

11588



ÉTUDE HYDRO-AGRICOLE DU BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL

ORGANISATION DES ÉTATS RIVERAINS DU FLEUVE SÉNÉGAL : GUINÉE, MALI, MAURITANIE, SÉNÉGAL

ÉTUDE DE LA CRUE DE 1970
DE LA CRUE DE 1968
ET DES TROIS CRUES ARTIFICIELLES

Texte

SOGREAH
Ingénieurs Conseils
GRENOBLE - FRANCE
1972

AGL : SF/REG 61
Rapport technique 3

ETUDE HYDROAGRICOLE DU BASSIN DU FLEUVE SENEgal

ORGANISATION DES ETATS RIVERAINS DU FLEUVE SENEgal,
GUINEE, MALI, MAURITANIE, SENEgal

ETUDE DE LA CRUE DE 1970, DE LA CRUE DE 1968
ET DES TROIS CRUES ARTIFICIELLES

Rapport préparé pour l'organisation des Nations Unies

pour l'alimentation et l'agriculture

par

la Société Grenobloise d'Etudes et
d'Applications Hydrauliques (SOGREAH)

SOGREAH
Grenoble - 1972

Ce rapport technique fait partie d'une série de rapports préparés pendant le déroulement du projet UNDP/SF identifié sur la page du titre. Les conclusions et recommandations données dans le rapport sont celles qui sont considérées valables au moment de sa préparation. Elles peuvent être modifiées à la lumière de connaissances complémentaires obtenues durant les étapes postérieures du projet.

Les noms utilisés et la présentation des documents dans ce rapport (y compris les cartes 1/) n'impliquent pas l'expression de quelque opinion que ce soit de la part des Nations Unies ou de l'Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture ou des autres sous-contractants concernant les statuts légaux ou constitutionnels de quelque pays, territoire ou domaine marin que ce soient, ou concernant la délimitation des frontières.

- 1/ Qui doivent être comprises dans les documents contenant des cartes qui font apparaître des frontières nationales, des côtes ou des domaines marins.

Etude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal. Organisation des états rive-rains du fleuve Sénégal, Guinée, Mali, Mauritanie, Sénégal. Rapport sur l'étude de la crue de 1970, de la crue de 1968 et des trois crues artificielles, basé sur les études de SOGREAH - Grenoble - 1972 p. 39 1 carte - 3 figures - 58 graphiques AGL : SF/REG 61 - Rapport technique 3.

ABSTRACT

Dans le cadre de l'étude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal conduite par la F.A.O., cette dernière a confié à SOGREAH l'établissement d'un modèle mathématique permettant de reproduire la propagation des crues du Sénégal entre Gouina et Saint-Louis.

Le réglage du modèle achevé, la F.A.O. a demandé à SOGREAH d'étudier la crue de 1970 en tant que deuxième crue de contrôle du réglage du modèle et, ensuite, de la comparer à trois crues artificielles définies à Bakel. Ce travail réalisé, le "Projet" à Saint-Louis, pour compléter l'étude, a pensé qu'il serait intéressant d'exploiter la crue de 1968 qui a servi au réglage du modèle, la crue de 1968 étant une crue faible.

La comparaison a pour but de dégager les idées sur la forme de la crue artificielle qu'il faut imposer à l'entrée de la Vallée du Sénégal (Bakel) pour assurer dans de bonnes conditions le maintien de l'agriculture traditionnelle de décrue (les crues artificielles sont supposées être modulées par un ou plusieurs barrages accumulateurs construits sur le Bafing et la Falémé).

Les conclusions de l'étude actuelle sont alors les suivantes :

- le contrôle du réglage du modèle à l'aide de la crue de 1970 conduit à une précision moyenne un peu moins bonne que celles obtenues pour les autres crues. Ceci étant, on peut cependant dire que le modèle réglé permet de reproduire la propagation des crues dans des conditions acceptables qui donnent aux résultats acquis une bonne crédibilité ;
- l'étude des crues artificielles et leur comparaison avec les crues de 1968 et de 1970 conduit à penser qu'une crue artificielle, modulée à partir de barrages accumulateurs amont, représentant un volume de 14 à 15 milliards de m³ à Bakel, devrait être suffisante pour assurer le maintien de l'agriculture traditionnelle de décrue dans de bonnes conditions. Il n'en demeure pas moins que l'étude actuelle est très incomplète et qu'elle devra être poursuivie afin de définir le mode de fonctionnement des barrages et donc les volumes qui pourront être emmagasinés pour être restitués pendant l'étiage du fleuve.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
CHAPITRE I - EXPOSE DES RESULTATS PRINCIPAUX DE L'ETUDE	2
1. Présentation du chapitre	2
2. Objet de l'étude	2
3. Conclusions sur le passage de la crue de 1970	3
4. Conclusions sur la comparaison entre les crues de 1968 et de 1970 et les trois crues artificielles	4
CHAPITRE II - DEFINITION DES MODELES UTILISES - ANALYSE DE LA CRUE DE 1970 - CARACTERISTIQUES DES CRUES ARTIFICIELLES	7
1. Objet du chapitre	7
2. Les modèles utilisés	7
3. Définition de la crue de 1970	9
4. Définition des crues artificielles	10
CHAPITRE III - LA CRUE DE 1970 - ANALYSE DES RESULTATS	18
1. Introduction	18
2. Précision du modèle pour la crue de 1970	18
3. Ecart aux maxima de la crue de 1970	19
4. Analyse des résultats	20
5. Conclusion	21

CHAPITRE IV - LES CRUES DE 1968 ET DE 1970 ET LES CRUES ARTIFICIELLES	
ANALYSE DES RESULTATS	23
1. Objet de l'étude	23
2. Précision sur le découpage en régions du lit majeur	24
3. Comparaison sur les niveaux	25
4. Comparaison sur les débits	28
5. Comparaison sur les volumes	30
6. Comparaison sur les surfaces	34
7. Conclusion	38

LISTE DES FIGURES

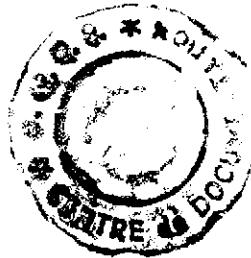
- Figure 1 : Schéma topologique du modèle maillé. Définition des régions.
- Figure 2 : Carte de la Vallée du Sénégal entre Bakel et le défluent du Doué. Définition des casiers, des régions et des unités agricoles naturelles.
- Figure 3 : Carte de la Vallée du Sénégal entre le défluent du Doué et Rosso. Définition des casiers, des régions et des unités agricoles naturelles.

LISTE DES GRAPHIQUES

- Graphique 1 : Limnigrammes de la crue de 1970 dans le Sénégal.
Graphique 2 : Limnigrammes de la crue de 1970 dans le delta.
Graphique 3 : Limnigrammes de la crue de 1970 dans le Doué.
Graphique 4 : Hydrogrammes de la crue de 1970 à Bakel, Kaédi, Dagana.
Graphique 5 : Limnigrammes de la crue artificielle 1 dans le Sénégal.
Graphique 6 : Limnigrammes de la crue artificielle 1 dans le delta.
Graphique 7 : Limnigrammes de la crue artificielle 1 dans le Doué.
Graphique 8 : Hydrogrammes de la crue artificielle à Bakel, Kaédi, Dagana.
Graphique 9 : Limnigrammes de la crue artificielle 2 dans le Sénégal.
Graphique 10 : Limnigrammes de la crue artificielle 2 dans le delta.
Graphique 11 : Limnigrammes de la crue artificielle 2 dans le Doué.
Graphique 12 : Hydrogrammes de la crue artificielle à Bakel, Kaédi, Dagana.
Graphique 13 : Limnigrammes de la crue artificielle 3 dans le Sénégal.
Graphique 14 : Limnigrammes de la crue artificielle 3 dans le delta.
Graphique 15 : Limnigrammes de la crue artificielle 3 dans le Doué.
Graphique 16 : Hydrogrammes de la crue artificielle 3 à Bakel, Kaédi, Dagana.
Graphique 17 : Courbes $V(t)$ dans la région WAOUN RDS
Graphique 18 : Courbes $V(t)$ dans la région MATAM RDS
Graphique 19 : Courbes $V(t)$ dans la région KAEDI RDS
Graphique 20 : Courbes $V(t)$ dans la région DIORB RDS
Graphique 21 : Courbes $V(t)$ dans la région SALDE RDS
Graphique 22 : Courbes $V(t)$ dans la région BOGHE RDS
Graphique 23 : Courbes $V(t)$ dans la région PDDOR RDS
Graphique 24 : Courbes $V(t)$ dans la région DAGANA RD
Graphique 25 : Courbes $V(t)$ dans la région ROSSO RDS

