

# Variabilité et répartition de l'argile et de la salinité dans le périmètre de Kalaât Landelous (Tunisie)

## Application à l'évaluation des risques de salinisation

M. Hachicha<sup>(1)</sup>, A. M'Hiri<sup>(2)</sup>, F. Bouksila<sup>(2)</sup> et I. Bach Hamba<sup>(2)</sup>

(1) Ministère de l'Agriculture-Direction des Sols 17, rue Hédi Karray 2080 Ariana - Tunisie

(2) Laboratoire de Science du Sol - Institut National Agronomique de Tunisie, 43, Avenue Charles Nicolle 1082 Tunis - Tunisie

### RÉSUMÉ

Dans le grand système hydro-pédologique de la Mejerda, l'hydromorphie et l'halomorphie affectent à des degrés divers les sols peu évolués d'apport alluvial. En particulier, les formations alluvionnaires de la Basse Vallée de la Mejerda, en bordure de mer, évoluent sous l'effet d'une nappe phréatique salée proche de la surface du sol. Ces terres étaient initialement exploitées extensivement par des cultures céréalières et fourragères et comme parcours. Elles ont fait l'objet d'une mise en valeur, pour le développement de cultures maraichères et fourragères irriguées d'été, par l'installation d'un réseau d'assainissement et de drainage, d'une station de pompage et d'un réseau d'irrigation. L'étude géostatistique des principales propriétés physico-chimiques a permis d'analyser leur structure et leur variabilité spatiale. Les paramètres hydro-pédologiques analysés à différentes échelles et à des pas de mesures de plus en plus petits ne montrent pas une réduction significative de la variabilité. Pour les paramètres physiques, la variabilité est plus forte en surface. Pour les paramètres chimiques, la variabilité est plus faible en profondeur et en surface mais plus forte aux niveaux intermédiaires soumis à la fois aux effets des précipitations et à celle de la nappe. Les profils salins sont descendants ou à ventre salin. A proximité de la nappe, le sol s'enrichit en chlorure et en sodium. Néanmoins, les solutions possèdent une réserve en gypse leur évitant la sodisation. Les risques de salinisation sont manifestes. Les secteurs situés au nord-est, au sud et à l'est du périmètre présentent des risques de salinisation élevés. Ils seront les plus à contrôler.

### Mots clés

Unités texturales - variabilité spatiale - salinité - nappe phréatique - risque de salinisation - Tunisie.

### SUMMARY

VARIABILITY OF SALINE AND CLAY SOIL PROPERTIES AND RISKS OF SALINIZATION OF THE IRRIGATED PERIMETER OF KALAAT LANDELOUS (TUNISIA).

In large hydro-pedological system of the Mejerda, waterlogging and salt affect, at different degrees, xerofluent soils. The alluvial formations of the Mejerda's lower valley near the sea is particularly affected by the effect of saline of subsurface watertable. These lands, initially used for annual crops and grazing, have been reclaimed, to improve summer fodder crops, by installing a drainage network, pumping station and an irrigation network. A geostatistical analysis of the main physical and chemical properties has shown their structure and their spatial variability.

The analysis of the hydro-pedological parameters, at different scales and at different steps of measure, more and more short, does not show a significant reduction of their variability. For the physical parameters, variability is more higher on surface of the soil. For the chemical parameters, variability is more lower in depth and on surface but more higher on the intermediate levels submitted, both, to effect of the rain and the watertable. In depth, the concentration of chloride and sodium became more higher. However, solutions have a stock of gypsum which protect the soil from sodisation.

The perimeter of Kalaât Landelous has a big risk of salinization. This risk is clear and high specially on north-east, south and east of the perimeter.

Key-words

Textural units - spatial variability - salinity - surface watertable - risk of salinisation - Tunisia.

## RESUMEN

### VARIABILIDAD DE LAS PROPIEDADES DE LOS SUELOS ARCILLOSOS SALADOS Y RIESGOS DE SALINIZACIÓN DEL PERÍMETRO IRRIGADO DE KALAAT LANDELOUS (TÚNEZ)

En el grand sistema hidro-edafológico de la Mejerta, el hidromorfismo y el halomorfismo afectan con varios grados los suelos poco evolucionados de aporte aluvial. En particular las formaciones aluviales de la parte baja del valle de la Mejerta, cerca del mar, evolucionan bajo el efecto de un manto freático salado cerca de la superficie del suelo. Estas tierras estaban inicialmente cultivadas extensivamente por cultivos de cereales y de forrajes y como pastoreo. Hicieron el objeto de mejoramiento, para el desarrollo de cultivos hortelanos y de forrajes irrigados, con la instalación de una red de desagüe y de drenaje, de una estación de Bombeo y de una red de irrigación. El estudio geoestadístico de las principales propiedades físico-químicas a permitido analizar su estructura y su variabilidad espacial. Los parámetros hidroedafológicos analizados a diferentes escalas y a pasos de medidas cada vez más reducidos no muestran una reducción significativa de la variabilidad. Para los parámetros físicos, la variabilidad es más fuerte en superficie. Para los parámetros químicos, la variabilidad es más pequeña en profundidad y en superficie pero más fuerte en los niveles intermedios sometidos a la vez a los efectos de las precipitaciones y a los del manto. Los perfiles salinos están bajando o con «vientre» salino. Cerca del manto, el suelo se enriquece en cloruro y en sodio. Sin embargo, las soluciones tienen una reserva en yeso que evitan la sodización.

Los riesgos de salinización son reales. Los sectores situados al noreste, al sur y al este del perímetro presentan riesgos de salinización elevados. Serán estos últimos los que haya que controlar con particular atención.

Palabras claves

Unidades texturales, variabilidad espacial, manto freático, riesgo de salinización, Túnez.

**S**ur les 340.000 ha de périmètres irrigués en Tunisie, environ 30 % sont affectés par une nappe superficielle salée. En outre, la majorité des eaux d'irrigation titrent entre 2 et 3 g/l. La salinisation est ainsi un phénomène assez fréquent et un problème assez sérieux en Tunisie comme ailleurs dans le Maghreb (Laudelout et al., 1994), dans la région méditerranéenne (Hamdy et al., 1995) ou dans le Monde (Szabolcs, 1989 ; Cheverry, 1995 ; Cheverry, 1996 ; Cheverry et Bourrié, 1996). Les recherches menées en Tunisie ont montré qu'il est possible d'utiliser les eaux moyennement salines en irrigation, sans gros risque, en respectant certaines règles de gestion, des eaux et des sols (CRUESI, 1970). Il n'en demeure pas moins que ces règles ne sont pas toujours respectées, et plusieurs périmètres encourent des risques de dégradation de leurs sols (Hachicha et al., 1994). Les risques se font sentir principalement dans les zones caractérisées par une faible pluviométrie et une forte évaporation, une eau d'irrigation rare et salée, une nappe phréatique peu profonde et salée et une texture fine. La mise en valeur du périmètre de Kalaât Landelous, où s'expriment tous ces facteurs, constitue une action authentique de bonification de sols médiocres par l'irrigation avec une eau de qualité relativement moyenne. Les dangers qu'encourt le périmètre imposent une parfaite connaissance des régimes hydriques et salins du sol et de leur variabilité spatio-temporelle afin de pouvoir élaborer les règles nécessaires à une meilleure gestion des eaux et des sols (Bach Hamba, 1992 ; Bouksila, 1992).

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Le périmètre de Kalaât Landelous

La plaine de Kalaât Landelous est située à 35 Km au Nord de Tunis sur la rive droite de la Mejerda et en bordure de la Méditerranée (figure 1) à une altitude de 3 à 5 m. Caractérisée par un bioclimat méditerranéen semi-aride supérieur, elle reçoit près de 470 mm de pluie par an et son déficit hydrique climatique annuel s'élève à plus de 900 mm.

Cette plaine alluviale est récemment gagnée sur la mer (Jauzein, 1971). Le réseau hydrographique est constitué de l'Oued Mejerda et de ses anciens lits. Les sols peu évolués d'apport fluvial, sont formés de matériaux argilo-limoneux fins à dominance de montmorillonite déposés par la Mejerda. On distingue des sols alluviaux sains et des sols avec des caractéristiques de salinité et de sodicité.

L'aménagement hydro-agricole du périmètre entrepris en 1986, a consisté en l'installation d'un réseau de drainage qui comprend des drains tertiaires enterrés, des canaux secondaires à ciel ouvert, deux émissaires principaux et une station de pompage qui refoulent les eaux de drainage vers la mer. Pour son irrigation par aspersion, le périmètre a été divisé en

unités parcellaires de 5 ha desservies par des bornes d'irrigation à partir d'une station de relevage des eaux de la Mejerda.

## Méthodes

### Caractérisation des eaux et des sols

La prospection de terrain a été menée entre 1989 et 1990, après drainage et avant la mise en irrigation du périmètre.

