

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

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

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

Etude hydroagricole du bassin du fleuve Sénégal. Organisation des états riverains du fleuve : Guinée, Mali, Mauritanie, Sénégal. Rapport sur l'étude sommaire de la remontée saline dans le Sénégal établi par SOGREAH - Grenoble - 1973 - 40 p. 3 graphiques - AGL : SF/REG 61. Rapport technique 5.

ABSTRACT

Un certain nombre d'aménagement hydroagricoles situés dans la vallée du Sénégal, entre Bakel et Richard-Toll, vont être mis en exploitation dans les prochaines années. Ces aménagements sont prévus pour une double culture et ils prélèveront donc de l'eau douce pendant l'étiage du fleuve.

Tant que les barrages de Manantali et de Diama ne seront pas construits deux problèmes se poseront : celui de l'eau disponible et celui de la remontée saline dans le fleuve, les deux problèmes étant d'ailleurs liés.

La F.A.O. a donc demandé à SOGREAH de procéder à une étude sommaire du problème. Cette étude, définie par la lettre SOGREAH GMT/TP/DH du 9 juin 1972, devait s'appuyer sur les mesures existantes relatives à la remontée saline dans le Sénégal. Les conditions de délais et de prix restant inchangées, nous avons suggéré d'utiliser un modèle mathématique schématique calculant la progression du coin salé. Ce modèle a mis en évidence un certain nombre de caractères spécifiques du coin salé dans le Sénégal mais, malheureusement, n'a pas donné tous les résultats que nous attendions de lui.

Une analyse basée sur les débits garantis pendant les étiages a alors mis en évidence que les remontées salines seraient majorées de 10 à 15 km pendant les étiages médians et de 30 à 35 km pendant les étiages décennaux. Ces valeurs sont valables si la station de pompage de Richard-Toll ne prélève pas d'eau en mars

Distances par rapport
à l'embouchure (Km)

200

150

100

50

0

0

50

100

0,0 g/L

2,5 g/L

5,0 g/L

10,0 g/L

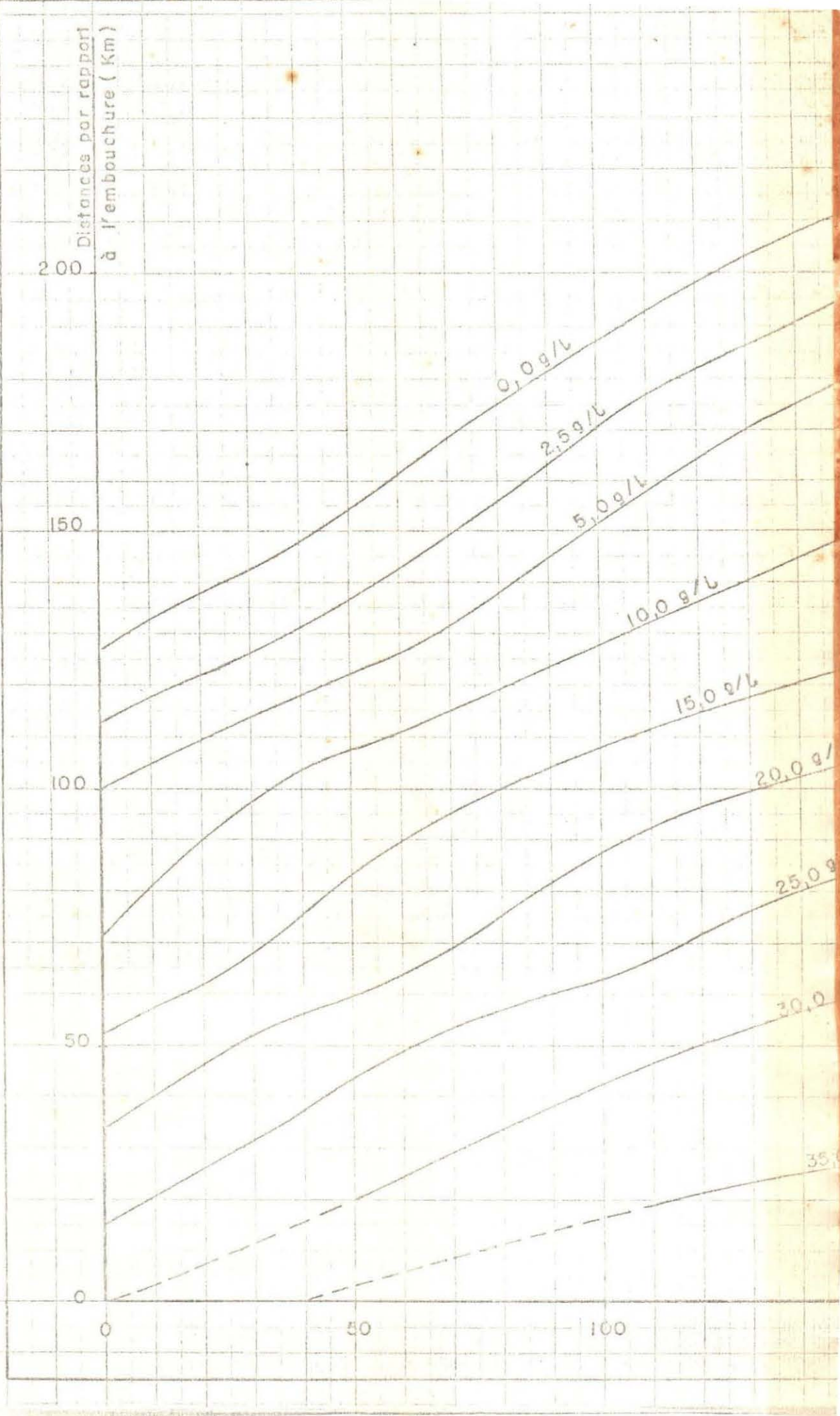
15,0 g/L

20,0 g/L

25,0 g/L

30,0

35,0



et avril. Pour cette dernière, la Taouey devant être rectifiée, il nous semble raisonnable de préconiser l'arrêt des pompages car le remplissage du lac de Guiers étant alors nettement amélioré, les ressources seront suffisantes pour assurer à la fois l'alimentation en eau de Dakar et du périmètre sucrier de Richard-Toll.

oOo

TABLE DES MATIERES

| | | |
|--|--|----|
| INTRODUCTION | | 1 |
| CHAPITRE I - RESUME DES CONCLUSIONS | | 3 |
| 1. Objet du chapitre | | 3 |
| 2. Analyse des études antérieures | | 3 |
| 3. Résultats pratiques | | 4 |
| CHAPITRE II - ANALYSE DES ETUDES ANTERIEURES | | 6 |
| 1. Présentation du chapitre | | 6 |
| 2. Conclusions essentielles relatives à l'étude de l'Orstom | | 7 |
| 3. Campagne de mesures 1972 | | 15 |
| 4. Campagne de mesures 1973 | | 16 |
| 5. Conclusion | | 21 |
| 6. Remarques relatives à l'action de l'évaporation | | 22 |
| CHAPITRE III - EVALUATION DE L'EVOLUTION A CRAINDRE DANS LA REMONTEE SALINE | | 27 |
| 1. Présentation du chapitre | | 27 |
| 2. Le modèle mathématique du coin salé | | 27 |
| 3. Résultats pratiques | | 34 |
| 4. Programme de mesures complémentaires | | 39 |
| 5. Conclusion | | 40 |

LISTE DES GRAPHIQUES

- Graphique 1 Relation débit - salinité moyenne de base
(débits supérieurs à 50 m³/s) (graphique 51
Orstom)
- Graphique 2 Relation temps - salinité moyenne de base
(débits inférieurs à 50 m³/s) (graphique 52
Orstom)
- Graphique 3 Relation temps - salinité moyenne de base
~~concernant~~ (débits inférieurs à 50 m³/s)

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'aménagement du bassin du fleuve Sénégal, la F.A.O. a été chargée de l'étude hydroagricole de la vallée du Sénégal entre Bakel et Saint-Louis.

L'étude a permis de définir les caractéristiques d'un certain nombre de périmètres qui sont réalisés, en cours de réalisation ou projetés. Ces aménagements sont prévus pour une double culture et les irrigations sont ou seront assurées à partir du Sénégal.

Pendant la décrue et l'étiage du fleuve de l'eau sera donc prélevée. Dans l'état actuel, alors que les prises d'eau en étiage sont faibles, le sel remonte le fleuve sur une distance variable qui est fonction de son hydrologie. Le fait de soustraire systématiquement de l'eau va donc modifier les conditions hydrauliques en amont de la partie salée et on aura alors des remontées plus importantes. Ceci est grave pour les aménagements situés entre le confluent du Doué et Richard-Toll. En effet, ils seront pénalisés plus fréquemment et la double culture peut, alors, ne pas être assurée.

Dans un état futur, plus ou moins lointain, cet état de chose peut être modifié par la construction du barrage de Manantali qui soutiendra les débits d'étiage et limitera donc l'intrusion saline. Un deuxième ouvrage, le barrage de Diama, situé à 25 km environ en amont de Saint-Louis, pourra jouer le rôle de barrière anti-sel s'il est construit.

Ces ouvrages demandant des investissements élevés, ils ne seront pas encore construits dans les premières années d'exploitation des périmètres. La F.A.O. a alors demandé à SOGREAH de chercher à définir sommairement quelle sera l'influence de ces prises de débit sur la remontée saline.

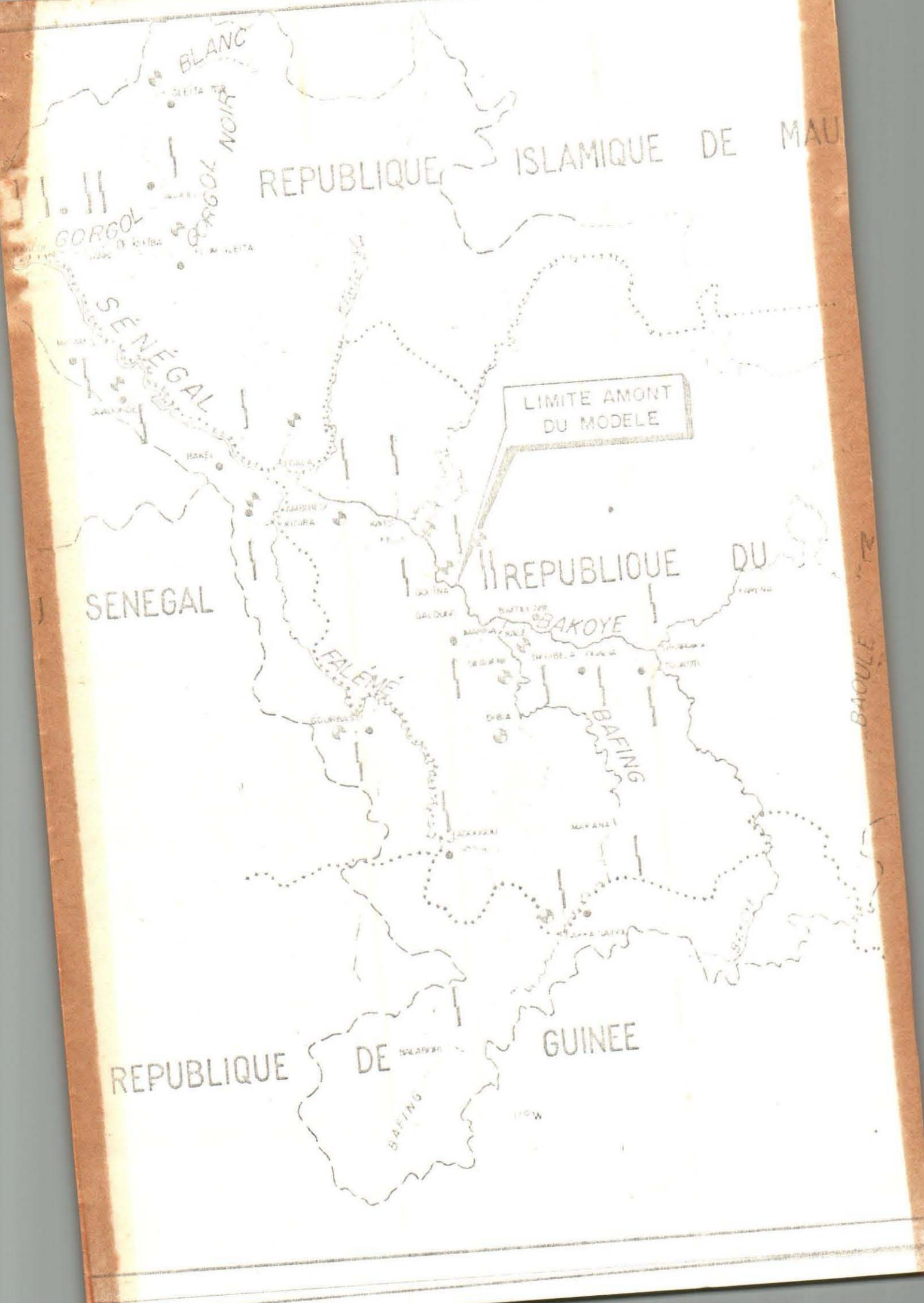
Ce n'est pas une étude exhaustive du problème qui est demandée. Une telle étude demanderait des détails et moyens financiers qui sont en dehors des limites permises.

