

## **Étude des ressources en eau souterraines en zones arides (Sahara algérien) par les méthodes isotopiques**

**ADNANE S. MOULLA**

*Centre de Recherche Nucléaire d'Alger, 02 Bd F. Fanon, BP 399 Alger-Gare, 16000 Alger, Algérie*

[asmoulla@hotmail.com](mailto:asmoulla@hotmail.com), [as.moulla@comena-dz.org](mailto:as.moulla@comena-dz.org)

**ABDELHAMID GUENDOZ**

*Université de Blida, Département de Génie Rural, BP 270, Route de Soumaâ, Blida, Algérie*

**Résumé** Les teneurs en isotopes stables, radioactifs mais également en gaz rares ont été mesurées sur les trois nappes aquifères sahariennes présentes dans la région du Grand Erg Oriental. Elle ont permis de préciser localement et globalement l'origine des masses d'eau de ces aquifères, ainsi que la variabilité de leur recharge dans le temps. En outre, ces méthodes considérées encore comme récentes, ont été mises à profit pour la reconstruction des climats anciens en remontant aux températures qui régnaient lors de l'infiltration des eaux de précipitations ayant rechargé les deux nappes profondes étudiées.

**Mots clefs** Algérie; Complexe Terminal; Continental Intercalaire; eaux fossiles; eaux souterraines; gaz nobles; hydrologie isotopique; Sahara

**Key words** Algeria; Complex Terminal; Continental Intercalaire; palaeowaters; groundwater; noble gases; isotope hydrology; Sahara

### **INTRODUCTION**

Les réservoirs souterrains du Sahara constituent d'immenses réserves d'eau à composante essentiellement ancienne (fossile). En plus des contraintes techniques, les conditions climatiques extrêmes qui y règnent ne facilitent pas les études s'intéressant aux questions en suspens concernant ces ressources. C'est justement dans ces cas là que les méthodes basées sur l'utilisation des isotopes environnementaux apparaissent non seulement comme des techniques d'appoint mais indispensables sachant que chaque type d'eau possède sa propre empreinte ou signature isotopique. Les premières applications des isotopes en Algérie ont été initiées sous l'égide de l'UNESCO au début des années 1970 à l'occasion du projet ERESS (UNESCO, 1972). Sur le plan méthodologique, les possibilités du traçage isotopique naturel ont donc été utilisées pour préciser des mécanismes ayant lieu dans les cycles des solutions naturelles et qui sont difficiles, voire impossibles à déterminer par les méthodes classiques. Le présent travail donnera un aperçu général sur la contribution de l'outil isotopique à la prise de décision quant à une meilleure gestion des ressources hydriques en régions sahariennes, ponctué par des exemples de résultats auxquels sont arrivées quelques unes des études menées jusqu'à présent.