La variabilité des propriétés des sols a été étudiée à différentes échelles et à différents pas de mesure. Sur plus de 1400 ha et au niveau de 144 sites, des prélèvements de sols ont été effectués à 10, 50, 100, 150 et 200 cm selon une maille assez régulière d'environ 200 m x 280 m soit une borne d'irrigation sur deux (figure 1). Cette analyse globale de la texture, nous a permis de distinguer des unités fonctionnelles homogènes définies sur la base de leur texture. Elle nous a aussi guidé dans le choix d'un premier transect T1 de 5 200 m de longueur, le long duquel les propriétés physiques et hydriques ont été mesurées. Cette analyse a été complétée par des mesures le long d'un second transect T2 de 500 m de longueur. Nous avons pu apprécier la variabilité des paramètres physiques à des pas de mesure de 200 m sur le transect T1 puis à des pas de 20 m sur le transect T2.

L'organisation des sols a été observée au niveau de 5 profils pédologiques situés sur le transect T1.

La salure des sols a été abordée sur l'ensemble du périmètre. Comme elle est liée aux caractéristiques de la nappe et à leur variabilité, un suivi de la nappe a été effectué au niveau d'un réseau de 60 piézomètres repartis régulièrement sur le périmètre (figure 1).

La pérennité de la mise en valeur est dépendante de la maîtrise du système sol/nappe soumis aux apports d'eaux d'irrigation salées. A cet effet, une zonation des risques de salinisation a été établie à la base des propriétés des sols et des caractéristiques de la nappe et de leur variabilité spatio-temporelle.

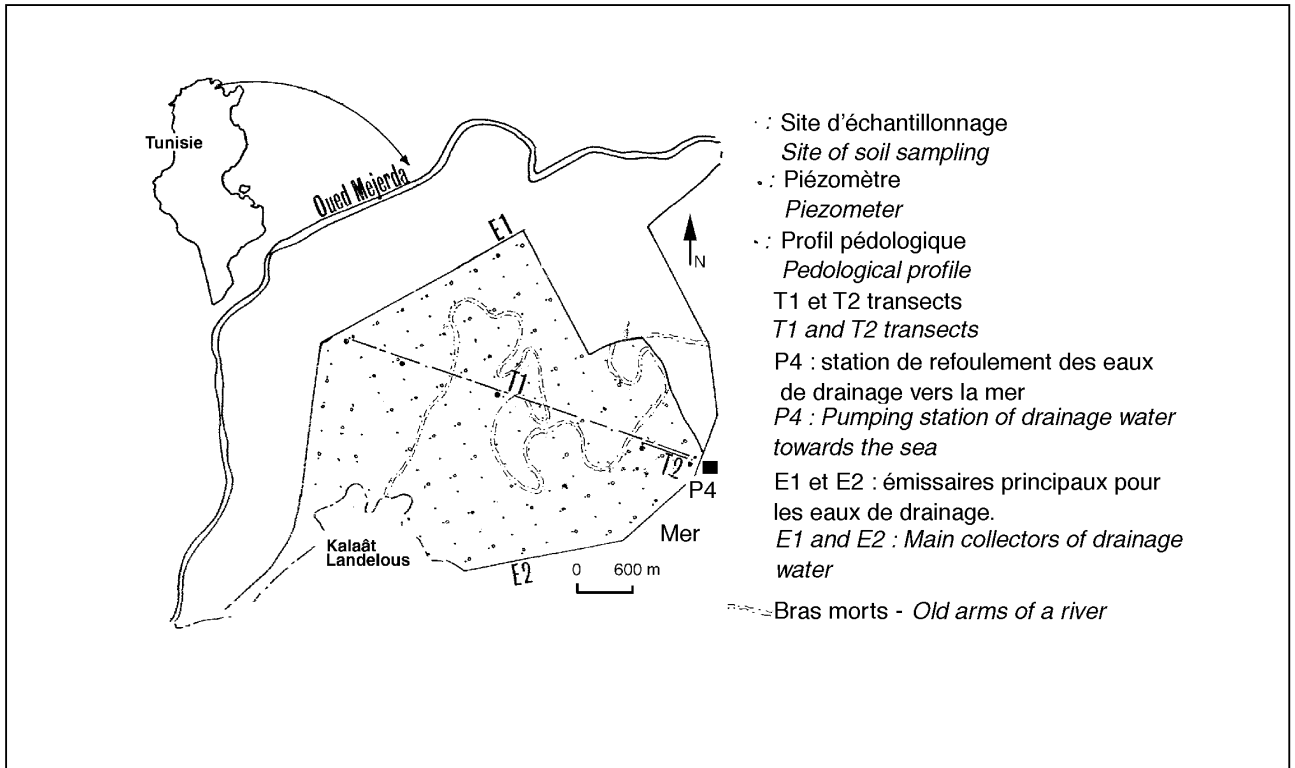
### Analyses des données

Elles comportent :

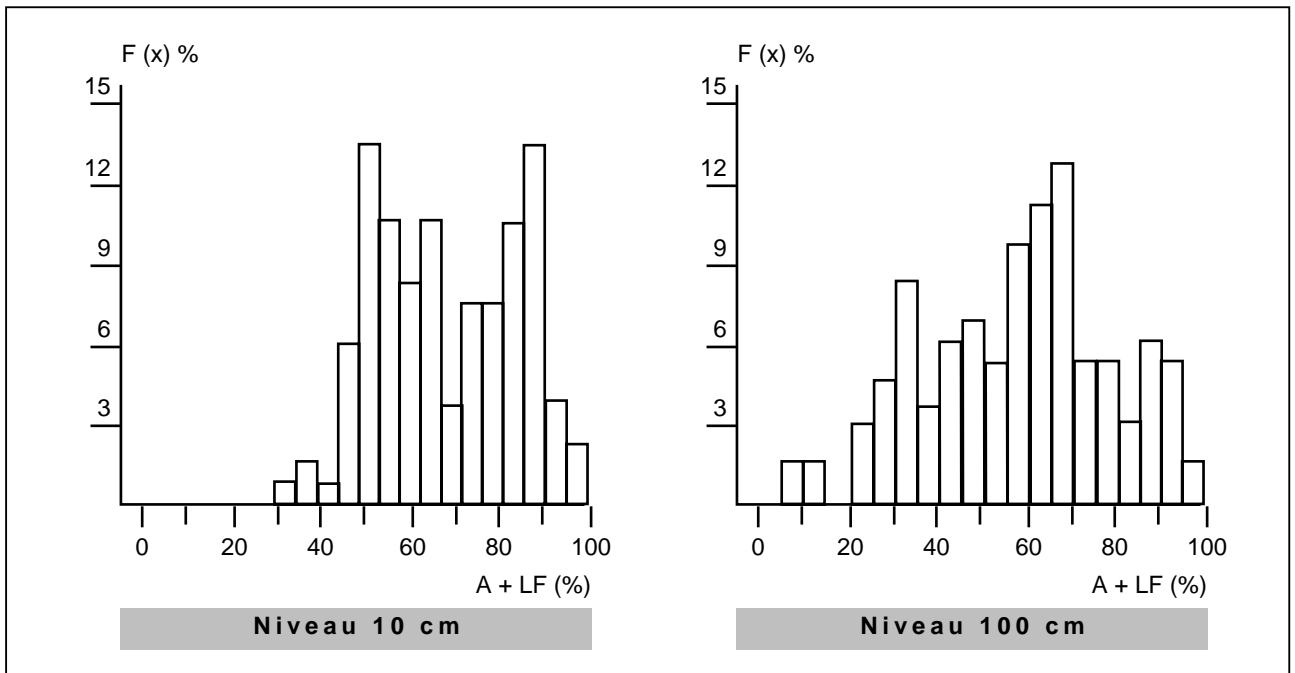
- Pour définir la structure des variables, les traitements statistiques permettant la description de la distribution des données (loi de distribution et moyenne), et leur dispersion (coefficient de variation), (Vauclin, 1982).

- Pour la structure spatiale des paramètres, nous avons employé la géostatistique. Les variables analysées sont considérées comme des variables régionalisées, c'est-à-dire qu'elles présentent simultanément un aspect aléatoire et un aspect structuré (Gascuel-Odoux et al., 1995). On cherche en premier lieu à caractériser cette structure spatiale en construisant les semi-variogrammes expérimentaux qui sont ensuite modélisés. Les cartes d'isovaleurs interpolées sont obtenues par un krigeage ordinaire (Gascuel-Odoux, 1984 ; Voltz, 1986 ; Walter, 1990 et Boivin, 1991).

**Figure 1** - Secteur étudié dans le périmètre de Kalaât Landelous et les lieux d'échantillonnage du sol et des eaux de la nappe.  
 Figure 1 - Studied area in the perimeter of Kalaât Landelou and sites for soil and groundwater sampling.



**Figure 2** - Exemples d'histogrammes des fréquences relatives de la fraction fine (A+Lf).  
 Figure 2 - Exemples of histograms of relative frequency of the fine fraction (A+Lf).



