



OMVS
Organisation pour la
Mise en Valeur du
fleuve Sénégal



P.O.G.R.
PROGRAMME D'OPTIMISATION DE LA GESTION DES
RESERVOIRS

FAISABILITE DE LA MODELISATION PLUIE DEBIT

AUTEURS : JP LAMAGAT, JC BADER, H LUBES

JUILLET 1999

MISSION FRANÇAISE DE COOPERATION

RAPPEL DES TERMES DE REFERENCES DE PHASE II

Les termes de références de Phase II contiennent le paragraphe qui suit, fixant la réalisation d'un système de prévision.

Prévision des apports

2.1. Modèle pluie débit

Cette partie a pour objectif la prévision des débits aux stations amont (Oualia, Fadougou) grâce aux observations des précipitations. Elle inclut donc le choix et l'installation de stations d'observations pluviométriques télétransmises, et l'élaboration d'algorithmes de prévision. On vérifiera la qualité et la pertinence de cette technique de prévision des débits amont avant d'engager les investissements correspondants (mode d'acquisition et télétransmission).

- *recueil des informations et données pluviométriques journalières auprès des services de météorologie nationaux ,*
- *analyse des corrélations entre ces pluies et les débits observés : modèles pluie / débit virtuel ,*
- *sélection des stations les plus efficaces pour la prévision de débit. Choix d'un réseau de mesure pluviométriques assurant une sécurité (perte de précision acceptable ~10% en cas de panne de 25% des stations) ,*
- *développement d'un module de prévision des débits à partir des données aux stations retenues (modèle de type DPFT).*

Au tout début de la Phase II, les données pluviométriques ont été assemblées et critiquées. Un chercheur spécialiste de la modélisation « pluie-débit » a été chargé de cette étude (Hélène Lubès – Ingénieur de recherches).

L'analyse menée a donné des résultats négatifs qui sont présentés en **annexe A**.

La prévision pluie débit doit servir de critère pour le démarrage des lâchés du barrage de Manantali. Il doit être bien compris que cette prévision doit être fiable et apporter un « plus » au système en place.

Les résultats de l'analyse contenue dans l'annexe A sont clairs :

Il n'est pas possible, avec les observations disponibles, de calibrer un modèle pluie – débit suffisamment fiable pour qu'il permette d'améliorer la connaissance de la date de démarrage des lâchers du barrage de Manantali.

En l'état actuel, la prévision que l'on pourrait réaliser n'apporterait pas une fiabilité suffisante pour être opérationnelle. C'est pourquoi, à la lumière des résultats présentés en annexe A, l'IRD a conseillé l'abandon de la prévision pluie-débit, et qu'il a été recherché une solution de remplacement afin d'obtenir un résultat aussi équivalent que possible dans le domaine de l'économie de l'eau.

Il a été proposé par un des participants au Comité de Suivi de chiffrer le coût de l'installation de stations pouvant à terme servir de base à une modélisation de type hydro-pluviométrique.

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

Création d'un réseau d'observation pluviométrique

L'installation de nouvelles stations et leur suivi, variante proposée par l'un des participant au Comité de Suivi, attire les remarques suivantes :

- Les sous bassins sont au nombre de 4, Falémé, Bakoye, Baoulé, Bafing.
- Un système minimal doit comprendre 3 ou 4 stations par sous bassin.
- Pour le calage du modèle, il faut raisonnablement compter 10 à 15 ans d'observations journalières (dans le cas présent).

Coût :

Installation et suivi pendant 10 ans				
Actions	nombre	unité	prix unit. (10 ⁶ cfa)	Total (10 ⁶ cfa)
Equipement				
Station pluvio OEDIPE	13		5,0	65,0
Station de réception	1		20	20,0
Fonctionnement				
Entretien (Tournée 4000 km - 2 personnes- 15 jours)	4 x 10 ans	forfait	3	120
Pièces détachées (10%)	13 x 10		0,5	65,0
Observateurs	13 x 10 ans		0,2	26
Abonnement ARGOS	130	station/an	0,6	78
Station de réception	10 ans x 8%	station/an	20,0	16
Imprévus (10%)				39
TOTAL				429

Ce montant est approximatif mais fixe le montant des dépenses à engager sans tenir compte du personnel. Il s'agit uniquement du fonctionnement.

A la suite de l'échec de la tentative de modélisation deux domaines ont été explorés, une crue à date fixe et la possibilité de disposer d'une prévision à quatre mois des indices pluviométriques par le projet MEDIAS France.

Dans un premier temps, les conséquences de l'impossibilité de faire une prévision à 10 jours ont été examinés. Une note est présentée en annexe B. Elle est résumée dans ce qui suit.

1. CONSEQUENCES PREVISIBLES SUR LA PRODUCTION D'ENERGIE DUES A L'ABSENCE DE PREVISION A 10 JOURS

Résumé de l'annexe B

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

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

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

Dans le cas où le soutien de crue à date mobile ne pourrait pas être mis en pratique, le soutien de crue à date fixe sera retenu. Il doit être calé sur une date optimale nécessitant les plus faibles débits lâchés possible à partir du barrage. Pour un hydrogramme ORSTOM1, considéré comme objectif de crue à réaliser à Bakel, la date optimale du premier jour de palier (2500 m³/s) se situe le 28 août sur la période 1973-1997. C'est pour cette date que les volumes lâchés dans la tranche des débits supérieurs à 600 m³/s (jamais turbinables) sont les plus faibles.

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

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

- respect d'un débits réservé de 50 m³/s à la sortie du barrage et à Bakel
- fourniture d'eau pour l'irrigation de 100.000 ha de culture, augmentée de 50 m³/s, et préservation d'un stock suffisant pour garantir la possibilité de presque toujours satisfaire cette demande.
- production de 90 MW d'électricité quand le niveau du lac dépasse un seuil de turbinage noté S_{turb}
- soutien de crue pour réaliser un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel, avec le premier jour de palier (2500 m³/s) fixé au 28 août. Le soutien de crue n'est déclenché que pour les années présentant dans le lac au 20 août, une cote supérieure à un seuil de soutien S_{sout} .

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

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

2. NOTE SUR LE SOUTIEN DE CRUE A DATE FIXE SUR LE FLEUVE SENEGAL – ANNEXE C

Résumé de l'annexe C

Le principe du soutien de crue optimisé qui était envisagé jusqu'à présent est rappelé. Il visait à faire coïncider au mieux, dans un but d'économie d'eau, le sommet de l'hydrogramme objectif avec une pointe de débit provenant des affluents non contrôlés Bakoye et Falémé.

Les modèles hydro-pluviométriques de prévision de débit testés sur le Bakoye et la Falémé, montrent pour l'heure des performances insuffisantes pour permettre d'envisager la mise en œuvre de ce type de gestion pour l'année 1998.

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

3. PROJET MEDIAS FRANCE – ANNEXE D

Résumé de l'annexe D

Le projet Médias France a pour objectif la prévision des pluviométries mensuelles avec un délai de quatre mois. Cette prévision saisonnière est basée sur l'évolution de la température des océans. La méthode, testée sur une période de 15 ans a montré des performances tout à fait intéressantes. L'annexe D décrit le projet qui doit être soumis à la Communauté Européenne pour un financement en fin d'année 1999.

La déclaration de l'annexe D réunit des équipes qui ont l'intention de développer en commun des outils de prévision qui permettent aux agriculteurs et aux gestionnaires de l'eau d'élaborer des stratégies de lutte contre les effets de la variabilité climatique dans un milieu aussi fragile que celui de l'Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement celui du Sahel. Ces équipes comptent aussi vérifier la pertinence de ces prévisions en les comparant avec les valeurs réellement observées sur le terrain.

Si cette déclaration d'intention était acceptée par le Comité Scientifique Français sur la Désertification, des propositions précises seront faites pour mener à bien un tel projet, avec la répartition des tâches entre les équipes, le calendrier des travaux et les produits attendus.

L'OMVS doit être invitée à participer à ce projet. L'Organisation pourra ainsi faire entendre sa voix et manifester ses besoins en matière de gestion de la ressource en eau du bassin du Sénégal.

4. COMPARAISON DES CRUES NATURELLES OBTENUES DANS LE SENEGAL A BAKEL, AVEC L'HYDROGRAMME OBJECTIF "ORSTOM1" – ANNEXE E

Résumé et conclusion de l'annexe E

Les simulations numériques présentées dans le manuel provisoire de gestion du barrage de Manantali, montrent qu'il existe une relation croissante entre la production moyenne d'énergie de l'ouvrage, et la fréquence R des crues faibles obtenues.

On ne connaît pas encore la fonction qui relie la superficie de terres inondées utilisables par les cultures de décrue, à la forme de l'hydrogramme obtenu à Bakel. On se contente donc pour le moment de classer comme crues faibles, celles dont l'hydrogramme est inférieur à l'hydrogramme objectif retenu. La comparaison porte sur les 38 premiers jours de ce dernier, qui correspondent à la montée, au palier et à la portion de descente située au dessus de 1000 m³/s .

La fréquence R des faibles crues du régime naturel du fleuve est examinée dans cette note, en tenant compte des décalages pouvant exister entre la date des crues et la date fixe optimale retenue pour le régime artificiel. Le but de cette analyse est de fournir une valeur de référence relative au régime naturel, à laquelle on pourra comparer les fréquences R de faibles crues obtenues en régime artificiel.

