



United Nations
Educational, Scientific
and Cultural Organization

INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME



Proceedings

Regional Aquifer Systems in Arid Zones – Managing non-renewable resources

**International Conference
Tripoli, Libya, 20–24 November 1999**



General Water Authority of
the Libyan Arab Jamahiriya

The designations employed and the presentation of material throughout the publication do not imply the expression of any opinion whatsoever on the part of UNESCO concerning the legal status of any country, territory, city or of its authorities, or concerning the delimitation of its frontiers or boundaries.

CO-SPONSORS

The preparation of this volume has been supported by the Sahara and Sahel Observatory (OSS)



International Organisations:

UNESCO, FAO, IAH, IUGS, IWRA, ACSAD, ALESCO, CEDARE, IDB

National Organisations:

GWA, GMRA, GMRWUA (Eastern, Western and Central Zones), GCMAP, LIBYAN ARAB AIRLINES, WWIP, NSRSC, GCAS

Kamel Zouari et My Ahmed Maliki

Contribution à l'évaluation et à la gestion des eaux de la nappe profonde du Sahel de Sfax par les méthodes isotopiques (Isotope methodologies' contribution to the evaluation and management of the Sfax Sahelian Aquifer)

*Laboratoire de Géochimie Isotopique et de Paléoclimatologie
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (ENIS
Sfax, Tunisie*

Abstract

This study has been carried out on the Sfax Sahelian deep aquifer which is located in the eastern part of Tunisia. This aquifer is lodged in the sandy series of Upper Miocene (Upper Serravalian-Tortonian). Its important extension (14,000 km²) offers considerable resources.

Groundwater flow was established by measuring the boreholes piezometric levels. The piezometric level ranges between 35 and 17 m and groundwater flow from north-west to south-east, and from the north to the south. The hydraulic gradient is very low and translates a slow flow and a sedentary groundwater state.

An isotopic study (¹⁸O, ²H, ³H, ¹³C and ¹⁴C) achieved more than four years ago, on groundwater deep aquifer has allowed to understand certain particularities of this basin's flow regime. The absence of tritium and the very low ¹⁴C contents show that this groundwater is old and that aquifer recharge occurred during different climatic conditions compared to the present one (Ages superior to 10,000 years). The homogeneity of the stable isotope and ¹⁴C contents suggests a slow flow, with very weak fluxes, in the system.

The hydrochemical study shows that groundwater is characterized by a chemical facies of Na-Cl type. The groundwater mineralisation varies between 3 and 10 g.l⁻¹. On the scale of the basin, the spatial distribution of the salinity is not progressive.

Keywords

Tunisia, Sahel of Sfax, deep aquifer, isotopes, recharge

Résumé

Une étude isotopique (¹⁸O, ²H, ³H, ¹³C et ¹⁴C) entreprise depuis plus de quatre ans sur les eaux de la nappe profonde de Sfax (Sahel de Tunisie) a permis de comprendre certaines particularités du régime des écoulements souterrains du bassin. L'absence de tritium et les faibles activités ¹⁴C montrent que les eaux de la nappe sont anciennes et que la recharge de cet aquifère a eu lieu sous des conditions climatiques très lointaines, vraisemblablement plus froides et différentes des conditions actuelles (période de l'Holocène-Pléistocène supérieur). L'homogénéité des teneurs en isotopes stables et les basses teneurs en ¹⁴C suggèrent des écoulements très lents et de faibles flux à l'entrée et à la sortie du système.

Mots clés

Tunisie, Sahel de Sfax, aquifère profond, isotopes, recharge

1. Introduction – problématique

Dans la région de Sfax, l'exploitation des eaux souterraines a intéressé en grande partie et jusqu'à les années 1985 les nappes phréatiques, et notamment celles se trouvant sur la zone côtière. Actuellement, l'exploitation globale à partir des nappes de surface est estimée à 32,6 Mm³, représentant ainsi environ 106 % des ressources exploitables (30,75 Mm³). Par conséquent, cette exploitation actuelle est arrivée à un stade avancé se traduisant par une surexploitation dans de nombreux secteurs du bassin.

Cette surexploitation et la fluctuation des précipitations sur la région (faiblesse et variabilité dans le temps) ont conduit à une dégradation quantitative et qualitative des eaux et à un danger réel de l'avancée de l'eau de mer, phénomène déjà observé dans de nombreux secteurs au Nord (région de Djebeniana, située à 35 km de la ville de Sfax) et au Sud (région de Hajeb-Sidi Abid) du bassin (Figures 1 et 2). Compte tenu de cette situation et afin de répondre à une demande de plus en plus croissante en eau, pour satisfaire les besoins en eau surtout pour l'agriculture et l'industrie, d'une part, et pour soulager les aquifères de surface, d'autre part, le recours aux ressources profondes devient inévitable.