- Graphique 26 : Courbes V (t) dans la région WAOUN RGS
Graphique 27 : Courbes V (t) dans la région MATAM RGS
Graphique 28 : Courbes V (t) dans la région KAEDI RGS
Graphique 29 : Courbes V (t) dans la région DIORB RGS
Graphique 30 : Courbes V (t) dans la région NGoui RGD
Graphique 31 : Courbes V (t) dans la région GUEDE RGD
Graphique 32 : Courbes V (t) dans la région DAGANA RG
Graphique 33 : Courbes V (t) dans la région ILE AMONT
Graphique 34 : Courbes V (t) dans la région ILE CENTR
Graphique 35 : Courbes V (t) dans la région ILE AVAL
Graphique 36 : Limnigrammes de la crue de 1968 dans le Sénégal
Graphique 37 : Limnigrammes de la crue de 1968 dans le delta
Graphique 38 : Limnigrammes de la crue de 1968 dans le Doué
Graphique 39 : Hydrogrammes de la crue de 1968 à Bakel, Kaédi, Dagana
Graphique 40 : Surfaces inondées dans la région WAOUN RDS
Graphique 41 : Surfaces inondées dans la région MATAM RDS
Graphique 42 : Surfaces inondées dans la région KAEDI RDS
Graphique 43 : Surfaces inondées dans la région DIORB RDS
Graphique 44 : Surfaces inondées dans la région SALDE RDS
Graphique 45 : Surfaces inondées dans la région BOGHE RDS
Graphique 46 : Surfaces inondées dans la région PODOR RDS
Graphique 47 : Surfaces inondées dans la région DAGANA RD
Graphique 48 : Surfaces inondées dans la région ROSSO RDS
Graphique 49 : Surfaces inondées dans la région WAOUN RGS
Graphique 50 : Surfaces inondées dans la région MATAM RGS
Graphique 51 : Surfaces inondées dans la région KAEDI RGS
Graphique 52 : Surfaces inondées dans la région DIDRB RGS
Graphique 53 : Surfaces inondées dans la région NGoui RGD
Graphique 54 : Surfaces inondées dans la région GUEDE RGD
Graphique 55 : Surfaces inondées dans la région DAGANA RG
Graphique 56 : Surfaces inondées dans la région ILE AMONT
Graphique 57 : Surfaces inondées dans la région ILE CENTR
Graphique 58 : Surfaces inondées dans la région ILE AVAL

INTRODUCTION



L'objet du rapport est de présenter les résultats acquis après passage sur le modèle mathématique de la vallée du Sénégal de la crue de 1970 et de trois crues artificielles définies à Bakel par leurs limnigrammes ou hydrogrammes.

Le passage de la crue de 1970 correspond à un contrôle supplémentaire du réglage du modèle.

L'étude des crues artificielles doit permettre d'établir une comparaison avec les crues naturelles de 1968 et de 1970. La comparaison portera sur les niveaux, les débits dans le lit mineur, les volumes transitant dans le lit majeur et les surfaces inondées en fonction du temps. Le but final est de pouvoir obtenir une idée valable sur la forme de la crue modulée qu'il faudra imposer à Bakel pour assurer le maintien de l'agriculture de décrue tout en économisant au maximum les ressources en eau.

Le présent rapport comporte les chapitres suivants :

- Chapitre I : Rappel des résultats de l'étude
- Chapitre II : Définition des modèles utilisés. Analyse de la crue de 1970. Caractéristiques des crues artificielles.
- Chapitre III : La crue de 1970. Analyse des résultats.
- Chapitre IV : Les crues de 1968 et de 1970 et les crues artificielles. Analyse des résultats.

Chapitre I

EXPOSE DES RESULTATS PRINCIPAUX DE L'ETUDE

1. PRESENTATION DU CHAPITRE

Ce chapitre est consacré à la présentation sommaire des principaux résultats de l'étude qui fait l'objet du présent rapport.

Dans un premier temps nous rappellerons l'objet de l'étude et, ensuite, donnerons les résultats concernant le passage de la crue de 1970 en tant que deuxième crue de contrôle (la crue de 1969 étant la première) et la comparaison entre les crues de 1968, 1970 et les trois crues artificielles qui ont été définies à partir du limnigramme observé en 1970 à Bakel.

2. OBJET DE L'ETUDE

L'étude actuelle comporte deux parties.

La première doit permettre un contrôle supplémentaire de la validité du réglage du modèle mathématique de la vallée du Sénégal. Pour ce faire, nous allons prendre la crue de 1970 comme deuxième crue de contrôle, la crue de 1969 ayant été la première.

La deuxième partie a pour objet de comparer les crues de 1968 et de 1970 à trois crues artificielles définies à Bakel. Le "Projet" en a éprouvé la nécessité car la crue de 1970 est une crue médiane dans l'échantillon des crues observées à Bakel depuis 1903. La crue de 1968 n'est venue, dans l'étude, qu'ensuite, car il fallait, compte tenu des résultats donnés par les crues artificielles, ajouter des éléments naturels de comparaison pour choisir correctement le type de crue artificielle à imposer à Bakel.

Il faut, en effet, que la crue imposée à Bakel permette le maintien de l'agriculture de décrue dans des conditions satisfaisantes mais, aussi, que l'on retienne un volume maximal dans le ou les barrages accumulateurs situés sur le Bafing et la Falémé.

3. CONCLUSIONS SUR LE PASSAGE DE LA CRUE DE 1970

La crue de 1970 passe sur le modèle complet Gouina - Saint-Louis. Dans le tableau suivant nous donnons :

- la précision du calcul en chaque station après avoir écarté les lectures erronées ou non utilisables. Ce dernier cas intéresse les stations aval qui sont sous l'influence de la marée et pour lesquelles, en juillet comme en novembre et décembre, il existe des incompatibilités dans les observations de niveaux. Rappelons que la précision moyenne est obtenue par division de la somme des écarts journaliers par le nombre de jours où des observations utilisables existent ;
- les niveaux maximaux observés $Z_{\max N}$;
- les niveaux calculés $Z_{\max C}$;
- les écarts entre ces niveaux maximaux :

$$\Delta Z = Z_{\max C} - Z_{\max N}$$

Stations	Précision (m)	$Z_{\max N}$ (I.G.N.)	$Z_{\max C}$ (I.G.N.)	ΔZ (m)
Félou aval	0,10	29,29	29,30	+ 0,01
Kayes	0,09	28,46	28,48	+ 0,02
Ambidédi	0,20	25,47	25,50	+ 0,03
Bakel	0,17	20,86	20,77	- 0,09
Waoundé	0,19		17,70	
Matam	0,21	14,33	14,36	+ 0,03
Kaédi	0,16	11,54	11,59	+ 0,05
Saldé	0,27	10,11	10,08	- 0,03
N'Goui	0,17	9,91	10,00	+ 0,09
Boghé	0,245	7,76	7,68	- 0,08
Podor	0,13	4,88	4,88	0
Dagana	0,15	2,99	3,17	+ 0,18
Richard-Toll	0,09	2,52	2,66	+ 0,14
Rosso	0,17	2,47	2,50	+ 0,03

L'examen des résultats portés dans ce tableau et des graphiques 1, 2 et 3 conduit aux conclusions principales suivantes :

- la précision moyenne sur les 14 stations est égale à 0,166 m, soit une valeur un peu supérieure à celles obtenues pour les autres crues, 1964 excepté où la précision moyenne est très bonne,
- les écarts sur les niveaux maximaux sont corrects à l'exception des stations de Dagana et Richard-Toll où ils dépassent 0,10 m (0,18 et 0,14 m respectivement).
- On retrouve un ensemble de phénomènes déjà observés avec les autres crues :
 - Variations observées à Bakel en juillet et non reproduites par le modèle (crue de 1966).
 - Décrues calculées trop hautes en novembre et décembre à partir de Bakel (crue de 1968).
 - Montées de l'onde de crue en aval de Bakel plus rapides, le décalage moyen étant de deux jours (ces montées plus rapides se retrouvent à presque toutes les crues avec des décalages plus ou moins grands selon les années et les gammes de niveaux concernées).
 - Effet du réglage moyen des seuils de communication entre les lits mineurs et le lit majeur.
 - Mauvaise reproduction des niveaux en juillet et décembre aux stations placées sous l'influence de la marée.

On peut cependant admettre que le résultat d'ensemble est acceptable compte tenu de la qualité des données de crue introduites dans le modèle et du fait que le modèle mathématique de la Vallée du Sénégal représente un état physique moyen qui ne peut s'adapter parfaitement à chaque crue qui possède des caractères propres et bien spécifiques.

4. CONCLUSIONS SUR LA COMPARAISON ENTRE LES CRUES DE 1968 ET DE 1970 ET LES TROIS CRUES ARTIFICIELLES

La comparaison a porté sur :

- les niveaux maximaux calculés aux stations limnimétriques du fleuve et les niveaux dépassés 15 et 30 jours en ces mêmes lieux,
- les débits maximaux et ceux dépassés 15 et 30 jours à Bakel, Kaédi et Dagana,

- les volumes maximaux instantanés dans les 19 régions du lit majeur et les volumes ayant transité dans le lit mineur à Bakel, Kaédi et Dagana,
- les surfaces maximales inondées et les surfaces submergées pendant 15, 30 et 45 jours dans ces mêmes régions.