Si l'on retient l'hydrogramme "ORSTOM1" comme objectif et donc comme critère d'évaluation, on constate que le régime naturel du fleuve, intégralement reconstitué depuis 1987, présente 31 fois sur 100 une crue trop faible durant la période 1950-1998. Les années 80, très déficitaires, montrent une série de 7 années successives ayant connu des crues trop faibles (1981-1987).

ANNEXE A

GESTION DU BARRAGE DE MANANTALI PREVISION DES APPORTS DE LA FALEME ET DU BAKOYE

Prévision des apports de la Falémé à Fadougou

Le bassin versant de la Falémé à Fadougou couvre une superficie de 9300 km².

La station limnimétrique de Fadougou est située à l'aval de la confluence de la Koilabé avec la Falémé.

La crue annuelle s'étale généralement de juin à octobre. Elle correspond soit à une pointe unique, soit à deux voire trois pointes qui peuvent être du même ordre d'amplitude.

Les données disponibles utilisées dans la présente étude sont des débits journaliers postérieurs à 1970. Des données antérieures à 1970 sont accessibles mais étant donné la rupture significative mise en évidence sur les moyennes annuelles de pluie et de débit vers 1970, il est préférable d'établir des procédures de prévision sur une période jugée homogène qui s'étale donc de 1970 à 1989. Toutefois l'acquisition des données de la dernière décennie permettrait de confirmer ou non la persistance jusqu'à nos jours du comportement hydro-pluviométrique "déficitaire" initié autour des années 1970. Une reprise significative des précipitations se répercutant sur les débits au cours de ces dernières années impliquerait de situer les modèles de prévision dans un contexte "significativement humide" représenté par cette période récente. Ce fait concerne de même le bassin du Bakoye.

Des reconstitutions de crue ont été réalisées au moyen de la station de Gourbassi pour les années 1974, 1975, 1977, 1979, 1982 et 1983.

La prévision des débits à Fadougou aux échéances requises pour la gestion en temps réel du barrage de Manantali repose sur la prise en compte d'une information pluviométrique.

Les échéances de prévision sont les plus longues possibles (idéalement supérieures à 20 jours). Les prévisions les plus précises en amplitude sont attendues.

Les données de pluie disponibles au pas de temps journalier sur le bassin ou dans son voisinage "pluviométrique" sont celles des stations de Faléa, Tougue, Pita, Labé et Dabola.

Les essais de modélisation ont été réalisés à partir du poste de Faléa. La prise en compte des autres postes pluviométriques n'a pas conduit à améliorer les résultats. Des contraintes budgétaires devant être considérées en matière d'équipement de télétransmission des postes de prévision, la station pluviométrique de Faléa, même imparfaitement représentative des précipitations générant la crue de la Falémé, a été préférentiellement retenue pour l'étude en raison de sa position privilégiée sur le bassin étudié.

Les données pluviométriques de Faléa ne sont pas disponibles pour 1986 et 1987.

Afin de lisser les trop fortes variations qui affectent l'hydrogramme observé à Fadougou, la variable choisie caractéristique de la crue à Fadougou est le débit moyen sur 7 jours consécutifs noté Q_{J7} (débit moyen sur la période (J, J+6)).

La pointe de la crue définie chaque année par la valeur maximale de Q_{J7} est observée entre le 03/08 et le 28/09, ces deux dates correspondant respectivement soit à la première pointe soit à la dernière pointe de crue d'une année à crues multiples. La valeur médiane d'occurrence de la pointe de crue est le 23/08, la valeur moyenne est le 26/08.

Une corrélation significative a été mise en évidence entre les précipitations moyennes sur les 20 jours précédant le jour J à Faléa et Q_{J7} sur les montées de crue jusqu'au début des décrues.

Des essais de prévision ont donc été entrepris portant sur la variable Q_{J7} avec un délai de 7 jours avec pour variables explicatives la pluie moyenne à Faléa sur les 20 derniers jours (ou 30 derniers jours) précédant le jour d'émission de la prévision noté J et le débit moyen à Fadougou sur les 5 derniers jours précédant J. Le pourcentage de variance expliquée de l'ordre de 45% est insuffisant pour retenir un tel modèle.

Des tentatives similaires ont été faites en considérant non plus les débits mais les hauteurs d'eau enregistrées à Fadougou de façon à s'affranchir d'éventuelles erreurs qui pourraient être dues à l'estimation des débits. Cette approche a conduit à établir comme meilleur modèle, celui expliquant, avec un délai de prévision de 7 jours, la hauteur d'eau moyenne à Fadougou sur 7 jours (H_{J7}) à partir de la hauteur d'eau à Fadougou au jour J et de la pluie moyenne à Faléa sur les 30 derniers jours. La capacité explicative du modèle mesurée par le coefficient de détermination est de l'ordre de 60%.

Le critère de Nash (1-somme du carré des résidus rapportée à la somme du carré des écarts des valeurs observées par rapport à la moyenne), et les écarts quadratiques moyens (racine carrée de la moyenne des écarts au carré entre valeur observée et valeur prévue) calculés sur les échantillons de calage et de validation sont présentés ci-dessous :

	calage	validation
critère de Nash (en %)	60	82
écart quadratique moyen (cm)	82	104
écart quadratique moyen /moyenne des valeurs observées (en %)	39	40

Ces quelques critères numériques montrent que les performances du modèle ne se dégradent pas sur l'échantillon de test, le critère de Nash est même meilleur en validation.

Toutefois même si ce modèle paraît plus explicatif que le précédent, son aptitude à émettre une prévision correcte est faible. En effet la variable explicative la plus significative du modèle est la hauteur d'eau observée à Fadougou au jour d'émission de la prévision, ce qui réduit le modèle au transfert différé de ce signal observé faiblement "corrigé" par l'information pluviométrique. Il en résulte des décalages de l'ordre de 10 à 14 jours entre une même hauteur observée et prévue.

L'inapplicabilité en gestion opérationnelle de ce modèle a conduit à adopter une autre démarche. Il s'agit d'anticiper le plus tôt possible le débit de pointe de la crue.

Même si la position de la pointe de crue varie d'une année sur l'autre (écart-type autour de 8 jours), la montée significative de la crue semble engagée dès qu'un certain volume d'eau estimé à 50 millions de m^3 est passé en 10 jours à l'exutoire de la Falémé à Fadougou. Le jour J_0 désigne le premier jour où ce critère volumique est observé à Fadougou.

La prévision de la valeur maximale du débit moyen sur 7 jours à Fadougou est émise à partir de J_0 par le modèle suivant :

$$\hat{Q}_{\max J7} = -23.05 * J_0 + 5265$$

Le pourcentage de variance expliquée sur l'échantillon de calage est égal à 64%. L'écart quadratique moyen passe de 148 m^3/s sur l'échantillon de calage à 209 m^3/s en validation.

Le modèle ne peut être appliqué que si J_0 est antérieur au 238^{ème} jour de l'année.

Un deuxième modèle a été établi en prenant comme variable explicative supplémentaire la pluie cumulée à Faléa depuis le début de l'année civile jusqu'à J_0 : (P_{J_0} est exprimée en millions de m^3)

$$\hat{Q}_{\max J7} = -20.08 * J_0 - 0.0496 * P_{J_0} + 4854$$

Le pourcentage de variance expliquée sur l'échantillon de calage est égal à 68%. L'écart quadratique moyen passe de 138 m^3/s sur l'échantillon de calage à 211 m^3/s en validation.

L'information pluviométrique n'est pas significative dans le modèle et la première équation est seule à retenir.

Appliqué sur les dernières crues disponibles de 1991 et 1992 ce modèle conduit aux résultats suivants :

	valeur observée (m ³ /s)	valeur prévue (m ³ /s)
1991	491	563
1992	397	678

La qualité du modèle est médiocre et laisse présager des erreurs de prévision significatives.

Cette démarche conduit à anticiper la pointe de crue dès le jour J0, ce qui correspond à une échéance variant de 6 à 47 jours.

Remarque : en 1983 J0 est postérieur au 238ème jour de l'année ce qui rend le modèle inapplicable.

Le même type d'essai de modélisation a été entrepris en considérant le débit moyen sur 30 jours autour de la pointe à Fadougou.

Les modèles établis à partir des mêmes variables explicatives que précédemment sont les suivants :

$$\hat{Q}_{\max J30} = -12.51 * J0 + 2889$$

$$\hat{Q}_{\max J30} = -10.52 * J0 - 0.0332 * P_{J0} + 2614$$

Les critères d'appréciation sont les suivants :

Modèle fonction de J0 :

	calage	validation
écart quadratique moyen (m ³ /s)	92	119

Modèle fonction de J0 et P_{J0} :

	calage	validation
écart quadratique moyen (m ³ /s)	85	104

Les pourcentages de variance expliquée sont respectivement de 57% (modèle fonction de J0) et 63% (modèle fonction de J0 et P_{J0}).

La variable P_{J0} n'est pas statistiquement significative dans le modèle (application du test t sur le coefficient de régression).

Appliqué sur les dernières crues disponibles de 1991 et 1992 le modèle fonction de J0 conduit aux résultats suivants :

	valeur observée (m ³ /s)	valeur prévue (m ³ /s)
1991	294	338
1992	188	400

La qualité du modèle reste médiocre en prévision.

L'information pluviométrique apportée par le poste de Faléa n'a pas été jugée significative pour la prévision sur la Falémé à Fadougou.