Dans le cas du krigeage ordinaire, on se place dans le cadre de l'hypothèse intrinsèque, hypothèse de stationnarité d'ordre 2 sur les accroissements (Gascuel-Oudoux et al., 1995), c'est-à-dire sur les différences  $[Z(x) - Z(x+h)]$ , soit :

- d'une part, l'espérance des accroissements ne dépend pas de  $x$  :

$$E[Z(x+h) - Z(x)] = 0 \text{ quel que soient } x \text{ et } h \quad (1)$$

- d'autre part, les accroissements ont une variance finie, liée à  $h$  et indépendante de  $x$  :

$$\text{VAR}[Z(x) - Z(x+h)] = 2\gamma(h) \quad (2)$$

La fonction  $\gamma(h)$  est appelée variogramme.

Tenant compte de (1), l'équation (2) devient :

$$\gamma(h) = 0,5 \cdot E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\}$$

Un variogramme se caractérise par :

- Un comportement à l'origine : la courbe peut partir de l'origine et comporter une variance à l'origine appelée effet de pépité ;
- un palier et une portée .

Ces points sont utilisés pour modéliser le variogramme brut, lequel modèle est repris pour l'interpolation des cartes d'isovaleurs. L'estimation par krigeage respecte deux conditions. Elle est en premier lieu non-biaisée. En second lieu, on cherche à minimiser la variance d'estimation.

Le traitement géostatistique est réalisé moyennant le logiciel GEOSTAT-PC (Boivin, 1990). Ce logiciel offre deux fonctions à l'utilisateur : un module de variographie et un deuxième module de cartographie par krigeage d'une variable donnée.

## RÉSULTATS

### Mise en évidence d'unités texturales homogènes

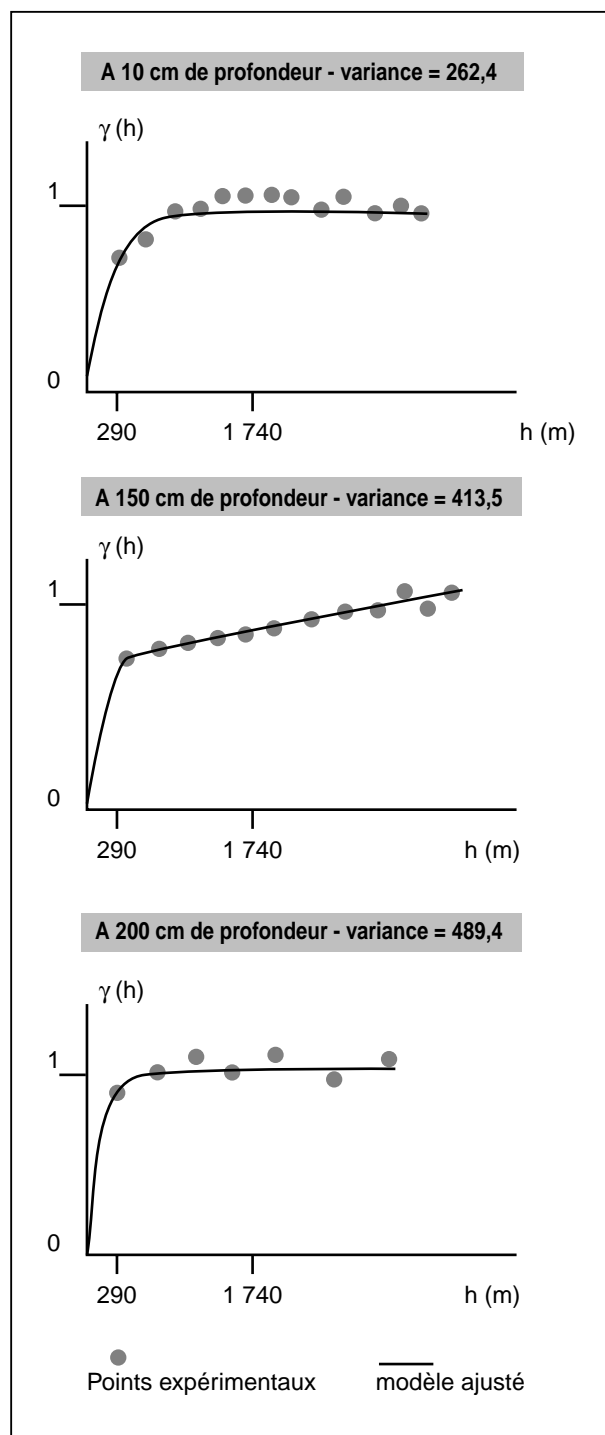
La répartition des fractions granulométriques analysées sur plus de 1400 ha se révèle hétérogène et non uniforme (figure 2).

A tous les niveaux, l'argile et le limon fin sont positivement corrélés entre eux et négativement corrélés aux limon grossier et sable (Analyse en Composante Principale). Les fractions fines (argile et limon fin) sont moins dispersées que les fractions grossières (C.V. < 46 % contre C.V. > 75 %).

Les variogrammes bruts de l'argile + limon fin révèlent un important effet de pépité (figure 3). Nous avons imputé ce comportement à l'origine au pas d'échantillonnage élevé de 200 m. Aux variogrammes moyens, nous avons ajusté des modèles sphériques et sphériques + linéaires. Les portées des variogrammes expérimentaux varient de 300 à 800 m, sont très élevées comparativement à celles rapportées dans la littérature. Burrough (1983) a montré que la portée augmente avec l'intervalle d'échantillonnage alors que l'hypothèse de station-

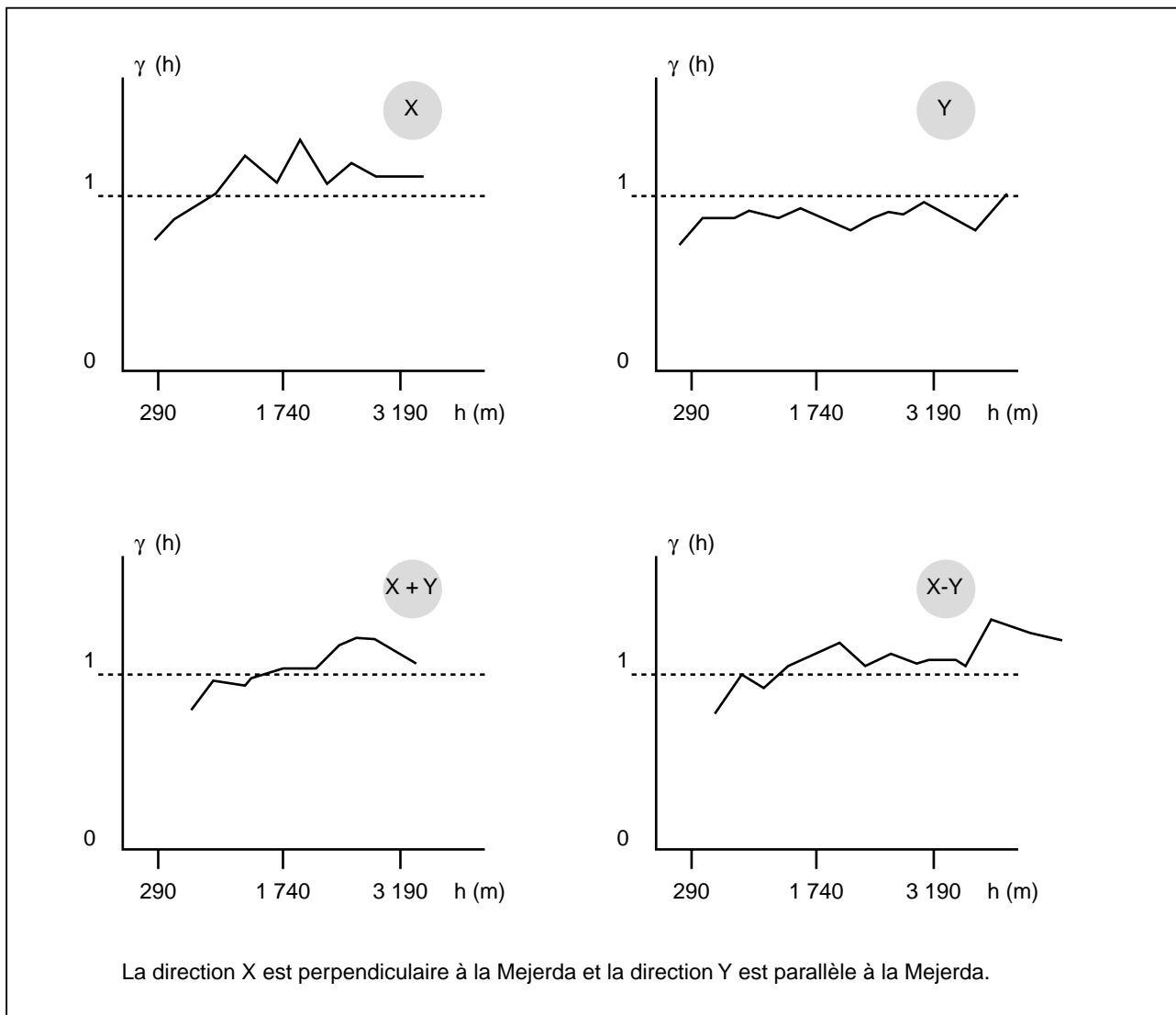
**Figure 3** - Variogrammes moyens normés de l'argile + limon déterminés au niveau du périmètre

Figure 3 - Average variograms of clay + silt for the perimeter.



