

Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie

H. Ben Hassine

Direction des sols, ministère de l'agriculture et des ressources hydrauliques, 2080 Ariana, Tunisie

RÉSUMÉ

Dans les périmètres irrigués, la salinisation secondaire a une double origine : l'eau d'irrigation et les remontées des plans d'eau souterrains. Dans cinq périmètres irrigués répartis sur le Nord, le centre et le Sud-Ouest de la Tunisie, la salinisation à partir des eaux souterraines a été étudiée par des tests de corrélation simple entre la profondeur du plan d'eau et sa salinité d'une part et la conductivité électrique de trois horizons du sol d'autre part. Les résultats se sont avérés peu significatifs dans la majorité des cas. Les tests de corrélation les plus significatifs sont apparus dans les sols du centre et du Sud-Ouest du pays. Cependant, les valeurs des coefficients de corrélation et de détermination sont, pour plusieurs campagnes de mesure, proches des valeurs significatives ce qui témoigne de l'existence de liens entre les deux paramètres concernés et de la participation de la nappe à la salinisation des horizons supérieurs du sol. Les périmètres de la basse vallée de la Mejerda semblent les moins touchés par cette origine de salinisation malgré leur texture fine et la présence de la nappe à des profondeurs assez faibles.

Les profondeurs critiques sont assez importantes pour les sols de texture fine et varient entre 1,6 et 2,0 m selon les périmètres et les campagnes de mesure. Elles le sont moins pour la texture sableuse et varient entre 1,3 et 1,5 m.

Mots clés

Salinité, nappe phréatique, horizons, drainage, remontée capillaire, Tunisie.

SUMMARY**UNDERGROUND WATERTABLE EFFECTS ON SALINIZATION OF SOILS IN FIVE IRRIGATED PERIMETERS IN TUNISIA**

In irrigated areas, secondary salinization has a double origin : the irrigation water and the rising of the underground watertable. In five irrigated perimeters situated in the North, the center and the Southwest of Tunisia, salinization from underground waters has been studied by tests of simple correlation between the water depth and its salinity on the one hand and the electric conductivity of three soil horizons on the other hand. The results did not proved to be significant in the majority of cases. The most significant tests of correlation appeared in the soils of the center and the Southwest of the country. However, the values of the correlation and determination coefficients are, for several campaigns of measurments, close to the critical values which reveals the existence of ties between the two parameters and the involvement of the underground watertable in the salinization of the higher soil horizons. The perimeters of the low valley of the Mejerda seem to be the least affected by this origin of salinization in spite of their fine texture and the presence of the watertable at low enough depths.

The critical depths are important enough for fine-textured soils and vary between 1.6 and 2,0 m according to the perimeters and the campaigns of measurments. They are lower for the sandy-textured soils and vary between 1.3 and 1,5 m.

Key-words

Salinity, watertable, horizons, drainage, capillary ascent, Tunisia.

RESUMEN**EFFECTOS DEL MANTO FREÁTICO SOBRE LA SALINIZACIÓN DE LOS SUELOS DE CINCO PERÍMETROS IRRIGADOS DE TÚNEZ**

En los perímetros irrigados, la salinización secundaria tiene un doble origen: el agua de riego y las subidas de los mantos freáticos subterráneos. En cinco perímetros irrigados localizados en el Norte, el centro y el Sur- Oeste de Túnez, se estudio la salinización a partir de las aguas subterráneas por tests de correlación simple entre la profundidad del manto de agua y su salinidad de un lado y la conductividad eléctrica de tres horizontes del suelo del otro lado. Los resultados se mostraron poco significativos en la mayoría de los casos. Las pruebas de correlación los más significativos aparecieron en los suelos del centro y del Sur-Oeste del país. Sin embargo, los valores de los coeficientes de correlación y de determinación son, para varias campañas de medida, cercas de los valores significativas lo que muestra la existencia de vinculos entre los dos parámetros concernidos y la participación del manto a la salinización de los horizontes superiores del suelo. Los perímetros del bajo valle de la Mejerda parecen los menos tocados por este origen de salinización a pesar de su textura fina y la presencia del manto a profundidades bastante pequeñas.

Las profundidades criticas son bastante importantes para los suelos de textura fina y varían entre 1,6 y 2,0 m según los parámetros y las campañas de medida. Son menos para las texturas arenosas y varian entre 1,3 y 1,5 m.

Palabras clave

Salinidad, manto freático, horizonte, suelo, arcilloso, arenoso, subida capilar

L'irrigation en Tunisie est un moyen très ancien d'intensification de la production agricole. Il s'est amélioré au cours des dernières décennies pour couvrir des centaines de milliers d'hectares répartis sur tout le territoire. Les périmètres irrigués sont aménagés le plus souvent dans des plaines alluviales, de part et d'autre des cours d'eaux (vallée de la Mejerda), dans les plaines côtières et dans les oasis. Les facteurs hydrologiques, géomorphologiques et géologiques dans ces zones font que beaucoup de surfaces irriguées sont soumises au régime d'une nappe phréatique non seulement subaffleurante mais aussi salée, ce qui accroît les risques de salinisation secondaire des sols. Une telle salinisation peut aboutir à la dégradation et à la stérilisation du sol, ce qui se répercute négativement sur les rendements des cultures. Pour éviter cette salinisation à partir du plan d'eau souterrain, la majorité des périmètres exposés à de possibles remontées de la nappe ont été équipés de réseaux de drainage. Des programmes parallèles de suivi de l'évolution de la profondeur et de la salinité des nappes ainsi que de la salinité des sols ont été instaurés pour (i) évaluer l'effet de ces nappes sur les sols, ce qui permet de juger l'état de fonctionnement du réseau de drainage (ii) et aussi identifier l'impact des activités d'irrigation sur la continuité de productivité de ces sols.

Des résultats de campagnes de suivi réalisées au cours des dernières années sont exploités dans l'actuelle étude pour évaluer l'effet sur les sols de la profondeur et de la salinité de la nappe phréatique dans cinq périmètres irrigués répartis du Nord au Sud du pays (Ben Hassine et Jelassi, 2001 ; Ben Hassine *et al.*, 2002 ; Ben Hassine et Jelassi, 2002 ; Ben Hassine *et al.*, 2003 (a) et (b)). L'objectif d'une telle démarche est la recherche de liens entre la nappe et la salinisation des sols en fonction des facteurs du milieu, en l'occurrence le type de sol, le bioclimat et la situation géomorphologique. En effet, les mouvements de l'eau dans le sol sont régis par divers paramètres liés à des facteurs intrinsèques du sol tels que la texture, la structure, la porosité, l'épaisseur, mais aussi à des facteurs du milieu ambiant comme la pluviométrie, la température, la position topographique ainsi que la situation géographique.

Cette étude ne tient pas compte du facteur eau d'irrigation qui est aussi une source de sels pour les sols de ces périmètres. Les apports d'eau ne peuvent pas être comptabilisés étant donné que chaque périmètre est divisé en de nombreuses parcelles et que chacune de ces parcelles est gérée d'une manière différente des autres : les cultures peuvent ne pas être les mêmes, les périodes d'occupation des sols peuvent être différentes, et par conséquent les quantités d'eau d'irrigation sont réparties d'une manière très irrégulière sur la surface totale de chaque périmètre. Le sujet étudié a ainsi concerné le seul facteur en commun pour les sols de chaque périmètre, qui est en l'occurrence la nappe phréatique salée et peu profonde.

LES PÉRIMÈTRES DU NORD DU PAYS

Les périmètres irrigués retenus sont répartis géographiquement à raison de deux dans le nord du pays, un au centre et deux au sud-ouest.

Les périmètres du Nord du pays

Le périmètre de Kalaât Landalous

Il s'étend sur la rive gauche de la Mejerda sur une surface de 2905 ha (comité de suivi des périmètres irrigués, 1998). Il est irrigué par les eaux de crues de l'oued Mejerda retenues dans les barrages d'El Aroussia et de Tobias.

Les sols de ce périmètre sont peu évolués d'apport alluvial (alluvions de l'oued Mejerda) dont la salinité augmente au fur et à mesure que l'altitude diminue et la côte se rapproche. Cette salinisation est causée par la présence d'une nappe phréatique salée dont l'écoulement latéral est rendu difficile par la faible altitude par rapport au niveau de la mer et aussi par la forme géomorphologique qui est monotone et à très faible pente. Ces sols deviennent halomorphes dans la zone préchottouse orientale et méridionale (Ben Thayer, 1982).

Les textures de loin dominantes dans ces sols sont limono-argileuses dans les 60 premiers centimètres et argilo-sableuses à sablo-argileuses entre 60 et 90 cm ; au-delà, la texture devient argileuse à argilo-limoneuse (Selmi, 1972 (a)).

Le périmètre de Borj Touil

Il couvre 3200 ha (comité de suivi des périmètres irrigués, 1998) et est situé dans la basse vallée de la Mejerda, sur la rive droite du lit de l'oued. Il est irrigué par les eaux usées traitées des stations d'épuration de la ville de Tunis et de sa banlieue nord.

Les sols de ce périmètre sont d'origine alluviale, profonds, carbonatés et de texture fine (Dérrouiche *et al.*, 2001). La carte des textures des sols de ce périmètre fait apparaître la répartition suivante (Selmi, 1972 (b)) :

- Dans la partie sud du périmètre, les sols sont limono-sableux avec une salinité de l'ordre de 4 à 10 mScm⁻¹ qui se manifeste au-delà de 90 cm.

- Dans sa partie médiane, le périmètre présente une texture équilibrée en surface et argileuse à partir de 60 cm ; la salinité remonte jusqu'à l'horizon de surface et elle est comprise entre 4 et 10 mScm⁻¹.

- Dans le reste du périmètre, la texture est argilo-limoneuse à argileuse en surface et limono-sableuse à limoneuse à partir de 60 cm. La salinité peut remonter jusqu'en surface avec des valeurs comprises entre 4 et 10 mScm⁻¹ ; elle augmente à partir de 60 cm pour atteindre la frange 10-20 mScm⁻¹.

Les résultats d'analyses les plus représentatifs (*tableau 1*) sont ceux du profil n° 81 décrit et analysé par Gharbi (1975). Il est situé

Tableau 1 - Résultats d'analyses du profil de sol peu évolué d'apport alluvial, à faible salure, situé à proximité du périmètre de Borj Touil (Gharbi, 1975).

Table 1 - Analysis results of the profile of the poorly evolved soil, of alluvial deposits, to weak salinity, situated nearby of Borj Touil perimeter (Gharbi, 1975).

