

LE "BOUCHON BARRAGE" DE KHEUNE : SON INFLUENCE
SUR LES EAUX DE NAPPE ALLUVIALE ET DU FLEUVE SÉNÉGAL
(CAMPAGNE - 1984)

J.L. SAOS - P. ZANTE

ORSTOM
(INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE
POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION)
CENTRE DE HANN B.P. 1385 - DAKAR (SÉNÉGAL)

S O M M A I R E

I	<u>INTRODUCTION</u>	4
II	<u>IMPLANTATION DU RESEAU DE PIEZOMETRE</u>	4
	1. Localisation	4
	2. Caractéristiques des piézomètres	6
	3. Nivellement	6
	4. Lithologie	8
	5. Caractéristiques de l'aquifère	11
III	<u>CAMPAGNE DE MESURE 1984</u>	12
	1. Variation des niveaux de la nappe	12
	2. Variation de la conductivité des nappes	17
	3. Variation du pH	20
	4. Chimie des eaux	21
	5. Evolution de la salinité des eaux du fleuve	26
	6. Variation des plans d'eau libre du barrage et du lac de Guiers	30
IV	<u>CONCLUSIONS</u>	32
	<u>ANNEXES</u>	33

- AVANT PROPOS -

Nous remercions vivement Mrs M.A. DIALLO et I. DIEME Pédologues à la SAED et leurs collaborateurs pour leur participation aux travaux de mise en place des piézomètres ainsi qu'aux prélèvements d'échantillons qu'ils ont effectués.

I INTRODUCTION

Sur le fleuve Sénégal, à 115 km de son embouchure, près du village de KHEUNE, un barrage en terre a été construit rapidement en Novembre 83 pour stopper l'invasion marine et rehausser le niveau d'eau douce en amont, afin de permettre une réalimentation du lac de Guiers. (Fig. 1)

En créant une différence de niveau entre l'aval et l'amont, et en empêchant le mélange des eaux fluviales et des eaux marines, ce barrage nous apporte l'occasion exceptionnelle d'aborder l'étude du mécanisme des échanges entre le fleuve et la nappe alluviale avant la mise en service du barrage de Diama.

Dans le cadre d'un Protocole d'étude entre l'ORSTOM et la SAED, nous avons décidé d'implanter un réseau de 10 piézomètres sur le site de Kheune afin de pouvoir suivre les variations dynamiques de la nappe alluviale.

II IMPLANTATION DU RESEAU

Deux séries de 5 piézomètres ont été implantées de part et d'autre du barrage sur la rive sénégalaise suivant des directions perpendiculaires aux rives du fleuve, à l'extérieur de la zone perturbée par le chantier de construction ; pour les deux lignes, 3 piézomètres sont implantés entre le fleuve et la digue de protection et 2 au delà de la digue ; les quatre piézomètres les plus proches du fleuve sont implantés sur des sols peu évolués d'apport hydromorphe, les derniers sont implantés dans des cuvettes de décantation aux sols halomorphes salins. (Carte et Rapport SEDAGRI - FAO 1973)

1. Localisation :

a) piézomètres amont

Situés à 600 m à l'amont du barrage

numérotation : PAM

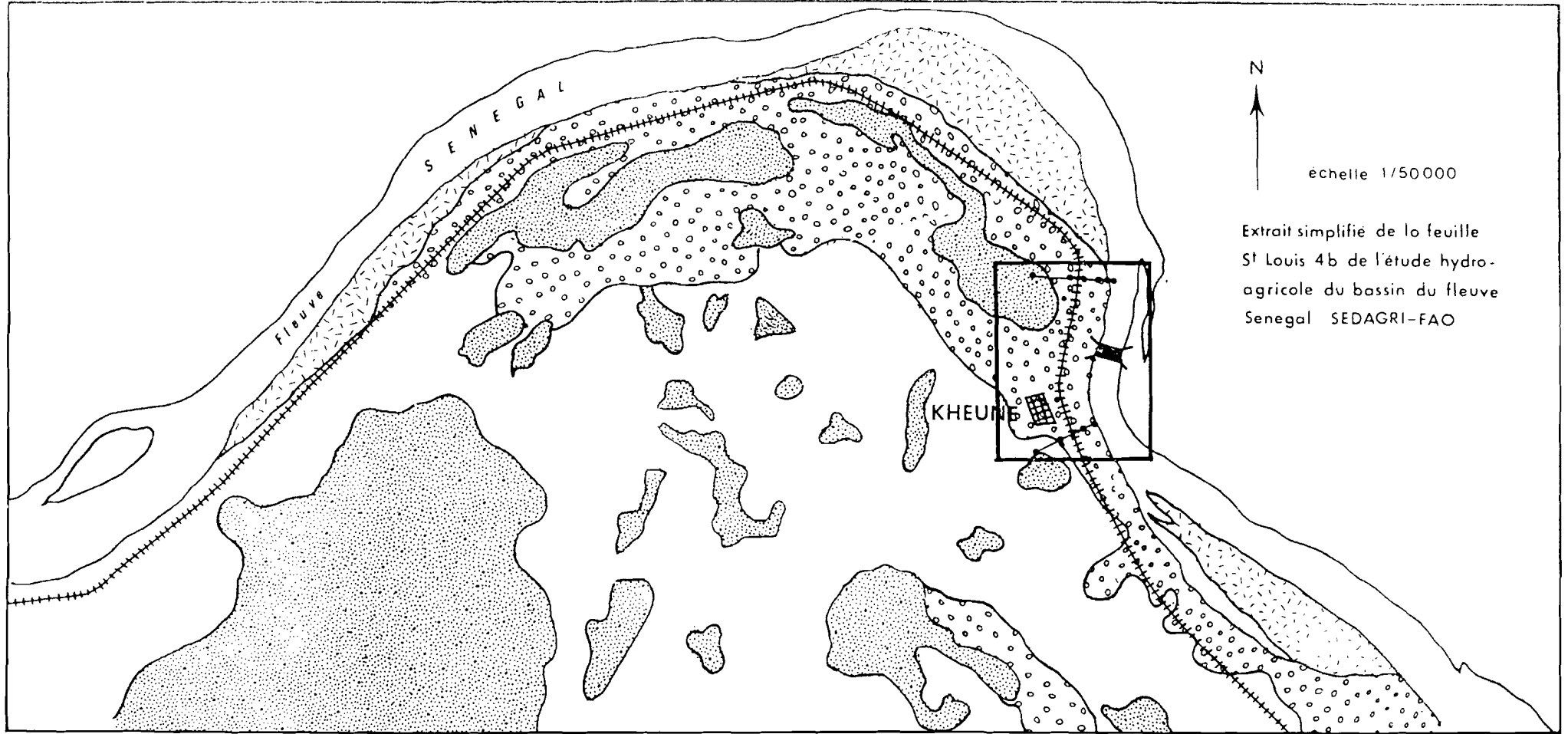
PAM 1 sur la berge du fleuve

PAM 2 à 30 m de PAM 1

PAM 3 à 150 m "

PAM 4 à 330 m "

PAM 5 à 550 m "



N
 échelle 1/50000
 Extrait simplifié de la feuille
 St Louis 4b de l'étude hydro-
 agricole du bassin du fleuve
 Senegal SEDAGRI-FAO

LEGENDE :

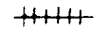



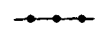




- | | | | |
|---|----------------------|---|--|
|  | Digue |  | Sols peu évolués d'apport hydromorphes
(Hautes levées, fluvio deltaïque haut) |
|  | Barrage |  | Sols halomorphes, salins, non différenciés
(fluvio deltaïque) |
|  | Ligne de piezomètres |  | Sols halomorphes, salins, peu acides
(Cuvettes de décantation) |
|  | Village |  | Association de sols à pseudogley, à gley salé et
salins acidifiés (levées subactuelles) |
|  | Détail en figure n°3 | | |

Fig. 2 Localisation des piezomètres et types de sols

b) piézomètres aval

Situés à 600 m à l'aval du barrage

numérotation : PAV

PAV 1 sur la berge du fleuve

PAV 2 à 30 m de PAV 1

PAV 3 à 150 m "

PAV 4 à 370 m "

PAV 5 à 710 m "

2. Caractéristiques des piézomètres

Les forages ont été faits à la tarière de 80 mm de diamètre, jusqu'à 5 m de profondeur.

Les tubes sont en acier galvanisé de 3" de diamètre, de 6 m de longueur, fileté à l'extrémité supérieure.

PAM 1	base du tube à 3,85 m	hors sol	1,10 m	crépine	2 m
PAM 2	5,04		0,96		3
PAM 3	5,00		1,00		3
PAM 4	5,10		0,90		3
PAM 5	5,10		0,90		3
PAV 1	4,00		1,00		2
PAV 2	4,57		1,43		3
PAV 3	3,50		1,00		1,5
PAV 4	5,00		1,00		3
PAV 5	5, 00		1,00		3

3. Nivellement

Le nivellement de l'ensemble du réseau a été fait en prenant pour référence le 0 de l'échelle du barrage.

PAM 1	+	2,892 m	PAV 1	+	2,735 m
PAM 2	+	3,635 m	PAV 2	+	3,296 m
PAM 3	+	3,361 m	PAV 3	+	3,625 m
PAM 4	+	3,046 m	PAV 4	+	2,772 m
PAM 5	+	2,735 m	PAV 5	+	2,636 m

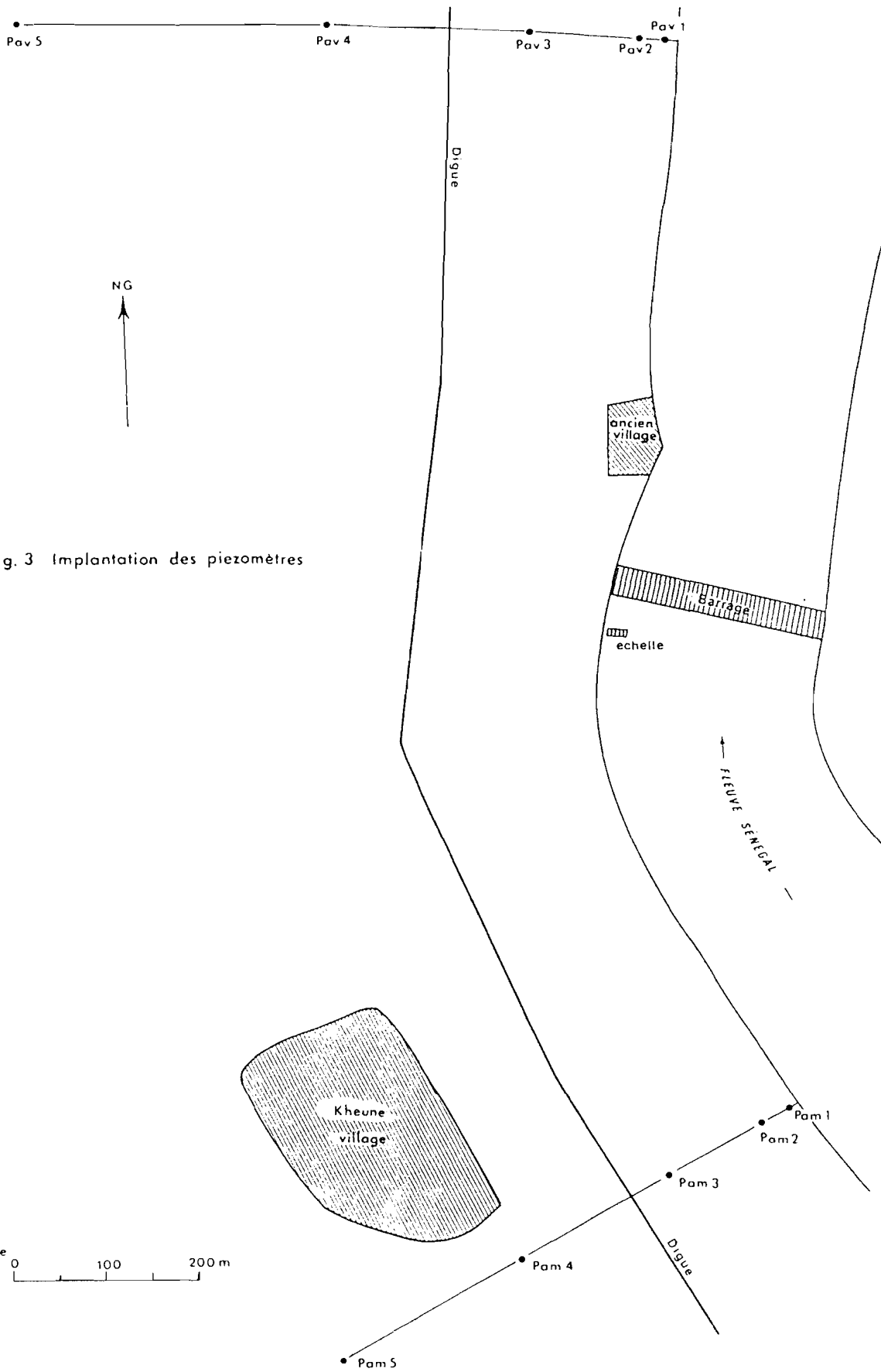


Fig. 3 Implantation des piezomètres

4. Lithologie

Les formations rencontrées sont essentiellement limoneuses :
limon argileux, limon sableux, sable limoneux. (Fig. 4)

