



1080

MODÈLE MATHÉMATIQUE DE LA VALLÉE DU SÉNÉGAL



RAPPORT SUR LE RÉGLAGE DU MODÈLE



TEXTE

SOCIÉTÉ GRENOBLOISE
D'ÉTUDES ET
D'APPLICATIONS
HYDRAULIQUES

GRENOBLE FRANCE

N°80

SOMMAIRE

<u>ABSTRACT</u>	1
<u>INTRODUCTION</u>	3
<u>CHAPITRE I</u> - CHAPITRE PRELIMINAIRE DEFINISSANT LE BUT DE L'ETUDE, SON DEROULEMENT, LES RESULTATS GENERAUX ACQUIS ET PRÉCISANT LES CONCLUSIONS UTILES	4
1. BUT DE L'ETUDE	4
2. DEROULEMENT DE L'ETUDE	4
3. EXTENSION GEOGRAPHIQUE DES ETUDES	6
4. DEFINITION SOMMAIRE DES MODELES UTILISES	8
5. RESULTATS ACQUIS AU COURS DU REGLAGE DU MODELE MAILLE	9
6. CONSIDERATIONS SUR CES RESULTATS	12
7. CONCLUSIONS SUR LE REGLAGE DU MODELE	15
8. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES FACONS D'AMELIORER LES CONNAISSANCES SUR LE FLEUVE	16
<u>CHAPITRE II</u> - FORMULATION MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE	18
1. FORMULATION MATHEMATIQUE	18
1.1 Découpage du modèle	18
1.2 Lois d'échanges entre casiers	19

2.	RESOLUTION NUMERIQUE	22
2.1	Schéma explicite	23
2.2	Schéma implicite	23
2.3	Choix du schéma	24
3.	PROGRAMMATION	25
3.1	Principes généraux	25
3.2	Conditions aux limites	28
4.	CONSTRUCTION DU PROGRAMME	30
4.1	Etat initial	30
4.2	Données variables dans le temps	30
4.3	La définition topologique du modèle	30
4.4	La définition des casiers	30
4.5	La définition des liaisons	31
<u>CHAPITRE III - LE REGLAGE DU MODELE MAILLE</u>		32
1.	GENERALITES	32
2.	LE MODELE, SA CONSTRUCTION	32
2.1	Les données topographiques	33
2.2	Le découpage du modèle	33
2.3	Préparation des données topographiques	34
2.4	Assemblage du modèle	35
2.5	Les données de crue	35
2.6	Les données de contrôle	35
3.	PRINCIPE DU REGLAGE	36
3.1	Bases du réglage	36
3.2	Cheminement suivi pour le réglage	36
3.3	Processus du réglage	37
4.	REGLAGE DU TRONCON GOUINA-BAKEL	37
4.1	Réglage du tronçon Gouina aval-Félou amont	38
4.2	Réglage du tronçon Félou aval- Bakel	39
5.	REGLAGE DU TRONCON BAKEL-KAEDI	40
5.1	Eléments disponibles permettant le contrôle	40
5.2	Reproduction des débits	41
5.3	Reproduction des niveaux	42
6.	REGLAGE DU TRONCON KAEDI-DAGANA	43
6.1	Eléments disponibles permettant le contrôle du réglage	43
6.2	Reproduction des débits	44
6.3	Reproduction des niveaux	46
6.4	Conclusion sur le réglage du secteur Kaédi-Dagana	48

7.	RECLAGE DU MODELE DE DAGANA A SAINT-LOUIS	48
7.1	Eléments disponibles permettant le contrôle du réglage	48
7.2	Reproduction des débits	48
7.3	Reproduction des niveaux	50
8.	CONCLUSION A CE STADE DE L'ETUDE	51

CHAPITRE IV - PASSAGE DE LA PREMIERE CRUE DE CONTROLE ET AMELIORATION DU REGLAGE 52

1.	DEROULEMENT DE CETTE PHASE D'ETUDE	52
2.	PASSAGE DE LA PREMIERE CRUE DE CONTROLE	52
2.1	Choix de la crue de contrôle	52
2.2	Résultats obtenus	53
2.3	Analyse des résultats	54
2.4	Conclusion partielle	54
3.	AMELIORATION DU REGLAGE POUR LES BAS NIVEAUX	55
4.	RESULTATS OBTENUS AVEC LES CRUES DE 1964 - 1966 ET 1968	56
4.1	Précisions moyennes absolues	56
4.2	Reproduction des niveaux maximaux	57
4.3	Analyse des résultats	58
5.	CRITIQUE DE LA CRUE DE 1964	58
6.	CRITIQUE DE LA CRUE DE 1966	59
7.	CRITIQUE DE LA CRUE DE 1968	60

CHAPITRE V - PASSAGE SUR LE MODELE DE LA CRUE DE 1969 COMME DEUXIEME CRUE DE CONTROLE 61

1.	CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA CRUE DE 1969	61
2.	CARACTERISTIQUES DES ESSAIS REALISES	61
3.	EXAMEN DES RESULTATS DU PREMIER CALCUL - CRUE 1969 ₁	62
3.1	Considérations générales	62
3.2	Résultats acquis	63
3.3	Analyse des résultats	63
4.	EXAMEN DES RESULTATS DU DEUXIEME CALCUL - CRUE 1969 ₂	64
4.1	Considérations sur la crue 1969 ₂	64
4.2	Résultats acquis	65
5.	CONCLUSION	65

<u>CHAPITRE VI - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</u>	66
1. CONCLUSIONS	66
2. TYPES D'EXPLOITATION DU MODELE QUE L'ON PEUT ENVISAGER	66
2.1 Etude statistique des surfaces inondées	66
2.2 Etude d'un barrage intermédiaire	67
2.3 Etude de l'influence d'endiguements partiels sur l'évolution des crues	67
2.4 Etude du débit régularisé minimal permettant d'atteindre un but hydro-agricole fixé	67
2.5 Etude des problèmes liés à la navigation	67
3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES ETUDES A REALISER POUR PARVENIR A UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU FLEUVE	68
3.1 Le Sénégal de Gouina à Bakel	68
3.2 Le Sénégal de Bakel à Kaédi	69
3.3 Le Sénégal de Kaédi à Dagana	69
3.4 Le Sénégal de Dagana à Saint-Louis	69
<u>ANNEXES</u>	71
ANNEXE 1 - DEFINITION DE LA CRUE DE 1964	72
ANNEXE 2 - DEFINITION DE LA CRUE DE 1968	77
ANNEXE 3 - DEFINITION DE LA CRUE DE 1966	79
ANNEXE 4 - DEFINITION DE LA CRUE DE 1969	82
ANNEXE 5 - LE MODELE UNIDIMENSIONNEL	90

LISTE DES GRAPHIQUES

- Graphique n° 1 - Modèle unidimensionnel. Crues de 1964 et 1965 à Gouina.
- Graphique n° 2 - Modèle unidimensionnel. Crue de 1964 dans le Sénégal.
- Graphique n° 3 - Modèle unidimensionnel. Crue de 1965 dans le Sénégal.
- Graphique n° 4 - Modèle maillé. Crue de 1964 dans le Sénégal.
- Graphique n° 5 - Modèle maillé. Crue de 1968 dans le Sénégal.
- Graphique n° 6 - Modèle maillé. Crue de 1966 dans le Sénégal.
- Graphique n° 7 - Modèle maillé. Crue de 1964 dans le Sénégal.
- Graphique n° 8 - Modèle maillé. Crue de 1964 dans le Doué.
- Graphique n° 9 - Modèle maillé. Crue de 1964 dans le delta du Sénégal.
- Graphique n° 10 - Modèle maillé. Modèle Gouina-Saint-Louis. Crue 1966, dans le Sénégal.
- Graphique n° 11 - Modèle maillé. Modèle Gouina-Saint-Louis. Crue 1966, dans le Doué.
- Graphique n° 12 - Modèle maillé. Modèle Gouina-Saint-Louis. Crue 1966, dans le delta du Sénégal.
- Graphique n° 13 - Modèle maillé. Modèle Bakel-Saint-Louis. Crue 1966, dans le Sénégal.
- Graphique n° 14 - Modèle maillé. Modèle Bakel-Saint-Louis. Crue 1966, dans le Doué.
- Graphique n° 15 - Modèle maillé. Modèle Bakel-Saint-Louis. Crue 1966, dans le delta du Sénégal.
- Graphique n° 16 - Modèle maillé. Crue 1968 dans le Sénégal.
- Graphique n° 17 - Modèle maillé. Crue 1968 dans le Doué.
- Graphique n° 18 - Modèle maillé. Crue 1968 dans le delta du Sénégal.
- Graphique n° 19 - Modèle maillé. Crue 1969, dans le Sénégal, sans le Gorgol.
- Graphique n° 20 - Modèle maillé. Crue 1969, dans le Doué, sans le Gorgol.
- Graphique n° 21 - Modèle maillé. Crue 1969, dans le delta du Sénégal, sans le Gorgol.
- Graphique n° 22 - Modèle maillé. Crue 1969, dans le Sénégal, avec le Gorgol.
- Graphique n° 23 - Modèle maillé. Crue 1969, dans le Doué, avec le Gorgol.
- Graphique n° 24 - Modèle maillé. Crue 1969, dans le delta du Sénégal, avec le Gorgol.

LISTE DES FIGURES

- Figure 1 - Carte du Sénégal.
- Figure 2 - Schéma topologique.
- Figure 3 - Loi hauteur-débit à Kayes.
- Figure 4 - Loi hauteur-débit à Ambidédi.
- Figure 5 - Loi hauteur-débit à Bakel.

ABSTRACT

Dans le cadre de l'étude de l'aménagement hydro-agricole de la vallée du Sénégal conduite par l'Organisation des Nations Unies pour la nourriture et l'agriculture (F.A.O.), SOGREAH a été retenue pour l'étude, sur modèle mathématique, de la propagation des crues du Sénégal entre Gouina et St-Louis .

SOGREAH doit mettre au point un outil capable de reproduire la propagation des crues dans l'état naturel, avec une précision acceptable sur les niveaux, et de donner au Maître d'Oeuvre des indications valables sur l'influence que les aménagements projetés auront sur des crues naturelles ou artificielles .

L'étude se décompose en deux phases bien distinctes . La première consiste, après avoir construit le modèle, à le régler à l'aide d'un certain nombre de crues représentatives des régimes du Sénégal . La seconde représente l'exploitation du modèle dans le cadre des avant-projets élaborés par la F.A.O.

Le présent rapport ne traite que de la première phase, c'est-à-dire du réglage du modèle maillé .

Le réglage a été réalisé au moyen de trois crues caractéristiques du Sénégal : une crue forte (1964), une crue moyenne (1966) et une crue faible (1968) . La qualité du réglage a été ensuite contrôlée par une crue moyenne (1969) .

Les résultats montrent que le modèle peut être considéré comme représentatif des conditions naturelles d'écoulement dans la gamme des niveaux étudiés . La précision moyenne obtenue est moins bonne que celle prévue au contrat ; elle reste cependant satisfaisante car elle intègre un nombre d'inconnues assez grand . Ces inconnues ne pourraient être levées qu'après des campagnes de mesures qui devraient être entreprises pendant plusieurs années . Leurs résultats ne seraient donc pas utiles au modèle .

La conclusion essentielle est que le modèle peut répondre à un certain nombre de questions, telles que :

- étude des surfaces inondées par les crues naturelles ;
- étude d'endiguements partiels ;
- étude de crues artificielles modulées à partir de barrages accumulateurs amont ;
- étude de barrage de reprise .

Par contre, si l'on voulait étudier des crues de "réquences centennale ou milléniale avec un endiguement général de la vallée, il faudrait aménager le modèle afin de rendre les lois d'échange des débits compatibles avec les niveaux qui seraient atteints . Ces niveaux seraient en effet nettement supérieurs à ceux qui existeraient dans l'état actuel .

Il en est de même des études relatives à la navigation. En effet, on ne pourra donner aux résultats une valeur absolue trop grande car les points de calcul des lits mineurs sont trop distants pour permettre une représentation correcte des faibles niveaux caractéristiques des régimes d'étiage.

000

INTRODUCTION

Ce rapport présente la façon dont le modèle mathématique maillé de la Vallée du Sénégal a été conçu (formulations mathématiques), construit à partir des données topographiques et réglé .

Le modèle mathématique de la Vallée du Sénégal est un modèle dit maillé . C'est-à-dire qu'il l'encontre d'un modèle unidimensionnel classique qui suppose que les écoulements se font uniquement d'amont en aval et que les niveaux dans les lits mineur et majeur sont à chaque instant égaux en une section, le modèle maillé permet de tenir compte des écoulements réels dans les lits mineur et majeur . Par écoulements réels nous entendons des écoulements qui peuvent aller d'amont en aval dans les lits mineurs, des lits mineurs vers les lits majeurs ou vice-versa, de mailles du lit majeur à mailles du lit mineur, dans le sens d'amont vers l'aval ou de l'aval vers l'amont ou de droite à gauche ou en sens contraire . Le modèle prend donc en considération les écoulements tels qu'ils se produisent dans la nature .

La construction du modèle se traduit par la représentation numérique de la topographie et de l'hydrographie du fleuve et de son champ d'inondation et par l'élaboration des méthodes qui permettent de simuler une crue . Le réglage consiste en l'ajustement au moyen de crues de réglage des paramètres hydrauliques introduits dans le modèle, de manière à ce que n'impose quelle crue naturelle du Sénégal puisse être reproduite avec une précision acceptable compte tenu de la qualité des données .

Ce rapport est une synthèse de la première phase des études confiées à SOGREAH par la F.A.O. . Il correspond à une clause du contrat d'étude .

Nous y trouverons les chapitres suivants :

- Chapitre I - Chapitre préliminaire qui présente sommairement le modèle, le déroulement de l'étude, les résultats obtenus et les conclusions générales que l'on peut en tirer ;
- Chapitre II - Formulation mathématique et numérique ;
- Chapitre III - Le réglage du modèle maillé ;
- Chapitre IV - Passage de la première crue de contrôle et amélioration du réglage du modèle ;
- Chapitre V - Passage sur le modèle de la crue de 1969 comme deuxième crue de contrôle ;
- Chapitre VI - Conclusions et recommandations .

A la fin du rapport se trouvent cinq annexes . Les quatre premières concernent la définition des crues étudiées sur le modèle maillé et la dernière traite du modèle unidimensionnel .

Chapitre I

CHAPITRE PRELIMINAIRE DEFINISSANT LE BUT DE L'ETUDE, SON DEROULEMENT, LES RESULTATS GENERAUX ACQUIS ET PRECISANT LES CONCLUSIONS UTILES

1. BUT DE L'ETUDE

L'étude sur modèle mathématique de la propagation des crues du Sénégal a pour but de mettre à la disposition de la F.A.O. un moyen de vérifier rapidement l'effet des aménagements hydro-agricoles projetés sur les conditions naturelles d'écoulement des crues .

Les résultats attendus demandent donc un réglage préalable du modèle, afin d'être assuré que les indications qu'il donnera au cours de son exploitation auront une valeur relative sûre sinon une valeur absolue certaine . Nous distinguerons ces deux définitions de qualité du modèle car on n'est jamais certain de la qualité des données et que, par conséquent, la comparaison directe entre deux états conduit à des enseignements d'une crédibilité plus grande que la prise en compte de valeurs absolues .

Le modèle mathématique qui permet le mieux de reproduire des écoulements naturels dans le cas du Sénégal est un modèle maillé ; c'est-à-dire que le Sénégal et sa vallée sont divisés en casiers ou mailles reliés les uns aux autres par des lois d'échange des débits . Cette schématisation permet de retrouver des écoulements conformes à ceux observés dans la nature et, surtout, n'oblige pas à avoir, à chaque instant, les mêmes niveaux dans les lits mineur et majeur dans un profil en travers du fleuve, ce qui est le cas d'un modèle mathématique unidimensionnel .

2. DEROULEMENT DE L'ETUDE

Dans le paragraphe ci-dessus nous avons fait allusion à deux types de modèles mathématiques fluviaux : les modèles unidimensionnel et maillé .

Ces deux modèles ont été utilisés pour l'étude de la propagation des crues du Sénégal . Leurs objectifs étaient différents puisque les résultats que l'on peut attendre d'eux le sont également .

Nous avons donc commencé par construire un modèle unidimensionnel de la Vallée du Sénégal en respectant cependant un certain nombre de règles permettant de profiter du travail qui lui était consacré pour le modèle maillé qui était le modèle principal. Ce premier modèle a été prévu car il permet une mise en œuvre plus rapide ainsi qu'un réglage plus souple car le modèle est moins lourd à exploiter.

Il avait pour but de tester les données topographiques, hydrographiques et hydrologiques d'une part et d'autre part, de régler les écoulements du lit mineur quand il n'y a pas de lit majeur (tronçon Gouina-Bakel). Ceci avait été rendu possible par un aménagement des programmes de calculs des écoulements fluviaux.

Ce modèle a été utilisé de novembre 1968 à février 1969 ; l'arrêt des essais a été décidé au cours de la réunion tenue à Grenoble les 24 et 25 février 1969.

Pendant cette période la construction du modèle maillé s'est poursuivie et le premier calcul a été réalisé le 21 février 1969. A partir de cette date nous nous sommes attachés au réglage du modèle maillé sur les crues de 1964 et 1968. Le choix de ces crues n'est pas arbitraire. En effet, nous avions initialement retenu les crues de 1964 et 1965 car elles étaient associées à des campagnes de mesures ORSTOM ; la crue de 1965 étant assez semblable à celle de 1964, il nous a été demandé de conserver la crue forte (1964) et de choisir une autre crue parmi les plus faibles. La crue de 1968 présente cette qualité et a aussi l'avantage d'être postérieure à la construction de la digue périphérique du delta rive gauche du Sénégal (construction réalisée pendant la saison sèche 1964).

Le réglage sur ces deux crues s'est poursuivi jusqu'au mois d'août 1969 ; au cours de la réunion des 7 et 8 août 1969 à Grenoble, nous étions à même de présenter les résultats qui allaient être exposés dans le rapport semestriel n° 3. Ce rapport semestriel concluant que le modèle maillé pouvait être considéré comme réglé, une réunion s'est tenue à Rome le 18 novembre 1969. Il nous a été demandé à la suite de ces entretiens, le 25 novembre 1969, de faire passer la première crue de contrôle sur le modèle. Les résultats ont été envoyés le 30 décembre 1969 et, au cours de la réunion des 19 et 20 janvier 1970, il fut décidé de poursuivre le réglage sur cette troisième crue. Les résultats furent acquis fin avril et firent l'objet du rapport semestriel n° 4 envoyé le 14 mai 1970.

La réunion des 11 et 12 juin qui suivit cet envoi amena un constat des consultants que l'on peut résumer ainsi : compte tenu des inconnues et des incertitudes concernant certaines données, on peut considérer que le modèle maillé est acceptable dans son état actuel et qu'il est suffisamment précis pour les types d'exploitation que l'on peut envisager. Afin d'étayer cette conclusion, il nous fut également demandé de faire passer sur le modèle une quatrième crue, celle de 1969, au titre de deuxième crue de contrôle. Ce travail a été réalisé et les résultats envoyés le 7 juillet 1970 ; depuis on a considéré que le modèle maillé est réglé au mieux des connaissances actuelles concernant le Sénégal et qu'il peut donc être exploité dans le cadre des avant-projets hydro-agricoles dressés par la F.A.O. .

3. EXTENSION GEOGRAPHIQUE DES ETUDES

La vallée du Sénégal représentée par le modèle correspond à 1 000 km de fleuve depuis la limite amont (Gouina) jusqu'à la limite aval (Saint-Louis) .

Ces 1 000 km comprennent deux parties distinctes :

- une partie amont à forte pente entre Gouina et Bakel (PK 202) coupée de rapides (Gouina, chutes du Félou) ; la vallée est encaissée et il n'y a pas de débordement caractérisé ;
- une partie à faible pente, en aval de Bakel ; la vallée s'élargit progressivement jusqu'au delta du Sénégal . Elle est inondée annuellement sur 10 à 30 km de largeur selon les crues ; c'est la vallée proprement dite, lieu des cultures de décrue.

Cette vallée peut, à son tour, être divisée en trois tronçons :

- de Bakel à Kaédi (km 464) où l'inondation se fait surtout en rive gauche . On y trouve le marigot de Diavagne qui alimente la rive gauche et la draine en décrue ;
- de Kaédi à Dagana (km 827) . Le Sénégal, entre les points kilométriques 515 et 750 se divise en deux bras : le Doué à gauche et le Sénégal à droite . La vallée est alors divisée en trois zones distinctes :
 - entre le Doué et le diéri sénégalais,
 - entre le Doué et le Sénégal, l'Ile A. Morphil,
 - entre le Sénégal et le diéri mauritanien (lao, toro),
- de Dagana à Saint-Louis (km 996).

Entre Dagana et Rosso (km 863), le Sénégal se resserre sur son lit mineur et, ensuite, on trouve l'élargissement du delta du Sénégal . Côté Sénégal l'expansion est actuellement limitée par la digue périphérique rive gauche construite en 1964 . Côté Mauritanie le lit s'élargit et prend une grande importance avec la dépression de l'Aftout Es Sahel qui s'étend jusqu'à Nouakchott . Cette dépression est intéressée par les crues supérieures à la moyenne .

Les deux affluents principaux du Sénégal sont :

- La Falémé en rive gauche ; son confluent se trouve à une trentaine de kilomètres en amont de Bakel . Ses débits sont connus à Kidira, 50 km en amont du confluent ;
- le Gorgol en rive droite ; il débouche à hauteur de Kaédi et son cours inférieur constitue le oualodou Gorgol . Ses débits sont mal connus .

On trouve également des affluents mineurs, tous situés en rive droite et en amont du Gorgol . On a ainsi :

- le Kolimbiné au PK 66,5 entre Félou et Kayes ;
- le Karakoro au PK 149 en amont du confluent du Sénégal et de la Falemé (PK 172) ;

- le Niordé (PK 260) en amont de Waoundé ;
- le Ghorfa (PK 321) entre Waoundé et Matam ;

A partir de Dagana on trouve un certain nombre de défluents, les débits empruntés ne revenant plus au Sénégal. Nous avons :

- le lac de R'Kiz à hauteur de Dagana (PK 827) ;
- le lac de Guiers à hauteur de Richard-Toll (PK 851) ;
- les ouvrages de la rive gauche du delta du Sénégal : N'Tiagar (PK 863), Ronq (PK 889), Diaouar (PK 896), Caimans (PK 914), Dieg (PK 944) ;
- l'Aftout Es Sahel (PK 950) à hauteur de Débi.

Les stations limnimétriques s'échelonnent tout au long du Sénégal et du Doué. Nous avons :

- sur le Sénégal :

Gouina	PK	0'
Félou amont et aval	PK	57
Kayes	PK	73,50
Ambidédi	PK	115,50
Bakel	PK	202
Waoundé	PK	282
Matam	PK	373
Kaédi	PK	464
Défluence du Doué	PK	514
Saldé	PK	522
Boghé	PK	617
Podor	PK	729
Confluence du Doué	PK	751
Dagana	PK	827
Richard-Toll	PK	851
Rosso	PK	863
Ronq	PK	889
Diaouar	PK	896
Caimans	PK	914
Débi	PK	930
Saint-Louis	PK	996

- Sur le Doué, en repérant les stations par rapport au Sénégal :

N'Goui	PK 522
Guédé	PK 686

4. DEFINITION SOMMAIRE DES MODELES UTILISES

Avant d'aller plus loin, nous pensons qu'il est intéressant de définir en quelques mots les caractéristiques principales des deux modèles utilisés .

4.1 Le modèle unidimensionnel

C'est un modèle qui permet de résoudre les équations de Saint-Venant en supposant que les écoulements ne peuvent se faire que parallèlement à l'axe du lit et que les niveaux d'eau dans les lits majeur et mineur sont, dans une section quelconque du modèle, égaux à chaque instant . C'est donc un modèle relativement simple à mettre en oeuvre et à utiliser ; cependant, il est limité, dans un cas semblable à celui du Sénégal, dans son exploitation après réglage . De plus, quand les écoulements dans le lit majeur sont loin d'être négligeables, il ne peut traduire les écoulements réels et, en particulier les échanges de débit entre les différentes parties du fleuve .

Il n'a donc eu qu'un rôle limité en apparence, celui de tester les données . En réalité, il a servi très utilement car il nous a montré les zones où des problèmes se posent . Ces zones ont été retrouvées sur le modèle maillé et la résolution des problèmes n'a pas toujours été possible . Les études et résultats acquis à l'aide de ce modèle sont consignés dans l'annexe n° 5, en fin du rapport .

4.2 Le modèle maillé

C'est un modèle plus complexe car il permet aux écoulements de se faire dans des sens semblables à ceux observés dans la nature . De plus, les niveaux dans les différentes mailles qui sont associées à une maille du lit mineur peuvent être très différents et ne dépendent que des lois d'échange des débits entre mailles et des lois de volume des mailles .

C'est donc un modèle qui permet, quand les points de contrôle sont nombreux et les données complètes, de reproduire des écoulements naturels avec une grande précision . Dans le cas où les renseignements disponibles sont moins nombreux, il permet cependant de schématiser les écoulements avec une plus grande fidélité que le modèle unidimensionnel .

Nous n'entrerons pas dans le détail du modèle car un chapitre du rapport lui sera consacré ; dans ce chapitre nous définirons la façon dont les équations sont prises en compte par le programme de calcul ainsi que le principe de la résolution numérique .

5. RESULTATS ACQUIS AU COURS DU REGLAGE DU MODELE MAILLE

5.1 Généralités

Le réglage du modèle a été, ainsi que nous l'avons dit dans le paragraphe 2 de ce chapitre, réalisé au moyen des crues de 1964, 1968 et 1966 .

