

# Évolution de la salinité dans une oasis moderne de la Tunisie

B. Askri<sup>(1)</sup> et R. Bouhlila<sup>(2)</sup>

- 1) Ecole Nationale d'Ingénieurs de Gabes, rue Omar Ibn Elkhattab, Zrig, 6029 Gabes - Tunisie  
*askrib@yahoo.com*
- 2) Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, BP 37 le Belvédère, 1002 Tunis - Tunisie

## RÉSUMÉ

Le périmètre oasien de Segdoud, située au sud-ouest de la Tunisie, est affecté par des problèmes de remontée de la nappe phréatique et de salinisation des sols. Cette salinisation est la résultante des effets cumulés d'un climat aride où les précipitations sont rares et irrégulières et d'une gestion irrationnelle de l'irrigation, elle est accentuée par l'absence de lessivage et le dysfonctionnement du système de drainage. Le présent travail a été entrepris pour cerner les phénomènes de salinisation des sols et de remontée de la nappe phréatique en tenant compte des paramètres abiotiques de l'oasis. Un suivi de la profondeur et de la salinité de la nappe, et de la salure de sol a été effectué pendant six ans (1993-1998). Les résultats relatifs à ce suivi ont révélé un régime hydrique stationnaire de la nappe entre novembre 1993 et octobre 1995 résultant d'un équilibre entre les apports d'eau par l'irrigation et les sorties sous l'effet du drainage et de l'écoulement latéral. La tarification de l'eau d'irrigation à partir de juillet 1998 a entraîné l'abandon de l'irrigation dans environ 60 % des parcelles, ceci a provoqué une baisse du niveau piézométrique et une augmentation de la salinité de la nappe. Le débit et la salinité des eaux de drainage variaient en fonction des apports d'eau d'irrigation. L'augmentation de ces apports entraîne une augmentation du débit et une dilution des eaux de drainage. L'analyse des profils salins moyens des sols irrigués correspondant à l'automne 1993 et au printemps 1995 montre que l'irrigation avec de l'eau de la nappe du Continental intercalaire n'entraîne pas de gros risque de salinisation de sol. Les profils salins moyens des sols non irrigués sont ascendants. La salure moyenne de l'horizon de surface de ces sols a augmenté au cours du temps. Le régime salin des couches de sol de sub-surface et profonde était quasiment en équilibre. L'étude de la distribution spatiale de la salinité de la nappe et de la salure des sols non irrigués montre une forte variabilité qui dépend des caractéristiques géomorphologiques de l'oasis et aussi de l'emplacement de l'oasis par rapport aux axes naturels de l'écoulement de la nappe phréatique.

## Mots clés

Oasis, irrigation, drainage, salinité, sol, nappe phréatique.

**SUMMARY****THE EVOLUTION OF THE SALINITY IN A MODERN OASIS IN TUNISIA**

The Segdoud oasis is situated in south-western Tunisia. The climate is arid with rare and irregular precipitation. In this ecosystem, watertable rise and salinisation have been crucial problems. The visible salt deposits and soil salinisation processes are generated by a multitude of factors, including poor water management practices, insufficient water supplies and non-efficient drainage systems. This paper reviews sources, causes and extent of salinity and watertable rise in the Segdoud oasis. The six-year monitoring program (2003-2008) focused on important abiotic water and soil parameters. The obtained results revealed a water balance in equilibrium between November 1993 and October 1995 for the groundwater component. During this period, input by irrigation was in the same magnitude as the export by drainage and groundwater flow. The irrigation water volume has decreased since July 1998 due to the abundance of irrigation practices in about 60 % of parcels. Thus, the piezometric level has decreased and the groundwater salinity has increased. The drainage flux and its salinity concentration varied according to the irrigation water input. This flux increased and this salinity decreased with the increase of the irrigation water volume. The analysis of two irrigated soil salinity profiles corresponding to the autumn 1993 and to the spring 1995 showed that the irrigation using the saline water pumped up from the Continental intercalary aquifer does not involved a significant risk of soil salinisation. The soil salinity profiles related to the uncropped area are ascending. The average soil salinity of the superficial soil layer increased with time from November 1993 to October 1998. The salinities of the subsoil and the deep soil layers are constants in time showing a salt balance in equilibrium. The spatial distribution of the groundwater and of the non-irrigated soil salinities are closely related on the oasis geomorphology and to the groundwater flows.

**Key-words**

Oasis, irrigation, drainage, salinity, soil, groundwater.

**RESUMEN****EVOLUCIÓN DE LA SALINIDAD EN UN OASIS MODERNO DE TÚNEZ**

El perímetro del oasis de Segdoud, situado en el sur-oeste de Túnez, está afectado por problemas de subida del manto freático y de salinización de los suelos. Esta salinización está la resultante de los efectos acumulados de un clima árido donde las precipitaciones son raras e irregulares y de una gestión irracional del riego, está acentuada por la ausencia de lixiviación y por el disfuncionamiento del sistema de drenaje. Se emprende el presente trabajo para delimitar los fenómenos de salinización de los suelos y de subida del manto freático teniendo en cuenta parámetros abióticos del oasis. Se efectuó un seguimiento de la profundidad y de la salinidad del manto freático y de la salinidad del suelo durante 6 años (1993-1998). Los resultados relativos a este seguimiento revelaron un régimen estacionario del manto freático entre noviembre de 1993 y octubre de 1995 que resulta de un equilibrio entre los aportes de agua por irrigación y las salidas bajo efecto del drenaje y del escurrimiento lateral. La tarificación del agua de irrigación a partir de julio de 1998 implicó el abandono del riego en el 60 % aproximadamente de las parcelas, lo que provocó una bajada del nivel piezométrico y un aumento de la salinidad del manto freático. El gasto y la salinidad de las aguas de drenaje variaban en función de los aportes del agua de riego. El aumento de estos aportes implicó un aumento del gasto y una dilución de las aguas de drenaje. El análisis de los perfiles salinos medios de los suelos irrigados que corresponden al otoño de 1993 y a la primavera de 1995, muestra que la irrigación con el agua del manto freático del continental intercalado no implica fuerte riesgo de salinización del suelo. Los perfiles salinos medios de los suelos no irrigados están ascendientes. La salinidad media del horizonte de superficie de estos suelos aumento en el transcurso del tiempo. El régimen salino de las capas de suelos de sub-superficie y profundas estaba casi en equilibrio. El estudio de la distribución espacial de la salinidad del manto freático y de la salinidad de los suelos no irrigados muestra una fuerte variabilidad que depende de las características geomorfológicas del oasis y también de la localización del oasis con los axis naturales del escurrimiento del manto freático.

**Palabras clave**

Oasis, irrigación, salinidad, suelo, manto freático.

Dans le sud Tunisien, le déficit hydrique climatique est tel que le recours à l'irrigation est le seul alternatif permettant de produire et de stabiliser les rendements de culture. Depuis les temps les plus reculés de l'histoire, l'exploitation des sources artésiennes a permis la mise en place d'une agriculture adaptée dans les oasis (Ghazouani *et al.*, 2007). Cette agriculture oasisienne se caractérise par de petites exploitations familiales dans lesquelles la production agricole est organisée selon un schéma qui répond principalement à des besoins d'autoconsommation (Lasram, 1990). Les oasis traditionnelles ont joué un rôle important dans la sédentarisation d'une population semi-nomade dans une zone aride très hostile (Kassah, 1996). Depuis la fin du siècle dernier, une agriculture oasisienne moderne prend place dans le sud Tunisien. Elle est basée sur la production intensive et l'exportation des dattes (Variété Deglat Nour). Les eaux d'irrigation proviennent soit de la nappe de l'Albien (les nappes du Continental Intercalaire) généralement profonde, chaude et salée, soit de la nappe peu profonde du Miopliocène (les nappes du complexe terminal) diversement minéralisée (Mamou, 1990). Dans les oasis modernes, la majorité des jeunes exploitants n'ont pas l'expérience suffisante pour pratiquer une irrigation par submersion. L'utilisation abondante et irrationnelle de l'eau saline en irrigation, les pertes d'eau dans les canaux en terre et l'absence d'un système de drainage efficace ont entraîné de sérieux problèmes de dégradation des sols dans les zones de faible pente et dans les terres basses, avec pour résultat, la remontée de la nappe (Kadri et Van Ranst, 2002). Ces problèmes peuvent s'aggraver en présence d'une croûte gypseuse qui empêche le drainage en profondeur et qui constitue un obstacle mécanique à la pénétration des racines (Hatira *et al.*, 2005). Par ailleurs, la majorité des eaux d'irrigation titrent plus que 2 g/L, ce qui accroît le risque de salinisation de sol (CRUESI-CRGR, 1970). Une telle salinisation provoque une dégradation des propriétés physiques, chimiques et biologiques de sol et entraîne une baisse des rendements de culture (Daoud et Halitim, 1994). Pour pallier ces problèmes, un programme de modernisation des systèmes d'irrigation et de drainage a été entrepris depuis 2001 sur 23 000 ha d'oasis (SANYU Consultants INC., 1996). Le remplacement des canaux d'irrigation en terre par d'autres en béton et la mise en place d'un réseau de drainage enterré à la place d'ancien à ciel ouvert, représentent les principales interventions de ce programme (Ben Aïssa *et al.*, 2006).

Le périmètre oasisien de Segdoud situé dans le sud-ouest de la Tunisie est confronté à des contraintes qui entravent son développement et sa valorisation, et qui menacent sa durabilité. Quelques années après sa mise en eau en 1989, cet écosystème a été surtout menacé par l'engorgement et la salinisation des sols (Ben Marai et Belarbi, 1995). Pour éviter ces problèmes, le périmètre a été équipé dès la fin de l'année 1993 d'un réseau de drainage enterré. Un programme parallèle de suivi de l'évolution de la profondeur et de salinité de la nappe

phréatique ainsi que la salure des sols a été instauré par l'Arondissement Sol de la région de Gafsa pour (i) évaluer l'effet de cette nappe sur les sols, ce qui permet de juger l'état de fonctionnement du réseau de drainage (ii) et aussi identifier l'impact des pratiques d'irrigation sur la productivité de ces sols (Ben Hassine, 2005). Les risques qu'encourt le périmètre nécessitent une bonne compréhension des régimes hydriques et salins de sol et de la nappe phréatique et de leurs évolutions spatiales et temporelles afin de pouvoir élaborer des règles nécessaires à une meilleure gestion des eaux et des sols (Hachicha *et al.*, 1997).