Profondeur cm	Granulométrie %					MO %	CaCO ₃ %		pH 1/2,5	CE mS cm ⁻¹	Na/T %
	A	LF	LG	SF	SG		Total	Actif			
0-40	41	41,5	6,5	6,5	2	2	30	14,5	8,6	0,6	5
40-75	43	33	15	4,5	1,5	1,5	33	13,8	8,6	2,4	16
75-110	26,5	31,5	13,5	10	14,5	-	28	-	8,8	3,5	-

Tableau 2 - Résultats de l'analyse granulométrique d'un sol non à peu évolué du périmètre de Sagdoud (Askri, 2002)

Table 2 - Analysis results of texture of a poorly evolved soil in Sagdoud perimeter (Askri, 2002)

Niveau	Argile + limon %	Sables %
0-20 cm	2	98
20-80 cm	3	97
80-100 cm	4	96

dans l'unité pédologique prolongeant ces sols à l'ouest de la route Tunis-Bizerte.

Le périmètre du centre du pays

C'est celui d'Oued Darb, situé au nord de la ville de Kasserine et couvrant 1 000 ha (comité de suivi des périmètres irrigués, 1998) irrigués par des eaux de crues retenues à l'amont des barrages aménagés sur les cours d'eau de la région. Les sols de ce périmètre sont de texture fine souvent et se répartissent sur quatre classes pédogénétiques : des sols peu évolués, des sols calcimagnésiques, des sols hydromorphes à redistribution du calcaire et des sols salés (Le Floc'h, 1967).

Les problèmes d'hydromorphie et de salinité apparaissent près de la confluence entre l'oued Darb et l'oued Hatab qui est l'axe de drainage majeur de la région. Le profil représentatif (n° 165) a été implanté et décrit par Le Floc'h (1967), sur la bordure gauche de l'oued Darb :

0-20 cm : argilo-limoneux, brun jaunâtre foncé (10 YR 4/4), structure polyédrique moyenne à tendance lamellaire, matière organique : 1,53 %, pH = 8,1, calcaire total : 35,4 %, CE = 24 mS cm⁻¹.

20-60 cm : argileux, brun jaunâtre foncé (10 YR 4/4), structure polyédrique grossière, matière organique : 1,43 %, pH = 8,8, calcaire total : 31,2 %, présence de pseudomycélium calcaire, CE = 34,5 mS cm⁻¹.

60-200 cm : argilo-limoneux, brun jaunâtre foncé (10 YR 4/4), structure polyédrique grossière, matière organique : 0,69 %, pH = 8,8, calcaire total : 37,5 %, présence de nombreux pseudomycéliums, CE = 34 mS cm⁻¹.

Ce sont donc des sols de texture fine issus des dépôts alluviaux des oueds Darb et Hatab ; ils sont affectés par la salinité causée par la remontée intermittente de la nappe salée souterraine dont le niveau est souvent à moins de 3 m (Ben Hassine *et al.*, 2003).

Les périmètres du Sud-Ouest du pays

Ce sont deux périmètres oasiens situés dans le bassin versant de Chott El Gharsa dans le Sud-Ouest du pays ; ils sont cultivés surtout en palmiers dattiers et en espèces potagères.

Le périmètre de Sagdoud

Il couvre 166 ha constitués de sols non évolués et peu évolués d'apport alluvial, de sols calcimagnésiques gypseux et de sols halomorphes (Ben Merai, 1986). La répartition de ces sols est étroitement liée à la géomorphologie :

- Dans la partie médiane du périmètre, s'étendent les sols non et peu évolués dont la texture est souvent grossière ; ils peuvent être sains ou à caractère de salure. Le profil est verticalement homogène, à texture sableuse, à structure particulaire, à très faible teneur en matière organique. Ils sont carbonatés et contiennent 3 à 4 % de gypse. L'analyse granulométrique d'un profil de ce type de sol a montré que la fraction dominante est celle des sables (*tableau 2*).

- Les sols calcimagnésiques gypseux occupent les buttes de la partie méridionale et se caractérisent par la présence d'une croûte gypseuse qui est soit affleurante soit couverte d'une pellicule superficielle de sable de 20 cm d'épaisseur. La teneur en gypse de cette croûte peut varier entre 22 et 72 % (Ben Merai, 1986).

- Les sols halomorphes occupent la partie la plus basse du périmètre ; leur texture est sableuse en surface (0-15 cm), équilibrée à moyenne profondeur (15-60 cm) et sableuse dans l'horizon inférieur (60-140 cm). La salinité des trois horizons est respectivement comme suit : 17, 26 et 34 mS cm⁻¹ (Ben Merai, 1986). L'origine de

cette salinité est une nappe phréatique salée peu profonde qui contribue à l'individualisation, outre la salinité, d'un encroûtement gypseux de nappe, formé suite à des mouvements ascendants de CaSO_4 à partir de cette nappe.

Le périmètre de Chamsa

Il couvre 90 ha surface et occupe le bas d'un glacis à faible pente orientée vers le Nord. Sa situation à l'aval d'autres oasis irriguées fait que les eaux souterraines le traversent avec un écoulement lent ce qui provoque des problèmes d'hydromorphie (Ben Hassine *et al.*, 2002). Ses sols sont homogènes et sont constitués d'une couverture sableuse épaisse sans différenciation d'horizons évidents. Ils ont été décrits par El Fékih (1967) de la manière suivante : sols de texture légère à équilibrée, profondeur du sol sain > 120 cm, salure nulle, drainage interne bon, pas d'encroûtement gypseux et pas d'hydromorphie avant 150 cm de profondeur, relief sans accidents et sans pente élevée ; sols aptes à toutes les cultures arbustives, maraîchères et fourragères. Un prélèvement à la tarière sur une épaisseur de 0 à 120 cm a été effectué en mars 1999 ; les résultats d'analyses sont présentés au *tableau 3*.

Ces analyses montrent que la fraction sableuse est dominante avec des parts sensiblement égales entre sables fins et sables grossiers ; la fraction argileuse n'existe pas. La matière organique n'est pas stable dans ces conditions et elle n'a pas été analysée. Les carbonates sont répartis verticalement d'une manière très homogène, avec une teneur de 13 % dans les horizons supérieurs et 12 à 11 % dans les horizons inférieurs. Le pH est alcalin et la salinité n'est pas très élevée malgré plusieurs décennies d'irrigation.

LA QUALITÉ DES EAUX D'IRRIGATION

Les eaux d'irrigation employées dans les cinq périmètres présentent les compositions chimiques portées sur le *tableau 4*.

- Pour le périmètre de Kalaât Landalous, la CE est de $2,59 \text{ mS cm}^{-1}$; le Na^+ et le Cl^- sont les éléments les plus abondants parmi les autres ions. Les deux prélèvements, espacés de 14 années, présentent presque la même composition, hormis un léger enrichissement en Ca^{2+} en 2003.

- A Borj Touil, les eaux usées épurées servant à l'irrigation ont une CE de $3,78 \text{ mS cm}^{-1}$, avec des quantités équivalentes de Na^+ et de Cl^- . Celles du bore et de NH_4^+ sont faibles par rapport aux deux autres éléments. La CE de cette eau semble avoir légèrement diminué puisqu'elle variait au cours de la période 06/1992 – 09/1992 entre $4,11 \text{ mS cm}^{-1}$ et $5,19 \text{ mS cm}^{-1}$ (Hachicha et Trabelsi, 1993).

- A Oued Darb, l'eau d'irrigation provient d'un barrage : elle est faiblement salée ($1,77 \text{ mS cm}^{-1}$) et aussi peu chargée en Na^+ et Cl^- . C'est une eau peu alcalinisante du fait de sa richesse en cations bivalents ($\text{SAR} = 1,4$).

- A Sagdoud, l'eau est pompée à partir de deux forages dont la CE est respectivement égale à $6,42 \text{ mS cm}^{-1}$ et $6,79 \text{ mS cm}^{-1}$. Les ions dissous les plus abondants sont Ca^{2+} et SO_4^{2-} , avec aussi des quantités non négligeables de Na^+ , Cl^- et Mg^{2+} .

- Enfin à Chamsa, l'eau provenant d'un forage est de qualité relativement bonne ($2,59 \text{ mS cm}^{-1}$) pour un sol très sableux, malgré une richesse relative en Cl^- et Na^+ . Les problèmes d'alcalinisation ne se posent pas dans le sol de ce périmètre dont la composition granulométrique est totalement dépourvue d'argiles (*tableau 3*).

Ces eaux sont pour la plupart salinisantes, notamment sous l'effet de la forte ETP (> 1000 mm an^{-1}) qui caractérise la totalité de ces périmètres. Cependant, la qualité de l'eau d'irrigation est de loin meilleure à celles des nappes phréatiques et les sels qu'elle dépose peuvent être évacués totalement ou partiellement, soit par la pluie (périmètres du Nord), soit par les fractions lessivantes des doses d'irrigation. De ce fait, l'eau de la nappe est à plus haut risque de salinisation et son effet l'emporterait sur celui de l'eau d'irrigation. Ceci a été constaté précédemment dans le périmètre de Borj Touil par

Tableau 3 - Résultats d'analyses des échantillons de sols prélevés dans le point P14 du périmètre de Chamsa

Table 3 - Analysis results of the soils samples taken from the P14 point in Chamsa perimeter.

Paramètres	0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	60-80 cm	80-100 cm	100-120 cm
Argile	-	-	-	-	-	-
Limon	4	6	15	3	3	4
Sables fins	43	48	46	46	45	46
Sables grossiers	48	51	38	47	46	41
pH	8	8	8,3	8,1	8,1	7,9
% de saturation *	33	28	28	28	28	28
CE en mS cm^{-1}	3,7	2,8	2,9	4,4	4,8	4,7
Calcaire total	13	13	13	13	12	11
Calcaire actif	4	4	4	3	1	3

* Pourcentage de saturation en eau

Tableau 4 - Compositions chimiques des eaux d'irrigation employées dans les cinq périmètres**Table 4** - Chemical compositions of irrigation waters used in the five perimeters

Périmètres	Date de prélèvement	CE mS cm ⁻¹	pH	Cations (cmol kg ⁻¹)				Anions (cmol kg ⁻¹)				Autres (cmol kg ⁻¹)	
				Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	NH ₄ ⁺	Bore
Kalaât	06/1989*	4,1	7,7	7,65	3,0	29,4	0,3	29,2	7,7	5	-	-	-
Landalous	09/2003	4,67	7,69	12,3	10,0	31,3	0,3	32,2	-	2,4	-	-	-
Borj Touil	05/2000	3,78	7,42	-	-	23,6	-	23,6	-	-	-	0,04	0,13
Oued Darb	2002	1,77	7,80	10,2	6,5	4,0	0,11	1,6	11,1	2,8	-	-	-
Sagdoud	09/2000	6,42	7,50	32,0	8,0	23,2	0,27	11,2	44,0	2,5	-	-	-
Forages 1 et 2	09/2000	6,79	7,35	24,0	20,0	14,8	0,26	18,4	40,5	2,5	-	-	-
Chamsa	04/2002	2,59	8,3	12,7	7,7	12,1	0,44	17,8	11,4	2,0	0,1	-	-

* Bach Hamba, 1992

Hachicha *et al.* (1992) qui indiquent que l'effet salinisant des eaux d'irrigation est négligeable par rapport à celui de la nappe; les sols à drainage déficient sont, en effet, ceux qui sont les plus chargés en sels.