Prévision des apports du Bakoye à Diangola

Le bassin versant du Bakoye à Diangola couvre une superficie de 12100 km². Les caractéristiques des crues sont sensiblement les mêmes que sur la Falémé à Fadougou même si les deux tributaires ne réagissent pas absolument en phase.

Les données disponibles à Diangola sont les hauteurs d'eau. Aucune information de débit n'est disponible. Les hauteurs ont dû être reconstituées à partir des données de la station de Toukouto située en aval pour plusieurs années (de 1976 à 1983).

L'information pluviométrique est apportée par le poste de Sirakoro situé sur le bassin.

Le premier modèle établi prévoit avec un délai de 10 jours la hauteur moyenne sur 7 jours à Diangola notée $H_{J7/10}$. Cette prévision fait intervenir la hauteur moyenne observée à Diangola les 5 derniers jours précédant le jour J d'émission de la prévision notée H_{J5} et la pluie moyenne sur les 30 derniers jours précédant le jour J à Sirakoro notée P_{30} .

Le modèle est mis en œuvre dès que la hauteur moyenne sur 7 jours observée à Diangola devient supérieure à zéro.

Le modèle s'écrit :

$$\hat{H}_{J7/10} = 0.594 * H_{J5} + 1.367 * P_{30} + 24.16$$

Le pourcentage de variance expliquée est égal à 79%.

En l'absence d'information pluviométrique un modèle dégradé fonction uniquement de H_{J5} a été calé :

$$\hat{H}_{J7/10} = 0.857 * H_{J5} + 56.97$$

Le pourcentage de variance expliquée est alors égal à 76%.

Malgré le faible écart constaté entre les deux coefficients de détermination, la variable P_{30} du modèle complet est du point de vue statistique significative dans la régression (application du test t sur le coefficient de régression).

Les écarts quadratiques moyens obtenus avec le modèle complet en calage et en validation sont respectivement égaux à 89 cm et 85 cm, ce qui constitue une mesure relativement bonne de la qualité explicative du modèle. Il faut désormais tester son aptitude à apporter une information utile dans le processus de gestion opérationnelle.

Un deuxième modèle a été établi en retenant comme variable explicative la hauteur moyenne sur les 30 jours suivant le jour J d'émission de la prévision à Diangola notée H_{J30} . Ce modèle retient les mêmes variables explicatives que le précédent, et s'écrit :

$$\hat{H}_{J30} = 0.498 * H_{J5} + 1.546 * P_{30} + 32.9$$

Le pourcentage de variance expliquée par le modèle est égal à 79%. Les écarts quadratiques moyens obtenus en calage et en validation sont respectivement égaux à 79 cm et 73 cm.

Les performances du modèle sur des crues de validation quoique globalement acceptables, comme en témoigne l'écart quadratique moyen, sont variables d'une crue à l'autre.

ANNEXE B

NOTE SUR L'EVENTUELLE IMPOSSIBILITE DE FAIRE UNE PREVISION DE DEBIT A 10 JOURS SUR LE BAKOYE ET LA FALEME. CONSEQUENCES PREVISIBLES SUR LE PRODUCTIBLE ENERGETIQUE DU BARRAGE DE MANANTALI.

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

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

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

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

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

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

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

- respect d'un débit réservé de 50 m³/s à la sortie du barrage et à Bakel
- laminage des pointes de crue à 4500 m³/s à Bakel
- fourniture d'eau nécessaire pour l'irrigation de 100.000 ha de cultures (suivant les hypothèses des études de Gibb concernant ces besoins), augmentée de 30 m³/s pour la compensation des pertes et de 20 m³/s pour la consommation humaine
- préservation d'un stock suffisant dans le lac, permettant de garantir le respect de la précédente consigne au moins 24 années sur 25.
- Production de 90 MW d'électricité (ou du maximum productible quand le barrage déverse) si le niveau du lac dépasse la cote 182 m, considérée comme seuil de turbinage. En dessous de ce seuil, cette consigne n'est pas prise en compte.
- soutien de crue visant à réaliser un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

4.1. Principe

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

Dans le cas où se confirmerait l'impossibilité de prévoir les débits à l'horizon 10 jours sur le Bakoye et la Falémé, il apparaît donc nécessaire d'envisager un soutien de crue à date fixe optimale qui ne sera pas réalisé de façon systématique chaque année, si l'on veut ne pas trop perdre sur le plan de la production d'électricité. Une première solution consiste à faire le soutien de crue suivant une périodicité fixée, qui offre l'avantage de savoir à l'avance pour quelles années le soutien sera réalisé. Suivant ce scénario, il est

possible qu'un soutien de crue puisse être enclenché même si le stock dans le lac est très faible, ceci risquant alors d'aboutir à un épuisement de la réserve. Il paraît donc préférable d'envisager une seconde solution, qui consiste à déclencher le soutien de crue si, et seulement si, la réserve dans le lac dépasse au moment du déclenchement, un certain seuil fixé à l'avance. Plus ce seuil de soutien de crue sera bas, plus le soutien de crue sera déclenché fréquemment.

4.2. Simulations numériques

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

- respect d'un débit réservé de 50 m³/s à la sortie du barrage et à Bakel
- fourniture d'eau nécessaire pour l'irrigation de 100.000 ha de cultures (suivant les hypothèses des études de Gibb concernant ces besoins), augmentée de 30 m³/s pour la compensation des pertes et de 20 m³/s pour la consommation humaine
- préservation d'un stock suffisant dans le lac, permettant de garantir le respect de la précédente consigne au moins 24 années sur 25 (statistiques établies sur la période 1970-1997).
- production de 90 MW d'électricité (ou du maximum productible quand le barrage déverse) si le niveau du lac dépasse un seuil de turbinage S_{turb} fixé à l'avance. En dessous de ce seuil, cette consigne n'est pas prise en compte.
- soutien de crue visant à réaliser à date fixe un hydrogramme de type "ORSTOM1" à Bakel. La règle adoptée pour le déclenchement annuel du soutien est la suivante : si la cote du lac dépasse au 20 août un seuil de soutien S_{sout} fixé à l'avance, alors le soutien de crue est réalisé de façon à caler sur le 28 août à Bakel, le premier jour de palier de débit à 2500 m³/s. Dans le cas contraire, cette consigne n'est plus prise en compte jusqu'à la fin de l'année, et le soutien de crue n'est pas réalisé.

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

4.3. Résultats obtenus

4.3.1. Critère de bonne crue

La règle adoptée pour le déclenchement du soutien de crue, aboutit certaines années à l'absence de soutien. Pour l'ensemble des scénarios simulés, ces années sans soutien (répertoriées dans les tableaux 1 à 3) aboutissent, hormis l'année 1988, à un hydrogramme situé très largement en dessous de l'hydrogramme ORSTOM1, et sans aucune efficacité pour les cultures de décrue. Par ailleurs, la règle concernant la préservation de stock pour l'irrigation peut entraîner dans certains cas un arrêt du soutien avant terme, bien que celui-ci ait été déclenché. Dans les tableaux 1 à 3, on a répertorié les années pour lesquelles un soutien de crue a été réalisé de façon très incomplète. On considère qu'un soutien de crue a été réalisé de façon satisfaisante si l'hydrogramme obtenu à Bakel est bien supérieur ou égal à l'hydrogramme ORSTOM1 pendant la montée, le palier, et la partie de la descente concernant les débits supérieurs à 1300 m³/s.

4.3.2. Crues obtenues en régime naturel

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

- 7 années (70 ; 71 ; 74 ; 75 ; 88 ; 94 ; 95) donnent une crue supérieure à l'hydrogramme ORSTOM1.
- 11 années (72 ; 76 ; 77 ; 79 ; 82 ; 83 ; 84 ; 87 ; 90 ; 92 ; 93) donnent une crue bien inférieure à l'hydrogramme ORSTOM1 non calé en temps, avec un déficit moyen dépassant 200 m³/s par rapport à cet hydrogramme.
- 10 années donnent un hydrogramme dont l'efficacité vis à vis des cultures de décrue est probablement assez proche de celle de l'hydrogramme ORSTOM1.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ANNEXE C

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

Rappel sur le principe du soutien de crue à date mobile proposé par l'ORSTOM

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

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

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

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

Problème posé par la prévision des débits à Oualia et Gourbassy

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

Considérations sur la date du soutien de crue

On adopte les notations suivantes :

$Q_{\text{Bakel}}(j)$	débit passant à Bakel le jour j
$Q_{\text{Oualia}}(j)$	débit passant à Oualia le jour j
$Q_{\text{Gourbassy}}(j)$	débit passant à Gourbassy le jour j
$Q_{\text{Manantali}}(j)$	débit lâché du barrage le jour j

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

En première approximation, on peut considérer que le débit passé à Bakel au jour j est égal à la somme des débits passés à Oualia, Gourbassy et Manantali au jour j-3, et des débits correspondant aux apports intermédiaires collectés entre ces trois stations et Bakel :

$$Q_{\text{Bakel}}(j) = Q_{\text{Oualia}}(j-3) + Q_{\text{Gourbassy}}(j-3) + Q_{\text{Manantali}}(j-3) + Q_{\text{intermédiaire}}(j)$$