PAM 1

0 - 50 cm limoneux
50 - 140 limon argileux avec débris de racines, matière organique
140 - 180 sable fin bariolé
180 - 200 sable gris
200 - 400 sable très fin vaseux, gris noir

PAM 2

0 - 70 cm sable limoneux
70 - 240 argile noire
240 - 340 gley gris bleuté
340 - 380 sable fin bleuté
380 - 500 débris de végétaux odeur H₂S

PAM 3

0 - 120 cm limon argileux
120 - 200 limon bariolé
200 - 500 sable vaseux noir à débris de végétaux

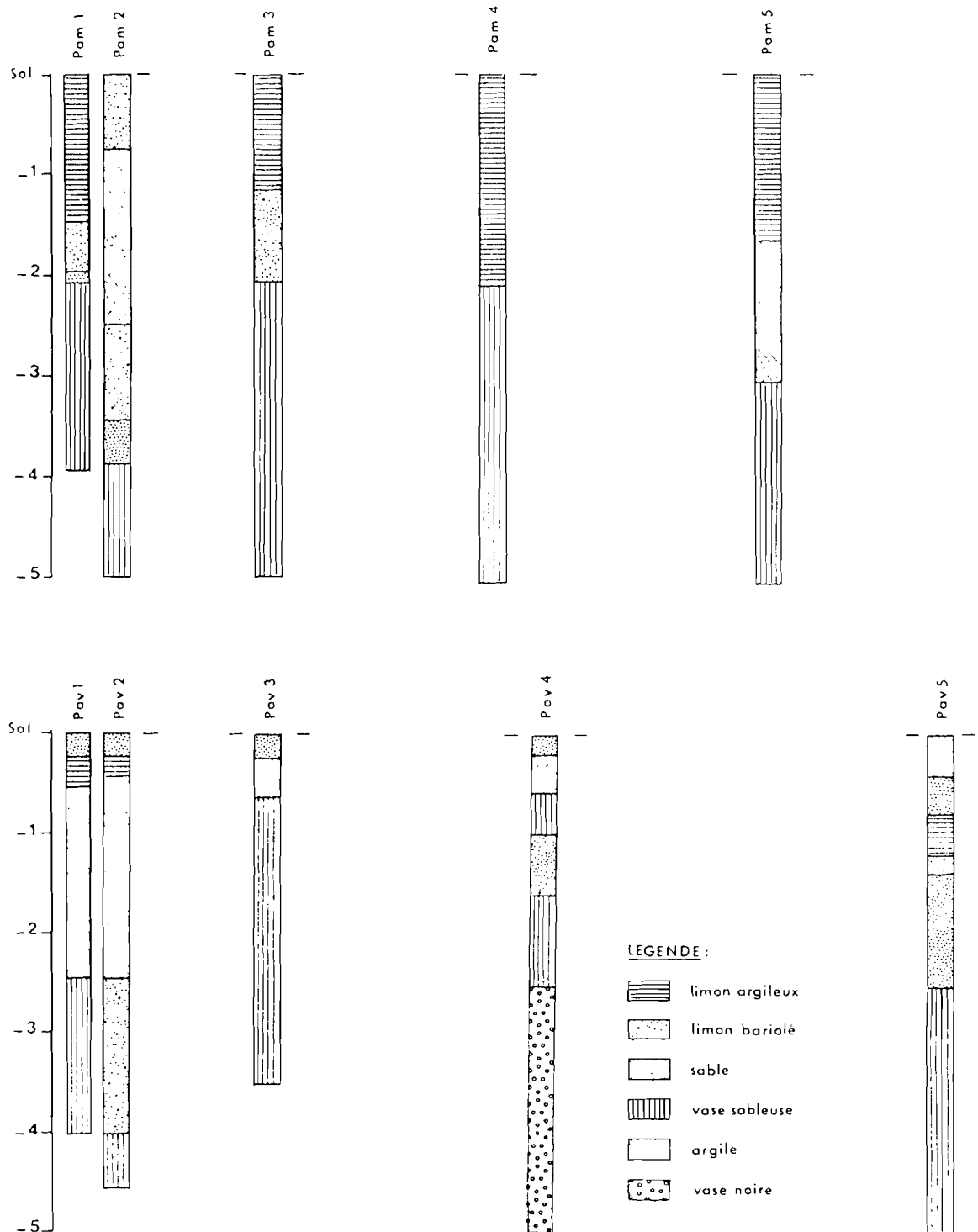
PAM 4

0 - 50 cm limoneux
50 - 200 limon argileux
200 - 500 sable vaseux noir

PAM 5

0 - 160 cm limon argileux
160 - 200 argile tachetée rouge ocre
200 - 300 taches de jarosite
300 - 500 sables vaseux bleu-noir

Fig. 4 _Lithologie au niveau des piezomètres



<u>PAV 1</u>	0 - 20	sable
	20 - 50	limon sablo-argileux
	50 - 180	limon argileux
	180 - 240	limon argileux humide
	240 - 400	sable vaseux
<u>PAV 2</u>	0 - 05	croûte saline
	05 - 20	sable éolien
	20 - 40	limon argilo-sableux
	40 - 240	limon sablo-argileux
	240 - 400	vase limoneuse gris foncé
	400 - 500	vase sableuse gris vert
<u>PAV 3</u>	0 - 20	sable éolien
	20 - 60	limon argileux
	60 - 350	sable fin
<u>PAV 4</u>	0 - 20	sable limoneux
	20 - 60	argile
	60 - 100	limon argileux
	100 - 160	limon sableux
	160 - 250	limon sableux humide
	250 - 500	vase noire
<u>PAV 5</u>	0 - 40	argile
	40 - 80	sable
	80 - 120	limon argilo-sableux
	120 - 140	sable fin blanc avec taches rouille
	140 - 250	sable rouille et jaune, humide
	250 - 500	sable vaseux gris foncé

5. Caractéristiques de l'aquifère

Les formations lithologiques rencontrées montrent un aquifère assez médiocre, et très hétérogène.

Les principales caractéristiques ne sont pas connues. On peut cependant, en se référant aux études menées par M. ILLY sur un secteur situé plus en amont, avancer des chiffres de l'ordre 10^{-3} m/s pour la transmissivité, 0,1 pour le coefficient d'emménagement.

Le niveau de la nappe est situé entre 2 m et 3 m sous le niveau du sol, sauf aux piézomètres PAM 1 et PAV 1 proches du fleuve (1 m à 1,5 m).

III CAMPAGNE DE MESURES 1984

1. Variation des niveaux de la nappe :

La comparaison des fig. 5 et 6 montre le comportement des nappes à l'aval et à l'amont du barrage.

- à l'aval, les niveaux mesurés dans les piézomètres font apparaître une pente constante de la surface de la nappe, ce qui indique que l'écoulement s'effectue en permanence de P1 à P5, c'est à dire du fleuve vers le piézomètre le plus éloigné de la rive. On enregistre simplement des variations de niveau relativement semblables dans tous les piézomètres.

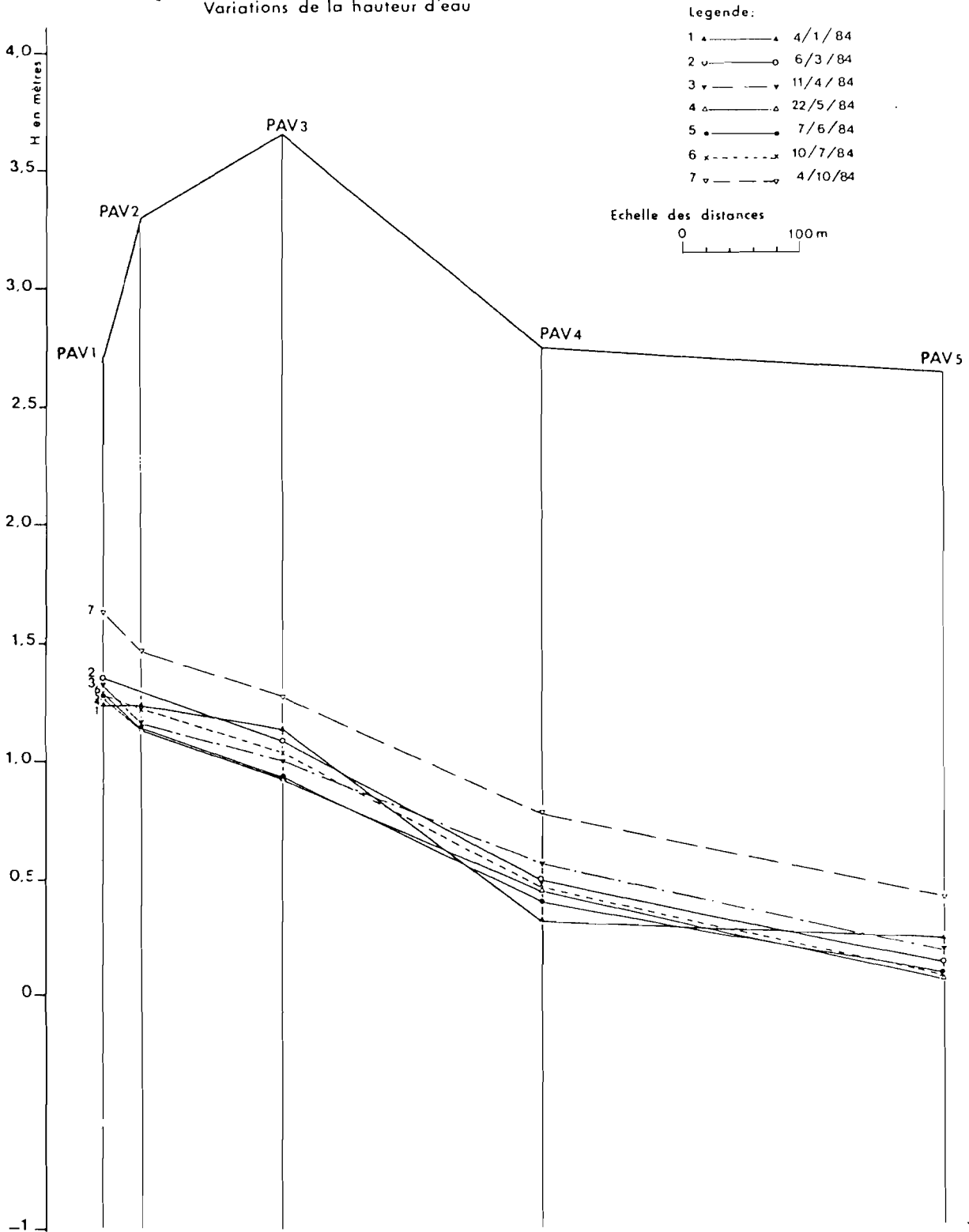
- à l'amont, par contre, on assiste à des changements de pente ; le sens de l'écoulement souterrain s'inverse à certaines époques de l'année au niveau de certains piézomètres. Jusqu'au 6/03/84, la circulation s'est fait de P1 à P4 et de P5 à P4, puis, entre le 6/3 et le 11/4, on assiste au début de l'inversion du sens de l'écoulement, d'abord de P2 à P1, puis entre le 22/5 et le 7/6 de P3 à P2 à P1.