Les deux premières crues citées ont été celles qui ont permis le réglage d'ensemble, la crue de 1966 ayant servi à améliorer certaines zones de ce même réglage .

Le réglage a été rendu long et laborieux en raison du manque de connaissance sur le processus d'inondation du lit majeur et aussi sur les conditions d'écoulement car les échelles existantes sont toutes dans le lit mineur . De plus, un certain nombre de données participant à la genèse ou à l'évolution de l'onde de crue manquaient et il a donc fallu essayer de les déterminer car leur influence se fait sentir sur certains tronçons du fleuve . Les négliger conduit à diminuer la précision tandis que les prendre en compte entraîne l'apparition de paramètres supplémentaires qu'il n'est pas logique, en principe, de considérer comme tels .

Contractuellement, les critères du réglage sont uniquement basés sur les niveaux, le contrat précisant que : "une précision de ± 10 cm sur les niveaux moyens du lit mineur sera jugée satisfaisante . Cette précision sera calculée en effectuant la moyenne arithmétique des valeurs absolues des écarts journaliers constatés pendant une période de 6 mois correspondant au développement de la crue du flauve . En outre, les maxima de la crue seront déterminés avec un écart qui ne devra pas être supérieur à 10 cm sous réserve des mesures complémentaires sur le terrain dont l'exécution pourra être reconnue nécessaire conformément aux dispositions de l'article (5) (d)" .

Parvenir à une précision de ± 10 cm implique une connaissance topographique, hydrographique et hydrologique précise et homogène sur toute la surface du domaine représenté . Quand il n'en est pas ainsi, le moindre flottement dans les données pénalise considérablement le réglage .

O'est pourquoi cette clause assez sévère concernant la précision était tempérée par le texte du paragraphe (e) article V "Le Modèle sera établi d'après les documents existants à la signature du contrat . Si la précision du réglage du modèle spécifiée à l'article 1 (c) (iii) ci-dessus n'est pas atteinte, il appartiendra à l'Organisation de décider sur la nécessité ou non d'entreprendre des mesures complémentaires sur le terrain . Tout programme complémentaire ainsi décidé en vue des résultats du réglage du modèle n'est pas compris dans le présent contrat" .

Après passage de la deuxième crue de contrôle (1969), la précision moyenne générale sur l'ensemble des 4 crues est de 0,14 m et le modèle est considéré comme réglé .

5.2 Résultats du réglage

Dans les tableaux suivants nous avons porté les précisions moyennes absolues obtenues aux différentes stations du fleuve ainsi que les valeurs des maxima observés et calculés et leurs écarts .

Les crues de référence sont celles de :

- 1964 sur le modèle Gouina - Saint-Louis ;
- 1966₁ sur le modèle Gouina - Saint-Louis ;
- 1966₂ sur le modèle Bakel - Saint-Louis ;
- 1968 sur le modèle Gouina - Saint-Louis ;
- 1969₁ sur le modèle Gouina - Saint-Louis sans tenir compte du Gorgol ;
- 1969₂ sur le modèle Gouina - Saint-Louis en tenant compte du Gorgol .

Stations	1964	1966 ₁	1966 ₂	1968	1969 ₁	1969 ₂
Félou aval	0,094	0,109		0,086	0,120	0,120
Kayes	0,083	0,119		0,077	0,106	0,106
Ambidédi	0,095	0,121		0,067		
Bakel	0,104	0,192		0,145	0,171	0,170
Waoundé	0,143	0,127	0,070	0,145	0,158	0,158
Matam	0,108	0,197	0,159	0,168	0,172	0,169
Kaédi	0,104	0,211	0,151	0,195	0,232	0,182
Saldé	0,128	0,192	0,187	0,227	0,283 (0,245)	0,212 (0,174)
N'Goui	0,128	0,199	0,175	0,136	0,187	0,123
Boghé	0,128	0,199	0,185	0,228	0,299	0,217
Guédé	0,138	0,150	0,163			
Podor	0,089	0,115	0,155	0,122	0,200	0,144
Dagana	0,110	0,118	0,130	0,081	0,136	0,116
Richard-Toll	0,113	0,075	0,108	0,082	0,100	0,102
Rosso	0,123	0,107	0,124	0,104		
Ronq	0,113	0,090	0,126		0,119	0,102

Les précisions entre parenthèses à Saldé, pour les crues de 1969₁ et 1969₂ correspondent à des corrections apportées aux observations naturelles qui semblent être entachées d'une erreur systématique pendant la période correspondant au maximum de la crue .

Les résultats partiels du tableau ci-dessus conduisent aux précisions moyennes suivantes :

- 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

On remarque donc que les précisions restent acceptables ; ce sont les crues de réglage (1964 et 1968) qui conduisent aux meilleurs résultats.

Dans les tableaux suivants nous avons porté les valeurs des maxima observés ($Z_{\max N}$) et calculés ($Z_{\max C}$) et les différences
 $\Delta Z_{\max} = Z_{\max C} - Z_{\max N}$

Stations	1964			1968		
	$Z_{\max N}$ (I.G.N.)	$Z_{\max C}$ (I.G.N.)	ΔZ_{\max} (m)	$Z_{\max N}$ (I.G.N.)	$Z_{\max C}$ (I.G.N.)	ΔZ_{\max} (m)
Felou aval	32,16	32,43	+ 0,27	28,51	28,59	+ 0,08
Kayes	31,68	31,77	+ 0,09	27,62	27,70	+ 0,08
Ambidédi	28,54	28,40	- 0,14	24,69	24,81	+ 0,12
Bakel	23,72	23,66	- 0,06	20,12	20,13	+ 0,01
Waoundé	19,53	19,53	0	17,24	17,00	- 0,24
Matam	15,94	15,89	- 0,05	13,81	13,71	- 0,10
Kaédi	12,77	12,80	- 0,03	10,85	10,82	- 0,03
Saldé	11,49	11,48	- 0,01	9,18	9,11	- 0,07
N'Goui	11,35	11,29	- 0,06	9,12	9,13	+ 0,01
Boghé	8,91	8,86	- 0,05	7,01	6,86	- 0,15
Guédé	6,87	6,93	+ 0,06			
Podor	6,10	6,10	0	3,94	4,02	+ 0,08
Dagana	4,08	4,08	0	2,36	2,36	0
Richard-Toll	3,51	3,54	+ 0,03	1,99	1,96	- 0,03
Rosso	3,32	3,37	+ 0,05	1,92	1,83	- 0,09
Ronq	2,93	3,08	+ 0,15			

Stations	19661			19662		
	$Z_{\max N}$ (I.G.N.)	$Z_{\max C}$ (I.G.N.)	ΔZ_{\max} (m)	$Z_{\max N}$ (I.G.N.)	$Z_{\max C}$ (I.G.N.)	ΔZ_{\max} (m)
Felou aval	30,36	30,54	+ 0,18			
Kayes	29,62	29,79	+ 0,17			
Ambidédi	26,95	27,11	+ 0,16			
Bakel	22,86	23,18	+ 0,32			
Waoundé	19,11	19,25	+ 0,14	19,11	19,05	- 0,06
Matam	15,59	15,63	+ 0,04	15,59	15,50	- 0,09
Kaédi	12,38	12,51	+ 0,13	12,38	12,41	+ 0,03
Saldé	10,99	11,08	+ 0,09	10,99	10,95	- 0,04
N'Goui	10,83	10,91	+ 0,08	10,83	10,79	- 0,04
Boghé	8,55	8,50	- 0,05	8,55	8,41	- 0,14
Guédé	6,62	6,57	- 0,05	6,62	6,50	- 0,12
Podor	5,64	5,65	+ 0,01	5,64	5,52	- 0,12
Dagana	3,60	3,79	+ 0,19	3,60	3,71	+ 0,11
Richard-Toll	2,94	3,05	+ 0,11	2,94	2,97	+ 0,03
Rosso	2,63	2,77	+ 0,14	2,63	2,69	+ 0,06

Stations	19691			19692		
	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)
Félou aval	29,78	29,68	- 0,10	29,78	29,68	- 0,10
Kayes	28,87	28,94	+ 0,07	28,87	28,94	+ 0,07
Bakel	21,27	21,52	+ 0,25	21,27	21,52	+ 0,25
Waoundé	18,20	18,18	- 0,02	18,20	18,18	- 0,02
Natam	14,81	14,79	- 0,02	14,81	14,80	- 0,01
Kaédi	11,95	11,86	- 0,09	11,95	11,88	- 0,07
Saldé	10,59	10,31	- 0,28	10,59	10,33	- 0,26
N'Goui	10,23	10,22	- 0,01	10,23	10,24	+ 0,01
Boghé	8,00	7,87	- 0,13	8,00	7,90	- 0,10
Podor	5,14	5,05	- 0,09	5,14	5,07	- 0,07
Dagana	3,20	3,32	+ 0,12	3,20	3,34	+ 0,14
Richard-Toll	2,73	2,80	+ 0,07	2,73	2,81	+ 0,08
Rong	2,35	2,35	0	2,35	2,36	+ 0,01

A ces tableaux sont annexés les graphiques 7 à 24 qui montrent la reconstitution des crues par le modèle (les croix portées sur les graphiques correspondent aux observations nature, les traits continuos aux limnigrammes calculés) .

6. CONSIDERATIONS SUR CES RESULTATS

- 6.1 On remarque que les précisions et les écarts entre les niveaux maxima calculés et observés ne sont pas toujours homogènes pour une même station mais que dans l'ensemble ils répondent, du moins pour ces derniers, à des valeurs assez peu différentes des + 10 cm contractuels. En effet, aux stations où les différences sur les écarts au maximum de la crue sont grands, on constate qu'ils sont supérieurs à 0,25 m en général et qu'alors on ne peut plus considérer que le modèle est seul en cause ; les crues étudiées représentent une gamme assez étendue des crues du Sénégal et il s'ensuit que souvent les écarts maxima apparaissent pour des cotes qui pour d'autres crues ne conduisent pas à des écarts anormaux .
- 6.2 Les graphiques 7 à 24 montrent les résultats obtenus aux stations équipées d'échelles limnimétriques . Les évolutions des crues sont assez bien reproduites bien que pour les crues faibles on note une certaine déformation de l'onde de crue ; ces déformations tendent à retarder la montée de la crue et la décrue . Il est bien évident alors que la précision moyenne est pénalisée très fortement car les gradients sont souvent pendant ces périodes de plusieurs décimètres par jour .

- 6.3 Les déformations des ondes de crues sont dues au fait que chaque crue a son caractère propre et que la façon dont le lit majeur intervient diffère à chaque fois. En effet, les marigots qui font communiquer les lits mineurs avec les lits majeurs comportent des seuils sableux ou limoneux qui sont plus ou moins vite érodés selon la crue. Il s'ensuit donc qu'une crue faible n'aura pas la puissance de les détruire tandis qu'une crue forte le fera très rapidement. Les conditions dans lesquelles les lits majeurs sont intéressés par les crues sont donc légèrement différentes chaque année. Or, le modèle mathématique représente par définition un état moyen. Cette remarque ressort du réglage du modèle sur les crues de 1964 et 1968. La première, crue très forte, nous a amené à baisser les liaisons entre les lits majeur et mineur afin de faire participer au maximum la vallée à l'écoulement ; la seconde, crue très faible, demandait, pour être réglée, un exhaussement des mêmes seuils bas. Le modèle représente donc un état moyen dans lequel la crue de 1964 est correcte tandis que celle de 1968 est déformée.
- 6.4 De Matam à Podor les décrues modèle sont excédentaires pendant la phase de descente rapide, c'est-à-dire que les niveaux calculés sont nettement plus haut que les niveaux observés. Nous sommes parvenus à cette situation car à un stade du réglage, après avoir introduit la pluie et l'évaporation, nous avions un déficit de débit dans le tiers aval du modèle. Pour pallier cette insuffisance, nous avons alors abaissé un certain nombre de seuils de liaison entre les lits mineur et majeur afin de vidanger un peu plus les mailles du lit majeur. Nous avons donc récupéré du débit de cette manière, mais avons également accentué la déformation de l'onde de crue signalée au paragraphe 6.3.
- 6.5 Parmi les remarques que l'on peut faire, il en est une qui intéresse les débits transitant dans le lit majeur rive droite, au droit de Dagana. Les résultats de la crue de 1964 ont montré que le débit pouvait être important : de l'ordre de 1 250 m³/s au maximum. Les débits qui empruntent le lit mineur à Dagana sont en accord avec ceux que l'on peut évaluer à partir de la loi hauteur-débit et il n'est donc pas possible de les augmenter.

On se trouve donc devant un fait qui est en contradiction avec les commentaires de la littérature concernant le Sénégal et qui disent que les débits qui passent dans le lit majeur rive droite sont toujours négligeables.

Nous ne sommes pas parvenus à résoudre le problème car la propagation de la crue est telle qu'il n'est pas possible de retarder davantage ce débit. On pourrait peut-être admettre qu'une partie se perd dans les cordons inter-dunaires situés au Nord de Dagana, mais cela ne résoud pas encore la question.

6.6 Une difficulté du réglage provient aussi de la méconnaissance du processus dans lequel l'île A. Morphil intervient dans la propagation de la crue et les échanges entre le Doué et le Sénégal. En effet, en amont de l'île, les débits dans le Sénégal à Saldé et le Doué à N'Goui sont différents et le Doué l'emporte nettement sur le Sénégal. Par contre, dans la partie aval de l'Île A. Morphil, on a un renversement de cet état, les débits transitant dans le Sénégal à Podor étant nettement plus importants que ceux restant dans le Doué à Guédé et Guia. On assiste donc à un échange continu de débits entre le Doué et le Sénégal, les marigots de l'île A. Morphil servant de lien entre les deux lits mineurs. Il nous a fallu beaucoup de temps pour parvenir à un schéma raisonnable et cohérent avec les données disponibles.

6.7 En ce qui concerne les lois hauteur-débit, le modèle a montré que :

- la loi de Kayes est univoque, les écarts par rapport à la courbe moyenne présentant une dispersion minimale et englobant les derniers jaugeages ;
- celle d'Ambidédi, sous l'influence des niveaux de Bakel, présente un caractère non univoque pour les hauts niveaux ;
- celle de Bakel n'est pas univoque et doit présenter un caractère cyclique moins accentué qu'en aval cependant. La loi tracée à partir des résultats du modèle intègre parfaitement les derniers jaugeages effectués par la brigade hydrologique de Kayes et par Sénégal-Consult. Ces lois sont définies par les fig. 3, 4 et 5 hors texte .

6.8 Le modèle a permis de mettre en évidence le fait que le lit majeur du Sénégal, entre le confluent de la Falemé et Diawara où il commence dans le modèle que nous avons construit, n'est pas négligeable. En effet, les calculs du modèle unidimensionnel, comme ceux du modèle maillé, donnaient à Bakel, en 1964 et 1965, des crues plus pointues et en avance, alors que les crues naturelles étaient arrondies. Une telle déformation d'un limnigramme ne peut venir que de l'effet d'un lit majeur qui écrête la crue et restitue ensuite une partie du débit. Nous avons alors introduit en amont de Bakel une maille unique dont nous avons bâti la loi de surface en fonction de la cote afin de trouver le volume de stockage nécessaire. Nous avons donc fait de la topographie à partir du modèle. Après plusieurs calculs, nous nous sommes arrêtés car il devenait de plus en plus difficile d'ajuster la loi de stockage .

Ces difficultés ont quand même eu une conséquence regrettable pour les autres crues qui avaient leur maximum dans la gamme des niveaux où la crue 1964 est mal réglée, c'est-à-dire entre les cotes IGN 21 et 23 environ. Les maxima calculés ont alors été nettement supérieurs à ceux observés, mais il faut bien voir que sans l'introduction de cette maille en amont de Bakel les écarts auraient encore été plus grands .

- 6.9 Entre Saldé et Podor on trouve un seuil, le seuil de Mafou Sarépoli où se produit une rupture de pente du Sénégal . A certaines époques une échelle a existé mais pour les crues de référence aucune donnée limnimétrique n'était disponible . Nous avons donc éprouvé de grandes difficultés à caler les lignes d'eau entre Saldé-Boghé d'une part et Podor-Dagana d'autre part .
- 6.10 Nous venons de voir les points principaux qui ont attiré notre attention au cours de l'étude ; il en est d'autres que nous signalerons dans le chapitre spécial consacré au réglage . Nous pensons que dans ce chapitre nous devons maintenant dégager les conclusions de cette phase de l'étude .

7. CONCLUSIONS SUR LE REGLAGE DU MODELE

- 7.1 La conclusion essentielle sur le réglage du modèle est que, comme nous l'avons vu au paragraphe 5 de ce chapitre, les précisions moyennes obtenues sont acceptables . On peut noter que la précision des crues de réglage 1964 et 1968 est meilleure que celle des crues de contrôle. Ceci est très logique, car on ne peut demander au modèle la même précision pour des crues de contrôle dont souvent les données sont très incomplètes .
- 7.2 La précision aux stations situées dans la zone de l'île A. Morphil (Saldé, Boghé, N'Goui, Guédé) est, d'une manière générale, moins bonne qu'aux autres stations . Les raisons principales en sont les suivantes : lois hauteur-débit moins sûres qu'ailleurs car les campagnes de mesure ont été peu nombreuses ; observations limnimétriques peu sûres, seules les erreurs de lecture nettes étant décelables ; échelles limnimétriques constituées d'éléments métriques qui n'ont pas été recalés entre eux depuis longtemps ; mauvaise connaissance des conditions d'inondation de l'île A. Morphil .
- 7.3 Le modèle est correctement ajusté en ce qui concerne l'étude des surfaces inondées pendant une période déterminée (30 à 40 jours) . En effet, les déformations des limnigrammes n'entachent pas d'une erreur altimétrique importante les durées observées et calculées correspondantes .
- 7.4 Le modèle peut-être utilisé pour les études ci-dessous :
- étude des surfaces inondées par les crues naturelles et, établissement d'une statistique permettant de prévoir une évolution dans le temps de l'agriculture traditionnelle de décrue à une agriculture moderne par irrigation ;

- étude de l'influence d'aménagements locaux sur les conditions de propagation des crues ;
- étude de l'influence de barrages placés dans la vallée et essai de détermination de lois de fonctionnement ; dans ce dernier cas il faudrait modifier le programme de calcul si l'on voulait vraiment introduire des lois de vannage liées aux niveaux amont et aval . Sans modifier le programme on pourrait chercher à déterminer des lois de niveau amont du barrage à respecter pour remplir des conditions fixées à l'avance ;
- recherche de la forme à donner à des hydrogrammes issus de barrages régulateurs de façon à obtenir des résultats fixés (superficie inondée, durée de submersion) avec une dépense minimale d'eau .

6. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES FAÇONS D'AMELIORER LES CONNAISSANCES SUR LE FLEUVE

Un certain nombre de mesures sur place seraient nécessaires pour améliorer les connaissances relatives à la propagation des crues . Le programme peut être très complet et nous le verrons après les chapitres consacrés au réglage . Nous pensons cependant qu'un certain nombre de mesures indispensables ne devraient pas conduire à des dépenses et investissements très importants . Nous aurons donc :

- 8.1 Vérification du zéro des échelles constituées d'éléments métriques installés sur les berges et contrôle du calage des éléments entre eux .
Cette vérification nous paraît indispensable car depuis de nombreuses années aucun contrôle n'a été effectué et que l'on constate, progressivement, des décrochements dans les hauteurs observées (cf. monographie du Sénégal de l'ORSTOM, échelle de Boghé) .
- 8.2 Reprise des lectures à l'échelle de Sarépoli-Mafou . L'échelle existe puisque le projet Navigation a fait effectuer des lectures pendant la saison sèche 1968-1969 . Il faudrait donc les poursuivre pendant les crues afin de connaître les niveaux à la cassure de pente du Sénégal.
- 8.3 Reprendre des jaugeages à Dagana si l'on veut élucider la question du passage d'un débit important en rive droite .
- 8.4 Reprendre la lecture des niveaux aux échelles placées sur les ouvrages de prise du delta rive gauche, côté Sénégal .

Ces quatre points représentent un programme minimal dont seul le troisième demande des investissements importants car il suppose la réalisation de jaugeage continus pendant plusieurs crues .
On pourrait peut-être réduire son importance en cherchant uniquement à estimer les débits qui passent en rive droite par des observations par bateau accompagnées de lectures limnimétriques illustrées de quelques photos aériennes pour suivre l'évolution de l'inondation .

oCo

Chapitre II

FORMULATION MATHEMATIQUE ET NUMERIQUE

La reproduction d'un écoulement maillé conduit à représenter les déformations dans le temps t de la surface $Z = Z(x, y, t)$.

Le modèle mathématique doit donc comprendre 2 variables spatiales (x, y) et la variable temps t .

L'ensemble UNIMA ne permet pas de représenter convenablement tous les écoulements maillés. Il est conçu pour simuler l'écoulement d'une crue relativement lente sur un champ d'inondation ou un delta. La formulation mathématique du problème a conduit en effet à adopter certaines hypothèses de calcul.

1. FORMULATION MATHEMATIQUE

On aurait pu tenter de résoudre le problème posé par la représentation de l'écoulement maillé par analogie avec les équations de propagation de la marée, avec un terme de résistance déduit par exemple de la loi de Strickler. Les équations générales du type de la marée constituent un système aux dérivées partielles, non linéaire, de type hyperbolique.

En outre, c'est un problème mixte car il fait intervenir des conditions initiales au temps $t = 0$ et des conditions aux limites variables dans le temps.

La résolution numérique de ce système posait des problèmes difficiles et l'on pouvait se demander si tous les termes de ces équations étaient nécessaires pour bien représenter la réalité dans le cas d'une crue relativement lente. Nous avons vérifié en particulier que, dans ce cas, les termes d'inertie sont faibles par rapport aux autres.

Par ailleurs, on ne peut pas admettre, comme pour les équations de la marée, que le terrain reste entièrement noyé et que les profondeurs sont partout du même ordre de grandeur. Même au maximum de la crue on ne peut négliger l'influence de la topographie du terrain.

$P_i(t)$ est le débit d'eau provenant de la pluie tombant sur le casier i ou de l'évaporation sur ce casier.

$Q_{i,k}$ les débits d'échange entre le casier i et les casiers adjacents k comptés positivement lorsqu'il y a apport d'eau au casier i , ou débit des différentes "liaisons" du casier i .

Il est possible d'écrire autant d'équations du type (1) qu'il y a de casiers i , donc d'inconnues.

On obtient un système d'équations différentielles ordinaires de 1er ordre en Z_i . Il suffit d'imposer les conditions initiales (en l'occurrence les Z_i^0 puisque les $Q_{i,k}^0$ sont alors déterminés) pour être sûr que la solution du système existe et qu'elle est unique.

L'équation (1) peut être intégrée dans les limites d'un intervalle de temps t :

$$\int_{Z_i}^{Z_i + \Delta Z_i} S_i \, dZ_i = \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} P_i \, dt + \sum_k \int_{n\Delta t}^{(n+1)\Delta t} Q_{i,k}(z_i, z_k) \, dt$$

d'où en admettant que S_i ne varie pas entre les niveaux Z_i et $Z_i + \Delta Z_i$, c'est-à-dire que la variation de niveau ΔZ_i est faible durant Δt :

$$S_i(z_i) \cdot \Delta Z_i = P_i(\tau) \cdot \Delta t + \Delta t \sum_k Q_{i,k}(z_i(\tau), z_k(\tau)) \quad (2)$$

où :

$$n\Delta t \leq \tau \leq (n+1)\Delta t$$

Cette relation (2) peut être écrite sous une forme encore mieux adaptée à la résolution numérique, mais alors il faut examiner les divers types de lois d'échange entre les casiers :

$$Q_{i,k} = f(z_i, z_k) \quad (3)$$

1.2 Lois d'échange entre casiers

Ces lois d'échange sont de deux types :

- La liaison est dite "fluviale" lorsque l'écoulement ne rencontre pas d'obstacle localisé (pertes de charge singulière) mais une rugosité moyenne ;

- La liaison est dite "singulière" lorsqu'une digue, une route... constitue la limite entre les casiers ou plus généralement lorsqu'elle ne peut-être assimilée à une liaison fluviale.

Liaison fluviale

Le débit d'échange est calculé selon la formule :

$$|Q_{i,k}| = \phi(\bar{Z}_{i,k}) \sqrt{|z_k - z_i|} \quad (4)$$

Dans la formule ci-dessus :

$Q_{i,k}$ est le débit de la liaison. Son signe sera celui de $z_k - z_i$

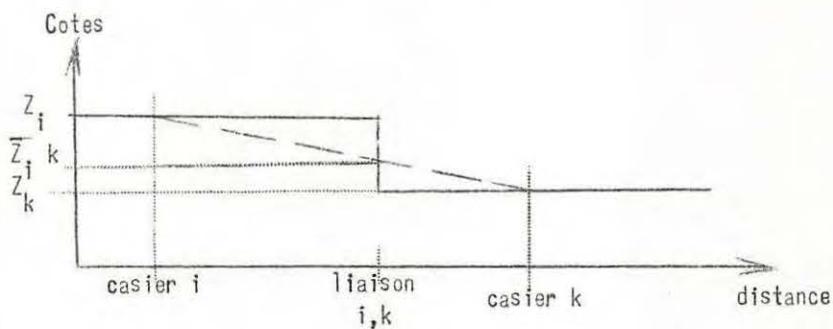
z_i et z_k les cotes du plan d'eau dans les casiers i et k liés

$\bar{Z}_{i,k}$ est la "cote pondérée de la liaison",
 $\bar{Z}_{i,k} = \alpha z_i + (1-\alpha) z_k$ où α est un coefficient donné constant pour le couple de casiers - α est appelé "coefficient de pondération" de la liaison

$\phi(\bar{Z}_{i,k})$ est la "débitance réduite" de la liaison à la cote $\bar{Z}_{i,k}$

La fonction $\phi(\bar{Z}_{i,k})$, de même que le coefficient de pondération, doit être préétablie pour la liaison i,k.