Le débit à lâcher du barrage pour réaliser l'hydrogramme objectif calé sur le jour j_0 vaut donc:

$$Q_{\text{Manantali}}(j-3) = \max \{ 0, [Q_{\text{ORSTOM}}(j, j_0) - Q_{\text{Oualia}}(j-3) - Q_{\text{Gourbassy}}(j-3) - Q_{\text{intermédiaire}}(j)] \}$$

Chaque année, le volume d'eau dépensé du barrage au dessus du débit S pour réaliser l'hydrogramme objectif calé sur le jour j_0 , peut alors être estimé par :

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

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

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

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

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

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

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

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

Les valeurs de volume dépensé D et gaspillé G ont été analysées sur l'ensemble des crues des années 1973 à 1997. Deux valeurs de seuil S ont été prises en compte pour cette analyse. Avec $S=0$, on s'intéresse à la totalité des volumes lâchés du barrage pour réaliser le soutien de crue. Avec $S=600$ m³/s, on s'intéresse à la part des volumes lâchés qui en aucun cas ne pourraient être turbinés. En effet, le débit maximum turbinable, envisageable dans les plus mauvaises conditions de chute, est légèrement inférieur à 600 m³/s pour les spécifications de turbines indiquées dans les rapports de 1987 du bureau d'étude Gibb & Partners.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Conclusion sur la date de soutien de crue

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

Si l'on souhaite limiter au maximum les lâchers d'eau effectués pour le soutien de crue, il convient de fixer au 22 août la date du premier jour de palier à 2500 m^3/s à Bakel. Cette solution entraîne un gaspillage d'eau limité entre 0 et 449 millions de mètres cube selon les années, avec une moyenne de 135, par rapport au calage mobile optimal. Selon les années, le volume d'eau dépensé pour un tel soutien de crue varie entre 671 et 5795 millions de mètres cube, avec une moyenne de 4005.

Si l'on souhaite limiter au maximum les lâchers d'eau non turbinée effectués pour le soutien de crue, il convient de fixer au 28 août la date du premier jour de palier à 2500 m^3/s à Bakel. Cette solution entraîne un gaspillage d'eau non turbinée limité entre 0 et 496 millions de mètres cube selon les années, avec une

moyenne de 157, par rapport au calage mobile optimal. Selon les années, le volume d'eau non turbinée dépensé pour un tel soutien de crue varie entre 9 et 3401 millions de mètres cube, avec une moyenne de 2028.

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

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

Critères proposés pour la prise de décision du soutien de crue

Considérations sur l'opportunité de soutenir la crue chaque année

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

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

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

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

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

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

- Au moment du déclenchement du soutien de crue, qui se situe environ 8 jours avant la date j_0 , seule une prévision assez précise et à suffisamment long terme sur le Bakoye et la Falémé permettrait d'avoir une estimation du volume à dépenser pour le soutien de crue de l'année en cours. Comme nous l'avons vu

plus haut, nos recherches se poursuivent sur les modèles de prévision hydro-pluviométriques nécessaires, mais les résultats obtenus pour le moment sont insuffisants, et ne nous permettent pas encore d'envisager cette solution.

- Il ne semble pas judicieux de s'intéresser au volume d'eau à dépenser pour le soutien de crue, sans le comparer au volume d'eau disponible dans la retenue. Il pourrait en effet arriver certaines années où, le niveau de départ étant très bas dans le lac, il serait préférable de ne pas faire le soutien de crue même si celui-ci ne demande qu'une dépense moyenne de volume. Inversement, un soutien de crue nécessitant une grosse dépense de volume pourrait fort bien être envisagé les années où le niveau de départ est très haut dans le lac.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- supérieur à 6647 10⁶ m³ (cote 196,71) avec deux chances sur trois
- inférieur à 9023 10⁶ m³ (cote 202,96) également avec deux chances sur trois

Si le soutien de crue est suivi d'un soutien d'étiage à 200 m³/s, alors la répartition des stockages annuels nets donne des valeurs de -392 et -2970 millions de mètres cube pour les probabilités 0,333 et 0,667 respectivement. Le soutien de crue déclenché à partir de la cote 198 aboutira donc dans ce cas, au 19 août de l'année suivante, à un stock :

- Supérieur à 4090 10⁶ m³ (cote 188,72) avec deux chances sur trois.
- Inférieur à 6668 10⁶ m³ (cote 196,77) également avec deux chances sur trois.

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

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

Conclusion

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

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

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

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

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

ANNEXE D

APPEL D'OFFRE « DESERTIFICATION »

DECLARATION D'INTENTION

Titre du projet: Utilisation des prévisions de pluies saisonnières par les agriculteurs et les gestionnaires des aménagements hydro - agricoles en Afrique de l'Ouest pour mieux lutter contre les effets de la désertification

Référence à l'appel d'offre: Axe 3, point 2 (évaluation, adaptation et diffusion de technologies de lutte contre la désertification: utilisation des prévisions météorologiques)

Cadre géographique: Afrique de l'Ouest

Thématique de recherche: variabilité du climat, prévision des pluies, des écoulements et des rendements de mil

Priorités nationales et régionale: première priorité pour la sécurité alimentaire et la gestion durable des ressources naturelles

Partenaires proposés: ACMAD, AGRHYMET, CIRAD, MEDIAS-France, METEO-France, IRD

Introduction

De nombreuses études font ressortir clairement la gravité du problème de la variabilité intra- et inter-annuelle des précipitations en Afrique de l'Ouest. Plusieurs domaines d'activité présentent une grande vulnérabilité à cette variabilité climatique en Afrique de l'Ouest. Les plus sensibles sont la sécurité alimentaire et la gestion des ressources naturelles, et plus particulièrement la gestion des ressources en eau.

La sécurité alimentaire

L'agriculture est l'employeur le plus important en Afrique de l'Ouest, et, de toutes les activités humaines, l'agriculture est le plus dépendant du climat. La variabilité du climat a été, et continue d'être, la principale source de variation de la production alimentaire en Afrique de l'Ouest. A travers l'histoire, les événements extrêmes du climat ont provoqué des désastres sur les systèmes agraires en l'Afrique de l'Ouest. Aussi, en conjonction avec les autres facteurs physiques, sociaux et politico - économiques, la variabilité du climat contribue à la vulnérabilité du développement économique, à la famine et à l'exode rural. Dans les deux dernières décennies, les taux de croissance de production de céréales dans certains pays de l'Afrique de l'Ouest sont bien inférieurs aux taux de croissance démographique. La disponibilité moyenne en calories exprimée en pourcentage du minimum requis est inférieure à 100 dans la plupart des pays, ce qui caractérise bien l'insécurité alimentaire de la région. La sous-nutrition chronique est supposée s'accroître en Afrique de l'Ouest dans les deux prochaines décennies si des actions ne sont pas entreprises pour résoudre le problème. Dans le domaine de la sécurité alimentaire, les prévisions climatiques pourraient contribuer de façon significative à améliorer la production agricole, la conservation des récoltes, le déplacement des populations, la transhumance du bétail et le transport des céréales des régions de production excédentaire aux régions déficitaires.

Les ressources naturelles

Les ressources naturelles constituent le deuxième secteur sensible à la variabilité climatique. La déforestation, la surexploitation des sols et la dégradation des terres constituent des priorités dans ce domaine. Les usagers ont besoin de prévisions à moyen et long termes pour gérer correctement les forêts, pour utiliser rationnellement et durablement les ressources naturelles, ainsi que pour la stabilisation des

populations en milieu rural afin d'éviter un exode trop rapide vers les zones urbaines. Enfin, l'utilisation des prévisions saisonnières des précipitations dans les modèles hydrologiques des grands bassins de l'Afrique de l'Ouest permettra de mieux gérer les aménagements hydro-agricoles (barrages de Sélingué sur le fleuve Niger, et de Manantali sur le fleuve Sénégal, par exemple) de la région.

Les programmes internationaux de l'Organisation Météorologique Mondiale (en particulier le programme CLIVAR: Climate Variability and Predictability Study du Programme Mondial de Recherche sur le Climat, et CLIPS: Climate Information and Prediction Service), ainsi que l'atelier "Prévision de la variabilité climatiques, ressources en eau et production agricole: sécurité alimentaire en Afrique sub-saharienne " organisé par START/IGBP et l'ORSTOM à Cotonou en juillet 1997 et le Forum PRESAO-1 (Prévisions saisonnière en Afrique de l'Ouest) organisé à Abidjan (mai 1998) par l'ACMAD et l'AGRHYMET, ont mis en évidence les progrès de la recherche dans ces domaines, et l'intérêt pour les agriculteurs et les gestionnaires des ressources naturelles de tirer partie de ces progrès.

Contributions proposées par les partenaires du projet

A. Contributions proposées par Météo-France en météorologie

La connaissance des lois physiques qui régissent l'atmosphère et la possibilité d'utiliser des calculateurs puissants pour simuler l'évolution de celle-ci ont conduit depuis une trentaine d'années les météorologistes à développer des modèles pour la prévision du temps à courte (48h) puis moyenne (7 jours) échéance. On s'est vite rendu compte qu'un tel outil ne pouvait et ne pourrait prévoir la chronologie des événements météorologiques au-delà de 10-20 jours.

La prévision saisonnière s'appuie sur les mêmes outils, mais poursuit un autre but. Les années se suivent et ne se ressemblent pas, en particulier en ce qui concerne la température des océans tropicaux. Or cette température évolue lentement dans le temps: pendant une saison, elle reste pratiquement constante à grande échelle, du fait de l'importante inertie thermique des masses d'eau. D'autre part, ces températures conditionnent de façon non négligeable la distribution des précipitations le long de la ceinture intertropicale.