Nous ferons donc le point sur les études et mesures réalisées et chercherons à extrapoler les résultats antérieurs pour les années à venir en fonction des hypothèses faites sur les débits nécessaires à l'agriculture.

Il s'agit donc essentiellement de définir quelle sera l'influence de l'exploitation des périmètres sur la limite amont de l'intrusion saline.

Le rapport contiendra les chapitres suivants :

- . Chapitre I Résumé des conclusions
- . Chapitre II Analyse des études et mesures
- . Chapitre III Evaluation de l'évolution à craindre dans la remontée saline



REPUBLICQUE ISLAMIQUE DE MAU

SENEGAL

LIMITE AMONT
DU MODELE

REPUBLICQUE DU

REPUBLICQUE DE GUINEE

BAFOULE

SOGREAH
GRENOBLE

FAO

ETUDE HYDROAGRICOLE DU BASSIN DU FLEUVE SENEGAL

—
MODELE MATHEMATIQUE
—

CARTE DU SENEGAL

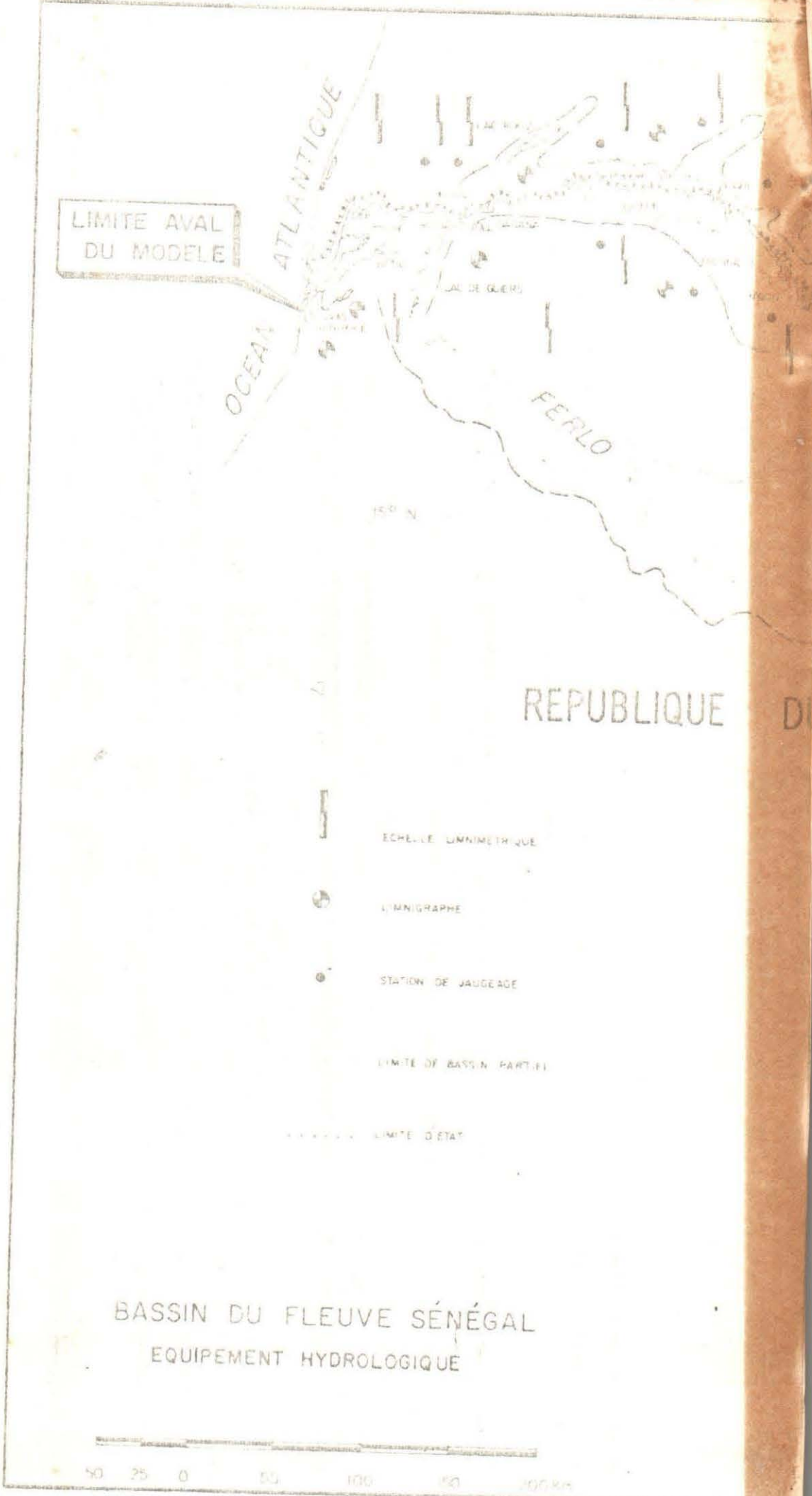
H 11520 - 104

1961 11 44

RITANIE

IALI





LIMITE AVAL
DU MODELE

OCEAN
ATLANTIQUE

LA DE GERU

FERLO

REPUBLIQUE DI...

Echelle limnimétrique

Limnigraphe

Station de jaugeage

Limite de bassin partiel

Limite d'état

BASSIN DU FLEUVE SÉNÉGAL
EQUIPEMENT HYDROLOGIQUE

50 25 0 50 100 150 200 KM

Chapitre 1

RESUME DES CONCLUSIONS

1. OBJET DU CHAPITRE

Il a pour but de présenter en quelques lignes les conclusions essentielles de l'étude sommaire de l'intrusion saline dans le Sénégal.

2. ANALYSE DES ETUDES ANTERIEURES

Ces études antérieures sont :

- l'étude Orstom de 1963 qui s'appuie sur une campagne de mesures de janvier à juillet 1963 ;
- les campagnes de mesures de 1972 et 1973, campagnes n'ayant pas fait l'objet d'interprétation.

Les conclusions essentielles de l'analyse de ces études et mesures sont alors :

- la méthode mise au point par l'Orstom pour définir l'abscisse maximale de l'intrusion saline paraît s'appliquer assez correctement aux années où ont eu lieu des observations, sauf en 1972 et 1973 ;
- les intrusions 1972 et 1973 sont nettement supérieures aux prévisions données par la méthode Orstom. Notons que le tarissement le plus long ayant servi de base à l'Orstom est celui de 1963 qui a duré 107 jours. Les durées

1972 et 1973 sont respectivement de 139 et 150 jours si on admet correcte la loi de tarage de Bakel. Si elle est vraiment détarée, les étiages réels sont plus longs ;

- la station de Bakel doit être détarée pour les débits inférieurs à 100 m³/s ;
- la méthode Orstom est en définitive acceptable pour des étiages ou tassements ne durant pas plus de 110 - 120 jours.

3. RESULTATS PRATIQUES

Ils sont les suivants :

- en l'absence de prélèvements, par les périmètres hydro-agricoles entre Bakel et Dagana, le graphique 3 donne la courbe probable de salinité nulle. Cette courbe est basée sur les études de l'Orstom et sur les observations de 1972 et 1973 ;
- quand les périmètres seront réalisés, les abscisses de l'intrusion saline seront modifiées. Deux corrections seront alors à effectuer : la première sur la date origine correspondant au débit de 45 m³/s à Bakel, la seconde sur les volumes résiduels en aval des prélèvements. Tous calculs effectués, on trouve que pour un étiage médian l'abscisse maximale sera majorée de 10 à 15 km et que pour un étiage décennal la majoration sera de 30 à 35 km ;
- l'étude à l'aide du modèle mathématique du coin salé n'a pas donné les résultats escomptés en raison de la nature du phénomène dans le Sénégal. Si, pour les débits du Sénégal supérieurs à 50 m³/s, les résultats sont assez proches de ceux définis par l'Orstom, nous n'avons pu, pour les débits inférieurs, simuler d'une manière continue l'évolution de l'intrusion saline pendant un étiage complet. Ceci est la conséquence de la nature même du phénomène qui allie à la fois des caractères typiques du coin salé (présence d'une interface net par exemple) et des caractéristiques où la diffusion joue un rôle prépondérant. Les valeurs des paramètres de réglage ne sont plus, dans ces conditions, constantes et il aurait été nécessaire d'ajuster des lois de variation de ces paramètres, ce que les données de base ne permettaient pas de réaliser ;

- si les barrages de Manantali et de Diama ne sont pas construits dans les 4 à 5 années à venir, il faudra poursuivre l'étude du coin salé du Sénégal en s'attachant à des mesures simultanées de salinité, de position de l'interface, de la marée, des débits fluviaux et des fonds.

oOo

2.4 LA SALINITE

2.4.1 Les mesures de salinité ont mis en évidence une augmentation de la concentration en sel avec la profondeur. Cette variation est rapide à un certain moment, ce qui implique nécessairement l'existence d'un coin salé. Transversalement il ne semble pas y avoir, à profondeur constante, de variation de la salinité.

Les formes des courbes isohalines sont très complexes, leurs inclinaisons et les intervalles qui les séparent étant très variables. En moyenne, la salinité décroît fortement de l'embouchure vers l'amont et du fond à la surface.

L'Orstom en est alors arrivé, pour définir les configurations moyennes type, à distinguer ce qui se passe quand la pénétration est inférieure ou supérieure à 100 km.

