

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**

2e Rapport

Juillet 2002

**Claude HAMMECKER
Jean-Luc MAEGHT**



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 12 piézomètres pour le moment. Dans ce rapport qui vient compléter le précédent, l'accent est mis plus spécifiquement sur les aspects géochimiques de l'eau de nappes.

Par ailleurs un certain nombre de résultats présentés ici correspondent à des travaux réalisés au sein du laboratoire de pédologie de l'UR67 (Ariane) de l'IRD de Dakar, dans le cadre de mémoires de stage d'ingénieurs de l'ENSA de Thiès et de l'IST. Il s'agit des mémoires d'Alioune SEYDI, Matar NDAO et Calixe Kohfaye DIOUF. Enfin en annexe est présentée une publication correspondant aux études préliminaires avant implantation des piézomètres, menée au sein du laboratoire de pédologie par Laurent BARBIERO et collaborateurs, qui décrit la répartition de la salinité dans le paysage du secteur N'Gallenka.

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 Barbiche 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 (CaCO_3), il présente un excès de carbonates (CO_3^{2-}) par rapport au calcium (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.

La remontée de la nappe à proximité de la surface du sol a différentes conséquences néfastes pour l'agriculture. Elle bloque l'infiltration de l'eau d'irrigation limitant ainsi toute possibilité de drainage profond et donc favorise la concentration de l'eau dans la zone racinaire. Par ailleurs lorsque la nappe arrive à proximité de la surface du sol, s'amorce la remontée capillaire de celle-ci, et les solutés y étant contenus en grandes quantités viennent se concentrer dans les horizons superficiels et contribuer à la salinisation du milieu. Il est donc important de suivre et essayer de maintenir le niveau de la nappe à une profondeur suffisante pour éviter ces problèmes. Le niveau et la qualité de la nappe sous ces périmètres irrigués sont suivis depuis janvier 1999.

1. Caractéristiques physico-chimiques du sol

L'étude de la dynamique des transferts hydriques et salins dans les sols est souvent conditionnée par la connaissance d'un certain nombre de propriétés physiques de ces sols. En particulier, les transferts hydriques dans la nappe et la zone non saturée au-dessus, sont régis par les propriétés de rétention d'eau et de conductivité hydraulique. Ces caractéristiques ont été déterminées pour l'aquifère à l'aide des courbes granulométriques et des essais de slug test respectivement. Les résultats de ces analyses ont été présentés en détail dans le rapport précédent.

Nous présenterons ici les caractéristiques physico-chimiques du sol au niveau des horizons supérieurs du sol en un point particulier (piézomètre P5) où l'on a observé un affaissement du niveau du sol de l'ordre de 20 cm dans les parcelles après les premières mises en eau.

1.1. Description du sol

Ce site a été divisé en deux sous-sites distants de 15 m. Cette division permet de mieux voir la variabilité de la conductivité hydraulique en surface et en profondeur.

Les sols de ces sites ont une structure poudreuse et sont riches en limon avec une faible teneur en argile. Les deux sites présentent le même profil.

Tableau 1: description du profil de sol à proximité du piézomètre P5

0-10 cm	limoneux, faible cohésion, présence de taches d'oxydoréduction, couleur jaune ocre
10-20 cm	limoneux, faible cohésion, présence de taches d'oxydoréduction couleur jaune ocre
20-30 cm	limoneux, humide, cohésion faible, couleur jaune ocre
30-40 cm	hydromorphe, présence de petites concrétions, sable fin blanc, présence de traces de charbon, taches d'oxydoréduction
40-50 cm	hydromorphe, présence d'inclusion de charbon, la couleur s'éclaircie
50-60 cm	hydromorphe, présence d'inclusion de charbon
60-70 cm	hydromorphe, présence d'inclusion de charbon, couleur plus claire
70-80 cm	hydromorphe, présence de trace de sable
80-100 cm	sableux, couleur jaune, humide

Pour déterminer la conductivité hydraulique de ces sols nous avons effectué au niveau de chaque site des mesures en surface et en profondeur (20 cm) avec l'infiltromètre à membrane et avons ensuite prélevé des échantillons pour la méthode de Wind.

1.2. Les courbes de rétention

Les courbes de rétention ont été déterminées grâce à la méthode de Wind (1969) sur des cylindres de sol (diamètre 5cm, hauteur 5cm) prélevés en deux sites distants d'une quinzaine de mètres en surface et à 20 cm de profondeur. Cette technique consiste à déterminer simultanément la courbe de rétention et la conductivité hydraulique du sol à partir d'une expérience d'évaporation.

Sur les courbes expérimentales obtenues avec cette méthode on a ensuite ajusté les expressions analytiques de van Genuchten (1980) et déterminé les paramètres d'ajustement :

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

où θ_s et θ_r sont respectivement la teneur en eau à saturation et résiduelle, α , n et m étant des paramètres d'ajustement mathématique avec $m=1-1/n$

Les résultats reportés dans le tableau 2 montrent une certaine homogénéité entre les deux sites et entre la surface et le niveau plus.

Tableau 2 : paramètres d'ajustement pour les courbes de rétention de type van Genuchten (1980)

Site	Profondeur	Echantillons	P_0 (g cm ⁻³)	P_s (g cm ⁻³)	Paramètres mesurés (WIND)						
					θ_r (%)	θ_s (%)	α (cm ⁻¹)	n	Coef. corr		
I	0 - 10 cm	S ₁ E _{1S}	1.682	2.65	0	0.36895	0.05197	1.239338	0.967		
		S ₁ E _{2S}	1.691			0.3838	0.01009	1.34088	0.982		
		S ₁ E _{3S}	1.71			0.36167	0.01573	1.25544	0.979		
	20 - 30 cm	S ₁ E _{1P}	1.706			0.4015	0.01093	1.24924	0.987		
		S ₁ E _{2P}	1.779			0.36089	0.02293	1.16587	0.98		
		S ₁ E _{3P}	1.431			0.43249	0.01317	1.16514	0.98		
II	0 - 10 cm	S ₂ E _{1S}	1.558			2.65	0	0.35531	0.03386	1.30053	0.988
		S ₂ E _{2S}	1.695					0.37188	0.01487	1.23613	0.984
		S ₂ E _{3S}	1.621					0.39752	0.02154	1.29089	0.982
	20 - 30 cm	S ₂ E _{1P}	1.592	0.42155	0.01231			1.49804	0.994		
		S ₂ E _{2P}	1.673	0.41393	0.02379			1.65091	0.989		
		S ₂ E _{3P}	1.705	0.39822	0.018			1.23728	0.977		

1.3. La conductivité hydraulique

La conductivité hydraulique à saturation a été mesurée in-situ avec l'infiltromètre à membrane (Perroux and White, 1988) et l'évolution de la conductivité hydraulique avec la teneur en eau, a été mesurée au laboratoire sur des cylindres de sol avec la méthode de Wind (1969). Comme pour les courbes de rétention, on ajuste une relation théorique sur les résultats expérimentaux :

$$K = K_s S_e^{1/2} \left(1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right)^2 \quad (2)$$

où S_e est la saturation effective en eau :

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r},$$

$m = 1 - 1/n$ et K_s la conductivité hydraulique à saturation.

Les résultats présentés dans le tableau 3 montrent que la conductivité hydraulique à saturation de ce sol est de l'ordre du cm/j.

Tableau 3 : paramètres d'ajustement pour la conductivité hydraulique

Site	Numéros de mesure	n	θ_r	θ_s	Ks (cm/j)	Ks moyenne (cm/j)	CV(%)
Site 1 en surface	3	2.394	0.095	0.330	0.633	0.506	69
	4	4.421	0	0.327	0.326		
	5	1.736	0.195	0.299	0.271		
Site 2 en surface	2	2.194	0	0.294	0.552	0.758	70
	3	3.114	0.121	0.272	0.143		
	4	1.692	0	0.321	1.107		
Site 1 en profondeur	1	1.346	0	0.281	1.033	0.758	70
	2	1.448	0	0.298	0.579		
	3	1.62	0	0.397	0.601		
Site 2 en profondeur	1	1.481	0.136	0.306	0.904	0.758	70
	2	1.636	0	0.387	0.8		
	3	2.111	0.187	0.339	1.027		



Figure 1: infiltrimètre à membrane



Figure 2 : dispositif expérimental pour déterminer les caractéristiques hydrodynamiques du sol par la méthode de Wind



Figure 3: affaissement du sol à proximité du piézomètre P5

1.4. Les coefficients de dispersion des solutés dans les sols.

Lorsque l'on considère simplement les transferts d'eau dans le sol, le flux est une moyenne par unité de surface de sol, sans distinction entre les flux dans les pores de différentes tailles. Cependant l'étude des transferts de solutés ne permet pas cette approximation. Les solutés vont avoir des temps de résidence plus ou moins long selon qu'ils traversent les pores de différente taille à différentes vitesses. Cette différence entre le flux d'eau et le flux des solutés est quantifiée par le coefficient de convection-dispersion qui entre dans la formulation des transferts de solutés :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3)$$

où c est la concentration de la solution, t le temps, x la coordonnée spatiale, v la vitesse macroscopique du flux d'eau et D le coefficient de dispersion.

Celui-ci a été déterminé au laboratoire par des expériences de traçage sur de petits cylindres de sol, au cours desquelles on fait percoler successivement de l'eau, puis de l'eau chargée avec un traceur conservatif dont on va étudier la cinétique de restitution (courbe d'éluion) après avoir traversé l'échantillon de sol. Sur cette courbe d'éluion on essaye d'ajuster une expression analytique avec un logiciel spécialisé CXTFIT (Torride et al. 1995) afin de déterminer D . Il est donc indispensable de connaître ce paramètre si l'on veut pouvoir modéliser les transferts de solutés dans le sol.

Pour chaque niveau deux échantillons de sol ont été analysés et hormis pour le second essai à 20-30cm où le coefficient de corrélation entre la courbe expérimentale et théorique est bas, les ordres de grandeurs sont respectés pour chaque niveau.

Tableau 4 : Coefficients de dispersion

	D cm ² /h	r ²
0-10 cm	1.86	0.97
	3.86	0.96
20-30 cm	2.03	0.99
	0.9	0.77
40-50 cm	9.06	0.99
	6.78	0.98



Figure 4: dispositif de traçage et de collecte des fractions de solution pour établir la courbe d'élution

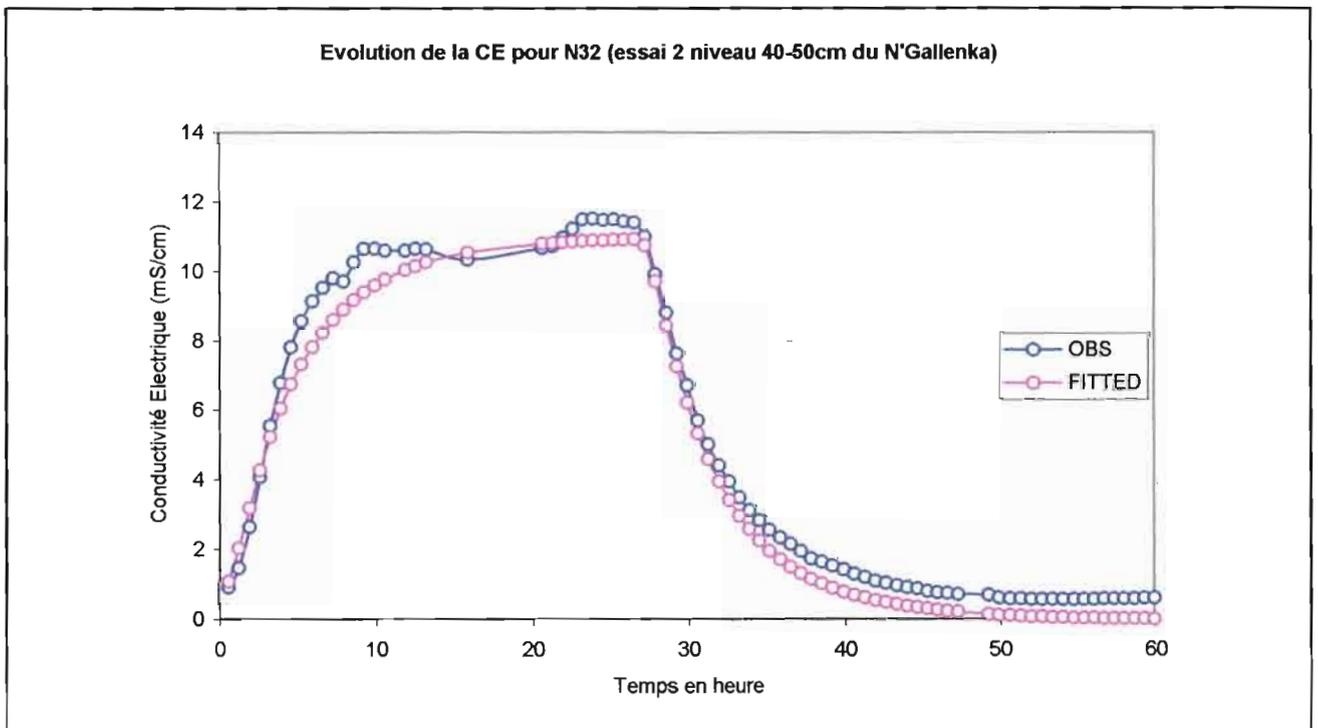


Figure 5 : exemple de courbe d'élution

2. 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. Il s'agit des piézomètres P5, P9, P11, P12, P16 et P17.

Les tendances décrivant l'évolution générale du niveau piézométrique présentées dans le rapport précédent semblent se confirmer au cours de cette année d'observation supplémentaire.

Le transect de piézomètres P1, P2, P3 installés dans les premiers périmètres aménagés, montre une élévation régulière du niveau de la nappe dans les trois piézomètres avec une pente allant du Nord vers le Sud de P3 vers P1. Les parcelles situées à proximité des piézomètres n'ont pas été cultivées au cours de l'année précédente et on ne distingue pas les variations saisonnières de la nappe liées à l'activité agricole comme c'était le cas précédemment. La vitesse moyenne de remontées de la nappe est de ce fait réduite par rapport à ce qui avait été déterminé précédemment. Par contre au niveau du piézomètre P3 on note clairement l'influence de la nappe du périmètre de Nianga et/ou celle du marigot Namarde qui vient alimenter la nappe sous le secteur N'Gallenka (figures 6 et 7).

Le transect Est-Ouest défini par l'alignement des piézomètres P4, P6, P7 et P8 (figures 8 et 9), 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. Hormis les variations saisonnières, on observe clairement une remontée générale de la nappe le long de ce transect. En particulier, au niveau du piézomètre P4 la nappe est montée très rapidement, probablement à cause de sa position centrale dans un méandre étroit du N'Gallenka. Cependant il apparaît que le marigot du N'Gallenka n'a pas ou du moins pas encore, d'incidence directe sur la recharge de la nappe. En effet le toit de la nappe le long de ce transect montre une nette pente vers l'Est, qui semble suggérer que la nappe soit plutôt alimentée par le marigot Namarde.

Seuls les deux piézomètres extrêmes sont actifs sur le transect P10-P13 (figure10) et montrent dans ce cas une pente du niveau piézométrique vers le Nord. Ici il apparaît donc que c'est le marigot du N'Gallenka qui contribue à l'alimentation de la nappe et non pas le Namarde, où l'aquifère de Nianga. Le niveau piézométrique dans le piézomètre P10 qui était proche de la surface au moment où a débuté ce suivi, baisse régulièrement depuis début 2000. Il faut noter que le comportement de ce piézomètre se distingue nettement de celui des autres.

Enfin sur le transect sud-est - nord-ouest P14-18 on retrouve le comportement habituel, à savoir une remontée régulière de la nappe et une pente vers le Sud-Est.

En faisant passer grossièrement une droite de régression à travers la courbe d'évolution piézométrique on peut déterminer une vitesse moyenne d'évolution de la nappe, indemne des variations saisonnières. Les résultats reportés dans le tableau 5 montrent un coefficient positif de manière générale, avec des vitesses d'infiltration variant de 0.3 à 2.5 mm/jour.

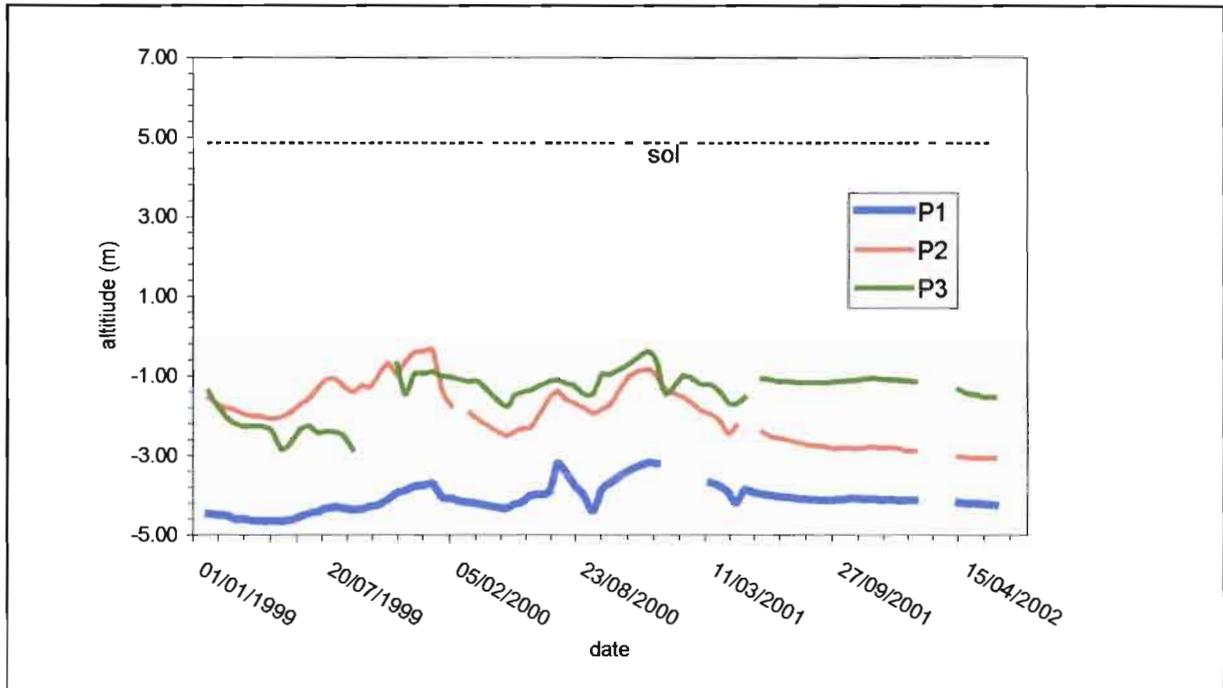


Figure 6 : évolution du niveau piézométrique

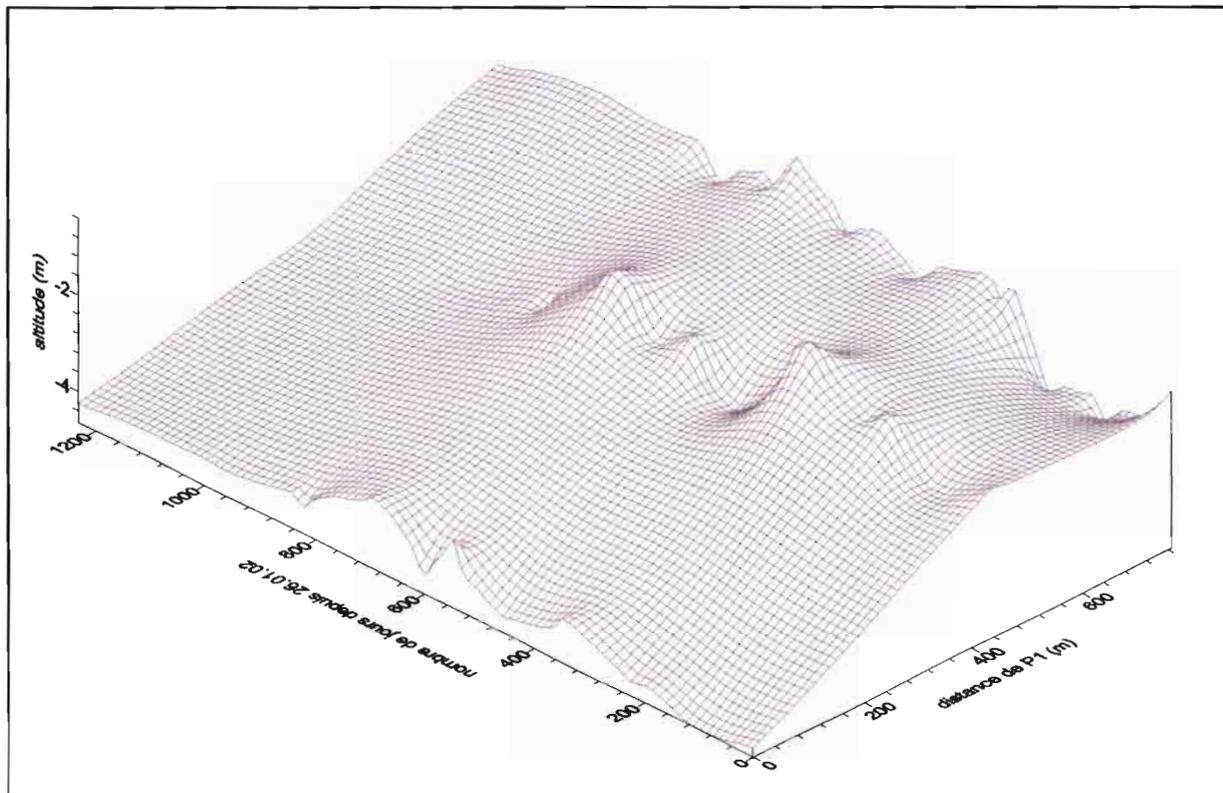


Figure 7 : représentation tridimensionnelle de l'évolution du niveau piézométrique au niveau du transect P1-P2-P3

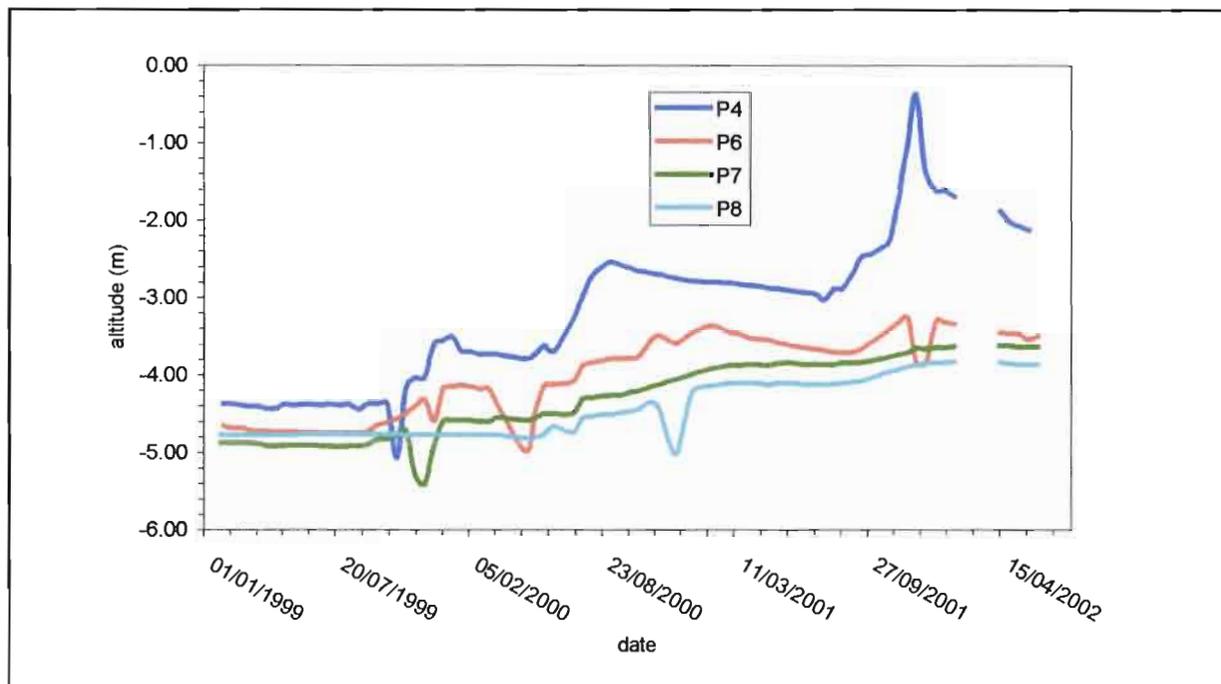


Figure 8 : évolution du niveau piézométrique au niveau du transect Est-Ouest (P4-P8)

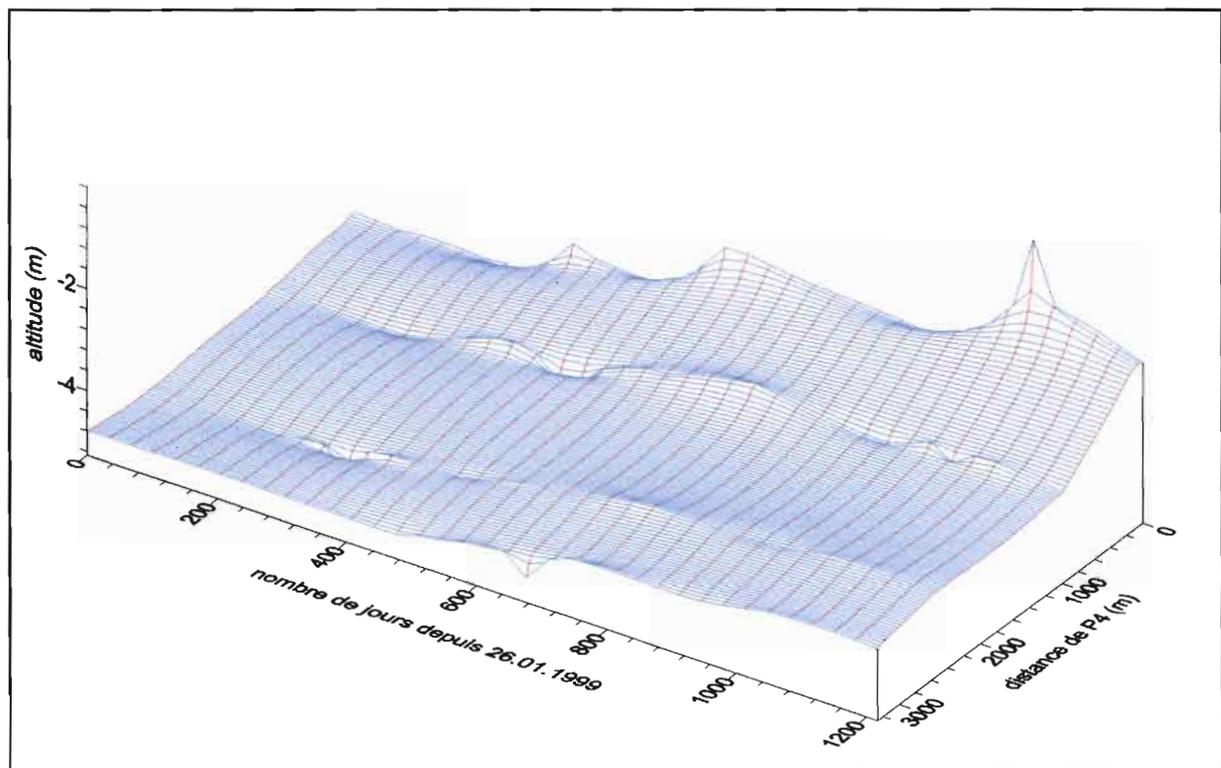


Figure 9 : représentation tridimensionnelle de l'évolution du niveau piézométrique au niveau du transect Est-Ouest (P4-P8)

