Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal

INTERPRETATION DES FLUCTUATIONS DES NAPPES DU HAUT DELTA DU FLEUVE SENEGAL

(Sénégal-Mauritanie)

RAPPORT PRESENTE PAR LE BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

DAK 65 - A 24

Mission d'Aménagement du Fleuve Sénégal

INTERPRETATION DES FLUCTUATIONS DES NAPPES DU HAUT DELTA DU FLEUVE SENEGAL

(Sénégal-Mauritanie)

par

J. LALEYE

RAPPORT PRESENTE PAR LE BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

DAK 65 - A 24

S O M M A I R E

Pages

- RESUME.....: I

- AVANT PROPOS.....: 1

I - RAPPEL DES PROBLEMES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES...: 3

II - RAPPEL DES DONNEES ACQUISES LORS DE LA PREMIERE PARTIE DE L'ETUDE.....: 4

II.1- Casier du Diovol.....: 4

II.1.1- Lithologie.....: 4

II.1.2- Allure de la nappe.....: 4

II.2- Casier de Rosso.....: 5

II.2.1- Lithologie.....: 5

II.2.2- Allure de la nappe.....: 5

II.3- Casier de Keur Madiké.....: 6

II.3.1- Lithologie.....: 6

II.3.2- Allure de la nappe.....: 6

III - EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET DES TENEURS EN CHLORURES PENDANT UN CYCLE ANNUEL.....: 7

III.1- Casier du Diovol.....: 8

III.1.1- Août 1964.....: 9

- Profil 1.....: 9

- Profil 2.....: 9

III.1.2- Septembre 1964.....: 9

III.1.3- Novembre 1964.....: 10

- Profil 1.....: 10

- Profil 2.....: 10

III.1.4- Janvier 1965.....: 11

- Profil 1.....: 11
- Profil 2.....: 12

III.1.5- Mai 1965.....: 12

- Profil 1.....: 13
- Profil 2.....: 13

III.1.6- Analyses chimiques et cartes des chlorures: 14

III.2- Casier de Rosso.....: 15

III.2.1- Août 1964.....: 15

- Profil 1 S-N.....: 15
- Coupe 2 S.SW-N.NE.....: 15

III.2.2- Novembre 1964.....: 16

III.2.3- Janvier 1965.....: 16

- Profil 1.....: 16
- Profil 2.....: 16

III.2.4- Mai 1965.....: 17

- Profil 1.....: 17
- Profil 2.....: 17

III.2.5- Analyses chimiques et cartes des chlorures: 18

III.3- Casier de Keur Madiké.....: 18

III.3.1- Août 1964.....: 18

- Profil 1.....: 19
- Profil 2.....: 19

III.3.2- Novembre 1964.....: 19

- Profil 1.....: 19
- Profil 2.....: 20

III.3.3- Janvier 1965.....: 20

- Profil 1.....: 20
- Profil 2.....: 20

III.3.4- Mai 1965.....: 21

- Profil 1.....: 21
- Profil 2.....: 21

III.3.5- Analyses chimiques et carte des chlorures.....: 21

- Janvier 1965.....: 22
- Mai 1965.....: 22

IV - DEFINITION DES FACTEURS DU REGIME.....: 23

IV.1- Généralités.....: 23

IV.2- Contexte hydrogéologique et définition des facteurs du régime.....: 25

IV.2.1- Les processus de recharge et de décharge: 25

IV.2.2- L'absence de modification de la teneur en sels des eaux.....: 26

IV.3- Modifications pouvant être provoquées par la mise en valeur.....: 28

IV.3.1- Pour le riz.....: 28

IV.3.2- Pour la canne à sucre.....: 28

IV.3.3- Par un barrage à l'aval de Rosso.....: 29

IV.4- Caractéristiques des casiers.....: 30

IV.4.1- Casier du Diovol.....: 30

IV.4.1.1- Contexte hydrogéologique.....: 30

IV.4.1.2- Alimentation de la nappe du casier.....: 30

IV.4.1.3- Répercussion du régime hydraulique sur l'aménagement agricole.....: 32

IV.4.2- Casier de Rosso.....: 35

IV.4.2.1- Généralités.....: 35

IV.4.2.2- Alimentation de la nappe du casier.....: 35

IV.4.2.3- Répercussion du régime hydraulique sur l'aménagement agricole.....: 36

IV.4.3- Casier de Keur Madiké.....: 38

IV.4.3.1- Généralités.....: 38

IV.4.3.2- Alimentation du casier.....: 38

IV.4.3.3- Répercussion du régime hydraulique sur l'aménagement agricole.....: 39

V - GEOCHIMIE DES NAPPES.....: 40

V.1- Géochimie de la nappe du casier du Diovol.....: 40

V.1.1- Résidu sec.....: 40

V.1.2- Eléments caractéristiques.....: 43

V.1.3- Conclusion.....: 55

V.2- Géochimie des nappes des casiers de Rosso et Keur Madiké.....: 56

V.2.1- Casier de Rosso.....: 56

V.2.2- Casier de Keur Madiké.....: 58

VI - CONCLUSIONS.....: 60

VI.1- Résultats acquis.....: 60

VI.2- Inconnues subsistant.....: 63

- LISTE DES DOCUMENTS ANNEXES.....: 65

RESUME

Dans le cadre de la mise en valeur agricole du haut-delta du fleuve Sénégal, une convention (36 M.A.S. 172 FAC) a été passée entre la Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal et le B.R.G.M. Elle a pour objet l'étude de la nappe phréatique du haut-delta.

La zone d'étude comprend :

- le casier du Diovol au Sénégal
- les casiers de Rosso et de Keur Madiké en R.I.M.

OBJET DE L'ETUDE

Le haut-delta du fleuve Sénégal doit être aménagé pour l'extension de cultures irriguées rationnelles. Déjà une partie - le casier du Diovol - est endiguée et l'inondation en est contrôlée.

Or l'on sait que la nappe phréatique de cette région est le plus souvent salée. Ce facteur est particulièrement inquiétant pour un tel aménagement car le risque de remontée d'une telle nappe jusqu'à la zone intéressée par les racines est grand et peut compromettre les cultures.

Il importait donc d'étudier cette nappe, sa salure, son contexte géologique et ses fluctuations, en fonction des crues. De cette connaissance, on devait déjà pouvoir dégager certaines conclusions quant aux modifications qu'entraînerait l'irrigation (apports à la nappe plus importants, évaporation diminuée etc...).

TRAVAUX ANTERIEURS

En 1964, un dispositif d'observation, comportant 49 piézomètres, 3 échelles limnimétriques et 49 sondages de reconnaissance, a été mis en place. Un rapport a fait le point des travaux effectués et des premières observations de la nappe en fin d'étiage (1).

TRAVAUX EN COURS

Un agent de la Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal a effectué de juillet 1964 à mai 1965, des observations périodiques mensuelles des niveaux dans ces 49 piézomètres. En outre des prélèvements d'eau furent faits pour les analyses chimiques afin d'étudier les variations de teneur en sel. Avec les mesures faites en mai 1964, on dispose donc d'une année complète d'observation.

Dans le présent rapport nous exploitons et interprétons les fluctuations de niveau et les variations de salure. Replaçant ces données dans le contexte, nous dégageons l'influence des inondations des crues du fleuve et de l'évaporation.

CASIER DU DIOVOL

La nappe est contenue dans un niveau de sables argileux qui, localement, a été entaillé par des marigots. Ceux-ci ont comblé leurs chenaux d'érosion par des sédiments très fins. La nappe à l'étiage est largement déprimée sous la cote zéro par l'évaporation. Le casier est endigué et la crue contrôlée. La hauteur d'eau fut assez faible sur le sol. Ceci permit de recon-

---

(1) Etude hydrogéologique de la nappe phréatique du haut-delta J. LALEYE. Rapport B.R.G.M. Dakar, DAK 64-A 8. Arch. M.A.S., Saint-Louis.

naître l'effet de transmission d'onde provoqué par la crue et la décrue du fleuve Sénégal, effet qui se propage sans transfert de volume d'eau important.
Les eaux de la nappe sont de type marins, diluées en bordure du fleuve concentrées à l'intérieur du casier. Elles ne subissent pas d'évolution à l'échelle de nos observations.

Un équilibre se fait entre la nappe, la zone de saturation qui la surmonte (sur 1 ou 1,5 m) et la frange capillaire qui est imbibée par les apports verticaux. Ceux-ci sont repris par l'évaporation. Si l'on modifie l'équilibre : reconstitution de la frange capillaire/évapo-transpiration, on risque de provoquer un changement d'état de la zone de saturation salée, ce qui entraînerait une remontée de la nappe salée et diminuerait d'autant l'épaisseur de la frange utilisable par les cultures. Un double réseau de drainage paraît s'imposer avant l'aménagement. La carte des isobathes peut être utilisée pour projeter ce réseau.

CASIER DE ROSSO

Dans la partie sud du casier, même contexte et mêmes phénomènes que pour le Diovol mais ici les apports verticaux sont beaucoup plus importants (crue non contrôlée) et masquent l'effet d'onde de la crue du fleuve. Seule la décharge de la nappe pendant la décrue est identifiable.

Une zone centrale d'évaporation déprime largement la nappe et draine les apports du Sud et du Nord.

Si au Sud la nappe est salée, au Nord elle est douce. Les eaux de la nappe des dunes au Nord, s'écoulent vers la zone d'évaporation et lessivent les terrains. Cette partie paraît donc aménageable en utilisant "l'axe d'évaporation" comme exutoire du réseau de drainage.

La partie sud est difficilement drainable et la présence d'argile défloculée complique le problème.

CASIER DE KEUR MADIKE

Un horizon sableux s'étend assez largement sous "le banco". Les eaux de la nappe y sont peu salées dans leur ensemble (0,090 g/l à km 5, 1,32 g/l à km 11); la zone à 1 g/l couvre la plus grande partie du casier. Seules les bordures du fleuve (20,48 g/l à km 12, 28,25 g/l à km 7) et du marigot de Garak (7,36 g/l à km 1,5, 5,25 g/l à km 4) présentent des teneurs en chlorures plus élevées.

Une alimentation importante se fait à partir du marigot de Keur Madiké (remontée de 50 à 60 cm). Il y a drainage saisonnier à la fois vers le fleuve et vers le marigot de Garak, ce qui explique les augmentations de salure en ces endroits.

La présence d'une nappe d'eau douce entre 3 et 4 m de profondeur et drainée naturellement, est favorable à la mise en valeur de ce casier, mais cela n'empêche pas la nécessité du drainage. Un complément d'irrigation par pompage à la nappe améliorerait son drainage.

CONCLUSIONS

Les éléments apportés par les deux parties de cette étude sont donc particulièrement importants.

Tout d'abord fut précisé le contexte géologique et hydrogéologique : existence dans le casier du Diovol et une partie de celui de Rosso d'une nappe d'eau salée (voire plus salée que la mer) dans les terrains très peu perméables donc très difficilement drainables. Par contre nappe d'eau peu salée à Keur Madiké et au Nord de Rosso là où un drainage naturel s'est produit.

Dans le Diovol les apports verticaux faibles permirent de préciser le phénomène de transmission latérale de pression. Le fait que la nappe salée soit entre 2 et 3 m de profondeur ne suffit pas à éliminer le danger, car celle-ci est surmontée, sur plus de 1 m sans doute, d'une zone de saturation. Il convient de connaître par des profils hydriques fréquents l'équilibre entre cette zone et les apports verticaux ensuite repris par l'évaporation. La poursuite des observations est nécessaire et la détermination des caractéristiques des terrains doit être faite par des essais de pompages.

Dans les casiers de Rosso et Keur Madiké, les apports verticaux regonflent la nappe mais ne modifient pas non plus sa composition chimique.

Si l'on ne modifie pas les conditions naturelles actuelles et les inondations, on observera vraisemblablement un statu quo dans les fluctuations de la surface piézométrique.

Si par contre l'irrigation devait être permanente, elle entraînerait très certainement, par modification de l'équilibre frange capillaire - évapo-transpiration, un changement d'état de la zone de saturation salée. Un double réseau de drainage est alors nécessaire.

La partie nord du casier de Rosso et le casier de Keur Madiké sont plus favorisés; la nappe est relativement peu chargée et les niveaux de sable, continus.

Il faut proscrire tout aménagement qui provoquerait une élévation permanente du niveau du fleuve et entraînerait très certainement une remontée généralisée de la nappe salée.

AVANT PROPOS

Ce rapport exploite les mesures et analyses chimiques effectuées de juillet 1964 à mai 1965 dans le haut delta du fleuve Sénégal (voir plan de situation) afin de connaître les fluctuations naturelles de la nappe et, par là, de prévoir les modifications qu'entraîneraient les aménagements. Il fait suite au rapport présenté à la fin des travaux sur le terrain (1).

Cette étude effectuée dans le cadre de la convention 36 MAS 172 FAC, passée entre la Mission d'Aménagement du fleuve Sénégal et le B.R.G.M., a pour but d'acquérir une connaissance assez complète de la nappe phréatique salée du haut-delta, en vue de la mise en valeur agricole de cette région.

La zone intéressée par cette étude et définie par la MAS comprend :

- <u>en République du Sénégal</u>
  - le casier du Diovol, situé au Sud du fleuve qui représente l'extension ouest du casier rizicole de Richard-Toll,
- <u>en République Islamique de Mauritanie</u>
  - le casier de Rosso couvrant les alentours de Rosso et limité au Nord par la route de Keur-Macène,
  - le casier de Keur Madiké situé au Sud de la grande boucle de Tambass.

---

(1) Notre Rapport DAK 64 A-18.

La première phase de l'étude, opération "A" de la convention, a été la mise en place du dispositif d'observation : 49 piézomètres, 49 sondages de reconnaissance, 3 échelles limnimétriques. Piézomètres et échelles ont été rattachés au réseau de nivellement I.G.N.

Les mesures et analyses d'eau effectuées en fin de mission nous avaient permis de donner des premiers résultats (notre rapport DAK 64 A-18, novembre 1964).

La seonde phase de l'étude, opération "B" du marché, a consisté en une campagne de mesures de niveau et de prélèvements d'eau, effectuée par un agent de la M.A.S, de juillet à mai 1965, selon le calendrier suivant :

- août 1964 : tournée de mesures
- septembre 1964 : tournée de mesures et prélèvements
  analyse complète des eaux prélevées
- octobre 1964) : tournée de mesures et prélèvements
- novembre 1964) analyse de chlorures
- décembre 1964 : tournée de mesures et prélèvements
  analyse complète des eaux
- janvier 1965) : tournée de mesures et prélèvements
- février 1965) analyse de chlorures
- mars 1965)
- avril 1965 : tournée de mesures et prélèvements
  analyse complète des eaux
- mai 1965 : tournée de mesures et prélèvements
  analyse de chlorures

I - RAPPEL DES PROBLEMES GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

Le delta du fleuve Sénégal a été occupé au Dunkerquien par une transgression marine de cote + 1,5. Des dépôts fluvio-deltaïques (sables, sables argileux) couvrirent la région qui était, semble-t-il, séparée de la mer par un cordon littoral.