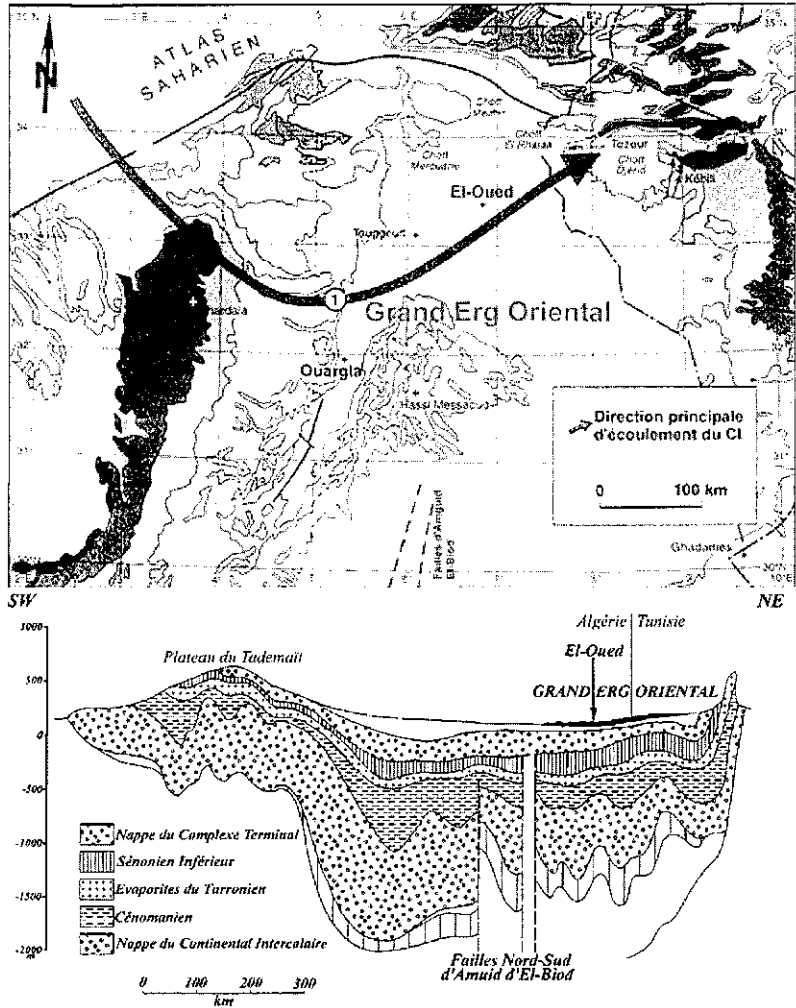


Fig. 1 Carte de situation et coupe hydrogéologique des régions étudiées (Edmunds et al., 1997).

### CARACTERISTIQUES DES EAUX SOUTERRAINES PROFONDES A L'ECHELLE GLOBALE DU GRAND ERG ORIENTAL

Trois grandes nappes souterraines (Fig. 1) sont présentes dans la région: une nappe très profonde dite du Continental Intercalaire (CI), une autre intermédiaire dite du Complexe Terminal (CT) et, une nappe phréatique (NP).

#### Isotopes stables: O-18, HD

Les teneurs en isotopes stables à l'échelle de tout le bassin du grand Erg Oriental (Algérie et Tunisie) sur près de 400 000 km<sup>2</sup> sont appauvries et très homogènes. Elles

sont centrées sur les valeurs suivantes:  $\delta^{18}\text{O} = -8.4 \pm 0.3\text{‰}$  ( $n = 100$ ) et  $\delta^2\text{H} = -61 \pm 3\text{‰}$  ( $n = 70$ ) (Guendouz, 1985; Guendouz & Moulla, 1996; Edmunds *et al.*, 1997). Cette homogénéité spatiale des teneurs en isotopes stables fait du CI un aquifère bien protégé, exempt de tout autre mélange ou apport provenant d'un autre aquifère. Ce caractère homogène a également été trouvé dans d'autres nappes de même dimension sises en zone aride, notamment en Égypte, en Libye, en Arabie Saoudite, au Soudan et en Australie (Sonntag *et al.*, 1978; Edmunds & Wright, 1979).

### Isotopes radioactifs: Tritium, Carbone-14 et Chlore-36

Toutes les eaux de la nappe du CI à l'échelle du bassin oriental ont été trouvées quasiment dépourvues de tritium. Les activités en C-14 mesurées (% de Carbone Moderne) varient entre 0 et 6 pmc (Guendouz, 1985) sur toute la partie centrale du bassin et entre 50 et 80 pmc au nord-ouest de Laghouat en Algérie et 50 pmc sur les monts du Dahar en Tunisie. Ces dernières valeurs élevées correspondent à des zones de recharge. Les âges corrigés déterminés à partir du C-14, pour l'ensemble du bassin du Grand Erg Oriental à l'exception des zones de recharge (Atlas Saharien, plateau du Timhert et les Monts du Dahar) varient entre 20 et 40 ka. Les eaux du CI seraient liées à la phase humide majeure de recharge du Pléistocène inférieur (20 à 40 ka), qui a été reconnue dans plusieurs ensembles aquifères du globe et plus récemment encore dans le Tidikelt autour de In-Salah (Cherchali, 2000).

Les rapports atomiques  $^{36}\text{Cl}/\text{Cl}$  exprimés en atomes par litre, ont montré une diminution dans le sens de la direction principale d'écoulement des eaux, i.e. de l'Atlas saharien en Algérie vers le golfe de Gabès en Tunisie. Les valeurs ainsi mesurées varient entre  $3.5 \times 10^8$  et  $0.9 \times 10^8$  at l<sup>-1</sup>. Cette diminution est simplement attribuée à la décroissance radioactive. Ainsi entre la dorsale du M'Zab et la vallée de l'Oued Rhir, le temps de résidence calculé le long de cette direction d'écoulement varie entre 50 et 600 ka (Guendouz *et al.*, 2003).