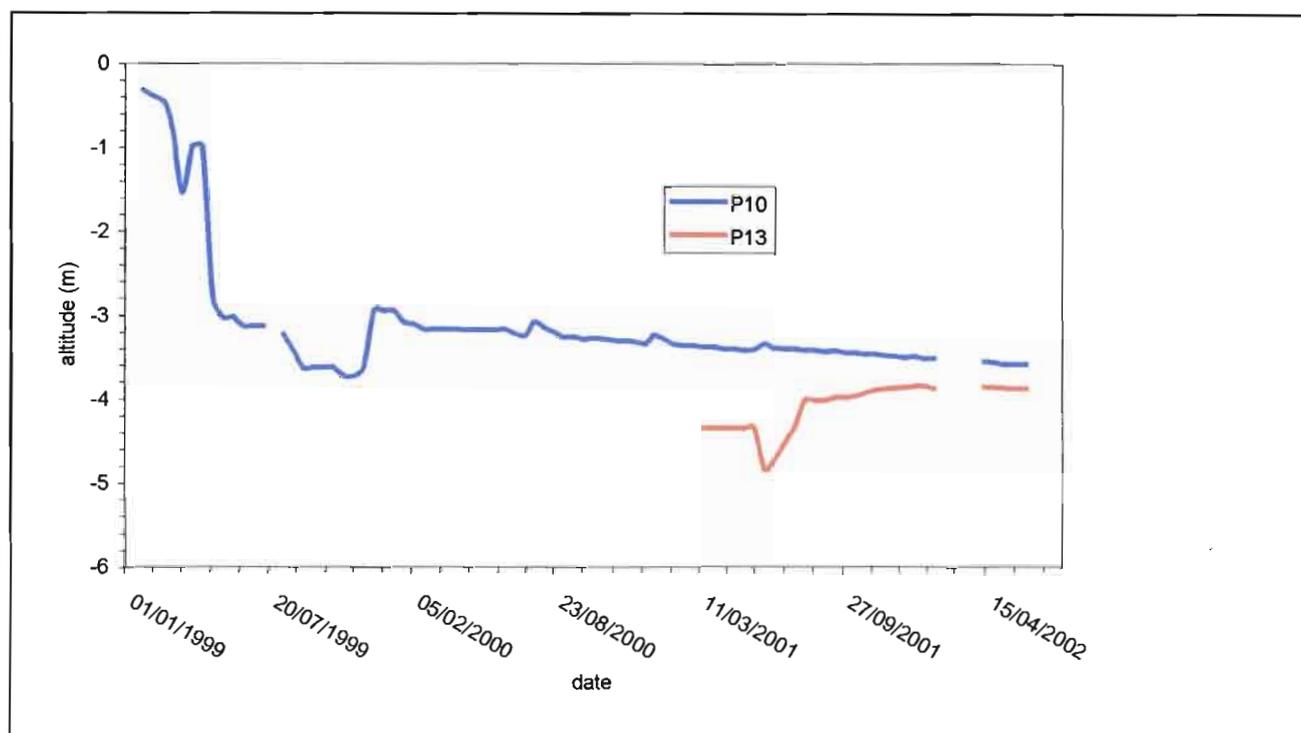


Figure 10 : évolution du niveau piézométrique au niveau du transect P10-P13

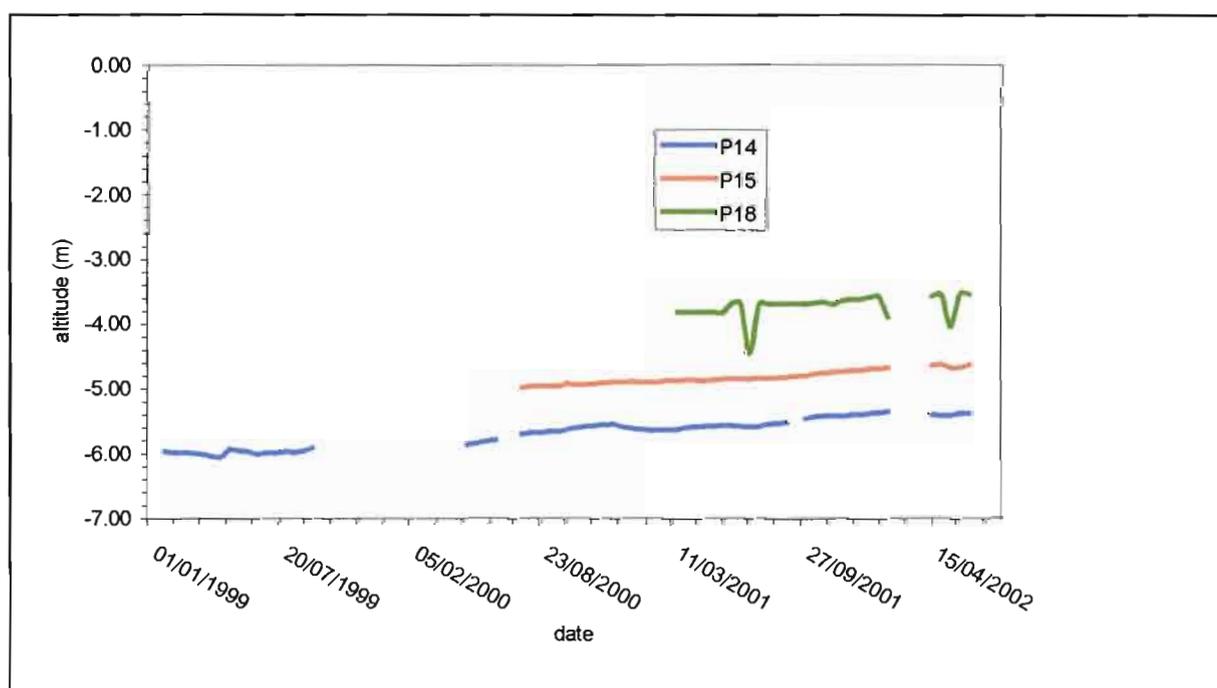


Figure 11 : évolution du niveau piézométrique au niveau du transect P14-P18

Afin d'essayer de rendre compte de l'évolution de la nappe à l'échelle du secteur N'Gallenka, nous avons établi des cartes du niveau piézométrique à différentes dates à partir des données dans chaque piézomètre actif. Les cartes ainsi obtenues ne sont qu'une illustration de la situation générale et ne peuvent pas être considérées quantitativement exactes car elles ne sont établies qu'à partir de 12 points (12 piézomètres actifs). Cependant il apparaît nettement que le niveau général de la nappe est remonté depuis janvier 1999, hormis dans la zone du piézomètre P10, où le niveau de la nappe était haut à cette date. De ce fait, et comme il était le seul piézomètre actif dans cette zone, son influence est très largement sur-représentée dans cette représentation (figure 13). Ainsi sur la carte des différences de situation on notera que les valeurs initiales de hauteurs piézométriques dans P10, génèrent une large zone dans laquelle on considère que le niveau piézométrique est descendu. Cependant malgré ce type de biais, ces représentation permettent de montrer c'est à l'Est du secteur N'Gallenka que la nappe est le plus montée. En considérant la pente de la nappe à partir des courbes de niveaux, on a établi une carte vectorielle de la situation en juin 2002, que l'on peut assimiler grossièrement à des lignes de flux (figure 12). Celles ci viennent confirmer qu'à part les événements saisonniers de pluie et d'irrigation, c'est essentiellement à partir du Nord Est que la nappe du secteur N'Gallenka est ré alimentée.

Tableau 5 : taux d'évolution moyen du niveau piézométrique et temps approximatif nécessaire pour atteindre la surface.

piézomètre	taux (m/j)	nombre de jours	nombre d'années
1	0.0003	30300	83
2	-1.40E-03		
3	0.0009	5798	16
4	0.0025	2584	7
6	0.0013	6096	17
7	0.0013	6031	17
8	0.001	8380	23
10	-0.0012		
13	0.0016	4766	13
14	0.0006	15082	41
15	0.0002	51830	142

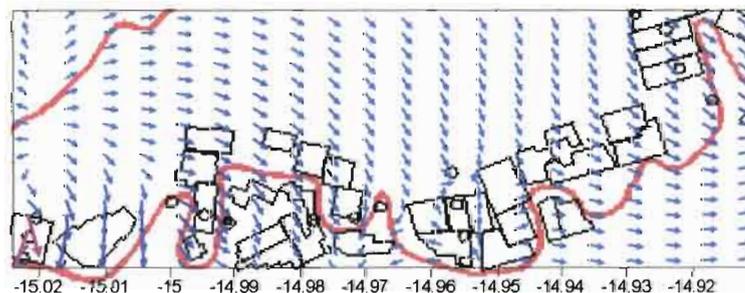


Figure 12 : carte vectorielle de la pente du niveau piézométrique le 11.06.2002

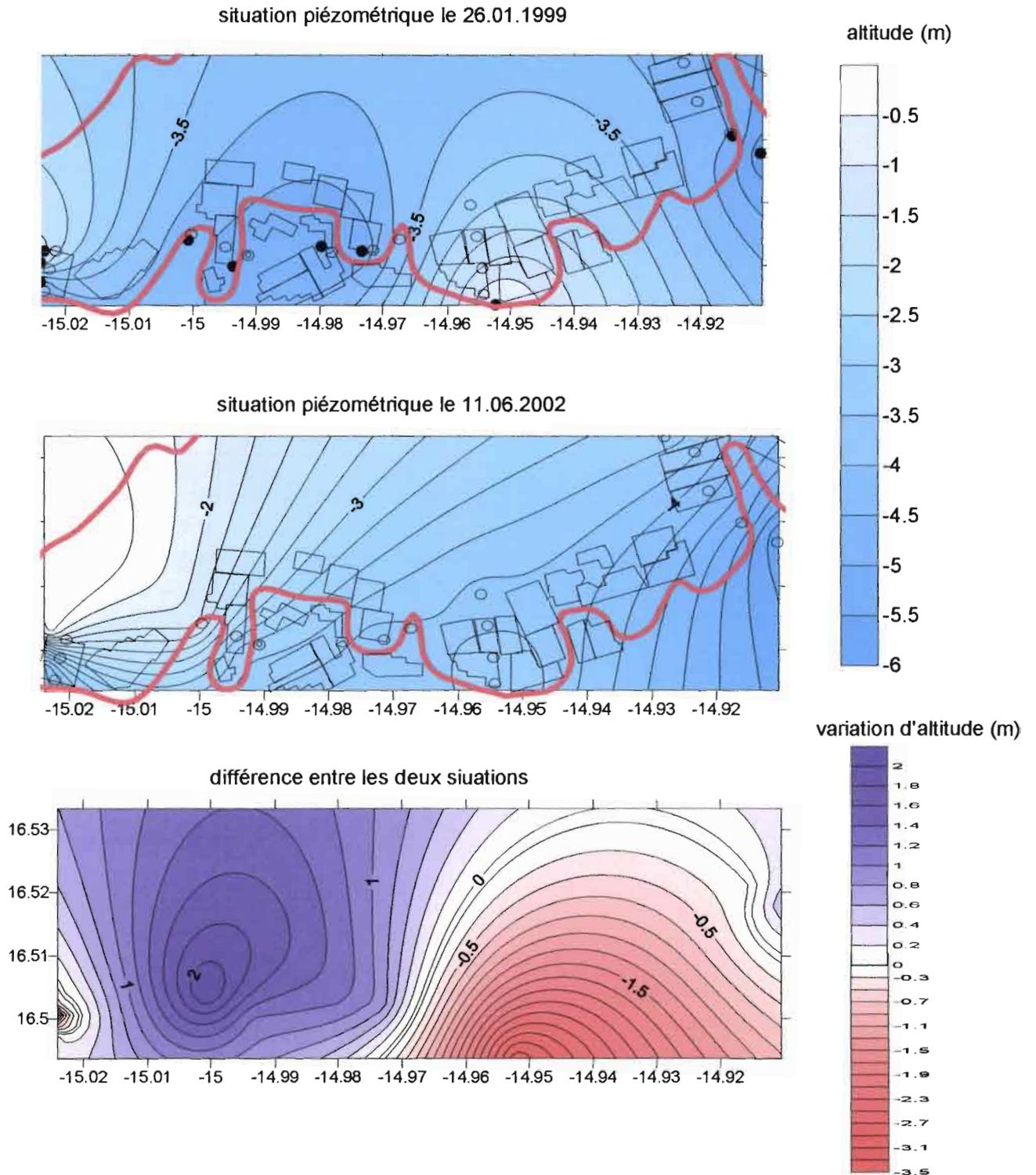


Figure 13 : cartes de situation du niveau piézométrique le 26.01.1999, le 11.06.2002 et différence entre les deux situations

3. Suivi géochimique.

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 d'avoir une idée rapide sur la salinité de la solution et de son alcalinité. Ces résultats présentés en annexe, montrent que le pH de l'eau de nappe varie dans chaque piézomètre, mais que de manière globale la valeur du pH ne montre pas d'évolution majeure à l'échelle de temps d'observation : il reste autour de la neutralité malgré des variations autour de cette valeur. La concentration de l'eau de la nappe quant à elle varie en fonction des niveaux de sols traversés. Ainsi lors de la remontée de la nappe, la concentration diminue dans les piézomètres du transect P1-P3 alors qu'elle est constante pour les piézomètres P6 et P4, et qu'elle augmente dans les autres. D'un point de vue quantitatif, les valeurs de conductivité électrique de ces solutions sont peu concentrées à intermédiaires, avec des valeurs maximales de 3.6mS/cm dans le piézomètre P13 et des valeurs comprises entre 1 et 3 mS/cm pour les eaux des piézomètres P7 et P8, les eaux dans les autres piézomètres sont toutes plus diluées et pourraient être utilisées pour l'irrigation.

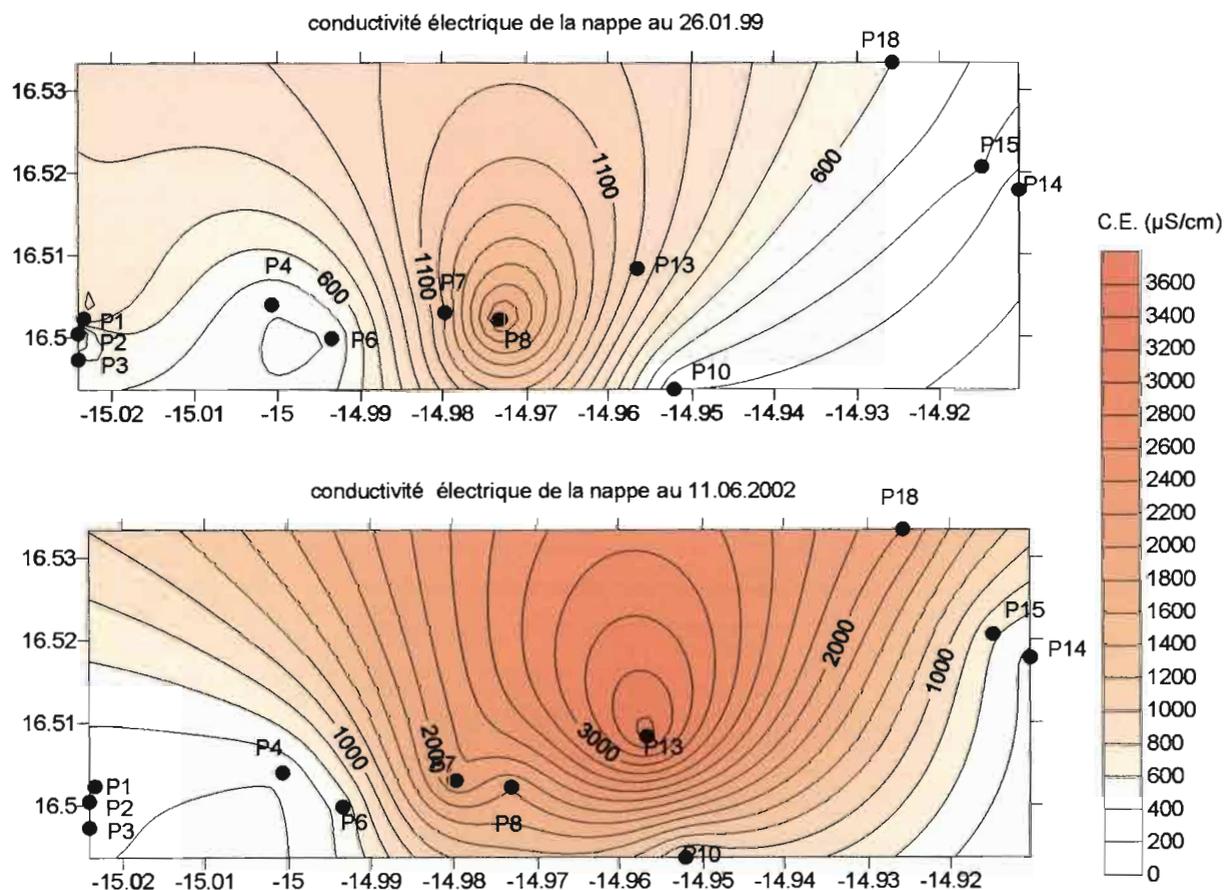


Figure 14 : situation de la salinité de l'eau de la nappe en janvier 1999 et juin 2002

La figure 14 montre l'évolution de la concentration de la nappe à deux dates différentes. Ces différences de situation ne sont pas liées à une évolution de l'eau de la nappe, mais bien parce qu'elle se charge par en minéraux plus ou moins solubles selon les niveaux pédologiques qu'elle traverse.

Lorsqu'on parle de la qualité d'une eau d'irrigation dans un contexte salin on évoque généralement deux indicateurs permettant de quantifier les risques liés à l'usage d'une eau d'irrigation, ainsi la conductivité électrique de la solution est l'indicateur de risque salin et le Sodium Adsorption Ratio (SAR) est l'indicateur permettant de quantifier le risque de sodisation. Cette grandeur est définie comme :

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

où les concentrations sont exprimées en milliéquivalents par litre.

En combinant ces deux indicateurs on peut placer les différentes eaux dans le digramme de Riverside qui permet de quantifier le risque que l'on fait encourir à un sol lorsqu'il est irrigué.

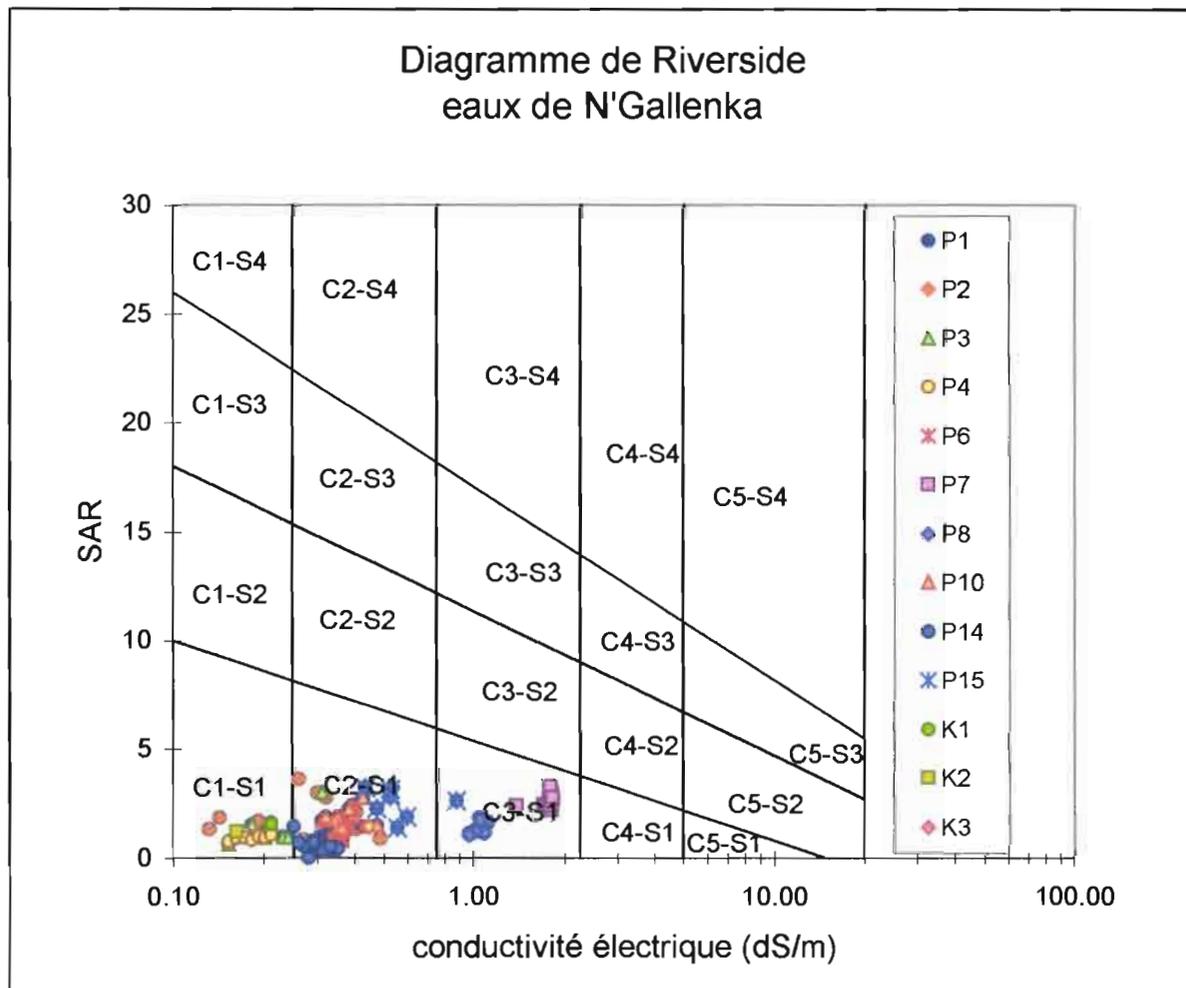


Figure 15 : représentation de la qualité de l'eau de la nappe dans les différents piézomètres dans le diagramme de Riverside.

La majorité des compositions d'eau se situe dans les domaines C1-S1 et C2-S1 qui représentent des domaines où les compositions d'eau présentent des risques de salinisation et sodisation faibles. Par contre les eaux des piézomètres P7 et P8 se distinguent par leur concentration plus élevée et légèrement plus sodique.

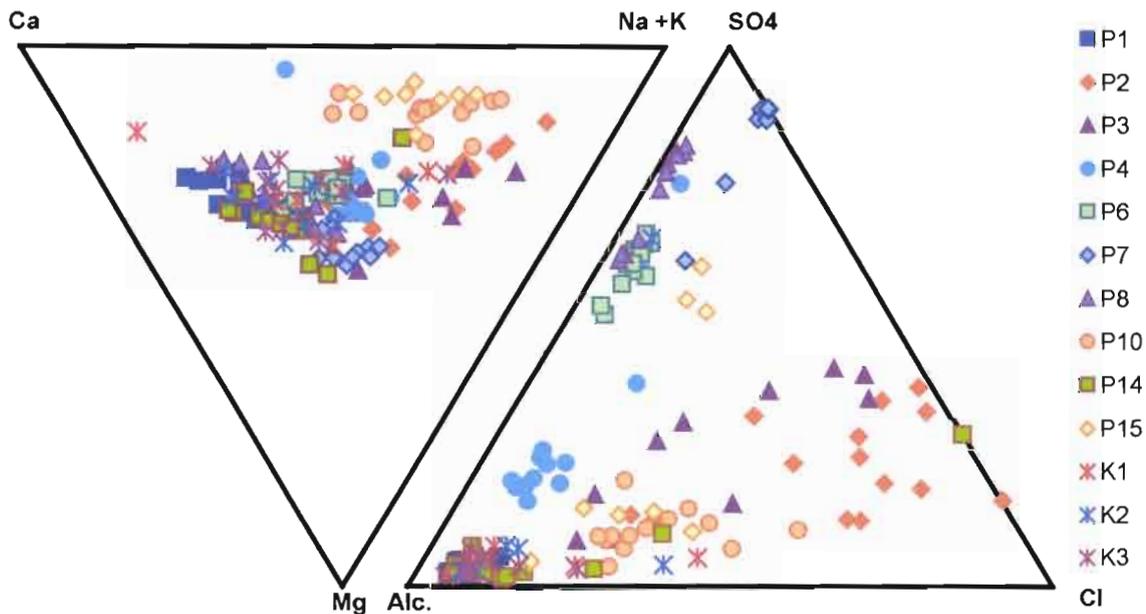


Figure 16 : représentation des compositions chimiques des eaux de nappe des différents piézomètres dans le diagramme ternaire de Piper

La figure 16 montre que les eaux collectées dans les différents piézomètres se distinguent par différents faciès suivant la position ou le temps. Ainsi du point de vue cationique toutes ces solutions sont essentiellement calci-sodique, avec une nette tendance sodique pour certains piézomètres comme P2, P10 et P15. En général tous les points pour un même piézomètre sont relativement regroupés, ce qui traduit une constance dans la composition cationique. Cependant dans le triangle des anions on voit une dispersion des points beaucoup plus importante. Ainsi l'eau dans le piézomètre P15 varie d'un faciès sulfaté à sulfaté-carbonaté, carbonaté. Cependant pour les autres piézomètres le faciès anionique de l'eau reste plus constant. En particulier les piézomètres P6, P7, P8 présentent un faciès nettement sulfaté, témoignant de la présence d'horizons gypseux dans la zone de leur implantation. Sur le transect P1-P3 on note également que dans chaque piézomètre le faciès géochimique est différent : le piézomètre P1 à proximité du marigot du N'Gallenka montre un faciès carbonaté alors que les piézomètres P2 et P3 ont des faciès bien plus chlorurés. Dans les autres piézomètres l'eau de nappe présente un faciès nettement carbonaté. Les eaux d'irrigation sont prélevées en 3 points le long du marigot :

- K1 : en face du transect P1-P3
- K2 : en face du piézomètre P10
- K3 : en face du piézomètre P15

Dans les trois sites le faciès chimique est carbonaté avec un faciès cationique intermédiaire.

