

## 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 .

C'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 .

C'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, 1969<sub>1</sub>, néglige les apports du Niordé, du Ghorfa et du Gorgol ; dans le deuxième calcul, 1969<sub>2</sub>, 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 oualodu 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 1969,

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 défluentes 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  $\Delta Z_{\max}$  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.)	$\Delta Z_{\max}$ (m)
Férou 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
Waoundé	0,158	18,20	18,18	- 0,02
Matam	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'Gouï	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	0,135	3,20	3,32	+ 0,12
Richard-Toll	0,100	2,73	2,80	+ 0,07
Ronq	0,119	2,35	2,35	0

### 3.3 Analyse des résultats

En certaines stations des erreurs de lectures sont manifestes :

- Férou 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 1969<sub>2</sub>

##### 4.1 Considérations sur la crue 1969<sub>2</sub>

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 1969<sub>1</sub> .

Stations	Précision moyenne absolue (m) 1969 <sub>1</sub>	Précision moyenne absolue (m) 1969 <sub>2</sub>	Z max <sub>N</sub> (I.G.N.)	Z max <sub>C</sub> (I.G.N.)	Δ Z max (m)
Férou 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
Waooundé	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)
N'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
Ronq	0,119	0,102	2,35	2,36	+ 0,01

Les valeurs entre parenthèses de la crue de 1969<sub>2</sub> tiennent compte des lectures erronées signalées pour le calcul 1969<sub>1</sub> ; nous ne pensons donc pas utile d'y revenir .

#### 5. CONCLUSION

Les résultats acquis diffèrent selon que l'on considère la crue 1969<sub>1</sub> ou la crue 1969<sub>2</sub> . Cependant, nous pensons que l'on peut dire que le deuxième calcul confirme les conclusions que nous avons 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 .

oOo

## 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 défluent 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 inexistantes 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 1000m<sup>3</sup>/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, Podor, 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'éléments 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 Podor 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 défluentés dont les lois de débit sont assez mal connues (lac de R'Kiz, Aftout Es Sahel, ..) ; le manque de levés 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 limnigraphe de Sainte 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 levés 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 défluent, 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 intermédiaires 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 avons 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 m<sup>3</sup>/s à Kidira, elle a été estimée à 200 m<sup>3</sup>/s pour un débit théorique initial de 2930 m<sup>3</sup>/s (la valeur correcte serait 2730 m<sup>3</sup>/s). C'est cette loi modifiée que nous avons retenue. Précisons que cette modification n'est sensible que pour la crue de 1964.

### 1.3 Débits de la Kolimbiné 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 Félou. Comme la Kolimbiné a son confluent entre ces deux stations, la différence fournit la loi de débit de la Kolimbiné.

Pour le Karakoro, nous avons pris les valeurs de la Kolimbiné 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 Foun-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 m<sup>3</sup>/s.

## 1.5 Débits pénétrants dans le lac de Guiers et le lac de R'Kiz

### 1.51 Le lac de Guiers

La loi de variation du niveau du lac de Guiers est connue grâce aux enregistrements du limnigraphe de Saninte.

Dans les rapports de M. OUSMANE FALL de 1961, et du groupement BCEOM-SOGETHA-SOGREAH R. 9 114 relatif au lac de Guiers 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 avons 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 Guiers.

## 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, Ronq, Diaour (Boundoum Nord), Cafmans et Dieg et correspondent à une exploitation type des cuvettes.

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

- 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 Lagouachichit.

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 m<sup>3</sup>/s et le volume total passant sur le seuil des maringouins de 600 millions de m<sup>3</sup>.

#### 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 avons cherché à rétablir les niveaux en certaines stations à l'aide de corrélations. Nous nous sommes rendu compte que la méthode pourrait 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 limnigramme 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 : Félou oval, 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 imposée 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 Kolimbiné 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 lié 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 faiblesse 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. DONNEES 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 (Ronq, 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 Kolimbiné 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 CRSTOM "Etude hydrologique des oueds Ghorfa et Niordé et des oueds en amont de Kaédi" de M.M. JACCON et CAMUS.

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 disposons, 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. Faut de renseignements complémentaires sur les autres défluents 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 limnigraphe 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 m<sup>3</sup>/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, en décrue, sont de toute évidence fausses.

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

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 km<sup>2</sup> tandis qu'au confluent avec le Sénégal le bassin versant total est de 40 000 km<sup>2</sup> environ. Comme Kabaté se trouve en amont du confluent du Falao avec le 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 Bokédiamby sur le Karakoro. Les lectures sont données avec la mention : "lecteur incompétent - 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 Bokédiamby 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 m<sup>3</sup>/s le 21 juillet et le volume total apporté de 496 millions de m<sup>3</sup>. 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-Gleïta, sur le Gorgol Noir, ont été respectivement de :

- . 300 millions de m<sup>3</sup> environ en 1960
- . 255 millions de m<sup>3</sup> environ en 1961 .

- 507,6 millions de m<sup>3</sup> environ en 1964
- 350 millions de m<sup>3</sup> environ en 1965.

Le Gorgol à Kaédi a un bassin versant de 22 000 km<sup>2</sup> tandis que celui du Gorgol Noir à Foun-Gleita n'est que de 8 500 km<sup>2</sup>. 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 limnigraphe 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 m<sup>3</sup>/s et le volume total dérivé égal à 174 millions de m<sup>3</sup>.

### 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 (valeurs imposées négatives) sauf en amont du Sénégal (Postes de Kayes, Kidira et Bakel) où certains mois donnent des valeurs 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 Férou 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 inexploitable.

## 2.4 Bakel

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 18 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 douteuses. 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 Ronq, 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),
- dégrossissage 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 déflucnts 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, la topographie est définie 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 effectuée en même temps que le lever au 1/20 000. Elle est donc entachée 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 mineurs 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  $\Delta t$  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 imposons des lois de niveau conformes à celles observées. Nous avons 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 illustrent 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 vide 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 mares 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 a 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 marcs 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 défluent aval (lac de Guiers, 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.

oOo