A Météo-France a été développée depuis une dizaine d'années une version du modèle de prévision ARPEGE spécifiquement pour la prévision saisonnière. Lors du projet international PROVOST, soutenu par la Commission Européenne, il a été démontré que ce modèle était capable de prévoir les précipitations moyennes pour la saison à venir. Sur une période de 15 ans (1979-1993), le taux de succès était significativement supérieur à celui d'une prévision purement aléatoire, démontrant ainsi le potentiel prédictif d'une telle approche. Les trois autres modèles participant au projet PROVOST ont fourni des scores similaires aux nôtres, ce qui démontre à la fois que ces scores sont statistiquement stables, et que le modèle de Météo-France est au niveau de l'état de l'art international. Cependant, cela ne veut pas dire que les prévisions s'avèrent exactes dans tous les cas, ni que l'on prévoie des phénomènes à l'échelle intra-saisonnière ou intra-régionale. Le problème de l'utilisation et de l'utilité d'une telle approche pour faire face aux aléas des précipitations dans les régions semi-arides comme le Sahel est posé mais n'est pas pour autant résolu.

Une étude de faisabilité semi-opérationnelle a été menée lors du projet ELMASIFA, soutenu par la Commission Européenne, qui a associé Météo-France, Médias-France, et les services météorologiques du Maghreb.

Il s'est agi pour la période 1996-97 de fournir tous les mois des indices de précipitations pour les quatre mois suivants sur des zones préalablement définies en Afrique du Nord. Ces prévisions ont été régulièrement transmises pour évaluation aux services gouvernementaux des trois pays maghrébins chargés de l'agriculture et de l'hydrologie. Même si deux années sont notoirement insuffisantes pour établir des statistiques fiables, ces services ont trouvé un intérêt certain dans les prévisions. A l'issue du projet, le service météorologique marocain a pris en charge de manière opérationnelle la production et la diffusion des prévisions.

Comme on l'a dit plus haut, les régions tropicales sont plus sensibles aux anomalies de température de surface de la mer, et donc potentiellement plus prévisibles. Les régions sahéliennes, plus encore que l'Afrique du Nord, dépendent de la pluviosité de la saison estivale pour la production alimentaire. Le fait d'avoir une indication (mais pas une certitude) de ce que va être la saison des pluies à venir permet de

définir des stratégies meilleures que d'autres en matière d'hydrologie et d'agronomie. Pour évaluer la meilleure forme à donner à l'information météorologique, ainsi que le bénéfice que l'on peut en attendre, deux approches complémentaires sont à mettre en œuvre. Une réprévision sur une longue période (50 ans) permet de faire une évaluation fiable. Une prévision en temps réel sur la durée du projet (3 ans) permet de mobiliser les acteurs et de régler les problèmes pratiques qui se poseront si une telle méthode doit devenir opérationnelle par la suite.

La prévision météorologique est le premier maillon d'une chaîne qui aboutit à la prise de décision. Cette prévision ne tient pas compte en effet des caractéristiques géographiques et humaines de l'endroit où elle sera appliquée. Deux types d'informations peuvent être fournis. Le premier est un indice de précipitation sur une échelle de -2 à 2, où 0 représente une situation normale, -2 une situation extrêmement sèche, et 2 une situation extrêmement humide. Une telle approche a été utilisée dans ELMASIFA. Le deuxième, rendue possible par une simulation récente de la période 1950-1998 avec le modèle de Météo-France, est une liste de 10 années les plus probables au cours de ce demi-siècle. Cette deuxième méthode d'analogues requiert que l'utilisateur dispose de séries de données hydrologiques ou agronomiques sur cette période, tandis que la première demande la disponibilité de données climatologiques locales. Les deux méthodes ci-dessus permettent à chaque utilisateur de particulariser la prévision à sa région, en partant d'une seule prévision de grande échelle produite ailleurs.

B. Contribution proposée par l'ORSTOM en hydrologie

1. Objectifs

La contribution de l'ORSTOM vise à évaluer comment, et avec quelle précision, les prévisions d'indices pluviométriques mensuelles peuvent être utilisées dans le domaine de la gestion des ressources en eau, par le biais de scénarios d'écoulements. Deux étapes sont nécessaires pour cela:

1. transformer les indices pluviométriques mensuels dérivés des sorties d'ARPEGE en lames d'eau au sol, à des échelles pertinentes pour être utilisés en entrée des modèles hydrologiques;
2. fournir des prévisions d'écoulement pour un certain nombre de bassins représentatifs de la diversité des situations hydro-climatiques rencontrées en Afrique de l'Ouest.

2. Démarche proposée

a) Elaboration des prévisions de précipitation

Elle comporte deux volets:

- ❑ établir une climatologie régionale adaptée permettant de transformer les indices pluviométriques ARPEGE en précipitations mensuelles. On s'appuiera pour cela sur la base de données pluviométriques journalières développée par l'ORSTOM, en partenariat avec les Directions Météorologiques Nationales de différents pays d'Afrique de l'Ouest. Cette banque couvre l'ensemble des pays d'Afrique de l'Ouest francophone et une partie des pays anglophones depuis l'origine des stations jusqu'en 1993 et doit, à terme, être implantée à l'ACMAD pour pouvoir être actualisée régulièrement;
- ❑ mettre au point et valider un modèle de désagrégation permettant de passer des précipitations mensuelles sur des mailles de 250x250 km² à des précipitations à l'échelle du système convectif sur des mailles de quelques dizaines de km².

Ce second point constituera un effort majeur, nécessitant le développement d'un outil spécifique. Il s'agira en effet d'adapter et de combiner les modèles développés par Le Barbé et Lebel (1997a), d'une part (modélisation régionale des régimes pluviométriques) et par Lebel et al. (1997), d'autre part (désagrégation des champs de cumuls associés aux systèmes convectifs de méso-échelle). La validation de ce modèle combiné se fera à la fois à l'échelle régionale (banque de données mentionnée ci-dessus) et à la méso-échelle (banque de données EPSAT-Niger, voir Lebel et al., 1995, et D'Amato et Lebel, 1997). Les sorties du modèle seront des scénarios gradués en probabilité et destinés à être utilisés comme entrées des modèles hydrologiques.

b) Elaboration des prévisions d'écoulement

L'intérêt de disposer de prévisions de précipitations à l'échelle du mois (du mois à plusieurs mois) est particulièrement important sur les bassins versants qui présentent des temps de réaction assez longs, et sur les bassins soit situés à l'amont d'aménagements soit mis en culture pour lesquels une gestion prévisionnelle à long terme est souhaitable. Nous pensons donc mettre en œuvre une démarche modélisatrice sur des bassins versants dont la superficie varie de l'ordre du millier de km² à environ 50 000 km². Deux types de modélisation conceptuelle seront utilisés, compte tenu des surfaces de bassin considérées.

3. Références:

D'Amato, N. and T. Lebel, 1997: On the characteristics of the rainfall events in the sahel with a view to the analysis of climatic variability. International Journal of Climatology, 18, 955-974.

Kouamé B., 1992: Adéquation de différents modèles globaux pluie-débit pour déterminer les apports en eau dans les zones de transition et de forêt de la Côte d'Ivoire. Essai de régionalisation des paramètres. Thèse de Doctorat, Université Montpellier II.

Le Barbé L. and T. Lebel, 1997: Rainfall climatology of the HAPEX-Sahel region during the years 1950-1990. J. of Hydrol., 188-189, 47-73.

Lebel, T., J.D. Taupin and M. Gréurd, 1995: Rainfall monitoring: The EPSAT-Niger set-up and its use for Hapex-Sahel. in T. Lebel (Ed), Hydrologie et Météorologie de Mésos-Echelle dans HAPEX-Sahel: Dispositif de Mesures au Sol et Premiers Résultats, ORSTOM Ed, Paris, 31-68.

Lebel, T., I. Braud and J.-D. Creutin, 1997: A space-time rainfall disaggregation model adapted to sahelian mesoscale convective complexes. Water Resour. Res., 34, 1711-1726.

C. Contribution proposée par le CIRAD en agronomie

1. Cadre actuel de l'estimation de rendement

En collaboration avec le Centre Régional AGRHYMET, le CIRAD a développé un logiciel (Diagnostic Hydrique des Cultures, DHC), basé sur l'application des connaissances acquises en matière d'alimentation en eau et son interaction avec la production finale des cultures en zone soudano - sahélienne. Les techniques informatiques actuelles fournissent des premiers indicateurs de production un à deux mois avant les récoltes en appliquant des modèles déterministes qui explicitent les mécanismes de fonctionnement du continuum sol-eau-plante-atmosphère et leur effet sur la production agricole. La détermination du rendement en milieu paysan utilise l'estimation (par simulation du bilan hydrique) de l'évapotranspiration réelle des cultures en tant que flux productif. De nombreux résultats de recherches ont montré que cette variable permet d'expliquer 70 à 90 % de la variabilité des rendements des céréales en région sahélienne.

