

## **Etude de la Dynamique de l'Eau et du Transfert des Sels Dans un Sol Sablo-Limoneux du Sahel Tunisien**

**Rajouene Majdoub**

*Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem  
BP 47, 4042 Chott Meriem, Sousse, Tunisie  
E-mail: rmajdoub@yahoo.com*

**Mohamed Hachicha**

*Institut National de Recherches en Génie Rural, Eaux et Forêts  
Rue Hédi Karray, Elmenzah IV, BP 10, 2080, Ariana, Tunisie  
E-mail: hachicha.mohamed@iresa.agrinet.tn*

**Asma EL Amri**

*Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem  
BP 47, 4042 Chott Meriem, Sousse, Tunisie  
E-mail: elasma@yahoo.com*

**Et Mariem Melki**

*Institut Supérieur Agronomique de Chott Meriem  
BP 47, 4042 Chott Meriem, Sousse, Tunisie*

### **Résumé**

L'une des principales contraintes du développement de l'agriculture irriguée, est le déficit de satisfaire les besoins alimentaires d'une population en extension avec une eau de qualité de plus en plus médiocre. De plus, la menace de salinisation du sol et des eaux souterraines induite par irrigation est devenue une problématique majeure. En particulier, dans les régions semi-arides et arides, la rareté des ressources en eaux douces, pendant la saison estivale mène, souvent, à une surexploitation des ressources en eaux souterraines. Il s'en suit donc un problème aussi sérieux que grave surtout dans les régions côtières du fait que les ressources en eaux souterraines seront affectées par l'intrusion marine. Le présent travail vise l'étude de la dynamique de l'eau et du transfert des sels pour prédire l'évolution de la salinité des sols et les risques associés à long terme. Cette étude a été réalisée sur un sol sablo-limoneux irrigué avec l'eau salée et représentatif de la région de Mahdia du Sahel Tunisien. Elle a porté notamment sur le suivi des profils hydrique et tensiométrique du sol (teneur en eau volumique et succion matricielle) et du profil salin (conductivité électrique sur extrait aqueux). Les résultats ont démontré la présence de phases de saturation et de désaturation de la couche arable du sol et ont mis en évidence des cycles de salinisation et de désalinisation du sol engendrant un enfoncement profond des sels. L'étude de la dynamique de l'eau et des sels dans la couche profonde a démontré le transfert profond des sels et leur enfoncement au delà de 4 m. Les profils salins sont de type descendant avec des pics salins traduisant le transfert des sels. La présence de ces pics confirme un transfert profond pouvant être à l'origine de la salinisation de l'aquifère à long terme et l'augmentation de sa salinité actuelle.

**Mots-clés:** Salinisation, dynamique de l'eau, transfert des sels, Sahel Tunisien

### **Abstract**

One of major constraints to development of irrigated agriculture, is the challenge of meeting an extended population food needs with increasingly poor water quality. Moreover, the threat of soil and groundwater salinization caused by irrigation has become a major issue. Particularly, in semi-arid and arid regions, the scarcity of freshwater resources, during summer often leads to overexploitation of groundwater resources. It follows therefore a serious and severe problem mainly in coastal regions, because groundwater resources will be affected by seawater intrusion. The present work aims to study water dynamics and salts transfer in order to predict the evolution of soil salinity and the associated risks in long-term. This study was conducted on a sandy loam soil irrigated with salt water representative of region of Mahdia in Tunisian Sahel. It focused especially on the monitoring of hydric and tensiometric soil profiles (volumetric water content and water suction head) and saline profile (electrical conductivity of aqueous extract). The results have shown the presence of phases of saturation and desaturation of the topsoil and showed cycles of salinization and desalinization of the soil resulting in a deep penetration of salts. The study of water and salts dynamics in deep layer showed the transfer of salts and their penetration exceed 4 m. The saline profiles are falling down with peaks, reflecting so the salts transfer. The presence of these peaks confirms a deep transfer that may cause salinization of the aquifer in long term and the increase in its current salinity.