Le présent travail a pour objet de cerner les phénomènes de salinisation des sols et de remontée de la nappe phréatique en tenant compte des paramètres abiotiques de l'oasis. Pour se faire, nous avons évalué le risque de salinisation à partir des eaux d'irrigation et étudié les évolutions spatiales et temporelles de la salure des sols, du niveau piézométrique et de la salinité de la nappe pendant six ans (1993-1998).

## MATÉRIELS ET MÉTHODES

### Description du site

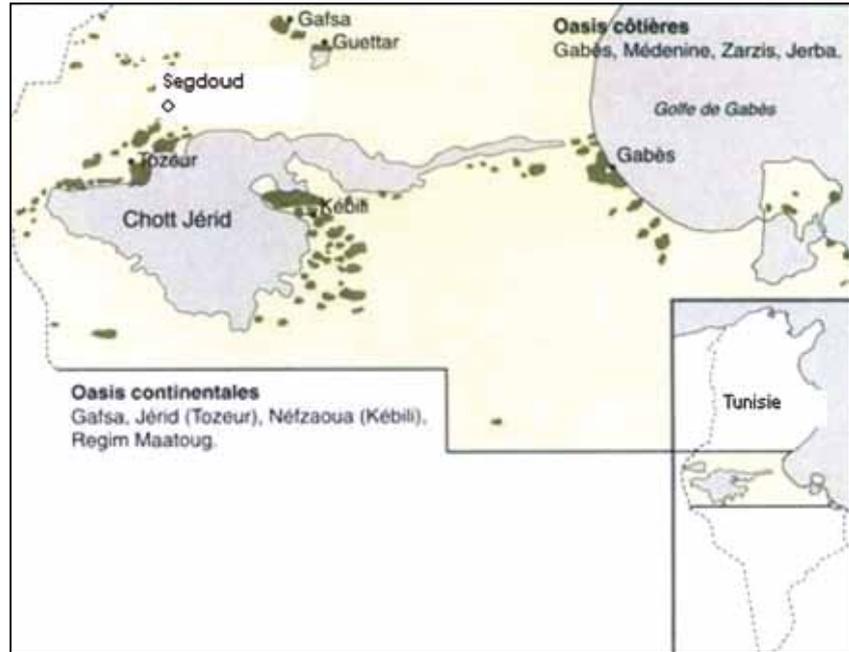
La région de Segdoud est située dans le sud-ouest de la Tunisie (*figure 1*), elle s'étend entre la chaîne de montagne de Gafsa-Metlaoui au nord et la dépression salée du chott El Ghar-sa au sud. Cette région correspond à un vaste lit d'oued qui a pris l'aspect d'une terrasse inclinée vers le sud-ouest, elle est parcourue par un réseau hydrographique organisé autour de l'oued Séguia. La majeure partie de la région a un socle effectif mésozoïque recouvert de couches quaternaires à la fois fluviales et éoliennes (CENA, 2000). Ces couches retiennent une nappe phréatique qui est alimentée soit par les surplus d'eau d'irrigation soit par les eaux de ruissellement qui s'infiltrent à travers la couverture sableuse (Mamou, 1995). À côté de la nappe phréatique, il existe deux grands ensembles d'aquifères séparés par d'épaisses séries évaporatiques ou argileuses de la base du Crétacé supérieur : l'ensemble inférieur appelé le Continental intercalaire ou Albien, et l'ensemble supérieur dénommé Continental terminal ou complexe terminal ou encore Miopliocène.

Dans le périmètre oasisien de Segdoud, la répartition des sols est étroitement liée à la géomorphologie (Ben Marai, 1986) :

- La partie nord est formée par des sols non et peu évolués dont la texture est sableuse; ils peuvent être sains ou à caractère de salure. Le profil est verticalement homogène, à texture sableuse, à structure particulière, à très faible teneur en matière organique. Les sols sont carbonatés et contiennent 3 % à 4 % de gypse.
- La zone de transition entre les parties nord et sud est mal drainée; elle est dominée par les sols calcimagnésiques gyp-

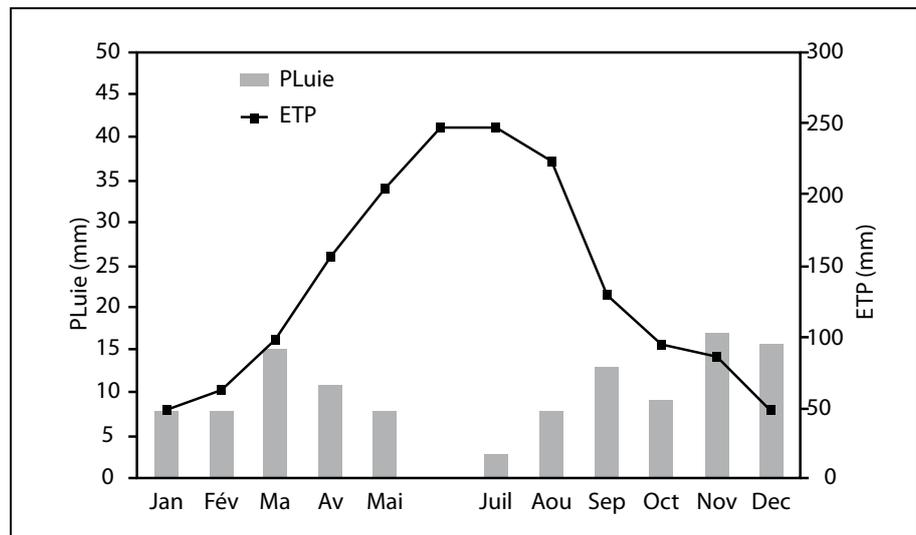
**Figure 1** - Carte de localisation de l'oasis de Segdoud.

**Figure 1** - Location map of Segdoud oasis.



**Figure 2** - Evapotranspiration et précipitation moyennes mensuelles mesurées dans la station météorologique de Tozeur (données disponibles pendant 20 ans).

**Figure 2** - Average monthly evapotranspiration and average monthly rainfall recorded at the Tozeur station (20 years of data).



seux ; elle se caractérise par la présence d'une croûte gypseuse qui est soit affleurante soit couverte d'une couche de sable de 20 cm d'épaisseur. La teneur en gypse de cette croûte varie entre 22 % et 72 %.

- La partie sud est caractérisée par des sols halomorphes ; leur texture est sableuse en surface (0-15 cm), équilibré à moyenne profondeur (15-60 cm) et sableuse dans l'horizon inférieur (60-140 cm). Cette partie est limitée au sud par la dépression salée de Sebkhia El Hanek.

La région de Segdoud est soumise à un climat continental, de type aride à semi-aride. La moyenne annuelle des précipitations est de l'ordre de 90 mm. Le déficit climatique annuel

s'élève à environ 1500 mm sur la base des données climatiques moyennes de 20 ans (Richter, 1986). La saison des pluies s'étend de septembre à mai. La saison d'été est très sèche avec un cumul pluviométrique inférieur à 10 mm (figure 2). Les précipitations se caractérisent par leur irrégularité au cours du temps et la plupart des pluies tombent pendant la saison d'hiver qui s'étend entre décembre et février.

### Système irrigué

L'oasis de Segdoud a été créée en 1988 dans le cadre d'un programme de développement rural intégré (Kassah, 1995), elle

couvre une superficie de 230 ha, scindée en deux périmètres Segdoud 1 situé au nord, et Segdoud 2 situé au sud. Notre travail concerne ce dernier périmètre car il est le plus affecté par la remontée de la nappe et la salinisation des sols. La superficie du périmètre est de 161 ha, répartie en 105 lots de 1,5 ha et 2 lots de 1,75 ha. La superficie irriguée nette était d'environ 20 ha en 1995. Les palmiers dattiers sont cultivés dans des bassins de submersion ou cuvettes. La superficie des cuvettes est variable dans la même parcelle mais elle ne dépasse pas les 50 m<sup>2</sup>. De point de vue agronomique, le périmètre oasien est formé par deux types de sols : des sols cultivés donc irrigués à l'intérieur des cuvettes et des sols non cultivés à l'extérieur. Les eaux d'irrigation sont pompées par deux forages Segdoud CT2 et CT3 qui captent la nappe de l'Albien et fournissent un débit total d'environ 76 l/s, elles sont stockées dans un réservoir semi-enterré puis distribuées gravitairement aux parcelles dans un réseau d'adduction. A l'intérieur des parcelles, le système gravitaire par *séguia* est l'unique mode d'irrigation pratiqué. L'irrigation est organisée suivant un tour d'eau. Avec une main d'eau de 20 l/s, la dose d'irrigation pratiquée est de l'ordre de 216 m<sup>3</sup>/ha moyennant un temps d'irrigation de 3 heures/ha. L'intervalle entre deux arrosages successifs varie de 20 jours en hiver à 15 jours en été.

Pour assurer la réussite de ce projet hydro-agricole, l'eau d'irrigation était livrée gratuitement aux exploitants jusqu'à juillet 1998, date d'entrée en pleine production du périmètre (Kassah, 1995). A partir de cette date, l'eau d'irrigation était gérée par une association pour intérêt commun (AIC). Le mode de distribution de l'eau était à la demande après paiement par l'exploitant (facturation à l'heure). Toutefois, le coût de l'heure d'irrigation réclamé était élevé par la majorité des jeunes exploitants qui n'ont pas de revenu fixe. De ce fait, l'irrigation était stoppée dans environ 60 % des parcelles (CENA, 2000).

Le réseau de drainage comporte un drainage de surface et un drainage souterrain. Dans le premier cas, il est constitué de 4500 m de fossés à ciel ouvert. Un système de drainage souterrain a été installé dès la fin de l'année 1993 dans le cadre d'un projet de réhabilitation du périmètre (figure 6). Ce réseau est composé de 11 000 m de drains enterrés situés à une profondeur variable entre 0,8 et 2 m et espacés de 75 à 150 m. Deux drains principaux sont installés, l'un dans la partie est, l'autre dans la partie ouest. Ils se prolongent en dehors du périmètre par deux rejets à ciel ouvert R1 et R2. Les eaux de drainage sont ensuite évacuées gravitairement vers chott El Gharsa situé au sud-ouest et constituant l'exutoire naturel de la nappe phréatique. Les drains à ciel ouvert et ceux enterrés ne sont pas entretenus et connaissent des problèmes d'invasion et de prolifération de mauvaises herbes.