### Gaz nobles

Dans les eaux naturelles, les gaz nobles ou gaz rares (Ne, Ar, Kr, Xe, He) proviennent de leur mise en solution à partir de l'air. La teneur des eaux en ces gaz suit la loi de solubilité de Henry et dépend essentiellement de la température. Pour les eaux souterraines, cette concentration dépendra logiquement de la température qui prévalait lors de la recharge.

Les teneurs en gaz rares du CI ont permis de calculer des températures de recharge avec une moyenne de 15°C (Guendouz *et al.*, 1997). Quant aux eaux du CT, elles ont exhibé des températures qui reflètent la valeur moyenne annuelle prévalant actuellement sur les zones d'études (~20°C). La différence de température entre les deux aquifères de ~5°C confirme que les eaux du CI se seraient infiltrées dans des conditions climatiques plus humides, reflétant ainsi une paléorecharge datant du Pléistocène inférieur (Fig. 2).

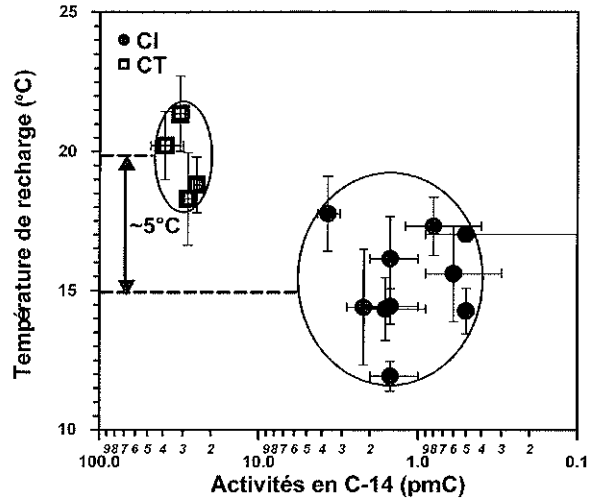


Fig. 2 Relation entre la température de recharge et les teneurs en C-14.

## CAS DE LA REMONTEE DES EAUX DE LA NAPPE PHREATIQUE DANS LE SOUF

L'investigation a porté sur toute la région sise autour de la ville d'El-Oued au cœur du Grand Erg Oriental afin d'étudier un phénomène de remontée du niveau piézométrique de la nappe phréatique qui a entraîné la disparition de milliers de palmiers dattiers, principale richesse de la région et qui menace présentement à certains endroits de la ville, les fondations des habitations.

Sur le plan isotopique, le  $\delta^{18}\text{O}$  de la nappe phréatique sur tout le Souf varie entre  $-1.8$  et  $-4.5\text{‰}$ . La valeur moyenne pondérée par la hauteur des rares précipitations à Béni-Abbès est de  $-7.4\text{‰}$  pour la période hivernale, et de  $-4.0\text{‰}$  pour toute l'année (Yousfi, 1984). Par ailleurs, à Ouargla et à Ain-Oussera (Hauts Plateaux) les valeurs pondérées sont respectivement de  $-5.0\text{‰}$  et  $-4.6\text{‰}$  (Edmunds *et al.*, 1997). On peut donc suggérer que les précipitations actuelles subissant parfois une modification de leur composition isotopique durant leur infiltration au travers des dunes de sable de l'erg (enrichissement), participent à la recharge de la nappe phréatique.

De plus, il a été trouvé une valeur moyenne en tritium égale à 16.3 UT pour les pluies à El-Oued même. Par ailleurs, des teneurs comprises entre 0 et 28 UT en  $^3\text{H}$ , et entre 20 et 120 pmc en  $^{14}\text{C}$ , ont été obtenues pour la nappe phréatique. Ces activités en C-14 correspondent à des âges corrigés (modèles de Pearson, Fontes & Garnier, AIEA) variant du Moderne à 2 ka, ce qui suggère que les eaux de la nappe phréatique comprennent une composante récente et une autre ancienne.

