

D'où :

$$\begin{aligned} \{\Delta Z_1\} &= - [[M_1] + [M_0] [E_0]]^{-1} [M_2] \{\Delta Z_2\} \\ &\quad - [[M_1] + [M_0] [E_0]]^{-1} [[M_0] \{F_0\} + \{L_1\}] \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} \{\Delta Z_1\} &= [E_1] \{\Delta Z_2\} + \{F_1\} \\ \{\Delta Z_0\} &= [E_0] \{\Delta Z_1\} + \{F_0\} \end{aligned}$$

On peut donc toujours exprimer linéairement les ΔZ_j 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 1 fournit le vecteur $\{\Delta Z_1\}$.

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 :

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

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 $\{\Delta Z_j\}$.

- 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 1ère 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'écarter 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 bourrelets 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 unidimensionnel.

Dans le lit majeur les échanges entre casiers sont réglés 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 défluent (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 : Félou aval, Kayes, Ambidédi, Bakel, Waoundé, Matam, Kaédi, Saldé, Boghé, Podor, Dagana, Richard-Toll, Rosso et Ronq 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 mineurs. 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 étalées 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 Félou, puis de Félou 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-île 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 réagira 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 distinguerons deux phases dans ce réglage. La première intéresse la zone Gouina, Félou amont et la deuxième le tronçon Félou aval-Bakel.

4.1 Réglage du tronçon Gouira aval Félou amont

La limite amont du modèle se trouve en aval des chutes de Gouina, au droit de l'emplacement de l'ancien limnigraphe 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 Félou 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 Félou 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 connaissions 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, Guerbetiou, Ségankané et Félou amont où est imposée 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 mineur 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 Félou amont où, pourtant, la précision moyenne obtenue à l'aide d'une loi de déversoir entre Félou amont et Félou aval, était nettement inférieure à 0,10 m.

4.2 Réglage du tronçon Félou aval - Bakel

Le réglage s'est fait sur le modèle unidimensionnel et nous espérons 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 avons d'abord pensé que la loi de la Falémé à Kidira pouvait, pour des débits supérieures à 1000 m³/s, être sous l'influence d'un remou du Sénégal et les calculs effectués ont en effet montré que l'extrapolation 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 écrête 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 indiquent 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 écrêtement des débits et leur soutient 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 absolus, 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) | ZmaxC (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 Kolimbiné 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 | Ecart moyen absolu (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 TRONGON 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 diéris 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 la MAS et contrôlées par l'ORSTOM. Les contrôles de l'ORSTOM sont antérieures à 1964 sauf à Podor.

On note également qu'il n'y a eu qu'un seul contrôle à Boghé et à faible débit (243 m³/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 (Monographie 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 transitent 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 | | | GUEDE | | | 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 jaugeage 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 (m3/s) | Qo (m3/s) | ΔQ (m3/s) | Qc (m3/s) | Qo (m3/s) | ΔQ (m3/s) | Qc (m3/s) | Qo (m3/s) | ΔQ (m3/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 | 1 438 | 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 | 528 | 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 Cayo 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

6.31 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. A 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 | Écart moyen absolu (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 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-Guédé.

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, Ronq, 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 mineur 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 mineur 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 mineur à Dagana et Rosso,
- . Qt débits totaux calculés au droit de Dagana,

- Q_0 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 | | |
|------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
| | Q_c (m ³ /s) | Q_t (m ³ /s) | Q_0 (m ³ /s) | ΔQ_1 (m ³ /s) | ΔQ_2 (m ³ /s) | Q_c (m ³ /s) | Q_0 (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 revienne 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 fautive. 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 capter 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) | | ΔZ_{max} (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 | |
| Diaouar | 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 avons 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 _{maxM} (I.G.N.) | Z _{maxC} (I.G.N.) | Δ Z _{max} (m) |
|--------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Férou 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 |
| N'Gouï | 0,265 (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 |
|--------------|---------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Férou 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 |
| Natam | 0,108 | 0,197 | 0,159 | 0,168 |
| Kaédi | 0,104 | 0,211 | 0,151 | 0,216 (0,195) |
| Saldé | 0,123 | 0,192 | 0,187 | 0,227 |
| N'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 | |
| Podor | 0,089 | 0,15 | 0,155 | 0,122 |
| Dagana | 0,110 | 0,118 | 0,130 | 0,091 |
| Richard-Toll | 0,113 | 0,075 | 0,108 | 0,082 |
| Rosso | 0,123 | 0,107 | 0,124 | 0,104 |
| Ronq | 0,113 | 0,090 | 0,126 | |

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 | | | |
| Ambidedi | 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 Félou aval et Ronq 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 soient très affectée .

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

La crue de 1964 pour laquelle nous disposions 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.