## Etude des eaux

Des échantillons d'eau ont été prélevés en octobre 1995 à partir des forages d'irrigation Segdoud CT2 et CT3 et des rejets de drainage R1 et R2. Le pH et la conductivité électrique de ces échantillons ont été mesurés *in situ* par des appareils portatifs. Les éléments majeurs ont été analysés au laboratoire selon les méthodes standards. Le rapport d'adsorption de sodium (SAR), qui évalue le risque de sodisation du complexe adsorbant, a été calculé selon la formule suivante où les concentrations sont exprimées en (meq/L) :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

Un réseau de 40 piézomètres a été installé en 1993 pour le suivi de la piézométrie et de la salinité de la nappe phréatique (Ben Marai et Belarbi, 1995). Huit campagnes de mesure de ces paramètres ont été réalisées pendant six ans (1993-1998). La première campagne a été effectuée en novembre 1993, date de démarrage des travaux d'installation du réseau de drainage enterré. Pour les besoins de la cartographie de la profondeur et de la salinité de la nappe, nous avons utilisé les mesures disponibles dans les 40 piézomètres afin d'obtenir un maillage le plus serré possible. La spatialisation des résultats a été réalisée par le logiciel Surfer 7.0. Par ailleurs, un jaugeage mensuel du débit transité par le rejet de drainage R1 a été réalisé entre juin 1994 et mai 1995 simultanément avec une mesure au laboratoire de résidu sec des eaux de drainage.

## Etude des sols

Pour évaluer l'effet de la nappe phréatique sur les sols, sept campagnes de mesure de la salure de sol ont été réalisées entre automnes 1993 et 1998. Deux campagnes ont été effectuées à l'intérieur des cuvettes cultivées pour analyser la dynamique de sels dans les sols irrigués. Les cinq autres ont été exécutées à l'extérieur pour étudier cette dynamique dans les conditions naturelles. Les prélèvements des échantillons de sol ont été effectués à l'aide d'une tarière à proximité des piézomètres à 20, 60 et 100 cm de profondeur. La salure de sol, exprimée en conductivité électrique de l'extrait de la pâte de sol saturée (dS/m), a été déterminée au laboratoire selon la méthode standard (USSS, 1954). Le profil salin moyen de sol a été obtenu en calculant la moyenne arithmétique par horizon de la salure de sol mesurée dans 40 sites. La spatialisation de cette salure a été réalisée par horizon à l'aide du logiciel Surfer 7.0.

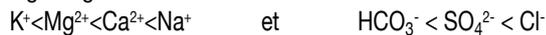
## RÉSULTATS

### Les eaux

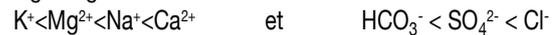
#### Les eaux d'irrigation

Les eaux d'irrigation présente un pH compris entre 7,3 et 7,5. Leur conductivité électrique varie entre un minimum de 4 dS/m et un maximum de 6,4 dS/m. Le SAR varie entre 4,4 et 5,8. Le report des résultats sur le diagramme U.S.S.L, montre que ces eaux se classent en C4-S2. D'après ce diagramme, l'usage de ces eaux présente un risque de salinisation des sols élevé et un pouvoir d'alcalinisation faible. Toutefois, 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 (Cointepas, 1964; CRUESI-CRGR, 1970). Les eaux d'irrigation sont très riches en chlorure (tableau 1). Les anions et les cations se distribuent selon l'ordre suivant :

- forage Segdoud CT2 :



- forage Segdoud CT3 :



Le faciès géochimique des eaux est chloruro-sodique pour le premier forage et chloruro-calcique pour le second. La toxicité par les chlorures de ces eaux est présente, du fait que leur teneur en chlore dépasse largement 10 meq/L, représentant le seuil maximum admissible pour les plantes (Ayars et Westcot, 1988).

#### Les eaux de la nappe phréatique

##### Profondeur de la nappe

La profondeur exprime un équilibre ou un bilan hydrique entre les apports (irrigations, pluies) et les pertes (évaporation, drainage artificiel, écoulement latéral). Lorsque cette profondeur est constante dans le temps, le régime de la nappe est dit stationnaire. Dans les 40 piézomètres répartis sur l'ensemble du périmètre, la profondeur moyenne de la nappe était quasiment constante entre automnes 1993 et 1995 (figure 3). Cet état est justifié par la stabilité des conditions d'exploitation de l'oasis et l'efficacité du réseau de drainage, il témoigne d'un équilibre entre les apports d'eau par l'irrigation et les sorties

**Tableau 1** - Composition physico-chimique des eaux d'irrigation (en meq l<sup>-1</sup>).

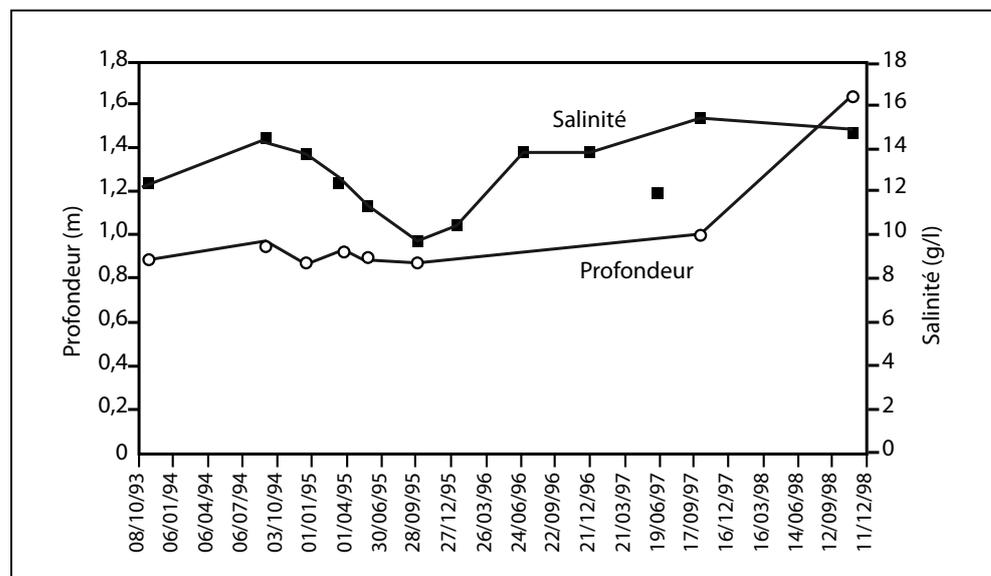
**Table 1** - Physico-chemical composition of the irrigation water (in meq l<sup>-1</sup>)

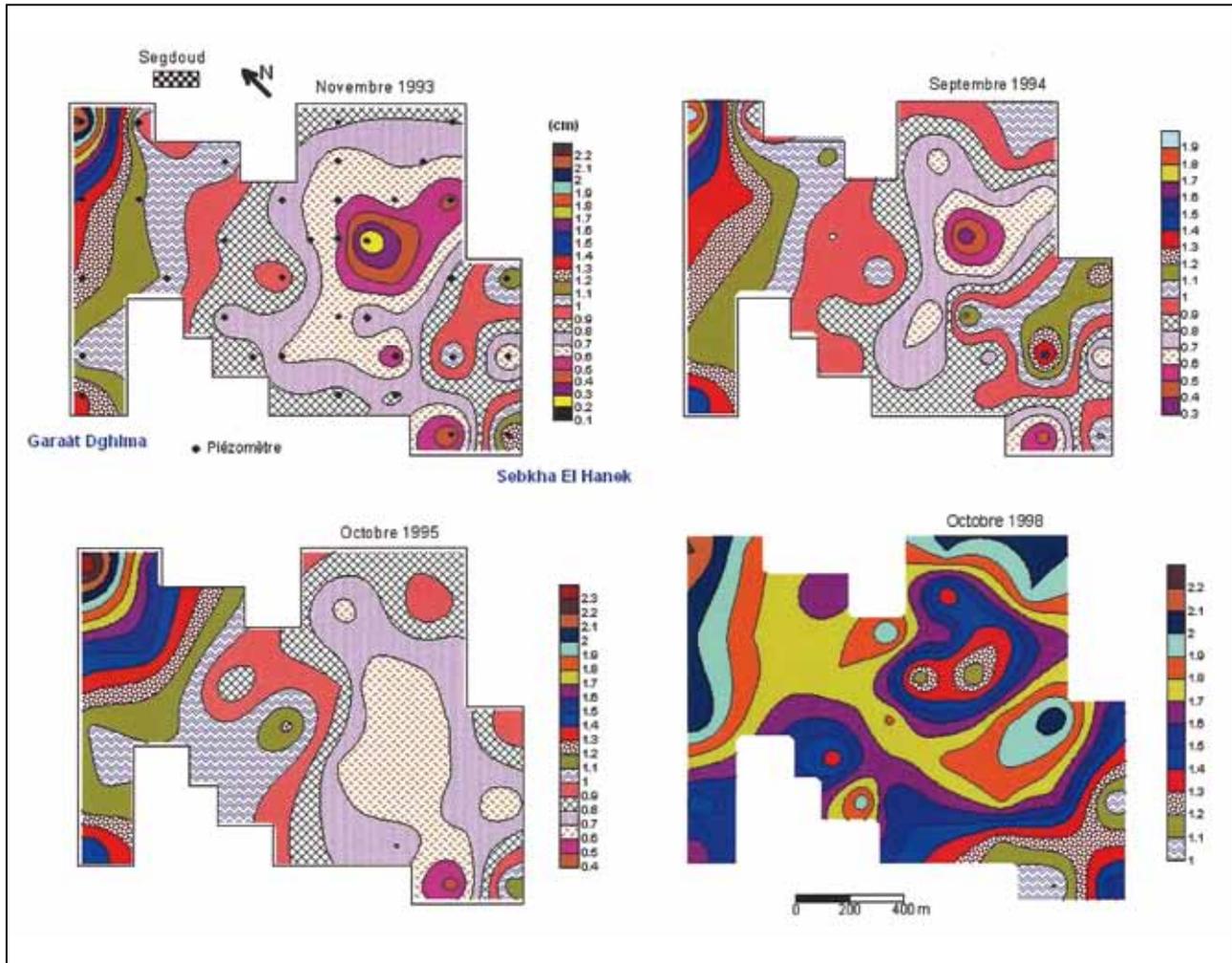
Forage	Date	CEe	pH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
Segdoud CT2	10/1995	6,4	7,3	21	19	26	0,54	35	28,6	3	5,8
Segdoud CT3	10/1995	4,0	7,5	18	12	17	0,42	34	17,2	2,6	4,4

CEe est la conductivité électrique (dS/m).