Il est également important de suivre l'alcalinité résiduelle calcite (ARC) qui est un indicateur de l'évolution de la qualité de la solution lorsqu'elle se concentre. Elle est définie comme la différence entre l'alcalinité et la teneur en Calcium :

$ARC = Alc - Ca$, où les deux sont exprimés en milliéquivalents par litre. Cet indicateur indique l'évolution de la solution lorsque la calcite précipite car c'est généralement le premier minéral à se former, car c'est un minéral peu soluble est donc les constituants sont souvent présents dans les solutions naturelles :



Ainsi

- si $ARC = 0$ la proportion entre l'alcalinité et le calcium reste constante même après cristallisation de calcite et le pH de la solution va rester à des valeurs autour 8.5.
- Si $ARC < 0$ la solution va s'appauvrir en alcalinité (bicarbonates et carbonates) lorsque la solution atteint la saturation avec la calcite et le pH va alors chuter vers la neutralité et la solution s'enrichir relativement en Ca et donc ne pas présenter de danger par rapport à un problème de sodisation.
- si $ARC > 0$ la solution va s'enrichir en alcalinité après la précipitation de la calcite, le pH va augmenter à des valeurs supérieures à 8.5 par conséquent s'appauvrir fortement en Calcium et donc s'enrichir relativement en sodium, qui lui présente et donc augmenter le risque de sodisation.

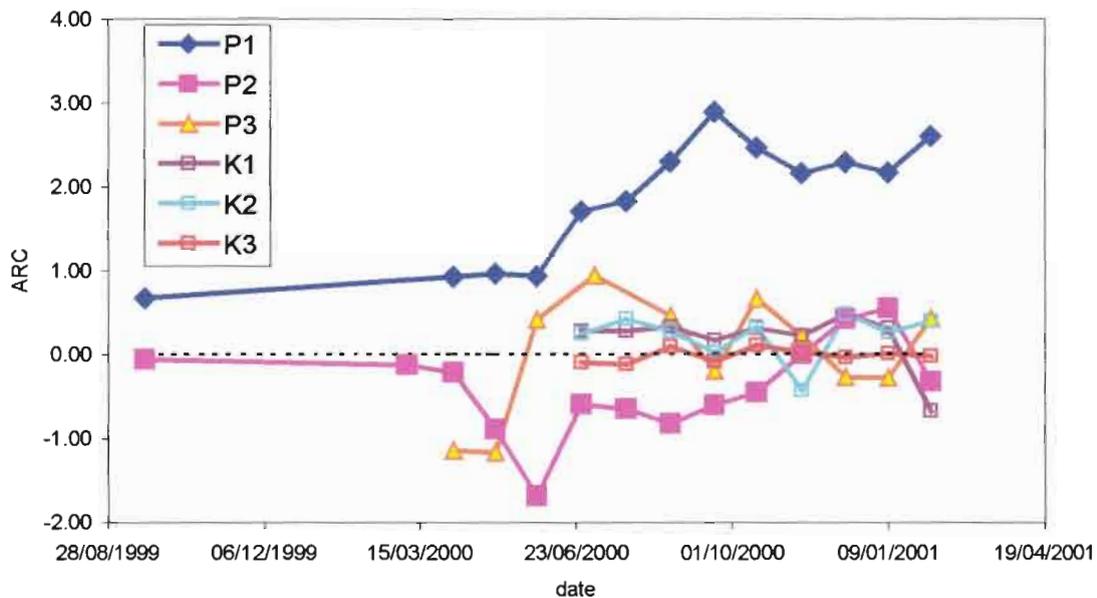


Figure 17 : évolution de l'alcalinité résiduelle calcite pour l'eau de nappe du transect P1-P3, et de l'eau de surface K1, K2, K3

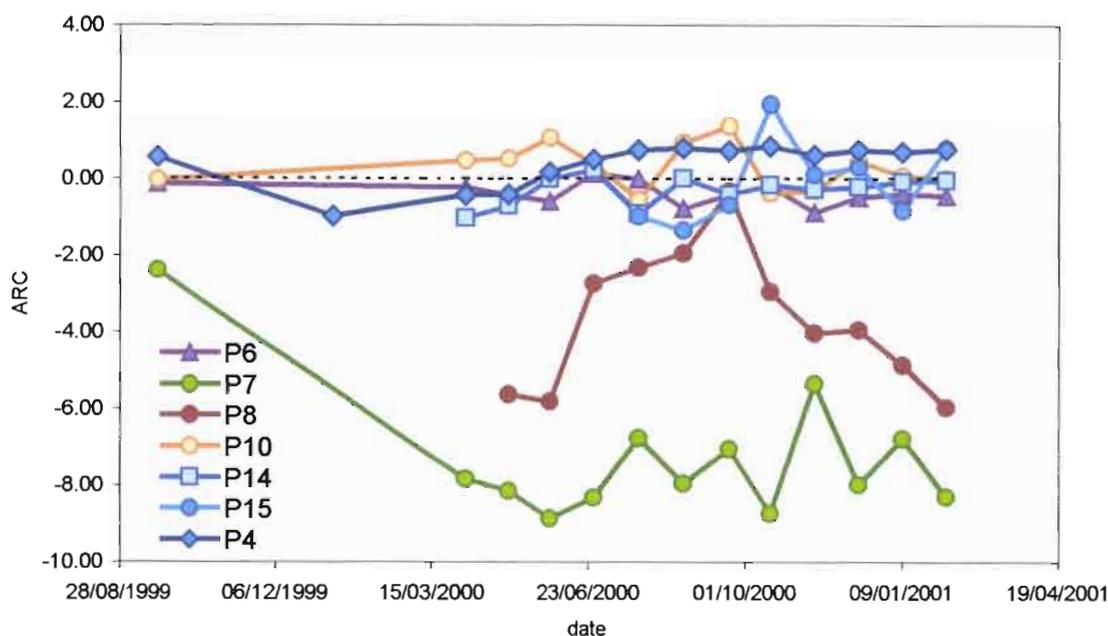


Figure 18 : évolution de l'alcalinité résiduelle calcite, de l'eau de nappe dans les transects P4-P8 , P14-P15 et dans le piézomètre P10

Sur le transect P1-P3 (figure 17), l'eau dans le piézomètre P1 présente toujours une ARC positive et qui semble augmenter avec le temps. On distingue clairement ici l'influence de l'eau d'irrigation qui présente un faciès carbonaté. Par contre pour le piézomètre P2, l'ARC est au contraire presque systématiquement inférieure à 0, mais semble néanmoins augmenter. L'eau de la nappe à ce niveau présente une composition initiale liée à la nature du sol (apparemment plus chloruré) qui semble finalement prendre le faciès de l'eau d'irrigation. Finalement le piézomètre P3 présente un comportement intermédiaire, qui est cependant globalement marqué par une ARC positive. Finalement les eaux d'irrigation prélevées dans les différents points sur le N'Gallenka, montre eux une ARC toujours positive, moins variable, mais également avec des valeurs faibles (proche de 0).

Pour les autres piézomètres (figure 18) l'eau dans les piézomètres P4 et P10 présente quasi systématiquement une ARC positive. Les deux, par leur position sont apparemment fortement influencés par la qualité de l'eau du marigot.

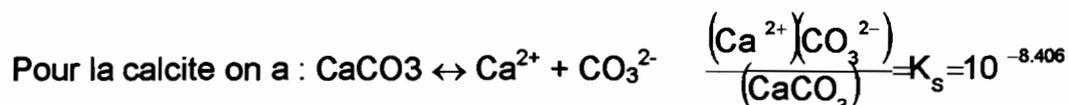
Les piézomètres P6, P7, P8 quant à eux ont toujours une ARC négative, avec des valeurs d'autant plus négatives que l'on se dirige vers l'Est (P6 → P8). Ceci indique donc une forte influence du sol sur la qualité de l'eau. Comme on a pu le voir dans le triangle de Piper (figure 16), la solution est marquée par la présence de dépôts sulfatés, probablement d'origine marine (anciens dépôts de mangrove, riches en gypse).

Les piézomètres P14 et P15 ont une ARC variable, mais qui a tendance à augmenter. Pour le piézomètre P14 elle est systématiquement négative, alors que dans P15 elle présente plus souvent des valeurs positives. On peut éventuellement attribuer ceci à la distance du Marigot car tous deux étant en zone non cultivée, P15 est plus proche du cours d'eau que P14 et en subit l'influence plus directement.

Afin de prévoir la réaction des eaux de nappe et d'irrigation avec la phase solide nous avons testé l'équilibre thermodynamique de ces solutions avec différents minéraux couramment rencontrés. Ainsi nous avons utilisé PHREEQC (Pankhurst et Appelo, 1999) qui est un logiciel géochimique classique permettant à partir d'analyse de solution standard de :

- faire la spéciation pour chaque élément et distinguer la fraction purement ionique des autres espèces aqueuses refermant cet ion. Par exemple dans une analyse, le Ca donné par le laboratoire correspond à Ca^{2+} mais également à CaCO_3^0 , CaSO_4^0 , CaHCO_3^+ , CaOH^+
- calculer les activités ioniques de différentes espèces en solution
- tester l'équilibre par rapport à un certain nombre de minéraux.
- de simuler des concentrations, dilutions et mélanges de solutions
- etc..

L'équilibre entre une solution et un minéral est décrit par une équation de dissociation et une constante thermodynamique K_s représentant le produit de solubilité.



Les valeurs entre parenthèses représentant l'activité ionique de l'espèce et celle de la phase minérale au dénominateur étant généralement égale à l'unité.

On calcule ainsi pour les différentes solutions le produit ionique K : $K = (\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})$

que l'on compare à K_s pour déterminer si une solution est à l'équilibre, sur ou sous saturée par rapport à un minéral.

Les équilibres des solutions des piézomètres et du marigot ont été testés avec les minéraux suivants :

Calcite :	CaCO_3	$\log K_s = -8.406$
Gypse :	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\log K_s = -4.581$
Thénardite :	Na_2SO_4	$\log K_s = -0.288$
Mirabilite :	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	$\log K_s = -1.228$
Sépiolite :	$\text{Mg}_2\text{Si}_3\text{O}_7 \cdot 5\text{OH} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$\log K_s = 31$
Kieserite :	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\log K_s = -0.123$
Hexahydrate :	$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$\log K_s = -1.635$
Epsomite :	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	$\log K_s = -1.881$

Les résultats de cette étude sont reportés dans des diagrammes d'équilibre, où les droites d'équilibre délimitent des domaines de sous et de sur saturation par rapport aux minéraux précités.

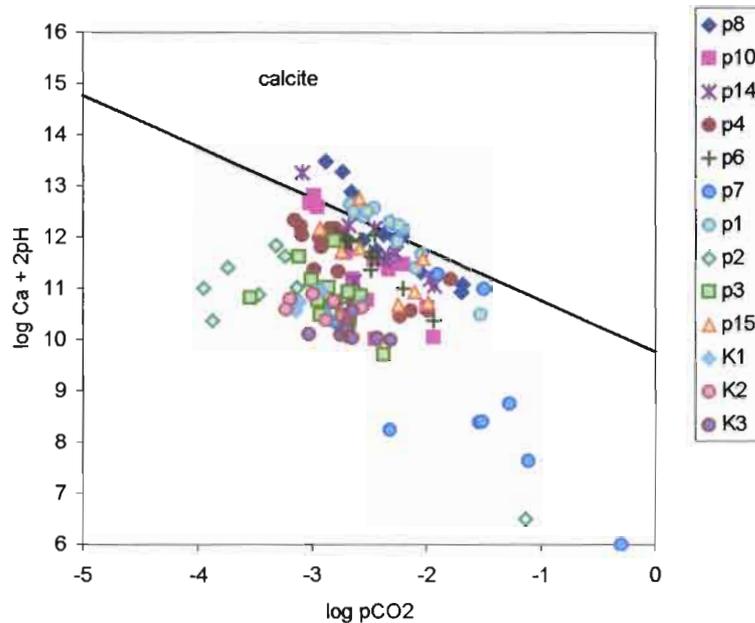


Figure 17 : diagramme d'équilibre des solutions par rapport à la calcite.

Les solutions pour les piézomètres P1, P8 et partiellement pour P10, P14 et P15 sont sursaturées par rapport à la calcite (figure 17) ce qui signifie que ce minéral peut potentiellement cristalliser dans ces solutions. Les piézomètres P2 et P3 plus éloignés du marigot présentent des solutions sous-saturées par rapport à la calcite. Cependant les eaux d'irrigation prélevées dans les 3 points sur le Marigot sont également sous-saturées par rapport à la calcite. Il existe donc probablement des sols avec des dépôts carbonatés à proximité de l'emplacement du piézomètre P1. Les eaux du piézomètre P8, bien qu'ayant un faciès plutôt sulfaté, sont plus concentrées et renferment probablement suffisamment de calcium et carbonates pour précipiter de la calcite. Il en est de même pour certains prélèvements de solutions du piézomètre P7 qui sont proches de la saturation avec la calcite, bien qu'ayant un faciès sulfaté, mais les eaux de ce piézomètre présente également les points les plus éloignés de la saturation, sans doute les points les plus dilués. De manière générale toutes les solutions que ne sont pas à l'équilibre avec la calcite le deviendront en cas de concentration.

On voit sur la figure 18, qu'aucune solution n'est à l'équilibre avec le gypse. Cependant ce sont les eaux des piézomètres P7 et P8 qui sont les plus proches de la saturation, qui comme on le voyait sur le diagramme de Piper (figure 16) sont les plus sulfatées. Les eaux du marigot K1, K2, K3 sont les plus éloignées de la saturation avec le gypse, car en effet elles ne contiennent que peu de sulfates. Tous les autres piézomètres ont ce situent dans une partie intermédiaire et peuvent éventuellement précipiter du gypse en cas de concentration de la solution, si toute fois tout le stock de calcium n'est pas consommé avant lors de la cristallisation de calcite.

Pour la Mirabilite et Thénardite (figure 19) deux minéraux sulfatés sodiques les solutions sont plus éloignées de l'équilibre mais la tendance est identique à savoir que dans P7 et P8 les eaux sont les plus proches de la saturation avec ces minéraux, alors que les de surface sont les plus éloignées. Ce classement est dû aux

teneurs en sulfates, dans la mesure où on voit dans la figure 19, que toutes les solutions sont déficitaires en sodium (elles sont en dessous de la droite d'égalité $2 \log \text{Na} : \log \text{SO}_4$).

Les solutions de nappe et de surface semblent également loin de l'équilibre avec les minéraux de sulfate de magnésium, Epsomite, Hexahydrate et Kieserite (figure 20), avec le même ordre que précédemment, dicté par la teneur en sulfate. Cependant pour les solutions les plus diluées, on a un excédent de Magnésium par rapport au sulfate, qui s'égalisent ensuite pour les solutions les plus concentrées. Bien qu'à priori la saturation par rapport au gypse semble atteint plus rapidement, on a mis en évidence la présence d'efflorescences d'epsomite (voir rapport précédent) dans la parcelle à proximité du piézomètre P7. Ceci signifie qu'en se concentrant la solution s'est appauvri en calcium qui a été consommé dans la cristallisation de calcite et que finalement c'est l'epsomite qui a pu cristalliser.

Finalement dans la figure 21 on a représenté l'équilibre des solutions par rapport à la sépiolite. Ce minéral qui est un silicate magnésien hydraté, est un minéral extrêmement important dans l'évolution alcaline d'une solution. En effet lorsqu'une mole ce minéral précipite se forment également deux moles de protons (H^+) qui viennent tamponner l'alcalinité de la solution, et peuvent infléchir l'évolution de la solution vers une voie saline neutre et non plus alcaline.

Une grande partie des eaux du piézomètre P4 sont clairement sursaturées par rapport à la sépiolite et les eaux du piézomètre P7 sont en voie d'atteindre la saturation par rapport à la forme amorphe et cristallisée. Pour les autres solutions de piézomètre, on a systématiquement un lot d'échantillons proches de la saturation et un lot plus éloigné. Par contre les eaux de surface sont toujours les plus éloignées de l'équilibre par rapport à la sépiolite.

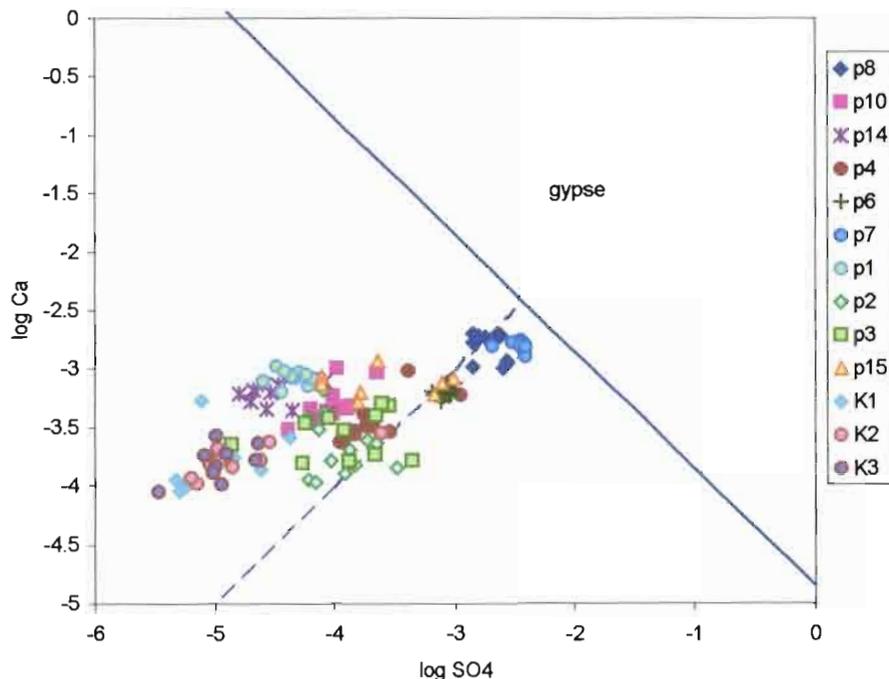


Figure 18: diagramme d'équilibre des solutions par rapport au gypse

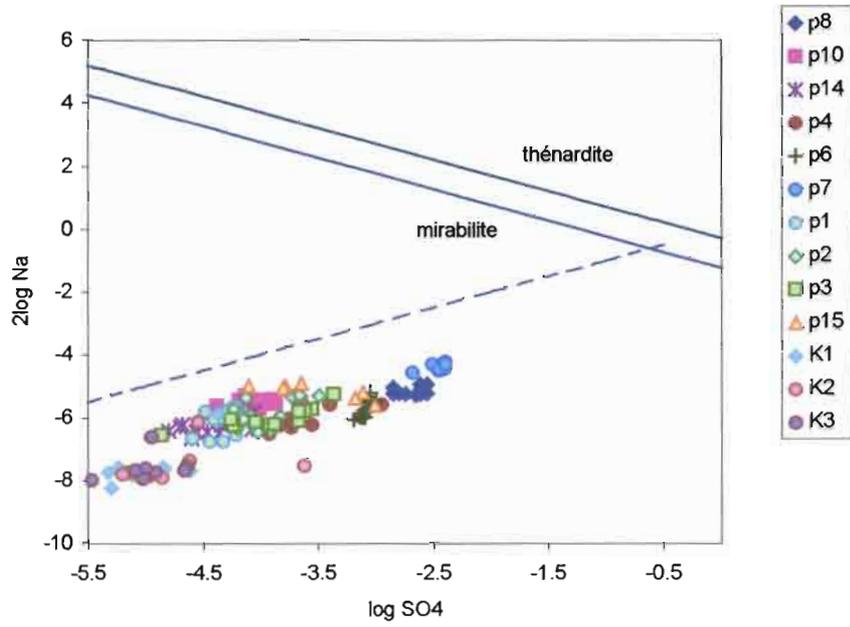


Figure 19 : diagramme d'équilibre des solutions pour thénardite et mirabilite

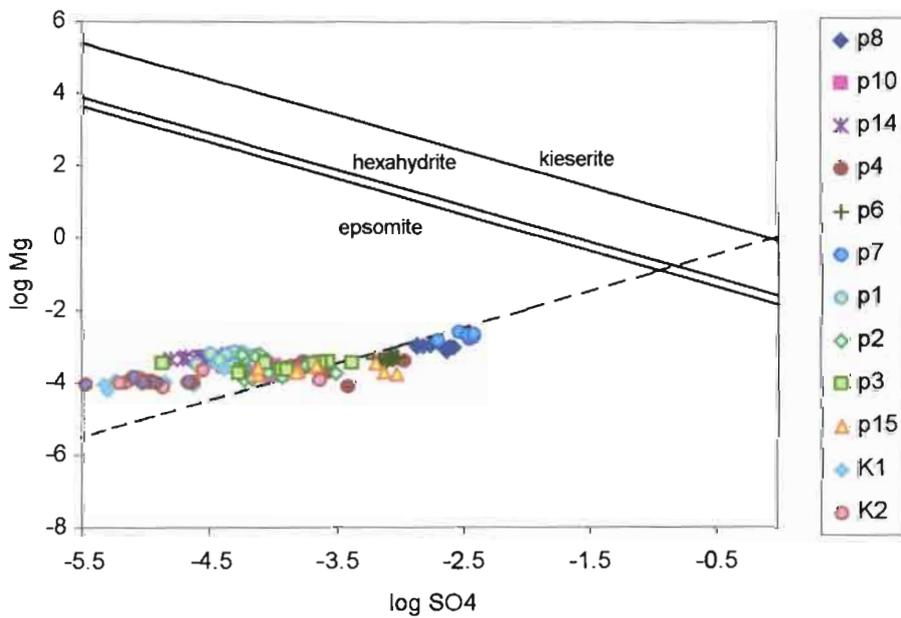


Figure 20 : diagramme d'équilibre des solutions pour la kieserite, hexahydrate et epsomite

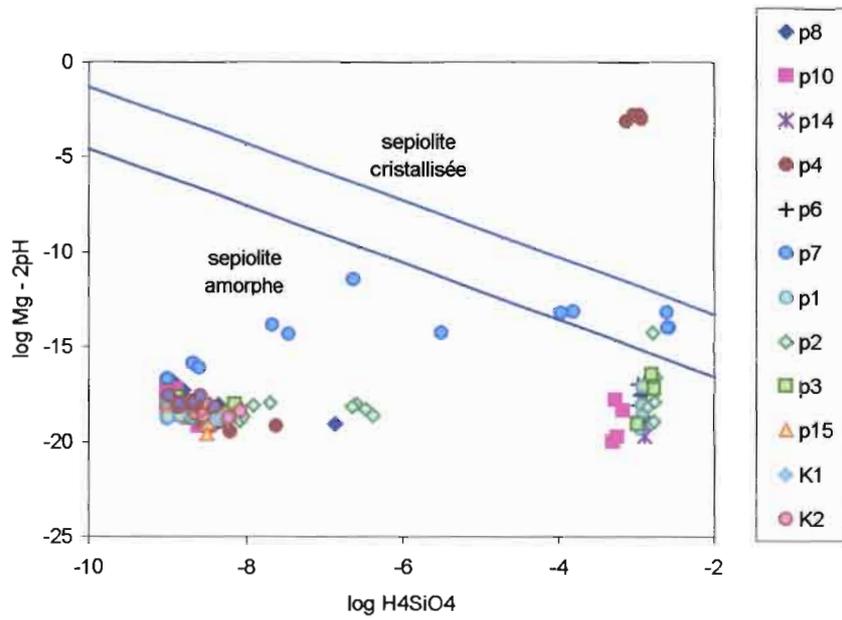


Figure 21 : diagramme d'équilibre des solutions par rapport à la sépiolite

Conclusions partielles.

Au cours de ces deux premières années 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 le premier rapport on a présenté la caractérisation des propriétés physiques des différents horizons de sols traversés lors de l'installation des piézomètres et dans celui-ci nous avons mis l'accent sur la caractérisation physico-chimique des horizons de surface, en particulier autour du piézomètre P5. Ainsi on a déterminé les propriétés de rétention, de conductivité hydraulique et de dispersion hydrodynamique des solutés, afin de pouvoir le cas échéant modéliser de manière complète les processus de transferts hydriques et de soluté dans ces sols et de bien comprendre les interactions entre les réservoirs supérieurs et la nappe.

Le suivi du niveau piézométrique depuis janvier 1999, permet déjà de tirer quelques conclusions générales sur la dynamique de la nappe sous le secteur N'Gallenka :

- Le niveau général de la nappe monte sous tout le secteur couvert par les aménagements irrigués. Malgré les variations de hauteurs saisonnières liées aux variations de niveau du fleuve, et aux activités agricoles on peut déterminer des taux de remontée moyens qui varient selon les piézomètres. Ainsi sous le long du transect P1-P3 on observe une diminution du taux de remontée de la nappe, que l'on peut attribuer à l'arrêt de toute activité agricole donc d'irrigation pendant la dernière année. On voit donc clairement l'incidence de l'irrigation sur le taux de remontée de la nappe.
- La pente générale de la nappe est établie selon une direction Nord-Ouest vers Sud-Est. Cette nappe correspond à la nappe naturelle du fleuve, sur laquelle viennent s'ajouter les influences des activités agricoles des périmètres irrigués de la cuvette de Nianga située au Nord. Cependant il apparaît clairement que l'irrigation même récente réalisée dans le secteur N'Gallenka, contribue à la recharge de la nappe. D'autant que les sols dans le secteur N'Gallenka sont plus perméables que ceux des cuvettes de Nianga ou de Donaye, qu'ils ne retiennent pas l'eau aussi bien en surface (au dam de certains agriculteurs), mais contribuent à l'alimentation de la nappe.

Cependant de manière générale le niveau piézométrique est encore éloigné de la surface dans le secteur dans la mesure où il se situe entre 6 et 10 m de profondeur.

D'un point de vue géochimique on a pu déterminer d'une part hormis en certains points précis, l'eau est peu chargée, et d'autre part que c'est de l'eau de bonne qualité pouvant éventuellement être utilisée pour l'irrigation. Il faut cependant écarter les piézomètres P6, P7 et P8 où l'on trouve des eaux de nappe légèrement plus concentrées, comme prévu par Barbiéro et al. (2000) (en annexe). Les valeurs de pH des solutions sont globalement constantes lorsqu'on les observe sur une échelle de temps plus longue permettant de s'affranchir des variations saisonnières, et elles se situent autour de la neutralité.

Le faciès géochimique de la nappe est essentiellement carbonaté, parfois légèrement chloruré. Il s'agit en fait d'une eau de composition équivalente à celle du fleuve (une eau carbonatée calci-magnésienne) qui prend les faciès chimiques

des horizons de sols traversés. Ainsi dans la zone des piézomètres P7, P8 par exemple, l'eau de la nappe acquiers un faciès sulfaté probablement lié à la présence d'anciens dépôts de mangroves renfermant du gypse.

L'étude des diagrammes d'équilibre par rapport à un certain nombre de minéraux vient confirmer cette tendance dans la mesure où ils montrent que c'est la calcite qui est le minéral pour lequel il y a le plus de solutions sursaturées, à saturation ou très proche de l'équilibre. Les minéraux sulfatés sont quant à eux plus proches de cristalliser dans les eaux des piézomètres P7 et P8.