**Keywords:** Salinization, water dynamics, salts transfer, Tunisian Sahel

## **1. Introduction**

Dans les zones arides et semi-arides, l'eau est le principal facteur limitant la production agricole (N'Kaya, 2004). Le développement de l'agriculture dans ces régions fait recours à l'irrigation qui devient alors une nécessité pour produire suffisamment afin d'assurer les besoins alimentaires d'une population de plus en plus importante. Selon l'USSL (2001), 35 à 40% de la nourriture produite au monde provient des 15% des terres arables cultivées en irrigué. La croissance projetée de la population mondiale pendant les 30 prochaines années exigera une augmentation d'au moins 20% de la production agricole dans les pays développés et 60% dans les pays en voie de développement pour maintenir les niveaux actuels de consommation alimentaire (USSL, 2001). Cependant, l'irrigation non contrôlée engendre des dégradations importantes de la qualité des sols et des eaux. En effet, aussi bien la quantité d'eau disponible que sa qualité affectent fondamentalement le sol et les cultures qui y sont cultivés (Ben Mechlia, 2004). La présence des sels solubles dans l'eau d'irrigation et le pouvoir évaporateur de l'air dans les zones irriguées conduisent souvent à la salinisation des sols irrigués et particulièrement en zones arides et semi-arides (Lahlou et al., 2003).

En Tunisie, l'agriculture irriguée se trouve confrontée à des contraintes multiples, dont la plus importante est l'utilisation des eaux salées. Dans ce contexte, la région de Mahdia relevant du Sahel est un exemple où la problématique de salinité des eaux utilisées en irrigation ( $5 \leq RS \leq 6$  g/l) est à l'origine de la salinisation des sols et des aquifères. En effet, la dégradation des sols par salinisation est préoccupante, dans la plupart des cas, des tendances évolutives des propriétés physico-chimiques des sols irrigués à l'échelle du profil pédologique de la parcelle et au mieux à l'échelle du périmètre (Hachicha et al., 1994).

Dans le cadre du projet «Recherche appliquée sur l'utilisation des eaux moyennement salées et salées en Afrique du Nord» (IFAD/ACSAD/INRGREF), plusieurs sites ont été équipés afin de

formuler à l'échelle agricole et dans les conditions culturales tunisiennes, des règles d'utilisation des eaux salées pour l'irrigation. Parmi les sites considérés, une parcelle a été retenue dans la région de Mahdia du Sahel Tunisien connue par la rareté de ses ressources hydriques caractérisées par une salinité élevée induite, entre autres, par l'intrusion d'eau de mer. Le travail entrepris vise l'étude de la dynamique de l'eau et du transfert des sels dans cette parcelle pour prédire l'évolution de la salinité des sols et prévoir ses conséquences.

## 2. Matériel et Méthodes

### 2.1. Dispositif Expérimental

Le dispositif expérimental a été installé sur une parcelle de la zone de Chiba ayant une superficie de 1274 m<sup>2</sup> et située à environ 5 km du centre ville de Mahdia. Dans cette parcelle, diverses cultures sont pratiquées en irrigué telles que les cultures de pomme de terre, de fève, de melon et d'oliviers. Le dispositif expérimental est installé dans un champ de pommes de terre. Il est formé par 7 sondes TDR pour le suivi de la teneur en eau volumique et 4 paires de tensiomètres pour la mesure du potentiel du sol (figure 1).

**Figure 1:** Dispositif Expérimental



#### 2.1.1. Conditions Climatiques

Compte tenu de sa position géographique et son étirement sur plus de 80 km de la côte vers l'intérieur, la région de Mahdia se trouve sous l'influence d'un climat steppique aride à l'intérieur et semi-aride à proximité de la mer. La pluviométrie moyenne est de l'ordre de 350 mm. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 19,1°C avec des variations journalières et saisonnières importantes. La moyenne des maxima est de 26,7°C et elle peut atteindre 37,5°C pendant le mois le plus chaud (Août). La moyenne annuelle des minima est de 12,3°C. La température minimale absolue au cours des mois les plus froids (Décembre, Janvier, Février) peut descendre en dessous de zéro. En revanche, la température maximale mensuelle peut dépasser 40°C pendant 6 mois de l'année. L'évapotranspiration potentielle annuelle est de l'ordre de 1342 mm. Les vents soufflent en moyenne pendant 20 jours/an avec les vents chauds du Sud «Sirocco» en été et les vents de l'Est «Chergui» apportant de la fraîcheur en hiver.