**Figure 3** - Variation de la profondeur et de la salinité de la nappe phréatique entre novembre 1993 et octobre 1998.

**Figure 3** - Groundwater depth and salinity variations between November 1993 and October 1998.



**Figure 4 -** Profondeur de la nappe phréatique dans l'oasis de Segdoud.**Figure 4 -** Depth of water table in the Segdoud oasis.

sous l'effet du drainage et de l'écoulement latéral. Le régime hydrique de la nappe a changé à partir du printemps 1997. En effet, la profondeur moyenne de la nappe était de 100 cm en avril 1997 et s'élevait à 167 cm en octobre 1998. Cette baisse du niveau piézométrique de la nappe est expliquée par l'abandon de l'irrigation dans environ 60 % des parcelles suite à la tarification de l'eau d'irrigation en juillet 1998. Une tendance à la recharge matérialisée par la remontée du niveau piézométrique de la nappe et la réduction progressive de la zone non saturée était enregistrée en été 1995. Durant cette saison, les apports d'eau d'irrigation augmentent, d'une part, pour assurer les besoins d'évapotranspiration et, d'autre part, pour lessiver les sols.

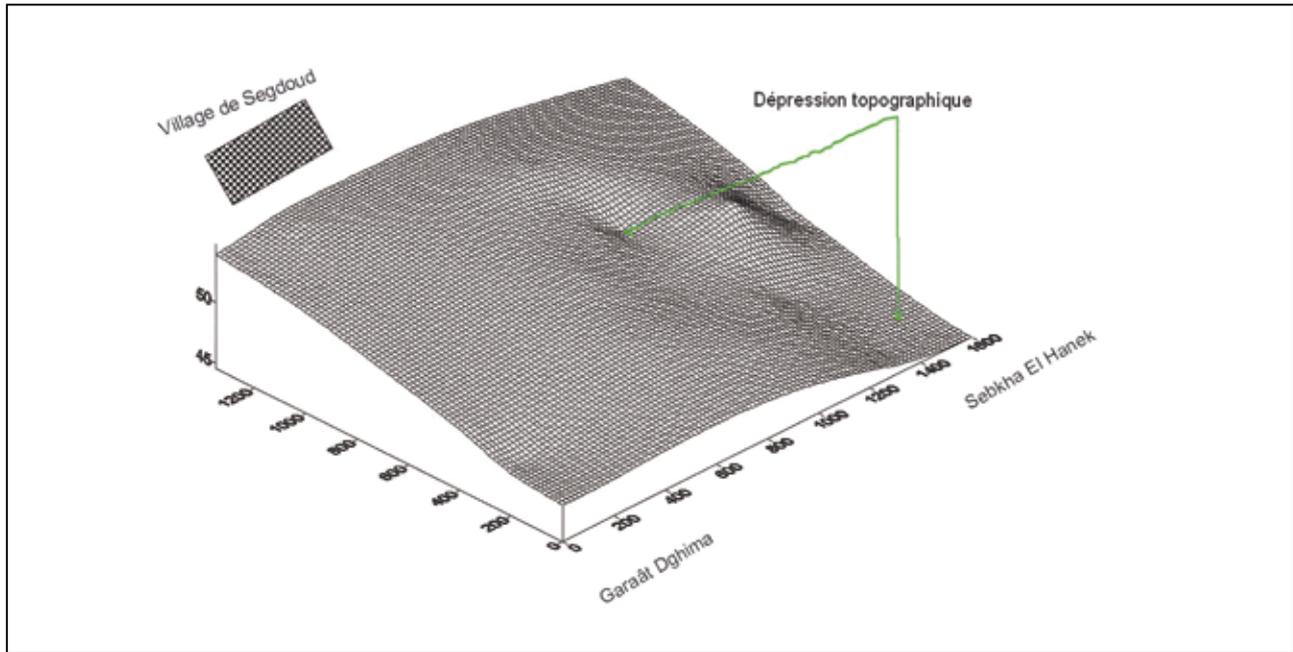
La superficie du périmètre présentant une profondeur de nappe inférieure à 50 cm était de 20 ha en novembre 1993 et baissait à environ 8 ha en septembre 1994. Durant cette pé-

riode, la superficie présentant une profondeur de nappe supérieure à 100 cm a évolué de 10 à 62 ha. La baisse du niveau piézométrique de la nappe est enregistrée une année après le démarrage des travaux d'installation du réseau de drainage. En octobre 1998, la profondeur de la nappe était supérieure à 100 cm, ce qui permet un développement optimal du système racinaire du palmier dattier. Cette tendance à la baisse du niveau piézométrique est attribuée, d'une part, à l'efficacité du réseau de drainage, et d'autre part, à l'abandon de l'irrigation dans environ 60 % des parcelles.

La profondeur de la nappe phréatique présente une variabilité spatiale moyenne (coefficient de variation compris entre 20 % et 40 %) qui paraît être liée à la géomorphologie du périmètre. Cette profondeur augmente dans la partie nord qui est la plus élevée et dans la partie ouest qui se situe en bordure de Garât Dghima (figure 4). Ces deux parties sont bien drainées.

**Figure 5-** Carte topographique du périmètre oasien de Segdoud.

**Figure 5-** Topographic map of the Segdoud oasis.



L'absence de drainage externe dans les micros dépressions topographiques des parties intermédiaire et sud-ouest du périmètre se traduit par des faibles profondeurs de la nappe (figure 5). L'évolution spatiale de la profondeur de nappe est indépendante de la répartition spatiale des apports d'eau d'irrigation. Des faibles profondeurs de la nappe sont enregistrées dans des parcelles abandonnées. Des profondeurs plus élevées sont enregistrées dans des parcelles sur-irriguées.

#### **Piézométrie de la nappe**

Les cartes piézométriques réalisées mettent en évidence deux axes naturels d'écoulement de la nappe phréatique (figure 6). Le premier axe est orienté nord-sud, il traverse le village de Segdoud et aboutit à sebkha El Hanek, avec un gradient hydraulique très variable qui augmente dans la partie intermédiaire du périmètre. Cette partie renferme des micros dépressions topographiques qui constituent des zones de drainage en provenance des parcelles limitrophes. Le second axe d'écoulement est orienté est-ouest, il passe par le village de Segdoud et se dirige vers l'ouest pour aboutir à Garaât Edghima. L'écoulement se fait avec un gradient hydraulique qui varie entre 0,4 % et 1 %. L'existence de deux axes d'écoulement souterrain permet le drainage naturel de grandes quantités d'eau. Toutefois, il résulte de cette divergence d'écoulement l'existence d'une zone mal drainée située dans la partie sud-ouest du périmètre.

#### **Salinité des eaux de la nappe**

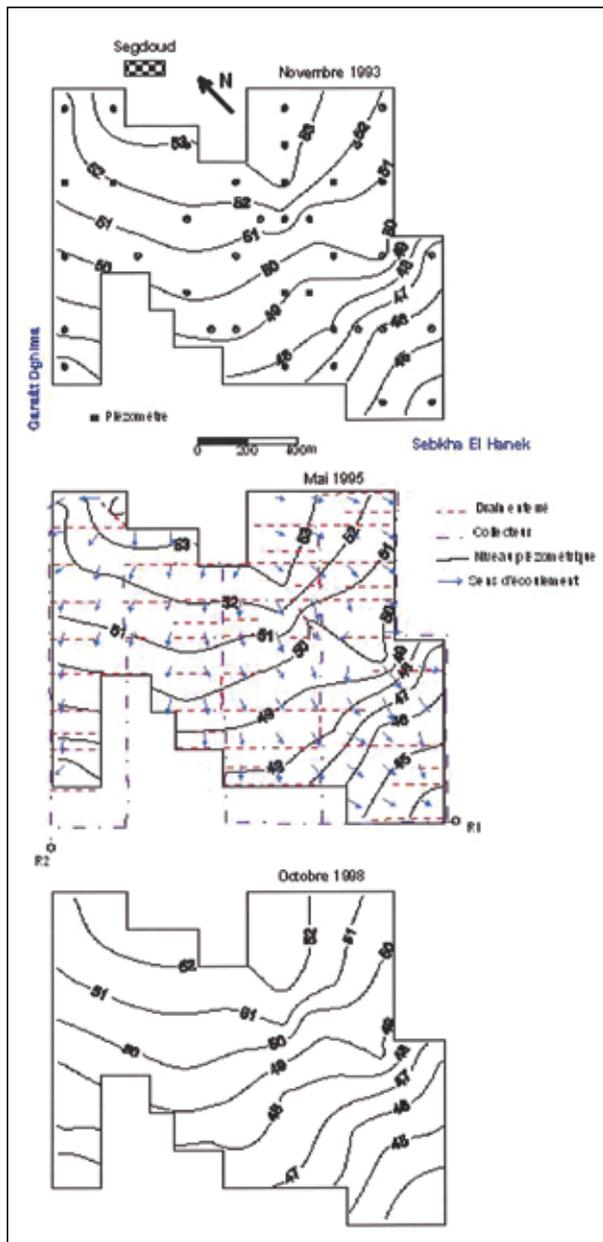
La salinité de la nappe, exprimée en résidu sec (g/L), exprime un équilibre ou un bilan salin entre les apports par l'irrigation et les prélèvements par drainage artificiel et écoulement latéral. Une minéralisation des eaux de la nappe est enregistrée entre novembre 1993 et septembre 1994 alors que la nappe s'approfondit (figure 3), elle coïncide avec la mise en place du réseau de drainage. La baisse du niveau piézométrique de la nappe a créé un appel d'eau chargée en provenance des horizons profonds du profil de sol et des zones limitrophes d'accumulation des sels (Garaât Dghima et Sebkha El Hanek). Entre septembre 1994 et octobre 1995, on note que les eaux de la nappe sont essentiellement soumises à un phénomène de dilution opéré par le surplus d'eau d'irrigation. Le régime salin de la nappe était stationnaire entre mars 1997 et octobre 1998.