Sous sa forme spatialisée, le logiciel DHC CP utilise des données d'entrée satellitaires pour l'estimation en temps réel des champs pluviométriques, dont l'acquisition au sol pose de nombreux problèmes logistiques et de communication. Pour chaque pixel, des simulations réalistes sont effectuées tout au long de la campagne agricole. A partir du temps réel « t », des simulations à caractère probabiliste sont effectuées sur des fichiers historiques, lesquels sont créés par un générateur de pluies journalières assis sur des données historiques enregistrées. On peut alors analyser en termes stochastiques le devenir probable de la campagne agricole. Un ajustement (fonction liant indicateurs hydriques et rendement attendu) traduit en termes de rendements associés à un niveau de probabilité la fin de campagne attendue.

2. Apports de la prévision saisonnière de pluie

Les simulations effectuées actuellement (DHC CP) sur la fin de campagne partent de l'hypothèse que la variabilité de la fin de saison des pluies est représentée par celle qui a été enregistrée historiquement. On ne fait donc pas d'hypothèse sur la fin de campagne. Le fait de disposer de prévision saisonnière pour les mois à venir change les données du problème. Il devient en effet possible de modifier (selon le schéma prévisionnel retenu par les méthodes élaborées par les autres partenaires du projet) la structure attendue de la variabilité des pluies en fin de campagne, et donc de prendre en compte ce gain d'information dans les paramètres du générateur de pluie qui caractérisera la fin de campagne attendue.

Le programme de recherche visera à mettre au point les méthodes statistiques permettant la prise en compte opérationnelle de la prévision saisonnière de pluie dans la méthode DHC CP précédemment décrite, et de mesurer les effets de cette prise en compte sur la qualité des prévisions de rendement émises.

3. Programme de travail

Pour réaliser le travail, en coordination avec l'ensemble des partenaires du projet, il est envisagé que le CIRAD et le Centre AGRHYMET travaillent en étroite collaboration:

- ❑ pour l'élaboration d'un cahier des charges,
- ❑ pour la traduction de l'effet de la prévision saisonnière sur la modification des paramètres du générateur de pluies,
- ❑ pour le couplage de la méthode retenue sur le logiciel existant,
- ❑ pour l'analyse de sensibilité des rendements prévus à la modification des paramètres issus de la prévision saisonnière,
- ❑ pour la validation a posteriori de la méthode d'ensemble sur les rendements prévus et observés.

4. Bibliographie:

Samba, A., 1998, AGRHYMET: « Prévision des rendements de mil en zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest: Utilisation d'un logiciel de Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC) ». West African Regional Climate Outlook Forum, 4-8 mai 1998, Abidjan.

AGRHYMET / CIRAD, 1996: «Modèle stochastique générateur de pluies journalières couplé au modèle de diagnostic hydrique des cultures champs pluviométriques ». Rapport de synthèse. Bourneuf, Goze, Forest, Maraux Girard, Pagnoux

D. Contribution envisagée par l'ACMAD et de l'AGRUYMET pour la validation des prévisions

Les problèmes météorologiques et climatiques sont ressentis à une échelle régionale, comme c'est le cas de la sécheresse des zones sahéliennes. Dans le cas des systèmes d'alerte précoce, l'introduction de la prévision à l'échelle mensuelle et saisonnière peut apporter un réel avantage en terme d'augmentation très significative du niveau de préparation pour les stratégies de parade. A cette échelle, la prévision météorologique devient un véritable outil de gestion du risque.

Le 4^{ème} plan à long terme de l'OMM appelle à une application encore plus effective de l'information météorologique pour le développement en général et souligne la nécessité en particulier "de maintenir et de développer les institutions régionales telles que le Centre ACMAD et AGRHYMET". Le Comité Inter Etats de Lutte contre la Sécheresse au Sahel (CILSS) s'est organisé pour gérer les problèmes de la sécurité alimentaire avec son institution spécialisée, le Centre AGRHYMET de Niamey. Un partenariat fort est établi entre l'ACMAD et le Centre AGRHYMET pour tester l'utilité des prévisions météorologiques et climatologiques. L'intérêt de répondre à ce besoin est double: d'une part il permet de bénéficier de l'accumulation des connaissances scientifiques en météorologie, en hydrologie et en agronomie et de la disponibilité des jeux de données existants sur la question, et, d'autre part, il offre un terrain d'expérimentation pratique unique puisque les besoins sont bien identifiés et les voies d'utilisation des produits finaux tous tracés permet de tracer assez facilement le contour des compétences à mobiliser.

Dans le cadre de ce partenariat, l'ACMAD et l'AGRHYMET envisagent de participer, en liaison avec les services nationaux de météorologie, d'hydrologie et d'agronomie des pays de l'Afrique de l'Ouest, à la validation des prévisions de pluie, d'écoulement et de rendement de mil, par le recueil auprès de ces services comme auprès des utilisateurs directs de ces prévisions (gestionnaires des aménagements hydrauliques et hydro-agricoles, associations d'agriculteurs, ...) des informations sur:

- ❑ les bénéfices que ces utilisateurs auront pu tirer de ces prévisions;
- ❑ les améliorations à apporter à la diffusion et à la présentation de ces prévisions.

Références:

Samba, A., 1998, AGRHYMET: « Prévision des rendements de mil en zone sahélienne de l'Afrique de l'Ouest: Utilisation d'un logiciel de Diagnostic Hydrique des Cultures (DHC) ». West African Regional Climate Outlook Forum, 48 mai 1998, Abidjan.

Amani, A., 1: Lebel, J. Rousselle and ~D. Taupin, 1996: Typology of Rainfall Fields to Improve Rainfall Estimation in the Sahel by the area threshold method. WaterResour. Res, 32, 8, 2473-2487

Amani, A. and T. Lebel, 1997: Lagrangian Kriging for the Estimation of Sahelian Rainfall at small time steps J. Hydrol., 192, 125-157

Amani, A. and T. Lebel, 1998: Relationship between point rainfall, average sampled rainfall and ground truth at the event scale in the Sahel. Stoch Hydrol. And Hydraulics, (In press).

E. Contribution de MEDIAS-France

MEDIAS-France:

- ❑ fournit les compétences, l'équipement et les capacités d'animation et de coordination nécessaires à l'exécution du projet, avec en particulier l'aide à la constitution des bases de données météorologiques, hydrologiques et agronomiques, en collaboration étroite avec tous les partenaires,
- ❑ participe à l'organisation des réunions de concertation entre les partenaires et des ateliers de présentation des résultats obtenus durant le projet.

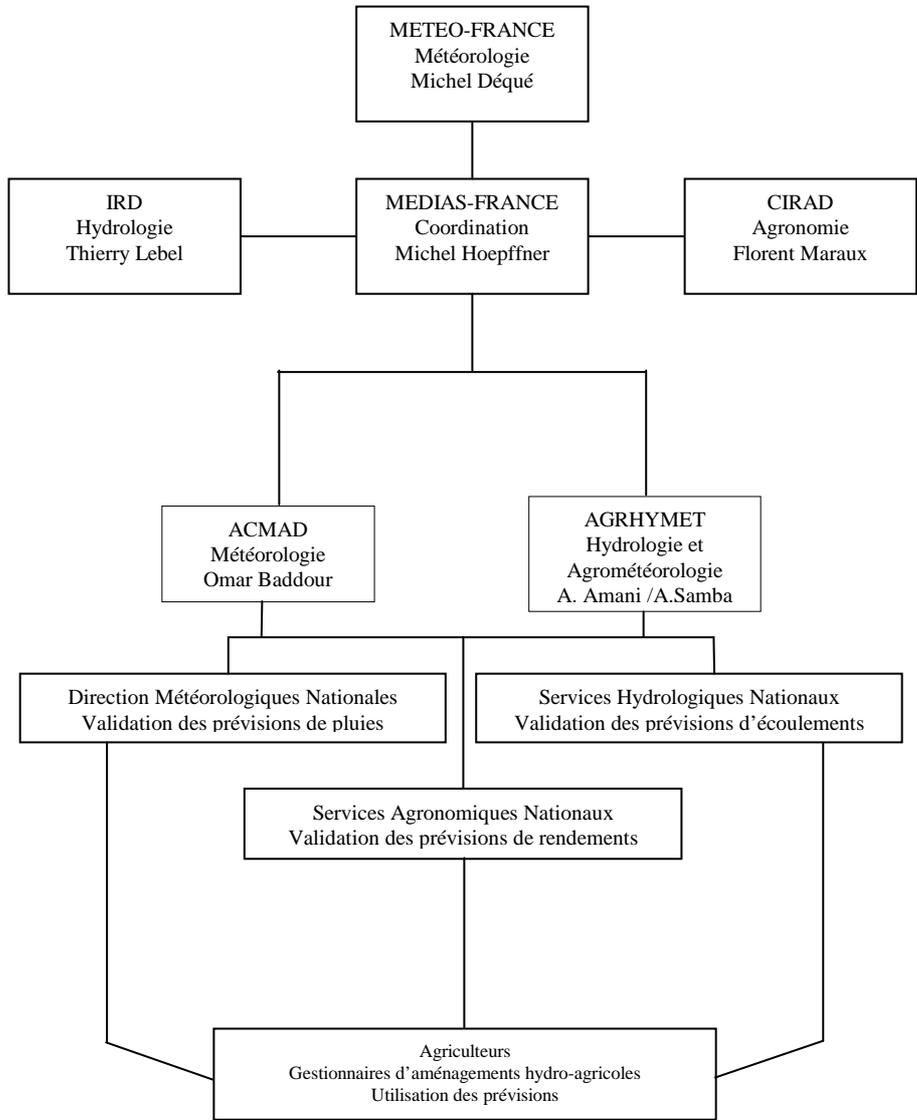
Référence:

Hoepffner, M., 1998: « Impacts des prévisions à long terme en Afrique de l'Ouest sur la gestion des ressources en eau et la production agricole ». West African Regional Climate Outlook Forum, 48 mai 1998, Abidjan.