La nappe du Complexe Terminal est assez profonde (250 m) et captive sur la région du Souf, ses zones d'alimentation se situant au sud sur l'étendue du Grand Erg Oriental où elle devient moins profonde et libre (niveau statique =  $-30$  m). Les eaux de cette nappe ont montré des valeurs homogènes et enrichies avec un  $\delta^{18}\text{O}_{\text{moy}} = -4.1\text{‰}$  ( $n = 44$ ), les teneurs en tritium et en radiocarbone sont comprises, respectivement, entre 0 et 4.8 UT et 2 et 14 pmc donnant des âges non corrigés variant

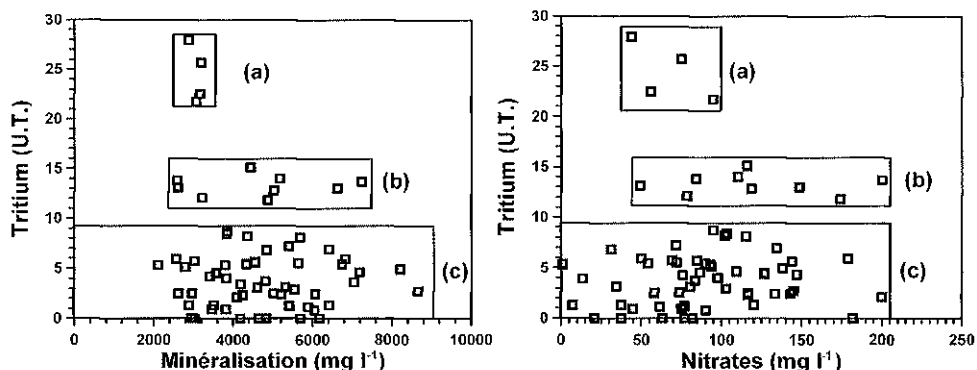


Fig. 3 Relations montrant les différentes contributions à la nappe phréatique dans le Souf: (a) composante récente, (b) composante mixte, (c) composante ancienne.

entre 18 et 30 ka. Ces données peuvent être expliquées par une recharge ancienne à partir d'eaux de pluie ayant subi des modifications de leur composition isotopique au cours du temps, qui daterait du Pléistocène inférieur (Guendouz *et al.*, 1993 ; Guendouz & Moulla, 1995; Moulla *et al.*, 1995, 1997). Il s'agit donc de réserves d'eau "fossile" et par conséquent à moyen terme non renouvelables.

Les relations entre les teneurs en tritium et la minéralisation d'une part et les nitrates d'autre part (Fig. 3), nous ont permis de distinguer trois composantes différentes pour la nappe phréatique: (a) des eaux ayant autour de 25 UT, des nitrates de 50–100 mg l<sup>-1</sup> et une minéralisation moyenne  $\bar{M} \approx 3$  g l<sup>-1</sup> qui correspondraient à l'infiltration rapide et récente des eaux de précipitation; (b) des eaux de 10 à 15 UT, des nitrates de 50 à 200 mg l<sup>-1</sup> et une minéralisation de 2 à 7 g l<sup>-1</sup>, qui seraient un mélange d'une composante récente (pluies) et d'une autre eau faiblement tritiée provenant du CT, et (c) des eaux contenant moins de 10 UT, des nitrates entre 30 et 150 mg l<sup>-1</sup> et une salinité moyenne  $\bar{M} \approx 5$  g l<sup>-1</sup>. Cette masse d'eau qui comprend la grande majorité des échantillons, correspondrait essentiellement à un apport du CT utilisé principalement pour l'irrigation.

## ETUDE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA CUVETTE DE OUARGLA

La cuvette de Ouargla est située au centre du Sahara nord-est septentrional. C'est une importante dépression naturelle d'une superficie de 990 km<sup>2</sup> qui est actuellement confrontée à un problème d'évacuation des eaux usées. Le manque de drains et de stations de pompage, le bouchage et l'entretien déficients des forages détériorés, ont contribué à accentuer ce problème. L'objectif premier de cette étude était de préciser les mécanismes de ce phénomène.

### La nappe du Continental Intercalaire

Les teneurs en isotopes stables <sup>18</sup>O et <sup>2</sup>H sont très homogènes sur l'ensemble du bassin oriental, et en particulier dans la région de Ouargla. Les valeurs moyennes sont

respectivement de  $-8.3\text{‰}$  et  $-63\text{‰}$  ( $n = 50$ ) pour la région de Ouargla (Guendouz & Moulla, 1995, 1996).

### La nappe du Complexe Terminal

Alors qu'ailleurs sur le reste du bassin oriental, le CT exhibe des teneurs très variables et enrichies allant de  $-7.0$  à  $-3\text{‰}$  en O-18, autour de Ouargla ces eaux sont homogènes et isotopiquement proches de celles du CI. Les teneurs détectées sur une vingtaine de forages varient entre  $-8.0$  et  $-8.3\text{‰}$  pour les  $\delta^{18}\text{O}$  et  $-64$  et  $-65\text{‰}$  pour les  $\delta^2\text{H}$ .