La salinité de la nappe se caractérise par une forte variabilité spatiale (coefficient de variation compris entre 57 % et 100 %) qui est expliquée par l'emplacement des piézomètres. Ceux qui sont installés dans des parcelles irriguées et bien entretenues présentent une salinité relativement modérée. Les piézomètres implantés dans les parcelles abandonnées ou mal entretenues présentent une salinité élevée qui est due, d'une part, au manque d'eau de lessivage, et d'autre part, à l'évaporation à partir du plan d'eau d'une nappe presque affleurante.

La répartition spatiale de salinité de la nappe relevée en automne 1995 montre une similitude assez étroite avec la répartition spatiale de son niveau piézométrique. Une évolution

**Figure 6** - Carte des contours piézométriques de la nappe phréatique dans l'oasis de Segdoud en novembre 1993, mai 1995 et octobre 1998.

**Figure 6** - Groundwater contour maps of the Segdoud oasis area at November 1993, May 1995 and October 1998.



de la minéralisation des eaux de la nappe depuis l'amont vers les micros dépressions des parties intermédiaire et sud-ouest est observée (figure 7). Des salinités relativement modérées sont enregistrées dans la partie nord du périmètre. Les eaux d'irrigation lessivent ces sols. Les eaux ainsi chargées en sels alimentent la nappe qui s'écoule dans le sens de la pente en drainant les sels vers les secteurs déficitaires en topographie localisés dans les parties intermédiaire et sud-ouest du périmètre. Ces parties renferment des croûtes gypseuses peu profondes. Par conséquent, une des raisons de la minéralisation des eaux de la nappe est liée au phénomène dissolution/précipitation du gypse (Hatira *et al.*, 2007; Marlet *et al.*, 2007). En décembre 1994, nous avons enregistré une profondeur de nappe de 19 cm et une salinité de ses eaux d'environ 85 g/L dans une parcelle abandonnée située dans la partie intermédiaire du périmètre.

### Les eaux de drainage

La conductivité électrique des eaux de drainage varie entre 11,8 et 18,7 dS/m. Le SAR varie entre 13,7 et 20,3. Ces eaux sont classées C4-S4. En plus de la salinisation, elles peuvent provoquer une alcalinisation des sols dans les zones de rejet. Les eaux de drainage sont riches en chlorure et en sodium (tableau 2). Leur faciès géochimique est chloruro-sodique avec une distribution des anions et cations comme suit:



Ce faciès est similaire à celui des eaux du forage Segdoud CT2. Les eaux issues du rejet de drainage R2 sont plus diluées que celles issues du rejet R1. Ceci est expliqué par le fait que la nappe phréatique était plus salée dans le secteur Est du périmètre.

Les ions chlorure n'interagissent pas avec la matrice solide et peuvent être considérés comme un traceur, ou un indicateur du facteur de concentration des eaux d'irrigation (Marlet *et al.*, 2009). Le facteur de concentration des eaux de drainage variait d'un facteur 2 à 3,6 par rapport aux eaux d'irrigation. La concentration des eaux de drainage s'explique en particulier par une efficacité réduite de lessivage liée à l'écoulement rapide vers le système de drainage de la nappe. Ce résultat peut aussi être comparé aux facteurs de concentration de 2,9 et 3,4 calculés respectivement par Ben Aissa *et al.* (2006) et

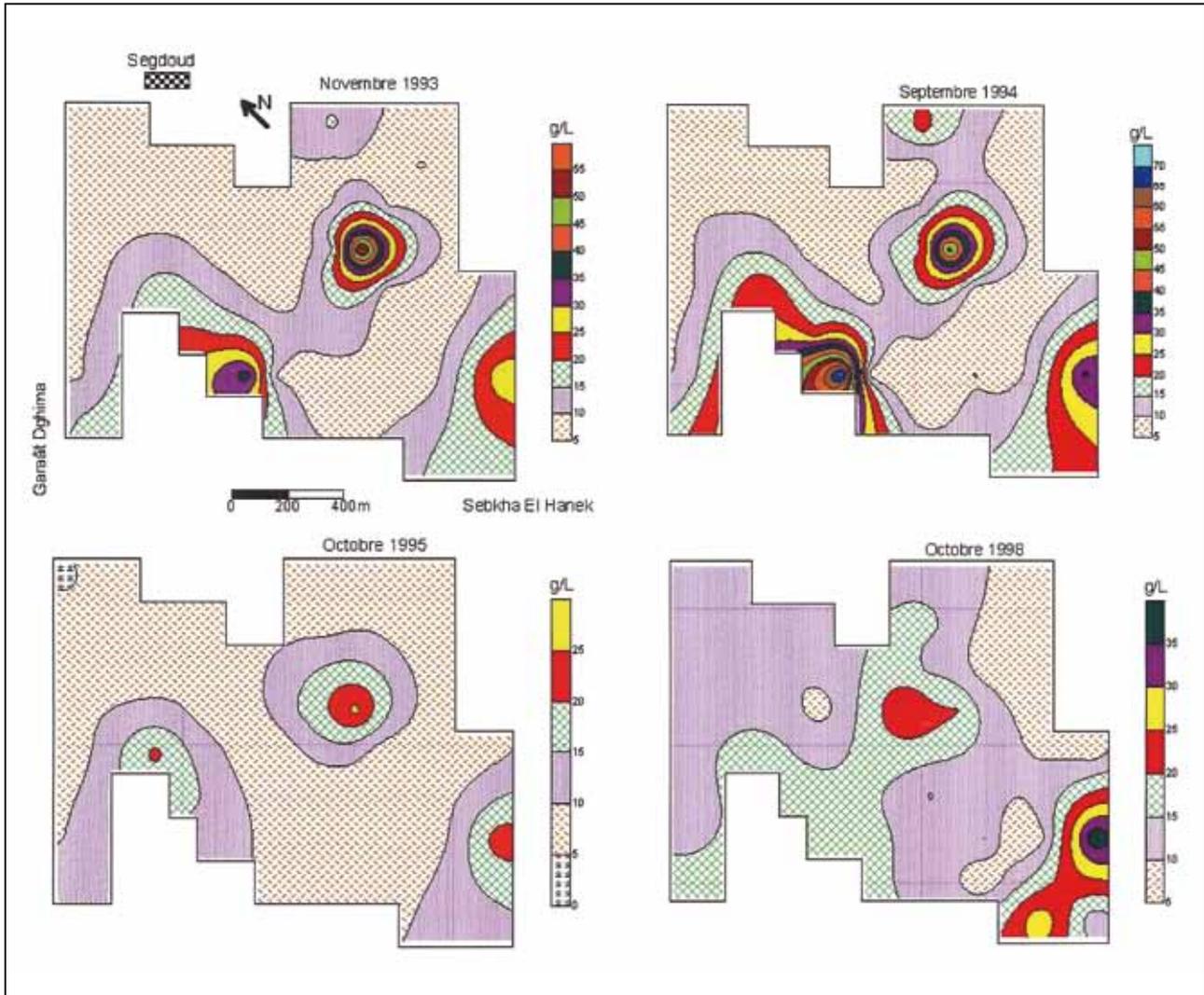
**Tableau 2** - Composition moyenne de l'eau de drainage (en meq l<sup>-1</sup>).

**Table 2** - Chemical composition of drainage water (in meq l<sup>-1</sup>).

Rejet	Date	CEe	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SAR
R1	03/1995	18,7	45	19	115	1,23	125	76	2,6	20,3
R2	03/1995	11,8	38	14	70	0,52	70	52	3,6	13,7

**Figure 7** - Carte des iso-valeurs de la salinité de la nappe phréatique en novembre 1993, septembre 1994, octobre 1995 et octobre 1998.

**Figure 7** - Groundwater salinity contour maps of the Segdoud oasis at November 1993, September 1994, October 1995 and October 1998.



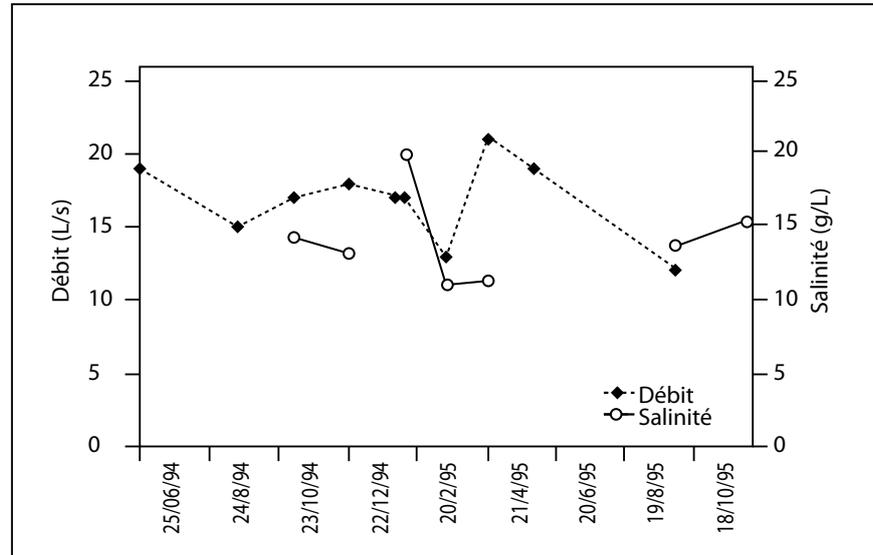
Marlet *et al.* (2007) dans le cas de l'oasis de Fatnassa dans le sud Tunisien.