Ces dépôts lagunaires furent, après la régression de la mer, couverts de sédiments fluviatiles de décantation. Des chenaux furent tour à tour entaillés dans les sables et comblés de sédiments fins. Ces divers remaniements, compliqués de phénomènes éoliens, provoquent, en certains endroits, des imbrications complexes des divers dépôts.

Il n'y a jamais eu de drainage avec apports d'eau suffisants pour lessiver ces terrains lagunaires et les eaux qui les imprègnent ont gardé ce caractère d'eaux lagunaires salées, voire sursalées. La présence d'eaux aussi salées à faible profondeur constitue un problème pour la mise en valeur du delta.

Aussi importait-il de connaître :

1/- la nature et la répartition des terrains ainsi que la forme des surfaces des nappes qui les imprègnent,

2/- les fluctuations naturelles de ces nappes en fonction des crues du fleuve, des submersions et de l'évaporation.

La première tranche de travaux (opération A) répondit au premier point. La seconde partie (opération B) devait permettre de connaître les réactions de la nappe en fonction des différentes actions auxquelles elle est soumise.

De cette évaluation, des précisions devaient être tirées concernant les modifications qu'entraîneraient les irrigations projetées.

Avant de passer à la description des mouvements observés, nous rappellerons les données acquises lors de la première partie de notre étude.

II - RAPPEL DES DONNEES ACQUISES LORS DE LA PREMIERE PARTIE DE L'ETUDE

II.1 - CASIER DU DIOVOL (Pl. I)

II.1.1 - Lithologie

Nous ne mentionnerons pas les niveaux fins de couverture mais seulement les horizons intéressant la nappe.

L'étude des échantillons montre que des dépôts de sables fins, légèrement argileux, se rencontrent d'une manière continue dans toute la partie nord du casier.

La zone comprise entre le Diovol et le Natchié, et surtout la confluence avec le Karsak et Gorom, est plus argileuse. Ces marigots ont entaillé les niveaux sableux, entailles qui ont été comblées ensuite par des dépôts de décantation plus fins ou un mélange de sable et d'argile. Cette zone est donc plus complexe, des dépôts très fins morcelant très fréquemment les sables. Au Sud de cette zone plus argileuse, le D 10 et le D 2 montrent que les sables réapparaissent.

II.1.2 - Allure de la nappe à l'étiage (juin-juillet 1964) (Pl.IIa)

Dans son ensemble la nappe est un bassin fermé, coupé en deux par une ligne de partage des eaux passant par N'Tiagar, D 6, D 8.

- Dans sa partie nord, le bassin fermé est en relation avec le fleuve qui l'alimente. Un petit axe de drainage par évaporation marque une zone déprimée ayant son centre en D 6 bis.

- Au Sud de la ligne de partage des eaux s'étend un autre bassin fermé avec un axe de drainage par évaporation selon la ligne des piézomètres D 4 - D 10 - D 12.

La salure augmente assez régulièrement du Nord au Sud passant de un peu plus de 15 g/l à 50 g/l. Notons que les courbes s'incurvent nettement à l'Est, selon une disposition sensiblement parallèle au fleuve et répétant ainsi le méandre de N'Thiagar.

II.2 - CASIER DE ROSSO (Pl. I)

II.2.1 - Lithologie

Le casier de Rosso est constitué de deux parties nettement distinctes.

- Partie sud entre le fleuve et la ligne de piézomètre R 15, R 10, R 6, zone essentiellement argileuse et argilo-sableuse.

- Partie nord, zone essentiellement sableuse en liaison avec les dunes qui bordent le casier au Nord.

II.2.2 - Allure de la nappe (Pl. IIa)

La limite des deux zones correspond à l'axe de drainage par évaporation (cote - 1). Du Sud viennent les eaux s'infiltrant le long des berges du fleuve. Ces eaux se chargent en sels sur l'axe d'évaporation, leurs teneurs en Cl Na allant de 15 à 30 g/l.

Du Nord viennent les eaux des dunes, eaux qui d'abord très douces (0,5 à 1 g de Cl Na) se chargent en se rapprochant de l'axe d'évaporation.

Signalons, dans le méandre, le piézomètre R 8 qui montre un drainage local par évaporation. A hauteur de Rosso et selon le méridien, se manifeste une ligne de partage des eaux qui sépare les nappes phréatiques des casiers de Rosso et de Keur Madiké.

II.3 - CASIER DE KEUR MADIKE (Pl. I)

II.3.1 - Lithologie

Un horizon de sables blancs s'étend très largement sous le casier de Keur Madiké. Cependant, le marigot de Tambass dans la partie aval, a érodé ces sables et déposé des limons fins, donnant ainsi naissance à des formations plus argileuses, avec notamment des niveaux d'argile défloculée. De même dans le Nord Est du casier (piézomètres km 8, km 13), dans la partie haute du Tambass nous notons également un fort enrichissement en argile.

II.3.2 - Allure de la nappe (Pl. IIa)

La morphologie de la surface de la nappe montre une alimentation latérale par le fleuve et, au droit du marigot de Keur Madiké, un bombement qui est soit un axe d'alimentation, soit une intumescence résiduelle d'une crue précédente. De cette intumescence d'eau douce, l'eau semble s'écouler vers le Nord et vers le Sud en direction de deux axes de drainage par évaporation, qui sont marqués :

- au Sud du marigot de Keur Madiké, par l'alignement des piézomètres km 7, km 12, km 17, km 16 (km 17 est le point bas : 1,12 m);

- au Nord du marigot de Keur Madiké, par l'alignement : km 14, km 9, km 4, km 2 (km 9 est le point bas : 1,59 m).

Du point de vue chimique, l'eau de la nappe est en grande partie douce, notamment de part et d'autre du marigot de Keur Madiké où sur une vaste zone la teneur en Cl Na n'excède pas 1 g/l.

La salure augmente vers les axes de drainage :

- Sud avec 12 et 20 g de Cl Na à km 12 et km 7;
- Nord avec 15 g de Cl Na à km 14.

III - EVOLUTION DES NIVEAUX PIEZOMETRIQUES ET DES TENEURS EN CHLORURES PENDANT UN CYCLE ANNUEL

Description des données acquises

Nous avons reporté sur graphique les mesures de niveau de chaque piézomètre ainsi que les variations de teneur en ion Cl (1 et 2 (Pl. IX), pour le Diovol, 3 à 5 pour Rosso, 6 et 7 pour Keur Madiké).

Nous avons rectifié les quelques erreurs de mesures relevées et éliminé quelques analyses aberrantes, résultant de la submersion de certains piézomètres en novembre. En utilisant les mesures par nous effectuées en mai 1964 (juin pour le casier de Keur Madiké), nous disposons d'une année complète.

Pour une plus grande facilité d'interprétation, nous décrirons successivement l'évolution des niveaux piézométriques de chacun des casiers.

Le casier du Diovol constitue une unité. Quant à ceux de Rosso et Keur Madiké, nous avons été amené à déplacer vers l'Ouest leur frontière commune, la limite de partage des eaux étant sensiblement le méridien de Rosso.

Pour suivre les descriptions ci-dessous, il convient de garder sous les yeux les planches suivantes.

- Planches II (a à e): carte des isopièzes
- Planches III (a à b): carte des isochlores
- Planche IV : carte des isobathes (janvier 1965)
- Planche V : carte des isoplèthes (janvier-mai 1965)
- Planches VI, VII, VIII : évolution de la nappe de juillet 1964 à mai 1965 : coupes schématiques
- Planche IX : évolution du niveau piézométrique et de la teneur en chlorures de l'eau dans chaque piézomètre
- Planche X : graphique des variations de niveau du fleuve.

Ces divers documents représentent une série d'états instantanés d'une évolution en régime transitoire. Cette évolution est continue et les Planches VI, VII, VIII ont pour but de permettre de saisir la cinématique de l'évolution. Certaines formes décrites (notamment en août et mai) sont résiduelles et ne sont donc pas déterminées par des facteurs du moment mais sont l'aboutissement d'une évolution continue.

III.1 - CASIER DU DIOVOL (Pl. II)

Le casier du Diovol est endigué en grande partie. Cette digue permet de contrôler l'entrée des eaux pendant la crue et de ralentir éventuellement la vidange. Tous les piézomètres, en dehors du D 1, ont été préservés de l'inondation.

Pendant la crue qui nous intéresse, la cote de l'eau dans les diverses cuvettes a été variable : + 2,75 dans le Diambar, + 2,15 dans celle de N'Tiagar, inconnue dans celle de Dieuleuss mais plus faible que dans celle de Diambar. Quoique les hauteurs soient différentes, il ressort que la cote de l'eau a toujours été beaucoup plus basse dans le Diovol que dans les casiers de Rosso et de Keur Madiké où la crue s'est étalée naturellement (+ 3,16).

Ce fait a une grande importance car la faible hauteur d'eau au-dessus du sol (voire minime) dans les cuvettes de N'Tiagar et Dieuleuss, n'a pas provoqué d'alimentation verticale importante et, dans le Diovol, on a essentiellement enregistré une remontée due à la transmission d'onde de crue depuis le fleuve concomitamment à l'arrêt momentané de l'évaporation. Ceci permettra, par comparaison avec les autres casiers, d'évaluer la part respective des apports latéraux (effet d'onde) et des apports per-descensum (submersion avec grande hauteur d'eau).

III.1.1 - Août 1964 -(Pl. IIb)

Le fleuve est passé de la cote 0,50 (juillet) à la cote 1,45, (Pl. X), mais la recharge de la nappe reste limitée à une frange très étroite en bordure de la berge (largeur 500 à 700 m). La pente de la surface piézométrique est très forte en bordure, due très vraisemblablement à la faible perméabilité des rives et non à un fort débit d'infiltration. Ailleurs la nappe a peu changé et reste sous la cote zéro.

- Planche VI

- Profil 1 (Ouest du casier)

Dès le D 7 bis la nappe est à une cote négative, avec une très faible pente vers le Sud où elle atteint sa cote la plus basse au D 10.

- Profil 2 (Est du casier)

(passant par l'axe de drainage nord, la ligne de partage des eaux et l'axe de drainage sud).

Le fleuve recharge en berge. La nappe descend très rapidement à une cote négative (point le plus bas au D 6 bis). Elle remonte au droit de l'intumescence (résiduelle ?) N'Tiagar-D6 - D8, puis s'approfondit à nouveau vers l'axe de drainage sud.

III.1.2 - Septembre 1964

Fleuve à + 2,31 ; inondation contrôlée du casier depuis la mi-août. Remontée sensible des zones entourant le centre des dépressions nord (D 6 bis) et Sud (D 10 - D 3) de la surface piézométrique. La cote piézométrique de ces dépressions ne varie guère. Dans l'Ouest du casier, là où la charge de submersion est la plus forte, la remontée est générale.

III.1.3 - Novembre 1964 (Pl. IIc)

Le fleuve atteint sa cote maximale: + 3,16 (mais dans les différentes cuvettes, la cote de l'eau est beaucoup plus basse et la hauteur de charge sur le sol est faible). Dans le Nord, la remontée est générale (de 0,80 à 1 m), sans modification sensible de la forme de la surface piézométrique. La ligne de partage des eaux notamment se perpétue par une remontée sensiblement égale.

Au Sud, sous l'influence de la submersion autour des digues et de certaines cuvettes, montée des niveaux autour de la zone déprimée qui fluctue très peu.

- Planche VI

- Profil 1

L'effet de recharge le long de la berge se déplace vers le Sud du casier où la remontée est générale jusqu'au D 9. Au D 8 la remontée est particulièrement forte (1,18 m). De cette zone à forte recharge, l'eau tend à s'écouler vers le Nord et le Sud (c'est la partie ouest où la recharge est si nette comme nous l'avons signalé ci-dessus).

- Profil 2

La remontée est également générale mais moins marquée. La nappe reste à une cote négative sur une grande partie du profil, même au droit de la ligne de partage des eaux N'Tiagar/ D 6 - D 8 . Néanmoins, une bonne partie de la dépression nord est en voie d'être comblée et la remontée vers le Sud Est sensible jusqu'au D 4.

III.1.4 - Janvier 1965 (Pl. IId)

Le fleuve est redescendu à la cote + 0,17. Il commence à drainer la nappe le long des berges. Le point haut de celle-ci (+ 0,75) est à 1 km à l'intérieur du casier et l'écoulement est double : vers le fleuve sous l'effet de drainage, vers le centre du casier où l'onde de crue continue à se propager.

L'effet de remontée s'est propagé vers les zones encore déprimées tant au Nord (D 6 bis passant de - 0,55 à - 0,20 m) que vers le Sud (D 9 qui n'avait encore bougé est monté de 0,20 m).

Le centre de la zone d'évaporation sud n'a cependant pas bougé.

En bordure du fleuve, celui-ci draine la nappe et une ligne de partage des eaux se manifeste. Ceci est bien visible sur la coupe de la Planche VI.

- Profil 1

Le fleuve a déjà commencé à drainer la berge, abaissant très sensiblement les niveaux.

Par contre, un peu plus au Sud, au D 7, on enregistre par rapport à novembre, une très forte remontée (1,05 m), comme si la recharge en berge, observée en novembre, s'était déplacée vers le Sud comblant la dépression jusqu'à la ligne de partage des eaux.

Plus au Sud, très peu de changement. Cette coupe semble montrer d'une part que les apports "per descensum" sont faibles (pas de charge importante en surface), d'autre part que la remontée est due à une transmission d'onde à partir du fleuve, transmission qui vient s'amortir sur la ligne de partage des eaux (D 8) au-delà de laquelle il y a fort peu d'évolution. Cet axe N'Tiagar - D 6 - D 8 semble remplir la fonction d'un barrage aux transmissions latérales de pression.

- Profil 2

Ici le même phénomène est visible : le fleuve sollicite la nappe et la draine, effaçant la recharge en berge jusqu'au D 6 ter. Cette recharge s'était écoulée également vers le Sud comblant la dépression (axe de drainage nord) avec une forte remontée au D 6 bis et propageant vers le Sud, avec une plus faible amplitude, l'effet d'onde (jusqu'au D 5 - D 4). Au D 3, peu de changement.

Au Sud de la ligne de partage des eaux, la remontée fut plus sensible entre août et novembre qu'entre novembre et janvier. On a donc ici l'impression qu'il y a apport par des infiltrations depuis la surface, lors de la submersion quand les fissures du "banco" sont largement ouvertes, qui diminuent après le gonflement du "banco". Il est peu probable qu'il y ait transmission de pression très rapide lors de la montée du fleuve. Nous n'avons pas là un véritable écoulement comme pour la zone de "drainage nord".

III.1.5 - Mai 1965 (Pl. IIe)

Le fleuve est à la cote 0,30. L'intumescence en bordure a été totalement effacée, tout d'abord par drainage par le fleuve, puis par évaporation. La nappe est à ce point descendue que le fleuve recommence à l'alimenter le long de la berge et de la ligne de partage des eaux : N'Tiagar - D 6 - D 8.