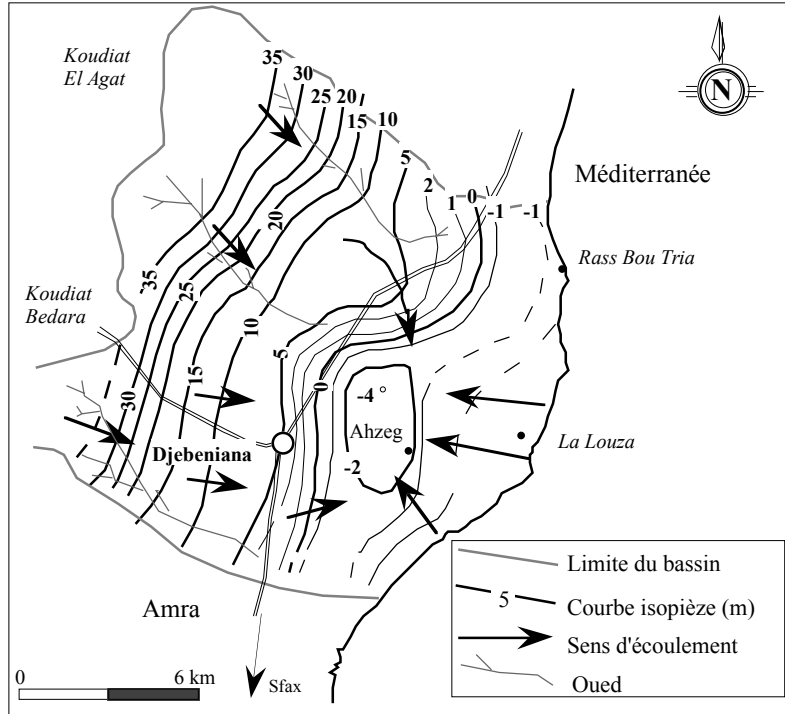


Figure 1: Etat piézométrique de la nappe phréatique de Djebeniana en 1994 (Maliki 1994)

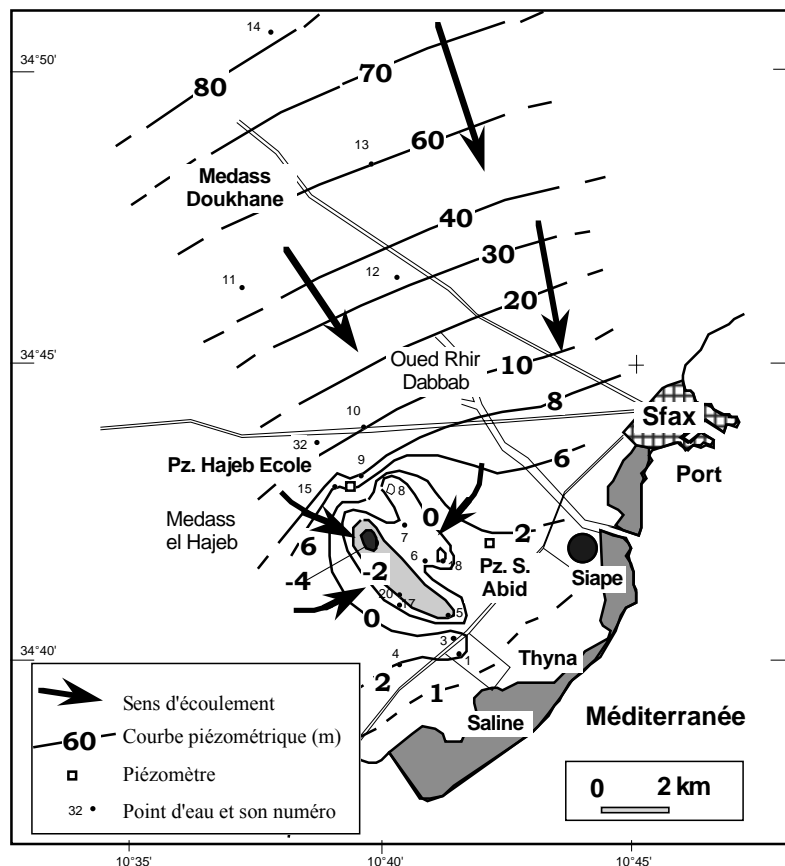


Figure 2: Piézométrie de la nappe phréatique de la région de Sidi Abid en 1997 (Fedrigoni 1998)

En effet, l'analyse de l'évolution de l'exploitation de la nappe profonde montre que les prélèvements sont passés de 9,6 Mm³ en 1986 à 13,4 Mm³ en 1987 puis à 17,8 Mm³ en 1988. A partir de cette dernière année, les prélèvements restent plus au moins stables (19 Mm³) (Figure 3).

Compte tenu de cette situation, cette étude a pour but de contribuer à une meilleure connaissance du fonctionnement hydrodynamique du système aquifère profond du Sahel de Sfax en adoptant une approche pluridisciplinaire (hydrogéologique, hydrochimique et isotopique).

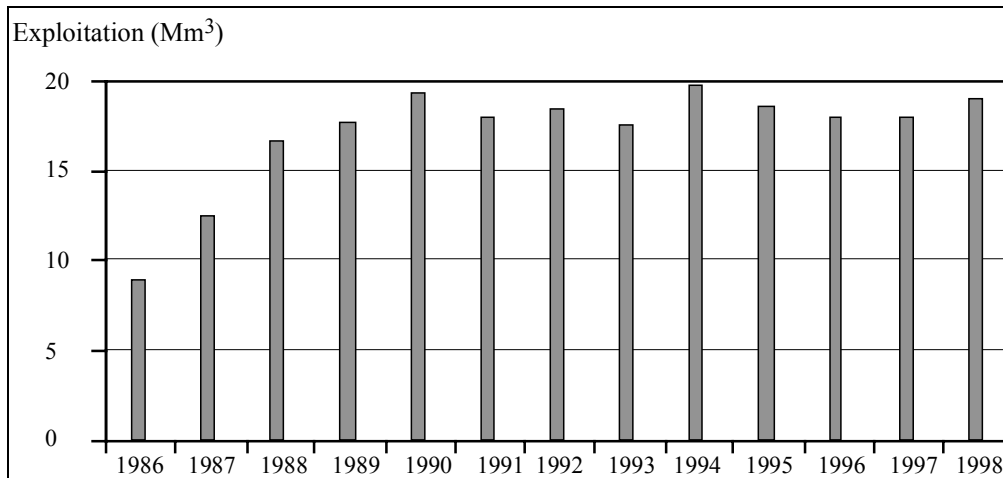


Figure 3: Exploitation annuelle des eaux de la nappe profonde de Sfax (Mm³) (DGRE 1998)

2. Généralités sur la zone d'étude

2.1 Localisation et aperçu géologique

La zone d'étude faisant partie du Sahel de Tunisie est limitée à l'Ouest par l'axe Nord-Sud, au Nord, par le Sahel de Sousse, au Sud, par le Golfe de Gabès et à l'Est, par la Méditerranée (Figure 4). Le bassin de Sfax, qui fait partie de la plate forme tunisienne, est constitué essentiellement de sédiments tertiaires et quaternaires. Les affleurements connus dans la région sont surtout d'âge Mio-Pliocène et Quaternaire. Quelques terrains d'âge Miocène supérieur sont rencontrés au niveau des reliefs de bordure (Djebel Krechem el Artsouma et au niveau du chaînon de Mezzouna), ainsi que dans le secteur de Zeramdine-Beni Hassen, situé au nord du secteur d'étude (Figure 4).