**Figure 4** - Variogrammes directionnels de la fraction argile+limon fin - Niveau 10 cm.

Figure 4 - Directional variograms of clay+fine silt - Level 10cm



narité était à priori satisfaite.

Les variogrammes directionnels confirment une légère anisotropie (figure 4). Les matériaux d'apport suivent un granulo-classement latéral depuis le lit de la Mejerda et en direction de la mer. Les matériaux les plus grossiers se rencontrent plus près du lit de l'Oued (Claude et al., 1976).

Les variogrammes moyens modélisés ont été utilisés pour obtenir des cartes krigées de la fraction fine (Argile + limon fin) pour chaque profondeur. La superposition de ces cartes d'isovaleurs de l'argile + limon fin fait ressortir 5 unités texturales différentes qui ont servi au choix d'un transect amont-aval pour affiner l'étude de la variabilité et pour observer l'organisation

verticale du sol (figure 5).

### Variabilité des paramètres de fonctionnement des sols

#### L'organisation verticale des sols

Les cinq profils pédologiques situés sur le transect T1 mettent en évidence un matériau argilo-limoneux de structure polyédrique subanguleuse nette qui superpose un matériau plus argileux à sur-structure prismatique. Celui-ci repose, vers 150 cm, sur un horizon argilo-limoneux à structure polyédrique anguleuse fine. Par endroit, un matériau limoneux sableux s'intercale, vers 100 cm, entre l'horizon à structure prismatique et

l'horizon profond.

Les paramètres de fonctionnement hydrique

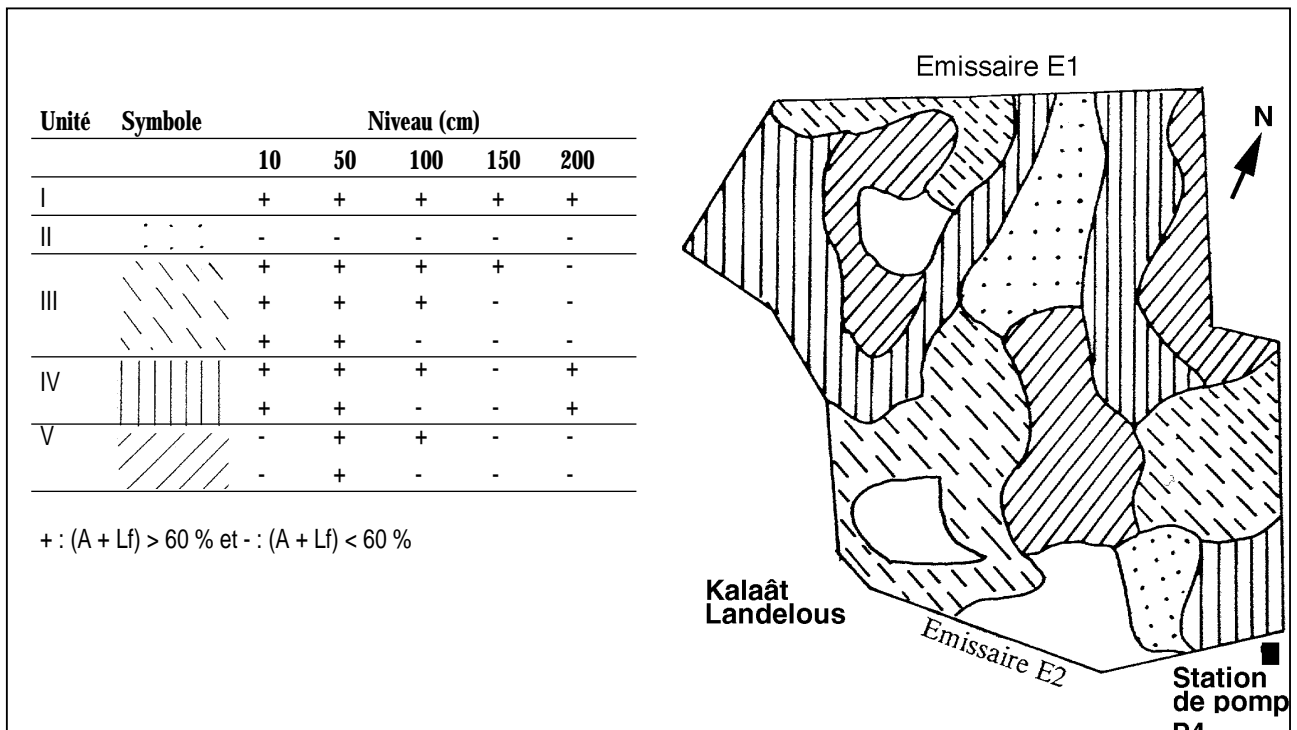
Eu égard aux observations pédologiques, la couche 0-70 cm, est formée d'un matériau assez semblable. Située à plus de 70 cm du niveau des drains enterrés (140-170 cm de profondeur), elle échappe à l'effet direct de la nappe. Sur le plan agronomique, c'est celle qui influe sur les cultures. Ces considé-

rations ont été à la base du choix de cette couche sur le transect T1.

Sur ce transect, la texture apparaît homogène non uniforme pour l'argile + limon fin. La variabilité est moyenne pour l'argile + limon fin (C.V. = 24 % ; tableau 1). Elle est du même ordre de grandeur que celle obtenue pour l'ensemble du périmètre à 10 cm de profondeur (0-20 cm ; C.V. = 24 %) et à 50 cm (40-60 cm ; C.V. = 29 %). Le passage à des pas de mesure de 20 m sur le mini-transect T2 n'a pas permis de réduire la variabilité observée sur T1 (23 %). En dépit des mesures rapprochées, la fraction argile + limon admet une structure

**Figure 5** - Les unités texturales homogènes.

Figure 5 - The homogeneous textural units.



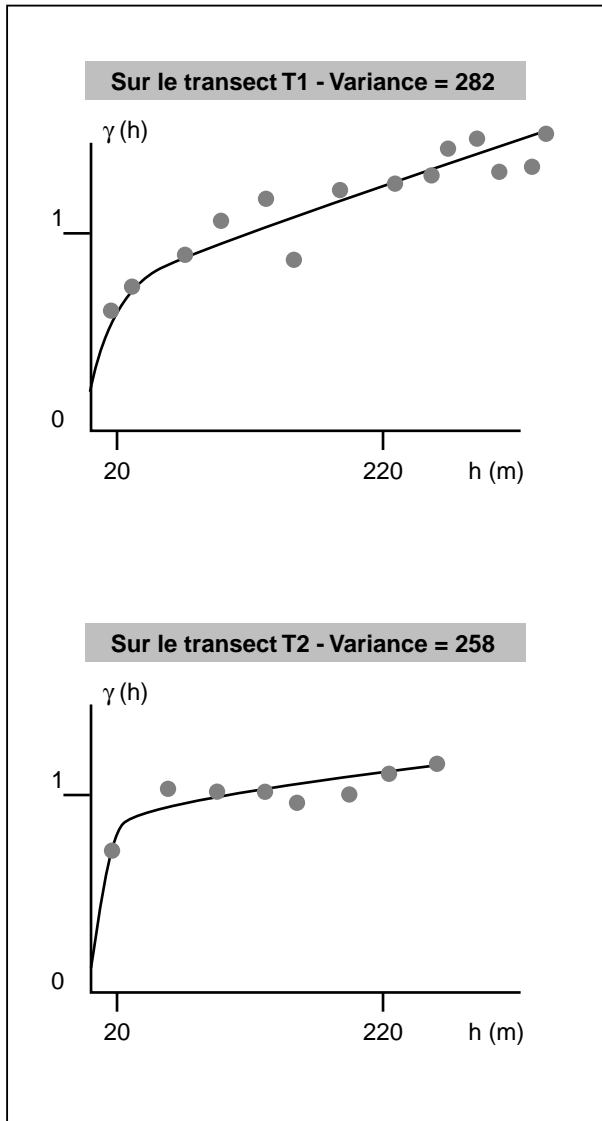
**Tableau 1** - Paramètres statistiques de la fraction argile+limon fin à l'échelle du périmètre et à différents pas de mesures (transects T1 et T2).

Table 1 - Statistical parameters of clay + fine silt for the studied perimeter and at different mesure lags (transects T1 and T2).