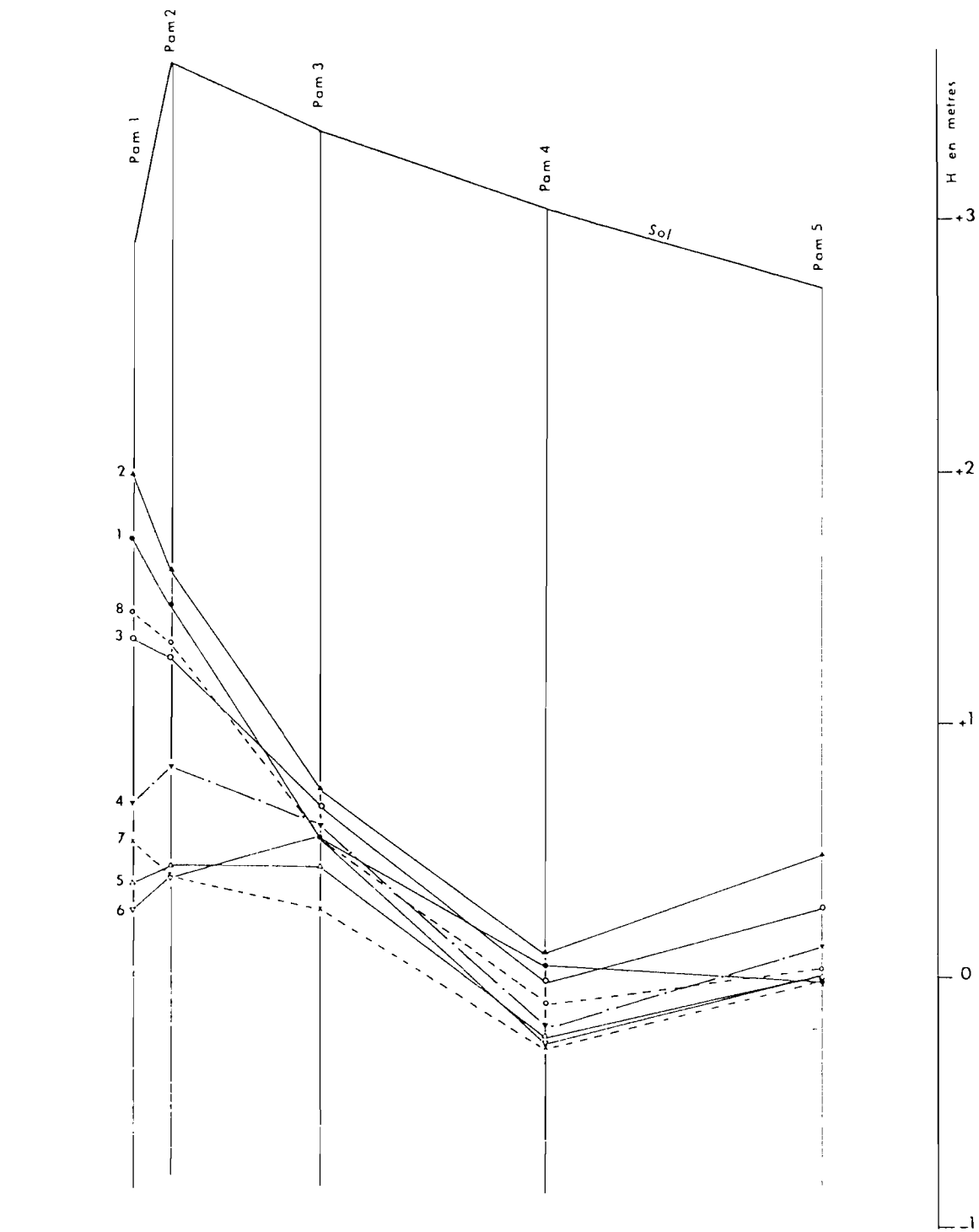
L'inversion du sens de l'écoulement de la nappe ne se fait que jusqu'en P3, c'est à dire à 150 m de la rive du fleuve.

L'examen du graphique 7 sur lequel est reportée la variation du niveau du fleuve au cours de la période de mesure, montre que l'écoulement des nappes vers le fleuve commence mi-mars, alors que le fleuve atteint la côte zéro, et s'amplifie à mesure que le niveau du fleuve baisse pour atteindre un maximum d'intensité en mai-juin alors que le fleuve est à son niveau le plus bas. Dès l'arrivée de la crue, la circulation se rétablit dans le sens fleuve-nappes.

La comparaison des fig. 7 et 8 montre qu'au niveau des piézomètres 1, 2, 3 une circulation d'eau est possible de l'aval vers l'amont du barrage entre le 15 mars et le 15 septembre, leur cote des niveaux statiques aval supérieur étant supérieure à celle de tous les piézomètres amont. La circulation est également théoriquement possible de l'aval vers l'amont pour les nappes situées au niveau des piézomètres 4 et 5 aval vers les 4 et 5 amont.

Fig. 5 Piezomètres aval:
Variations de la hauteur d'eau





Echelle des distances
 0 100m

- Légende:
- 1 —●— 29 \ 12 \ 83
 - 2 —▲— 4 \ 1 \ 84
 - 3 —○— 6 \ 3 \ 84
 - 4 —▼— 11 \ 4 \ 84
 - 5 —△— 22 \ 5 \ 84
 - 6 —◇— 7 \ 6 \ 84
 - 7 —×— 10 \ 7 \ 84
 - 8 —○— 4 \ 10 \ 84

Fig.6 Piezomètres amont:
 Variations de la hauteur d'eau

Fig. 7 - KHEUNE - Variation du niveau de la nappe
Piezomètres amont (1984)

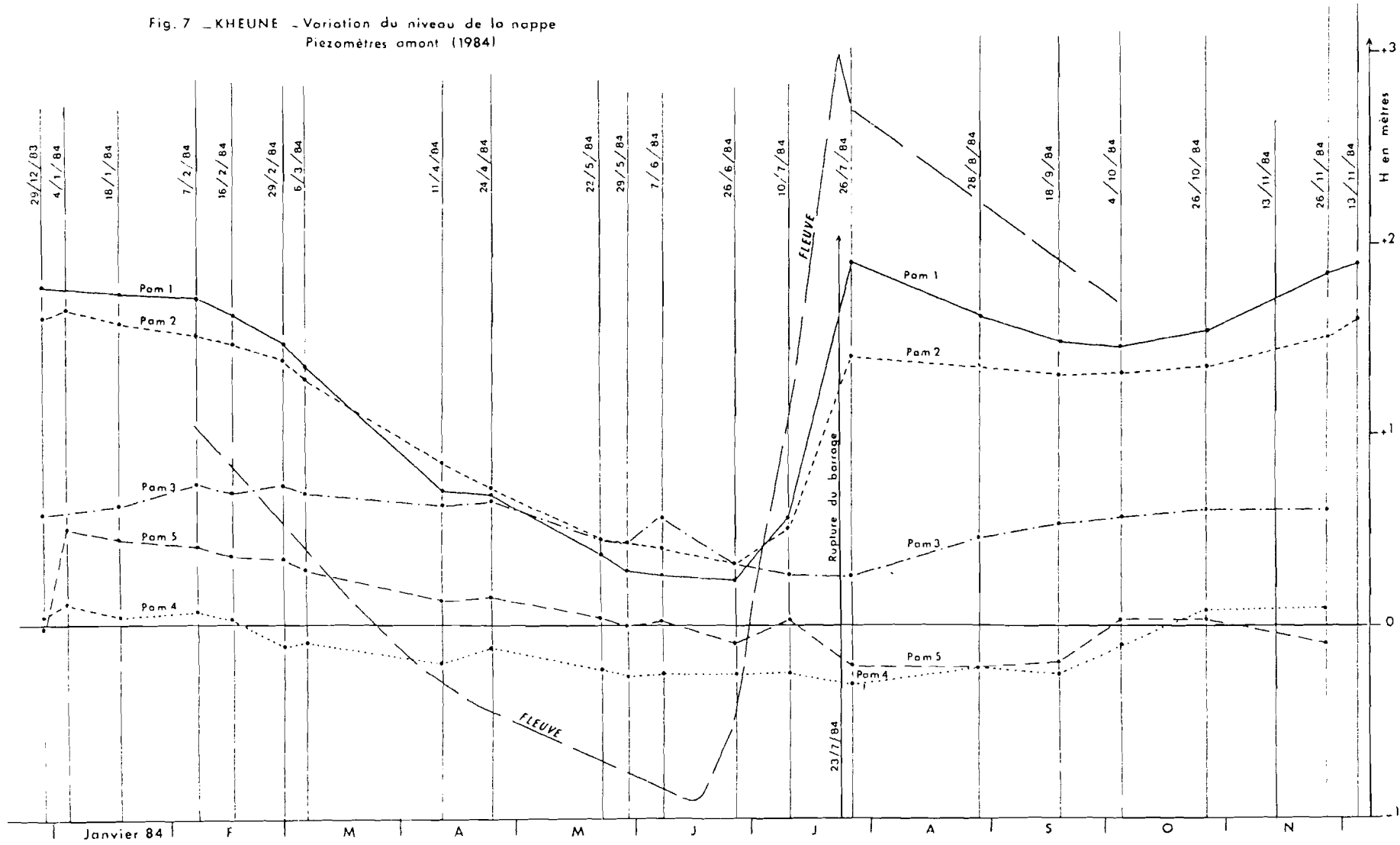
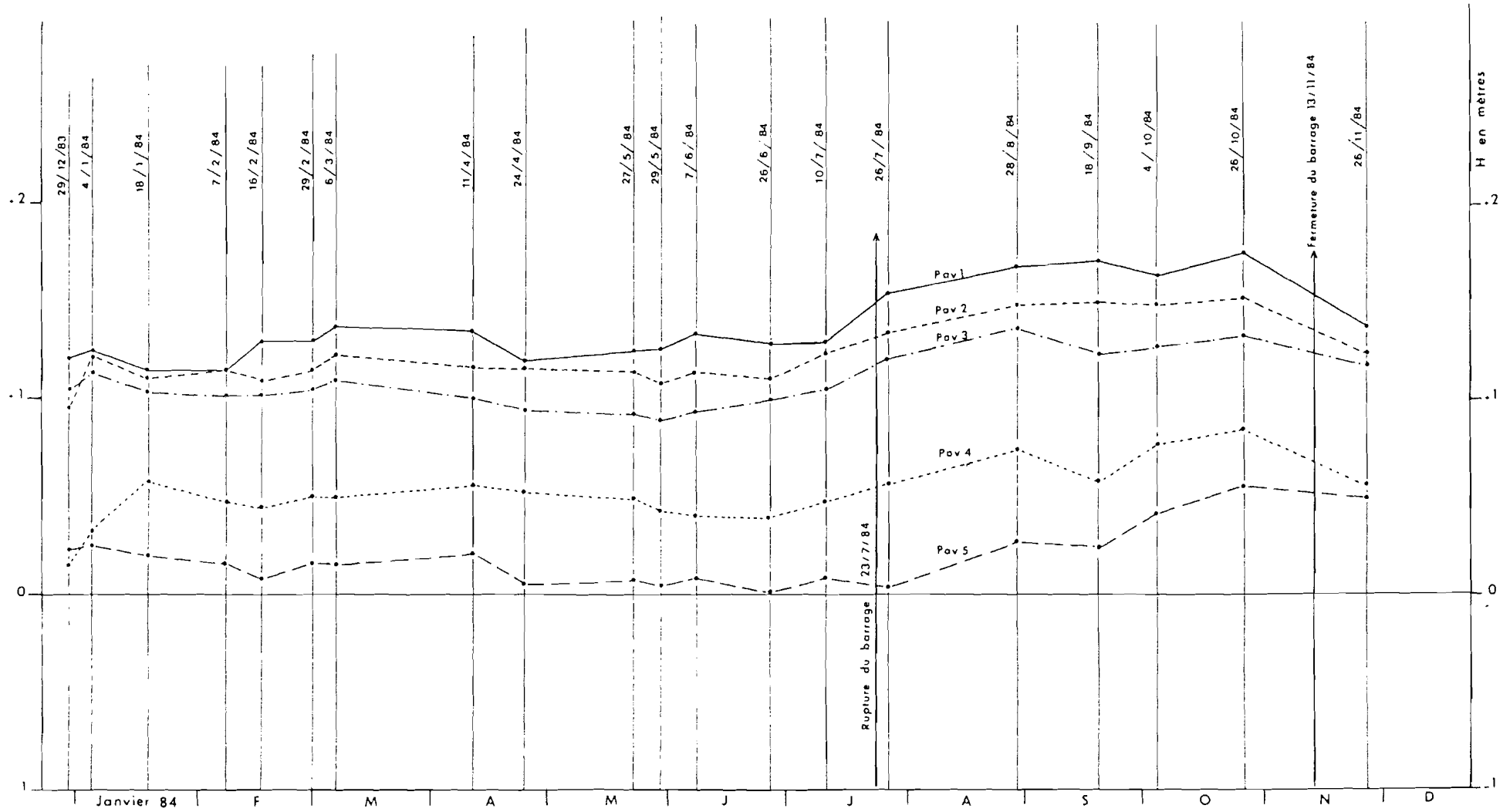