L'allure de la nappe est la même qu'en juin 1964 mais légèrement plus haute (0,20 à 0,40 m).

Vers le Sud, peu de changement ou pas du tout (exemple : D 10).

- Planche VI

  - Profil 1

Le profil 1 montre, par rapport à celui de janvier, l'applatissement de l'intumescence séparant les zones de drainage nord et Sud.

Au Sud pas de modification malgré l'évaporation. Sans doute y a-t-il eu compensation par apports depuis l'intumescence, ce qui a contribué à son effacement et également un "essorage" plus lent de la zone superficielle, maintenue un peu plus longtemps en eau par les digues.

Au Nord, l'évaporation a déprimé la surface piézométrique au-dessous de la cote 0.

  - Profil 2

Au droit du D 6, se marque l'intumescence résiduelle de part et d'autre de laquelle la surface piézométrique est déprimée par l'évaporation.

En bordure du fleuve, l'alimentation est nette.

De l'analyse de ces cartes isopièzes et des coupes décrites, il ressort que le phénomène de recharge par le fleuve est prédominant. Dans le casier du Diovol, la recharge par infiltration directe consécutive à l'inondation, n'est certes pas inexistante mais plus faible et surtout beaucoup plus faible que dans les autres casiers comme nous allons le voir. Ceci est dû à ce que la hauteur d'eau au-dessus du sol y fut beaucoup plus petite en moyenne. Le phénomène de décharge par le fleuve est momentané et localisé, par évaporation plus prolongé et beaucoup plus important.

III.1.6- Analyses chimiques et cartes des chlorures (Pl. IIIa et IIIb)

Sur l'ensemble du casier du Diovol, l'eau de la nappe a une teneur en Cl Na très élevée. Celle-ci augmente du Nord vers le Sud (du fleuve vers les zones d'évaporation) avec une légère tendance à la diminution au droit de la limite de séparation : N'Tiagar-DC 6 qui est une zone de réalimentation.

Le tableau ci-après donne du Nord au Sud, selon le profil II, l'évolution de Cl^-, Na^+ et résidu sec.

	D6 ter	D6 bis	D6	D4	D3	D2
Cl^-	18.070	13.170	17.535	26.165	27.510	33.050
Na^+	9.400	6.400	8.000	8.400	13.000	13.900
rs	30.180	27.050	31.960	46.630	51.430	57.590

La submersion contrôlée n'a guère modifié la teneur en chlorures de la nappe et les cartes isochlores de janvier et de mai sont très semblables.

Les courbes isochlores, parallèles à la boucle du fleuve et croissant vers l'intérieur, traduisent un effet de dilution des eaux de la nappe par les eaux du fleuve infiltrées en berge. La courbe 20 g/Cl^-/l coïncide approximativement avec la limite d'influence de la crue. Au delà on a affaire à des eaux fossiles, emprisonnées lors des dépôts et concentrées par évaporation. Le lessivage par les crues n'affecte, en fait, que la tranche très superficielle des terrains.

Les seules fluctuations de teneur en ions Cl^- se manifestent en bordure du fleuve. Les apports latéraux, pendant la crue, y provoquent un léger abaissement des teneurs. Notons que le puits de N'Tiagar, très près du fleuve, a une eau douce d'octobre à février; il se sale ensuite.

III.2 - CASIER DE ROSSO

Le casier de Rosso n'est pas endigué. La crue s'y étale largement venant baigner la base des dunes qui limitent le casier au Nord.

III.2.1 - Août 1964 (Pl. IIb)

Le fleuve à la cote 1,45 commence à inonder l'aval du casier (le Gouère) et provoque une remontée locale importante au R 13. Cette remontée scinde l'axe de drainage par évaporation en deux axes.

En bordure du fleuve, alimentation par la berge (0,40 m de remontée au R 12).

- Planche VII

  - Profil 1 S-N

La coupe montre nettement l'alimentation par le fleuve et l'intumescence créée au centre de ce qui était la dépression par les infiltrations par descensum au droit du R 13.

  - Profil 2 S.SW-N.NE

Ici pas d'alimentation par le dessus, l'inondation n'ayant pas encore atteint cette zone. Seuls les apports du fleuve en berge (sur une largeur de 500 m environ). Ailleurs la nappe est encore déprimée.

III.2.2 - Novembre 1964 (Pl. IIc)

L'inondation du casier est totale. Des mesures ont cependant été faites mais elles sont souvent aberrantes. Elles montrent cependant un décrochement net entre la cote du fleuve (3,16) et les cotes des niveaux piézométriques (entre 1,10 au R 5 et R 6 et 2,90 au R 12 en bordure du fleuve).

En certains endroits donc il n'y a pas saturation des terrains.

III.2.3 - Janvier 1965 (Pl. IId)

La remontée de la nappe, depuis août, est générale et importante : plus de 1 m en moyenne. Notons cependant une décrue très nette par rapport aux niveaux "vraisemblables" de novembre. Le fleuve draine la nappe en bordure de la berge. Une ligne de partage des eaux parallèle au fleuve, passe à 500 m au Nord des R 12, R 9, R 7, R 15. Elle est également sollicitée par l'axe E-W de drainage qui commence à se dessiner sous l'effet de l'évaporation. La nappe reste néanmoins assez horizontale dans l'ensemble.

- Planche VII

- Profil 1

On voit le double écoulement vers le fleuve qui draine et vers l'axe de drainage.

En outre, les apports depuis les dunes au Nord sont également nets.

- Profil 2

Le long de ce profil, la nappe très plate est drainée par le fleuve au Sud. La nappe est presque uniformément à la cote + 1.

III.2.4 - Mai 1965 (Pl. IIe)

L'évaporation a déprimé très fortement la nappe (0,75 m en moyenne), reconstituant l'axe de drainage E-W: R 13 - R 10, le long duquel les cotes piézométriques sont négatives et le point bas du R 8 (baisse de plus de 1 m).

Entre ces deux axes, la ligne intermédiaire de partage des eaux s'aligne sur les piézomètres R 9 - R 7 - R 15, séparant le fleuve du casier. Cette intumescence a un écoulement double vers le fleuve et vers le casier. Les dunes contribuent toujours aux apports en provenance du Nord. Le fleuve alimente en bordure, sauf dans la partie amont du casier où il draine encore la nappe.

- Planche VII

- Profil 1

Par rapport à janvier, on voit que l'axe de drainage est très nettement déprimé (passant à -0,81, soit 1,20 m d'abaissement).

L'intumescence en bordure du fleuve a disparu : le fleuve et les dunes alimentent.

- Profil 2

Le méandre du R 8 a la surface de sa nappe à nouveau déprimée et alimentée par le fleuve et par le Nord.

La ligne de partage des eaux est faiblement marquée au R 7.

Notons qu'en mai 1965, 7 piézomètres sur 15 ont une cote positive supérieure à 0,20 alors qu'en juin-juillet 1964, un seul, le R 9, avait une cote positive.

III.2.5 - Analyses chimiques et cartes des chlorures (Pl. III a et III b)

Les 2 cartes des isochlores de l'eau de la nappe en janvier et mai 1965 sont très semblables.

L'axe de drainage E-W se situe au Nord du maximum de salure qui est ici aux environs de 40 g/l de Cl Na. Le secteur où la teneur en Cl Na est supérieure à 10 g/l occupe la zone de drainage par évaporation et s'étend jusqu'au fleuve. Les apports de celui-ci ont provoqué une dilution de la nappe et une moins forte salure. La teneur en Cl^- sous l'intumescence est moins forte en mai qu'en janvier.

L'eau douce (moins de 1 g de Cl Na/l) qui s'écoule depuis les dunes au Nord, se charge vers l'axe de drainage. L'eau de la nappe des dunes est nettement diluée lors de la crue : les apports y sont donc importants en volume.

Notons que la zone de partage des eaux Nord-Sud avec le casier de Keur Madiké est relativement peu chargée (de 1 à 5 g). On s'approche ici des conditions du casier de Keur Madiké que nous allons étudier maintenant.

III.3 - CASIER DE KEUR MADIKE

Ce casier également n'est pas endigué et subit intégralement l'inondation.

III.3.1 - Août 1964 (Pl. II b)

Nous discernons :

- 2 axes de drainage par évaporation
  - au Sud selon km 7 - km 12, km 17 et km 16 (point le plus bas km 17 à - 1,12 m),
  - au Nord selon R 4, km 2, km 8, km 9, km 14 (cote minimale - 1,62 au km 9).

- 2 axes d'alimentation
  - le fleuve le long de la berge,
  - le long du marigot de Keur Madiké d'où s'écoulent les eaux vers les axes de drainage Nord et Sud; le marigot de Keur Madiké, défluent du fleuve, est déjà en eau à cette époque (cote < 1).

- Planche VIII
  - Profil 1

Nous voyons que la nappe s'approfondit lentement vers le Nord après avoir esquissé un léger bombement au droit du marigot de Keur Madiké.

  - Profil 2

Les deux axes de drainage sont très visibles et très marqués ainsi que les alimentations par le fleuve et au droit du km 15.

III.3.2 - Novembre 1964 (Pl. IIc)

Submersion quasi-totale sauf dans le Nord Est. Les mesures sont discutables et nous n'avons pu dresser de carte isopièze. Cependant nous pouvons noter que si sur l'ensemble du casier, la remontée semble importante, au Nord Est et au Sud du casier, les remontées sont plus faibles et une cote reste négative (km 14).

- Planche VIII
  - Profil 1

L'inondation s'étend largement sur le casier laissant émerger une zone au Sud du Tambass.

- Profil 2

Deux îles restent émergées. Sous la zone inondée, il semble qu'il y ait assez souvent saturation.

III.3.3 - Janvier 1965 (Pl. IId)

La remontée notée sur l'ensemble des piézomètres est très importante et ce n'est que dans le Nord Est du casier que la remontée reste faible (notamment au km 14 toujours à une cote négative) (cote du sol + 3,19 donc non inondée et pas d'alimentation per descensum).

L'axe de drainage Sud a disparu, comblé par les apports (remontée de 2,46 m au km 17) et c'est le fleuve qui draine cette zone. La nappe a une morphologie différente : à la ligne de partage des eaux souterraines qui suit le marigot de Keur Madiké, se greffe une autre ligne selon les km 10, km 9, km 8, avec écoulement vers le Nord Est (bassin fermé du km 14) et vers l'Ouest et le Tambass qui fonctionne en drain pendant cette période de hautes eaux.

- Planche VIII

- Profil 1

Cette coupe montre que le marigot de Keur Madiké, encore en eau, alimenta la nappe qui est drainée par le fleuve au Sud et s'écoule vers le Tambass au Nord.

- Profil 2

Cette coupe complète la précédente. Identique à elle dans la partie sud, elle montre vers le Nord la dépression permanente au droit de km 14, puis une nouvelle intumescence avant le Tambass.

III.3.4.-Mai 1965 (Pl. IIe)

La situation antérieure à la crue s'est partiellement reconstituée et la surface piézométrique est à peu près étale. L'axe de drainage sud existe dans la partie aval et amont du casier. Dans la partie intermédiaire (km 12), l'écoulement se fait encore vers le fleuve.

L'axe de drainage Nord s'est reconstitué dans sa quasi-totalité.

Les hauteurs de fluctuations sont plus importantes que dans les autres casiers. Ceci est sans doute dû à un drainage de l'ensemble plus homogène par l'horizon sableux.

- Planche VIII

- Profil 1

Après la petite dépression sud alimentée par le fleuve, l'intumescence centrale s'étale largement alimentant la zone déprimée du Tambass.

- Profil 2

Même phénomène. Notons que les niveaux piézométriques de la zone de drainage Sud, sont encore au-dessus de la cote 0 et que ceux de la zone nord, quoique négatifs, sont nettement plus hauts que ceux enregistrés en juin-juillet 1964.

III.3.5 - Chlorures

L'eau de certains piézomètres (km 4, km 13) change totalement pendant l'inondation. Ceci est dû à des infiltrations le long des tubes, le sol étant particulièrement craquelé à la fin de la saison sèche. Par la suite, l'eau de ces deux piézomètres reprend ses caractéristiques premières.

- Janvier 1965 (Pl. III a)

L'eau dans l'ensemble du casier est relativement douce ou peu chargée (1,5 g de Cl Na dans le centre et inférieure à 7,5 g Cl Na/l sur la presque totalité).

Des teneurs plus élevées sont enregistrées en bordure du fleuve et au Nord Est du casier, dans la zone déprimée.

- Mai 1965 (Pl. III b)

Augmentation de teneurs en chlorures en bordure du fleuve. Pas de changement ailleurs.

Contrairement au fleuve, le marigot de Keur Madiké est essentiellement une zone d'alimentation à eau douce; défluent du fleuve, il ne se remplit qu'à la période de crue. Les eaux salées qui remontent le fleuve à la fin de l'étiage n'y pénétrent pas.

IV - DEFINITION DES FACTEURS DU REGIME INTERPRETATION ET CONSEQUENCES

IV.1 - GENERALITES

Les facilités de mise en valeur agricole des terres du haut-delta, plus particulièrement celles des casiers du Diovol, de Rosso et de Keur Madiké, dépendent étroitement du contexte hydrogéologique régional.

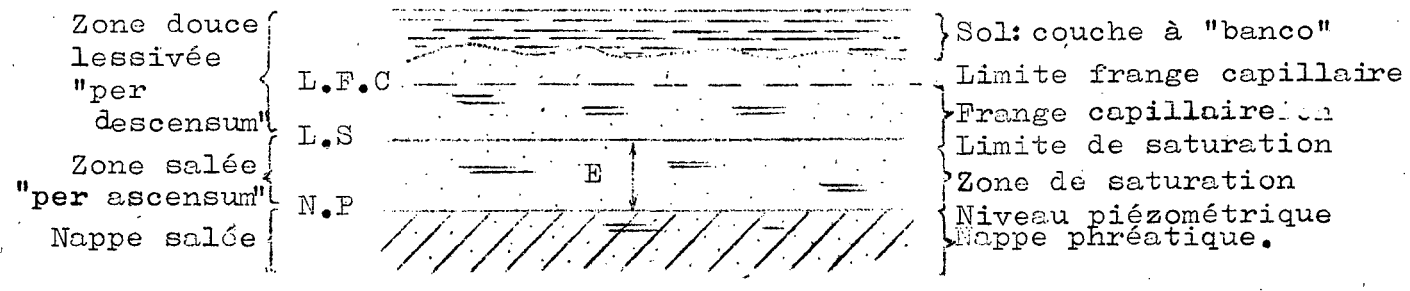
En effet la présence à profondeur assez faible d'une nappe, le plus souvent très salée, pose un problème délicat que la très faible perméabilité des terrains, donc leur drainabilité, risque de transformer en obstacle à une mise en valeur rapide et peu coûteuse.

Il convient d'essayer de préciser les dangers exacts afin d'exécuter les aménagements indispensables pour éviter que ces difficultés ne deviennent des vices rédhibitoires.