De manière générale on sent l'influence géochimique de l'irrigation qui tend à faire évoluer les solutions vers un faciès carbonaté plus franc (comme par exemple le piézomètre P1) et qui tend à faire augmenter l'alcalinité résiduelle calcite (ARC) de la nappe dans la plupart des piézomètres. Bien que l'ARC soit un indicateur permettant de prévoir l'évolution de la solution lorsqu'elle se concentre, il ne tient pas compte des interactions avec le complexe d'échange du sol qui peut complètement modifier l'évolution de la qualité du sol. Ainsi des simulations réalisées sur le site de Donaye montrent que c'est la garniture cationique du complexe d'échange c'est à dire les cations adsorbés à la surface des argiles, qui contrôlent l'évolution de la solution du sol et non pas la qualité de l'eau d'irrigation. Cependant dans le cas de Donaye nous sommes en présence d'un sol très argileux avec une très forte Capacité d'Echange Cationique, ce qui n'est pas le cas dans le secteur N'Gallenka. On ne peut donc pas transposer directement les résultats obtenus à Donaye sur ce secteur. Cette étude plus spécifique dans le secteur N'Gallenka, est en cours de réalisation actuellement est sera présentée dans le rapport final. En particulier pour bien comprendre la dynamique de l'eau et des solutés depuis la surface lors des irrigations, un dispositif tensio-neutronique et de suivi de la qualité de la solution du sol a été mis en place dans une parcelle à proximité du piézomètre P5. Par ailleurs des piézomètres « superficiels » de 6 mètres de profondeur ont été mis en place afin de détecter la présence éventuelle de nappe perchée.

A partir des données de transfert d'eau et de solutés depuis la surface ainsi que le suivi piézométrique, on aura alors une bonne idée du fonctionnement et de la réactivité du système et l'on pourra alors modéliser les différents processus physico-chimiques permettant de quantifier les risques de salinisation et alcalinisation-sodisation, lié à l'irrigation dans ces périmètres.

Références bibliographiques

- 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.
- BOVIN P. et al, 1995, Nianga - Laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal, ORSTOM, 562 pages.
- DIOUF C.K. 2002. Détermination des coefficients de dispersion des solutés dans les sols de Donaye et du Ngalenka : expérimentation et modélisation. Rapport de stage, IRD multigraph. 52pp
- VAN GENUCHTEN M.Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **44** :892-898
- NDAO M. 2001, Caractérisation des conductivité hydrauliques par infiltrométrie et par la méthode de Wind des sols des nouveaux aménagements du Ngalenka : essais de simulation des transferts d'eau et de solutés. Mémoire de fin d'étude, ingénieur ENSA Thiès. 62pp.
- PARKHURST D.L., APPELO C.A.J., 1999. User's guide to Phreeqc (version2)-a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. Water-Resources investigations report 99-4256 USGS, Denver, Colorado
- PERROUX K.M. and WHITE I.1988. Design for Disc Permeameters. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **52**:1205-1215
- SEYDI A. 2001. Détermination des propriétés de retentions des sols : comparaison entre les mesures obtenues par la méthode de Wind au laboratoire et à partir de la granulométrie des sols des nouveaux aménagements du Ngalenka. Essais de simulation des transferts d'eau. Mémoire de fin d'études, ingénieur ENSA Thiès, 78 pp.
- TORIDE, N., F. J. LEIJ, and M. Th. VAN GENUCHTEN. 1995. The CXTFIT Code for Estimating Transport Parameters from Laboratory or Field Tracer Experiments, Version 2.0. Research Report No. 137, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California.
- WIND G.P. 1968. Capillary conductivity data estimated by a simple method. p. 181-191. In P.E. Rijtema and H. Wassink (ed.), *Water in the unsaturated zone*. Proc. of the Wageningen symposium, June 1966, IASH Gentbrugge/ Unesco Paris, Vol. 1.

ANNEXES

ANNEXE 1 : COURBES DE RETENTION

ANNEXE 2 : CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE

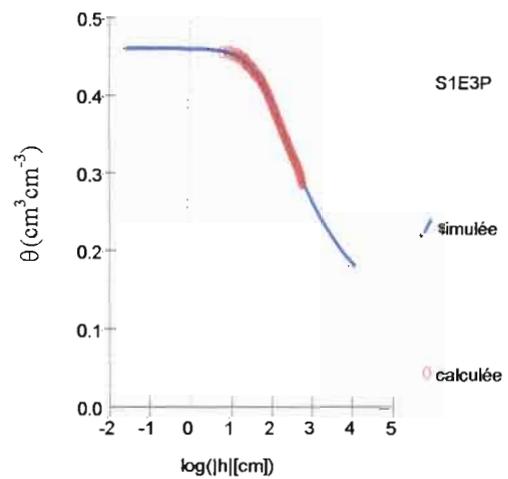
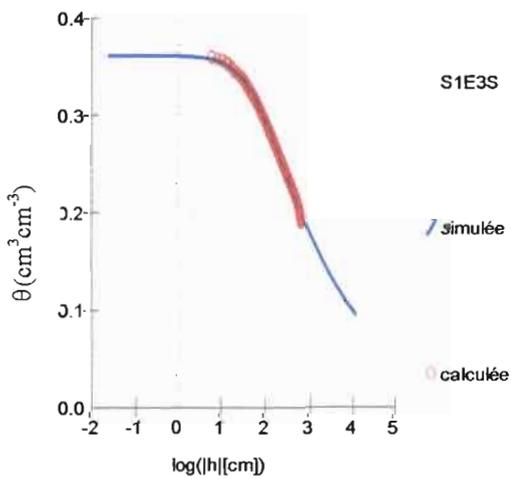
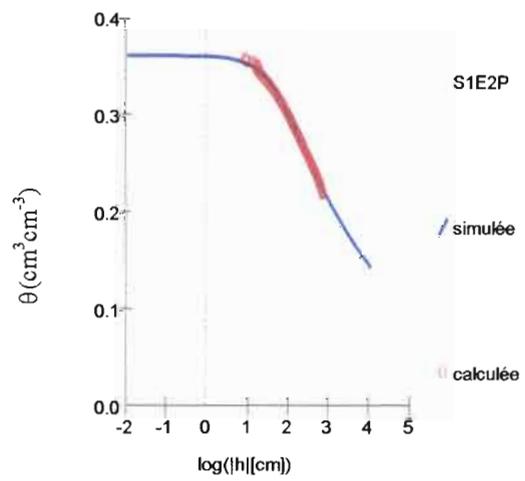
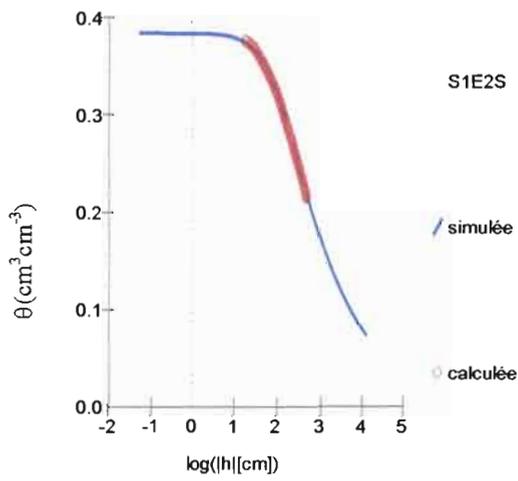
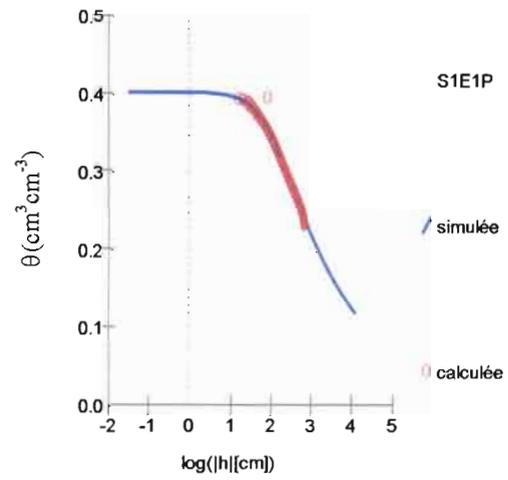
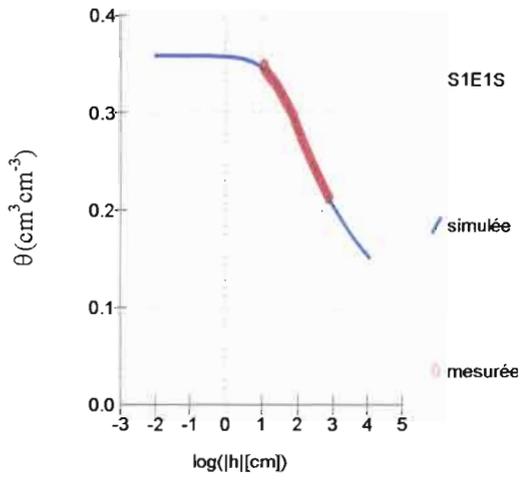
ANNEXE 3 : SUIVI DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

ANNEXE 4 : RESULTATS GEOCHIMIQUES

ANNEXE 5 : PUBLICATION

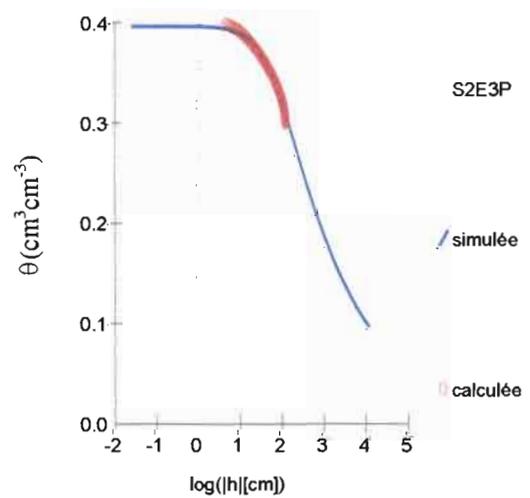
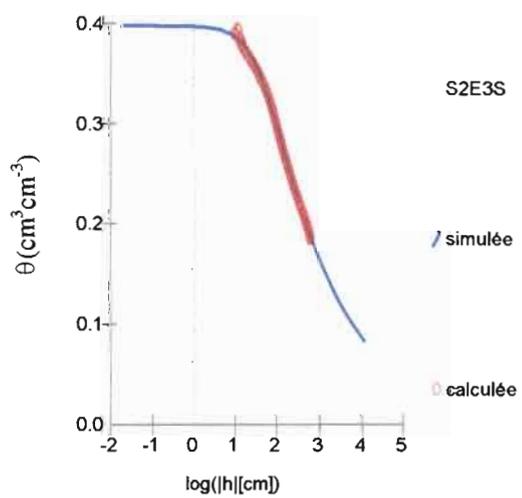
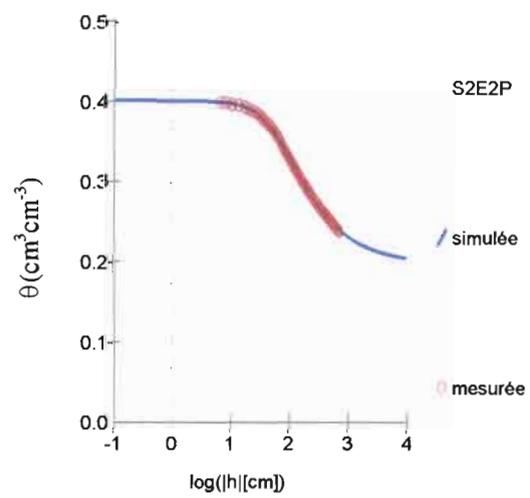
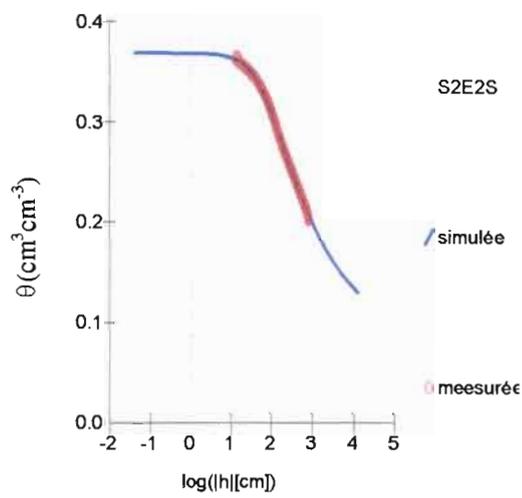
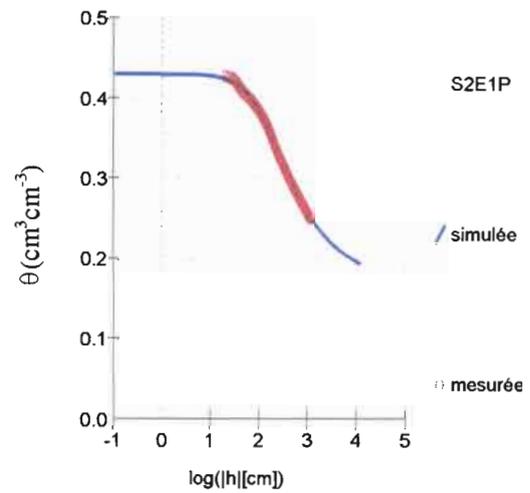
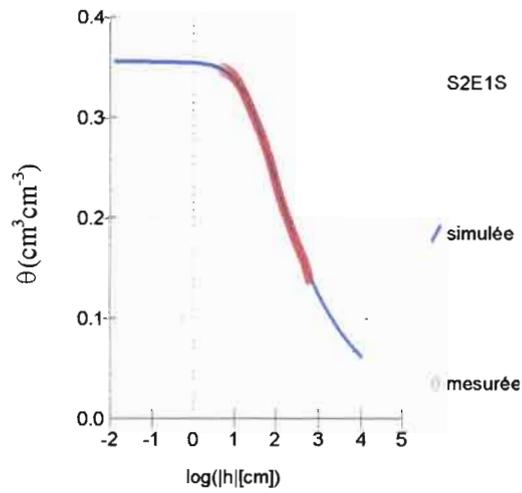
ANNEXE 1

COURBES DE RETENTION



(0-10cm)

(20-30cm)

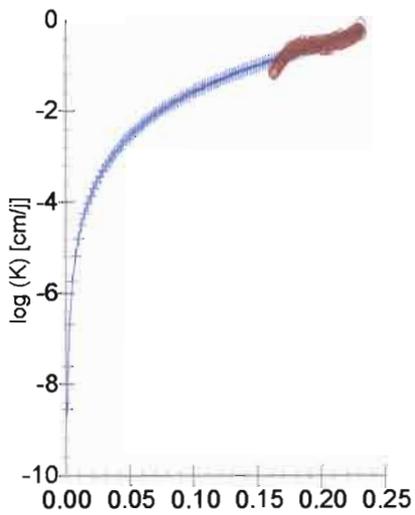


(0-10cm)

(20-30cm)

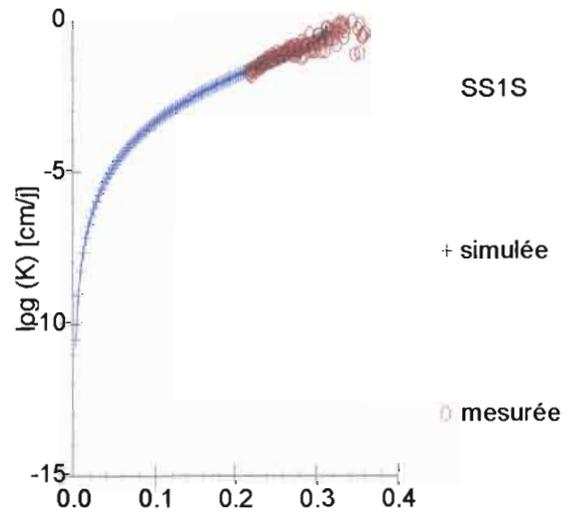
ANNEXE 2

CONDUCTIVITE HYDRAULIQUE



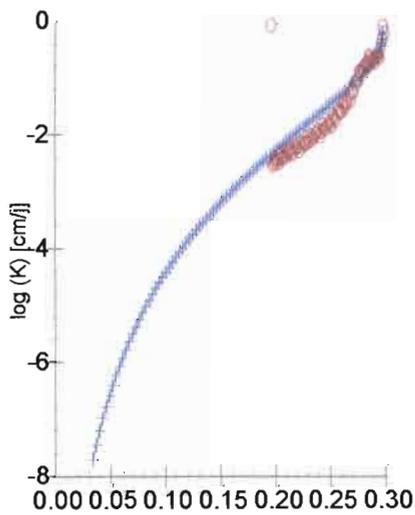
SS1S

+ simulée
○ mesurée



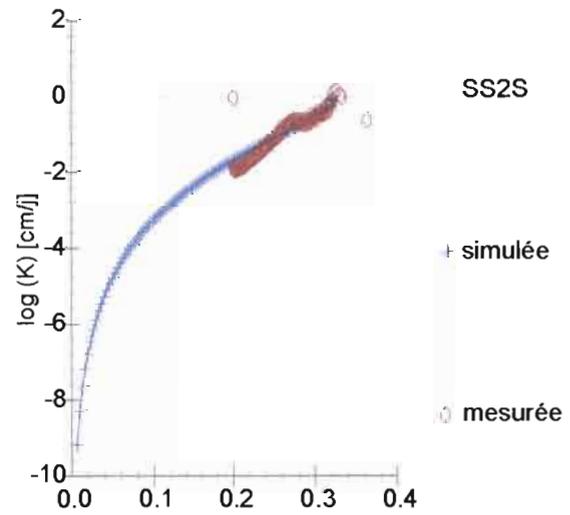
SS1S

+ simulée
○ mesurée



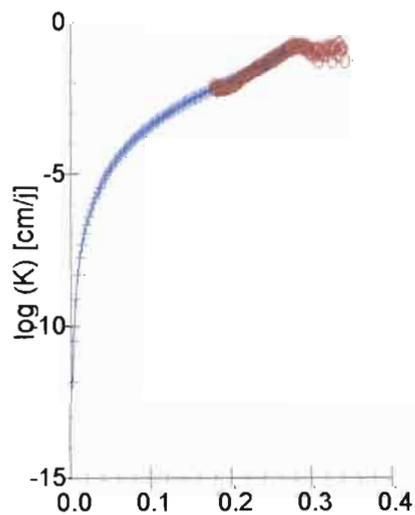
SS1S

+ simulée
○ mesurée



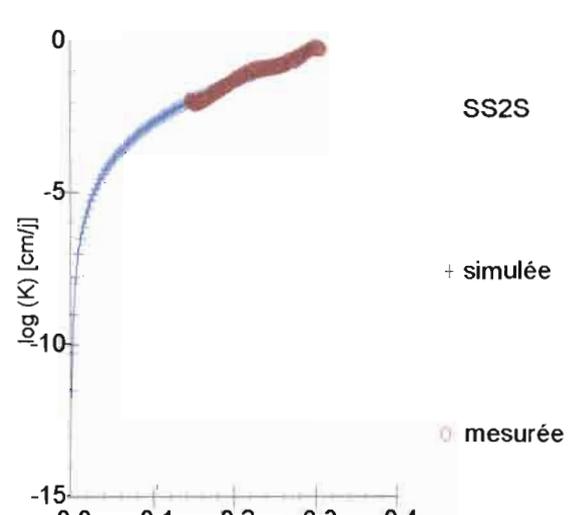
SS2S

+ simulée
○ mesurée



SS2S

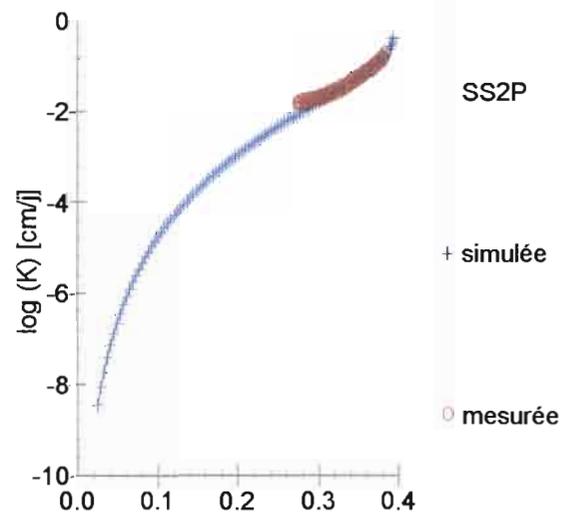
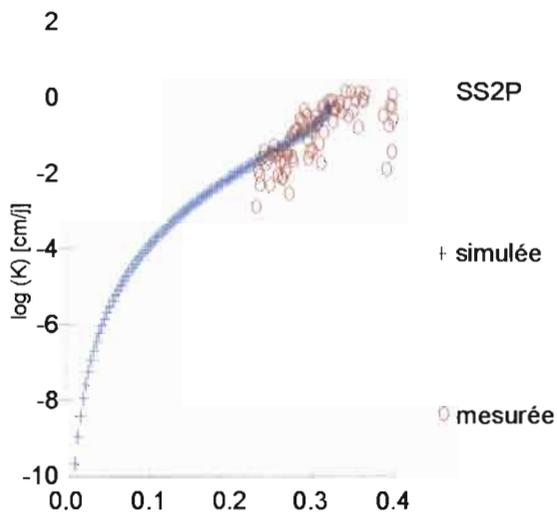
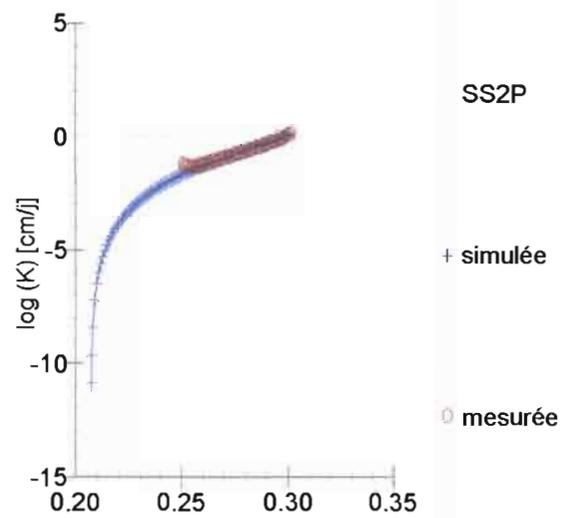
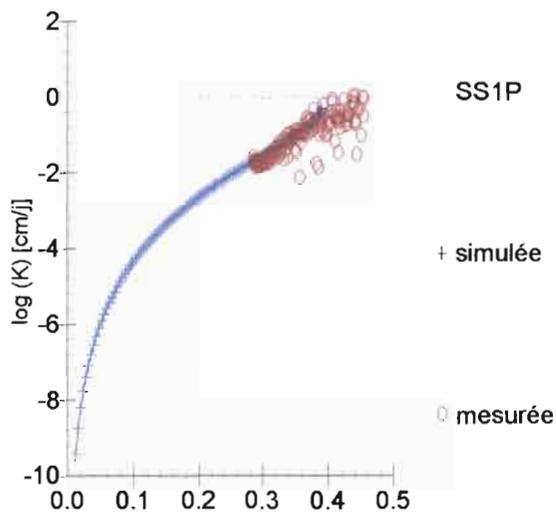
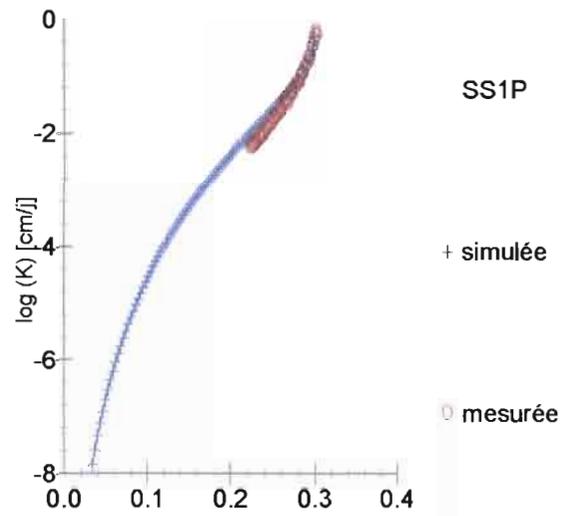
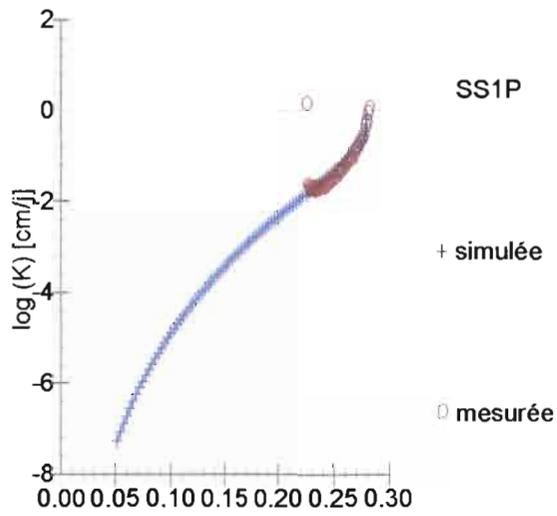
+ simulée
○ mesurée



SS2S

+ simulée
○ mesurée

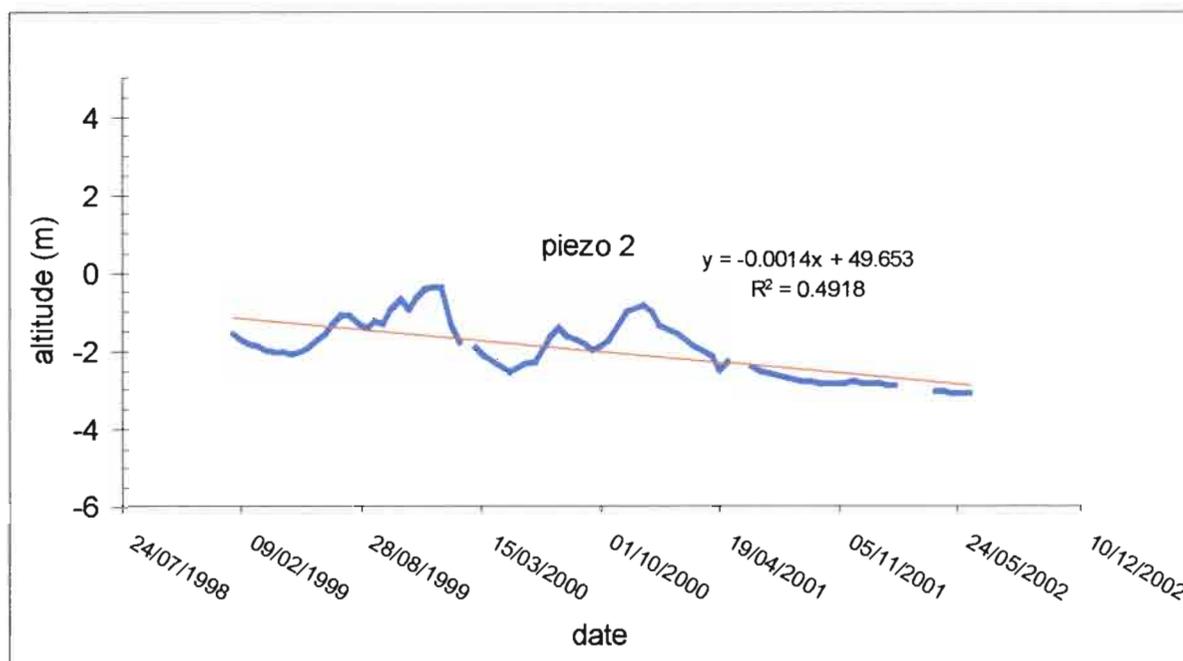
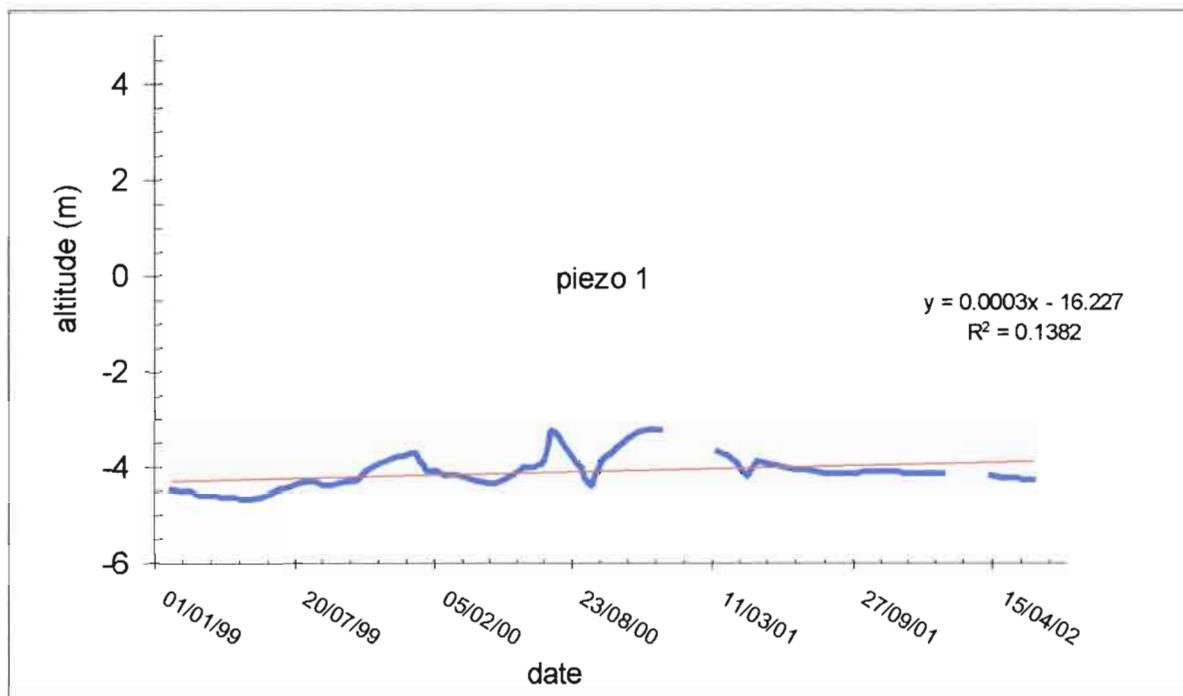
Conductivité hydraulique sur les deux sites en surface.

