

**République du Sénégal**

**Ministère de l'Agriculture**

Société Nationale d'Aménagement et  
d'Exploitation des terres du Delta du  
fleuve Sénégal et des vallées du fleuve  
Sénégal et de la Falémé

**S.A.E.D.**

---

contrat n° 25/2000

**Financement : KFW**

**Convention : 90 65 178**

**Objet : Suivi et évaluation de la qualité des eaux et de l'impact  
environnemental des aménagements du secteur N'Gallenka**

---

**1<sup>er</sup> Rapport**

Juillet 2001

Claude HAMMECKER  
Jean-Luc MAEGHT



Institut de recherche  
pour le développement

DEZ φ HAM

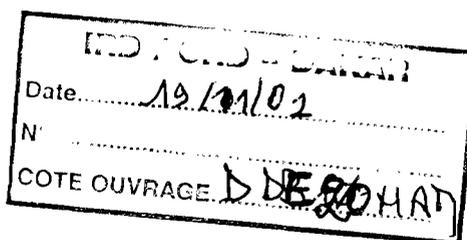
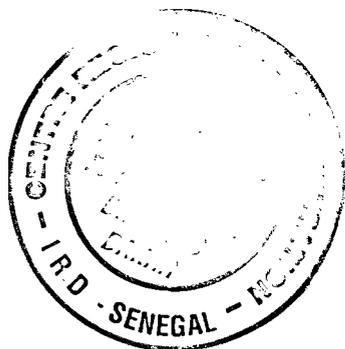
## Remarques préliminaires.

Afin de collecter un maximum d'informations sur l'évolution physique et chimique de l'impact environnemental de l'irrigation dans le secteur N'Gallenka, le suivi des mesures présentées dans ce rapport a débuté en janvier 1999, soit un an et demi avant la signature du contrat.

A l'heure actuelle tous les piézomètres implantés ne sont pas encore actifs pour différentes raisons (profondeurs de forage non respectées ou périmètres non encore aménagés). Les données piézométriques présentées ici ne concernent donc que 10 piézomètres pour le moment.

Les résultats chimiques ne sont actuellement pas encore tous disponibles du fait de retards pris dans le processus d'analyse lié au réaménagement du laboratoire d'analyse de l'IRD de Hann. Ce retard sera rattrapé dès le redémarrage du laboratoire et les résultats seront présentés dans le rapport suivant.

Les résultats présentés ici ont été obtenus partiellement grâce à la participation de D. Marrant et M. Faignant, qui ont réalisé leur mémoire de stage sur le secteur concerné.



## **Introduction**

Suite à des études sur l'impact de l'irrigation sur les sols dans la région de Podor menées au sein du laboratoire de pédologie de l'IRD (ex Orstom), un certain nombre de risques de dégradation ont pu être définis. Il s'agit essentiellement de risques salins qui sont liés d'une part aux nombreux dépôts de sels laissés lors des transgressions marines quaternaires, et d'autre part à la qualité de l'eau d'irrigation que présente un faciès très alcalin. Lors de la mise en place du périmètre irrigué du secteur N'Gallenka, il a donc paru important de suivre l'impact de ce périmètre sur un espace nouvellement aménagé, dans lequel en particulier le niveau de la nappe est gouverné uniquement par les fluctuations du niveau du fleuve. Un réseau de 18 piézomètres a donc été mis en place sur le secteur à aménager afin de suivre d'une part l'évolution du niveau de la nappe, et d'autre part de suivre l'évolution de la qualité chimique de cette nappe.

### **Les risques de dégradation par l'irrigation**

L'irrigation d'un sol place ce dernier dans une situation fondamentalement différente d'un régime pluvial : si douce soit-elle, l'eau d'irrigation possède des caractéristiques chimiques susceptibles, à plus ou moins long terme, de modifier le sol. La modification du régime hydrique est également un changement profond des conditions de pédogenèse, dont les conséquences doivent être envisagées. La gestion conservatoire des sols irrigués dans la vallée pose effectivement des problèmes liés au transfert de sels et à la gestion de l'eau.

#### *La salinisation*

Les sels neutres, d'origine marine, sont présents à partir de 80 cm de profondeur environ dans tous les sols de la moyenne vallée aval. L'irrigation entraîne un rehaussement des nappes et une évaporation permanente qui favorisent une remontée des sels dans les profils.

D'une part, la salinité des périmètres irrigués de la région de Podor a été multipliée par un facteur entre 7 et 15 en moins de 10 ans, indépendamment du type de sol (Poitevin, 1993). D'autre part, la conductivité électromagnétique moyenne sur l'ensemble des périmètres est de l'ordre de 300 mS/m, cette teneur est voisine des seuils de tolérance de la culture pratiquée, le riz. Cette nuisance est effectivement partout constatée par les exploitants (Boivin et al., 1995). Une carte de salinité a été établie dans le secteur du N'Gallenka avant la mise en place des périmètres irrigués par Barbiero et al. (2001).

#### *La sodisation*

La sodisation des argiles correspond à l'accumulation de sodium sur le complexe d'échange. Elle entraîne un effondrement de la structure du sol. Etant donné les taux de sodium et magnésium échangeables des sols, et leur faible stabilité structurale, nous pouvons penser qu'un lessivage bien conduit et utilisant l'eau du fleuve ne devrait pas poser de problèmes.

### *L'alcalinisation*

Le danger le plus sérieux provient de la qualité de l'eau du fleuve. En première approche, elle paraît d'excellente qualité : pH proche de la neutralité, conductivité électrique faible, SAR relativement faible, ce qui écarte a priori les risques de sodisation sous irrigation. Or, il s'avère que l'eau du fleuve Sénégal est carbonatée, elle possède une alcalinité résiduelle calcite positive. On appelle alcalinité résiduelle vis à vis d'un minéral donné, l'alcalinité qui reste dans l'eau lorsque le minéral précipite. Une alcalinité résiduelle positive correspond à un excédent de bases faibles dans l'eau, donc une tendance vers un pôle alcalin.

C'est le cas de l'eau du fleuve Sénégal, vis à vis de la calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), il présente un excès de carbonates ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) par rapport au calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ). La calcite étant le premier minéral à précipiter lors de la concentration de l'eau du fleuve, la teneur relative en calcium diminue, et celle en carbonates augmente. Le phénomène d'accumulation résiduelle de carbonates augmentera au cours du temps. En conséquence, les carbonates étant une base faible, le pH va rapidement s'élever vers une valeur de 8.4 (équilibre avec la calcite). D'autre part, la teneur en calcium de l'eau du sol diminuant (consommation par la cristallisation de calcite) et le sodium se concentrant, le rapport sodium/calcium atteint alors des valeurs élevées, et une accumulation de sodium sur les sites d'échange des argiles (soit une sodisation du sol) se produit.

Une nouvelle étape est franchie, et dont la réversibilité est mal connue et en tout état de cause coûteuse. Ce constat est d'actualité pour les sols de l'Office du Niger au Mali (BERTRAND et al., 1993), où la pratique de l'irrigation pendant des décennies a fait remonter la nappe de 50m et qui a ainsi contribué à l'alcalinisation des sols.

## 1. Caractéristiques d'implantation des piézomètres.

Les forages des piézomètres ont été réalisés au Rotary en diamètre 8''½ à la boue auto biodégradable de type GS 550 ou Revert.

L'équipement est constitué de tubes PVC de diamètres 3'' ou 4'' crépinés dans la partie captante avec un massif filtrant constitué de gravier roulé calibré. La longueur de la partie gravillonnée dépend de la texture du sol. Un bouchon d'argile en bentonite de 20 à 50 cm d'épaisseur est réalisé immédiatement au-dessus du gravier filtrant. La partie haute du forage, au niveau du terrain naturel, est bouchonnée par une cimentation de tête sur une profondeur de 0.60 à 2.70 m selon les piézomètres. La partie du forage entre le bouchon d'argile en bentonite et la cimentation de tête est constituée d'un remplissage de couches de remblais de terre et de cimentations, si nécessaire.

La tête des piézomètres est constituée par un tube en acier de diamètre 4''½ avec un couvercle cadénassé. Les têtes en acier ont été peintes en bandes rouges et blanches pour un meilleur repérage.

### Type de piézomètres installés sur le NGallenka.

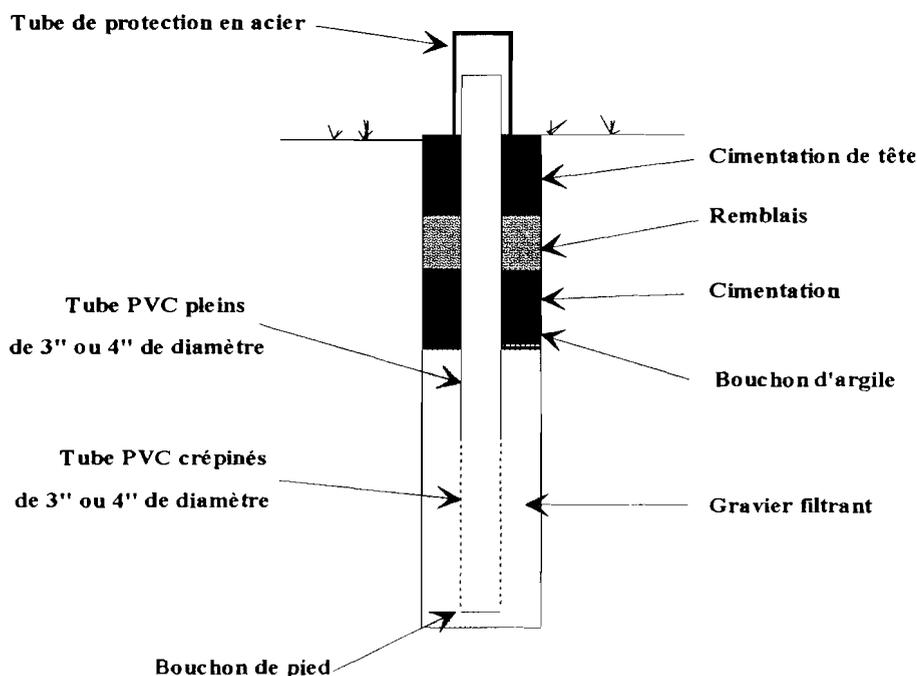
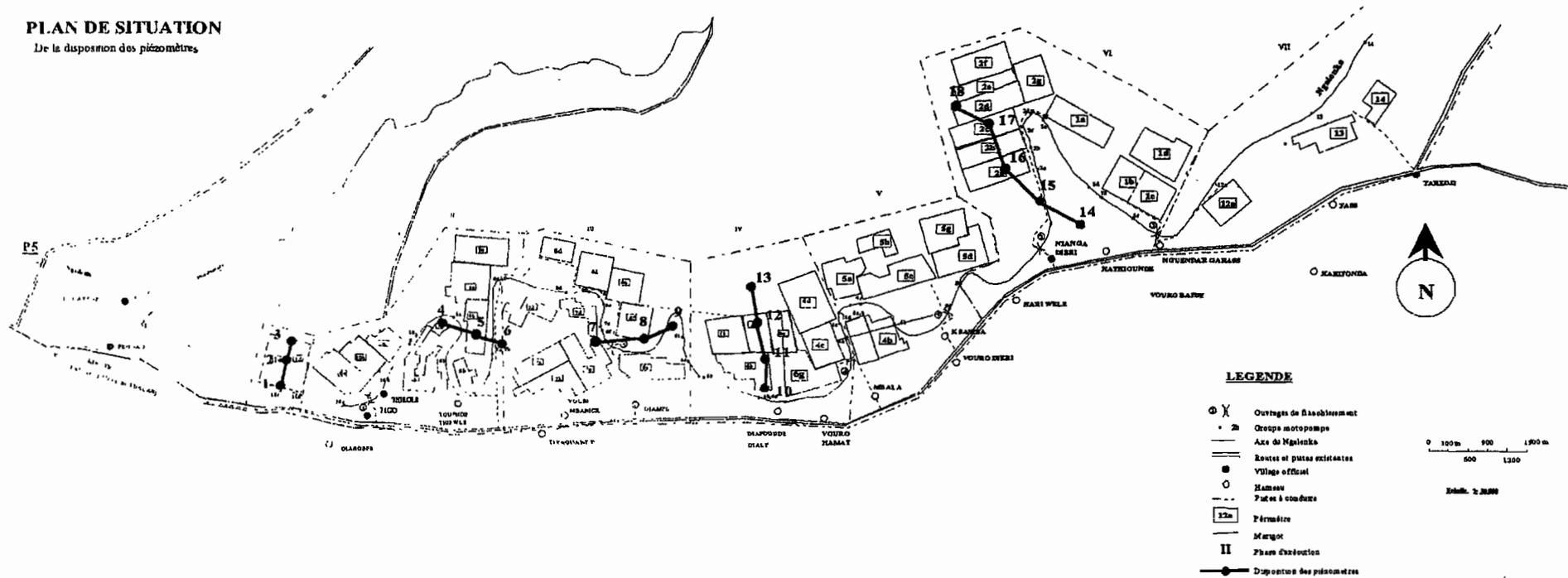


Figure 1: schéma de piézomètre

## SITUATION DES PIEZOMETRES SUR LE NGALLENKA.

### PLAN DE SITUATION

De la disposition des piézomètres



## 2. Caractérisation physique des sols

L'étude de la dynamique des transferts hydriques dans les sols est souvent conditionnée par la connaissance d'un certain nombre de propriétés physiques de ces sols. En particulier la texture des sols qui détermine généralement les propriétés de rétention d'eau et de conductivité hydraulique.

### 2.1. Analyse granulométrique.

Lors de l'implantation des piézomètres, les forages ont été partiellement carottés et des échantillons de sol ont pu être prélevés. Suivant l'homogénéité et / ou la quantité de sol disponible, des mesures de granulométrie ont été effectuées sur les différents horizons de sols traversés.

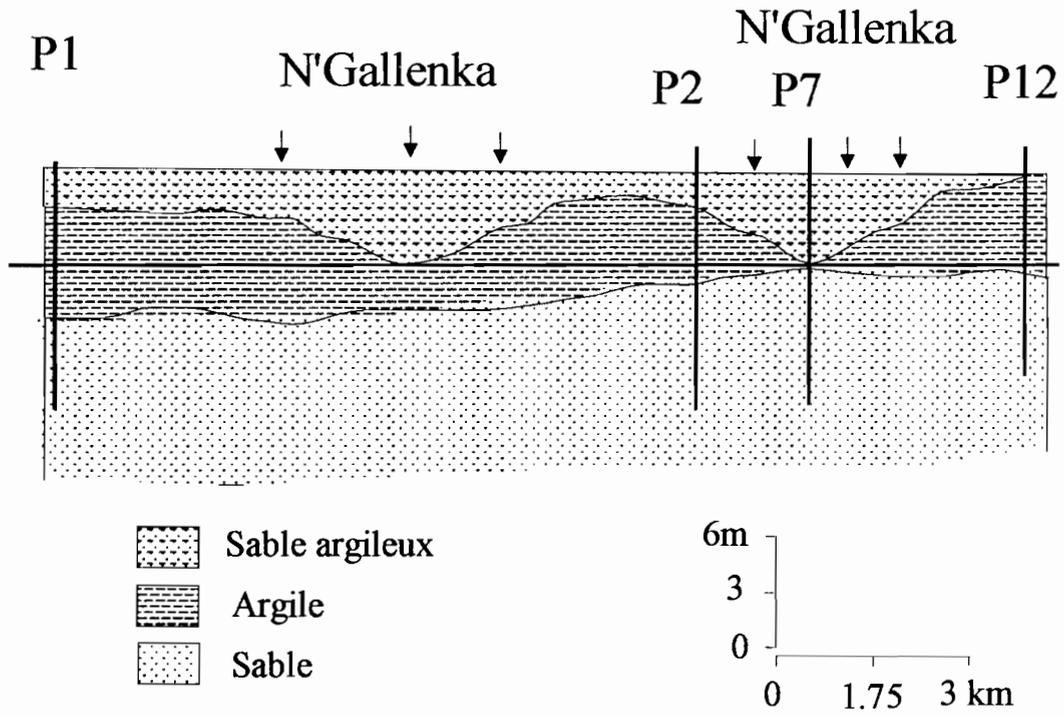
De manière générale la texture des sols dans le secteur N'Gallenka suit une séquence souvent identique : un dépôt sablo argileux surmontant localement un niveau plus argileux puis un niveau sableux qui renferme l'aquifère. Il a ainsi été possible de déterminer des coupes lithologiques suivant différents transects présentés ci dessous.

Lorsque l'on est à la verticale ou proche du marigot N'Gallenka, on remarque cette couche de sable argileux allant jusqu'à plusieurs mètres d'épaisseur. Elle est due aux dépôts successifs du marigot au cours du temps. La puissance pouvant être corrélée avec le temps de dépôt à cet endroit. L'étendue horizontale est caractéristique des variations latérales du lit du N'Gallenka.

Le piézomètre 10 est le seul présentant une couche argileuse profonde. Cela avait d'ailleurs été signalé lors de la pose du piézomètre : un retard avait été enregistré du fait de la présence d'argile compacte.

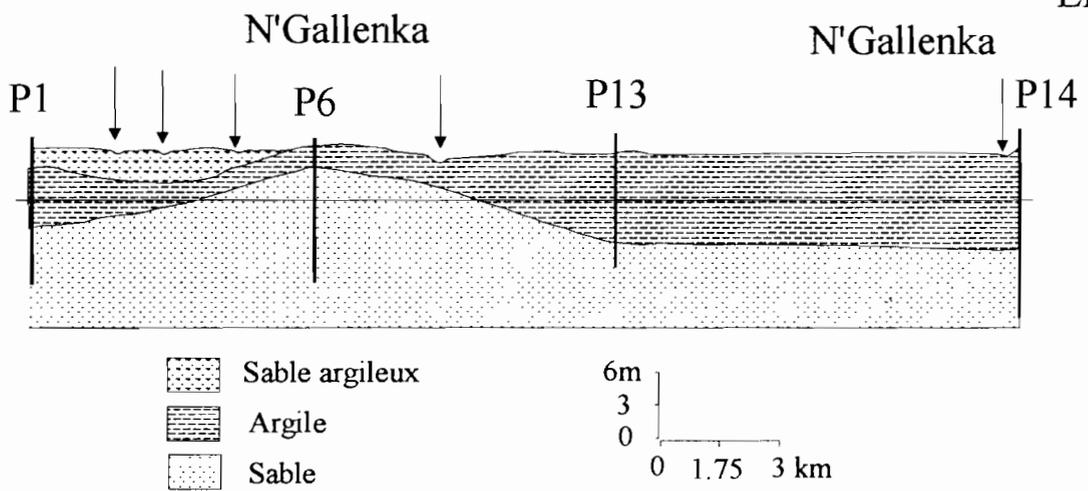
WSW

ENE



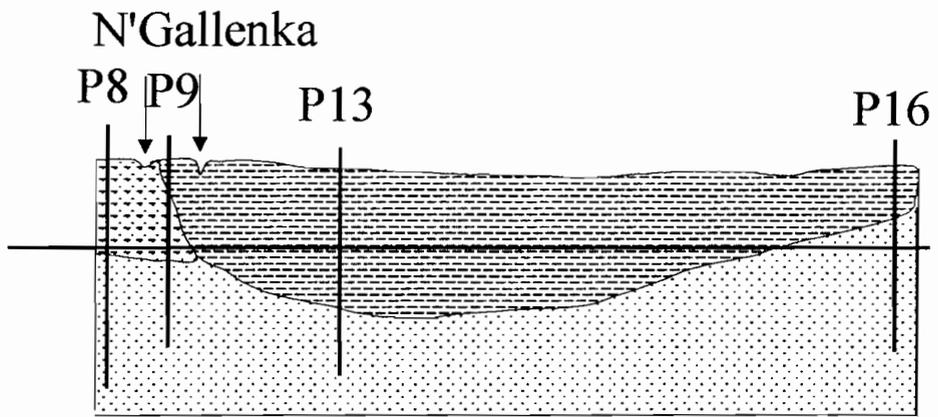
WSW

ENE

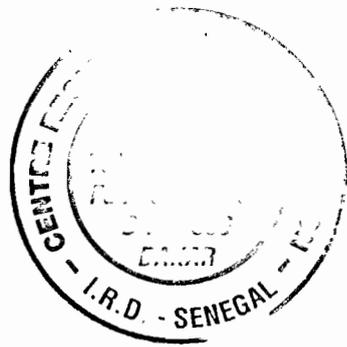
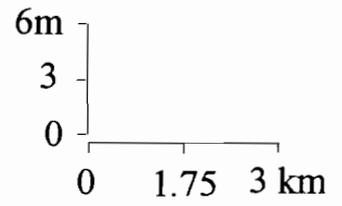


SW

NE



-  Sable argileux
-  Argile
-  Sable



Les analyses granulométriques présentées en annexe, montrent clairement qu'en profondeur, l'aquifère est localisé dans des niveaux sableux. Ceux ci qui peuvent présenter de teintes variables.

## 2.2. Détermination des propriétés de rétention.

L'étude des transferts hydriques dans les sols en particulier dans la zone non saturée situé juste au-dessus de l'aquifère, par laquelle transitent les flux d'eau de surface, est conditionnée d'une part par la conductivité hydraulique du milieu et d'autre part par leurs propriétés de rétention. En effet ce sont ces propriétés qui avec la gravité sont les principaux « moteurs » de transfert d'eau. Que ce soit lors des phases d'irrigation, qui contribuent à la recharge de la nappe ou lors des phases de redistribution de l'eau dans le profil de sol pendant les phases d'évaporation. Par ailleurs si l'on envisage de quantifier les transferts hydriques et salins, ces données sont indispensables pour l'usage de modèles de simulation numériques. Comme les échantillons recueillis lors des forages, ont été systématiquement remaniés les courbes de rétentions n'ont pas pu être déterminées directement selon avec les techniques traditionnelles, mais elles ont pu être estimées à partir des courbes de granulométrie. La méthode de détermination des courbes de rétention est celle de Arya et al. (1999) qui est une

méthode indirecte permettant d'estimer la courbe de rétention d'un sol à partir des données de la taille des particules (la granulométrie). En effet, en se basant sur l'analogie entre la répartition de la taille des grains et celle des pores, il est possible de reconstituer une courbe de rétention à partir d'une courbe granulométrique.

Cette méthode consiste à fractionner la courbe de distribution de la taille des particules en  $n$  fractions de même porosité. Chaque fraction est supposée composée de particules sphériques de taille uniforme.

Tout d'abord, le volume des pores est défini par :

$$V_{pi} = \frac{w_i}{\rho_s} \cdot e \cdot \pi \cdot r_i^2 \cdot l_i \quad [1]$$

- Avec -  $w_i$  : la masse solide d'une fraction [M],  
 -  $\rho_s$  : la densité des particules [M.L<sup>-3</sup>],  
 -  $e$  : l'indice des vides,  
 -  $r_i$  : le rayon des pores [L],  
 -  $l_i$  : la longueur des pores [L.M<sup>-1</sup>].

L'indice des vides,  $e$ , représente le volume relatif des espaces vides, c'est-à-dire le volume des vides par rapport au volume des particules. Ce qui revient à :

$$e = \frac{\text{Volume total} - \text{Volume des particules}}{\text{Volume des particules}}$$

Il est généralement compris entre 0,3 et 2,0 et s'exprime par la relation suivante :

$$e = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_b} \quad [2]$$

Avec  $\rho_b$  : la densité apparente du sol [ $M.L^{-3}$ ] qui peut varier de 1,5 à 1,8.

La teneur en eau,  $\theta_i$  [ $L^3.L^{-3}$ ], est obtenue par additions successives du volume des pores remplis d'eau, soit :

$$\theta_i = \phi \cdot S_w \cdot \sum_{j=1}^{j=i} w_j \quad [3]$$

Avec -  $S_w$  : un facteur correctif dans le cas où la porosité calculée par les densités serait différente de celle mesurée par une autre méthode (saturation en eau),

-  $i = 1, 2, \dots, n$ ,

-  $\phi$  : la porosité totale [ $L^3.L^{-3}$ ]. Elle est constituée par l'ensemble des vides contenus dans une roche, et elle est mesurée en % du volume total de la roche. Soit :

$$\phi = \frac{\text{Volume total} - \text{Volume des particules}}{\text{Volume total}} = \frac{\rho_s - \rho_b}{\rho_s}$$

Le nombre de particules sphériques,  $n_i$ , pour chaque fraction de la courbe de la répartition de la taille des particules, est calculé de la manière suivante :

$$n_i = \frac{3 \cdot w_i}{4 \cdot \pi \cdot \rho_s \cdot R_i^3} \quad [4]$$

Avec  $R_i$  : le rayon des particules moyennes pour les  $i$  fractions de taille de particules.

Pour un sol idéal constitué de particules sphériques de taille uniforme assemblées de manière cubique,  $l_i$ , peut être estimée par  $l_i = 2 \times n_i \times R_i$ , sachant que le rayon des pores est relié au rayon des particules par :

$$r_i = 0.816 \times R_i \times e \quad [5]$$

Pour un sol naturel constitué de la même masse solide, mais composé de particules non sphériques arrangées au hasard, on introduit un terme correctif

empirique  $\alpha$ , tel que  $l_i = 2 \times n_i^\alpha \times R_i$ . En combinant l'équation (1) et (4),  $\frac{r_i^2}{R_i^3} = \frac{4 \cdot n_i \cdot e}{3 \cdot l}$ , le rayon des pores est relié au rayon des particules par :

$$r_i = 0.816 \cdot R_i \cdot e \cdot n_i^\alpha \quad [6]$$

Avec -  $n_i^\alpha$  : le nombre de particules [sans dimension],

-  $\alpha$  : un paramètre empirique, qui peut varier de 1,35 à 1,7. Par analogie entre la taille des grains et celle des pores, les grains sont assimilés aux pores, donc on peut obtenir l'espace vide. Le paramètre  $\alpha$  essaie de rendre compte de la tortuosité du réseau poreux sans préjuger du type d'empilement. Il est donné par la relation suivante :

$$\alpha = \frac{-2.478 + 1.490 \cdot \log\left(\frac{w_i}{R_i^3}\right)}{\log\left(\frac{3 \cdot w_i}{4 \cdot \pi \cdot \rho_s \cdot R_i^3}\right)} \quad [7]$$

Sur la base de l'équation de Laplace, il est possible de calculer la pression capillaire associée à chaque taille de pore, selon la relation suivante :

$$h = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \cos \vartheta}{\rho_w \cdot g \cdot r_i} \quad [8]$$

Avec -  $\gamma$  : la tension interfaciale air-eau [ $M \cdot T^{-2}$ ],

-  $\vartheta$  : l'angle de contact entre l'eau et le solide (généralement égal à 0 sur les minéraux [°],

-  $\rho_w$  : la densité de l'eau [ $M \cdot L^{-3}$ ],

-  $g$  : l'accélération de la pesanteur [ $L \cdot T^{-2}$ ].

Les pressions calculées sont couplées avec les teneurs en eau calculées afin d'obtenir la courbe de rétention du sol étudié. Ces courbes sont caractéristiques des propriétés de l'horizon de sol considéré et la forme de ces courbes peut être décrite par différents types de modèles. En général, le modèle le plus utilisé car décrivant au mieux l'allure des courbes de rétentions expérimentales ( $h-\theta$ ), est celui défini par van Genuchten (1980). On pour laquelle sont définis 4 paramètres :

$$\theta = \frac{(\theta_s - \theta_r)}{(1 + (\alpha \cdot h)^n)^m} + \theta_r \quad [9]$$

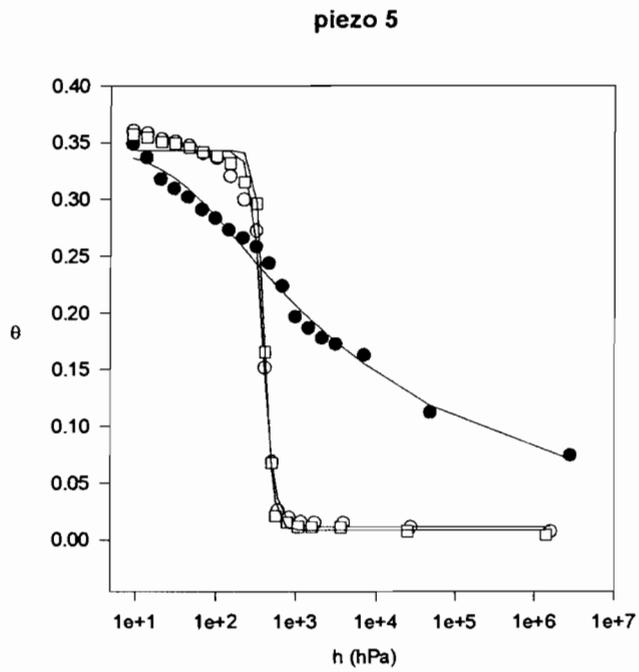
$\theta$  : teneur en eau  
 $h$  : potentiel matriciel  
 $\theta_r$  : teneur en eau résiduelle  
 $\theta_s$  : teneur en eau à saturation  
 $\alpha$  : paramètre empirique proportionnel à la taille des pores  
 $n$  : paramètre empirique de forme de la courbe  
 $m = 1-1/n$

L'exemple présenté ci-dessous illustre typiquement deux types de courbes de rétentions caractéristiques de sols de texture différente. Ainsi dans le piézomètre 5 on distingue un niveau de sol argileux à 1 m de profondeur, alors que les niveaux sous jacents sont caractéristiques de sols sableux avec une répartition plus régulière. Ces caractéristiques sont illustrées par les paramètres de la courbe ajustée en particulier au niveau des paramètres  $\alpha$  et  $n$  :

**Tableau 1: exemple de paramètres de van Genuchten décrivant les courbes de rétention, des horizons de sol du piézomètre 5**

	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$
1m	0.3445	0.0217	0.0275	1.1674
2m	0.3429	0.0117	2.7246e-3	6.3258
7m	0.3429	8.6443e-3	2.5322e-3	8.3756

Les courbes de rétentions pour tous les horizons de sol prélevés ainsi que les paramètres pour les courbes ajustées de van Genuchten sont présentés en annexe [A2]



**Figure 2: exemple de courbes de rétention argileuse et sableuses**

### 3. Mesure de la conductivité hydraulique de l'aquifère

#### 3.1 Définition

La conductivité hydraulique permet de quantifier la facilité avec laquelle un fluide (l'eau) s'écoule à travers un milieu poreux, sous l'effet d'un gradient hydraulique.