Les conclusions essentielles de l'étude sont alors :

- la crue artificielle 1 est équivalente à la crue de 1970 sur presque tous les éléments de comparaison et elle lui est même supérieure dans la partie aval car le soutien du maximum à Bakel pendant 45 j évite un aplatissement de l'onde de crue au cours de sa propagation ;
- la crue artificielle 2 est inférieure à la crue de 1970 sur les différents points de comparaison. Cependant, les résultats montrent que, moyennant un aménagement du limnigramme à Bakel, on devrait parvenir à des résultats intéressants en économisant, par rapport à la crue de 1970 et à la crue artificielle 1, un volume non négligeable ;
- la crue artificielle 3 est nettement insuffisante, le but recherché : maintien de l'agriculture de décrue, ne pouvant en aucune manière être atteint ;
- la crue de 1968, d'un volume équivalent à celui de la crue artificielle 2 à Bakel, donne des résultats d'ensemble inférieurs à la crue artificielle 2 et se rapproche même, en aval de la Vallée, de la crue artificielle 3. Ceci montre combien la forme du limnigramme ou de l'hydrogramme qui sera réglé à Bakel aura de l'importance sur ce qui se passera en aval et donc sur le maintien dans des conditions correctes ou non de l'agriculture de décrue.

Ceci dit, la conclusion est la suivante : une crue modulée d'une puissance un peu supérieure à la crue artificielle 2 (14 à 15 milliards de m³ à Bakel pour 12,75 milliards de m³ pour la crue artificielle 2) peut être suffisante pour assurer le maintien d'une agriculture de décrue correcte. Il faut cependant définir la forme du limnigramme ou de l'hydrogramme à Bakel qui évite l'affaiblissement de l'onde de crue observé en aval de Boghé avec la crue artificielle 2. Il semble donc que, dans une phase ultérieure, il sera nécessaire de reprendre les études de manière à voir comment, en fonction du ou des barrages construits et des apports des affluents non aménagés, on pourra respecter à Bakel la forme de la crue désirée.

La méthode la plus simple paraît, à ce stade de l'étude, de prolonger le modèle actuel jusqu'aux barrages projetés et de procéder à un

Chapitre II

DEFINITION DES MODELES UTILISES ANALYSE DE LA CRUE DE 1970 CARACTERISTIQUES DES CRUES ARTIFICIELLES

1. OBJET DU CHAPITRE

Le réglage du modèle mathématique de la Vallée du Sénégal étant achevé et ayant fait l'objet du Rapport Technique 1 et du Rapport R 10 582, ce chapitre a pour objet de donner en quelques lignes les caractéristiques des modèles utilisés et de définir les crues étudiées. Ces crues sont d'une part la crue de 1970 pour laquelle nous procéderons à une analyse des données et, d'autre part, trois crues artificielles définies à Bakel en fonction des caractéristiques de la crue de 1970.

Pour la crue de 1968, nous renvoyons au rapport SOGREAH R 10 582 dans lequel elle a été définie.

2. LES MODELES UTILISES

2.1 RAPPEL SUCCINCT DES ETUDES ANTERIEURES

La première phase des études confiées par la F.A.O. à SOGREAH consistait en la constitution et le réglage d'un modèle mathématique de la Vallée du Sénégal s'étendant de Gouina à Saint-Louis et susceptible de reproduire la propagation des crues du Sénégal avec une précision acceptable. Cette phase achevée, le modèle, support physique des calculs de crues, doit donner au Projet des éléments permettant de juger de l'influence des aménagements hydroagricoles projetés dans la vallée ou des

aménagements situés dans le haut-bassin sur les débits, les niveaux, les volumes transitant dans le lit majeur et les surfaces inondées en fonction du temps.

Le modèle étant à présent un moyen permettant de répondre à certaines questions du "Projet", il a cependant paru intéressant de vérifier encore une fois la validité du réglage, étant bien entendu qu'il ne s'agit pas de le poursuivre mais simplement de le contrôler. Le passage de la crue de 1970 sur le modèle correspond donc à un seul calcul.

2.2 MODELES UTILISES

La crue de 1970 et les crues artificielles étant de natures différentes, nous utiliserons :

- pour la crue naturelle, le modèle allant de Gouina à Saint-Louis,
- pour les crues artificielles, un modèle allant de Bakel à St-Louis.

Les raisons ayant conduit à ce choix sont les suivantes :

- pour la crue de 1970 il s'agit de tenir compte de tout le modèle car nous voulons vérifier le réglage à toutes les stations où des observations limnimétriques sont effectuées. De plus, les lois de débit amont étant surtout connues à Galougo sur le Sénégal et à Kidira sur la Falémé, il devenait nécessaire de prendre le modèle complet afin de s'assurer que la propagation de la crue entre Gouina et Bakel était correcte,
- pour les crues artificielles le problème est d'une autre nature. Comme leur tracé sous-entend que des barrages régulateurs existent dans le haut-bassin, c'est bien évidemment à l'entrée de la vallée qu'il est nécessaire d'imposer une loi de débit ou une loi de niveau en fonction du temps. Comme l'entrée de la vallée coïncide avec Bakel, c'est donc en cette station que nous imposerons les lois définissant les crues artificielles. Un autre avantage réside dans le fait que Bakel se trouve en aval du confluent de la Falémé avec le Sénégal.

2.3 RAPPEL DES CARACTERISTIQUES GENERALES DU MODELE GOUINA - SAINT-LOUIS

Le modèle s'étend de Gouina (kilomètre zéro) à Saint-Louis (kilomètre 996). La partie amont du modèle, entre l'aval des chutes de Gouina et Diawara en aval de Bakel, ne comporte qu'un lit mineur, le fleuve

coulant entre des berges hautes qui ne sont pas, en principe, submergées. En aval de Diawara, le modèle prend en compte le lit majeur qui est découpé en un certain nombre de mailles qui constituent, autant que faire se peut, des unités hydrauliques.

Le modèle est conçu et les programmes de calcul prévus pour que l'on tienne compte des affluents et défluents ainsi que de la pluvio-évaporation, la précision du modèle dépendant directement de la qualité des données.

Les affluents sont les suivants :

- la Kolimbiné qui rejoint le fleuve en amont de Kayes,
- le Karakoro entre Ambidédi et la Falémé,
- la Falémé en amont de Bakel, cet affluent étant le plus important car prenant sa source en Guinée,
- le Niordé, en amont de Waoundé,
- le Ghorfa entre Waoundé et Matam,
- le Gorgol au droit de Kaédi,

A part la Falémé, tous les affluents appartiennent à la rive droite du fleuve.

Les défluents sont à leur tour :

- le départ vers le lac de R'Kiz au niveau de Dagana,
- le départ vers le lac de Guiers à Richard-Toll,
- la défluence vers l'Aftout Es Sahel au niveau de Débi,
- les défluences au travers des ouvrages de la digue gauche du delta sénégalais.

La figure 1, hors texte, montre le schéma topologique du modèle.

3. DEFINITION DE LA CRUE DE 1970

La crue de 1970 demande la constitution de deux fichiers "données". Le premier correspond aux "données de crue", le deuxième aux "données de contrôle".

3.1 LES DONNEES DE CRUE

Elles consistent essentiellement en la définition des lois de débit en fonction du temps du Sénégal et de ses affluents et défluents et d'une loi de niveau en fonction du temps ou hauteur-débit à l'extrémité aval du modèle.

Nous aurons ainsi :

a. Limite amont du modèle

Nous introduisons la loi de débit de Galougo. Comme nous l'avons exposé dans le rapport SDGREAH R 10 582, nous procérons ainsi car les observations de Galougo sont en général bonnes et que la distance Galougo - Gouina n'est que de 25 km environ. De plus, les observations sont faites à Gouina à l'échelle MAS 2ème bief où une relation hauteur-débit n'a pas été établie. Il faudrait donc passer par une corrélation hauteur-hauteur pour définir la loi de niveau en fonction du temps en amont des chutes où existe une loi hauteur-débit. Si on ajoute que les observations de niveaux ne sont pas toujours excellentes à Gouina, le choix de Galougo se justifie encore plus.

b. Limite aval du modèle

A Saint-Louis, nous avons imposé une loi de niveau en fonction du temps pour les crues de réglage. Ces lois ont été définies à partir des marégrammes pour les crues de 1964 et pour 1966 mais, pour les crues de 1968 et 1969, nous avons été obligés de les définir par corrélation avec l'évolution des niveaux à Dagana. Pour la crue de 1970 nous n'avons pas procédé de cette manière et avons imposé à Saint-Louis la loi hauteur-débit que nous avons calculée lors de l'étude du barrage du delta. Ainsi que nous le supposions lors de son établissement, la loi est bonne pour les débits moyens et supérieurs mais trop basse pour les petits débits. Or, comme nous le verrons plus loin, la crue de 1970 est caractérisée par des niveaux bas au mois de juillet et cet état de fait va rendre les calculs assez mauvais dans la basse vallée durant cette période. Ceci confirme, d'une manière implicite, que le modèle mathématique ne peut reproduire correctement des niveaux d'étiage.

c. Lois de débit des affluents

Nous aurons successivement :

/La Kolimbine/

Les niveaux sont observés à Kabaté en amont du confluent de son affluent de rive gauche, le Falao, dont le bassin versant est équivalent à celui de la Kolimbine à Kabaté.