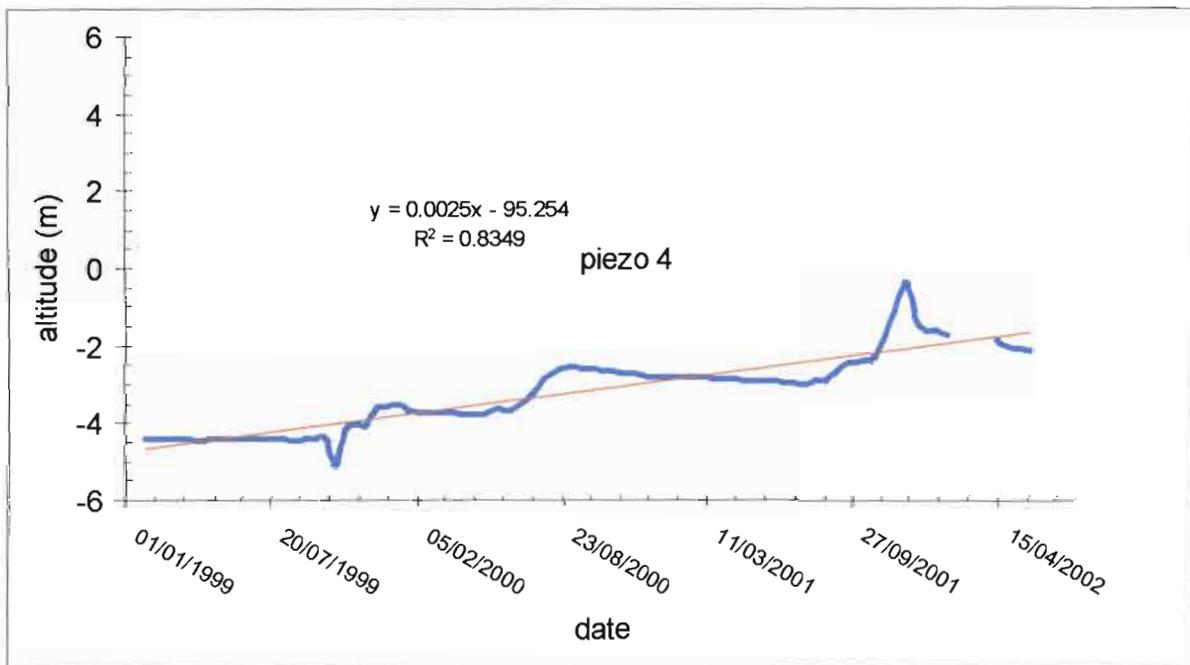
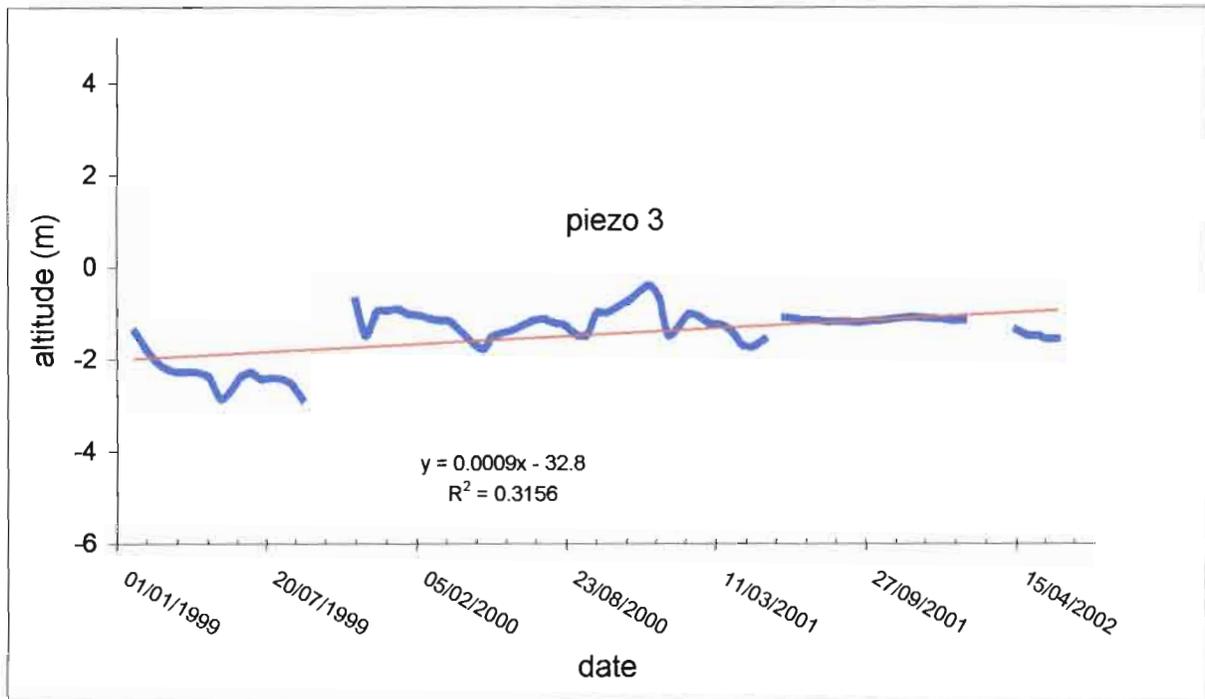


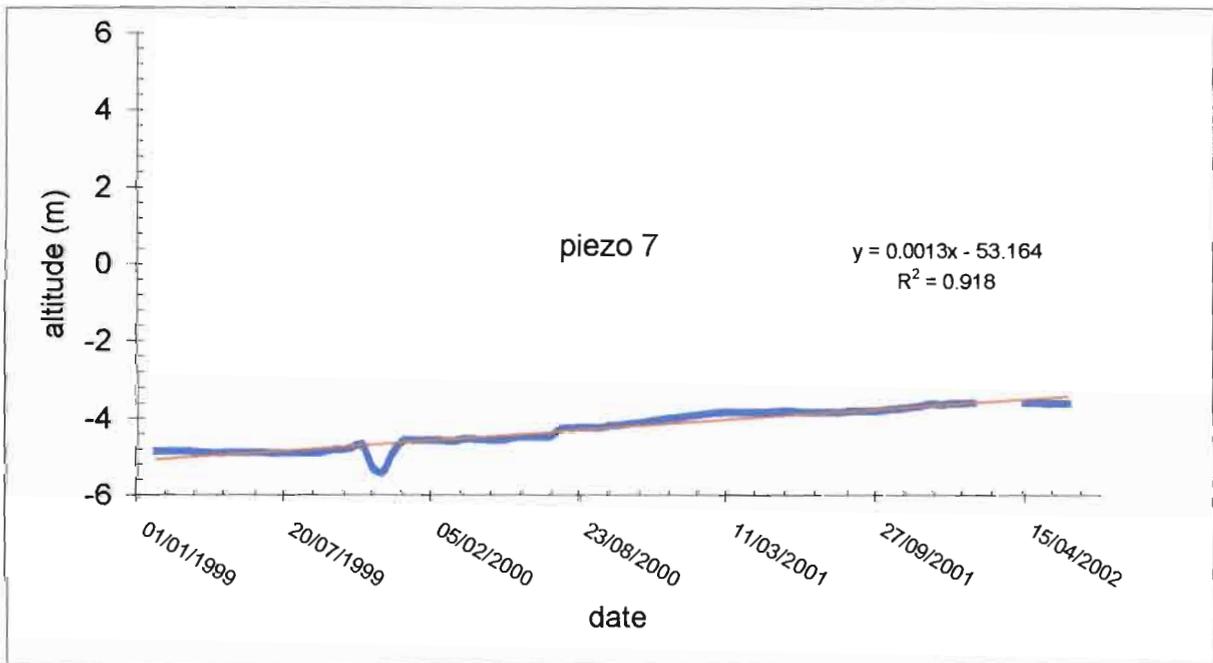
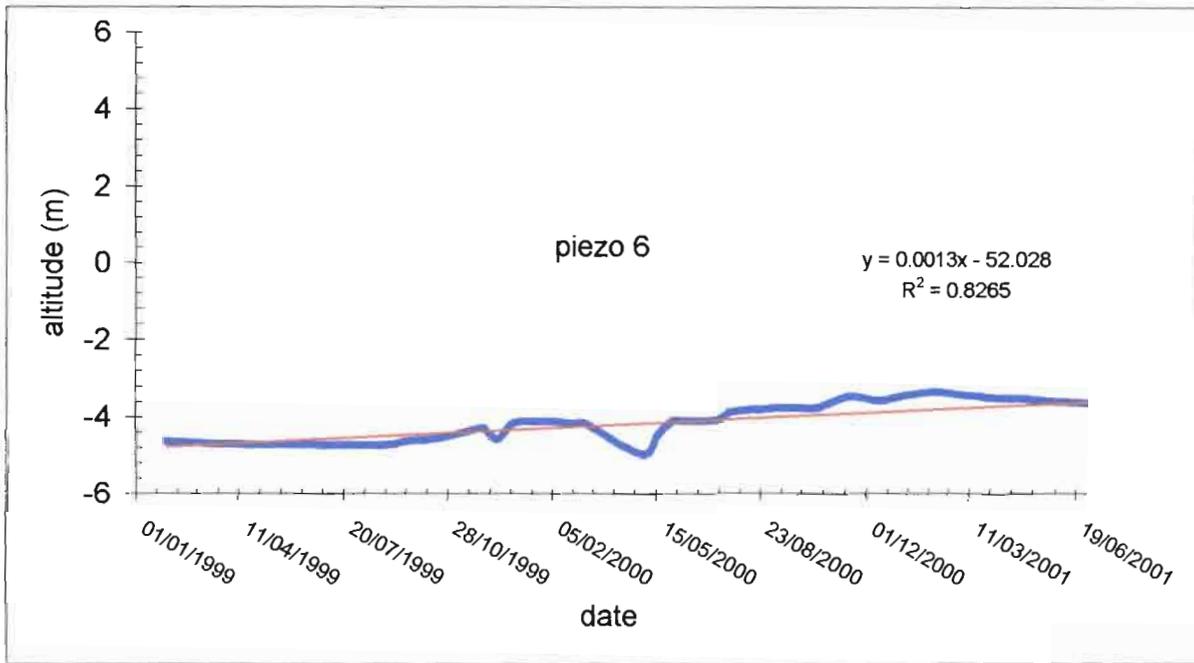
Conductivité hydraulique sur les deux sites à 20 cm de profondeur.

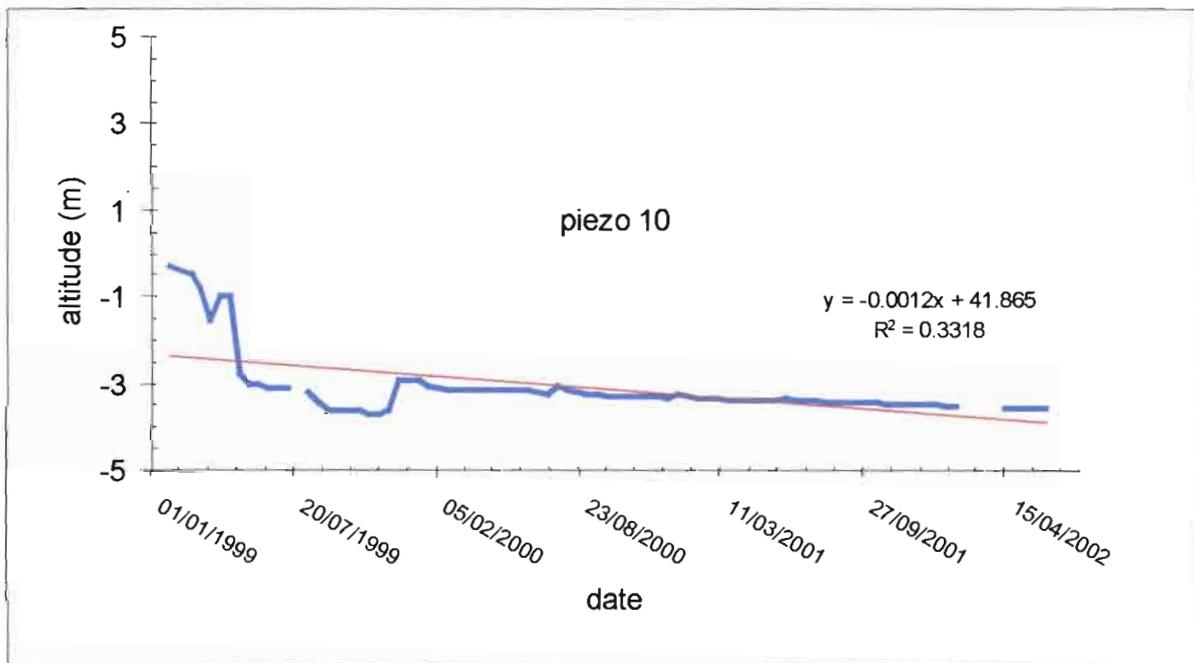
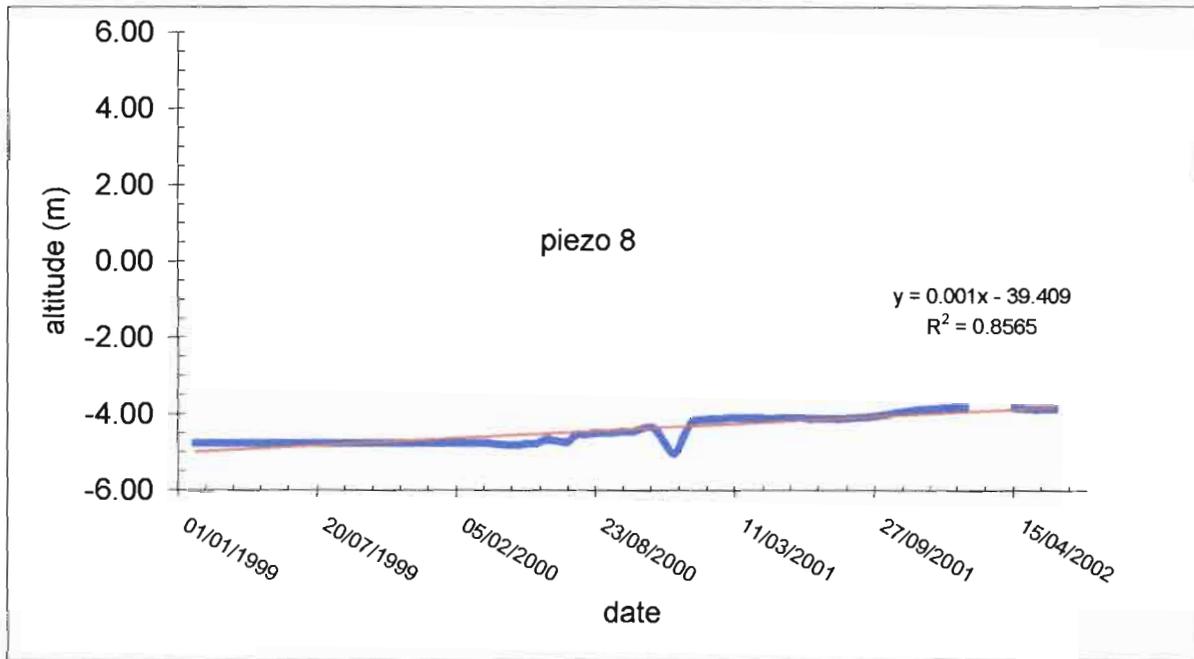
ANNEXE 3

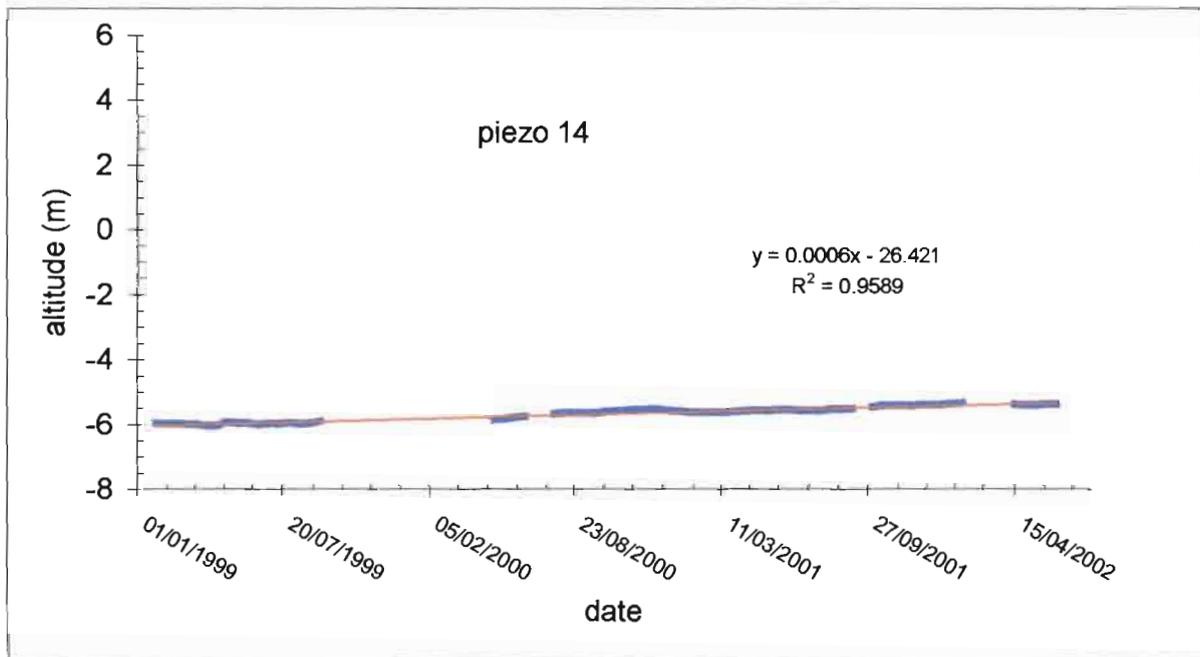
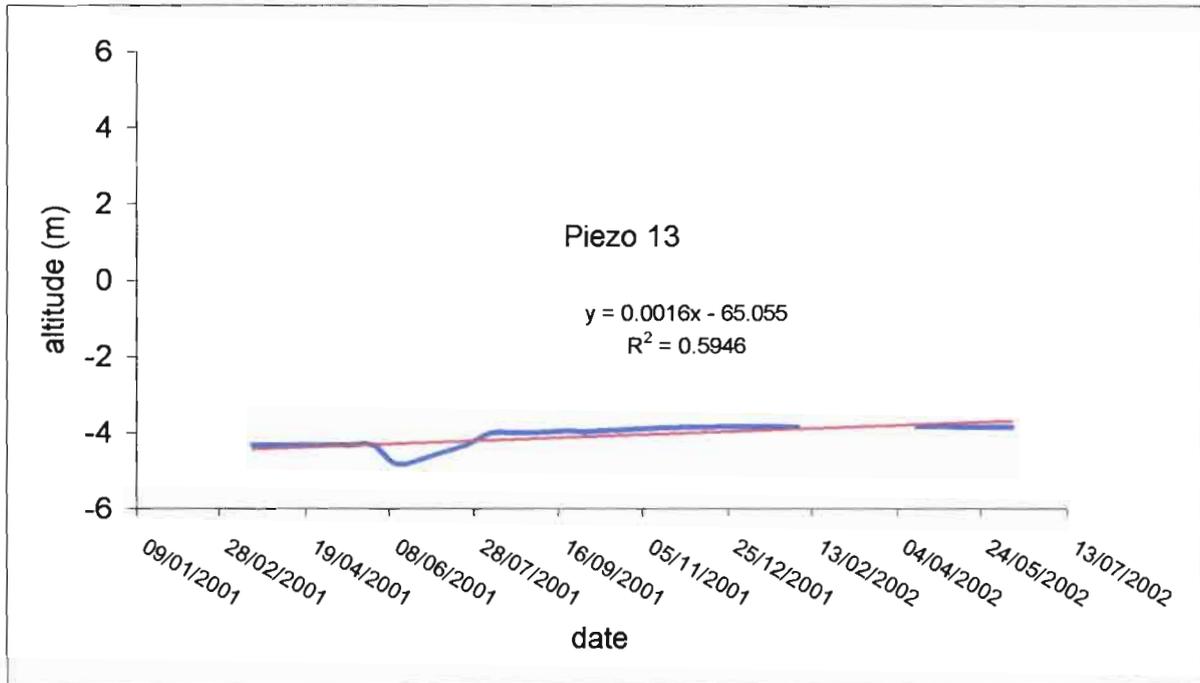
SUIVI DU NIVEAU PIEZOMETRIQUE

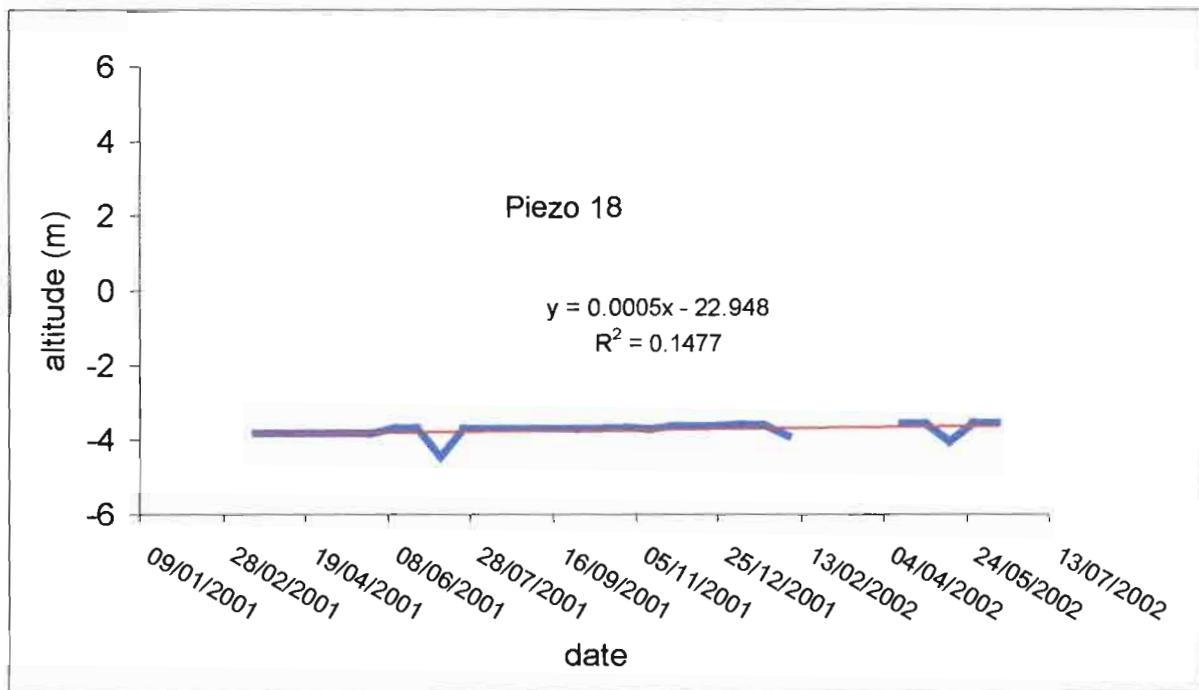
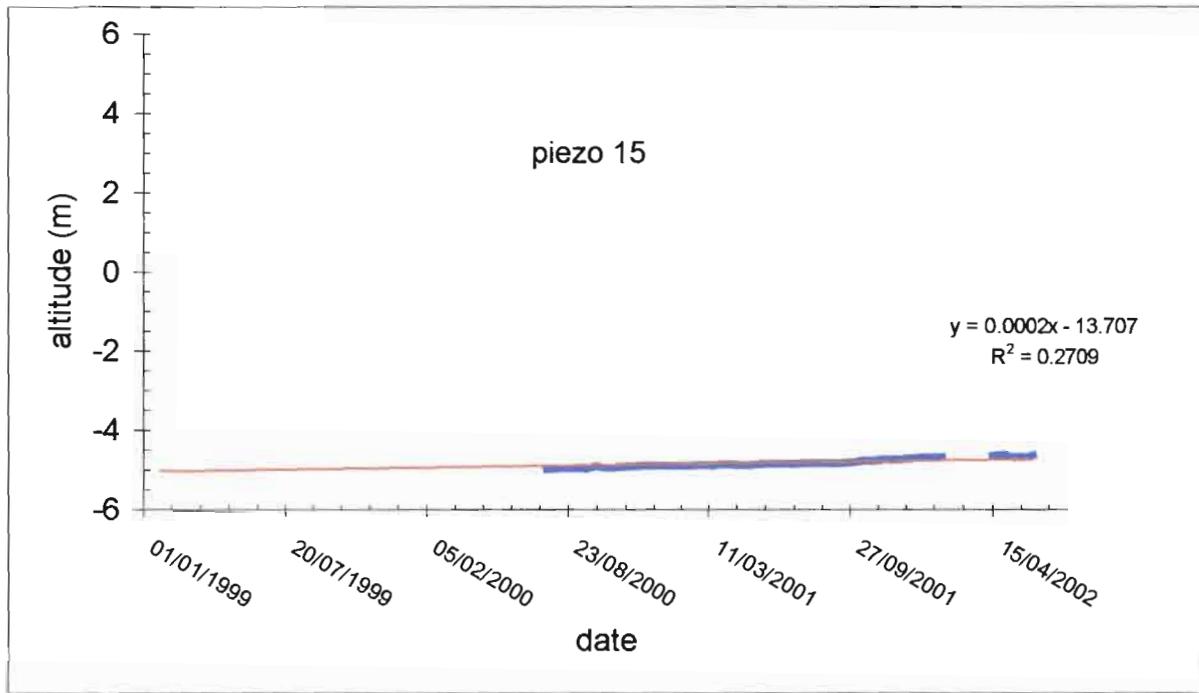