Ce gradient est exprimé dans l'équation de Darcy, à l'aide du débit  $q$  d'une surface unitaire :

$$q = K \cdot \frac{\Delta H}{L}$$

- Avec -  $q$  : le débit d'une surface unitaire [ $L \cdot T^{-1}$ ],  
 -  $K$  : la conductivité hydraulique [ $L \cdot T^{-1}$ ],  
 -  $\Delta H$  : différence de charge hydraulique [ $L$ ] sur une colonne,  
 -  $L$  : la longueur de la colonne [ $L$ ].

Le *Slug-Test* a été choisi pour estimer la conductivité hydraulique de l'aquifère. Cette méthode est sûre, facile et ne présente aucun risque de contamination de la nappe.

#### 3.2 Principe de slug-test

L'essai par choc hydraulique (*slug test* en anglais) est une expérimentation simple visant à déterminer la perméabilité de l'aquifère testé. Ces essais par chocs hydrauliques consistent à engendrer une impulsion de pression très brève en un point d'une nappe, et à observer la réponse transitoire au même point ; on en tire alors la perméabilité ou la conductivité hydraulique. Concrètement, il s'agit de prélever (ou injecter) un volume d'eau connu, afin de mesurer dans le temps les variations du niveau d'eau jusqu'au retour au niveau initial. On mesure donc la variation de la charge au cours du temps.

Pour traiter les données obtenues, il existe différentes méthodes. Celles-ci sont fonction du type de piézomètre, et du contact qu'il a avec l'aquifère testé.

##### 3.2.1 La méthode de HVORSLEV :

Son interprétation sur le slug-test date de 1951. Cette première méthode, très simple, permet d'accéder à la perméabilité locale de l'aquifère pour différents types de puits et de piézomètres.

Pour un piézomètre incomplet et crépiné sur une longueur  $L$ , ce qui correspond à nos cas, la perméabilité est donnée par :

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

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

Elle nécessite quelques hypothèses :

- l'aquifère est supposé homogène, isotrope, et d'extension illimitée ;
- l'eau et le sol sont incompressibles.

### 3.2.2. La méthode de BOUWER et RICE :

La première version de leur méthode date de 1976, et est basée sur l'équation de Thiem :

$$Q = 2\pi K L (y/\ln(R_e/r_w))$$

Q : débit dans le piézomètre (m<sup>3</sup>/s)

K : conductivité hydraulique (m/s)

L : longueur de crépine libre (m)

y : charge instantanée dans le piézomètre :  $y=h(t)-H_0$

R<sub>e</sub> : rayon d'influence de l'essai (m)

r<sub>w</sub> : rayon de l'ensemble crépine+massif filtrant (m)

H<sub>0</sub> : niveau d'eau initial (m)

H(t) : niveau d'eau à l'instant t de l'essai (m)

La variation de charge dy/dt se traduit par :

$$dy/dt = -Q/(\pi r_c^2)$$

r<sub>c</sub> : rayon intérieur du tubage (m)

Si on combine ces deux équations, et que l'on intègre le résultat, on obtient, après simplification, la formule suivante pour la perméabilité conductivité hydraulique K :

$$K = \frac{r_c^2 \ln(R_e/r_w)}{2L} \frac{1}{t} \ln\left(\frac{y_0}{y(t)}\right)$$

Toutes les grandeurs de ces équations sont ou seront connues, sauf une : R<sub>e</sub>.

Elle a été estimée par Bouwer et Rice, de façon expérimentale, par analogie à un réseau de résistances calorifiques.

Il existe cependant deux cas pour obtenir  $\ln(R_e/r_w)$  :

1. Si le piézomètre est complet, c'est-à-dire pénétrant entièrement l'aquifère :

$$\ln\left(\frac{R_e}{r_w}\right) = \left[ \frac{1,1}{\ln(d/r_w)} + \frac{C}{L/r_w} \right]^{-1}$$

d : distance entre la surface de l'aquifère et le fond du piézomètre (m)

b : puissance de l'aquifère (m)

C : paramètre sans dimension qui est fonction de L/r<sub>w</sub>

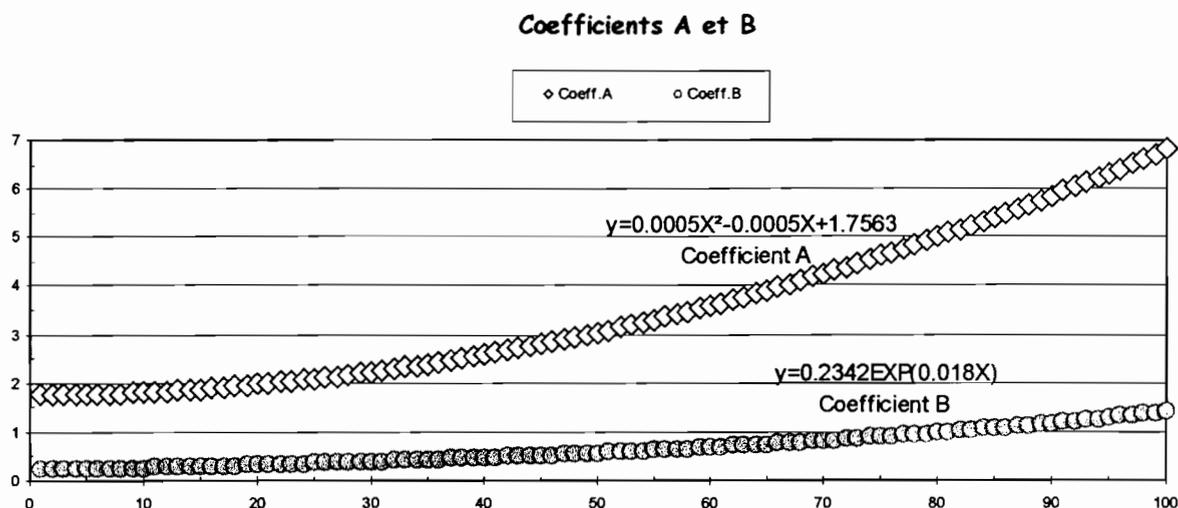
2. Si le piézomètre pénètre partiellement l'aquifère, donc est considéré comme incomplet :

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

A, B : paramètres sans dimensions, fonctions de L/r<sub>w</sub>

Les valeurs des paramètres A, B et C sont estimés graphiquement à partir d'abaques donnés par Bouwer et Rice.

Les piézomètres implantés sur le N'Gallenka étant du type incomplet, seuls les coefficients A et B ont été calculés.



**Figure 3 : Evolution des paramètres empiriques A et B**

Hypothèses d'application de la méthode de Bouwer et Rice :

- L'aquifère est homogène, isotrope et de puissance constante sur la surface influencée par l'essai.
- L'aquifère est libre, et à une extension latérale apparemment illimitée.
- Le niveau d'eau dans le piézomètre est abaissé instantanément au temps  $t_0=0$ .
- L'inertie de la colonne d'eau dans le piézomètre ainsi que les pertes de charges linéaires et non linéaires sont aussi négligeables.
- Le puits a un diamètre fini.
- L'écoulement vers le puits est dans un état d'équilibre.

La méthode employée sur les piézomètres du N'Gallenka est celle de Bouwer Rice concernant les puits pénétrant partiellement l'aquifère.

### 3.3 Résultats

Sur les 18 piézomètres installés sur le site des parcelles irriguées et futures parcelles du N'Gallenka, seuls 9 contenaient de l'eau.

Les essais par Slug-test se sont fait par prélèvement. Sur les 9 piézomètres testés, un seul s'est révélé inexploitable, car il n'y avait pas de variations du niveau d'eau après plus de 4 heures d'attente : le piézomètre 10.

Les mesures de conductivités hydrauliques obtenues par la méthode de Bouwer et Rice sont données ci-dessous en m/s et en m/j.

**Tableau 2: Résultats de conductivité hydraulique de l'aquifère dans différents piézomètres, en fonction de la couleur et de la texture**

N° piézomètre	K (m/s).10 <sup>-8</sup>	K (cm/j)	Texture aquifère	Couleur aquifère
1	6.27	0.54	Sable fin	Beige
2	30.7	2.65	Sable fin	Gris
3	56.5	4.88	Sable	Gris
4	4.49	0.39	Sable peu grossier	Jaunâtre
6	11.1	0.96	Sable	Jaunâtre
7	51.4	4.44	Sable argileux	Grisâtre
14	7.54	0.65	Sable grossier	Beige
15	147	12.07	Sable fin	gris

Les perméabilités calculées ne correspondent pas aux valeurs caractéristiques de perméabilité des aquifères données par ILLY (1973) : de 2.5 m/j pour des sables francs à 1 m/j pour des sables limoneux. Mais ces données avaient été recueillies à partir de piézomètres généralement profonds et installés le long de toute la vallée, et ne sont donc pas forcément caractéristiques des nappes alluviales.

On remarque donc que les sables contenant des oxydes de fer altérés (couleur ocre, jaune) ont des conductivités relativement plus faibles. Ceci avait déjà été observé par LAVAL (1996) sur les sites de Podor-Ndiaye.

On constate que les valeurs obtenues sont faibles et comprises entre 0.4 et 12 cm/j. D'après l'étude de LAVAL, les sables fins de type nouakchottiens ont des perméabilités de 1 à 4 m/j et les sables plus limoneux du type sable gris ont des perméabilités de l'ordre de 0.2 à 0.8 m/j.

A première vue, il semble que les perméabilités obtenues ne peuvent pas se corréliser entre elles. On constate cependant que suivant la couleur de l'aquifère, on peut corréliser les perméabilités. Les couleurs beige-jaunâtres peuvent provenir de la présence d'oxydes de fer, donc d'une accumulation de fer dans les sables. On remarque donc que moins il y a d'oxydes de fer et plus la perméabilité est grande. Ce qui est normal, car les oxydes de fer en se formant bouchent les interstices où circule l'eau, et donc par conséquent diminuent la perméabilité. Les aquifères contenant une grande quantité d'oxydes de fer altérés (couleur ocre/jaune, beige, jaunâtre) ont une plus faible perméabilité que les sols grisâtres. La texture semble avoir aussi un rapport : plus la granulométrie est grossière et plus la perméabilité est grande.

Les différences de valeurs obtenues peuvent s'expliquer par la nature géologique du terrain. L'hétérogénéité des dépôts des sables quaternaires et particulièrement l'existence de proportions d'argiles variant suivant les différentes profondeurs crépinées peut influencer sur la perméabilité locale. Comme le slug-test n'intéresse qu'un faible volume de terrain et particulièrement la partie supérieure de

la crépine, la valeur de la perméabilité obtenue par cette méthode reflétera essentiellement les caractéristiques de la partie supérieure de la nappe au droit du piézomètre.

#### 4. Suivi du niveau piézométrique.

Le suivi du niveau piézométrique est réalisé bi mensuellement depuis janvier 1999, sur l'ensemble des piézomètres installés. Cependant à l'heure actuelle tous les piézomètres ne sont pas en fonction, la nappe n'atteignant pas le fond du tubage. Les piézomètres non actifs sont généralement soit des piézomètres situés dans des zones non aménagées ou aménagées que récemment, soit des piézomètres dont la profondeur prévue n'a pas été atteinte lors du forage.

Les caractéristiques de chaque piézomètre sont reportées dans le tableau synthétique suivant.

**Tableau 3 : Caractéristiques géométriques des différents piézomètres.**

PZ	Prof. (m)	Ø tube (m)	Longueur crépine (m)	Ø Crépine+massif filtrant (m)	Altitude tête PZ (m IGN)	Altitude au sol (m IGN)
1	12	0.0762	4	0.2159	5.220	4.850
2	12.5	0.0762	4	0.2159	4.851	4.464
3	12	0.0762	4	0.2159	4.448	4.078
4	12	0.0762	4	0.2159	4.838	4.374
5	8	0.0762	3	0.2159	5.402	4.902
6	12	0.0762	4	0.2159	4.815	4.361
7	12	0.0762	4	0.2159	5.395	4.182
8	12	0.1016	4.5	0.2159	5.780	4.513
9	10	0.1016	6	0.2159	5.978	4.712
10	11.5	0.1016	6	0.2159	6.178	4.937
11	9.5	0.0762	4	0.2159	5.251	4.127
12	10	0.1016	6	0.2159	5.230	4.009
13	10.5	0.1016	6	0.2159	4.974	3.749
14	15	0.1016	6	0.2159	4.888	3.659
15	12	0.1016	6	0.2159	6.975	5.731
16	10	0.1016	6	0.2159	6.036	4.824
17	10	0.1016	6	0.2159	6.245	5.013
18	10	0.1016	6	0.2159	5.450	4.244

Les résultats obtenus depuis janvier 1999 permettent de dégager une tendance globale d'évolution du niveau de la nappe suite à la mise en eau du N'Gallenka et des périmètres irrigués.

Ainsi le transect de piézomètres des premiers périmètres aménagés (11c et 11d) montre l'évolution de du niveau de la nappe en fonction de du temps (figure 4). On note en particulier une nette remontée de la nappe lors de chaque hivernage et campagne d'irrigation. Cependant contre toute attente, on se rend compte la pente de la nappe est orientée vers le sud (P3 au Nord, P1 au sud) alors que ce transect est situé au Nord de N'Gallenka. Il est en effet probable que le Marigot de Namarde situé au Nord du périmètre contribue depuis plus longtemps à l'alimentation de la nappe que ne le fait actuellement le marigot du N'Gallenka. Par ailleurs cette pente peut également s'inscrire dans la pente générale de la nappe, depuis le fleuve Sénégal et /ou le Doué vers le sud. Les données hydrologiques du niveau du fleuve mesurées à Podor, montrent que les crues du fleuve se répercutent directement sur le niveau de la nappe au niveau de ce transect. On notera cependant un certain décalage dans le temps d'environ un mois entre les oscillations du niveau du fleuve et de celles de la nappe à ce niveau.

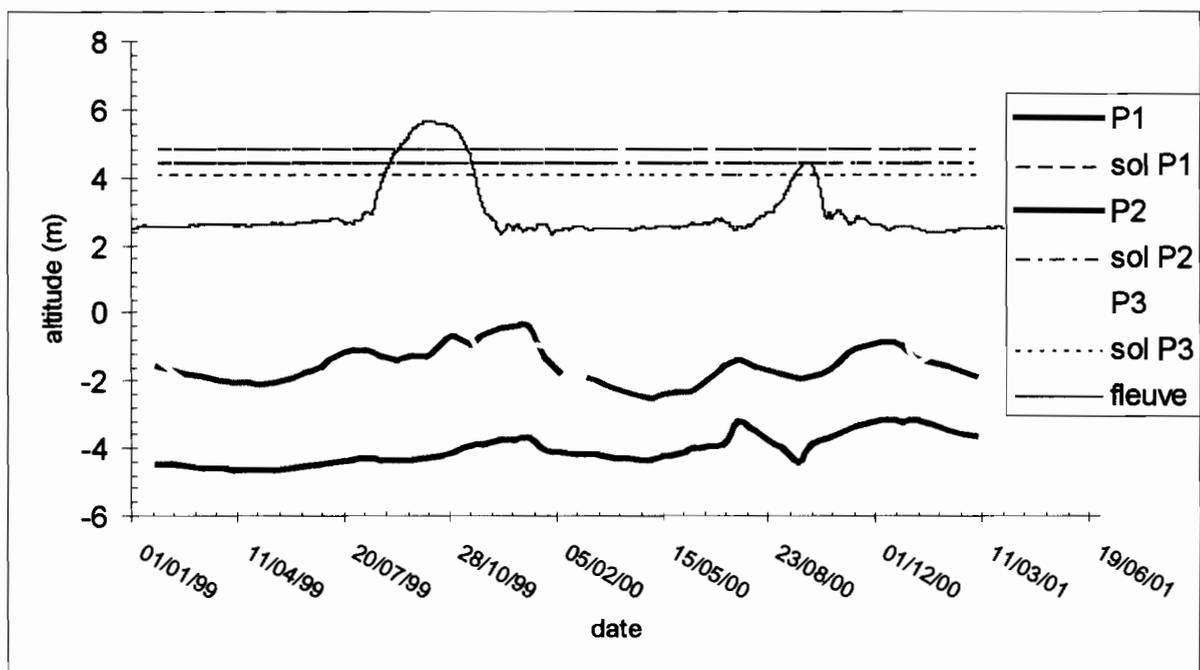


Figure 4: Evolution du niveau piézométrique selon un transect N-S (P1, P2, P3)

Le transect E-W défini par l'alignement des piézomètres P4, P6 et P7 (figure 5), montre également une évolution du niveau de la nappe en fonction des variations de niveau des eaux du fleuve ainsi que des saisons d'irrigation. Cependant on note des amplitudes clairement plus faibles que dans les périmètres précédents. Cette différence peut s'expliquer par la mise en service plus récente des périmètres adjacents, ainsi que par une profondeur de nappe globalement plus importante. Par ailleurs on note dans ce cas une pente de la nappe vers l'Est dans la mesure où le piézomètre P4 est situé à l'Ouest du transect et le piézomètre P8 est le plus oriental.

La différence de profondeur de nappe dans les différents piézomètres est croissante avec le temps, la pente de la nappe long du transect E-W augmente donc au fil du temps.

La recharge de la nappe sous le secteur aménagé du N'Gallenka se fait donc selon deux directions : principalement à partir du Nord et non pas à partir du marigot du Ngallenka, et vers l'Est en direction du Doué.

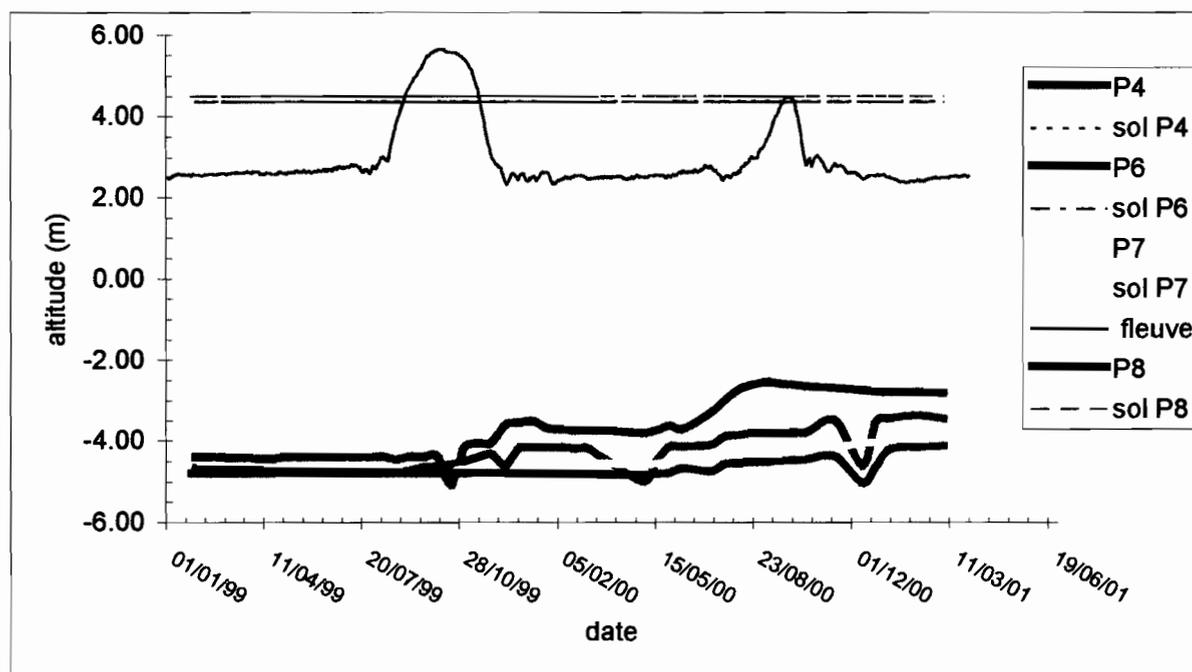


Figure 5: Evolution du niveau piézométrique selon un transect E-W (P4, P6, P7, P8)

Malgré les variations dues aux événements saisonniers (crues, irrigations), l'évolution du niveau de la nappe mesurée dans les piézomètres actuellement actifs montrent que de manière générale le niveau de la nappe augmente. En effet si l'on ajuste arbitrairement une droite de régression aux courbes d'évolution du niveau piézométrique en fonction du temps (Annexe 3), on trouve un coefficient de variation positif dans la majorité des cas. Dans la partie Ouest de secteur aménagé (la plus ancienne) le taux d'augmentation du niveau de la nappe est le plus élevé (2.9 mm/j pour P4, 2.1 mm/j pour P3, 1.9mm/j pour P1) alors que dans la partie orientale l'évolution est plus lente (0.7 mm/j pour P8 et 0.6mm/j pour P14). D'un autre côté pour certains piézomètres on observe une diminution du niveau de la nappe (P10 et P15). Tous deux sont situés hors périmètre et ne reflètent probablement que des réajustements locaux non influencés par l'irrigation. En particulier au niveau du piézomètre 10, lors du début de la campagne de mesure (janvier 1999) le niveau de la nappe était extrêmement haut (0 m d'altitude) par rapport niveau général de la nappe à cette époque (entre -2 m et -6m d'altitude).

Considérant cette dynamique on peut extrapoler la durée nécessaire pour que la nappe affleure en surface. Les résultats présentés dans le tableau 4 montrent que hormis pour le piézomètre 2, le temps nécessaire pour atteindre la surface du sol, varie entre 10 et 50 ans si la dynamique actuelle perdure.

**Tableau 4: taux d'évolution moyen du niveau de la nappe dans les différents piézomètres, et temps approximatif nécessaire pour atteindre la surface du sol**

piézomètre	taux (m/j)	nombre de jours	nombre d'années
1	0.0016	5625	15
2	7.00E-05	100000	274
3	0.0021	2476	7
4	0.0029	2462	7
6	0.0017	4588	13
7	0.0014	5786	16
8	0.0007	12314	34
10	-0.0027		
14	0.0006	17800	49
15	-0.0005		

Comme prévu la mise en place des périmètres irrigués dans le secteur N'Gallenka contribue à la dynamique globale de remontée du niveau de la nappe, risque de s'accélérer lors de la mise en service de tous les périmètres irrigués.

## 5. Suivi de la qualité de l'eau de nappe.

Lors des mesures de suivi du niveau de la nappe, des échantillons d'eau dans les piézomètres « actifs » ont été prélevés mensuellement afin de déterminer le faciès géochimique de l'eau de la nappe ainsi que son évolution avec l'irrigation.

Différents paramètres chimiques ont été mesurés pour tenter de quantifier les risques de dégradation des sols par salinisation et alcalinisation. Les paramètres de bases facilement mesurables sur le terrain sont la conductivité électrique ainsi que le pH.

Ces deux paramètres permettent de prime abord d'avoir une idée sur la salinité de la solution et de son alcalinité.

L'évolution de ces deux paramètres montre (Annexe 4) montre des variations plus ou moins importantes en fonction du temps. Au niveau de la salinité (conductivité électrique), les variations ne sont pas très importantes et dans les cas où l'on observe des variations notables, on se rend compte qu'elle est probablement liée au passage dans des niveaux de sols renfermant plus ou moins sels (gypse). Par ailleurs il semble que le pH de l'eau de la nappe généralement située autour de la neutralité (pH 7), tende à augmenter lorsque la nappe se rapproche de la surface (figure 6).

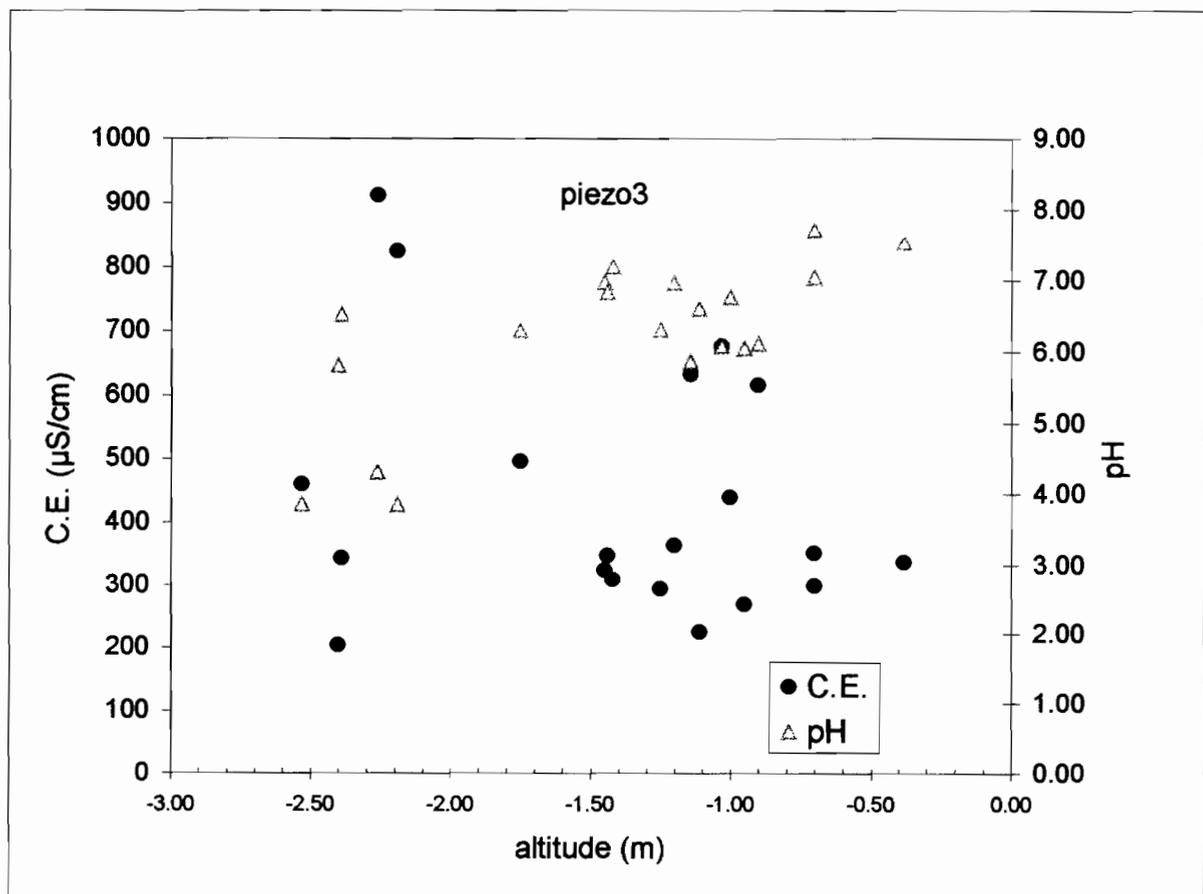


Figure 6 : évolution de la salinité (conductivité électrique) et du pH de l'eau de la nappe dans le piézomètre 3 en fonction de l'altitude du toit de la nappe

Cette observation peut trouver une explication dans le fait que la pression de CO<sub>2</sub> dans l'eau diminue alors qu'elle remonte vers la surface et de ce fait le pH augmente jusqu'à des valeurs de 8.

Cependant on distingue également des mesures présentant des pH très bas (autour de pH 3 - 4) ce qui marque probablement des niveaux d'anciens dépôts de mangrove dans lesquels reste encore de la pyrite en voie d'oxydation.

Des mesures plus complètes ont ensuite été réalisées au laboratoire, afin pouvoir prédire de manière plus précise l'évolution de la solution du sol.

De manière générale l'eau de la nappe présente une concentration 10 fois supérieure à celle du Doué avec une conductivité électrique moyenne de 0.4 mS/cm contre 0.06 mS/cm dans le Doué, ce qui correspond à la dissolution de certains dépôts plus ou moins salins affectant la concentration de l'eau de la nappe. En particulier au niveau des piézomètres 7, 8 et 15 la concentration des solutions est supérieure au mS/cm.

Les faciès géochimiques de l'eau de nappe en ces différents piézomètres sont représentés dans le diagramme de la figure 7. Il en ressort que dans la plupart des piézomètres, l'eau présente un faciès bicarbonaté, mais dans les piézomètres P6, P7 et P8 le faciès géochimique est sulfaté, probablement lié à des dépôts de sulfate de calcium (gypse) et de sodium (thenardite). La proportion de chlorures est très basse pour toutes les analyses d'eau de piézomètre. Cependant des efflorescences de halite (NaCl) et de calcite (CaCO<sub>3</sub>) ont été identifiées dans les drains à proximité du piézomètre P5. L'origine de la halite est probablement liée à des niveaux de sols plus superficiels que la nappe n'a pas encore atteint.

Au niveau des cations, le calcium est dominant, mais un grand nombre d'analyses montrent un faciès mixte entre calcium et sodium. L'eau dans les piézomètres P2 et P10 quant à elle présente une proportion de sodium légèrement plus importante. On peut néanmoins remarquer la faible teneur en magnésium dans l'ensemble des piézomètres, alors qu'à proximité du piézomètre P7 des efflorescences d'epsomite ont été identifiées (MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O). Dans ce cas aussi l'origine de ce sel est sans doute à attribuer à des dépôts plus superficiels dans le profile de sol.

Un certain nombre d'indicateurs sont généralement utilisés pour quantifier la qualité de l'eau. Le SAR est l'indicateur le plus souvent utilisé pour quantifier le pouvoir sodisant d'une solution. Il est défini par la relation suivante

$$SAR = \frac{Na}{\sqrt{(Ca+Mg)/2}}$$

où les concentrations sont exprimées en équivalents par litre.

A partir de ce paramètre l'équipe de recherche du laboratoire de Riverside a déterminé un abaque permettant de classer les eaux d'irrigation suivant des degrés de risque de salinisation et de sodisation.

Il apparaît que les solutions de la nappe tombent dans des zones à très faible risque de sodisation et à risque moyen de salinisation (figure 8).

Cependant cette classification ne donne qu'une indication instantanée de la qualité de l'eau d'irrigation mais ne préjuge pas de l'évolution qu'elle peut subir en se concentrant.