### 2.1.2. Conditions Edaphiques

Le tableau 1 montre que le sol est de texture à forte teneur en sable, possédant ainsi une faible capacité de rétention en eau. Pour les premiers 40 cm, le sol est de texture limono-sableuse, sablo-limoneuse jusqu'à la profondeur 100 cm et il est de texture limoneuse par la suite.

**Tableau 1:** Texture du Sol de la Parcelle d'Etude

Profondeur (cm)	Texture
0 – 20	Limono-sableuse
20 – 40	Limono-sableuse
40 – 60	Sablo-limoneuse
60 – 100	Sablo-limoneuse
100 – 120	Limoneuse

Les valeurs de la densité apparente mesurée au laboratoire (tableau 2) augmentent de la surface jusqu'à la profondeur 90 cm. Puis elles diminuent par la suite. Ceci implique que le sol devient plus compact en profondeur qu'à la surface du sol.

**Tableau 2:** Densité Apparente du Sol

Profondeur (cm)	Densité apparente
0 – 30	1,52
30 – 60	1,57
60 – 90	1,61
90 – 120	1,53
120 – 150	1,54

### 2.1.3. Instrumentation

Les sondes TDR ont été implantées une année à l'avance, aux profondeurs 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 et 4 m. Le TDR utilisé est de type "Soil Moisture modèle Trase 2001" (SM Trase 2001) commercialisé par Soil moisture corp. (Santa Barbara, USA). Il est composé d'un boîtier de mesure, d'un câble coaxial et de sondes métalliques. Le TDR permet de déterminer la teneur en eau à partir de la courbe du signal réfléchi et enregistrée par Réflectométrie dans le Domaine Temporel (TDR). Il permet la mesure de la constante diélectrique du sol qui serait transformée en humidité volumique en fonction de la salinité, la teneur en matière organique, etc. Le TDR présente une très bonne résolution spatio-temporelle avec une incertitude inférieure à  $\pm 2\%$  (D.S.L.A., 1997).

Les tensiomètres ont été installés aux profondeurs 0,2 ; 0,5 ; 1 et 1,5 m. Les tensiomètres utilisés sont de marque JET FILL modèle 2725 commercialisés par Soil moisture corp. ayant une plage de mesure ne dépassant pas les 90 cbars. Ils autorisent des échanges osmotiques à travers une bougie poreuse. L'eau du tube du tensiomètre est sucée par le sol jusqu'à ce que le vide créé dans ce dernier soit suffisant pour s'équilibrer avec la succion du sol. A ce point d'équilibre, l'eau cesse de s'écouler hors de la bougie et la valeur lue sur le manomètre correspond à la tension du sol (Barranger, 2002).

## 2.2. Mesures Expérimentales

Les mesures ont porté principalement sur le suivi de l'humidité volumique et de la tension matricielle. Les lectures de l'humidité volumique ont été effectuées pendant les dates : 22/02/07 ; 14/03/07 et 11/04/07. Quant à la tension matricielle, les lectures ont été effectuées pendant les dates : 14/03/07; 18, 23, 27 et 30/04/07 et 09/05/07.