Fig. 8_KHEUNE_Variation du niveau de la nappe
Piezomètres aval (1984)



2. Variation de la conductivité des nappes

L'évolution de la conductivité des nappes est représentée figures 9 et 10.

A l'amont, (fig. 9), la conductivité varie peu au cours de l'année pour l'ensemble des piézomètres. On distingue deux zones essentielles de salure : P1 P2 et P5 autour de 25 mS cm^{-1} et autour de 60 mS pour P3 et P4. La rupture du barrage et la saison des pluies ne semblent pas influencer le niveau de salure des nappes avant fin septembre sauf pour P5, situé dans la cuvette de décantation, dont la salinité diminue dès fin août.

Les variations de conductivité enregistrées pour chacun des piézomètres sont peu importantes : P1 a une augmentation lente et continue jusqu'à la rupture du barrage, même chose pour P5 mais jusqu'à fin août. Par contre, en P2, la conductivité diminue régulièrement de mars à la rupture du barrage et se stabilise ensuite à la même valeur que P1.

P4 présente une conductivité minimale en avril-mai, puis elle remonte légèrement en fin de saison sèche.

P3 présente un profil plus irrégulier, notamment le 11 avril, qui paraît être une valeur aberrante.

La conductivité de l'eau dans le fleuve, en amont du barrage, croît légèrement de décembre à juillet d'une valeur de $0,91$ à $1,38 \text{ mS cm}^{-1}$; l'apport de la nappe et l'évaporation pourraient être responsables de cette variation.

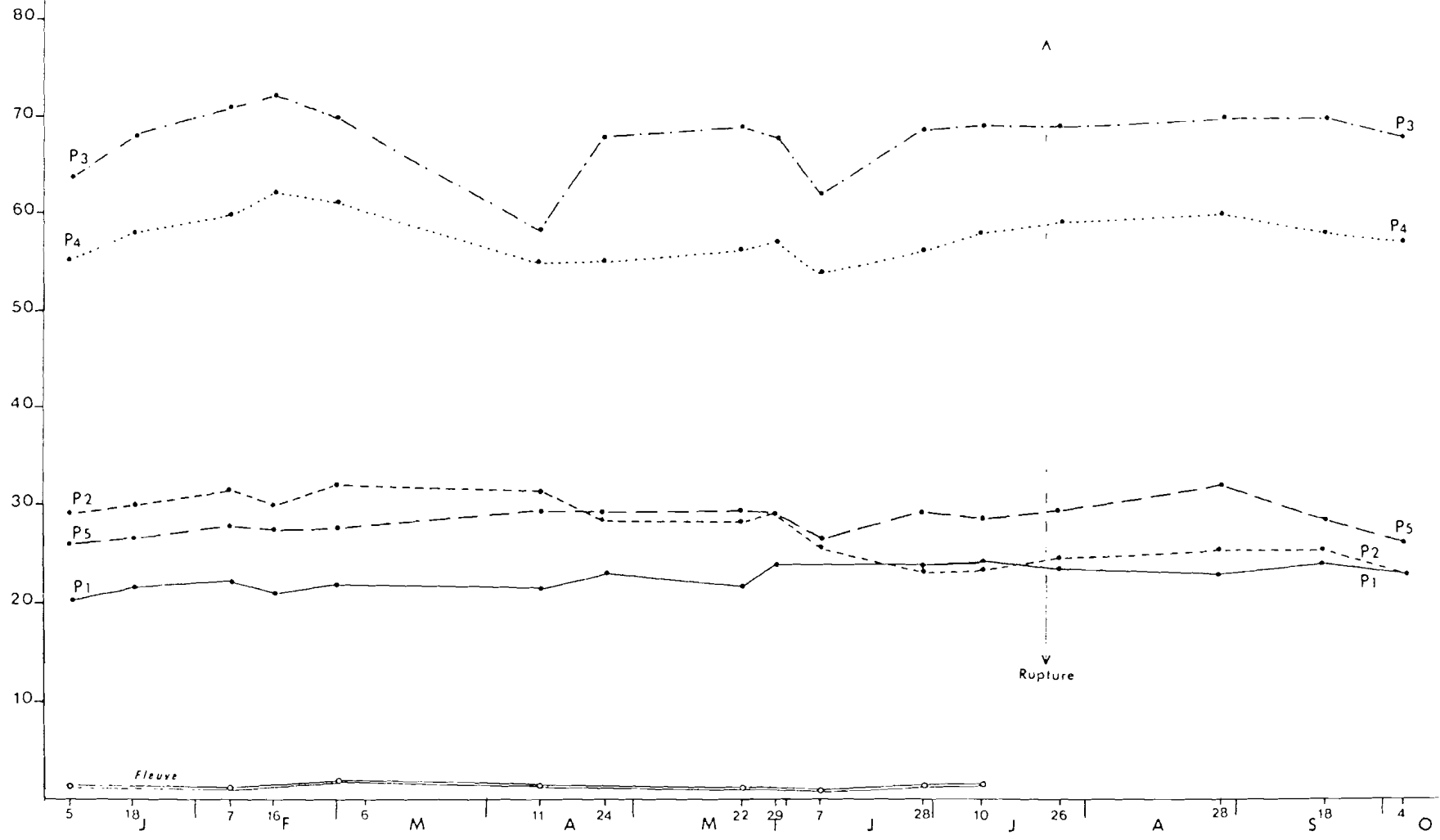
A l'aval, (fig. 10), la situation est sensiblement différente. Les courbes de conductivité de P3 et P5 suivent assez bien celle de l'eau du fleuve : augmentation lente et régulière de la conductivité jusqu'en avril puis stabilisation jusqu'à la rupture du barrage.

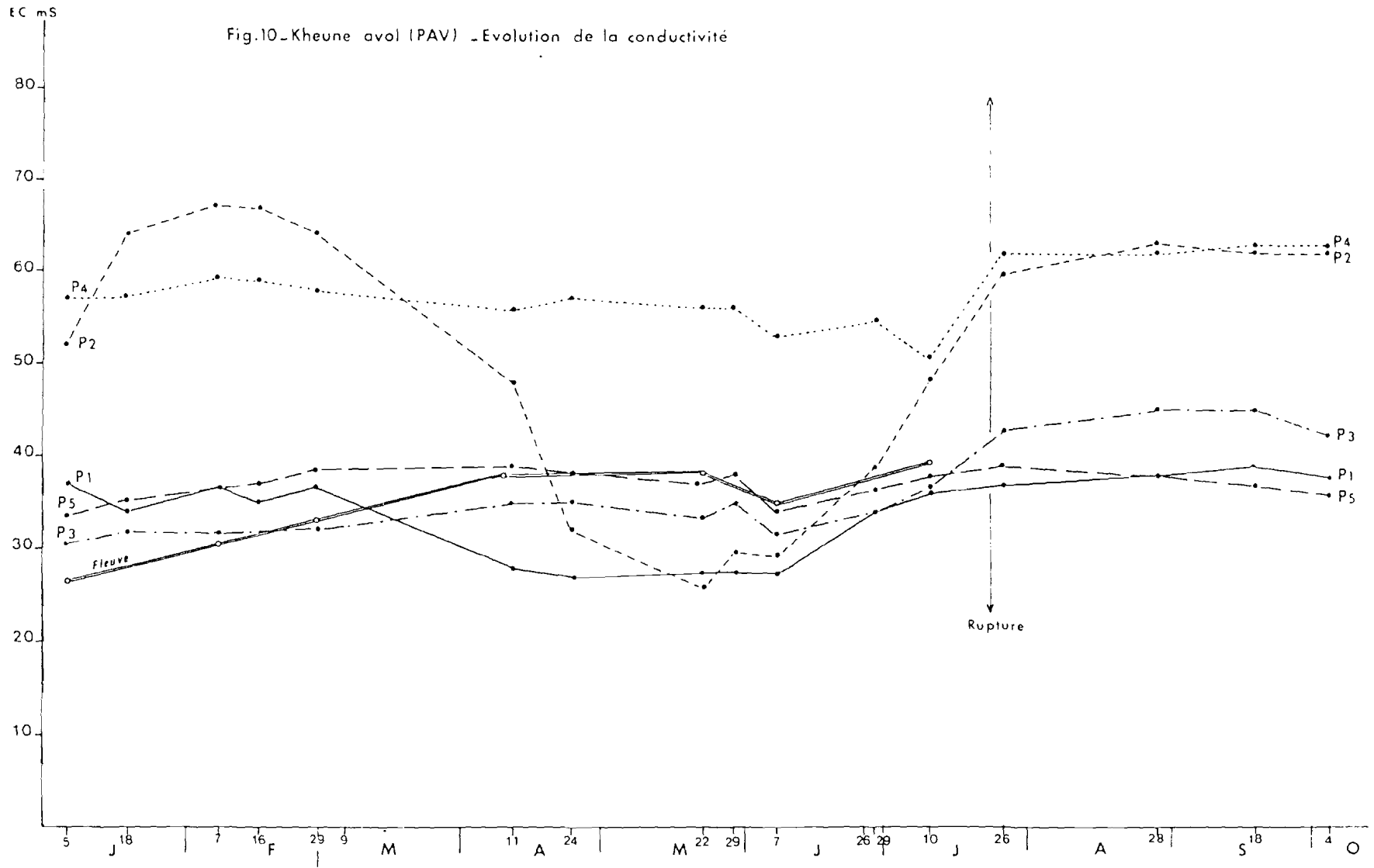
Les piézomètres P1 et surtout P2 montrent par contre une baisse de la salinité à partir de début mars, jusqu'à fin mai, celle-ci atteint même des valeurs inférieures à celle du fleuve, puis remonte à partir de juin et se stabilise après la rupture du barrage. Le dispositif mis en place et les mesures effectuées ne permettent pas d'éclaircir ce comportement. Le sens d'écoulement donné par les niveaux piézométriques permet d'envisager un apport d'eau du fleuve mais cette hypothèse est contredite par la sursalure du fleuve par rapport aux nappes et cette hypothèse n'expliquerait pas la remontée de la salure dans les nappes à partir de juin.