Quand elle est inférieure à 100 km, les conditions de marées agissent nettement sur la configuration moyenne des courbes isohalines et on observe :

- une stratification maximale avec pente moyenne de 0,25 m/km des isohalines entre les marées de mortes-eaux et les marées moyennes de vives-eaux qui les suivent. On a un coin salé très net ;
- une configuration correspondant aux conditions maximales de mélange (isohalines très inclinées) trois à quatre jours après les marées de vives-eaux les plus fortes. Les pentes varient de 0,6 à 2,5 m/km et le mélange est plus modéré en aval qu'en amont. L'Orstom précise que le coin salé ne disparaît pas entièrement sous l'action du brassage qui s'opère pendant la période de vives-eaux.

Ces deux configurations se succèdent en fonction de l'amplitude des marées.

Quand la pénétration est supérieure à 100 km, l'Orstom conclut que "la répartition spatiale de la salinité est pratiquement indépendante des conditions de marées. Il y a cependant une exception à l'extrémité amont du bief salé car on y retrouve une certaine alternance des formes des isohalines", alternance qui traduit la présence d'un coin salé.

2.4.2 Les mesures de l'Orstom n'ont pas mis en évidence une évolution de la salinité liée à la marée.

L'Orstom a alors cherché à définir les influences réciproques des différents paramètres sur la salinité. Ces paramètres sont :

- . le débit fluvial ;
- . le niveau moyen à l'embouchure ;
- . l'amplitude de la marée (marnage).

L'influence du débit fluvial a été étudiée en fonction de l'évolution de la salinité moyenne. L'Orstom a alors établi une relation entre le débit fluvial et la répartition de la salinité le long du fleuve. (Cette relation amène deux réserves : elle s'applique mal aux faibles débits et n'est vraiment valable qu'en considérant l'évolution de la salinité comme une série d'états d'équilibre qui ne seraient réalisés que si le débit fluvial était constant).

Ceci est vrai quand le débit fluvial est grand et il existe une valeur limite de ce débit en dessous de laquelle l'évolution de la salinité ne dépend plus que du temps.

L'Orstom a fixé cette valeur à 50 m³/s et les graphiques 1 et 2 (graphiques Orstom 51 et 52) permettent alors de déterminer la salinité en fonction du débit et du temps.

Les variations du niveau moyen, elles, entraînent une progression ou un retrait de la salinité.

L'action dépend de la configuration des isohalines et l'Orstom a estimé que, dans le cas d'un mélange assez fort des eaux, le déplacement ΔX_x du front est proportionnel à la variation Δh du niveau moyen.

Quant à la variation de la salinité, elle dépend de la valeur locale du gradient longitudinal de salinité :

$$\frac{\Delta S}{\Delta x}$$

pris à l'origine de la variation Δh considérée.

L'Orstom a alors posé :

$$\frac{\Delta S}{(\Delta h)} = - \frac{\Delta S}{\Delta x} \cdot \Delta X_*$$

L'Orstom a ensuite essayé de définir l'influence du marnage et, en utilisant une méthode de calcul assez simple dans son principe, est parvenu aux conclusions suivantes :

- Au début de l'intrusion saline, on a une augmentation de la salinité en mortes-eaux et une diminution en vives-eaux ;
- Au-delà d'une certaine pénétration (120 km environ) il semble que les variations du marnage n'ont plus d'influence pratique sur la salinité (notons qu'au-delà du mois d'avril, la méthode de calcul ne donne plus de résultats significatifs selon l'Orstom).

2.4.3 L'Orstom a ensuite cherché à préciser les limites aval du pompage dans le Sénégal à partir des courbes du graphique 1. Les distances lues sur le graphique sont majorées pour tenir compte des évolutions journalières de la salinité qui donnent des pénétrations de 10 à 15 km au-delà de la limite théorique.

Par rapport à une embouchure située à 3 km en aval de Gandiolo on a :

| Débit (m ³ /s) | Limite aval de pompage (P.K) | Position sur le fleuve |
|------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 50 | 140 | 5 km en aval de Rosso |
| 100 | 115 | Diawar |
| 150 | 90 | Au droit de Kour Macène |
| 200 | 75 | 3 km en amont de Tiguat |
| 300 | 58 | Partie Sud de l'île de N'Tieng |
| 400 | 45 | Diana |
| 500 | 37 | Confluent Gueyloubé |

2.4.4 Retrait du coin salé

Ce retrait est un phénomène continu qui dépend du débit et du temps, soit du volume total écoulé au début de la crue.

L'analyse faite pour la crue de 1963 a montré que l'on pouvait lier le retrait au volume écoulé à Dagana. La difficulté de la méthode réside dans l'estimation de ce volume car, en-dessous d'un débit de 500 m³/s, la loi de tarage de Dagana n'est pas utilisable en raison de l'influence de la marée.

2.5 APPLICATION DES RESULTATS

2.5.1 L'Orstom a appliqué les résultats aux années antérieures.

Auparavant, toutefois, il a été nécessaire de vérifier si les formes de décroissance des débits étaient semblables d'une année sur l'autre et s'il existait une relation temporelle à peu près constante entre les volumes écoulés à Bakel, à Saldé-N'Goui et à Dagana.

L'analyse faite par l'Orstom montre qu'entre 500 et 50 m³/s les formes de décroissance des débits sont assez proches. En-dessous de 50 m³/s, le tracé, en coordonnées semi-logarithmiques, est linéaire mais la pente varie d'une année sur l'autre. L'Orstom a alors admis que l'année 1963 était une année médiane. La limite de l'intrusion saline est alors calculée à l'aide des figures 1 et 2 et on y apporte une correction égale à :

$$\Delta x = - \frac{\Delta V}{3}$$

(km)

ΔV étant exprimé en millions de m³ et représentant la différence entre le volume de tarissement de l'année médiane 1963 et le volume de l'année considérée.

Le retrait des eaux salines est défini à partir du volume écoulé à Dagana, volume déduit des volumes écoulés à Saldé sur le Sénégal et N'Goui sur le Doué. Comme les observations en ces stations sont peu sûres avant 1956, l'Orstom a été conduit à chercher s'il existait une corrélation satisfaisante entre les volumes écoulés à Bakel et ceux écoulés à Saldé et N'Goui.

Les résultats ont alors montré que le nombre de jours séparant des dates d'égal volume écoulé est relativement constant, c'est-à-dire 8 jours entre Bakel et Saldé et 10 jours entre Bakel et Dagana.

2.5.2 L'application de la méthode est alors la suivante :

• Salinité maximale :

L'Orstom admet qu'elle se produit 10 jours après l'arrivée de la crue à Bakel.

On calcule l'abscisse maximale par la méthode suivante :

- on cherche la date à laquelle apparaît le débit de 45 m³/s à Bakel (on admet implicitement que le débit à Dagana est égal à 50 m³/s ce même jour) ;
- on définit ensuite le nombre de jours séparant cette date de l'arrivée de la crue à Bakel. On ajoute 10 jours à cette durée et, à l'aide de la figure 2, on définit l'abscisse maximale de l'intrusion saline ;
- cette abscisse est ensuite à corriger en fonction du volume de tarissement de l'année et d'une valeur de 10 à 15 km correspondant aux fluctuations journalières.

Cette méthode a été appliquée dans le tableau ci-après page 14.

• Retrait :

Le calcul est réalisé en supposant un décalage de 10 jours entre les volumes écoulés à Bakel et Dagana. La section moyenne est prise égale à 2000 m² et il semble que l'Orstom, dans ses calculs, ait admis une variation linéaire du rendement entre Dagana (PK 169) et Saint-Louis (PK zéro) Ces rendements seraient de 66 % à Dagana et de 32 % à Saint-Louis.

| Année | Date origine (0=50m3/s (45 m3/s à Bakel) | Date arrivée crue Bakel | Date salinité maximale | Nombre de jours | Abscisse maximale (km ori- gine embouch.) | Observations | Dates de retrait | |
|--|---|----------------------------------|------------------------------|-----------------------|---|-------------------|---|----------------------------|
| | | | | | | | Richard- Toll (km 155) PK 145 de St-Louis | Saint- Louis (km 10) |
| EXTRAIT DU RAPPORT C. MARIOTTE (ORSTOM 1964) | | | | | | | | |
| 1930 | 16/3 | (5/6) | (10/6) | 86 | 177 | | 28/6 | 24/7 |
| 1931 | 11/3 | (10/6) | (18/6) | 99 | 187 | | 3/7 | 24/7 |
| 1932 | 12/3 | (5/6) | (15/6) | 95 | 185 | | 4/7 | 27/7 |
| 1933 | 18/3 | | (20/6) | (94) | (182) | | 28/6 | 18/7 |
| 1934 | 3/3 | (19/6) | (25/6) | 114 | 196 | | 16/7 | 11/8 |
| 1935 | 27/2 | | (15/6) | (108) | (192) | | 6/7 | 22/7 |
| 1936 | 22/3 | (5/6) | (10/6) | 80 | 175 | | 28/6 | 21/7 |
| 1937 | 3/4 | (25/6) | (5/7) | 93 | 182 | | 24/7 | 6/8 |
| 1938 | 1/3 | (25/6) | (8/7) | 106 | 200 | | 18/7 | 7/8 |
| 1939 | 1/3 | 15/6 | 21/6 | 95 | 183 | | 18/7 | 3/8 |
| 1940 | 21/2 | (15/6) | (20/6) | 119 | 196 | | 14/7 | 15/8 |
| 1941 | 25/2 | 3/7 | 13/7 | 138 | 205 | | 26/7 | 2/8 |
| 1942 | 10/2 | (1/7) | (10/7) | 141 | 205 | | 25/7 | 6/8 |
| 1943 | 1/3 | (28/6) | (25/6) | 116 | 192 | | 16/7 | 16/8 |
| 1944 | 14/2 | (25/6) | (1/7) | 137 | 201 | | 13/7 | 7/8 |
| 1945 | 1/3 | (25/6) | (1/7) | 122 | 192 | | 28/7 | 1/8 |
| 1946 | 8/3 | 5/7 | (10/7) | 124 | 193 | | 23/7 | 8/8 |
| 1948 | 20/2 | 14/6 | 24/6 | 125 | 192 | | 10/7 | 25/7 |
| 1949 | 25/2 | 20/6 | 30/6 | 125 | 183 | | 23/7 | 7/8 |
| 1950 | 21/2 | 30/6 | 18/7 | 132 | 195 | | 22/7 | 3/8 |
| 1951 | 15/3 | 6/6 | 16/6 | 93 | 171 | | 27/6 | 1/8 |
| 1952 | 28/3 | 14/6 | 24/6 | 88 | 167 | | 6/7 | 30/7 |
| 1953 | 7/3 | 16/6 | 22/6 | 103 | 177 | | 29/6 | 22/7 |
| 1954 | 12/3 | 26/5 | 5/6 | 84 | 165 | | 12/6 | 12/7 |
| 1955 | 3/4 | 1/6 | (11/6) | (68) | | | non salé | 2/7 |
| 1956 | 1/4 | 16/6 | 19/6 | 79 | 140 | Valeurs observées | non salé | 28/7 |
| 1957 | 29/3 | 11/6 | 18/6 | 82 | 150 | Valeurs observées | (23/6) | 17/7 |
| 1958 | 1/4 | 3/6 | 7/6 | 67 | 135 | Valeurs observées | non salé | 16/7 |
| 1959 | 9/4 | 28/5 | 4/6 | 56 | 145 | Valeurs observées | non salé | 19/7 |
| 1960 | 11/3 | 11/6 | 21/6 | 102 | 180 | Valeurs observées | 5/7 | 25/7 |
| 1961 | 11/3 | 15/6 | 24/6 | 105 | 189 | | 4/7 | 25/7 |
| 1962 | 13/3 | 9/6 | 19/6 | 98 | 193 | | 5/7 | 28/7 |
| 1963 | 16/3 | 30/6 | 1/7 | 107 | 188 | Valeurs observées | 16/7 | 4/8 |
| ANNÉE POSTÉRIEURES AU TABLEAU ORSTOM | | | | | | | | |
| 1964 | 6/3 | 1/6 | 11/6 | 97 | 177 | | | |
| 1965 | 23/3 | 21/6 | 29/6 | 98 | 180 | | | |
| 1966 | 26/3 | 30/5 | 10/6 | 84 | 170 | | | |
| 1967 | 28/3 | 11/6 | 20/6 | 84 | 170 | | | |
| 1968 | 5/4 | 28/6 | 20/6 | 82 | 170 | | | |
| 1969 | 21/2 | 21/6 | (2/7) | 131 | 200 | | 15/7 | |
| 1970 | 18/3 | 6/6 | 26/6 | 94 | 170 | | | |
| 1971 | 23/2 | 30/6 | (7/7) | 134 | 215 | | 20/7 | 31/7 |
| 1972 | 15/2 | 22/6 | 2/7 | 139 | 226 | Moins de 0,1 µ/l | 17/7 | |
| 1973 | 22/1 | 10/6 | 20/6 | 150 | 250 | Valeurs observées | | |