Des prélèvements d'échantillons de sol ont été également effectués, à l'aide d'une tarière, jusqu'à la profondeur 4 m. Ces échantillons ont servi à déterminer l'humidité du sol par la méthode gravimétrique (Musy et Soutter, 1991) ainsi que sa salinité. Cette dernière a été déterminée par la

méthode de la conductivité électrique (CEe) sur extrait aqueux sol/eau de 1/5 ( $CE_{1/5}$ ) (Bonneau et Souchier, 1979). La conductivité électrique a été déterminée par la relation suivante relatée par Chibani (2004) :

$$CEe = 9,53 \times CE_{1/5} \quad (1)$$

En vue de quantifier les sels dans le sol, le bilan salin a été calculé à partir des stocks salins initial et final par la formule suivante (Creusi, 1970) :

$$S = (C_i \times da \times PS \times E) \times 100 \quad (2)$$

avec, S : stock des sels présents dans une couche du sol (kg/ha),  $C_i$  : concentration de l'extrait de saturation;  $C_i = 0,7 \times CEe$ , da : densité apparente (-), PS : pourcentage de saturation du sol; PS = 33% et E : épaisseur de la couche du sol (m).

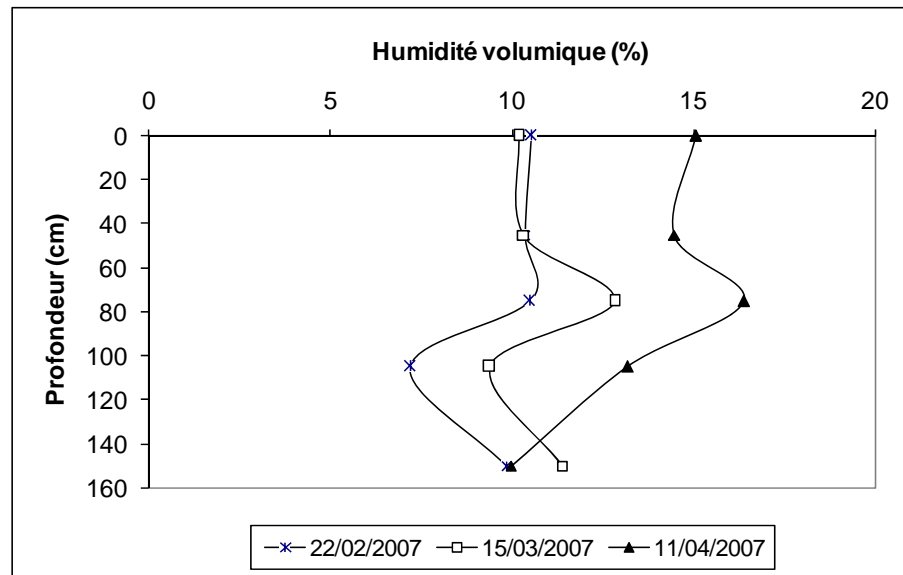
### 3. Résultats et Discussion

#### 3.1. Dynamique de l'Eau et Transfert des Sels dans la Couche Arable

##### 3.1.1. Profils Hydriques

La figure 2 révèle que le sol devient de plus en plus humide, ceci est dû à l'effet des événements pluvieux enregistrés le 08/03/07 et le 12/03/07. L'augmentation de la teneur en eau le 11/04/2007 résulte de l'irrigation apportée (150 mm) le 15/03/2007. La variation de la teneur en eau enregistrée à la profondeur 70 cm coïncide avec la variation de la texture du sol, de limono-sableuse à sablo-limoneuse. L'augmentation de la teneur en eau vers la profondeur 150 cm est expliquée notamment par le changement de la texture du sol.