Une solution possible serait d'envisager un apport d'eau douce longitudinal venant des lentilles des sols du méandre situé à l'aval, mais ceci reste à démontrer.

EC mS

Fig. 9 -Kheune amont (PAM) -Evolution de la conductivité





Dès l'arrivée des pluies, on constate une augmentation de la conductivité sur l'ensemble des piézomètres, cela peut s'expliquer par la présence de croûtes de sel en surface ou des niveaux très salés dans le sol. L'eau de pluie, en s'infiltrant, se charge très fortement et c'est une eau très minéralisée qui vient réalimenter la nappe. L'augmentation de la conductivité se fait parallèlement à l'élévation du niveau de la nappe.

3. Variations du pH :

TABLEAU N° 1 : Variations du pH dans le Fleuve amont et aval du barrage
(FAM - FAV) et dans les piézomètres.

	DATE	FAM	PAM 1	PAM 2	PAM 3	PAM 4	PAM 5	FAV	PAV 1	PAV 2	PAV 3	PAV 4	PAV 5
	27/12/83	6,8	5,6	6,2	4,9	4,5	3,1	7,2	7,2	7,3	8,0	7,2	6,9
	29/02/84	7,5	3,4	3,2	2,5	2,9	2,7	7,5	4,6	3,3	3,8	3,6	2,6
	11/04/84	7,5	3,6	1,9	2,3	1,8	1,8	7,4	6,5	1,8	1,7	2,1	2,1
	07/06/84	7,5	-	1,8	2,0	1,9	1,9	7,9	7,8	2,0	1,8	2,1	2,1
in situ	11/01/84	7,6	6,7	6,5	6,3	6,4	6,9	8,1	6,9	6,7	6,3	6,6	6,5

L'examen du Tableau ci-dessus montre d'une part la constance du pH dans les eaux du fleuve à l'amont et à l'aval de la retenue, d'autre part la nature très acide des eaux des nappes, sauf pour le piézomètre aval en bordure du fleuve (PAV 1). Ces résultats ont été obtenus en laboratoire, plusieurs jours après les prélèvements. Leur comparaison à une mesure faite "in situ", lors du prélèvement des échantillons montre que pour les eaux du fleuve il n'y a pas de différence entre les deux mesures. Par contre les eaux de nappe ont des pH "in situ" beaucoup plus élevés, tout en restant légèrement acides.

Cette évolution dans le temps des échantillons prélevés vers une forte acidité témoigne de la présence de soufre (pyrite) dans les sols (anciens sols de mangroves) qui par oxydation au contact de l'air libère des ions SO_4^{--} et H^+ et provoque une chute du pH, ce qui rend ces eaux de nappe, par ailleurs salées, impropres à l'irrigation.

4. Chimie des eau

4.1. Les eaux du Fleuve

Les Tableaux ci-dessous permettent de comparer l'évolution de la qualité des eaux en différents sites caractéristiques du fleuve et par rapport à l'eau de mer.

Dagana, situé à environ 70 km à l'amont du barrage, représente une eau douce en période de crue du fleuve (cf tableau n° 2).

On constate que l'eau située juste à l'amont de la retenue est nettement plus salée que l'eau normale de crue, environ 20 fois plus ; ceci est dû au fait que lors de la fermeture du barrage, la langue salée était déjà nettement remontée à l'amont du site du barrage.

Par contre, l'eau saumâtre située à l'aval du barrage, reste moins salée que l'eau de mer, même en fin de saison sèche.

Tableau n° 2 Composition chimique moyenne à Dagana en mg/l

Cl^-	SO_4^{--}	HCO_3^-	Ca^{++}	ng^{++}	K^+	Na^+	Charge Totale
1,8	4,3	18,3	2,6	3,3	1,9	1,6	33,8

Tableau n° 3 Analyses chimiques des eaux du fleuve en amont du barrage de Kheune en mg/l

DATE	Cl^-	SO_4^{--}	HCO_3^-	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+	Na^+	Charge Totale
29/12/83	308,41	24,5	24,40	14,8	13,1	9,38	174,26	544,2
29/02/84	322,60	41,3	31,72	12,4	22,0	12,12	180,93	623
11/04/84	345,64	49,5	34,77	15,0	21,2	14,85	194,04	674,8
07/06/84	365,13	49,5	39,05	16,2	23,6	15,64	217,03	726

Tableau N° 4 Analyses chimiques des eaux en aval du barrage
(bief maritime) en mg/l.

DATE	Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Charge Totale
29/12/83	9287,9	1275,7	81,1	200,4	619,6	146,6	5057,8	16679
29/02/84	11875,8	1744,9	109,8	162,7	777,6	227,1	7184,4	22082,1
11/04/84	14180,0	1906,8	108,6	260,5	920,3	304,9	7989,0	25670
07/06/84	14463,6	2151,7	102,5	300,6	1001,3	304,9	4023	22345,8

Tableau N° 5 Composition chimique moyenne d'une eau de mer en mg/l

Cl ⁻	SO ₄ ⁻⁻	HCO ₃ ⁻	Ca ⁺⁺	ng ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Charge Totale
19677	2726	145	416	1312	391	10929	35595

L'examen des Tableaux présentant les principaux rapports caractéristiques des eaux (Tableaux 6 à 9) montre que les eaux aval du barrage sont très proches de l'eau de mer et que les eaux amont ont les mêmes rapports Cl⁺/Na ; des rapports Cl⁺/SO₄ différents le 29/12/83, peu après la fermeture du barrage mais qui sont ensuite identiques à ceux de l'eau de mer et à ceux de l'eau à l'aval du barrage. Les remaniements de terre, apportée par décapage des sols environnant le site du barrage, pourraient expliquer les résultats analytiques du 29/12/83.

Ces Tableaux confirment la parenté des eaux de l'amont du barrage avec l'eau de mer et leur différence avec l'eau douce de crue représentée par le site de Dagana.

L'eau retenue à l'amont du barrage est de l'eau de mer diluée, le barrage ayant été fermé alors qu'une importante quantité d'eau de mer était déjà remontée à l'amont du site.

Tableau n° 6 Rapports caractéristiques des eaux du Fleuve à Dagana (mé/l)

$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$	Cl^-/Na^+	$\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$	Na^+/K^+	$(\text{Na}^+ + \text{K}^+)/(\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++})$
0,4	0,6	1,1	1,4	0,4

Tableau n° 7 Rapports caractéristiques des eaux du Fleuve à l'amont du Barrage (mé/l)

DATE	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$	Cl^-/Na^+	$\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$	Na^+/K^+	$(\text{Na} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg})$
29/12/83	17,0	1,1	1,5	31,6	4,3
29/02/84	10,6	1,1	2,9	25,4	3,3
11/04/84	9,5	1,1	2,3	22,2	3,5
07/06/84	10,0	1,1	2,4	23,6	3,6

Tableau n° 8 Rapports caractéristiques des eaux du Fleuve à l'aval du Barrage (mé/l)

DATE	$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$	Cl^-/Na^+	$\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$	Na/K^+	$(\text{Na} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg})$
29/12/83	9,9	1,2	5,1	58,7	3,7
29/02/84	9,2	1,1	7,9	53,8	4,4
11/04/84	10,1	1,1	5,8	44,5	4,0
07/06/84	9,1	-	5,5	-	-

Tableau n° 9 Rapports caractéristiques de l'eau de mer (mé/l)

$\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$	Cl^-/Na^+	$\text{Mg}^{++}/\text{Ca}^{++}$	Na^-/K^+	$(\text{Na} + \text{K})/(\text{Ca} + \text{Mg})$
9,7	1,2	5,2	47,5	3,8

4.2. Les eaux souterraines :

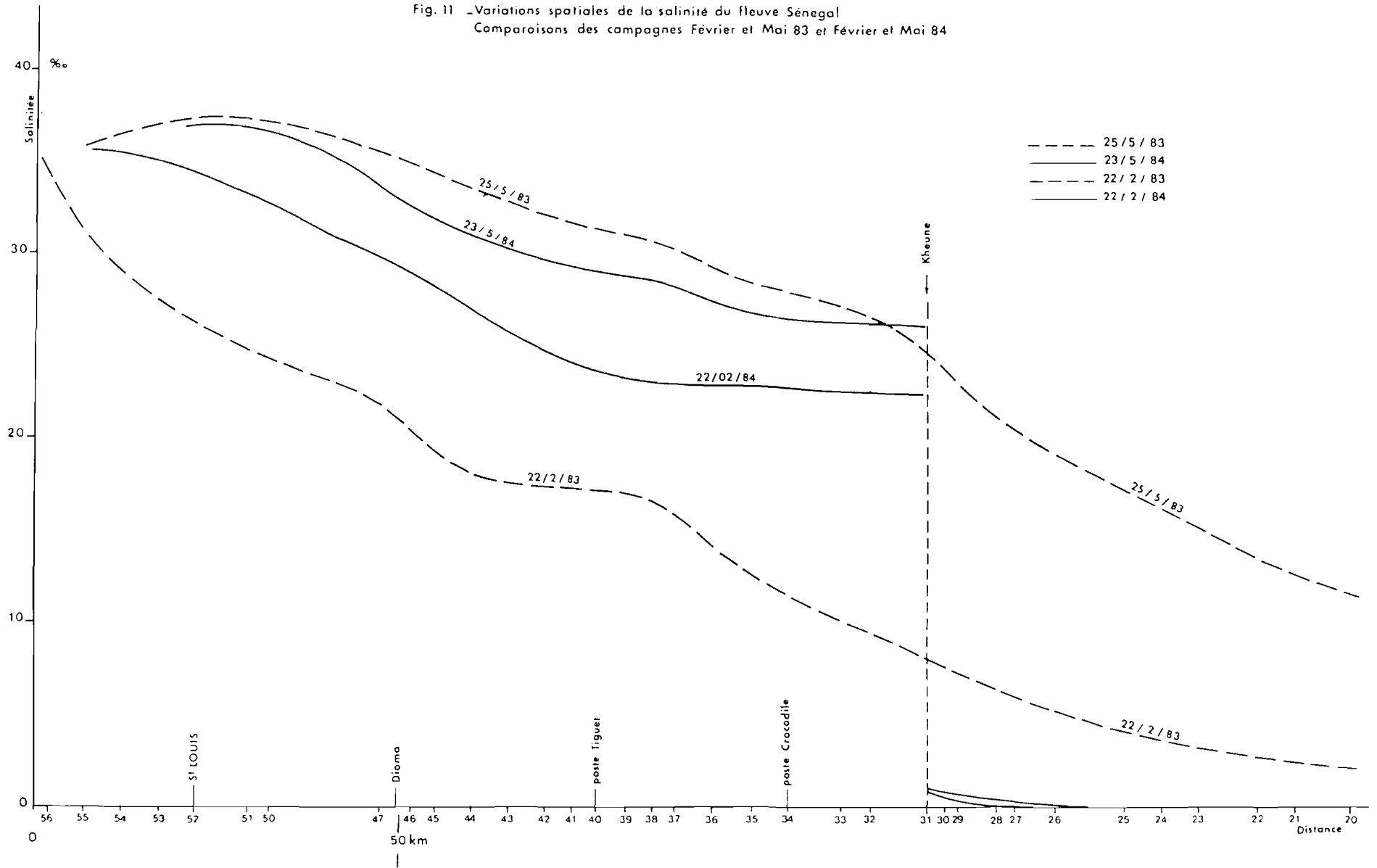
Les eaux souterraines sont très minéralisées, et toutes chlorurées sodiques.