2.2 Aperçu climatique

La région d'étude se caractérise par un climat aride à semi-aride. Les précipitations moyennes annuelles se limitent à 252 mm (1968-93) (Station El Maou), un module sujet d'ailleurs à de grandes fluctuations. A l'échelle mensuelle, la région de Sfax se caractérise par un régime pluviométrique moyen complexe (Figure 5). La variabilité constitue une caractéristique fondamentale des pluies dans la région sfaxienne. Le coefficient de variation atteint 45 % au niveau des pluies annuelles et augmente au fur et à mesure que l'on considère les quantités saisonnières et/ou mensuelles. D'une manière générale, la variabilité est inversement proportionnelle aux modules moyens : elle est d'autant plus élevée que les quantités sont faibles.

La région de Sfax connaît un climat thermique de type méditerranéen assez chaud. La moyenne annuelle s'élève à 19°C, avec des températures moyennes de l'ordre de 11,5°C en janvier, et de 25,6°C en juillet.

En plus de la rareté des précipitations, l'évaporation élevée sur la région de Sfax, accentue davantage la sécheresse. Elle fonctionne tout le long de l'année, même en hiver où elle atteint sa valeur minimale 127 mm. Le maximum d'évaporation est enregistré en été avec 602 mm. En raison de l'irrégularité et la faiblesse des pluies, le réseau hydrographique est peu développé. Tous les oueds sont à caractère temporaire.

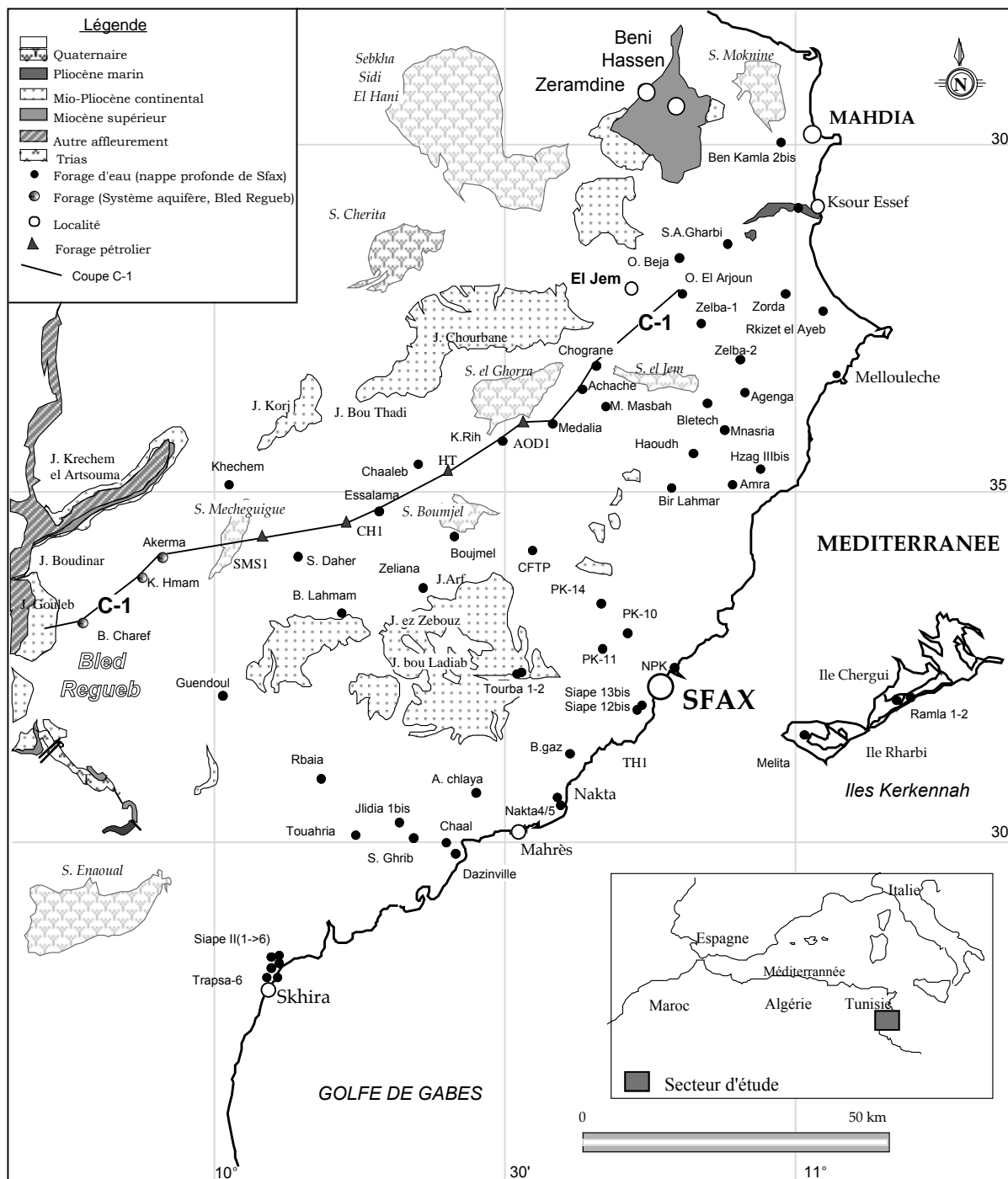


Figure 4: Carte géologique du secteur d'étude et localisation des points d'eau

2.3 Aperçu hydrogéologique

D'un point de vue hydrogéologique, la nappe profonde de Sfax est logée dans les sables du Miocène supérieur qui forment le réservoir aquifère profond le plus important dans la région. D'une puissance moyenne de l'ordre de 200 m, ce réservoir est formé essentiellement de sables et d'argiles. Affleurant au Nord, au Nord-Ouest et Sud-Ouest du bassin, il est capté à une profondeur variant de 200 à 700 m. Libre dans la partie amont du bassin, il est captif au centre et devient jaillissant le long du littoral.