Au cours des études du haut-bassin du Sénégal, Sénégal-Consult a effectué quelques jaugeages à Kabaté qui ont permis de tracer une loi hauteur-débit. Par l'intermédiaire de cette loi nous avons commencé par établir la loi de débit à Kabaté. Ensuite, pour tenir compte du Falao, nous avons, du 18 juillet au 6 octobre, multiplié la loi précédente par deux. Entre le 6 octobre et le 25 novembre, nous avons admis que le Falao n'apportait aucun débit et n'avons pris en compte que les débits à Kabaté (pendant cette période les débits varient entre 15 m³/s et zéro).

/Le Karatoro/

Nous avons reçu du Service de l'Hydraulique du Mali les observations effectuées à Bokediamby. Aucun tarage n'ayant été effectué, nous n'avons pu calculer directement la loi de débit. Nous avons alors comparé les variations de niveaux à Kabaté sur la Kolimbine et à Bokediamby et avons pu constater qu'elles présentent d'assez bonnes coïncidences pour que l'on puisse admettre, pour le Karakoro, une loi de débit définie à partir de celle de la Kolimbine en multipliant cette dernière par le rapport des bassins versants. Ceci n'est qu'une approximation comme l'a été la prise en compte du Falao pour la Kolimbine. Notons que les débits sont différents de zéro entre le 12 juillet et le 12 octobre.

/La Falémé/

La loi de débit est établie à partir des observations de Kidira. Elle s'étale du 1er juillet au 31 décembre.

/Le Niordé, le Ghorfa, le Gorgol/

Aucun renseignement n'est disponible pour les deux premiers. Pour le Gorgol, nous avons reçu du "Projet" une photocopie d'une lettre de la SCET-Coopération donnant les bilans mensuels du Gorgol Noir à Foum-Gleïta. On constate que les apports des mois d'août,

septembre, octobre du Gorgol Noir représentent un volume de 348 millions de m³ et nous regrettons de ne pas connaître leur répartition journalière. En effet, le Gorgol Noir à Foum-Gleïta ayant un bassin versant égal au tiers du bassin versant total du Gorgol, on peut penser que les apports au Sénégal, bien que la crue de 1970 soit moyenne, doivent représenter un volume de l'ordre de 500 à 600 millions de m³ (cette estimation tient compte du fait que le Gorgol Blanc a un bassin versant moins arrosé que le Gorgol Noir). L'examen du graphique 1 hors texte ne met pas en évidence de manière nette, pendant ces mois, un manque de débit, mais on peut cependant penser que les écarts observés en août en aval de Kaédi peuvent être la conséquence de la non prise en compte du Gorgol.

d. Lois de débit des défluents

/Lac de R'Kiz/

La crue étant moyenne et ne possédant aucun élément permettant le calcul de la loi de débit au travers des ouvrages de contrôle, nous avons admis que les débits étaient nuls.

/Lac de Guiers/

Le "Projet" à Saint-Louis nous ayant communiqué les niveaux observés à Saninte sur le lac de Guiers, nous avons calculé les débits par la méthode exposée dans le rapport R 10 582, Annexe 1 : crue de 1964. En fonction de l'évolution des niveaux à Richard-Toll et à Saninte, nous avons fixé l'ouverture du pont barrage le 29 juillet et sa fermeture le 3 novembre.

/Aftout Es Sahel/

Le niveau maximal observé à Rosso étant 2,67 m à l'échelle, soit la cote 2,47 IGN, les débits s'écoulant vers l'Aftout Es Sahel sont pratiquement nuls et nous avons admis une loi de débit nulle en permanence.

/Ouvrages de la rive gauche du delta du Sénégal/

Nous avons encore une fois reconduit les lois de débit calculées, dans le cadre d'une exploitation type des cuvettes, au moment où nous commençons les études relatives au réglage du modèle.

e. Pluvio-évaporation

Nous avons conservé les valeurs moyennes calculées pour la crue de 1969.

3.2 LES DONNEES DE CONTROLE

Il s'agit des niveaux observés aux échelles du fleuve. Ces observations sont plus ou moins complètes et correctes et amènent les commentaires suivants :

Félou aval

Les hauteurs sont fournies du 1er juillet au 31 décembre mais, du 8 au 31 octobre, elles ont été estimées. L'analyse des observations montre qu'elles doivent être erronées au cours des périodes ou aux dates suivantes :

- du 21 au 31 juillet,
- les 2 et 3 septembre,
- le 13 septembre,
- les 21 et 22 septembre,
- le 30 septembre et le 1er octobre.

Kayes

Les lectures sont complètes et ne présentent pas d'anomalies.

Ambidédi

Les lectures fournies vont du 1er juillet au 31 décembre mais les niveaux du mois de novembre ont été reconstitués. L'analyse des observations montre que les hauteurs sont douteuses :

- du 1er au 26 juillet,
- du 31 juillet au 2 août,
- du 5 au 8 août,
- du 15 au 22 août,

- du 25 au 28 août,
- les 18 et 19 septembre,
- du 5 octobre au 31 décembre.

L'observateur de cette échelle paraît donc assez incompétent comme cela l'était déjà en 1969.

Bakel

Les lectures sont complètes et correctes.

Waoundé

Les lectures vont du 24 septembre au 31 décembre. Pendant cette période on ne décèle pas d'anomalies.

Matam

Lectures complètes du 1er juillet au 31 décembre, aucune anomalie n'est décelable.

Kaédi

Les lectures sont presque complètes mais nous avons dû, au-delà du 23 octobre, prendre les valeurs du limnigramme relevé par la SCET-Coopération. Il reste cependant un trou du 19 au 23 décembre. L'analyse des hauteurs semble montrer que des lectures sont douteuses :

- du 1er juillet au 10 août,
- le 19 septembre,
- du 24 au 31 décembre.

Saldé

Les lectures vont du 1er août au 31 décembre. Aucune anomalie n'apparaît de manière évidente.

Boghé

Les lectures vont du 1er juillet au 11 octobre et du 17 octobre au 12 novembre. Les niveaux du 9 au 11 octobre et du 17 au 21 octobre sont douteux. Il s'y rajoute en plus, du 17 septembre au 8 octobre, l'effet du décalage vers le bas, de 0,06 m, de l'élément 8-9 m de l'échelle.

Podor

Les lectures sont complètes.

Dagana

Les lectures sont complètes.

Richard-Toll

Les lectures vont du 31 juillet au 31 octobre.

Rosso

Les lectures vont du 1er juillet au 15 novembre.

N'Goui

Les lectures vont du 1er juillet au 30 novembre. On note que le 18 juillet et du 11 octobre au 28 octobre les lectures sont douteuses.

Pour revenir sur les stations aval, Boghé, Podor, Dagana, Rosso, les lectures du mois de juillet, du fait de la marée, ne sont pas homogènes, les niveaux étant parfois plus bas aux stations amont. De plus, à partir du 15 novembre, les observations de Dagana montrent des évolutions qui peuvent être dues à la marée et qui sont à peine visibles à Podor. Enfin, dernière remarque, les niveaux maximaux à Rosso sont, par moment, supérieurs à ceux observés à Richard-Toll qui se trouve en amont.

En conclusion sur les observations aux échelles du fleuve, leur qualité n'est pas très bonne, certaines échelles étant très mal lues.

4. DEFINITION DES CRUES ARTIFICIELLES

Des crues sont au nombre de trois. A part la pluvio-évaporation moyenne que nous avons introduite dans les données de crue, nous avons admis que tous les affluents et défluents avaient une loi de débit nulle.

La condition limite amont est introduite à Bakel et la condition limite aval est encore la loi hauteur-débit moyenne qui a été calculée à Saint-Louis au moment de l'étude du barrage du delta.

Les conditions limites amont sont alors les suivantes :

4.1 CRUE ARTIFICIELLE 1

Elle correspond à une loi de niveau imposée à Bakel :

1er juillet	_____	Z = 14,40	IGN
1er août	_____	Z = 14,40	IGN
6 août	_____	Z = 19,80	IGN
25 septembre	_____	Z = 19,80	IGN
1er octobre	_____	Z = 17,30	IGN
24 octobre	_____	Z = 14,40	IGN
15 décembre	_____	Z = 14,40	IGN

4.2 CRUE ARTIFICIELLE 2

C'est une crue qui est également définie à Bakel par une loi de niveau en fonction du temps, c'est-à-dire :

1er juillet	_____	Z = 14,40	IGN
27 août	_____	Z = 14,40	IGN
1er septembre	_____	Z = 19,80	IGN
30 septembre	_____	Z = 19,80	IGN
6 octobre	_____	Z = 17,30	IGN
29 octobre	_____	Z = 14,40	IGN
15 décembre	_____	Z = 14,40	IGN

La différence essentielle, par rapport à la crue précédente, est que le maximum de crue qui est maintenu 50 jours dans la crue de type 1 est réduit à 1 mois à présent.

