

Article

« Analyse de sensibilité du système oasien et mesures de sauvegarde de l'oasis de Métouia (Tunisie) »

A. Hatira, L. Baccar, M. Grira et T. Gallali

Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, vol. 20, n° 1, 2007, p. 59-69.

Pour citer cet article, utiliser l'information suivante :

URI: <http://id.erudit.org/iderudit/014907ar>

DOI: 10.7202/014907ar

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <https://apropos.erudit.org/fr/usagers/politique-dutilisation/>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : info@erudit.org

ANALYSE DE SENSIBILITÉ DU SYSTÈME OASIEN ET MESURES DE SAUVEGARDE DE L'OASIS DE MÉTOUIA (TUNISIE)

Sensitivity analysis of the oasis system and safeguard measures for the Metouia Oasis (Tunisia)

A. HATIRA^{1*}, L. BACCAR², M. GRIRA³ et T. GALLALI¹

¹UR Pédologie, Département de Géologie, Faculté des Sciences de Tunis, Campus Universitaire, 2092 Manar II, Tunisie.

²UR Géomatique des Géosystèmes, FLAHM, Manouba, Tunisie.

³Arrondissement Sol, CRDA, Gabès, Tunisie.

Reçu le 4 décembre 2005, accepté le 30 mars 2006

RÉSUMÉ

L'oasis de Métouia, située au sud-est de la Tunisie, est caractérisée par un climat aride où les précipitations sont rares et irrégulières. L'oasis doit donc son existence aux eaux souterraines qui, autrefois, provenaient de sources artésiennes actuellement tarées suite à une surexploitation de la nappe profonde. La pédogenèse actuelle est dominée par l'évolution des processus de salinisation et d'hydromorphie affectant en totalité ou en partie le profil pédologique. Cette salinisation est la résultante des effets cumulés de la salinité des eaux d'irrigation et celle de la nappe phréatique proche de la surface dont la remontée capillaire génère des efflorescences salines. Ce facteur est accentué par l'absence de lessivage des sols et le dysfonctionnement du réseau de drainage. Le suivi des paramètres abiotiques de l'oasis durant quatre années successives (2001 – 2004), a révélé une interdépendance étroite entre la qualité des eaux précédemment décrite et les processus géochimiques qui en résultent, d'une part, et la dégradation de la zone non saturée, siège des accumulations gypseuses, d'autre part. Par ailleurs, aux facteurs précédemment signalés, viennent s'ajouter la mauvaise exploitation des parcelles et l'absence de règles de gestion du système oasien dans sa globalité. Afin de contrecarrer ces phénomènes qui affectent profondément la sensibilité du système oasien, on a élaboré des recommandations visant l'optimisation des besoins dynamiques en eau, du mode de distribution, ainsi que du réseau de drainage freinant la

remontée de la nappe et améliorant l'aération et le lessivage de la zone non saturée.

Mots clés: oasis, irrigation, nappe, hydrodynamique, hydrochimie, salinisation, croûte gypseuse, drainage, Tunisie.

ABSTRACT

The Métouia oasis is situated in south-eastern Tunisia near the coast of Gabès City. The climate is arid with rare and irregular precipitation events. The oasis originated from a confined subsurface that was hydraulically connected to surface springs that had already been exhausted by human activities. The soil features are presently dominated by the evolution of salinization and water-saturation processes either partially or totally affecting the soil profile. The visible salt deposits and soil salinization processes are generated by the salinity of irrigation water and the shallow water table as well as the rising capillarity head. These processes are strongly influenced by the weak soil leaching mechanisms, on the one hand, and the poor drainage schemes, on the other hand. The four-year monitoring programme (2001 – 2004) focussed on important abiotic water and soil parameters and showed a close relationship between water quality and the generated geochemical processes parallel to the degradation of the non-

*Auteur pour correspondance :
Télécopieur : 216 71 885 408
Courriel : absat.hatira@fst.rnu.tn

saturated zone, in which gypsum accumulation processes are taking place. In addition to the above mentioned factors, the poor land exploitation system and the lack of integrated management of the oasis system are also important. Due to the high sensitivity of the oasis and in order to overcome the problems, several recommendations were proposed concerning the optimization of the irrigation scheme, the water supply network and drainage schemes. The recommended hydraulic infrastructure, combined with the proposed management rules for the oasis, would lead to better control of groundwater fluctuations and improvement of leaching and aeration processes in the unsaturated zone.

Key words: *oasis, ground-water, hydrodynamic, hydro-chemistry, salinization, gypsum crust, drainage, Tunisia.*

1. INTRODUCTION

Dans le sud tunisien, le déficit hydrique climatique est tel que le recours à l'irrigation est une nécessité vitale pour la production agricole. L'eau souterraine est la seule ressource permettant de faire face aux besoins de l'irrigation et des différents usages domestiques. L'utilisation abondante et irrationnelle d'eau en irrigation a entraîné une dégradation des sols dans les terres basses et la remontée de la nappe phréatique. L'oasis de Métouia est confrontée à des contraintes qui entravent son développement et sa valorisation, et qui menacent sa durabilité. L'oasis est surtout menacée par l'abandon et le morcellement des exploitations, la mauvaise gestion de l'eau d'irrigation et la

mauvaise efficacité du système de drainage. Le concours de ces facteurs a conduit à l'épuisement des sols et, par conséquent, à la dégradation de l'écosystème oasien et à l'éruption de problèmes socio-économiques entravant le développement de la région. Afin de contribuer à minimiser les effets négatifs de la dégradation de l'écosystème oasien de Métouia, nous avons établi, en collaboration avec l'Arrondissement Sol de la région de Gabès, un plan d'action pour assurer un suivi régulier et continu des processus de salinisation d'encroûtement et d'hydromorphie.