Les tableaux III et IV en annexe présentent les résultats des analyses effectuées sur les eaux prélevées le 28/12/83, le 29/02/84, le 11/04/84 et le 07/06/84, en milli-équivalents par litre et en milligrammes par litre.

L'étude du comportement des ions majeurs montre une certaine hétérogénéité de la nappe : certains piézomètres enregistrent peu de variations, alors que d'autres présentent une évolution de la composition chimique dans le temps.

Les piézomètres PAM 1, PAM 3, PAV 4, PAV 5 montrent une baisse des chlorures et une augmentation des sulfates. FAV, enregistre une augmentation parallèle des Chlorures et des sulfates ainsi que FAM où à partir du 11/04. Le rapport des éléments se stabilise à celui de l'eau de mer. Dans l'ensemble, les rapports $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{--}$ (en mé/l) varient de 10 à 140 par contre les rapports Cl^-/Na^+ sont compris entre 1 et 2. L'hétérogénéité des dépôts de matériaux alluviaux est sans doute à l'origine de ces variations apparemment indépendantes entre deux piézomètres très voisins.

Fig. 11 - Variations spatiales de la salinité du fleuve Sénégal
 Comparaisons des campagnes Février et Mai 83 et Février et Mai 84



5. Evolution de la salinité des eaux du fleuve

A l'amont du barrage, la salinité est restée inférieure à 1‰. Les mesures de conductivité électrique montrent une variation de 0,91 mS en décembre à 1,38 mS en juillet. En septembre, après la crue, l'eau du fleuve avait une valeur moyenne de 0,06 mS.

Le front salé avait atteint Kheune un peu avant la fermeture complète du barrage, mais la quantité de sel piégée à l'amont du barrage était relativement minime en regard du stock d'eau douce de la retenue, et nous n'avons pas noté de migration vers les stations amont. La légère augmentation de la conductivité à Dagana (de 0,060 à 0,080 mS) peut s'expliquer par une augmentation de la concentration par évaporation.

A Kheune, juste à l'amont du barrage, l'évaporation entre pour une large part dans l'augmentation de la conductivité mais la décharge de la nappe des berges de conductivité élevée (20 à 30 mS) y participe probablement de manière non négligeable. En effet compte tenu du rabattement au niveau des piézomètres PAM 1 PAM 2 et PAM 3, on peut estimer, entre la fin du mois de janvier et la fin du mois de juin, une quantité d'eau apportée par la nappe de 15.000 m³ par Km.

A l'aval du barrage, l'invasion marine qui, avant la fermeture, était freinée par l'écoulement d'eau douce, va pouvoir progresser plus rapidement. On aurait pu s'attendre à observer des taux de salinité très forts, beaucoup plus élevés que les années précédentes, or, si l'on constate en effet une rapide augmentation générale de la salinité dès la fermeture du barrage, les maxima atteints en fin de saison sèche ne dépassent pas ceux des années précédentes, et sont même légèrement inférieurs.

Les variations spatiales de la salinité des eaux du fleuve mesurées tous les 5 km depuis l'embouchure jusqu'à Podor, représentées fig. 11, nous permettent de comparer aux mêmes dates en 83 et 84 le comportement de l'invasion marine.

On constate qu'en février 84, les valeurs de salinité sont largement supérieures à celles de 83, elles sont presque constantes entre Tiguet et Kheune (22 à 23 ‰), alors qu'en 83, on notait 8‰ à Kheune et une élévation presque régulière jusqu'à 35‰ à l'embouchure.

En mai 84, les valeurs sont dans l'ensemble moins fortes qu'en mai 83. L'allure de la courbe est semblable sauf à l'approche du barrage où un palier observé depuis janvier est toujours présent.

Fig. 12 _Variation de la Salinité à Crocodile (km 101)

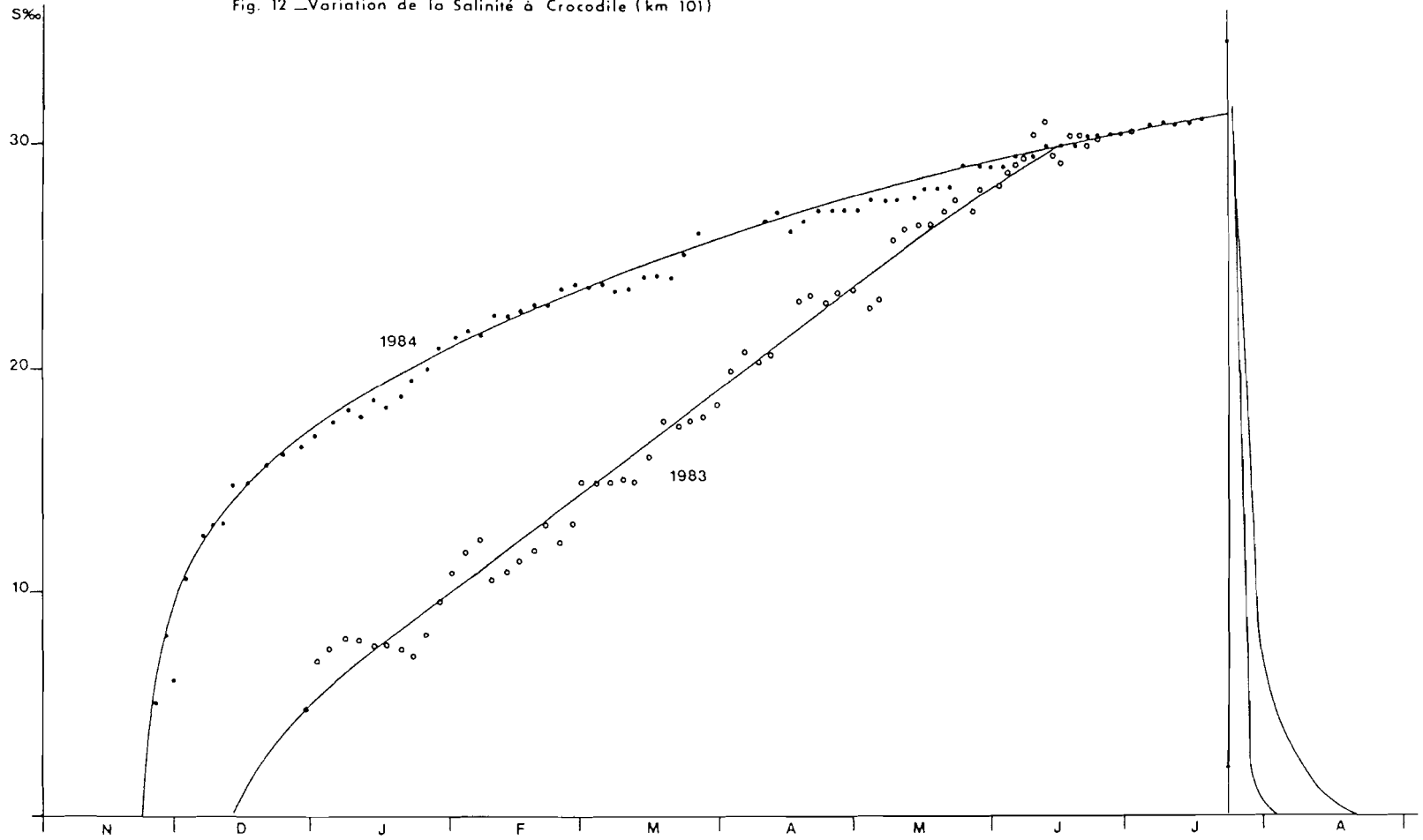
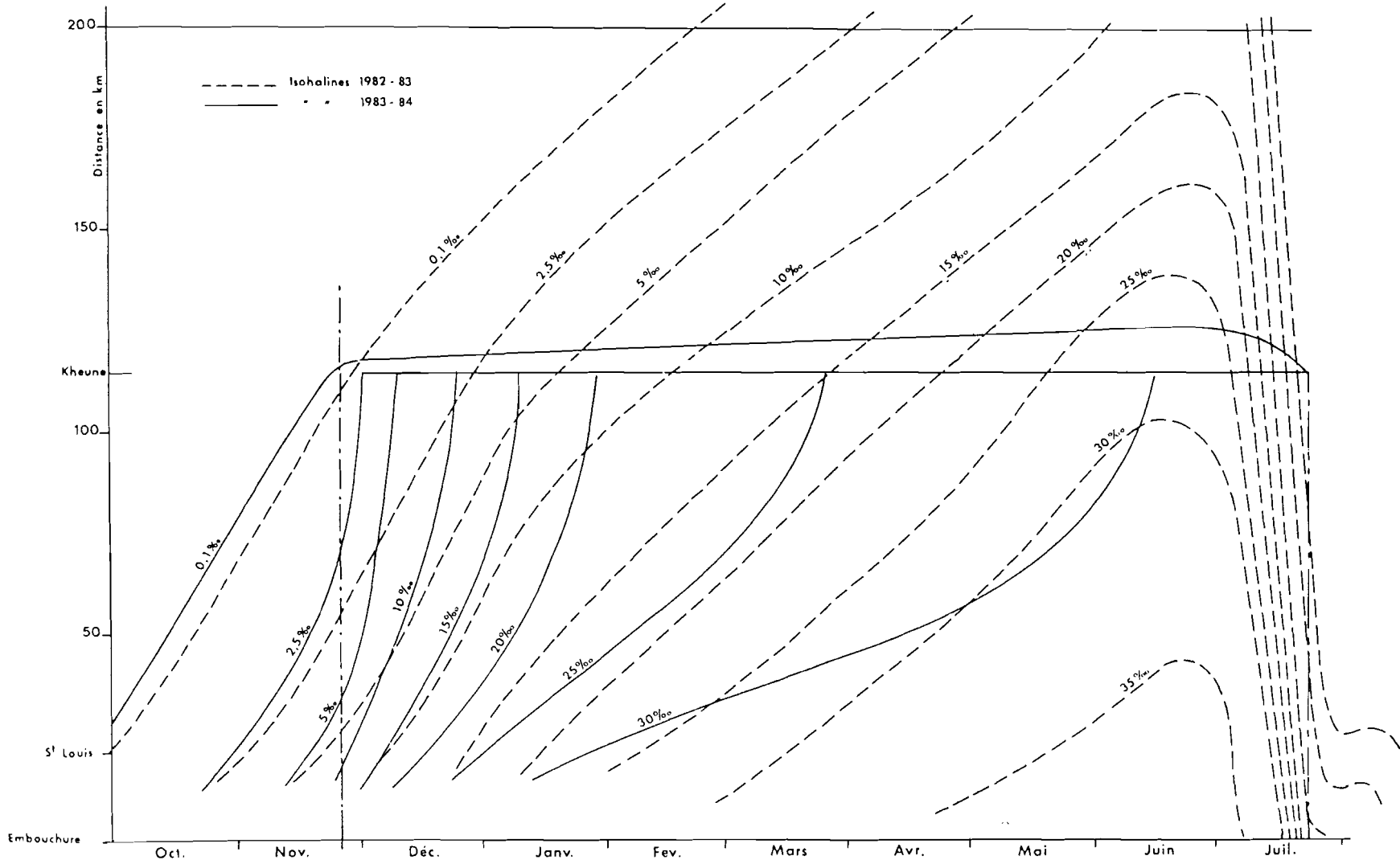


Fig.13 - Influence du barrage de Kheune sur l'invasion marine



Les prélèvements réguliers à la station de Crocodile (10 km à l'aval de Kheune) nous ont permis de suivre les variations de salinité dans le temps (fig. 12), et de comparer les années, 83 et 84. On voit que le barrage entraîne entre décembre et janvier un accroissement très rapide de la salinité, de 0 à 15‰ en moins d'un mois ; ensuite la progression est moins rapide, on passe de 15‰ à 25‰ entre mi-décembre et mi-mars (3 mois), enfin l'accroissement est lent, de 25‰ à 31‰ entre mi-mars et mi-juillet. (4 mois).