2.6 CONCLUSION SUR L'ETUDE DE L'ORSTOM

Cette étude est celle qui présente les résultats les plus nombreux et une méthode d'évaluation a posteriori de l'intrusion maximale des eaux salines.

Elle semble cependant ne pas s'être attachée à l'étude de l'évolution du coin salé, son existence n'étant probablement pas évidente au début de leur étude.

Cette remarque explique le fait que les résultats présentés ci-dessus pendent à des salinités moyennes calculées sur toute la hauteur des sections alors que les études relatives aux coins salés s'attachent, à présent, à mettre en évidence les interfaces et les courbes isohalines.

En conclusion, cette étude, étayées par une seule campagne de mesure, a permis de dégager un certain nombre d'enseignements qui seront utiles à la définition des travaux et recherches qu'il faudrait réaliser pour étudier correctement l'intrusion saline dans le Sénégal (à titre d'exemple : l'étude du coin salé du Rhône a été amorcée de manière systématique vers 1965 et des campagnes de mesures continues ont eu lieu entre 1967 et 1971).

3. CAMPAGNE DE MESURES 1972

Elle s'est intéressée à l'intrusion saline et à son retrait en amont de Richard-Toll.

Les mesures vont du 25 avril au 17 juillet 1972 à raison d'une série de prélèvements hebdomadaires pendant la pénétration et de prélèvements journaliers durant le retrait.

Il est dommage que les prélèvements n'aient pas commencé avant le 25 avril afin de vérifier si le seuil situé en aval de Dagana joue vraiment un rôle de contrôle pendant une certaine période de l'intrusion saline.

Les mesures montrent qu'au cours de l'intrusion il y a des phases où la stratification des isohalines est marquée et d'autres où on observe un mélange presque uniforme sur toute la profondeur.

Les cotes du fond ayant été mesurées en chaque point de prélèvement, on note que le fond évolue beaucoup d'une section à une autre (entre - 3 et - 12 IGN).

Gr. I

SOGREAH
GRENOBLE

F.A.O

F.A

MODELE MATHEMATIQUE DE LA VALLEE DU SENEGAL

NEO

ETUDE SOMMAIRE DE LA REMONTEE SALINE

INI

débits en m³/s

Relation débit-salinité moyenne de basse

(débits supérieurs à 50 m³/s)

(GRAPHIQUE 51 ORSTOM)

R.11520 - 101

73 36390

39

NOTA: Le jour zéro correspond à un débit de $50 \text{ m}^3/\text{s}$
à DAGANA ou de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ à BAKEL

SOGREAH
GRENOBLE

F.A.O

MODELE - MATHEMATIQUE - DE LA VALLEE DU SENEGAL

ETUDE SOMMAIRE DE LA REMONTEE SALINE

Relation temps - salinité moyenne de base

(débits inférieurs à $50 \text{ m}^3/\text{s}$)

(GRAPHIQUE 52 ORSTOM)

Nombre de jours

R. 11520 102

7336301

L'abscisse maximale atteinte par la salinité serait le km 226 si on conserve l'écart entre Saint-Louis et l'embouchure égal à 18 km. L'utilisation de la figure 2 conduit à une remontée saline de 207 km, abscisse qu'il faudrait corriger de la valeur :

$$\frac{\Delta V}{3}$$

qui, dans notre cas, serait de 10 km environ. En effet, entre le 15 février et le 21 juin 1972, le volume écoulé à Bakel est de 151 millions de m³, le volume de tarissement normal de 1963 étant de 120 millions de m³.

L'intrusion maximale serait donc, d'après les courbes de l'Orstom, de 200 km environ, soit 26 km de moins que l'intrusion maximale observée.

Cet écart optimiste est en contradiction avec ceux trouvés par l'Orstom lors de la comparaison de la méthode avec les observations de M. DUBOIS. En effet, lors de cette analyse, la méthode Orstom donnait des intrusions salines supérieures à celles observées. Il est vrai que les limites amont atteintes étaient en aval du seuil de Keur-Mour (PK 183 par rapport à l'embouchure) et que M. DUBOIS avait mesuré la salinité en surface.

4. CAMPAGNE DE MESURES 1973

Cette campagne de mesures va de la mi-décembre 1972 au mois de juin 1973. Elle s'est attachée, dans la mesure du possible, à suivre la progression de l'intrusion saline.

Notons que l'année 1973 est une année où le régime d'étiage a été perturbé par des pompages effectués à Richard-Toli, pompages rendus nécessaires par la faiblesse de la crue de 1972 qui n'a pu remplir convenablement le lac de Guiers. Ce type d'exploitation doit, en principe, se poursuivre dans les prochaines années afin de préserver le plus longtemps possible la réserve d'eau douce constituée dans le lac de Guiers à des fins hydroagricoles et urbaines (alimentation en eau de Dakar).

4.1 DEBITS A BAKEL

L'examen des tableaux dressés par le Projet à Saint-Louis permet de situer l'apparition des débits caractéristiques suivants :

| | | |
|---------------------------|-------|---------------------|
| Q = 500 m ³ /s | _____ | le 12 octobre 1972 |
| Q = 400 m ³ /s | _____ | le 30 novembre 1972 |
| Q = 300 m ³ /s | _____ | le 6 novembre 1972 |
| Q = 200 m ³ /s | _____ | le 15 novembre 1972 |
| Q = 100 m ³ /s | _____ | le 24 décembre 1972 |
| Q = 50 m ³ /s | _____ | le 31 janvier 1973 |
| Q = 45 m ³ /s | _____ | le 8 février 1973 |

Selon l'Orstom, on peut donc admettre que le 8 février 1973 le débit à Dagana est de 50 m³/s. Notons que le 7 février il y a, d'une manière uniforme, 1,7 g/l de sel à Richard-Toll et à Dagana l'eau est encore douce. La limite amont de l'intrusion se trouve donc entre ces deux stations qui sont distantes de 25 km, soit entre les PK 162 et 187 par rapport à l'embouchure. La courbe Orstom donne, pour les mêmes conditions, une intrusion située au PK 132 par rapport à l'embouchure.

4.2 EVOLUTION DE L'INTRUSION SALINE

Dans le tableau suivant nous avons essayé de rassembler les résultats essentiels que l'on peut tirer de l'interprétation des mesures

Remarques :

1. Nous avons admis, comme l'Orstom, qu'il y a un décalage de 10 jours entre les débits à Bakel et à Dagana.
2. Les limites L1 et L2 sont calculées à l'aide des figures 1 et 2 de l'Orstom. L1 tient compte du débit à Dagana et le 10 février 1973 est pris comme date d'origine pour l'utilisation de la figure 2. L2 considère le débit en aval de Richard-Toll et le 22 janvier 1973 est pris comme date d'origine. A cette date le sel est arrivé à Richard-Toll et on peut considérer que la station de pompage a été arrêtée.
3. La station de pompage de Richard-Toll ayant une capacité de 20 m³/s, nous avons admis qu'elle fonctionnait à pleine puissance tant que cela est possible.

4. Les PK donnés à partir des prélèvements correspondent à des distances comptées à partir de l'embouchure (kilométrages comptés à partir de Saint-Louis auxquels on ajoute 18 km).

| Date | Débit A Bakel | Débit A Dagana | Débit aval Richard- Toll | Lignes aval du ciel (observées) | Lignes Gratun | | |
|------------|---------------------|----------------------|-----------------------------------|------------------------------------|---------------|------|-----|
| | | | | Lieu | PK | L1 | L2 |
| 14.12.1972 | 133 | 123 | 103 | Cafnans | 100 | 94 | 104 |
| 19.12.1972 | 111 | 136 | 116 | Entre Cafnans et Diawar | ~110 | 88 | 97 |
| 23.12.1972 | 93 | 113 | 93 | Diawar | 118 | 100 | 109 |
| 4.01.1973 | 82 | 97 | 77 | Entre Diawar et Rong | ~122 | 105 | 116 |
| 9.01.1973 | 74 | 86 | 66 | Amont Rong (PK 127) | | 111 | 121 |
| 18.01.1973 | 63 | 76 | 56 | Amont Rong (PK 127) | | 117 | 128 |
| 24.01.1973 | 57 | 68 | 48 | Vers Richard-Toll | ~162 | 127 | 132 |
| 26.01.1973 | 56 | 65 | | Amont Richard-Toll | | 128 | 132 |
| 30.01.1973 | 51 | 60 | | Amont Richard-Toll | | 131 | 133 |
| 2.02.1973 | 49 | 58 | | Amont Richard-Toll | | ~132 | 134 |
| 7.02.1973 | 46 | 54 | | Amont Richard-Toll | | ~132 | 137 |
| 10.02.1973 | 43 | 50 | | Amont Richard-Toll | | ~132 | 138 |
| 13.02.1973 | 42 | 49 | | Amont Richard-Toll | | ~132 | 140 |
| 16.02.1973 | 39 | 47 | | Amont Richard-Toll | | ~132 | 141 |
| 20.02.1973 | 36 | 43 | | Amont Richard-Toll | | 134 | 143 |
| 22.02.1973 | 33 | 42 | | Amont Richard-Toll | | 136 | 144 |
| 27.02.1973 | 29 | 37 | | Amont Richard-Toll | | 137 | 146 |
| 2.03.1973 | 27 | 36 | | Dagana | 187 | 138 | 148 |
| 6.03.1973 | 25 | 32 | | Dagana | 187 | 140 | 150 |
| 13.03.1973 | 21 | 27 | | Dagana | 187 | 144 | 154 |
| 23.03.1973 | 17 | 21 | | Amont Dagana | | 145 | 161 |
| 27.03.1973 | 15 | 19 | | Amont Dagana | | 151 | 164 |
| 3.04.1973 | 9 | 12,8 | | Bokholé | 208 | 160 | 173 |
| 17.04.1973 | 7 | 10 | | Amont Bokholé | | 166 | 178 |
| 25.04.1973 | 4,4 | 7 | | Amont Bokholé | | 171 | 183 |
| 2.05.1973 | | 4,4 | | Entre Bokholé et Gourel Saldé | 217 | 176 | 187 |
| 8.05.1973 | | 4,4 | | Gourel Saldé | 226 | 180 | 191 |
| 14.05.1973 | | | | Amont Gourel Saldé | | 183 | 195 |
| 23.05.1973 | | | | Amont Gourel Saldé | | 189 | 200 |
| 25.05.1973 | | | | Dara Salan | 238 | 190 | 201 |
| 1.06.1973 | | | | Gourel Moussa | 241 | 196 | 205 |
| 12.06.1973 | | | | Amont Gourel Moussa | 250 | 200 | 208 |

4.3 ANALYSE DES MESURES

On peut remarquer qu'entre les valeurs observées de l'intrusion saline et les valeurs calculées selon la méthode Orstom il y a deux phénomènes.

