



Pôle régional de recherche
sur les systèmes irrigués
en Afrique soudano-sahélienne

**Lutte contre la Dégradation des sols
dans la vallée du fleuve Sénégal**

**Synthèse sur
L'évolution des nappes sous culture**

**Claude HAMMECKER
Jean Luc MAEGHT**



**Institut de recherche
pour le développement**
*Agriculture irriguée durable
dans la vallée du Sénégal*

B.P. 1386 Dakar Sénégal
Fax : (221) 8 32 43 07
Téléphone : 8 32 34 80

Mai 1999

Evolution des nappes sous culture.
Vallée du Sénégal – Région de Podor

1- La caractérisation des propriétés de transfert de la nappe : méthode du Slug Test

1-2- Présentation

Le slug-test ou essai de choc hydraulique est un essai facile à mettre en œuvre permettant d'accéder à la perméabilité ou la transmissivité de l'aquifère au voisinage d'un puits ou d'un piézomètre. Après avoir injecté (ou prélevé) un volume d'eau connu, on observe l'abaissement (ou la remontée, respectivement) du plan d'eau au cours du temps. Le slug-test peut donc être décrit comme un essai de perméabilité à charge variable *in situ*.

On obtient les meilleurs résultats au slug-test pour des perméabilités relativement faibles, c'est-à-dire inférieures à 10^{-4} m/s ou 10m/j. Au-delà, les temps d'abaissement ou de remontée du plan d'eau sont relativement courts et ne permettent pas une bonne précision dans les mesures avec un matériel classique.

Le slug-test est donc utile pour l'étude des aquifères à faible perméabilité pour lesquels les essais de pompage sont difficiles à réaliser (faible débit, longue durée de pompage). Néanmoins, le caractère du slug-test reste très local du fait du faible volume d'eau déplacé et il convient de répéter les essais dans l'espace pour connaître la variabilité des grandeurs hydrodynamiques.

1-2- Les différentes méthodes d'interprétation

La première méthode d'interprétation a d'abord été développée par Hvorslev (1951) pour différents types de puits et de piézomètres; elle permet d'accéder à la perméabilité locale de l'aquifère. Plus tard, Cooper et al. (1967, 1973) ont développé des abaques de référence pour des essais de choc hydraulique dans des puits complets, c'est-à-dire pénétrant l'aquifère jusqu'au substratum et crépinés sur toute la longueur. Cette méthode aboutit au calcul de la transmissivité de l'aquifère et dans une moindre précision au calcul du coefficient d'emmagasinement.

Plus tard, Bouwer et Rice (1976) ont complété, amélioré et généralisé à différentes configurations la méthode de Hvorslev. Leur méthode s'applique pour des piézomètres complets ou pénétrant partiellement un aquifère libre. Dans le cas des aquifères captifs, la méthode s'applique à condition que l'aquifère soit alimenté par l'horizon supérieur.

Cette dernière méthode d'interprétation, combinée dans certains cas à celle de Hvorslev, sera celle utilisée par la suite.

La méthode de Cooper et Papadopoulos, qui s'applique pour des piézomètres complets, basée sur une interprétation graphique et pour laquelle la précision des premières mesures de l'essai sont essentielles, n'a pas été développée.

1-3- Méthode de Bouwer et Rice

Dans toutes les méthodes précédentes, la donnée la plus difficile à recueillir est le rayon d'influence R_e de l'essai de slug-test. Notons que pour les essais de pompage, la connaissance précise de ce paramètre garantie de bons résultats.

Bouwer et Rice ont évalué R_e dans différentes configurations à partir d'une analogie électrique. Un courant est envoyé dans le piézomètre, et on observe la propagation de l'énergie électrique. Les équipotentielles électriques correspondent aux équipotentielles de pertes de charge dans l'aquifère. Le rayon d'influence R_e est mesuré afin que 85% des pertes de charge soit perdues depuis le centre du puits sur une distance R_e .

La méthode de Bouwer et Rice est basée sur l'équation de Thiem:

$$Q = 2\pi KL \frac{y}{\ln(R_e / r_w)} \quad (1)$$

avec	Q	débit dans le piézomètre (m ³ /s)
	K	perméabilité conductivité hydraulique (m/s)
	L	longueur de crépine libre (m)
	y	charge instantanée dans le piézomètre: $y = h(t) - H_0$
	R_e	rayon d'influence de l'essai (m)
	r_w	distance du centre du piézomètre à l'aquifère (m)
	H_0	niveau d'eau initial (m)
	$h(t)$	niveau d'eau à l'instant t de l'essai (m)

Les hypothèses d'application de cette loi sont les suivantes (2):

- aquifère homogène et isotrope
- abaissement de la nappe au voisinage du piézomètre négligeable
- débit d'origine capillaire négligeable
- pertes de charges négligeables

L'équation de conservation de la matière se traduit par:

$$\frac{dy}{dt} = -\frac{Q}{V} \quad (3)$$

où r_c rayon intérieur modifié du piézomètre (m)

r_c doit tenir compte de la porosité du massif filtrant du piézomètre. Dans les piézomètres étudiés, le tube est en contact directement avec l'aquifère; r_c sera donc pris comme le rayon intérieur du piézomètre et de plus il sera égal à r_w . On notera donc par la suite r ces deux grandeurs.

La combinaison de (1) et (3) conduit à une intégration de y en fonction du temps sur l'intervalle $[0,t]$ puis à l'équation (4) qui donne la conductivité hydraulique en fonction de tous les autres paramètres:

$$K = \frac{r^2 \ln(R_e/r)}{2L} \cdot \frac{1}{t} \ln\left(\frac{y_0}{y(t)}\right) \quad (4)$$

K étant une constante, le deuxième membre de l'équation dépendant de t est constant dans le temps. Lors de l'essai on mesure $y(t)$ en fonction de t . On trace ensuite sur un graphique semi-logarithmique la courbe $y(t)/y_0$ en fonction de t qui a l'allure d'une droite. La pente caractéristique de cette droite affectée du signe moins donne la valeur du deuxième membre recherché.

La grandeur $\ln(R_e/r)$ est la dernière inconnue de l'équation (4). Elle a été estimée par Bouwer et Rice par analogie électrique pour des piézomètres incomplets. Sa valeur peut être calculée grâce à l'équation empirique suivante:

$$\ln\left(\frac{R_e}{r}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln(d/r)} + \frac{A + B \cdot \ln[(b-d)/r]}{L/r} \right]^{-1} \quad (5)$$

avec d distance entre la surface de l'aquifère et le fond du piézomètre (m)
 b puissance ou épaisseur de l'aquifère (m)

Dans le cas de piézomètres complets, c'est-à-dire si $b=d$, la formule (5) devient:

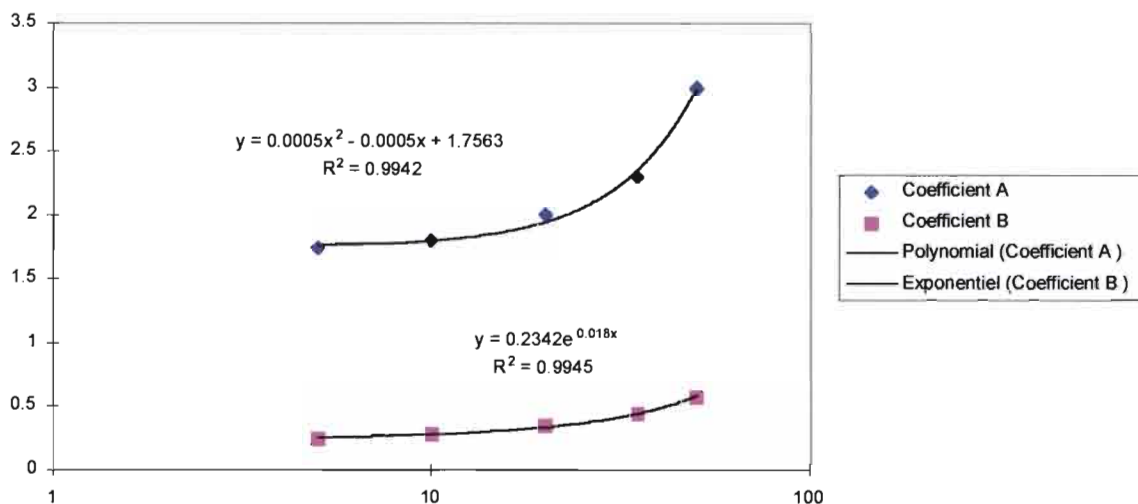
$$\ln\left(\frac{R_e}{r}\right) = \left[\frac{1.1}{\ln(d/r)} + \frac{C}{L/r} \right]^{-1} \quad (6)$$

où C est un coefficient semblable à A et B .

A , B et C sont des coefficients adimensionnels qui sont fonction du rapport L/r . Leurs valeurs sont estimées graphiquement à partir d'abaques données par Bouwer et Rice. Par la suite, seuls les coefficients A et B ont été calculés puisque les piézomètres étudiés ne sont pas complets.