Physiquement le calcul du débit revient à fixer la section fictive d'écoulement, en un point du profil en long, située entre les casiers i et k, où sera localisée la perte de charge $z_k - z_i$. Pour calculer le débit $Q_{i,k}$, on considère la cote $\bar{Z}_{i,k}$ obtenue par l'interpolation linéaire entre z_i et z_k et la "débitance réduite" de cette liaison fictive à cette cote.



Ceci implique que, dans toute la gamme des cotes admissibles au droit de cette liaison fictive, le débit calculé par cette méthode simule correctement le débit réel.

La débitance est dite réduite car elle représente une débitance divisée par le racine carrée de la distance entre les centres des caissons liés ce qui permet de ne plus faire intervenir cette distance.

Liaisons singulières

On utilise les formules classiques pour les déversoirs à seuil épais soit en supposant $Z_k > Z_i$

$$(5a) \quad Q_{i,k} = \phi_D (Z_k - Z_s)^{3/2} \quad \text{en régime dénoyé } Z_i - Z_s < \frac{2}{3}(Z_k - Z_s)$$

$$(5b) \quad Q_{i,k} = \phi_N (Z_i - Z_s) \sqrt{Z_k - Z_i} \quad \text{en régime noyé } Z_i - Z_s \geq \frac{2}{3}(Z_k - Z_s)$$

ϕ_N et ϕ_D sont des coefficients caractéristiques de la liaison.

Afin d'assurer la continuité des débits lors du changement de régime, on aura obligatoirement $\phi_D = 0,386 \phi_N$.

Une liaison peut être constituée de plusieurs déversoirs : le calcul de chaque débit élémentaire se fait par tranches verticales puis ces débits sont cumulés. Ceci permet de représenter des liaisons très différentes d'un déversoir à seuil épais avec une bonne approximation.

La loi d'échange peut donc prendre trois formes :

$$(4) \quad Q_{i,k} = \phi \sqrt{|Z_k - Z_i|} \quad \text{liaison fluviale}$$

$$(5a) \quad Q_{i,k} = 0,386 \phi_D (Z_k - Z_s)^{3/2} \quad \text{liaison singulière dénoyée}$$

$$(5b) \quad Q_{i,k} = \phi_N (Z_i - Z_s) \sqrt{Z_k - Z_i} \quad \text{liaison singulière noyée}$$

Ces lois d'échange ne sont valables que pour un régime où l'influence des forces d'inertie, et donc de la variation de vitesse d'écoulement sur le débit, peuvent être négligées.

2. RESOLUTION NUMERIQUE

Il y a plusieurs façons d'écrire le dernier terme de la relation (2) :

$$S_i (Z_i) \times \Delta Z_i = P_i (\tau) \times \Delta t + \Delta t \sum_k Q_{i,k} (Z_i(\tau), Z_k(\tau)).$$

2.1 Schéma explicite

Si l'on admet que le débit $Q_{i,k}$ ne varie pas pendant la période Δt , on peut écrire $\Delta Z_i S_i = P_i \Delta t + \sum_k Q_{i,k}^n$ et calculer explicitement ΔZ_i donc Z_i^{n+1} en fonction de Z_i^n et de Z_k^n au temps $n\Delta t$.

2.2 Schéma implicite

On peut aussi admettre, durant l'intervalle Δt , une valeur intermédiaire :

$$Q_{i,k}(Z_i(\tau), Z_k(\tau))$$

entre les débits

$$Q_{i,k}(Z_i(n\Delta t), Z_k(n\Delta t)) = Q_{i,k}^n$$

à l'instant $n\Delta t$ et

$$Q_{i,k}^{n+1}$$

à l'instant $(n+1)\Delta t$

Dans ce cas on ne peut plus exprimer les niveaux Z_i^{n+1} explicitement à partir des niveaux à l'instant $n\Delta t$ puisque le second membre de l'équation (2) contient des valeurs à l'instant $(n+1)\Delta t$.

Il reste à déterminer la valeur intermédiaire du débit $Q_{i,k}(Z_i(\tau), Z_k(\tau))$ ce qui peut être réalisé de la façon suivante :

$$Q_{i,k}(Z_i(\tau), Z_k(\tau)) = \theta Q_{i,k}^{n+1} + (1-\theta) Q_{i,k}^n \quad \text{avec } 0 \leq \theta \leq 1$$

En reportant cette relation dans l'équation (2), on obtient :

$$\Delta Z_i \cdot S_i = P_i \Delta t + \Delta t \left[\theta \sum_k Q_{i,k}^{n+1} + (1-\theta) \sum_k Q_{i,k}^n \right] \quad (6)$$

Les lois d'échange n'étant pas linéaires, on suppose faibles les variations de niveau au cours de l'intervalle Δt et l'on écrit :

$$Q_{i,k}^{n+1} = Q_{i,k}^n + \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \Delta Z_i + \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k$$

L'équation (6) prend alors la forme :

$$S_i^n \frac{\Delta Z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_k Q_{i,k}^n + \theta \left[\sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \Delta Z_i + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k \right] \quad (7)$$

Les ΔZ_k des casiers adjacents au casier i sont associés au ΔZ_i dans cette équation.

Les équations du type (7), écrites pour tous les casiers, forment un système d'équations algébriques linéaires en ΔZ_i dont la résolution à chaque pas de temps Δt donne des résultats valables, à condition que Δt soit suffisamment petit.

Le schéma de différences finies utilisé ici est du type implicite grâce à l'introduction du coefficient θ pour exprimer les dérivées en espace.

2.3 Choix du schéma

Le choix entre les méthodes explicite et implicite a été guidé par un souci d'économie de temps d'ordinateur c'est-à-dire le produit du temps d'un cycle par le nombre de cycles nécessaires, à validité égale des résultats.

On sait que le choix du pas de temps de calcul pose des difficultés. Du point de vue de l'exactitude des résultats, Δt doit être choisi suffisamment petit pour que la linéarisation soit valable surtout lorsque les variations de niveaux sont rapides.

D'autre part, les crues que l'on se propose d'étudier sur un tel schéma sont des crues annuelles lentes. Il faut donc que Δt soit assez grand pour ne pas conduire à des temps de calcul prohibitifs.

Dans le cas d'un schéma explicite, Δt est limité par une condition de stabilité numérique ; dans les grands modèles tels que le Mékong ou le Sénégal, Δt n'aurait pu dépasser 30 mn. Le nombre de cycles aurait été excessif.

La méthode implicite par contre permettait d'atteindre des pas de temps de l'ordre de 6 h en crue et 72 h en étiage ; avec $\theta = 1$ on était sûr d'obtenir un schéma de différences finies inconditionnellement stable.

$$S_i \cdot \frac{\Delta Z_i}{\Delta t} = P_i + \sum_k Q_{i,k}^n + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \Delta Z_i + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k \quad (8)$$

Pour trouver les ΔZ_i il faut, à chaque pas de temps, résoudre un système linéaire comportant autant d'équations (8) que d'inconnues comme on s'en rend compte en introduisant adéquatement les conditions

aux limites. Le nombre d'équations est très élevé mais on s'aperçoit rapidement que la matrice des coefficients des variables ΔZ_i est très creuse, chaque casier n'étant lié qu'à quelques casiers adjacents.

Cette remarque permet d'éviter la résolution de la matrice complète.

3. PROGRAMMATION

3.1 Principes généraux

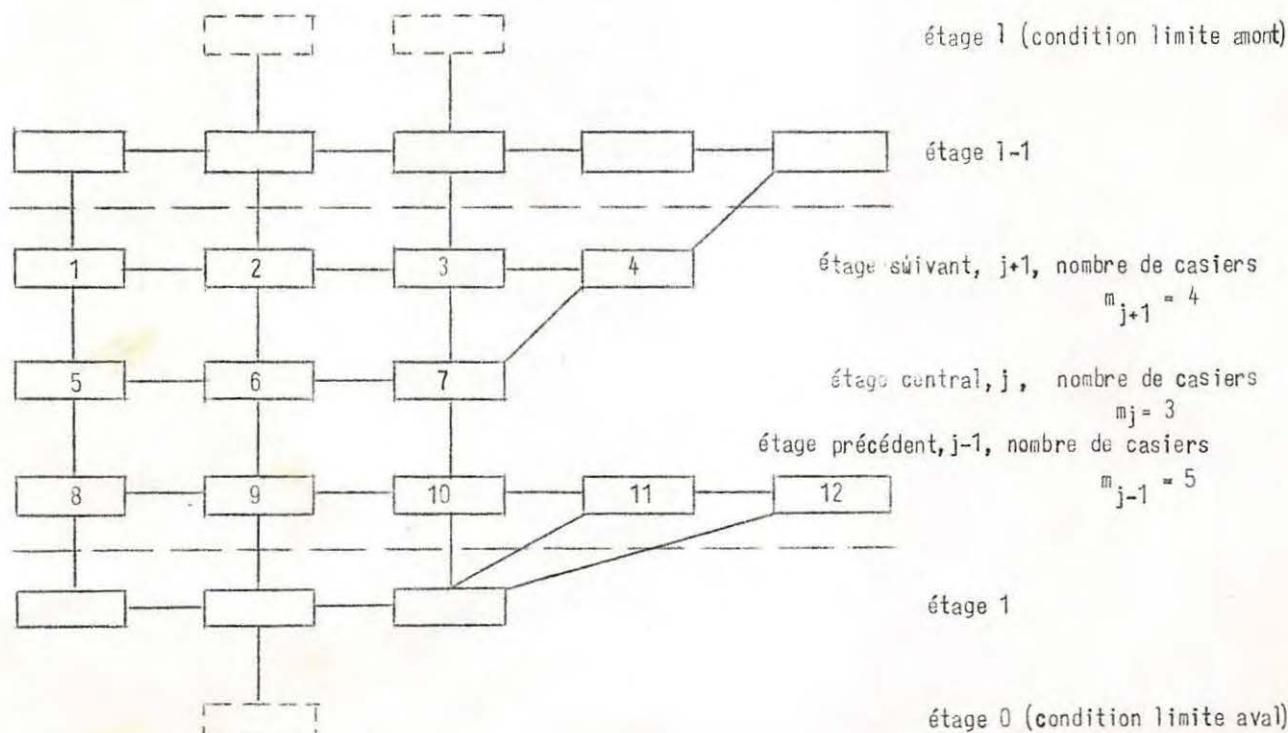
Les casiers formant le modèle doivent être réparties suivant un certain nombre d'"étages" de telle sorte qu'un casier d'un étage j n'ait d'échanges qu'avec des casiers du même étage ou des étages adjacents $j-1$ et $j+1$.

La notion d'étage n'a aucun sens physique pour le modèle. Il s'agit seulement d'un artifice de résolution numérique permettant un gain de temps de calcul considérable.

Les équations (9) :

$$\Delta Z_i \left(-\frac{S_i}{\Delta t} + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} \right) + \sum_k \frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_k} \Delta Z_k + L_i = 0 \quad (9)$$

où le terme libre $L_i = P_i + \sum_k Q_{i,k}^n$ est connu, vont être appliquées à l'étage central j , à l'étage précédent $j-1$ et à l'étage suivant $j+1$ du schéma ci-dessous.



Le tableau de la page suivante groupe les coefficients relatifs à chaque inconnue ΔZ_i .

En utilisant la notation matricielle, on peut écrire les équations de continuité relatives aux points de l'étage central c sous la forme :

$$[M_c] \cdot \{z_c\} + [M_s] \cdot \{z_s\} + [M_p] \cdot \{\Delta Z_p\} + \{L_c\} = 0 \quad (10)$$

Où :

$[M_c]$ est une matrice carrée $m_j \times m_j$ de l'étage central

$[M_s]$ est une matrice rectangulaire $m_{j+1} \times m_j$ de l'étage suivant

$[M_p]$ est une matrice rectangulaire $m_{j-1} \times m_j$ de l'étage précédent

$\{\Delta Z_c\}, \{\Delta Z_s\}, \{\Delta Z_p\}$ sont les vecteurs inconnus correspondants

$\{L_c\}$ est le vecteur des termes libres.

Une équation du type (10), s'écrit ainsi pour chaque étage, y compris l'étage 1, où l'on aura en particulier :

$$[M_1] \{\Delta Z_1\} + [M_2] \{\Delta Z_2\} + [M_o] \{\Delta Z_o\} + \{L_1\} = 0 \quad (11)$$

Pour un modèle de L étages, on a $L-1$ équations de ce type et $L+1$ inconnues vectorielles du type $\{\Delta Z_i\}$. Il manque deux équations que nous trouverons dans les conditions limites amont et aval.

Condition aval : les composantes du vecteur $\{\Delta Z_o\}$ peuvent toujours être exprimées en fonction des composantes du vecteur $\{\Delta Z_1\}$ selon la relation :

$$\{\Delta Z_o\} = [E_o] \{\Delta Z_1\} + \{F_o\} \quad (12a)$$

En effet, quelles que soient les conditions (acceptables physiquement) à la limite, on peut toujours trouer, en linéarisant ces conditions, les éléments de la matrice $[E_o]$ et du vecteur $\{F_o\}$: ceci sera vu plus loin.

Par suite en substituant (12a) dans (11) nous avons :

$$[M_1] \{\Delta Z_1\} + [M_2] \{\Delta Z_2\} + [M_o] [E_o] \{\Delta Z_1\} + [M_o] \{F_o\} + \{L_1\} = 0$$

Etage central	Matrice de l'étage central (matrice symétrique)			Matrice de l'étage suivant				Matrice de l'étage précédent				Terme libre	
Casiers	ΔZ_6	ΔZ_8	ΔZ_7	ΔZ_1	ΔZ_2	ΔZ_3	ΔZ_4	ΔZ_6	ΔZ_9	ΔZ_{10}	ΔZ_{11}	ΔZ_{12}	L
5	$-\frac{S_6}{\Delta t} \frac{\partial Q_{5,1}}{\partial Z_6}$												$P_6 + Q_{5,1}^n$
	$+\frac{\partial Q_{5,6}}{\partial Z_6}$	$\frac{\partial Q_{5,6}}{\partial Z_6}$	0	$\frac{\partial Q_{6,1}}{\partial Z_1}$	0	0	0	$\frac{\partial Q_{5,8}}{\partial Z_8}$	0	0	0	0	$+Q_{5,6}^n$
	$+\frac{\partial Q_{5,8}}{\partial Z_5}$												$+Q_{5,8}^n$
6		$-\frac{S_6}{\Delta t} \frac{\partial Q_{6,5}}{\partial Z_6}$											$P_6 + Q_{6,5}^n$
	$\frac{\partial Q_{6,5}}{\partial Z_5}$	$+\frac{\partial Q_{6,2}}{\partial Z_6}$	$\frac{\partial Q_{6,7}}{\partial Z_7}$	0	$\frac{\partial Q_{6,2}}{\partial Z_2}$	0	0	$\frac{\partial Q_{6,9}}{\partial Z_9}$	0	0	0	0	$+Q_{6,2}^n + Q_{6,7}^n$
		$+\frac{\partial Q_{6,7}}{\partial Z_6} + \frac{\partial Q_{6,9}}{\partial Z_6}$											$+Q_{6,9}^n$
7			$-\frac{S_7}{\Delta t} + \frac{\partial Q_{7,6}}{\partial Z_7}$										$P_7 + Q_{7,6}^n$
	0	$\frac{\partial Q_{7,6}}{\partial Z_6}$		0	0	$\frac{\partial Q_{7,3}}{\partial Z_3}$	$\frac{\partial Q_{7,4}}{\partial Z_4}$	0	0	$\frac{\partial Q_{7,10}}{\partial Z_{10}}$	0	0	$+Q_{7,3}^n + Q_{7,4}^n$
			$\frac{\partial Q_{7,4}}{\partial Z_7} + \frac{\partial Q_{7,10}}{\partial Z_7}$										$+Q_{7,10}^n$

Avec $Q_{i,k}^n = -Q_{k,i}^n$, $\frac{\partial Q_{i,k}}{\partial Z_k} = -\frac{\partial Q_{k,i}}{\partial Z_k}$

D'où :

$$\{\Delta Z_1\} = - [[M_1] + [M_o] [E_o]]^{-1} [M_2] \{\Delta Z_2\}$$

$$- [[M_1] + [M_o] [E_o]]^{-1} [[M_o] \{F_o\} + \{L_1\}]$$

c'est-à-dire que l'équation (11) prend la forme récurrente du type (12a) :

$$\{\Delta Z_1\} = [E_1] \{\Delta Z_2\} + \{F_1\}$$

$$\{\Delta Z_o\} = [E_o] \{\Delta Z_1\} + \{F_o\}$$

On peut donc toujours exprimer linéairement les ΔZ_i d'un étage central par le ΔZ_k de l'étage suivant pourvu que l'on ait cette relation entre les accroissements de l'étage précédent et de l'étage central.

Le processus de substitution, répété de proche en proche, permet de remonter les étages en calculant, pour chaque étage j , les matrices $[E_j]$ et les vecteurs $\{F_j\}$. En amont du modèle on calcule de même $[E_{j-1}]$ et $\{F_{j-1}\}$. La condition à la limite amont l fournit le vecteur $\{\Delta Z_l\}$.

Alors, dans une nouvelle phase de calcul, par le processus inverse de déroulement, nous déterminons les valeurs de $\{\Delta Z_j\}$ pour tous les étages j à l'aide des $\{E_j\}$ et $\{F_j\}$ stockés dans la première phase et des $\{\Delta Z_{j+1}\}$ que l'on vient de calculer.

Il suffit d'ajouter les ΔZ_j calculés aux niveaux Z_j^n à l'instant $n\Delta t$ pour obtenir l'état du modèle au temps $(n+1)\Delta t$. Et l'on recommence pour le pas suivant.

Cette méthode de calcul est en réalité une méthode d'inversion d'une matrice bande extrêmement creuse et représente une extension de la méthode dite "de double balayage". Malgré sa complexité apparente elle exige un temps de calcul nettement inférieur à celui d'une méthode conventionnelle d'élimination.

3.2 Conditions aux limites

Le système d'équations en Z étant parabolique, il est nécessaire et suffisant d'imposer aux limites géographiques du domaine les niveaux $Z(t)$. Ceci n'est pas toujours possible dans la réalité ; trois types de conditions aux limites sont programmés :

- niveau donné en fonction du temps, $Z(t)$, dit "niveau imposé" ;
- débit donné en fonction du temps, $Q(t)$, dit "débit imposé" ;
- loi hauteur-débit $Q = f(Z)$ dit "polynôme" car cette loi est donnée sous forme polynomiale.

Ces trois types de conditions peuvent s'exprimer sous la forme (12a). En effet :

- Condition $Z(t) :$

On introduit un casier fictif, dit "casier limite", où le niveau Z_k est connu au temps $t = (n+1)\Delta t$, situé dans l'étage précédent celui du casier i et l'on écrit :

$$\{\Delta Z_k\} = [E_k] \{Z_j\} + \{F_k\}$$

avec $\Delta Z_k = F_k$, tous les termes de $[E_k]$ étant nuls de telle sorte que $\{\Delta Z_k\}$ soit égal à la valeur imposée à la limite quel que soit $\{Z_j\}$.

- Condition $Q(t) :$

On ajoute tout simplement l'accroissement de débit imposé $\Delta Q = Q^{n+1} - Q^n$ au terme libre L dans l'équation de continuité du casier.

- Condition $Q(Z) :$

$Q_{i,k} = f(Z_i)$ est une fonction connue. On introduit un casier fictif k et l'on pose, dans l'équation de continuité :

$$Q_{i,k}^n = f(Z_i^n)$$

$$\frac{\partial Q_{i,k}^n}{\partial Z_i} = f'(Z_i^n)$$

$$\frac{\partial Q_{i,k}}{\partial Z_k} = 0$$

L'avant-dernier type de condition limite ne nécessite pas l'introduction d'un casier fictif. Toutefois pour des raisons d'homogénéité de présentation, chacune des conditions limites du modèle sera représentée par un casier fictif qui, dans le cas de débit imposé, ne sera pas utilisé par le noyau de résolution numérique.

4. CONSTRUCTION DU PROGRAMME

La représentation numérique d'un écoulement nécessite, outre le programme de calcul, cinq types d'informations :

4.1 Etat initial

Ce sont les niveaux du plan d'eau dans tous les casiers du modèle à l'instant t_0 de démarrage du calcul.

4.2 Données variables dans le temps

Ce sont les lois de variation des niveaux et débits imposés aux limites du modèle ainsi que celles de la pluie (et de l'évaporation) en fonction du temps tout au long de la période à représenter.

Ces informations sont stockées en langage interne, sur bande magnétique et lues par le programme de calcul au fur et à mesure des besoins. Elles constituent le fichier "données binaire".

On commence par lire le fichier "données binaire" et on effectue si nécessaire une interpolation linéaire pour déterminer les conditions aux limites au temps $t = (n+1)\Delta t$.

Puis l'on passe à l'exécution de la 1^{ère} phase de calcul où, de l'aval vers l'amont, on déterminera les coefficients $\{E\}$ et $\{F\}$ à l'instant t . Le "modèle" sert de canevas à cette phase.

Le "modèle" a été préalablement mis en mémoire à partir d'un "modèle binaire" ou d'un "modèle condensé" stocké sur bande ou disque magnétique. Il groupe les trois autres types d'informations.

4.3 La définition topologique du modèle

Noms des casiers, des limites, découpage en étages.

4.4 La définition des casiers

Table de surface au plan d'eau en fonction de la cote et cote de base ainsi que le numéro de poste de pluie associé au casier.

4.5 La définition des liaisons

Pour chaque liaison d'un casier avec un casier du même étage, de l'étage suivant ou un casier limite elle comprend le type de liaison et les coefficients nécessaires au calcul du débit et de ses dérivées.

La définition des tables de surface au plan d'eau ou des débitances réduites des liaisons fluviales est rattachée à une "grille de niveaux" unique et définitive pour le modèle. Cette grille de niveaux peut être translatée, pour chaque table, d'une valeur associée à la table et appelée "cote de base". Dans chaque table une valeur doit être donnée pour chacun des niveaux de la grille incrémentée de la cote de base de la table.

La deuxième phase de calcul consiste à trouver les valeurs des niveaux dans les casiers de chaque étage en se servant des valeurs ΔZ connues des casiers de l'étage suivant et des coefficients $[E]$ et $\{F\}$ calculés pendant la "première phase".

ooo

Chapitre III

LE REGLAGE DU MODELE MAILLE

1. GENERALITES

Ce chapitre est consacré à la construction du modèle et à son réglage avec les crues de 1964 et 1968. Nous ne rentrerons pas dans tous les détails que nous avons eu à résoudre mais chercherons à préciser les difficultés successives que nous avons rencontrées. Ces difficultés sont de différents ordres, aussi bien topographiques qu'hydrographiques ou hydrologiques.

Nous trouverons les paragraphes suivants :

- le modèle, sa construction,
- principe du réglage,
- réglage du tronçon Gouina-Bakel,
- réglage du tronçon Bakel-Kaédi,
- réglage du tronçon Kaédi-Dagana,
- réglage du tronçon Dagana-Saint-Louis,
- conclusions à ce stade de l'étude.

2. LE MODELE, SA CONSTRUCTION

Ainsi que nous l'avons rapidement dit dans le chapitre I et que cela a été expliqué dans le chapitre II le modèle maillé permet de mieux représenter les écoulements réels puisque les sens des écoulements dans les lits mineurs et majeurs n'ont pas une direction imposée, mais, au contraire, une direction qui dépend uniquement des niveaux dans des mailles adjacentes , des caractéristiques des lois d'échange entre ces mailles et des volumes d'accumulation.

Le modèle forme donc un ensemble qui comprend un support physique tiré des données topographiques et hydrographiques, des données dynamiques qui sont les données de crue et des données de contrôle qui sont les niveaux observés aux échelles.

2.1 Les données topographiques

Leur qualité conditionne directement la précision des résultats que l'on peut attendre du modèle. En effet, on peut jouer sur les débitances des lits mineurs pour modifier les conditions d'écoulement sur l'axe du fleuve mais il n'en est pas de même dans le lit majeur. Vouloir modifier le lit majeur revient à vouloir reconstituer une autre topographie à partir du modèle. Or on rentre là dans des procédés difficiles sinon impossibles à réaliser correctement et on introduit un paramètre de réglage qui n'est pas correct, car on joue artificiellement sur le rôle d'accumulation du lit majeur. (Nous emploierons cette méthode en amont de Bakel mais nous justifierons le procédé).

La topographie est définie par le fond de carte au 1/50 000 dressé vers 1955-1957 à la demande de la M.A.S. (Mission d'Aménagement du Sénégal) par l'I.G.N. (Institut Géographique National). Au moment de la construction du modèle, la couverture en notre disposition n'était pas complète entre Waoundé et Kaédi et nous avons dû faire appel aux cartes au 1/20 000 levées par la M.E.F.S. en 1937-1938.

Ces cartes au 1/20 000 sont peu sûres et des contrôles effectués à l'aide des cartes au 1/50 000 et par une mission topographique ont montré que de brusques discordances de nivellement apparaissent : de tels écarts ne s'expliquent pas dans l'exécution d'un nivellement continu. La couverture au 1/50 000 de cette région nous est parvenue au début février 1970 et nous avons alors repris la définition des mailles intéressées.