Jusqu'au 4 janvier 1973, il existe une bonne concordance entre les limites amont de l'intrusion saline, surtout que les valeurs Orstom sont des moyennes qui peuvent être majorées par les variations journalières.

Après le 4 janvier, les divergences importantes apparaissent entre les observations et les interprétations que l'on peut faire à partir des résultats Orstom. On note ainsi des écarts systématiques de 30 à 40 km, écarts en distance s'accompagnant de différences dans les temps très importantes. Ainsi, l'intrusion saline est en avance de près de deux mois par rapport aux données moyennes de l'Orstom.

L'analyse des débits passés à Bakel entre le 10 février et le 10 juin 1973, date d'apparition de la crue à Bakel, donne aussi un résultat troublant. Leur totalisation donne un volume écoulé de 155 millions de m³ en admettant que du 10 mai au 10 juin le volume écoulé a été de 10 millions de m³ (débit moyen de 2,7 m³/s environ). Ce volume est nettement supérieur au volume de tarissement de l'année 1963 prise comme année moyenne (120 millions de m³). On peut alors se demander comment il peut en être ainsi quand on sait que l'étiage 1973 est un des étiages les plus faibles observés sur le Sénégal.

Alors, quand on tient compte de ces éléments, on trouve que la limite amont de l'intrusion saline devrait se situer vers le PK 200 alors qu'en réalité la limite s'est trouvée vers le PK 250.

La comparaison est troublante : un écart de 26 km en 1972 et un écart de 50 km en 1973 alors qu'il semble qu'en 1971 la limite mesurée par le SCET corresponde à la limite définie par la méthode Orstom.

Voyons à présent d'un peu plus près le profil en long du fleuve dans le bief maritime. On note ainsi, à partir de l'embouchure, les points hauts suivants :

| | | |
|---------------|--------|---------------|
| Seuil à _____ | - 3,85 | IGN au PK 19 |
| Seuil à _____ | - 4,20 | IGN au PK 63 |
| Seuil à _____ | - 4,20 | IGN au PK 93 |
| Seuil à _____ | - 2,90 | IGN au PK 119 |
| Seuil à _____ | - 3,20 | IGN au PK 183 |

Si on revient aux observations, on remarque que la concordance existe tant que le seuil du PK 119 n'est pas atteint. Ensuite, il n'est plus possible de faire correspondre l'observation avec la méthode Orstom.

On peut penser que les seuils exercent un contrôle tant qu'ils ne sont pas franchis par les eaux salines. Ensuite, il se produit un déversement qui progresse vers l'amont plus ou moins vite en fonction du modelé des fonds du Sénégal, mais surtout d'une manière moins continue que ne le traduisent les abaques de l'Orstom.

Nous avons signalé plus haut le décalage dans le temps. Nous croyons intéressant d'y revenir en nous référant à la station de Richard-Toll. Le sel y parvient le 24 janvier 1973 alors que les courbes Orstom donnent comme date probable le 25 mars 1973 (en admettant, comme l'Orstom, que Richard-Toll est au PK 158, la date probable serait le 18 mars 1973).

Cet écart de deux mois est encore observé à Dagana.

Reste à expliquer les divergences importantes des années 1972 et 1973. Ce sont des années exceptionnelles, certes, mais les différences sont trop grandes pour ne pas être explicables.

On peut penser à différentes raisons :

- une modification de l'embouchure du fleuve, mais alors pourquoi en aval du PK 119 y a-t-il concordance entre les observations et la méthode Orstom ;
- une évolution des hauts fonds intermédiaires du fleuve qui ferait que l'intrusion saline a été rendue plus facile ;
- l'effet du vent qui, par un phénomène de mise en circulation des eaux, a pu favoriser la remontée du sel et sa diffusion (les observations sur le Rhône ont montré que le vent seul pouvait en quelques heures changer l'abscisse maximale du coin salé de plusieurs kilomètres) ;
- l'action de l'évaporation. L'évaporation, surtout sur des étiages tels que ceux de 1972 et de 1973, peut avoir joué un rôle permettant d'expliquer une partie des anomalies (on peut ainsi estimer que les intrusions salines de 1972 et 1973 ont été majorées de 10 et 13 km respectivement). Par contre, pour des étiages moins sévères, il nous semble qu'elle est implicitement incluse dans les évaluations. Dans le paragraphe 6 de ce chapitre nous développerons plus longuement l'action éventuelle de l'évaporation.

- Le détarage de la station de Bakel. Ainsi, des mesures faites au moulinet les 27 mars et 3 mai 1973 ont donné des débits de 8 et 2,4 m³/s alors que d'après la loi hauteur-débit ils sont théoriquement ces jours-là de 15 et 4 m³/s. Deux autres jaugeages effectués le 10 mai ont donné 0,25 m³/s à Bakel et 1,5 m³/s à Diouldé-Dabé, le débit théorique à Bakel étant de 3 m³/s.

Toutes ces raisons peuvent jouer en même temps, mais il est bien évident que la dernière est la plus importante.

En conclusion, les mesures de 1972 et de 1973 font apparaître des divergences notables avec les résultats donnés par la méthode Orstom. L'explication principale pourrait venir du détarage de la station de Bakel aux faibles débits. En effet, le fait que la station de Richard-Toll ait prélevé un débit de l'ordre de 20 m³/s ne conduit pas à de telles différences une fois réalisées les corrections pour en tenir compte.

5. CONCLUSION

L'analyse de l'étude réalisée par l'Orstom et des dernières campagnes de mesures (1972 et 1973) montre que :

- la méthode mise au point par l'Orstom pour définir l'abscisse maximale de l'intrusion saline paraît s'appliquer assez correctement aux années où ont eu lieu des observations, sauf en 1972 et 1973 ;
- les intrusions 1972 et 1973 sont nettement supérieures aux prévisions données par la méthode Orstom. Notons ici que l'étiage le plus long ayant servi de base à l'Orstom est celui de 1963 qui a duré 107 jours. Les étiages 1972 et 1973 durèrent respectivement 139 et 150 jours si on admet correcte la loi de tarage de Bakel. Si elle est vraiment détarée, les étiages réels sont plus longs ;
- la station de Bakel doit être détarée pour les débits inférieurs à 100 m³/s ;
- la méthode Orstom est en définitive acceptable pour des étiages ne durant pas plus de 110 - 120 jours.

6. REMARQUES RELATIVES A L'ACTION DE L'EVAPORATION

Le Projet, à Saint-Louis, a émis l'hypothèse que l'évaporation sur le bief maritime a joué un rôle dans la pénétration des eaux salines en 1972 et 1973. En effet, entre les dates d'apparition du débit de 45 m³/s et l'arrivée de la crue à la station de Bakel, il s'est écoulé 139 jours en 1972 et 150 jours en 1973 alors que la durée n'a été que de 107 jours en 1963, année de référence. Il nous semble cependant utile de signaler ici que le nombre de jours correspondant est égal à 134 en 1971 et qu'il ne semble pas y avoir de discordance manifeste entre la méthode Orstom et les observations effectuées par le SCET.

Voyons à présent les différents paramètres qui influent sur le phénomène.

6.1 ACTION POTENTIELLE DE L'EVAPORATION SUR LE BIEF MARITIME

Dans l'étude du barrage du delta réalisée par SAGREAH, la surface du bief maritime a été estimée à 11 000 ha à la cote zéro I.G.N.. Le bief maritime ayant une longueur de 450 km et la pénétration saline se faisant sur une longueur variant entre 150 et 250 km, l'évaporation agit donc sur des eaux douces et salées.

En appliquant à la surface de 11 000 ha les capacités d'évaporation potentielle, on obtient les résultats portés dans le tableau suivant :

| Mois | Evaporations mensuelles (mm) | Volumes mensuels (10 ⁶ m ³) | Débits moyens équivalents (m ³ /s) |
|---------|------------------------------|--|---|
| Février | 190 | 21 | 8,7 |
| Mars | 245 | 27 | 10,1 |
| Avril | 265 | 29 | 11,2 |
| Mai | 260 | 28,6 | 10,7 |
| Juin | 230 | 25,3 | 9,8 |

On note que les débits moyens équivalents sont grands vis à vis des apports d'eau douce du Sénégal, ainsi que nous le verrons plus loin.

L'action de l'évaporation se traduira par :

- Une augmentation de la salinité moyenne du bief salé ;
- Un apport supplémentaire d'eau de mer pour compenser les pertes par évaporation ;
- Une réduction de l'effet retardateur dû au volume d'eau douce parvenant de l'amont.

Ces effets se traduiraient donc par une action sur la pénétration saline qui risque donc, dans la mesure où l'étiage est plus long que l'étiage de référence, d'atteindre une abscisse supérieure à l'abscisse théorique. Mais quel sera l'écart réel et comment le calculer ?

6.2 ANALYSE DES DÉBITS GARANTIS A BAKEL

L'étude de base est "l'étude statistique des faibles débits du fleuve Sénégal" réalisée par M. JUTON en mars 1972.

A l'aide du graphique 6 de cette étude, on peut dresser le tableau suivant des débits garantis à Bakel. A ce tableau nous avons adjoint les dates d'apparition de ces mêmes débits pendant les étiages 1970-1971, 1971-1972 et 1972-1973.

| Débits garantis (m ³ /s) | 100 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 |
|--|-------------|------------|------------|------------|----------|----------|
| Médiane | 8 février | 15 mars | 23 mars | 4 avril | 13 avril | 5 mai |
| 8 années sur 10 | 23 janvier | 2 mars | 11 mars | 22 mars | 5 avril | 21 avril |
| 9 années sur 10 | 14 janvier | 23 février | 4 mars | 15 mars | 29 mars | 13 avril |
| 19 années sur 20 | 7 janvier | 17 février | 26 février | 9 mars | 24 mars | 6 avril |
| 49 années sur 50 | 30 décembre | 11 février | 20 février | 2 mars | 19 mars | 30 mars |
| 99 années sur 100 | 24 décembre | 7 février | 16 février | 26 février | 13 mars | 26 mars |
| Etiage 1970-1971 | 6 janvier | 16 février | 27 février | 13 mars | 26 mars | 15 avril |
| Etiage 1971-1972 | 28 décembre | 10 février | 22 février | 4 mars | 22 mars | 10 avril |
| Etiage 1972-1973 | 24 décembre | 31 janvier | 15 février | 26 février | 15 mars | 6 avril |

Remarquons que les faibles débits du Sénégal ont été analysés de 1951 à 1971 car les observations antérieures à 1951 n'étaient pas systématiques pendant les étiages. Notre extrapolation jusqu'à l'étiage centennal est peut-être excessive mais les dates tirées du graphique doivent quand même rester significatives à quelques jours près.