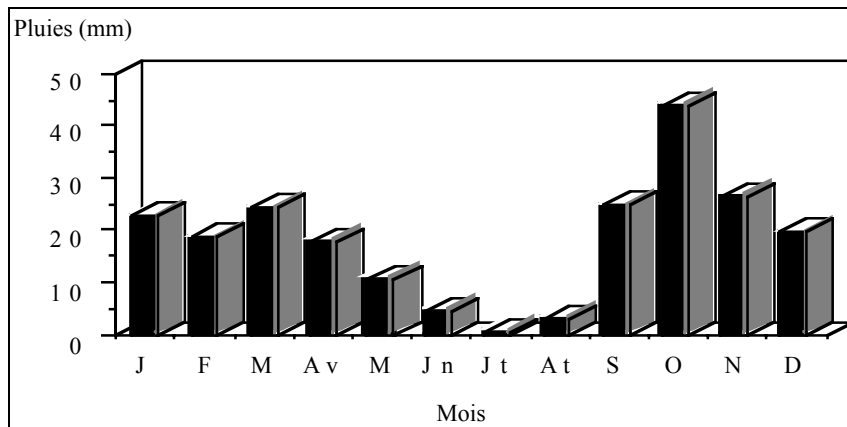


Figure 5: Régime moyen des pluies à Sfax (1901-90)

La corrélation lithostratigraphique réalisée à partir des sondages pétroliers associées aux renseignements fournis par les coupes de forages d'eau profonds, nous a permis de mieux définir la structure et la géométrie des différentes formations réservoirs existantes dans le Sahel de Sfax.

La coupe C-1 (voir Figure 4 pour l'emplacement) de direction SW-NE, débute à partir des reliefs de l'axe N-S au niveau de Djebel Gouleb et s'étend jusqu'à l'Oued el Arjoun (Figure 6). Cette coupe, à structure assez complexe, illustre la continuité de la série sableuse à travers la plaine de Sfax. Elle montre un grand développement des séries sédimentaires au niveau du forage pétrolier AOD1 où le Miocène moyen à supérieur atteint une épaisseur de l'ordre de 670 m puis une réduction de leur puissance vers les bordures. Vers le NE, la présence de forages d'eau, dont la profondeur d'investigation ne dépasse pas les 700 m (forage de Meddalia) et captant probablement la partie sommitale de l'aquifère (la plus productive), rend difficile toute tentative de caractérisation de la géométrie de l'aquifère.

La carte piézométrique établie au cours de la période juin-juillet 1995 par Maliki (en prép.) montre que les écoulements souterrains de la nappe se font du Nord et du Nord-Ouest vers Sud et le Sud-Est (Figure 7).

3. Methodes d'analyses

Les forages d'eaux échantillonnés pour des analyses chimiques (éléments majeurs) et isotopiques sont représentés sur la Figure 4. Les teneurs en isotopes stables de la molécule d'eau ont été mesurées par spectrométrie de masse au laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université de Paris-Sud (Orsay, France) et à British Geological Survey (Wallingford, UK).

Les teneurs en oxygène-18 ont été mesurées sur du CO₂, préalablement équilibré avec l'eau des échantillons. La mesure est exprimée par rapport au standard international SMOW [Standard Mean Ocean Water, représentant la composition isotopique moyenne des eaux océaniques (Craig 1961)]. L'incertitude analytique est de $\pm 0,2$ ‰. Les teneurs en deutérium ont été mesurées sur le gaz hydrogène obtenu par réduction en utilisant le zinc (Coleman *et al.* 1982). L'incertitude analytique est de ± 2 ‰.

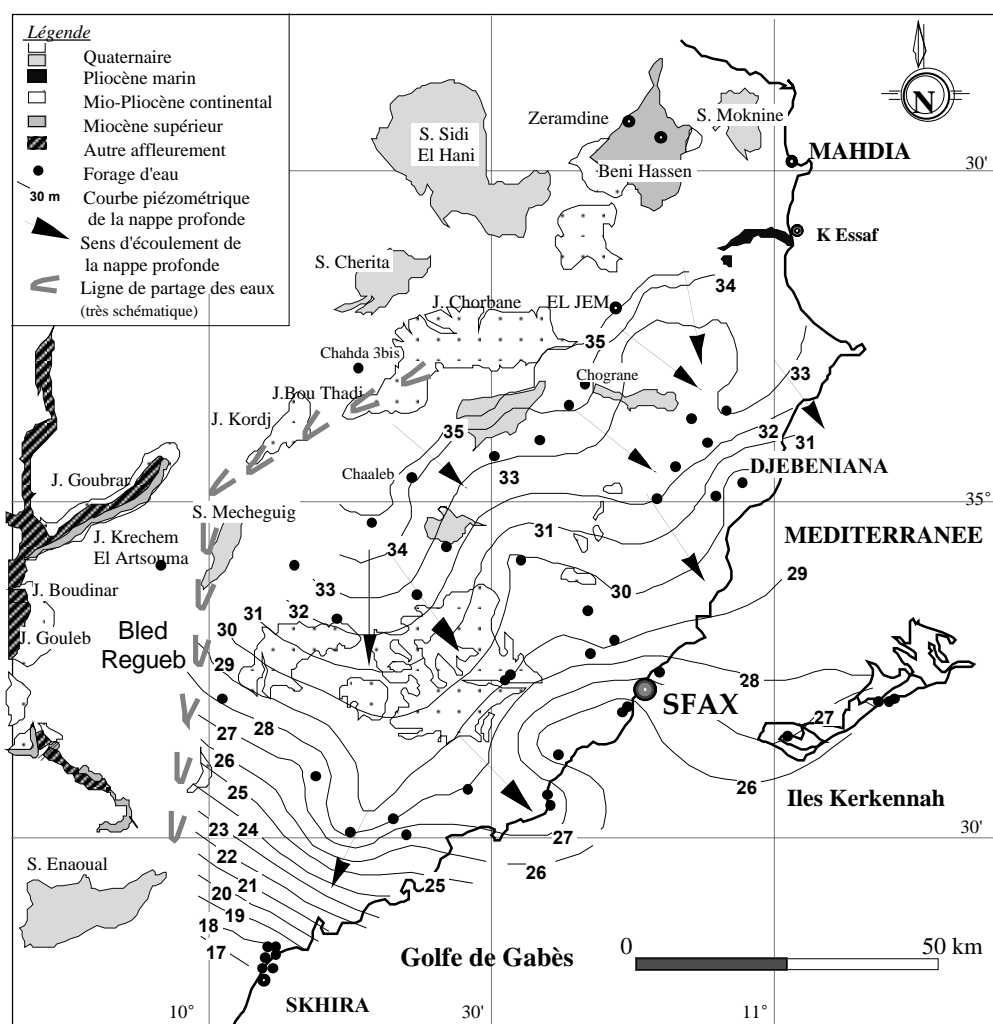


Figure 7: Carte piézométrique des eaux de la nappe profonde de Sfax (juin-juillet, 1995)

L'activité ^{14}C du Carbone Inorganique Total Dissous (CITD) a été déterminée par comptage ϵ dans un compteur à scintillation liquide (type Beckman), au laboratoire de Géochimie Isotopique et de Paléoclimatologie de l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, selon la méthode décrite par Fontes (1971). Les teneurs en ^{13}C sont mesurées par spectrométrie de masse au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique à Orsay sur le CO_2 dégagé après attaque acide complète de H_3PO_4 (ultra-pur) sur le BaCO_3 . Le tritium a été déterminé, par enrichissement au Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon (CRGT) en France et à l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) à Vienne, en Autriche.

4. Resultats et discussions

4.1 Hydrochimie

Les points représentatifs des eaux de la nappe profonde de Sfax sont reportés sur le diagramme de Piper (Figure 8). Les eaux montrent une grande homogénéité du faciès chimique. Elles sont de type chloruré sodique.

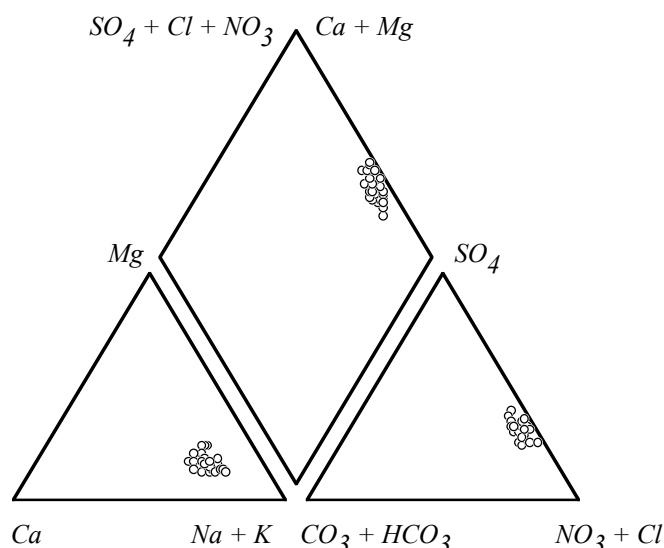


Figure 8: Diagramme de Piper des eaux de la nappe profonde de Sfax

La salinité des eaux de la nappe représentée par la Figure 9, varie entre 3 et 10 g.l⁻¹. Les eaux à minéralisation modérée (comprise entre 3 et 4,5 g.l⁻¹) sont rencontrées dans le Nord et le Centre du bassin. Dans la partie sud, les eaux se distinguent par une minéralisation nettement plus élevée (autour de 10g.l⁻¹).

Les teneurs élevées en sels enregistrées dans les eaux prélevées dans la partie sud du bassin sont vraisemblablement liées, en partie, à une intrusion d'eau de mer, comme en témoignent leurs rapports Br/Cl et Na/Cl proches du rapport marin, et à la mise en solution de minéraux tels que le gypse, l'anhydrite, la calcite et la dolomite vis-à-vis desquels les eaux sont saturées voire même sur-saturées. Dans le reste de la plaine, les eaux acquièrent leurs minéralisations par dissolution des évaporites (Maliki, en prép.).

4.2 Géochimie isotopique

Pour déterminer le temps de séjours des eaux et tenter de remonter aux périodes de recharges qui ont été à l'origine de la mise en eau dans ce système aquifère profond, nombreuses analyses isotopiques ont été réalisées. La détermination du tritium par enrichissement a été effectuée sur neuf échantillons. Les résultats obtenus montrent que les eaux sont très faiblement tritiées, voire non tritiées (Figure 10). Ces teneurs suggèrent des temps de séjours moyens prolongés et une infiltration antérieure à 1952, date de début des essais thermonucléaires.

Les teneurs en ¹⁴C du CTD ont été mesurées sur environ 40 échantillons. Sur l'ensemble des analyses ¹⁴C, environ 20 échantillons présentent des activités en carbone moderne inférieures à 5 % et 14 échantillons affichent des teneurs comprises entre 5 et 10 %, alors que 4 points d'eau montrent des activités ¹⁴C variant de 10 à 15 pCm. Les activités ¹⁴C comprises entre 15 et 20 % n'intéressent que 3 points d'eau. L'histogramme de fréquence (Figure 11) montre clairement la distribution des différentes analyses ¹⁴C. D'une façon générale, les basses activités en ¹⁴C mesurées dans les eaux de la nappe de Sfax correspondent à des âges corrigés (selon le modèle de Pearson), s'échelonnant entre 28 ka et 11 ka. Ces âges corrigés confirment déjà l'origine ancienne des eaux et l'absence de recharge récente. En termes paléoclimatiques, la nappe profonde de Sfax est rechargée sous des conditions climatiques très lointaines, vraisemblablement plus froides, et différentes des conditions actuelles (période de l'Holocène-Pléistocène supérieur).

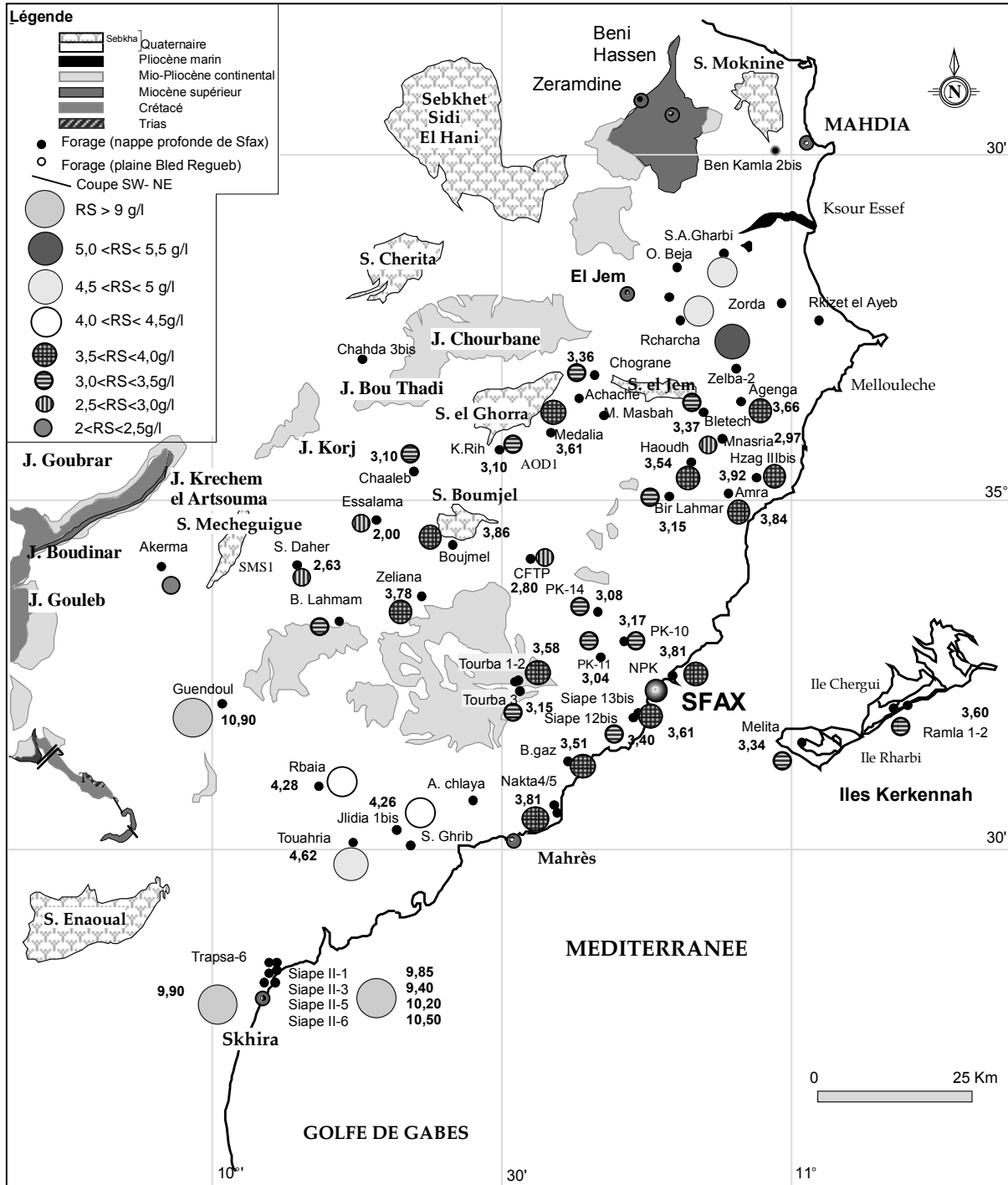


Figure 9: Carte de minéralisation des eaux de la nappe profonde de Sfax

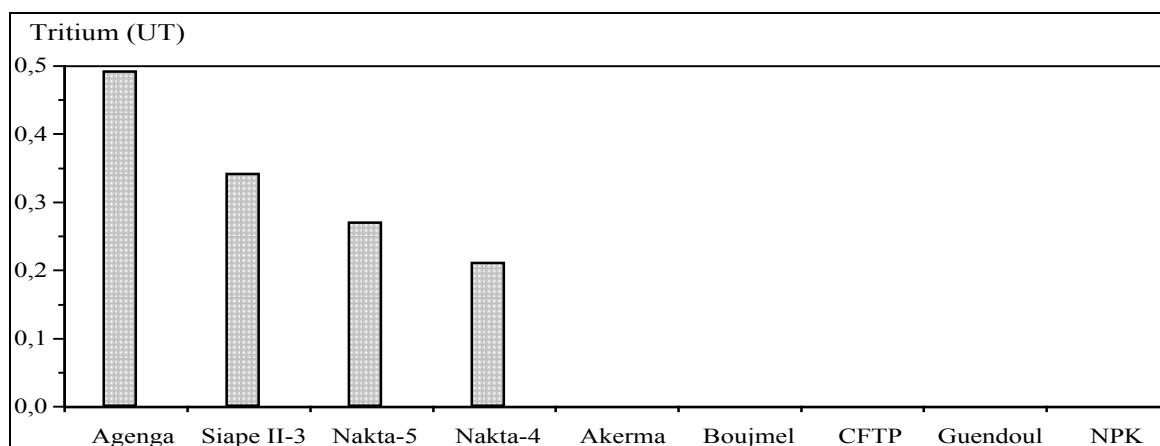


Figure 10: Teneurs en tritium dans les eaux de la nappe profonde de Sfax

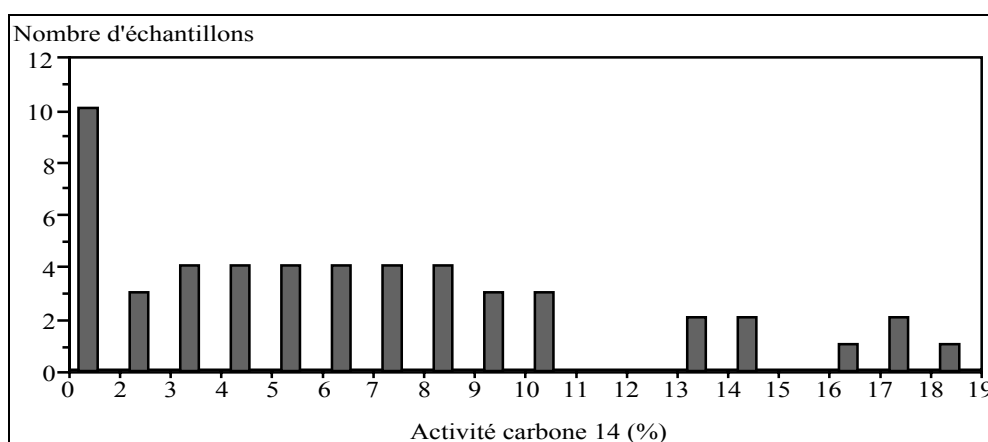


Figure 11: Histogramme de fréquence des teneurs en ¹⁴C dans les eaux de la nappe (Maliki, en prép.)