Lieu	Nombre	Min.	Max.	Moy.	C.V. (%)	Loi de distribution
Périmètre à 10 cm (0-20)	144	29	98	68	24	Normale
Périmètre à 50 cm (40-60)	144	7	99	68	29	Normale
Transect T1 0-70 cm	81	27	96	69	24	Normale
Transect T2 0-70 cm	78	42	96	70	23	Normale

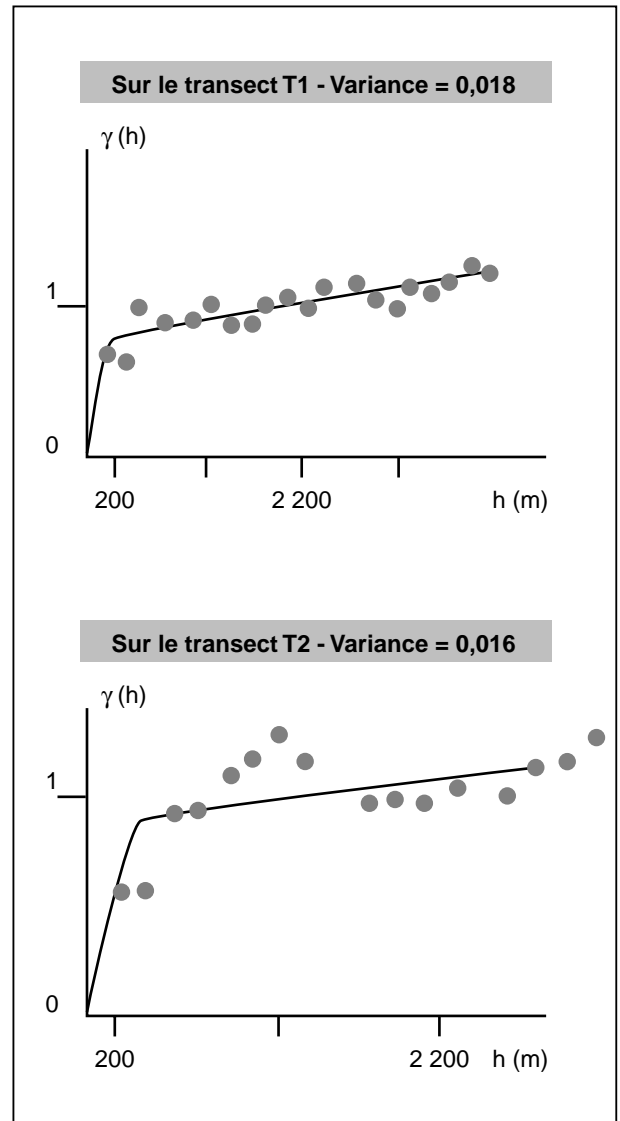
**Figure 6** - Variogrammes moyens normés de l'argile+limon fin au niveau des transects T1 et T2 (0-70 cm).

Figure 6 - Average variograms of clay+fine silt for the transects T1 and T2 (0-70 cm).



**Figure 7** - Variogrammes moyens normés de la densité apparente sur les transects T1 et T2.

Figure 7 - Average variograms of bulk density on the transects T1 and T2.



**Tableau 2** - Paramètres statistiques de la densité apparente (méthode des anneaux) à différents pas de mesures (transects T1 et T2).

Table 2 - Statistical parameters of bulk density (ring method) at different mesure lags (transects T1 and T2).

Lieu	Nombre	Min.	Max.	Moy.	C.V. (%)	Loi de distribution
Transect T1 0-70 cm	81	1,13	1,76	1,50	10	Normale
Transect T2 0-70 cm	78	1,12	1,81	1,57	8	Normale



spatiale mais possède une pépite élevée même à de courtes distances (figure 6).

La densité apparente déterminée par la méthode des cylindres, présente une faible variabilité, entre 8 et 10 % (tableau 2). C'est une caractéristique des variables statiques (Vauclin, 1982). La moyenne est du même ordre de grandeur sur T1 et sur T2. D'après les variogrammes expérimentaux, les structures sur les deux transects ne semblent pas fondamentalement différentes (figure 7). En dépit des mesures rapprochées, la variabilité n'est pas atténuée.

#### Les caractères géochimiques de la salinité

La conductivité électrique (CEe) de l'extrait de pâte saturée (méthode standard ; USDA, 1954) d'échantillons de sol prélevés dans l'ensemble du périmètre (144 sites) présente une distribution log-normale à 10, 100 et 150 cm. Le coefficient de variation de la salinité du sol est élevé. En particulier pour les horizons de surface, C.V. est compris entre 52 et 76 %. Les variogrammes moyens de la CEe indiquent une meilleure structure spatiale en profondeur. La portée d'environ 300 m en surface devient sans limite en profondeur. En dessous de l'horizon de surface, ce comportement à l'origine ne dépasse guère 20 % de la variance totale (figure 8). L'augmentation de la portée des mesures en profondeur résulte de l'effet de la nappe qui a tendance à uniformiser la salinité et donc à réduire sa variabilité.

Les profils salins sont faiblement salés et descendants pour certains et à accumulation de sels vers 1 m de profondeur pour d'autres. Les faciès géochimiques sont chlorurés sodiques à chloruro-sulfatés calciques et sodiques (Bach Hamba, 1992). Les horizons superficiels sont plus riches en calcium et en sulfate. A proximité de la nappe, la solution du sol s'enrichit en chlorure et en sodium. Les chlorures représentent 40 à 72 % de la somme des anions et le sodium 43 à 64 % de la somme des cations. Pour la plupart des profils, la solution du sol est sur-saturée vis-à-vis du gypse. Elle évolue dans le sens d'une saturation vis-à-vis de la mirabilite et de la halite en profondeur. Dans les bases échangeables, le calcium est le cation le plus fréquent, il constitue 45 à 90 % des bases échangeables. La proportion de sodium est très variable : 2 à 27 %. Le magnésium ne représente que 2 à 10 %.

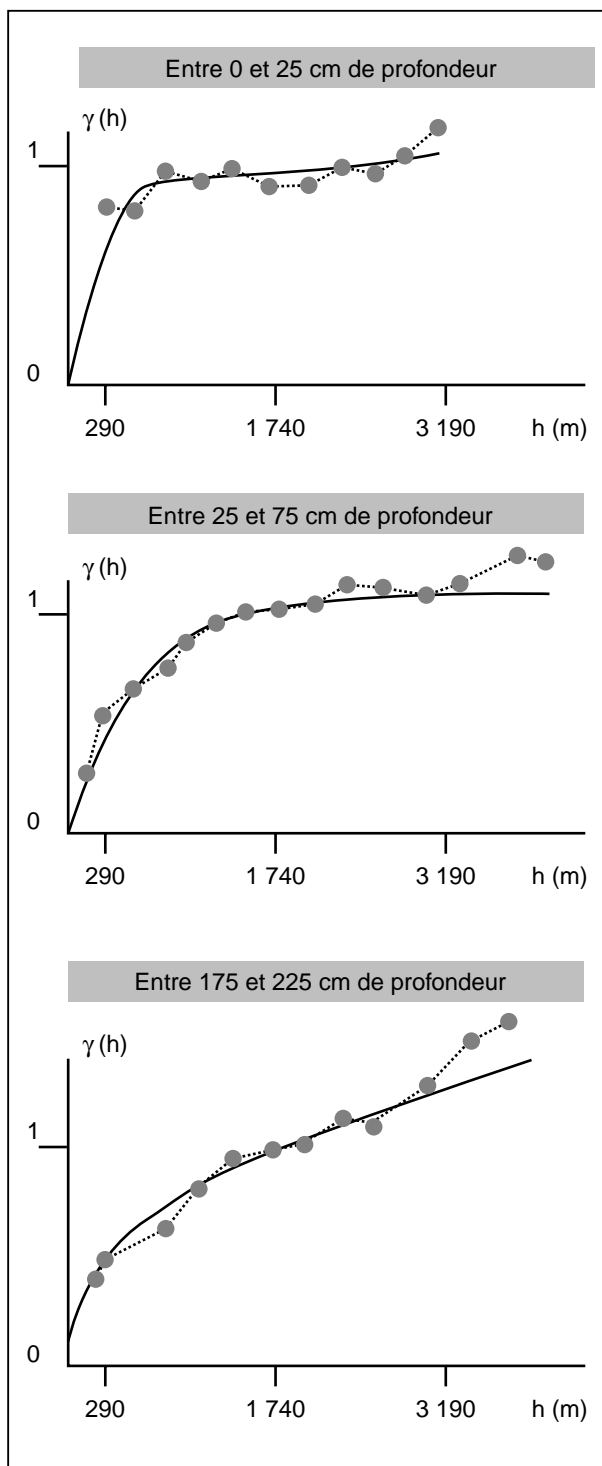
L'horizon superficiel subit entre l'été et l'hiver une désalinitation dont l'intensité est variable d'un site à un autre. L'évolution saisonnière des profils salins dépend pour les autres profondeurs de la distribution verticale de la texture.

#### Régime de la nappe

Dans les 60 piézomètres répartis sur l'ensemble du périmètre, la nappe située en moyenne à plus de 200 cm en automne 1989 remonte à environ 150 cm au cours de l'hiver pluvieux de l'année 1990 (tableau 3). La variabilité est moyennement faible (C.V. < 18 %). Parallèlement, sa salinité de

**Figure 8** - Variogrammes moyens normés et modèles ajustés de la salure du sol déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989 (Bach Hamba, 1992).

Figure 8 - Average variograms and adjusted models of soil salinity defined for the perimeter in October 1989, (Bach Hambe, 1992).



**Tableau 3** - Variation des caractéristiques de la nappe pour 60 piézomètres.

Table 3 - Variation of the groundwater characteristics for 60 piezometers.