### La nappe phréatique

Les valeurs obtenues en O-18 sur 98 échantillons de la nappe phréatique dans la cuvette de Ouargla sont comprises entre  $+3\text{‰}$  et  $-8.5\text{‰}$  en O-18. La comparaison de ces données à celles du CI et du CT a permis de confirmer, outre une contribution par réinfiltration des eaux d'irrigation et d'AEP, l'existence d'un apport ascendant à partir d'anciens forages dont les tubages se sont détériorés.

A Ouargla et ses environs, bien que les aquifères superficiels se trouvent séparés du CI par des formations argileuses et anhydritiques épaisses de 300–400 m, une alimentation par drainance verticale se confirme. Ceci est démontré par la relation chlorures- $\delta^{18}\text{O}$  (Fig. 4), où les points représentatifs s'ordonnent selon un schéma triangulaire qui correspondrait à un mélange de trois types d'eau: (Pôle A) une eau bien homogénéisée contenant près de  $0.5 \text{ g l}^{-1}$  de chlorures et une teneur en O-18 de  $-8.3\text{‰}$  qui correspondrait à la nappe du CI, (Pôle B) une eau très évaporée contenant près de  $100 \text{ g l}^{-1}$  de chlorures et une teneur en  $^{18}\text{O}$  enrichie de  $+3.5\text{‰}$  qui correspondrait à la masse d'eau de la nappe phréatique dont le niveau statique est proche du sol, et (Pôle C) une eau très chargée mais isotopiquement non évaporée contenant près de  $70 \text{ g l}^{-1}$  de chlorures, dont  $\delta^{18}\text{O}_{\text{moy}} = -8.3\text{‰}$ , est similaire à celle de la nappe profonde du CI.

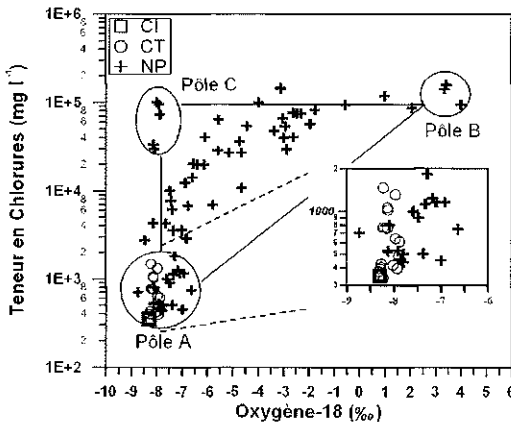


Fig. 4 Relation teneurs en Chlorures /  $\delta^{18}\text{O}$  des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla.

Sur le plan géologique, ces apports semblent être liés aux prolongements nord-est de la dorsale d'Amguid El-Biod où des failles à fort rejet vertical favorisent les communications entre les systèmes aquifères.

## CONCLUSION

Les techniques isotopiques qui ont été appliquées en Algérie surtout durant la dernière décennie ont contribué principalement à différencier plusieurs types d'eaux en présence dans les ensembles aquifères sahariens étudiés. Au niveau du bassin du Grand Erg Oriental, ces outils ont permis en outre, de mettre en évidence globalement et localement les informations suivantes.

Les eaux homogènes et fossiles du CI, ont été rechargées lors des périodes humides et plus froides du Pléistocène inférieur. Cette assertion est également confirmée au niveau du Tidikelt dans le bassin occidental.

Le problème de remontée des eaux au niveau de la région du Souf trouve principalement sa cause dans l'utilisation abusive des eaux du CT pour les besoins d'irrigation par le biais de techniques inadaptées en l'absence de réseau d'assainissement. Les eaux du CT sont anciennes et proviendraient d'un pluvial datant du Pléistocène inférieur.

Le même schéma se répète au niveau de la cuvette de Ouargla où le CI, artésianisme aidant, contribue au phénomène, à la faveur d'une drainance ascendante par la biais de forages détériorés et des prolongements des failles d'Amguid El-Biod.

Les implications immédiates de tels résultats devraient nous orienter vers une révision et une adaptation du programme de gestion des eaux en considérant les données actuelles. Bien que les ressources en eau soient considérables, l'avenir des biens et des populations et le développement régional sont conditionnés par le fait fondamental de l'instauration d'un schéma d'exploitation de type minière.