La salure en elle-même, dans la mesure où elle n'affecte que des horizons profonds sans rapport avec la zone radiculaire des plantes, ne gêne pas la culture. Mais le fait d'irriguer, donc de modifier les conditions naturelles par un apport plus important d'eau où par la diminution de l'évaporation, peut provoquer la remontée de la nappe avec comme conséquence une salification des sols dans la zone radiculaire.

Le fait que la nappe salée soit entre 2 et 3 m de profondeur constituerait un facteur favorable. Mais ce qui est mesuré dans les piézomètres est le niveau de l'eau libre, niveau piézométrique de la nappe. Or, la surface piézométrique ne correspond pas au toit de la zone salée : la hauteur de remontée capillaire doit être prise en considération; la surface de saturation est certainement notablement supérieure à la surface piézométrique.

Le schéma ci-dessous explicite la structure hydraulique d'un sol.



- La frange capillaire située au-dessus de la zone de saturation contient de l'eau fixée par effet de paroi des grains et de l'air. Son épaisseur est très variable.

- La limite de saturation représente le toit de la zone de saturation, où tous les vides sont comblés par de l'eau capillaire. L'épaisseur E de cette couche est fonction (d'après les expériences d'ATTERBERG) de la granulométrie du sol. Dans le cas du casier du Diovol où la granulométrie des terrains, qui contiennent et surmontent la nappe, est très fine (90 % de grains ont un diamètre inférieur à 0,1 mm et 40 % à 0,05 mm), la hauteur d'ascension capillaire est de 1 m au minimum, au-dessus de la nappe. La hauteur actuelle des sols, non saturée en eau salée, en considérant la hauteur d'ascension capillaire, est en moyenne de 1 m à 1,50 m, donc très limitée.

IV.2- CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE ET DEFINITION DES FACTEURS DU REGIME

Dans l'ensemble la nappe est contenue dans des terrains fins, peu perméables, localement très peu perméables. Nous avons vu, dans la description des observations, qu'il y avait concurremment des écoulements (transferts de volume d'eau) et des transmissions de pression qui interfèrent.

IV.2.1 - Les processus de recharge et de décharge

Du fait de la faible submersion du casier du Diovol, on a pu différencier les deux processus de recharge et les deux processus de décharge distincts qui jouent dans la zone étudiée.

	RECHARGE	DECHARGE
Transmission latérale de pression depuis une limite	Propagation d'une onde de pression à partir des lignes d'alimentation (Sénégal)	Propagation d'une onde de dépression à partir des axes drainants
Echange d'eau vertical par la surface	Infiltrations des inondations	Evaporation

Les effets de ces processus se superposent : les variations de niveau piézométrique observées en un point donné intègrent leur ensemble. Mais il s'agit de phénomènes de natures différentes.

Les variations de niveau dans le Sénégal entraînent des ondes de pression puis de dépression successives se propageant à partir du fleuve à des vitesses qui sont fonction de T/S (T : transmissivité, S : coefficient d'emmagasinement) donc variables; leurs effets sont donc d'autant plus tardifs qu'on s'éloigne du fleuve. Les zones éloignées peuvent encore subir un effet de recharge alors que les zones proches du fleuve subissent déjà un effet de décharge comme cela a été observé dans le casier du Diovol. Dans les autres casiers, les infiltrations massives provoquées par les inondations ont un effet de recharge synchronique qui masquent en grande partie et atténuent la propagation de l'onde de transmission de charge.

Il en est de même, en sens inverse, pour l'effet de décharge par évaporation. Mais celle-ci est à la fois plus continue (mais non constante) dans le temps et sans doute plus inégale dans l'espace : son effet est maximal au voisinage des centres des dépressions fermées, sans doute favorisé par une plus faible perméabilité (effet capillaire). Les axes de ces dépressions peuvent donc s'assimiler à des axes de drainage à niveau variable. Ces dépressions fermées s'expliquent par une recharge plus rapide à leur périphérie. Ces zones de forte recharge ne sont pas, le plus souvent, assimilables à des zones de grande perméabilité. Le fait que les intumescences se maintiennent après les périodes de recharge directe (inondation) semble montrer des zones de recharge initiale plus grande ou le plus souvent des zones de faible transmissivité moins facilement drainables.

IV.2.2 - L'absence de modification de la teneur en sels des eaux

Des prélèvements d'eau mensuels ont été faits dans les piézomètres aux fins d'analyse chimique. Les analyses ioniques complètes étaient faites un mois sur deux; les autres mois, seuls étaient effectués les dosages de chlorures. Pour une nappe salée dont la recharge par des eaux douces a provoqué des remontées de 1 à 2 m, la remarquable constance des teneurs, sauf

quelques cas particuliers où il y a eu visiblement infiltration d'eau de la crue le long du piézomètre, mérite d'être expliquée.

Lorsque les piézomètres ont été foncés, nous avons cherché à placer les crépines franchement dans la nappe afin qu'elles ne puissent être dénoyées, même en fin de saison sèche.

Les recharges par transmission latérale de pression depuis le fleuve n'ont pas provoqué le transfert de gros volumes d'eau. Il est donc normal qu'il n'y ait pas eu pour ce cas de modification sensible de la composition chimique de l'eau, sauf en berge même du fleuve (puits de N'Thiagar).

Les apports verticaux qui provoquent l'infiltration de volumes d'eau importants, auraient dû, eux, modifier la composition de l'eau de la nappe. Si cela ne s'est pas produit, c'est que cette eau infiltrée ne s'est pas mêlée à la nappe salée. Il y a eu imbibition des terrains sur une certaine tranche se superposant à la nappe elle-même sans qu'il y ait diffusion. L'évaporation reprend ensuite cette eau dans sa quasi-totalité, avant d'intéresser la nappe salée elle-même.

L'eau de la nappe captée par les crépines du piézomètre subit donc en fait très peu d'évolution : les échanges se font au-dessus d'elle, dans la zone d'imbibition par apports verticaux et dans la zone de capillarité. Ceci explique que ces eaux n'évoluent pas à l'échelle de l'observation (1 année); il faudrait avoir des analyses sur une décennie au moins pour constater une variation. Cette absence d'évolution se retrouve, tant dans la teneur totale que dans les rapports ioniques comme ceci est montré plus loin.

IV.3- MODIFICATIONS POUVANT ETRE PROVOQUEES PAR LA MISE EN VALEUR

Pour mieux prévoir ces modifications, il faudrait déjà connaître en quoi consiste le ou les projets de mise en valeur. Or, sans doute, ces projets dépendent-ils, en partie du contexte hydrogéologique.

D'après nos renseignements, il n'y a vraiment de plans que pour l'aménagement du Diovol. Deux sortes de cultures principales sont prévues : le riz et la canne à sucre.

IV.3.1 - Pour le riz, d'après J. DUBOIS, il semble que les conditions naturelles seront peu changées, la durée d'inondation étant maintenue un peu plus longuement grâce aux digues mais la hauteur de submersion sera plus faible. L'action latérale (alternativement alimentante et drainante) du fleuve sera maintenue et les apports verticaux, sensiblement identiques à ceux de l'été 1964, tant globalement que dans le temps. Une certaine stabilité semble donc pouvoir se maintenir dans le régime des fluctuations. En ce qui concerne la salure, l'effet lessivant de la crue sur la partie superficielle des sols, risque d'être sensiblement diminué alors que la lame d'eau évaporée restera de même importance. Ceci peut entraîner un accroissement progressif de la salinité des terrains de surface.

IV.3.2 - Pour la canne à sucre, les conditions seront nettement différentes. Il n'y aura plus submersion mais irrigation pour entretenir en permanence l'humidification.

Cette irrigation, même très étroitement surveillée et règlementée au minimum, ne manquera pas de provoquer quelques apports à la nappe. Ceci est malgré tout moins grave que le fait d'entretenir une humidification en surface qui arrêtera l'évaporation de la nappe salée. Celle-ci, ne sera donc plus déprimée et remontera sous l'influence des transmissions de pression latérales à un niveau en équilibre avec le fleuve. La zone

saturée qui surmonte la nappe remontera d'autant, risquant de venir dans la zone radiculaire. On ne peut espérer que la charge en eau douce en surface empêche de telles remontées. Il faudra donc installer un double réseau de drainage :

- colature des eaux d'irrigation en surface pour éviter les apports à la nappe,

- réseau de drainage enterré en profondeur pour limiter la remontée de la nappe salée.

IV.3.3 - Par un barrage à l'aval de Rosso. Nous avons vu le phénomène de recharge par propagation d'onde de pression à partir du fleuve pendant la crue. Si un barrage est construit à l'aval de Rosso (comme il est prévu pour empêcher les remontées d'eaux marines) et surélève le plan d'eau en permanence de 1,5 à 2 m, ceci entrainera à brève échéance, la remontée générale de la nappe salée et provoquera une contamination des sols, pratiquement irréversible.

Le risque de salification des casiers est suffisamment grand pour que les sites de barrages ne soient recherchés qu'à l'amont de Rosso, dans une zone où aucun périmètre d'irrigation n'est projeté.

Reprenant chaque casier, nous allons essayer de définir les caractères de leur régime hydraulique propre, desquels découleront les conséquences probables de l'irrigation.

IV.4 - CARACTERISTIQUES DES CASIERS

IV.4.1 - Casier du Diovol

IV.4.1.1 - Contexte hydrogéologique

La nappe phréatique du casier du Diovol fonctionne en bassin fermé. Son alimentation a deux origines : latérale à partir du fleuve, verticale lors de la submersion. Son drainage s'effectue en partie vers le Sénégal lors de la décrue de celui-ci, en partie par évaporation le long de deux axes D 6 bis au Nord, D 10 au Sud. Ceux-ci sont parfaitement visibles sur la Planche IIe qui représente la surface piézométrique à l'étiage en mai 1965, c'est à dire lorsque le régime hydraulique tend à devenir permanent.

IV.4.1.2 - Alimentation de la nappe du casier

Dans le Diovol, comme nous l'avons vu, la submersion ne s'est faite que sous une faible charge et les apports verticaux furent faibles. Ce fait nous a permis, ici, de distinguer (Pl. V et VI) deux catégories de fluctuations dans les différents piézomètres du casier du Diovol.

- En premier lieu, des fluctuations caractérisées par leur grande amplitude et leur synchronisme apparent avec la crue du fleuve.

- En second lieu, des fluctuations d'amplitudes limitées et sans rapport apparent avec la crue du fleuve.

Dans la première catégorie (amplitudes $> 0,25$ m), nous trouvons les piézomètres suivants (Pl. V) :
D1, D1 bis, D4, D5, D6 bis, D6 ter, D8, D7, D7 bis, D12, D11.
Ils sont tous localisés (si l'on excepte D4) dans une bande large de 5 km, parallèle au Sénégal.

Dans la seconde catégorie (amplitude $< 0,25$ m), nous trouvons les piézomètres suivants :
D2, D3, D6, D9, D10, D13. Ils sont tous situés au centre du casier.

Ces deux types de fluctuations sont imputables à deux régimes d'alimentation :

- les fluctuations importantes (1ère catégorie) correspondent à la propagation de l'onde de crue du fleuve dans ses berges;

- les fluctuations de faible amplitude traduisent l'alimentation "per descensum".

L'approche mathématique du phénomène, difficile du fait de l'hétérogénéité des formations deltaïques et du peu d'éléments connus, a cependant été tentée en analysant les fluctuations du fleuve (assimilation à un mouvement sinusoïdal) et de la nappe aux piézomètres D7 bis et D7. Cette approche est certes très critiquable à bien des titres mais les résultats sont assez séduisants.

La limite de propagation de l'onde de crue vers l'intérieur des terres ainsi évaluée (4.000 m) s'accorde assez correctement aux observations faites sur les piézomètres, qui donnaient 5.000 m.

Par cette même méthode, nous avons évalué le débit infiltré pendant la crue, le long de la berge, et partiellement restitué pendant la décrue. Il serait compris entre 500.000 et 2.500.000 m^3/an. Ces valeurs très divergentes restent faibles en soi et expliquent la morphologie des courbes isochlores, sensiblement parallèles au fleuve dans la bande des 4.000 ou 5.000 m, précédemment citée, croissantes vers l'intérieur du casier où la salure reste sensiblement constante.

Dans le casier du Diovol, pour l'été 1964 - année de faible submersion - on distingue donc schématiquement deux régions.

1 - Une frange de 4.000 à 5.000 m de large où les fluctuations sont dues à la propagation d'une onde de crue avec apport d'eau faible.

2 - L'intérieur du casier où les fluctuations sont dues à la seule percolation des eaux de submersion. Comme nous le verrons plus loin, le Sud du casier de Rosso, hydrogéologiquement comparable, montre des remontées supérieures de 2 m environ, remontées provoquées par la plus forte charge d'eau en surface.

IV.4.1.3 - Répercussion du régime hydraulique sur l'aménagement agricole

Dans la frange "4.000 - 5.000 m" précédemment définie, la remontée due à une percolation verticale est masquée par la propagation de l'onde de crue. Elle existe cependant au même titre que dans la partie centrale du casier. Les facteurs de l'infiltration verticale sont essentiellement :

- la perméabilité du recouvrement
- la surface de submersion
- la durée de submersion
- la hauteur d'eau de submersion.

L'aménagement hydro-agricole va sans doute modifier certains de ces facteurs : la perméabilité du recouvrement notamment risque d'être accrue si des travaux d'aplanissement entaillent "le banco", horizon très peu perméable de surface et peu épais (0,20 à 0,80 m). Les profonds labours augmenteront également les risques d'infiltration.

Dans le cas de la culture du riz, il est probable que les autres facteurs (durée de submersion, hauteur d'eau de submersion) seront proches de ceux qui régnèrent lors de l'été 1964. Les fluctuations observées seront donc sensiblement celles que l'on peut attendre.

Par contre pour la culture de la canne à sucre, comme nous l'avons déjà vu, il n'y aura plus de submersion prolongée mais irrigation permanente. La frange superficielle sera continuellement humectée. On peut évidemment, par des pratiques d'irrigation draconiennes, n'apporter que l'eau nécessaire à l'évapotranspiration mais il est toujours à craindre que des apports trop importants ne provoquent une recharge de la nappe.

En outre, une telle irrigation arrêtera l'évaporation de la nappe elle-même. Celle-ci, rechargée latéralement et peut-être par le haut, tendra à s'élever (Pl. VI). Nous avons vu que la remontée capillaire des eaux devait situer la surface saturée entre 1 et 1,5 m de profondeur. La remontée due à l'arrêt de l'évaporation risque donc d'amener le toit de la surface saturée dans la zone radiculaire.

Ce fait, lié à l'éventuel accroissement de l'infiltration provoqué par l'aménagement hydro-agricole, exclue, semble-t-il, toute possibilité de mise en culture généralisée sans équipement préalable de drainage. Il aurait été extrêmement important de pouvoir contrôler la hauteur de cette zone de saturation par remontée capillaire. Des profils hydriques par sonde à neutrons seraient à préconiser si ceux-ci ne risquaient de ne pouvoir être appliqués à cause de la salure élevée des eaux.