LES RÉSEAUX DE DRAINAGE

Quatre parmi les cinq périmètres étudiés sont équipés de réseaux de drainage qui sont souterrains à Kalaât Landalous, Sagdoud et Chamsa et à ciel ouvert à Borj Touil. Le périmètre d'Oued Darb n'est pas drainé.

Les plans d'évacuation pour les réseaux souterrains sont les mêmes: les drains souterrains se déversent dans des collecteurs à ciel ouvert qui communiquent à leur tour avec un émissaire se déversant le plus souvent dans un exutoire naturel. A Kalaât Landalous qui est un périmètre côtier, l'altitude est très proche de celle de la mer ce qui rend l'écoulement naturel des eaux de drainage difficile; les émissaires se déversent par conséquent dans un bassin à partir duquel les eaux sont refoulées par pompage vers la mer.

La profondeur des drains souterrains est de 1,4 m à Kalaât Landalous, entre 0,8 m et 2 m à Sagdoud et entre 1,5 m et 1,8 m à Chamsa.

L'écartement des drains est de 22,5 m à Kalaât Landalous (Hachicha *et al.*, 1995), 150 m à Sagdoud et à Chamsa.

Le drainage à ciel ouvert comprend généralement un émissaire recevant un réseau primaire alimenté par des fossés secondaires. La profondeur de ces drains varie entre 1,6 m pour les fossés à 1,9 m pour l'émissaire.

Les drains souterrains ou à ciel ouvert peuvent être colmatés et les débits qu'ils évacuent peuvent diminuer ce qui rend la remontée du niveau de la nappe possible dans ces conditions. En outre, si le drain est à 1,4 m, le niveau de la nappe peut être plus proche de la surface dans l'espace séparant deux drains successifs. En conséquence, des risques éventuels de salinisation d'un ou de plusieurs horizons du sol existent.

MATÉRIEL ET MÉTHODES

Les cinq périmètres irrigués ont été suivis entre les années 1997 et 2002 pour mesurer le niveau de la nappe et sa salinité. De telles actions entrent dans le cadre de l'évaluation des impacts des réseaux de drainage aménagés sur le rabattement des niveaux des plans d'eau souterrains et aussi de leur état de fonctionnement et sa durabilité. En parallèle, des prélèvements d'échantillons de sols sont effectués sur des tranches de 20 cm entre 0 et 80 cm. La périodicité de mesure et de prélèvement est semestrielle: en mars-avril-mai, après la saison hivernale coïncidant avec le maximum de pluviométrie et en septembre-octobre-novembre, après une saison estivale de sécheresse et d'irrigation des sols. La mesure du niveau de la nappe est faite à travers des piézomètres qui sont des tubes cylindriques en métal galvanisé de 7 à 8 cm de diamètre et de 3 m de hauteur. Ces tubes sont crépinés sur leur moitié inférieure pour permettre à l'eau de la nappe de pénétrer et de pouvoir la prélever.

L'opération de mesure sur le terrain a consisté à introduire dans le piézomètre un flotteur équipé ou non d'une sonde électrique et attaché à une corde graduée. La hauteur mesurée (m) est comprise entre la surface du terrain naturel et le niveau du plan d'eau.

L'échantillonnage de l'eau se fait après le pompage des 2/3 environ du volume stagnant au fond du piézomètre. La mesure de la salinité est effectuée soit directement sur le terrain à l'aide d'un conductivimètre portatif soit en portant les échantillons au laboratoire.

Pour les sols, le prélèvement des échantillons est réalisé d'une manière simultanée et concerne les horizons 0-20 cm, 20-40 cm, et 60-80 cm. Ces échantillons sont portés au laboratoire pour une mesure de leur conductivité électrique (CEe) réalisée sur un extrait de pâte saturée.

Les données disponibles sont donc :

- Le niveau de la nappe phréatique (m).
- La salinité de l'eau de la nappe phréatique (mS cm^{-1}).
- La salinité de trois horizons du sol sur une épaisseur de 80 cm (mS cm^{-1}).

La présente étude a pris pour objectif d'étudier l'impact des paramètres mesurés de la nappe sur la salinité de sols. Des corrélations simples (linéaires et polynomiales pour la plupart) sont établies entre niveau de la nappe (x) et la salinité du sol (y) d'une part et la salinité de la nappe (x) et celle du sol (y), d'autre part. Pour le sol, 3 niveaux sont retenus pour réaliser ces corrélations : ce sont les tranches 0-20 cm, 20-40 cm et 60-80 cm. Les deux premiers horizons sont choisis à cause de la concentration racinaire dans leur masse pour la plupart des espèces végétales cultivées dans les périmètres irrigués (cultures maraîchères et annuelles). Le dernier horizon (60-80 cm) est retenu puisqu'il est le plus profond et le plus exposé à recevoir les eaux remontant à partir de la nappe ; en outre, une partie des racines peut atteindre cet horizon pour absorber de l'eau en cas de déficit dans les horizons supérieurs.

Les points d'échantillonnage sont précisés dans le *tableau 5*.

Le nombre de points varie selon les périmètres et les campagnes de mesure. Cette variation est due à ce que le nombre de piézomètres dans lesquels affleure la nappe est variable en fonction des périmètres et des saisons de prélèvement. En outre, dans chaque périmètre, il y a des points bien précis sur lesquels se font les mesures semestrielles et ces points varient en fonction du périmètre et de la région naturelle.

Les points de mesure du niveau de la nappe et de la salinité des sols sont souvent les mêmes ; seul le paramètre salinité de la nappe est à nombre soit inférieur soit égal à celui des points de mesure du niveau du plan d'eau et aussi de prélèvement des échantillons de sols. Ceci revient du fait que dans plusieurs cas, le piézomètre est soit sec soit le volume d'eau qui s'y trouve est insuffisant pour en faire un prélèvement.

L'interprétation des données est réalisée par des tests de corrélation simple ; chaque corrélation est jugée significative ou non selon le coefficient de corrélation r. Cependant, lorsque le coefficient de détermination R^2 est élevé, l'équation est signalée. Cette équation permet, en annulant sa dérivée, de déterminer le point à partir duquel la courbe change de direction, donc le point à partir duquel il n'y aurait plus d'interaction entre les deux paramètres.

RÉSULTATS

Corrélations entre le niveau de la nappe et la salinité de l'horizon 0-20 cm

Les valeurs du coefficient de corrélation r sont très faibles pour les deux périmètres du nord du pays en l'occurrence Kalaât Landalous et Borj Touil (*tableau 6*). Ils ont tendance à augmenter, sans atteindre un seuil significatif dans les périmètres d'Oued Darb et de Chamsa. C'est à Sagdoud que la seule valeur significative ($r = 0,512$) est obtenue pour la campagne de septembre 1998, au seuil $p = 0,01$ (*figure 1*) et avec 26 degrés de liberté (ddl).

Pour le coefficient de détermination R^2 , les valeurs sont faibles pour les périmètres du nord du pays, sauf pour la campagne d'octobre 1999 à Borj Touil, durant laquelle sa valeur a atteint 0,2819.

Les valeurs augmentent pour le périmètre d'Oued Darb notamment en octobre 2001 et en avril 2002. Mais la plus forte valeur ($R^2 = 0,9217$) est observée à Chamsa en novembre 2000 (*figure 1*) ; pour la campagne de l'année suivante, à la même période, sa valeur a chuté à 0,2204.

Pour les valeurs de R^2 ou de r jugées relativement suffisantes pour montrer une relation entre les deux paramètres étudiés, la dérivée de l'équation polynomiale est annulée pour déterminer la profondeur minimale x à partir de laquelle la courbe change de direction et par conséquent la relation devient non significative. Les profondeurs obtenues et au-delà desquelles, la nappe n'aurait plus d'effet sur l'horizon de surface 0-20 cm, sont 1,62 m pour Bor Touil, 1,80 m environ pour Oued Darb, 2,14 m pour Sagdoud et entre 1,30 et 1,50 m pour Chamsa. On doit signaler ici la profondeur élevée à Sagdoud et les valeurs assez faibles pour le périmètre de Chamsa.

Corrélations entre le niveau de la nappe et la salinité de l'horizon 20-40 cm

Les valeurs de r sont non significatives pour presque tous les périmètres et pour toutes les campagnes ; un seul cas s'est avéré très significatif au seuil $p = 0,001$ avec $r = 0,969$, c'est celui du périmètre de Chamsa en novembre 2001 (*tableau 7*). Dans ce même périmètre et en novembre 2000, la valeur de R^2 est relativement élevée ce qui témoigne d'un effet presque permanent du niveau de la nappe sur cet horizon subsuperficiel. Les autres valeurs de r les plus élevées sont observées à Oued Darb en avril 2002 ($r = 0,523$) et à Borj Touil en octobre 2001 ($r = 0,569$), tout en restant non significatives.

Les valeurs du coefficient de détermination R^2 ne sont élevées que pour le périmètre de Chamsa, pour les deux campagnes de mesures réalisées ; elles ont atteint respectivement 0,9811 et 0,9392 en novembre 2000 et novembre 2001 (*figure 1*). Le lien entre les deux paramètres semble donc rigide et témoigne d'un effet certain du niveau du plan d'eau sur la salinité de l'horizon 20-40 cm. Dans les autres périmètres, R^2 se caractérise par ses faibles valeurs à l'exception des campagnes d'octobre 2001 et d'avril 2002 à Oued

Tableau 5 - Dates des campagnes de mesures et nombre de points de prélèvement d'échantillons d'eau et de sols dans les périmètres étudiés
Table 5 - Dates of the campaigns of measures and number of points of sampling water and soils in the studied perimeters

Périmètre	Situation ou région naturelle	Campagne de mesure	Nombre de points mesurés ou échantillonnés		
			Nappe		Sols
			Niveau	Salinité	
Kalaât Landalous	Basse vallée de la Mejerda, Nord-Est	Avril 2000	7	7	7
Borj Touil	Basse vallée de la Mejerda, Nord-Est	Avril 1999	14	12	14
		Octobre 1999	07	05	07
		Mai 2000	07	06	07
		Octobre 2001	10	06	10
Oued Darb	Tunisie centrale	Mars 2000	15	11	15
		Septembre 2000	09	09	09
		Avril 2001	08	08	08
		Octobre 2001	05	05	05
		Avril 2002	10	10	10
Sagdoud	Glacis de Metlaoui-El Hamma du Jérid, Sud-Ouest	Septembre 1997	35	35	35
		Septembre 1998	28	19	28
		Novembre 1999	36	04	36
Chamsa	Oasis du Jérid, Sud-Ouest	Novembre 2000	14	08	14
		Novembre 2001	07	0	07

Darb, durant lesquelles il a atteint 0,6492 et 0,462. Cependant, à chaque fois qu'il dépasse 0,1 l'équation polynomiale liant les deux paramètres est signalée (tableau 7).