4.3 CRUE ARTIFICIELLE 3

Cette crue est définie par une loi de débit en fonction du temps à Bakel. La loi est la suivante :

1er juillet	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$
27 août	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$
1er septembre	$Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$
30 septembre	$Q = 2000 \text{ m}^3/\text{s}$
5 octobre	$Q = 700 \text{ m}^3/\text{s}$
28 octobre	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$
15 décembre	$Q = 300 \text{ m}^3/\text{s}$

Chapitre III

LA CRUE DE 1970 ANALYSE DES RESULTATS

1. INTRODUCTION

Le critère de réglage du modèle repose sur la précision avec laquelle les niveaux aux stations du fleuve sont reproduits.

Ce chapitre sera donc consacré à l'analyse des précisions moyennes obtenues et des écarts sur les maxima de la crue. Cependant, avant de passer aux résultats, nous allons rappeler comment est calculée la précision en une station quelconque. Elle est obtenue en divisant la somme des écarts journaliers par le nombre de jours où ont eu lieu les observations.

2. PRECISION DU MODELE POUR LA CRUE DE 1970

Dans le tableau suivant nous donnons aux stations du fleuve :

- la précision brute ΔZ_1 obtenue en prenant les valeurs des lectures introduites dans la bande "données de contrôle" en tenant compte de celles qui sont erronées,
- la précision ΔZ_2 obtenue après avoir écarté les lectures erronées,
- la précision ΔZ_3 pour les stations aval obtenues en écartant, en plus des lectures erronées, les lectures du 1er au 31 juillet à Boghé, Podor et Dagana, et du 1er juillet au 8 août à Rosso.

Stations	ΔZ_1 (m)	ΔZ_2 (m)	ΔZ_3 (m)
Féloù aval	0,12	0,10	
Kayes	0,09	0,09	
Ambidédi	0,47	0,20	
Bakel	0,17	0,17	
Waoundé	0,19	0,19	
Matam	0,21	0,21	
Kaédi	0,25	0,16	
Saldé	0,27	0,27	
N'Goui	0,21	0,17	
Boghé	0,28	0,265	0,245
Podor	0,16	0,16	0,13
Dagana	0,17	0,17	0,15
Richard-Toll	0,13	0,09	
Rosso	0,23	0,17	0,17

La précision moyenne sur les 14 stations du fleuve est, en prenant les valeurs après correction, de 0,166 m.

3. ECARTS AUX MAXIMA DE LA CRUE DE 1970

Les valeurs portées dans le tableau correspondent :

- aux niveaux maximaux observés $Z_{\max} N$,
- aux niveaux maximaux calculés $Z_{\max} C$,
- aux différences $\Delta Z_{\max} = Z_{\max} C - Z_{\max} N$.

Stations	$Z_{\max} N$ (I.G.N.)	$Z_{\max} C$ (I.G.N.)	ΔZ_{\max} (m)
Féloù aval	29,29	29,30	+ 0,01
Kayes	28,46	28,48	+ 0,02
Ambidédi	25,47	25,50	+ 0,03
Bakel	20,86	20,77	- 0,09
Waoundé		17,70	
Matam	14,33	14,36	+ 0,03
Kaédi	11,54	11,59	+ 0,05
Saldé	10,11	10,08	- 0,03
N'Goui	9,91	10,00	+ 0,09
Boghé	7,76	7,68	- 0,08
Podor	4,88	4,88	0
Dagana	2,99	3,17	+ 0,18
Richard-Toll	2,52	2,66	+ 0,14
Rosso	2,47	2,50	+ 0,03

4. ANALYSE DES RESULTATS

L'examen des graphiques 1, 2 et 3 qui donnent les limnigrammes calculés et observés dans le Sénégal, le delta et le Doué et des tableaux des paragraphes 2 et 3 conduit aux constatations suivantes :

- Entre Gouina et Bakel, l'évolution des niveaux est assez bien reproduite dans l'ensemble. Cependant, les montées rapides existant au début du mois d'août à Félou aval et Kayes sont mal reconstituées par le modèle. Ceci doit être dû à un manque de débit. Enfin, en ces deux stations, le modèle permet de suivre les décrues observées de façon correcte.
- Le corps de la crue est assez bien suivi par le modèle à Bakel. Il reste cependant des discordances que nous avions déjà observées avec des crues de réglage. Ainsi, une montée notée au mois de juillet n'est absolument pas rendue par le modèle. Ce phénomène avait déjà été constaté en juillet 1966 et les causes exactes non éclaircies. On peut penser qu'il s'agit encore d'une sous-estimation des débits du Karakoro ou de la Falémé puisque cette pointe n'existe pas à Félou aval et Kayes. L'autre discordance se trouve dans la décrue. Le modèle, en effet, donne des niveaux trop hauts comme pour la crue de 1968. Il est d'ailleurs normal de retrouver la même chose pour ces deux crues car les gammes de niveaux observés sont identiques. Ceci est une conséquence de la forme très raide des lois de débitance aux faibles niveaux qui se traduit par des variations notables des niveaux pour de faibles évolutions des débits.
- En aval de Bakel, et jusqu'à Podor, les maxima calculés et les formes des limnigrammes sont en accord avec les observations. Certaines différences en montée de crue et en décrue sont cependant systématiques. Ainsi, en montée de crue, le calcul est en avance de deux jours en moyenne par rapport aux montées observées. On note encore qu'au mois d'août, en aval de Kaédi, les niveaux calculés sont inférieurs aux niveaux observés. On peut voir ici un effet du manque de données journalières relatives au Gorgol, mais on ne peut donner à cette raison une valeur absolue. Enfin, à la décrue, on note qu'à toutes les stations, comme à Bakel, les niveaux calculés sont trop hauts. Ici, nous pouvons donner deux causes à ce phénomène. La première, que nous avons évoquée pour Bakel, réside dans la définition des lois de débitance qui sont très raides aux bas niveaux. La seconde provient du calage des seuils de communication entre le lit mineur et le lit majeur. Ainsi que nous l'avons expliqué dans le rapport relatif au réglage, les fortes crues demandaient un abaissement de ces seuils et les faibles crues un exhaussement. Nous avons donc réalisé un réglage moyen qui conduit à une vidange trop grande du lit majeur et donc à des débits un peu supérieurs à ceux de la réalité.

- En aval de Podor, les niveaux sont pour commencer inférieurs aux niveaux observés puis ensuite supérieurs. On retrouve donc le phénomène que nous avons observé pour toutes les crues étudiées.
- Au mois de juillet et à la décrue, à toutes les stations placées sous l'influence de la marée, on constate que les niveaux calculés sont bas, ce qui confirme que la loi hauteur-débit à Saint-Louis n'est pas très bonne aux faibles débits. De toute façon, comme les niveaux observés pendant ces périodes ne peuvent être homogènes en raison du temps de propagation des ondes de marée, ceci ne revêt pas une très grande importance.

Pour ce qui est de la précision avec laquelle la crue de 1970 a été reproduite par le calcul, on note que :

- Les niveaux maximaux sont assez bien retrouvés, les différences étant inférieures à 0,10 m sauf à Dagana et à Richard-Toll où elles atteignent 0,18 m et 0,14 m. On retrouve là des écarts déjà observés avec la crue de 1966.
- Les précisions moyennes aux stations sont homogènes avec ce que nous avons déjà obtenu pour les autres crues étudiées, 1964 excepté. Pour l'ensemble des stations, elle est de 0,166 m, soit un peu supérieure à celle des autres crues. Ceci ne doit pas nous étonner si on considère que la crue de 1970 est une crue moyenne et que la qualité des observations semble se dégrader en certaines stations. Ci-dessous, nous rappelons les précisions moyennes obtenues avec les différentes crues étudiées :

1964	:	précision moyenne sur 16 stations	:	0,112 m
19661	:	précision moyenne sur 16 stations	:	0,145 m
19662	:	précision moyenne sur 12 stations	:	0,144 m
1968	:	précision moyenne sur 14 stations	:	0,133 m
19691	:	précision moyenne sur 13 stations	:	0,175 m
19692	:	précision moyenne sur 13 stations	:	0,147 m
1970	:	précision moyenne sur 14 stations	:	0,166 m

5. CONCLUSION

En conclusion, on peut dire que le passage de la crue de 1970 sur le modèle mathématique de la vallée du Sénégal confirme les résultats obtenus avec les crues de réglage et de contrôle. En effet, nous retrouvons pour cette crue une série de phénomènes déjà observés :

L'étude actuelle a donc pour objet de comparer les crues naturelles de 1968 et de 1970 avec les trois crues artificielles définies dans le chapitre II. Les comparaisons porteront sur :

- les niveaux maximaux atteints aux stations du fleuve en aval de Bakel,
- les hauteurs dépassées 15 et 30 jours à ces mêmes stations,
- les débits maximaux et les débits dépassés 15 et 30 jours aux stations de Bakel, Kaédi et Dagana,
- les volumes maximaux instantanés ayant transité dans le lit majeur qui a été préalablement divisé en 19 régions respectant au mieux les unités hydroagricoles naturelles (le groupement des casiers en 19 régions est défini par les figures 1, 2 et 3 hors texte),
- les surfaces maximales submergées et les surfaces submergées pendant 15, 30 et 45 jours. Il n'était pas prévu, initialement, d'examiner ces paramètres mais, au cours de l'étude, il nous a paru utile de le faire car nous ne pouvions conclure valablement sur les crues artificielles 1 et 2, l'analyse des volumes étant insuffisante en elle-même.