Par ailleurs, si l'on peut penser que les apports d'eau depuis la surface créeront une zone superficielle saturée en eau douce surmontant et écrasant l'eau salée sous-jacente, les phénomènes de transmission de pression latérale, d'évaporation et de discontinuités de perméabilité, risquent de bouleverser en bien des cas ce schéma séduisant.

En outre l'irrigation permanente en surface modifiera les forces de "succion" de l'évaporation actuelle à la nappe salée; la frange capillaire se modifiera en conséquence.

Il conviendra donc de drainer :

1 - à un niveau supérieur, les eaux d'irrigation,

2 - à un niveau inférieur, vers 2,5 m de profondeur, la zone de saturation de la nappe salée, pour éviter la remontée de celle-ci. Le drainage d'eaux aussi salées dans des terrains aussi fins, avec localement des argiles défloculées, sera fort délicat et le choix des matériaux posera des problèmes. Une étude de la SOGETHA a défini l'espacement des drains. Les projeteurs pourront s'appuyer sur la carte des isobathes (carte d'égale profondeur, Pl. IV) pour tracer le canevas du réseau utilisant la forme naturelle de la nappe donc les axes de drainage naturels. Rappelons que ces axes de drainage correspondent à des zones plus argileuses (effet capillaire plus intense favorisant une plus grande évaporation). Les intumescences maintenues de la nappe étant le plus souvent des zones à faible transmissivité, devront avoir un réseau de drainage plus dense (axe N'Thiagar-D6 - D8).

IV.4.2 - Casier de Rosso

IV.4.2.1 - Généralités

Comme le casier du Diovol, le casier de Rosso fonctionne en bassin fermé, soutenu au Sud par le fleuve et au Nord par un apport d'eau douce en provenance de la nappe des dunes rouges qui bordent le casier dans sa partie nord.

L'alimentation du casier a donc une triple origine :

- latérale et périodique à partir du fleuve au Sud,
- latérale et constante à partir de la nappe des dunes rouges,
- verticale par infiltration des eaux de submersion pendant la crue du fleuve.

Le drainage est essentiellement provoqué, hormis le fleuve en période de décrue, par deux axes évaporatoires: l'un situé en bordure du fleuve et passant par R8, l'autre dans l'axe du casier, suivant l'alignement des piézomètres R10 et R13.

IV.4.2.2 - Alimentation du casier

Le casier n'est pas endigué, la crue du fleuve n'est donc pas contrôlée, à l'opposé du casier du Diovol, et vient mouiller le pied des dunes au Nord du casier.

Les fluctuations qui appartiennent d'une part à la propagation transversale de l'onde de crue du fleuve dans le casier, d'autre part à la percolation des eaux de submersion du casier, s'intègrent.

La percolation des eaux d'épandages, qui intéresse des volumes d'eau importants, masque le phénomène de propagation d'onde qui n'est identifiable que pendant la période de décrue du fleuve où se manifeste, sur la berge du casier, un bourrelet à écoulement double vers le fleuve et vers l'intérieur du casier.

Tous les piézomètres enregistrent des fluctuations de grande amplitude (plus de 1 m en moyenne) (Pl. VI et V) et synchrones avec la crue du fleuve. L'amortissement, d'ailleurs faible, de l'amplitude des fluctuations avec l'éloignement du fleuve, n'est plus celui d'une onde, mais correspond simplement à des durées de submersion plus courtes, fonction de la topographie et de l'éloignement du fleuve.

Dans la zone déprimée, l'évaporation abaisse la nappe, entre janvier et mai, de plus de 1 m. La nappe douce des dunes rouges (moins de 1 g de résidu sec en moyenne) voit son résidu sec diminuer sensiblement pendant la crue. Cette eau se charge progressivement en s'écoulant vers le Sud (Pl. II a) par lessivage des terrains jusqu'à la zone d'évaporation.

L'évaporation le long des axes de drainage provoque leur concentration. La zone où ces teneurs en Cl Na sont supérieures à 10 g s'étend depuis ces axes d'évaporation jusqu'au fleuve. La zone de partage des eaux avec le casier de Keur Madiké est relativement moins chargée (1 à 5g Cl Na).

IV.4.2.3 - Répercussion du régime hydraulique sur l'aménagement agricole

La mise en valeur du secteur à nappe salée sous-jacente - c'est à dire la partie sud ouest du casier - paraît particulièrement difficile.

La profondeur de la nappe salée libre (moins de 1,50 m dans ce secteur, Pl. IV) montre que la limite supérieure de la zone de saturation doit se situer, compte tenu de la remontée capillaire, à 0,50 - 1 m de profondeur (remontée capillaire 0,50 à 1 m), c'est à dire pratiquement dans la zone radiculaire.

Un réseau de drainage paraît d'autant plus difficile à réaliser dans ce secteur, qu'il n'existe pas de tapis drainant continu et que la présence d'argile défloculée sous le banco (piézomètres R8, R7, R9, R12) est très fréquente.

Les secteurs nord et est du casier (Pl. III), où la salure de la nappe sous-jacente est inférieure à 10 g/l, sont mieux disposés, la présence d'un tapis drainant de bonne perméabilité (sable) autorisant un drainage plus facile (buses enterrées à 1,20 m de profondeur).

Il est peut être possible - des études plus fouillées seules pourraient le dire - d'utiliser, pour drainer la nappe des secteurs nord et est, les axes de drainage par évaporation de la zone salée en renforçant leur efficacité par un endiguement qui, les soustrayant à la submersion, augmenterait d'autant leur pouvoir drainant.

En conclusion, nous pouvons distinguer deux régions dans le casier de Rosso.

1 - Une région salée, limitée par la courbe isochlore 10 g/l, très difficilement drainable. Il faudrait donc ne pratiquer ici que des cultures dont les modalités d'irrigation ne modifient pas les conditions actuelles et notamment l'effet lessivant de la crue.

2 - Une région (Nord et Est du casier) à eau saumâtre (salure inférieure à 10 g/l), à tapis drainant continu (sable), susceptible d'être équipée d'un réseau drainant à un seul niveau dans la zone de saturation à 1,20 m de profondeur.

IV.4.3 - Casier de Keur Madiké

IV.4.3.1 - Généralités

La nappe phréatique fonctionne également en bassin fermé. Un niveau de sables blancs s'étend assez largement sous le banco entaillé seulement au droit du Tambass où il est remplacé par des argiles.

Son régime hydraulique est conditionné par un axe d'alimentation préférentiel qui se situe le long du marigot de Keur Madiké et de deux axes de drainage par évaporation, localisés, l'un au Sud en bordure du fleuve, km 7, km 17, km 16, et l'autre au Nord Ouest en bordure de Tambass (km 4, km 2, km 9, km 14).

La Planche IIe, qui représente la surface piézométrique à l'étiage mai 1965 (régime subpermanent), montre en outre, le rôle du fleuve qui se comporte principalement en axe d'alimentation (en période de crue le fleuve a un comportement identique à la fin d'étiage, par contre en période de décrue, le fleuve joue un rôle de drain). Les effets du fleuve sont cependant limités par la présence de l'axe de drainage sud qui absorbe ses apports.

IV.4.3.2 - Alimentation du casier

Le casier de Keur Madiké n'est pas endigué. Il est submergé dans sa quasi-totalité (exception faite de la zone nord est, km 14) pendant la période de crue du fleuve. Il n'est pas plus possible dans ce casier que dans celui de Rosso (et pour les mêmes raisons) de faire la part respective des fluctuations dues à la propagation d'une onde de crue, de celles dues à une infiltration verticale

De toutes façons les volumes infiltrés verticalement sont très nettement prédominants sur ceux, très faibles, mis en jeu lors de la propagation de l'onde. L'alimentation verticale se fait par toute la surface du banco, mais plus particulièrement par le marigot de Keur Madiké, où les sables sont subaffleurants.

IV.4.3.3 - Répercussions du régime hydraulique sur l'aménagement agricole

Le marigot de Keur Madiké alimenté en eau douce dès le début de la crue du fleuve, provoque donc une alimentation importante et le lessivage des sols vers les axes de drainage par évaporation au Nord et au Sud.

Le long de ces axes, la salure s'accroît par concentration résiduelle des eaux. Dans le cas particulier de ce casier, les zones salées restent localisées le long des axes d'évaporation (Planche IIa).

L'aménagement agricole de ce casier, est plus aisé que les précédents et paraît devoir nécessiter des investissements plus limités.

Il est peut-être possible d'accroître l'efficacité du drainage naturel par évaporation, par endiguement des axes d'évaporation. Essentiellement l'axe sud (km 7, km 12, km 16) et pro parte l'axe nord (km 14). Il est néanmoins peu probable que l'on puisse éviter la pose d'un réseau de drainage car la lame d'eau évaporée restera grande, et malgré le drainage temporaire par les axes d'évaporation, il n'est pas sûr qu'aucun risque d'accroîssement progressif de la salinité de l'eau de la nappe ne soit à craindre.

Signalons qu'une irrigation complémentaire par puisage et pompage dans ce casier, serait indiquée car elle améliorerait le drainage naturel.

V - GEOCHIMIE DES NAPPES

V.1 - GEOCHIMIE DE LA NAPPE DU CASIER DU DIOVOL

Les observations faites dans la région considérée ont porté sur un an. Pour chaque piézomètre quatre prélèvements ont été analysés :

- en fin d'étiage (30 juin 1964)
- en début de crue (17 septembre 1964)
- en fin de crue (17 décembre 1964)
- à mi-étiage (avril 1965).

Ces analyses devaient refléter l'évolution de la nappe durant un cycle hydrogéologique. Tous les échantillons ont montré une très forte teneur en sels; fait qui limite la précision des analyses. En effet pour les teneurs de 60 g/l par exemple, une variation de 1 à 2 g/l n'est nullement significative.

V.1.1.- Résidu sec

Les eaux de ce casier sont des eaux très chargées; leur résidu sec est compris entre 60 et 15 g/l (Pl. IX). On peut établir une zonalité. Les salures croissent vers l'intérieur des terres respectant schématiquement la boucle du fleuve Sénégal. Ceci permettrait d'envisager cette nappe comme une zone transitoire soutenue au Sud par des eaux sursalées et légèrement modifiées par les apports d'eau douce de la crue.

On pourrait aussi envisager cette zonalité comme le résultat d'un équilibre ancien susceptible d'évoluer dans le même sens actuellement mais cette évolution n'est pas décelable à l'échelle d'une année.

Si on considère les fluctuations chimiques enregistrées dans le temps, on observe pour un piézomètre donné une constance dans les valeurs des résidus secs ainsi que dans l'ensemble de la composition ionique. Les zones submergées et émergées se comportent de la même façon à ce point de vue. Ses légères variations observées ne sont pas significatives du fait de leur hétérogénéité qui peut simplement être due à la précision des analyses.

Cette stabilité chimique durant un cycle hydrogéologique, montre bien que ces eaux n'évoluent pas à l'échelle annuelle et sont indépendantes du régime hydraulique du fleuve Sénégal.

Il semble bien que les mouvements de l'eau soient exclusivement des mouvements verticaux. Ces eaux seraient stagnantes; hypothèse déjà émise lors de l'étude dynamique.

On est donc en présence d'une nappe libre soutenue, dont la surface est très près du sol (- de 2 m). Cette nappe, en principe, devrait se concentrer par évaporation. Mais, pour en déterminer le rythme et bien le vérifier, il faudrait observer les variations sur plusieurs années, de manière à bien mettre en évidence l'augmentation du résidu sec avec comme corollaire une diminution du r SO_4/rCl et une augmentation de rMg/rCa. Cette stabilité chimique des eaux est en apparente contradiction avec les fluctuations de niveau de la nappe.

L'étude dynamique de la nappe a montré deux zones de fluctuations :

- la première bordant le fleuve où les fluctuations ont de fortes amplitudes et sont synchroniques avec la crue.

- la seconde qui comprend tout l'intérieur du casier où les fluctuations sont réduites et indépendantes de la crue. Il semblerait donc a priori que les apports d'eaux soient dégressifs

vers l'intérieur du casier; or les variations chimiques ne décèlent pas une telle répartition. On doit donc envisager que la crue du fleuve n'apporte directement à la nappe qu'un volume d'eau "infime" donc que cette crue pourrait très bien n'être marquée dans les terrains que par la propagation d'une onde de pression (1).

Par ailleurs, le casier, protégé par une digue, est soumis à une submersion, certes localisée, mais qui devrait provoquer des apports d'eau douce importants. Or, même dans ces zones, on constate une stabilité des teneurs en sels. Pour expliquer cette anomalie apparente on peut envisager deux hypothèses :

a)- la couverture superficielle est totalement imperméable et il n'y a donc pas d'infiltration,

b)- l'eau pénétrant par la surface du sol donne naissance à une lentille d'eau douce en équilibre de densité sur l'eau salée.

En fait il semble que le phénomène soit plus complexe et intègre les deux hypothèses envisagées.

Il y aurait donc, au premier temps, infiltration par les fentes de retraits de la couverture argileuse (banco). Celle-ci dans un second temps, certainement très rapproché du premier, formerait un écran imperméable par imbibition complète.

---

(1) Ceci est en accord avec l'accord avec l'analyse dynamique qui a mis en évidence ce phénomène.

La notion de lentille d'eau douce est difficilement concevable, puisqu'au dessus de la nappe existe une zone de saturation dont les eaux ont une composition chimique voisine de celle de l'eau libre. La remontée observée peut être attribuée à un changement d'état partiel de la zone de saturation dû, soit à la faible quantité d'eau infiltrée, soit à la supression de l'évapo-transpiration de la nappe.

V.1.2 - Eléments caractéristiques

Afin de préciser les caractères chimiques des eaux du casier du Diovol, nous avons calculé 3 rapports caractéristiques suivant deux profils piézométriques et ce pour un cycle annuel. Les résultats sont consignés dans les tableaux des pages suivantes.

Comme pour les résidus secs, il n'a pas été possible d'envisager de lois cycliques de variations. Tous les indices d'échange de base (1) (i e b) des alcalins montrent que ceux-ci n'évoluent pratiquement pas, les proportions de Na et de Cl restant identiques. Ceci s'explique par la saturation de ces eaux en Na et Cl et montre que ces eaux sont d'origine marine. De plus, les très faibles valeurs du rapport rSO_4/rCl (2) et l'analogie du rapport rMq/rCa avec celui de l'eau de mer (0,3 et 4,56), montrent que ces eaux proviennent bien d'une transformation chimique de l'eau de mer au sein d'un même sédiment marin ou plus exactement deltaïque, très peu perméable.

---

(1) i e b : indice d'échange de base d'après H. SCHOELLER : c'est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature, primitivement existants.

(2) r : signifie milliéquivalents. Ce nombre s'obtient en divisant le poids en milligrammes par l'équivalent de l'élément ou du radical considéré, l'équivalent étant le poids atomique (ou le poids moléculaire s'il s'agit d'un radical) divisé par sa valence.