Conclusion

Cette déclaration réunit des équipes qui ont l'intention de développer en commun des outils de prévision qui permettent aux agriculteurs et aux gestionnaires de l'eau d'élaborer des stratégies de lutte contre les effets de la variabilité climatique dans un milieu aussi fragile que celui de l'Afrique de l'Ouest, et plus particulièrement celui du Sahel. Ces équipes comptent aussi vérifier la pertinence de ces prévisions en les comparant avec les valeurs réellement observées sur le terrain.

Si cette déclaration d'intention était acceptée par le Comité Scientifique Français sur la Désertification, des propositions précises seront faites pour mener à bien un tel projet, avec la répartition des tâches entre les équipes, le calendrier des travaux et les produits attendus.



ANNEXE E

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

Contexte

Le soutien des crues du fleuve Sénégal consiste à lâcher suffisamment d'eau du barrage de Manantali pour obtenir, à Bakel, un débit supérieur ou égal à un hydrogramme objectif prédéfini. Les résultats de simulation numérique présentés en avril 1999 dans le manuel provisoire des consignes de gestion de l'ouvrage, montrent qu'une réalisation très fréquente (presque chaque année) de l'hydrogramme objectif entraînerait une faible production moyenne d'énergie. Au contraire, une forte production pourrait être obtenue au prix de crues assez fréquemment inférieures à l'hydrogramme objectif. Entre ces deux extrêmes, toute une gamme de résultats intermédiaires peut être envisagée, en ajustant certains paramètres de gestion de façon adéquate. Les pays riverains du fleuve devront donc se mettre d'accord pour adopter un dosage entre les objectifs de production d'énergie et de soutien de crue. Parmi les éléments qui pourront guider leur choix, il semble que la nature des crues obtenues en régime naturel constitue une référence importante. Cette note en propose donc une analyse.

Objectif

Tant pour le régime artificiel que pour le régime naturel, la variabilité des crues entraîne chaque année une valeur différente de la superficie potentiellement utilisable par les cultures de décrue. La fonction de répartition des superficies obtenues doit constituer, pour un régime donné, un assez bon indicateur de la qualité de ce dernier vis à vis des cultures de décrue. Malheureusement, cet indicateur ne peut être utilisé ici, du fait qu'on n'est pas encore en mesure de traduire la forme de l'hydrogramme de crue obtenu à Bakel, en superficie potentiellement utilisable par les cultures de décrue. Les études nécessaires, actuellement en cours, n'ont pas encore donné leurs résultats.

On en est donc réduit pour le moment à faire une classification simple des crues obtenues à Bakel, en comptabilisant celles qui sont supérieures ou égales à l'hydrogramme objectif, et celles qui lui sont inférieures. C'est ce travail qui a déjà été fait dans le chapitre 3 du manuel provisoire des règles de gestion, pour des scénarios de gestion envisageant l'hydrogramme 'ORSTOM1' comme objectif de crue. Le but de cette note consiste à établir une telle classification pour les crues du régime naturel.

Méthode

Hydrogrammes de crue du Sénégal à Bakel en régime naturel

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

- Première méthode : par modèle de propagation de crue de type JPL, à partir des débits naturels de Soukoutali (reconstitués avant 1967 et après 1983, à partir des stations de Makana et Daka Saidou, par modèle JPL), Oualia et Gourbassy.
- Deuxième méthode : par bilan de volume écoulé, à partir des débits observés à Bakel et à la sortie du barrage, et du débit naturel à Soukoutali. On adopte un temps de propagation constant de 3 jours entre Manantali et Bakel :

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

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

Comparaison des hydrogrammes avec l'hydrogramme objectif 'ORSTOM1'

On rappelle que l'hydrogramme 'ORSTOM1' est défini par des débits variant de façon linéaire entre les points suivants, pour le Sénégal à Bakel : 0 m³/s le 1^{er} jour ; 2500 m³/s le 7^{ème} jour ; 2500 m³/s le 12^{ème}

jour ; $0 \text{ m}^3/\text{s}$ le 56^{ème} jour. En régime artificiel, les scénarios retenus envisagent tous la date du 22 août pour le 1^{er} jour de cet hydrogramme. Cette date est celle qui entraîne en moyenne un minimum de volume dépensé à partir de Manantali pour réaliser le soutien de crue.

Pour les scénarios de régime artificiel testés dans le manuel provisoire, on a considéré qu'une crue était supérieure à l'objectif si une partie de son hydrogramme se situait au dessus des 38 premiers jours de l'hydrogramme "ORSTOM1". Cela signifie que les débits obtenus doivent être supérieurs à la montée de ce dernier, ainsi qu'à son palier et à la partie de sa descente située au dessus de $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Du fait que le soutien de crue, les années où il est déclenché, force les débits de Bakel à suivre l'objectif à date fixe, la classification des crues obtenues peut être faite sans ambiguïté de façon graphique.

Pour évaluer l'importance des crues naturelles selon un critère identique, il faut tenir compte du fait que ces dernières peuvent survenir de façon décalée par rapport à la date fixe retenue pour le régime artificiel. On procède donc de la façon suivante :

Pour chaque jour j_0 situé entre le 1^{er} mai et le 1^{er} novembre, on calcule le déficit de débit écoulé par rapport aux 38 premiers jours de l'hydrogramme objectif, en calant le 1^{er} jour de ce dernier sur le jour j_0 :

$$V(j_0) = T * \sum_{j=j_0}^{j=j_0+38} \max(0; Q_0(j) - Q(j))$$

Les notations adoptées sont les suivantes :

$V(j_0)$ (m^3) : déficit d'écoulement par rapport à l'hydrogramme objectif calé sur le jour j_0

T (s) : temps écoulé en un jour

$Q_0(j)$ (m^3/s) : débit au jour j , de l'hydrogramme objectif calé sur le jour j_0

$Q(j)$ (m^3/s) : débit obtenu le jour j

Chaque année, la valeur minimale obtenue pour le déficit d'écoulement $V(j_0)$ permet de situer le jour J_0 à partir duquel l'hydrogramme obtenu présente le moindre déficit d'écoulement (V_{\min}) par rapport à l'hydrogramme objectif :

$$V_{\min} = V(J_0) = \min_{j_0=1er.mai}^{j_0=1er.novembre} (V(j_0))$$

Les années présentant un déficit V_{\min} nul sont naturellement classées parmi les crues supérieures à l'objectif. Pour les autres, le classement est effectué au vu des figures suivantes : la figure 1 représente l'hydrogramme obtenu, superposé sur l'hydrogramme objectif calé sur le jour J_0 . La figure 2 représente, pour l'hydrogramme naturel et l'hydrogramme objectif, les valeurs de débits caractéristiques de crue dépassés pendant N jours consécutifs, pour les valeurs suivantes de N : 1 ; 5 ; 10 ; 15 ; 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40 jours.

Résultats

Les valeurs obtenues pour le déficit V_{\min} relatif au régime naturel, sont données dans le tableau 1. On constate que sur les 49 années de la période 1950-1998, 27 années présentent, avec une valeur nulle de V_{\min} , une crue située au dessus de l'objectif. L'année 1989, avec un déficit très faible de 6 millions de m^3 , peut également être classée dans cette catégorie.

Les crues des 20 années restantes, avec un déficit nettement positif, peuvent être analysées à l'aide des figures 1 et 2. La figure 1 permet de constater que 10 crues naturelles se situent très largement en dessous de l'objectif. Ceci concerne les années suivantes : 1972, 1976, 1977, 1979, 1982, 1983, 1984, 1985, 1987 et 1990. Bien que de façon moins nette, les crues de 1978, 1986, 1992 et 1993 sont également moins bonnes que l'hydrogramme objectif, comme le confirme la figure 2. A l'inverse, on voit sur les deux figures que les crues de 1973, 1991 et 1997 sont meilleures que l'objectif. Reste le cas plus délicat des années 1968, 1980, 1981 et 1996.

En 1968, on peut penser que la durée trop faible des débits supérieurs à $2000 \text{ m}^3/\text{s}$ (fig. 2) est probablement compensée par la forte valeur dépassée pendant 5 jours. Cette pointe de crue plus brève mais plus élevée que celle de l'hydrogramme objectif provoque probablement une inondation aussi bonne que ce dernier. L'année 1968 sera donc classée parmi les bonnes crues.

Pour des raisons similaires, l'année 1980 pourra également être classée parmi les bonnes crues.

En 1981, la première pointe de crue atteint tout juste le débit souhaité, mais pendant un temps trop bref. Les deux autres pointes, trop éloignées et trop faibles, ne compensent probablement pas le déficit d'inondation. L'année 1981 peut donc être classée avec les crues trop faibles.

Enfin, malgré l'inconvénient de deux pointes nettement séparées, la crue de 1996 doit probablement provoquer une inondation aussi bonne que celle de l'hydrogramme objectif. Cette année peut donc être classée parmi les bonnes crues.