## REFERENCES

- Cherchali, M. E. H. (2000) Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines du Hoggar central, des Tassilli N'Ajjer et Oua N'Ahaggar et du Tidikelt. Rapport final, Projet Modèle AIEA, RAF/8/022. CRNA, Alger.
- Edmunds, W. M. & Wright, E. P. (1979) Groundwater recharge and paleoclimate in the Sirte and Kufra basins. Libya. *J. Hydrol.* **40**, 215–241.
- Edmunds, W. M., Shand, P., Guendouz, A., Moulla, A. S., Mamou, A. & Zouari, K. (1997) Recharge characteristics and groundwater quality of the Grand Erg Oriental basin. Final Report. EC (Avicenne) Contract CT93AVI0015. BGS Technical Report WD/97/46R, Hydrogeology series. BGS, Wallingford, UK.
- Guendouz, A. (1985) Contribution à l'étude hydrochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara nord-est septentrional, Algérie. Thèse Doctorat 3ème cycle. Univ. Paris-XI, Orsay, France.
- Guendouz, A., Moulla, A. S. & Reghis, Z. (1993) Etude de la remontée des eaux de la nappe phréatique de la région de Qued-Souf (Erg Oriental, Sahara nord-est septentrional) par les méthodes isotopiques et hydrochimiques. En: *Actes du séminaire des dixièmes journées de géologie appliquée* (Sfax, Tunisie, Mai 1993), 289–299.
- Guendouz, A. & Moulla, A. S. (1995) Application des techniques nucléaires aux problèmes des ressources en eaux souterraines profondes du Sahara nord-est septentrional algérien. En: *L'eau, une réalité, une urgence, un défi* (Actes du 2ème colloque National Climat Environnement, Oran, Algérie, décembre 1995).
- Guendouz, A. & Moulla, A. S. (1996) Drainage de la nappe profonde du Continental Intercalaire vers les aquifères superficiels à Ouargla: arguments isotopiques. En: *L'application des techniques isotopiques dans le domaine des ressources en eau et en sol* (Actes Séminaire international de Mahdia, Tunisie, juin 1996).
- Guendouz, A., Moulla, A. S., Edmunds, W. M., Shand, P., Poole, J., Zouari, K. & Mamou, A. (1997) Palaeoclimatic information contained in groundwaters of the Grand Erg Oriental, North Africa. In: *Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and the Atmosphere* (Proc. Int. Symp. at Vienna, Avril 1997), 555–571. IAEA-SM-349/43.

- Guendouz, A., Michelot, J. L. & Allan, G. (2003) Chlorine-36 in deep groundwaters from north-eastern sahara, Algeria (en préparation).
- Moulla, A. S., Guendouz, A. & Reghis, Z. (1995) Qualité chimique et bactériologique des eaux de la nappe phréatique de la région de Oued-Souf. (Sahara nord est septentrional, Algérie). En: *L'eau, une réalité, une urgence, un défi* (Actes du 2ème colloque National Climat-Environnement, Oran, Algérie, décembre 1995).
- Moulla, A. S., Guendouz, A. & Reghis, Z. (1997) Hydrochemical and isotopic investigation of rising piezometric levels of saharan phreatic aquifers in the Oued-Souf region (Grand Erg Oriental basin, Algeria). In: *Water in the Mediterranean. Collaborative Euro-Mediterranean Research: State of the Art, Results and Future Priorities* (Proc. Int. conf., Istanbul, Turkey, Novembre 1997).
- Somtag, C., Klitsch, E., Lohmert, F. P. Munich, K. O., Junghans, C., Thorweihe, U., Weistroffer, K. & Swailen, F. M. (1978) Palaeoclimatic information from  $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$ , in  $^{14}\text{C}$  dated north-saharan groundwater: groundwater formation in the past. In: *Isotope Hydrology 1978* (Proc. Symp. IAEA, Vienna), 569-581. IAEA, Vienna, Austria.
- UNESCO (1972) Etude des ressources en eau du sahara septentrional. Projet ERESS, Rapport final, 7 plaquettes, Paris, France.
- Yousfi, M. (1984) Étude géochimique et isotopique de l'évaporation et de l'infiltration en zone non saturée sous climat aride: Béni-Abbès, Algérie. Thèse Doctorat 3ème cycle, Univ. Paris-XI, Orsay, France.