Variable		10/11/89	20/12/89	15/3/90	18/5/90
Niveau (cm)	Moyenne	216	202	150	174
	C.V.(%)	13,6	17,4	11,6	14,7
CE (dS/m)	Moyenne	19	12,3	18	20,6
	C.V.(%)	53	75	42	43

l'ordre de 19 dS/m (environ 12,5 g/l) subit une dilution au cours de l'hiver à environ 12,3 dS/m (environ 8,6 g/l) mais se caractérise par une forte variabilité. Le C.V. est d'environ 75 %.

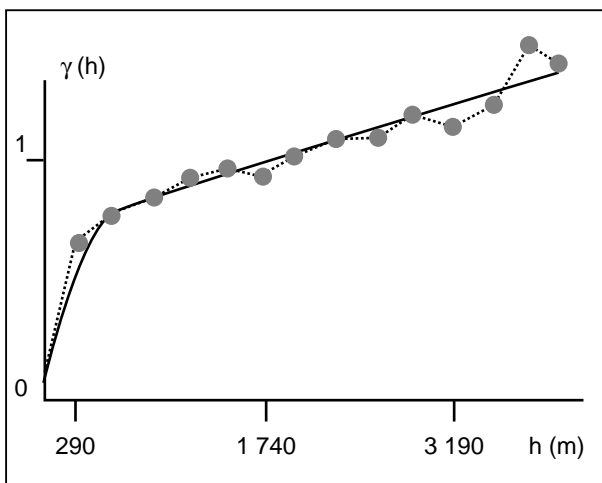
Par ailleurs, la salinité de la nappe et celle du sol sont hautement corrélées en profondeur et faiblement en surface (tableau 4).

Le niveau de la nappe est bien structuré dans l'espace comme le révèle le variogramme moyen (figure 9). La portée est d'environ 300 m. La pépite assimilée à zéro est concevable. Le modèle sphérique + linéaire est celui qui s'ajuste parfaitement au variogramme brut. Ceci reste valable pour la salinité de la nappe sauf que la portée s'élève à plus de 500 m (figure 10).

La structure du niveau de la nappe correspond à une variabilité spatiale mise en évidence par la carte krigée. Un gradient est observable partant à plus de 225 cm au milieu du périmètre à moins de 175 cm près des émissaires E1 et E2 (figure 11).

A cette tendance spatiale du niveau de la nappe correspond

**Figure 9** - Variogramme moyen et modèle ajusté du niveau de la nappe déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989.  
Figure 9 - Average variogram and adjusted model of the groundwater depth defined for the perimeter in October 1989.

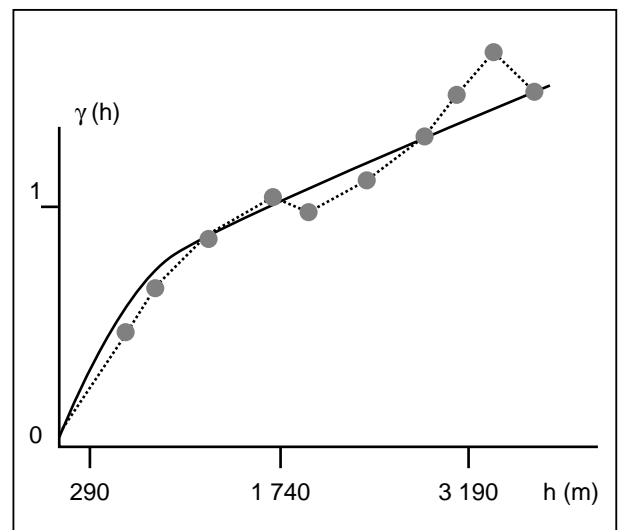


une tendance similaire de sa salinité caractérisée par un gradient de moins de 10 dS/m dans le milieu du périmètre à plus de 30 dS/m près de l'émissaire E1 et 40 dS/m près de E2 (figure 12).

Les zones dont la nappe est plus salée sont aussi celles où elle se rapproche le plus de la surface du sol. Elles sont aussi celles où la salure des sols est plus élevée (figure 13). Le gradient est de moins de 4 dS/m au milieu du périmètre à plus de 8 dS/m près des émissaires. Les mêmes tendances de la variation spatiale se conservent au cours des différentes saisons. Pour une salinité de la nappe inférieure à 10 dS/m et une profondeur d'environ 240 cm, la CEE de l'horizon de surface est généralement inférieure à 4 dS/m en hiver (phase de dessalement) même en dessous de 100 cm. A la même saison, elle dépasse 8 dS/m quand la salinité de la nappe est supérieure à 30 dS/m.

#### Risques de salinisation

**Figure 10** - Variogramme moyen et modèle ajusté de la salinité de la nappe déterminés au niveau du périmètre en octobre 1989.  
Figure 10 - Average variogram and adjusted model of the groundwater salinity defined for the perimeter in October 1989.



L'irrigation n'étant pas entamée, la salure des sols provient du comblement de la plaine côtière par les alluvions de la Mejerda et la subsistance d'une nappe superficielle très salée.

Sur la base des propriétés des sols (texture et salinité primaire) et les caractéristiques de la nappe (niveau et salinité) et leur variabilité spatio-temporelle, on peut distinguer, après la réhabilitation de ces sols salés, trois zones à risques de salinisation.

**Tableau 4** - Relations entre la salure du sol (CEe) et la salinité de la nappe CEn) en dS/m (d'après Bach Hamba, 1992).

Table 4 - Relationships between soil salinity (CEe) and groundwater salinity (CEn) in dS/m (from Bach Hamba, 1992).

Z(cm)	Equation de corrélation	r	N
10	non significative	0,11	59
50	$CEe = 0,46 * CEn - 0,91$	0,83	59
100	$CEe = 0,28 * CEn + 1,91$	0,85	81
150	$CEe = 0,36 * CEn + 1,25$	0,90	82
200	$CEe = 0,35 * CEn + 1,67$	0,89	85

L'eau d'irrigation aura un résidu sec de 2,5 g/l (figure 14) :

- au milieu du périmètre et près des bras morts des oueds, une zone à faible risque : le sol est peu perméable et faiblement salin ( $CEe < 4$  dS/m). la nappe est à plus de 200 cm et sa salinité est inférieure à 15 dS/m.

- tout autour de la première, une zone à risque de salinisation moyen : le sol est peu perméable et sa salinité est moyenne ( $4 \text{ dS/m} < CEe < 8 \text{ dS/m}$ ). La nappe située à 200 cm en été remonte à 100 cm en hiver. Sa salinité est comprise entre 10 et 20 dS/m.

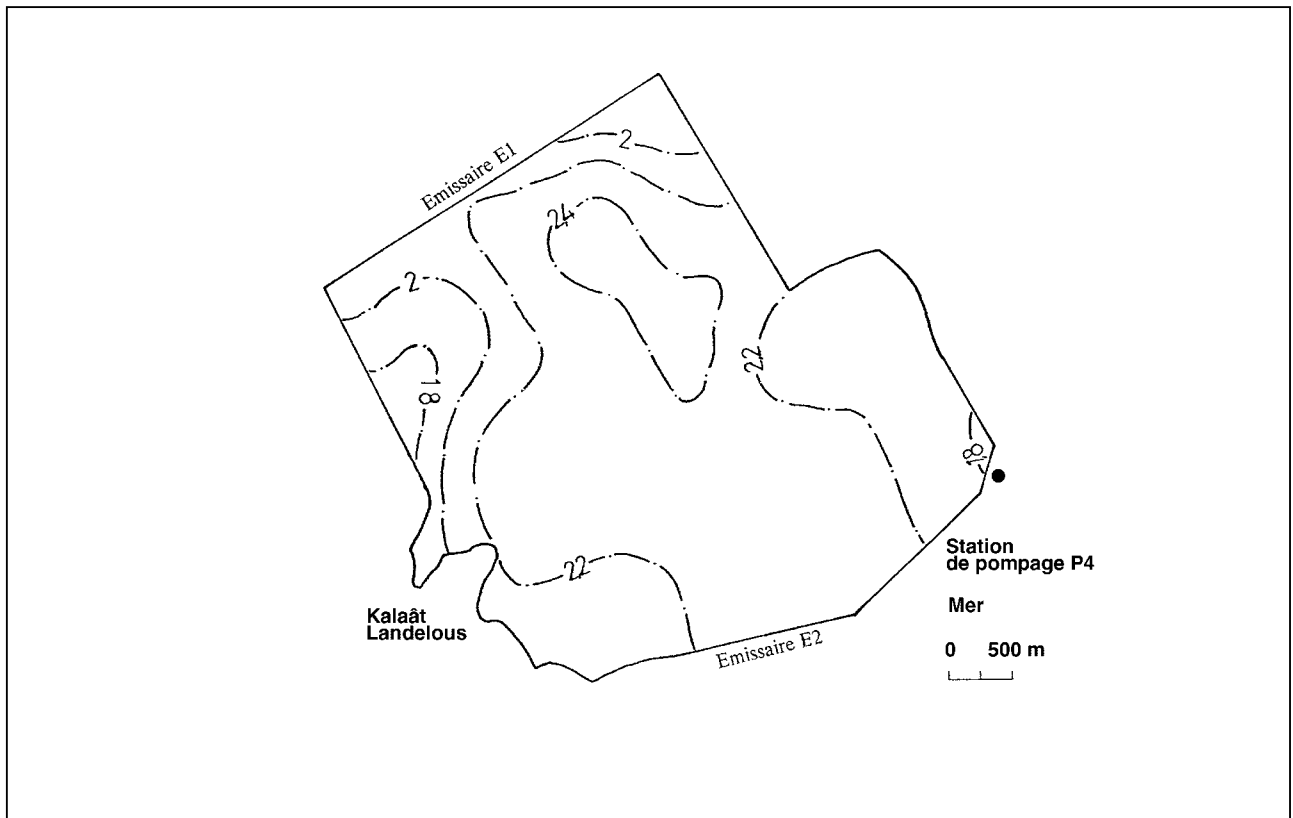
- au nord-est, au sud et à l'est, des zones à risque de salinisation élevé : le sol y est stratifié et très peu perméable. Il est salin et sodique. La nappe varie entre 60 et 120 cm en hiver et 120 à 220 cm en été et sa salinité entre 10 à 30 dS/m.