Pour faciliter le traitement des résultats, on a calé des lois mathématiques sur ces abaques pour des valeurs de L/r balayant les valeurs caractéristiques des piézomètres.

L/r varie généralement de 0 à 30. Dans le paragraphe suivant, on verra que lorsque $L/r < 1$, la méthode de Hvorslev pour un essai en bout de tubage a été préférée. On considère donc que L/r varie entre 1 et 30 ce qui permet de caler les deux lois suivantes pour A et B:



Pour le coefficient A, une loi polynomiale convient le mieux. Pour le coefficient B, on a ajusté une loi exponentielle.

Enfin, connaissant la valeur de $\ln(R_e/r)$ grâce à (4), on déduit la valeur de la conductivité hydraulique K .

1-4- Méthode de Hvorslev

La méthode de Hvorslev est ici brièvement présentée car elle a été utilisée dans certains cas.

- Pour un piézomètre incomplet et crépiné sur une longueur L , ce qui correspond au cas de figure étudié par Bouwer et Rice, la perméabilité est donnée par:

$$K = \frac{r^2 \ln(L/r)}{2L} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right) \quad (7)$$

où y_1 et y_2 sont deux charges instantanées aux temps t_1 et t_2

En comparant (7) à (4), on remarquera que Hvorslev a approximé R_e par L , ce qui limite la précision de l'interprétation.

- Pour un piézomètre avec tubage jusqu'à une profondeur L à l'intérieur de la partie non creusée, Hvorslev donne encore:

$$K = \frac{2\pi + 11L}{11} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right) \quad (8)$$

Enfin, pour un piézomètre avec tubage mais sans crépine, ce qui correspond à un essai en bout de tubage, Hvorslev donne:

$$K = \frac{2\pi}{11} \cdot \frac{1}{t_2 - t_1} \ln\left(\frac{y_1}{y_2}\right) \quad (9)$$

Cette dernière équation est identique à (8) lorsque L=0

2- Campagne d'essai: Méthodes expérimentales, interprétation des mesures et sites expérimentés

2-1 Méthodes expérimentales

Les slug-tests peuvent être initiés par prélèvement ou par injection. Ces deux méthodes présentent des avantages et des inconvénients respectifs.

- le slug-test par prélèvement consiste à prélever un volume d'eau connu. Ceci peut être obtenu en immergeant un récipient cylindrique et en le retirant rapidement. On peut mesurer avec une éprouvette le volume soutiré. Cette méthode a été appliquée pour la plupart des essais avec des préleveurs de différentes tailles:

- préleveur de 1m (en abrégé P/1m): le volume prélevé est théoriquement de 2.16 litres; cette valeur sera arrondie de 2.05 à 2.15 litres dans les calculs pour tenir compte des pertes lors du levage du cylindre. Dans un piézomètre de diamètre extérieur 75mm comme couramment utilisé dans la région de Podor, ce prélèvement produit un abaissement du plan d'eau de 58cm environ.

- préleveur de 0.50m (en abrégé P/0.50m): on a recours à ce préleveur lorsque la quantité d'eau dans le piézomètre est plus faible. On opère avec ce préleveur de la même façon qu'avec le précédent. Le volume prélevé est d'environ 1.02 litre ce qui produit un abaissement de 28cm.

- soupape de 0.80m (S/0.80m): on utilise la soupape pour curer les piézomètres munie d'un bouchon au fond en guise de préleveur pour les piézomètres à diamètre intérieur inférieur à 60mm. Le volume prélevé est d'environ 1.09 litre.

L'essai par prélèvement présente l'inconvénient de faire pénétrer du sable par dépression lors du soutirage du cylindre, par le bout du tubage lorsque celui-ci n'est pas bouché ou par la crépine lorsque celle-ci n'est pas munie d'un filtre. On peut éviter ce phénomène en immergeant un cylindre d'un volume connu. On attend ensuite l'abaissement du plan d'eau jusqu'au niveau initial avant de retirer le cylindre. Cette méthode

n'était pas applicable pour nos essais où les perméabilités sont relativement faibles; le temps d'un essai aurait été alors multiplié par deux.

- le slug-test par injection consiste à injecter un volume d'eau connu. L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'injecter un volume spécifique à chaque piézomètre, mais dans tous les cas il est difficile de réaliser une injection instantanée, ce qui nuit à la précision des premières mesures. En outre, si la crépine est trop près de la surface de la nappe, on observe un remplissage direct de la zone non saturée et non pas un transfert de charge dans la zone saturée.

Les essais de slug test effectués par injection n'ont pas été traités dans ce rapport.

2-2- Comparaison des méthodes d'interprétation et discussion

Nous avons considéré que nos essais où tous les piézomètres sont partiellement pénétrants et captant des aquifères libres à semi-captifs, entraînent dans le champ des hypothèses (2).

Dès que le choc hydraulique a été produit, on mesure les variations piézométriques à partir du sommet du piézomètre en fonction du temps comme présenté en annexe pour tous les essais. Les temps sont convertis en secondes et on calcule le rapport $y(t)/y_0$ ou $(h(t)-H_0)/(h_0-H_0)$. Ce dernier terme est porté sur un graphe semi-logarithmique en fonction du temps. C'est la pente caractéristique de cette courbe assimilée à une droite qui va mener au calcul de K.

Lorsque l'essai est correctement réalisé, on observe que la courbe tend vers une asymptote rectiligne. Le relèvement de la nappe s'effectue alors en régime pseudo-permanent. La première partie de la courbe où le niveau remonte relativement plus rapidement peut être due à un drainage des macropores de l'aquifère autour du piézomètres car cet effet est moindre lorsque les sols sont plus limoneux.

Bouwer et Rice préconisent de choisir un point caractéristique de la courbe précédente et de calculer la pente de la droite passant par ce point et l'origine du repère et donnée par le terme (10), autrement appelé (2) en annexe:

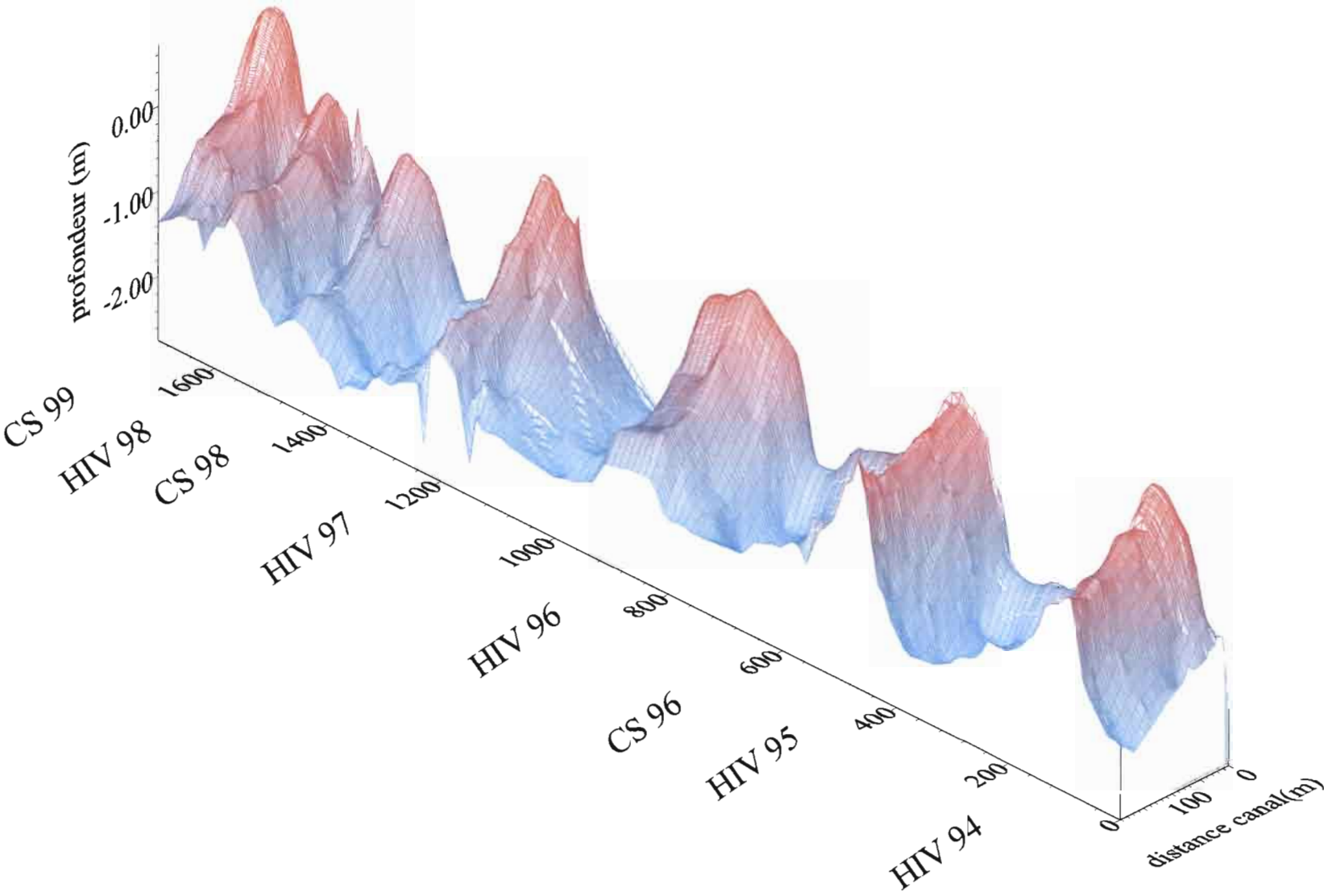
$$\frac{1}{t} \ln\left(\frac{y_0}{y(t)}\right) \quad (10)$$

Cette méthode ne considère donc pas l'effet de drainage décrit précédemment et le terme (10) peut varier considérablement au cours de l'essai.