Le débit et la salinité des eaux de drainage présentent des évolutions temporelles cohérentes avec les occurrences d'irrigation et la dynamique de la nappe (*figure 8*). Le débit de drainage était de 15 l/s en septembre 1994 et s'élevait à 18 l/s en décembre 1994. Cette augmentation est enregistrée alors que la nappe monte. Par ailleurs, les volumes d'eau d'irrigation ont baissé en février 1995 par la suite d'un arrêt du forage d'irrigation Segdoud CT2 (*figure 9*), ceci a entraîné une baisse du niveau piézométrique de la nappe et du débit de drainage. La salinité des eaux de drainage était de 20 g/L en février 1995

et baissait à 11 g/L en mars 1995. Cette dilution est expliquée par l'augmentation des volumes d'eau d'irrigation. En effet, ces volumes étaient d'environ 30 000 m<sup>3</sup> en février 1995 et s'élevaient à environ 71 000 m<sup>3</sup> en mars 1995. La salinité des eaux de drainage a augmenté durant la période estivale de l'année 1995 pour atteindre un maximum de 15 g/L en décembre 1995. Durant ce mois, nous avons enregistré un volume d'eau d'irrigation minimal qui est d'environ 14 000 m<sup>3</sup>. Ces résultats mettent en évidence une liaison étroite entre le volume d'eau d'irrigation et le débit de drainage, d'une part, et le volume d'eau d'irrigation et la salinité des eaux de drainage, d'autre part.

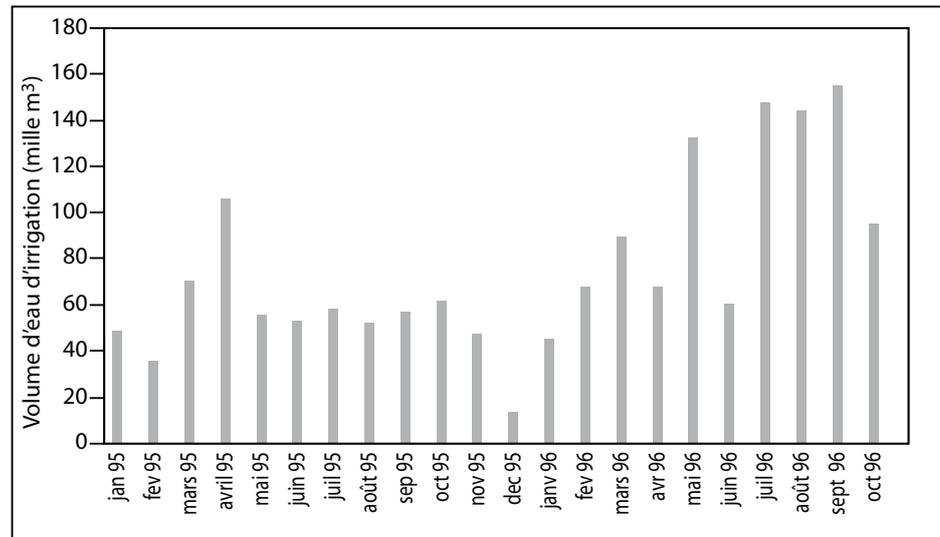
**Figure 8**- Variation de la salinité et du débit de drainage (rejet R1).

**Figure 8**- Salinity and flow variations of the water drainage.



**Figure 9**- Volumes d'eau d'irrigation mensuels utilisés entre janvier 1995 et octobre 1996.

**Figure 9**- Monthly irrigation water volumes applied between January 1995 and October 1996.



## Les sols

### Les sols irrigués

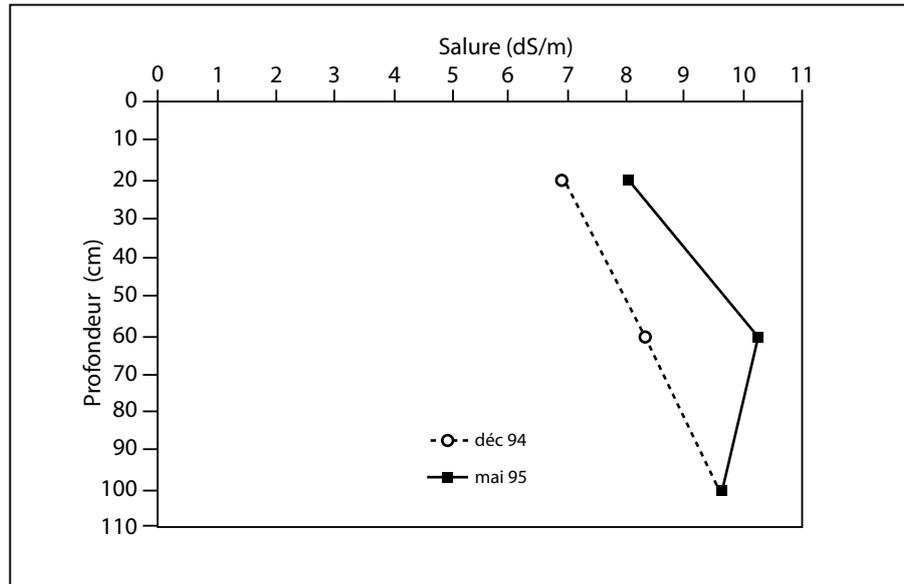
Le profil salin moyen des sols irrigués (à l'intérieur des cuvettes) correspondant à l'hiver 1994 est descendant (figure 10), il présente une salure de l'horizon de surface d'environ 7 dS/m, salure qui augmente en profondeur et atteint environ 10 dS/m dans l'horizon profond (80-120 cm). Le profil salin moyen correspondant au printemps 1995 est uniforme, il présente une salure de l'horizon de surface d'environ 8 dS/m, salure qui augmente légèrement dans l'horizon de sub-surface (40-80 cm) à 10 dS/m puis baisse à environ 9 dS/m dans l'horizon profond. La comparaison de ces deux profils salins montre que l'irrigation avec l'eau de la nappe de l'Albien :

- conserve la salure moyenne de l'horizon de surface de sol à une valeur proche de la conductivité électrique de l'eau d'irrigation ;
- entraîne une légère salinisation de l'horizon de sub-surface ;
- maintient un régime salin en équilibre dans la couche de sol profonde.

Le périmètre oasien de Segdoud est caractérisé par des sols à texture sablo-limoneuse favorable à l'infiltration de l'eau et au transfert des solutés (Askri, 2002). Les doses d'irrigation appliquées ont permis de ramener toute la couche de sol à la capacité au champ voir souvent à la saturation. Ce type de fonctionnement hydrique, favorisé par la gratuité de l'eau d'irrigation, entraîne le drainage vertical et permet le lessivage des sels solubles en profondeur.

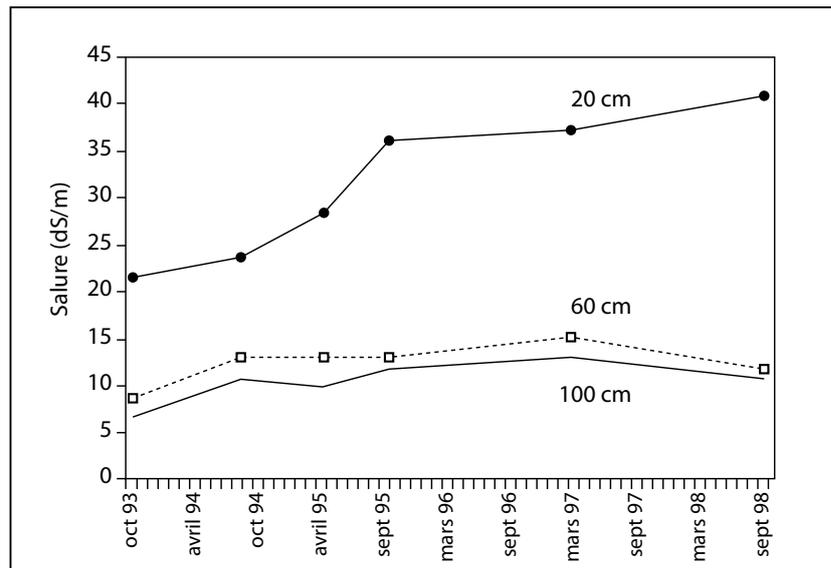
**Figure 10** - Profils salins de sol irrigué en décembre 1994 et mai 1995.

**Figure 10** - Soil salinity profiles in the irrigated area in December 1994 and May 1995.



**Figure 11** - Variation de la salure moyenne de sol non irrigué entre septembre 1993 et octobre 1998.

**Figure 11** - Variation of the mean soil salinity within the non-irrigated area between September 1993 and October 1998.



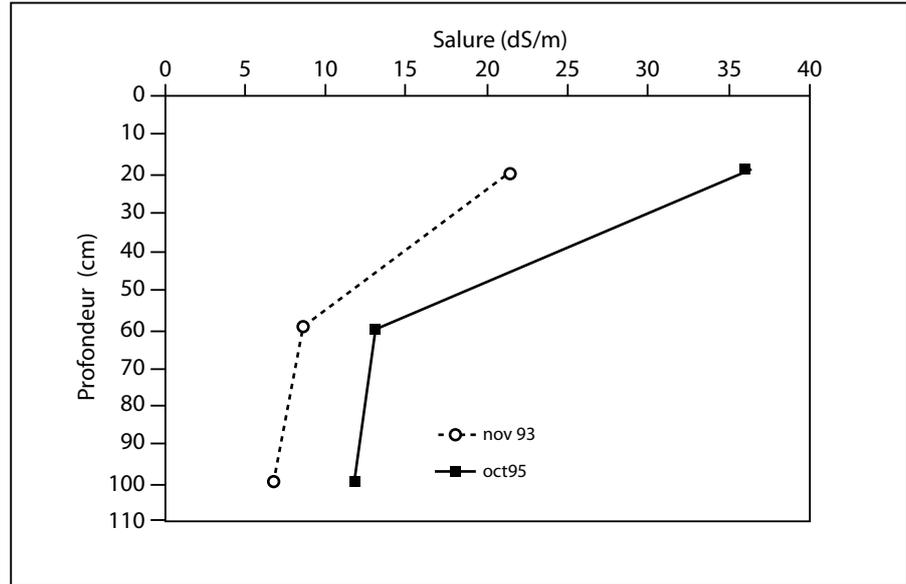
### Les sols non irrigués

Dans les 40 profils de sol répartis sur l'ensemble du périmètre, la salure moyenne de la couche de sol superficielle a augmenté au cours du temps (figure 11). Cette salure était d'environ 21 dS/m en novembre 1993 et s'élevait à environ 41 dS/m en octobre 1998. Cette tendance à la salinisation est imputée aux conditions climatiques très arides produisant une forte évaporation et surtout elle témoigne sur la rareté des pluies abondantes qui lessivent le sol. Les évolutions temporelles de la salure des couches de sol de sub-surface et profonde sont assez similaires, elles mettent en évidence un régime salin en équilibre durant la

période qui se prolonge entre septembre 1994 et avril 1997. Ce régime résulte d'un équilibre entre les apports de sels à partir de la nappe par remontée capillaire et les sorties de sels sous l'effet de la percolation en profondeur. La dynamique de sels dans les couches de sub-surface et profonde de sol non irrigué semble être moins influencée par le processus d'évaporation que celle dans l'horizon de surface. La salure moyenne de la couche de sol profonde était de 13 dS/m en printemps 1997 et baissait à environ 11 dS/m en automne 1998. Cette dilution coïncide avec une baisse de la salinité de la nappe qui a évolué durant cette période de 16 à 15 g/L.