La fig. 13 montre l'influence du barrage de Kheune sur l'allure des isohalines entre octobre 1983 et juillet 1984, et la comparaison avec l'année précédente.

La présence du barrage a entraîné une progression plus rapide de la salinité des eaux entre l'embouchure et le barrage. Par exemple, au niveau du barrage de Kheune, la salinité était de 5‰ vers le 15 janvier 1983, alors qu'elle était déjà de 15‰ vers le 5 janvier 1984. Le 1er janvier, l'eau à 15‰ était à 26 km de l'embouchure en 1983 et à 66 km en 1984.

5. Variations des plans d'eau libre du barrage et du lac de Guiers

La variation du plan d'eau de la retenue dépend de 5 facteurs principaux :

- le débit d'arrivée : Il peut être estimé à partir du débit écoulé à Bakel.
- la quantité d'eau évaporée : on peut l'obtenir de manière approximative en utilisant le taux d'évaporation calculé sur le lac de Guiers (Gac et Al..) et la surface moyenne de la lame d'eau libre.
- la quantité d'eau prélevée : au niveau de la Taoué pour le stockage dans le lac de Guiers, ou par pompage aux stations situées entre Dagana et Kheune (C.S.S., SAED..)
- la quantité d'eau prélevée ou restituée par les nappes phréatiques, difficilement appréciable à cause de l'hétérogénéité des aquifères.
- la morphologie du lit du fleuve : la section est généralement constituée d'un chenal principal profond bordé de talus assez raides et de plages en pente douce entre les rives et le chenal.

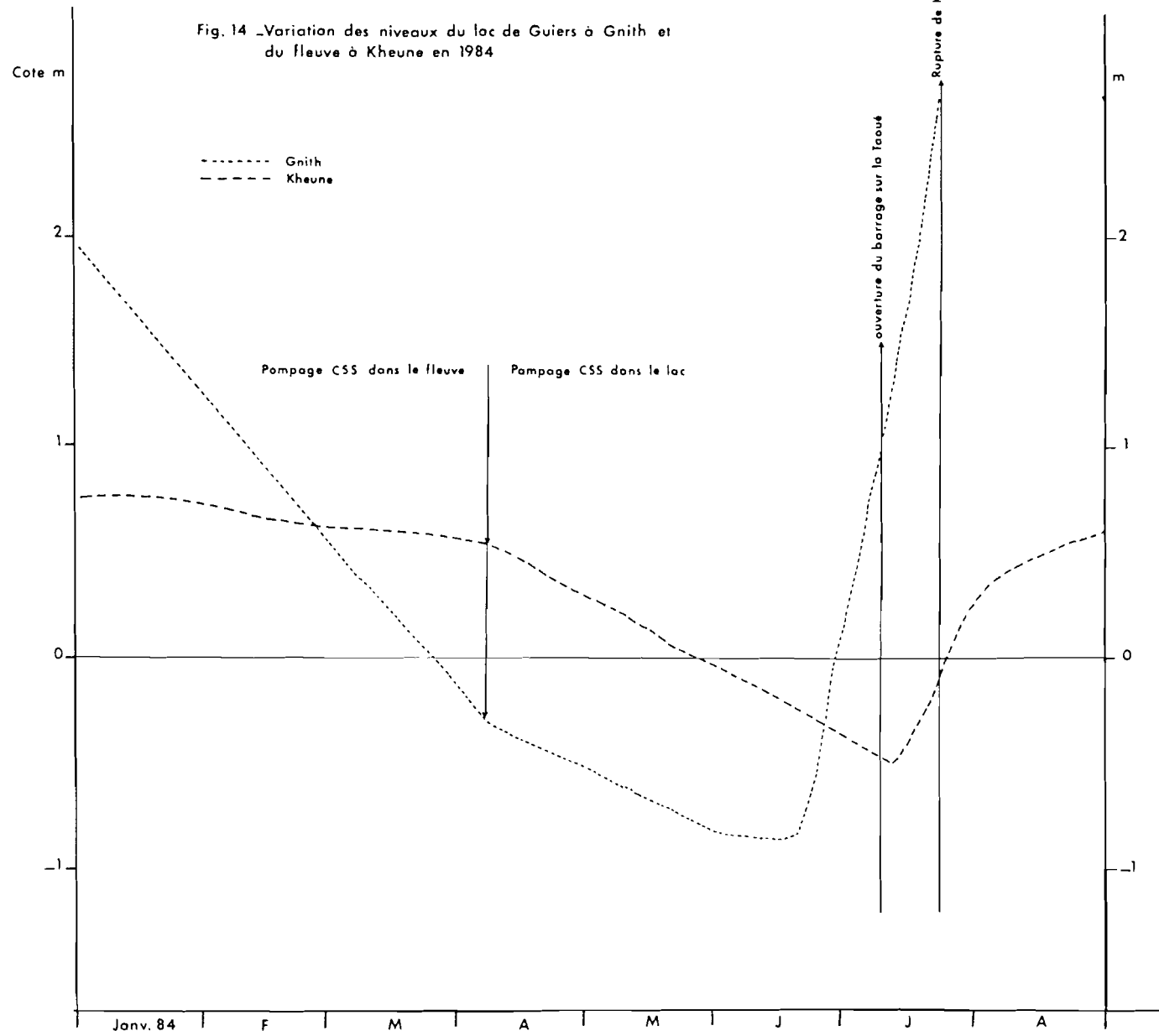
La comparaison entre les variations de niveau du lac de Guiers à Gnith et du Fleuve à Kheune est intéressante (fig. 14).

De fin décembre au début avril, le niveau de la retenue baisse très rapidement de manière constante de 22,2 mm par jour.

De début avril à mi-juin, la descente est toujours constante, mais moins rapide : 8,8 mm par jour.

Aux mêmes périodes, on observe le phénomène inverse à Gnith. La rupture de pente correspond en fait aux pompage de la C.S.S., jusqu'en avril dans le Fleuve, ensuite dans le lac.

Fig. 14 Variation des niveaux du lac de Guiers à Gnith et du fleuve à Kheune en 1984



IV - CONCLUSION

Le dispositif, mis en place juste après la création du barrage, ne permet évidemment pas de comparer le comportement des nappes avant et après la construction du barrage.

Néanmoins, nous avons pu observer que les nappes étaient, de manière générale, dépressives dans ce secteur, c'est à dire qu'elles avaient une pente descendante en s'éloignant du fleuve.

Cette campagne de mesures montre que la présence du barrage n'influence les niveaux qu'en bordure de la rive, principalement à l'amont : le sens d'écoulement varie en fonction du niveau du fleuve jusqu'au piézomètre P 3 soit à 150 m de la berge. A l'aval, l'écoulement reste constant de P 1 à P 5 (de la rive vers l'intérieur des terres).

Quant à la conductivité des eaux, les seules variations enregistrées l'ont été à l'aval ; en bordure de la rive, avec une diminution de la salinité en P 1 et P 2 (30 m de la berge) entre avril et juin.

Le stock d'eau douce retenue à l'amont du barrage ne semble pas avoir influencé la salinité des nappes. Par contre, on note un faible accroissement de la salinité des eaux de la retenue. Il s'explique par l'apport des eaux souterraines, et la concentration par évaporation.

A l'aval du barrage, le bief maritime s'est salé beaucoup plus rapidement que les années précédentes, de 1‰ à 15‰ en un mois dès la fermeture du barrage, alors qu'en 1983, la même augmentation de salinité avait demandé 3 mois. Mais les valeurs maximales des années précédentes n'ont pas été atteintes.

Le bouchon-barrage de Kheune a parfaitement rempli son rôle de barrage anti-sel et de retenue d'eau douce pour permettre le remplissage du lac de Guiers, et le pompage des quantités nécessaires aux périmètres irrigués de la C.S.S. et de la SAED jusqu'au mois d'avril avant d'utiliser, d'avril à juillet, les eaux stockées dans le lac.

Cependant les résultats d'analyse montrent que la fermeture du barrage a été trop tardive, entraînant une forte pollution par l'eau marine de l'eau située à l'amont la retenue. Le suivi de la remontée de la langue d'eau salée permettra de déterminer la date optimale de fermeture du barrage.

- A N N E X E S -

I NIVEAU DE LA NAPPE DANS LES PIEZOMETRES (m)

	PAM 1	PAM 2	PAM 3	PAM 4	PAM 5		PAV 1	PAV 2	PAV 3	PAV 4	PAV 5
Cote Date	2,892	3,635	3,361	3,046	2,735		2,735	3,296	3,625	2,772	2,636
29/12/83	1,74	1,48	0,56	0,04	-0,02		1,20	0,94	1,05	0,14	0,22
04/01/84	1,99	1,62	1,36	0,10	0,48		1,24	1,23	1,13	0,32	0,24
18/01/84	1,61	1,54	0,61	0,03	0,44		1,14	1,10	1,03	0,57	0,19
07/02/84	1,69	1,50	0,72	0,06	0,40		1,13	1,14	1,01	0,47	0,15
16/02	1,60	1,45	0,68	0,02	0,35		1,29	1,08	1,01	0,44	0,07
29/02	1,45	1,37	0,72	-0,12	0,34		1,29	1,14	1,04	0,49	0,15
06/03	1,34	1,27	0,68	-0,10	0,28		1,36	1,22	1,09	0,49	0,15
11/04	0,69	0,84	0,61	-0,20	0,13		1,34	1,16	1,00	0,55	0,20
24/04	0,67	0,70	0,64	-0,12	0,15		1,19	1,15	0,94	0,52	0,05
22/05	0,37	0,45	0,45	-0,23	0,05		1,24	1,13	0,92	0,48	0,07
29/05	0,28	0,70	0,43	-0,27	0,0		1,25	1,08	0,89	0,42	0,04
07/06	0,26	0,40	0,56	-0,26	0,025		1,32	1,13	0,93	0,40	0,08
26/06	0,23	0,32	0,34	-0,26	-0,09		1,28	1,10	1,00	0,38	0,01
10/07/84	0,54	0,50	0,27	-0,25	0,035		1,29	1,23	1,05	0,47	0,08
26/07/84	1,89	1,40	0,26	-0,31	-0,28		1,54	1,34	1,21	0,56	0,03
28/08/84	1,61	1,35	0,45	-0,22	-0,21		1,68	1,48	1,36	0,74	0,26
18/09/84	1,48	1,30	0,53	-0,25	-0,19		1,71	1,50	1,23	0,58	0,24
04/10/84	1,45	1,31	0,56	-0,11	0,03		1,64	1,48	1,27	0,77	0,41
26/10/84	1,53	1,35	0,60	0,07	0,03		1,75	1,52	1,33	0,84	0,55
26/11/84	1,94	1,50	0,60	0,09	-0,09		1,38	1,24	1,18	0,56	0,49