La dérivée de l'équation permet de calculer la profondeur du plan d'eau qui n'a plus d'effet sur la salinité du sol. Ces profondeurs sont 1,57 à 1,60 m pour Borj Touil, 1,69 à 1,72 m pour Oued Darb et 1,34 m pour Chamsa. A Sagdoud, les coefficients sont tellement faibles que les équations liant les deux variables n'ont pu être mentionnées. Ces résultats ne s'éloignent pas trop de ceux identifiés pour l'horizon 0-20 cm.

On doit remarquer aussi la spécificité de chaque milieu relative à la profondeur critique du plan d'eau; elle est similaire pour les périmètres de Kalaât Landalous et de Borj Touil avec 1,60 m environ; à Oued Darb, elle est de 1,70 m et à Chamsa, elle est de 1,30 m. On peut tirer comme première constatation que le matériau sableux ne permet à la nappe d'agir sur la salinité du sol qu'à partir de 1,30 m. Dans les sols argileux, des profondeurs plus élevées (jus-

qu'à 1,70 m) peuvent influencer sur la salinité des horizons de surface des sols.

Corrélations entre le niveau de la nappe et la salinité de l'horizon 60-80 cm

Cet horizon est le plus éloigné de la surface, dans le cas de cette étude, mais il est plus proche du niveau de la nappe. Une partie des racines peut exploiter cet horizon qui peut stocker des réserves hydriques durant les périodes d'assèchement des horizons de surface. Il peut, par conséquent, alimenter en eau et en éléments nutritifs les végétaux cultivés, essentiellement à la fin des périodes de tour d'eau lorsque les réserves en eau des horizons de surface s'épuisent.

Les corrélations entre le niveau de la nappe (x) et la CE de l'extrait de saturation de la pâte de cet horizon (y) sont évaluées par les coefficients r et R² (tableau 8).

Tableau 6 - Résultats des tests de corrélation entre le niveau de la nappe phréatique (m) et la salinité de l'horizon 0-20 cm ($mS^{cm^{-1}}$)**Table 6** - Results of the correlation tests between the underground watertable level (m) and the salinity of the horizon 0-20 cm ($mS^{cm^{-1}}$)

Périmètre	Campagne	Coefficient de détermination R^2	Coefficient de corrélation r	Seuil de signification à (n-2) ddl	Equation	x à $y' = 0$
Kalaât Landalous	Avril 2000	0,0096	0,098	NS	-	
Borj Touil	Avril 1999	0,0272	0,165	NS	-	-
	Octobre 1999	0,2819	0,088	NS	$y = 20,57x^2 + 66,66x - 48,7$	1,62 m
	Mai 2000	0,002	0,045	NS	-	-
	Octobre 2001	0,1114	0,236	NS	-	-
Oued Darb	Mars 2000	0,1430	0,325	NS	$y = 5,78x^2 - 23,19x + 25,01$	2,00 m
	Septembre 2000	0,3532	0,462	NS	$y = 57,63x^2 - 210,29x - 192,3$	1,82 m
	Avril 2001	0,072	0,122	NS	-	-
	Octobre 2001	0,5482	0,354	NS	$y = 59,67x^2 - 213,7 + 188,2$	1,79 m
	Avril 2002	0,4261	0,474	NS	$y = 3,79x^{-1,286}$	-
Sagdoud	Septembre.1997	0,0059	0,062	NS	-	-
	Septembre 1998	0,2774	0,512	p = 0,01	$y = 43,69x^2 - 187,32x + 224,7$	2,14 m
	Novembre 1999	0,0873	0,192	NS	-	-
Chamsa	Novembre 2000	0,9217	0,618	NS	$y = 18,78x^2 - 48,95x + 32,08$	1,30 m
	Novembre 2001	0,2204	0,434	NS	$y = 8,32x^2 - 24,99x + 22,35$	1,50 m

Le coefficient de corrélation r est significatif au seuil 0,05 dans le périmètre de Sagdoud en septembre 1998 et dans le périmètre de Chamsa durant la campagne de novembre 2001. Les autres valeurs relativement élevées mais non significatives de ce coefficient sont :

- 0,617 à Kalaât Landalous en avril 2000,
- 0,448 en octobre 1999, 0,364 en mai 2000 et 0,418 en octobre 2001 dans le périmètre de Borj Touil,
- 0,492 en avril 2001 et 0,464 en avril 2002, pour le périmètre d'Oued Darb.

Les coefficients de détermination R^2 les plus élevés sont obtenus dans les périmètres d'Oued Darb en avril (0,8102) et octobre 2001 (0,7961) et dans le périmètre de Chamsa en novembre des campagnes 2000 (0,6403) et 2001 (0,649). Les autres valeurs les plus importantes de ce coefficient R^2 sont 0,4295 en octobre 1999 pour Borj Touil et 0,4159 pour Oued Darb en septembre 2000. Pour presque toutes les autres campagnes, R^2 est supérieur à 0,1 ce qui a justifié l'indication de l'équation liant les deux variables.

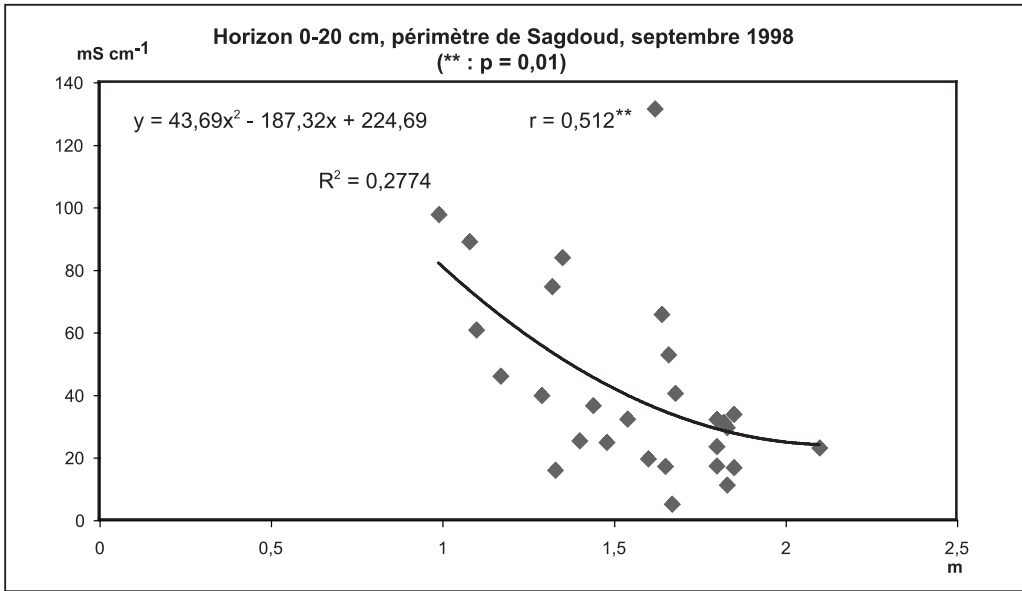
En annulant les dérivées des équations, on obtient la valeur de x (profondeur de la nappe) à partir de laquelle le niveau n'aurait plus d'effet sur la salinité de cet horizon. Ces profondeurs varient selon les périmètres :

- A Kalaât Landalous, la profondeur critique est de 1,85 m.
- A Borj Touil, cette profondeur varie entre 1,0 m et 1,60 m.
- A Oued Darb, elle varie entre 1,41 m et 1,68 m.
- A Sagdoud, on constate les profondeurs les plus faibles : 0,70 m et 1,17 m.
- A Chamsa, la profondeur critique de la nappe est de 1,38 m.

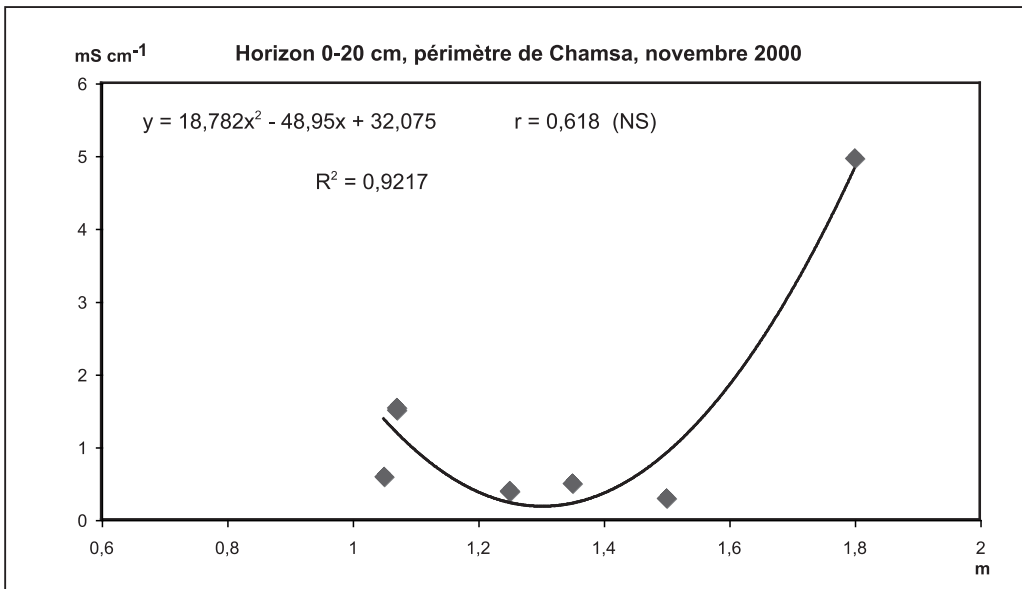
Cette couche de sol qui est située à mi-profondeur du profil de sol ne présente pas des valeurs spécifiques et stables dans chaque périmètre. Seul le périmètre de Chamsa conserve le niveau déjà observé pour les deux premières couches du sol. A Sagdoud et en septembre 1998, il n'y aurait plus d'effet de la nappe sur la salinité du sol lorsque le niveau est supérieur ou égal à 0,7 m, soit dans l'horizon lui-même. En mars 2000, à Oued Darb, le niveau 2,03 m peut influencer sur la salinité de cet horizon. A Borj Touil et en

Figure 1 - Graphiques des corrélations significatives entre le niveau de la nappe (m) et la salinité du sol (mS cm⁻¹)