2. PRECISION SUR LE DECOUPAGE EN REGIONS DU LIT MAJEUR

Les figures 1, 2 et 3 définissent :

- le découpage en régions avec comme support le schéma topologique du modèle (figure 1),
- le découpage en casiers du modèle, leur regroupement en régions, les unités naturelles qui ont été définies par le "Projet" à Saint-Louis, le support étant la carte au 1/200 000 du Sénégal (figure 2 et 3).

Nous avons défini 19 régions en essayant, dans toute la mesure du possible, de respecter les unités naturelles ou tout au moins de grouper certaines unités entre elles afin de ne pas dépasser la possibilité de sous-programme qui est de 20 régions pour l'ensemble de la Vallée.

On peut constater que nous avons respecté les lits majeurs rives droite et gauche ainsi que l'île A Morphil en tant qu'unités caractéristiques.

Chaque région comporte un nom de 8 lettres. Les cinq ou six premières font référence à une station située près de la région considérée. Les deux ou trois dernières permettent de préciser s'il s'agit de la rive droite ou de la rive gauche du Sénégal ou de la rive gauche du Doué car il existe trois exceptions à cette règle, exceptions relatives à l'île A MORPHIL qui est divisée en trois régions : ILE AMONT, ILE CENTR, ILE AVAL.

Les deux exemples ci-dessous illustrent les commentaires que nous venons de faire. Ainsi :

- WADUN RGS représente une région située près de Wacundé en rive gauche du Sénégal (R.G.S.) ;
- NGOUI RGD correspond à une région située près de N'Goui en rive gauche du Doué (R.G.D.).

En conclusion, les noms des régions, associés aux figures 1, 2 et 3, permettent de les situer géographiquement.

3. COMPARAISON SUR LES NIVEAUX (Graphiques 1, 2, 3, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 36, 37 et 38)

La comparaison porte sur les niveaux maximaux et sur les niveaux dépassés 15 et 30 jours.

3.1 COMPARAISON SUR LES NIVEAUX MAXIMAUX

Le tableau suivant donne les valeurs des niveaux maximaux atteints aux stations caractéristiques du fleuve situées en aval de Bakel. Pour permettre une meilleure comparaison nous avons indiqué pour les crues de 1968 et de 1970 les niveaux maximaux observés ($Z_{max\ N}$) et les niveaux maximaux calculés ($Z_{max\ C}$).

Stations	Crue de 1968		Crue de 1970		Crue artificielle 1 (I.G.N.)	Crue artificielle 2 (I.G.N.)	Crue artificielle 3 (I.G.N.)
	Zmax N (I.G.N.)	Zmax C (I.G.N.)	Zmax N (I.G.N.)	Zmax C (I.G.N.)			
Waoundé	17,24	17,00		17,70	17,18	17,10	15,50
Matam	13,81	13,71	14,33	14,36	14,26	14,15	12,85
Kaédi	10,85	10,82	11,54	11,59	11,60	11,37	10,35
Saldé	9,18	9,11	10,11	10,08	10,09	9,84	8,60
N'Goui	9,12	9,13	9,91	10,00	10,00	9,80	8,65
Boghé	7,01	6,86	7,76	7,68	7,70	7,44	6,30
Guédé			5,62	6,11	6,11	6,04	5,35
Pador	3,94	4,02	4,88	4,88	4,91	4,62	3,57
Dagana	2,36	2,36	2,99	3,17	3,22	2,87	2,11
Richard-Toll	1,99	1,96	2,52	2,66	2,75	2,42	1,76
Rosso	1,92	1,83	2,47	2,50	2,60	2,26	1,65
Ronq		1,62		2,22	2,31	2,05	1,50
Débi		1,20		1,59	1,67	1,43	1,08
Saint-Louis		0,70		0,76	0,80	0,70	0,55

Les commentaires ci-dessous portent sur les résultats des calculs. C'est plus homogène de procéder ainsi car, si pour les stations amont les différences sont négligeables vis-à-vis de l'amplitude des variations de niveaux, c'est moins vrai en aval et nous pensons en particulier à Dagana où, en 1970, l'écart au maximum de la crue est de 0,18 m pour une variation de 3 m des niveaux.

On peut alors faire les remarques suivantes :

- La crue de 1968 qui est équivalente à Waoundé à la crue artificielle 1, se place, dès Matam, entre les crues artificielles 2 et 3 ; elle se rapproche d'ailleurs, plus elle se propage vers l'aval, de la crue artificielle 3 ;
- Les niveaux maximaux engendrés par la crue artificielle 1 sont inférieurs à ceux de la crue de 1970 à Waoundé et Matam, équivalents jusqu'à Pador et supérieurs en aval ;
- Les niveaux maximaux des crues artificielles 1 et 2 sont équivalents jusqu'à Boghé - Guédé. En aval, ceux de la crue artificielle 2 deviennent inférieurs, l'écart maximal étant observé à Rosso (2,60 IGN contre 2,26 IGN) ;
- La crue artificielle 3 engendre des niveaux maximaux nettement inférieurs aux niveaux des autres crues. Sa comparaison avec la crue de 1968 montre déjà que cette crue sera sûrement insuffisante pour remplir les buts fixés.

3.2 COMPARAISON SUR LES NIVEAUX DEPASSES 15 ET 30 JOURS

Le tableau suivant donne les valeurs des niveaux dépassés 15 et 30 jours (Z15 et Z30) aux stations du fleuve. Pour les crues de 1968 et 1970 nous donnons deux groupes de valeurs. Le premier, caractérisé par la lettre N, correspond aux observations et le deuxième, défini par la lettre C, est relatif aux valeurs données par les calculs sur le modèle mathématique. Comme dans le tableau précédent, nous n'avons indiqué, en certaines stations, que les niveaux calculés car nous ne disposons pas des observations.

Stations	Crue de 1968				Crue de 1970				Crue artificielle 1		Crue artificielle 2		Crue artificielle 3	
	Z15N	Z30N	Z15C	Z30C	Z15N	Z30N	Z15C	Z30C	Z15C	Z30C	Z15C	Z30C	Z15C	Z30C
Waoundé	15,45	14,35	15,50	14,20			17,20	16,90	17,10	17,05	16,98	16,65	15,44	15,06
Matam	12,85	11,95	13,05	11,95	14,10	13,90	14,20	13,95	14,20	14,10	13,95	13,48	12,68	12,32
Kaédi	10,50	9,82	10,55	9,97	11,50	11,20	11,52	11,30	11,52	11,35	11,20	10,82	10,10	9,71
Saldé	8,88	8,20	8,85	8,28	10,10	9,70	10,01	9,76	10,01	9,85	9,65	9,18	8,35	7,80
N'Gouf					8,85	8,37	9,85	9,60	9,95	9,72	9,95	9,81	9,65	9,18
Boghé	6,75	5,95	6,58	6,05	7,64	7,40	7,61	7,44	7,64	7,49	7,32	6,98	5,95	5,35
Guédé					5,50	5,10		6,08	6,02	6,10	6,05	5,95	5,80	5,10
Podor	3,80	3,48	3,85	3,42	4,80	4,60	4,82	4,65	4,85	4,72	4,42	4,20	3,30	2,80
Dagana	2,30	2,02	2,28	2,06	2,95	2,85	3,10	2,95	3,17	3,05	2,79	2,52	1,98	1,70
Richard-Toll	1,92		1,90	1,70	2,48	2,35	2,61	2,45	2,71	2,58	2,35	2,10	1,67	1,45
Rosso	1,85		1,80	1,62	2,40	2,30	2,45	2,30	2,55	2,42	2,18	1,95	1,55	1,36
Ronq					1,62	1,48		2,15	2,07	2,27	2,15	1,98	1,80	1,42
Débi					1,20	1,12		1,55	1,45	1,65	1,55	1,40	1,26	1,03
														0,93

Les résultats portés dans le tableau montrent que :

- pour les crues de 1968 et de 1970 les comparaisons sur les niveaux dépassés 15 et 30 jours sont bonnes dans l'ensemble. Les écarts sont, en général, inférieurs à 0,10 m sauf, en 1968, pour les Z15 de Matam et Boghé et les Z30 de Waoundé, Kaédi, et en 1970 pour le Z15 de Dagana,
- la crue artificielle 1 conduit à des niveaux égaux ou légèrement supérieurs à ceux engendrés par la crue de 1970. Ces différences sont surtout sensibles dans la partie aval de la Vallée,
- la crue artificielle 2 donne, dès Waoundé, des niveaux inférieurs, les différences ayant une plus grande valeur relative en aval car l'amplitude des crues y est moins grande,

- la crue de 1968 est inférieure à la crue artificielle 3 en amont de Kaédi, mais, en aval, elle lui devient supérieure, les plus grands écarts, en faveur de la crue de 1968, étant notés à Boghé et Guédé,
- enfin, la crue artificielle 3 apparaît, par rapport à la crue de 1970, aux crues artificielles 1 et 2 et à la crue de 1968 à partir de Kaédi, nettement déficitaire. Les écarts sont grands et varient en fonction des stations. On peut donc dire que cette crue artificielle ne pourra pas engendrer des niveaux conduisant à des submersions intéressantes du lit majeur.