En conclusion, le nombre de crues de qualité supérieure ou égale à celle de l'hydrogramme ORSTOM1 s'élève à 32 sur les 49 années de la période 1950-1998. Celui des crues de moins bonne qualité (signalées en gras dans le tableau 1) s'élève à 15. En utilisant le même critère et la même notation que dans le manuel provisoire de gestion pour le régime artificiel, on peut donc dire qu'en régime naturel, les crues du fleuve Sénégal présentent une fréquence R de crues trop faibles égale à 0,31 entre 1950 et 1998.

année	Vmin	année	Vmin	année	Vmin	année	Vmin	année	Vmin
1950	0	1960	0	1970	0	1980	648	1990	1713
1951	0	1961	0	1971	0	1981	551	1991	88
1952	0	1962	0	1972	1808	1982	1046	1992	755
1953	0	1963	0	1973	115	1983	3183	1993	656
1954	0	1964	0	1974	0	1984	3393	1994	0
1955	0	1965	0	1975	0	1985	886	1995	0
1956	0	1966	0	1976	1409	1986	533	1996	168
1957	0	1967	0	1977	913	1987	2002	1997	45
1958	0	1968	436	1978	642	1988	0	1998	0
1959	0	1969	0	1979	1933	1989	6		

tableau 1 : valeur minimale annuelle (Vmin, en millions de m³), du déficit de volume écoulé V de la crue naturelle par rapport aux 38 premiers jours de l'hydrogramme objectif "ORSTOM1"

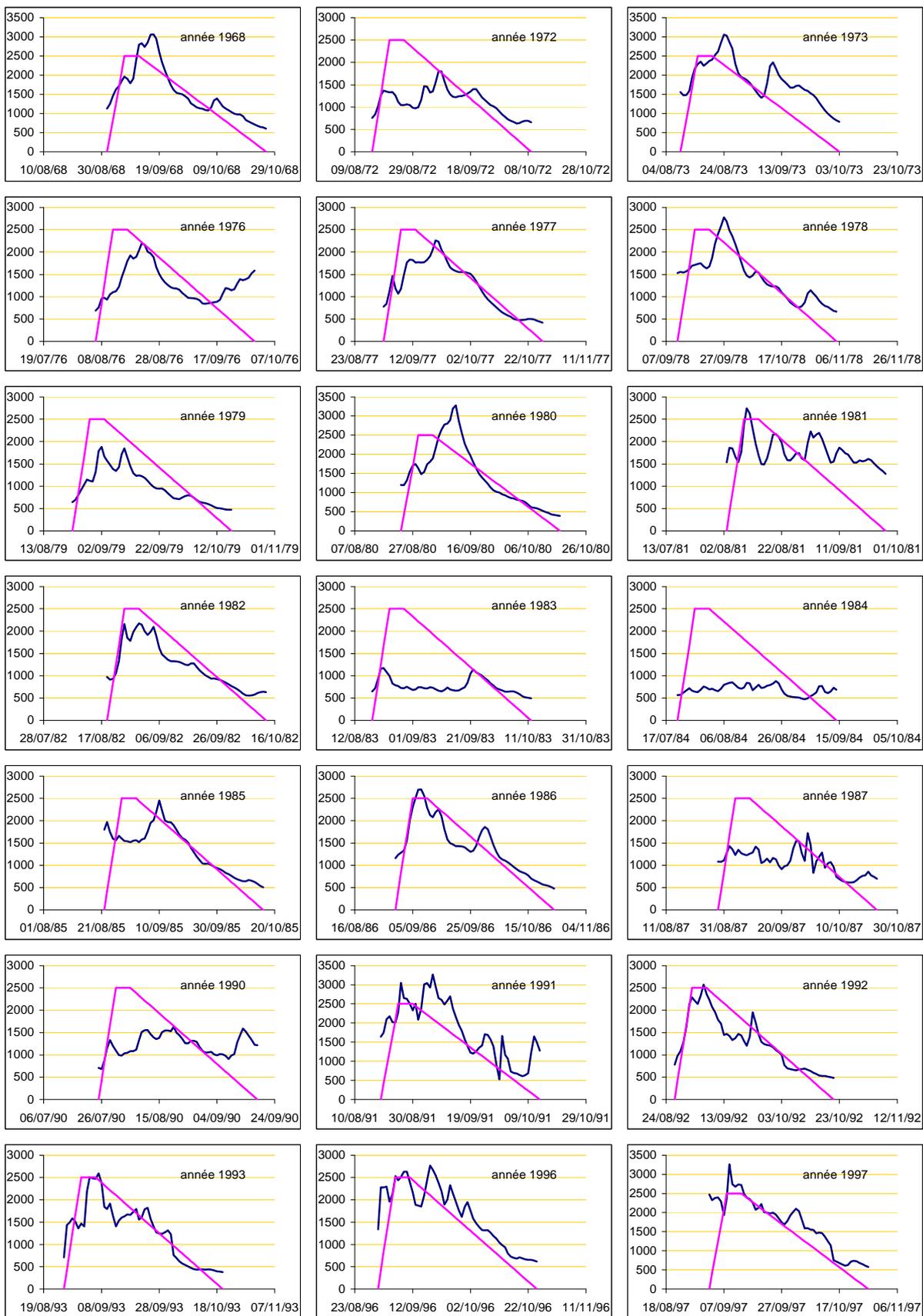
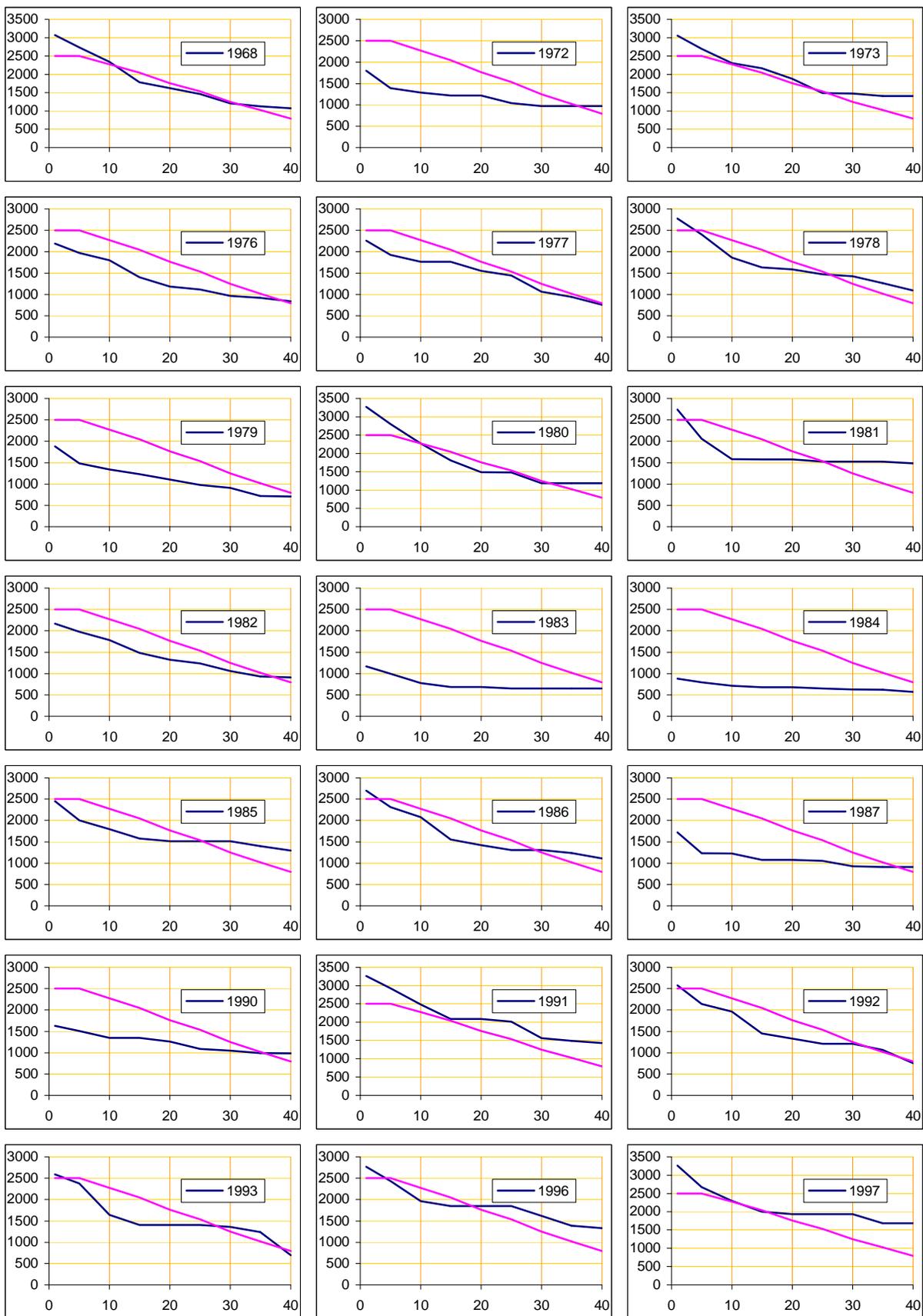


figure 1 : comparaison des hydrogrammes naturels du Sénégal à Bakel avec l'hydrogramme objectif "ORSTOM1", pour les années où la crue présente un déficit d'écoulement V_{min} non nul.



figure

2 : Débits caractéristiques de crue (m^3/s , en ordonnée) dépassés pendant N (en abscisse) jours consécutifs dans le Sénégal à Bakel, pour le régime naturel et l'hydrogramme objectif "ORSTOM1".