Pour le delta rive droite du Sénégal aucune couverture altimétrique n'existe. Nous avons alors utilisé les estimations faites indirectement par M. BAILLARGEAT au cours de ses études (Rapport SOGREAH R. 8 662 - Hydrologie de la rive droite du Sénégal). Cette région présente donc une incertitude topographique importante et nous verrons plus loin que certains problèmes peuvent être liés à ces lacunes.

L'hydrographie est définie par les sections en travers levées par la M.E.F.S. (Mission d'Etude du Fleuve Sénégal), en même temps que les cartes au 1/20 000. Elles sont donc entachées des mêmes erreurs altimétriques que le fond au 1/20 000. De plus, toutes les sections ne sont pas exploitables car, étant englobées dans des transversales de planimétrie, elles sont parfois obliques par rapport au sens de l'écoulement.

2.2 Le découpage du modèle

Le découpage du modèle procède d'une façon relativement logique. Sur les cartes au 1/50 000, on commence à repérer les stations limnimétriques où, obligatoirement, on placera un point de calcul. Ensuite on place

sur les cartes les profils en travers en prenant soin d'écartier ceux qui sont obliques. Ce travail réalisé, on découpe le Sénégal et le Doué en tronçons relativement homogènes, en faisant en sorte que les stations limnimétriques soient au centre des tronçons qui les concernent et que le nombre de profils en travers utilisable soit à peu près cohérent.

Cette phase achevée, on recherche dans le lit majeur des limites naturelles qui pourront constituer les frontières entre les mailles. Par limites naturelles on entend les digues, les routes, les marigots avec bourelets de berge, les zones de passage obligé entre des collines par exemple.

Ces limites définies, on les trace sur les cartes en cherchant à obtenir des mailles de surfaces homogènes, ce qui n'est pas toujours facile. On évitera ainsi les apparitions d'instabilités dans les calculs car, au moment où une maille trop petite commencerait à se remplir, on pourrait avoir des variations de niveau très rapides engendrant des oscillations.

Le découpage a donc pour but de définir, dans la mesure du possible, des unités hydrauliques indépendantes.

Ce travail a conduit à définir :

- 72 tronçons pour le Sénégal de Gouina à Saint-Louis,
- 15 tronçons pour le Doué,
- 157 mailles pour le lit majeur.

2.3 Préparation des données topographiques

D'une manière générale on aura des lois d'échange des débits (fluviales ou singulières) et des sections d'accumulation.

On commence donc par déterminer, pour les lois d'écoulement fluvial des lois de débitance en fonction de la cote. Il s'agit donc des lois relatives aux lits mineurs. Ce sont des lois du type Strickler. Pour le modèle maillé nous avons introduit les lois définies au cours de l'exploitation du modèle hydrologique.

Dans le lit majeur les échanges entre casiers sont régis par des lois de déversoir qui présentent l'avantage de ne tenir compte que des niveaux aux centres des casiers pour le calcul des débits.

Les sections d'accumulations (lits mineur et majeur) sont définies par des couples de valeur cote-surface. Elles sont donc déterminées par planimétrage des cartes pour le lit majeur. Pour les lits mineurs on fait le produit, pour chaque cote, de la longueur du tronçon par la largeur de la section caractéristique.

2.4 Assemblage du modèle

Avant d'assembler le modèle on le découpe en étages regroupant chacun un certain nombre de mailles.

Le modèle du Sénégal comporte 26 étages, le nombre de mailles de chaque étage variant entre 4 pour l'étage n° 1 à 14 pour l'étage correspondant à Podor (étage n° 19).

Le modèle est alors construit par le programme MOUNIM à partir des cartes perforées qui portent toutes les caractéristiques.

2.5 Les données de crue

Elles comprennent essentiellement :

- le débit du Sénégal introduit à Gouina,
- les débits des affluents (Falémé, Kolimbiné, Karakoro, Niordé, Ghorfa, Gorgol),
- les débits des défluents (lacs de Guiers et de R'Kiz, ouvrages de la rive gauche du delta du Sénégal, Aftout Es Samel),
- les valeurs de la pluvio-évaporation,
- les lois de niveaux en fonction du temps (lois de niveau à Bakel et à Saint-Louis).

2.6 Les données de contrôle

Le critère contractuel de réglage reposant uniquement sur les niveaux, ce seront donc les lectures aux échelles du fleuve. Les stations sont : Féloù aval, Kayes, Ambidédi, Bakel, Waoundé, Matam, Kaédi, Saldé, Boghé, Podor, Dagana, Richard-Toll, Rosso et Rong sur le Sénégal, N'Goui et Guédé sur le Doué.

Les niveaux sont cependant insuffisants en eux-mêmes pour permettre un réglage correct du modèle. On doit s'appuyer également sur les débits connus, c'est-à-dire sur les lois hauteur-débit des lits mincurs. Ces lois seront donc un outil de réglage uniquement, la comparaison entre les débits calculés et les débits lus sur les lois hauteur-débit ne pouvant avoir la même signification.

3. PRINCIPE DU REGLAGE

3.1 Bases du réglage

Le réglage correspond à un ajustement des paramètres hydrauliques introduits dans le modèle. Cet ajustement n'est pas arbitraire mais doit permettre de reproduire la propagation des crues avec une précision de 10 cm sur les niveaux et des valeurs acceptables sur les débits connus. Des mesures de débit ont eu lieu en presque toutes les stations du fleuve. Elles sont parfois étaillées sur plusieurs années et alors on peut en tirer des enseignements très valables. Parfois elles n'ont duré qu'une seule campagne. Dans ce dernier cas, les lois n'étant pas univoques, il est plus difficile de donner des débits exacts pour chaque crue, mais on peut cependant déterminer des ordres de grandeur très utiles ; notons que les lois correspondant à la montée sont en général uniques, les courbes de décrue faisant, elles, des boucles. Pour ces déterminations de débit, la monographie du Sénégal de l'ORSTOM nous a été très utile.

3.2 Cheminement suivi pour le réglage

Le réglage se fait par phases successives c'est-à-dire que l'on part de l'amont et que l'on cherche à régler des tronçons du fleuve formant des unités hydrauliques. Il y a ainsi le modèle de Gouina à Félix, puis de Félix à Bakel où l'écoulement se fait uniquement dans le lit mineur. On a donc un écoulement unidimensionnel et, par conséquent, le réglage obtenu avec le modèle unidimensionnel est en principe acquis pour le modèle maillé puisque les programmes de calcul ont été rendus compatibles pour les deux modèles.

Ensuite nous trouvons le tronçon Bakel Kaédi. C'est un tronçon important puisque c'est entre Bakel et Waoundé, à Diawara, que commence le lit majeur et que l'hydrogramme de crue subit ses premières évolutions du fait de l'accumulation de volume qui s'ensuit.

Après nous trouvons la zone qui va de Kaédi à Dagana, c'est-à-dire le complexe Sénégal-Doué-fle A Morphil.

Enfin nous aurons tout l'aval du modèle, de Dagana à Saint-Louis. Nous précisons que durant ce réglage la loi de débit est introduite à Gouina et que la loi de niveau aval est toujours celle de Saint-Louis.

Le réglage s'effectue donc par phases successives, le réglage fin d'un tronçon aval ne commençant vraiment que lorsque le tronçon amont est à peu près réglé. Une première approche de la précision étant ainsi atteinte, on reprend le réglage de détail sur le modèle complet et on améliore ou tente d'améliorer les résultats acquis.

Le processus est obligatoirement long car l'analyse d'un calcul, comme nous allons le voir, demande l'examen d'un certain nombre de points qu'il faut reprendre à chaque fois.

3.3 Processus du réglage

La figure 2 montre le découpage du modèle et précise le nom des casiers.

Le calcul que l'on analyse fournit les débits entre les mailles, le sens de ces débits, les niveaux au centre de chaque casier. On commencera par choisir un certain nombre de jours de la ou des crues pour lesquels on va procéder à un ajustement des paramètres hydrauliques.

Le choix des jours fait, on reporte sur le schéma topologique les résultats du calcul de référence. Nous avons les niveaux en chaque casier et les débits avec leur sens. En fonction des données de contrôle, on connaît les niveaux qu'il faudrait avoir aux stations limnimétriques et les débits correspondants. On peut alors comparer les résultats du calcul avec les valeurs qu'il aurait fallu obtenir. Si les débits sont différents, ainsi que les niveaux, on commence par rétablir en chaque maille du modèle les niveaux probables par le tracé des lignes d'eau entre stations de contrôle et on cherche, par une nouvelle distribution des débits, à obtenir à ces mêmes stations les débits désirés. On est donc conduit à modifier les échanges des débits entre les lits mineurs (Sénégal et Doué) et le lit majeur et entre les mailles du lit majeur.

Cette première phase achevée, nous avons donc, pour plusieurs jours des crues de réglage, les conditions de niveaux et de débit à obtenir. Il faut alors calculer tous les paramètres hydrauliques (lois de débitance des lits mineur et, coefficient de débit des déversoirs et cotes de ces déversoirs) pour parvenir aux résultats escomptés. Ces calculs sont longs et parfois incompatibles. En effet, si dans les lits mineurs on peut toujours définir des lois de débitance raisonnables, il n'en est pas de même dans le lit majeur où nous ne disposons d'aucun éléments de contrôle ; alors on parvient parfois à des résultats qui certains jours demandent la réduction des lois d'échanges des débits et qui d'autres demandent au contraire leur augmentation. Dans ces cas là, il faut alors définir une solution de moyen terme qui sera souvent de ne pas modifier la liaison incriminée, attendant de voir comment régira le modèle lors du calcul suivant.

Pour chaque essai de réglage il faut refaire ces opérations qui prennent plusieurs jours quand l'analyse porte sur deux crues, soit deux ou trois jours par crue afin de couvrir un éventail de niveaux suffisamment grand.

A titre indicatif, nous précisons que les réglages effectués entre février et août-septembre 1969 ont conduit à modifier une quarantaine de fois le modèle.

4. REGLAGE DU TRONCON GOUINA-BAKEL

Son réglage s'est fait à l'aide du modèle unidimensionnel, mais a demandé une mise au point sur le modèle maillé. Nous distinguons deux phases dans ce réglage. La première intéresse la zone Gouina, Féloù amont et la deuxième le tronçon Féloù aval-Bakel.

4.1 Réglage du tronçon Gouira aval Férou amont

La limite amont du modèle se trouve en aval des chutes de Gouina, au droit de l'emplacement de l'ancien limnigraphie U.H.E.A. qui se trouvait en rive droite. Le débit est donc introduit en ce point et la loi de niveau est constituée par corrélation à partir des lectures effectuées à l'échelle MAS qui se trouve en rive gauche dans le deuxième bief (la corrélation utilisée est celle donnée dans la monographie du Sénégal de l'ORSTOM).

La limite aval est l'amont des chutes du Férou et là aussi il faut passer par une corrélation pour déterminer la loi de niveau en fonction du temps puisqu'aucune lecture n'est faite en cet emplacement.

Une autre difficulté provient de l'absence totale de relevés hydrographiques. Il a donc fallu inventer la topographie et les lois de débitance en admettant une translation linéaire des sections et des lois d'écoulement en suivant la pente moyenne de l'écoulement entre Gouina et Férou amont.

Les lois définies ne sont pas entièrement arbitraires. Nous nous sommes en effet basés sur les profils en travers du Sénégal à Galougo, Gouina amont, Diémou, les photos aériennes, la carte au 1/200 000. De plus, nous connaissons les vitesses moyennes du Sénégal à Galougo et Gouina amont et nous avons vérifié que l'on pouvait entre ces deux sections définir un coefficient de Strickler moyen.

Les points de calcul sont alors Gouina où nous imposons la loi $Q(t)$ de Galougo, Séoura, Guerbétiou, Ségankané et Férou amont où est imposé la limite aval en $Z(t)$ établie par corrélation. Le problème est alors de retrouver à Gouina aval le limnigramme établi par corrélation.

Après différents ajustements des lois de débitance, nous avons obtenu les résultats illustrés pour les crues de 1964 et 1965 par le graphique N° 1 hors texte.

Ces résultats confirment que les observations de Gouina sont loin d'être valables car, pour des débits peu différents à Galougo, les observations à Gouina diffèrent parfois de plus d'un mètre. Toutes les approximations énoncées font que le réglage de ce tronçon ne peut être parfaitement représentatif de la réalité. Cependant, comme il n'a qu'une longueur de 60 km de lit mince seul et qu'à l'aval immédiat des chutes il y a le contrôle de la station de Kayes, nous avons maintenu ce tronçon schématisé dans le modèle mathématique, car il permet d'assurer un certain amortissement à la crue.

Pour les autres crues étudiées nous n'avons pas cherché à établir une loi de niveau à Gouina aval car, s'agissant de corrélation, nous n'avons pas cru utile de comparer des précisions de natures différentes. Il en est de même pour Férou amont où, pourtant, la précision moyenne obtenue à l'aide d'une loi de déversoir entre Férou amont et Férou aval, était nettement inférieure à 0,10 m.

4.2 Réglage du tronçon Féliou aval - Bakel

Le réglage s'est fait sur le modèle unidimensionnel et nous espérions que nous n'aurions pas à le reprendre sur le modèle maillé. Nous avons quand même dû le faire car le réglage à Bakel n'était pas satisfaisant.

En examinant le graphique n° 2 hors texte, on constate que les maxima de la crue 1964 sont en avance par rapport à la réalité et que les limnigrammes calculés sont nettement plus pointus. On note également que les niveaux à la montée sont plus hauts et qu'ils sont plus bas en décrues. Ceci montre que l'on a une phase où les débits sont excédentaires et une autre où ils sont déficitaires.

Nous avions d'abord pensé que la loi de la Falémé à Kidira pouvait, pour des débits supérieurs à 1000 m³/s, être sous l'influence d'un remous du Sénégal et les calculs effectués ont en effet montré que l'interpolation pouvait raisonnablement être modifiée. Cela a été insuffisant pour permettre un réglage cohérent des niveaux à Bakel.

En poussant alors l'analyse, nous avons conclu que les formes arrondies des limnigrammes observés à Bakel ne pouvaient être dues qu'à l'intervention d'un lit majeur qui écrète la crue à la montée et restitue une partie du débit stocké à la décrue. Un autre élément militait en faveur de cette conclusion : les crues du Sénégal à Ambidédi et de la Falémé à Kidira, en amont de leur confluent, sont très pointues et il leur correspond des crues arrondies à Bakel. Cette idée basée sur des considérations hydrauliques semblant valables, nous avons examiné d'un peu plus près les cartes entre la Falémé et Diawara point où nous avons fait commencer le lit majeur du Sénégal. Bien que les données topographiques soient assez clairsemées le long du fleuve, on voit que les cartes au 1/200 000 indique la présence de mares permanentes et que les cotes de ces mares sont basses vis-à-vis des niveaux atteints dans le fleuve.

Il est bien évident qu'une partie du volume emmagasiné entre le fleuve et les collines provient de la pluie et du ruissellement, mais nous pensons qu'au cours de la crue ces zones permettent un écrêtage des débits et leur soutien en décrue.

Nous avons alors cherché à établir une loi de surface en fonction de la cote pour un casier unique que nous avons placé en amont de Bakel (maille D14). La solution a été approchée en comparant d'une part le modèle sans lit majeur et d'autre part la loi de débit qu'il faudrait théoriquement avoir en prenant la loi de débitance à Bakel et la pente moyenne entre Bakel et Waoundé. On peut ainsi définir un ordre de grandeur des débits qui doivent être accumulés ou restitués en fonction du temps et, par approximations successives, on parvient à définir la loi de variation de la surface du casier en fonction de la cote, ainsi que les caractéristiques de la liaison du type déversoir qui lie le lit mineur au casier.

Le résultat ne peut être atteint au premier essai et nous avons dû procéder à différents tâtonnements et essais pour parvenir à l'état figuré sur le graphique n° 4 hors texte. Cela n'est pas encore parfait mais on peut se rendre compte que notre hypothèse est valable puisque la forme des limnigrammes est mieux reproduite. Nous en avons une preuve par le tracé de la loi hauteur-débit à Bakel qui n'est pas univoque et encadre correctement les derniers jaugeages réalisés par la brigade hydrologique du Mali et Sénégal-Consult.

Les figures 3, 4 et 5 montrent ce que sont les lois hauteur-débit à Kayes, Ambidédi et Bakel.

Dans le tableau suivant nous avons porté, pour les crues de 1964 et 1968, les écarts moyens absolu, les niveaux maximaux observés et calculés ainsi que les écarts aux maxima des crues. Ces valeurs correspondent à l'état du modèle en septembre 1969, avant que nous ayons commencé à faire passer sur le modèle les crues de contrôle.

Stations	1964				1968			
	Ecart moyen absolu(m)	Zmax N (IGN)	Zmax C (IGN)	ΔZ_{max} (m)	Ecart moyen absolu (m)	Zmax N (IGN)	Zmax C (IGN)	ΔZ_{max} (m)
Félou aval	0,098	32,16	32,43	+ 0,27	0,104	28,51	28,59	+ 0,08
Kayes	0,071	31,68	31,77	+ 0,09	0,101	27,62	27,70	+ 0,08
Ambidédi	0,088	28,54	28,40	- 0,14	0,098	24,69	24,81	+ 0,12
Bakel	0,115	23,72	23,66	- 0,06	0,121	20,12	20,13	+ 0,01

Ces valeurs diffèrent de celles données au paragraphe 6 du chapitre I car la crue de 1964 était arrêtée au 30 novembre et celle de 1968 au 15 octobre car nous ne possédions pas les données postérieures à cette date et que le réglage sur la crue 1966 n'était pas commencé.

Les résultats sur ce tronçon du Sénégal sont donc assez cohérents bien que les données ne soient pas toujours d'une grande qualité. On peut ainsi évoquer les apports de la Kolimbéré et du Karakoro ainsi que les observations biquotidiennes à des heures répétées invariables qui ne peuvent pas toujours donner une idée exacte des variations rapides de certaines pointes des crues.

Le grand écart observé à Félou aval entre le calcul et la lecture du niveau au maximum de la crue 1964 peut être dû à une erreur de lecture, la station de Félou aval n'étant pas toujours bien observée. Cette appréciation est donnée par MM. JACCON, KOITA et DJIGANDE dans leur rapport concernant l'hydrologie du haut Sénégal pendant les années 1965-1966 et 1967.

5. REGLAGE DU TRONCON BAKEL-KAEDI

Nous séparons les différents tronçons du Sénégal dans cet exposé, mais il est bien évident que le réglage final s'est fait sur le modèle complet.

5.1 Eléments disponibles permettant le contrôle

Sur ce tronçon on dispose de lectures aux échelles de Waoundé, Matam et Kaédi ainsi que des lois hauteur-débit aux stations de Matam (lits mineur et majeur) et de Kaédi (lit mineur uniquement).

La loi hauteur-débit de Matam est très intéressante puisqu'elle permet de vérifier la bonne propagation du débit dans les lits mineur et majeur. Celle de Kaédi, elle, nous donne des indications sur la façon dont évolue le débit dans le lit mineur depuis Matam et donc comment il faut essayer de faire intervenir le lit majeur en fonction de ses caractéristiques topographiques.

Le lit majeur est relativement simple à représenter dans ce tronçon du modèle. Comme le montre le schéma topologique, il suffit d'associer à un tronçon de lit mineur une maille rive gauche et une maille rive droite.

Bien que le critère de réglage soit basé sur les niveaux, nous pensons intéressant de donner, à des dates fixes, les débits à Matam (lits mineur et majeur) et à Kaédi (lit mineur). Ensuite nous examinerons les précisions obtenues sur les niveaux.

5.2 Reproduction de débits

Dans le tableau suivant nous avons porté les valeurs des débits calculés (Q_c) et les débits pris sur les lois hauteur-débit de la monographie du Sénégal de l'ORSTOM (Q_o). Pour Matam il s'agit des débits totaux, tandis que pour Kaédi il n'est question que des débits du lit mineur. Le terme ΔQ représente la différence entre le calcul et les valeurs issues de la monographie. Enfin les valeurs des débits de Kaédi placées entre parenthèses peuvent être entachées d'erreurs car elles correspondent à des extrapolations de la loi hauteur-débit.

Date	MATAM			KAEDI		
	Q_c (m ³ /s)	Q_o (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)	Q_c lit mineur (m ³ /s)	Q_o lit mineur (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)
1.07.1964	442	396	+ 46	442	406	+ 36
13.07.1964	317	333	- 16	343	350	- 7
23.07.1964	605	585	+ 20	567	600	- 33
2.08.1964	1 864	1 715	+ 149	1 623	1 300	+ 323
12.08.1964	2 624	2 740	- 116	1 907	1 725	+ 182
22.08.1964	2 427	2 385	+ 42	1 775	1 795	- 20
1.09.1964	3 182	3 375	- 193	2 002	2 030	- 28
11.09.1964	5 078	4 640	+ 438	2 484	2 350	+ 134
21.09.1964	5 346	5 270	+ 76	2 714	(2 570)	(+ 144)
1.10.1964	5 616	5 620	+ 4	2 743	(2 650)	(+ 93)
11.10.1964	3 785	3 500	+ 285	2 455	(2 400)	(+ 55)
21.10.1964	2 252	1 975	+ 277	1 920	1 800	+ 120
31.10.1964	1 327	1 140	+ 185	1 333	1 345	- 12
10.11.1964	834	780	+ 54	972	965	+ 7
20.11.1964	598	508	+ 90	683	650	+ 33
30.11.1964	414	380	+ 34	475	415	+ 60

Les écarts moyens absolus exprimés en pourcentage sont peu différents aux deux stations (5,7 % pour Matam et 5,5 % pour Kaédi). Cet ordre de grandeur est donc très acceptable. Toutefois les débits calculés à Matam sont nettement supérieurs aux débits donnés par la loi de l'ORSTOM du 11 octobre au 10 novembre. On note d'ailleurs que les niveaux calculés sont bien supérieurs aux niveaux observés pendant cette période.

5.3 Reproduction des niveaux

Dans le tableau suivant nous avons porté les valeurs brutes des précisions moyennes absolues ainsi que les différences entre les maxima observés et les maxima calculés (ΔZ_{max}). Les valeurs entre parenthèses découlent de la discussion qui suit.

Stations	Ecarts moyens absolus (m)		ΔZ_{max} (m)	
	1964	1968	1964	1968
Waoundé	0,166 (0,148)	0,095	- 0,05	- 0,26
Matam	0,116	0,097	- 0,04	- 0,14
Kaédi	0,108	0,144 (0,108)	- 0,03	- 0,15

Les valeurs diffèrent des valeurs finales du chapitre I pour les mêmes raisons que pour le tronçon précédent. Les crues de 1964 et 1968 donnent des résultats assez corrects dans leur ensemble, bien que cette zone intègre les imprécisions du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol et de l'utilisation des cartes au 1/20 000 pour la définition de certaines mailles du lit majeur.

Les écarts aux maxima de la crue de 1968 sont grands mais ils diminuent à partir de Waoundé.

Divers paramètres peuvent être évoqués pour expliquer ce phénomène : qualité des lectures à Waoundé, intervention trop rapide de la maille D14 située en amont de Bakel, emprunts trop importants de débit par le lit majeur entre Diawara et Waoundé. La crue de 1968 est faible et donc beaucoup plus sensible à la fine topographie du fond du lit majeur.

L'examen des niveaux observés fait apparaître à Waoundé en 1964 et à Kaédi en 1968 deux périodes où les lectures doivent être erronées car les limnigrammes ne sont pas en accord avec ceux que l'on peut tracer aux stations amont et aval. Nous avons ainsi la période du 19 au 25 juillet 1964 à Waoundé et celle du 20 au 26 juillet 1968 à Kaédi. Si on les écarte, les précisions sont améliorées et deviennent égales à 0,148 m à Waoundé pour 1964 et 0,108 m à Kaédi pour 1968, valeurs indiquées entre parenthèses dans le tableau ci-dessus.

6. REGLAGE DU TRONCON KAEDI-DAGANA

6.1 Eléments disponibles permettant le contrôle du réglage

La zone du fleuve comprise entre Kaédi et Dagana forme une unité complexe du fait :

- de la présence du Doué,
- des échanges de débit qui s'effectuent d'un lit mineur à l'autre au travers de l'île A Morphil,
- des écoulements latéraux le long des diéri sénégalais et mauritaniens.

La reconstitution correcte de l'évolution des crues demande dans ces conditions que les niveaux et les lois de débit soient connus en de nombreux points. Ces dernières lois sont indispensables car il faut pouvoir s'appuyer sur d'autres données que les niveaux dans les lits mineurs car nous ne connaissons rien sur les lits majeurs qui ont une grande importance puisqu'ils permettent le transit de près de la moitié du débit liquide total.

Les niveaux sont observés à Kaédi, Saldé, Boghé, Podor et Dagana sur le Sénégal et à N'Goui et Guédé sur le Doué.

En chacune de ces stations existe une loi hauteur-débit non univoque, mais on en peut leur attribuer la même valeur. En effet, ces lois ont été établies par le MAS et contrôlées par l'ORSTOM. Les contrôles de l'ORSTOM sont antérieures à 1954 sauf à Podor.

On note également qu'il n'y a eu qu'un seul contrôle à Boghé et à faible débit ($243 \text{ m}^3/\text{s}$) et que les jaugeages de l'ORSTOM s'intègrent bien aux déterminations de la MAS à N'Goui, Guédé et Podor tandis qu'à Saldé il existe une certaine divergence. Il est vrai que les lois de Saldé et Boghé ne sont basées que sur une seule année de mesures.