Notre travail consiste en partie en des suivis temporels et spatiaux du niveau piézométrique et de la salinité de la nappe phréatique de l'oasis et de son impact sur la salinisation du sol. En effet, une relation étroite a été décelée entre l'hydrodynamisme et l'hydrochimisme des eaux de la nappe phréatique, d'une part, et l'apparition d'encroûtements gypseux et la salinisation des sols, d'autre part, affectant ainsi le système oasien sensible de Métouia.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Description du site

L'oasis de Métouia fait partie des oasis littorales du gouvernorat de Gabès. Elle est située à 12 km au nord de la ville de Gabès (sud-est de la Tunisie) et s'étale sur une superficie de 270 ha environ (Figure 1). L'altitude varie entre 15 et 25 m dans une région marquée par un climat méditerranéen doux à prédominance aride. L'oasis de Métouia est caractérisée par

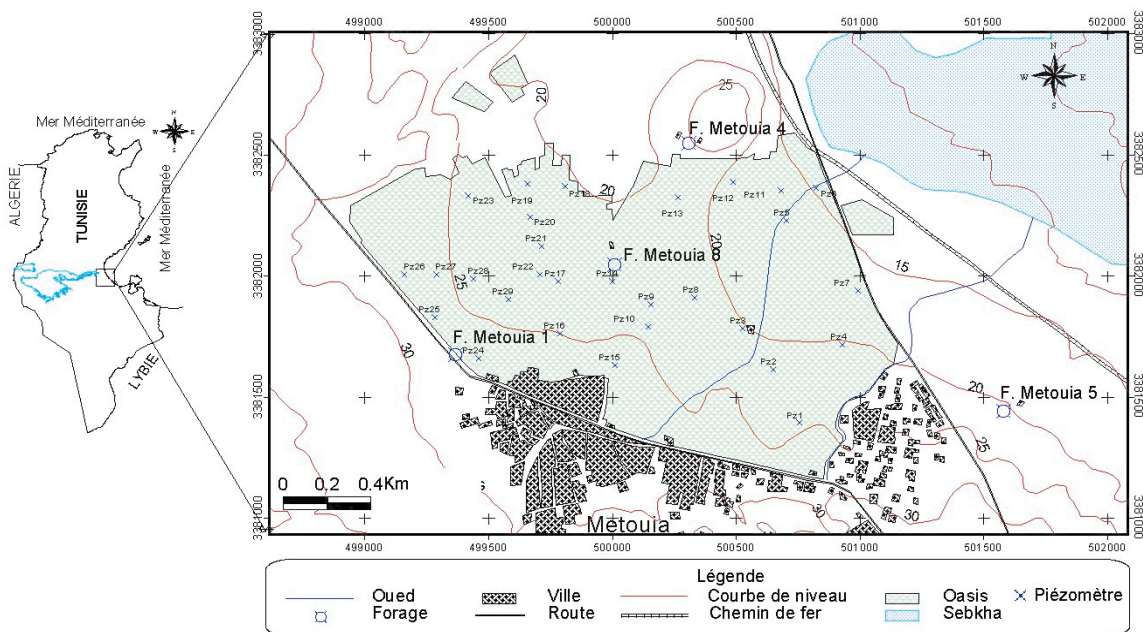


Figure 1. Carte de localisation de l'oasis de Métouia.
Map of the Metouia oasis.

une pluviométrie faible de 183 mm/an (période 1985-1995) avec des variations interannuelles fortes allant de 50 à 400 mm. La répartition des précipitations au cours d'une année est caractérisée par une période sans pluie (juin, juillet et août) et une période à pluviométrie irrégulièrement répartie sur les autres mois et un bilan hydrique annuel fortement déficitaire. Le vent est pratiquement permanent (avec seulement 17 % de jours calmes enregistrés par an) et constitue l'élément déterminant du climat de la région. Statistiquement, deux directions dominantes sont enregistrées, à savoir les vents marins d'est tempérés et humides et les vents d'ouest continentaux, secs et violents, dont les vitesses peuvent dépasser 50 km/h. Les vents du sud sont les moins fréquents, très chauds et connus sous le nom de sirocco. Les parcelles d'exploitations agricoles de l'oasis couvrent des superficies très réduites d'environ 1,5 ha en moyenne. Les cultures y sont étagées en hauteur, correspondant respectivement à des palmiers et des grenadiers, en premier et deuxième étages, et la luzerne et les cultures maraîchères, en troisième étage. Le réseau de drainage est peu efficace et moyennement entretenu évacuant gravitairement les eaux vers la sebkha Er Rahia située au nord-est de l'oasis et constituant l'exutoire naturel de la nappe phréatique. L'oasis de Métouia est caractérisée par la présence d'une nappe phréatique de très faible profondeur conditionnant étroitement l'évolution des sols dans toute l'oasis (GRIRA *et al.*, 2002; HATIRA *et al.*, 2002).

2.2 Les potentialités hydrauliques

Actuellement, les eaux d'irrigation dans l'oasis de Métouia proviennent de quatre forages qui captent la nappe de la

Jeffara. Sur le plan des ressources en eaux souterraines, la région de Gabès est caractérisée par l'existence de deux groupes de nappes.

2.2.1 La nappe phréatique

Elle est de faible étendue, logée dans les dépôts argilo-sableux du Mio-plio-quaternaire d'environ 10 m d'épaisseur moyenne dans la zone d'étude et dont le substratum est argileux. Elle est alimentée à partir d'infiltrations d'eaux de surface mais en grande partie par drainance verticale des eaux de la nappe profonde de la Jeffara à travers les niveaux semi-perméables et le réseau de failles (MAMOU et BEN BACCAR, 1987).

2.2.2 Les nappes profondes

Il s'agit d'un complexe de nappes multicouches particulièrement celles du continental intercalaire des formations sablo-gréseuses du crétacé inférieur et celle de la Jeffara qui s'étend sur la totalité de la plaine côtière de la Skhira au nord, et jusqu'en Libye au sud. L'alimentation de cette nappe à Gabès Nord s'effectue essentiellement par les apports de la nappe du continental intercalaire sous-jacente, qui constitue le relais hydraulique avec la nappe de Jeffara par le biais de la faille d'El Hamma (Figure 2). L'écoulement de la nappe de la Jeffara s'effectue de la région d'El Hamma à l'ouest vers la plaine côtière à l'est (MAMOU, 1990; MEKRAZI, 1975).