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

	D 2				D 3			
	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65	30/6/64	17/9/64	18/12/64	Avril 65
i e b	0,17	0,20	0,23	0,34	0,23	0,19	0,24	0,26
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,019	0,008	0,036	0,027	0,096	0,10	0,094	0,0554
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	3	5,4	3,5	3,9	4,2	5,4	3,19	7,41

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

(suite)

	D 4				D 5			
	30/6/64	18/9/64	18/12/64	Avril 65	30/6/64	18/9/64	18/12/64	Avril 65
i e b	0,29	0,32	0,30	0,49	0,18	0,18	0,13	0,21
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,018	0,028	0,048	0	0	0,057	0,016	0
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	2,37	2,56	5,15	4,40	1,48	1,35	3,26	3,39

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

(suite)

	D 6				D 6 bis			
	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65
i e b	0,23	0,22	0,12	0,27	0,22	0,18	0,23	0,23
r SO4 / r Cl	0,049	0,081	0,045	0	0,21	0,22	0,24	0,097
r Mg / r Ca	3,35	3,11	5,53	4,47	3,35	5,19	3,7	8,1

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

(suite)

	D 6 ter			
	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65
i e b	0,31	0,28	0,30	0,19
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,061	0,014	0,073	0
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	1,1	3,6	3,3	3,48

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

(suite)

	D 7				D 7 bis			
	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65
i e b	0,12	0,13	0,14	0,27	0,28	0,16	0,19	0,27
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,26	0,19	0,013	0,027	0,00218	0,015	0,029	0
$\frac{Mg}{r\ Ca}$	1,17	1,81	9	2,41	1,19	3,10	5,05	3,31

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

(suite)

	D 8				D 9			
	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65
i e b	0,22	0,19	0,66	0,28	0,22	0,24	0,26	0,31
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,011	0,021	0,049	0,029	0,007	0,0022	0,008	0
$\frac{Mg}{r\ Ca}$	3,60	19	4,19	3,87	3,2	4,3	2,6	3,75

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DU DIOVOL

(fin)

	D 10			
	30/6/64	17/9/64	17/12/64	Avril 65
i e b	0,31	0,32	0,36	0,35
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,02	0,02	0,032	0
$\frac{Mg}{r\ Ca}$	1,1	4,99	3,6	4,56

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX DU CASIER DE ROSSO

	R 5				R 6			
	2/7/64	Sept.	Décembre	Avril 65	2/7/64	15/9/64	18/12/64	Avril 65
i e b	0,25			0,34	0,14	0,39	0,44	0,46
$\frac{r\ SO4}{r\ Ca}$	0,13			0,16	0,06	0,056	0,10	0,030
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	0,54			1,21	0,17	3,09	2,72	3,51

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DE ROSSO

(suite)

	R 7				R 8			
	2/7/64	15/9/64	18/12/64	Avril 65	2/7/64	18/9/64	17/12/64	Avril 65
i e b	0,31	0,22	0,25	0,32	0,40	0,37	0,44	0,44
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,0025	0,021	0,032	0	0,002	0,028	0,1157	0
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	0,93	2	4,24	3,09	0,68	0,87	1,26	1,24

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX DU CASIER DE ROSSO

(suite)

	R 12				R 13			
	2/7/64	18/9/64	17/12/64	Avril	2/7/64	Sept.	Décembre	Avril 65
i e b	0,29	0,28	0,27		0,14			0,25
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0	0,026	0,041		0,127			0
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	1,79	2,19	3,29		1,68			1,79

RAPPORTS CARACTERISTIQUES DES EAUX
DU CASIER DE ROSSO

(fin)

	R 14			
	2/7/64	15/9/64	19/12/64	Avril 65
i e b	- 0,47	- 0,43	- 0,019	- 0,13
$\frac{r\ SO4}{r\ Cl}$	0,85	0,55	0,2	0,52
$\frac{r\ Mg}{r\ Ca}$	0,60	0,63	0,93	0,64

V.1.3 - Conclusion

Les eaux de la nappe sont de type marin et n'ont subi que des modifications de détails au sein de leurs sédiments originels : dilution en bordure du fleuve, concentration à l'intérieur du casier.

Actuellement, à l'échelle de nos observations, leur évolution n'est pas décelable. On doit donc considérer qu'elles sont statiques et que l'influence des eaux douces y est négligeable.

- La crue du fleuve n'apporte que très peu d'eau car elle se manifeste sous la forme d'une onde de pression.

- L'eau répandue en surface ne profite pas ou très peu à la nappe mais reconstitue en eau douce, annuellement, la frange capillaire utilisée par la végétation.

Ainsi nous sommes en présence d'un équilibre hydraulique et chimique, que de petites transformations pourraient perturber, risquant d'entraîner la remontée de la nappe salée.

Comme l'a montré l'étude dynamique, les mouvements de l'eau ne sont dus qu'à l'évapo-transpiration mais on peut préciser que cette évapo-transpiration n'intéresse que la frange capillaire et ne met en jeu, dans sa grande majorité, que de l'eau douce.

Si l'on modifie l'équilibre reconstitution de la frange capillaire/évapo-transpiration, on risque alors de provoquer un changement d'état de la zone de saturation (salée), ce qui entraînerait une remontée de la nappe salée et diminuerait d'autant l'épaisseur de la frange capillaire utilisable par les cultures.

Ces conclusions ne doivent être considérées que comme une approche du problème et à partir du dispositif de surveillance actuel, des observations devraient être poursuivies, en particulier pour bien mettre en évidence la répartition verticale des eaux, qu'elles soient capillaires ou dans la zone de saturation.

V.2- GEOCHIMIE DES NAPPES DES CASIERS DE ROSSO ET DE KEUR MADIKE

Nous avons plus particulièrement insisté sur les eaux du casier du Diovol, parce que dans celui-ci les travaux d'aménagement agricole sont avancés. Les conditions hydrochimiques du casier du Diovol sont proches de celles de la phase d'exploitation agricole, une digue limitant les submersions existant déjà.

Dans le casier de Rosso, aucun travail d'aménagement n'a été fait. L'intensité et la durée de submersion ne dépendent que de la crue du fleuve. Il en est de même d'ailleurs pour le casier de Keur Madiké.

V.2.1 - Casier de Rosso

Les résidus secs permettent de mettre en évidence deux zones bien différenciées. Une zone sud à résidu sec élevé 46 g/l. à 17 g/l) (Pl. III).

Ces fortes teneurs sont dues essentiellement aux "ions" Cl et Na. Nous avons à faire comme dans le casier du Diovol, à des eaux hyperchlorurées thalassiques. Il existe cependant une différence fondamentale entre le casier de Diovol et de Rosso; à savoir :

- la nappe du premier est soutenue au Sud par des eaux très chargées, tandis que la nappe du second est limitée, vers le Nord, par l'écoulement des eaux douces de la nappe des dunes du Trarza.

Dans le casier du Diovol, nous avions observé une zonation des résidus secs depuis le fleuve Sénégal vers l'intérieur du casier. Dans le casier de Rosso, nous retrouvons le même schéma - (si l'on excepte le méandre de N'Dialène - N'Thiagar, où les anomalies sont dues à la présence des sédiments argileux) - compliqué vers le Nord par l'influence des eaux douces des dunes du Trarza. Nous avons donc une répartition symétrique des valeurs du résidu sec, due aux influences combinées des eaux douces du Nord et du Sud.

Sur un cycle hydrogéologique, les variations en concentions ne sont pas observables, compte-tenu de la précision des analyses et des fortes teneurs. Les cartes isochlores faites à deux périodes de l'année, janvier et mai 1966, ne décèlent pas de modification fondamentale.

Rapports caractéristiques

Ils marquent parfaitement les différents types d'eaux en jeu dans le casier de Rosso. Ainsi, pour le R 14 nous avons un "i o b" de faible valeur négative, -0,47 à -0,019, et des valeurs de $\frac{rSO4}{rCl}$ et $\frac{rMg}{rCa}$ comprises entre 0,50 et 0,80. Ces valeurs sont en bon accord avec les valeurs que l'on trouve dans les eaux des sables sous climat tropical.

Le piézomètre R 13 montre que les eaux à ce niveau ont des caractères chimiques transitoires : i e b = 0,14, $\frac{rSO4}{rCl}$ = 0,127 et $\frac{rMg}{rCa}$ = 1,70 montrant que les eaux douces du Nord passent à des eaux d'origine marine vers le Sud. Elles ressemblent à celles du casier de Diovol au niveau du piézomètre R 12 (i e b = 0,29 $\frac{rSO4}{rCl}$ = 0,026 $\frac{rMg}{rCa}$ = 1,79 à 3,29).

Conclusion

Dans le casier de Rosso, l'équilibre chimique des eaux est tributaire du fleuve Sénégal et des nappes d'eau douce du Nord. Entre les deux, se situe un aquifère d'origine marine, enfermé dans des dépôts deltaïques. Son évolution est certainement tributaire de l'évapo-transpiration, mais ne peut être mise en évidence sur un cycle hydrogéologique. De plus, les travaux d'aménagement, en modifiant l'influence du fleuve, risquent de perturber la situation actuelle dans un sens qu'il est très difficile de prévoir avec les observations dont nous disposons.

V.2.2 - Casier de Keur Madiké

Ce casier, contrairement aux deux précédents, présente la particularité de posséder de l'eau douce en son centre. Cette eau douce est due à un défluent du fleuve Sénégal, le marigot de Keur Madiké, et il n'est alimenté qu'à partir d'un certain seuil, c'est à dire lorsque le fleuve est en crue et transporte des eaux douces.

Du point de vue chimique, les eaux de ce casier sont (à de rares exceptions près : zone à dépôts deltaïques argileux) faiblement chargées, ou tout au moins beaucoup plus douces que les eaux des deux casiers précédents.

Cette situation résulte, d'une part de la morphologie des terrains qui permet un apport d'eau douce par le fleuve, et d'autre part, des vitesses de circulation dues à la bonne perméabilité des sables.

Les résidus secs (Pl. XI) les plus importants se situent en bordure du fleuve (de 18 à 26 g/l) tandis que dans la partie centrale, les teneurs en sels sont beaucoup plus faibles et atteignent à peine 1 à 5 g/l. On peut donc mettre en évidence une zonation tout à fait contraire à celle observée dans le casier de Rosso.

Cette zonation inverse s'explique par la présence du défluent du Sénégal dont la cote du lit mineur n'autorise que le transit des eaux douces. Mais c'est à la nature des sédiments, ici sableux, que l'on doit le lessivage et l'équilibre chimique que l'on peut observer.

Dans les zones à sédiments deltaïques, le lessivage ne s'est pas produit, et les sels absorbés au niveau des minéraux argileux sont restés fixés.

VI - CONCLUSIONS

Dans l'ensemble des problèmes posés par les projets d'aménagement du haut delta du fleuve Sénégal, l'étude hydrogéologique décrite apporte un certain nombre d'éléments importants. Des inconnus subsistent, des hypothèses sont à vérifier. Elles devraient faire l'objet de travaux complémentaires, travaux qui devraient être conduits en équipe avec d'autres disciplines.

VI.1 - RESULTATS ACQUIS

De la "nappe salée du haut delta" qui était déjà connue ponctuellement, nous connaissons maintenant son contexte géologique, son alimentation, son drainage naturel, ses limites avec des eaux plus douces, ses teneurs souvent très fortes en Cl Na et nous pressentons les difficultés de mise en valeur et le drainage nécessaire mais combien délicat et onéreux à réaliser.

- <u>Pour le Diovol</u>,

casier dont la mise en valeur est la plus immédiate, nous savons que la nappe est partout très salée, le plus souvent autant ou plus que l'eau de mer. Les terrains sablo-argileux, peu perméables, sont imprégnés d'une nappe de type marin n'évoluant pas à l'échelle de nos observations. Les eaux sont statiques et l'influence des eaux douces y est négligeable car :

- la crue du fleuve n'apporte que très peu d'eau (onde de pression),
- les apports verticaux rejoignent en faible quantité la nappe; ils imbibent la frange et sont repris par l'évaporation.

Le fait que la zone de saturation de la nappe salée doit imprégner les terrains jusqu'à une profondeur de 1 à 2 m, nécessitera obligatoirement un drainage si l'on doit modifier l'équilibre actuel : reconstitution de la frange capillaire - évaporation. Il est peu probable que l'on puisse uniformément créer une "lentille d'eau douce" en surface s'opposant aux remontées salées. L'hétérogénéité des terrains permettra des remontées locales comme cela se manifeste dans la zone de Richard Toll.

Il est certain que le réseau de drainage sera d'un aménagement difficile du fait de la faible perméabilité, de la nature des terrains et des eaux à drainer.

La prudence voudrait que l'on ne modifie guère les conditions actuelles d'irrigation tant en quantité qu'en répartition dans le temps.

En outre - et ceci est valable pour tous les casiers -, il faut exclure tout aménagement du fleuve qui provoquerait une élévation permanente du plan d'eau au droit de la zone étudiée. Cette élévation entrainerait à brève échéance, par transmission latérale, une montée de la nappe qui contaminerait les sols d'une manière pratiquement irréversible.

Rappelons que dans ce casier, grâce à une inondation sous une très faible hauteur d'eau, nous avons pu voir le phénomène de transmission latérale de pression depuis le fleuve, phénomène masqué dans les autres casiers par des apports verticaux importants.

- <u>Casier de Rosso</u>

La partie sud du casier, et plus particulièrement sud-ouest, présente des conditions hydrogéologiques analogues à celles du Diovol : nappe salée dans des terrains sablo-argileux,

déprimée par l'évaporation, n'évoluant pas sous l'action des apports latéraux et surtout verticaux qui imprègnent la frange superficielle et nourrissent l'évaporation. En outre, ici, la nappe est à plus faible profondeur, et la zone saturée de la nappe salée doit être proche de la zone radiculaire.

Le drainage sera rendu encore plus difficile par la présence fréquente d'argile défloculée.

Dans la partie nord du casier, la nappe venant des dunes y est plus douce et est contenue dans des sables fins facilement drainables. Un réseau de drainage ayant pour exutoire l'"axe d'évaporation" peut être envisagé, étant entendu que cet "axe" serait aménagé pour évaporer en permanence, et condamné pour les cultures. Les apports de la crue à la nappe des dunes, provoquent une dilution. On peut donc espérer un lessivage progressif des terrains.

- Casier de Keur Madiké

Ce casier apparaît comme le plus favorisé : la nappe y est relativement peu salée sur une grande partie et un niveau de sables blancs, relativement continu, favorise son drainage. Il ne paraît cependant pas possible de passer à la mise en culture sans compléter et aménager ce drainage de manière à éviter tout accroissement progressif de la teneur en sel que ne manquera pas de provoquer l'évaporation continue des eaux d'irrigation. L'utilisation de l'eau de la nappe pour une irrigation de complément favoriserait ce drainage.

IV.2 - INCONNUES SUBSISTANT

L'étude a été entreprise dans l'optique que l'on avait à l'origine des problèmes. Certains aspects nouveaux se sont révélés, qu'il conviendrait d'étudier.

a)- Etude de la zone de saturation et de la frange capillaire

Les piézomètres installés nous donnent la cote de l'eau libre. Au dessus de celle-ci existe une zone de saturation en eau salée que nous avons estimée à 1 m voire 1,50 m.