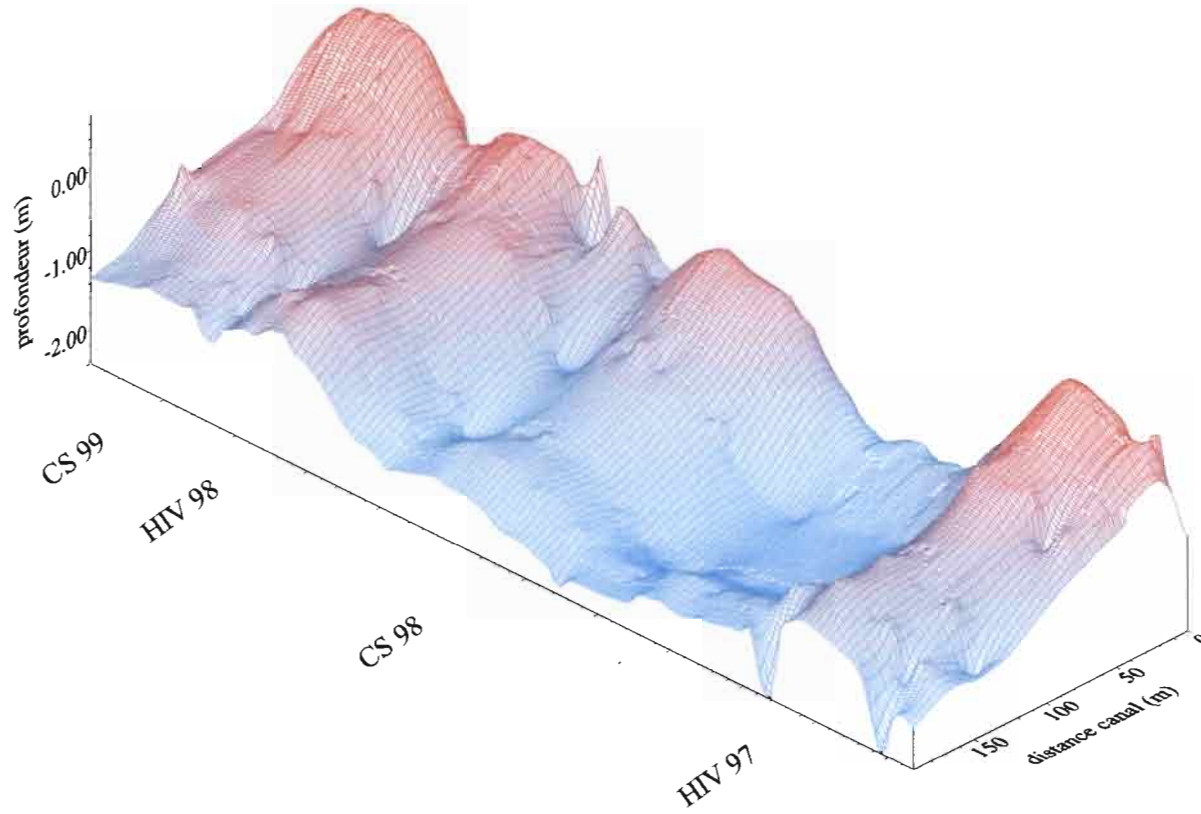
Hvorslev préconise lui de choisir deux points caractéristiques à des temps t_1 et t_2 et de calculer la pente de la droite joignant ces deux points. Le régime pseudo-permanent peut être considéré si les deux points sont bien choisis.

La méthode choisie pour le calcul d'une valeur significative du terme (10) est la suivante: elle consiste à évaluer ce terme de proche en proche entre deux mesures, soit à calculer le terme (11), autrement appelé (3) en annexe:

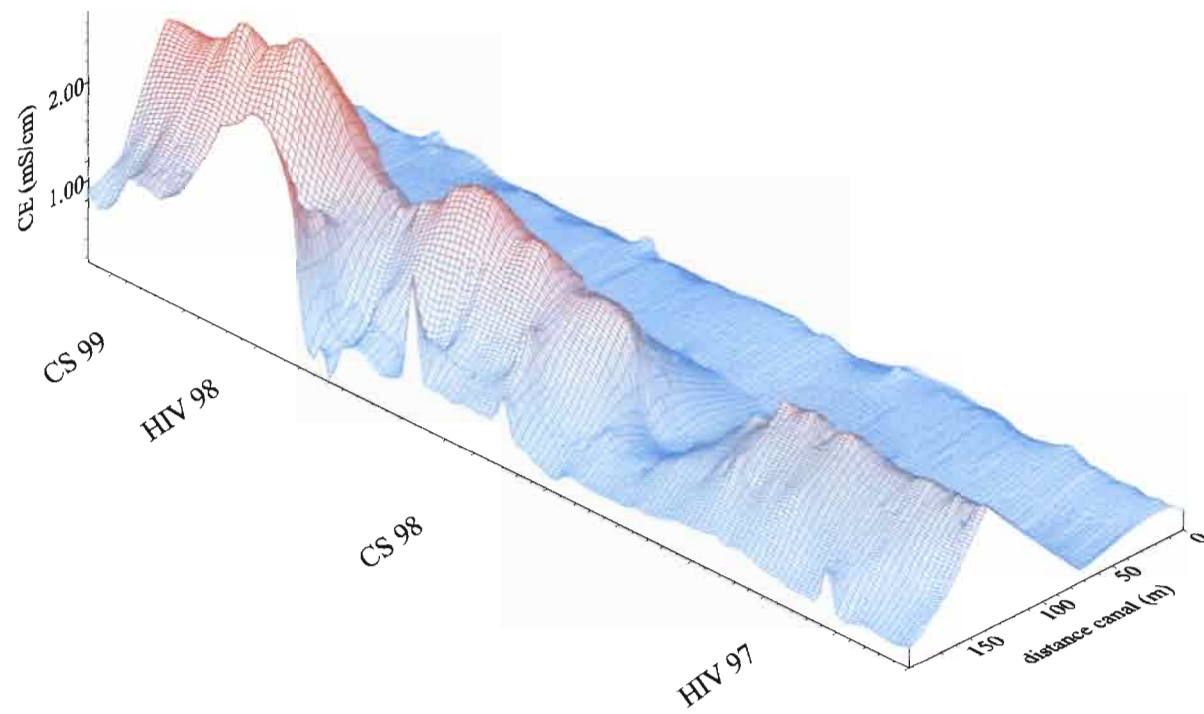
Evolution de la profondeur du toit de la nappe sur 5 ans à IT1 Donaye