Historiquement, l'exploitation de la nappe de la Jeffara de Gabès Nord s'effectuait à partir des sources artésiennes qui sourdent à l'occasion de failles profondes. Ces sources ont fait

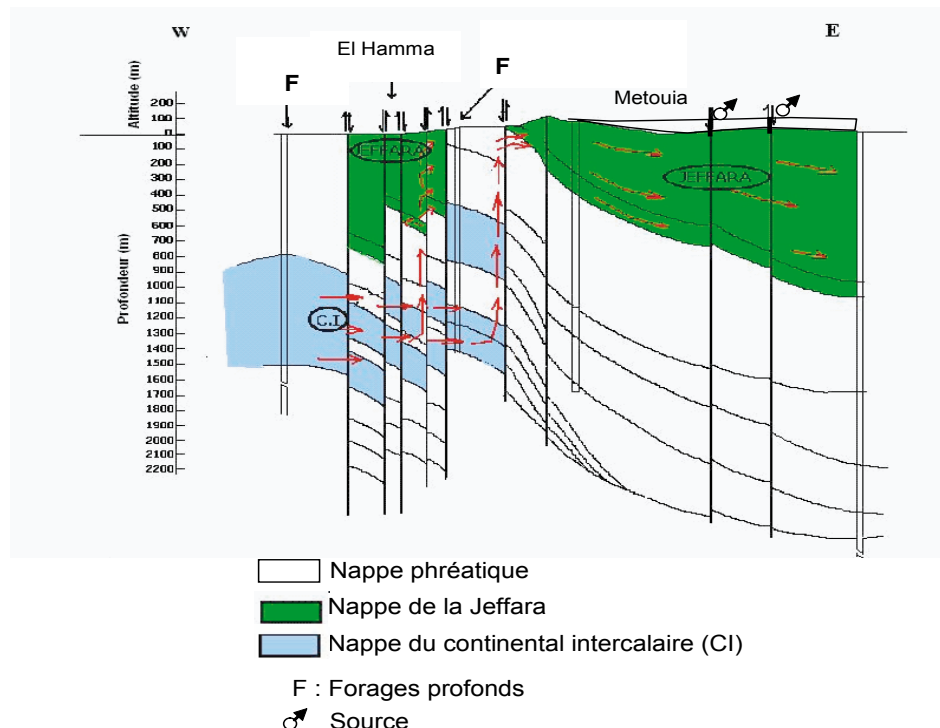


Figure 2. Contexte hydrogéologique dans la région de Gabès (ABIDI, 1999, modifiée).
 Hydrogeological context of the Gabès region (ABIDI, 1999, modified).

l'objet de suivi de leurs débits depuis l'année 1912. À partir de l'année 1966, des forages profonds ont commencé à être réalisés. L'évolution de l'exploitation dans le temps, pour satisfaire aux besoins croissants en eaux, s'est traduite par une chute spectaculaire des débits des sources, à partir de 1976, suivi d'un tarissement total vers l'année 1986.

La baisse moyenne annuelle du niveau piézométrique de la nappe de la Jeffara, durant la période entre 1973 et 2002, est variable d'une région à une autre. Cette variation est due essentiellement à la répartition inégale des forages dans la région de Gabès Nord. La région de Métouia est toujours très sollicitée, où la baisse moyenne annuelle du niveau piézométrique varie entre 0,8 et 0,9 m. Cette baisse est traduite dans l'ensemble de la région par une altération chimique de l'eau qui est d'autant plus sensible que le toit de la nappe est de faible épaisseur et que la mer ou des sebkhas sont proches (MAMOU, 1995).

L'affectation des ressources en eaux aux périmètres irrigués est faite en fonction des données hydrologiques et agronomiques. L'irrigation de l'oasis de Métouia est assurée par quatre forages équipés par des électropompes qui débitent ensemble 133 L/s (ABIDI, 1999). L'eau est distribuée dans des conduites souterraines jusqu'aux parcelles agricoles.

2.3 Étude des eaux

Les eaux d'irrigation ont été prélevées au niveau de quatre forages qui alimentent actuellement tout le périmètre oasisien. Un réseau de 29 piézomètres a été installé pour le suivi de la piézométrie et la qualité des eaux de la nappe phréatique. Les mesures de la piézométrie ont été réalisées à l'aide de sonde électrique et les profondeurs ont été ramenées à des niveaux rattachés au système national de nivellement (mètre NGT). Les analyses physico-chimiques ont concerné les eaux d'irrigation, les eaux de drainage et les eaux de la nappe phréatique. Ces dernières ont été prélevées au niveau de dix piézomètres considérés comme représentatifs de toute l'oasis. Les paramètres étudiés concernent le pH et la conductivité électrique, mesurés *in situ* par des appareils portatifs, et les éléments majeurs analysés au laboratoire selon des méthodes standards. Pour les besoins de la cartographie du niveau piézométrique et de la salinité des eaux de la nappe, nous avons utilisé les mesures au niveau des 29 piézomètres installés afin d'obtenir un maillage le plus serré possible.

2.4 Étude des sols

Les sols ont été étudiés en saison estivale en creusant une quarantaine de profils pédologiques couvrant toute la superficie de l'oasis. La profondeur des fosses pédologiques varie de 60 à 160 cm coïncidant généralement avec le niveau piézométrique de la nappe phréatique. Parmi les quarante profils étudiés, une dizaine seulement ont été choisis pour les analyses des

principaux paramètres physico-chimiques des sols. Ces derniers sont répartis sur toute la superficie de l'oasis et caractérisent les différentes unités de sols identifiées (VIEILLEFON, 1978). La démarche adoptée pour l'étude pédologique comprend deux étapes. La première étape concerne l'étude des propriétés morpho structurales des différents profils *in situ*, tels que la couleur, la texture, la structure et la porosité, et la deuxième, une étude analytique au laboratoire sur des échantillons prélevés au niveau de chaque horizon. Les paramètres analysés sont le taux de gypse et de calcaire, et sur des extraits de pâte saturée, le pH, la conductivité électrique et les teneurs en sels solubles. La pâte de sol saturée a été obtenue par addition d'eau distillée et malaxage jusqu'à ce qu'un point de saturation soit atteint. L'extrait est ensuite obtenu par filtration sous vide, afin d'obtenir une quantité suffisante pour les analyses. Le gypse a été dosé par la méthode de double décomposition en présence du carbonate d'ammonium à chaud. Le calcaire a été déterminé par la méthode du calcimètre de Bernard. Dans les extraits de pâte saturée, les cations ont été analysés par spectrophotométrie d'absorption atomique, et les chlorures par dosage par le nitrate d'argent en présence de chromate de potassium (méthode de Mohr). Quant aux sulfates, ils ont été analysés par dosage gravimétrique par précipitation avec le chlorure de baryum et les bicarbonates par acidimétrie.