**Figure 12-** Profils salins de sol non irrigué en novembre 1993 et octobre 1995.

**Figure 12-** Soil salinity profiles in non-irrigated area in November 1993 and October 1995.



Le profil salin moyen des sols non irrigués correspondant à l'automne 1993 est ascendant (*figure 12*), la salure est trop élevée en surface (environ 21 dS/m) sous l'effet de l'évaporation; elle baisse fortement dans les horizons de profondeur pour atteindre environ 7 dS/m dans la couche de sol profonde. Le profil salin moyen correspondant à l'automne 1995 présente aussi une très forte salure en surface (environ 36 dS/m), salure qui diminue dans les horizons les plus profonds pour atteindre environ 12 dS/m dans la couche de sol profonde. La comparaison de ces deux profils salins suggère les faits suivants:

- une très forte salinisation de l'horizon de surface de sol non irrigué sous l'effet de l'évaporation,
- un gradient de salure important entre les couches de sol superficielle et profonde,
- l'allure des deux profils salins est comparable pour les deux dates, mais la salure correspondante à l'automne 1995 est plus élevée que celle enregistrée à l'automne 1993.

Le climat est aride, la nappe phréatique est salée et peu profonde, le sol sablo-limoneux du périmètre oasien de Segdoud présente donc des conditions favorables à la mobilisation des sels par remontée capillaire. En l'absence d'irrigation, les sels des sols non cultivés (hors des cuvettes) proviennent donc à partir de la nappe phréatique. Ce résultat a été confirmé par Ben Hassine (2005) à l'aide des tests de corrélation simples qui ont été établis entre la salure du sol et la salinité de la nappe phréatique, d'une part, et la salure du sol et la profondeur de la nappe d'autre part.

La salure des sols non irrigués est hétérogène en surface, hétérogénéité qui baisse en profondeur. La salure de la couche de sol superficielle présente des valeurs relativement modérées dans la partie nord du périmètre (*figure 13*). Dans cette partie, les sols sableux sont caractérisés par une bonne infil-

tration et une faible capacité de rétention hydrique. Une salinisation très forte de l'horizon de surface est observée dans les micros dépressions des parties intermédiaire et sud-ouest du périmètre. Dans ces zones, la carte montre une similitude assez étroite avec l'allure de la carte de la salinité de la nappe (*figure 7*). Par conséquent, les processus de salinisation des eaux de la nappe et des sols non irrigués se produisent dans les mêmes secteurs de l'oasis qui souffrent d'un drainage externe déficient.

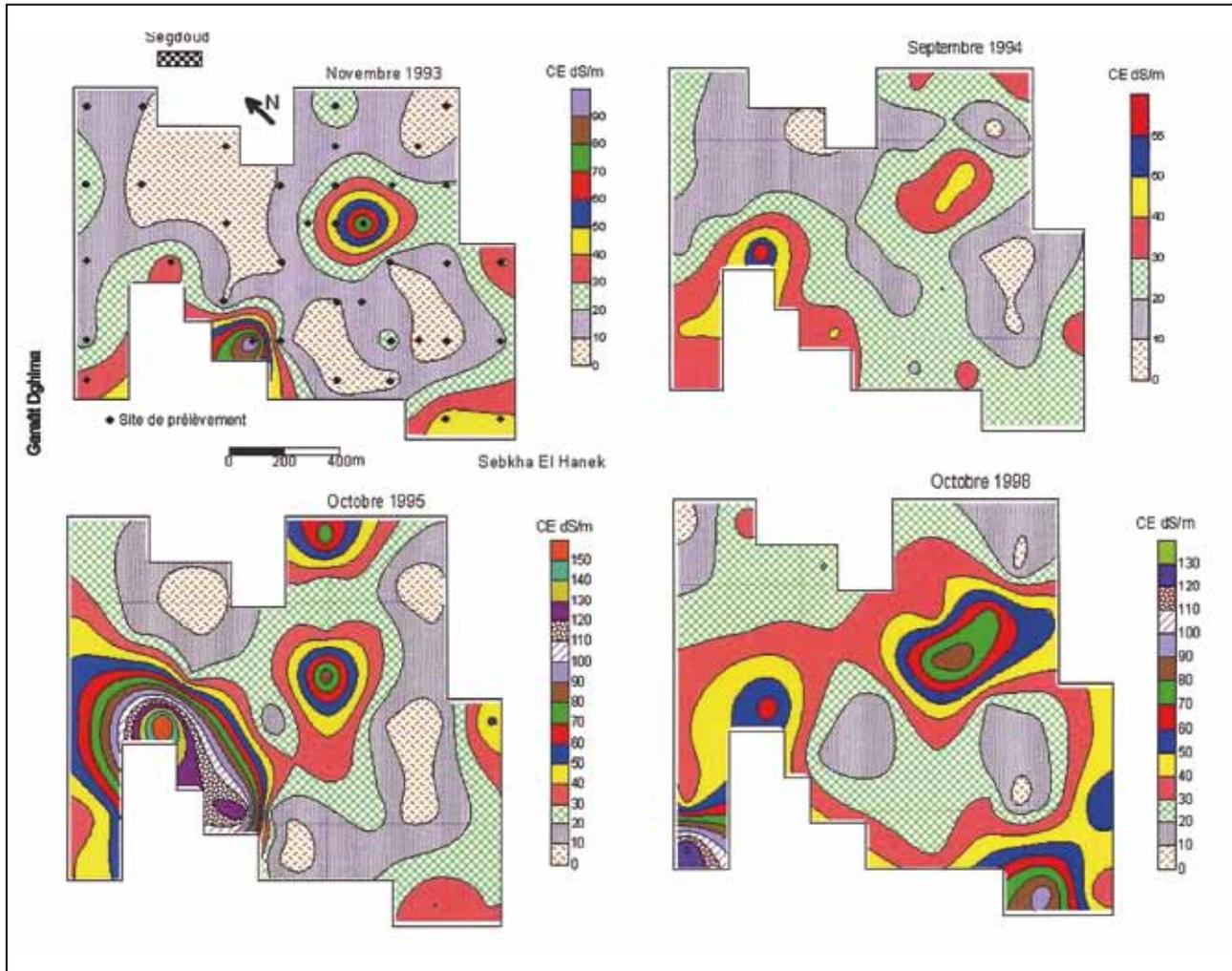
## DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude des évolutions de la profondeur et de la salinité de la nappe, du débit et de la salinité des eaux de drainage et de la salure de sol dans le périmètre oasien de Segdoud situé dans le sud-ouest de la Tunisie a permis une compréhension des processus de salinisation des sols et de remontée de la nappe. Cette étude a inclus une caractérisation géochimique des eaux d'irrigation et de drainage. Durant la période de suivi (1993-1998), nous avons enregistré trois événements qui ont influencé la dynamique des eaux et des sels dans le périmètre. Le premier événement consiste à l'installation du réseau de drainage à la fin de l'année 1993. Le deuxième coïncide avec l'arrêt du forage d'irrigation Segdoud CT2 en février 1995 suite à une panne mécanique. Le troisième événement consiste à la tarification de l'eau d'irrigation à partir de juillet 1998. Ces deux derniers événements ont été suivis par une baisse des apports d'eau d'irrigation

Durant les dix premières années qui ont suivi la mise en eau du périmètre, la gratuité de l'eau d'irrigation a engendré une situation de gaspillage et une mauvaise gestion de l'eau

**Figure 13-** Distribution spatiale de la salure de l'horizon de surface de sol.

**Figure 13 -** Soil salinity distribution in the upper soil layer.



par un usage abusif et anarchique (Askri, 2002). Le réseau d'irrigation constitué principalement de canaux à ciel ouvert, dit "Séguia" demeure la cause principale de la perte d'eau d'irrigation (SCET-TUNISIE, 1999). Tous ces facteurs ont entraîné une élévation du niveau piézométrique de la nappe, une minéralisation de ses eaux et une salinisation des sols non irrigués. Les mesures effectuées en novembre 1993 ont montré que la nappe phréatique était située à une profondeur moyenne de 87 cm, que la salinité moyenne de ses eaux était d'environ 12 g/L, et que la salure moyenne de la couche superficielle des sols non irrigués était d'environ 21 dS/m. Dans ces conditions défavorables, plusieurs exploitants ont abandonné leurs parcelles. Déjà en printemps 1995, environ 20 % de la surface totale exploitée du périmètre était abandonnée, ce qui constitue une menace sérieuse pour la dégradation des sols. En effet, il y

a une tendance vers la généralisation de la salinité à la surface des sols par remontée capillaire. Dans le secteur intermédiaire du périmètre, la salure de l'horizon de surface de sol a atteint environ 83 dS/m en novembre 1993. Pour restaurer les sols affectés par la salinisation et abaisser le niveau de la nappe dans le périmètre, le ministère de l'Agriculture a lancé dès la fin 1993 les travaux d'installation du réseau de drainage. En septembre 1994, la profondeur moyenne de la nappe était de 97 cm, la salinité moyenne de ses eaux était d'environ 14 g/L et la salure moyenne de la couche de sol superficielle des sols non irrigués était d'environ 24 dS/m. Ces résultats montrent que la salinité de la nappe et la salure des sols non irrigués ont augmenté malgré la présence du réseau de drainage. Dans un contexte climatique aride, le lessivage des sols est assuré essentiellement par l'eau d'irrigation qui permet aussi la dilution

des eaux de la nappe. Néanmoins, les pluies exceptionnelles comme celles de janvier 1991 (340 mm en deux jours) ont eu un impact très positif sur la réduction du stock résiduel des sels accumulés dans les sols (Job, 1992). Entre septembre 1994 et octobre 1995, nous avons enregistré une baisse de la salinité de la nappe phréatique qui est attribuée, d'une part, aux excès d'eau d'irrigation et, d'autre part, à l'efficacité du réseau de drainage. A partir de juillet 1998, l'abondance de l'irrigation dans environ 60 % des parcelles a entraîné une baisse du niveau piézométrique de la nappe et une minéralisation de ses eaux. Ces évolutions montrent que l'hydrodynamisme de la nappe est influencé principalement par la gestion de l'eau d'irrigation. Cette gestion a influencé aussi le débit et la salinité des eaux de drainage. En effet, l'arrêt du forage d'irrigation Segdoud CT2 en février 1995 a été suivi par une diminution du débit et une minéralisation instantanée et rapide des eaux de drainage transitée par le rejet R1. La mise en marche de ce forage en mars 1995 a été suivie par une augmentation du débit et une dilution rapide des eaux de drainage.