II VARIATION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUES

(en millisiemens, à 20° C)

DATES	FAM	S1					FAV	S2				
		PAM 1	PAM 2	PAM 3	PAM 4	PAM 5		PAV 1	PAV 2	PAV 3	PAV 4	PAV 5
29/12/83	0,91	22,1	32,9	65,8	58,0	24,0	27,0	41,9	32,9	37,9	63,1	34,9
04/01/84	1,2	20,5	29,4	63,5	55,2	26,1	26,7	36,7	51,8	30,6	57,0	33,5
18/01/84	1,25	21,5	30,0	68,0	58,0	26,5	25,0	34,0	64,0	32,0	57,0	35,0
07/02/84	1,25	21,8	31,5	70,9	59,8	27,7	30,6	36,7	67,1	32,2	59,3	37,2
16/02/84	1,30	21,0	30,0	72,0	62,0	27,5	32,0	35,0	67,0	-	59,0	37,0
29/02/84	1,29	21,5	32,2	70,1	60,8	27,6	33,0	36,7	64,7	32,3	58,1	38,6
11/04/84	1,17	21,5	31,4	58,5	55,1	29,5	37,8	28,1	48,0	35,0	55,8	39,1
24/04/84	-	23,0	28,5	68,0	55,0	29,0	-	27,0	32,0	35,0	57,0	38,0
22/05/84	1,21	21,3	27,8	68,9	55,7	29,5	37,0	27,6	26,3	33,6	55,7	36,7
29/05/84	-	24,0	29,0	68,0	57,0	29,0	-	27,6	29,5	35,0	56,0	38,0
07/06/84	1,26	-	28,3	65,0	54,0	27,5	36,0	28,0	31,0	35,0	54,0	36,0
28/06/84	1,27	23,7	23,5	68,8	56,6	29,4	-	34,3	39,3	34,4	54,6	36,4
10/07/84	1,38	24,1	23,6	69,4	58,4	28,6	39,5	36,1	48,6	36,5	50,7	37,7
26/07/84	-	23,5	24,8	69,0	59,0	29,6	-	37,0	60,0	43,0	57,0	39,0
28/07/84	-	23,0	25,5	70,0	60,0	32,0	-	-	63,0	45,0	57,0	38,0
18/09/84	-	24,0	25,5	70,0	58,0	28,5	-	39,0	62,0	45,0	58,0	37,0
04/10/84	0,06	23,3	23,3	67,9	57,3	26,2	0,07	37,8	63,1	42,3	58,1	35,9
26/10/84	-	24,7	24,5	66,0	57,0	28,5	-	39,0	42,0	55,0	61,0	37,0

III COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE KHEUNE

en mg/l

ORIGINE	DATE	TE(MS)	Cl-	SO4--	CO3H-	Ca++	Mg++	K+	Na+
fam	831229	91	2.7	.51	.4	.74	1.08	.24	7.58
pam1	831229	22	214	17.82	.12	11.5	43.75	2.44	170
pam2	831229	33	336	5.14	.84	14	51.5	2.06	277
pam3	831229	66	765	36.84	.02	52.5	170	3.06	560
pam4	831229	58	640	31	.06	56.5	160	3.2	450
pam5	831229	24	207	45.76	0	23.75	53	2.31	170
fav	831229	27	262	26.56	1.33	10	51	3.75	220
pav1	831229	42	412.5	33.76	15.22	10.5	44	3.27	405
pav2	831229	33	330	31.53	3.36	11.5	45.5	4.69	300
pav3	831229	38	390	20.74	0	17.4	59	.31	320
pav4	831229	63	725	18	2.65	31.25	128	3.81	590
pav5	831229	35	356	4.28	12.67	15	57.5	2.94	295
fam	840229	1.18	9.1	.86	.52	.62	1.81	.31	7.87
pam1	840229	22.3	210	17.65	0	6.27	38	2.87	170
pam2	840229	34	340	23.14	0	9.81	49.5	2.5	280
pam3	840229	74	910	40.62	0	64	185	4.8	680
pam4	840229	65	750	51.58	0	63	182.5	4.4	535
pam5	840229	29.5	260	51.07	0	18.6	65	3.44	222.5
fav	840229	35	335	36.33	1.8	8.12	64	5.81	312.5
pav1	840229	39	395	30.85	0	7	36	3.31	382.5
pav2	840229	71	780	51.07	0	16.7	112.5	13	710
pav3	840229	35	360	20.74	0	11.8	46	5.4	307.5
pav4	840229	62	690	16.97	0	28.75	115	5	550
pav5	840229	40	415	3.94	0	10.9	55	3.37	337.5
fam	840411	1.1	9.75	1.03	.57	.75	1.75	.38	8.44
pam1	840411	20	237.5	10.1	0	11.2	42.5	3.69	183.8
pam2	840411	30	358	26.7	0	12.3	57.5	2.56	265
pam3	840411	64	950	34.5	0	65	200	5.6	675
pam4	840411	53	700	52.6	0	21.25	169	4.19	440
pam5	840411	28.5	318	50.3	0	31.25	75.5	1.69	216
fav	840411	33	400	39.7	1.78	13	75.75	7.8	347.5
pav1	840411	24.5	285	18	.1	6.25	24.75	3.16	267.5
pav2	840411	43	531	42.3	0	21	83.5	2.25	425
pav3	840411	34	422.5	28.8	0	14.75	51.5	5.5	345
pav4	840411	54	744	15.5	0	31.5	125	5.9	565
pav5	840411	36	450	3.12	0	14	62.5	3.88	325
fam	840607	28.3	10.3	1.03	.64	.81	1.94	.4	9.44
pam1	840607	20	237.5	10.1	0	11.2	42.5	3.69	183.8
pam2	840607	28.3	325	15.2	0	10.1	41.25	2	212.5
pam3	840607	65	968	33.2	0	62.5	200	5.25	680
pam4	840607	54	705	58.8	0	57.5	165	4.12	450
pam5	840607	27.5	305	50	0	27	70	1.38	205
fav	840607	36	408	44.8	1.68	15	82.5	7.75	175
pav1	840607	28	312	20.4	3.4	5.81	28	3	302
pav2	840607	31	358	29.7	0	10.5	50	6.2	297.5
pav3	840607	35	430	22.2	0	16.75	65	4.5	325
pav4	840607	54	750	16	0	26.75	150	3.92	555
pav5	840607	36	450	3.02	0	13.75	75	2.71	315

FAM : Fleuve amont

FAV : Fleuve aval

PAM : Piézomètre amont

PAV : Piézomètre aval

IV - COMPOSITION CHIMIQUE DES EAUX DE KHEUNE

en mg/l

ORIGINE	DATE	Cl ⁻	So4 ⁻⁻	CO3H ⁻	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	CUMUL
FAM	831229	308.4	24,5	24.4	14,8	13,12	9.3	174.2	544,2
PAM1	831229	7586.3	855,9	7.3	230,4	531,6	95.3	3908.3	13715,1
PAM2	831229	11911.2	246,9	51.2	280,5	625,7	80.5	6368.2	19564,2
PAM3	831229	27119.2	1769,4	4.9	1052,1	2065,5	119.6	12874.4	45005,1
PAM4	831229	22688	1488,9	3.6	1132,2	1944	125.0	10345.5	37727,2
PAM5	831229	7338.1	2197,8	0	475,9	649,5	90.2	3908.3	14659,8
FAV	831229	9287.9	1275,7	81.1	200,4	619,6	146.5	5057.8	16679
PAV1	831229	14623.1	1621,5	928.6	210,4	534,6	127.8	9310.9	27356,9
PAV2	831229	11698.5	1514,4	205.0	230,5	552,8	183.3	6897	21281,5
PAV3	831229	13825.5	996,1	0	348,7	716,8	12.1	7356.8	23256
PAV4	831229	25701.2	864,5	527.7	626,2	1555,2	148.9	13564.1	40987,8
PAV5	831229	12620.2	205,6	773.0	300,6	698,6	114.9	6782.0	21494,9
FAM	840229	322.6	41,3	31.7	12,4	22,0	12.1	180.9	623
PAM1	840229	7444.5	847,7	0	165,7	461,7	112.1	3908.3	12940
PAM2	840229	12053	1111,4	0	196,6	601,4	97.7	6437.2	20497,3
PAM3	840229	32259.5	1950,9	0	1282,5	2247,7	187.6	15633.2	53561,4
PAM4	840229	26587.5	2477,4	0	1262,5	2217,4	171.9	12299.6	45016,3
PAM5	840229	9217	2452,9	0	372,7	789,7	134.4	5115.2	18081,9
FAV	840229	11875.7	1744,9	109.8	162,7	777,6	227.1	7184.3	22082,1
PAV1	840229	14002.7	1481,7	0	115,3	437,4	129.3	8793.6	24960
PAV2	840229	27651	2452,9	0	334,7	1366,7	508.1	16322.9	48635,4
PAV3	840229	12762	996,1	0	236,5	558,9	211.0	7069.4	21833,9
PAV4	840229	24460.5	815,0	0	576,1	1392,2	195.4	12644.5	40083,6
PAV5	840229	14711.7	189,2	0	218,4	668,2	131.7	7759.1	23678,3
FAM	840411	345.6	49,5	34.7	15,0	21,2	14.8	194.0	674,8
PAM1	840411	8419.4	485,1	0	224,4	516,4	144.2	4225.5	14015
PAM2	840411	12691.1	1282,4	0	246,5	698,6	100.0	6092.3	21110,9
PAM3	840411	33677.5	1657,0	0	1302,6	2430	218.9	15518.2	54804,2
PAM4	840411	24815	2526,4	0	425,8	2053,3	163.7	10115.6	40099,8
PAM5	840411	11273.1	2415,9	0	626,2	917,3	66.0	4965.84	20264,3
FAV	840411	14180	1906,8	108.6	260,5	920,3	304.9	7989.0	25670
PAV1	840411	10103.2	864,5	6.1	125,2	300,7	123.5	6149.8	17673
PAV2	840411	18823.9	2031,6	0	420,8	1014,5	87.9	9770.7	32149,4
PAV3	840411	14977.6	1383,3	0	295,6	625,7	214.9	7931.5	25428,6
PAV4	840411	26374.8	744,5	0	631,2	1518,7	230.6	12989.3	42489,1
PAV5	840411	15952.5	149,8	0	280,6	759,3	151.6	7471.7	24765,4
FAM	840607	365.1	49,5	39.0	16,2	23,6	15.6	217.0	726
PAM1	840607	8419.4	485,1	0	224,4	516,4	144.2	4225.5	14015
PAM2	840607	11521.2	730,0	0	202,4	501,1	78.1	4885.3	17918,1
PAM3	840607	34315.6	1599,1	0	1252,5	2430	205.2	15633.2	55435,6
PAM4	840607	24992.2	2824,2	0	1152,2	2004,7	161.0	10345.5	41479,8
PAM5	840607	10812.2	2401,5	0	541,1	850,5	53.9	4712.9	19372,1
FAV	840607	14463.6	2151,7	102.5	300,6	1001,3	302.9	4023.2	22345,8
PAV1	840607	11060.4	979,8	207.4	116,4	340,2	117.2	6942.9	19764,3
PAV2	840607	12691.1	1426,5	0	210,4	607	242.3	6839.5	22016,8
PAV3	840607	15243.5	1066,3	0	335,7	789,7	175.9	7471.7	25082,8
PAV4	840607	26587.5	768,5	0	536,1	1822,5	153.2	12759.4	42627,2
PAV5	840607	15952.5	145,0	0	275,5	911,2	105.9	7241.8	24631,9