3. RÉSULTATS

3.1 Les eaux d'irrigation

Les résultats de l'analyse chimique des eaux des forages destinées à l'irrigation montrent une stabilité de leurs propriétés physico-chimiques. La conductivité électrique varie de 4 à 5 mS/cm. Le pH est globalement neutre et avoisine la valeur de 7,6. D'après le diagramme de Piper (Figure 3), le faciès géochimique des eaux d'irrigation d'anciens forages (1958, 1959, 1966, 1968, 1969 et 1992) et des forages actuellement en exploitation (Métouia 1, Métouia 4, Métouia 5, et Métouia 8; voir Figure 1) est mixte sulfaté ou mixte chloruré. Les eaux d'irrigation présentent un risque moyen d'alcalinisation avec un rapport d'adsorption de sodium (SAR) oscillant de 7,5 à 10,2. Les eaux de forages, par rapport aux teneurs moyennes tolérées en éléments ioniques (AYERS et WESTCOT, 1988), sont riches en sulfates et déjà très proches de la saturation vis-à-vis du gypse (Figure 4).

3.2 Les eaux de la nappe phréatique

3.2.1 Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe phréatique

La nappe montre une tendance à la recharge matérialisée par la remontée du niveau piézométrique et la réduction progressive de la zone non saturée. Cette tendance

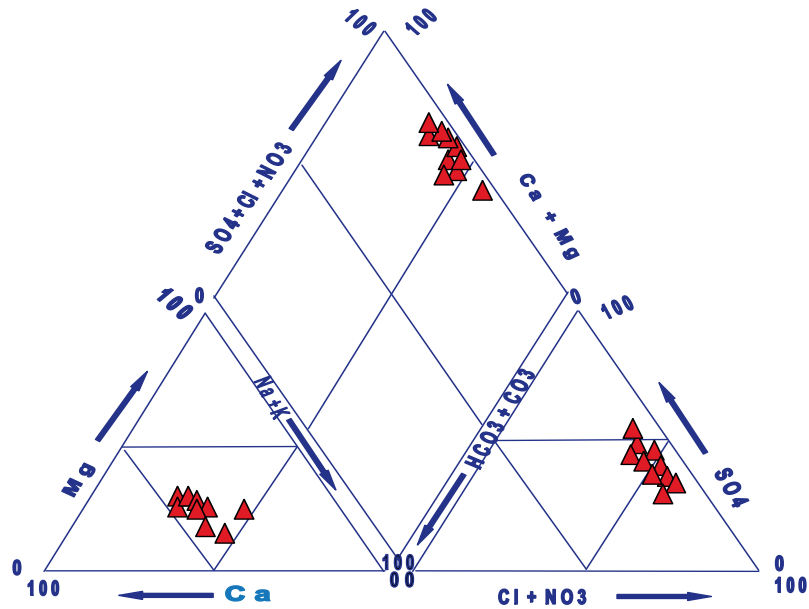


Figure 3. Faciès géochimique des eaux d'irrigation.
Geochemical facieses of irrigation waters.

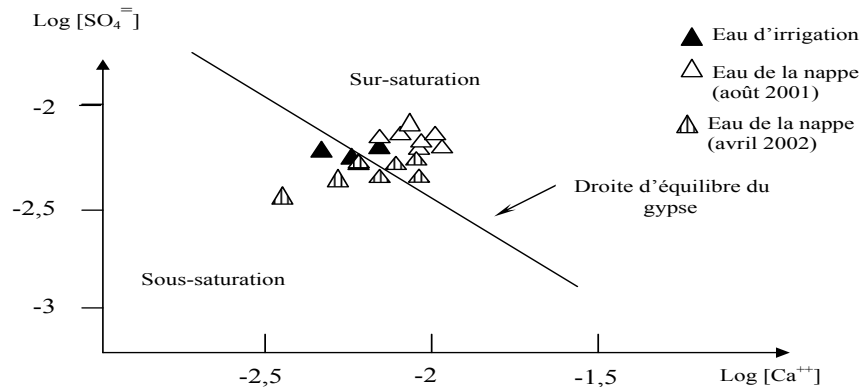


Figure 4. Diagramme d'équilibre des eaux d'irrigation et de la nappe phréatique par rapport au gypse.
Chemical equilibrium diagram for the irrigation waters and for ground water, as compared to gypsum.

interannuelle à la recharge est attribuée au surdosage artificiel des eaux d'irrigation à partir des forages par rapport aux doses naturelles fournies autrefois par les sources actuellement taries. À cela vient s'ajouter le mauvais dimensionnement et le dysfonctionnement du réseau de drainage. Au sein de cette remontée du niveau piézométrique, une fluctuation saisonnière et interannuelle est aussi observée. Cette fluctuation est essentiellement liée à l'irrégularité des précipitations comme le démontre bien l'année hydrologique 2002-2003 exceptionnellement pluvieuse (333 mm), dépassant de loin la pluviométrie moyenne annuelle des trois autres années de la période d'observation (Figure 5). Les fluctuations saisonnières oscillent entre 0,3 m et 2,36 m avec une moyenne de 1 m au cours de la période 2001-2004. Durant les années 2000-2001 et 2001-2002 où la pluviométrie est très faible, la morphologie

des isopièzes est quasiment stable (Figure 6). Cependant, au cours de l'année 2002-2003 exceptionnelle, on constate le déplacement du front de la nappe vers l'aval lié à la remontée du niveau piézométrique. Les cartes piézométriques montrent que les eaux de la nappe s'écoulent de l'amont du NW et du SW vers l'aval à l'est à Sebkhia Er Rahia en direction du littoral.

L'hydrodynamique de la nappe ainsi caractérisée met en évidence la haute sensibilité de celle-ci aux influences extérieures et, par conséquent, sa haute vulnérabilité aux risques de différentes natures. Ceci s'explique bien entendu par la réduction de la zone non saturée, d'une part, et par le caractère filtrant de cette dernière, d'autre part.

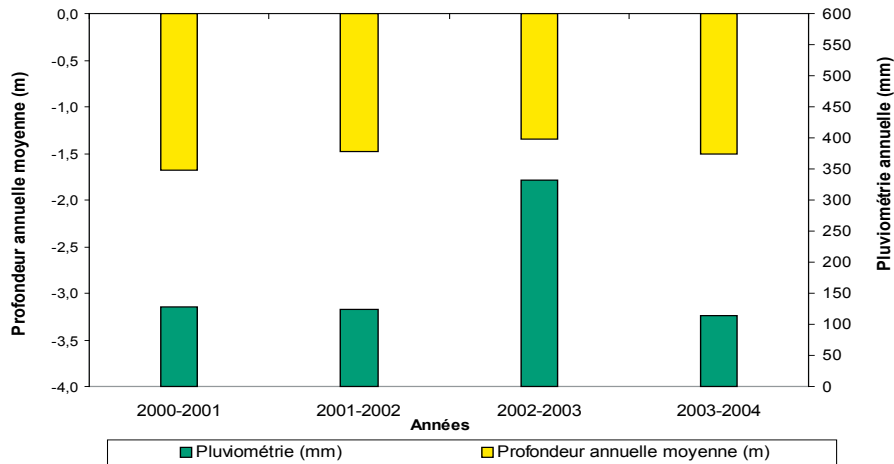
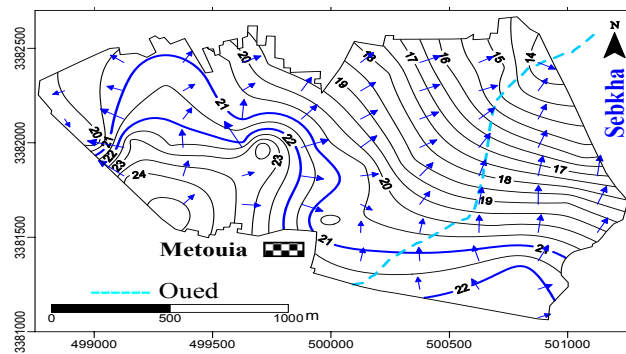
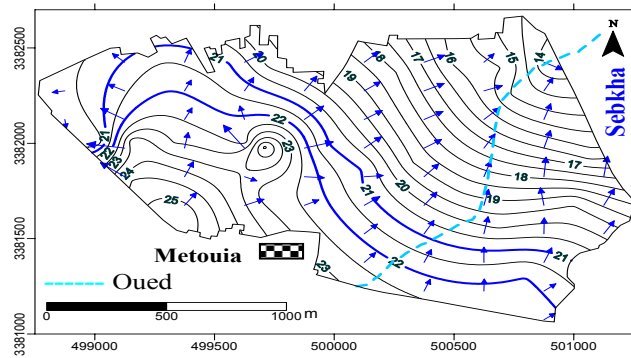


Figure 5. Variations de la profondeur moyenne annuelle de la nappe phréatique en fonction de la pluviométrie.

Variations of the average depth of the water table as related to precipitation.



(a)



(b)

Figure 6. Variation spatio-temporelle du niveau piézométrique et de l'écoulement des eaux de la nappe phréatique : (a) 2001, (b) 2003.

Spatial and temporal variations of the piezometer level and ground water flow: (a) 2001, (b) 2003.

3.2.2 Caractéristiques hydro chimiques des eaux de la nappe phréatique

Les mesures de suivi de la salinité de la nappe montrent que cette dernière est sensible à la sécheresse et à la dynamique de l'eau. En effet, durant l'année 2000-2001 où la pluviométrie est de l'ordre de 128 mm succédant à une année très peu

pluvieuse (62 mm en 1999-2000), la salinité de la nappe a atteint des valeurs maximales très élevées de l'ordre de 120 mS/cm dans certains piézomètres. Cette salinisation est renforcée par l'évaporation intense à laquelle la nappe est soumise. De même, durant l'année exceptionnelle 2002-2003 où la pluviométrie a atteint 333 mm, la salinité a aussi augmenté sensiblement dans l'ensemble de la nappe avec une moyenne

de l'ordre de 31,6 mS/cm. Ceci s'explique par le phénomène de lessivage des sels accumulés dans la zone non saturée.

À l'échelle spatiale, la conductivité électrique varie d'un piézomètre à un autre et les salinités les plus élevées ont été enregistrées au centre de l'oasis et vers l'aval à proximité de l'exutoire (Figure 7).

Le résultat des analyses des eaux de la nappe a révélé un faciès chimique chloruré-sodique sulfaté et magnésien. Le diagramme d'équilibre du gypse a montré une sursaturation des eaux vis-à-vis de ce minéral pendant les basses eaux et une saturation tangente au cours des hautes eaux (Figure 4).

En conclusion, le faciès chimique des eaux de la nappe étant constant, seule la minéralisation totale varie particulièrement en fonction des pluies, de l'infiltration de l'excédent d'eau d'irrigation ainsi que de l'évaporation intense.

3.3 Les eaux de drainage

Dans un réseau de drainage d'un périmètre irrigué, les eaux proviennent soit de la nappe phréatique, soit de l'eau de lessivage du sol, percolée de la surface après irrigation. Or, le

réseau de drainage actuel ne semble pas jouer cette fonction vitale pour l'oasis. En effet, la superposition de la carte piézométrique et du réseau de drainage (Figure 8), montre que ce dernier n'est que partiellement fonctionnel dans sa partie amont.

Ailleurs, les directions des écoulements souterrains, matérialisées par les lignes de courants, ne sont pas affectées par la présence du réseau de drainage, prouvant ainsi que, localement, le niveau de la nappe est en-dessous de ce dernier.

D'autre part, les efflorescences salines fréquentes au niveau de l'oasis prouvent que le lessivage est défaillant et les saumures n'atteignent pas les canaux de drainage pour être évacuées vers l'exutoire.

3.4 Les sols

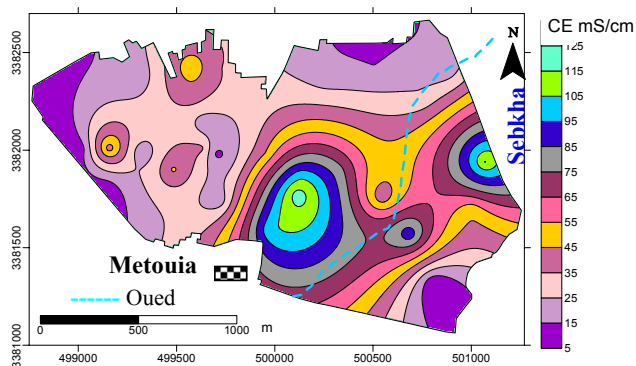
3.4.1 Analyse morphologique et minéralogique

L'étude morphologique des sols a montré la prédominance d'une texture sablo-limoneuse conférant aux sols un pouvoir filtrant très important. Tous les profils étudiés sont pourvus en gypse. Les teneurs varient de 2 à 61 % avec un gradient croissant du haut vers le bas des profils. Le carbonate de calcium est présent dans tous les sols étudiés avec des teneurs faibles de 5,5 % en moyenne, et ne dépassant pas 10 %. Le taux de calcaire est quasi invariant tout le long des profils et ne présente pas de corrélation avec le taux de gypse. À partir de l'étude morphologique de tous les profils creusés, nous avons pu représenter la profondeur d'apparition de la croûte gypseuse dans toute l'oasis (Figure 9). Dans les trois quarts de la superficie de l'oasis la croûte est à faible profondeur, de 55 cm à 140 cm. Les croûtes gypseuses ont été observées en surface sur les bordures sud-ouest et nord-est de l'oasis correspondant respectivement à la partie en pente de l'oasis située sur les glacis du jebel Dissa et à l'aval de celle-ci située à la limite de l'exutoire naturel de l'oasis coïncidant avec la sebkha Er Rahia. Les croûtes gypseuses sont très épaisses et possèdent une morphologie polygonale caractéristique.

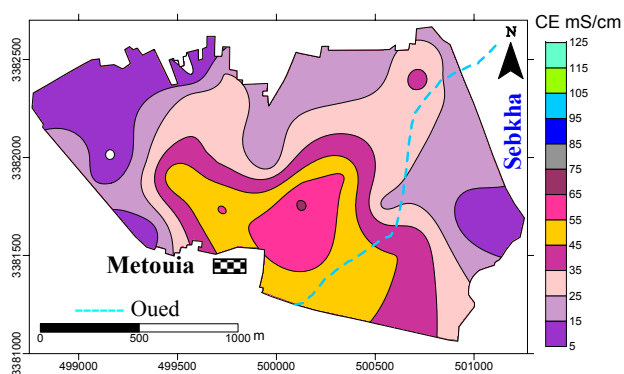
3.4.2 Géochimie de la solution extraite du sol

La solution extraite du sol a été obtenue par la méthode de la pâte saturée. Le pourcentage de saturation qui exprime le rapport entre le volume d'eau distillée ajoutée et le poids du sol utilisé varie de 33 à 56 % suivant la texture des horizons des sols, avec une moyenne globale de 40 % pour tous les sols. Les cations dominants sont, dans l'ordre décroissant : $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$. Les anions dominants sont dans l'ordre : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} \gg \text{HCO}_3^-$.

La solution extraite du sol dans la plupart des profils montre une salinité élevée allant de 3,5 à 75 mS/cm. Cette



(a)



(b)

Figure 7. Variation de la salinité des eaux de la nappe phréatique : (a) août 2001, (b) septembre 2003.
Variation in ground water salinity: (a) August 2001, (b) September 2003

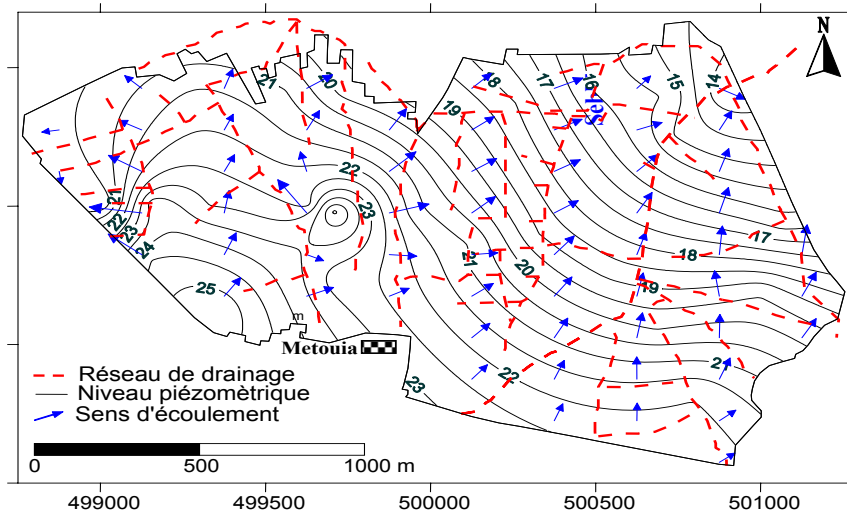


Figure 8. Relation entre la piézométrie de la nappe et le réseau de drainage.
Relationship between piezometric and drainage networks.

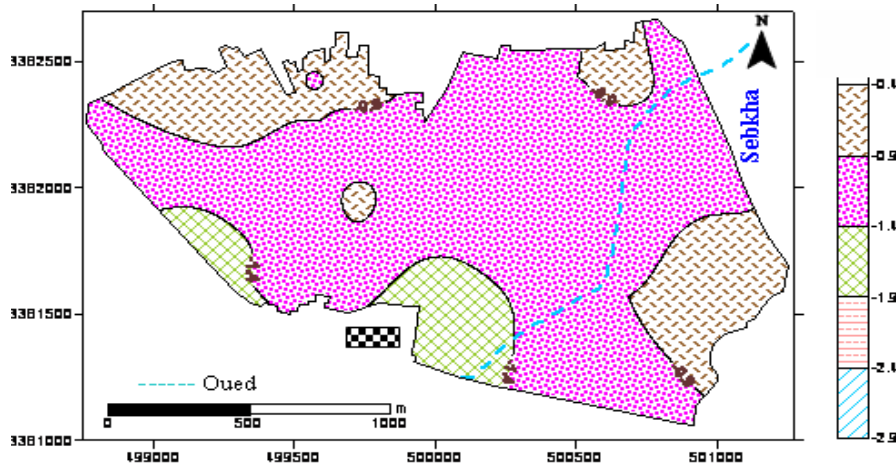


Figure 9. Profondeur de la croûte gypseuse dans l'oasis de Métouia.
Depth of gypsum crust in the Metouia oasis.

forte salinité est à attribuer à la qualité de l'eau d'irrigation préalablement salée, aux conditions climatiques très arides produisant une forte évapotranspiration qui concentre la solution du sol (CHEVERRY et ROBERT, 1998), et surtout à l'inefficacité du réseau de drainage mal entretenu. La solution extraite du sol est saturée vis-à-vis du gypse, alors même que l'extraction s'accompagne d'une dilution (PODWOJEWSKI et PETARD, 1996). Les profils des concentrations des différents cations et anions sont similaires de la surface jusqu'en profondeur. Les teneurs les plus élevées sont observées à la surface et en profondeur surmontant l'encroûtement gypseux. Cela est dû au fait que les solutions se concentrent, d'une part, à la surface du sol surtout par évaporation et, d'autre part, à la base du profil, où la texture sablo-limoneuse des sols favorise la lixiviation des éléments en solution jusqu'à la base du profil, c'est-à-dire jusqu'à la nappe (HATIRA, 2004).

3.5 Relation profondeur de la nappe- profondeur de la croûte gypseuse

La variation de la profondeur de la croûte suit globalement celle de la profondeur moyenne des eaux de la nappe (Figure 10). Ceci confirme bien l'origine de la croûte gypseuse qualifiée de croûte de nappe et citée par plusieurs auteurs (KADRI et HATIRA, 1996 a,b; MTIMET et HACHICHA, 1995; POUGET, 1968; VIEILLEFON, 1976, 1978; WATSON, 1985). En effet, les oasis se localisent pour leur grande majorité dans les régions d'artésianisme. Elles se trouvent souvent soumises à l'action d'une nappe phréatique. En ce qui concerne les oasis, les croûtes ou encroûtements se localisent dans les zones où la nappe phréatique est plus ou moins salée et alimentée essentiellement par des apports naturels d'origine profonde (sources et forages).

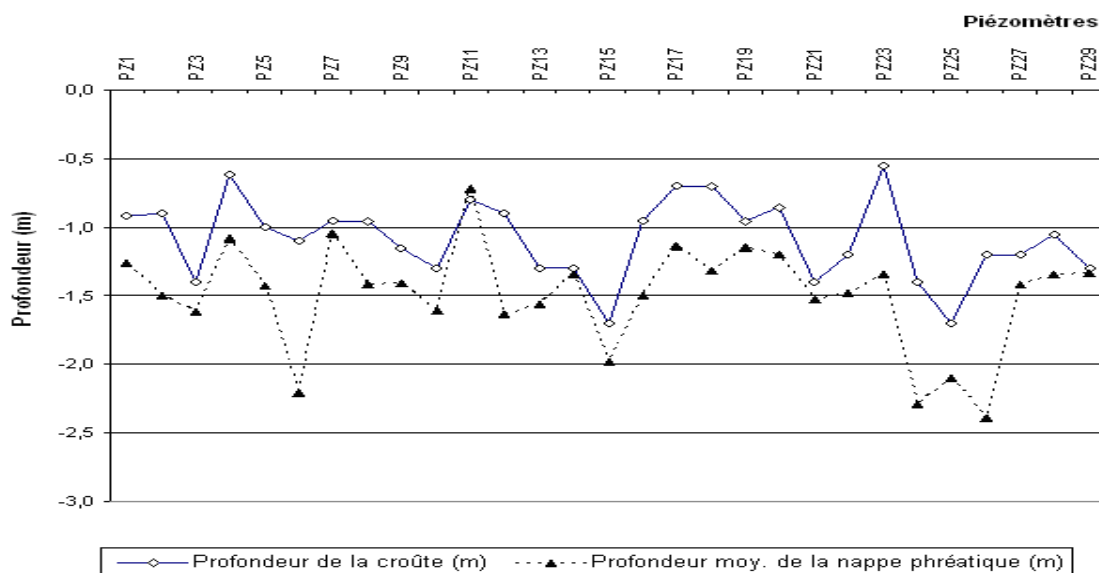


Figure 10. Variations de la profondeur des piézomètres et de la croûte gypseuse.
Variations in the depth of the piezometers and gypsum crust.

Partout où le niveau d'eau s'est abaissé, les croûtes et encroûtements subsistent et évoluent différemment selon les nouvelles conditions dans lesquelles ils se trouvent. À l'interface zone-saturée – zone-non saturée, là où le niveau piézométrique de la nappe phréatique est fluctuant, les croûtes et encroûtements sont dans un état métastable alternant entre une apparition et une disparition. Il semble que la présence d'un dépôt éolien sablo-gypseux dans la zone non saturée ait facilité leur formation (POUGET, 1968). Les croûtes et encroûtements sont alors souvent très épais, à texture sableuse, finement micro-cristallisés et très indurés.

4. DISCUSSIONS ET CONCLUSION

L'analyse de toutes les composantes du système oasien de Métouia durant quatre années par l'intermédiaire des mesures de suivi des caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques des eaux d'irrigation, des eaux de la nappe phréatique, des eaux de drainage et des solutions du sol, nous a permis de dégager les conclusions suivantes.

L'évolution de l'exploitation dans le temps de la nappe profonde de la Jeffara avec une demande accrue en eau pour l'irrigation, les usages domestique et industriel, a entraîné à partir de 1976 une chute prononcée et continue des débits artésiens, le tarissement des sources et l'augmentation des débits pompés avec le recours à l'exploitation par pompage. Cette exploitation n'a pas manqué d'influencer la qualité chimique des eaux. Actuellement, la charge saline des eaux d'irrigation utilisées dans l'oasis de Métouia varie entre 4 et 5 mS/cm. Ce sont des eaux chargées en sels chlorurés et sulfatés. Elles sont proches de la saturation vis-à-vis du gypse. Ces caractéristiques

chimiques de l'eau d'irrigation sont en partie à l'origine des accumulations gypseuses dans la zone non saturée de l'oasis. Outre le problème de dégradation qualitative des eaux, la pérennité de la ressource en eau se pose, soit la salinisation des nappes et le tarissement des nappes fossiles constituant dans l'avenir une menace de l'environnement du système oasien dans le sud tunisien. Les ressources en eau sont assez limitées, il est ainsi urgent de réviser la gestion globale de l'irrigation, caractérisée par une faible efficacité des réseaux de distribution à la parcelle due, essentiellement à la nature sableuse des sols, à l'insuffisance des équipements d'économie d'eau et à la maîtrise insuffisante de l'irrigation par les exploitants. Le réseau d'irrigation traditionnel très étendu est constitué de canaux à ciel ouvert, dits « Séguias », encore exploités dans ces oasis, demeure la cause principale de la perte d'eau d'irrigation.

La piézométrie et la minéralisation des eaux de la nappe phréatique constituent une menace permanente pour la salinisation de la zone non saturée. La réhabilitation des sols à une production agricole satisfaisante dépend ainsi des caractéristiques hydrodynamiques et hydrochimiques de la nappe phréatique superficielle.

L'oasis de Métouia est caractérisée par des sols à texture sablo-limoneuse, ayant des propriétés hydrodynamiques favorables à l'infiltration de l'eau et au transfert des solutés. Néanmoins, les sols y accusent une accumulation des sels de la surface jusqu'à la base du profil. La plupart du temps, les accumulations gypseuses sous forme d'encroûtement sont localisées à la base des profils et sont en relation avec la fluctuation saisonnière de la nappe phréatique.

Dans un contexte climatique aride, le lessivage des sols est assuré essentiellement par les eaux d'irrigation. Néanmoins,

les pluies exceptionnelles comme celle de 2003 (333 mm d'eau) ont eu un impact très positif sur la réduction du stock résiduel des sels accumulés dans les sols et, par conséquent, une amélioration notable du rendement agronomiques durant toute l'année 2004. L'abandon des terres (60 ha environ), qui représente 22 % de la superficie totale exploitée de l'oasis, 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 instantanée et rapide sous forme d'efflorescences salines même en hiver. Dans les parcelles abandonnées, la salinité des horizons de surface des sols peut atteindre 70 à 90 mS/cm et qui est équivalente à la salinité de la nappe au même endroit. Ainsi, l'encroûtement gypseux de nappe répartie à des profondeurs variables allant de 0,5 m à 2,3 m, additionné éventuellement à une croûte saline de surface due à l'abandon des terres, constituent des contraintes majeures pour la survie de l'oasis en tant que ressources naturelles et source de vie pour une bonne partie de la population du sud tunisien (KADRI et VAN RANST, 2002; ROBERT et CHEVERRY, 1996).

L'oasis de Métouia est caractérisé par un relief relativement plat et un gradient hydraulique faible, une surface piézométrique élevée et un drainage naturel insuffisant. L'amélioration des sols affectés par les sels dans l'oasis de Métouia reste réalisable mais tributaire d'un aménagement minimum qui garantisse une profondeur satisfaisante de la nappe. La réhabilitation et la sauvegarde de l'oasis passent par l'efficacité du drainage et de l'efficacité des eaux d'irrigation à toutes les échelles de leur utilisation. Tenant compte du diagnostic du réseau de drainage existant, sa réfection en matière d'optimisation de sa densité et de sa profondeur, empêchant la remontée de la nappe et améliorant l'évacuation des eaux de lessivage, semble nécessaire pour éviter l'évaporation à la surface et l'accumulation du sel dans les sols. Pour ce faire, nous recommandons l'optimisation de la conception du réseau de drainage tenant compte des données hydrodynamiques de la nappe phréatique et du maillage nécessaire à un drainage total des eaux de lessivage. Une fois réalisé, le nouveau système de drainage nécessite un entretien de curage périodique.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABIDI B. (1999). Gestion des ressources en eau d'une zone d'interdiction. Cas des nappes souterraines de la région O. Akarit-El Bssissi (Gabès Nord). Journée des ressources en eau, INAT, Tunis, 1-19.
- AYERS R.S., D.W. WESTCOT (1988). La qualité de l'eau en agriculture. *FAO Irrig. Drain. Bull.*, 29, Rév.1, Rome, 180 p.
- CHEVERRY C. et M. ROBERT (1998). La dégradation des sols irrigués et de la ressource en eau : Une menace pour l'avenir de l'agriculture et pour l'environnement des pays au sud de la Méditerranée. *Étude et Gestion des Sols, AFES*, 5, 4, 217-226.
- GRIRA M, A. HATIRA, B. BENMANSOUR et T. GALLALI (2002). Hydrodynamique et hydrochimie de la nappe superficielle de l'oasis de Métouia (Gabès Nord, Tunisie). Colloque international sur l'eau dans le bassin méditerranéen : Ressources et développement durable. *WATMED*, Monastir, Tunisie, 505-508.
- HATIRAA., M. GRIRA, B. BEN MANSOUR et T. GALLALI (2002). Impact des eaux d'irrigation sur l'évolution des accumulations gypseuses. Cas de l'oasis de Métouia (Gabès N). Colloque international sur l'eau dans le bassin méditerranéen : Ressources et développement durable. *WATMED*, Monastir, 842-845.
- HATIRA A. (2004). Complexation dans les systèmes organo-minéraux naturels. Spéciation des métaux lourds dans les sols - Impacts des activités anthropiques sur la pollution de l'environnement pédologique (fertilisant - phosphogypse - eau usée - eau d'irrigation et rejets miniers). Habilitation U. FST, Tunis, 194 p.
- KADRI A. et A. HATIRA (1996a). Genesis and typology of gypso-saline accumulations in southern Tunisia. International Symposium on Soils with Gypsum Léida, Espagne, 55-59.
- KADRI A. et A. HATIRA (1996b). Caractérisation hydro-pédologique des sols des oasis de Nefzaoua. Séminaire Int. Acquis scientifiques et perspectives pour un développement durable des zones arides, Jerba, Tunisie, 18-21.
- KADRI. A. et E. VAN RANST (2002). Contrainte de la production oasisienne et stratégies pour un développement durable. Cas des oasis de Nefzaoua (Sud tunisien), *Sécheresse*, 1, 5-12.
- MAMOU A. et B. BEN BACCAR (1987). Situation de l'exploitation des nappes phréatiques du gouvernorat de Gabès. DRE. Ministère de l'agriculture de Tunisie.
- MAMOU A. (1990). Caractéristiques et évaluation des ressources en eau du sud tunisien. Thèse de Doctorat ès Sciences Naturelles, Univ. Paris Sud, Orsay, France, 190 p.
- MAMOU A. (1995). Incidence de l'exploitation des nappes du sud tunisien dans les oasis sur la qualité chimique de leurs eaux. *Sols Tunisie*, 16, 30-40.

- MEKRAZI A.F. (1975). Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique de la région de Gabès Nord. Thèse de Doctorat ès Sciences Géologiques, Univ. Bordeaux I, 230 p.
- MTIMET A. et M. HACHICHA (1995). Hydromorphie et salinisation dans les oasis tunisiennes. *Sécheresse*, 6, 319-324.
- PODWOJEWSKI P. et J. PETARD (1996). Comparaison entre différentes méthodes d'extraction des sels solubles et des cations échangeables dans un vertisol à gypse de Nouvelle Calédonie. *Étude et Gestion des Sols, AFES*, 3, 3, 193-206.
- POUGET M. (1968). Contribution à l'étude des croûtes et encroûtements gypseux de nappe dans le sud tunisien. *Cab. ORSTOM Ser. Pédol.*, VI, 309-365.
- ROBERT, M. et C. CHEVERRY (1996). Les ressources mondiales en eau et en sols : une limitation pour l'avenir. *Cab. Agric.*, 5, 243-248.
- VIEILLEFON J. (1976). Inventaire critique des sols gypseux en Tunisie. Étude préliminaire. Direction des Ressources en Eau et en Sol, Tunis, Tunisie, ES 98. 80.
- VIEILLEFON J. (1978). Les sols gypseux en Tunisie. Contribution à l'amélioration de leur étude analytique. *Sols Tunisie*, 10, 40-105.
- WATSON A. (1985). Structure, chemistry and origin of gypsum crusts in southern Tunisia and the central Namib Desert. *Sedimentol.*, 32, 855-875.