3.3 CONCLUSION PARTIELLE

Les premières comparaisons effectuées montrent que la crue artificielle 1 est équivalente à la crue naturelle de 1970 et que la crue artificielle 3, inférieure à la crue de 1968, semble insuffisante pour assurer un maintien correct de l'agriculture de décrue. Le problème est donc de savoir si la crue artificielle 2 est, elle, suffisante.

4. COMPARAISON SUR LES DEBITS (Graphiques 4, 8, 12, 16 et 39).

4.1 COMPARAISON SUR LES DEBITS MAXIMAUX

Cette comparaison est effectuée sur les débits du lit mineur à Bakel, Kaédi et Dagana. Les valeurs des débits maximaux sont portées dans le tableau ci-dessous.

Désignation	Bakel	Kaédi	Dagana
Crue de 1968	3 440	1 760	1 700
Crue de 1970	3 930	1 900	1 960
Crue artificielle 1	3 460	1 900	1 935
Crue artificielle 2	3 460	1 820	1 880
Crue artificielle 3	2 000	1 595	1 560

- la crue de 1968 est inférieure à la crue artificielle 3 en amont de Kaédi, mais, en aval, elle lui devient supérieure, les plus grands écarts, en faveur de la crue de 1968, étant notés à Boghé et Guédé,
- enfin, la crue artificielle 3 apparaît, par rapport à la crue de 1970, aux crues artificielles 1 et 2 et à la crue de 1968 à partir de Kaédi, nettement déficitaire. Les écarts sont grands et varient en fonction des stations. On peut donc dire que cette crue artificielle ne pourra pas engendrer des niveaux conduisant à des submersions intéressantes du lit majeur.

3.3 CONCLUSION PARTIELLE

Les premières comparaisons effectuées montrent que la crue artificielle 1 est équivalente à la crue naturelle de 1970 et que la crue artificielle 3, inférieure à la crue de 1968, semble insuffisante pour assurer un maintien correct de l'agriculture de décrue. Le problème est donc de savoir si la crue artificielle 2 est, elle, suffisante.

4. COMPARAISON SUR LES DEBITS (Graphiques 4, 8, 12, 16 et 39).

4.1 COMPARAISON SUR LES DEBITS MAXIMAUX

Cette comparaison est effectuée sur les débits du lit mineur à Bakel, Kaédi et Dagana. Les valeurs des débits maximaux sont portées dans le tableau ci-dessous.

Désignation	Bakel	Kaédi	Dagana
Crue de 1968	3 440	1 760	1 700
Crue de 1970	3 930	1 900	1 960
Crue artificielle 1	3 460	1 900	1 935
Crue artificielle 2	3 460	1 820	1 880
Crue artificielle 3	2 000	1 595	1 560

On note que :

- les débits maximaux à Bakel sont supérieurs à 3 000 m³/s dans tous les cas sauf pour la crue artificielle 3 où le débit imposé est égal à 2 000 m³/s,
- à Kaédi, le débit maximal de la crue de 1968 est devenu inférieur à celui des autres crues exception faite de la crue artificielle 3. Par ailleurs, les débits des trois autres crues restent bien homogènes ;
- à Dagana, la remarque faite au niveau de Kaédi, se confirme encore, le débit de la crue de 1968 étant plus proche de celui de la crue artificielle 3 que des autres débits.
- En résumé, la crue de 1968 évolue de telle manière que le débit maximal passe de 3 440 m³/s à Bakel à 1 700 m³/s à Dagana, la diminution de débit étant due à quelques débordements en amont et surtout au fait que la crue est faible et donc qu'il se produit un aplatissement important de l'onde de crue.

4.2 COMPARAISON SUR LES DEBITS DEPASSES 15 ET 30 JOURS

Le tableau suivant donne, aux mêmes stations, les débits dépassés 15 et 30 jours (Q15 et Q30)

Désignation	Bakel		Kaédi		Dagana	
	Q15	Q30	Q15	Q30	Q15	Q30
Crue de 1968	1 980	1 220	1 580	1 350	1 640	1 525
Crue de 1970	3 190	2 860	1 880	1 770	1 960	1 930
Crue artificielle 1	3 080	3 040	1 860	1 750	1 920	1 870
Crue artificielle 2	3 080	2 960	1 760	1 750	1 840	1 740
Crue artificielle 3	2 000	1 860	1 550	1 470	1 480	1 320

Les commentaires que l'on peut faire à partir de ce tableau sont assez intéressants. En effet :

- la crue de 1968, dans sa propagation vers l'aval, voit son hydrogramme évoluer de telle manière qu'elle est caractérisée, à Dagana, par des débits de 15 et 30 jours supérieurs à ceux de la crue artificielle 3 alors qu'en amont c'est le contraire que l'on note,

- les crues de 1970 et artificielles 1 et 2 restent parfaitement homogènes jusqu'à Kaédi, les différences sur les débits de 30 jours étant cependant assez nettes à Dagana,
- les débits caractéristiques de la crue artificielle 3 décroissent régulièrement de Bakel à Dagana, la réduction relative étant plus sensible pour le débit de 30 jours que pour le débit de 15 jours puisque pour ce dernier les débits sont assez peu différents à Kaédi et Dagana.
- En conclusion, on voit que la crue naturelle de 1968, qui se propage sur un régime établi de l'ordre de 1 100 m³/s, se renforce d'amont en aval quand on s'intéresse aux débits de 15 et 30 jours alors que la crue artificielle 3, elle, s'affaiblit. Aussi, on voit encore une fois se confirmer le fait que la crue artificielle 3 paraît insuffisante pour permettre le maintien de l'agriculture de décrue dans des conditions satisfaisantes.

5. COMPARAISON SUR LES VOLUMES (graphiques 17 à 35)

Ces comparaisons portent sur les volumes ayant transité dans le lit mineur à Bakel, Kaédi et Dagana et sur les volumes en fonction du temps ayant traversé les régions du lit majeur. Toutefois, avant de donner les résultats, nous consacrerons un paragraphe à la méthode de calcul des volumes dans le lit majeur.

5.1 METHODE DE CALCUL

Ainsi que nous l'avons déjà dit, le lit majeur, entre Diawara et Rosso, a été divisé en 19 régions. Les volumes que nous calculons ne sont pas les volumes ayant transité dans ces régions puisque cela aurait conduit à faire la sommation des lois $Q(t)$ de chaque liaison du lit majeur et donc à parvenir à un volume bien trop grand vis-à-vis du volume réel. Un mode de calcul aurait pu être de prendre chaque liaison et de calculer le volume total l'ayant traversé. Cette façon de faire aurait entraîné, compte tenu du nombre de liaisons, des calculs très longs.

Nous avons donc préféré, pour chaque région et à chaque instant, calculer les volumes existant dans chaque casier et effectuer leur somme. Le résultat est ensuite traduit par une courbe qui donne le volume en fonction du temps.

L'inconvénient de la méthode est que l'on ne connaît pas ainsi le volume total passant dans une transversale du fleuve. Cependant, les cultures de décrue étant liées à la surface réellement submergée, on sent que, physiquement, le calcul du volume emmagasiné dans une région peut se traduire par une surface couverte par la crue et donc une possibilité de mise en culture des terres.

Nous possédons les résultats donnant les volumes emmagasinés dans le lit majeur dans chacune des régions. Le problème est de pouvoir relier ces volumes à des niveaux. Dans le rapport technique 4 nous avons vu que la meilleure corrélation était établie quand on reliait les volumes aux niveaux maximaux atteints aux stations les plus proches.

5.2 COMPARAISON ENTRE LES VOLUMES AYANT TRANSITE DANS LE LIT MINEUR

Le tableau suivant donne les valeurs des volumes ayant transité dans le lit mineur du Sénégal pour les cinq crues étudiées. Avant de donner les résultats, nous pensons utile de préciser les dates extrêmes que nous avons prises en compte pour le calcul de ces volumes.