**Figure 2:** Profils Hydriques de la Couche Arable



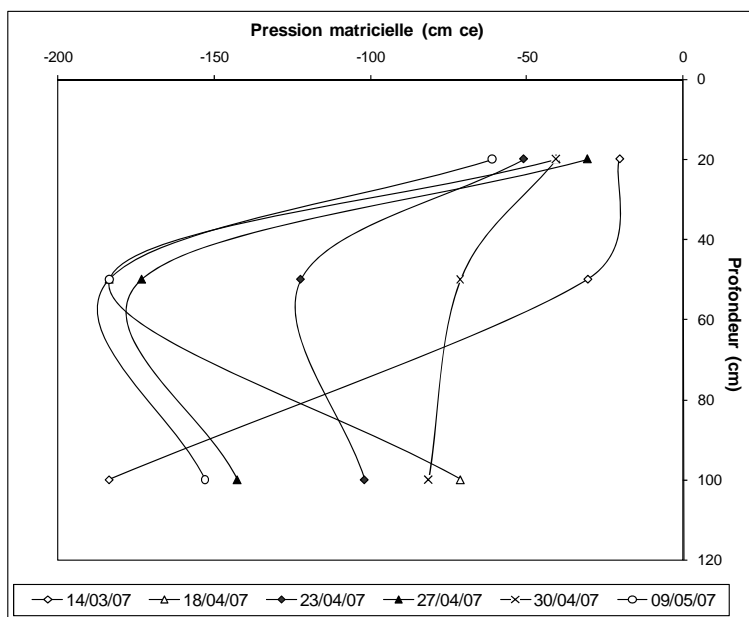
##### 3.1.2. Profils Tensiométriques

Les profils illustrés sur la figure 3 mettent en évidence trois états de la tension de l'eau dans le sol :

- une couche de surface : la tension de l'eau varie entre 20 et 60 cm de colonne d'eau (ce). Le sol passe de son état saturé (20 cm de ce) à son état sec (60 cm de ce).
- une couche intermédiaire : la tension de l'eau varie de l'état saturé du sol (-50) à son état sec (180 cm de ce).
- une couche profonde : la tension de l'eau passe de l'état sec du sol (183 cm de ce) à un état saturé (102 cm de ce).

Si l'on considère la texture constante, les variations verticales et temporelles de la tension de l'eau résultent des paramètres du bilan hydrique : pluie, évaporation et irrigation. Chaque événement pluvieux et chaque irrigation se sont traduits par une diminution de la tension (en valeur absolue). Inversement, chaque période de sécheresse a entraîné une augmentation de la tension.

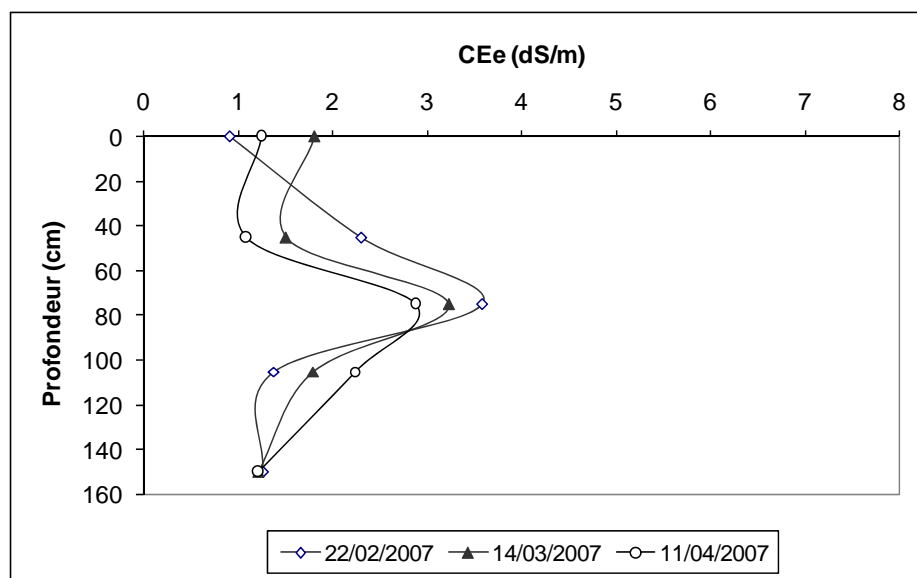
**Figure 3:** Profils Tensiométriques de la Couche Arable



### 3.1.3. Profils Salins

Les profils salins de la couche arable sont présentés sur la figure 4. Le transfert des sels concorde avec la dynamique de l'eau. En effet, un lessivage des sels, dû aux précipitations du mois de mars et à l'irrigation du 15/03/2007, est observé. Vers 70 cm de profondeur, une certaine accumulation des sels se produit. Elle coïncide avec le passage de la couche limono-sableuse à la couche sablo-limoneuse ainsi qu'à la dynamique de l'eau signalée précédemment.