La comparaison montre que :

- L'étiage 1970-1971 se produit statistiquement une année sur vingt ;
- L'étiage 1971-1972, une année sur cinquante ;
- L'étiage 1972-1973, une année sur cent en admettant valable la loi hauteur-débit de Bakel aux faibles débits. Or, comme il semble qu'elle soit actuellement majorante, cet étiage, comme le précédent d'ailleurs, doit avoir une fréquence au dépassement encore plus faible.

On peut cependant tirer un enseignement de cette comparaison. L'étiage de 1970-1971, qui se place avec une fréquence au dépassement raisonnable, conduit à une intrusion saline observée en conformité avec la méthode. Par contre, les étiages 1971-1972 et 1972-1973 qui ont des fréquences au dépassement de 1/50 et de 1/100 ou plus (loi hauteur-débit à Bakel douteuse) sortent nettement du cadre et ne peuvent plus entraîner des résultats en conformité avec la méthode. Nous pensons que nous nous trouvons dans ces cas devant un phénomène qui ne peut plus s'intégrer dans les résultats d'ensemble.

Avant, toutefois, de conclure, voyons quels sont les débits garantis à Diouldé-Diabé, en amont du bief maritime, sur le Sénégal.

6.3 ANALYSE DES DEBITS GARANTIS A DIOULDE-DIABE

L'analyse réalisée par M. JUFON ne porte que sur sept années d'observation car la station de Diouldé-Diabé n'est pas une station principale.

Les valeurs des débits garantis ont donc été établies à partir d'une loi de régression. La valeur origine du débit à Diouldé-Diabé est de 150 m³/s. Ce débit apparaît, en moyenne, 13 jours après que le débit à Bakel ait été égal à 300 m³/s.

M. JUFON a alors calculé, pour trois valeurs du coefficient de tarissement, les débits garantis. Nous les donnons ci-après, pour les trois derniers étiages, pour la valeur moyenne et la valeur pessimiste de ce coefficient ($k = 0,0165$ et $k = 0,018$).

| Débits (m ³ /s) | | t (jours) | Dates | | |
|-------------------------------|-----------|--------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| k = 0,0165 | k = 0,018 | | Etiage 1970 - 1971 | Etiage 1971 - 1972 | Etiage 1972 - 1973 |
| 150 | 150 | 0 | 24 novembre | 22 novembre | 19 novembre |
| 91 | 88 | 30 | 24 décembre | 22 décembre | 19 décembre |
| 58 | 51 | 60 | 23 janvier | 21 janvier | 18 janvier |
| 35 | 30 | 90 | 22 février | 20 février | 17 février |
| 22 | 17 | 120 | 24 mars | 22 mars | 19 mars |
| 13 | 10 | 150 | 23 avril | 21 avril | 18 avril |
| 8 | 6 | 180 | 23 mai | 21 mai | 18 mai |
| 5 | 3,5 | 210 | 22 juin | 20 juin | 17 juin |

Compte tenu du décalage de 13 jours, les débits de 300 m³/s apparaissent à Bakel les 11 novembre 1970, 9 novembre 1971 et 6 novembre 1972 ; quant aux crues, elles apparaissent respectivement les 30 juin 1971, 22 juin 1972 et 10 juin 1973.

En se basant sur ces temps, on trouve alors que nous avons, à Bakel, les durées suivantes :

- du 11 novembre 1970 au 30 juin 1971 : 232 jours ;
- du 9 novembre 1971 au 22 juin 1972 : 224 jours ;
- du 6 novembre 1972 au 10 juin 1973 : 215 jours

tandis que du 10 décembre 1962 au 30 juin 1963 la durée est de 201 jours.

Cette analyse à Diouldé - Diabé montre finalement qu'il est difficile de corroborer les résultats à partir de l'analyse statistique quand on se trouve devant des années exceptionnelles. En effet, il faut alors se retourner vers le laps de temps séparant l'apparition du débit de 45 m³/s et l'arrivée de la crue à Bakel, les durées correspondantes paraissant plus significatives.

6.4 CONCLUSIONS

L'examen que nous venons de faire conduit aux conclusions suivantes :

- Pour des étiages normaux allant jusqu'à l'étiage dont la fréquence au non dépassement est de 19 années sur 20, la méthode Orstom s'applique dans de bonnes conditions et il ne semble pas essentiel de tenir compte de l'évaporation car elle est implicitement comprise dans l'évaluation ;
- Pour des étiages exceptionnels comme ceux des deux dernières années, la méthode ne s'applique plus correctement et ce d'autant plus que la loi de tarage de Bakel est erronée aux faibles débits. En conséquence, une correction doit être faite sur l'abscisse maximale que peut atteindre l'intrusion saline. Le Projet a proposé de prendre la relation :

$$\frac{\Delta V}{3}$$

ΔV représentant le volume évaporé entre la durée de l'étiage 1963 (107 jours) et la durée des étiages concernés (139 et 150 jours respectivement en 1972 et 1973).

Cette correction conduirait à majorer les abscisses maximales de 10 et 13 km respectivement, c'est-à-dire que les écarts ne seraient plus que de 16 et 37 km en 1972 et 1973. Pour cette dernière année, reste encore inexpliqué le décalage dans le temps de près de 60 jours dans l'intrusion saline.

Chapitre III

EVALUATION DE L'EVOLUTION A CRAINDRE
DANS LA REMONTEE SALINE1. PRESENTATION DU CHAPITRE

Dans ce chapitre nous commencerons par exposer les résultats acquis à l'aide du modèle mathématique du coin salé.

Ensuite, nous essaierons de justifier les corrections à apporter à la figure 2 pour tenir compte des étiages durant plus de 110 jours environ et verrons comment tenir compte des pompages dans le Sénégal pour définir l'abscisse approximative maximale de l'intrusion saline.

Enfin, dans un dernier paragraphe, nous préciserons les mesures qu'il faudrait faire pour parfaire la connaissance de l'intrusion saline dans le Sénégal.

2. LE MODELE MATHEMATIQUE DU COIN SALE

2.1. METHODE DE CALCUL

La méthode a été exposée par SCHILF et SCHONFELD au congrès de l'AIRH en 1953. Elle généralise les équations classiques de Saint-Venant au cas d'un écoulement comportant deux fluides distincts superposés. On obtient ainsi un système de quatre équations différentielles décrivant pour chaque fluide la conservation de la masse et l'équation de la dynamique :

$$\begin{aligned} \partial (y-z)/\partial t &= \partial [v (y-z)] / \partial x \\ \partial z/\partial t &= \partial [w (z-r)] / \partial x \\ \partial v/\partial t &= v \partial v/\partial x + g \partial y/\partial x - F1 \\ \partial w/\partial t &= w \partial w/\partial x + g \varepsilon \partial z/\partial x + g (1-\varepsilon) \partial y/\partial x - F2 \end{aligned}$$

Dans lesquelles

- y niveau de la surface libre
- z niveau de l'interface eau douce - eau salée
- v vitesse d'écoulement de l'eau douce
- w vitesse d'écoulement de l'eau salée
- r cote du fond du lit
- g accélération de la pesanteur
- $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$
- ρ_2 densité de l'eau salée
- ρ_1 densité de l'eau douce
- F1 et F2 termes de frottement

Les termes de frottements proviennent du contact avec le lit et les berges du fleuve, mais également du contact entre les eaux douce et salée à l'interface.

Dans le calcul elles sont explicitées :

$$\begin{aligned} F1 &= - k_i |v-w| (v-w)/(y-z) \\ F2 &= k_i |v-w| (v-w)/(z-r) - k_r |w| w/(z-r) \end{aligned}$$

- k_i coefficient de frottement à l'interface
- k_r coefficient de frottement sur le fond du lit (on néglige les berges)

La théorie et l'expérimentation ont montré que l'embouchure d'un fleuve, avec coin salé établi, constitue une section de contrôle. Des équations précédentes on déduit que la condition pour obtenir une section critique est :

$$\frac{v^2}{g \varepsilon (y-z)} + \frac{w^2}{g \varepsilon (z-r)} - 1 = 0$$

formule qui se simplifie encore si $w = 0$, c'est-à-dire si le coin salé est arrêté.

On reconnaît là des nombre de Froude mais dans lesquels la gravité est pondérée par le facteur $\varepsilon = (\rho_2 - \rho_1) / \rho_1$.

2.2. MODELE MATHEMATIQUE

Le modèle mathématique permet le calcul du système des 4 équations différentielles hyperboliques explicitées précédemment. Toutefois, comme le front du coin salé se déplace selon les conditions de marée et de débits et que sa longueur n'est pas a priori connue, il est nécessaire de prolonger le modèle assez en amont de sa zone d'extension maximale. Dans cette partie amont on n'utilise plus que deux des équations de base : les équations classiques de Saint-Venant.

Les calculs sont exécutés numériquement selon le schéma de Lax-Wendroff. Un traitement numérique particulier est nécessaire pour calculer les conditions d'écoulement aux deux extrémités du modèle et au voisinage du front du coin salé. Aux extrémités amont et aval on a recours à la théorie des caractéristiques. Le front du coin salé se déplace de manière continue et se situe généralement en dehors des points définis par la trame à pas constants adoptée pour le calcul. On est alors amené à procéder par interpolation.

Remarque :

La méthode de calcul précédente repose sur une hypothèse fondamentale, à savoir l'absence de tout mélange des deux fluides à travers l'interface. En pratique, il y a toujours un certain mélange et les mesures faites sur le Sénégal montrent bien une décroissance de la teneur en sel dans le coin salé quand on s'éloigne de l'embouchure. Nous reviendrons sur ce point un peu plus loin.

Une seconde difficulté provient d'une incertitude sur la valeur du coefficient de frottement à l'interface. Il n'existe que quelques mesures de laboratoire, précieuses certes, mais encore peu confirmées par une longue expérience pratique. Ceci contraint encore à un étalonnage préalable du modèle mathématique, plus complexe que pour une étude de crue, puisqu'il faut régler par tâtonnement deux coefficients au lieu d'un.

2.3 APPLICATION AU CAS DU SENEGAL

Compte tenu des remarques précédentes nous avons d'abord cherché à "régler le modèle" c'est-à-dire essentiellement à trouver des valeurs des coefficients de frottements sur le radier et sur l'interface telles que l'on retrouve une intrusion du coin salé proche des observations faites par l'ORSTOM.

Malheureusement, si abondantes soient les observations, leur interprétation s'avère particulièrement complexe pour de nombreuses raisons :

- tout d'abord parce que les salinités indiquées sont des valeurs moyennes dans chaque section du fleuve alors qu'il serait indispensable d'avoir des profils en fonction de la profondeur permettant de déterminer la cote de l'interface eau douce-eau salée sur toute la longueur du coin ;
- parce que la pénétration du sel est établie au-delà d'une certaine distance en fonction du temps et non en fonction des conditions hydrauliques prépondérantes qui la gouverne : le débit du fleuve et la marée.