- Crue de 1968
 - Bakel : du 15 juillet au 16 novembre
 - Kaédi : du 15 juillet au 18 novembre
 - Dagana : du 15 juillet au 21 novembre
- Crue de 1970
 - Bakel : du 15 juillet au 14 novembre
 - Kaédi : du 15 juillet au 20 novembre
 - Dagana : du 15 juillet au 23 novembre
- Crue artificielle 1
 - Bakel {
 - Kaédi { du 1er août au 1er décembre
 - Dagana {
- Crue artificielle 2
 - Bakel {
 - Kaédi { du 27 août au 1er décembre
 - Dagana {

• Crue artificielle 3

- Bakel }
- Kaédi } du 26 août au 10 novembre
- Dagana }

Voyons à présent les résultats :

Désignation	Bakel (m ³)	Kaédi (m ³)	Dagana (m ³)
Crue de 1968	12,90 10 ⁹	11,70 10 ⁹	12,00 10 ⁹
Crue de 1970	18,48 10 ⁹	13,85 10 ⁹	15,12 10 ⁹
Crue artificielle 1	18,60 10 ⁹	13,63 10 ⁹	15,57 10 ⁹
Crue artificielle 2	12,75 10 ⁹	10,30 10 ⁹	11,00 10 ⁹
Crue artificielle 3	7,45 10 ⁹	6,66 10 ⁹	7,32 10 ⁹

Ces résultats sont intéressants car ils montrent que :

- les volumes des crues de 1968 et artificielles 2 sont très comparables mais, en définitive, conduisent dans la vallée à des résultats très différents car les débits importants ne sont pas soutenus,
- la crue artificielle 2, qui engendre des niveaux et des débits assez semblables à ceux des crues artificielles 1 et de 1970 quand on prend les valeurs de 15 jours, permet de faire une économie de près de 6 milliards de m³ à l'entrée de la vallée,
- d'une façon générale le volume qui transite à Kaédi dans le lit mineur est inférieur à celui que l'on trouve à Dagana,
- la crue artificielle 3 transite en quasi totalité dans le lit mineur, les volumes à Bakel et à Dagana étant pratiquement égaux à l'évaporation près.

5.3 COMPARAISON SUR LES VOLUMES MAXIMAUX AYANT EXISTE DANS LES REGIONS

Dans le tableau suivant, nous avons indiqué, en millions de m³, les volumes maximaux ayant existé, à un moment donné, dans les régions du lit majeur. Nous rappelons qu'il ne s'agit pas ici de volumes totaux ayant franchi plusieurs liaisons, mais de la somme des volumes existant dans les casiers de chaque groupement.

Régions	Crue de 1968 (10 ⁶ m ³)	Crue de 1970 (10 ⁶ m ³)	Crue artificielle 1 (10 ⁶ m ³)	Crue artificielle 2 (10 ⁶ m ³)	Crue artificielle 3 (10 ⁶ m ³)
Waoun RDS	47	100	85	75	20
Waoun RGS	120	200	165	160	45
Matam RDS	205	525	490	430	120
Matam RGS	225	487	435	393	122
Kaédi RDS	22	80	80	60	10
Kaédi RGS	205	580	565	460	140
Diorb RDS	355	677	678	548	277
Diorb RGS	360	580	578	530	230
Saldé RDS	27	120	124	80	16
Ile Amont	45	175	175	112	47
Ngoui RGD	35	110	110	81	23
Boghé RDS	66	168	170	132	45
Ile Centr	57	309	310	185	44
Podor RDS	63	220	223	151	32
Ile aval	183	392	391	317	157
Guédé RGD	98	188	188	158	73
Dagana RD	120	325	349	225	65
Dagana RG	134	455	465	298	87
Rosso RDS	62	235	250	150	40

On note que :

- du fait de la montée rapide de la crue artificielle 1, les volumes jusqu'à Kaédi sont inférieurs à ceux de la crue de 1970. A partir de cette station ils sont égaux ou supérieurs comme on aurait pu le supposer par la seule analyse des niveaux,
- la crue artificielle 2, dont la pointe ne dure que 29 jours contre 50 jours pour la crue artificielle 1, donne des volumes maximaux inférieurs, les différences devenant surtout sensibles en aval de Kaédi. Les volumes instantanés maximaux restent cependant corrects ;
- La crue de 1968, du fait de son hydrogramme, bien que d'un volume équivalent à la crue artificielle 2 à Bakel, donne des volumes nettement inférieurs dans les régions du lit majeur. Les résultats sont quand même supérieurs à ceux de la crue artificielle 3 qui est nettement insuffisante. Les résultats confirment bien ce que nous avons déjà perçu au travers des niveaux, des débits et des volumes transitant dans le lit mineur. On peut donc penser que la crue artificielle 3 permet la mise en eau des marigots et des fonds de cuvettes mais que les submersions sont insuffisantes pour assurer des conditions acceptables à l'agriculture traditionnelle de décrue.

5.4 CONCLUSION PARTIELLE

On pourrait, dès à présent, conclure que la crue artificielle 3 est insuffisante. On pourrait également dire que la crue artificielle à imposer à l'entrée de la vallée devra être définie correctement de manière à ce que le volume lâché soit utilisé le plus efficacement possible. On en voit une illustration nette quand on compare la crue de 1968 et la crue artificielle 2 qui sont d'un même volume à Bakel et qui, pourtant, donnent des résultats très différents dans la vallée car les formes de leurs hydrogrammes sont dissemblables.

Cependant, avant de faire un choix consistant à dire que la crue artificielle 2 est celle qu'il faut retenir dans son principe, quitte à chercher l'hydrogramme optimal ayant le même volume à Bakel, nous pensons qu'il est nécessaire d'examiner le dernier facteur représenté par l'analyse des surfaces inondées dans chaque région. Ce point ne devrait pas, initialement, être examiné, mais l'étude ne pourrait être complète si nous arrêtons l'analyse ici.

6. COMPARAISON SUR LES SURFACES (graphiques 40 à 58)

6.1 METHODE DE CALCUL

Le calcul des surfaces inondées en fonction du temps est le pendant du calcul des volumes instantanés traversant chaque région. En effet, dans chaque casier du lit majeur, à un instant t_i , existe une surface S_i couverte par la crue. Le calcul effectué consiste à faire, dans chaque région, la somme des surfaces S_i de chaque casier aux temps t_i . On peut donc, dans chaque région, définir globalement la surface totale inondée aux temps t_i et donc, en plus de la surface maximale, préciser les surfaces qui sont submergées pendant un certain nombre de jours, 15, 30 et 45 jours par exemple. Le calcul des lois $S(t)$ des régions est fait par un sous-programme et les résultats sont ensuite tracés graphiquement.

6.2 COMPARAISON SUR LES SURFACES MAXIMALES

Dans le tableau suivant nous avons porté les surfaces maximales inondées dans chaque région pour les cinq crues concernées. Nous avons donné, dans la dernière colonne, les surfaces cultivées en 1970 indiquées par le "Projet" à Saint-Louis en les rattachant, dans toute la mesure du possible, aux régions que nous avons définies.

En amont du défluent du Doué cela a été simple mais, en aval, des problèmes sont apparus. Par exemple, l'île A Morphil et la rive gauche du Doué ne sont pas individualisées. La comparaison n'est donc pas toujours directe mais elle reste quand même intéressante (les résultats sont exprimés en km²).

Régions	Crue de 1968	Crue de 1970	Crue artificielle 1	Crue artificielle 2	Crue artificielle 3	surfaces culti- vées en 1970
Waoun RDS	46	66 100	56 85	52	5 20	7
Waoun RGS	93	129 200	106 165	103	28 45	17,30
Matam RDS	166	281 525	271 490	254	60 120	81,90
Matam RGS	212	329 487	304 435	283	80 122	72,70
Kaédi RDS	20	68 80	70 80	47	4 10	10,40
Kaédi RGS	204	481 580	475 565	403	40 140	74,20
Diorb RDS	234	355 677	356 678	306	184 174	128,15
Diorb RGS	264	320 590	320 518	314	187 230	103,10
Saldé RDS	29	98 120	101 125	69	15 16	73
Île amont	41	145 175	145 175	89	18 47	
N'Goui RGD	46	98 110	99 110	81	20 13	65
Boghé RDS	73	116 168	118 170	102	47 45	58
Île Centr	57	242 305	247 310	161	20 44	142,5*
Podor RDS	63	177 220	183 223	119	17 32	76
Île aval	95	216 391	220 391	160	65 157	
Guédé RGD	90	123 148	124 188	113	66 43	48
Dagana RDS	152	344 385	360 392	252	84 65	52,50
Dagana RGS	118	352 455	358 465	260	62 52	87,50 **
Rosso RDS	83	266 235	262 150	198	55 42	38
Surfaces totales	2 086	4 210	4 195	3 367	1 057	1 135,25

* Avec une partie de la rive gauche du Doué

** Avec île aval

Les résultats de ce tableau montrent l'effet de l'aplatissement de l'onde de crue de la crue artificielle 2 en aval de Boghé.

On constate aussi que la crue de 1968 a submergé une superficie double de celle cultivée dans la vallée en 1970. Or, bien que la crue de 1968 ait été faible, les cultures de décrues ont pu être réalisées dans des conditions moyennes, ce qui laisse entendre qu'il faut que la superficie totale inondée dépasse 2 000 km² dans la Vallée pour que les ressources de subsistance soient au moins assurées.

La crue artificielle 3 est, par contre, nettement insuffisante car la surface maximale inondée est inférieure à la surface cultivée en 1970. Cette dernière surface correspond approximativement à 25% de la surface maximale inondée (surface cultivée de 1 135 km² pour une surface maximale inondée de 4 210 km²). (Nous devons rappeler que les surfaces maxi-