**Figure 4:** Profils Salins de la Couche Arable

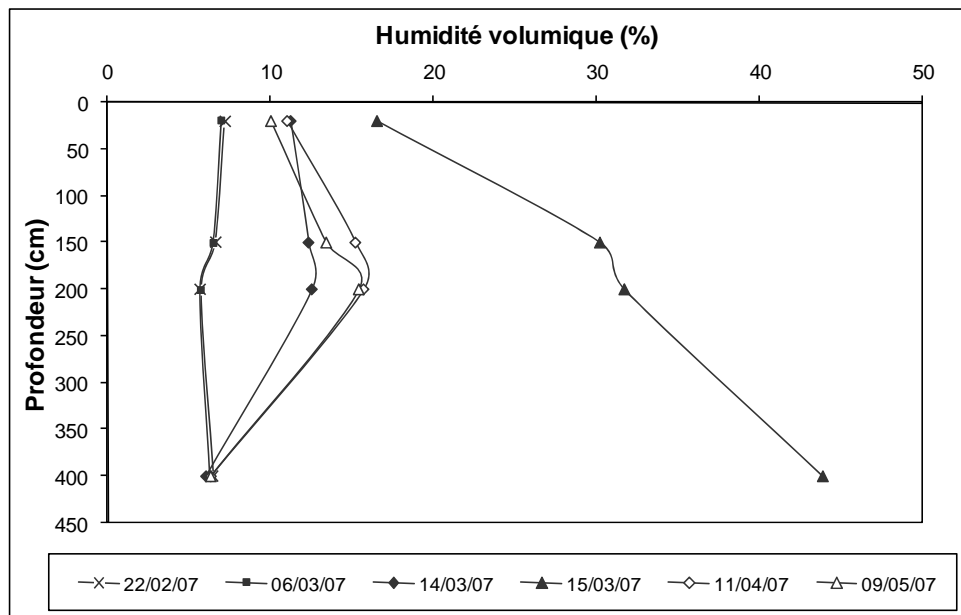


### 3.2. Dynamique de l'Eau et Transfert des Sels dans la Couche Profonde

#### 3.2.1. Dynamique de l'Eau dans la Couche Profonde

Les profils hydriques de la couche profonde sont présentés sur la figure 5. Les deux premiers profils (22/02/07 et 06/03/07) sont confondus ce qui indique que le sol est sec. Les précipitations importantes du 08/03/07 au 12/03/07 (90,7 mm) ont saturé le sol jusqu'à 4 m de profondeur où la différence entre les deux dates s'annule. La quantité énorme d'eau ramenée pendant la date du 15/03/07 a sursaturé le sol depuis la surface et au-delà de 4 m (profil nettement descendant). L'augmentation de la teneur en eau est presque linéaire d'environ 17% en surface à 43% en profondeur avec une inflexion entre 1,5 m et 2 m traduisant un ralentissement de l'infiltration de l'eau vers cette couche.