Nous avons néanmoins dégagé de cette étude les ordres de grandeur suivants, en adoptant la tolérance de 15 km proposée par L'ORSTOM :

| Débit du Sénégal (m ³ /s) | Longueur du coin salé (km) |
|---|-------------------------------|
| 160 | 75 à 90 |
| 120 | 90 à 105 |
| 100 | 100 à 135 |
| 50 | 115 à 150 |

L'intrusion saline est fonction de la densité qui dépend à la fois de la teneur en sel et de la température de l'eau.

Le tableau ci-dessous indique ces variations :

| Grammes de ClNa par litre | Température de la solution | | |
|------------------------------|----------------------------|---------|---------|
| | 0° | 10° | 25° |
| 0 | 0,99967 | 0,99973 | 0,99967 |
| 10 | 1,00747 | 1,00707 | 1,00409 |
| 20 | 1,01509 | 1,01442 | 1,01112 |
| 40 | 1,03038 | 1,02920 | 1,02530 |

Les premiers calculs effectués ont révélé que les paramètres densité et frottement avaient une influence notable sur l'étendue du coin salé, mais que cette influence variait également avec le débit du Sénégal. A titre indicatif nous donnons dans le tableau ci-après les longueurs du coin salé obtenues avec $\epsilon = 0,020$ et différentes valeurs du coefficient de frottement.

| Coefficient de frottement | Débit du Sénégal | | |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| | 160 m ³ /s | 120 m ³ /s | 80 m ³ /s |
| 0,001 | 120,8 | 127,2 | 172,8 |
| 0,00125 | 117,6 | 125,6 | 163,8 |
| 0,0015 | (48 ?) | 123,2 | 160,6 |
| 0,00175 | | 121,6 | 161,6 |
| 0,002 | | 119,2 | 158,4 |

On remarque sur ce tableau, pour un débit de 160 m³/s, la très forte régression du coin salé quand le frottement à l'interface s'accroît. On constate également que les ordres de grandeur s'accordent très mal avec les observations de L'ORSTOM et, qu'en particulier, les résultats aux faibles débits indiquent la nécessité d'une augmentation du coefficient de frottement, ce qui est en contraction avec l'ajustement pour le débit de 160 m³/s.

Après de nombreux essais, nous avons abouti aux conclusions suivantes :

- Le profil en long du lit du Sénégal est particulièrement mouvementé. Les hauts-fonds jouent pour certaines conditions le rôle de barrage dans la propagation du coin salé. Mais dès que l'un d'entre eux est atteint par le niveau de l'interface, l'extension vers l'amont se développe très rapidement. Dès lors la schématisation du lit à partir des seules données en notre possession, à savoir un profil en travers tous les 16 km environ était probablement très insuffisante pour bien représenter les phénomènes ;
- La méthode consistant à prendre une densité constante de l'eau salée n'est pas suffisante. La réalité montre bien que, par suite de diffusion, la teneur en sel décroît beaucoup, même à proximité du fond, le long des quelques 200 km de développement de la langue salée. La prise en compte rigoureuse des échanges à travers l'interface étant un problème extrêmement difficile et très mal connu, nous avons adopté une solution empirique. Celle-ci consiste à admettre une variation linéaire de la densité de l'eau salée en fonction de la distance à l'embouchure.

Après réception de documents complémentaires concernant le profil en long de la rivière, et compte tenu des relevés de salinité effectués postérieurement à ceux de L'ORSTOM, nous avons, après une nouvelle série de calculs, arrêté les ordres de grandeur de l'intrusion saline définis dans le tableau suivant :

| Coefficient de frottement | Débit du Sénégal | | | | |
|---------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
| | 160 m ³ /s | 140 m ³ /s | 120 m ³ /s | 80 m ³ /s | 60 m ³ /s |
| 0,0012 | 84,8 | 95,2 | 122,4 | 173,6 | 190,4 |
| 0,0014 | 48,4 | 68,8 | 96,0 | 166,4 | 186,4 |
| 0,0015 | 43,0 | 84,8 | 94,4 | 162,4 | 184,0 |
| 0,0016 | 42,2 | 77,8 | 92,2 | | |

Ces différents calculs ont été réalisés avec l'hypothèse d'une densité de l'eau salée variant en fonction de la distance x à l'embouchure (x exprimée en km) :

$$\rho_2(x) = 1,021 - \frac{1,003}{430} x$$

Nous avons rencontré de sérieuses difficultés pour calculer l'évolution du coin salé sous l'action de la marée. Compte tenu en effet des très faibles vitesses d'écoulement de l'eau douce, l'interface remonte rapidement jusqu'à la surface libre pendant la marée montante. Cela signifie que l'embouchure cesse alors d'être une section de contrôle et que tout le lit du fleuve est progressivement rempli d'eau salée. L'eau douce forme alors elle-même un "coin léger", situation strictement inverse de l'extrémité amont du coin salé. Les programmes de traitement sur ordinateur dont nous disposons ne sont pas adaptés pour résoudre ce cas et les transformations nécessaires étaient difficilement réalisables dans le cadre financier et surtout dans les délais d'études impartis.

Quoiqu'il en soit, les calculs effectués montrent que l'influence de la marée joue beaucoup sur l'interface sur les 10 à 20 premiers kilomètres à proximité de l'embouchure.

A titre indicatif, nous donnons dans le tableau ci-dessous les variations constatées des cotes de l'interface sur un coin salé assez court, donc, en principe, plus sensible à la marée. Les valeurs correspondent à un débit fluvial de 160 m³/s.

| Temps (h) | pK 0 | pK 16 | pK 32 | pK 41,6 | pK 44,8 | pK 48 |
|-----------|--------|--------|--------|---------|---------|-------|
| 0 | - 1,56 | - 5,49 | - 6,20 | - 6,57 | - 6,68 | |
| 1 | - 1,54 | - 5,49 | - 6,20 | - 6,56 | - 6,56 | |
| 2 | - 2,43 | - 5,50 | - 6,21 | - 6,55 | - 6,55 | |
| 3 | - 3,06 | - 5,50 | - 6,23 | - 6,56 | - 6,56 | |
| 4 | - 2,90 | - 5,49 | - 6,25 | - 6,58 | - 6,58 | |
| 5 | - 2,01 | - 5,49 | - 6,27 | - 6,60 | - 6,60 | |
| 6 | - 0,75 | - 5,48 | - 6,28 | - 6,60 | - 6,60 | |

2.4 CONCLUSIONS SUR L'UTILISATION DU MODELE MATHEMATIQUE

Le modèle mathématique du coin salé que nous avons réalisé n'a pu donner tous les enseignements désirés. En effet, nous espérons pouvoir, par son intermédiaire, définir les limites d'intrusion du sel en fonction du débit plus qu'en fonction du temps. Cet élément est important car il aurait permis de définir les intrusions maximales des eaux salées en relation directe avec les débits résiduels en amont de la pénétration saline.

Cela n'a pas été possible car il aurait fallu, au cours des calculs :

- imposer une loi de variation de la densité des eaux salines en fonction de l'abscisse réelle de l'intrusion saline à chaque instant ;
- modifier le coefficient de frottement à l'interface en fonction du débit amont ;
- tenir compte dans le détail de l'hydrographie du fleuve dans le bief maritime ;
- pouvoir en cours de calcul changer l'abscisse de la section critique où l'eau saline a une densité égale à celle de la mer.

Tous ces éléments font que le modèle n'a pas donné des résultats directement applicables. Il ne faut cependant pas dénier toute valeur à ce modèle mathématique qui pourrait donner des indications constructives dans le cas de fleuves soumis à l'intrusion d'un coin salé plus court et bien caractéristique. Or, ce n'est pas le cas du Sénégal qui allie des remontées exceptionnelles des eaux salines avec des débits fluviaux très faibles et des durées d'étiage très longues.

Que reste-t-il alors de l'utilisation du modèle ? Pour commencer, les ordres de grandeur des remontées salines dans le Sénégal pour des débits supérieurs à 50 m³/s à Dagana sont corrects. Ensuite, on constate que le phénomène du coin salé du Sénégal est très complexe et que les définitions de l'ORSTOM, basées sur des salinités moyennes ne permettent pas une interprétation correcte du phénomène.

Enfin, nous dirons que le modèle mathématique du coin salé du Sénégal a montré que le suivi de son évolution pendant la décrue et l'étiage demandait, d'une part, des observations fines du phénomène et, d'autre part, la connaissance précise de la topographie du bief maritime concerné par son intrusion.

3. RESULTATS PRATIQUES

3.1 1972 et 1973 constituent des années exceptionnelles en ce qui concerne la durée des étiages et les intrusions salines.

Cependant l'ORSTOM n'ayant pu baser ses études que sur des étiages de l'ordre de 110 jours environ, nous pensons que les extrapolations doivent être corrigées (par étiage nous entendons la durée séparant l'apparition du débit de 45 m³/s et l'arrivée de la crue à Bakel).

3.2 Sur le graphique 3 nous avons porté les courbes ORSTOM "relation temps - salinité moyenne de base" pour les débits inférieurs à 50 m³/s à Dagana et les points observés en 1972 et en 1973. On constate nettement combien la divergence est grande en 1973.

En pointillés, nous avons tracé la courbe de salinité nulle probable compte tenu des dernières observations. Nous pensons que c'est celle qui doit à présent être retenue, toute abstraction faite du détarage de la station de Bakel que nous avons évoqué dans le chapitre précédent. Cette courbe ne présente plus de points d'inflexion comme la précédente. Elle tend donc à donner des intrusions salines supérieures à celles définies par l'ORSTOM pour des durées de tarissement plus grandes que 100 jours environ.

Il est bien évident que cette courbe de salinité nulle tend vers une limite qui est celle pour laquelle les seuils situés en amont du confluent du Doué sont pratiquement hors d'eau en étiage. Cette limite théorique est au-delà de Sérépoli, vers le PK 380 par rapport à l'embouchure.

3.3 Les besoins en eau, entre Bakel et Dagana ont été définis par le Projet.

Dans le tableau ci-dessous nous avons rappelé :

- à Bakel et Diouldé-Diabié
les valeurs des débits d'étiage médian et décennal ;
- les valeurs des débits nécessaires
(ces valeurs sont tirées des rapports du Projet) ;

| Dates | Débits à Bakel | | Débits à Diouldé-Diabé | | Bessins (m ³ /s) | | |
|-------------|----------------|-----------------|------------------------|-----------------|-----------------------------|--------------|-------|
| | année médiane | année décennale | année médiane | année décennale | en amont de Richard-Toll | Richard-Toll | Total |
| 1er février | 115 | 74 | 82 | 50 | 10,43 | | 10,43 |
| 15 février | 87 | 58 | 58 | 40 | 10,43 | | 10,43 |
| 1er mars | 67 | 43 | 46 | 32 | 6,01 | 10 | 16,01 |
| 15 mars | 50 | 30 | 36 | 26 | 6,01 | 10 | 16,01 |
| 1er avril | 32 | 18 | 23 | 20 | 2,88 | 10 | 12,88 |
| 15 avril | 22 | 9 | 22 | 16 | 2,88 | 10 | 12,88 |
| 1er mai | 12 | 5 | 17 | 12 | 1,94 | | 1,94 |
| 15 mai | 6 | 3 | 13 | 9 | 1,94 | | 1,94 |
| 1er juin | 3,2 | 1,4 | 10 | 7,5 | 7,67 | | 7,67 |
| 15 juin | | 0,8 | 8 | 6 | 7,67 | | 7,67 |

On voit donc que :

- en année médiane, les débits sont à peine suffisants en juin pour satisfaire la demande totale (en réalité, dès le mois de juin, ainsi que nous le verrons plus loin, l'eau salée sera parvenue à Dagana, ce qui implique que le périmètre soit irrigué à partir d'une réserve constituée au préalable) ;
- le fait de prélever de l'eau va déplacer directement les dates d'apparition des débits clés à Bakel et Dagana ;
- les prélèvements vont accélérer le processus de progression des eaux salines ;
- la demande de 10 m³/s en mars et en avril à Richard-Toll risque d'être satisfaite, même en année médiane, par des eaux saumâtres.