Il est indispensable de connaître la hauteur de cette zone, de même qu'il est indispensable, par l'étude des profils hydriques fréquents, de connaître l'équilibre qui se produit entre les apports verticaux qui imbibent les terrains de surface et la zone de saturation. Cet équilibre conditionne en grande partie l'équipement futur, et sa connaissance pourra peut être faire gagner un temps et un argent précieux. Les études doivent être menées, tant dans le Diovol, où les hauteurs de submersion sont faibles, que dans les autres casiers où les hauteurs sont plus fortes. Il est probable que l'utilisation de la sonde à neutrons sera limitée à la partie superficielle, là où les eaux sont peu chargées.

b)- Evolution des fluctuations et des teneurs en chlorure dans dans le temps

Nous ne saurions trop insister sur la nécessité de continuer les observations afin d'avoir un plus grand nombre de "cas" avec des données climatiques et de submersion variables. Le nombre de ces cas augmentera sensiblement les prévisions possibles. De même, il faut vérifier les hypothèses émises sur la non évolution de la salure des nappes.

c)- Détermination des coefficients de transmissivité et d'emmagasinement du terrain

Maintenant que la nappe est à peu près connue et que son contexte géologique l'est également, il faut, par des essais de pompages à proximité des piézomètres situés dans des zones "type", déterminer les caractéristiques du terrain. Celles-ci ne sont connues que localement près des puits. Il faut les compléter, car la connaissance des transmissivité et coefficient d'emmagasinement est indispensable pour interpréter plus complètement et exactement les fluctuations observées. Ces facteurs sont également importants pour tracer le canevas du réseau de drainage.

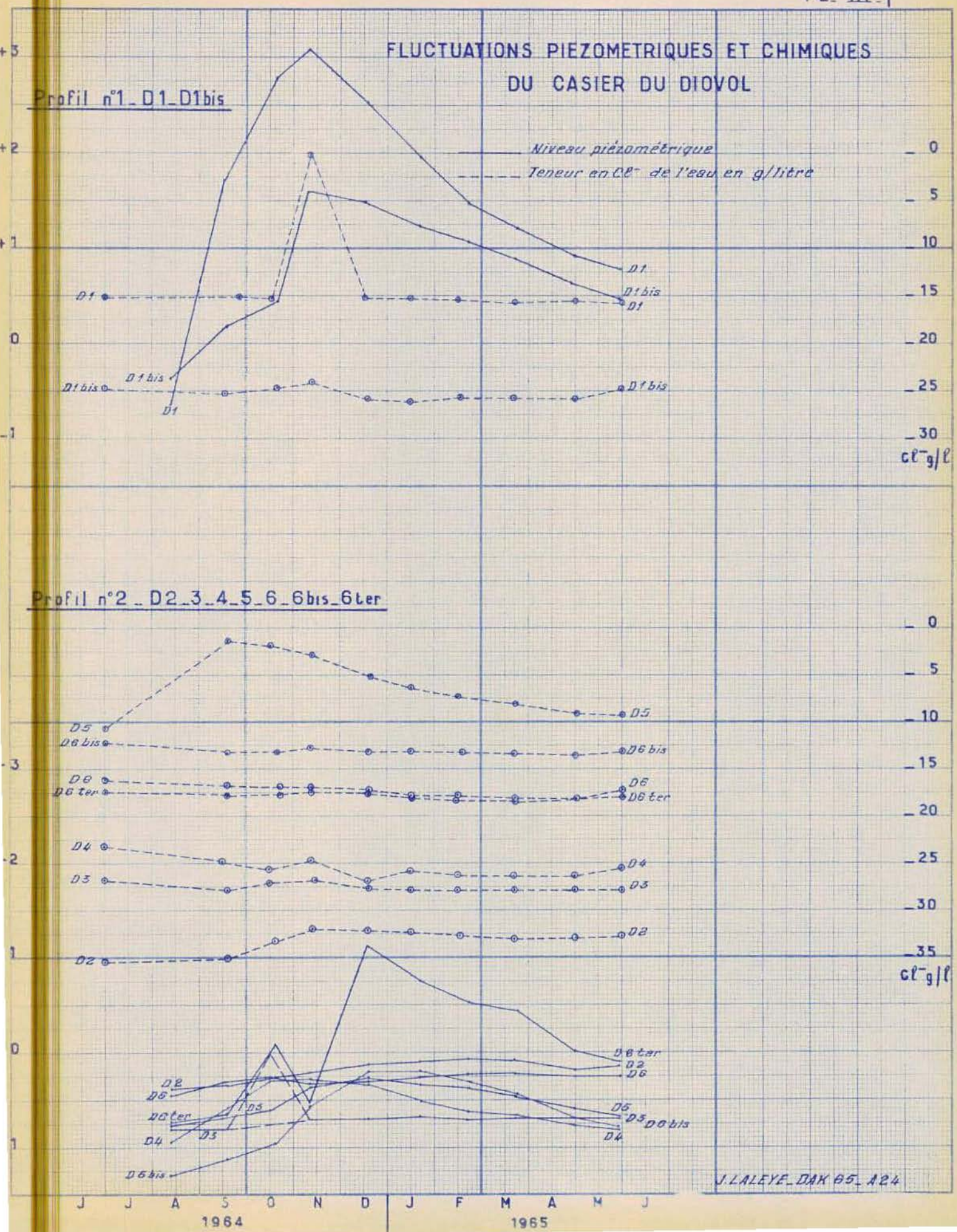
Le problème de l'aménagement du haut delta s'articule sur l'hydrogéologie de la nappe salée. Un très gros progrès a été fait dans sa connaissance; des points restent cependant à préciser. L'importance des répercussions qu'entraînera l'aménagement est telle qu'il faut, par un travail d'équipe, aborder tous les aspects du problème; l'hydrogéologue, le pédologue et l'agronome doivent participer conjointement à l'avancement des idées.

LISTE DES DOCUMENTS ANNEXES

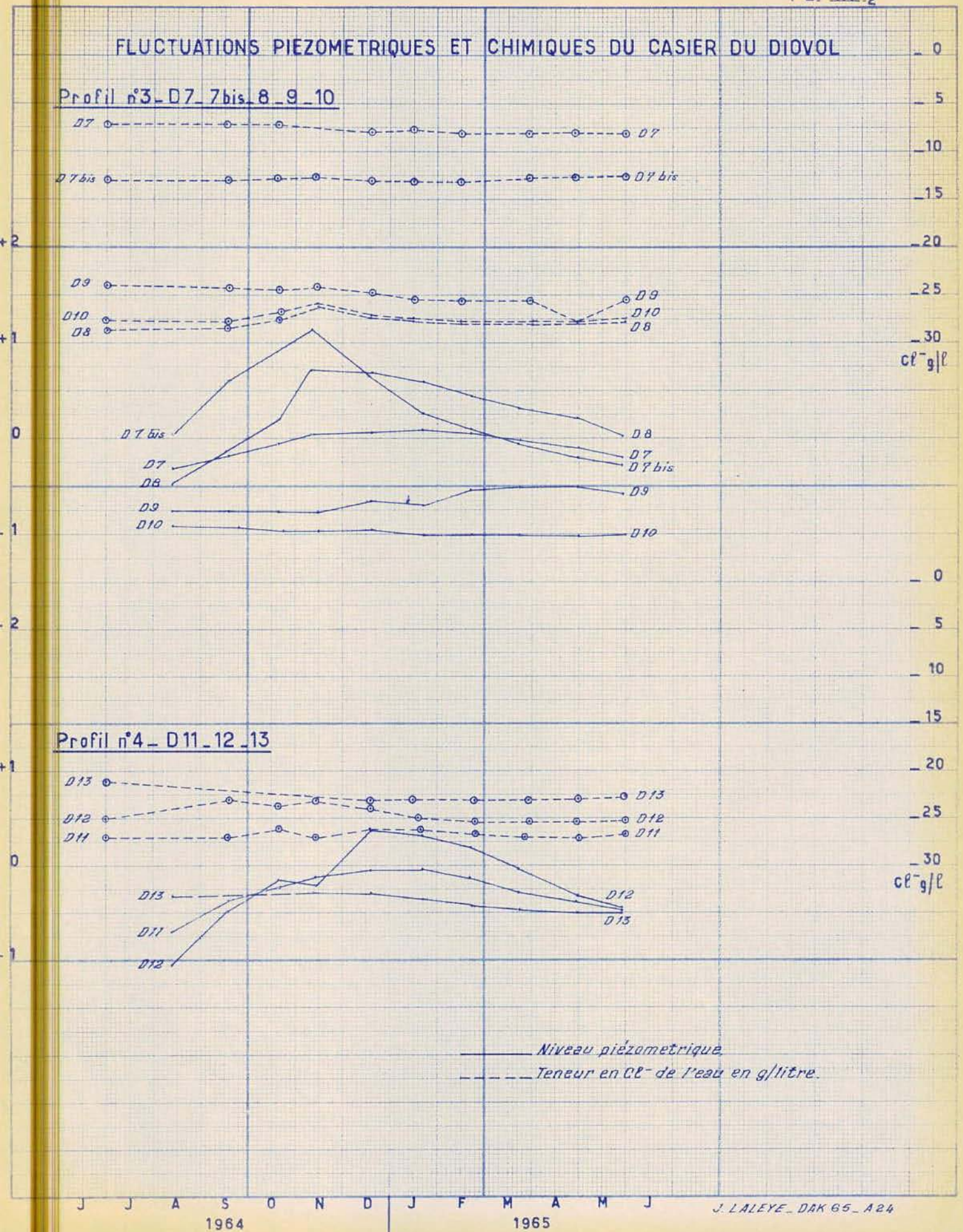
Hors texte

- Pl. I : Implantation des ouvrages et coupes théoriques
- Pl. II : Carte des isopièzes des nappes des 3 casiers
  - a - juin-juillet 1964
  - b - août 1964
  - c - novembre 1964
  - d - janvier 1965
  - e - mai 1965
- Pl. III : Carte des isochlorures
  - a - janvier 1965
  - b - mai 1965
- Pl. IV : Carte des isobathes (janvier 1965)
- Pl. V : Carte des isoplèthes (janvier-mai 1965)
- Pl. VI : Casier du Diovol - Evolution de la nappe selon les profils 1 et 2
- Pl. VII : Casier de Rosso - Evolution de la nappe selon les profils 1 et 2
- Pl. VIII : Casier de Keur Madiké - Evolution de la nappe selon les profils 1 et 2
- Pl. IX : Fluctuations piézométriques et chimiques
  - 1 et 2 - Diovol
  - 3 - 4 - 5 - Rosso
  - 6 - 7 - Keur Madiké
- Pl. X : Limnigramme du fleuve (1964-65)
- Pl. XI : Analyses chimiques complètes : casier de Diovol
- Pl. XII : Analyses chimiques complètes : casier de Rosso
- Pl. XIII : Analyses chimiques complètes : casier de Keur Madiké.

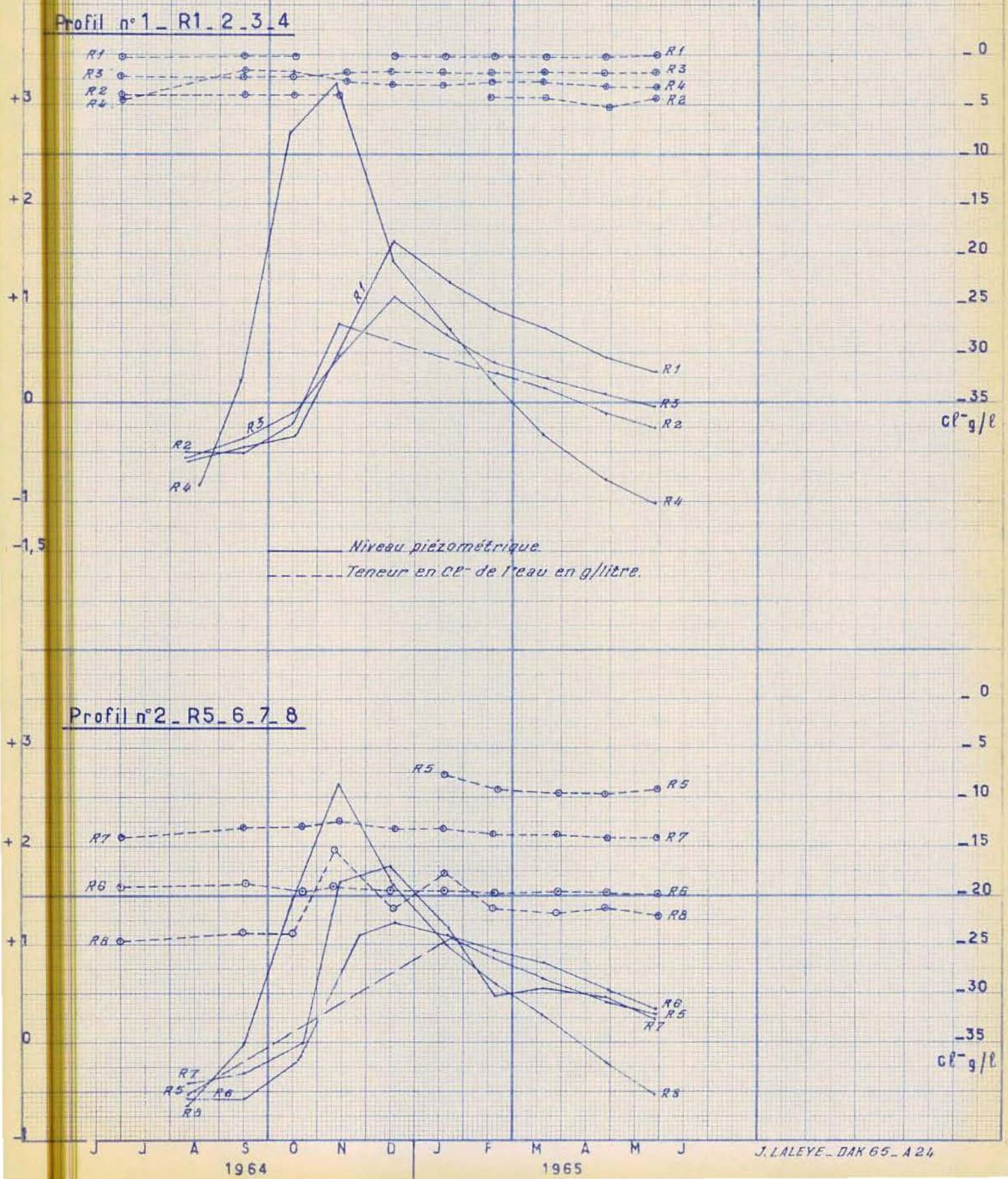
FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DU DIOVOL



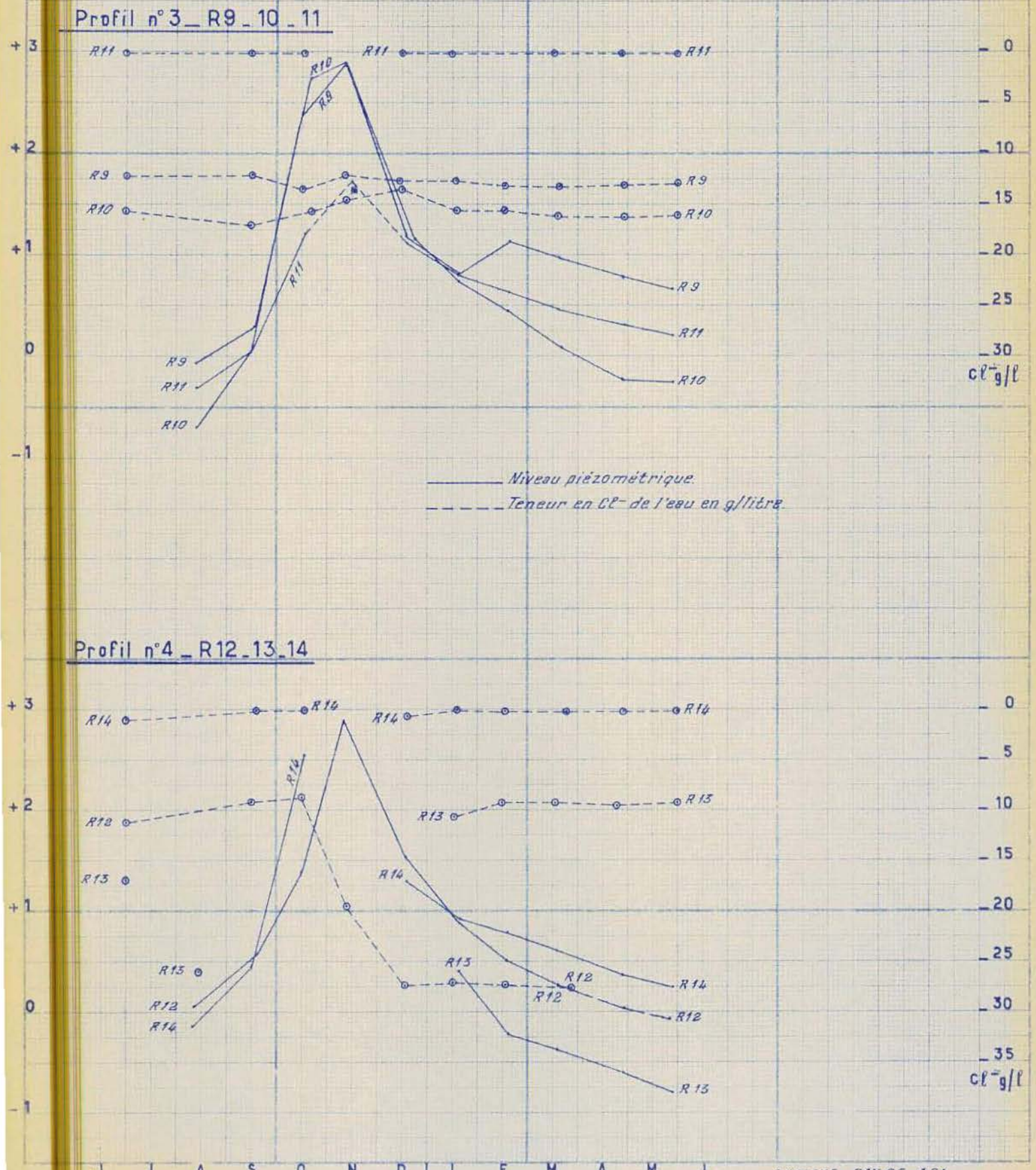
FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DU DIOVOL



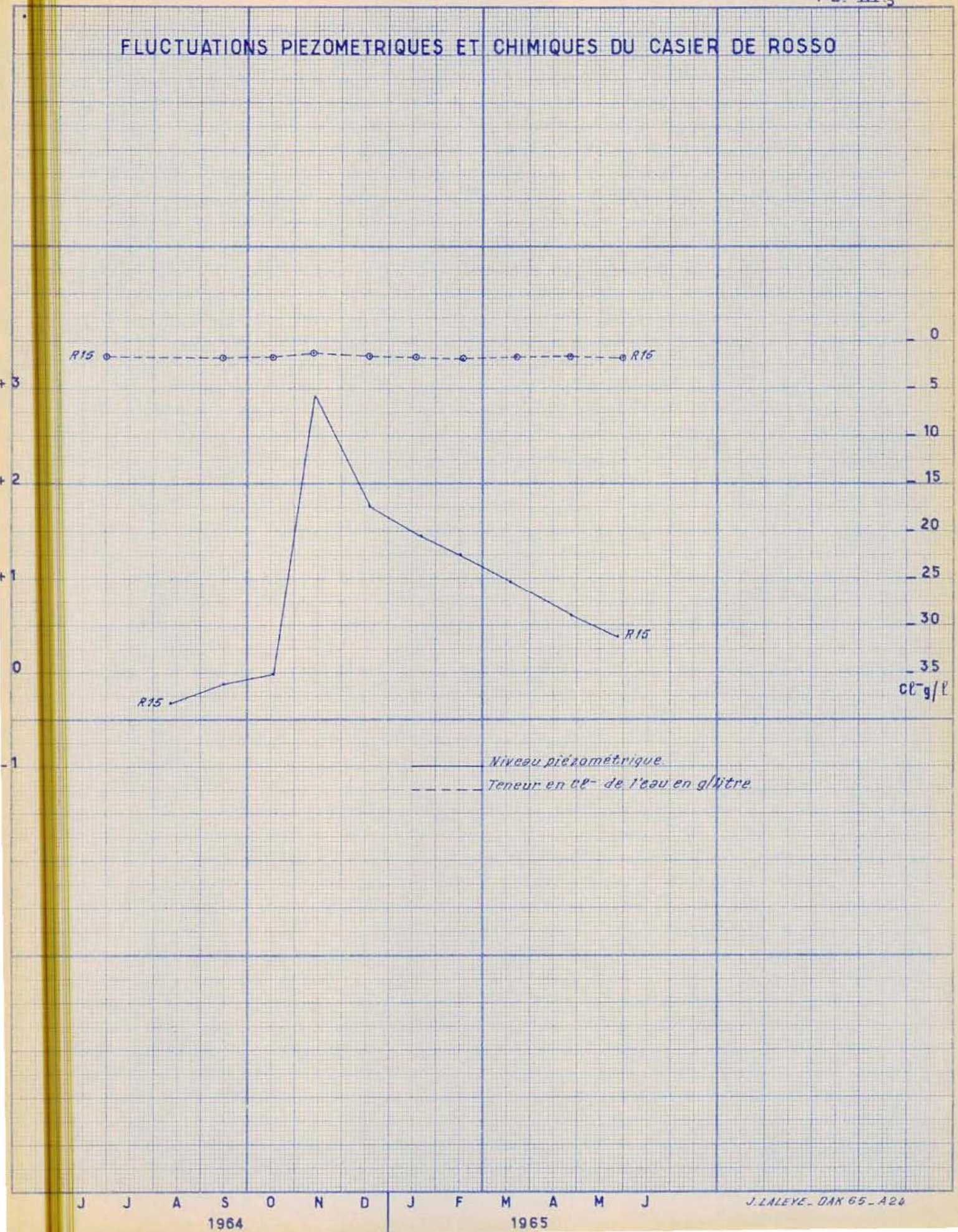
FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DE ROSSO



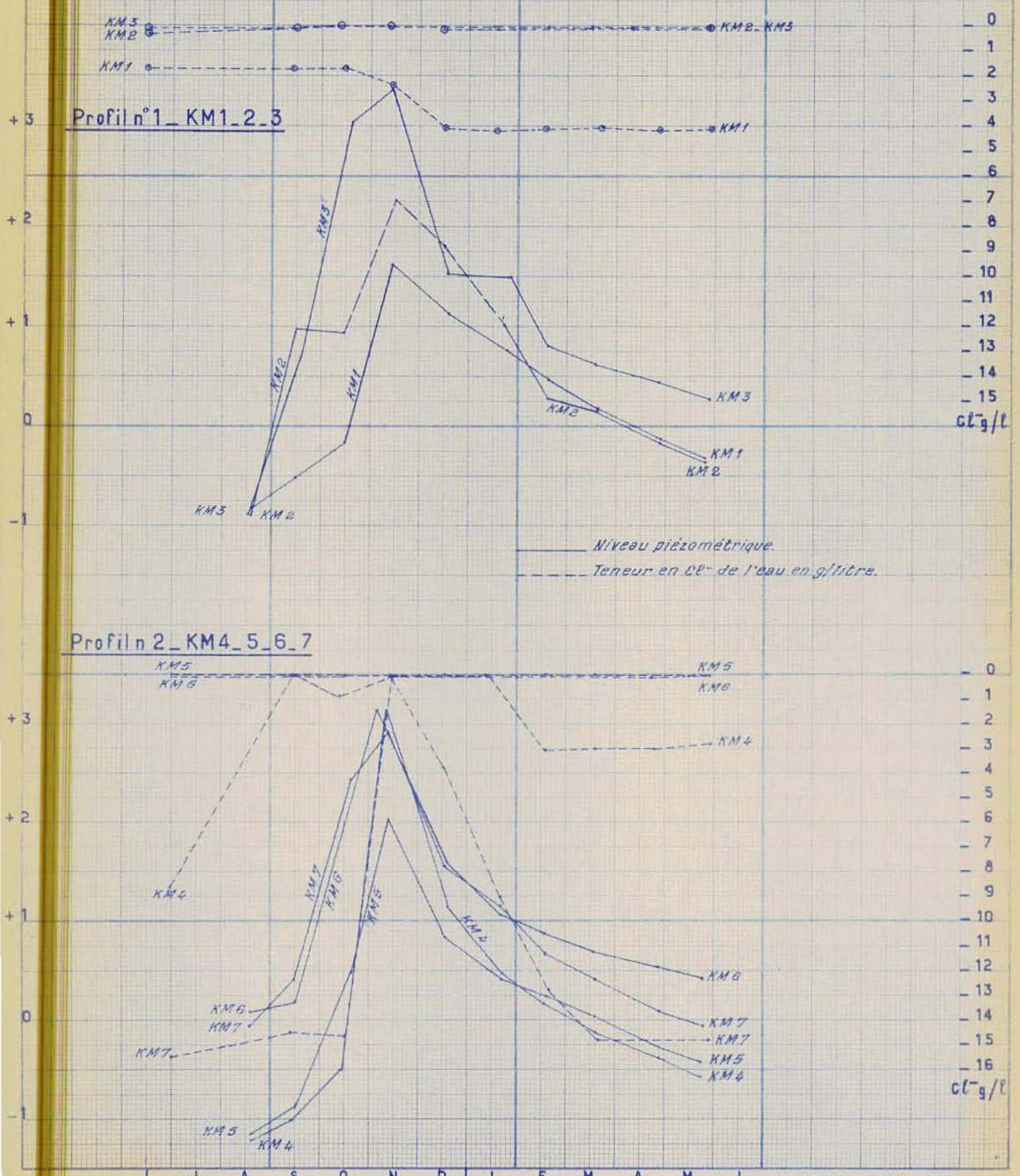
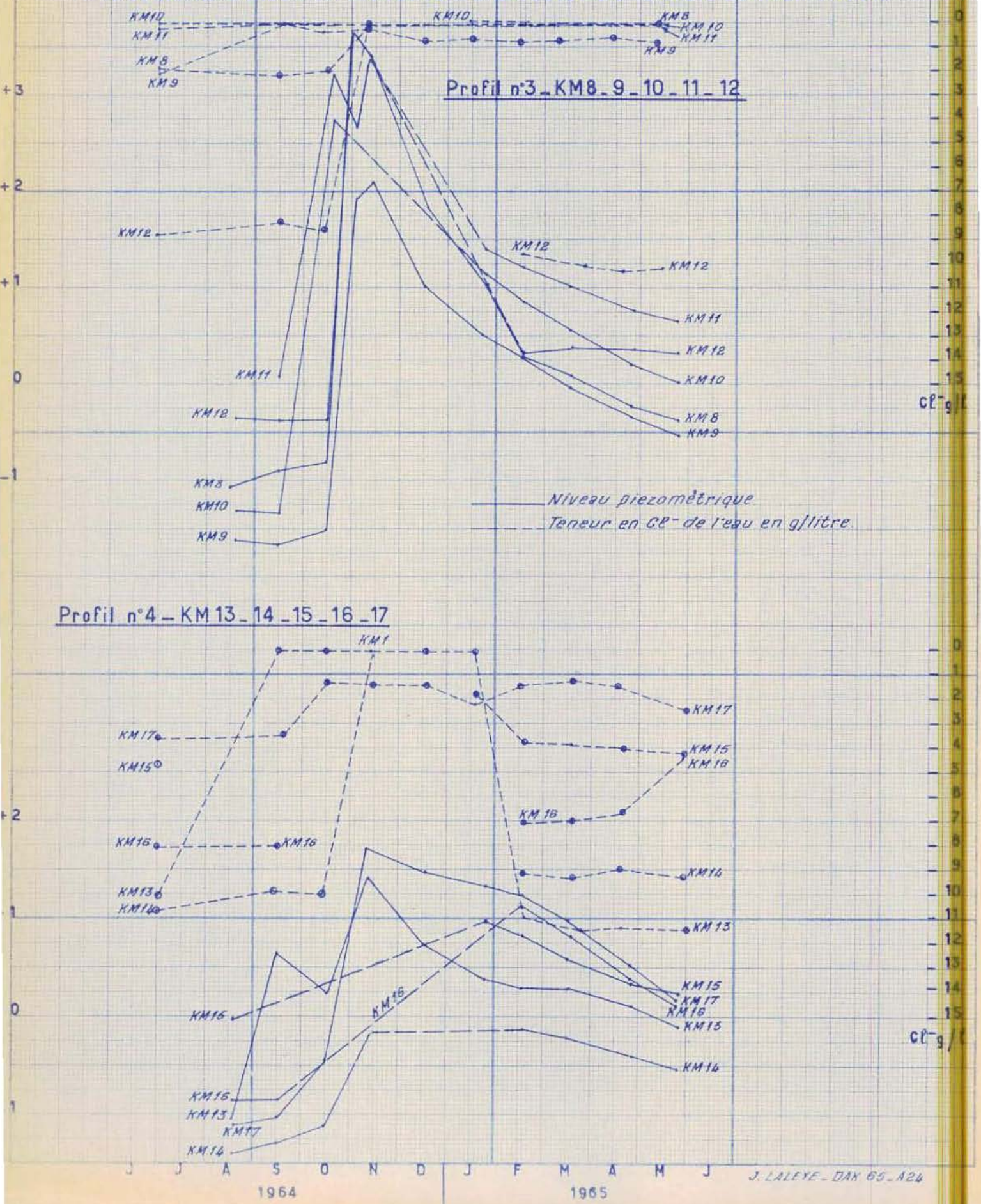
FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DE ROSSO



FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DE ROSSO



FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DE KEUR MADIKE



FLUCTUATIONS PIEZOMETRIQUES ET CHIMIQUES DU CASIER DE KEUR MADIKE