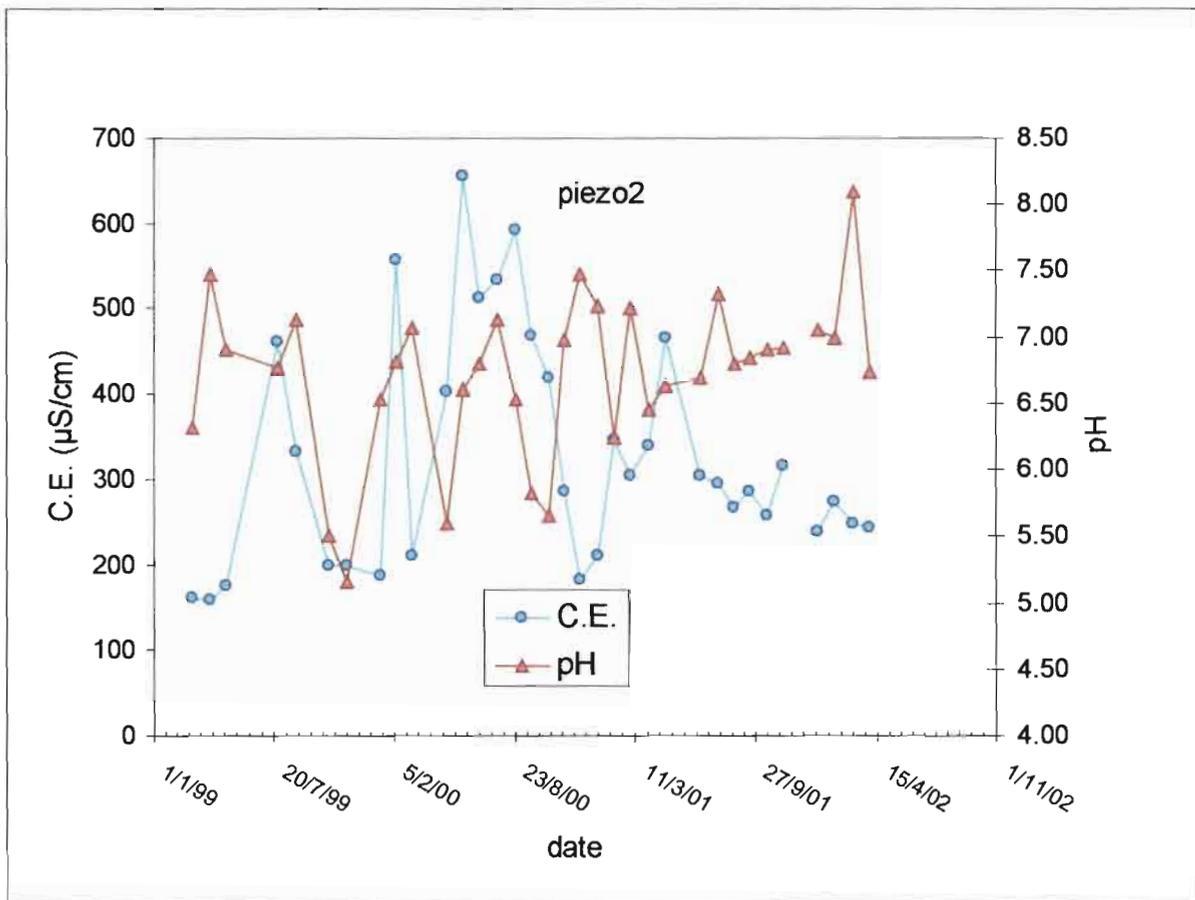
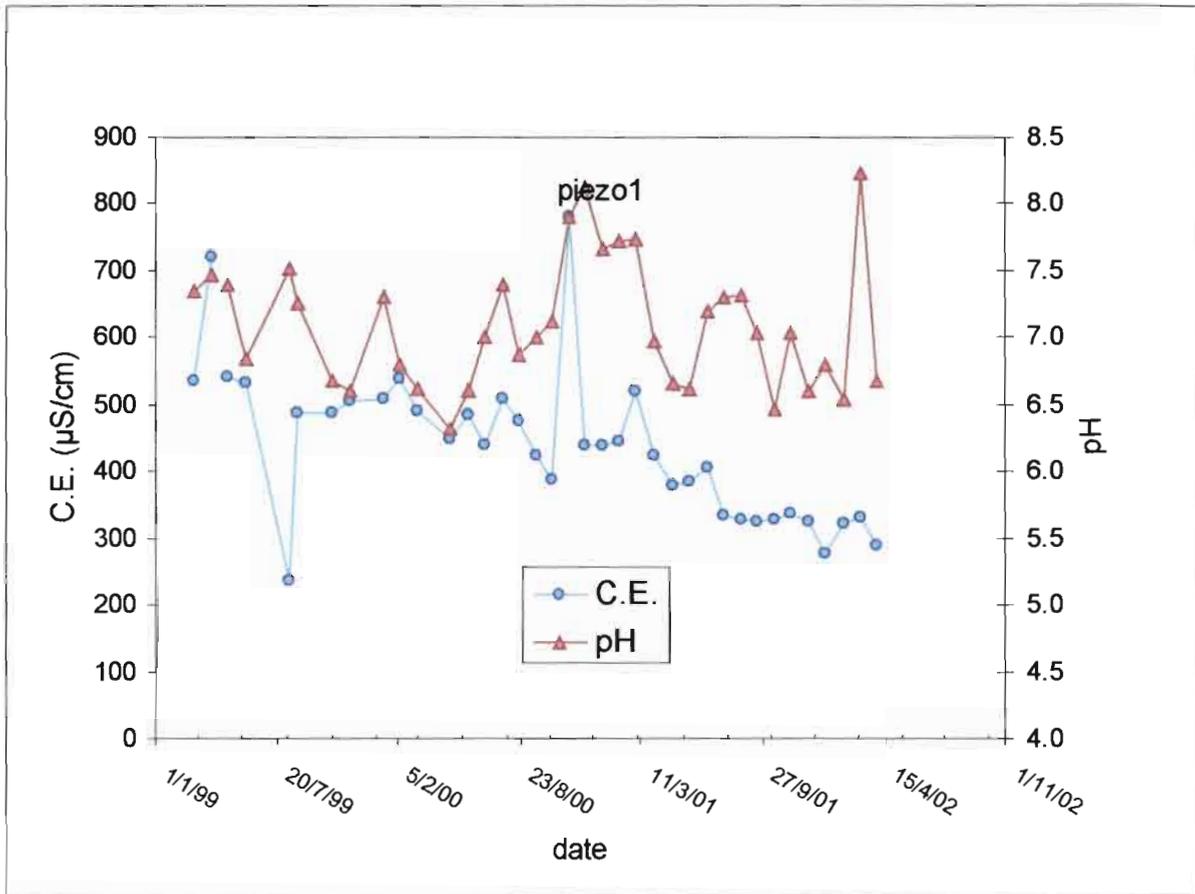


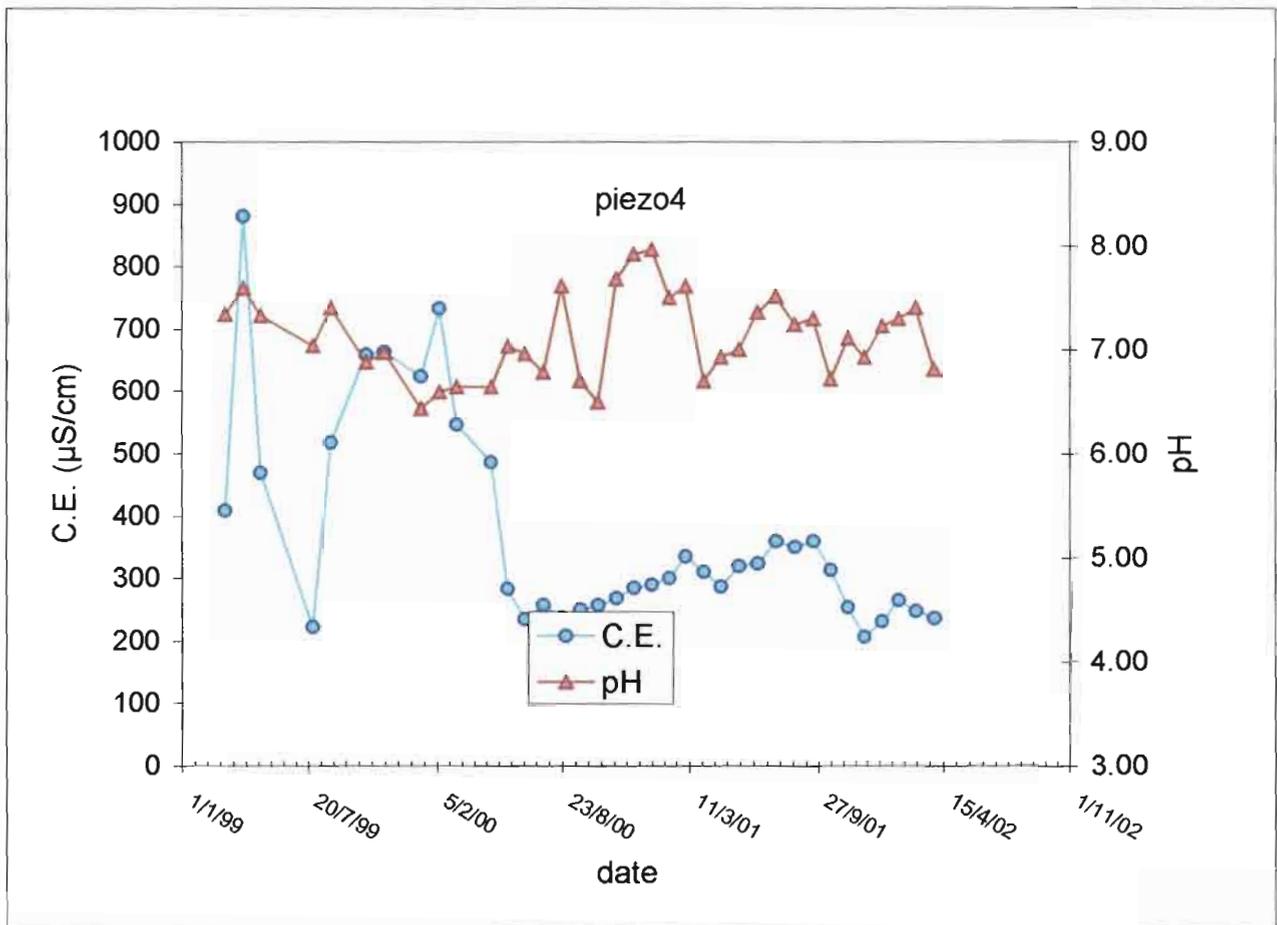
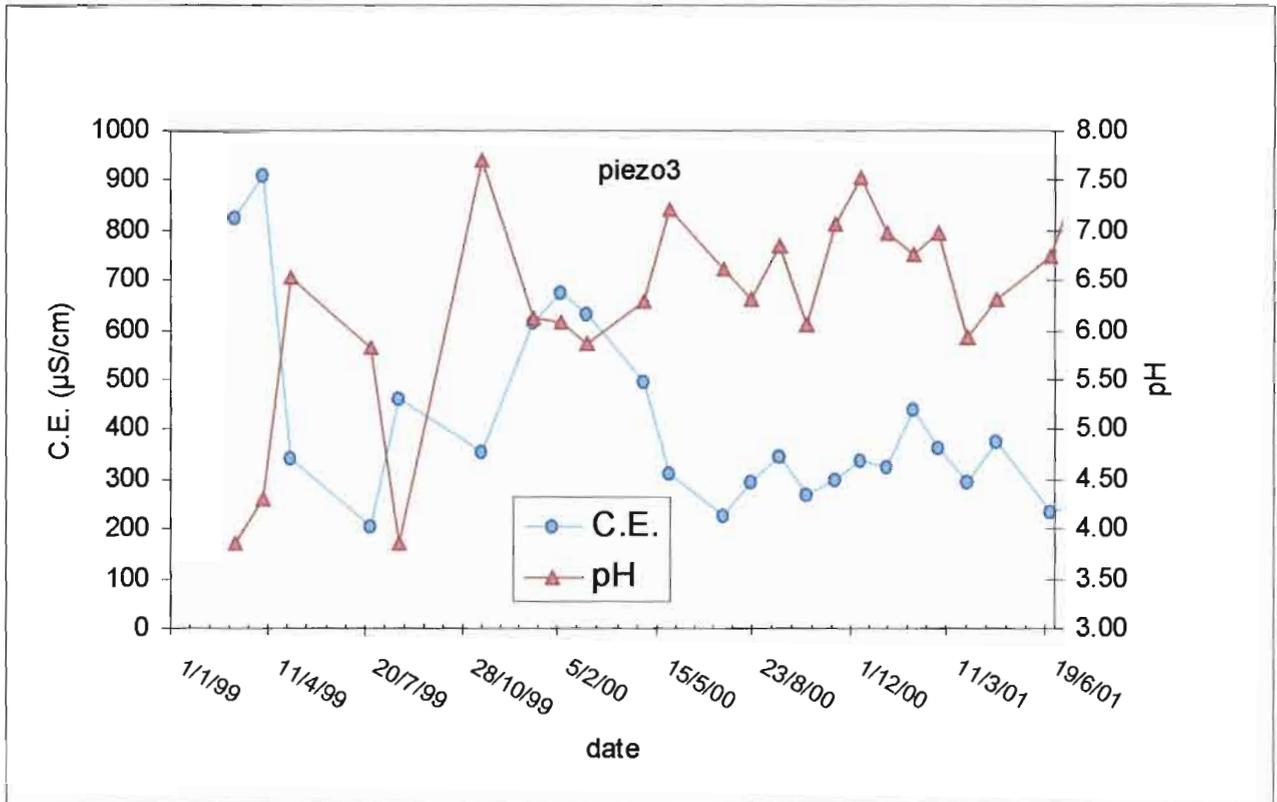


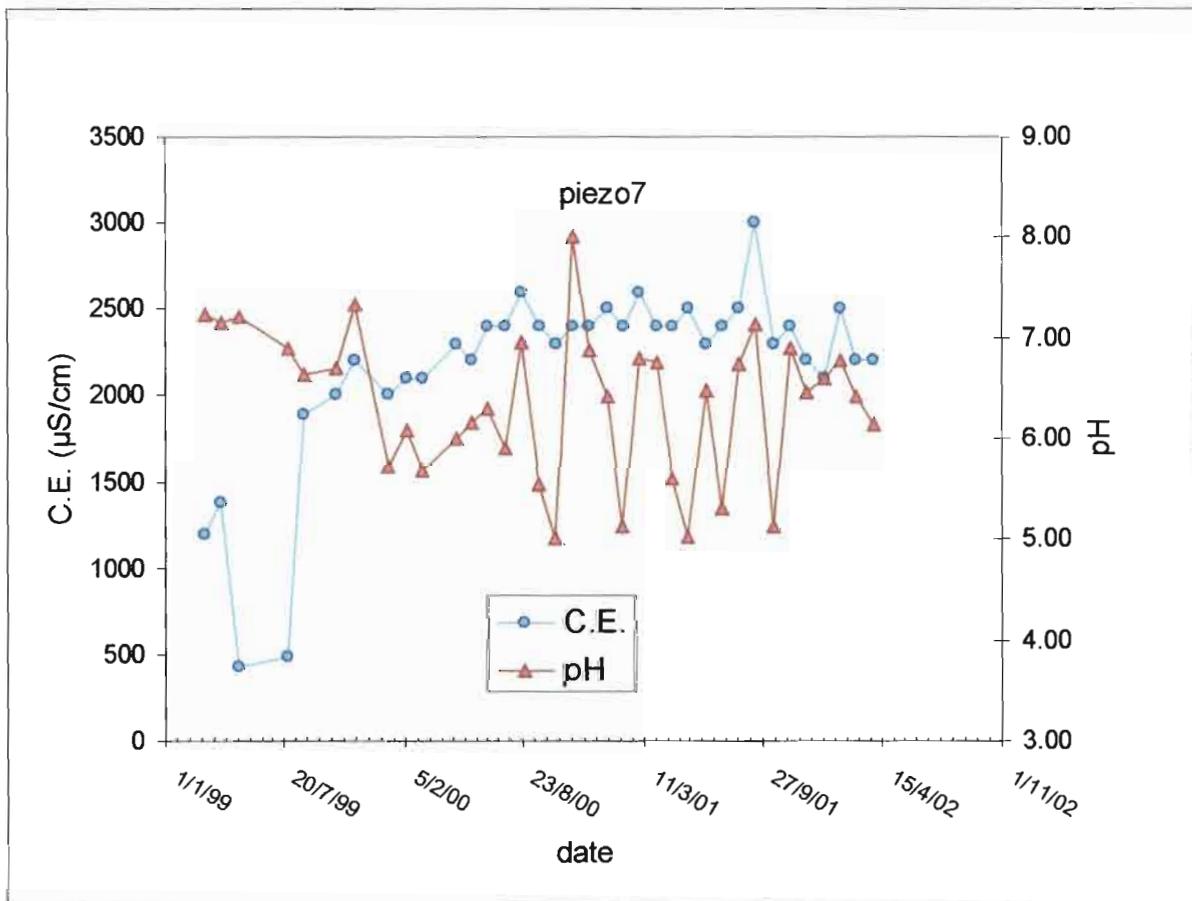
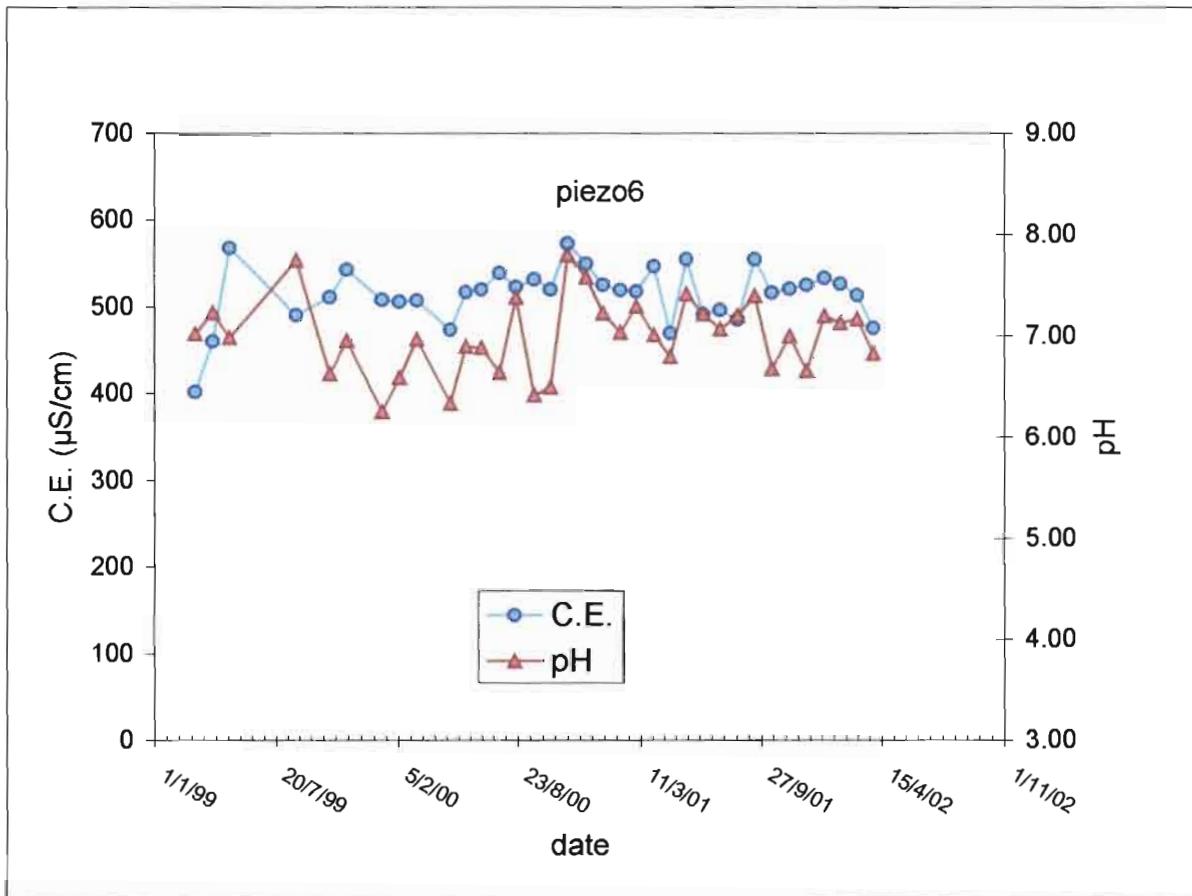


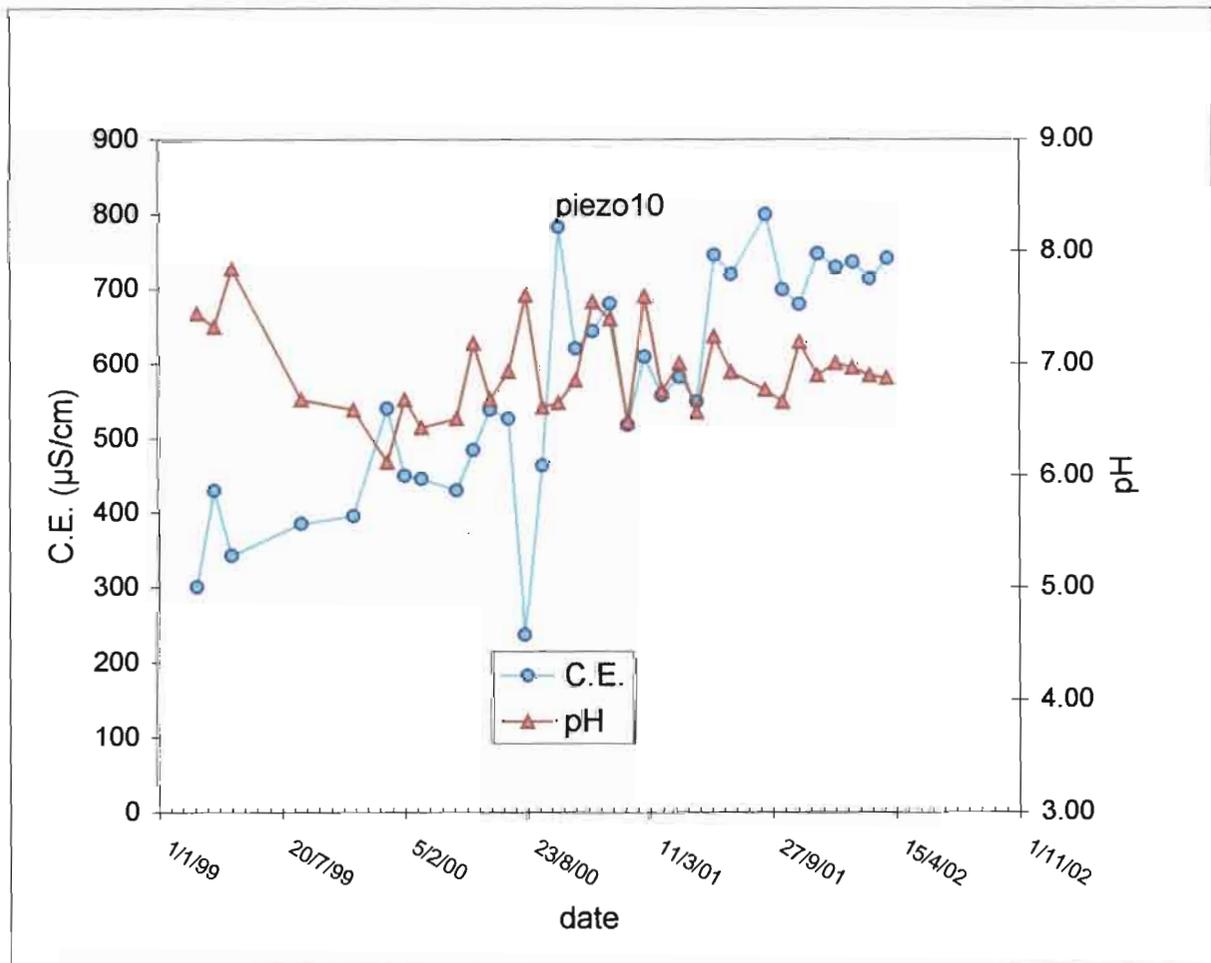
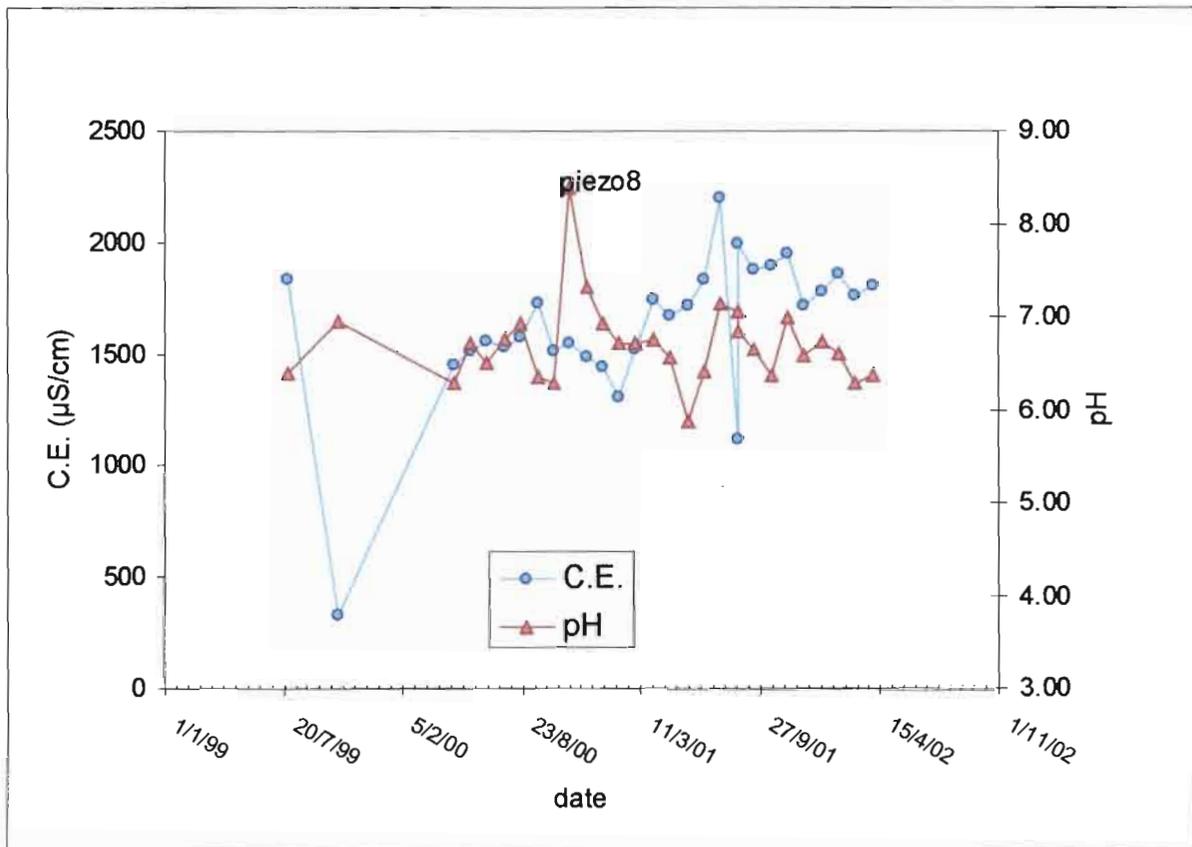
ANNEXE 4