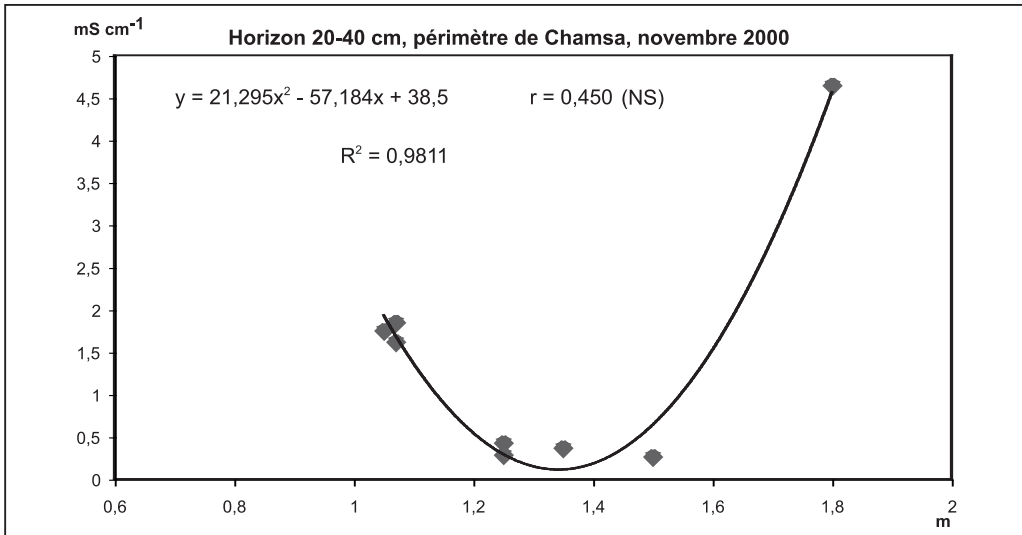
Figure 1 - Graphics of the significant correlations between the underground watertable level (m) and the soil salinity (mS cm⁻¹)



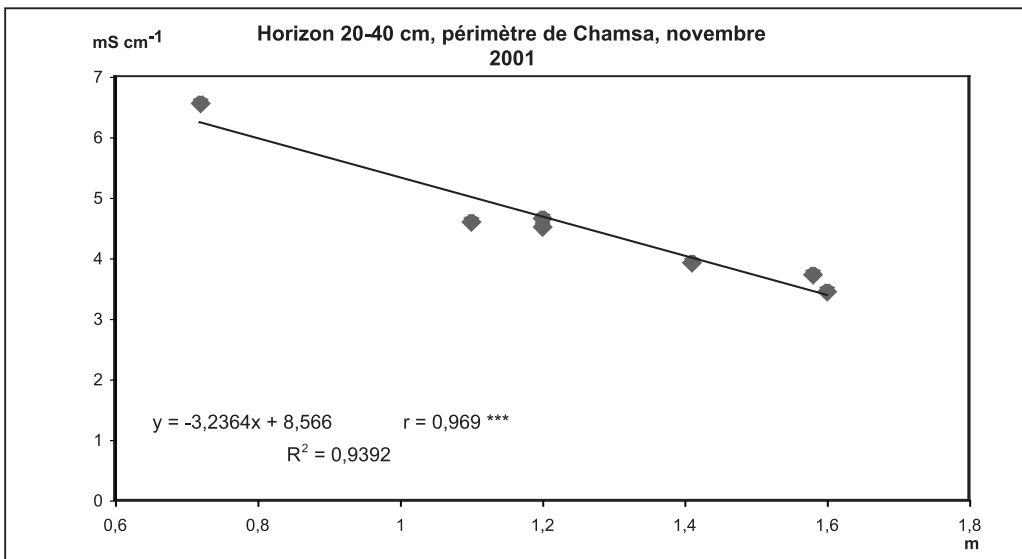
1



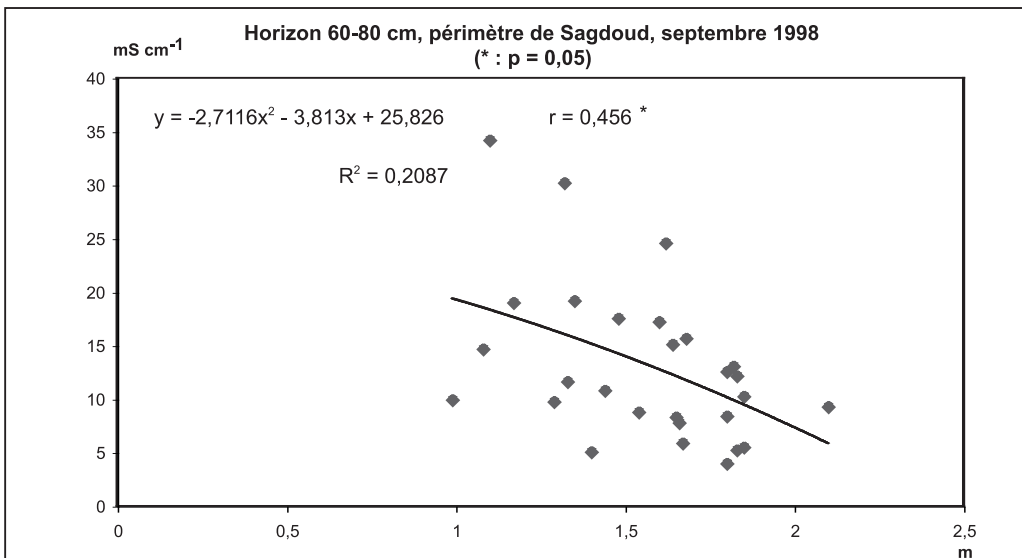
2



3



4



5

Tableau 7 - Résultats des tests de corrélation entre le niveau de la nappe phréatique (m) et la salinité de l'horizon 20-40 cm ($m S^{-1} cm^{-1}$)

Table 7 - Results of the correlation tests between the underground watertable level (m) and the salinity of the horizon 20-40 cm ($m S^{-1} cm^{-1}$)

Périmètre	Campagne	Coefficient de détermination R^2	Coefficient de corrélation r	Seuil de signification à (n-2) ddl	Equation	x à $y' = 0$
Kalaât Landalous	Avril 2000	0,2127	0,016	NS	$y = -95,71x^2 + 306,48x - 242,94$	1,60 m
	Avril 1999	0,0272	0,165	NS	-	-
Borj Touil	Oct. 1999	0,1555	0,102	NS	$y = -15,02x^2 + 50,35x - 37,03$	1,60 m
	Mai 2000	0,1046	0,069	NS	$y = -1,62x^2 + 5,09x - 2,07$	1,57m
Oued Darb	Oct. 2001	0,324	0,569	NS	$y = -2,09x + 6,32$	-
	Mars 2000	0,0830	0,289	NS	-	-
	Sept. 2000	0,376	0,236	NS	$y = 50,65x^2 - 174,43x + 150,18$	1,72 m
	Avril 2001	0,012	0,032	NS	-	-
	Oct. 2001	0,6492	0,037	NS	$y = 36,98x^2 - 125,39x + 107,2$	1,69 m
Sagdoud	Avril 2002	0,462	0,523	NS	$y = 3,836x^{-1,248}$	-
	Sept. 1997	0,0324	0,155	NS	-	-
	Sept. 1998	0,0576	0,169	NS	-	-
Chamsa	Nov. 1999	0,0065	0,081	NS	-	-
	Nov. 2000	0,9811	0,450	NS	$y = 21,29x^2 - 57,18x + 38,5$	1,34 m
	Nov. 2001	0,9392	0,969	$p = 0,001$	$y = -3,24x + 8,57$	-

octobre 2001, au-delà de la profondeur 1,0 m, la nappe n'aurait pas d'impact sur la salinité de cet horizon.

Corrélations entre la salinité de la nappe et la salinité de l'horizon 0-20 cm

La salinité de la nappe est un autre facteur qui peut influencer sur la salinité du sol dans la mesure où une forte concentration en sels de cette nappe pourrait agir par une plus forte accumulation en sels. Les tests de corrélation réalisés entre cette salinité exprimée en $mScm^{-1}$ et celle de l'horizon de surface 0-20 cm exprimée aussi en $mScm^{-1}$ de l'extrait de saturation de la pâte, a révélé des coefficients de corrélation significatifs au seuil 0,05 uniquement dans le périmètre irrigué de Sagdoud pour les deux campagnes de mesure (tableau 9). D'autres valeurs de r sont obtenues à Borj Touil en mai 2000 avec $r = 0,526$ et à Oued Darb et à Chamsa avec $r > 0,2$. A Sagdoud, la nappe est très concentrée en sels; son effet sur le sol s'est donc nettement illustré. Ceci n'est pas le cas pour plusieurs

campagnes à Borj Touil et à Kalaât Landalous dont les nappes sont aussi assez concentrées en sels.

Le coefficient de détermination R^2 présente des valeurs élevées ($>0,3$) à Borj Touil en octobre 1999 et en mai 2000, à Oued Darb en septembre 2000 et à Sagdoud pour les deux campagnes (tableau 9). Ces valeurs élevées reflètent un certain lien entre les deux paramètres; ce lien est ainsi reconfirmé dans le périmètre de Sagdoud à cause, probablement de la forte concentration en sels de la nappe. L'allure des courbes illustrant ce lien (figure 2) est différente d'une campagne à l'autre: elle forme un arc de cercle en septembre 1997 et elle est presque linéaire et progressive en septembre 1998.