## CONCLUSION

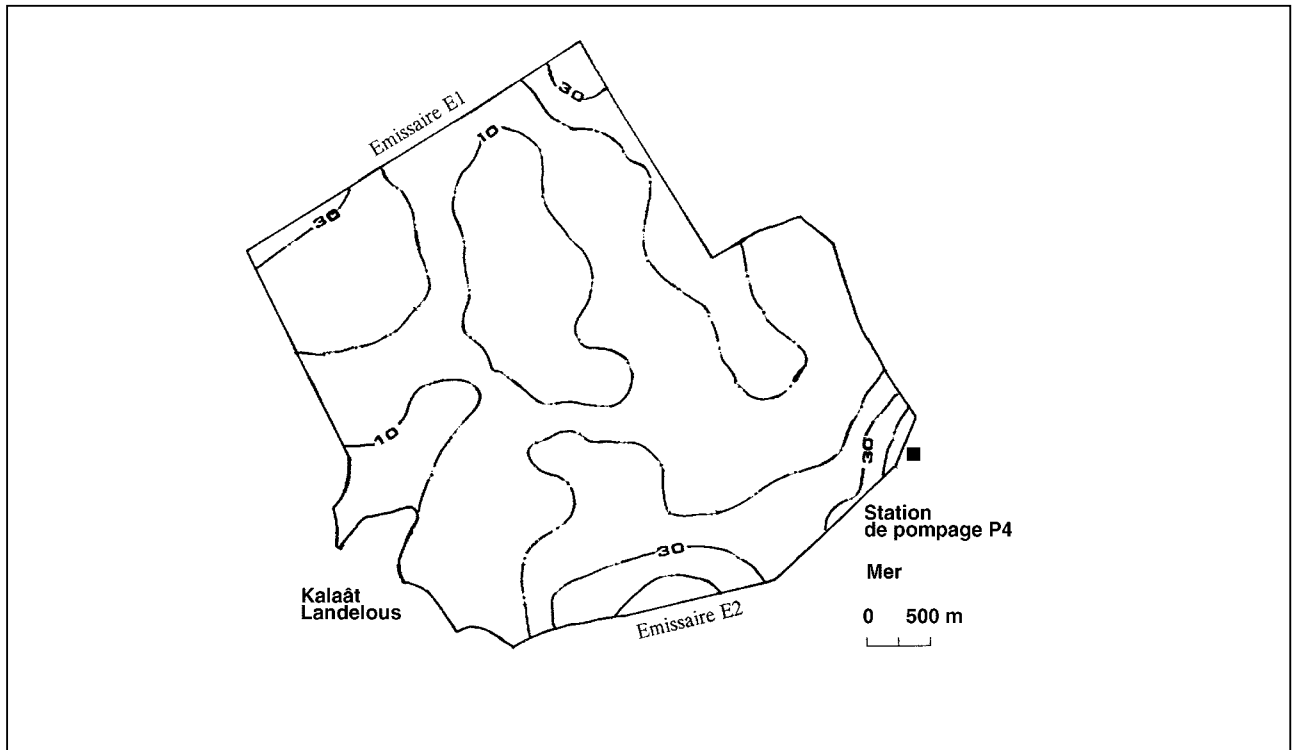
L'aménagement hydro-agricole de la plaine de Kalaât Landelous reste précaire si des mesures ne sont pas entreprises régulièrement au niveau de la prévision des risques de salinisation. Les paramètres hydro-pédologiques analysés à différentes échelles et à des pas de mesures de plus en plus

**Figure 11** - Variabilité spatiale du niveau de la nappe - Carte krigée en m - situation en octobre 1989.

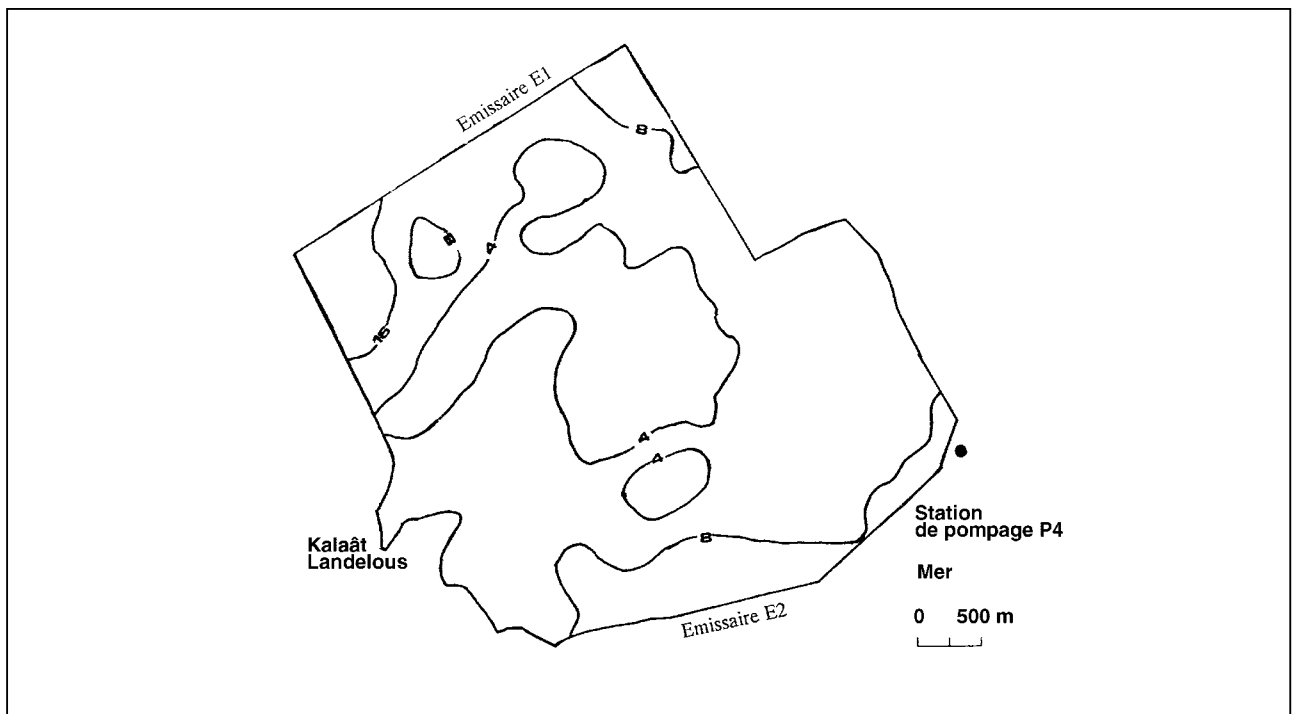
Figure 11 - Spatial variability of the groundwater depth - Kriging map in m - Situation in october 1989.



**Figure 12** - Variabilité spatiale de la salinité de la nappe - Carte krigée en mS/cm - situation en octobre 1989.  
 Figure 12 - Spatial variability of the groundwater salinity - Kriging map in mS/cm - Situation in 1989.