Les sols irrigués avec les eaux de la nappe de l'Albien sont dominés par des mouvements descendants de sels. Les différentes fractions de lessivage qui ont été appliquées entre décembre 1994 et mai 1995 ont pu maintenir les sels en profondeur. Ce résultat montre que l'utilisation de ces eaux en irrigation ne pose pas un gros risque de salinisation des sols à conditions d'assurer un drainage suffisant. Des essais d'irrigation avec une eau chargée (3 g/l) appliqués dans une parcelle située dans l'oasis de Tozeur (sud Tunisien) arrivent aux mêmes conclusions (CRUESI-CRGR, 1970). Cependant, des expériences menées dans deux parcelles situées en milieu saharien en Algérie ont montré que la salinité, qui était initialement inférieure à 2 dS/m dans les horizons de surface, est passée à plus de 12 dS/m après cinq campagnes d'irrigation en utilisant les eaux de la nappe de l'Albien dont la conductivité électrique est de 8,5 dS/m (Kaddour *et al.*, 2003). Il est évident que ces eaux sont plus chargées que celles utilisées dans le périmètre oasien de Segdoud. Par ailleurs, la technique d'irrigation par aspersion appliquée dans ces expériences a entraîné le stockage des sels dans les horizons de surface. Tandis que la technique d'irrigation par submersion appliquée dans le périmètre oasien de Segdoud a permis le lessivage de sels en profondeur.

Dans les sols non cultivés du périmètre de Segdoud, la forte évaporation et l'absence de lessivage sont des facteurs qui ont contribué au mouvement ascendant de sels à partir d'une nappe salée et peu profonde. Les profils salins correspondants sont ascendants. En absence des pluies abondantes, la couche de sol superficielle est soumise à l'influence du processus d'évaporation et présente un régime salin aditif. Tandis que les couches de sol de sub-surface et profonde sont soumises à l'influence de la nappe et présentent un régime salin en équilibre.

La salinité de la nappe et la salure des sols non irrigués présentent une forte variabilité spatiale. Leurs répartitions spatiales semblent être liées à la géomorphologie du périmètre. Les parties nord et ouest du périmètre sont bien drainées. A *contrario*, les zones d'accumulation préférentielle de sels se situent dans les parties intermédiaire et sud-ouest en relation avec une position élevée de la nappe. Ces deux zones présentent des micro-dépressions topographiques. Par conséquent, elles constituent des zones de drainage des écoulements en provenance des parcelles limitrophes. Aussi, ces zones contiennent une croûte gypseuse peu profonde. Par conséquent, une des raisons de la minéralisation des eaux de la nappe est liée au phénomène dissolution/précipitation du gypse (Hatira *et al.*, 2007).

L'amélioration des sols salés du périmètre oasien de Segdoud reste réalisable mais tributaire d'un aménagement minimum qui garantit une profondeur satisfaisante de la nappe phréatique. La réhabilitation et la sauvegarde de ce périmètre nécessiteraient une intensification du réseau de drainage dans les parties intermédiaire et sud-ouest, des opérations d'entretien et de curage du réseau de drainage existant et une meilleure gestion des eaux d'irrigation qui tient compte des facteurs climatiques, pédologiques hydrogéologiques et topographiques de l'oasis.

## BIBLIOGRAPHIE

- Askri B., 2002- La modélisation des processus de salinisation des sols irrigués en zones arides, cas de l'oasis de Segdoud. Thèse, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Tunis, 165 p.
- Ayers R.S., Westcot D.W., 1988- La qualité de l'eau en agriculture. FAO Bulletin d'Irrigation et de Drainage, 29, Rév. 1, Rome. 180 p.
- Ben Aissa I, Bouarfa S., Bouksila F., Bahri A., Vincent B., Chaumont C., 2006- Fonctionnement du drainage au sein d'une oasis modernisée du sud tunisien. Actes du deuxième atelier régional du projet SIRMA. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom., Marrakech, Maroc, 13 p.
- Ben Hassine H., 2005- Effets de la nappe phréatique sur la salinisation des sols de cinq périmètres irrigués en Tunisie. Etude et Gestion des Sols, 12, 4, pp. 281-300.
- Ben Meraï M., 1986- Etude pédologique du périmètre de Segdoud. Etude n°2051/E, Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 6 pages.
- Ben Meraï M., Belarbi A. 1995- Surveillance de la salinisation et contrôle de la nappe du périmètre de Segdoud. Direction des Sols, Ministère de l'Agriculture, Tunisie, 25 p.
- CENA, 2000- Etude d'évaluation ex-post du projet de développement de Segdoud. Ministère de l'Agriculture, 120 p.
- Cointepas J.P., 1964- Résultats d'un essai d'irrigation à l'eau salée en Tunisie. 8<sup>th</sup> Inter. Congress of soil science, Bcharest, Romania, pp. 793-802.
- CRUESI-CRGR, 1970- Recherche et formation en matière d'irrigation avec des eaux salées. Rapport technique, INRGREF, Tunisie, 241 pages+ annexes.
- Daoud Y., Halitim A., 1994- Irrigation et salinisation au Sahara algérien. Sécheresse, 5, pp. 151-160.
- Ghazouani W., Marlet S., Mekki I., Vidal, A., 2007- Diagnostic et analyse du fonctionnement d'un périmètre oasien. Cas de l'oasis de Fatnassa Nord (Kébili, sud Tunisien). Actes du troisième atelier régional du projet SIRMA.

- Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom., Nabeul, Tunisie, 18 p.
- Hachicha M., M'Hiri A., Boukhsila F. et Bach Hamba I., 1997- Variabilité et répartition de l'argile et de la salinité dans le périmètre de Kalaât Landelous (Tunisie). *Etude et Gestion des Sols*, 4, 1, pp. 53-66.
- Hatira A., Benmansour B., Grira M. et Gallali T., 2005- Impact des eaux d'irrigation sur l'origine des accumulations gypseuses dans les sols de l'oasis de Métouia (Tunisie). *Etude et Gestion des Sols*, 12, 1, pp. 43-54.
- Hatira A., Baccar L., Crira M., Gallali T., 2007- Analyse de sensibilité du système oasien et mesures de sauvegarde de l'oasis de Métouia (Tunisie). *Revue des Sciences de l'Eau*, 20, 1, pp. 59-69.
- Job JO., 1992- Les sols salés de l'oasis d'El Guettar. Thèse de doctorat. Université de Montpellier II, 150 p.
- Kaddour D., Daoud Y., Gaouar A. et Beldjoudi Z., 2003- La salinisation des sols au Sahara. Conséquences sur la durabilité de l'agriculture dans les nouveaux périmètres de mise en valeur. *Science et changement planétaires/ Sécheresse*, 14, 4, pp. 241-246.
- Kadri A. et Van Ranst E., 2002- Contraintes de la production oasienne et stratégies pour un développement durable. Cas des oasis de Nefzaoua (Sud tunisien). *Sécheresse*, 13, 1, pp. 5-12.
- Kassah A., 1995- Société et espaces oasiens dans le sud tunisien : mutations, aménagement et perspectives de développement. *Sols Tunisie*, 16, pp. 7-29.
- Kassah A., 1996- Les oasis tunisiennes : aménagement hydro-agricole et développement en zone aride. *Faculté des lettres et sciences humaines de Tunis 13<sup>e</sup> série : Géographie*, 346 p.
- Lasram, M., 1990- Les systèmes agricoles oasiens dans le Sud de la Tunisie. *Options Méditerranéennes*, 11, pp. 21-27.
- Mamou A., 1990- Caractéristiques et évolution des ressources en eau du sud tunisien. Thèse doc. Es sciences naturelles. Orsay, Paris sud, 190 p.
- Mamou A., 1995- Incidence de l'exploitation des nappes du sud tunisien dans les oasis sur la qualité de leurs eaux. *Sols Tunisie*, 16, pp. 30-40.
- Marlet S., Bouksila F., Mekki I., Ben Aissa I., 2007- Fonctionnement et salinité de la nappe de l'oasis de Fatnassa : arguments géochimiques. Actes du troisième atelier régional du projet SIRMA. Cirad, Montpellier, France, colloques-cédérom., Nabeul, Tunisie, 14 p.
- Marlet S., Bouksila F., Bahri A., 2009- Water and salt balance at irrigation scheme scale: A comprehensive approach for salinity assessment in a Saharan oasis. *Agricultural Water Management*, 96, pp. 1311-1322.
- Richter, M. 1986- The climate of oases and its ecological significance. *Applied Geography and Development*, 29, 44-72.
- SANYU Consultants INC., 1996- Projet d'amélioration des périmètres irrigués dans les oasis du sud en république de Tunisie. Agence japonaise de coopération internationale. Rapport final, 300 p.
- SCET-TUNISIE, 1999- Projet d'amélioration des périmètres irrigués dans les oasis de Gafsa, Ministère de l'Agriculture, 89 p.
- U.S. Salinity Laboratory, 1954- Diagnosis and improvement of saline-alkali soils, U.S. Depart. of Agric. Handbook n°60, U.S. Government Printing Office Washington D.C., 160 p., Richards L.A., ed.