Evolution de la profondeur du toit de la nappe à IT1 Donaye



Evolution de la conductivité électrique de la nappe à IT1 Donaye



Evolution du pH de la Nappe Donaye IT I

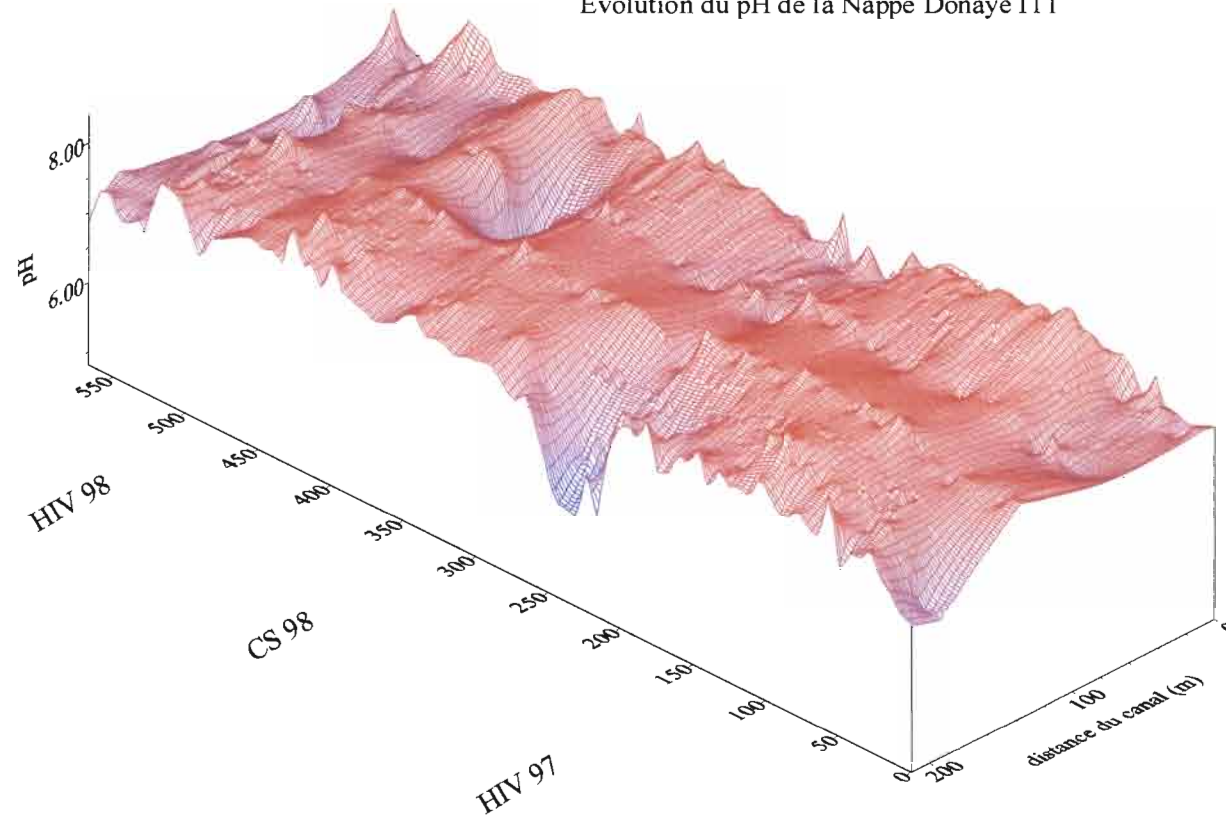


Tableau I. Analyse de sol sur le profil au niveau du piézomètre PB (Donaye IT1)

Prof. cm	GRANULOMETRIE						BASES ECHANGEABLES					EXTRAIT 1/5	
	argile	Limon fin	Limon grossier	Sable fin	Sable grossier	Total	Ca	Mg	Na	K	ESP	pH	EC
		%	%	%	%	%	meq%	meq%	meq%	meq%			mS/cm
20	61.7	16.4	11.0	9.2	0.3	98.6	11.64	10.10	1.20	0.34	5.14	6.44	0.145
40	62.7	16.6	10.4	8.3	0.2	98.2	10.59	9.67	1.48	0.33	6.72	6.92	0.138
60	65.3	16.8	8.5	7.9	0.2	98.7	9.75	10.07	5.80	0.24	22.44	5.54	1.398
80	66.3	16.5	7.8	8.0	0.1	98.7	9.65	10.53	2.50	0.24	10.90	5.96	0.306
100	66.2	16.2	8.5	7.3	0.2	98.4	14.34	10.82	3.87	0.22	13.24	5.34	1.282
120	66.0	15.7	8.1	8.3	0.4	98.5	27.61	10.92	3.59	0.20	8.49	5.38	2.350
140	65.5	15.2	8.5	9.1	0.3	98.6	14.14	10.36	4.27	0.21	14.74	5.73	1.447
160	64.3	14.1	7.9	11.9	0.8	99.0	10.44	10.49	4.41	0.21	17.26	6.35	0.511
180	57.3	13.1	6.3	21.7	0.5	98.9	9.70	10.33	3.33	0.20	14.15	6.59	0.372
200	1.2	1.5	0.8	94.5	0.8	98.8	1.01	0.99	0.47	0.03	18.82	6.78	0.127
220	1.1	1.2	0.6	96.0	0.8	99.7	0.90	0.82	0.33	0.03	15.88	6.74	0.097
240	0.0	0.9	0.7	96.6	0.8	99.0	0.70	0.66	0.29	0.02	17.46	6.83	0.078

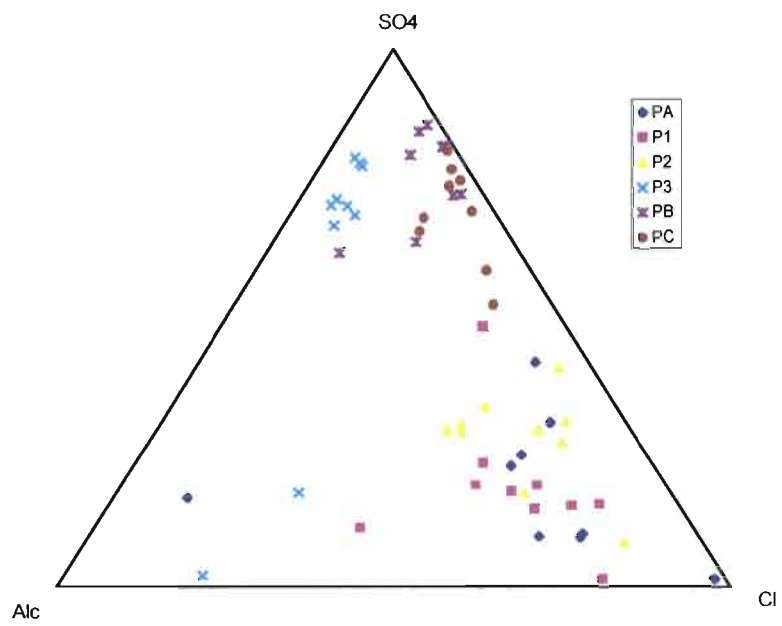
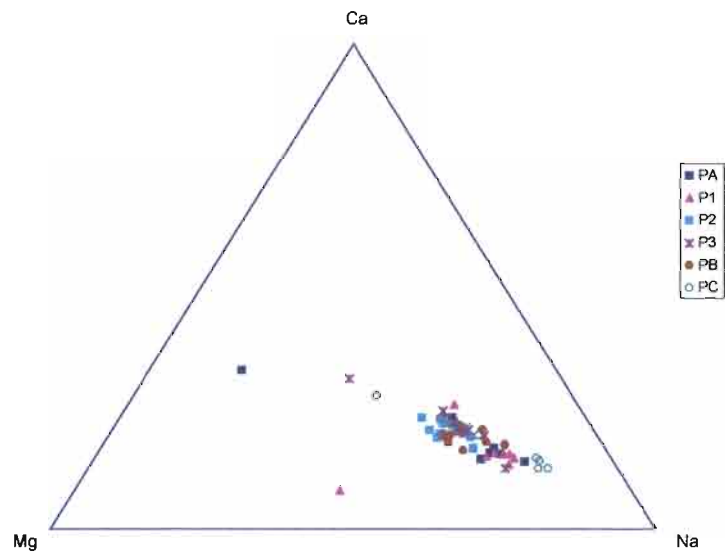
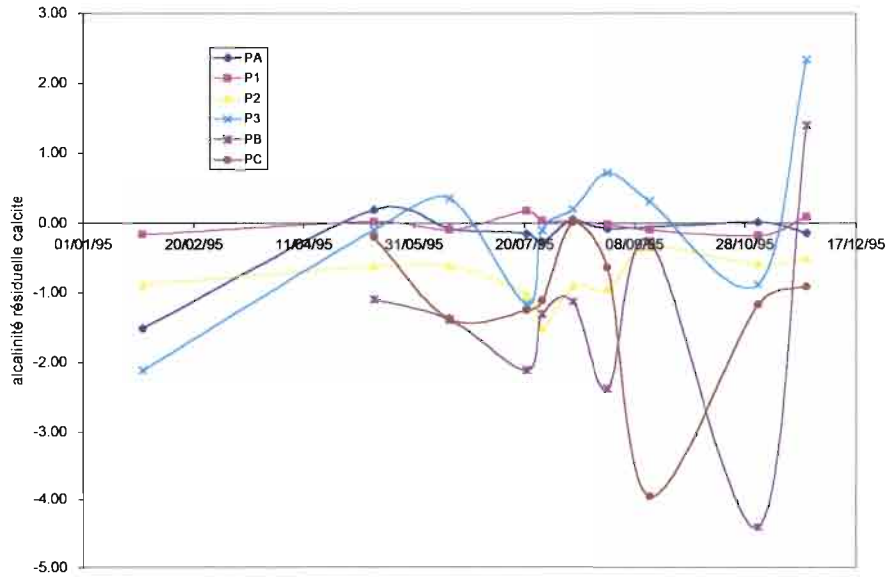
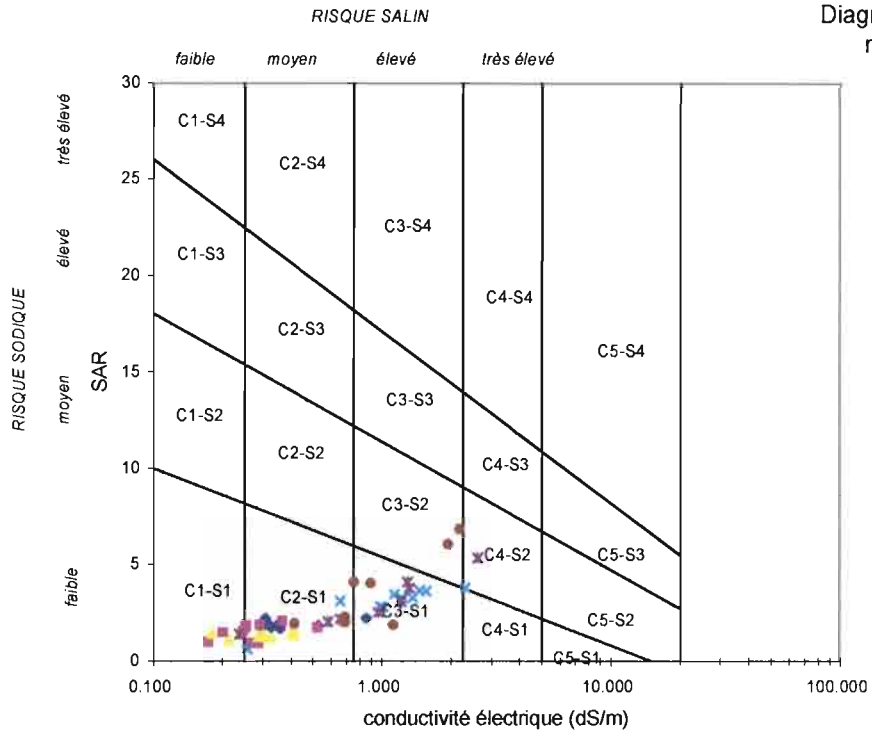


Diagramme de Riverside
nappe à Donaye



4-3. Mboyo 7

Le périmètre de Mboyo 7 est un périmètre FED de 15 ha sur un sol argileux situé en bordure du Fleuve Sénégal et du Gayo son affluent et les piézomètres sont installés comme mentionnés sur le plan (Fig. 4).

Comme à Donaye, la nappe se situe dans un aquifère sableux. Le sable est toutefois moins homogène car sa texture tend à être plus limoneuse. Le sable est de couleur beige à ocre ou ocre/rouge. Cet horizon sableux est épais de 1.5m à 2m suivant les piézomètres; il repose sur un horizon sableux de couleur grise, assez limoneux à son apparition, puis fin en profondeur.

Le secteur de Mboyo 7 étudié a été cultivé avec du riz pendant l'hivernage 95; aucune culture n'a eu lieu en contre-saison chaude. La saison culturale a débuté fin août (jour n°240) et s'est achevée vers le 15 novembre (jour n°318) sur les parcelles 1 à 6 du secteur étudié.

Observations piézométriques

Les relevés piézométriques ont débuté en juillet 95 environ un mois avant la première mise en eau.

A la mise en eau des parcelles 1 à 6, la nappe est déjà remontée dans certains piézomètres (MB1, MB6). Les parcelles du périmètre entier ont été mises en eau à la même période, cette remontée est donc due à l'influence de la crue du Fleuve.

Par la suite, il devient difficile de faire la part des influences respectives des apports par irrigation ou infiltration depuis la berge, d'autant plus que la dernière irrigation aura lieu quelques jours après la décrue. On peut cependant remarquer que tous les piézomètres du transect n°1 ont amorcé une redescende avant que les parcelles de la zone étudiée soient à sec (jour n°318). L'influence du Fleuve sur le fonctionnement de la nappe semble donc être prépondérante. La figure fig.12 montre que le piézomètre MB1 réagit aux fluctuations du Fleuve.

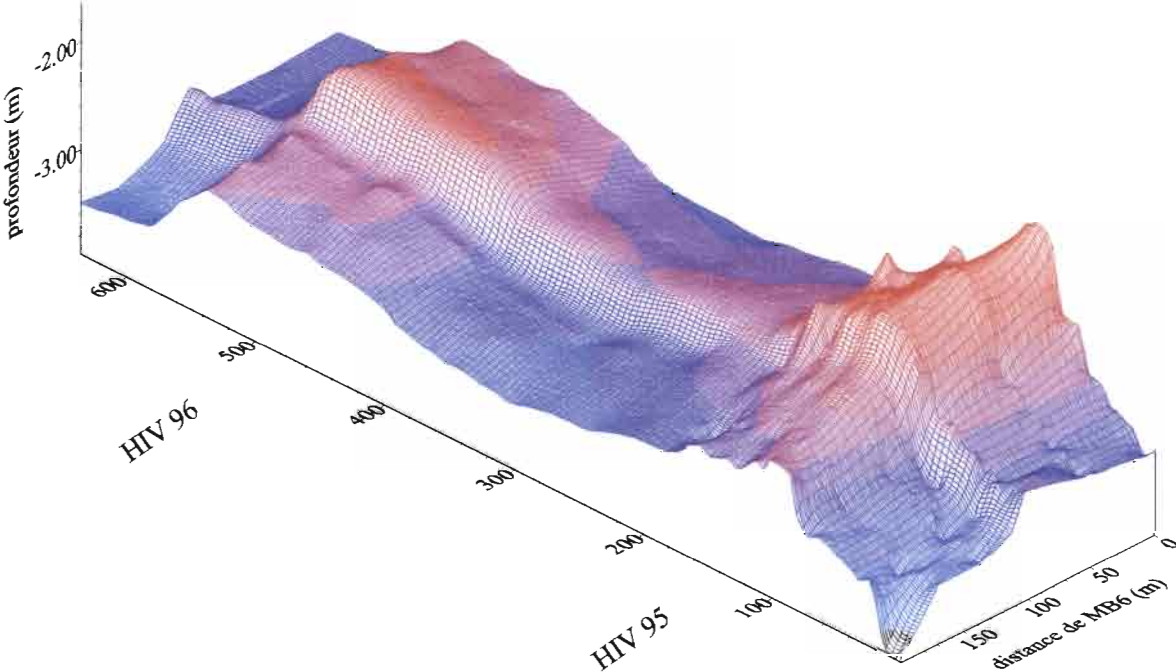
Lors de la période de crue, la nappe monte uniformément dans tous les piézomètres sauf dans MB6 qui réagit plus vite. MB6 est le piézomètre le plus près du centre du périmètre. Les données recueillies ne suffisent pas à dire si la nappe au voisinage de MB6 est alimentée par les apports d'irrigation, par le Fleuve ou par le Gayo à l'opposé. On peut remarquer toutefois que la nappe de la zone du transect au voisinage des piézomètres MB2 à MB4 est alimentée d'une part par le Fleuve, d'autre part par la nappe centrée sur le périmètre.

Globalement, les amplitudes des variations de la nappe de Mboyo sont faibles par rapport à celles de la nappe de Donaye IT1. La différence de taille des périmètres, les conductivités hydrauliques moindres à Mboyo et la proximité à Mboyo de 2 cours d'eau qui facilite le drainage en sont les causes les plus probables.

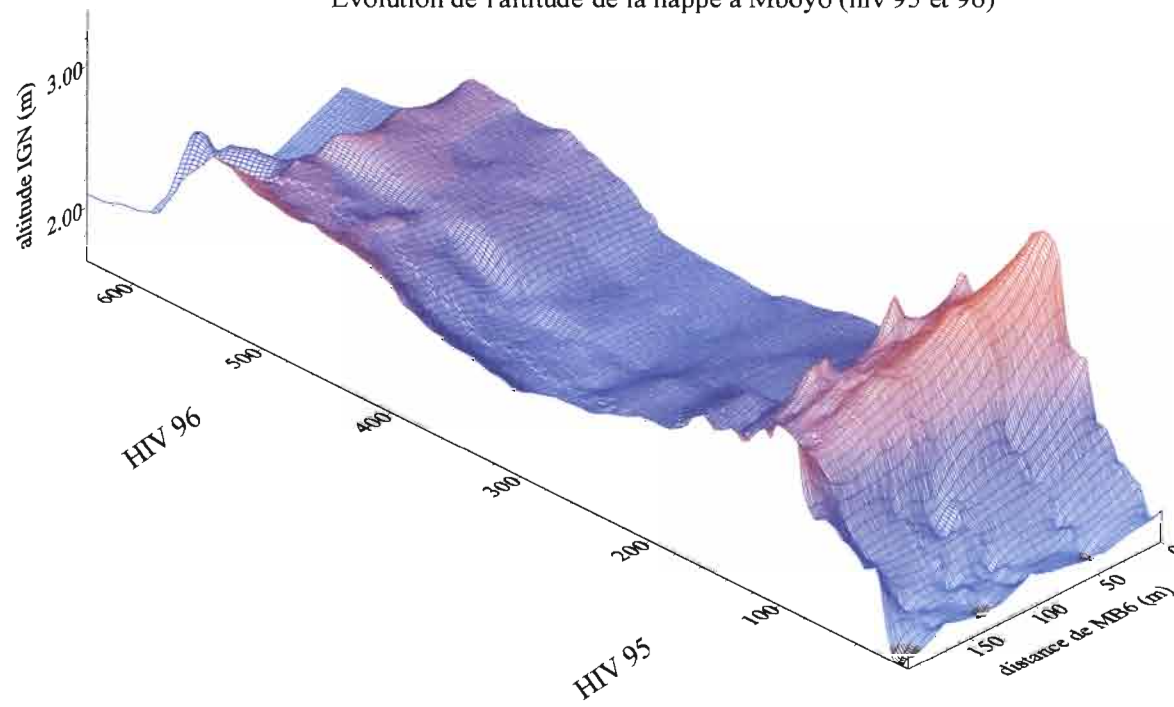
Sur le site de Mboyo la chimie de l'eau de la nappe est très particulière dans la mesure où c'est une eau chlorurée sodique correspondant à de l'eau mer légèrement diluée. L'influence de la géochimie du fleuve se ressent légèrement au niveau du piézomètre MB1 où l'alcalinité résiduelle calcite est positive.

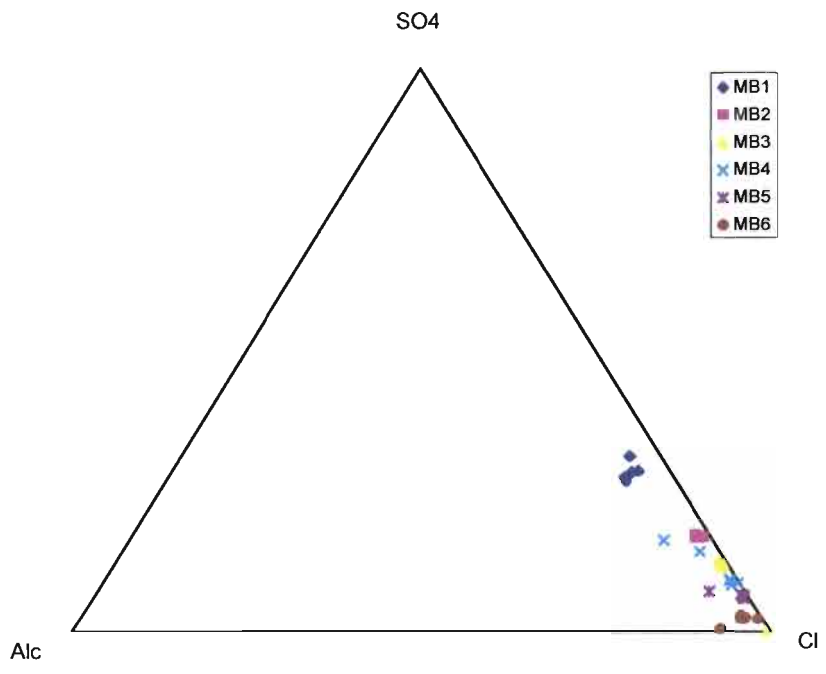
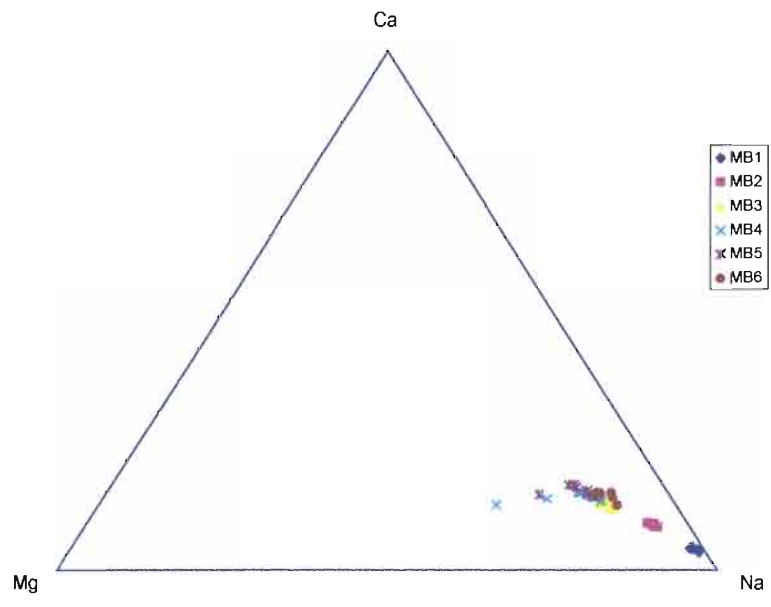
Tout comme sur le site de Donaye l'influence de l'irrigation est négligeable sur le chimisme de la nappe.

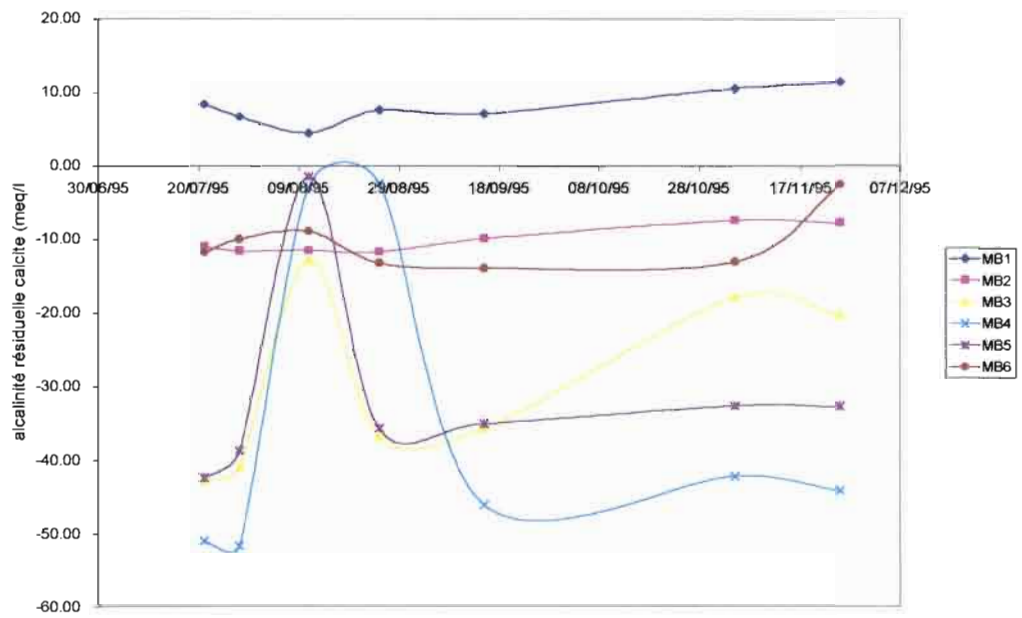
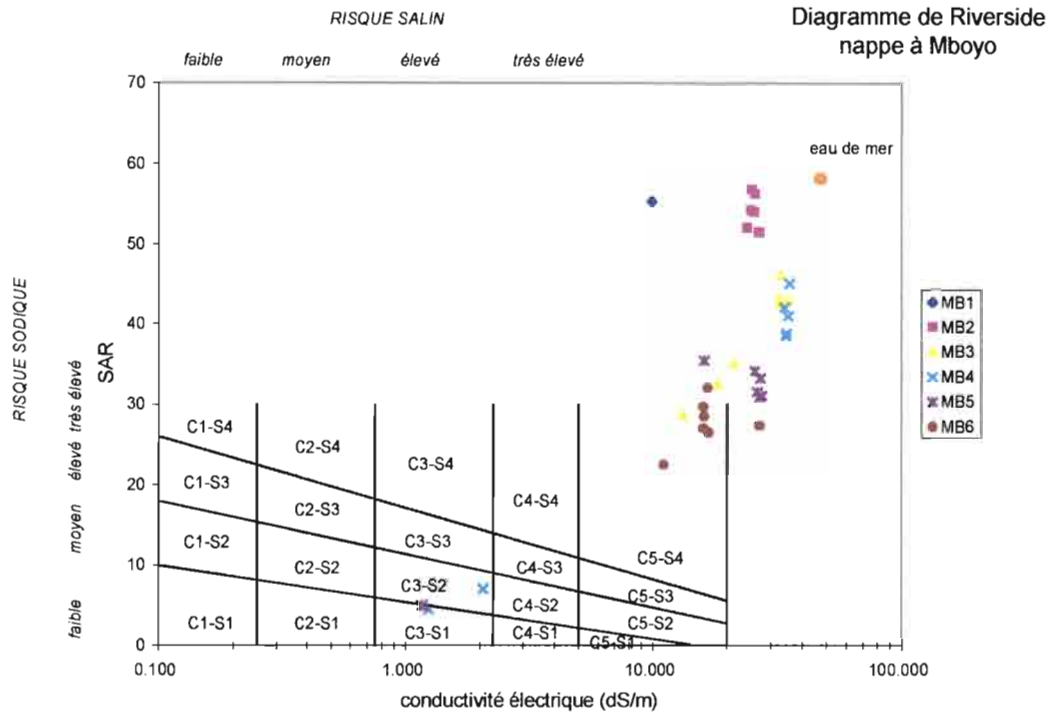
Evolution de la profondeur de la nappe à Mboyo (hivernages 95 et 96)



Evolution de l'altitude de la nappe à Mboyo (hiv 95 et 96)







4-2. Ouro Madiou

Le périmètre d'Ouro Madiou est un périmètre FED de 12 ha sur fondé et il est habituellement destiné au maraîchage (cultures d'oignons et de tomates). Il est installé sur un bourrelet de berge en bordure du Doué dont la texture est limoneuse à argileuse en surface.

Les figures fig.2 et 3 montrent le plan général du périmètre et la zone d'étude comprenant un transect de 6 piézomètres en direction du Doué.

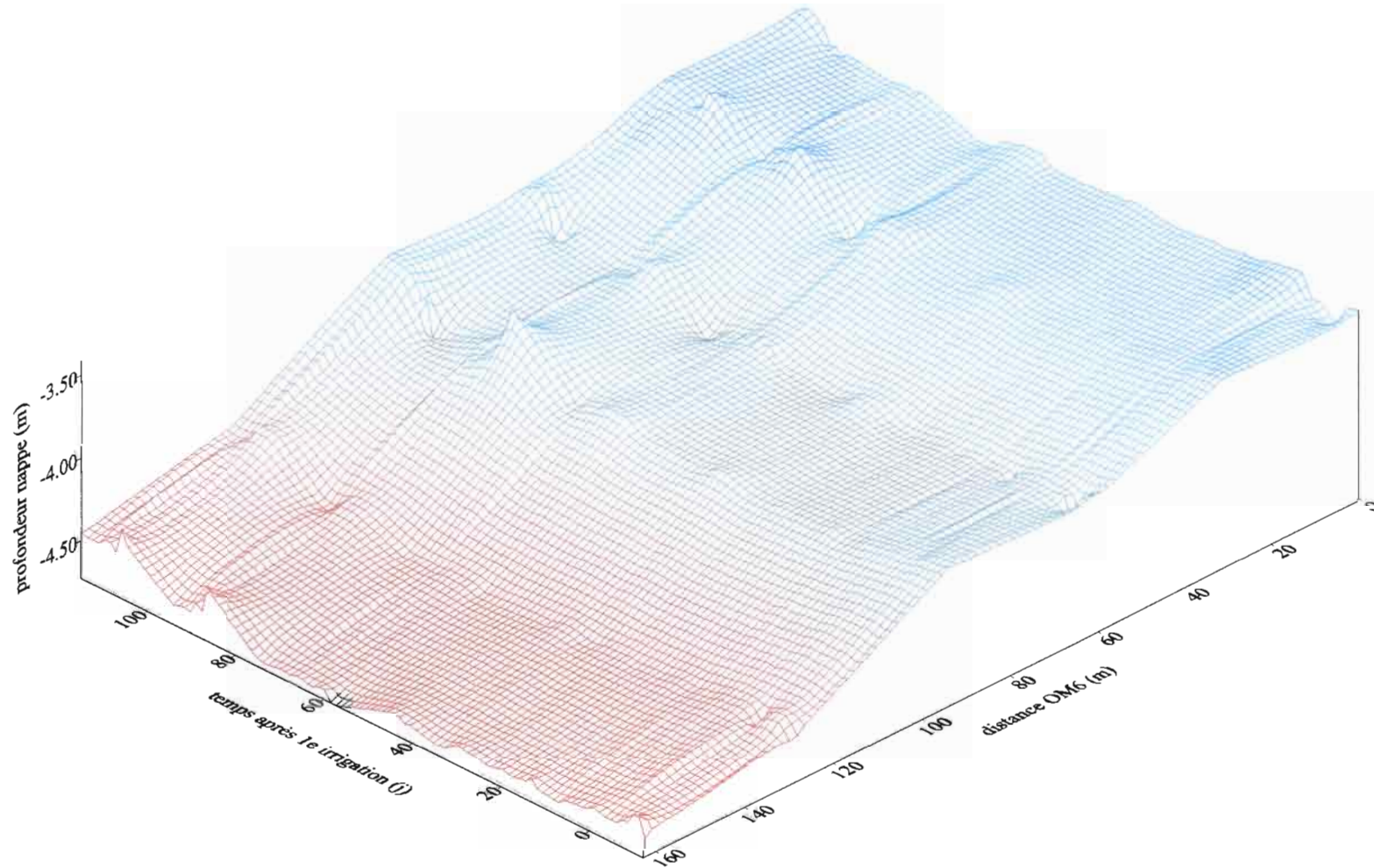
Observations piézométriques

La nappe se situe en saison sèche à une profondeur d'environ 4m et peut remonter lors de la crue. L'aquifère est sableux dans la partie éloignée du Doué, plus limoneux lorsqu'on s'en rapproche. On trouve d'ailleurs assez profondément le même sable limoneux gris qu'à Mboyo. On remarque que seuls les piézomètres OM1 et OM2 réagissent à la crue à l'époque où le niveau est le plus élevé. L'alimentation de la nappe semble limitée par la présence d'une langue argileuse suivant la surface de la nappe mais dont la position et l'impact restent à préciser. On peut considérer que les piézomètres suivants sont quasi-statiques le long de l'année quelle que soit l'activité culturale. En effet, Diaw (1996) montre sur le même périmètre que le profil hydrique n'évolue pas au-delà de 1.50m de profondeur sous culture d'oignons et de tomates. Bien que la texture des sols soit légère les apports d'irrigation sont faibles: on estime à environ 450m³ par ha la quantité d'eau nécessaire à une campagne de culture d'oignons. La quantité nécessaire pour une campagne de tomates est sensiblement identique bien que la campagne soit plus longue.

La composition de la nappe est chlorurée-sulfatée sodique avec de fortes valeurs de SAR. Elle couvre une large gamme dans le diagramme de Riverside, allant de compositions à risques faibles pour les piézomètres proches du Doué, jusqu'à des risques de salinisation et sodisation importants, pour les piézomètres les plus éloignés.

En conclusion, sur ce périmètre où se pratique la culture maraîchère, les apports d'eau sont faibles et n'intéressent que la partie supérieure du profil de sol. La nappe n'est donc pas rechargée par l'irrigation de ce périmètre. Par ailleurs de par sa position topographique élevée, la crue de fleuve ne permet pas non plus de lessiver les sels apportés au cours de la culture. Compte tenu de la composition carbonatée de l'eau d'irrigation (alc. résiduelle calcite et alc. résiduelle calcite + Mg >0) il existe donc un risque d'alcalinisation potentiel pouvant s'exprimer à la faveur d'une culture intensive de ce périmètre.

Evolution de la nappe sur le périmètre d'Ouro Madiou (maraîchage CS froide 96)



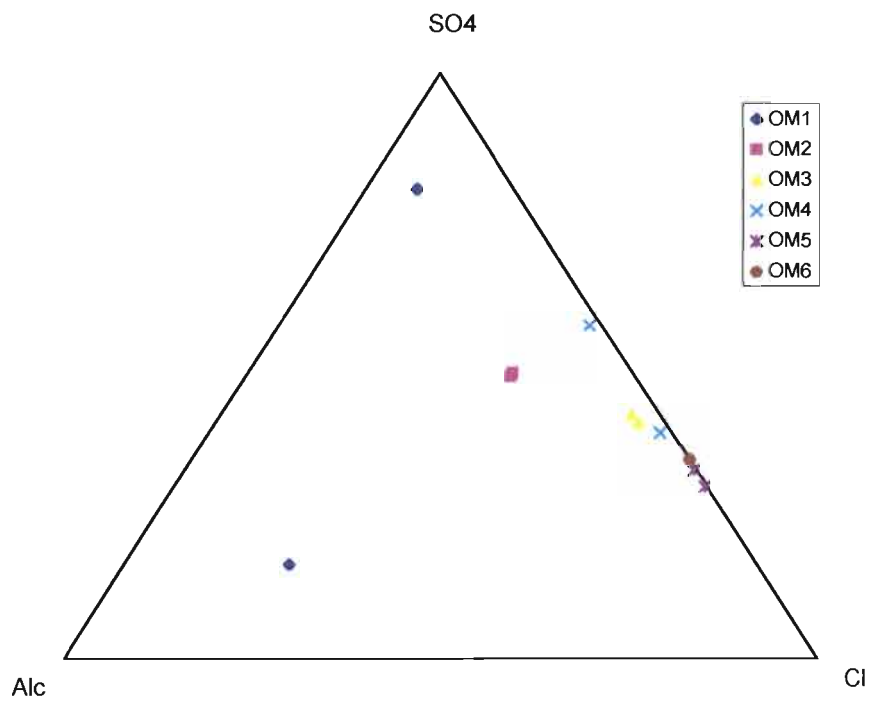
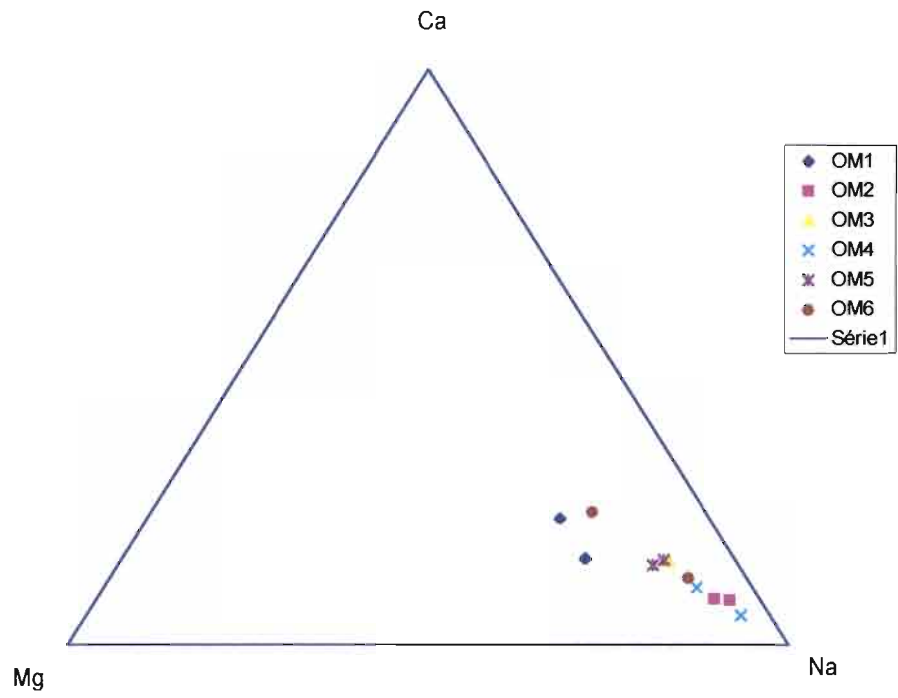
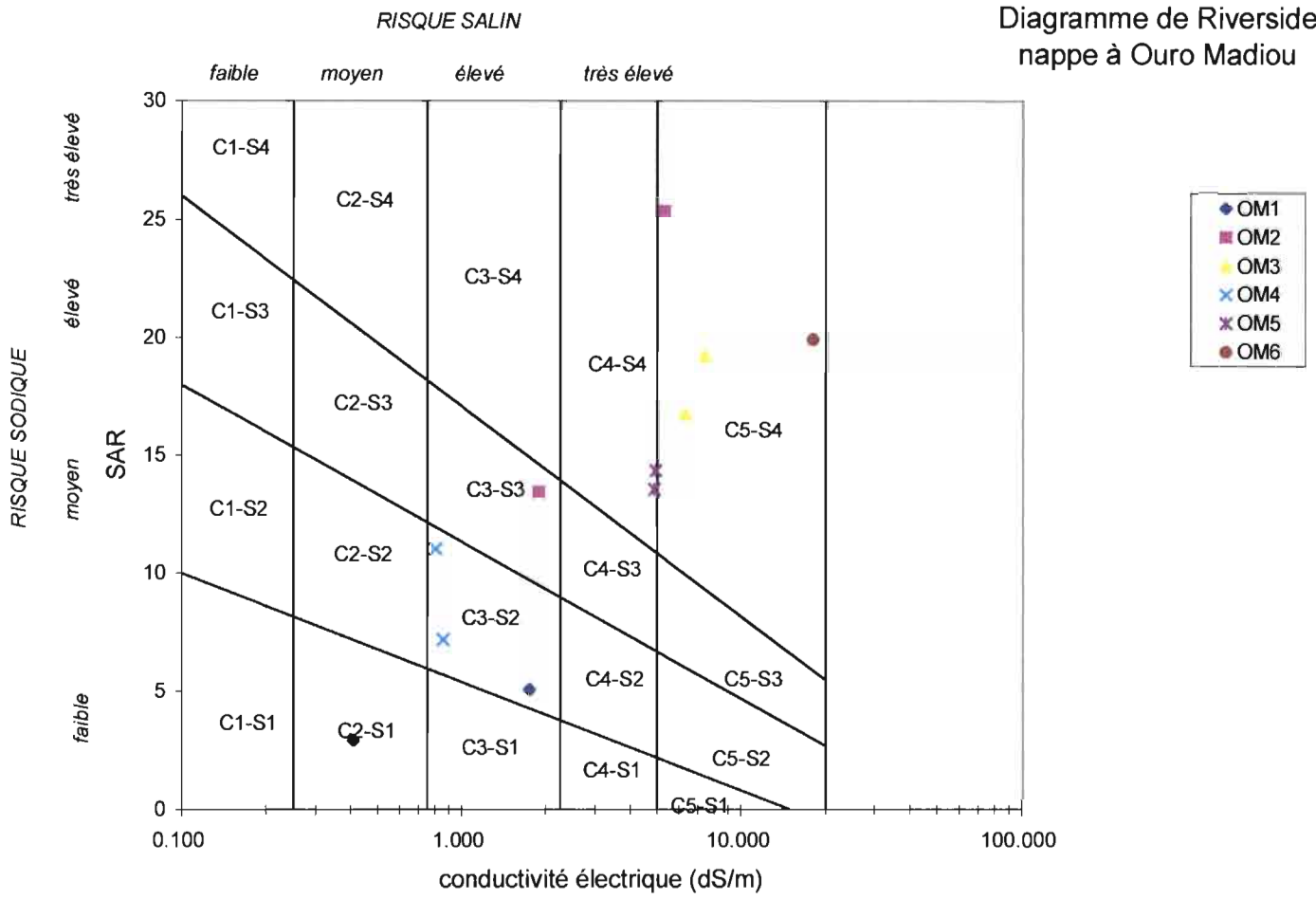


Diagramme de Riverside
nappe à Ouro Madiou



Conclusion

Un suivi piézométrique plus ou moins long a été réalisé sur trois sites différents dans la région de Podor. Chacun présente des caractéristiques particulière tant du point de vue de son fonctionnement hydrique que de la qualité chimique de la nappe. A Donaye, la nappe proche de la surface, réagit rapidement à l'irrigation, et il arrive que le niveau piézométrique dépasse la surface du sol à proximité du canal d'irrigation. Par ailleurs à ce niveau le faciès chimique de la nappe est affecté par la qualité de l'eau d'irrigation, bien que de manière général elle conserve son faciès salin neutre. Sur le site d'Ouro Madiou, la culture maraîchère, imposée par la texture limoneuse du sol n'a absolument aucun effet sur la recharge de la nappe. Pendant le suivi piézométrique sur le site de Mboyo aucune culture de contre saison n'a été effectuée. De ce fait il est difficile d'apprécier précisément la contribution de l'irrigation à la variation de la hauteur piézométrique par rapport aux périodes de crue. Néanmoins il est clair que l'influence du Fleuve est prépondérante sur le fonctionnement de la nappe. Compte tenu de l'extrême salinité de la nappe à cet endroit, l'influence chimique de l'eau du Fleuve est imperceptible. De manière générale, bien que sur le site de Donaye on observe indéniablement une recharge de la nappe lors de l'irrigation, les grands mouvements de nappe sont avant tout déterminés par les fluctuations du Fleuve dans ces petits périmètres.

Références bibliographiques.

BOIVIN P. et LAVAL F. (1995) - Rapport de campagne des travaux d'expérimentation ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, région de Podor, Volet Irrigation et Dynamique des nappes superficielles, contre-saison chaude et hivernage 1995, ORSTOM.

BOIVIN P. et LAVAL F. (1996) - Rapport final. Travaux d'expérimentation ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal, région de Podor, Volet Irrigation et Dynamique des nappes superficielles, ORSTOM.

BOUWER H., RICE R. C. (1976) - A Slug Test for Determining Hydraulic Conductivity of Unconfined Aquifers with Completely or Partially Penetrating Wells. *Water Resources Research*, Vol. 12, No. 3, 1976.

DIAW El H. B. (1996) – Modélisation du transfert d'eau en milieu poreux non saturé : application à l'étude de la recharge des nappes d'eau souterraines en région soudano-sahélienne. Thèse Univ. Louis Pasteur Strasbourg, 239pp.

COOPER H. H. Jr, PAPADOPULOS S. S., BREDEHOEFT J. D., 1973 - On the Analysis of 'Slug Test' Data. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 4, 1973, p.1087-1089.

HVORSLEV, J. M., (1951) - Time Lag and Soil Permeability in Ground-water Observations, bull.36, 50pp., U.S. Corps of Eng., Waterways Exp. Sta., Vicksburg, Miss.

PAPADOPULOS S. S., BREDEHOEFT J. D., COOPER H. H. Jr (1973) - On the Analysis of 'Slug Test' Data. *Water Resources Research*, Vol. 9, No. 4, 1973.