Corrélations entre la salinité de la nappe et la salinité de l'horizon 20-40 cm

Les deux corrélations significatives obtenues pour cet horizon sont celles d'Oued Darb en septembre 2000 et de Sagdoud en sep-

Tableau 8 - Résultats des tests de corrélation entre le niveau de la nappe (m) et la salinité de l'horizon 60-80 cm (mScm⁻¹)**Table 8** - Results of the correlation tests between the underground watertable

Périmètre	Campagne	Coefficient de détermination R ²	Coefficient de corrélation r	Seuil de signification à (n-2) ddl	Equation	x à y' = 0
Kalaât Landalous	Avril 2000	0,3874	0,617	NS	$y = -16,75x^2 + 62,01x - 53,68$	1,85 m
	Avril 1999	0,1093	0,250	NS	$y = 4,56x^2 - 14,61x + 15,63$	1,60 m
Borj Touil	Octobre 1999	0,4295	0,448	NS	$y = -13,98x^2 + 44,2x - 28,19$	1,58 m
	Mai 2000	0,1872	0,364	NS	$y = -7,18x^2 + 18,98x - 7,51$	1,32 m
	Octobre 2001	0,1911	0,418	NS	$y = -2,41x^2 + 4,8x + 4,1$	1,0 m
Oued Darb	Mars 2000	0,1419	0,284	NS	-	
	Septembre 2000	0,4159	0,03	NS	$y = 60,33x^2 - 202,2x + 167,9$	1,68 m
	Avril 2001	0,8102	0,492	NS	$y = 34,2x^2 - 96,52x + 68,24$	1,41 m
	Octobre 2001	0,7961	0,255	NS	$y = -36,92x^2 - 120,33x + 99,07$	1,63 m
	Avril 2002	0,2579	0,464	NS	$y = 4,092x^{-0,788}$	-
Sagdoud	Septembre 1997	0,1202	0,114	NS	$y = -41,12x^2 + 96,1x - 39,63$	1,17 m
	Septembre 1998	0,2097	0,456	p = 0,05	$y = -2,71x^2 - 3,81x + 25,83$	0,70 m
Chamsa	Novembre 2000	0,6403	0,127	NS	$y = 13,47x^2 - 37,28x + 26,53$	1,38 m
	Novembre 2001	0,649	0,793	p = 0,001	$y = -3,88\text{Ln}(x) + 5,58$	-

tembre 1997 (figure 2). En effet, r est significatif au seuil 0,05 avec des valeurs respectivement égales à 0,666 et 0,387. La nappe n'a pas eu d'effet sur l'horizon 0-20 cm à Oued Darb pour la même période, tandis que pour Sagdoud, l'effet sur l'horizon 0-20 cm en septembre 1998 ne s'observe plus pour cet horizon, mais r reste quand même assez proche du seuil significatif (tableau 10). Pour le périmètre d'Oued Darb, si r n'est pas significatif pour l'horizon 0-20 cm, R² a été relativement fort (0,5851) ce qui reflète l'existence d'un lien entre les deux paramètres (tableau 9). En conséquence, les deux horizons de surface des sols de ce périmètre sont étroitement liés et sont concernés simultanément par l'effet de la salinité de la nappe.

Les autres valeurs relativement élevées de r (r > 0,2) sont apparues à Borj Touil en mai 2000, à Oued Darb en octobre 2001 et en avril 2002 et à Chamsa en novembre 2000. A Chamsa, l'eau de la nappe est assez diluée, malgré son niveau assez proche de la surface, ceci ne s'est pas traduit par un lien évident entre les deux paramètres et par conséquent, la salinité de la nappe n'a qu'un effet partiel sur celle de l'horizon 20-40 cm et aussi sur celle de la couche 0-20 cm.

Les valeurs de R² supérieures à 0,2 sont obtenues pour Kalaât Landalous en avril 2000, Borj Touil en avril 1999 et octobre 1999, Oued Darb en septembre 2000 et octobre 2001, et Sagdoud en septembre 1997 (tableau 10). Les périodes au cours desquelles ces coefficients de détermination ne sont que partiellement significatifs coïncident avec le mois d'avril le plus souvent à Kalaât Landalous et Borj Touil et avec les mois de septembre et octobre pour Oued Darb et Sagdoud.

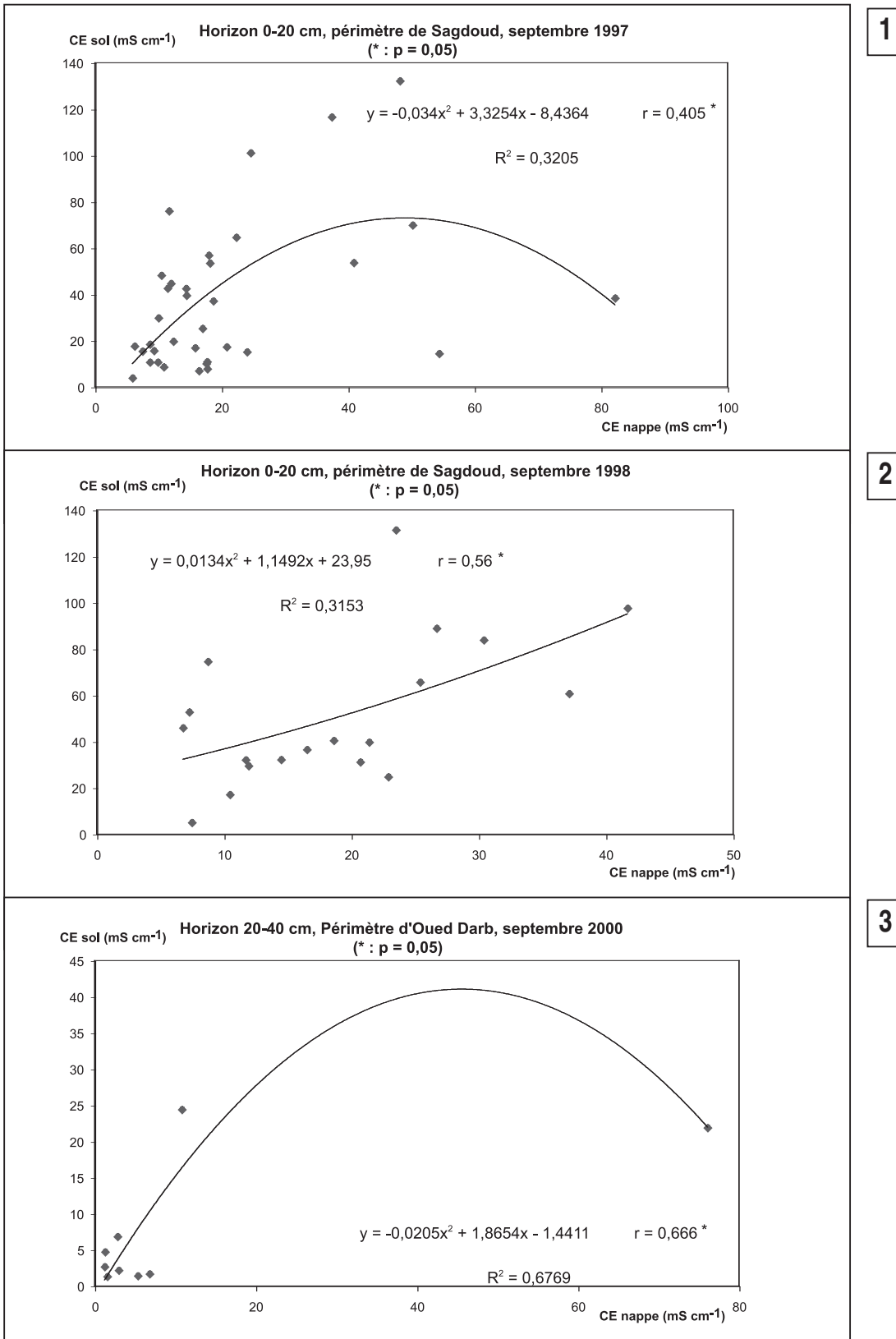
Corrélations entre la salinité de la nappe et la salinité de l'horizon 60-80 cm

Cet horizon est plus profond dans le sol et devrait normalement être touché partiellement ou totalement par l'effet de la nappe.

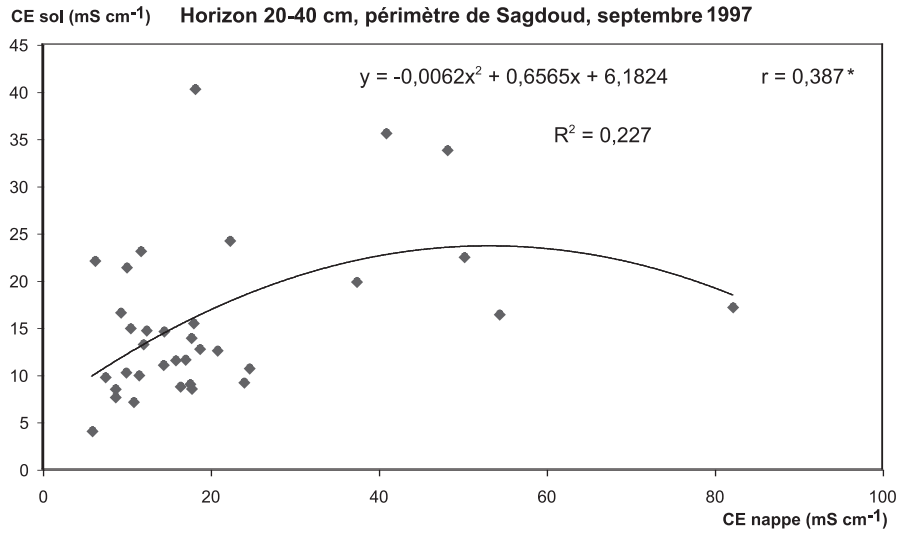
Les coefficients de corrélation significatifs sont apparus dans les périmètres d'Oued Darb en septembre 2000 et dans le périmètre de Sagdoud en septembre 1997, avec un seuil de signification de 0,01 (figure 2). Les valeurs de r supérieures à 0,2 sont nombreuses et apparaissent à Borj Touil (3 valeurs sur 4), à Oued Darb (4 valeurs sur 5) et à Sagdoud (2 valeurs sur 2). De telles valeurs confirment l'impact plus évident de la salinité de la nappe sur celle

Figure 2 - Graphiques des corrélations significatives entre la salinité de la nappe (mS cm⁻¹) et la salinité du sol (mS cm⁻¹)

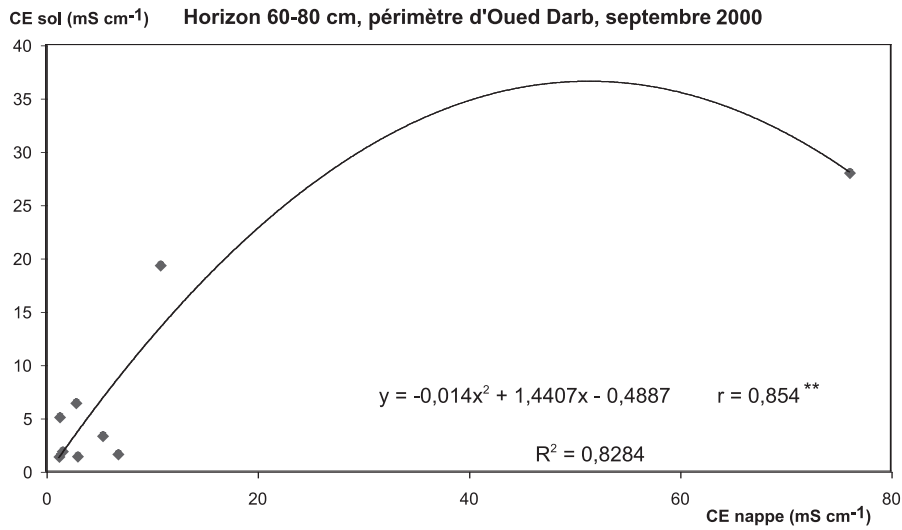
Figure 2 - Graphics of the significant correlations between the underground watertable salinity (mS cm⁻¹) and the soil salinity (mS cm⁻¹)