**Figure 5:** Profils Hydriques de la Couche Profonde



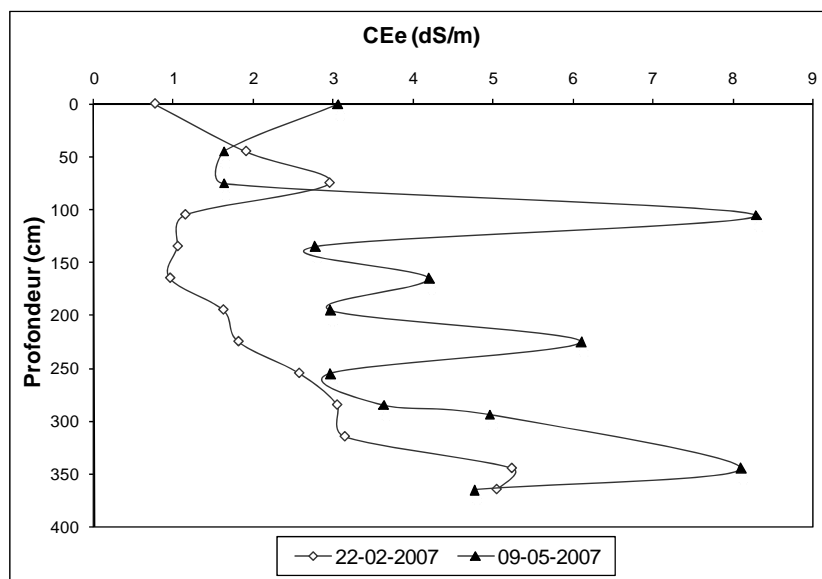
Les teneurs en eau excessivement élevées, supérieures aux valeurs à la capacité au champ caractéristiques des matériaux sablo-limoneux, indiquent que la mesure a eu lieu dans la phase de drainage rapide du sol. A partir de cette date, le sol s'est désaturé pour atteindre un état qu'il a globalement conservé. La teneur en eau augmente vers 2 m de profondeur et atteint sa valeur initiale faible vers 4 m de profondeur. C'est un certain niveau de plan de flux nul.

#### 3.2.2. Transfert des Sels dans la Couche Profonde

La figure 6 présente les profils salins dans les couches profondes. Le profil du 22/02/07 est de type descendant : teneur faible en surface (<1 dS/m) et plus élevée en profondeur (environ 5 dS/m) avec le pic de salinité vers 70 cm signalé précédemment (environ 3 dS/m). Ce pic traduit le lessivage des sels qui a eu lieu depuis l'automne de l'année 2006. Mais à long terme, le profil salin met en évidence un transfert profond des sels qui s'enfonce de plus en plus profondément. En effet, la teneur en sels reste en dessous des quantités ramenées par les dizaines d'années d'irrigation avec des eaux salées.

Le profil du 09/05/07 est également de type descendant mais l'allure est moins nette : teneur en surface de l'ordre de 3 dS/m et d'environ 8 dS/m en profondeur avec plusieurs pics de salinité d'intensités variables. Ces pics traduisent des séquences d'apport et de lessivage des sels qui se produisent lors de chaque apport d'eau pluvial ou d'irrigation. Ce profil confirme l'enfoncement profond des sels.

**Figure 6:** Profils Salins de la Couche Profonde



### 3.2.3. Accumulation des Sels dans la Couche Profonde

Le Tableau 3 montre, pour l'ensemble du profil, une accumulation des sels d'environ 185 kg/ha. Le stock de sels est positif pour toutes les couches du sol sauf pour celles situées entre 30 et 90 cm. L'accumulation des sels est particulièrement élevée vers 1 m de profondeur. Cette salinisation est induite par l'irrigation d'une culture de pomme de terre de saison.

Le transfert des sels et leur enfoncement profond sont décelables. Si l'on considère que les sols sont irrigués depuis longtemps, on peut s'assurer que leur accumulation se trouve encore plus en profondeur au-delà de 4 m. Pour un niveau statique de la nappe vers 11 m, la contamination de cet aquifère est assez certaine.

**Tableau 3:** Evolution du Stock Salin

Profondeur (cm)	Si (kg/ha)	Sf (kg/ha)	$\Delta S$ (kg/ha)
0 – 30	11,89	39,29	27,41
30 – 60	19,81	13,83	-5,99
60 – 90	30,71	13,83	-16,88
90 – 120	11,89	71,21	59,32
120 – 150	10,90	23,70	12,80
150 – 180	9,91	35,97	26,06
180 – 210	16,84	25,36	8,52
210 – 240	18,82	52,39	33,57
240 – 270	26,75	37,21	10,47
270 – 300	31,70	38,77	7,07
300 – 330	32,69	42,52	9,82
330 – 360	54,49	69,54	15,06
360 – 390	52,50	50,42	-2,09
<b>Total</b>	<b>328,9</b>	<b>541,0</b>	

$S_i$  et  $S_f$  sont, respectivement, le stock initial et final des sels.