Les lois hauteur-débit de Podor, N'Goui et Guédé auront donc au cours du réglage un plus grand poids que celles de Saldé et Boghé. Cet état de fait entraînera d'ailleurs des difficultés pour le réglage.

Comme considération d'ordre général, il est intéressant de noter que le débit à N'Goui est le double de celui à Saldé dès que la cote en cette station est supérieure au niveau 11,30 IGN (Monographic du Sénégal). Ceci n'est pas dû à une dérivation importante de débit à la défluence du Doué, mais au fait que le lit majeur rive gauche restitue les débits qui y transittent par le marigot de Diavagne, en amont immédiat de N'Goui.

6.2 Reproduction des débits

6.21 Stations du Doué

Dans le tableau suivant nous avons porté les valeurs suivantes :

- Q_c débits calculés dans le lit mineur,
- Q_o débits du lit mineur déterminés au moyen des lois portées dans la monographie du Sénégal. Les niveaux pris en compte sont les niveaux observés.
- $\Delta Q = Q_o - Q_c$ différences entre les débits théoriques et les débits calculés.

Aux stations de N'Goui et Guédé nous avons ajouté celle de Guia où l'Orstom a fait un certain nombre de jaugeages.

Dates	N'GOUI			GUÉDÉ			GUIA		
	Q_c (m ³ /s)	Q_o (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)	Q_c (m ³ /s)	Q_o (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)	Q_c (m ³ /s)	Q_o (m ³ /s)	ΔQ (m ³ /s)
1.07.1964	209	142	- 67	209	160	- 48	211	203	- 8
13.07.1964	165	132	- 33	166	180	+ 14	170	220	+ 50
23.07.1964	275	215	- 60	247	220	- 27	246	250	+ 4
2.08.1964	650	580	- 70	564	470	- 94	550	460	- 90
12.08.1964	828	950	+ 122	619	575	- 44	601	575	- 26
22.08.1964	956	1 130	+ 174	653	650	- 3	595	640((610))	+ 45
1.09.1964	1 208	1 440	+ 232	711	710	- 1	590	690((620))	+ 100
11.09.1964	1 696	1 780	+ 84	789	775	- 14	556	725((690))	+ 169
21.09.1964	2 465	2 260	- 205	833	845	+ 12	569	765((725))	+ 196
1.10.1964	2 774	(2 730)	(- 44)	858	930	+ 72	745	810((785))	+ 65
11.10.1964	2 548	2 500	- 48	919	(1 000)	(+ 81)	843	850	+ 7
21.10.1964	1 843	1 680	- 163	833	(980)	(+ 147)	783	850	+ 67
31.10.1964	1 178	1 000	- 178	727	(870)	(+ 143)	644	720	+ 76
10.11.1964	752	560	- 192	654	655	+ 1	485	590	+ 105
20.11.1964	401	330	- 81	507	(470)	(- 37)	442	450	+ 8
30.11.1964	274	210	- 64	362	(305)	(- 57)	378	305	- 73

Les écarts moyens absolus exprimés en pourcentage sont respectivement de 10,2 - 8,2 et 11,2 % à N'Goui, Guédé et Guia. Si pour cette dernière station on envisage le tracé de la loi hauteur-débit au milieu des jaugeages de 1963, on a les valeurs portées entre doubles parenthèses et le pourcentage devient égal à 9,7 %. On serait donc tenté, comme pour les autres stations, de tracer à Guia une loi unique pour la montée de crue, tandis que la loi de décrue serait caractéristique de chaque crue comme cela a été mis en évidence à Podor et Dagana.

Les valeurs placées entre parenthèses simples sont sujettes à caution (courbes de jaugage extrapolées ou lectures douteuses).

En conclusion sur ces comparaisons de débits, on peut dire que le modèle reproduit avec une assez bonne fidélité les débits théoriques surtout si on tient compte que chaque crue a son allure propre et que la précision des mesures n'est pas absolue.

6.22 Stations du Sénégal

Le tableau ci-dessous donne les mêmes valeurs pour les stations de Saldé, Boghé, Podor.

Dates	SALDE			BOGUE			PODOR		
	Qc (m ³ /s)	Qo (m ³ /s)	Δ Q (m ³ /s)	Qc (m ³ /s)	Qo (m ³ /s)	Δ Q (m ³ /s)	Qc (m ³ /s)	Qo (m ³ /s)	Δ Q (m ³ /s)
1.07.1964	231	236	+ 5	231	235	+ 4	230	222	- 8
13.07.1964	196	222	+ 26	197	245	+ 48	196	246	+ 50
23.07.1964	293	345	+ 52	273	334	+ 61	264	275	+ 11
2.08.1964	839	660	- 179	815	717	- 98	766	650	- 116
12.08.1964	1 005	835	- 170	967	962	- 5	912	1 005	+ 93
22.08.1964	1 075	900	- 175	1 049	1 143	+ 94	1 086	1 235	+ 149
1.09.1964	1 166	1 000	- 166	1 113	1 218	+ 105	1 188	1 400	+ 212
11.09.1964	1 272	1 110	- 162	1 231	1 316	+ 85	1 342	1 540	+ 198
21.09.1964	1 433	1 340	- 93	1 488	1 500	+ 12	1 511	1 665	+ 154
1.10.1964	1 452	1 430	- 22	1 707	1 741	+ 34	1 724	1 800	+ 76
11.10.1964	1 322	1 420	+ 98	1 728	(1 855)	+ 127	1 761	(1 810)	+ 51
21.10.1964	1 102	1 080	- 22	1 492	1 525	+ 33	1 643	(1 760)	+ 117
31.10.1964	931	780	- 151	1 233	1 160	- 73	1 421	1 450	+ 29
10.11.1964	760	522	- 238	991	729	- 262	1 258	1 195	- 63
20.11.1964	523	362	- 166	637	490	- 147	965	880	- 85
30.11.1964	287	248	- 39	336	363	+ 27	483	470	- 13

On constate que les débits sont moins bien reproduits à Saldé (écart de 12,5 %) qu'à Podor (8,7 %) ou Boghé (7,9 %).

6.23 Conclusion sur la reproduction des débits

Quand on examine les valeurs des débits aux différentes stations, on remarque que le long du Doué les débits décroissent d'amont en aval alors que dans le Sénégal c'est le processus contraire qui se produit,

Ainsi, l'enrichissement du Sénégal à Boghé est dû au retour des débits qui transitent en rive droite (Lao), ce retour étant imposé par la digue de Boghé. Entre Boghé et Podor les débits varient peu car les apports de l'île A Morphil par le marigot de Gayo sont compensés par les départs en rive droite par le marigot de Koundi.

On constate aussi que la confluence du Sénégal et du Doué joue le rôle d'une nasse vis-à-vis du transit par l'île A Morphil. Les débits qui échappent à cette nasse profitent à la rive droite extrême (Toro et marigot de Koundi) et à la rive gauche du Doué (marigot de Ngalanka). On peut donc dire que la fermeture des débits est acceptable compte tenu du peu de connaissances que nous avons sur la façon dont les débits transitent dans les lits majeurs.

Enfin, dernière remarque, on observe que les débits calculés au mois de novembre sont nettement supérieurs aux débits théoriques en amont de Podor et Guia et nous en verrons la raison dans le paragraphe suivant.

6.3 Reproduction des niveaux

6.3.1 Difficultés rencontrées

Le réglage du modèle a été réalisé en utilisant simultanément les deux crues (1964 et 1968).

Au cours de ce travail nous nous sommes trouvés devant des résultats contradictoires en apparence.

En effet, la crue de 1968 demande, pour être réglée, que les seuils de liaison des lits mineurs avec les lits majeurs soient calés haut. De cette manière cette crue faible ne coule pratiquement que dans les lits mineurs comme le confirme sa vitesse rapide de propagation.

La crue de 1964 demande, au contraire, que ces mêmes seuils soient abaissés de façon qu'à la décrue on puisse soutenir les niveaux en aval de l'île A Morphil, ou plus exactement à partir de Podor.

Nous avons alors adopté une solution intermédiaire qui permet de ne pas trop amortir une crue faible comme 1968 et de reproduire une crue forte comme 1964 relativement bien. Cette politique ne conduit pas à un résultat absolument parfait car, ainsi que nous le notons ci-dessus, on a, dans le tiers central du Sénégal, des débits de décrue bien plus grands que les débits théoriques et, par conséquent, les niveaux sont nettement exhaussés.

Il est intéressant de remarquer que la nécessité de vidanger au maximum le lit majeur est apparue lorsque nous avons fait intervenir l'évaporation qui a comme avantage d'être une donnée physique valable et de réduire les débits au droit de Dagana.

Sur le fait que les seuils devraient être calés à des cotes différentes pour chaque crue, on peut émettre l'hypothèse que les seuils naturels de contrôle des marigots doivent être érodés de façons différentes selon la puissance de chaque crue. À ce moment là les vidanges du lit majeur doivent se faire plus ou moins rapidement.

Une autre difficulté est apparue lors du réglage du lit mineur du Sénégal entre Podor et Boghé. A Sarépoli - Mafou existe un seuil où se produit une cassure de la pente des écoulements. Aucune lecture n'était disponible et il a donc fallu agir au mieux tout en sachant qu'une erreur absolue peu importante peut prendre une valeur relative plus grande en raison de la faiblesse des pentes des écoulements.

6.32 Résultats acquis et discussion de ces résultats.

Dans le tableau suivant nous avons porté les valeurs des précisions moyennes absolues brutes et celles des différences entre les maxima calculés et observés. Pour certaines stations nous avons porté entre parenthèses une seconde valeur qui correspond à une correction de la première après prise en considération d'erreurs connues (par exemple décalage de deux éléments de l'échelle de Boghé) ou de lectures erronées.

Stations	Écarts moyens absolus (m)		ΔZ_{\max} (m)	
	1964	1968	1964	1968
Saldé	0,148	0,141	0,0	- 0,16
Boghé	0,132 (0,116)	0,237 (0,160)	- 0,18 (- 0,12)	- 0,20 (0,0)
Podor	0,075	0,105	± 0,10	± 0
N'Goui	0,165	0,157	- 0,07	- 0,07
Guédé	0,140		- 0,05	

Comme déjà indiqué, les valeurs ne correspondent pas à celles du chapitre I.

Les écarts moyens absolus reflètent bien les difficultés que nous avons eues pour régler le modèle dans cette zone. Si à Podor la précision est bonne, car là il y a un double contrôle sur les niveaux et les débits, les autres stations s'écartent de la précision contractuelle mais restent homogènes entre les deux crues. Nous pensons cependant qu'elles sont acceptables car la façon dont le modèle réagit montre que lorsqu'on veut améliorer les décrues qui sont les plus mauvaises, on ne peut y parvenir qu'en pénalisant les montées de crue qui sont à peu près bien reproduites.

Sur les observations, nous ne ferons qu'un seul commentaire relatif à la station de Boghé. On sait qu'en cette station les éléments 8 - 9 m et 9-10 m sont respectivement calés 4 et 6 cm trop bas (tome 2 de la monographie du Sénégal). En rectifiant les valeurs de 1964 on parvient aux valeurs entre parenthèses. En 1968, outre le décalage de ces éléments, on constate que la forme du maximum de la crue donnée par les observations n'est pas en accord avec celles de Saldé et Podor. L'application des différentes corrélations établies par l'ORSTOM montre que que le niveau moyen théorique est de 7,32 pour un maximum observé de 7,58 m. Il semble donc que les lectures qui précèdent et suivent le maximum de Boghé sont erronées et leur correction conduirait à un écart moyen absolu égal à 0,160 m et à une différence nulle entre les maxima observés et calculés.

6.4 Conclusion sur le réglage du secteur Kaédi-Dagana

Ce réglage a mis en évidence un certain nombre de difficultés que nous avons signalées ci-dessus. Certaines ont pu être résolues, d'autres non, et il est apparu que l'on ne pouvait parvenir qu'à un modèle ayant des caractéristiques moyennes permettant de reproduire de façon relativement correcte des crues de caractères très différents.

Certaines crues, de caractère moyen à faible, seront donc légèrement déformées en raison d'une intervention trop rapide du lit majeur, d'autres, de caractère moyen à fort, auront des montées de crue correctes mais des décrues excédentaires de Kaédi-Matam à Boghé-Guédi.

Ces phénomènes ne devraient pas entraîner des erreurs trop importantes lors de l'exploitation du modèle.

7. REGLAGE DU MODELE DE DAGANA A SAINT-LOUIS

7.1 Eléments disponibles permettant le contrôle du réglage

Ces éléments ne sont pas entièrement homogènes pour les crues de 1964 et 1968.

En effet, si en 1964 nous disposons de lectures de niveaux à Dagana, Richard-Toll, Rosso, Rong, Diaouar et Débi, en 1968 nous n'avons les lectures qu'aux trois premières stations.

Les débits peuvent être contrôlés à Dagana où la station a fait l'objet de plusieurs campagnes de mesure (1950, 1961, 1962 et 1964) et à Rosso où, malheureusement une seule campagne a eu lieu, en 1957. Ces stations donnent des indications sur les débits qui transitent dans le lit minceur mais, ici comme ailleurs, aucun élément ne permet un contrôle de ce qui se passe dans les lits majeurs.

On remarque que la route Saint-Louis Nouakchott construite en remblai oblige pratiquement tout le débit à revenir dans le lit minceur du Sénégal à Rosso, les débits empruntant le Natchié en rive gauche et les ponceaux en rive droite étant relativement modestes.

Ces différents éléments permettent donc d'orienter le réglage de cette partie du modèle.

7.2 Reproduction des débits

Dans le tableau suivant nous avons porté les débits :

- Qc débits calculés dans le lit minceur à Dagana et Rosso,
- Qt débits totaux calculés au droit de Dagana,

- Qo débits du lit mineur tirés de la monographie du Sénégal, tome 5 pour Dagana ou établis à l'aide de la loi hauteur-débit à Rosso,
- ΔQ_1 , différences entre les débits théoriques et calculés dans le lit mineur,
- ΔQ_2 , différences entre les débits calculés dans le lit mineur et les débits totaux calculés passant au droit de Dagana. Il s'agit donc des débits calculés empruntant le lit majeur rive droite.

Dates	DAGANA					ROSSO		
	Qc (m ³ /s)	Qt (m ³ /s)	Qo (m ³ /s)	ΔQ_1 (m ³ /s)	ΔQ_2 (m ³ /s)	Qc (m ³ /s)	Qo (m ³ /s)	ΔQ_1 (m ³ /s)
2.08.1964	1 246	1 246	905	- 341	0	1 218	1 190	- 28
12.08.1964	1 443	1 446	1 320	- 123	3	1 407	1 560	+ 153
22.08.1964	1 611	1 618	1 605	- 6	7	1 583	1 815	+ 232
1.09.1964	1 744	1 756	1 870	+ 126	12	1 707	2 040	+ 333
11.09.1964	1 888	2 008	2 070	+ 182	120	1 872	2 140	+ 268
21.09.1964	2 071	2 451	2 225	+ 154	380	2 128	2 315	+ 187
1.10.1964	2 465	3 250	2 420	- 45	785	2 596	2 435	- 161
11.10.1964	2 985	4 164	2 740	- 245	1 179	3 242	2 730	- 512
21.10.1964	3 213	4 492	3 190	- 23	1 279	3 535	(3 140)	(- 395)
31.10.1964	2 999	4 195	2 940	- 59	1 194	3 384	(3 450)	(+ 56)
10.11.1964	2 528	3 541	2 420	- 108	1 013	2 962	(2 470)	(- 492)
20.11.1964	1 979	2 575	1 950	- 29	596	2 345	2 040	- 305
30.11.1964	1 355	1 411	1 170	- 185	56	1 510	1 550	+ 40

Le tableau met en évidence les faits suivants :

- à Dagana les débits calculés et théoriques dans le lit mineur du fleuve sont bien reconstitués, les différences maximales étant en général inférieures à 10 %,
- toujours à Dagana, on constate que les débits qui empruntent le lit majeur rive droite sont grands puisqu'ils atteignent près de 1300 m³/s au maximum de la crue. La croissance rapide de ces débits montre qu'il doit s'agir d'un déversement général du Sénégal en rive droite,
- à Rosso, la correspondance débits calculés débits théoriques est moins bonne ; on peut expliquer cela par le fait que la loi hauteur-débit à Rosso n'est basée que sur une seule année de mesure (1957) et que la loi étant cyclique et fonction de la crue, on ne peut dans ces conditions être assuré de sa validité pour 1964.

Nous avons été surpris de l'importance des débits du lit majeur rive droite car dans la bibliographie relative au Sénégal on précise que tous les écoulements reviennent à Dagana et que les transits en rive droite sont pratiquement nuls. Au moment du réglage du modèle unidimensionnel on avait déjà remarqué que ces écoulements étaient importants.

L'introduction de l'évaporation a permis de réduire le débit maximal de l'ordre de 300 m³/s, mais on ne peut trouver une explication valable au phénomène si on n'admet pas qu'il existe. En effet, l'examen des niveaux atteints dans les mailles du lit majeur montre que les accumulations maximales ont été faites et qu'on ne peut pas freiner davantage la propagation du débit. Il faudrait donc supposer qu'il y a des pertes d'eau en amont de Dagana en rive droite puisque les écoulements de rive gauche sont obligés de revenir vers le Sénégal.

Le modèle donne donc un schéma des écoulements en contradiction avec les affirmations faites jusqu'ici. Deux solutions s'offrent alors à nous :

- ou admettre qu'ils existent,
- ou les nier et alors il faut supposer que la loi hauteur-débit à Dagana est fausse. Cette dernière hypothèse nous semble difficile à adopter car les jaugeages à Dagana ont été réalisés par le MAS et l'ORSTOM et ils se confirment les uns les autres.

En conclusion nous pensons que la solution la plus plausible est que ces écoulements existent et que l'ordre de grandeur des débits de débordement est correct. Ces débits auraient pu être minorés si on avait pu tenir compte, en amont de Dagana, des cordons interdunaires mauritaniens qui doivent, pour les fortes crues comme celle de 1964, être intéressés par l'écoulement, leur rôle étant de capturer des débits qui ne sont pas ou peu restitués à la décrue.

7.3 Reproduction des niveaux

Le tableau suivant donne, comme pour les autres tronçons du Sénégal, les précisions moyennes absolues ainsi que les écarts aux maxima des crues aux différentes stations.

Stations	Ecart moyen absolu (m)		Δ Zmax (m)	
	1964	1968	1964	1968
Dagana	0,112	0,072	- 0,12	- 0,05
Richard-Toll	0,119	0,079	- 0,04	- 0,12
Rosso	0,125	0,117	- 0,07	- 0,14
Rong	0,104		+ 0,10	
Diaourar	0,097			
Débi	0,106		+ 0,15	

Ces valeurs sont relativement correctes mais l'examen des différents graphiques hors textes relatifs à ces crues montre que la propagation n'est pas parfaitement en phase. Pour la crue puissante de 1964, les gradients de montée sont relativement bien reconstitués jusqu'au 20 septembre mais au-delà les gradients de montée modèle sont nettement plus grands.

Nous avons cherché, en jouant sur les débitances et le remplissage des mailles, à corriger ce défaut, mais nous n'y sommes par parvenus. Ces différences de forme dans les liminigrammes sont caractéristiques d'un manque de surfaces inondables. Comme le modèle, en aval de Rosso, est construit à partir des estimations de M. BAILLARGEAT, on peut se demander si les crues auxquelles il a assisté au cours de son étude lui ont permis de prendre en compte les surfaces totales inondables. En effet, l'examen des cartes montre qu'au delà des mailles introduites dans le modèle, des mares plus ou moins pérennes existent. Ces mares doivent être alimentées par le Sénégal lors des crues moyennes à fortes et la surface intéressée peut être grande (de l'ordre de 750 km²). Il est bien évident que si cette surface inondable pouvait être intégrée au modèle les résultats seraient meilleurs et qu'il serait plus facile de retrouver des gradients de montée semblables à ceux observés. Il ne peut cependant en être question car les données topographiques ne peuvent constituer un paramètre de réglage.

Enfin demeure l'inconnue de l'Aftout Es Sahel.

8. CONCLUSION A CE STADE DE L'ETUDE

La conclusion principale que nous avions tirée du modèle à ce stade de l'étude était que l'on pouvait considérer le modèle comme réglé et utilisable pour les différentes exploitations envisagées.

Dans le chapitre suivant nous verrons ce que le passage de la première crue de contrôle a donné et comment nous avons amélioré le réglage du modèle pour les bas niveaux.

Chapitre IV

PASSAGE DE LA PREMIERE CRUE DE CONTROLE ET AMELIORATION DU REGLAGE

1. DEROULEMENT DE CETTE PHASE D'ETUDE

A la suite des résultats exposés dans le chapitre III (cf. le rapport semestriel n° 3) il nous fut demandé de faire passer sur le modèle la crue de 1966 comme première crue de contrôle .

Au vu des résultats envoyés le 30 décembre 1969 il nous fut demandé :

- d'améliorer le réglage du modèle pour les faibles débits et de faire démarrer la crue au mois de juin ;
- de réaliser un modèle ayant pour origine Bakel afin de voir si les résultats pouvaient être meilleurs qu'avec une origine à Gouina .

L'amélioration du réglage s'est poursuivie jusqu'à la fin avril 1970 et les résultats ont été envoyés le 15 mai suivant .

Dans la suite de ce chapitre nous allons dire comment nous avons procédé et donner les résultats obtenus au terme de cette phase d'étude .

2. PASSAGE DE LA PREMIERE CRUE DE CONTROLE

2.1 Choix de la crue de contrôle

Le modèle étant construit en tenant compte de la digue périphérique du delta sénégalais (état actuel), il était souhaitable de choisir une crue postérieure à sa construction . De plus, le modèle ayant été réglé avec une crue forte (1964) et une crue faible (1968), le choix devait donc se fixer sur une crue moyenne . La crue de 1966 répondait à ces conditions ; la détermination de ses caractéristiques est exposée dans l'annexe n° 4 de ce rapport .

2.2 Résultats obtenus

Le modèle sur lequel passe la crue de 1966 est le modèle qui a servi pour les derniers calculs des crues de 1964 et 1968. Aucune modification ne lui a été apportée et les résultats sont donc comparatifs.

Le tableau suivant résume ces résultats. Nous y avons porté les précisions moyennes absolues, les niveaux maximaux calculés et observés, ainsi que les écarts aux maxima entre le calcul et la nature. A côté des précisions moyennes absolues brutes, nous avons indiqué, pour certaines stations, des valeurs entre parenthèses qui correspondent à des corrections justifiées dans la discussion ultérieure de ces résultats.

Stations	Ecart moyen absolu (m)	Z_{maxN} (I.G.N.)	Z_{maxC} (I.G.N.)	ΔZ_{max} (m)
Félou aval	0,109	30,36	30,55	+ 0,19
Kayes	0,112	29,62	29,80	+ 0,18
Ambidédi	0,133	26,95	27,12	+ 0,17
Bakel	0,214	22,86	23,20	+ 0,34
Waoundé	0,123	19,11	19,27	+ 0,16
Matam	0,217 (0,177)	15,59	15,64	+ 0,05
Kaédi	0,264 (0,217)	12,38	12,51	+ 0,13
Saldé	0,298 (0,207)	10,99	11,09	+ 0,10
Il'Goui	0,205 (0,184)	10,83	10,91	+ 0,08
Boghé	0,305 (0,201)	8,55	8,51	- 0,04
Guédé	0,134 (0,094)	6,62	6,58	- 0,04
Podor	0,085	5,64	5,65	+ 0,01
Dagana	0,121	3,60	3,83	+ 0,23
Richard-Toll	0,105		3,29	
Rosso	0,099	2,94	3,12	+ 0,18
Ronq	0,081	2,63	2,84	+ 0,21

Comparées aux résultats obtenus avec les crues de 1964 et 1968, les valeurs portées dans ce tableau ne montrent pas que le modèle est bien réglé puisque de Matam à Boghé les précisions sont nettement supérieures à 0,20 m avant toute correction.

On peut tout de même faire quelques remarques intéressantes :

- La précision moyenne absolue et l'écart au maximum à Bakel sont grands, le maximum de la crue de 1966 correspond à la zone des niveaux pour laquelle nous n'avons pu régler correctement les niveaux en 1964, la maille introduite en amont du modèle n'ayant pas le fonctionnement souple qu'aurait pu donner une prise en compte correcte du lit majeur dans cette région ;
- Le grand écart au maximum à Bakel s'estompe assez vite et, de Waoundé à Podor, on obtient un écart de l'ordre de 0,10 m bien que les précisions moyennes ne soient pas très bonnes ;

- A partir de Dagana, les écarts au maxima de la crue sont grands . On peut en trouver une explication dans le fait que les maxima de 1966 correspondent à la zone des niveaux pour laquelle les gradients modèle sont supérieurs aux gradients nature.

2.3 Analyse des résultats

L'examen du graphique n° 6 montre qu'en amont de Bakel la propagation de la crue est correcte . A Bakel des divergences importantes se manifestent . On a vu dans le paragraphe précédent ce qu'il en était dans la période du maximum . De plus, entre le 10 août et le 10 septembre apparaît une divergence qui ne peut s'expliquer que par des apports excédentaires de la Falemé . Cet excédent de débit se propage vers l'aval et on le retrouve pratiquement tout au long du fleuve . Nous incriminons la Falemé car le rapport concernant "l'hydrologie du bassin amont du Sénégal de 1965 à 1967" dit que les lectures de Kidira sont peu sûres . Ainsi, la comparaison des niveaux observés à Gourbassi et à Kidira, montre que des variations importantes de niveau en amont (Gourbassi) sont traduites par un palier à Kidira .

Pour en revenir à Bakel, on peut également remarquer qu'en 1964 et 1968, nous n'avons pas pour ces niveaux des divergences aussi grandes .

En conclusion, nous pensons que la précision moyenne absolue à Bakel est pénalisée par des paramètres qui ne dépendent pas de nous (mauvaise qualité des lectures, manque de données topographiques dans cette région) et cette pénalisation, quoique amortie, s'étend à l'aval .

En aval de Bakel on remarque que l'accrochage du calcul se fait mal ; ceci est dû au fait que le calcul commence par l'établissement d'un régime de stabilisation qui correspond à un régime permanent avec les débits du 1er juillet . Comme la crue est tardive et qu'il lui faut un certain nombre de jours pour parvenir jusqu'en aval, on ne peut donc accrocher le calcul que vers le 25 juillet . Il est bien évident qu'un tel phénomène diminue fortement la précision du modèle et les valeurs entre parenthèses portées dans le tableau correspondent à l'hypothèse où l'on ne tient pas compte de la période du 1er au 25 juillet pour le calcul de la précision .

2.4 Conclusion partielle

Malgré ses imperfections, le passage sur le modèle de la crue de 1966 a montré que dans l'ensemble il était capable de reproduire les ondes de crues avec une précision dépendant de la qualité des données . Si cette qualité est insuffisante, il s'ensuit des divergences qui viennent pénaliser les résultats .

Une réunion s'est alors tenue à Grenoble les 19 et 20 janvier 1970 et les décisions essentielles ont été les suivantes :

- poursuivre le réglage du modèle avec la crue de 1966 comme troisième crue de réglage . L'effort principal est à porter sur la reproduction des bas niveaux et pour cela on fera démarrer la crue le plus tôt possible au mois de juin ;

- la précision mauvaise obtenue à Bakel étant sûrement due à des données erronées, construire un modèle ayant comme origine Bakel comme limite amont avec une loi de niveau imposée en fonction du temps .

3. AMELIORATION DU REGLAGE POUR LES BAS NIVEAUX

Le problème est de faire démarrer le calcul le plus tôt possible au mois de juin afin de ne pas retrouver les écarts importants visibles sur le graphique n° 6 hors texte . Il faut également prendre en considération le fait que le modèle que nous avons construit n'est pas un modèle permettant de calculer les étiages . En effet, un modèle d'étiage doit être construit avec des intervalles entre sections relativement petits, de l'ordre de un à deux kilomètres, alors que le lit mineur du Sénégal est découpé en tronçons d'une longueur moyenne de 14 km environ .

Ces remarques faites, nous avons procédé de la façon suivante . Après avoir refait les bandes de données de crue et de contrôle du 1er juin au 31 décembre 1966, nous avons cherché à accrocher le calcul le plus tôt possible au mois de juin . Après plusieurs essais, le calcul a démarré le 12 juin pour un débit de 60 m³/s à Gouina et de 9 m³/s à Kidira . Précisons que nous avons dû pendant ces essais modifier le modèle afin d'abaisser les cotes de base de certaines liaisons fluviales entre Bakel et Saldé .

Le premier calcul a montré que le modèle était mal réglé pour ces débits, les débitances des lits mineurs étant trop grandes et, par conséquent, les niveaux calculés trop bas . Nous avons donc procédé par ajustements successifs des débitances, chaque essai apportant une amélioration sur les niveaux au démarrage de la crue .

Le réglage a été rendu difficile car on a de grandes variations de niveau accompagnées de faibles variations de débit au moment où la crue arrive . Les lois de débitance que nous avons réglées sont donc très raides . Nous pensons que cela est dû à la présence des seuils qui, dans la nature, contrôlent les niveaux dans cette gamme de débit (jusqu'à 150 m³/s environ) . Or, le modèle ne les représente pas et il est alors difficile de parvenir à une bonne conformité entre la nature et le modèle . Les graphiques n° 10 à 15 hors texte montrent ce que sont les limnigrammes calculés sur les modèles Gouina-Saint-Louis et Bakel-Saint-Louis . Ces résultats sont nettement meilleurs que ceux qui figurent sur le graphique n° 6 relatif au modèle Gouina-Saint-Louis.

Ces résultats ne sont d'ailleurs pas les meilleurs que nous ayons obtenus . En effet, à cause des crues de 1964 et 1968, nous avons dû revenir en arrière car leur démarrage était nettement pénalisé . C'est donc une solution moyenne que nous présentons, solution issue d'un réglage réalisé à l'aide des trois crues . Ceci explique aussi que le démarrage de la crue de 1968 est moins bon que celui figurant sur le graphique n° 5 .

La conclusion sur cette phase du réglage est que le modèle réagit assez bien à des débits faibles et que les niveaux obtenus sont valables, aux stations limnimétriques, à quelques décimètres près .

On atteint cependant la limite d'utilisation du modèle car une étude correcte des régimes d'étiage demande la réalisation d'un modèle bien plus fin et détaillé, représentant exactement l'hydrographie des lits mineurs du Sénégal et du Doué .

4. RESULTATS OBTENUS AVEC LES CRUES DE 1964 - 1966 et 1968

Dans les tableaux suivants nous avons porté, pour les différentes stations les valeurs :

- de la précision moyenne absolue ;
- des maxima observés ;
- des maxima calculés ;
- des écarts entre les maxima calculés et observés; à Ambidédi (1966), Waoundé (1964), Kaédi (1968) et Boghé (1964, 1966) nous avons donné, entre parenthèses, les valeurs corrigées de la précision . Ces corrections correspondent à des erreurs manifestes dans les lectures de niveau .

4.1 Précisions moyennes absolues

Stations	1964	1966 ₁	1966 ₂	1968
Félou aval	0,094	0,109		0,086
Kayes	0,083	0,119		0,077
Ambidédi	0,095	0,190 (0,121)		0,067
Bakel	0,102	0,192		0,145
Waoundé	0,158 (0,143)	0,127	0,070	0,145
Matam	0,108	0,197	0,159	0,168
Kaédi	0,104	0,211	0,151	0,216 (0,195)
Saldé	0,128	0,192	0,187	0,227
M'Goui	0,128	0,199	0,175	0,136
Boghé	0,143 (0,128)	0,211 (0,199)	0,195 (0,185)	0,228
Guédé	0,138	0,150	0,163	
Pedor	0,089	0,15	0,155	0,122
Dagana	0,110	0,118	0,130	0,081
Richard-Toll	0,113	0,075	0,108	0,082
Rosso	0,123	0,107	0,124	0,104
Ronq	0,113	0,090	0,120	

1966₁ correspond au passage de la crue de 1966 sur le modèle Gouina - Saint-Louis .

1966₂ correspond au passage de la crue de 1966 sur le modèle Bakel - Saint-Louis .

4.2 Reproduction des niveaux maximaux

Les deux tableaux suivants donnent les valeurs pour les crues de 1964, 1966₁, 1966₂ et 1968 .

Stations	1964			1968		
	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)
Félou aval	32,16	32,43	+ 0,27	28,51	28,59	+ 0,08
Kayes	31,68	31,77	+ 0,09	27,62	27,70	+ 0,08
Ambidédi	28,54	28,40	- 0,14	24,69	24,81	+ 0,12
Bakel	23,72	23,66	- 0,06	20,12	20,13	+ 0,01
Waoundé	19,53	19,53	0	17,24	17,00	- 0,24
Matam	15,94	15,89	- 0,05	13,81	13,71	- 0,10
Kaédi	12,77	12,80	- 0,03	10,85	10,82	- 0,03
Saldé	11,49	11,48	- 0,01	9,18	9,11	- 0,07
N'Goui	11,35	11,29	- 0,06	9,12	9,13	+ 0,01
Boghé	8,91	8,86	- 0,05	7,01	6,86	- 0,15
Guédé	6,87	6,93	+ 0,06			
Podor	6,10	6,10	0	3,94	4,02	+ 0,08
Dagana	4,08	4,08	0	2,36	2,36	0
Richard-Toll	3,51	3,54	+ 0,03	1,99	1,96	- 0,03
Rosso	3,32	3,37	+ 0,05	1,92	1,83	- 0,09
Ronq	2,93	3,08	+ 0,15			

Stations	1966 ₁			1966 ₂		
	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)
Félou aval	30,36	30,54	+ 0,18			
Kayes	29,62	29,79	+ 0,17			
Ambidédi	26,95	27,11	+ 0,16			
Bakel	22,86	23,18	+ 0,34			
Waoundé	19,11	19,25	+ 0,14	19,11	19,05	- 0,06
Matam	15,59	15,63	+ 0,04	15,59	15,50	- 0,09
Kaédi	12,38	12,51	+ 0,13	12,38	12,41	+ 0,03
Saldé	10,99	11,08	+ 0,09	10,99	10,95	- 0,04
N'Goui	10,83	10,91	+ 0,08	10,83	10,79	- 0,04
Boghé	8,55	8,50	- 0,05	8,55	8,41	- 0,14
Guédé	6,62	6,57	- 0,05	6,62	6,50	- 0,12
Podor	5,64	5,65	+ 0,01	5,64	5,52	- 0,12
Dagana	3,60	3,79	+ 0,19	3,60	3,71	+ 0,11
Richard-Toll						
Rosso	2,94	3,05	+ 0,11	2,94	2,97	+ 0,03
Ronq	2,63	2,77	+ 0,14	2,63	2,69	+ 0,06

Ces trois tableaux correspondent à ceux du chapitre I .

4.3 Analyse des résultats

L'examen attentif des graphiques 7 à 18 met en évidence un certain nombre d'anomalies dans les lectures à certaines échelles . Nous avons ainsi noté :

- Ambidédi
La précision est bonne en 1964 et 1968 . Par contre, en 1966, elle est égale à 0,190 m . Or, entre le 10 novembre et le 31 décembre les lectures sont visiblement erronées ; si on ne tient pas compte de cette période dans le calcul de la précision, elle devient égale à 0,121 m ce qui est mieux en accord avec les résultats précédents ;
- Waoundé
En 1964, la période du 19 au 25 juillet comporte des lectures fausses . Quand on les écarte du calcul de la précision, elle passe de 0,158 à 0,143 m ;
- Kaédi
Les lectures du 20 au 26 juillet 1968 sont incompatibles avec les observations amont et aval . La précision initiale de 0,216 m devient égale à 0,195 m si l'on n'en tient pas compte . A la décrue, certaines lectures sont également douteuses ; c'est ce qui explique que la précision soit mauvaise, d'autant plus qu'elle intègre aussi la déformation de l'onde de crue due à une intervention trop rapide du lit majeur ;
- Boghé
En 1964 et 1966 nous avons corrigé les précisions en éliminant les décalages des éléments 8 - 9 m et 9 - 10 m signalés dans la monographie du Sénégal .

D'autres anomalies apparaissent aussi dans les lectures mais il est difficile d'en tenir compte .

L'impression que l'on a en analysant les résultats est que le modèle réagit assez bien dans l'ensemble mais que la zone complexe existant au droit de l'île A Morphil demanderait, pour parvenir à un meilleur réglage, une exploration systématique qui devrait se poursuivre sur plusieurs années . Il n'en demeure pas moins que les crues étudiées sont dans l'ensemble représentatives . Le fait que les maxima observés soient assez bien retrouvés montre que les résultats que fourniront l'exploitation du modèle seront parfaitement utilisables .

5. CRITIQUE DE LA CRUE DE 1964

La précision moyenne absolue pour les 16 stations du fleuve entre Féloü aval et Rong est égale à 0,112 m, c'est-à-dire peu différente de la valeur contractuelle .

Les maxima calculés sont peu différents de ceux observés, ce qui fournit une preuve complémentaire de la valeur du modèle pour une crue forte .

On n'a pu cependant supprimer certaines anomalies telles que niveaux supérieurs pendant une partie de la décrue ou divergence des gradients de crue à Dagana et en aval, mais elles ne sont pas suffisamment importantes pour que la précision en soit très affectée .

On peut également constater que les décrues du mois de décembre sont assez bien reproduites .

La crue de 1964 pour laquelle nous disposons du maximum de renseignements a donc pu être reproduite par le modèle d'une façon très correcte.

6. CRITIQUE DE LA CRUE DE 1966

La crue de 1966 est une crue moyenne . Les divergences acceptables pour une crue forte comme celle de 1964 vont, par contre, être très accentuées ici et les résultats vont s'en ressentir .

Les calculs se font sur deux modèles pour essayer de les réduire et aussi éliminer l'influence de données qui semblent erronées . Nous avons donc le modèle complet de Gouina à Saint-Louis et le modèle partiel de Bakel à Saint-Louis . Pour le premier la condition limite amont sera une loi de débit en fonction du temps et pour le second une loi de niveau en fonction du temps . Cette dernière solution est un palliatif mais ne représente pas une solution absolue pour le problème posé . En effet, la loi de débitance à Bakel est réglée avec le modèle d'ensemble et intègre les imprécisions locales (topographie, débits du Sénégal et de ses affluents , ..). Quand on examine les graphiques 10, 11 et 12 illustrant la crue de 1966 sur le modèle complet, on note que des divergences apparaissent entre le calcul et la nature aux époques suivantes :

- mois de juillet
des variations rapides ne sont pas données par le modèle . Comme on ne coule que dans le lit mineur, c'est donc que les données ne permettent pas de moduler les débits ;
- du 10 août au 10 septembre à Bakel et en aval
ici on a un excédent de débit . Comme cette période est correctement reproduite en amont de Bakel on doit donc penser à la Falémé ;
- du 1er au 20 octobre
c'est la période qui couvre le maximum de la crue . Les différences sont surtout sensibles à Bakel et on peut supposer qu'elles sont dues à un manque d'amortissement de la crue en raison d'une mauvaise représentation du lit majeur (rappelons qu'aucune couverture altimétrique ne couvre cette région schématisée par la maille D14).

En passant aux graphiques 13, 14 et 15 concernant la même crue sur le modèle Bakel-Saint-Louis, on note que les niveaux sont mieux retrouvés en juillet et en août et que dans l'ensemble l'évolution de l'onde de crue est mieux reproduite .

Les résultats absolus ne sont toujours pas aussi bon que pour la crue de 1964 mais, ainsi que nous l'avons dit, chaque crue ayant son caractère propre, un modèle représentant un état moyen ne pourrait pas, même si toutes les données étaient parfaites, donner les mêmes résultats pour toutes les crues . Cette remarque est à fortiori juste quand les données ne sont pas d'une qualité homogène .

Dans les deux calculs on retrouve, en début de décrue, des niveaux trop hauts . Ceci est une conséquence de la vidange maximale du lit majeur et il est normal que le phénomène prenne une importance absolue plus grande pour une crue moyenne comme celle de 1966 .

Enfin, au mois de décembre, les niveaux calculés sont en accord avec les niveaux observés .

En conclusion, on peut dire que par rapport aux résultats illustrés par le graphique n° 6 on a une amélioration certaine .

7. CRITIQUE DE LA CRUE DE 1968

La précision moyenne calculée pour les 14 stations du fleuve dont nous disposons des lectures est égale à 0,133m. comme pour la crue de 1966, les précisions du tiers central du Sénégal sont moins bonnes qu'en amont ou en aval .

La crue subit aussi une déformation pendant sa propagation dans le tiers central et il est alors normal que la précision s'en ressente . En effet, un décalage à la montée de crue de deux ou trois jours conduit à des erreurs absolues importantes . Cette déformation est une conséquence de l'intervention du lit majeur qui, normalement, pour une crue faible, ne doit jouer qu'un rôle négligeable . Nous avons vu que ceci nous avait été imposé au cours du réglage du modèle .

En décembre les niveaux calculés sont supérieurs aux niveaux observés de Bakel à Boghé . Plusieurs hypothèses peuvent être avancées mais la plus plausible est que les lois de débitances étant très raides dans ces gammes de niveaux, des différences de quelques m³/s conduisent à des variations de niveaux importantes et donc à des écarts non négligeables .

8. CONCLUSION

A la suite de ces essais, une réunion tenue à Grenoble les 11 et 12 juin 1970 a eu pour conclusion que le modèle, compte tenu des données disponibles, pouvait être considéré comme acceptable car il intègre des imprécisions concernant les données et prend en compte des crues de caractères très différents. Dans ces conditions il nous a été demandé de faire passer sur le modèle une deuxième crue de contrôle, celle de 1969 . Le chapitre suivant lui sera consacré .

Chapitre V

PASSAGE SUR LE MODELE DE LA CRUE DE 1969 COMME DEUXIEME CRUE DE CONTROLE

1. CONSIDERATIONS GENERALES SUR LA CRUE DE 1969

La définition des données est faite dans l'annexe n° 4 de ce rapport . Nous pensons cependant qu'il est intéressant de dégager ses caractères principaux .

O'est une crue un peu inférieure à la crue moyenne du Sénégal . Si l'on prend des hauteurs maximales comme critère de classement, la crue de 1969 se classe aux rangs suivants en prenant comme origine 1903 :

45 à Bakel
45 à Matam
36 à Kaédi
38 à Boghé
40 à Podor
36 à Dagana

C'est une crue assez précoce puisque les premières montées rapides qui suivent le régime d'étiage se produisent à la fin juin ou au début juillet selon les stations considérées . De la mi-juillet à la mi-août on observe un palier au cours duquel les débits varient peu . La pointe de la crue est étalée dans le temps et, en aval de Kaédi, on voit que les niveaux maxima sont observés plusieurs jours . La décrue ne s'amorce qu'après le 1er novembre ce qui montre que la crue, sans être très puissante, couvre une période de près de deux mois et demi .

O'est une crue qui se situe entre celle de 1966 et celle de 1968 . Elle est donc intéressante pour tester le modèle dans des conditions assez proches de celles qu'aurait donné le choix de la crue moyenne caractéristique du Sénégal .

2. CARACTERISTIQUES DES ESSAIS REALISES

Le modèle utilisé est le modèle complet Gouina-Saint-Louis . Le premier calcul, 1969₁, néglige les apports du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol ; dans le deuxième calcul, 1969₂, par l'analyse des résultats du premier, nous avons estimé une loi de débit de ces affluents que nous avons bloquée sur le Gorgol, au niveau de Kaédi .

Nous avons agi ainsi car les résultats du premier calcul n'étaient pas satisfaisants en aval de Matam (graphiques 19, 20 et 21), des décrochements dans les niveaux calculés à partir de Kaédi ne pouvant s'expliquer que par un manque de débit entraîné par l'hypothèse que les trois affluents ci-dessus n'avaient rien fourni. Cette hypothèse avait été faite car nous n'avions aucune donnée les concernant.

Ces deux calculs ne sont cependant pas inutiles. En effet, ils montrent que les écarts ne sont guère apparents vers le maximum de la crue et que les périodes de 30 à 40 jours pendant lesquelles on doit assurer la submersion des terres ne sont pas influencées. Les vraies erreurs seront localisées aux mailles où ces affluents arrivent car leur remplissage ne se fera qu'à partir du Sénégal alors que dans la réalité il est dû, au départ, à leurs apports. Le oualou du Gorgol sera donc fortement pénalisé.

Enfin ces deux calculs montrent un fait capital : la recherche d'une précision ne peut se faire que si toutes les données sont complètes et dignes de confiance. S'il n'en est pas ainsi, il faut s'attendre à ce que le modèle donne des résultats en accord avec leur qualité.

3. EXAMEN DES RESULTATS DU PREMIER CALCUL - CRUE 1969₁

Nous rappelons que ce calcul est celui dans lequel nous avons négligé les apports du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol.

3.1 Considérations générales

L'examen des graphiques 19, 20 et 21 met en évidence les faits suivants :

- le démarrage de la crue, le 1er juillet, est en général correct, les plus grandes différences étant observées à Saldé et N'Goui. Ceci démontre la validité de la méthode qui consiste à imposer les niveaux en chaque maille plutôt que de faire une stabilisation initiale qui correspond à l'établissement d'un régime permanent avec les débits de Gouina et de Kidira et des autres affluents ou défluents le premier jour du calcul. Ce procédé est valable quand le régime est permanent tout au long du fleuve ;
- de Félou aval à Matam les modulations de la crue sont, dans l'ensemble, assez bien reproduites bien que, par moment, on observe des niveaux calculés supérieurs aux niveaux naturels ;
- en aval de Matam, du 16 juillet au 10 septembre environ, les niveaux calculés sont systématiquement inférieurs aux niveaux observés. Au début de cette période on peut admettre qu'il s'agit d'un déficit en débit dû au fait que l'on a négligé les trois affluents mauritaniens. Au delà du 22 août il peut s'y ajouter l'effet du lit majeur qui, intervenant trop tôt, déforme l'onde de crue et tend à la retarder. On retrouve le même phénomène que celui observé avec la crue de 1968 ;

- les maxima sont bien retrouvés si l'on excepte les stations de Bakel et Saldé . Pour cette dernière les lectures couvrant la période du maxima sont sûrement erronées (voir annexe n° 4) ;
- enfin, les décrues, aux stations où les lectures existent en novembre et décembre sont assez bien reconstituées .

3.2 Résultats acquis

Comme pour les autres crues, nous avons porté les valeurs de la précision moyenne absolue, des niveaux maximaux observés (Z_{\max_N}) et calculés (Z_{\max_C}), ainsi que la différence ΔZ_{\max} entre le calcul et l'observation . Nous avons encore porté entre parenthèses les valeurs corrigées qui tiennent compte des lectures erronées ou des erreurs systématiques .

Stations	Précision moyenne absolue (m)	Z_{\max_N} (I.G.N.)	Z_{\max_C} (I.G.N.)	ΔZ_{\max} (m)
Félou aval	0,151 (0,120)	29,78	29,68	- 0,10
Kayes	0,106	28,87	28,94	+ 0,07
Bakel	0,171	21,27	21,52	+ 0,25
Waundé	0,158	18,20	18,18	- 0,02
Natam	0,172	14,81	14,79	- 0,02
Kaédi	0,265 (0,232)	11,95	11,86	- 0,09
Saldé	0,283 (0,245)	10,59	10,31	-0,28 (-0,12 à -0,03)
N'Goui	0,255 (0,187)	10,23	10,22	- 0,01
Boghé	0,325 (0,299)	8,00	7,87	- 0,13
Podor	0,200	5,14	5,05	- 0,09
Dagana	0,136	3,20	3,32	+ 0,12
Richard-Toll	0,100	2,73	2,80	+ 0,07
Rong	0,119	2,35	2,35	0

3.3 Analyse des résultats

En certaines stations des erreurs de lectures sont manifestes :

- Félou aval
Si l'on ne tient pas compte des jours signalés dans l'annexe n° 4, la précision devient égale à 0,120 m ; elle est du même ordre de grandeur que celles obtenues avec les autres crues.
- Kaédi
La précision moyenne absolue devient égale à 0,232 m quand on élimine du calcul les jours où les lectures sont erronées . Elle est encore grande mais reste du même ordre de grandeur que celles des crues 1966, et 1968.

La précision moyenne semble être aussi pénalisée à la fin octobre et au début novembre car les niveaux observés paraissent un peu bas . Les corrélations donnent des niveaux supérieurs de 0,10 à 0,15 m pendant cette période et, s'il en était vraiment ainsi, la précision serait encore améliorée de 0,02 m environ .

• Saldé

Dans la période du 19 septembre au 18 octobre les niveaux observés semblent anormalement hauts (voir annexe n° 4) . Si l'on admet que l'écart moyen pendant cette période est de 0,15 m, la précision serait égale à 0,245 m ce qui est encore grand . Quant à l'écart au maximum, il serait égal de 0,12 à 0,03 m selon les corrélations que l'on prend . Ces valeurs semblent plus raisonnables quand on se réfère aux niveaux observés à N'Goui .

• N'Goui

Les lectures erronées des mois de juillet et décembre pénalisent fortement la précision moyenne absolue . Quand on les écarte, elle est égale à 0,187 m .

• Boghé

En tenant compte du décalage de 0,04 m de l'élément 8 - 9 m signalé dans la monographie du Sénégal et de la période douteuse du 16 au 22 novembre, la précision est de 0,299 m c'est-à-dire qu'elle reste très mauvaise .

Malgré ces corrections, les précisions restent toujours inférieures à celles des autres crues .

4. EXAMEN DES RESULTATS DU DEUXIEME CALCUL - CRUE 1969₂

4.1 Considérations sur la crue 1969₂

Les graphiques 22, 23 et 24 hors textes montrent que la prise en considération d'une loi de débit pour le Gorgol améliore nettement les résultats au début de la crue, les écarts aux maxima restant sensiblement les mêmes .

Les gains sur la précision moyenne absolue sont importants puisqu'ils varient de 0,05 à 0,08 m . Ceci montre que la recherche d'une précision doit s'accompagner d'une connaissance parfaite des données de crue et d'un contrôle sévère des données limnimétriques de contrôle .

Il est évident que la précision aurait pu être améliorée par une analyse de ce deuxième calcul et l'estimation d'une nouvelle loi de débit pour le Gorgol . Le but du modèle n'étant pas de régler des débits d'affluents, nous avons préféré nous arrêter .

4.2 Résultats acquis

Le tableau suivant les résume . A titre de comparaison nous avons également indiqué les précisions moyennes absolues pour la crue 1969₁ .

Stations	Précision moyenne absolue (m) 1969 ₁	Précision moyenne absolue (m) 1969 ₂	Z max _N (I.G.N.)	Z max _C (I.G.N.)	Δ Z max (m)
Félou aval	0,151 (0,120)	0,151 (0,120)	29,78	29,68	- 0,10
Kayes	0,106	0,106	28,87	28,94	+ 0,07
Bakel	0,171	0,170	21,27	21,52	+ 0,25
Waoundé	0,158	0,158	18,20	18,18	- 0,02
Matam	0,172	0,169	14,81	14,80	- 0,01
Kaédi	0,265 (0,232)	0,215 (0,182)	11,95	11,88	- 0,07
Saldé	0,283 (0,245)	0,212 (0,174)	10,59	10,33	-0,26 (-0,10-0,03)
II'Goui	0,255 (0,187)	0,198 (0,123)	10,23	10,24	+ 0,01
Boghé	0,327 (0,299)	0,247 (0,217)	8,00	7,90	- 0,10
Podor	0,200	0,144	5,14	5,07	- 0,07
Dagana	0,136	0,116	3,20	3,34	+ 0,14
Richard-Toll	0,100	0,102	2,73	2,81	+ 0,08
Rong	0,119	0,102	2,35	2,30	+ 0,01

Les valeurs entre parenthèses de la crue de 1969₂ tiennent compte des lectures erronées signalées pour le calcul 1969₁ ; nous ne pensons donc pas utile d'y revenir .

5. CONCLUSION

Les résultats acquis diffèrent selon que l'on considère la crue 1969₁ ou la crue 1969₂ . Cependant, nous pensons que l'on peut dire que le deuxième calcul confirme les conclusions que nous avions faites dans le chapitre IV, c'est-à-dire que le modèle est réglé et qu'il permet de reproduire avec une précision acceptable l'évolution des ondes de crue le long de la vallée du Sénégal .

Chapitre VI

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

1. CONCLUSIONS

Le réglage du modèle mathématique a été réalisé au moyen d'une gamme de crues qui va de la plus forte (1964) à une des plus faibles (1968) en passant par des crues moyennes (1966 et 1969). Les résultats acquis montrent que le modèle représente un état moyen du fleuve et qu'il permet donc de répondre correctement aux différents types d'exploitation qui lui seront demandés dans la mesure où l'on restera dans la gamme des niveaux étudiés.

Une autre remarque que nous pensons utile de répéter dans ce paragraphe est que la précision des résultats que l'on peut attendre du modèle dépend directement de la qualité des données dont on dispose.

Par contre, pour ce qui est des surfaces inondées dans l'état naturel, on peut ajouter que le manque de connaissances concernant certains affluents ou défluents doit s'avérer secondaire et que les résultats devraient, surtout s'ils ont trait au plus grand échantillon possible, être parfaitement représentatifs.

Le réglage a également montré que certaines stations limnimétriques étaient mal observées ou que le calage des échelles a probablement évolué depuis 1964, année où l'Orstom avait procédé à quelques vérifications et déjà décelé des anomalies.

Dans les paragraphes suivants, nous donnerons quelques types d'exploitation que l'on peut envisager dans l'état actuel du modèle ainsi que les recommandations concernant les études hydrologiques complémentaires que l'on pourrait entreprendre pour améliorer la connaissance du fleuve.

2. TYPES D'EXPLOITATION DU MODELE QUE L'ON PEUT ENVISAGER

2.1 Etude statistique des surfaces inondées

Cette étude rentre dans le cadre de l'amélioration des connaissances actuelles du fleuve ; jusqu'à maintenant des estimations ont seulement été faites et, selon les auteurs, les résultats sont très différents.

Dans l'étude d'ensemble de la vallée du Sénégal il est donc nécessaire de connaître les surfaces réelles submergées afin de pouvoir dresser des plans prévoyant la façon dont on pourra passer d'une agriculture traditionnelle de décrue à une culture moderne par irrigation .

Le modèle permet de répondre à la première question et de donner, pour toutes les crues connues depuis 1903, les valeurs de ces surfaces inondées .

La façon la plus simple de procéder sera la suivante . On regroupera un certain nombre de mailles entre elles et, après avoir passé les crues sur le modèle, on demandera comme sortie la loi de surface submergée en fonction du temps . On pourra alors connaître très rapidement la surface inondée un certain nombre de jours par an pour chaque crue, ainsi que la surface maximale .

2.2 Etude d'un barrage intermédiaire

On pourra déterminer l'influence d'un barrage placé dans la vallée sur la propagation de la crue (niveaux, débits, surfaces submergées) .

Cette étude demandera que l'on précise les conditions aux limites et, en particulier celles dépendant du barrage .

2.3 Etude de l'influence d'endiguements partiels sur l'évolution des crues

Un certain nombre d'aménagements hydro-agricoles types étant retenus le long du fleuve, il est intéressant de connaître les répercussions que subissent les crues du fait des endiguements . Les mêmes calculs permettent de définir les cotes auxquelles il faudra araser les digues afin de les rendre insubmersibles .

2.4 Etude du débit régularisé minimal permettant d'atteindre un but hydro-agricole fixé

Si l'on construit des barrages d'accumulations dans le bassin amont afin de régulariser l'étiage du fleuve à un certain débit, il est primordial, pour fixer le volume optimal des retenues, de connaître les hydrogrammes qu'il faudra avoir en aval des barrages afin de pouvoir maintenir une agriculture minimale de décrue correspondant aux besoins actuels . Il s'agira donc de la recherche de la loi de débit à obtenir en amont de la vallée, à Bakel par exemple .

2.5 Etude des problèmes liés à la navigation

Le problème de la navigation sur le Sénégal est de disposer d'un tirant d'eau minimal pendant l'étiage du fleuve . Ce tirant d'eau peut être assuré par le maintien, par des barrages accumulateurs, d'un débit minimal qui est à fixer en fonction de l'hydrographie du fleuve . Mais, le modèle peut-il répondre à cette question ? dans l'état actuel nous ferons des réserves.

En effet, un modèle prévu pour l'étude des étiages d'une rivière doit représenter finement l'hydrographie du fleuve, c'est-à-dire que les distances entre sections adjacentes doivent être relativement petites (de l'ordre de un à deux kilomètres). Ce n'est évidemment pas le cas pour le modèle du Sénégal qui comporte 68 tronçons pour une longueur de 940 km entre Félou aval et Saint-Louis.

Une étude précise de ce problème demandera donc un aménagement préalable du modèle si l'on veut que les résultats soient significatifs.

3. RECOMMANDATIONS CONCERNANT LES ETUDES A REALISER POUR PARVENIR A UNE MEILLEURE CONNAISSANCE DU FLEUVE

Dans le chapitre I nous avons indiqué ce qui nous paraissait indispensable de faire immédiatement pour préciser certaines données de crue ou de contrôle. Il s'agit donc d'un programme minimal qui ne demande pas des investissements très importants et qui peut rentrer dans le cadre de l'étude hydro-agricole de la vallée du Sénégal.

Dans ce qui suit nous donnerons, in extenso, des indications sur ce qu'il serait utile de réaliser si l'on voulait parfaire les connaissances sur le fleuve. Ce programme est important et demanderait de nombreuses années ainsi que des investissements non négligeables. Notons que le programme minimal demandera également du temps et qu'il n'est pas pensable de retarder toute l'exploitation du modèle dans l'attente de ces résultats.

3.1 Le Sénégal de Gouina à Bakel

Les résultats du modèle ont montré que dans la partie amont les variations rapides de niveaux n'étaient pas toujours retrouvées avec exactitude. Ceci provient en partie des lectures biquotidiennes des niveaux effectuées en principe à heures fixes. Il paraît donc intéressant de mieux suivre ces variations au moyen de limnigraphes.

L'exploitation de stations sur la Kolimbiné et le Karokoro seraient également intéressante. Cela a commencé mais devrait être poursuivi en cherchant, pour la Kolimbiné, à intégrer tout le bassin versant. Nous pensons ainsi au Kanarou ou Falao, affluent de rive gauche de la Kolimbiné, qui se trouve en aval de Kabaté.

Enfin, les renseignements topographiques entre la Falemé et Diawara sont inexistant et il faudrait donc combler cette lacune.

En résumé, nous pensons qu'il faudrait :

- installer des limnigraphes à Galougo, Kayes, Bakel sur le Sénégal et à Kidira sur la Falemé ;
- effectuer des jaugeages à Ségala et Bakel sur le Sénégal et Kidira sur la Falemé. Pour cette dernière station ce sont les jaugeages de débits supérieurs à $1000 \text{m}^3/\text{s}$ qui sont intéressants car leurs résultats conditionnent l'extrapolation de la loi hauteur-débit ;

- prévoir une campagne topographique pour lever le lit majeur entre la Falémé et Diawara en aval de Bakel ;
- continuer les lectures à Kabaté sur la Kolimbiné et Bokediamby sur le Karakoro et poursuivre les jaugeages . Il faudrait également chercher à intégrer le Falao dans la détermination des débits de la Kolimbiné .

3.2 Le Sénégal de Bakel à Kaédi

Dans cette zone il faudrait :

- assurer la régularité des lectures à Waoundé ;
- poursuivre l'étude des affluents mauritaniens commencée en 1964, 1965 et 1966 par l'Orstom . Il s'agit du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol .

3.3 Le Sénégal de Kaédi à Dagana

Nous avons vu les problèmes posés lors du réglage du modèle, la plus grande inconnue étant de savoir comment se font réellement les échanges de débit entre le Doué et le Sénégal au travers de l'île A. Morphil . Il faudrait donc :

- vérifier le zéro des échelles et rattacher les différents éléments entre eux aux stations de Saldé, Boghé, Fodor, N'Goui et Guédé . Certains décalages ont été signalés par l'Orstom (Boghé), mais d'autres ont dû apparaître depuis . Nous avons vu pour la crue de 1969, par exemple, que des divergences apparaissent et qu'elles ne peuvent s'expliquer que par des décalages d'échelle ;
- rétablir la station de Sarepoli C'est en ce point, ou plus exactement au seuil de Mafou, que se produit la rupture de pente du Sénégal . Il est donc primordial que l'on connaisse la loi de niveau puisque ces niveaux servent à régler ceux de Boghé-Saldé en amont et Fodor en aval ;
- établir sur le Doué, entre N'Goui et Guédé, une échelle intermédiaire afin de mieux connaître l'évolution des niveaux . On pourrait rétablir l'échelle de Madina ou bien en installer une à Hounoko Aéré à mi-distance de N'Goui et Guédé . Il serait également intéressant de jauger le lit mineur(à Madina n'ont été faits que des jaugeages d'étiage) ;
- pour résoudre le problème du partage du débit entre le Sénégal et le Doué on peut envisager de :
 - réaliser des jaugeages au défluent du Doué, en amont de la restitution du marigot de Diavagne, tant que le Doué reste délimité topographiquement,
 - compléter l'étude des lois hauteur-débit de Saldé et Boghé .

3.4 Le Sénégal de Dagana à Saint-Louis

Les problèmes sont assez complexes dans cette zone du fait de la présence des défluents dont les lois de débit sont assez mal connues (lac de R'Kiz, Aftout Es Sahel, ..) ; le manque de leviers topographiques dans le delta mauritanien constitue un autre handicap pour l'obtention d'une grande qualité du modèle . Enfin, le problème du passage du débit dans le lit majeur rive droite, au droit de Dagana, reste entier .

Les mesures et travaux nécessaires seraient alors les suivants :

- contrôler tous les zéros des échelles et le calage des différents éléments entre eux quand les échelles sont constituées d'éléments métriques ;
- reprendre les lectures aux échelles du delta ;
- essayer de mieux connaître les conditions de remplissage du lac de R'Kiz et de l'Aftout Es Sahel ; pour le lac de Guiers il serait nécessaire de s'assurer que le limnigraphes de Saninte fonctionne correctement ;
- effectuer des jaugeages continus à Dagana ou Rosso afin de préciser si un débit pouvant être important lors des grandes crues emprunte le lit majeur ;
- compléter les leviers topographiques au Nord de la ligne Podor-Rosso et les réaliser dans le delta rive droite en allant bien au-delà de la route Keur-Macène - Rosso .

oOo

Annexe 1

DEFINITION DE LA CRUE DE 1964

1. DONNEES DE CRUE

Les données de crue comprennent les lois de débit du Sénégal et de ses affluents et défluents, l'évapotranspiration et la loi de niveau à Saint-Louis qui constitue la limite aval du modèle.

1.1 Débit du Sénégal à Gouina

Les lectures à Gouina 2ème bief MAS sont peu sûres et la loi hauteur-débit n'a pas été vérifiée. Nous préférons dans ces conditions prendre comme station de référence la station de Galougo qui se trouve à une vingtaine de kilomètres en amont, les apports intérmédiaires étant négligeables. En effet, les lectures y sont sûres et la loi hauteur-débit a été confirmée par les jaugeages de la brigade hydrologique de Kayes, au Mali, et ceux de Sénégal Consult.

La loi de débit du Sénégal à Galougo est donc transposée telle quelle à Gouina.

1.2 Débit de la Falémé à Kidira

Initialement nous avions pris la loi donnée dans la monographie du Sénégal. L'analyse des calculs ayant montré un excédent de débit au niveau de Bakel, nous avons analysé la loi et avons conclu que le Sénégal a une influence sur les niveaux à Kidira. Cette influence joue surtout sur les forts débits : pratiquement nulle jusqu'à un débit de 1000 m³/s à Kidira, elle a été estimée à 200 m³/s pour un débit théorique initial de 2930 m³/s (la valeur correcte serait 2750 m³/s). C'est cette loi modifiée que nous avons retenue. Précisons que cette modification n'est scnsible que pour la crue de 1964.

1.3 Débits de la Kolimbinié et du Karakoro

Comme aucune donnée sur ces rivières n'existe, nous avons comparé les débits à Kayes donnés par la loi hauteur-débit de la monographie et ceux du modèle à Féloù. Comme la Kolimbinié a son confluent entre ces deux stations, la différence fournit la loi de débit de la Kolimbinié.

Pour le Karakoro, nous avons pris les valeurs de la Kolimbinié que nous avons multipliées par le rapport des bassins versants. C'est une méthode simpliste, mais il est impossible de faire autrement.

1.4 Débits du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol

En 1964, on ne dispose que de la loi de débit du Ghorfa à Ghorfa aval. Il manque d'ailleurs la pointe de la mi-juillet.

Par contre, en 1965, nous avons les hydrogrammes du Niordé à Harr, du Ghorfa à Ghorfa aval et du Gorgol Noir à Foum-Gleïta.

Nous avons donc, dans un premier temps, reconstitué l'hydrogramme de la crue 1964 du Ghorfa en nous aidant d'une corrélation hauteur hauteur entre Maghama et Ghorfa aval et de l'observation du maximum de la laisse de crue du 15 juillet 1964.

Pour les autres affluents il fallait se servir des éléments de 1965. Nous avons établi pour cette année en nous basant sur les débits spécifiques maximaux, les valeurs des coefficients de correction à apporter aux différents bassins versants pour, à partir de l'un d'eux, reconstituer les débits des deux autres. Pour cela nous nous sommes basés sur les constatations suivantes :

- les crues du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol Noir ont des formes assez semblables. D'où l'idée d'une affinité des hydrogrammes dont le rapport est défini par les pointes de crue, c'est-à-dire par les débits spécifiques maximaux,
- les isohyètes sont parallèles dans cette région et de direction générale Ouest-Est. Nous avons alors admis que les débits spécifiques maximaux dépendaient de la latitude du centre de gravité des bassins versants.

En nous aidant des valeurs de 1965, nous avons reconstitué en 1964 les hydrogrammes du Niordé et du Gorgol à partir de celui du Ghorfa et nous avons admis que la crue du Gorgol était en avance de deux jours sur celles des deux autres affluents. A titre indicatif, le débit maximal du Gorgol à Kaédi est de 330 m³/s.

1.5 Débits pénétrants dans le lac de Guicrs et le lac de R'Kiz

1.51 Le lac de Guicrs

La loi de variation du niveau du lac de Guicrs est connue grâce aux enregistrements du limnigraphie de Saninco.

Dans les rapports de M. OUSMAINE FALL de 1961, et du groupement BCEOM-SOGETHA-SOGREAH R. 9 114 relatif au lac de Guicrs et à la Taouey on trouve les courbes donnant les lois de surface et de volume du lac en fonction de la cote.

En prenant en compte la pluvio-évaporation de Richard-Toll et l'imbibition selon la même hypothèse que M. DUBOIS, on peut déterminer la loi de débit à Richard-Toll, au pont-barrage sur la Taouey. La seule inconnue était la date d'ouverture du pont-barrage. Nous l'avons déterminée en fonction de la variation du plan d'eau dans le lac en juillet et aussi des dates d'ouverture les autres années. La date probable semble être le 15 juillet, à quelques jours près.

1.52 Le lac de R'Kiz

Aucune observation n'a été effectuée en 1964. En 1965, par contre, nous avions la loi de variation de niveau. Comme ces deux crues sont assez semblables, nous avons admis que l'exploitation du lac avait été la même ces deux années. Nous avons donc appliqué une méthode identique à celle exposée ci-dessus pour le lac de Guicrs.

1.6 Ouvrages de la rive gauche du delta du Sénégal

Le rapport concernant l'exploitation des ouvrages pendant l'hivernage 1964 est peu exploitable et nous nous sommes bornés à vérifier les calculs présentés dans le rapport SOGREAH R. 8 985 relatif à l'hydrologie du delta rive gauche du Sénégal.

Les calculs effectués concernent les ouvrages de N'Tiagar, Rong, Diaour (Boundoum Nord), Caïmans et Diog et correspondent à une exploitation type des cuvettes.

Les hypothèses de calcul ont été les mêmes que celles du rapport précédent :

- vitesse de montée du plan d'eau de 1,5 cm/jour jusqu'au 20 septembre et de 2 cm/jour ensuite,
- cote 0,90 I.G.N. atteinte le 20 septembre,
- débits dus à l'évapotranspiration et à l'imbibition calculés avec les valeurs données par M. DUBOIS,

- submersion maintenue pendant 45 jours,
- exploitation des cuvettes avec des diguettes aux mêmes cotes que celles définies dans le rapport R. 8 985.

Par contre, nous n'avons pas pris en considération le débit de vidange dont il est fait mention dans le rapport car nous n'avons pas pu retrouver les hypothèses sur lesquelles repose sa détermination.

Les lois $Q(t)$ calculées aux différents ouvrages sont donc théoriques mais il nous paraît difficile de faire mieux en raison même de la complexité de l'exploitation de ces ouvrages qui sont en permanence manœuvrés.

1.7 L'Aftout Es Sahel

Les données concernant les départs de débit vers l'Aftout Es Sahel sont pratiquement inexistantes. On connaît une mesure du débit en 1963 pour un débit faible et, en 1965, une mesure au seuil des maringouins, à l'entrée de l'Aftout, et trois mesures au seuil intermédiaire de Tagouachichit.

Nous avons relié ces valeurs aux hauteurs observées à Rosso et avons, pour 1964, pu déterminer un hydrogramme plausible. Les renseignements complémentaires ont permis de montrer que le décalage moyen entre le niveau maximal à Rosso et le déversement maximal vers l'Aftout était de 10 jours. De plus, ce déversement semble commencer lorsque la lecture à l'échelle de Rosso dépasse 2,30 m. Avec ces éléments, nous avons déterminé que le débit maximal dérivé était de 210 m³/s et le volume total passant sur le seuil des maringouins de 600 millions de m³.

1.8 Définition de la pluvio-évaporation

Compte tenu des renseignements pluviométriques en notre possession et des données relatives à l'évaporation, on a défini douze postes de pluvio-évaporation pour le modèle. Ces données sont définies mensuellement par une seule valeur journalière.

Quand les renseignements relatifs à l'évaporation étaient inexistantes nous avons admis qu'elle était égale à 2,50 m par an et qu'elle était régulièrement répartie.

1.9 Loi de niveau à Saint-Louis

Nous disposons, pour l'année 1964, des enregistrements du marégraphe de Saint-Louis. Comme il n'est pas question d'introduire les variations de niveau dues à la marée, nous avons déterminé les niveaux moyens en analysant la loi de variation de la marée. Cette façon de faire peut donc entraîner des difficultés pour reconstituer les niveaux au démarrage de la crue alors que les débits sont encore petits.

2. DONNEES DE CONTROLE

Au début de l'étude nous avions cherché à rétablir les niveaux en certaines stations à l'aide de corrélations. Nous nous sommes rendu compte que la méthode pouvait être valable pour chercher l'ordre de grandeur des niveaux certains jours mais ne l'était absolument pas quand il s'agissait de reconstituer un limnigraphie complet. En effet, les erreurs peuvent être de plusieurs décimètres et, dans ces conditions, il est difficile d'établir une comparaison valable entre les niveaux calculés et reconstitués.

Pour 1964, nous disposons des lectures aux échelles suivantes : Féloval, Kayes, Ambidédi, Bakel, Waoundé, Matam, Kaédi, Saldé, Boghé, Podor Dagana, Richard-Toll, Rosso, Ronq, Diaouar, Débi sur le Sénégal, N'Goui et Guédé sur le Doué.

ooo

Annexe 2

DEFINITION DE LA CRUE DE 1968

1. DONNEES DE CRUE

1.1 Débit du Sénégal à Gouina

Comme pour la crue de 1964, la loi de débit imposé à Gouina est celle de Galougo.

1.2 Débit de la Falémé à Kidira

Les débits sont petits et la loi tracée par l'ORSTOM dans la monographie du Sénégal s'applique parfaitement puisqu'on n'atteint pas la gamme de débits pour laquelle on peut avoir une influence des niveaux du Sénégal sur les niveaux à Kidira.

1.3 Débits de la Kolimbinié et du Karakoro

Nous les avons supposé nuls. Ceci ne doit pas être loin de la vérité si on tient compte de la faiblesse de cette crue.

1.4 Débits du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol

Aucun élément ne permet de savoir si ils ont joué un rôle dans la crue. Nous avons donc admis que leurs apports étaient nuls.

1.5 Débits du lac de Guiers et du lac de R'Kiz

Pour le lac de Guiers nous avons admis que les débits dérivés étaient les mêmes qu'en 1964. C'est sûrement une hypothèse qui conduit à dériver un trop grand volume vers le lac, mais faute de renseignements, cela nous a paru préférable au fait d'inventer une loi de défluence du débit.

Pour le lac de R'Kiz nous avons supposé que les débits étaient constamment nuls.

1.6 Ouvrages de la rive gauche du delta du Sénégal

Les calculs que nous avons réalisés pour la crue de 1964 concernent une exploitation type des cuvettes qui, en réalité, n'était pas liéé directement à la crue. Nous avons donc pour 1968 conservé les mêmes lois de débit.

1.7 L'Aftout Es Sahel

Compte tenu de la faiblessce de la crue, nous avons admis que les débits dérivés étaient nuls.

1.8 Définition de la pluvio-évaporation

Nous avons procédé de la même manière qu'en 1964 en utilisant au maximum les renseignements en notre possession relatifs à l'année 1968. Quand ces renseignements faisaient défaut, nous avons retenu les valeurs moyennes de la pluie et de l'évaporation.

1.9 Loi de niveau à Saint-Louis

Le marégraphe n'a pas fonctionné en 1968. Nous avons dû établir la loi de niveau en nous basant sur des corrélations réalisées avec l'année 1964 pour des lignes d'eau amont comparables.

2. DONNÉES DE CONTRÔLE

Ces données sont moins complètes que celles dont nous disposions en 1964. Ainsi, il nous manque les observations de Guédé sur le Doué et de celles des ouvrages du delta (Rouq, Diaouar, Débi).

On peut noter aussi qu'elles présentent un certain nombre d'anomalies dont les causes peuvent être liées à un mauvais calage des éléments d'échelle entre eux.

Annexe 3

DEFINITION DE LA CRUE DE 1966

1. DONNEES DE CRUE

1.1 Débit du Sénégal à Gouina

C'est encore la loi de débit de Galougo que nous introduisons à Gouina.

1.2 Débit de la Falémé à Kidira

Les débits sont déterminés à partir de la loi hauteur-débit à Kidira.

Il demeure cependant une imprécision due à la qualité des lectures. Dans le rapport concernant "l'hydrologie du bassin du Sénégal en amont de Bakel" de MM. JACCON, DJIGANDE et KOITA il est dit : "... les relevés des trois dernières années (1965, 1966 et 1967) sont douteux et incomplets ; douteux car les cotes semblent systématiquement arrondies à la dizaine, donc modifiées ou inventées ; incomplets car seules les hautes eaux sont observées. Ce relâchement dans l'exploitation de cette station est très regrettable". Nous avons vu dans le chapitre consacré à cette crue que nous avons éprouvé de grandes difficultés pour parvenir à des résultats corrects.

1.3 Débits de la Kolimbiné et du Karakoro

Les débits de la Kolimbiné ont été appréciés par comparaison directe des débits de Galougo et de Kayes. Cette comparaison ne tient pas compte d'un amortissement de l'onde de crue entre ces deux stations mais, comme il est petit, l'erreur commise n'est pas importante. L'analyse des limnigrammes a montré qu'entre le 11 et le 25 septembre la Kolimbiné avait eu deux pointes suffisamment notables pour qu'il soit nécessaire de les introduire dans le modèle.

Les débits du Karakoro, pendant cette période, ont été calculés en multipliant ceux de la Kolimbine par le rapport des bassins versants respectifs.

1.4 Débits du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol

Les débits des deux premiers sont connus et sont disponibles dans le rapport ORSTOM "Etude hydrologique des oueds Ghorfa et Niordé et des oualos en amont de Kaédi" de M.M. JACCON et CALUS.

Le débit du Gorgol n'a pas été observé et nous avons reconstitué sa loi de débit selon la même méthode que celle utilisée pour la crue de 1964.

1.5 Débits du lac de Guiers et du lac de R'Kiz

Nous disposions, pour le lac de R'Kiz, d'un document trouvé au Génie Rural de Nouakchott qui précise le fonctionnement de l'ouvrage du Sokham, donne la valeur des débits ainsi que la durée d'ouverture des vannes. Faute de renseignements complémentaires sur les autres défluences possibles vers le lac de R'Kiz, nous avons admis cette loi.

Pour le lac de Guiers nous avons admis que le pont-barrage de Richard-Toll avait été ouvert le 5 août et fermé le 26 novembre. La loi de débit a été ensuite calculée en tenant compte du volume accumulé et du volume perdu par évaporation et imbibition. Le calcul est semblable à celui déjà effectué pour la crue de 1964. Notons que la variation du niveau dans le lac est connue par les enregistrements du limnigraphie de Saninte.

1.6 Débits des ouvrages du delta rive gauche

En l'absence de renseignements précis permettant de calculer les lois de débit réelles des différents ouvrages, nous avons repris les valeurs déterminées dans le cadre d'une exploitation type des cuvettes pour l'année 1964.

1.7 Aftout Es Sahel

Comme pour la crue de 1964, nous avons supposé que le déversement commence vers l'Aftout Es Sahel quand la lecture à l'échelle de Rosso devient supérieure à 2,30 m. Nous avons également conservé le décalage de 10 jours entre le maximum de Rosso et celui du déversement vers l'Aftout. Le débit maximal a été estimé à 98 m³/s et il se produit le 30 novembre. Le début de déversement a eu lieu le 30 septembre.

1.8 Définition de la pluvio-évaporation

La méthode employée est la même que pour les autres crues. On utilise au maximum les renseignements en notre possession et pour le reste on prend les valeurs moyennes.

1.9 Loi de niveau à Bakel

Comme un des modèles a pour origine Bakel, on impose comme condition amont la loi de niveau en fonction du temps. Cette loi correspond aux niveaux observés.

1.10 Loi de niveau à Saint-Louis

Comme pour la crue de 1964, nous traçons à partir des marégrammes la loi de variation du niveau moyen.

2. DONNEES DE CONTROLE

Les lectures ne sont pas complètes et sont parfois entachées d'erreurs. On peut ainsi signaler les observations à Ambidédi qui, on décrira, sont de toute évidence fausses.

Malgré ces imperfections, les lectures existent en toutes les stations, sauf en aval de Rong.

oOo

Annexe 4

DEFINITION DE LA CRUE DE 1969

1. DONNEES DE CRUE

1.1 Débit du Sénégal à Gouina

Nous faisons, comme pour les autres crues ; c'est-à-dire que la loi de débit de Galougo est introduite à Gouina.

1.2 Débit de la Falémé à Kidira

Nous utilisons la loi de tarage portée dans la monographie du Sénégal de l'ORSTOM. Cette loi a été confirmée par les jaugeages de Sénégal Consult dans la gamme des niveaux qui intéresse la crue 1969. La seule incertitude à Kidira reste la validité des observations limnimétriques qui, parfois, semblent douteuses. Nous admettons qu'elles sont valables faute de moyens de vérification.

1.3 Débit de la Kolimbiné

Nous possédons les relevés à Kabaté sur la Kolimbiné ainsi que les résultats de jaugeages effectués par Sénégal Consult en 1968 et 1969. Le bassin versant à Kabaté est de 22 900 km² tandis qu'au confluent avec le Sénégal le bassin versant total est de 40 000 km² environ. Comme Kabaté se trouve en amont du confluent du Falao avec la Kolimbiné, on ne peut connaître la valeur exacte des débits par les seules mesures de Kabaté.

Le rapport des bassins versants étant sensiblement de deux, nous avons supposé que les débits totaux de la Kolimbiné étaient doubles de ceux mesurés à Kabaté. Ce facteur deux a été appliqué du 4 juillet au 1er novembre. Nous avons admis ensuite que les débits du Falao étaient nuls et n'avons pris en compte que ceux de Kabaté.

1.4 Débit du Karakoro

Le service de l'hydraulique du Mali, à Bamako, nous a fait parvenir les relevés effectués à l'échelle de Bokediamby sur le Karakoro. Les lectures sont données avec la mention : "lecteur incomptént - interprétation hasardeuse de ses observations". Nous avons quand même examiné les hauteurs lues et avons constaté, en les comparant avec celles de la Kolimbiné à Kabaté, qu'il y avait une bonne concordance dans les variations de niveaux. Comme nous n'avons pas de courbe de tarage du Karakoro à Bokediamby nous avons calculé les débits du Karakoro en multipliant le débit de la Kolimbiné par le rapport des bassins versants de ces deux affluents du Sénégal. La méthode ne prétend pas donner des résultats entièrement exacts mais permet de donner aux apports des valeurs plausibles.

Les débits ont été définis du 4 juillet au 4 novembre 1969 car il nous a semblé qu'après cette date les débits à Kabaté correspondaient à la vidange des mares situées en amont de ce point.

1.5 Débit du Gorgol

Nous n'avons aucun élément direct qui permette de définir les lois de débit du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol. Nous avons donc, dans un premier temps, décidé de les négliger. Le premier calcul effectué a montré que les lois de niveau étaient assez bien reproduites jusqu'à Matam entre le 14 juillet et le 15 août environ. A partir de Kaédi on observe un abaissement anormal des niveaux qui ne peut être dû qu'à un manque de débit, débit qui pourrait être amené par les trois affluents définis ci-dessus.

Nous avons donc analysé les résultats du calcul et avons cherché à définir, au droit de Kaédi, les valeurs des débits qu'il faudrait introduire pour retrouver des niveaux corrects. Nous n'avons pas cherché à faire la même chose pour le Ghorfa et le Niordé car il semble que leurs apports aient été moindres et, peut-être, plus réguliers, ce qui fait qu'à Matam on ne retrouve pas d'écart systématique avant le 12 août.

Le problème a été assez difficile à résoudre car il fallait considérer les débits désirés à Kaédi, les débits venant du Sénégal et remplissant le oualo du Gorgol et, en fonction de ces éléments, définir une loi de débit du Gorgol.

Par différentes analyses portant sur Kaédi, N'Goui, Saldé, nous avons défini une loi de débit du Gorgol qui commence le 10 juillet et s'arrête le 15 septembre. Le débit maximal introduit est de 220 m³/s le 21 juillet et le volume total apporté de 496 millions de m³. Cette valeur est raisonnable si on considère qu'elle intègre les apports du Ghorfa et du Niordé et que les volumes ayant transité à Foum-Glefta, sur le Gorgol Noir, ont été respectivement de :

- 300 millions de m³ environ en 1960
- 255 millions de m³ environ en 1961 .

- 507,6 millions de m³ environ en 1964
- 350 millions de m³ environ en 1965.

Le Gorgol à Kaédi a un bassin versant de 22 000 km² tandis que celui du Gorgol Noir à Foum-Gleïta n'est que de 8 500 km². Le volume estimé semble donc raisonnable même si on prend en compte le fait que le bassin versant du Gorgol Blanc est bien moins arrosé, car situé plus à l'Ouest.

1.6 Le lac de Guicrs

Nous ne disposons pas des relevés du limnigraphie de Saninte sur le lac. Nous n'avons donc pu calculer la loi de débit nécessaire pour assurer le remplissage du lac tel qu'il s'est produit. Bien que les maxima de 1966 et de 1969 soient différents à Richard-Toll, nous avons admis que les lois de débit de remplissage du lac étaient les mêmes ces deux années en modifiant seulement la date d'ouverture du pont barrage de Richard-Toll.

La date d'ouverture est le 26 juillet 1969 et celle de fermeture le 17 novembre 1969 (en 1966 ces dates étaient respectivement le 5 août et le 27 novembre).

1.7 Le lac de R'Kiz

Nous ne disposons d'aucune donnée permettant de définir une loi de débit. Nous avons donc admis que le débit dérivé était nul.

1.8 Les ouvrages de rive gauche du delta

Comme pour les autres crues nous avons reconduit les valeurs calculées pour la crue de 1964. Ces valeurs, ainsi que nous l'avons expliqué dans l'annexe n° 1, sont théoriques car aucun élément ne permet de définir les lois exactes des ouvrages.

1.9 Aftout Es Sahel

Comme pour les autres crues nous avons évalué la loi de débit de l'Aftout en liaison avec les lectures de Rosso. Une difficulté est apparue au cours du calcul car il s'est avéré que les observations de Rosso étaient erronées, les niveaux en cette station étant supérieurs à ceux de Richard-Toll situés en amont et suivant des gradients de montée différents de ceux de Dagana, Richard-Toll et Ronq. Nous avons donc été obligés de rétablir les niveaux à Rosso à partir de ceux de Richard-Toll.

Tous calculs effectués on trouve que l'Aftout a été alimenté du 20 septembre au 28 novembre 1969, que le débit maximal est de 58 m³/s et le volume total dérivé égal à 174 millions de m³.

1.10 Définition de la pluvio-évaporation

Nous sommes partis du principe que la crue de 1969 est peu différente d'une crue moyenne et avons donc admis que la pluviométrie et l'évaporation étaient également moyennes.

Avec ces éléments on trouve qu'il se produit en général un déficit (valcurs imposées négatives) sauf en amont du Sénégal (Postes de Kayes, Kidira et Bakel) où certains mois donnent des valcurs positives (il s'agit du mois d'août pour Bakel et Kidira et des mois de juillet, août et septembre pour Kayes).

1.11 Loi de niveau à Bakel

Nous avons introduit cette donnée afin de pouvoir fonctionner sur le modèle Bakel-Saint-Louis quand cela sera nécessaire sans avoir besoin de refaire une bande "données de crue". La loi définie correspond aux niveaux observés à l'échelle de Bakel.

1.12 Loi de niveau à Saint-Louis

Comme pour la crue de 1968 nous ne disposons pas des marégrammes de Saint-Louis. Nous avons alors établi une corrélation entre les niveaux à Dagana et Saint-Louis en nous servant des crues de 1964, 1965 et 1966. La loi est celle qui figure sur les graphiques. Elle semble satisfaisante dans son ensemble sauf, peut-être, pendant les derniers jours du mois de décembre où les niveaux moyens semblent avoir été supérieurs à ceux que nous avons définis.

2. LES DONNEES DE CONTROLE

Ici encore on note que les observations sont parfois incomplètes ou fausses. Comme cette crue est la deuxième crue de contrôle, nous insisterons un peu plus sur les données de contrôle car nous avons évoqué leur imperfection dans le chapitre V que traite de cette crue.

2.1 Félou aval

Les lectures couvrent la période du 31 juillet au 8 novembre 1969. Si on se réfère aux lectures faites à Kayes, on note que certains niveaux doivent être erronés aux dates suivantes :

- les 2 et 3 août,
- les 16, 17 et 18 août,
- le 7 septembre,

- les 21, 22 et 23 septembre,
- les 17, 18, 19, 20, 21, 22 et 23 octobre.

2.2 Kayes

Les lectures vont du 1er juillet au 31 décembre. Elles sont correctes dans leur ensemble.

2.3 Ambidédi

Le lecteur était incompétent et les lectures sont inexploitables.

2.4 Bakol

Les lectures sont continues du 1er juillet au 30 novembre. La seule valeur erronée évidente est celle du 19 octobre, l'erreur devant être de 0,50 m environ.

2.5 Waoundé

Les lectures vont du 13 août au 31 décembre. Il n'y a rien de particulier à signaler.

2.6 Matam

Les relevés sont complets du 1er juillet au 31 décembre 1969. Les observations semblent correctes.

2.7 Kaédi

Les lectures ne sont pas continues et présentent des erreurs assez importantes. On trouve les périodes suivantes :

- du 7 au 12 ou 13 juillet - Pendant cette période la montée du Sénégal à Kaédi n'est pas en accord avec ce que l'on observe en amont (Matam) et en aval (Saldé),
- du 19 au 29 novembre - Les lectures présentent des décrochements qui sont peu compatibles avec la forme de la décrue observée à Matam. Ce phénomène avait déjà été noté lors de la décrue 1968,

- du 8 au 15 décembre - Les observations divergent par rapport à celles de l'amont. Il est à noter qu'en 1966, à la fin du mois de décembre, on retrouve le même phénomène, bien que moins caractéristique,
- enfin, il est une période qui va du 21 octobre au 14 novembre où les lectures sont doutcuses. Nous ne pouvons pas, par manque de lecture à Saldé, les rétablir correctement, mais si nous prenons la période du 21 octobre au 7 novembre, on constate que le palier de Matam se traduit à Kaédi, par un abaissement régulier des niveaux de 0,55 m alors qu'en aval, à Saldé, la variation n'est que de 0,35 m. La corrélation niveaux-niveaux entre Kaédi et Saldé montre que les niveaux à Kaédi devraient, pendant cette période, être supérieurs de 0,10 à 0,20 m. Une telle corrélation ne peut conduire à des résultats ayant une grande valeur absolue mais permet d'indiquer une tendance.

2.8 Saldé

Les relevés en notre possession ne sont pas complets et vont du 1er juillet au 8 novembre 1969 avec, par moment, des absences de lecture.

Le maximum à Saldé présente une anomalie. En effet, à partir du 19 septembre, on observe un gradient de montée des niveaux qui augmente brusquement. Du 24 septembre au 9 octobre on trouve un palier qui correspond au maximum de la crue et ensuite, jusqu'au 18 octobre, les niveaux baissent et on observe une certaine symétrie avec la montée. Les niveaux maxima ainsi atteints nous semblent hauts et leur comparaison avec N'Goui confirme cette impression.

En nous servant des relations reliant les maxima de Kaédi, N'Goui, Boghé et Saldé qui sont portées dans le tome 3 de la monographie du Sénégal de l'ORSTOM, on trouve :

- corrélation entre Kaédi et Saldé

$$H_{\text{Kaédi}} = 8,10 \text{ m} \quad - \quad H_{\text{Saldé}} = 9,10 \text{ m}$$

- corrélation entre N'Goui et Saldé

$$H_{\text{N'Goui}} = 10,68 \text{ m} \quad - \quad H_{\text{Saldé}} = 9,02 \text{ m}$$

- corrélation entre Boghé et Saldé

$$H_{\text{Boghé}} = 8,57 \quad - \quad H_{\text{Saldé}} = 9,02 \text{ m}$$

alors que le maximum observé à Saldé est égal à 9,27 m soit 0,17 à 0,25 m de plus que ce que donnent les corrélations. Le phénomène est d'autant plus troublant qu'il intervient alors qu'il n'y a pas changement d'élément métrique et que précédemment les lectures semblent continues. L'écart moyen pendant cette période entre les niveaux réels et indiqués semble donc être de l'ordre de 0,10 à 0,20 m.

2.9 N'Goui

Il manque les lectures du mois de novembre. Deux périodes font apparaître des erreurs de lecture.

La première va du 8 au 16 juillet et la seconde du 1er au 10 décembre 1969. Ailleurs les lectures semblent correctes.

2.10 Boghé

Les lectures vont du 1er juillet au 27 novembre 1969. Elles semblent relativement correctes sauf pendant la période du 16 au 22 novembre, où la forme de la décrue n'est pas en accord avec ce qui est amorcé avant et ce qui suit après, et la période du 27 août au 15 septembre où la forme du limnigramme n'est pas en accord avec ce que l'on observe à Saldé, N'Goui et Podor. Un phénomène analogue a été noté en 1968, à l'époque du maximum de la crue.

2.11 Podor

Les relevés utilisables vont du 11 juillet au 30 novembre 1969. Ils ne présentent aucune anomalie.

2.12 Dagana

Les relevés portent sur la même période qu'à Podor et ne présentent aucune irrégularité.

2.13 Richard-Toll

Les lectures vont du 25 juillet au 8 novembre 1969 et semblent correctes dans leur ensemble, la variation apparaissant le 19 septembre n'étant cependant pas en accord avec ce que l'on observe à Dagana et Rong, stations situées en amont et en aval.

2.14 Rosso

Nous possédions les relevés de juillet, août, septembre et octobre mais nous avons dû les écarter. En effet, en portant les niveaux sur un graphique on constate qu'ils sont en permanence supérieurs aux niveaux de Richard-Toll et que l'écart au maximum atteint près de 0,30 m en faveur de Rosso. Les lectures semblent donc entièrement erronées à moins qu'il ne s'agisse d'un changement du zéro de l'échelle.

2.15 Ronq

Les relevés utilisables vont du 6 août au 31 décembre. Notons que jusqu'au 22 août les niveaux à Ronq sont pratiquement confondus avec ceux de Richard-Toll et que ce n'est qu'après que commence à apparaître une divergence nette.

Du 20 au 31 décembre on retrouve l'influence de la marée mais il nous semble anormal que l'on observe une remontée si importante du niveau moyen à Ronq (de 0,27 à 0,46 m entre le 20 et le 29 décembre).

ooo

Annexe 5

LE MODELE UNIDIMENSIONNEL

1. BUT DU MODELE UNIDIMENSIONNEL

A la différence du modèle maillé, le modèle unidimensionnel est un modèle dans lequel on admet que :

- Les écoulements ne s'effectuent que parallèlement à l'axe de la rivière,
- dans une section perpendiculaire à cet axe le niveau est horizontal à chaque instant.

Ces hypothèses ont comme corollaires les conséquences suivantes :

- le lit majeur, dès que les niveaux sont assez hauts, participe au transit d'amont en aval des débits,
- tout écoulement différé est incompatible avec le schéma de calcul sauf si on introduit des complications particulières dont la généralisation conduit finalement à un modèle maillé.

Sa conception est donc plus simple que celle d'un modèle maillé ; son exploitation aussi, car le nombre de paramètres en jeu est moins grand. Ce sont ces avantages qui ont entraîné la décision de le réaliser.

Ce modèle ne peut cependant avoir dans son état final la même précision que celle obtenue avec le modèle maillé car il ne cherche qu'à représenter une schématisation des écoulements. On essaiera donc de reproduire au mieux l'évolution des niveaux, celle des débits étant moins bien représentée.

Les buts fixés au modèle étaient alors les suivants :

- réglage du tronçon Gouina-Bakel qui ne comporte que le lit mineur du Sénégal. Ce réglage que nous pensions pouvoir être définitif dû cependant être repris pour introduire une maille en amont de Bakel (D14),
- dégrossissement du réglage du lit mineur du Sénégal en aval de Bakel et, pour les débits débordants, obtention d'une première connaissance du comportement du fleuve,
- vérification des données de crue et de contrôle,
- ajustement éventuel des données de crue que nous avons dû établir faute de renseignements. Il s'agit essentiellement des lois de débit des affluents de rive droite, les débits des défluents situés en aval de Podor n'étant pas assez importants pour que le modèle puisse donner des indications précises,
- localisation des zones du modèle où des problèmes autres qu'hydrauliques pourront apparaître pendant le réglage du modèle maillé.

2. CONSTRUCTION DU MODELE

Un modèle mathématique est un ensemble constitué de données topographiques et hydrauliques définissant la rivière à étudier et d'un programme de calcul qui utilise un ordinateur pour calculer les écoulements.

Les données topographiques constituent le support physique du modèle dont la précision espérée dépend de leur qualité ; ces données correspondent à l'hydrographie du fleuve et à la topographie de la vallée.

Le modèle ayant été construit en 1968, le topographie est défini par le fond de carte au 1/50 000, les zones non couvertes étant complétées par les cartes au 1/20 000. L'hydrographie est celle qui a été effectué en même temps que le lever au 1/20 000. Elle est donc entaché des mêmes erreurs altimétriques.

Le découpage du modèle est le même que celui qui existe pour le modèle maillé. Le traitement est cependant différent du fait même du schéma de calcul. Ainsi, après traitement de ces données par des sous-programmes, on aura, pour chaque tronçon du Sénégal, une section d'écoulement qui comprendra de façon distincte le ou les lits mincurs et le lit majeur et une section d'accumulation qui sera la somme de tous les éléments constitutifs du tronçon.

Chacune de ces sections a un emploi différent. Deux équations régissent l'écoulement : l'équation dynamique et l'équation de continuité.

La première équation s'applique donc à la section d'écoulement et la deuxième à la section d'accumulation

Le découpage ayant conduit à définir 72 tronçons du Sénégal entre Gouina et Saint-Louis, nous aurons donc 72 sections d'écoulement et autant d'accumulation.

3. PROGRAMME DE CALCUL UNIDIMENSIONNEL

Nous disposons d'un programme de calcul qui traite les équations de Saint-Venant dans leurs généralités. Nous avons ainsi :

- l'équation dynamique

$$\frac{\partial Z}{\partial x} = \frac{Q^2}{D^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{V^2}{2g} \right) + \frac{1}{g} \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right)$$

- l'équation de continuité

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0$$

Ces équations aux dérivées partielles sont remplacées selon un schéma implicite par des équations aux différences finies qui sont résolues à l'aide de l'ordinateur.

Le calcul des éléments hydrauliques se conduit pas à pas. On connaît les éléments à l'instant $t = \Delta t$ et à l'instant t ; on les calcule ensuite à l'instant $t + \Delta t$ et on procède ainsi de proche en proche. Dans la méthode implicite les éléments du temps futur demandent une résolution qui caractérise le programme de calcul; elle présente l'avantage d'adapter le pas de temps Δt au rythme de la crue et non à des servitudes trop étroites de stabilité numérique.

Ces équations sont complètes. Cependant, dans une rivière où les crues ne sont pas rapides, et c'est le cas pour le Sénégal, on peut négliger dans l'équation dynamique les termes qui contiennent la vitesse car ils sont négligeables vis-à-vis de la pente. C'est ce que nous avons fait et les écoulements fluviaux deviennent alors identiques dans les deux modèles. On peut alors conserver une partie des réglages du modèle unidimensionnel pour le modèle maillé.

4. REGLAGE DU MODELE UNIDIMENSIONNEL

Le réglage du modèle a été réalisé tronçon par tronçon.

Comme on suppose que les niveaux sont identiques dans les lits mineur et majeur, nous avons pu nous servir de points de réglage intermédiaires où nous imposions des lois de niveau conformes à celles observées. Nous avions suivi les points suivants : Bakel, Matam, Saldé, Boghé et Podor.

Ces points intermédiaires définissent des biefs. Dans chacun de ces biefs la condition-limite amont est représentée par le débit provenant du bief adjacent et la condition-limite aval par les niveaux observés. On procède donc d'amont en aval, le point intermédiaire étant supprimé quand les lois de niveau calculées correspondent à celles observées dans le bief, et surtout, à la limite aval du bief.

Nous avons cherché à définir des coefficients de rugosité globaux permettant de reproduire approximativement l'évolution des ondes de crue, le réglage fin s'effectuant ensuite à l'aide de facteurs correctifs de débitance. Nous nous sommes alors aperçus que la définition des sections d'accumulation ne permettait pas de retrouver la forme des limnigrammes au début de la crue. Les volumes accumulés étaient trop grands et les débits transitant vers l'aval insuffisants. Les niveaux calculés avaient des gradients de montée trop faibles et l'effet matériel des bourrelets de berge ne pouvait pas être respecté.

Nous avons alors joué simultanément sur les débitances à l'aide des facteurs correctifs et sur les sections d'accumulation. Pour ces dernières le problème consiste à rechercher par l'analyse des limnigrammes et des cartes les cotes à partir desquelles le lit majeur commence à jouer un rôle dans l'écoulement de la crue. Ensuite, on impose à chaque section d'accumulation une cote en dessous de laquelle le lit majeur n'est pas concerné dans le calcul de l'accumulation des débits.

Le réglage consiste alors en un ajustement des débitances et des cotes de limitation du lit majeur.

Les graphiques 2 et 3 hors texte illustreront l'état du réglage du modèle quand nous l'avons arrêté en février 1969.

On constate que les décrues ne sont pas satisfaisantes, les plus grandes différences étant notées à Matam. Cet état est dû au schéma de calcul qui suppose que les niveaux sont horizontaux dans une section transversale. Ceci revient à dire que les champs d'inondation se remplissent et se vident en même temps que le lit mineur. Nous avons pu limiter cet effet à la montée de la crue par l'artifice des cotes symbolisant les bourrelets de berge ; à la décrue, malheureusement, on ne dispose d'aucun artifice pour retarder la vidange du lit majeur. Les débits de décrue sont donc trop grands et ces écarts s'amplifient d'amont en aval car au débit de crue normal se superpose le débit de décrue d'amont qui n'est pas différé.

Autre élément défavorable, on suppose que le lit majeur se vidange entièrement alors que dans la nature il reste des marcs qui représentent un volume important. Enfin, nous n'avons pas pris en compte l'évaporation qui joue un rôle non négligeable dans le bilan des volumes.

5. BILAN DU MODELE UNIDIMENSIONNEL

Le modèle à permis :

- de régler plus rapidement le tronçon Gouina-Bakel qui ne comporte pas de lit majeur au sens conventionnel du terme. Dans cette zone il laisse supposer que les mares qui bordent le Sénégal entre la Falémé et Diawara doivent jouer un rôle dans la formation de l'onde de crue à Bakel. Nous avons vu que nous avons dû, dans le modèle maillé, introduire une maille en amont de Bakel,
- d'ajuster les lois de débit des affluents de rive droite,
- de vérifier la qualité des lectures aux échelles. A titre d'exemple nous avons constaté que les lectures à Bakel, entre le 9 et le 31 août 1964 étaient sous-estimées de 1 m,
- de retenir comme station de base amont Galougo plutôt que Gouina 2ème bief MAS dont les lectures sont en général moins bien suivies,
- de constater que les débits calculés pour les défluents aval (lac de Guicrs, lac de R'Kiz, ouvrages du delta rive gauche, Aftout Es Sahel) ne paraissent pas aberrants,
- de montrer que la loi hauteur-débit de Bakel n'était pas univoque,
- de mettre en évidence le fait que pour des crues fortes comme 1964 et 1965 les débits passant dans le lit majeur rive droite, au droit de Dagana, ne sont pas négligeables.

L'ensemble de ces résultats n'est pas négligeable et confirme l'utilité de ce modèle.