

# DOSSIER THEMATIQUE

## **SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES: L'ETAT DE L'ART DES TRACEURS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES**



Par Pr. Lhoussaine Bouchaou  
Laboratoire de Géologie Appliquée et Géo-Environnement  
Faculté des Sciences  
Université Ibn Zohr, Agadir, Maroc  
[lbouchaou@gmail.com](mailto:lbouchaou@gmail.com), [l.bouchaou@uiz.ac.ma](mailto:l.bouchaou@uiz.ac.ma)

La salinité des ressources en eau est la clé pour les développements futurs au Maroc, cet article a pour objectif de montrer une approche d'analyse des sources de salinité et de mécanismes de salinisation des eaux souterraines en général en s'appuyant sur l'exemple de quelques bassins au Maroc.

# **SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES: L'ETAT DE L'ART DES TRACEURS CHIMIQUES ET ISOTOPIQUES**

La salinité des ressources en eau est la clé pour les développements futurs au Maroc, cet article a pour objectif de montrer une approche d'analyse des sources de salinité et de mécanismes de salinisation des eaux souterraines en général en s'appuyant sur l'exemple de quelques bassins au Maroc. Cette tâche est réalisée par une analyse systématique des compositions géochimiques et isotopiques (hydrogène de l'oxygène, le carbone, le bore, le strontium, le soufre) de solution saline dans les aquifères souterrains sélectionnés au Maroc. Élucidation des sources d'eaux souterraines contaminées est basée sur la caractérisation géochimique et isotopique des sources de contaminants spécifiques et de modélisation des scénarios possibles de mélange. Cette approche multi-traceurs, combinée à l'enquête hydrologique traditionnelle, est considéré comme l'état de la méthodologie de la technique pour tracer l'origine de salinisation des eaux souterraines (Vengosh, 2003; Vengosh et al, 2007; Bouchaou et al., 2008, 2009).

## **Origine et impact de la salinité**

La salinité de l'eau est habituellement définie par la teneur en chlorure (mg/l) ou la teneur totale en solides dissous (TDS mg/L), bien que le chlorure comprend seulement une fraction des sels dissous totaux dans l'eau. Le rapport Cl/TDS varie de 0,1 dans les eaux salines non-marines à ~ 0,5 dans les eaux marines associées salines. La salinité de l'eau est également

définie par une conductivité électrique (CE). En plus de chlorure, les niveaux élevés d'autres constituants dissous peuvent limiter l'utilisation de l'eau à usage domestique, l'agriculture, et les applications industrielles. La salinité élevée est aussi associée à des concentrations élevées d'autres polluants inorganiques tels que le sodium, le sulfate, le bore, le fluorure et bioaccumulés éléments tels que le sélénium, et l'arsenic. Le processus de salinisation améliore provoque la mobilisation des métaux lourds dans les solutions de sol en raison de l'échange d'ions et la formation de complexes métal-chlorure (Bäckström et al., 2004).

L'organisation mondiale de la santé (OMS) recommande que la concentration en chlorure de l'eau pour la consommation humaine ne doit pas dépasser 250 mg / L. Les applications en agriculture dépendent également du niveau de la salinité de l'eau utilisée. De nombreuses plantes, telles que les agrumes, l'avocat, la mangue sont sensibles à la concentration de chlorure dans l'eau d'irrigation (une limite supérieure de 250 mg / L). En outre, l'irrigation de longue durée avec de l'eau enrichie en sodium favorise une réduction significative de la conductivité hydraulique, et donc la fertilité des sols irrigués. De même, le secteur industriel exige une eau de qualité. Le taux de la salinité des eaux souterraines est donc l'un des facteurs limitant qui déterminent l'aptitude de l'eau pour différentes applications.

Le problème de la salinité est un phénomène mondial, mais il est plus

grave dans les zones de pénurie d'eau, tels que les zones arides et semi-arides. La demande croissante pour l'eau a créé d'énormes pressions sur les ressources en eau qui ont abouti à l'abaissement du niveau d'eau et le processus de salinisation. Le problème de la salinité a de nombreuses conséquences économiques, sociales et politiques graves, en particulier dans les bassins transfrontaliers.

La salinisation des ressources en eau affecte également la gestion agricole. Les types de l'eau d'irrigation et sa qualité vont déterminer la salinité et de la fertilité du sol, et finalement, la qualité de la ressource en eau sous-jacente. L'utilisation d'eaux usées traitées ou toute autre eau marginale (par exemple, de l'eau saumâtre) dépend de la salinité et de la composition chimique de l'eau. Les eaux usées traitées à haute teneur en chlorure, sodium, et le bore ne conviennent que pour les cultures tolérantes au sel et nécessitent un traitement spécial d'amendement du sol. L'impact de la salinisation est plus visible dans un aquifère d'eau douce où l'eau n'est pas renouvelable (est à dire, fossiles). De nombreuses études ont montré que les ressources en eaux souterraines à travers le Sahara, la région du Sahel, Afrique du Nord et dans les zones arides du Moyen-Orient sont fossiles montrant une paléo-recharge à la fin du Pléistocène pendant les périodes humides (Cook et al., 1992; Phillips, 1994; Edmunds et Gaye, 1994; Gaye et Edmunds, 1996; Edmunds et Droubi, 1998; Edmunds et al, 1999; 2001). Typiquement, les eaux douces recouvrent les plans d'eau saline dense. Avec le temps géologique, un fragile équilibre hydraulique a été établi entre les deux plans d'eau. L'implantation des

forages affectent cet équilibre hydrologique délicat. L'exploitation des eaux fossiles, sans possibilité de réalimentation récente, peut entraîner la salinisation rapide des ressources en eaux souterraines. La salinisation des eaux souterraines fossiles a des effets dévastateurs car, dans certains cas, ils sont la seule source d'eau. Dans d'autres cas, la surexploitation entraîne une baisse de la surface piézométrique et une augmentation de la salinité en raison de la combinaison de drainage des aquifères profonds, l'intrusion marine, migration de l'eau des sebkhas et le drainage agricole. L'utilisation future de cette ressource en eau, dépend donc principalement de la vitesse et l'ampleur du processus de salinisation.

Identifier l'origine de la salinité est crucial pour la gestion de l'eau, la prédiction des modèles et l'assainissement. La diversité des sources de salinisation rend cette tâche difficile. La salinisation des eaux Souterraines et de surface peuvent résulter de sources ponctuelles (par exemple, fuite ou recharge des eaux usées domestiques) ou de sources non ponctuelles (par exemple, les flux de retour de l'agriculture, de l'irrigation avec des effluents d'eaux usées). La salinisation peut être dérivée de processus (géogénique) naturels tels que l'intrusion d'eau de mer ou le flux de dissolution saline de l'eau des aquifères adjacents ou sous-jacents (Maslia et Prowell, 1990, Vengosh et al, 1999;. 2002; Sanchez-Martos et Pulido-Bosch, 1999;. Sanchez-Martos et al, 2001;. Kloppmann et al, 2001; Hsissou et al, 1999). Alternativement, la salinisation peut également être induite par une contamination anthropique directe. Les sources de salinité multiples

présentent donc un réel défi pour les agences de l'eau et des organismes de réglementation.

La clé élémentaire pour le traçage des sources de salinité est le principe que la composition chimique de la source de solution saline est conservée pendant le processus de salinisation. En raison des grandes différences dans la teneur en soluté entre la solution saline et l'eau douce, la composition chimique de l'eau contaminée imite la composition de la source de solution saline. Cependant, la composition initiale de la source de solution saline peut être modifiée une fois qu'elle est masquée par des interactions eau-roche. Par exemple, la composition de l'eau de mer est considérablement modifiée quand elle pénètre dans les aquifères côtiers. Par conséquent, les traceurs de diagnostic doivent être non réactif (conservateur). Le chevauchement et la similitude des compositions chimiques des différentes sources salines rendent la tâche de traçage encore plus difficile. Par exemple, le ratio Na/Cl peut être un bon traceur de distinguer l'origine marine (par exemple, l'intrusion d'eau de mer avec  $Na/Cl < 0,86$ ) des sources non-marines ou anthropiques ( $Na/Cl \geq 1$ ). Cependant, la réactivité de Na dans la zone non saturée peut réduire la Na/Cl, même dans le contexte non marin (Vengosh et Keren, 1996; De Simone et al, 1997; Stigter et al., 1998; Gavrieli et al. , 2001). Il est donc essentiel d'utiliser plusieurs traceurs chimiques et isotopiques pour un diagnostic et une délimitation précise des sources de salinité (Fig. 1). Plusieurs auteurs ont examiné la plupart des outils géochimiques qui sont utiles pour distinguer entre les différentes sources de solutés dans les systèmes

d'eau souterraine. La source de composés dissous dans l'environnement salinisé peut être déduite de (1) le mélange entre eau météorique et de l'eau saline tel que l'eau de mer, fluides connées, les eaux hydrothermales piégées à l'intérieur ou à l'extérieur de l'aquifère; (2) la dissolution des évaporites laissées après le retrait d'eau de mer ou de la saumure; (3) l'altération des minéraux des aquifères; (4) l'accumulation de sels dérivés d'un dépôt à long terme de retombées atmosphériques; (5) des eaux usées (domestiques ou industrielles) et (6) la salinisation par reflux agricoles. Chacune de ces sources a une composition chimique et isotopique unique et distinctif. L'intégration de traceurs géochimiques et isotopiques peut être utilisée pour aider à résoudre ces multiples sources.

Les résultats des études réalisées sur certains bassins marocains (Souss\_Massa, Draa, Ziz..) sont très pertinents à cet égard (Bouchaou et al.2008, 2009, Hsissou et al. 1999, Boutaleb et al, 2000, Tagma et al. 2009, Ettayfi et al., 2012, Warner et al., 2013, David et al., 2013 Lgourna et al. 2014, 2015).

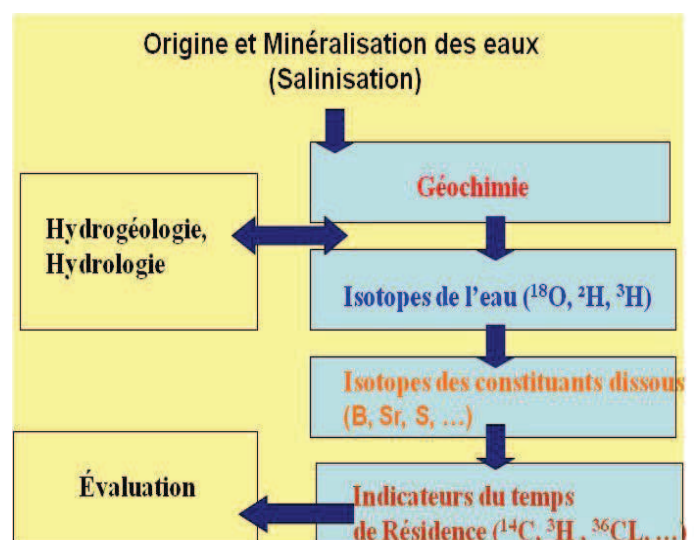


Figure 1 : La clé pour une utilisation correcte des outils isotopiques pour l'évaluation de l'origine et le taux de processus de salinisation.

La cartographie thématique ou SIG des teneurs de salinité illustrent bien la répartition spatiale de la salinité des eaux souterraines dans ces bassins (e.g. Sous-Massa) en permettant aux décideurs d'avoir une vision globale sur le phénomène. Ceci leur permettra de mieux planifier et gérer la ressource en eau.

Les données isotopiques indiquent également que les différents aquifères étudiées sont fortement influencés par la contribution de l'eau de recharge du Haut Atlas, qui a relativement une forte pluviométrie et une couverture neigeuse significative. Les résultats indiquent que l'Atlas constitue la principale zone de recharge des aquifères adjacents. En outre, les données du tritium et  $^{14}\text{C}$  ont révélées la présence des eaux souterraines moderne dans les zones de recharge, alors que les eaux souterraines profondes dans les parties confinées sont plus âgées et reflètent une recharge durant l'Holocène. Les résultats des estimations d'âge en fonction de suggèrent que les eaux souterraines relativement anciennes sont exploitées dans certains forages. Cela indique que les bassins en question sont très vulnérables aux processus de contamination. Les taux de salinisation ou de contamination anthropique (recyclage des flux de retour agricole) sont plus

rapides que la réalimentation naturelle de l'aquifère. Nous avons distingué deux domaines majeurs en général dans les bassins étudiés: (i) La partie amont avec une bonne qualité d'eau et la recharge moderne, et (ii) en aval dans les zones côtières ou de convergence de faible qualité de l'eau provenant de sources différentes de salinité et à long temps de séjour des eaux souterraines. De toute évidence, la poursuite d'utilisation de l'eau dans les zones côtières ou dans les zones aval des différents bassins augmenterait encore l'épuisement des ressources en eau et la dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ces facteurs devraient tenir compte des plans de gestion future de l'eau et un changement dans l'exploitation de l'eau des zones fortement peuplées, encore plus vulnérables.

En conclusion, le multi traçage chimique et isotopique est un outil performant pour l'investigation de l'origine, la minéralisation et le temps de séjours de l'eau souterraine notamment en zones arides non équipées où le suivi des paramètres hydrogéologiques fait défaut. Les résultats de cités ci-dessous ont été obtenus dans le cadre du projet (SFP 983134) de coopération entre Ibn Zohr Université-Duke Université, financé par l'OTAN (2008-2012).

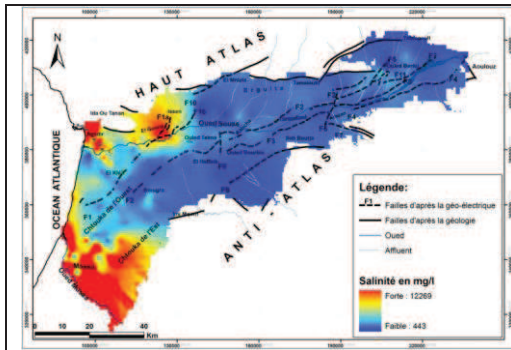


Figure 2 : Répartition spatiale de la salinité dans l'aquifère Souss-Massa (Hassaisoune et al. 2011)

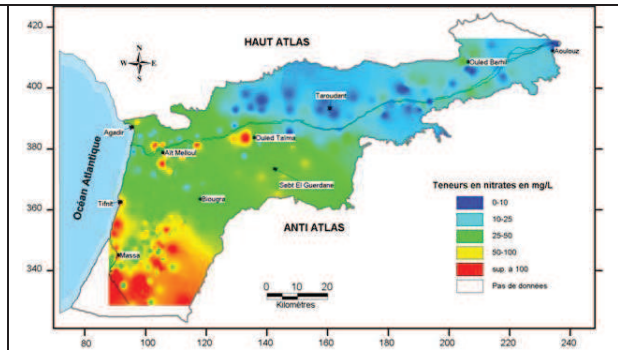


Figure 3 : Répartition spatiale de des nitrates dans l'aquifère Souss-Massa (Tagma. 2011)

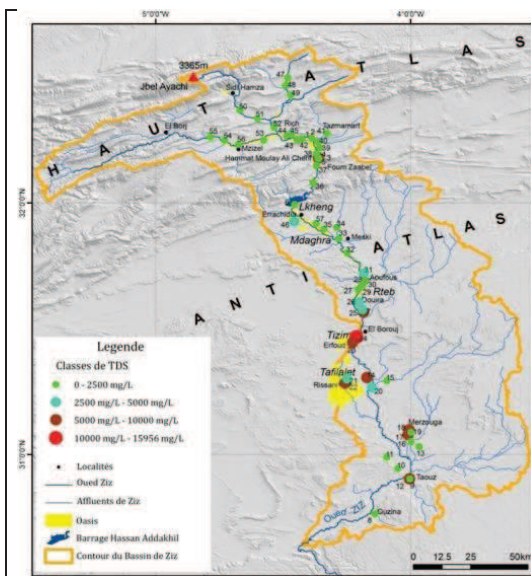


Figure 4 a : Salinité des eaux souterraines dans le Bassin du Ziz (Lgourna et al., 2015)

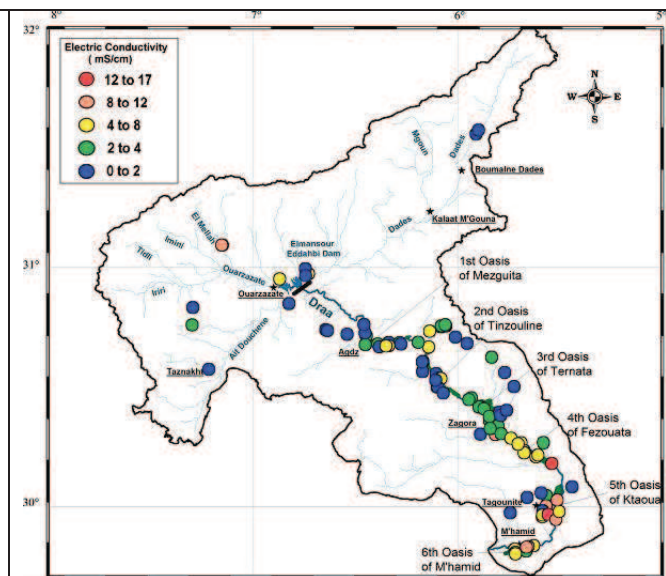


Figure 4b : Salinité des eaux souterraines dans le Bassin du Draa (Warner et al. 2013)

## Références :

Bäckström, M., Karlsson, S., Bäckman, L., Folkesson, L., Lind, B. (2004) Mobilisation of heavy metals by deicing salts in a roadside environment . Water Res., 38, 720-732 .

Bouchaou, L., Michelot, J.L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C.B., Bullen, T.D., and Zuppi G.M. (2008). "Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss-Massa aquifer, southwest of Morocco." Journal of Hydrology 352(3-4): 267-287.

Bouchaou L., M. Qurtobi, J.L. Michelot, N. Zine, C.B. Gaye, P.K. Aggarwal, H. Marah, A. Zerouali, H. Taleb, A. Vengosh (2009) - Origin and residence time of the groundwater in the Tadla basin

(Morocco) using multiple isotopic and chemical tools. Journal of Hydrology 379 (2009) 323-338

Bouragba L., J.Mudry, L.Bouchaou, Y.Hsissou, M.Krimissa, T.Tagma, J.L.Michelot -(2011)- Isotopes and groundwater management strategies under semi-arid area: Case of the Souss upstream basin (Morocco). Applied Radiation and Isotopes, Volume 69, Issue 7, July 2011, Pages 1084-1093.

Boutaleb, S. L., Bouchaou, J., Mudry, Y., Hsissou, J., Mania, Et, Chauve, P., 2000. Acquisition of salt mineralization in semi-arid watershed: The case of Qued Issen (Western Upper Atlas, Morocco). Hydrogeol. Journal, 8, 230-238.

Cook, P., Edmunds, W. M., and Gaye, C. B. (1992). "Estimate paleorecharge and paleoclimate from

the unsaturated zone profiles." *Water Resources Research* 28: 2721–2731.

David S. Vinson, Tarik Tagma, Lhoussaine Bouchaou, Gary S. Dwyer, Nathaniel R. Warner, Avner Vengosh – (2013) -Occurrence and mobilization of radium in fresh to saline coastal groundwater inferred from geochemical and isotopic tracers (Sr, S, O, H, Ra, Rn). *Applied Geochemistry* 38 (2013) 161–175.

De Simone, L. A., Howes, B.L., and Barlow, P.M. (1997). "Massbalance analysis of reactive transport and cation exchange in a plume of wastewater-contaminated groundwater." *Journal of Hydrology* 203: 228-249.

Edmunds, W. M., and Droubi, A. (1998). Groundwater salinity and environmental change. *Proc. Int. Symp. Isotope Technol. Study of the Past and Current Environment. Changes in the Hydrosphere and Atmosphere*, IAEA, Vienna.

Ettayfi N., L. Bouchaou, J.L. Michelot, T. Tagma, N. Warner, S. Boutaleb, M. Massault, Z. Lgourna, A. Vengosh- 2013- Geochemical and isotopic (oxygen, hydrogen, carbon, strontium) constraints for the origin, salinity, and residence time of groundwater from a carbonate aquifer in the Western Anti-Atlas Mountains, Morocco. *Journal of Hydrology* 438–439 (2012) 97–111

Gaye, C. B., and Edmunds, W. M. (1996). "Groundwater recharge estimation using chloride, stable isotopes and tritium profiles in the sands of northwest Senegal." *Environmental Geology* 27: 246-251.

Hsissou, Y., Bouchaou, L., Mudry, J., Mania, P., Chauve, P., (2002). Use of chemical tracing to study acquisition modalities of the mineralization and behaviour of unconfined groundwaters under a semi-arid climate: the case of the Souss plain (Morocco). *Env. Geol.*, 42, 672-680.

Hsissou, Y., Mudry, J., Mania, J., Bouchaou, L., and Chauve, P. (1999). "Use of the Br/Cl ratio to determine the origin of the salinity of groundwater: an example from the Souss Plain, Morocco." *Surface Geosciences* 328: 381–386.

Hssaisoune Mohammed, Said Boutaleb, Mohamed Benssaou, El hassane Beraaouz, Tarik Tagma, M'hamed El Fasskaoui & Lhoussaine Bouchaou (2012)- Analyse géophysique et structurale de l'aquifère de la plaine du Souss-Massa: synthèse et

conséquences hydrogéologiques. *Geo-Eco-Trop.*, 2012, 36: 63 – 82

Kloppman, W., Negel, P., Casanova, J., Klinge, H., Schelkes, K., and Guerrot, C. (2001). "Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N German basin). Evidence from boron, strontium, oxygen, and hydrogen isotopes." *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65: 4087–4101.

Krimissa, S., Michelot, J.L., Bouchaou, L., Mudry, J., Hsissou, Y., 1999. Sur l'origine par altération du substratum schisteux de la minéralisation chlorurée des eaux d'une nappe côtière sous climat semi-aride (Chtouka-Massa, Maroc). *Comptes rendus Geoscience*, 336, 1363-1369.

Lgourna Z., N. Warner, L. Bouchaou, S. Boutaleb, T. Tagma, M. Hssaisoune, N. Ettayfi, and A. Vengosh - Nitrate contamination of alluvial groundwater in the Ziz basin, southeastern Morocco. *Moroccan Journal of Chemistry*.2 N°5 (2014) 447-451

Lgourna Zineb, Nathaniel Warner, Lhoussaine Bouchaou, Said Boutaleb, Mohammed Hssaisoune, Tarik Tagma, Najat Ettayfi, Avner Vengosh (2014) -Elucidating the sources and mechanisms of groundwater salinization in the Ziz Basin of southeastern Morocco. *Environ Earth Sci* (2015) 73:77-93. DOI 10.1007/s12665-014-3396-1

Sanchez-Martos, F., and Pulido-Bosch, A. (1999). "Boron and the origin of salinization in an aquifer in Southeast Spain." *Surface Geosciences* 328: 751–757.

Sanchez-Martos, F., Pulido-Bosch, A., Molina-Sanchez, L., and Vallejos-Izquierdo, A. (2001). "Identification of the origin of salinization in groundwater using minor ions (Lower Andarax, Southeast Spain)." *The Science of the Total Environment* 297: 43-58.

Stigter, T. Y., van Ooijen, S.P.J., Post, V.E.A., Appelo, C.A.J., and Carvalho Dill, M.M. (1998). "A hydrogeological and hydrochemical explanation of the groundwater composition under irrigated land in a Mediterranean environment, Algarve, Portugal." *Journal of Hydrology* 208: 262-279.

Sturchio, N.C., Bohlke, J.K., Markun, F.J. (1993) Radium isotope geochemistry of geothermal water, Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 1203-1214.

Tarik Tagma, Youssef Hsissou, Lhoussaine Bouchaou, Latifa Bouragba and Said Boutaleb - 2009- Groundwater nitrate pollution in Souss-Massa basin(southwest Morocco). African Journal of Environmental Science and Technology Vol. 3 (9), September, 2009 ; ISSN 1991-637X © 2009 Academic Journals

Vengosh, A., and Keren, R. (1996). "Chemical modifications of groundwater contaminated by recharge of sewage effluent." Journal of Contaminant Hydrology 23: 347-360.

Vengosh, A., Farber, E., Shavit, U., Holtzman, R., Segal, M., Gavrieli, I., and Bullen, T.M. (2001). Exploring the sources of salinity in the Middle East: a hydrologic, geochemical and isotopic study of the Jordan River. Proc. 10th Int. Symp. Water-Rock

Interaction, WRI-10, Villasimuis, Sardinia, Italy, A. A. Balkema, Sardinia, Italy.

Vengosh A., K., W., Marei, A., Livshitz, Y., Gutierrez, M., Banna, M., Guerrot, C., Pankratov, I., and Raanan, H. (2005). "Sources of salinity and boron in the Gaza strip: Natural contaminant flow in the southern Mediterranean coastal aquifer." Water Resources Research 41.

Warner, N, Lgourna, Z, Bouchaou, L, Boutaleb S., Tarik T, Hsaissoune M & Vengosh, A. (2012)- Integration of geochemical and isotopic tracers for elucidating water sources and salinization of shallow aquifers in the sub-Saharan Drâa Basin, Morocco. Applied Geochemistry 34 (2013) 140–151.