3.4

On sent que, par rapport aux lois et courbes établies dans l'hypothèse de prélèvements nuls, deux corrections sont à faire :

- la première concerne la date origine des débits clés ;
- la seconde l'influence des volumes soutirés sur la pénétration.

3.4.1 Date origine

La correction est simple. On sait que l'ORSTOM a admis que le débit de 50 m³/s à Dagana correspond à un débit de 45 m³/s à Bakel.

Les prélèvements étant effectués de Matam à Dagana, le débit cité de 50 m³/s sera en réalité égal à la somme de ce débit et des débits prélevés. On admettra alors que la date origine à Bakel sera celle qui correspond au débit de 45 m³/s plus la somme des débits prélevés dans les différents casiers.

En année médiane, par exemple, le débit de 45 m³/s survient à Bakel le 20 mars d'après le calendrier des débits garantis (Rapport technique de fin de mission de M. Juton de juin 1972). En mars, le débit moyen prélevé est égal à 6,01 m³/s ou à 16,01 m³/s selon que Richard-Toll prélève ou non 10 m³/s. Les dates originelles seront alors celles qui correspondent à des débits de 51 ou 61 m³/s à Bakel.

La méthode est simple mais elle ne doit pas conduire à un déplacement de la date origine de plus de 3 à 4 jours.

3.4.2 Influence des volumes prélevés

Cette influence est très difficile à déterminer de manière formelle car, en définitive, on ne sait pas bien à quels critères se raccrocher.

En effet, nous avons pensé, initialement, définir une loi de variation à partir de la règle ORSTOM prenant l'année 1963 comme année médiane. Cependant, le cadre de cette étude ne comprenant pas l'étude statistique des tarissements du fleuve, nous nous sommes alors tournés vers le rapport de M. Juton cité plus haut qui donne les débits garantis à des dates fixes.

Ainsi, pour les années médiane et décennale les débits de 45 m³/s apparaissent à Bakel le 20 mars et le 27 février. Partant de ces dates originelles et calculant les volumes écoulés du 20 mars au 8 juin d'une part et du 27 février au 20 juin d'autre part, nous avons trouvé que les volumes écoulés étaient, dans les deux cas, de 123 millions de m³ (nous avons admis que les débits avaient une décroissance linéaire ce qui n'est pas entièrement exact). Ces volumes sont à rapprocher du volume de 120 millions de m³ donné par l'ORSTOM pour l'année 1963 dite année médiane. Les volumes étant alors identiques à Bakel, il n'était plus possible de relier les volumes prélevés à ces volumes qui, bien entendu, se répartissent de manières différentes dans le temps. De plus, en considérant les prélèvements de Richard-Toll, on parvenait à un volume total dérivé équivalent au volume transitant à Bakel.

Nous avons alors essayé d'analyser, toujours à l'aide du tableau des débits garantis, l'évolution des volumes à Diouldé-Diabé. Cette station, située sur le Sénégal, entre Saldé et Boghé, ne prend pas en compte les volumes qui transitent par le Doué. Ceci est net quand on compare les débits à Bakel, Kaedi et Diouldé-Diabé, les débits en cette dernière station, pendant la phase de décrue (débits supérieurs à 50 m³/s à Bakel), étant inférieurs.

Nous croyons cependant que la comparaison peut être significative car des prélèvements seront également effectués dans le Doué et, toutes proportions gardées, les valeurs relatives doivent être correctes.

Nous avons alors établi les bilans des volumes potentiels prélevés et résiduels pour l'année médiane et l'année d'étiage décennal.

Nous l'avons fait dans l'hypothèse d'un prélèvement ou non à Richard-Toll et les résultats principaux sont rassemblés dans les tableaux suivants (les volumes sont ceux calculés à partir des débits garantis à Diouldé-Diabé et sont donc relatifs à cette station).

La partie supérieure du tableau est relative à l'étiage médian et la partie inférieure à l'étiage décennal. De plus, les positions sont données à partir de l'embouchure.

| Dates | Nombre de jours | Volumes potentiels cumulés | Volumes après prélèvements sans Richard-Toll | Volumes après prélèvements avec Richard-Toll | Position théorique du coin sale | Position corrigée du coin salé |
|------------|-----------------|----------------------------|--|--|---------------------------------|--------------------------------|
| 31 mars | 17 | 33,25 | 27 | 16,65 | 140 | 142 |
| 30 avril | 47 | 92 | 78,40 | 42 | 156 | 161 |
| 31 mai | 78 | 127,50 | 109,50 | 73,70 | 179 | 187 |
| 18 juin | 96 | 141,50 | 111,50 | 75,20 | 193 | 204 |
| 28 février | 8 | 5,65 | 3,85 | 3,85 | 136 | 138 |
| 31 mars | 39 | 75 | 57,60 | 30,75 | 152 | 159 |
| 30 avril | 69 | 116,40 | 91,50 | 38,75 | 172 | 185 |
| 31 mai | 100 | 141,40 | 111,50 | 50,55 | 196 | 215 |
| 30 juin | 130 | 158 | 108 | 55,30 | 222 | 233 |

Notons que le nombre de jours a été corrigé pour tenir compte des prélèvements et que les volumes sont calculés à partir des dates d'origine sans correction.

Les positions théoriques du coin salé sont tirées du graphique 3 en prenant la courbe probable de salinité nulle.

Enfin, la position corrigée du coin salé a été calculée, dans l'hypothèse où Richard-Toll ne prélève pas d'eau, en multipliant la distance Δx séparant deux fins de mois successives (positions théoriques) par le rapport du volume potentiel s'il n'y avait pas de prélèvement au volume après prélèvement.

La méthode est évidemment simpliste mais nous n'avons pu, avec les données disponibles, parvenir à des corrélations plus satisfaisantes permettant de dégager une règle simple et logique.

La conclusion est donc que, pour les années médiane et décennale, les pénétrations salines seront majorées, par les prélèvements, de 10 à 15 km et de 30 à 35 km respectivement, ceci dans l'hypothèse où la station de Richard-Toll ne prend pas 10 m³/s en mars et avril.

S'il en est ainsi, la méthode appliquée ci-dessus ne doit plus être valable car les prélèvements globaux représentent plus de 50 % des apports potentiels. De plus, il semble bien que l'eau ainsi pompée sera salée et on ne voit pas bien l'utilité de le faire. En effet, la date origine sera encore reculée pour l'année médiane et le sel parviendra à Richard-Toll bien plus tôt. Aussi, si cela est possible, nous pensons que la station de Richard-Toll ne devrait pas prélever de l'eau. Autrement, le périmètre de Dagana sera pénalisé avec une fréquence telle que l'on peut se demander si son exploitation sera possible en double culture. Ceci est d'autant plus justifié que le recalibrage de la Taouey permettra un meilleur remplissage du lac de Caiers et que la réserve ainsi constituée sera suffisante pour l'alimentation en eau de Dakar et du Casier-sucrier de Richard-Toll.

3.5 CONCLUSIONS

En conclusion, les résultats pratiques de l'étude sont les suivants :

- en absence de prélèvements, le graphique 3 donne la courbe probable de salinité nulle en fonction du temps au-delà de l'apparition du débit clé de 45 m³/s à Bakel ;
- les prélèvements vont modifier les abscisses de l'intrusion saline et les dates d'apparition à des stations importantes comme Richard-Toll et Dagana ;
- d'après les valeurs des débits mensuels prélevés et en absence de prélèvements à Richard-Toll, les intrusions seront supérieures de 10 à 15 km et de 30 à 35 km pour les étiages médians et décennaux ;

- si Richard-Toll prélève des débits de 10 m³/s en mars et avril comme cela est envisagé, l'intrusion saline risque d'être majorée dans de grandes proportions, mais il ne nous est pas possible de définir ces valeurs. Aussi, nous conseillons que Richard-Toll ne prélève pas d'eau dans le Sénégal.

3.6 REMARQUE

Dans l'analyse précédente, nous n'avons pas tenu compte de l'évaporation car nous estimons, ainsi que nous l'avons dit dans le paragraphe 6 du chapitre II, que, pour des étiages médians ou allant jusqu'à une fréquence au non dépassement d'une année sur vingt, elle est implicitement comprise dans les estimations.

4. PROGRAMME DE MESURES COMPLEMENTAIRES

Une meilleure connaissance de l'intrusion saline dans le Sénégal pourrait être acquise à l'aide de mesures et relevés complémentaires.

Ils consisteraient en :

- la mesure de l'évolution de la salinité dans le temps. Ces mesures devraient faire ressortir nettement, comme en 1972, les concentrations à différentes profondeurs et au fond, ce dernier étant situé en altitude.

Il sera utile de relever des "images" quasi instantanées de la position du coin salé quand on se trouve dans une phase de stratification maximale. A ce titre, signalons que le relevé de l'interface eau douce-eau salée a été obtenu avec succès sur le Rhône au moyen des appareils de sondage par ultra-son. L'intérêt de cette méthode est de fournir simultanément et relativement vite le relevé des fonds et de l'interface ;

- la mesure des ondes de marées en même temps que le relevé de l'interface ;

- la mesure des débits fluviaux. Il sera en particulier nécessaire de procéder à des jaugeages pendant les étiages aux stations non influencées par la marée. De plus, la station de Bakel devra être étalonnée de nouveau pour les débits inférieurs à 150 - 200 m³/s ;
- le relevé de l'hydrographie du lit du fleuve dans le bief maritime.

5. CONCLUSION

Les études que nous avons réalisées n'ont pas permis finalement de déboucher sur des conclusions simples et facilement exploitables.

Nous avons dû nous résoudre, après plus de deux mois d'efforts sur le modèle mathématique, à abandonner son exploitation car nous nous sommes trouvés devant un estuaire à coin salé où la diffusion joue un grand rôle dans la pénétration des eaux salines.

Nous avons alors essayé par l'analyse des études antérieures sur le coin salé et sur les débits d'étiage, de parvenir à une définition des risques encourus en étiage médian et en étiage décennal. Les valeurs auxquelles nous sommes parvenues nous semblent raisonnables et doivent correspondre à ce qui se passera dans la réalité.

Il n'en demeure pas moins qu'une étude complète du problème du Sénégal ne pourra pas être menée sans que des campagnes lourdes et onéreuses n'aient pas été réalisées.

Si les barrages de Mantali et de Diama doivent être construits dans les 4 à 5 ans à venir, il est peut-être envisageable de se satisfaire de l'état actuel. Si les délais de réalisation doivent être plus grands, le problème du coin salé doit alors être examiné avec soin.