Par ailleurs, les teneurs en isotopes stables (¹⁸O et ²H) mesurées dans les eaux de la nappe profonde sont très homogènes et sont centrées respectivement pour juin 1994 et janvier 1995 autour de -6,2 et -6,0 ‰ vs V-SMOW pour l'oxygène-18 et autour -40,8 et -40,7 ‰ vs V-SMOW pour le deutérium (Maliki *et al.*, sous presse). Dans un diagramme ¹⁸O/¹⁸O (Figure 12), les teneurs isotopiques des échantillons prélevés au cours des deux périodes d'échantillonnage (juillet 1994 et janvier 1995) ne montrent pas de différences significatives à l'échelle de la saison (estivale et hivernale), puisque pour la plupart des échantillons, les légères variations que l'on observe s'inscrivent dans les marges d'incertitude analytique.

L'absence de variations marquées à l'échelle de six mois signifie que les variations saisonnières de la recharge sont effacées par un temps de résidence dans l'aquifère beaucoup plus long. Ceci est logique si l'on considère que la nappe est captive sur presque la totalité du bassin.

Dans le diagramme classique δ²H en fonction de δ¹⁸O (Figure 13), les points représentatifs des eaux de la nappe profonde de Sfax forment un groupe très homogène, ils sont situés pour la plupart, légèrement en dessous de la droite météorique mondiale (Craig 1961). Ces points restent dans tous les cas très en dessous de la droite météorique locale et leurs teneurs isotopiques sont très inférieures aux teneurs isotopiques moyennes pondérées des précipitations actuelles (-4,6 ‰ en ¹⁸O et -23,3 ‰ en ²H). Cette différence de teneurs isotopiques peut être liée, soit à un effet d'altitude de recharge, soit un effet paléoclimatique.

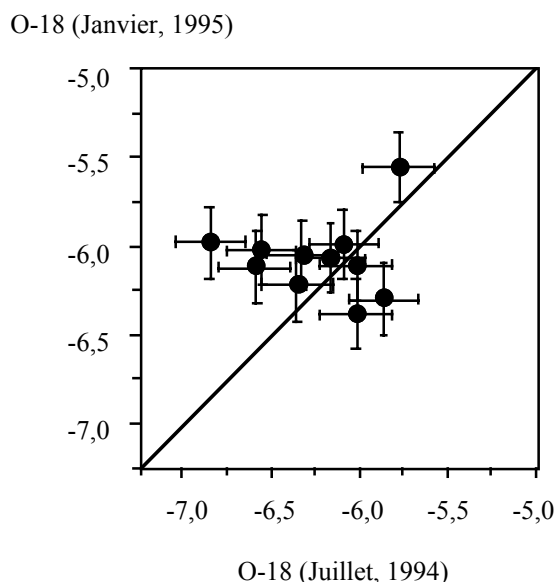


Figure 12: Relation ^{18}O (juillet, 1994)/ ^{18}O (janvier, 1995) des eaux de la nappe profonde de Sfax

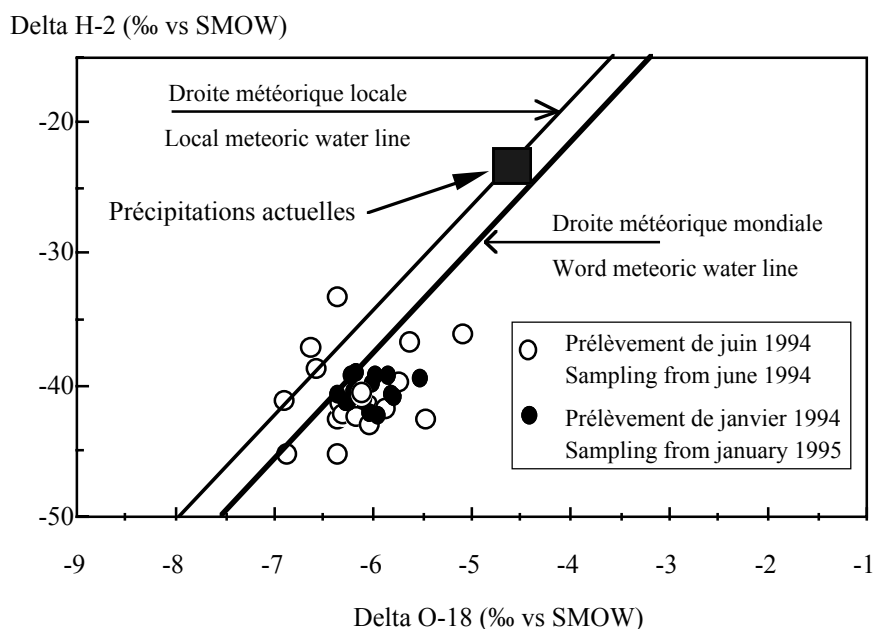


Figure 14: Relation oxygène 18 / deutérium des eaux de la nappe profonde de Sfax

Dans le premier cas, l'altitude de recharge, calculée en adoptant un gradient altitudinal moyen en ^{18}O voisin de 0,3 ‰ par 100 m d'altitude (Blavoux 1978), est de 800 m, alors que l'altitude du point culminant dans le bassin n'est que de 677 m. Donc, les différences dans les compositions isotopiques entre les eaux de la nappe et celles des précipitations actuelles seraient donc essentiellement le résultat d'un effet paléoclimatique, c'est à dire que la recharge se serait effectuée, en grande partie, sous un climat plus froid que celui qui règne actuellement sur la région.

La grande homogénéité des teneurs en isotopes stables de l'eau et des teneurs en carbone-14 suggère un écoulement très lent et de très faibles flux à l'entrée et à la sortie du système. L'état de "quasi-stagnation" de cette nappe en région côtière serait lié aux variations du niveau marin au cours du Quaternaire récent (Maliki *et al.*, sous presse). En effet, les écoulements dans la nappe pourraient être en grande partie régis par la charge au niveau de son exutoire, charge qui n'a fait que croître depuis l'époque de recharge si l'on se réfère à l'élévation continue du niveau marin depuis environ 15 ka B.P., suivie de sa relative stabilisation au niveau actuel, depuis environ 7000 ans B.P. (Fairbanks 1989).

5. Conclusion

Cette première étude isotopique de la nappe profonde de Sfax a mis en évidence le caractère ancien de ses réserves. Les activités ^{14}C mesurées dans les eaux (dépourvues de tritium) sont très faibles, pour la plupart, inférieures à 10 %. Ces faibles activités correspondent à des âges corrigés allant de 28 ka à 11 ka. Ces âges confirment que les eaux de la nappe sont très anciennes et reflètent une réserve parfaitement isolée et confinée. En termes paléoclimatiques, la nappe profonde de Sfax est rechargée sous des conditions climatiques très lointaines, vraisemblablement plus froides et différentes des conditions actuelles (période de l'Holocène-Pléistocène supérieur). Ces résultats sont similaires de ceux obtenus dans d'autres systèmes aquifères du Sud tunisien (Zouari 1988) et de la Tunisie centrale (Zouari *et al.* 1999).

Ces eaux profondes anciennes doivent être bien gérées et par conséquent leur exploitation dépend beaucoup plus de certains choix économiques de développement de la région que des caractéristiques de la nappe elle-même.

Références

- DGRE (1998). Annuaire piézométrique de Tunisie.
- Craig H. (1961). Standard for reporting concentrations of deuterium and oxygen 18 in natural waters. *Sciences* 133, 1833-1934.
- Coleman M. L., Shepherd T. J., Rousse T. E. and Moore G. R. (1982). Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Analyt. Chem.*, 54, 993-995.
- Blavoux B. (1978). Etude du cycle de l'eau au moyen de l'oxygène-18 et du deutérium. *Thèse Doct. Etat*. Univ. Paris VI, 316 p.
- Fairbanks R. G. (1989). A 17 000 year glacio-eustatic sea level record: influence of glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation. *Nature*, Vol. 342: 637-642.
- Fontes J-Ch. (1976). Isotopes du milieu et cycle des eaux naturelles: quelques aspects. *Thèse Doctorat ès Sciences*, Univ. Paris VI, 208p.
- Fedrigoni L. (1998). Idrogeologia e geochimica per la caratterizzazione ambientale di un'area ad industrializzazione recente di un paese in via di sviluppo: il caso di Sfax-Tunisia. Tesi Laurea. Univ. Degli Studi di Venezia Ca'Foscari.
- Maliki My A. (1994). Etude hydrochimique et isotopique des nappes phréatiques de Skhira et de Djebeniana et de la nappe profonde de Sfax. *Mémoire DEA*. Fac. Sc. Tunis. 127p.
- Maliki My A., Krimissa M., Michelot J. L. et Zouari K. (*Sous presse*). Origine des eaux, relation entre nappes superficielles et aquifère profond dans le bassin de Sfax (Tunisie). *Comptes Rend. Acad. Sc.*
- Maliki My A. (en prép.). Etude hydrochimique et isotopique des eaux de la nappe profonde de Sfax. *Thèse Doct. de l'Université*. Université de Tunis II.
- Zouari K. (1988). Géochimie et sédimentologie des dépôts continentaux d'origine aquatique du Quaternaire Supérieur du Sud tunisien: Interprétation paléohydrologiques et paléoclimatologiques. *Thèse es-Sciences*. Univ. Paris-Sud, Orsay, 256pp.
- Zouari K., Mamou A., Ouda B., Yermani M., Gibert-Massault E. et Michelot J. L. (1999). An isotopic approach of multi-layered aquifer system functioning in central Tunisia: The cases of Gafsa North and Hajeb el Ayoun-Djelma basins. Colloque International IAEA-Vienne (1999).