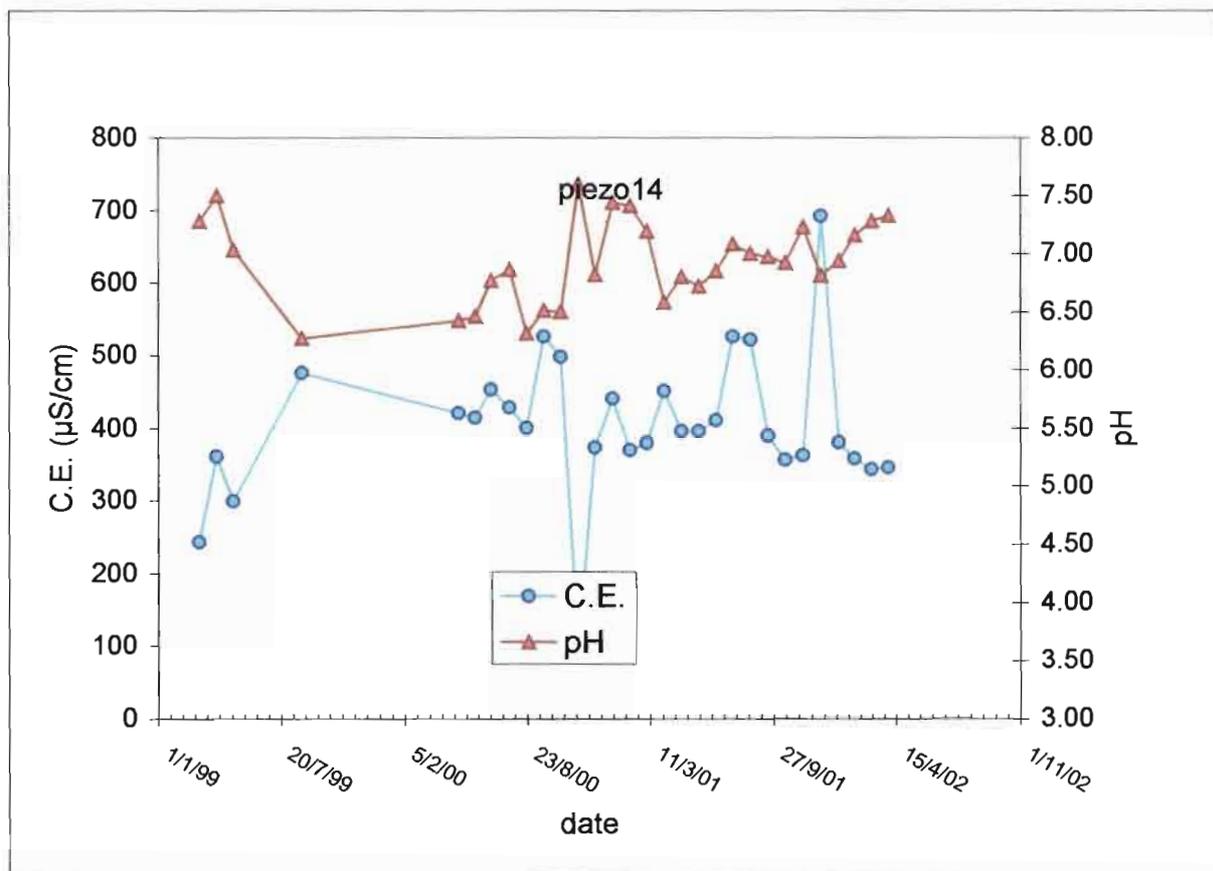
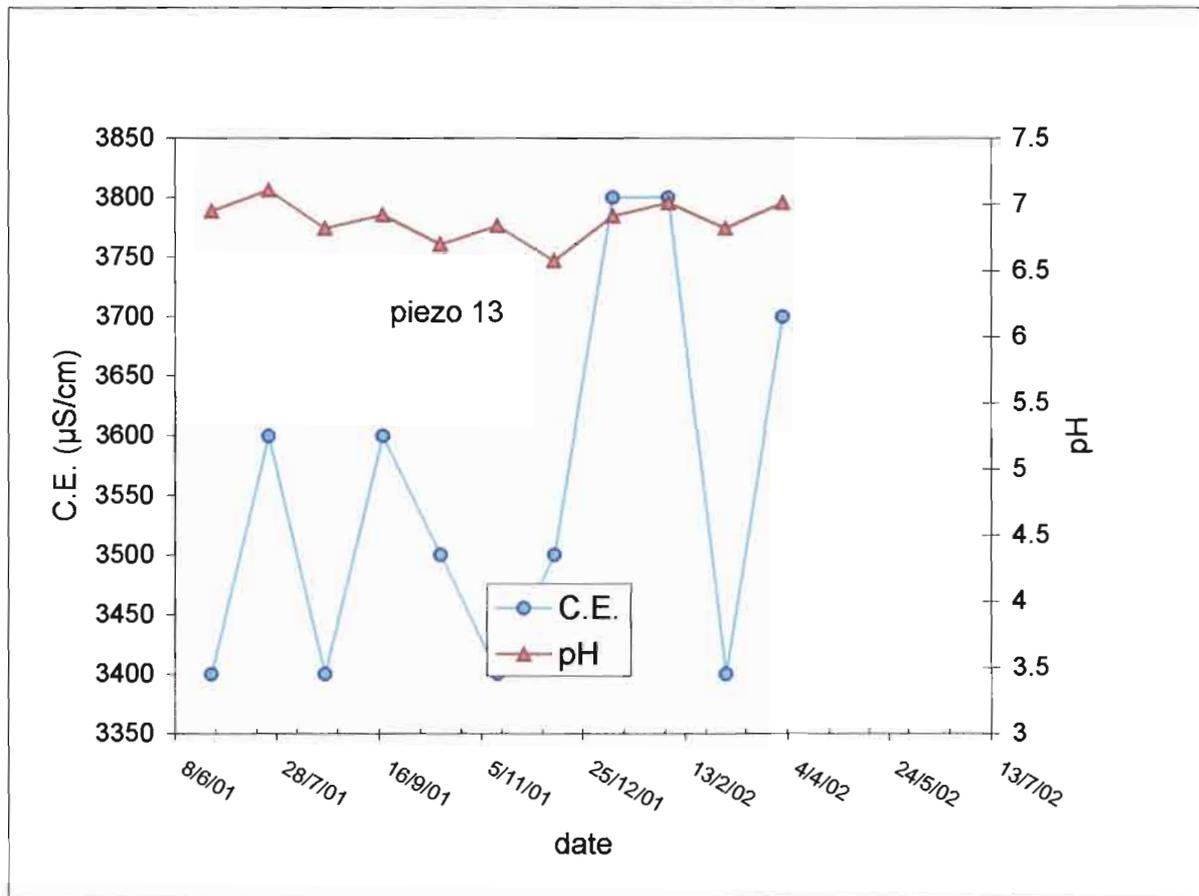
RESULTATS GEOCHIMIQUES

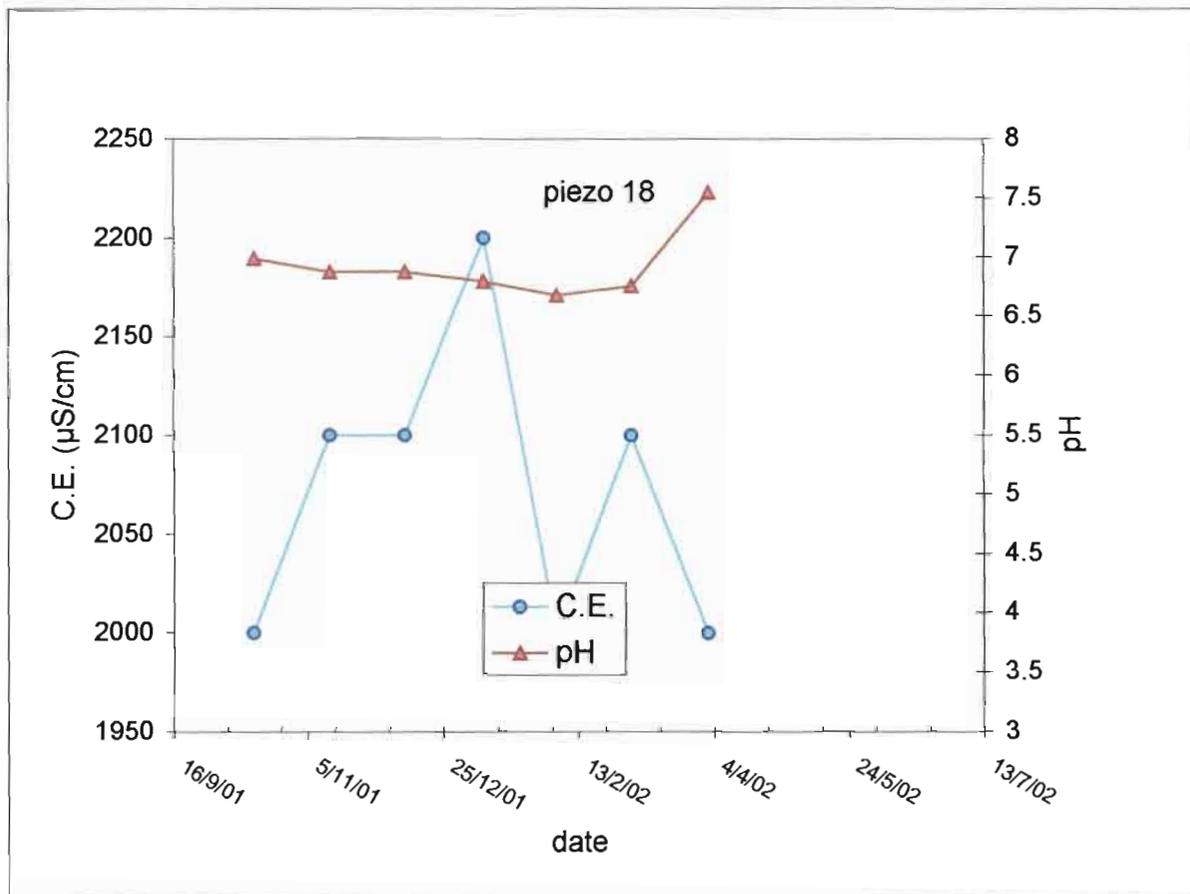
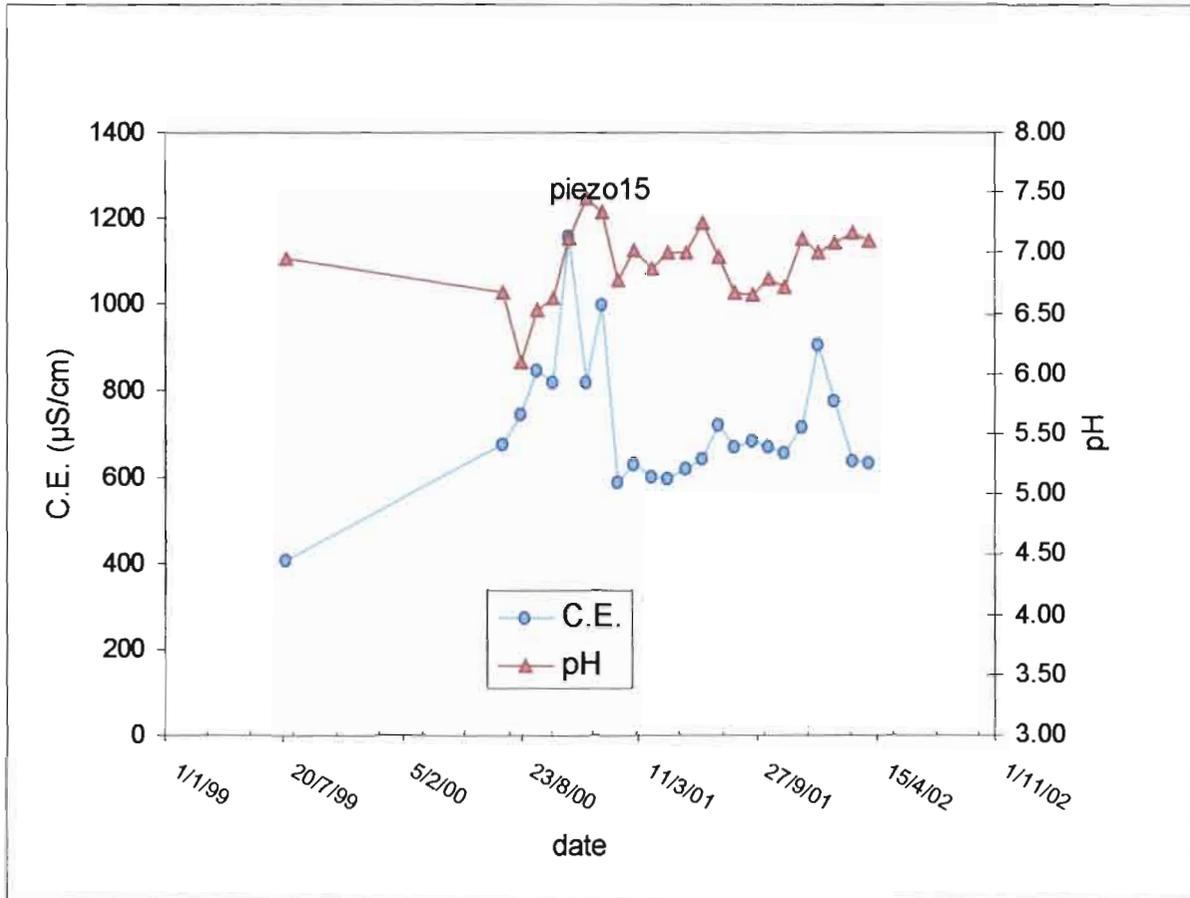












ANNEXE 5

PUBLICATION



ELSEVIER

Agricultural Water Management 46 (2001) 201–213

Agricultural
water management

www.elsevier.com/locate/agwat

Salt distribution in the Senegal middle valley Analysis of a saline structure on planned irrigation schemes from N'Galenka creek

Laurent Barbiéro^{a,*}, Sébastien Cunnac^b, Landing Mané^c,
Caroline Laperrousaz^d, Claude Hammecker^a, Jean Luc Maeght^a

^aIRD exORSTOM, B.P. 1386, Dakar, Senegal

^bESA Purpan, 75 voie du T.O.E.C., 31076 Toulouse Cedex 3, France

^cSAED, B.P. 74, St. Louis, Senegal

^dENSA, 65 Rue de St Briec, 35000 Rennes, France

Accepted 21 February 2000

Abstract

In the middle Senegal valley, the saline soil distribution is not related to the present faint topography. The absence of a relationship is one of the major constraints in establishing new irrigation schemes. The salt distribution was studied to understand its variability, and to describe its structure and spatial arrangement. Saline areas were delineated by measuring the electromagnetic soil conductivity (EC_m), a rapid technique with a portable instrument (EM38). The results indicate that the saline soils are distributed as strips. A detailed examination revealed that the major strip is actually composed of two parallel minor strips, and a comparison with aerial photographs showed that one lies in a former creek bed, and the other fringes it on the southern bank. The strip is intersected by an actual creek bed, indicating that the salt distribution is ancient, related to previous geo-morphology, and does not result from a recent remobilisation of the marine salt deposits incorporated in the soil. The identification of this relationship between the present saline soil distribution and previous geo-morphology allowed us to survey the whole N'Galenka region (about 6000 ha) using EC_m measurements on selected transects. © 2001 Elsevier Science B.V. All rights reserved.

Keywords: Salinity; Electromagnetic induction; Irrigation schemes; Senegal

* Corresponding author. Tel.: +221-8323480; fax: +221-8324307.

E-mail address: laurent.barbiero@ird.sn (L. Barbiéro).

1. Introduction

The Senegal river valley has been recently developed by the surrounding countries taking advantage of the construction of two major dams, 'Diama' in the delta and 'Manantali' upriver in Mali (OMVS, 1975). On the Senegalese side, the development of irrigation projects involves about 240,000 ha. At present, about 60,000 ha are under full irrigation control. Most of the irrigation infrastructure was constructed by the aid agencies as a response to the droughts of the 1970s (Verheye, 1995). The ecological, economical and social changes induced by this new way of water management are reviewed in a common IRD/ISRA research program, whose main objective is to define the conditions for the establishment of a sustainable irrigated agriculture in the Senegal valley.

A review of the studies concerning the environmental side of the program is given by Boivin et al. (1995). The situation is mainly characterised by a lack of information prior to irrigation and the absence of environmental impact studies.

The soil salinity is one of the major constraints for the development of irrigated agriculture. For example, in the Nianga irrigation scheme, which has been operational since 1974–1975, a large area has been deserted by the farmers due to excess salinity. This is not due to secondary salinisation but to the expression of the salt already present in the soil prior to the establishment of the rice culture. An inventory of the most suitable sites and, particularly, of the salt distribution, which is dangerously lacking, is a prerequisite for successful implementation of sustainable irrigated agriculture. At present, many irrigation schemes are under construction along the N'Galenka creek, in the middle Senegal valley. This area has never been cultivated, therefore, the occurrence of saline soil can not be related to former land-use. Preliminary studies (Laval, 1996; Zanolin, 1997) have revealed that the salt distribution is not related to the present faint topography or geo-morphological formations. In this paper, a saline area was studied to better understand its variability, and to describe its structure and spatial arrangement. The results were used in a regional survey of the saline soil distribution along the N'Galenka.

2. Site

The N'Galenka creek is located in the region of Podor (Northern Senegal) from 16°26' to 16°30'N and from 14°50' to 15°05'W (Fig. 1). The climate is semiarid, characterised by a wet season (≈ 200 mm of rainfall) from July to September, a cold dry season from October to February and a hot dry season from March to June. Dry, warm winds increase evaporation and create a shift in the plant-water balance. Average Class A pan evaporation exceeds average rainfall in each month and by over 2000 mm annually.

The Senegal valley was subjected to a recent transgression, called Nouakchottian (or Duinkerke) transgression, which started about 4300 B.P. (Faure et al., 1980) up to Boghé, today located 380 km inland. According to Michel (1973), this transgression is responsible for salt incorporation (neutral chemical composition) in the sediments into which the soil sequences were formed (Maynard and Combeau, 1960). The soils have developed after the post-Nouakchottian (or Taffolian) regression, which was

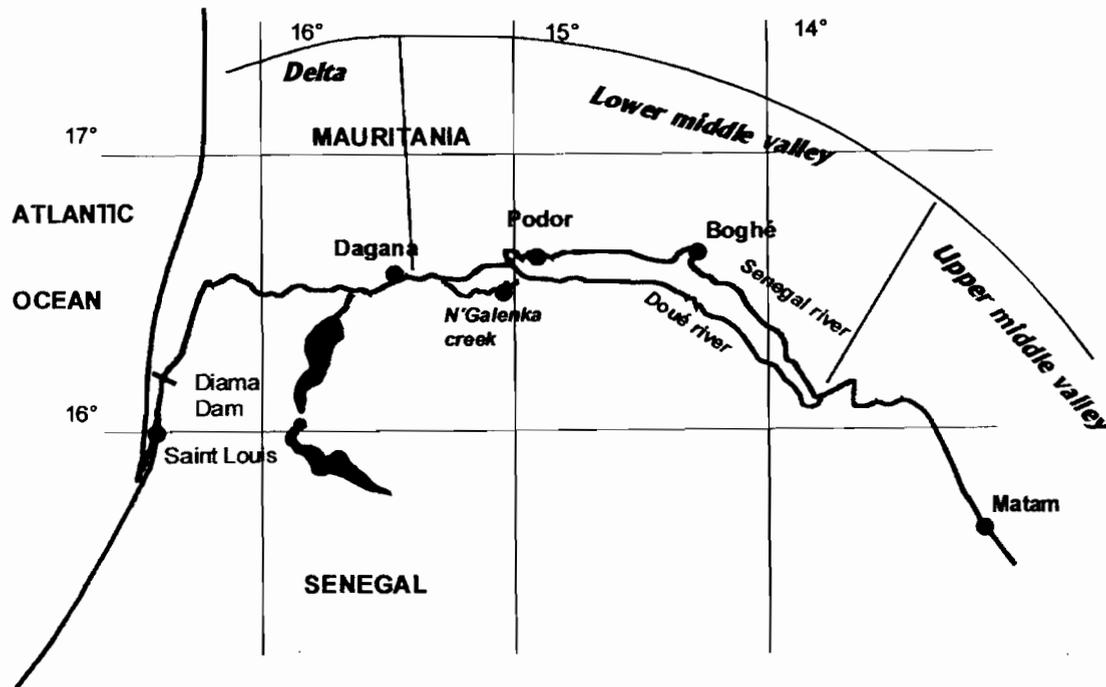


Fig. 1. Location of the study site in the middle Senegal valley.

accompanied by mangrove vegetation, in the roots of which considerable amounts of pyrite were formed by sulphur-fixing bacteria. The salts and acidity were subsequently leached in part by the river swelling, but traces of salinity are still observed up to 300 km inland. The saline soils are mainly characterised by high variability in the chemical composition of the salinity within small distances, which can be either sodium/chloride, sodium/sulphate, magnesium/sulphate or calcium/sulphate type (Barbiéro et al., 1998).

Two major geo-morphological formations are distinguished in this region: depression and former river banks (FAO-Sedagri, 1973), respectively, occupied by Vertic Xerofluvents and Typic Xeropsammets (USDA, 1975), locally known as Hollaldé and Fondé (Maynard and Combeau, 1960). Fondé soils exhibit a clay content around 30%, and a saturated hydraulic conductivity ranging from 10^{-6} to 10^{-5} m s^{-1} (Meyer, 1997). Hollaldé soils are characterised by clay contents around 65% (smectite and interstratified: 60%, kaolinite: 30%, illite: 5%, chlorite: 5%) and saturated hydraulic conductivity about 10^{-7} m s^{-1} . These clay soils constitute the best areas for irrigated rice cropping because of their suitable physical and chemical properties.

In the N'Gallenka floodplain, where irrigation has never been performed, the water table occurs generally at about a depth of 7 m, but closer to the surface under the irrigation schemes. The salt concentration in the groundwater in the middle Senegal valley varies from place to place ranging from 0.2 to 85 g l^{-1} (Laval, 1996). In the N'Gallenka region, the electrical conductivity (EC) in the water table ranges from 0.15 to 1 dS m^{-1} .

The irrigation water has a very low total dissolved content (EC ranges from 0.5 to 0.8 dS m^{-1}) and does not, therefore, reduce the quality of irrigation in terms of secondary salinisation hazard. However, it exhibits a positive calcite residual alkalinity, as it is often

the case in continental waters (Vallés et al., 1991). Therefore, it could lead to secondary alkalisation if the carbonates supplied at each irrigation remained in the soil profiles. The calcite residual alkalinity is lower than in the river Niger, where secondary alkalisation has occurred. Therefore, the alkalisation hazard is lower in the Senegal valley than in the Niger valley. Specific research on soil degradation by alkalisation and the monitoring of this phenomenon has been carried out (Hammecker et al., 1998).

Our study was carried out prior to the establishment of 48 irrigation schemes along the N'Galenka creek. These will be constructed on the former floodplain locally known as 'walo' areas (Fig. 2) and are already allotted to the surrounding villages.

3. Materials and methods

3.1. Field salinity measurements

The soil salinity was measured using a portable electromagnetic conductivity meter (Geonics EM38). This portable device can be used to monitor spatial changes in soil salinity, and hence to delineate saline areas. This instrument measures apparent soil electrical conductivity in millisiemens per metre (mS m^{-1}). The calibration of the EM38 according to soil texture, moisture, and to the type of salinity was the subject of a specific study (Laperrousaz and Barbiéro, 1999).

This work has been carried out in three stages. In the first stage, an area of 73 ha, located at the eastern part of the N'Galenka region around a large winding of the creek (sector VI, Fig. 3), has been surveyed using vertical measurements according to a $25 \text{ m} \times 25 \text{ m}$ regular grid. In the vertical mode, 75% of the signal is estimated to come from the top 1.8 m of the soil (McNeill, 1980). The data was analysed geostatistically. In the second stage, a 2 ha area located in the original surveyed area (Fig. 3) was subjected to a more detailed salinity survey ($10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ regular grid), coupled with topographical measurements. Finally, the saline area delineated on the computed map was compared to aerial photographs of the site (Geotronics, 1980) in order to identify the relationship between the salt distribution and the actual or previous geo-morphological formations. A regional survey of the whole N'Galenka was attempted from EC_m measurement transects, located so as to maximise the intersection with the structures identified on the aerial photograph and suspected of being saline. EC_m values over 100 mS m^{-1} were used to delineate the saline areas.

3.2. Geostatistical treatments

A chi-squared test showed that the data may not be assumed to have a normal distribution. Therefore, the calculation was performed on a theoretical distribution of the data by lognormal transformation as recommended by Dowd (1984),

$$z(x_i) = \ln(s(x_i) + 0.05) \quad (1)$$

where $s(x_i)$ is the EC_m data at x_i , $z(x_i)$ the log-transformed data, and 0.05 a constant because some $s(x_i)$ were equal to zero. An estimate of the sample variogram is given by

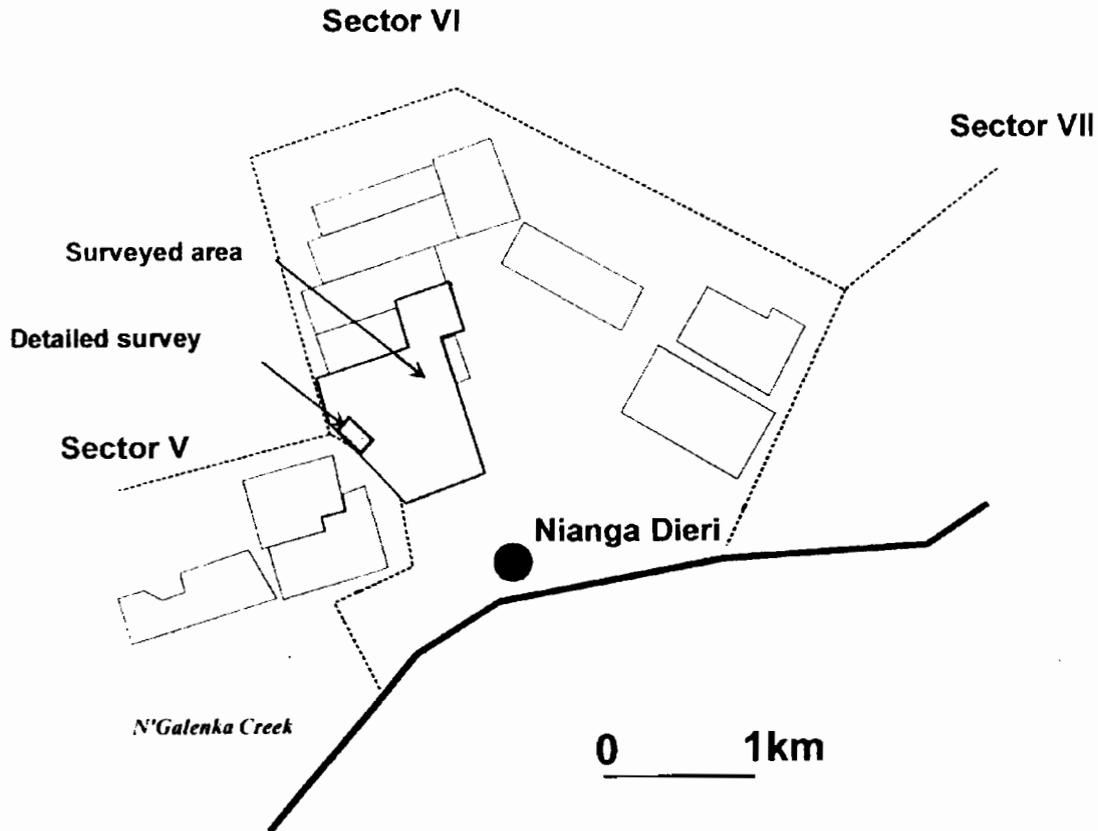


Fig. 3. Location of the surveyed area along the large winding of the N'Galenka.

the formula:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (z(x_i) - z(x_i + h))^2 \quad (2)$$

where $N(h)$ is the number of pairs of points and $z(x_i)$ and $z(x_i+h)$ are the log-transformed ECm value at x_i and x_i+h . Raw and directional variograms were calculated to detect an eventual anisotropy in the field salinity. The kriged map is built from a spherical model fitted on the sample variogram. This automatic computation was performed using the GEOSTAT-PC software (Boivin, 1989).

4. Results and discussion

4.1. Structure of the saline area on the surveyed zone

High ECm values are observed, the maximum values being 390 mS m^{-1} , with an average value of 55.95 mS m^{-1} , and a standard deviation of 71.94 mS m^{-1} . The variation coefficient (128.6%) indicates a high dispersion of the data around this average value.

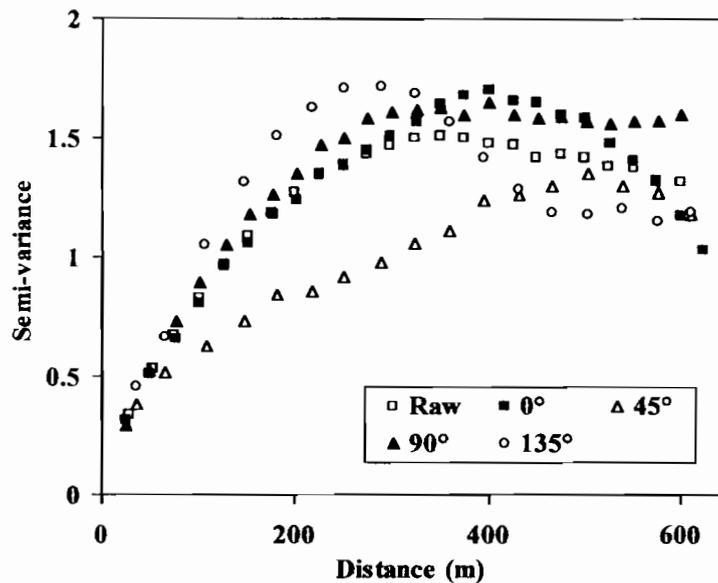


Fig. 4. Raw and directional sample variogram.

The experimental variogram built from the EC_m data is presented in Fig. 4. The range is about 300 m and the nugget effect is low, indicating that the density of measurements is sufficient to describe the spatial structures at small distances. A slight anisotropy is detected by comparing the raw and directional variogram, but it has not been taken into account for the computation. It indicates a high dependence of the EC_m values in the direction 45° (Northeast/Southwest) up to a distance of 300 m.

The computed EC_m kriged map is presented in Fig. 5 and confirms the heterogeneity of the studied site in terms of salinity. A saline area clearly appeared as a strip about 200 m wide and 800 m long, running in a NE–SW direction. This EC_m value distribution is consistent with the anisotropy detected by the directional variograms. Some small isolated saline areas were detected to the south of this main strip.

The characteristics of this strip are presented on Fig. 6. Detailed examination of the major saline strip reveals that it is actually composed of two parallel minor strips, which exhibit higher EC_m values. An asymmetry can be detected in the boundary of the major saline strip, which is discrete in the north and more diffuse in the south. This asymmetry is reinforced by the topographic data. The minor strip located at north lies in a depression, whereas that located at the south is on higher ground (Figs. 6 and 7). Thus, the distribution of the saline area seems to depend on site morphology, which were further studied from aerial photographs.

4.2. Comparison with the aerial photograph

The salt distribution can be related to the remains of a former creek not easily perceptible in the field but detectable on the aerial photograph. The northern minor strip is located in the former creek bed, whereas the southern one fringes it on the southern bank (Fig. 8). This former creek can be followed on the aerial photograph, and therefore, used as support for a regional survey.

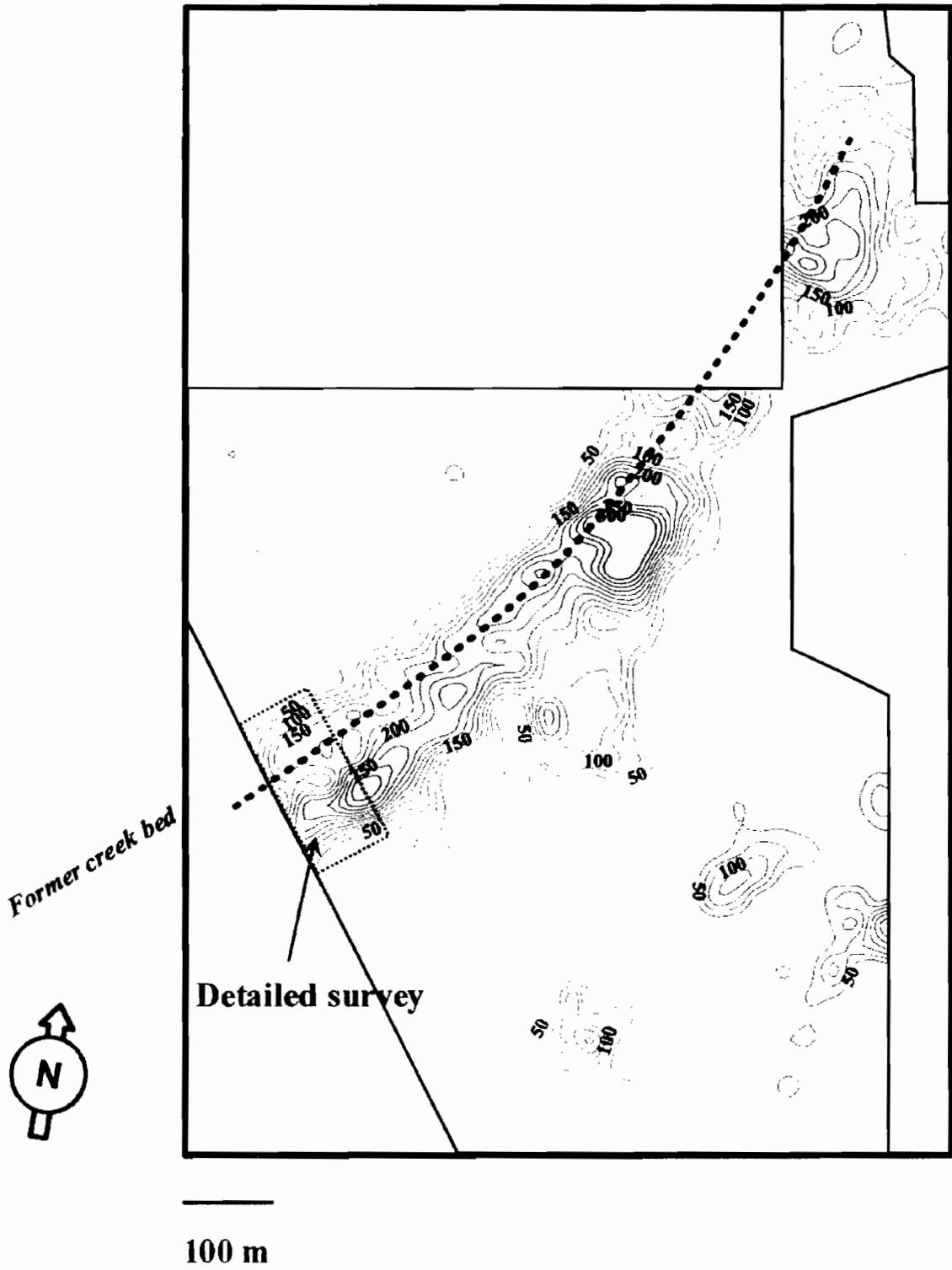


Fig. 5. ECm kriged map of the surveyed area.

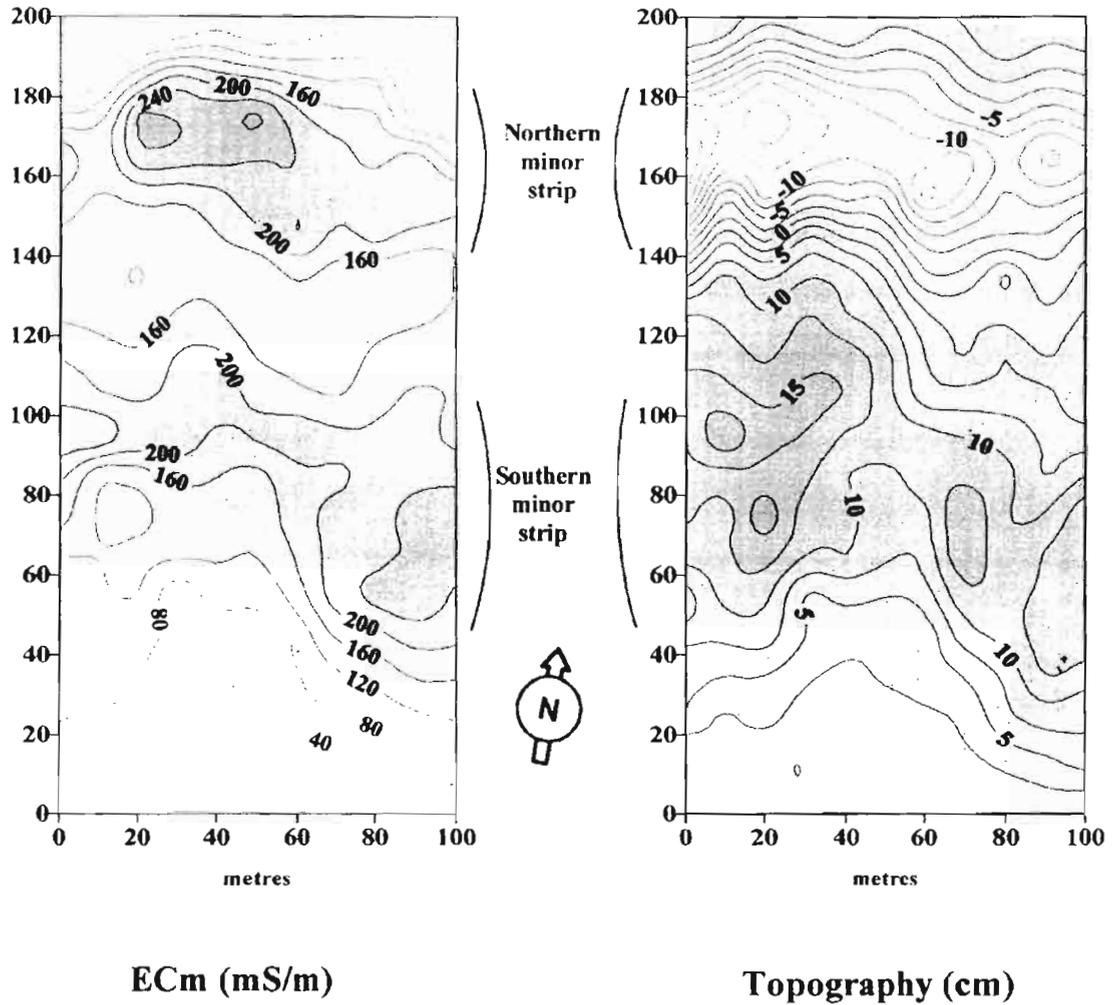


Fig. 6. Distribution of ECm and topography values in the major saline strip.

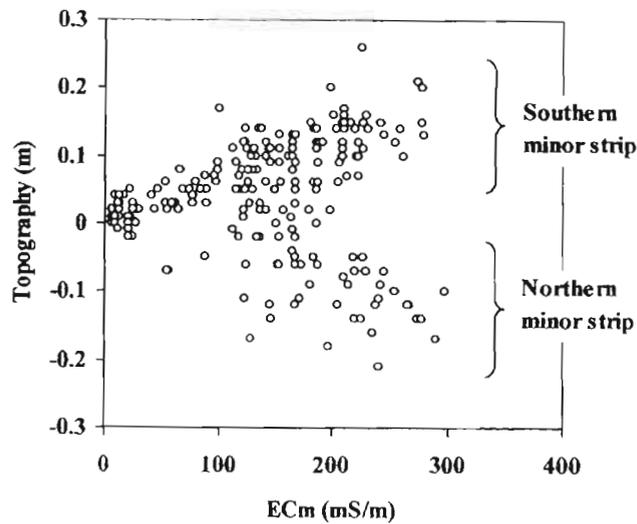


Fig. 7. Relationship between ECm and topography.

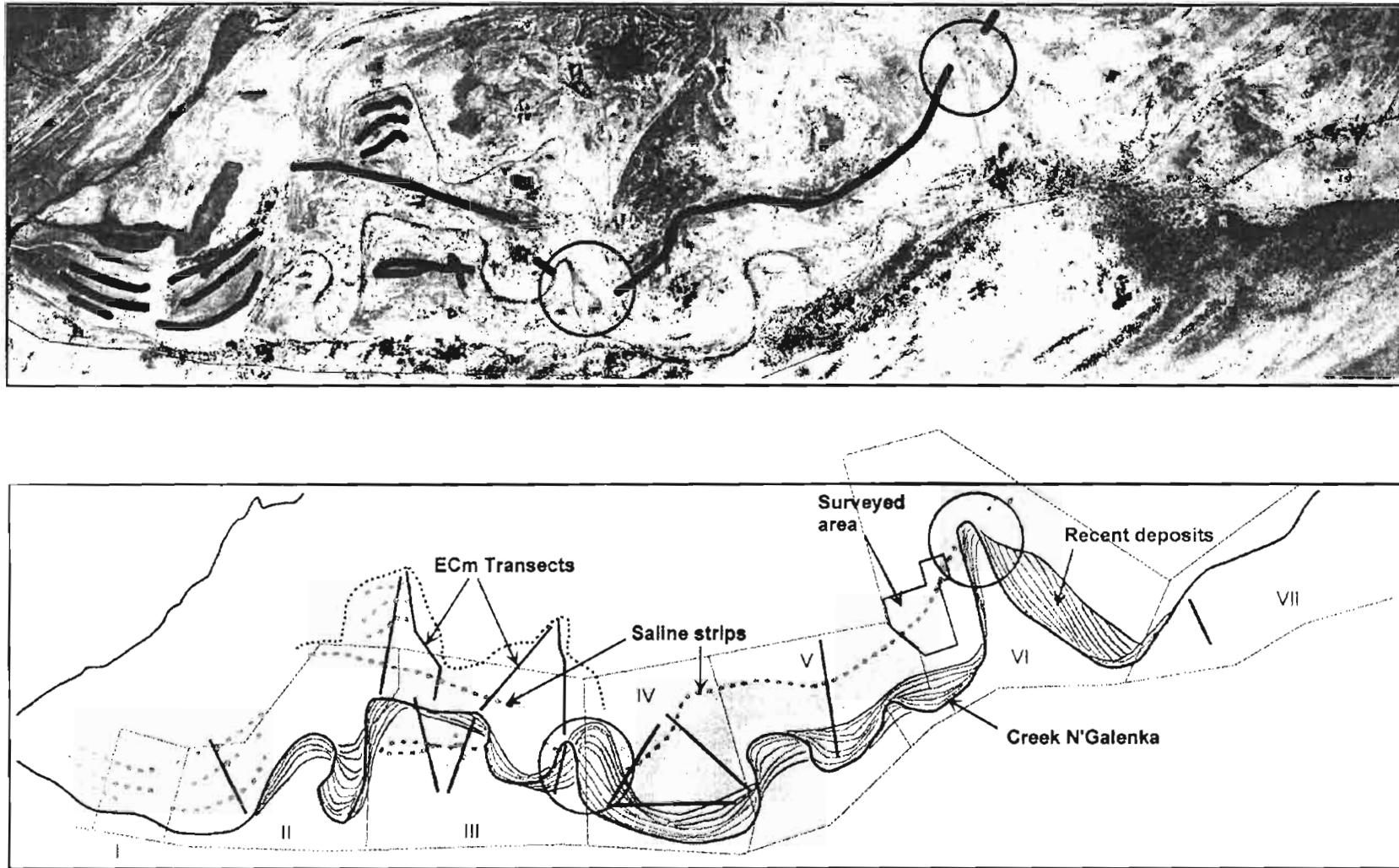


Fig. 8. Distribution of the saline soils in the whole N'Galenka region.

4.3. Survey of the whole N'Gallenka area

The results of the regional survey, extrapolated from ECm measurements on 11 transects, are presented on the Fig. 8. The saline strip detected on the surveyed area in sector VI is continuous in the north of the present N'Gallenka creek bed in sectors V and IV. This strip is intersected by the present bed and the most recent non-saline deposits of the N'Gallenka at two points, the first along the large winding on sector VI, and the second one along another winding located between sectors III and IV. These two points are shown by circles on Fig. 8. This pattern of saline soil distribution indicates that it existed prior to the present N'Gallenka and does not correspond to a recent remobilisation of the salt.

The saline strip appears again down to sector II, on the other side of the winding, where it is intersected by other deposits coming from the north in which three saline strips were detected. These strips coming from the north are continuous with the Pont Gary site where Gascuel-Odoux and Boivin (1994) also detected a saline strip. Another saline strip is detected in sector III on the other side of the N'Gallenka. Fortunately, the Soil in sector VII, located upstream of the planned development area, is non-saline. From the investigation and mapping details (Fig. 8), verification in the field revealed that all the saline areas had been detected from these 11 transects, located so as to intersect the former geo-morphological formations. This confirms the efficiency of the method implemented on this site.

During this regional survey, it appeared that the morphological characteristics of the strip detected in sector VI were frequently observed and, therefore, they are representative of the whole N'Gallenka region. In particular, the major strip is frequently composed of two minor strips exhibiting higher ECm values, the northern one located in a depression and the southern one on higher ground. This detail is not presented on Fig. 8 where only the global saline structure is drawn.

The survey revealed that a large proportion (almost 10%) of the planned irrigation schemes is composed of saline soils. Each irrigation scheme was allotted to the surrounding villages before its establishment, therefore, according to this allocation, it can be noted that some villages will be particularly affected by the saline soils pattern. In particular, the farmers of Nianga, Thiewle (sector V) and Pendaou (sector III) will be strongly affected whereas those of Djamel (sector III) will not suffer with this problem.

5. Conclusion

As a result of climatological problems in the past decades, the traditional agriculture in the Senegal valley has shifted to irrigated agriculture in the former floodplain areas. Many irrigation schemes are presently under construction along the N'Gallenka creek. One of the prerequisites, generally lacking, is an inventory of the salt distribution in this area, which is a major constraint for a sustainable irrigated agriculture. The systematic survey of soil salinity using an electromagnetic conductivity meter (EM38), on a 73 ha survey area, reveals a unique pattern: the salt is distributed as a strip in a SW–NE

direction. This saline strip, of ancient origin, is not correlated with the present but with the previous geo-morphology, and detectable on the aerial photographs. This relationship being established, it was possible to survey the whole N'Gallenka region on selected transects for EC_m measurements. The regional study confirms that the difference in salinity are quite pronounced and that the saline soil distribution followed a regular pattern as stripes that are more than 10 km long and about 100–200 m wide, and related to the previous geo-morphology. Similar saline strips were revealed by other survey studies in the lower middle valley, for example, in Ouromadiou, Nianga, Pont Gary, Guia, M'Boyo (Gascuel-Odoux and Boivin, 1994; Laval, 1996; Barbiéro et al., 1998). Therefore, this structure appears representative of the salt distribution in the lower middle valley. The specific characteristics of the saline strips, which are actually composed of two parallel strips, one in a depression and the other on higher ground, must be taken into account in proposing a model for the origin of this salt distribution.

The method developed here, far from being expensive in time and equipment, is recommended for fast mapping of saline soil distribution before establishment of new irrigation areas.

Acknowledgements

This work was partially supported by the Regional Centre for Research on Sudano-Sahelian Irrigation Systems (PSI-CORAF).

References

- Barbiéro, L., Hammecker, C., Boivin, P., Aeolian origin of some saline soil stripes in the Senegal middle valley. In: Proceedings of the 16th ISSS World Congress on Morphological and Geo-Chemical Considerations. 20–26 August 1998, Montpellier, France.
- Boivin, P., 1989. Geostat-PC. Logiciel interactif pour le calcul géostatistique. ORSTOM Ed.
- Boivin, P., Dia, I., Lericollais, A., Poussin, J.C., Santoir, C., Seck, S.M., 1995. Nianga, laboratoire de l'agriculture irriguée en moyenne vallée du Sénégal. Colloques et séminaires, ORSTOM Ed., Paris.
- Dowd, P., 1984. Lognormal geostatistical. *Science de la Terre. Série Informatique Géologique* 18, 49–68.
- FAO-Sedagri, 1973. Etude hydro-agricole du bassin du fleuve Sénégal. Etude pédologique, map 1/50,000^e, 251 pp.
- Faure, H., Fontes, J.C., Hebrard, L., Monteillet, J., Pirazzoli, P.A., 1980. Geoidal changes and shore-level tilt along holocene estuaries: Senegal river area, West Africa. *Science* 210, 421–423.
- Gascuel-Odoux, C., Boivin, P., 1994. Variability of variograms and spatial estimates due to soil sampling: a case study. *Geoderma* 62, 165–182.
- Geotronics, 1980. Couverture aérienne mission Teledyne Geotronics USA. Photographies Infra-rouge fausses couleurs 1/50 000^{ème}.
- Hammecker, C., Barbiéro, L., Boivin, P., Samba Diene, R., 1998. Contribution of modelling solute and water transfer to the irrigation of saline soils in the valley of river Senegal. In: Proceedings of the 16th ISSS World Congress. 20–26 August 1998, Montpellier, France.
- Laperrousaz, C., Barbiéro, L., 1999. Influence de la variabilité du faciès chimique sur la conductivité électromagnétique. In: BRGM, INRA, IRD, UPMC (Eds.), *Geofcan*, Géophysique des sols et des Formations Superficielles. Orléans, pp. 63–66.
- Laval, F., 1996. Rapport d'activités. Travaux d'expérimentation ORSTOM-FED dans la moyenne vallée du Fleuve Sénégal. Région de Podor. ORSTOM de Dakar Hann.

- Maynard, J., Combeau, A., 1960. The residual effect of submersion on soil structure (Demonstrated by applying S. Henin's index of structural instability). *Afr. Soils (Sols Africains)* 5, 123–148.
- McNeill, J.D., 1980. Survey Interpretation Techniques: EM38. Tech. Note TN-6, Geonics Pty, Ltd., Ont., Canada.
- Meyer, L., 1997. Etude du transport des sels au cours des écoulements et de l'évolution des propriétés physiques du sol au contact de différentes solutions salines. Mém. EPF Lausanne, 40 pp.
- Michel, P., 1973. Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude géomorphologique. Mém. ORSTOM 63, 752 pp.
- OMVS, 1975. The objectives and the main outlines of the integrated development strategy of the Senegal river basin. OMVS, Dakar, Senegal, 30 pp.
- USDA, 1975. Soil Taxonomy. A basic system for soil classification for making and interpreting soil survey. US Dept. Agric., Soil conserv. Serv., Agric. Handbook 436, Washington, DC, 754 pp.
- Vallès, V., Y.A. Pachepsky, A.A. Ponizovsky, 1991. Invariant criteria for irrigation water quality assessment in arid and semi arid regions. In: *Genesis and Control of Fertility of Salt Affected Soils*. ISSS Sub-Commission on Salt Affected Soils Science, USSR, V.V. Dokuchaev Soil Institute, Moscow, pp. 330–333.
- Verheye, W.H., 1995. Impact of climate and soil conditions on conception and implementation of irrigation schemes in the Senegal river basin. *Agric. Water Manage.* 28, 73–94.
- Zanolin, A., 1997. Etude de site pour l'implantation d'un réseau piézométrique sur périmètres irrigués (Vallée du fleuve Sénégal). Rapport DESS, Univ. Grenoble/ORSTOM de Dakar Hann.