4



5



6

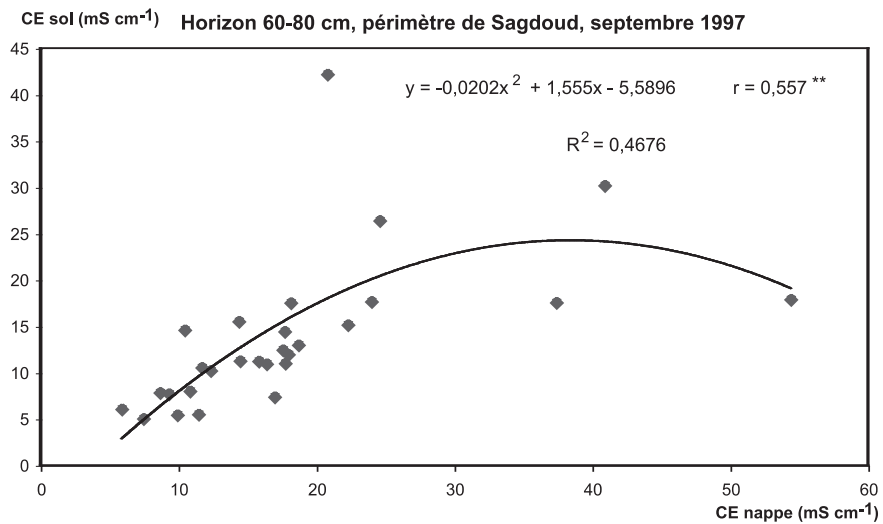


Tableau 9 - Résultats des tests de corrélation entre la salinité de la nappe (mScm^{-1}) et la salinité de l'horizon 0-20 cm (mScm^{-1})**Table 9** - Results of the correlation tests between the underground watertable salinity (mScm^{-1}) and the salinity of the horizon 0-20 cm (mScm^{-1})

Périmètre	Campagne	Coefficient de détermination R^2	Coefficient de corrélation r	Seuil de signification à (n-2) ddl	Equation
Kalaât Landalous	Avril 2000	0,1067	0,02	NS	$Y = -0,07x + 1,03x - 1,69$
Borj Touil	Avril 1999	0,0235	0,152	NS	-
	Octobre 1999	0,3128	0,050	NS	$y = -0,11x^2 + 2,55x - 8,60$
	Mai 2000	0,4691	0,526	NS	$y = -0,01x^2 + 0,22x + 1,02$
	Octobre 2001	0,1276	0,350	NS	$y = -0,011x^2 + 0,035x + 3,87$
Oued Darb	Mars 2000	0,1127	0,222	NS	$y = 0,17x^2 - 3,97x + 25,58$
	Septembre 2000	0,5851	0,196	NS	$y = -0,05x^2 + 4,39x - 7,75$
	Avril 2001	0,1812	0,244	NS	$y = 11,74x - 0,299$
	Octobre 2001	0,2601	0,260	NS	$y = -0,06x^2 + 2,66x - 1,23$
	Avril 2002	0,1457	0,233	NS	$y = -0,03x^2 + 4,83x - 5,52$
Sagdoud	Septembre 1997	0,3205	0,405	$p = 0,05$	$y = -0,03x^2 + 3,33x - 8,44$
	Septembre 1998	0,3153	0,560	$p = 0,05$	$y = 0,01x^2 + 1,15x + 23,95$
Chamsa	Novembre 2000	0,1772	0,288	NS	$y = 0,03x^2 - 3,36x + 11,69$

de cet horizon.

Le coefficient de détermination R^2 présente aussi des valeurs élevées comme à Borj Touil en avril 1999 (0,7073) et à Oued Darb en octobre 2001 (0,6745) sans pour autant que r soit significatif (tableau 11). Ceci reflète le caractère non linéaire de la relation entre les deux paramètres. Plusieurs autres valeurs sont supérieures à 0,1 et confirment le lien partiel entre les deux paramètres, même dans les périmètres de la basse vallée de la Mejerda. Les corrélations entre les deux paramètres ont été en 1992 nettement plus significatives à cette profondeur et au-delà pour le périmètre de Kalaât Landalous (Hachicha *et al.*, 1997).

Pour les équations significatives, les courbes tracées présentent des points maximaux situés à 51 mScm^{-1} pour le périmètre d'Oued Darb et à $38,5 \text{ mScm}^{-1}$ pour Sagdoud (figure 2). Cela devrait signifier qu'au-delà de ces valeurs, la relation s'établit inversement entre les deux variables. Une telle constatation prouve que l'augmentation des deux variables se produit parallèlement jusqu'à ces points culminants puis la relation ne s'établit plus étant donné que la salinité des sols ne s'accroît plus avec celle de la nappe.

DISCUSSION

L'actuelle étude concerne des zones soumises à un régime de nappe superficielle dont le niveau est maintenu éloigné de la surface dans quatre d'entre elles, grâce à un réseau de drainage aménagé conformément à des données pédologiques et hydrauliques. La nappe n'agit donc pas par ses effets de saturation partielle ou totale de la porosité de la zone racinaire dans les périmètres drainés, mais agit plutôt par les dépôts de sels qu'elle peut communiquer par la remontée capillaire de ses eaux. C'est pourquoi, les paramètres traités dans cette étude sont le niveau et la salinité de la nappe et la salinité des horizons successifs des sols.

Les sels solubles sont transportés dissous dans l'eau et s'accumulent dans l'endroit où l'eau est évaporée. Parmi les phénomènes qui régissent le déplacement ascendant de l'eau, Chamayou et Legros (1989) citent la diffusion sous l'effet d'un gradient de température avec ses deux composantes: la thermocapillarité et la thermoosmose. Pour la thermocapillarité, elle est active surtout pendant la nuit et son flux est estimé par Vershinin *et al.* (in Chamayou et Legros, 1989) à $0,1 \text{ mm heure}^{-1}$ pour un gradient de $5 \text{ }^\circ\text{Cm}^{-1}$. Pour

Tableau 10 - Résultats des tests de corrélation entre la salinité de la nappe (mScm⁻¹) et la salinité de l'horizon 20-40 cm (mScm⁻¹)**Table 10** - Results of the correlation tests between the underground watertable salinity (mScm⁻¹) and the salinity of the horizon 20-40 cm (mScm⁻¹)

Périmètre	Campagne	Coefficient de détermination R ²	Coefficient de corrélation r	Seuil de signification à (n-2) ddl	Equation
Kalaât Landalous	Avril 2000	0,3903	0,048	NS	-
Borj Touil	Avril 1999	0,3657	0,162	NS	$y = -0,08x^2 - 1,37x + 7,45$
	Octobre 1999	0,2736	0,002	NS	-
	Mai 2000	0,1413	0,311	NS	$y = -0,008x^2 + 0,197x + 0,54$
	Octobre 2001	0,0447	0,124	NS	-
Oued Darb	Mars 2000	0,0327	0,032	NS	-
	Septembre 2000	0,6769	0,666	p = 0,05	$y = -0,02x^2 + 1,87x - 1,44$.
	Avril 2001	0,1599	0,152	NS	$y = 9,376x^{-0,246}$
	Octobre 2001	0,5002	0,220	NS	$y = -0,05x^2 + 2,16x - 4,05$
	Avril 2002	0,1504	0,272	NS	$y = -0,17x^2 + 2,94x - 2,11$
Sagdoud	Septembre 1997	0,227	0,387	P = 0,05	$y = -0,06x^2 + 1,87 - 1,44$
	Septembre 1998	0,1832	0,344	NS	$y = 4,62x^{0,417}$
Chamsa	Novembre 2000	0,0775	0,215	NS	-

la thermoosmose, le flux qu'elle engendre est faible et n'est sensible que dans les sols salés ce qui pourrait être le cas de certains points à forte salinité dans les périmètres étudiés. Ces phénomènes de diffusion thermocapillaire doivent s'ajouter aux processus de remontée capillaire définis par la loi de Jurin (Hénin, 1977). L'eau de la nappe remonte dans le sol à travers la porosité capillaire pour atteindre des horizons proches de la surface. Les distances parcourues par cette eau ascendante varient suivant les textures ; elles peuvent atteindre 100 cm pour les limons avec une ascension lente, 35 cm dans les sables avec une ascension rapide, et une hauteur intermédiaire dans le cas des argiles avec une ascension encore plus lente (Boulaine, 1976).

Pour les sols de la basse vallée de la Mejerda, des études précédentes (Hamdane et Mami, 1976 ; Ben Hassine *et al.*, 1981) ont montré que pour les textures argilo-limoneuses à limono-argileuses de ces sols, la profondeur critique de la nappe est de 120 cm. A partir de cette profondeur, la corrélation entre le niveau de la nappe et la salinité des horizons de surface était très significative.

Les profondeurs des plans d'eau qui agissent sur la salinité des sols peuvent être plus grandes, en l'absence d'irrigation ou de pluie ; sous climat chaud, des plans d'eau à 2-3 m de profondeur peu-

vent communiquer leurs sels à la surface du sol par une remontée capillaire continue mais à vitesse réduite (CRUESI-CRGR, 1970).

Dans cette étude, nous avons pris toutes les données disponibles en masse et voulu voir si pour chaque périmètre et pour chaque zone géographique, la nappe participe à la salinisation des sols ou non. Les résultats obtenus permettent de constater que dans la majorité des cas, les corrélations sont non significatives, mais avec des coefficients de corrélation qui s'approchent du seuil de signification à (n-2) ddl. Ceci est valable aussi bien pour la profondeur de la nappe que pour sa salinité. De tels résultats expliquent que les relations existent entre les paramètres choisis mais ne sont pas trop rigides pour plusieurs causes dont particulièrement, la variabilité des points dans le périmètre, la nature du matériau pédologique, le type de milieu bioclimatique, la variabilité bi-dimensionnelle des caractéristiques de la nappe et aussi le rôle dans le rabattement de cette nappe des réseaux de drainage aménagés. Cependant, des relations significatives, malgré l'intervention de ces divers facteurs, ont été bien identifiées dans les périmètres du centre et du Sud-Ouest du pays. En conséquence, la nappe agit par son niveau et sa salinité sur les horizons de surface et de moyenne profondeur des sols des périmètres irrigués sans toutefois atteindre des situations très graves ou dan-

Tableau 11 - Résultats des tests de corrélation entre la salinité de la nappe (mScm^{-1}) et la salinité de l'horizon 60-80 cm (mScm^{-1})**Table 11** - Results of the correlation tests between the underground watertable salinity (mScm^{-1}) and the salinity of the horizon 60-80 cm (mScm^{-1})