Un indicateur plus pertinent quant à la possibilité d'évolution de la solution est l'alcalinité résiduelle calcite (ARC). Celui-ci rend compte de la précipitation de calcite qui est le minéral qui généralement précipite le premier. Il est défini comme la différence d'équivalents en alcalinité et calcium :

$$ARC = Alc - Ca$$

où les concentrations sont exprimées en méq/l.

Lorsque la quantité d'équivalents d'alcalinité est supérieure à celle en calcium ( $ARC > 0$ ), au moment de la précipitation de la calcite, la solution s'appauvrit en calcium, et donc s'enrichit relativement en « alcalinité » ( $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ) et en sodium. Le pH de la solution va grimper au-delà des valeurs de 8.5 qui correspond au pK de la calcite, et le risque de sodisation va devenir très important. Dans le cas d'une ARC négative, la solution va se concentrer en calcium au moment de la précipitation de la calcite, et tout risque d'alcalinisation ou sodisation est écarté.

Un indicateur supplémentaire est généralement ajouté, pour confirmer l'évolution de la solution par concentration au-delà du stade de précipitation de la calcite. Il s'agit du facteur « Residual Sodium Carbonate » (RSC) qui correspond à la ARC à laquelle on retranche la concentration en équivalents de magnésium :

$$RSC = Alc. - (Ca + Mg) = ARC - Mg$$

Ce facteur prend en compte l'éventualité de précipitation d'un carbonate de magnésium (magnésite) ou un silicate de magnésium (sépiolite), tous deux précipitant généralement peu de temps après la calcite dans une dynamique de concentration, pouvant tous les deux influencer sur l'évolution de l'alcalinité.

Lorsque le facteur RSC est positif, la solution va évoluer clairement vers un processus d'alcalinisation accompagné de sodisation. Par contre dans le cas d'une valeur négative pour le RSC, après avoir atteint la saturation par rapport à la calcite la solution peut évoluer vers un faciès salin neutre et ainsi s'écarter du risque d'alcalinisation.

Les résultats reportés dans le tableau en annexe 4, montre que les piézomètres P4, P6, P7 et P8 présentent des ARC négatives qui a priori écartent les risques d'alcalinisation. Cependant ce sont également les piézomètres présentant un faciès sulfaté pouvant être lié à une présence locale de dépôts gypseux. Tous les autres piézomètres montrent une ARC positive qui de surcroît semble augmenter au cours du temps.

Dans les piézomètres P1, P2, P3, P10 et P14 le facteur RSC présente des valeurs positives, également croissantes au fil du temps. Potentiellement l'eau de la nappe au niveau de ces piézomètres risque donc d'engendrer des mécanismes de dégradation des sols par alcalinisation puis sodisation, dans le cas d'une concentration.

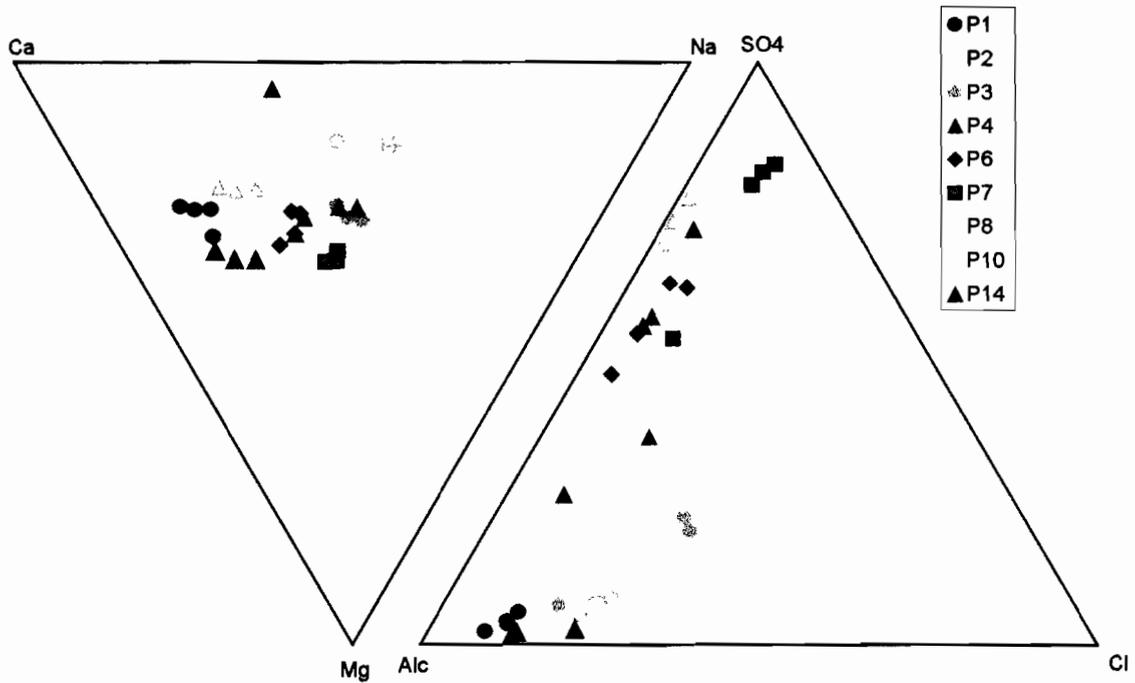


Figure 7 : Composition de l'eau de la nappe sous le secteur N'Gallenka représentée dans un diagramme de Piper

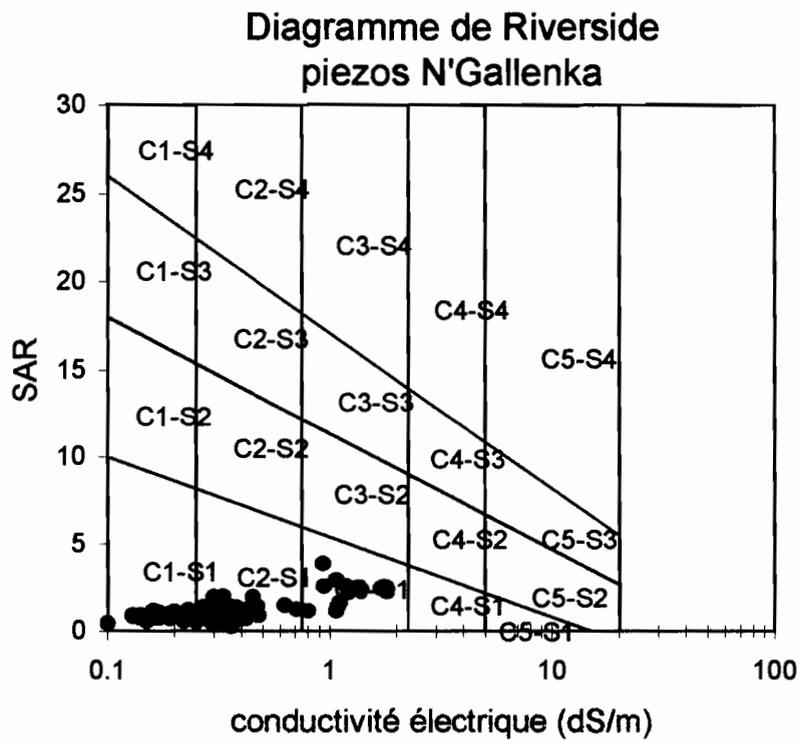


Figure 8 : analyses d'eau des piézomètres du secteur N'Gallenka dans le diagramme de Riverside.

## Conclusions partielles.

Au cours de cette première phase de l'étude sur le suivi et l'évaluation de la qualité des eaux et de l'impact environnemental des aménagements du secteur N'Gallenka, plusieurs aspects ont été abordés.

Dans un premier temps on a caractérisé les propriétés physiques des différents horizons de sols traversés lors des forages pour l'installation des piézomètres. Une analyse granulométrique fine a ainsi permis de définir les textures des différents horizons et d'établir des coupes texturales selon différents transects. La disposition la plus courante étant celle d'un niveau sablo argileux superficiel de 2m d'épaisseur surmontant un niveau argileux de 1 à 4 m d'épaisseur. Le niveau sableux sous-jacent correspond à l'aquifère, et présente localement des teintes et textures variables.

A partir des courbes de répartition granulométrique il a été possible de déterminer les courbes de rétention de ces différents horizons de manière à pouvoir le cas échéant utiliser ces données dans des modèles numériques de simulation de transfert d'eau (et solutés).

De la même manière les conductivités hydrauliques de l'aquifère ont été déterminées par slug-test, dans les piézomètres actifs à savoir pour lesquels le niveau de la nappe atteint le piézomètre. Les valeurs varient entre 0.5 et 12 cm/j se situent autour d'une valeur moyenne de 4 cm/j, ce qui ne correspond pas à des conductivités très élevées pour des dépôts sableux.

Les premières mesures sur l'évolution du niveau de la nappe sous le secteur N'Gallenka montrent qu'à l'heure actuelle :

- la nappe est influencée par les variations saisonnières du niveau du fleuve d'autant plus amplement que la nappe est haute
- la pente générale de la nappe est du Nord vers le sud avec une légère composante de l'Ouest vers l'est.
- le niveau moyen de la nappe remonte dans ce secteur à des taux variables selon les différents points géographiques (de 0.6 à 3 mm/j)

La nappe sous le secteur N'Gallenka correspond à la nappe naturelle du fleuve, probablement influencée par les activités d'irrigation dans la cuvette de Nianga située au Nord. Cependant l'irrigation dans le secteur N'Gallenka commence à contribuer de manière de plus en plus importante à l'évolution du niveau de la nappe. Il convient en effet de préciser que contrairement à la cuvette de Nianga où le sol est très argileux, la texture du sol est plus grossière dans le secteur N'Gallenka et les infiltrations sont plus rapides. Certains agriculteurs se plaignant des importantes quantités d'eau qu'il sont obligés d'apporter dans la parcelle. Cependant le niveau de la nappe est toujours profond, mais au rythme d'évolution actuel, il faut une dizaine ou une quinzaine d'années pour atteindre la surface.

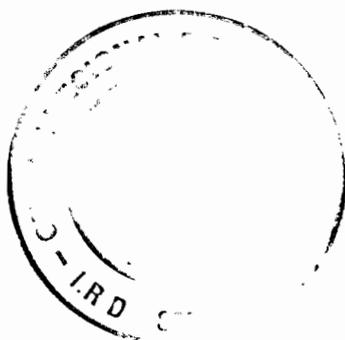
Du point de vue de la géochimie des eaux de la nappe, elles présentent de manière générale un faciès chimique équivalent à celui de l'eau du fleuve, mais avec une concentration 10 fois supérieure. Cependant localement dans certains piézomètres (P6, P7, P8) on remarque des compositions d'eau plus sulfatées et plus concentrées qu'ailleurs. Il s'agit probablement de l'influence locale d'anciens dépôts

de mangrove encore riches en gypse et autres sulfates, dans lesquels se trouve la nappe.

A partir de cet intervalle de temps sur lequel le suivi de la qualité des eaux a été réalisé un certain nombre de tendances semblent se dégager :

- le pH de l'eau de la nappe augmente lorsque celle-ci se rapproche de la surface
- les eaux ont un faciès carbonaté calcique, parfois sodique et présentent localement des faciès sulfatés calciques à sodiques.
- l'alcalinité des solutions augmente avec le temps.
- en l'état actuel les eaux de la nappe ne présentent pas de danger pour l'irrigation. Cependant en se concentrant dans la plupart des cas, les indicateurs comme *l'alcalinité résiduelle calcite* (ARC) et le *residual sodium carbonate* (SRC) tendent à montrer qu'il existe un réel risque d'alcalinisation si ces eaux se concentrent.

Ces conclusions partielles ont été établies à partir de données de suivi sur une période de un et demandent à être confirmées sur une période de suivi plus longue. Par ailleurs, en plus de la considération des indicateurs géochimiques comme ARC et SRC, l'évolution géochimique des eaux de la nappe devra être vérifiée à l'aide de modèles de simulation numérique permettant de calculer les équilibres avec les différentes phases minérales.



## Références bibliographiques :

- ARYA L.M. and PARIS J.F., 1981, Physico-empirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 45, 1023 - 1030.
- ARYA L.M. et al, 1999 (a), Scaling parameter to predict the soil water characteristic from particle-size distribution data, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 510 - 519.
- ARYA L.M. et al, 1999 (b), Relationship between hydraulic conductivity function and the particle-size distribution, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63, 1063 -1070.
- L. BARBIÉRO, S. CUNNAC, L. MANÉ, C. LAPERROUSAZ, C. HAMMECKER, J.L. MAEGHT (2001) - Salt distribution in the Senegal middle valley. Analyse of a saline structure on the future irrigation schemes of creek N'Galenka. *Agricultural Water Management*, 46, 201-213
- BERTRAND et al., 1993, La dégradation des sols des périmètres irrigués de grandes vallées subsahariennes (cas de l'office du Niger au Mali), *Cahiers Agriculture*, 2, 349 pages.
- BOIVIN P. et al, 1995, Nianga - Laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal, ORSTOM, 562 pages.
- BOUWER H. et RICE R.C., 1976, A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells, *Water Resources Research*, volume 12, n°3.
- HVORSLEV J.M., 1951, Time lag and soil permeability in ground water observations, bulletin 36, U.S. Corps of ENG., Waterways Exp. Sta., 50 pages.
- LAVAL F., 1996, Caractérisation hydrodynamique des aquifères alluviaux de la vallée du fleuve Sénégal – Région de Podor Ndiaye – Méthode du slug-test, ORSTOM, Dakar, 21 pages.
- MARRANT D., 1998, Caractérisation de l'aquifère dans le secteur Ngallenka Amont – Conductivité hydraulique par la méthode du slug-test, ORSTOM, 40 pages.

# **ANNEXES**

**ANNEXE 1 : COURBES GRANULOMETRIQUES**

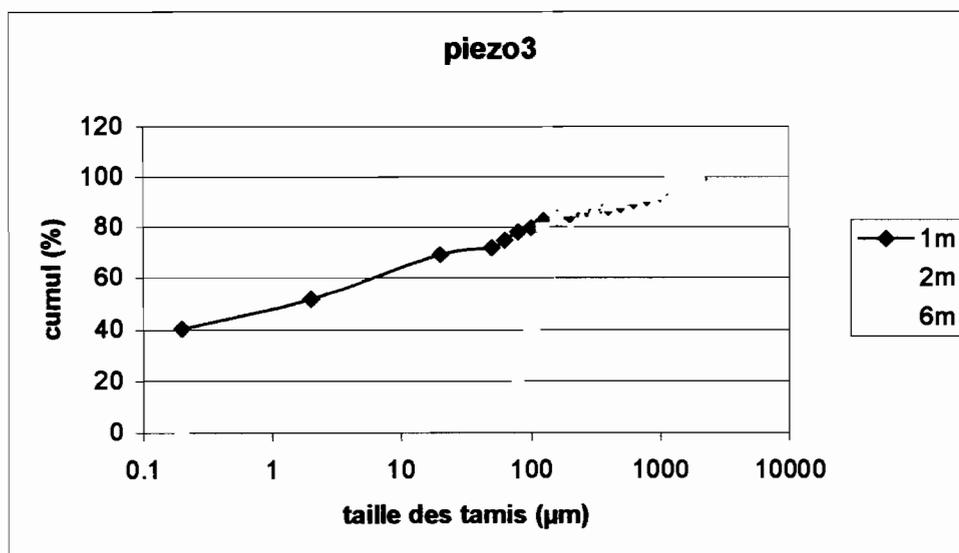
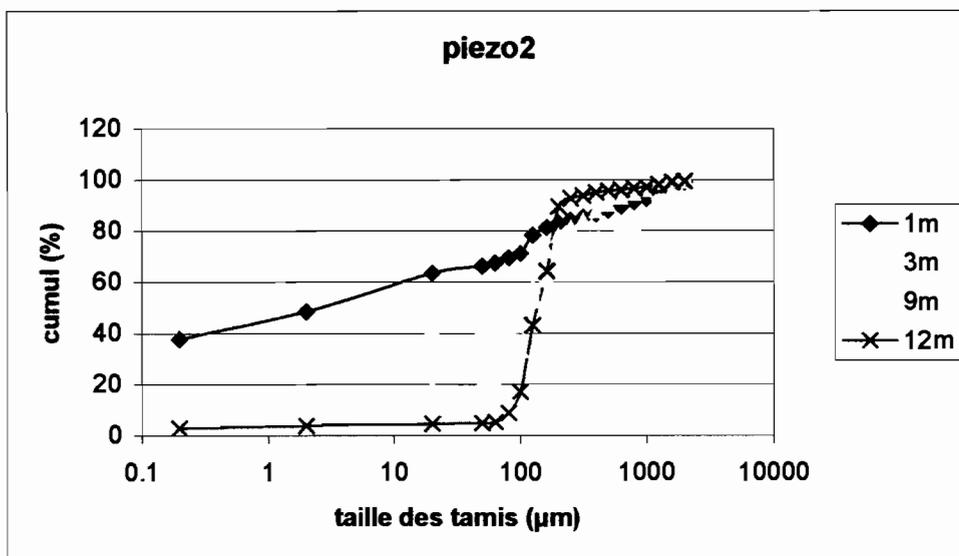
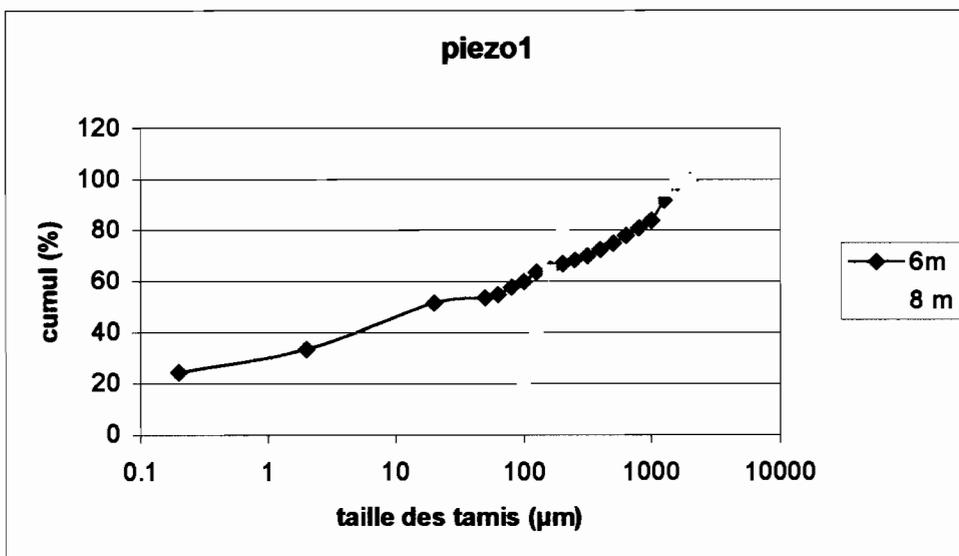
**ANNEXE 2 : COURBES DE RETENTION**

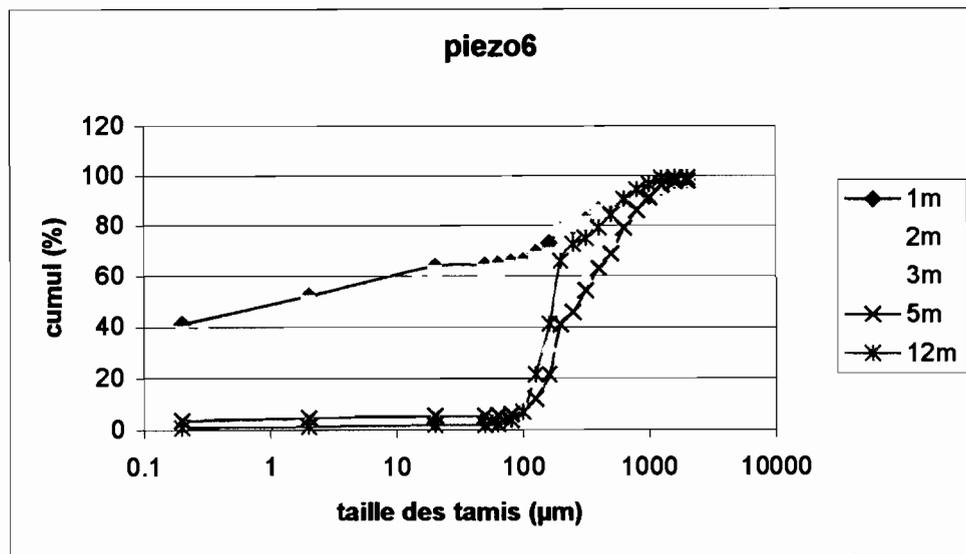
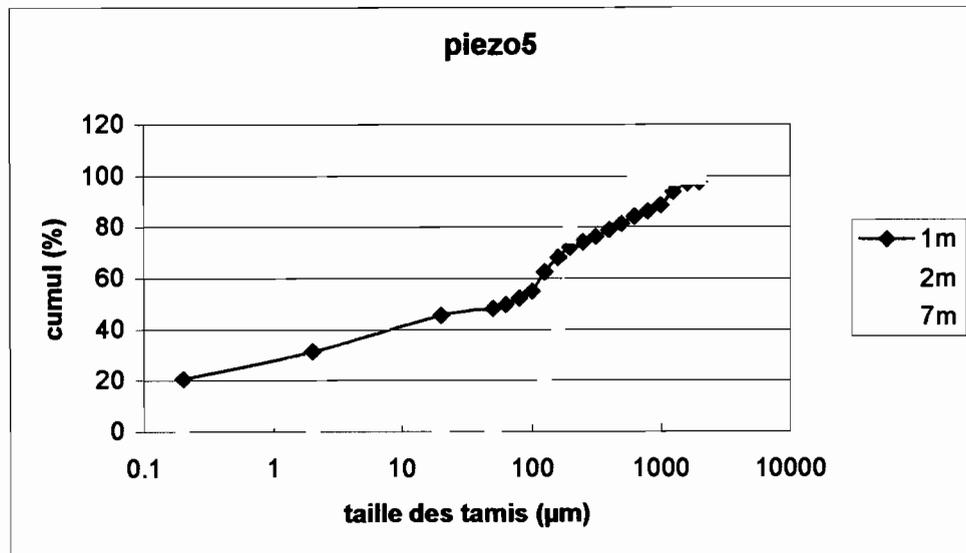
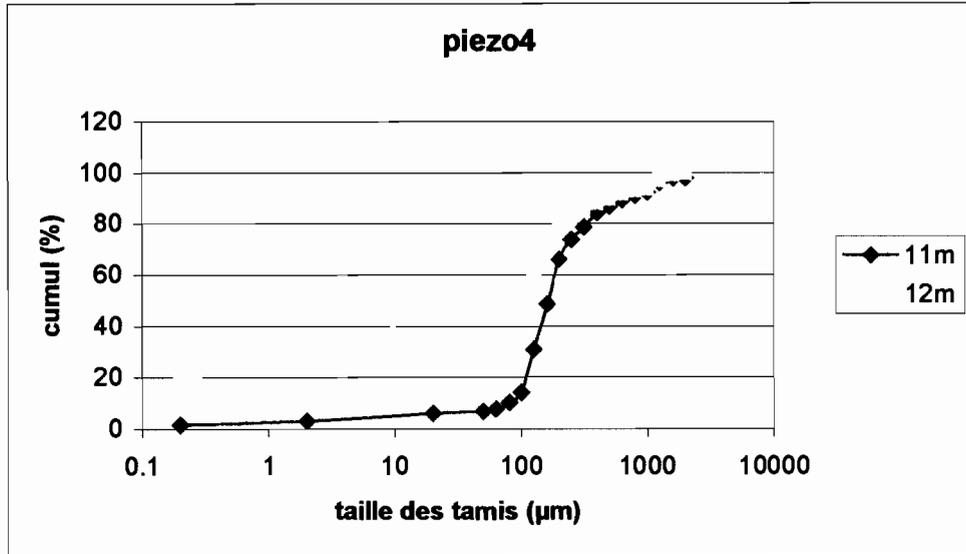
**ANNEXE 3 : SUIVI PIEZOMETRIQUE**

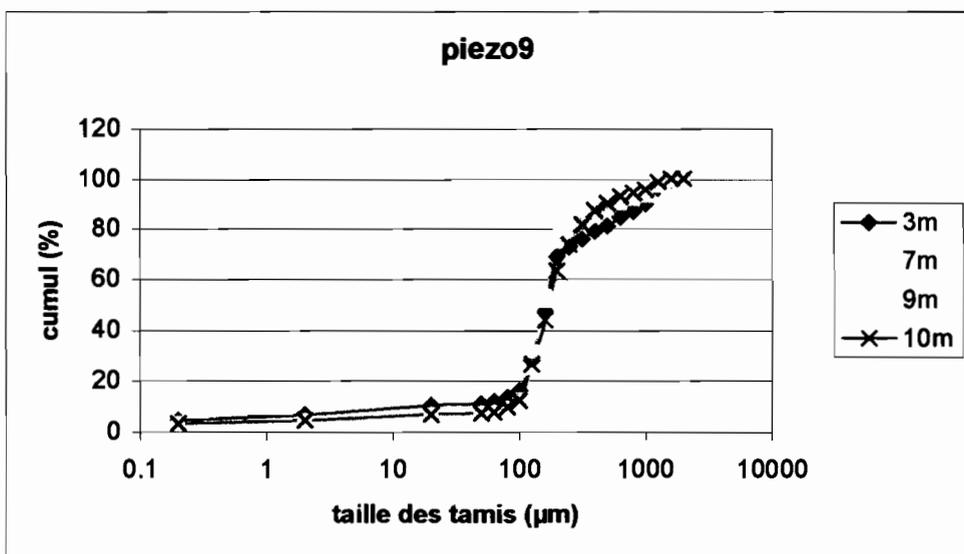
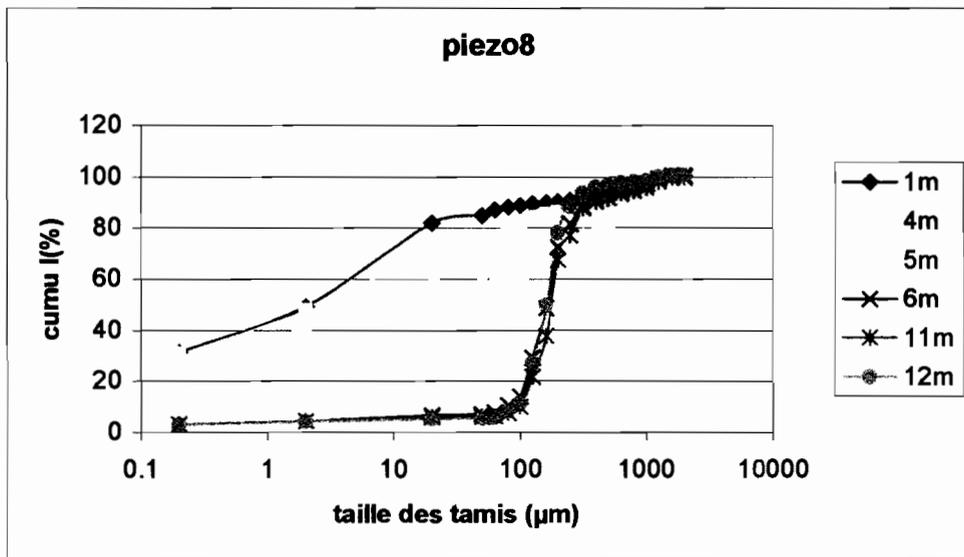
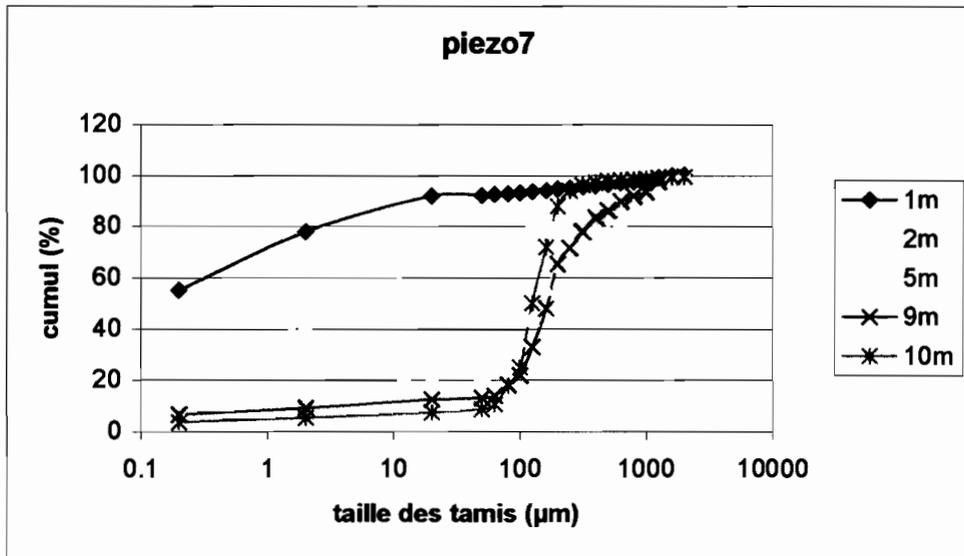
**ANNEXE 4 : GEOCHIME**