## 4. Conclusion

Pour évaluer les risques à long terme de la salinisation dans la région de Mahdia, on a procédé à la caractérisation de la dynamique de l'eau et du transfert des sels dans une parcelle occupée par une



culture de pomme de terre. Cette étude a été menée au niveau de la couche arable et au niveau de la couche profonde jusqu'à 4 m.

Le suivi de la dynamique de l'eau dans la couche arable a mis en évidence une couche de surface passant de l'état saturé à l'état sec, une couche intermédiaire présentant le même comportement mais d'une manière plus nette et une couche située vers 1 m qui initialement sèche, s'est saturée en eau. Le transfert des sels concorde avec la dynamique de l'eau. De plus, la variation de la teneur en eau et également celle en sels vers 70 cm coïncide avec le changement de la texture du sol, de limono-sableuse à sablo-limoneuse.

L'étude du mouvement de l'eau et du transfert des sels dans la couche profonde a montré le transfert des sels et leur enfoncement au-delà de 4 m. La quantité d'eau ramenée lors de l'essai d'infiltration a sursaturé le sol depuis la surface et au-delà de 4 m. Les profils salins sont de type descendant avec des pics salins traduisant des séquences d'apport et de lessivage des sels qui se produisent lors de chaque apport d'eau pluvial ou d'irrigation. Les profils confirment l'enfoncement profond des sels et mettent en lumière le risque de salinisation de l'aquifère et delà, accentuer la salinité relevée.

### Références Bibliographiques

- [1] Barranger Ph., 2002. Synthèse des expériences de pilotage tensiométrique de l'irrigation en Jordanie, DDA. Agronomie Environnement de l'Institut National Agronomique, Paris, Grignon.
- [2] Ben Mechlia N., 2004. Perspectives de valorisation de l'eau d'irrigation dans les pays du Maghreb, Options méditerranéennes, Série B, no. 47, pp. 169-185.
- [3] Bonneau M. et B. Souchier, 1979. Pédologie 2. Constituants et propriétés du sol, Masson, 459 p.
- [4] Chibani A., 2004. Evolution de la salinité du sol sous irrigation avec l'eau salée pour une culture d'orge dans la région de Mahdia, PFE- ESIER Medjez El Bab, 58 p.
- [5] Creusi, 1970. Recherche et formation en matière d'irrigation avec les eaux salées, 1962-1969, Rapport technique, PNUD/UNESCO, 143 p.
- [6] D.S.L.A., 1997. Pereira, Développement d'une nouvelle méthode de détermination des profils de teneur en eau dans les sols par inversion d'un signal TDR, Thèse nouveau doctorat, Université de Grenoble I.
- [7] Hachicha M., J.O. Job et A. Mtimet, 1994. Sols de Tunisie, Sols irrigués et sols sodiques, Les sols salés et la salinisation en Tunisie, Bulletin de la direction des sols no. 15, 342 p.
- [8] Lahlou M., M. Badraoui, B. Soudi, A. Goumari et D. Tessier, 2003. Modélisation de l'impact de l'irrigation sur le devenir salin et sodique des sols, Institut agronomique et vétérinaire HASSANE II.
- [9] Musy A. et M. Soutter, 1991. Physique du sol, Presse Polytechnique et Universitaires Romande, Lausanne, 240 p.
- [10] N'Kaya M., 2004. Paramétrisation d'un modèle de transfert hydrique dans le sol sous trois plantations d'eucalyptus dans la région de Pointe-Noire, Diplôme d'Etudes Approfondies, Université Marien Ngouabi, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines, Département de Géographie.
- [11] U.S.S.L., 2001. Site web de United State Salinity Laboratory, <http://www.ussl.ars.usda.gov>.