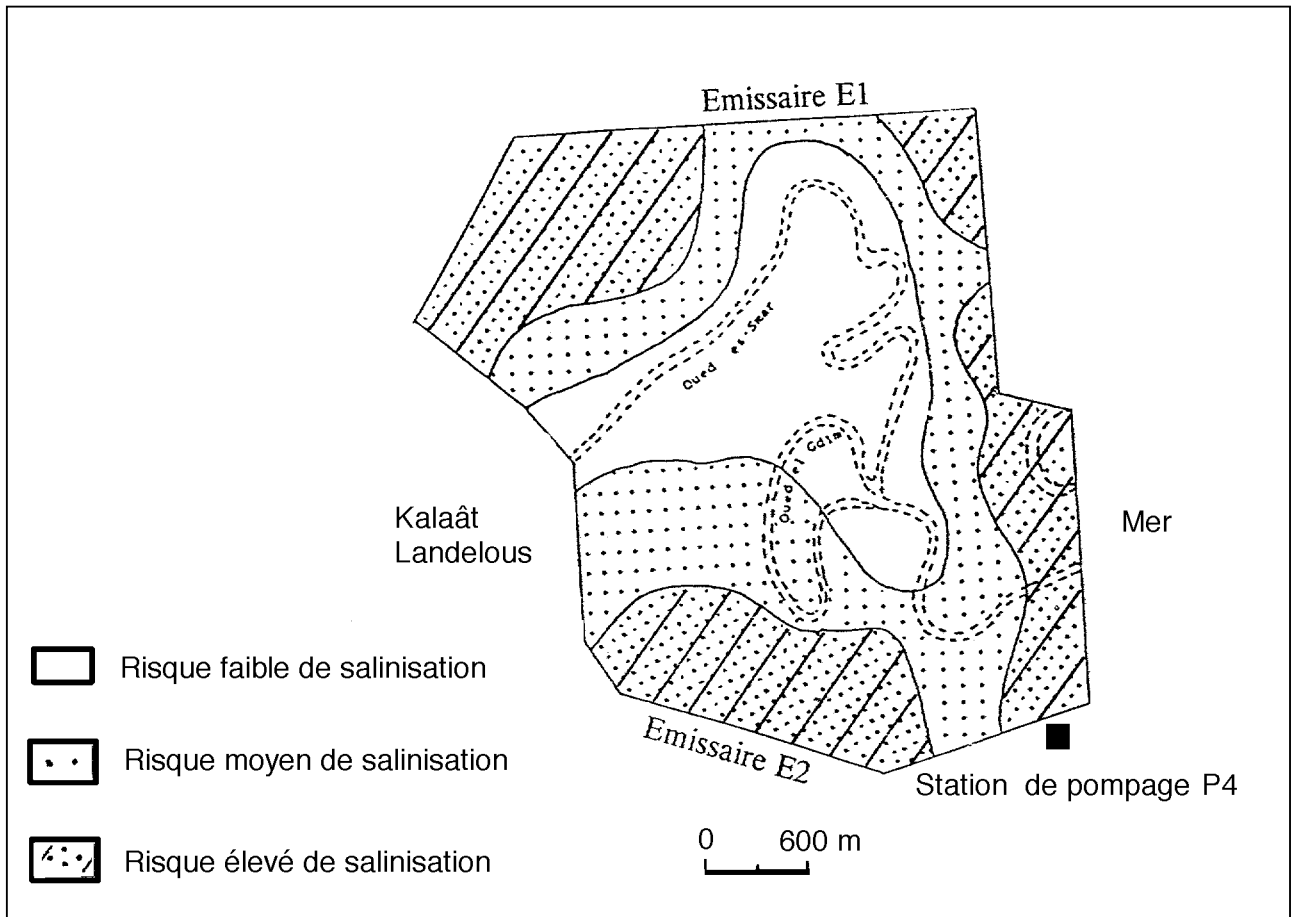


**Figure 13** - Variabilité spatiale de la salure des sols - Carte krigée en mS/cm - situation en octobre 1989.  
 Figure 13 - Spatial variability of soil salinity - Kriging map in mS/cm - Situation in 1989.



**Figure 14** - Les zones à risques de salinisation dans le périmètre de Kalaât Landelous.

Figure 14 - The risk of salinization areas in the perimeter of Kalaât Landelous.



petits ne montrent pas une réduction significative de la variabilité. Pour les paramètres physiques, la variabilité est plus forte en surface. Pour les paramètres chimiques, la variabilité est plus faible en profondeur et en surface, mais plus forte aux niveaux intermédiaires soumis à la fois aux effets des précipitations et à celle de la nappe.

**Le fonctionnement hydrique de ces sols** repose sur une texture homogène non uniforme pour l'argile et le limon fin et hétérogène pour le limon grossier et le sable.

**Le fonctionnement géochimique** a induit une variance élevée de la salinité du sol en surface qui est atténuée en profondeur par la nappe. Les profils salins qui en résultent sont descendants ou à ventre salin. Cette différenciation de la surface et de la base est antérieure à l'aménagement actuel. A proximité de la nappe, le sol s'enrichit en chlorure et en sodium. Néanmoins, les solutions possèdent une réserve en gypse leur évitant la sodisation. L'horizon superficiel se désalinise en hiver.

Le fonctionnement des sols avant leur mise en eau, est tributaire d'une part, **du régime de la nappe** et d'autre part de l'effet lixiviant des pluies. En été, le rabattement de la nappe va de pair avec une concentration de ces eaux. En hiver, elle se rapproche de la surface et subit une baisse de sa salinité. La salinité du sol en profondeur est corrélée à celle de la nappe.

**Les risques de salinisation** sont manifestes sur plus des deux tiers du périmètre. Les secteurs situés au nord-est, au sud et à l'est du périmètre présentent des risques de salinisation élevés. Ils seront les plus à contrôler.

## BIBLIOGRAPHIE

- Bach Hamba I. 1992 - Bonification des sols. Cas du périmètre irrigué de Kalaât Landalous. Caractérisation de la salinité initiale du sol en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mémoire du cycle de spécialisation en pédologie et mise en valeur des terres - Institut National Agronomique de Tunisie, 170 pages.
- Bouksila F. 1992 - Bonification des sols. Cas du périmètre irrigué de Kalaât Landalous. Caractérisation physique des sols et étude de la variabilité spatiale de leurs propriétés en vue de la détermination des facteurs et des zones à risque de salinisation. Mémoire du cycle de spécialisation en pédologie et mise en valeur des terres - Institut National Agronomique de Tunisie, 192 pages.
- Boivin P., 1990 - GEOSTAT PC, logiciel interactif pour calculgéostatistique. Coll. LOGOS édition ORSTOM. 66 pages.
- Boivin P., 1991 - Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). Étude de la variabilité spatiale et relation avec les caractéristiques pédologiques. Coll. Études et Thèses. Edition ORSTOM. 226 pages.
- Burrough P.A., 1983 - Multiscale sources of spatial variation in soil. The application of fractal concepts to nested levels of soil variation. *J. Soil Sc.*, V.34 ; pp.577-598.
- CRUESI, PNUD/UNESCO -1970 Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées 1962-1969. Rapport technique. 243 pages.
- Chevry C., 1995 - Comportement des plantes et milieu salé. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. Vol.81 n° 2, pp.42-46.
- Chevry C., 1996 - Contraintes environnementales et disponibilités en ressources naturelles. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation. Groupe prospective. Séance du 19 juin 1996. 16 pages.
- Chevry C. et Bourrié G., 1996 - La salinisation des sols. in « Sols : interfaces fragiles » 3e partie : Conséquences de l'utilisation des sols par l'homme. Coédition INRA/NATHAN. à paraître. 17 pages.
- Claude J., Loyer J. Y, Francillon G., 1976 - Les alluvions déposées par l'oued Medjerda lors des crues exceptionnelles de Mars 1973. DRES/ORS-TOM. pp. 56-57.
- Gascuel-Odoux Ch., 1984 - Application de la géostatistique à l'étude de la variabilité spatiale des propriétés hydriques du sol. Thèse de Docteur Ingénieur. ENMP et UPMC. Paris VI. 235 pages.
- Gascuel-Odoux Ch., Boivin P. et Walter Ch., 1995 - Éléments de géostatistique. In Modélisation mathématique des processus pédologiques. Coll. Manuels scientifiques et techniques. Actes éditions. Maroc. pp.217-245. pp. 217-245.
- Hachicha M., Job J.O. et Mtimet A., 1994 - Les sols salés et la salinisation en Tunisie. Sols de Tunisie. Bulletin de la Direction des Sols n°15. pp.270-341.
- Hamdy A., Lasram M. et Lacirignola C., 1995 - Les problèmes de salinité dans la zone méditerranéenne. Comptes rendus de l'Académie d'Agriculture de France. Vol.81 n° 2, pp.47-60.
- Jauzein A., 1971 - Évolution du delta de la Mejerda. Travaux du laboratoire de géologie. Cours et documentations ORSTOM. 45 pages.
- Laudelout H., Chevry C. et Clavet R., 1995 - Modélisation mathématique des processus pédologiques. Coll. Manuels scientifiques et techniques. Actes éditions. Maroc. 264 pages.
- Szabolcs J., 1989 - Salt affected soils. CRP press. Boca Raton FL.
- USDA, 1954 - Handbook n° 60, 160 pages.
- Vauclin M., 1982 - Méthodes d'étude de la variabilité spatiale des propriétés d'un sol. Colloques INRA, n° 15, pp.9-43.
- Voltz M., 1986 - Variabilité spatiale des propriétés physiques du sol en milieu alluvial. Thèse de Docteur Ingénieur. ENSA Montpellier. 198 pages.
- Walter Ch., 1990 - Estimation de propriétés du sol et quantification de leur variabilité à moyenne échelle : cartographie pédologique et géostatistique dans le sud de l'Ille et Vilaine (France). ENSA Rennes. Thèse de doctorat de l'université de Paris VI. 172 pages.