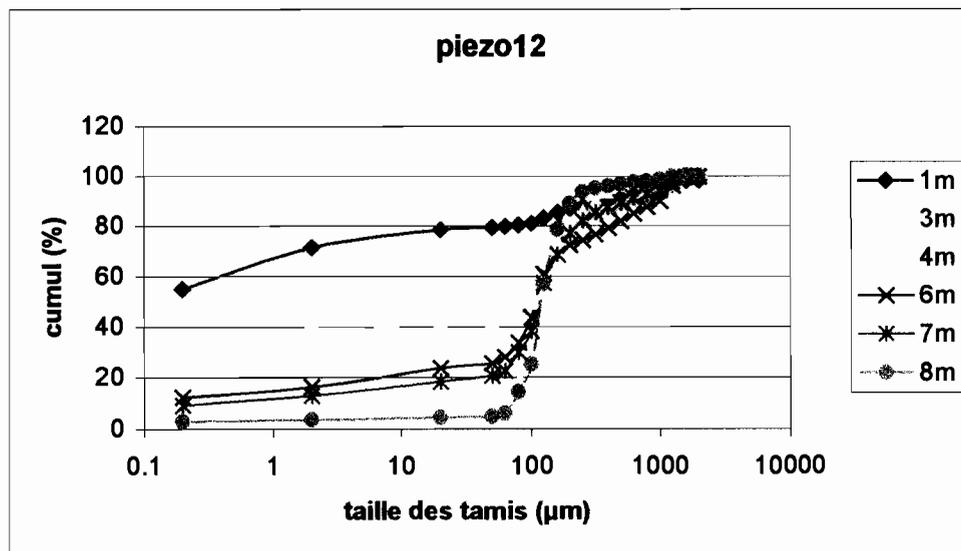
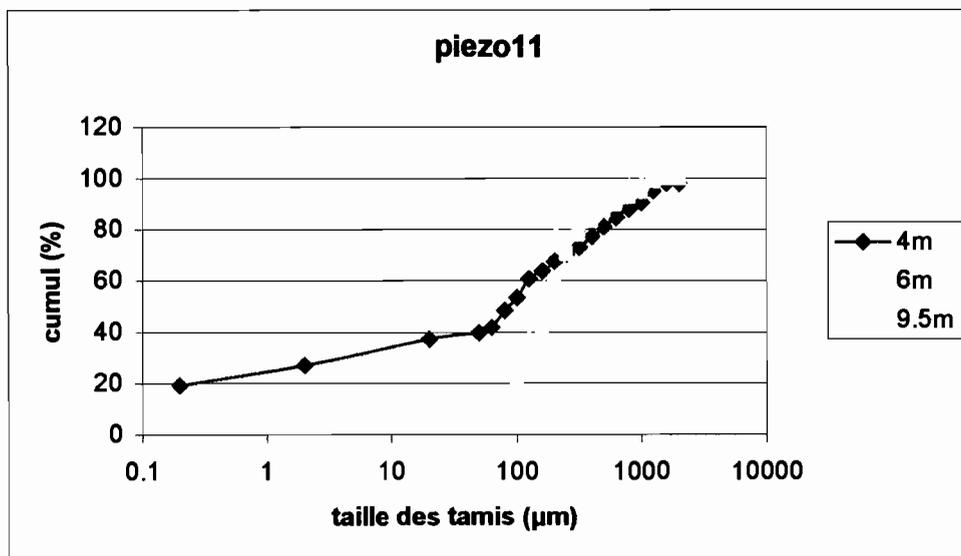
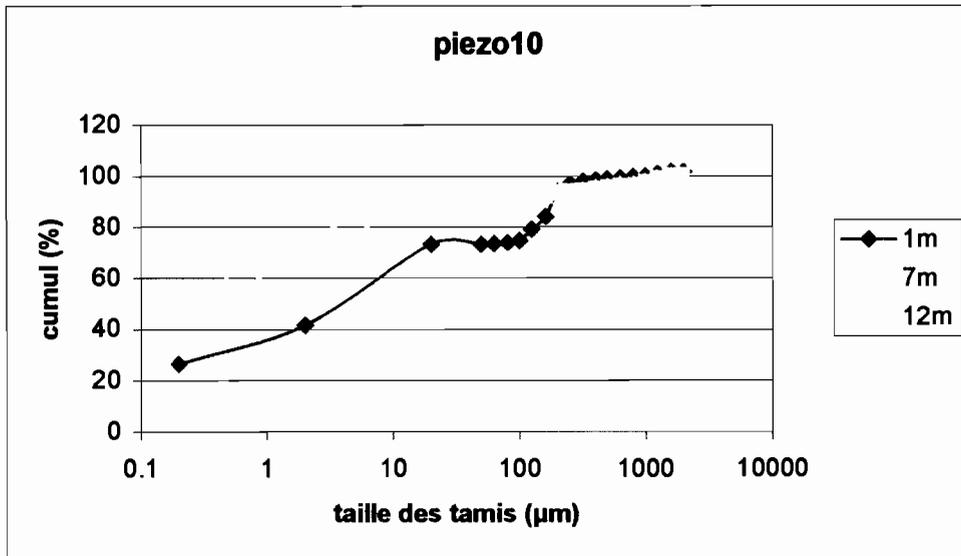
## **ANNEXE 1**

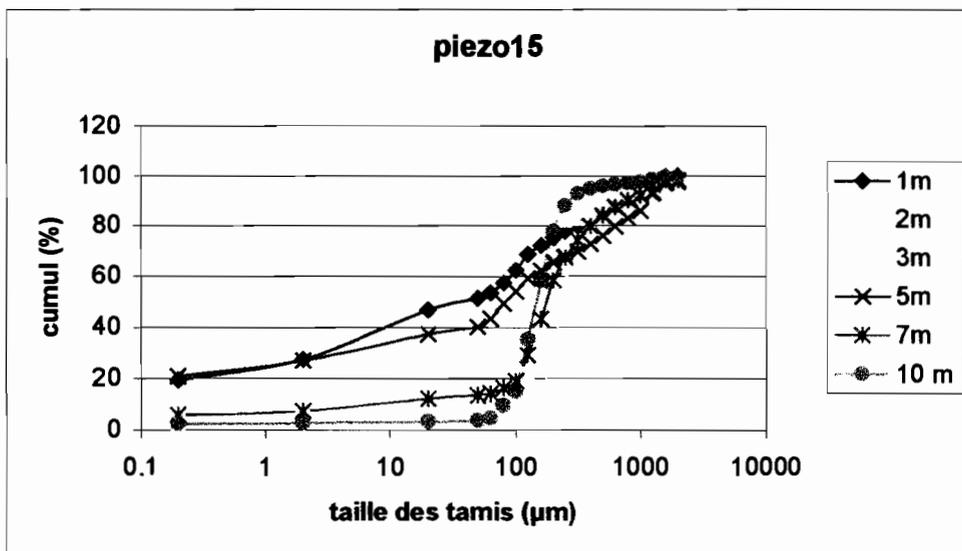
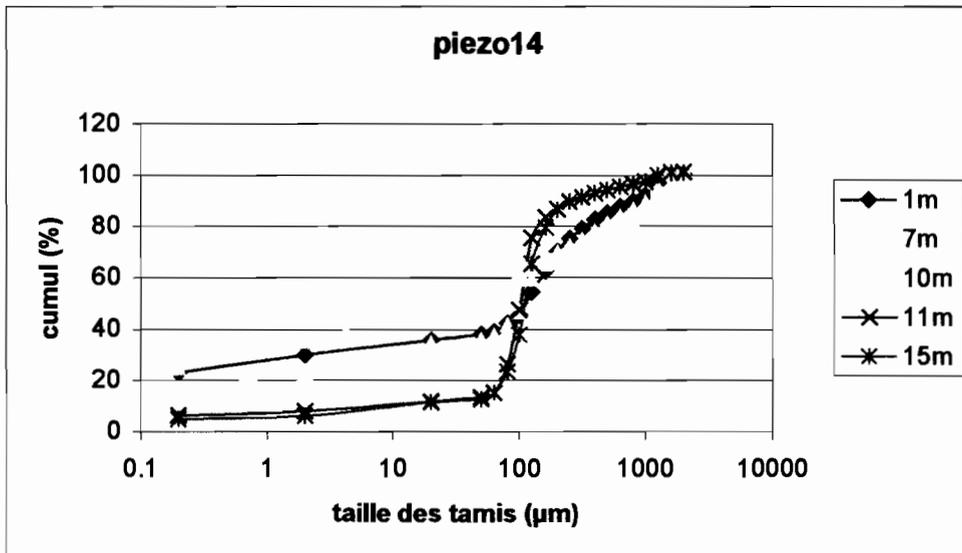
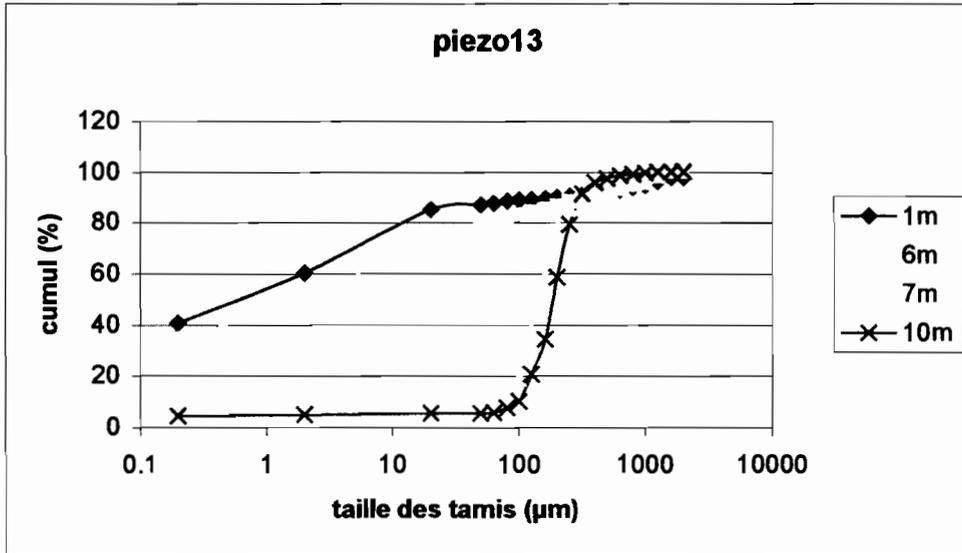
# **COURBES GRANULOMETRIQUES**

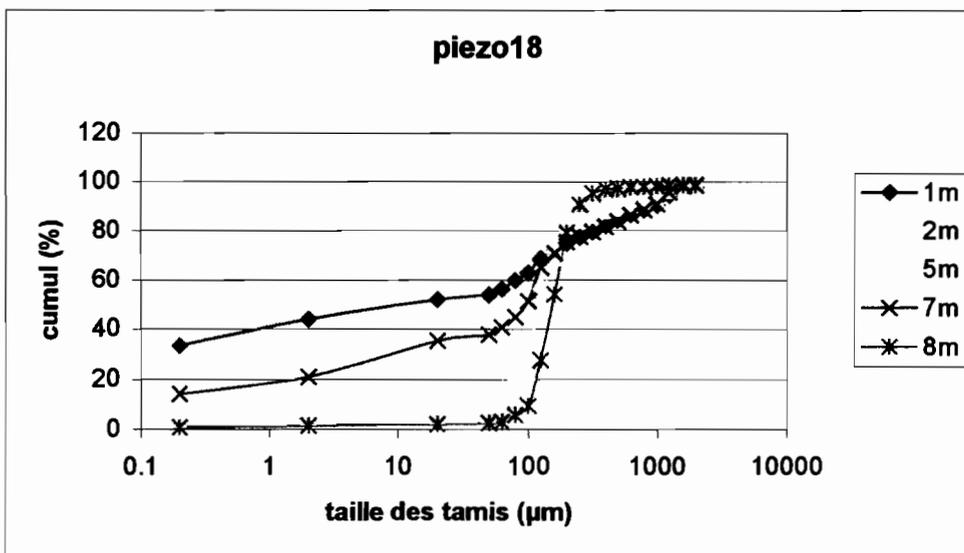
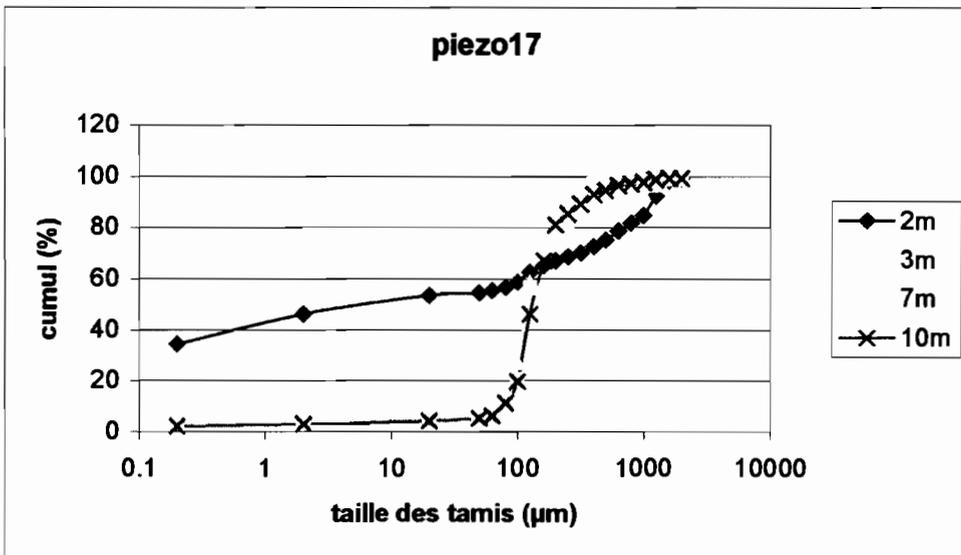
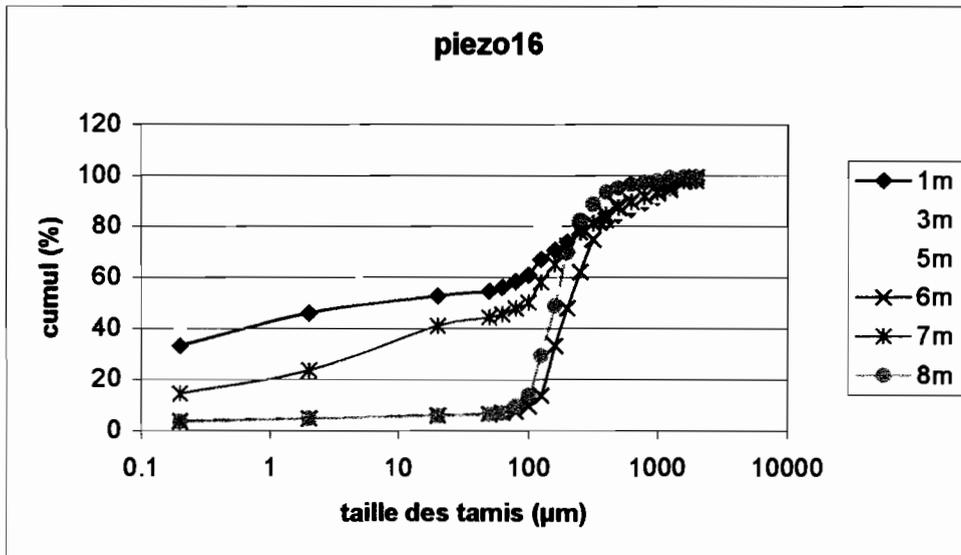












## GRANULOMETRIE PIEZO 1

			PZ 01 6.00	PZ 01 8.00
granulométrie	argile	%	24.5	5.3
	Limons Fins	%	8.9	2.0
	Limons Grossiers	%	18.1	3.4
	Sables Fins	%	47.3	74.7
	Sables Grossiers	%	1.0	14.1
	total		99.8	99.5
extrait 1/5	pH		6.12	6.64
	EC	mS20° C	0.192	0.044
granulométrie des sables	2.000	%	2.48	0.28
	1.600	%	13.89	3.61
	1.250	%	16.19	2.83
	1.000	%	5.95	1.13
	0.800	%	6.39	0.73
	0.630	%	6.18	1.43
	0.500	%	4.96	1.02
	0.400	%	5.26	1.55
	0.315	%	3.31	3.18
	0.250	%	3.21	5.36
	0.200	%	4.08	18.95
	0.160	%	2.81	25.47
	0.125	%	7.91	24.78
	0.100	%	4.10	5.58
	0.080	%	6.02	2.37
	0.063	%	2.74	0.66
	0.050	%	4.11	0.57
total		99.59	99.50	



## GRANULOMETRIE PIEZO 2

			PZ 02 1.00	PZ 02 3.00	PZ 02 9.00	PZ 02 12.00
granulométrie	argile	%	37.6	25.2	11.8	3.0
	Limons Fins	%	11.0	6.2	3.7	0.7
	Limons Grossiers	%	15.0	6.6	3.3	0.9
	Sables Fins	%	35.1	60.8	80.2	92.1
	Sables Grossiers	%	0.8	1.0	2.5	2.7
	total		99.5	99.8	101.5	99.4
extrait 1/5	pH		5.74	6.23	6.79	3.46
	EC	mS20° C	0.309	0.073	0.076	0.324
granulométrie des sables	2.000	%	0.59	1.14	0.04	0.08
	1.600	%	7.21	10.80	2.34	1.11
	1.250	%	9.62	10.88	3.26	1.21
	1.000	%	3.71	4.16	1.74	0.50
	0.800	%	4.40	5.10	2.08	0.48
	0.630	%	4.66	4.86	3.21	0.61
	0.500	%	4.01	3.96	3.03	0.52
	0.400	%	4.42	4.98	4.30	1.35
	0.315	%	2.81	4.28	3.44	1.09
	0.250	%	3.10	3.50	3.85	3.27
	0.200	%	4.53	9.00	7.26	26.80
	0.160	%	8.87	13.26	16.99	22.56
	0.125	%	19.77	11.95	30.14	27.23
	0.100	%	4.26	4.75	11.02	8.85
	0.080	%	5.89	3.85	4.58	3.66
	0.063	%	3.91	1.27	1.18	0.54
	0.050	%	7.23	1.57	1.03	0.22
total		98.99	99.31	99.49	100.08	

## GRANULOMETRIE PIEZO 3

			PZ 03 1.00	PZ 03 2.00	PZ 03 6.00
granulométrie	argile	%	40.4	2.3	3.4
	Limons Fins	%	11.4	0.6	1.6
	Limons Grossiers	%	17.5	1.9	2.9
	Sables Fins	%	29.3	94.6	73.5
	Sables Grossiers	%	0.6	0.2	17.0
	total		99.2	99.6	98.4
extrait 1/5	pH		5.78	8.03	3.67
	EC	mS20° C	0.098	0.086	0.436
granulométrie des sables	2.000	%	0.80	0.00	0.08
	1.600	%	7.50	1.79	2.31
	1.250	%	10.61	2.12	2.86
	1.000	%	5.52	0.99	0.97
	0.800	%	3.79	0.71	1.03
	0.630	%	5.32	1.25	1.74
	0.500	%	3.92	1.09	1.38
	0.400	%	4.29	1.91	3.17
	0.315	%	2.67	1.55	3.17
	0.250	%	2.93	1.52	5.74
	0.200	%	4.15	3.80	16.39
	0.160	%	3.09	4.54	18.70
	0.125	%	8.98	38.95	21.49
	0.100	%	5.60	23.57	12.16
	0.080	%	11.18	11.94	6.19
	0.063	%	10.33	2.47	2.03
	0.050	%	8.46	1.43	0.84
total		99.14	99.63	100.25	

## GRANULOMETRIE PIEZO 4

			PZ 04 11.00	PZ 04 12.00
granulométrie	argile	%	1.6	19.0
	Limons Fins	%	1.5	10.1
	Limons Grossiers	%	3.0	15.8
	Sables Fins	%	79.3	49.9
	Sables Grossiers	%	13.0	5.8
	total		98.4	100.6
extrait 1/5	pH		7.01	2.33
	EC	mS20° C	0.047	4.660
granulométrie des sables	2.000	%	0.11	0.64
	1.600	%	1.86	4.22
	1.250	%	4.03	5.64
	1.000	%	1.39	1.60
	0.800	%	2.02	2.33
	0.630	%	2.63	3.64
	0.500	%	2.87	2.85
	0.400	%	6.11	5.31
	0.315	%	5.19	4.82
	0.250	%	8.30	5.40
	0.200	%	18.75	15.23
	0.160	%	19.22	19.38
	0.125	%	18.22	13.87
	0.100	%	4.33	4.96
	0.080	%	2.64	4.37
	0.063	%	0.87	1.84
0.050	%	0.96	2.32	
total		99.50	98.42	

## GRANULOMETRIE PIEZO 5

			PZ 05 1.00	PZ 05 2.00	PZ 05 7.00
granulométrie	argile	%	20.8	2.1	1.3
	Limons Fins	%	10.6	1.1	0.9
	Limons Grossiers	%	14.1	1.0	0.9
	Sables Fins	%	49.1	69.5	78.7
	Sables Grossiers	%	3.7	27.1	17.9
	total		98.3	100.8	99.7
extrait 1/5	pH		4.79	6.59	6.27
	EC	mS20° C	0.226	0.022	0.027
granulométrie des sables	2.000	%	0.74	0.13	0.00
	1.600	%	6.36	0.66	0.70
	1.250	%	9.99	1.47	1.08
	1.000	%	4.36	0.63	0.53
	0.800	%	3.90	1.03	1.02
	0.630	%	5.79	1.84	1.08
	0.500	%	4.03	1.24	1.04
	0.400	%	5.23	4.68	1.82
	0.315	%	3.86	5.92	4.79
	0.250	%	4.04	7.87	5.44
	0.200	%	7.74	34.85	37.77
	0.160	%	10.58	23.98	28.20
	0.125	%	14.36	12.39	13.65
	0.100	%	5.20	1.81	1.52
	0.080	%	4.73	1.13	1.07
	0.063	%	2.76	0.14	0.12
	0.050	%	5.14	0.10	0.06
total		98.81	99.87	99.89	

## GRANULOMETRIE PIEZO 6

			PZ 06 1.00	PZ 06 2.00	PZ 06 3.00	PZ 06 5.00	PZ 06 12.00
granulométrie	argile	%	41.2	37.9	3.5	3.5	0.8
	Limons Fins	%	11.1	11.8	1.1	1.0	0.5
	Limons Grossiers	%	11.7	11.8	0.9	1.0	0.5
	Sables Fins	%	32.5	32.5	46.9	52.3	55.7
	Sables Grossiers	%	2.0	4.4	47.1	40.4	42.0
	total		98.5	98.4	99.5	98.2	99.5
extrait 1/5	pH		5.23	5.24	5.79	5.83	6.41
	EC	mS20 °C	0.263	0.257	0.055	0.050	0.031
granulométrie des sables	2.000	%	1.19	0.15	0.00	0.25	0.00
	1.600	%	7.91	7.04	1.10	1.48	0.19
	1.250	%	9.70	8.13	3.61	5.54	2.53
	1.000	%	2.52	4.11	4.35	5.46	2.24
	0.800	%	3.92	4.44	7.33	7.48	3.82
	0.630	%	6.24	4.46	10.55	11.14	6.42
	0.500	%	2.86	4.94	7.78	6.18	5.48
	0.400	%	11.40	12.74	7.55	9.56	4.14
	0.315	%	8.20	2.20	5.44	9.22	2.46
	0.250	%	3.43	5.71	6.68	5.20	6.88
	0.200	%	15.03	25.88	16.05	20.99	25.30
	0.160	%	11.32	3.90	14.38	10.05	20.18
	0.125	%	9.55	8.64	10.89	5.66	14.89
	0.100	%	1.79	1.40	2.60	0.91	3.31
	0.080	%	1.90	2.44	1.17	0.55	1.67
	0.063	%	1.01	1.18	0.16	0.07	0.22
	0.050	%	1.12	1.71	0.13	0.03	0.11
	total		99.09	99.07	99.77	99.77	99.84

## GRANULOMETRIE PIEZO 7

			PZ 07 1.00	PZ 07 2.00	PZ 07 5.00	PZ 07 9.00	PZ 07 10.00
granulométrie	argile	%	55.2	30.5	9.1	6.6	3.8
	Limons Fins	%	22.7	11.3	4.3	2.6	1.7
	Limons Grossiers	%	14.0	24.4	8.5	3.4	2.1
	Sables Fins	%	7.8	31.8	69.3	71.3	76.4
	Sables Grossiers	%	0.5	0.8	7.8	16.0	16.0
	total		100.2	98.8	99.0	99.9	100.0
extrait 1/5	pH		5.44	6.78	5.98	6.12	3.98
	EC	mS20 °C	1.461	2.530	0.407	0.222	0.252
granulométrie des sables	2.000	%	1.68	1.40	0.96	0.08	0.00
	1.600	%	9.42	13.64	4.99	2.23	0.28
	1.250	%	12.40	13.64	8.99	4.39	0.57
	1.000	%	7.42	6.50	2.56	2.02	0.19
	0.800	%	5.26	5.62	3.63	2.47	0.29
	0.630	%	6.82	5.71	5.15	3.87	0.46
	0.500	%	6.89	4.13	3.30	3.12	0.59
	0.400	%	6.41	5.08	5.13	6.46	1.19
	0.315	%	4.67	2.13	3.85	7.34	2.33
	0.250	%	4.50	2.47	4.92	7.23	6.54
	0.200	%	6.92	3.41	11.45	19.86	17.38
	0.160	%	5.71	1.84	15.73	17.09	23.55
	0.125	%	5.96	3.63	9.95	12.84	27.09
	0.100	%	3.09	2.74	6.56	3.98	7.80
	0.080	%	4.21	8.98	7.95	4.97	7.86
	0.063	%	3.33	7.90	2.47	1.02	1.92
	0.050	%	4.49	10.34	1.65	0.65	1.37
	total		99.18	99.16	99.24	99.62	99.41

## GRANULOMETRIE PIEZO 8

			PZ 08 1.00	PZ 08 4.00	PZ 08 5.00	PZ 08 6.00	PZ 08 11.00	PZ 08 12.00
granulométrie	argile	%	31.3	30.7	26.9	3.1	3.1	2.9
	Limons Fins	%	18.0	17.2	14.2	1.2	1.3	1.2
	Limons Grossiers	%	32.6	23.0	18.7	2.4	1.5	1.2
	Sables Fins	%	17.8	29.9	40.1	85.5	72.1	74.2
	Sables Grossiers	%	0.9	0.6	1.6	8.4	22.1	21.1
	total		100.6	101.4	101.5	100.6	100.1	100.6
extrait 1/5	pH		9.34	9.37	9.49	8.47	3.90	3.86
	EC	mS20 °C	0.895	0.544	0.444	0.066	0.393	0.303
granulométrie des sables	2.000	%	1.27	1.34	2.35	0.04	0.03	0.02
	1.600	%	9.52	10.03	12.79	1.08	1.47	0.47
	1.250	%	11.79	10.24	13.84	1.94	2.59	1.44
	1.000	%	5.29	4.36	6.17	0.83	1.25	0.41
	0.800	%	5.16	4.65	5.18	0.94	1.18	0.55
	0.630	%	5.44	4.60	6.04	1.63	1.86	0.96
	0.500	%	4.79	4.05	3.38	1.78	1.32	0.73
	0.400	%	4.41	3.76	6.96	4.72	3.14	2.51
	0.315	%	3.53	2.92	5.74	7.15	11.18	5.14
	0.250	%	2.62	2.21	2.02	9.44	10.23	11.07
	0.200	%	2.14	2.73	8.80	25.47	31.42	29.79
	0.160	%	2.11	4.16	9.34	20.60	17.11	23.81
	0.125	%	4.09	10.82	8.90	16.25	12.42	16.35
	0.100	%	2.57	8.72	2.84	3.58	2.73	3.52
	0.080	%	5.86	6.82	2.27	3.11	1.25	2.48
	0.063	%	12.82	8.44	1.10	0.68	0.28	0.37
	0.050	%	15.52	9.26	1.28	0.46	0.17	0.15
total		98.93	99.11	99.00	99.70	99.63	99.77	

## GRANULOMETRIE PIEZO 9

			PZ 09 1.00	PZ 09 2.00	PZ 09 3.00	PZ 09 7.00	PZ 09 9.00	PZ 09 10.00
granulométrie	argile	%	31.9	11.4	4.7	3.3	3.4	31.9
	Limons Fins	%	15.4	5.6	2.0	1.1	1.2	15.4
	Limons Grossiers	%	22.0	10.3	3.8	2.5	2.5	22.0
	Sables Fins	%	29.7	66.4	80.2	77.5	72.4	29.7
	Sables Grossiers	%	1.6	7.3	9.6	16.0	20.9	1.6
	total		100.6	101.0	100.3	100.4	100.4	100.6
extrait 1/5	pH		6.20	6.74	6.78	7.06	6.82	6.20
	EC	mS20 °C	0.062	0.034	0.026	0.020	0.022	0.062
granulométrie des sables	2.000	%			0.33	0.26	0.03	0.07
	1.600	%			3.73	2.86	2.01	1.68
	1.250	%			7.02	4.33	1.61	3.24
	1.000	%			3.23	1.47	0.78	1.26
	0.800	%			2.46	1.94	0.80	1.76
	0.630	%			4.11	2.19	0.75	2.75
	0.500	%			2.35	1.65	0.78	3.10
	0.400	%			3.51	2.56	0.99	6.16
	0.315	%			3.38	4.53	5.56	8.48
	0.250	%			4.23	5.18	8.08	11.22
	0.200	%			23.93	22.93	30.00	20.89
	0.160	%			21.65	23.38	28.57	18.76
	0.125	%			13.51	20.27	14.89	15.28
	0.100	%			2.89	3.56	2.51	2.67
	0.080	%			1.80	1.72	1.13	2.06
	0.063	%			0.81	0.54	0.49	0.45
	0.050	%			0.74	0.39	0.47	0.43
total				99.68	99.76	99.45	100.26	

## GRANULOMETRIE PIEZO 10

			PZ 10 1.00	PZ 10 7.00	PZ 10 12.00
granulométrie	argile	%	26.6	45.4	49.8
	Limons Fins	%	15.0	23.4	26.1
	Limons Grossiers	%	31.7	22.3	15.9
	Sables Fins	%	28.2	5.2	5.6
	Sables Grossiers	%	0.4	4.5	3.3
	total		101.9	100.8	100.7
extrait 1/5	pH		6.78	7.44	7.50
	EC	mS20° C	0.034	0.031	0.030
granulométrie des sables	2.000	%	0.17	3.24	2.97
	1.600	%	2.69	11.58	9.30
	1.250	%	3.17	13.82	12.08
	1.000	%	1.13	12.99	8.53
	0.800	%	1.20	3.20	5.20
	0.630	%	1.45	5.32	10.15
	0.500	%	1.46	6.21	4.61
	0.400	%	1.96	5.93	12.22
	0.315	%	3.18	4.46	8.00
	0.250	%	10.18	3.84	7.32
	0.200	%	34.62	3.88	14.17
	0.160	%	17.76	3.17	0.62
	0.125	%	15.40	7.90	2.42
	0.100	%	2.58	1.72	0.80
	0.080	%	1.56	5.62	0.26
	0.063	%	0.52	3.15	0.25
	0.050	%	0.57	3.16	0.14
	total		99.60	99.19	99.04

## GRANULOMETRIE PIEZO 11

			PZ 11 1.00	PZ 11 4.00	PZ 11 6.00	PZ 11 9.50
granulométrie	argile	%	39.0	19.3	5.7	4.2
	Limons Fins	%	15.3	7.7	1.7	0.8
	Limons Grossiers	%	16.2	10.3	2.5	1.2
	Sables Fins	%	29.0	60.5	64.4	73.3
	Sables Grossiers	%	1.4	0.9	26.8	21.3
	total		100.9	98.7	101.1	100.8
extrait 1/5	pH		6.05	7.38	7.28	6.91
	EC	mS20° C	0.176	0.068	0.027	0.017
granulométrie des sables	2.000	%		0.20	0.01	0.00
	1.600	%		4.55	1.92	0.61
	1.250	%		7.65	4.79	1.57
	1.000	%		4.01	2.18	0.70
	0.800	%		5.12	2.87	0.93
	0.630	%		6.25	2.90	1.05
	0.500	%		6.02	3.99	2.08
	0.400	%		6.73	6.33	3.10
	0.315	%		4.55	8.08	5.24
	0.250	%		4.35	12.41	9.33
	0.200	%		6.18	18.57	21.35
	0.160	%		5.08	14.56	19.63
	0.125	%		11.85	12.23	22.21
	0.100	%		8.16	4.74	7.26
	0.080	%		11.14	2.89	3.58
	0.063	%		3.08	0.56	0.29
	0.050	%		4.10	0.52	0.65
total			99.02	99.55	99.58	

## GRANULOMETRIE PIEZO 12

			PZ 12 1.00	PZ 12 3.00	PZ 12 4.00	PZ 12 6.00	PZ 12 7.00	PZ 12 8.00
granulométrie	argile	%	54.9	29.4	5.2	12.4	9.3	3.0
	Limons Fins	%	16.6	7.4	1.1	4.0	3.7	0.6
	Limons Grossiers	%	7.1	5.1	0.9	7.2	5.5	0.8
	Sables Fins	%	19.1	57.7	92.9	75.4	68.4	81.6
	Sables Grossiers	%	0.7	1.2	1.2	1.5	13.4	14.5
	total		98.4	100.8	101.3	100.5	100.3	100.5
extrait 1/5	pH		6.54	7.44	3.66	6.79	3.41	4.05
	EC	mS20 °C	0.107	0.045	0.576	0.021	0.763	0.237
granulométrie des sables	2.000	%	0.35	0.55	0.00	0.13	0.09	0.00
	1.600	%	7.49	5.49	0.68	4.69	2.31	0.46
	1.250	%	10.62	5.55	1.80	7.82	4.02	1.33
	1.000	%	5.12	2.09	0.80	3.15	1.66	0.50
	0.800	%	5.74	3.67	1.42	3.34	1.88	0.56
	0.630	%	5.83	2.42	2.38	3.90	2.32	0.69
	0.500	%	6.46	2.74	2.60	3.43	2.17	0.69
	0.400	%	6.18	3.41	4.12	3.47	2.69	0.89
	0.315	%	4.14	4.56	4.45	2.84	4.03	1.53
	0.250	%	4.73	2.47	5.76	2.75	6.04	4.94
	0.200	%	7.03	12.40	9.35	4.91	10.28	10.61
	0.160	%	11.50	22.70	18.94	9.91	14.10	22.36
	0.125	%	11.10	17.57	27.40	22.54	23.33	33.51
	0.100	%	2.52	4.98	10.31	12.95	10.06	11.14
	0.080	%	3.99	4.38	6.17	7.48	8.93	8.65
	0.063	%	1.84	2.31	1.07	3.02	2.44	1.23
	0.050	%	4.13	1.43	4.60	2.60	2.67	0.50
total		98.77	98.72	101.85	98.93	99.02	99.59	

## GRANULOMETRIE PIEZO 13

			PZ 13 1.00	PZ 13 3.00	PZ 13 6.00	PZ 13 7.00	PZ 13 10.00
granulométrie	argile	%	40.8	32.5	34.6	9.0	4.5
	Limons Fins	%	19.7	11.6	15.5	2.4	0.6
	Limons Grossiers	%	24.8	18.2	24.1	0.9	0.5
	Sables Fins	%	12.6	37.8	24.2	66.1	46.3
	Sables Grossiers	%	0.2	1.1	1.8	23.1	48.9
	total		98.1	101.2	100.2	101.5	100.8
extrait 1/5	pH		6.44	6.00	4.24	3.45	6.12
	EC	mS20 °C	0.161	1.169	1.154	0.756	0.269
granulométrie des sables	2.000	%	0.64		0.99	0.02	0.00
	1.600	%	11.52		8.31	0.97	0.06
	1.250	%	13.34		9.43	2.46	0.45
	1.000	%	6.05		3.72	1.05	0.40
	0.800	%	6.28		5.73	1.62	0.67
	0.630	%	5.35		5.09	1.74	1.09
	0.500	%	6.03		4.25	2.21	1.65
	0.400	%	4.81		5.43	2.31	4.73
	0.315	%	3.23		4.02	4.10	12.63
	0.250	%	3.72		6.61	8.90	21.70
	0.200	%	2.94		4.65	21.21	25.53
	0.160	%	2.88		4.02	23.38	14.26
	0.125	%	3.03		4.66	21.13	11.34
	0.100	%	2.09		3.47	4.70	2.58
	0.080	%	6.17		9.42	2.14	1.88
	0.063	%	5.46		9.89	0.36	0.25
	0.050	%	14.87		12.14	0.57	0.09
total		98.41		101.83	98.87	99.31	

## GRANULOMETRIE PIEZO 14

			PZ 14 1.00	PZ 14 7.00	PZ 14 10.00	PZ 14 11.00	PZ 14 15.00
granulométrie	argile	%	23.0	24.6	16.7	6.2	4.9
	Limons Fins	%	6.8	10.4	6.6	1.7	1.2
	Limons Grossiers	%	6.0	16.0	11.3	3.9	5.1
	Sables Fins	%	52.3	44.0	61.2	89.3	89.7
	Sables Grossiers	%	13.2	5.4	5.2	0.5	0.7
	total		101.3	100.4	101.0	101.6	101.6
extrait 1/5	pH		6.34	7.00	7.00	7.22	7.08
	EC	mS20 °C	0.072	0.085	0.065	0.066	0.026
granulométrie des sables	2.000	%	0.38	1.62	0.53	0.02	0.04
	1.600	%	5.34	13.80	7.08	1.41	1.09
	1.250	%	7.29	16.49	8.47	2.66	2.82
	1.000	%	3.37	7.18	4.04	1.04	1.10
	0.800	%	3.29	5.00	3.78	1.20	1.18
	0.630	%	3.67	6.65	4.61	1.42	1.49
	0.500	%	4.01	4.83	4.60	1.43	1.29
	0.400	%	5.40	4.74	4.59	1.88	1.71
	0.315	%	5.78	3.46	3.74	1.99	1.90
	0.250	%	7.72	3.37	3.98	2.82	3.66
	0.200	%	11.80	3.53	5.98	3.93	7.50
	0.160	%	12.18	3.96	9.95	8.70	15.51
	0.125	%	13.86	7.98	18.83	31.32	30.77
	0.100	%	4.91	5.03	7.68	23.60	15.93
	0.080	%	4.84	5.00	6.24	12.68	9.15
	0.063	%	1.67	2.56	2.46	1.73	2.97
	0.050	%	3.51	4.32	2.48	1.84	1.50
total		99.02	99.52	99.04	99.67	99.61	

## GRANULOMETRIE PIEZO 15

			1.00	2.00	3.00	5.00	7.00	10.00
granulométrie	argile	%	19.5	3.6	2.5	21.0	5.8	2.2
	Limons Fins	%	7.8	1.6	1.1	6.0	1.6	0.3
	Limons Grossiers	%	19.6	1.4	0.9	10.3	4.8	0.6
	Sables Fins	%	50.7	41.2	45.9	55.1	53.2	59.7
	Sables Grossiers	%	3.0	50.9	48.9	6.0	33.4	37.5
	total		100.6	98.7	99.3	98.4	98.8	100.3
extrait 1/5	pH		6.29	6.93	6.90	5.14	5.67	6.46
	EC	mS20 °C	0.121	0.029	0.028	0.057	0.026	0.025
granulométrie des sables	2.000	%	0.37	0.03	0.65	0.51	0.05	0.02
	1.600	%	4.27	0.65	1.83	6.83	1.78	0.99
	1.250	%	8.90	1.19	0.71	11.80	5.09	1.11
	1.000	%	3.38	0.60	1.08	4.65	2.32	0.48
	0.800	%	5.18	0.88	1.39	5.62	3.28	0.56
	0.630	%	5.21	1.26	2.31	6.29	3.84	0.58
	0.500	%	4.71	1.73	7.00	4.93	4.86	1.15
	0.400	%	5.28	4.63	11.48	5.02	6.50	1.91
	0.315	%	3.97	0.92	17.87	3.50	7.90	4.95
	0.250	%	4.56	14.75	28.72	3.73	10.50	10.65
	0.200	%	5.84	31.98	15.63	5.29	17.49	20.45
	0.160	%	6.74	18.34	8.36	5.23	16.54	23.64
	0.125	%	11.54	10.92	1.65	8.13	11.52	20.71
	0.100	%	9.31	2.54	0.76	7.63	3.24	5.65
	0.080	%	7.44	1.53	0.17	10.10	2.22	5.22
	0.063	%	4.07	0.68	0.20	5.28	0.93	0.77
	0.050	%	8.32	0.88	0.18	4.49	1.49	0.53
total		99.09	93.51	99.99	99.03	99.55	99.37	

## GRANULOMETRIE PIEZO 16

			PZ 16 1.00	PZ 16 3.00	PZ 16 5.00	PZ 16 6.00	PZ 16 7.00	PZ 16 8.00
granulométrie	argile	%	33.2	40.5	5.1	3.7	14.7	3.5
	Limons Fins	%	12.7	13.6	1.7	1.2	8.9	1.4
	Limons Grossiers	%	6.8	14.6	1.7	1.2	17.3	1.0
	Sables Fins	%	35.8	28.0	84.5	58.6	38.9	64.0
	Sables Grossiers	%	10.0	2.2	6.9	34.4	18.8	29.7
	total		98.5	98.9	99.9	99.1	98.6	99.6
extrait 1/5	pH		6.59	7.89	8.04	7.33	3.23	4.46
	EC	mS20 °C	0.126	0.985	0.091	0.071	1.040	0.127
granulométrie des sables	2.000	%	0.10	1.15	0.02	1.80	0.17	0.00
	1.600	%	5.66	9.10	2.76	3.41	2.44	0.38
	1.250	%	8.89	11.15	5.07	1.36	5.04	1.39
	1.000	%	4.23	4.67	1.93	1.63	2.91	0.59
	0.800	%	5.55	4.52	2.34	2.05	3.67	0.77
	0.630	%	5.30	5.08	2.73	2.18	3.86	1.35
	0.500	%	6.07	4.26	2.90	5.51	5.30	1.94
	0.400	%	5.87	4.02	4.44	8.29	5.74	4.92
	0.315	%	4.49	2.77	4.88	13.80	5.63	6.96
	0.250	%	6.43	3.30	7.03	15.35	9.09	13.45
	0.200	%	7.05	5.21	13.37	15.65	12.73	22.38
	0.160	%	7.65	10.03	24.35	20.99	12.54	20.63
	0.125	%	13.81	15.66	21.43	4.38	13.55	16.51
	0.100	%	5.37	3.31	4.07	2.26	4.19	4.53
	0.080	%	5.29	7.73	1.57	0.42	3.88	3.00
	0.063	%	3.04	1.80	0.33	0.57	2.16	0.62
	0.050	%	4.10	4.78	0.45	0.59	5.89	0.37
total		98.90	98.54	99.67	100.24	98.79	99.79	

## GRANULOMETRIE PIEZO 17

			PZ 17 2.00	PZ 17 3.00	PZ 17 7.00	PZ 17 10.00
granulométrie	argile	%	34.5	3.3	4.6	2.0
	Limons Fins	%	11.6	1.0	1.7	0.9
	Limons Grossiers	%	7.4	0.8	3.2	1.2
	Sables Fins	%	44.3	92.5	89.5	84.0
	Sables Grossiers	%	1.9	3.4	0.8	11.4
	total		99.7	101.0	99.8	99.5
extrait 1/5	pH		6.35	6.78	6.75	3.65
	EC	mS20° C	0.050	0.031	0.033	0.344
granulométrie des sables	2.000	%	1.40	0.03	0.15	0.00
	1.600	%	13.40	0.08	2.70	0.31
	1.250	%	16.06	0.76	3.95	1.25
	1.000	%	6.39	0.27	1.12	0.49
	0.800	%	6.97	0.42	1.67	0.76
	0.630	%	7.53	0.81	2.56	1.93
	0.500	%	5.22	1.58	2.08	1.88
	0.400	%	5.43	3.13	2.80	3.68
	0.315	%	3.56	3.78	2.76	3.80
	0.250	%	3.30	6.10	3.01	4.73
	0.200	%	4.31	11.58	7.74	14.74
	0.160	%	5.28	17.75	14.24	21.81
	0.125	%	8.85	37.67	35.00	27.88
	0.100	%	4.26	10.77	11.38	8.69
	0.080	%	2.96	4.41	5.59	5.31
	0.063	%	1.47	0.55	1.75	1.02
	0.050	%	2.45	0.22	1.00	1.25
total		98.84	99.91	99.50	99.53	

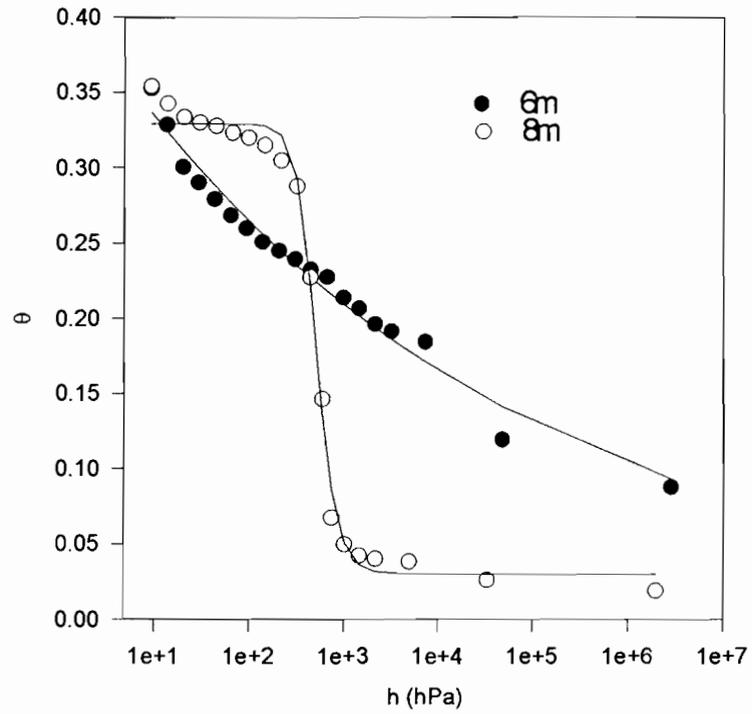
## GRANULOMETRIE PIEZO 18

			PZ 18 1.00	PZ 18 2.00	PZ 18 5.00	PZ 18 7.00	PZ 18 8.00
granulométrie	argile	%	33.4	3.3	5.8	14.1	0.9
	Limons Fins	%	10.6	1.2	2.5	7.0	0.5
	Limons Grossiers	%	8.0	0.7	5.4	14.4	0.7
	Sables Fins	%	43.2	82.3	78.9	59.5	56.8
	Sables Grossiers	%	3.3	12.5	5.6	4.2	40.3
	total		98.5	100.0	98.2	99.2	99.2
extrait 1/5	pH		7.95	7.73	3.67	3.15	4.14
	EC	mS20 °C	0.087	0.053	0.451	1.200	0.166
granulométrie des sables	2.000	%	0.55	0.05	0.09	0.30	0.00
	1.600	%	6.83	0.92	2.10	4.18	0.13
	1.250	%	8.65	1.86	3.72	7.79	0.46
	1.000	%	4.17	0.77	1.30	3.82	0.23
	0.800	%	4.29	1.08	1.65	3.30	0.23
	0.630	%	4.69	1.49	1.59	4.04	0.31
	0.500	%	4.99	1.49	1.43	3.26	0.56
	0.400	%	5.68	2.09	1.82	3.41	1.78
	0.315	%	4.43	2.40	1.69	2.93	4.50
	0.250	%	5.27	5.91	3.23	3.65	11.94
	0.200	%	6.25	14.34	9.16	6.87	25.95
	0.160	%	6.77	17.21	17.99	9.14	27.18
	0.125	%	12.82	31.37	34.86	21.51	18.87
	0.100	%	6.82	11.42	8.18	10.18	3.78
	0.080	%	7.50	5.50	6.61	6.48	2.87
	0.063	%	5.06	0.97	1.93	4.58	0.47
	0.050	%	3.90	0.38	2.12	3.63	0.38
total		98.67	99.25	99.47	99.07	99.64	

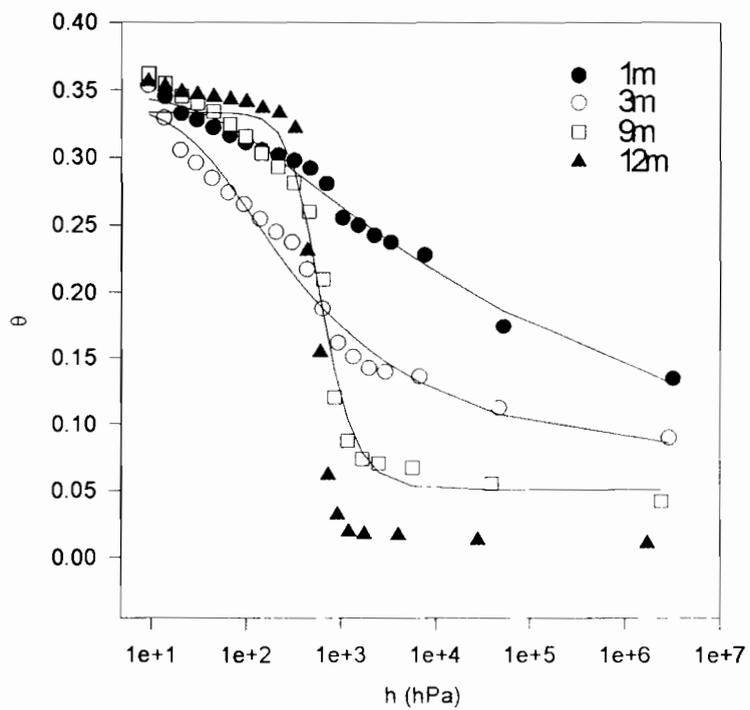
## **ANNEXE 2**

# **COURBES DE RETENTION**

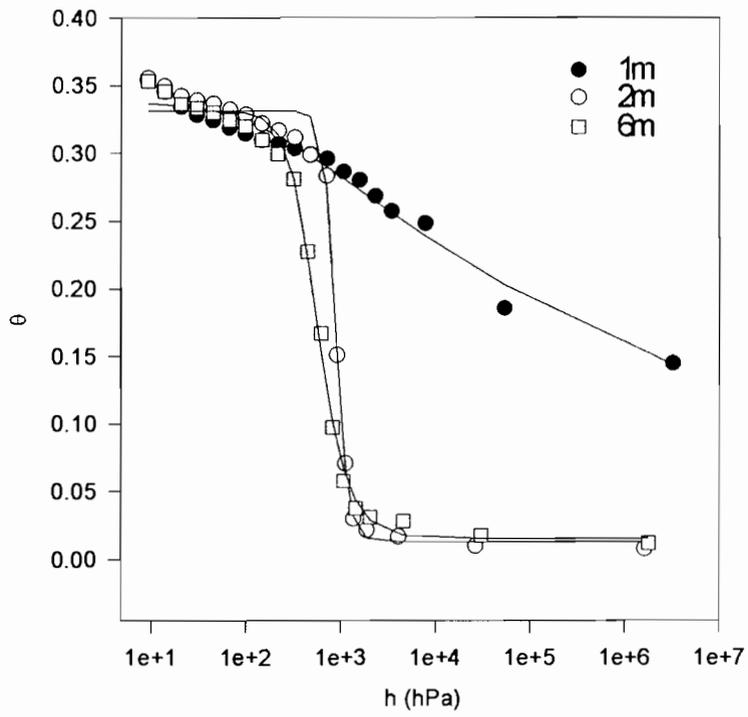
**piezo 1**



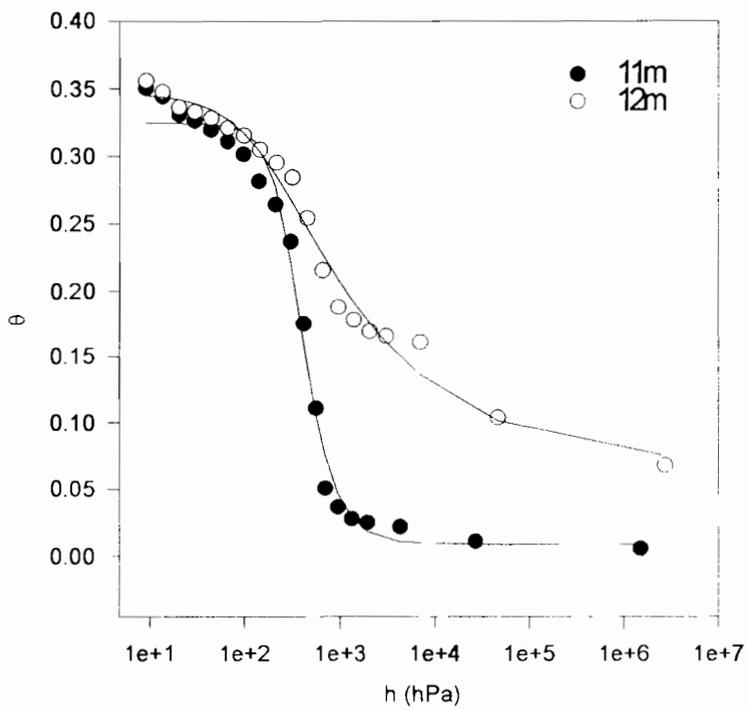
**piezo 2**



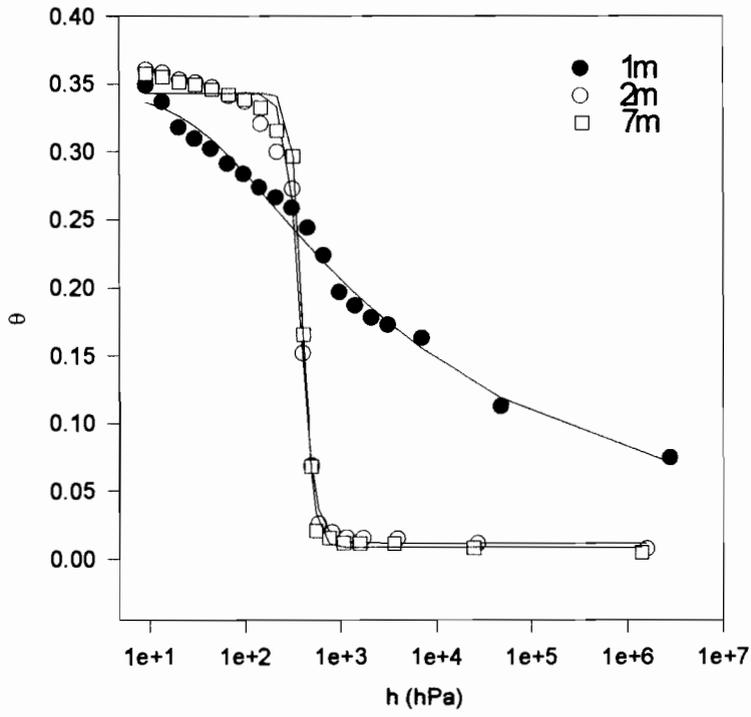
**piezo 3**



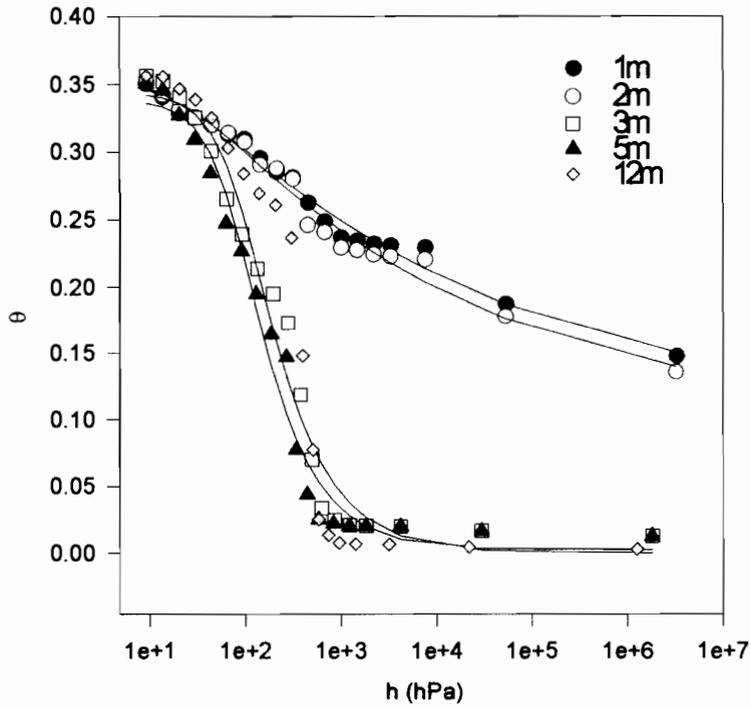
**piezo 4**



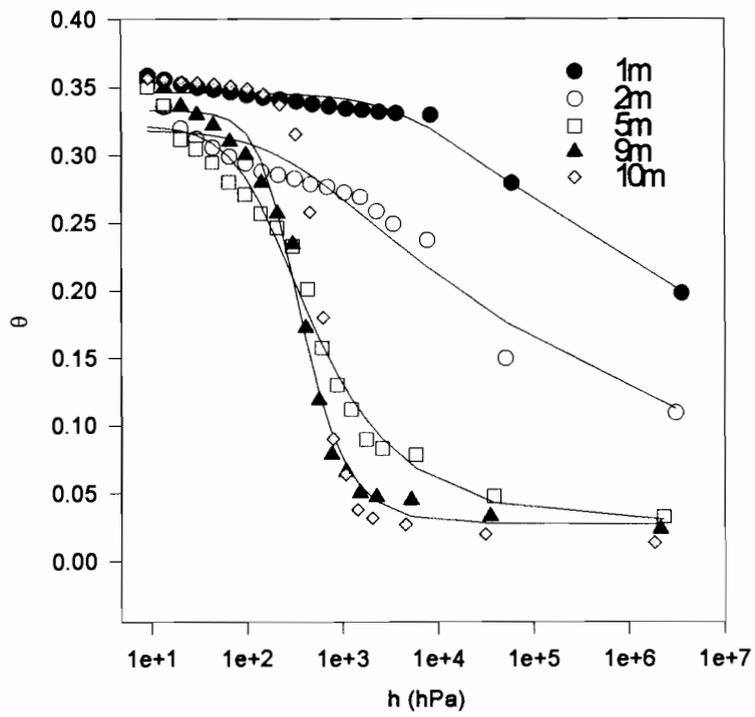
**piezo 5**



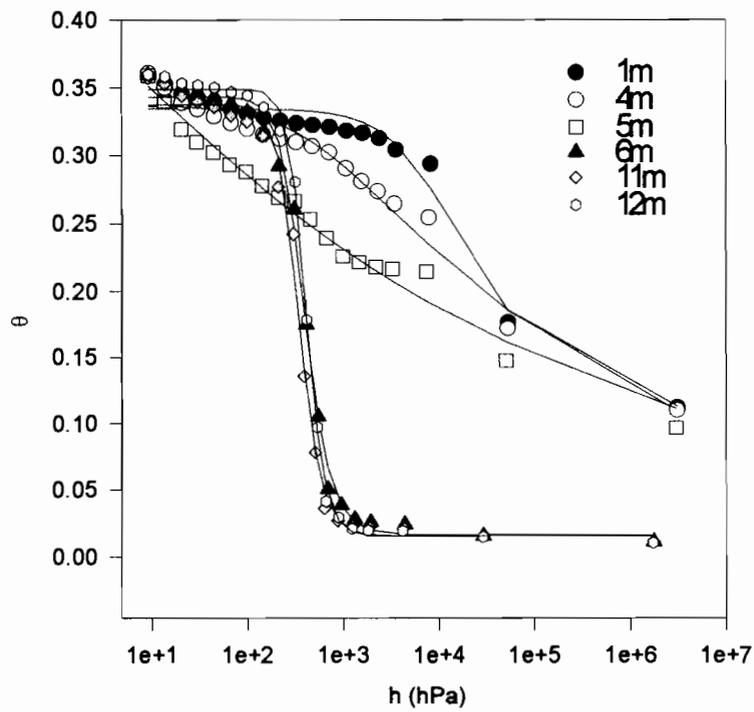
**piezo 6**



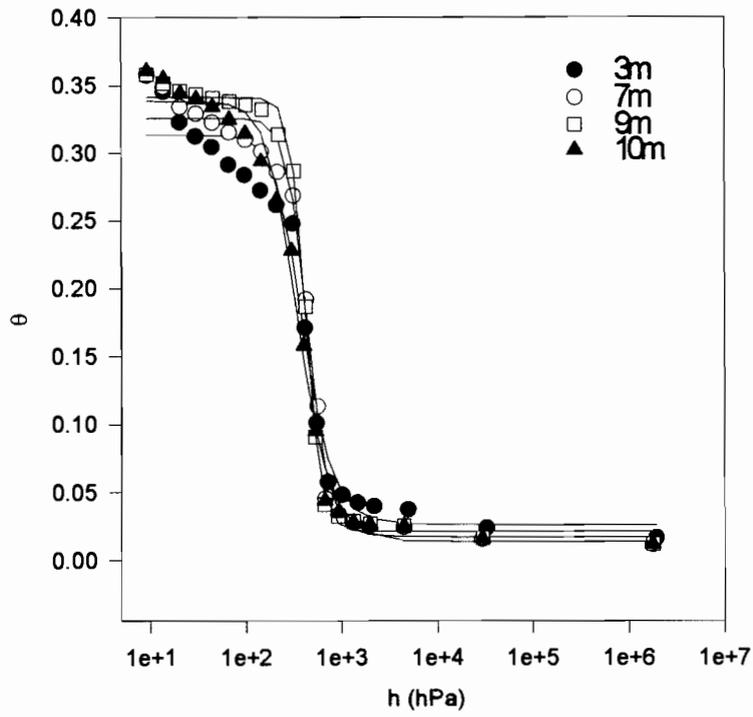
**piezo 7**



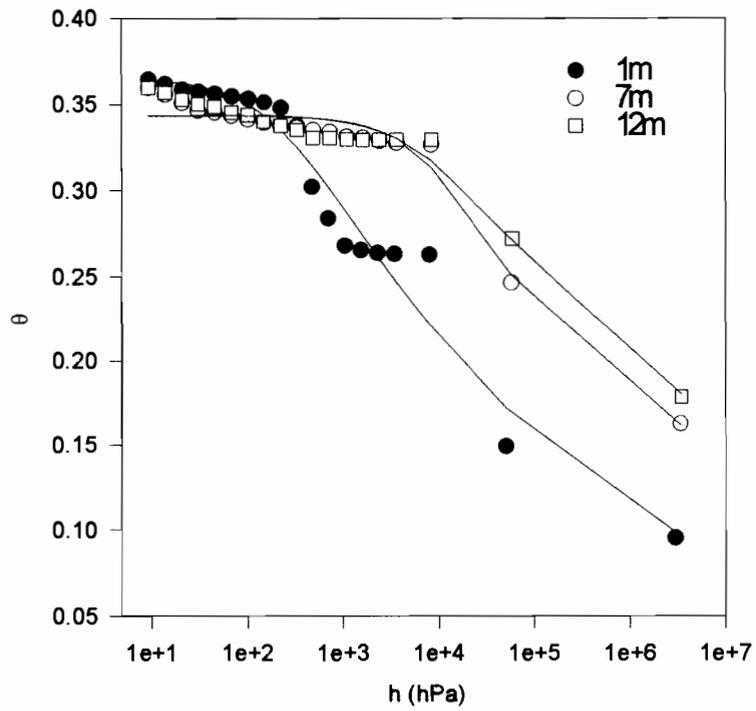
**piezo 8**



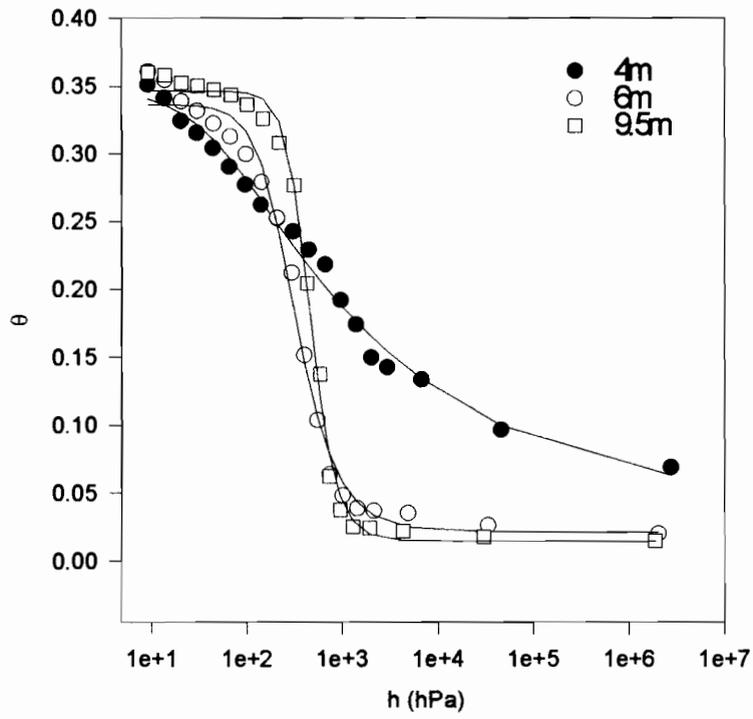
**piezo 9**



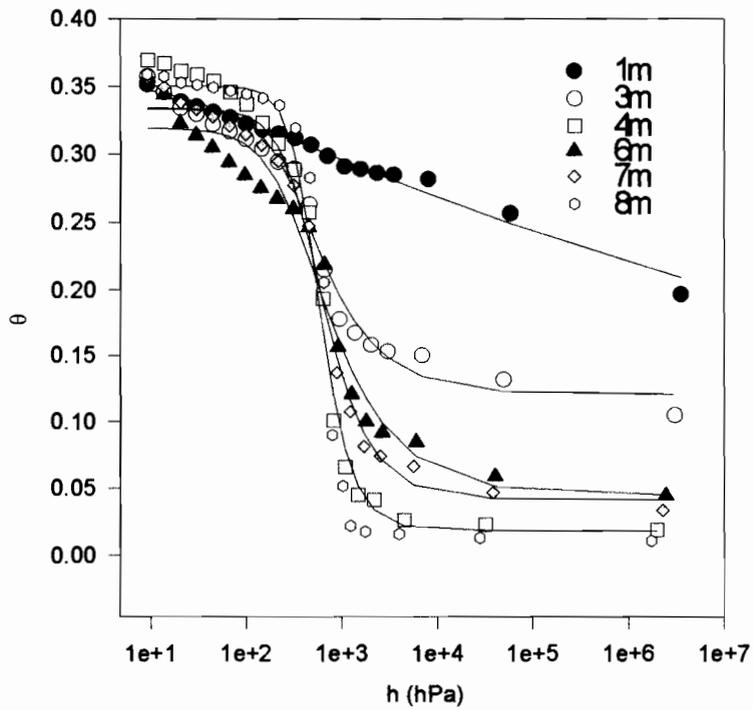
**piezo 10**



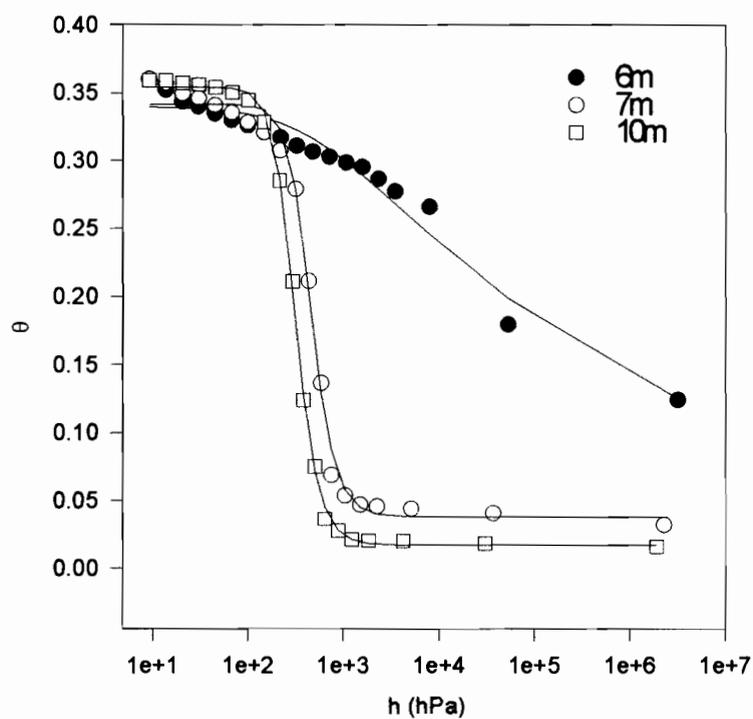
**piezo 11**



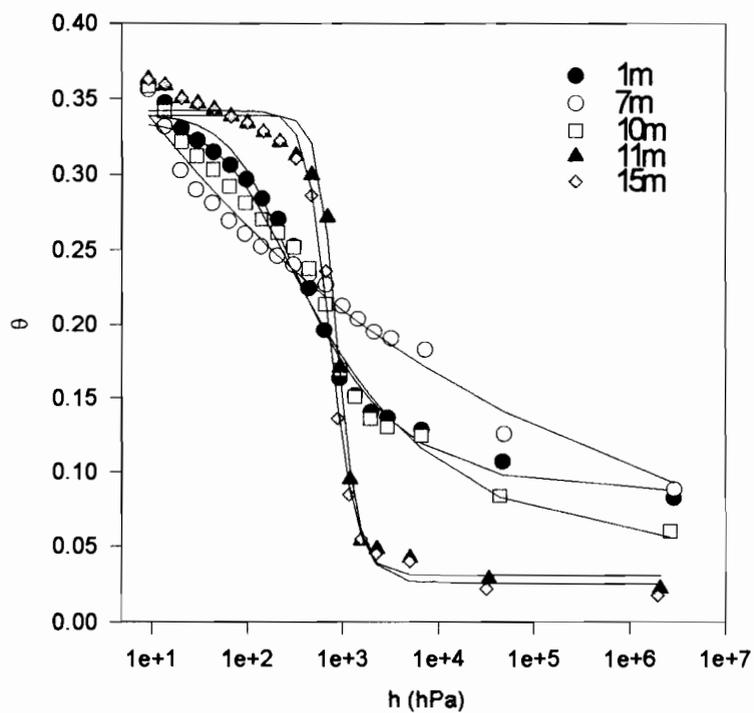
**piezo 12**



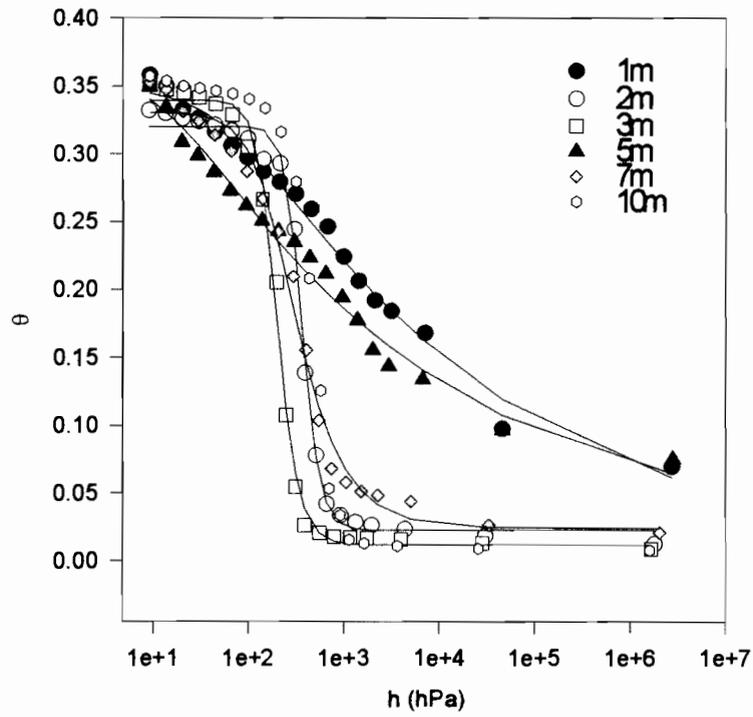
**piezo 13**



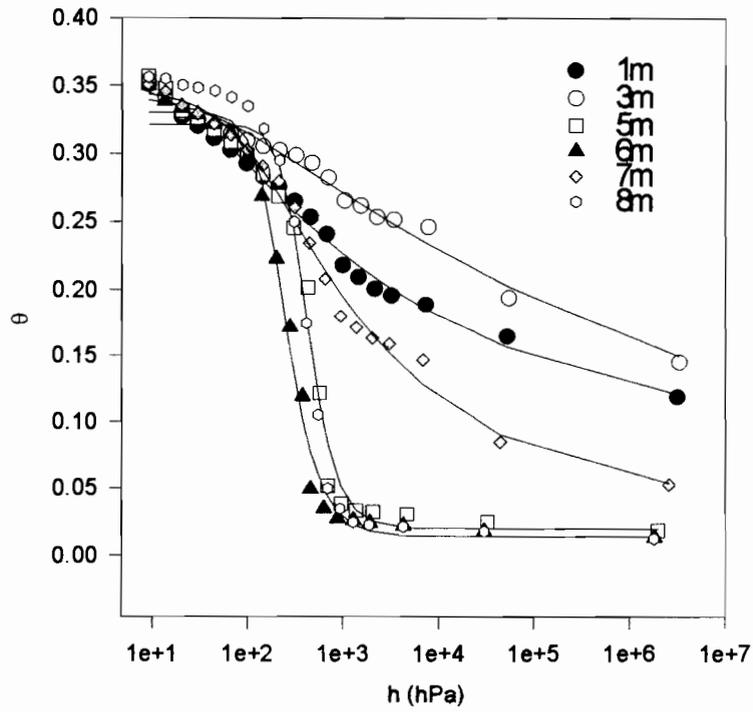
**piezo 14**



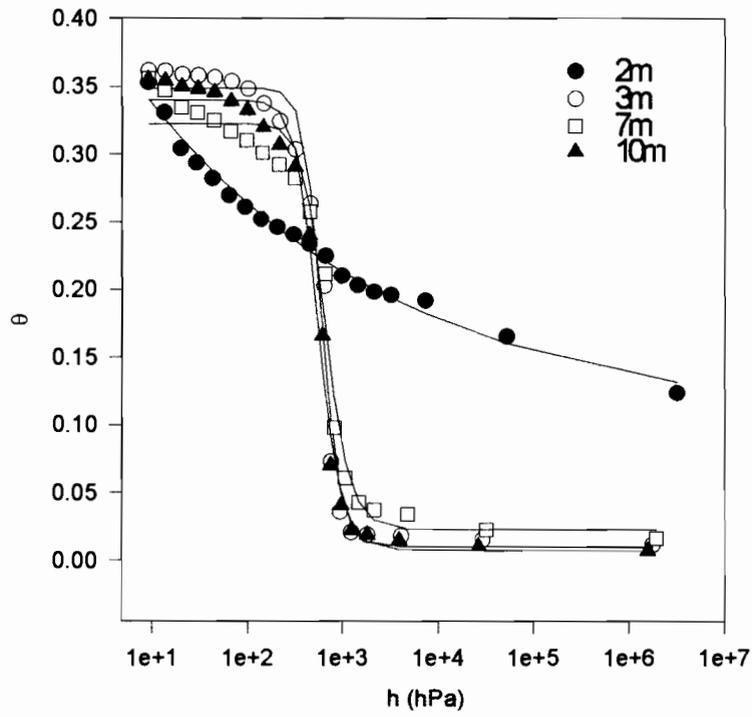
**piezo 15**



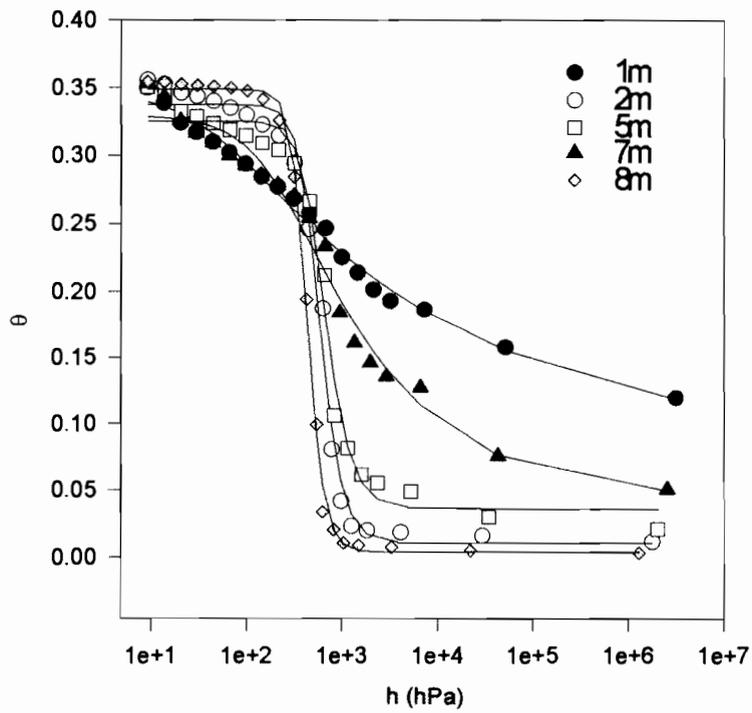
**piezo 16**



**piezo 17**



**piezo 18**

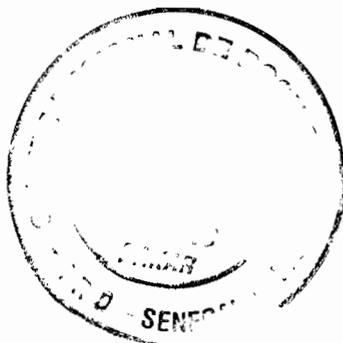
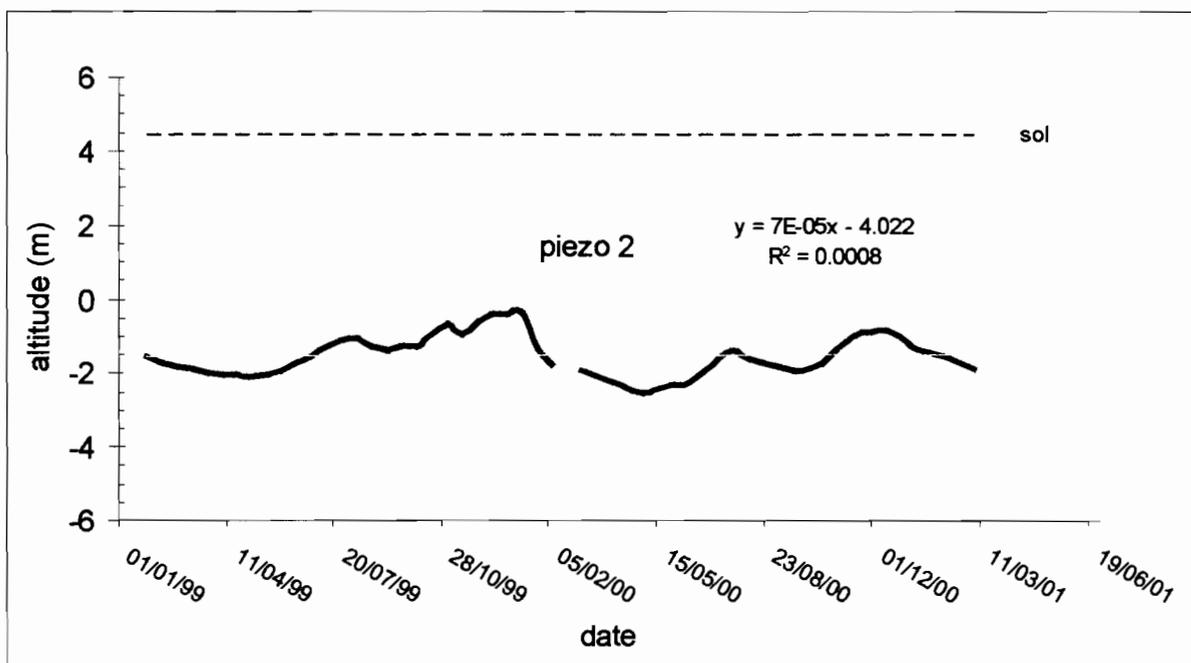
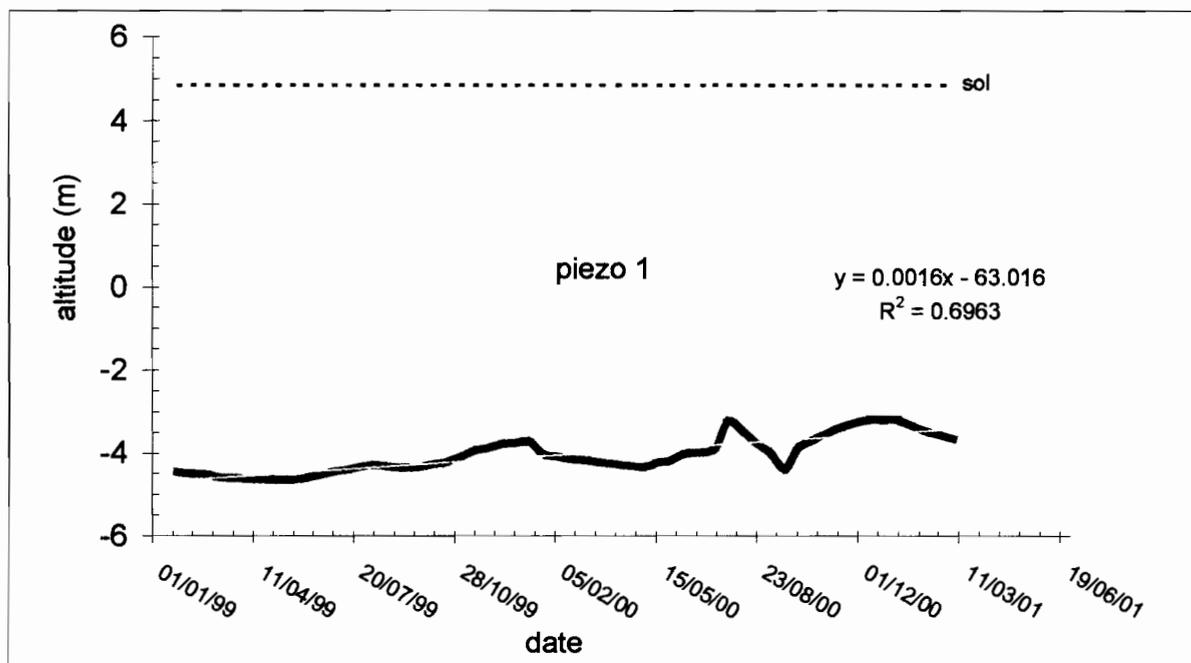


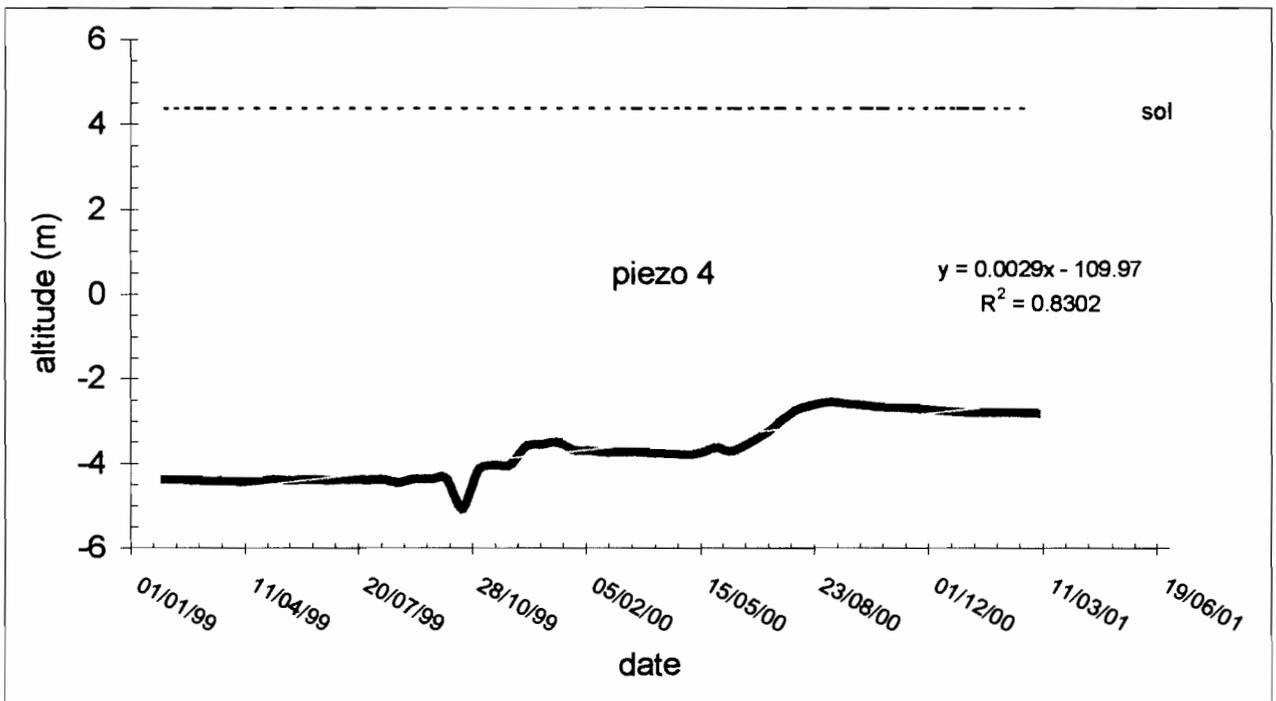
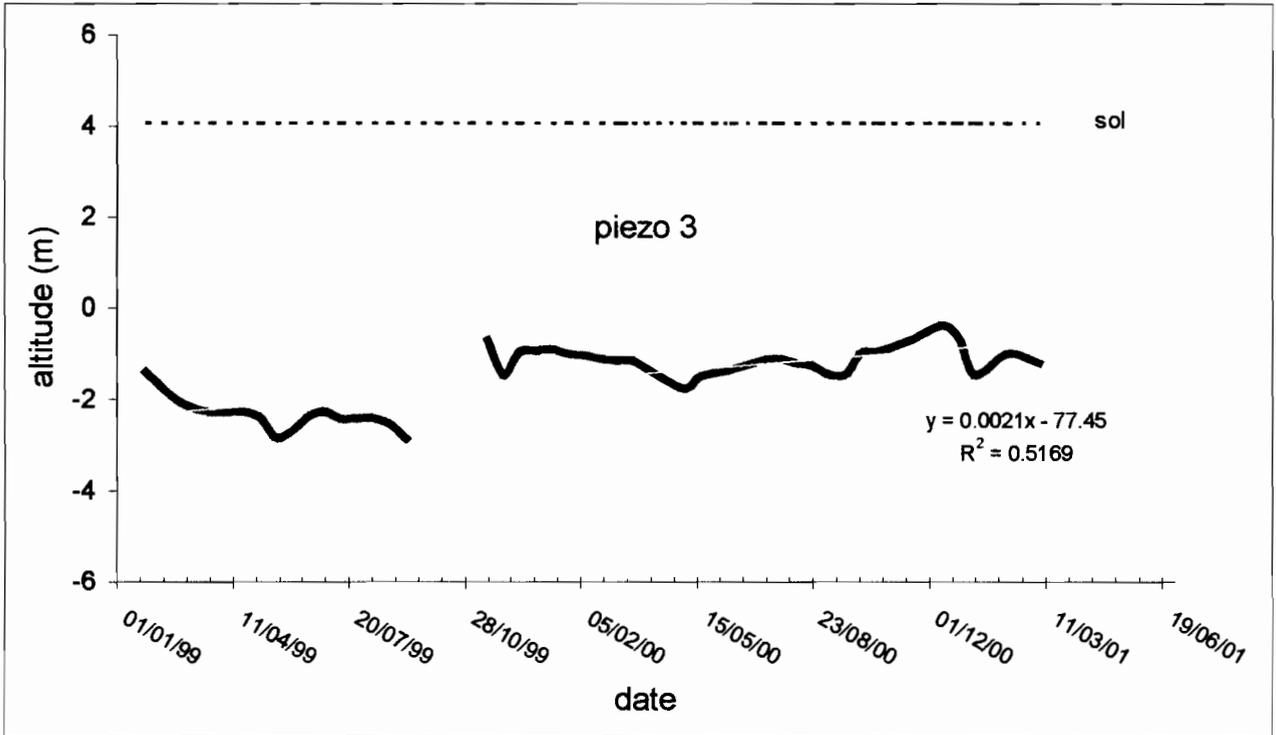
## PARAMETRES D'AJUSTEMENT DE COURBES DE RETENTION

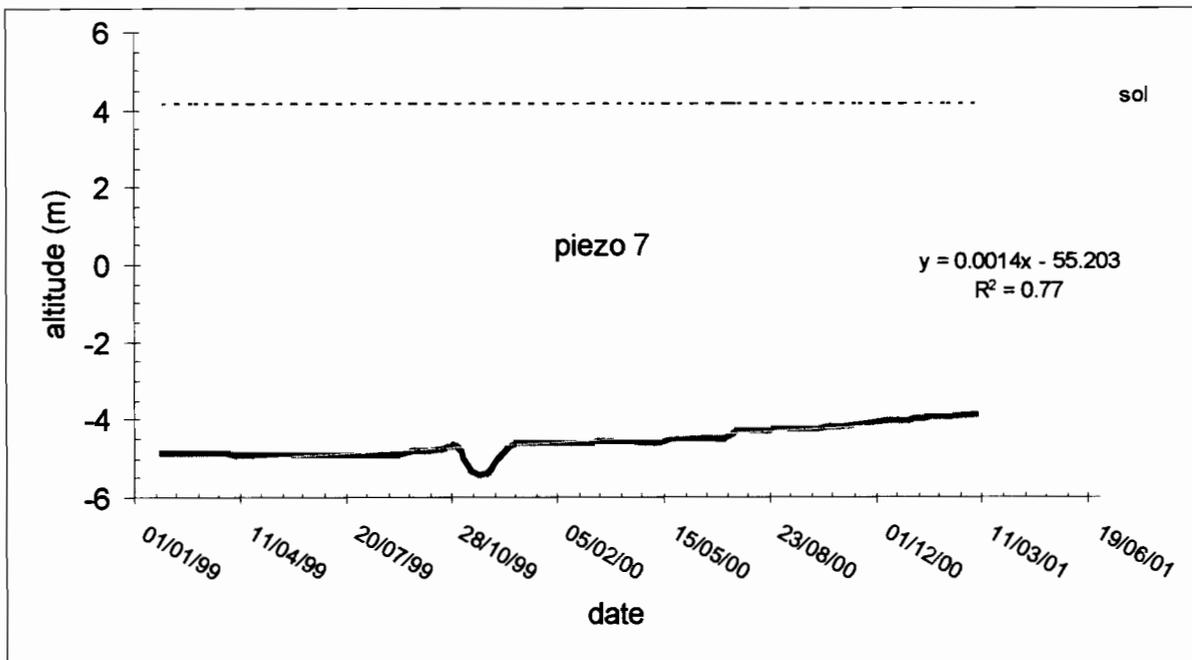
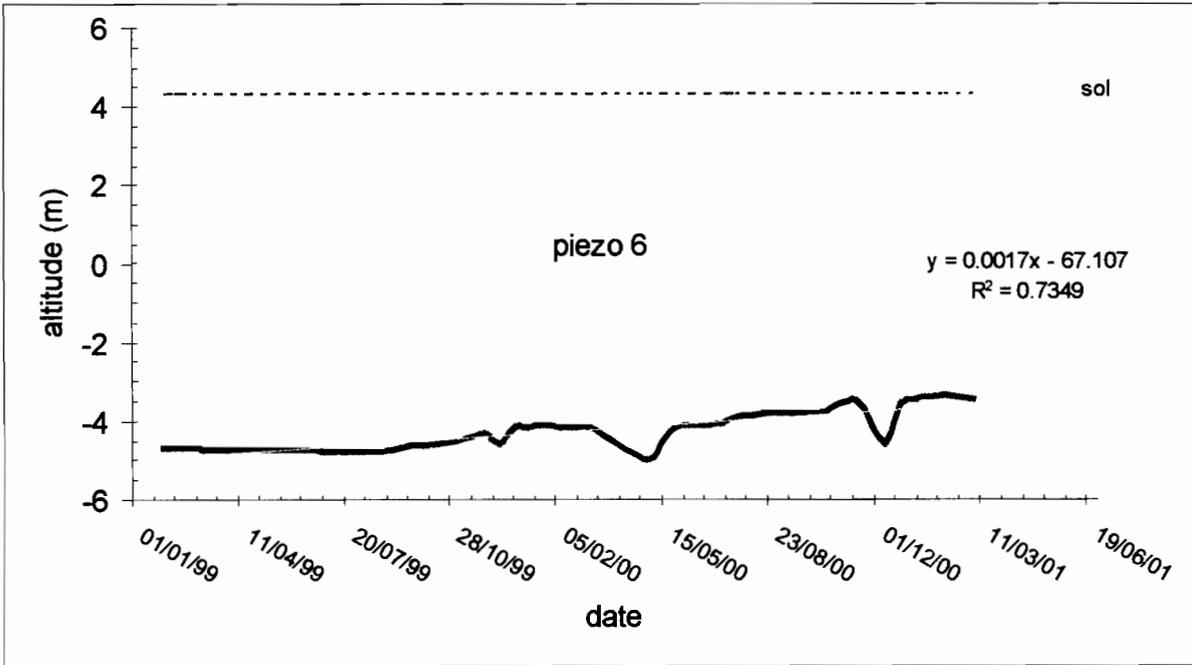
	$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n		$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n
<b>P1-6</b>	0.4807	2.281e-10	3.5158	1.1017	<b>P11-4</b>	0.3481	0.0408	0.0221	1.2381
<b>P1-8</b>	0.3290	0.0299	2.12e-3	4.4116	<b>P11-6</b>	0.3363	0.0213	4.2272e-3	2.4670
<b>P2-1</b>	0.3476	0.0115	0.0210	1.0933	<b>P11-9.5</b>	0.3463	0.0147	2.4444e-3	3.6778
<b>P2-3</b>	0.3406	0.0780	0.0260	1.3073	<b>P12-1</b>	0.3543	3.4273e-9	0.0697	1.0425
<b>P2-9</b>	0.3336	0.0507	1.9998e-3	2.9022	<b>P12-3</b>	0.3342	0.1205	3.2075e-3	1.8921
<b>P2-12</b>	0.3455	0.0113	2.0053e-3	5.0032	<b>P12-4</b>	0.3501	0.0183	2.0315e-3	3.0626
<b>P3-1</b>	0.3382	1.069e-9	7.6337e-3	1.0847	<b>P12-6</b>	0.3192	0.0447	2.9326e-3	1.7831
<b>P3-2</b>	0.3314	0.0134	1.1717e-3	7.1156	<b>P12-7</b>	0.3332	0.0412	2.2498e-3	2.2901
<b>P3-6</b>	0.3313	0.0157	2.1196e-3	3.1613	<b>P12-8</b>	0.3467	0.0106	1.6195e-3	5.0808
<b>P4-11</b>	0.3244	8.7235e-3	3.0534e-3	2.9650	<b>P13-3</b>				
<b>P4-12</b>	0.3244	8.7235e-3	3.0534e-3	2.9650	<b>P13-6</b>	0.3397	1.2623e-9	2.1192e-3	1.1135
<b>P5-1</b>	0.3445	0.0217	0.0275	1.1674	<b>P13-7</b>	0.3414	0.0379	2.4375e-3	3.8945
<b>P5-2</b>	0.3429	0.0117	2.7246e-3	6.3258	<b>P13-10</b>	0.3539	0.0169	3.5479e-3	3.9764
<b>P5-7</b>	0.3429	8.6443e-3	2.5322e-3	8.3756	<b>P14-1</b>	0.3402	0.0862	7.2458e-3	1.5284
<b>P6-1</b>	0.3571	0.1018	0.0529	1.1378	<b>P14-7</b>	0.4923	1.248e-10	4.0346	1.1028
<b>P6-2</b>	0.3581	0.0984	0.0452	1.1549	<b>P14-10</b>	0.3355	0.0474	9.5650e-3	1.3471
<b>P6-3</b>	0.3438	8.914e-12	0.0101	1.8777	<b>P14-11</b>	0.3387	0.0307	1.2181e-3	4.5731
<b>P6-5</b>	0.3382	2.4539e-3	0.0124	1.9501	<b>P14-15</b>	0.3419	0.0254	1.4972e-3	3.6617
<b>P6-12</b>	0.3221	1.949e-11	3.0075e-3	4.1224	<b>P15-1</b>	0.3499	4.556e-11	0.0164	1.1621
<b>P7-1</b>	0.3460	1.2219e-9	2.0952e-4	1.0837	<b>P15-2</b>	0.3202	0.0226	2.8904e-3	5.0691
<b>P7-2</b>	0.3187	1.5198e-9	4.0677e-3	1.1106	<b>P15-3</b>	0.3396	0.0119	5.4256e-3	4.2748
<b>P7-5</b>	0.3223	0.0294	6.6009e-3	1.5511	<b>P15-5</b>	0.3647	0.0218	0.0771	1.1694
<b>P7-9</b>	0.3328	0.0275	3.9034e-3	2.3312	<b>P15-7</b>	0.3306	0.0240	4.8450e-3	2.1888
<b>P7-10</b>	0.3512	0.0208	1.8868e-3	3.9513	<b>P15-10</b>	0.3457	6.0948e-3	2.3508e-3	4.1270
<b>P8-1</b>	0.3344	0.0934	1.6265e-4	1.4389	<b>P16-1</b>	0.3556	0.0877	0.0401	1.1779
<b>P8-4</b>	0.3369	1.0683e-9	2.3652e-3	1.1230	<b>P16-3</b>	0.3438	1.3343e-9	0.0247	1.0737
<b>P8-5</b>	0.4186	1.6245e-9	0.6600	1.0914	<b>P16-5</b>	0.3213	0.0196	2.6855e-3	3.3604
<b>P8-6</b>	0.3433	0.0162	2.8202e-3	3.6840	<b>P16-6</b>	0.3305	0.0138	4.7856e-3	2.9722
<b>P8-11</b>	0.3376	0.0151	3.1379e-3	4.1880	<b>P16-7</b>	0.3469	0.0377	9.8600e-3	1.2917
<b>P8-12</b>	0.3490	0.0151	2.5744e-3	4.9699	<b>P16-8</b>	0.3452	0.0143	2.8903e-3	3.5908
<b>P9-1</b>					<b>P17-2</b>	0.6049	0.1014	10.5291	1.1626
<b>P9-2</b>					<b>P17-3</b>	0.3486	0.0100	1.7620e-3	4.8464
<b>P9-3</b>	0.3133	0.0264	2.9324e-3	3.3019	<b>P17-7</b>	0.3226	0.0226	1.6843e-3	3.9055
<b>P9-7</b>	0.3255	0.0174	2.4602e-3	4.3760	<b>P17-10</b>	0.3397	7.3557e-3	2.0015e-3	4.0325
<b>P9-9</b>	0.3410	0.0212	2.4799e-3	5.8324	<b>P18-1</b>	0.3467	0.0848	0.0276	1.1807
<b>P9-10</b>	0.3383	0.0136	3.4460e-3	3.0581	<b>P18-2</b>	0.3373	0.0104	1.8546e-3	4.1756
<b>P10-1</b>	0.3652	5.902e-10	4.5903e-3	1.1379	<b>P18-5</b>	0.3253	0.0359	1.6808e-3	3.6760
<b>P10-7</b>	0.3433	0.1105	1.1835e-4	1.2529	<b>P18-7</b>	0.3294	0.0430	4.6540e-3	1.4060
<b>P10-12</b>	0.3438	1.0623e-9	1.5964e-4	1.1026	<b>P18-8</b>	0.3485	3.8803e-3	2.4238e-3	5.3812
<b>P11-1</b>									

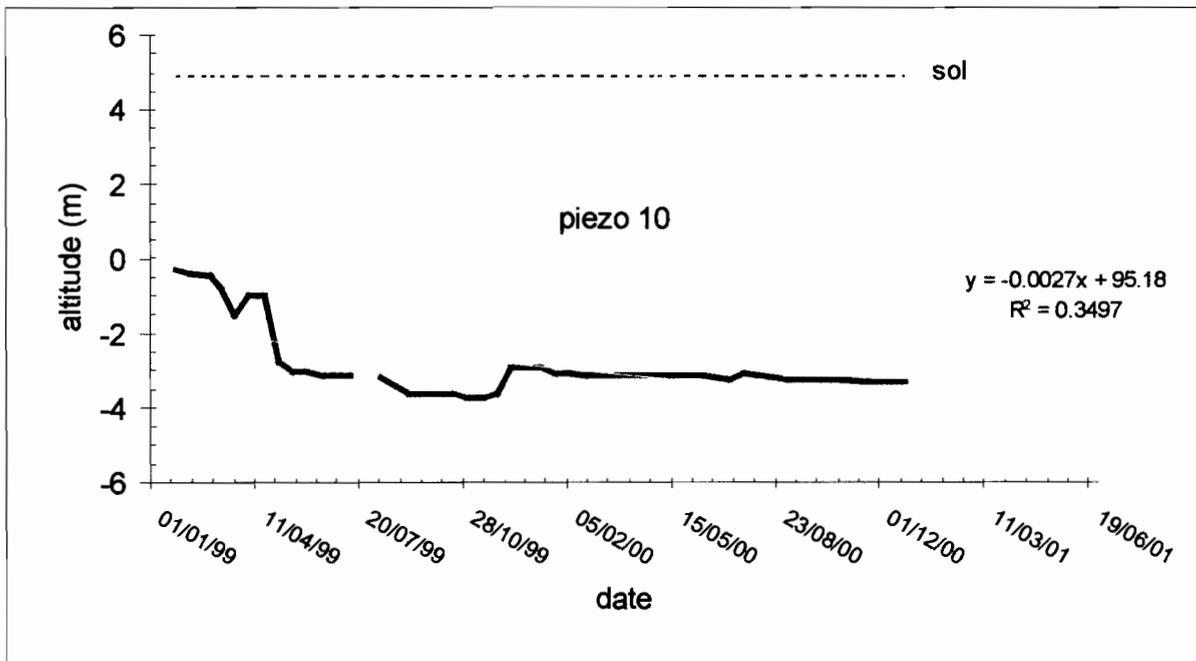
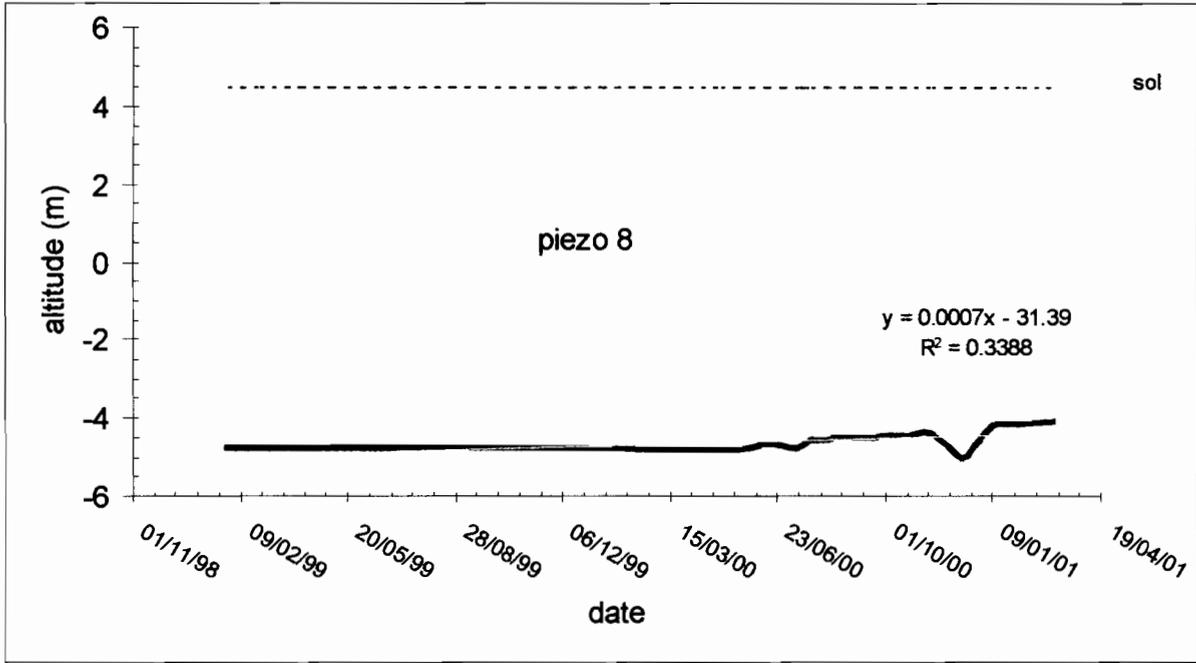
## **ANNEXE 3**

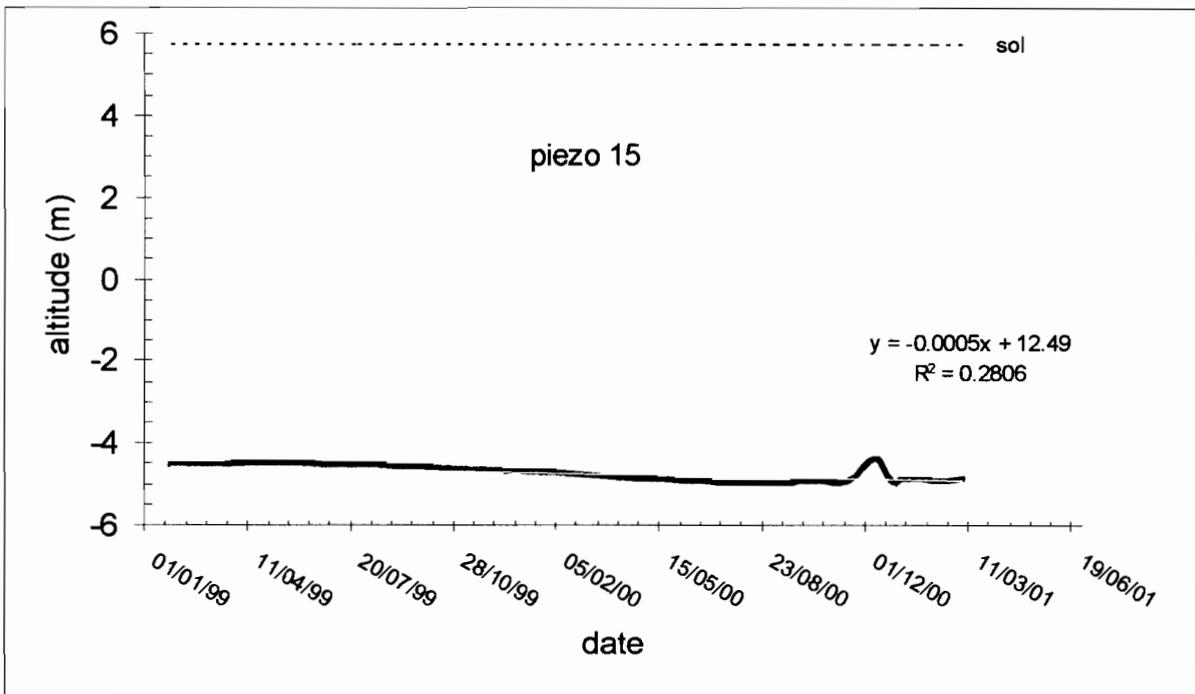
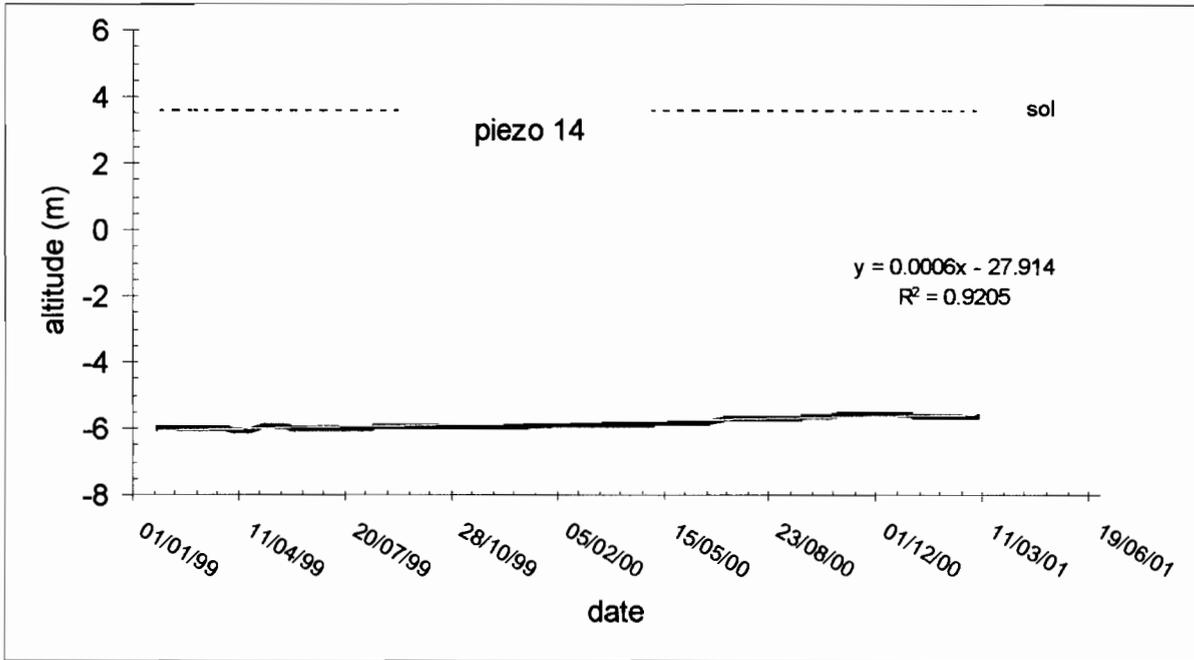
# **EVOLUTION DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE**





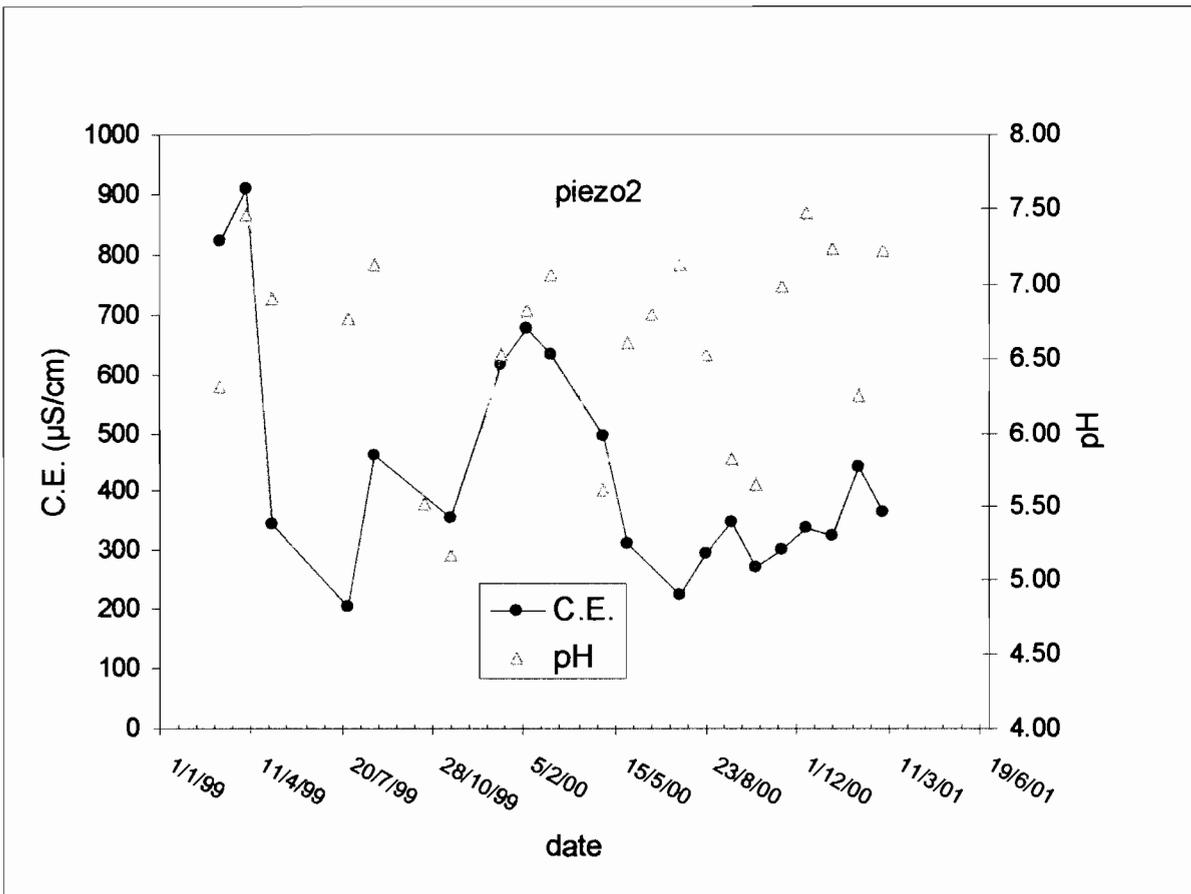
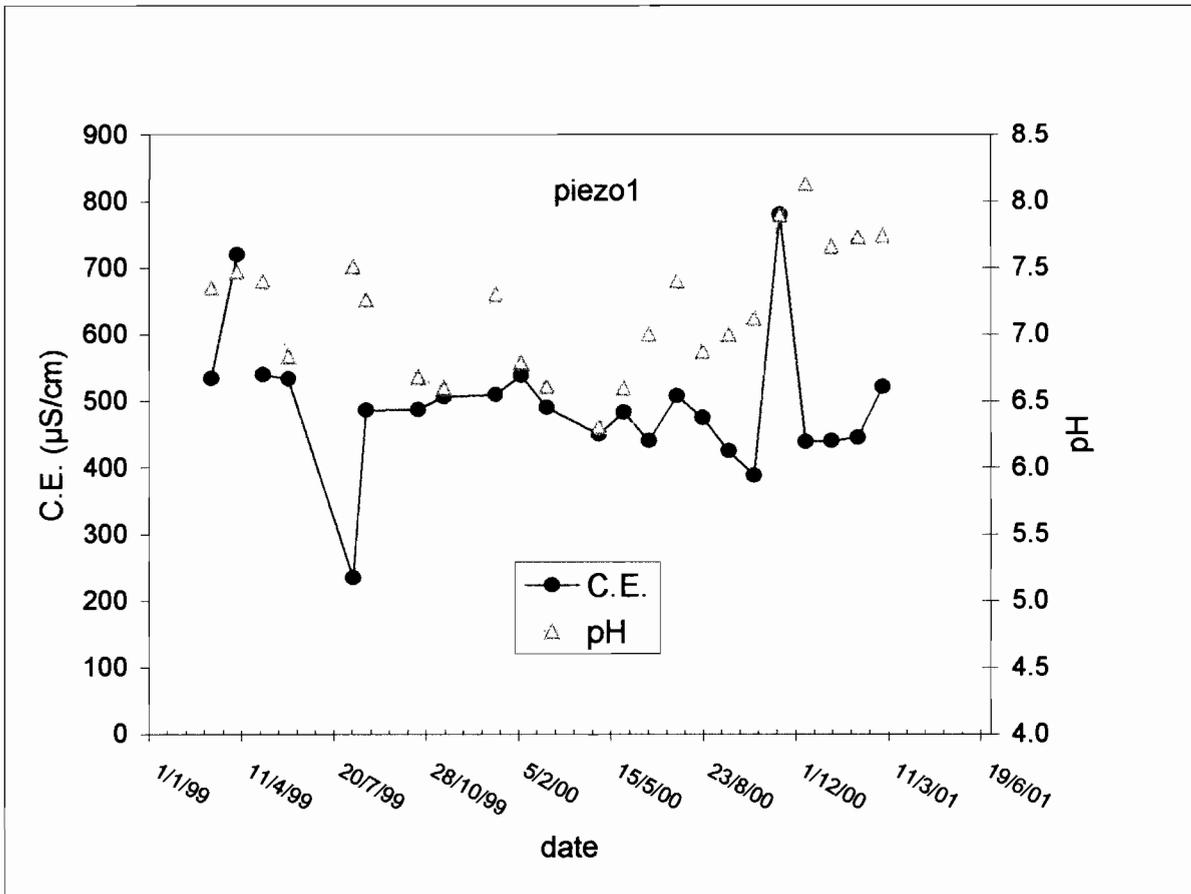


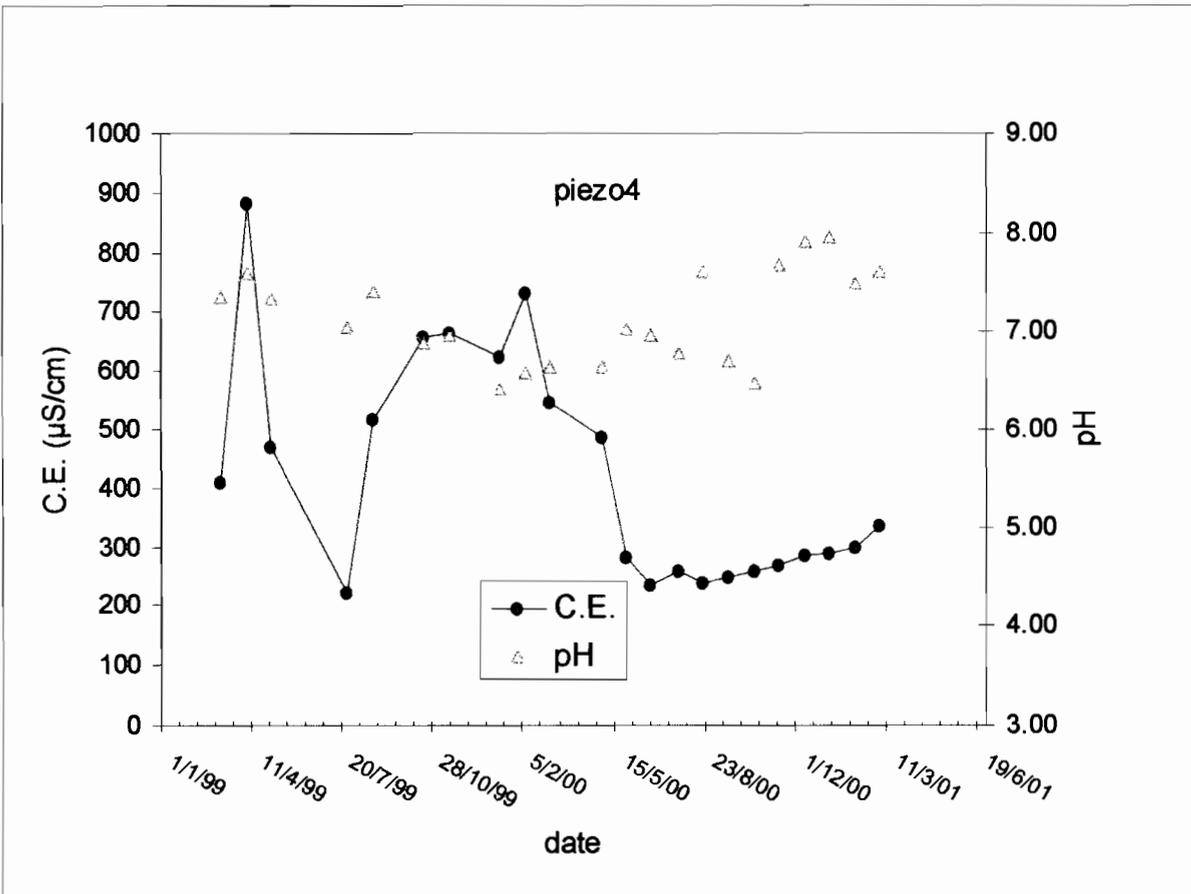
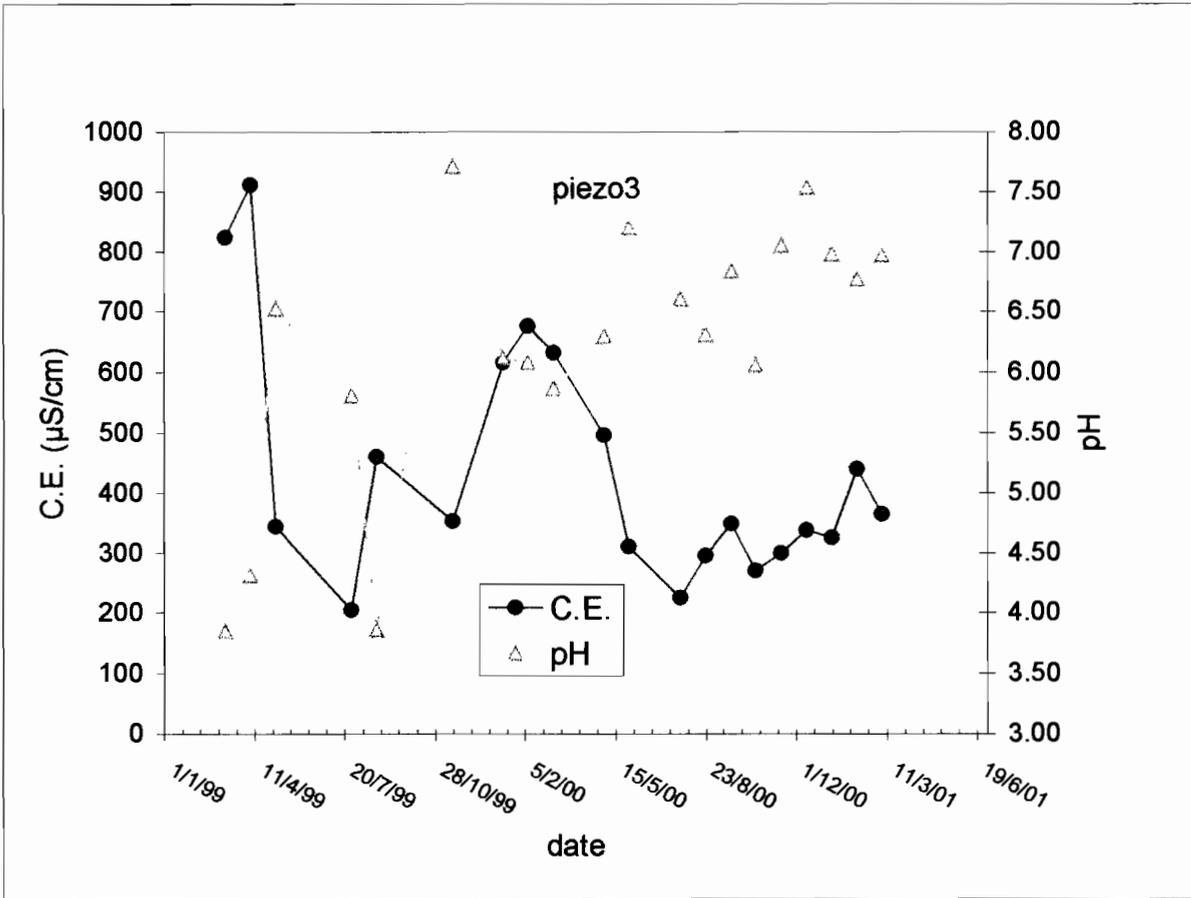


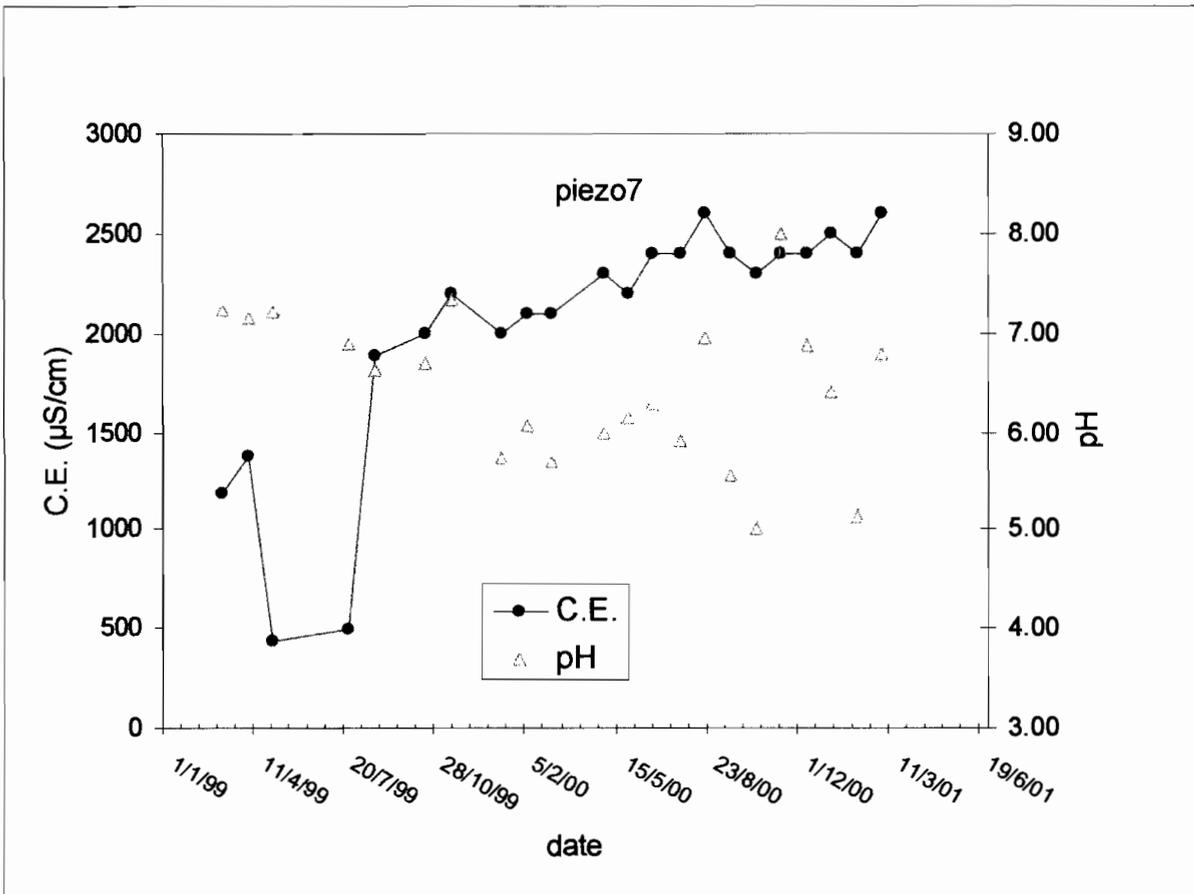
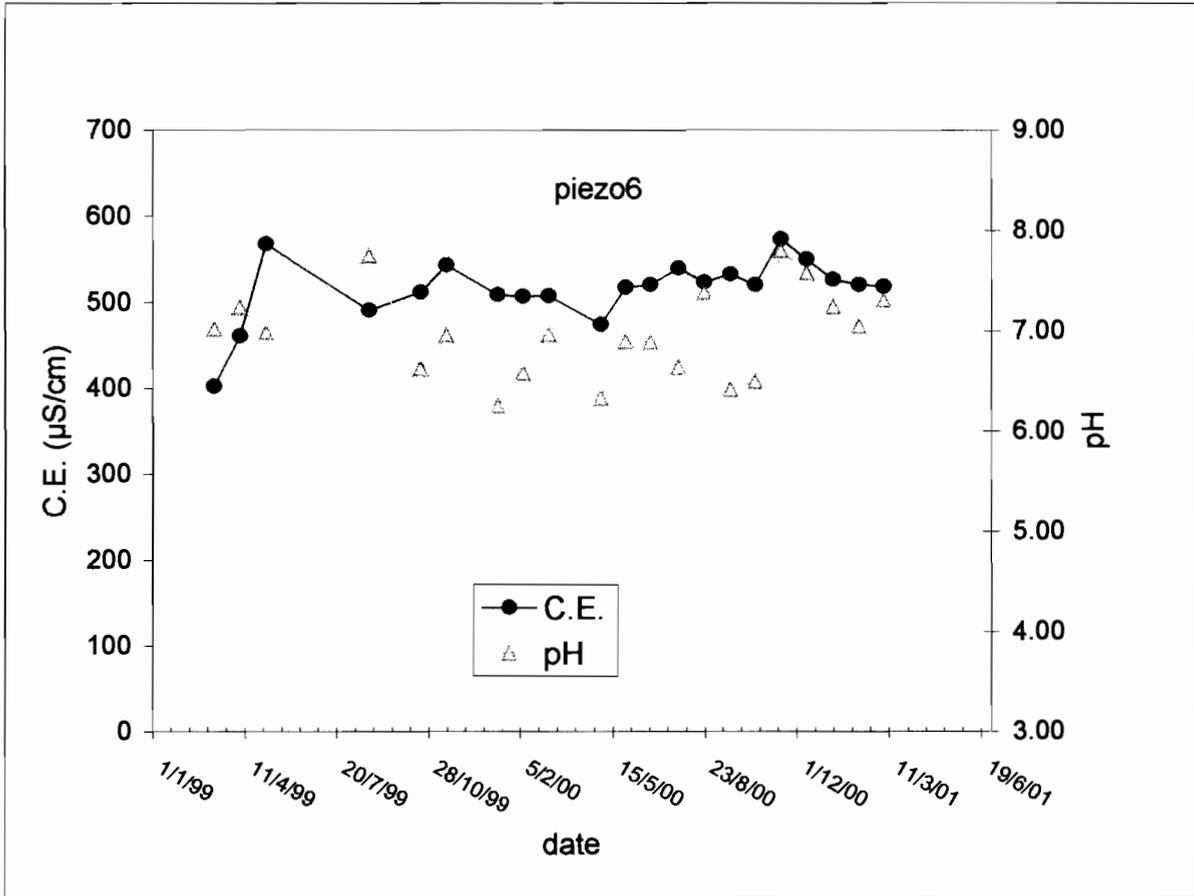


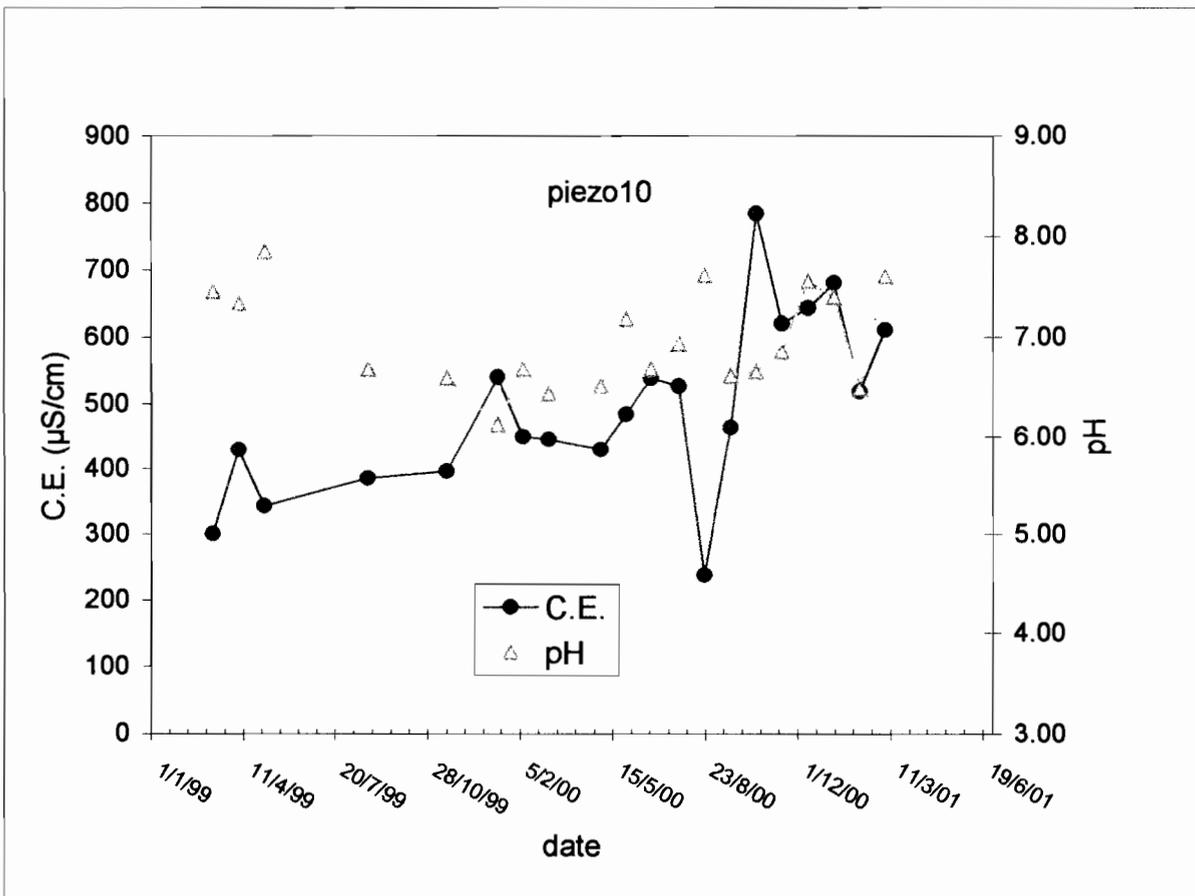
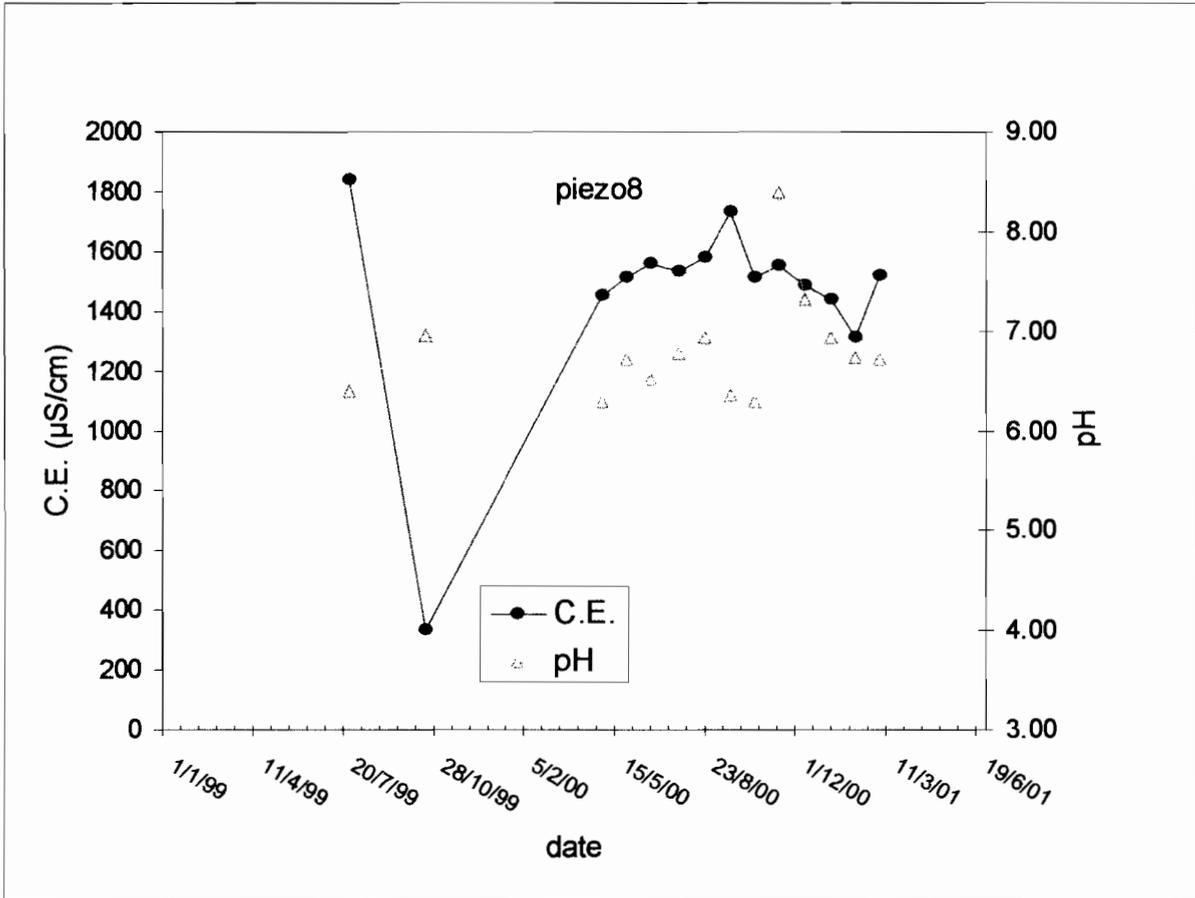
# **ANNEXE 4**

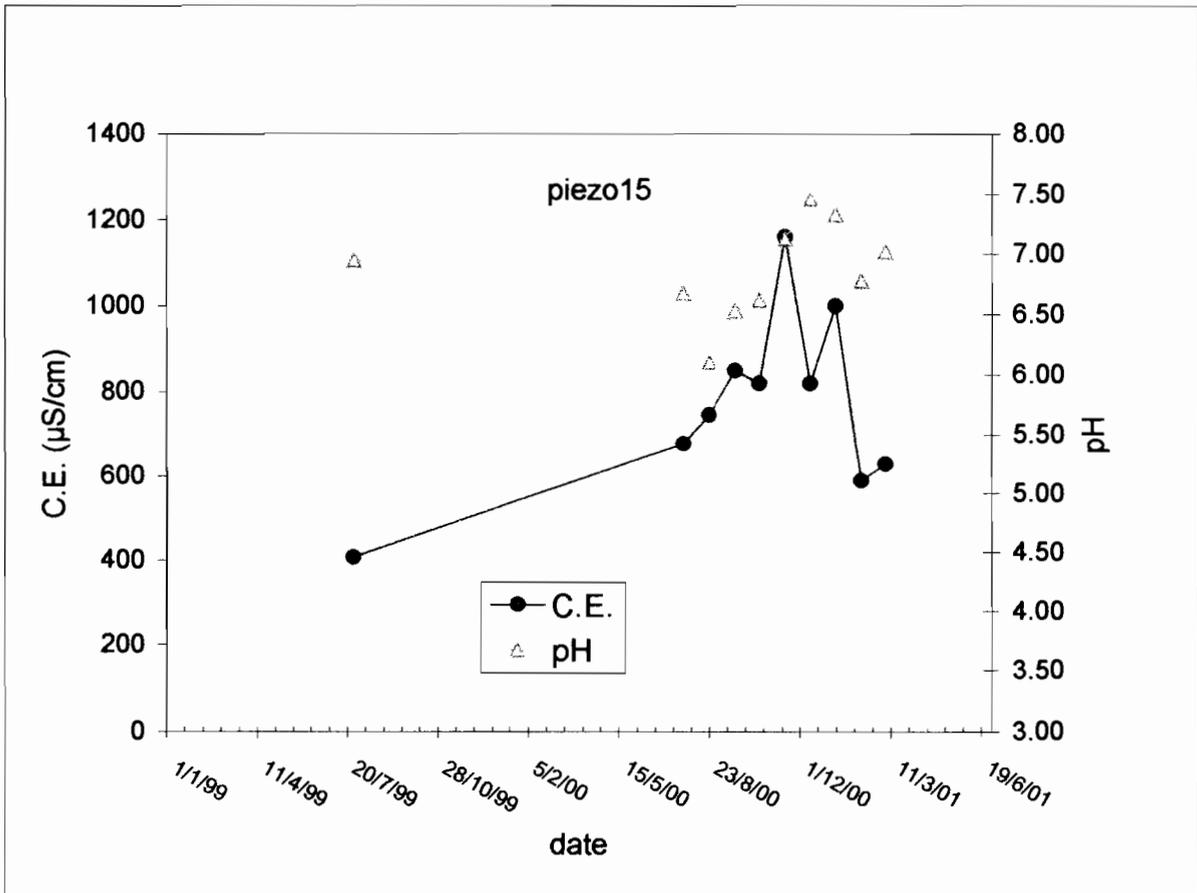
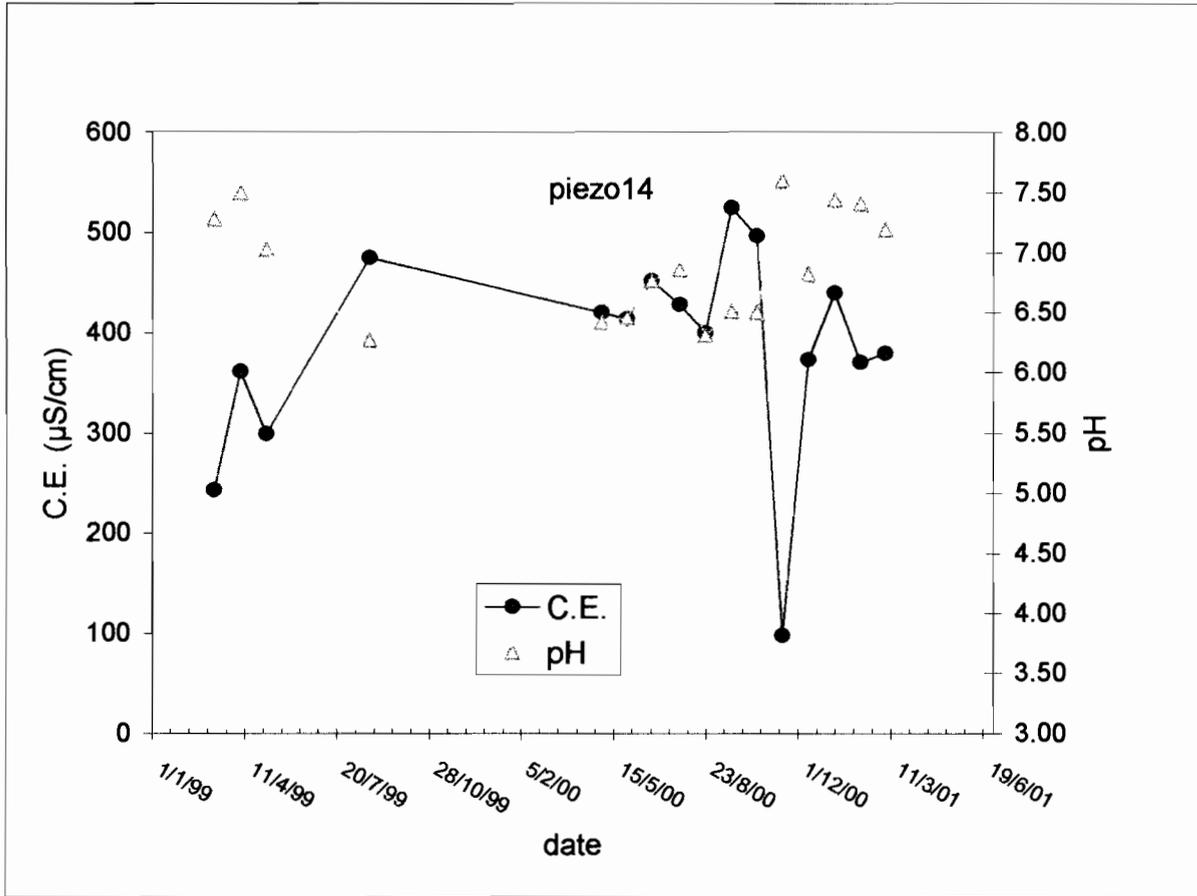
# **GEOCHIMIE**













## ANALYSES CHIMIQUES DE L'EAU DE LA NAPPE

n° piézo	date	pH	EC à 20°C mS/cm	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/l	CO <sub>3</sub> <sup>--</sup> meq/l	Cl <sup>-</sup> meq/l	SO <sub>4</sub> <sup>--</sup> meq/l	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> meq/l	HPO <sub>4</sub> <sup>--</sup> meq/l	K <sup>+</sup> meq/l	Ca <sup>++</sup> meq/l	Na <sup>+</sup> meq/l	Mg <sup>++</sup> meq/l	Al mg/l	SiO <sub>2</sub> mg/l	Fe mg/l	ARC meq/l	RCS meq/l
1	21/09/1999	7.5	0.34	3.00	0.00	0.41	0.15	0.00	0.00	0.06	2.33	0.45	0.92	0.50	33.10	1.00	0.87	-0.05
1	05/04/2000	7.9	0.31	2.90	0.00	0.41	0.19	0.02	0.00	0.07	1.98	0.56	0.86	0.50	30.20	0.05	0.89	0.03
1	02/05/2000	7.3	0.30	2.70	0.00	0.36	0.11	0.02	0.00	0.06	1.74	0.45	0.94	0.32	31.80	0.72	0.98	0.04
1	29/05/2000	6.8	0.33	3.10	0.00	0.31	0.08	0.06	0.00	0.05	2.17	0.50	0.91	0.07	32.50	3.30	1.07	0.16
2	21/09/1999	7.2	0.17	0.46	0.00	0.77	0.36	0.22	0.00	0.15	0.52	0.73	0.44	0.39	38.50	-	0.19	-0.25
2	07/03/2000	5.2	0.16	0.19	0.00	0.65	0.32	0.50	0.00	0.17	0.32	0.66	0.35	0.31	44.20	0.00	0.21	-0.14
2	05/04/2000	7.6	0.16	0.19	0.00	0.61	0.25	0.67	0.00	0.14	0.41	0.62	0.47	0.36	46.20	0.00	0.37	-0.10
2	02/05/2000	7.2	0.27	0.22	0.00	0.85	0.25	1.47	0.00	0.15	1.12	0.84	0.85	0.10	47.10	0.00	0.74	-0.11
2	29/05/2000	6.7	0.48	0.18	0.00	1.11	0.28	3.18	0.00	0.23	1.87	1.18	1.75	-	48.80	-	1.77	0.02
3	05/04/2000	6.9	0.38	0.22	0.00	1.15	0.88	1.61	0.00	0.13	1.37	1.49	1.07	0.46	46.40	0.02	0.66	-0.41
3	02/05/2000	6.5	0.36	0.25	0.00	1.19	0.76	1.32	0.00	0.12	1.42	1.37	1.02	0.28	42.90	0.10	0.56	-0.46
3	29/05/2000	7.7	0.20	1.30	0.00	0.41	0.16	0.30	0.00	0.16	0.89	0.79	0.55	0.19	27.70	0.00	0.93	0.38
4	21/09/1999	7.1	0.36	3.50	0.00	0.44	1.33	0.38	0.00	0.25	2.94	1.77	0.23	0.69	24.30	1.80	0.48	0.25
4	11/01/2000	6.9	0.44	1.00	0.00	0.25	3.65	0.05	0.00	0.12	1.98	1.78	1.25	0.27	29.40	0.19	-0.75	-2.00
4	05/04/2000	7.7	0.35	1.40	0.00	0.27	2.44	0.06	0.00	0.14	1.83	1.24	1.13	0.52	29.40	0.63	-0.20	-1.33
4	02/05/2000	6.9	0.34	1.40	0.00	0.24	2.33	0.03	0.00	0.09	1.82	1.12	1.23	0.32	30.80	0.81	-0.13	-1.36
4	29/05/2000	7.0	0.19	0.95	0.00	0.35	0.78	0.04	0.00	0.07	0.78	0.81	0.53	0.07	19.80	0.07	0.28	-0.25
6	21/09/1999	7.1	0.36	1.80	0.00	0.22	2.04	0.00	0.00	0.10	1.93	1.01	1.35	3.80	30.70	6.30	0.20	-1.15
6	05/04/2000	7.6	0.36	1.40	0.00	0.34	2.34	0.05	0.00	0.17	1.63	1.07	0.95	0.61	27.90	1.30	-0.49	-1.44
6	02/05/2000	6.8	0.34	1.40	0.00	0.23	2.28	0.05	0.00	0.09	1.83	1.12	1.23	1.50	28.40	2.10	-0.07	-1.30
6	29/05/2000	7.3	0.36	1.20	0.00	0.24	2.50	0.09	0.00	0.13	1.80	1.10	1.00	0.97	28.70	1.50	-0.51	-1.51

ARC : Alcalinité résiduelle calcite  
RSC : Residual sodium carbonate  
- : solution épuisée

## ANALYSES CHIMIQUES DE L'EAU DE LA NAPPE

n° piézo	date	pH	EC à 20°C mS/cm	HCO3-- meq/l	CO3-- meq/l	Cl- meq/l	SO4-- meq/l	NO3- meq/l	HPO4-- meq/l	K+ meq/l	Ca++ meq/l	Na+ meq/l	Mg++ meq/l	Al mg/l	SiO2 mg/l	Fe mg/l	ARC meq/l	RSC meq/l
7	21/09/1999	6.9	1.38	4.60	0.00	2.23	10.37	2.13	0.00	0.36	6.98	6.14	6.30	0.43	41.10	2.50	0.20	-6.10
7	05/04/2000	5.6	1.70	0.25	0.00	2.63	19.11	0.22	0.00	0.41	8.08	6.89	7.82	0.77	72.90	4.20	-6.62	-14.44
7	02/05/2000	5.6	1.76	0.25	0.00	2.48	19.63	0.34	0.00	0.39	8.40	7.30	8.15	0.58	68.10	14.40	-6.27	-14.42
7	29/05/2000	5.2	1.80	0.22	0.00	2.43	19.83	0.34	0.00	0.38	9.08	7.17	8.52	0.33	67.00	19.80	-6.19	-14.71
8	02/05/2000	6.9	1.08	3.00	0.00	0.18	11.39	0.06	0.00	0.30	8.63	3.35	3.39	0.44	35.10	0.94	-4.53	-7.92
8	29/05/2000	7.8	1.07	2.60	0.00	0.21	11.14	0.10	0.00	0.26	8.42	2.78	3.08	0.65	34.90	1.60	-5.23	-8.31
8	05/04/2000	8.1	1.11	3.20	0.00	0.26	11.36	0.12	0.00	0.42	8.58	4.02	3.51	0.57	31.80	0.32	-3.67	-7.18
10	21/09/1999	7.3	0.35	1.60	0.00	0.88	0.30	0.97	0.00	0.36	1.63	1.47	0.49	0.47	18.10	0.00	1.14	0.65
10	05/04/2000	8.0	0.31	1.70	0.00	0.81	0.19	0.59	0.00	0.50	1.23	1.60	0.49	0.51	15.30	0.00	1.59	1.10
10	02/05/2000	7.0	0.31	1.70	0.00	0.83	0.26	0.53	0.00	0.53	1.18	1.52	0.42	0.32	14.30	0.00	1.38	0.96
10	29/05/2000	8.1	0.32	2.20	0.00	0.90	0.29	0.40	0.00	0.54	1.14	1.59	0.42	0.09	13.50	0.00	1.36	0.94
14	05/04/2000	8.2	0.34	2.40	0.00	0.94	0.11	0.42	0.00	0.28	2.05	0.64	1.38	0.90	35.80	0.98	1.25	-0.13
14	02/05/2000	7.1	0.31	2.50	0.00	0.52	0.08	0.23	0.00	0.19	2.01	0.50	1.21	0.44	33.40	1.70	1.30	0.09
14	29/05/2000	7.2	0.29	2.90	0.00	0.48	0.05	0.08	0.00	0.17	1.69	0.67	1.22	0.30	33.20	1.20	1.53	0.31

ARC : Alcalinité résiduelle calcite  
RSC : Residual sodium carbonate  
- : solution épuisée