Périmètre	Campagne	Coefficient de détermination R^2	Coefficient de corrélation r	Seuil de signification à $(n-2)$ ddl	Equation
Kalaât Landalous	Avril 2000	0,1279	0,193	NS	$y = -0,07x^2 + 1,1x - 1,65$
Borj Touil	Avril 1999	0,7073	0,357	NS	$y = 0,10x^2 - 1,69x + 10,61$
	Octobre 1999	0,2903	0,020	NS	$y = -0,05x^2 + 14,56x + 0,60$
	Mai 2000	0,2166	0,309	NS	$y = -0,03x^2 + 0,64x - 0,59$
	Octobre 2001	0,3914	0,615	NS	$y = -0,02x^2 + 0,81x - 0,03$
Oued Darb	Mars 2000	0,0466	0,215	NS	-
	Septembre 2000	0,8284	0,854	$p = 0,01$	$y = -0,01x^2 + 1,44x - 0,49$
	Avril 2001	0,182	0,386	NS	$y = 0,01x^2 - 0,20x + 5,73$
	Octobre 2001	0,6745	0,097	NS	$y = -0,05x^2 + 2,57x - 8,72$
	Avril 2002	0,2746	0,409	NS	$y = -0,09x^2 + 1,65x + 0,33$
Sagdoud	Septembre 1997	0,4676	0,557	$p = 0,05$	$y = -0,02x^2 + 1,56x - 5,59$
	Septembre 1998	0,1080	0,329	NS	$y = 0,25x + 10,21$
Chamsa	Novembre 2000	0,0306	0,134	NS	-

gereuses pour les cultures. La transmission des sels peut ne pas être directe vers la surface, mais elle pourrait se produire en deux étapes : les sels pourraient atteindre les horizons de moyenne profondeur (60 à 120 cm) à partir de la nappe ; ils pouvaient être rejoints à cette épaisseur, par des eaux pluviales ou celles d'irrigation infiltrées par la gravité qui les entraînerait dans un mouvement inverse d'ascension après l'assèchement des horizons de surface. Des niveaux assez profonds peuvent ainsi transmettre même partiellement les sels de la nappe qui finissent par rejoindre la zone de développement racinaire. Ces profondeurs ont été identifiées dans l'actuelle étude par les points minimaux des courbes de corrélation. Ils varient en fonction des périmètres et se situeraient entre 1,40 et 2,0 m le plus souvent dans les sols de texture fine et entre 1,30 m et 1,50 m dans les sols sableux du périmètre de Chamsa.

Il en découle que plus le plan d'eau souterrain est profond, moins le risque de salinisation des sols est grand. Il y a intérêt donc à le repousser constamment en profondeur par les opérations d'entretien et de curage du réseau de drainage installé dans chaque périmètre. Ceci se répercuterait favorablement sur la productivité des sols et éviterait des salinisations secondaires difficiles à corriger. C'est le cas du périmètre de Sagdoud où, malgré le rabattement du

niveau de la nappe au cours des dernières campagnes (Ben Hassine *et al.*, 2003(a)), le sol a gardé encore une très forte salinité qui ne s'est pas améliorée surtout dans les sols gypseux. Le périmètre d'Oued Darb nécessite l'aménagement d'un réseau de drainage ; la pente naturelle de surface ne suffit pas pour entraîner les eaux souterraines de la nappe qui agit sur les sols par la transmission de sels. Ceci a été confirmé par des valeurs élevées de r et R^2 durant plusieurs campagnes.

CONCLUSION

Cinq périmètres irrigués situés dans des milieux physiographiques et bioclimatiques différents ont été suivis au cours de plusieurs campagnes pour déterminer les variables liées à la salinité des sols et de la nappe, en l'occurrence la conductivité électrique de l'extrait de pâte saturée de 3 horizons de surface et de moyenne profondeur, la profondeur du plan d'eau souterrain et la conductivité électrique des eaux de la nappe. Pour évaluer l'effet des deux paramètres liés à la nappe sur la salinité des sols, des tests de corrélation simple ont été établis entre les couples de variables exis-

tants. Les résultats exprimés par les coefficients de détermination et de corrélation ont montré des relations généralement peu significatives mais qui reflètent l'existence de liens partiels entre les deux variables de la nappe et la salinité du sol. La salinisation du sol à partir de la nappe n'est pas directe et totale, mais souvent partielle. Les périmètres du Nord-Est du pays semblent les moins touchés par ce processus de salinisation secondaire. Ce dernier est plus évident dans le périmètre de Sagdoud (Sud-Ouest) dont la nappe est la plus concentrée en sels et dont les sols sont les plus salés. Des corrélations significatives ont aussi été démontrées pour le périmètre d'Oued Darb, non drainé. Des profondeurs des plans d'eau considérées auparavant comme peu dangereuses (>1,20 m) se sont avérées influentes sur les sols; ceci est mieux illustré dans les sols du centre et du sud du pays. Il est donc recommandé de rabattre constamment les niveaux des nappes phréatiques dans les périmètres irrigués en intervenant fréquemment par les opérations d'entretien et de nettoyage des réseaux de drainage enterrés ou même à ciel ouvert. De telles mesures doivent être généralisées à tous les périmètres dont les conditions du milieu physique, de l'environnement et aussi de gestion favorisent les remontées des eaux souterraines vers les horizons des sols exploitables par les racines des végétaux cultivés.

BIBLIOGRAPHIE

- Askri B., 2002 - La modélisation des processus de salinisation des sols irrigués en zones arides, cas de l'oasis de Sagdoud. Thèse, Ecole Nationale des Ingénieurs de Tunis, 165 pages.
- Bach Hamba I., 1992 - Bonification des sols : cas du périmètre de Kalaât Landalous. Caractérisation de la salinité initiale du sol en vue de la détermination des facteurs et des zones à risques de salinisation. Mémoire de fin d'études du cycle de spécialisation de l'INAT, Tunisie, 171 pages.
- Ben Hassine H., Ben Hassine T. et Ben Ammar A., 1981 - Evolution saisonnière et variation inter-annuelle de la salure du sol dans la basse vallée de la Mejerda. ES 193, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 22 pages.
- Ben Hassine H. et Jelassi K., 2001 - Résultats de deux années de suivi de l'évolution de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous, 1999 - 2000. ES 315, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 23 pages.
- Ben Hassine H. et Jelassi K., 2002 - Résultats des campagnes de suivi de l'évolution de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de Cébala - Borj Touil, période 1999 - 2002. ES 321, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 43 pages.
- Ben Hassine H., Jelassi K., Harrathi J., El Ichi H. et Marzougui M., 2002 - Suivi de l'évolution de la salinité des sols et de la nappe dans le périmètre irrigué de Chamsa (Tozeur), période 1999 - 2002. ES 322, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 29 pages.
- Ben Hassine H., Jelassi K., Baccari M.S. et Jeraba M., 2003 (a) - Suivi de l'évolution de la salinité des sols et de la nappe dans le périmètre irrigué de Sagdoud (Gafsa), période 1997-2001. ES 323, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 43 pages.
- Ben Hassine H., Jelassi K., Khouldia J. et Zaïri M., 2003 (b) - Suivi de l'évolution de la salinité des sols et de la nappe dans le périmètre irrigué d'Oued Darb (Kasserine), période 2000-2002. ES 324, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 43 pages.
- Ben Merai M., 1986 - Etude pédologique du périmètre de Sagdoud. Etude n° 2051/E, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 11 pages.
- Ben Thayer M., 1982 - Etude pédologique de l'extension du périmètre de Kalaât El Andalous. Notice de la carte des aptitudes des sols à l'irrigation selon le système USBR, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 6 pages.
- Boulaine J., 1976 - Cours d'hydropédologie, tome 1. Institut National Agronomique Paris Grignon - ENGREF, 80 pages.
- Chamayou H. et Legros J.P., 1989 - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. ACCCT, Presses universitaires de France, 593 pages.
- Comité de suivi des périmètres irrigués, 1998 - Les périmètres irrigués de Tunisie, situation actuelle. Ministère de l'Agriculture, Tunisie, annexe 1, 17 pages.
- CRUESI-CRGR, 1970 - Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Rapport technique, INRGREF, Tunisie, 241 pages + annexes.
- Dérouiche C., Loukil A., Decluseau D. et Braudeau E., 2001 - Le SIRS-sols du périmètre irrigué de Cébala. Bulletin « Sols de Tunisie », numéro spécial 2001, pages 51-66.
- El Fékih M., 1967 - Etude pédologique du Djerid (de Tozeur à Nefta), carte des aptitudes des sols. Etude n° 389, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie.
- Hachicha M., Jelidi B., Trabelsi A. et Brari N., 1992 - Impact du drainage sur les variations saisonnières de la salinité dans le périmètre irrigué de Cébala-Borj Touil. ES 264, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 18 pages.
- Hachicha M. et Trabelsi A., 1993 - Evolution sous irrigation d'un sol cultivé dans le périmètre irrigué aux eaux usées épurées de Cébala-Borj Touil. Résultats

- de la campagne de mesures de l'été 1992. ES 277, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 18 pages.
- Hachicha M., Trabelsi A., Brari N. et Jelidi B., 1995 - Impact du drainage et de l'irrigation sur la variabilité spatio-temporelle des caractéristiques de la nappe et de la salure des sols dans le périmètre irrigué de Kalaât Landalous. ES 283, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 54 pages.
- Hachicha M., M'hiri A., Bouksila F. et Bach Hamba I., 1997 - Variabilité et répartition de l'argile et de la salinité dans le périmètre de Kalaât Landalous (Tunisie). Application à l'évaluation des risques de salinisation. Etude et Gestion des Sols, volume 4, n° 1, 1997, pp. 53-66.
- Hamdane A et Mami A., 1976 - Etude du drainage, de la salure et de l'alcalinité dans les périmètres irrigués de la basse vallée de la Mejerda. ES 128, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 13 pages.
- Hémin S., 1977 - Cours de physique du sol, Tome 2: l'eau et le sol, les propriétés mécaniques, la chaleur et le sol. ORSTOM Paris, Editest Bruxelles, 221 pages.
- Gharbi A., 1975 - Etude pédologique de la basse vallée de la Mejerda, région de Sidi Thabet- Mabtouha. Etude n° 498, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 136 pages et 4 cartes.
- Le Floc'h J., 1967. Etude pédologique de la zone focale de Kasserine-Fériana. Etude n° 323, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 42 pages et 2 cartes.
- Selmi M., 1972 (a) - Plan directeur des eaux du Nord (extension de la basse vallée de la Mejerda). Etude pédologique de Kalaât El Andalous. Carte des textures des sols. Echelle: 1/25 000. Etude n° 462D, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie.
- Selmi M., 1972 (b) - Plan directeur des eaux du Nord (extension de la basse vallée de la Mejerda). Etude pédologique de Cébala-Raoued. Carte des textures des sols. Echelle: 1/25 000. Etude n° 462E, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie.