



**HAL**  
open science

## Apport des isotopes de la molécule d'eau à la détermination de l'altitude de recharge des principales sources du Moyen Atlas calcaire (Maroc).

Abdelhadi El Ouali, Soumaya Sefrioui, Jacques Mudry, Omar Fassi Fihri, Ali Essahlaoui, Hamid Marah

### ► To cite this version:

Abdelhadi El Ouali, Soumaya Sefrioui, Jacques Mudry, Omar Fassi Fihri, Ali Essahlaoui, et al.. Apport des isotopes de la molécule d'eau à la détermination de l'altitude de recharge des principales sources du Moyen Atlas calcaire (Maroc).. H2Karst - 9th Conference on Limestone Hydrogeology, Sep 2011, BESANCON, France. pp.145-148. hal-00687293

**HAL Id: hal-00687293**

**<https://hal.science/hal-00687293v1>**

Submitted on 12 Apr 2012

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Apport des isotopes de la molécule d'eau à la détermination de l'altitude de recharge des principales sources du Moyen Atlas calcaire (Maroc).

Abdelhadi El Ouali<sup>1</sup>, Soumaya Sefrioui<sup>1</sup>, Jacques Mudry<sup>2</sup>, Omar Fassi Fihri<sup>3</sup>, Ali Essahlaoui<sup>1</sup> et Hamid Marah<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Equipe de recherche « Sciences de l'Eau et Ingénierie de l'Environnement » Département de Géologie Faculté des Sciences, Université Moulay Ismail, Méknès, Maroc

<sup>2</sup> Labo. Chrono environnement UMR 6249, UFR Sciences & Techniques Route de Gray 25030 Besançon Cedex

<sup>3</sup> Service de l'eau à Meknès, Secrétariat d'état chargé de l'eau et de l'Environnement, Maroc.

<sup>4</sup> Laboratoire d'hydrologie isotopique, CNESTEN, Maroc.

## Abstract

The present study contributes to the characterisation of Middle Atlas limestone karst aquifers by implementing water stable isotopic techniques to determine the recharge altitudes of major springs issuing from Liassic dolomitic limestone, helping to delineate protection areas for the springs. Chemical analyses of spring waters show a composition that reflects both reservoir lithology and a chemical evolution over the course of flow within the reservoir. Analysis of the evolution of deuterium as a function of oxygen-18 suggests a local water line similar to that derived for rainwater at a station in Fez, indicating that the aquifers in question are recharged through rapid infiltration, without appreciable evaporation of the rainwater. Application of the established  $-0.27\text{‰}$  per 100m altimetric gradient for oxygen 18 to the isotopic signatures of other analyzed sources allows us to backtrack recharge altitudes for these springs. Comparison of these results with local and regional hydrogeologic data shows a notable agreement among springs for which the drainage basin is known, and allows for more precise localization of springs for which the drainage basin is poorly known, with recharge altitudes reaching 1090m higher than emergence zones. To a certain extent, these results help to determine recharge zones for Middle Atlas springs and thus aid in strategizing protection for this resource.

**Keywords:** Middle Atlas, springs, karst, chemical analysis, oxygen 18, deuterium, recharge altitude, protection area, isotopic gradient

## Résumé

La présente étude est menée au Maroc sur le Moyen Atlas calcaire à caractère karstique. Son objectif est de contribuer à la caractérisation des aquifères moyens atlasique et à la détermination des altitudes de recharge des principales sources issues des calcaires dolomitiques liassiques afin d'aider à la détermination de leurs zones d'alimentation pour leur protection. La méthodologie utilisée est basée sur l'utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau. La caractérisation chimique des eaux de ces sources montre que leur composition est le reflet de celle des roches-réservoirs qu'elles drainent d'une part et de l'évolution qu'elles subissent au cours de leur transit au sein de ces réservoirs d'autre part. L'analyse de l'évolution du deutérium en fonction de l'oxygène 18 permet de tracer une droite locale similaire à celle des pluies analysées au sein de la station de Fès, ce qui montre que les aquifères concernés se rechargent par une infiltration rapide, sans évaporation notable des eaux de pluie. Le gradient altimétrique pour l'oxygène 18 est établi à  $-0.27\text{‰}$  par 100m. L'application de ce gradient aux teneurs isotopiques des autres sources analysées permet de remonter aux altitudes de recharge de ces sources. La confrontation de ces résultats aux données hydrogéologiques locales et régionales montre une concordance notable pour les sources dont les bassins versants étaient connus, et une orientation précieuse pour les sources dont les bassins étaient mal connus, avec des altitudes de recharge qui peuvent être 1090m plus élevées que les zones d'émergence. Ces résultats aident d'une manière certaine à déterminer les zones de recharge des sources, et donc à définir une stratégie de protection de cette ressource.

**Mots clés :** Moyen Atlas, Sources, Karstique, caractérisation chimique, Oxygène 18, Deutérium, altitude de recharge, zone de protection, gradient isotopique.

## 1.Introduction

La région de Meknès-Fès située au nord du moyen Atlas est l'une des régions agricole les plus importantes au Maroc. Ces ressources en eau agricoles et potable sont fournies par le massif karstique du moyen atlas (Fig.1) et les aquifères superficielles et profonds du bassin de Meknès-Fès. ESSAHLAOU (2000), CHAMAYOU *et al.* (1975). Le climat général de ce secteur est de type méditerranéen à influence océanique. La pluie moyenne annuelle est de 600 mm. Elle décroît avec la continentalité, et croît avec l'altitude et l'exposition aux perturbations océaniques venant de l'Ouest. Les températures sont maximales en juillet et août, et minimale en janvier. Les valeurs moyennes annuelles varient suivant l'altitude et la continentalité entre 10 et 20°C. Les aquifères du moyen atlas sont constitués par des carbonates liassiques à perméabilité essentiellement fissurale et karstique (nappes des Causses et du Moyen-Atlas plissé) Du DRESNAY & STUDER (1975).

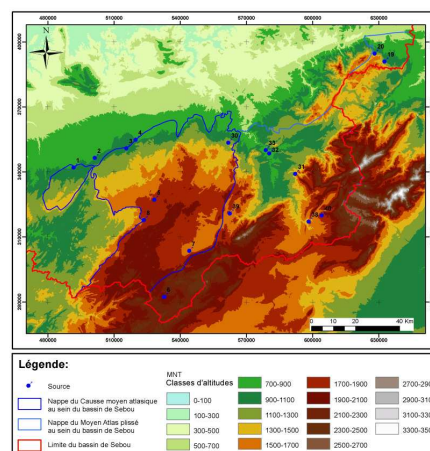


Figure 1. Situation de la zone étudiée et répartition spatiale des nappes du Moyen Atlas (Maroc).

Code	Nom	Nappe	$\delta^{18}\text{O}$ (V.‰)	$\delta^2\text{H}$ (V.‰)	CE $\mu\text{s/cm}$	T °C	$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	$\text{Cl}^-$ (mg/l)	$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	$\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)	$\text{Na}^+$ (mg/l)	$\text{K}^+$ (mg/l)
1	Ain Maarouf	Causse guigo	-6.16	-37.51	537	19,8	365.39	53.5	26.3	8.11	60.1	40.5	32.2	0.67
2	Ain Aghbal	Causse lhajeb	-6.66	-38.66	685	17,7	354.41	13.0	58.9	12.60	69.3	38.2	8.50	0.85
3	Ain Ribaa	Causse lhajeb	-7.42	-42.68	583	16,6	378.81	10.7	11.6	2.56	71.1	31.7	6.56	0.47
4	Ain Bittit	Causse lhajeb	-7.65	-42.87	588	16,7	395.28	10.0	10.3	2.54	62.3	31.7	6.33	0.49
5	Ain Zerrouka	Causse Ifrane	-8.03	-47.50	604	12,6	417.85	4.46	7.48	3.23	73.9	30.8	2.39	0.37
6	Aghbalou Aberchane	Causse Guigo	-8.90	-55.31	407	10,1	204.35	9.24	12.1	27.58	53.6	16.9	7.44	1.49
7	Ain Titzil	M.A Plissé	-8.04	-45.84	669	13,7	199.47	56.5	13.9	69.20	59.2	24.6	38.1	4.96
8	Ain Sidi Rached	Causse Ifrane	-8.04	-48.13	577	12,1	418.46	2.84	4.00	1.90	66.3	33.2	1.39	0.33
19	El Anssar	M.A.Plissé	-7.55	-47.23	-	-	309.88	10.6	15.1	8.09	55.5	16.8	6.55	0.35
20	Ain Ras El Ma	M.A.Plissé	-7.57	-46.00	499	14,5	387.35	3.02	7.06	7.87	61.1	26.7	2.42	0.41
30	Ain Regraga	Causse Sefrou	-7.48	-51.64	1198	17,4	457.5	167.	11.1	9.20	85.6	44.4	146.	1.42
31	Ain Bouk	M. A.Plissé	-8.78	-55.72	427	15	298.9	3.05	8.35	10.67	69.2	9.66	15.3	2.46
32	Ain Sebou	M. A.Plissé	-8.32	-50.69	617	15,5	451.4	13.5	4.62	10.79	80.5	8.87	2.74	0.43
33	Timedrine	M. A.Plissé	-8.33	-49.81	738	18,3	460.55	50.4	3.62	12.58	122	21.5	13.4	0.47
38	Skhounate marmocha	M. A.Plissé	-8.61	-54.87	812	36	273.28	79.2	10.0	135.12	115.	19.3	39.1	1.89
39	Skhounate S.Mdez	M. A.Plissé	-8.70	-55.69	847	-	376.98	101.	11.7	45.77	77.9	37.4	75.0	1.25
40	Ain Tataw	M. A.Plissé	-9.53	-60.50	336	12,8	213.5	2.28	10.2	20.16	64.9	9.40	2.17	0.82

Tableau 1 : résultats des analyses des eaux des sources échantillonnées (MA : Moyen Atlas)

Le massif calcaro-dolomitique du Lias donne naissance à de nombreuses sources qui émergent au niveau du chevauchement nord et sud atlasique. Les sources qui ont fait l'objet de la présente étude sont choisies pour des spécificités relatives à leurs multiples utilisations, à leurs débits importants, et à leur contexte hydrogéologique lorsqu'elles sont distinguées comme exutoires majeurs des nappes qu'elles drainent. Les plus importantes sont les sources de Ribaa et Bitit au piémont du Causse Moyen atlasique (Qmoy. : 1324L/s) qui alimentent la ville de Méknès en eau potable et agricole.

Depuis plusieurs années, le problème de fonctionnement de ces sources préoccupe l'agence du bassin de Sebou et l'office National de l'eau potable (ONEP). En effet Les systèmes karstiques représentent une ressource alternative à la surexploitation des autres systèmes aquifères et des eaux de surface, notamment dans les zones semi-arides méditerranéennes. Ainsi L'objectif de cette étude est de contribuer à la détermination de l'origine des eaux de ces sources à grands débits, afin d'aider à la détermination de leurs zones de protection.

## 2. Matériels et méthodes

Une campagne d'échantillonnage des eaux de 17 sources est réalisée à une période de hautes eaux au mois de février 2007. La mesure des paramètres physico-chimiques (température, conductivité, pH et alcalinité) est effectuée in situ. Les analyses ont concerné les éléments chimiques majeurs, et les isotopes stables de la molécule d'eau ( $^2\text{H}$  et  $^{18}\text{O}$ ) Tab.1. Ces analyses sont effectuées au laboratoire d'hydrologie isotopique du CNESTEN en utilisant un spectromètre de masse.

La méthodologie adoptée permet ainsi d'explorer les potentiels d'une approche pluridisciplinaire, centrée sur l'utilisation des isotopes stables de la molécule d'eau, pour la détermination des zones de recharge des principales sources étudiées.

## 3. Résultats

### 3.1. Caractérisation chimique

Les résultats des analyses chimiques des sources échantillonnées sont reportés sur le diagramme de Piper Figure 2.

Cette représentation permet de souligner une grande diversité des faciès chimiques des sources, avec une forte représentativité des eaux ayant un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Au niveau du Moyen Atlas plissé, on observe une distinction entre des sources évoluant à partir de deux pôles distincts. Le premier est calcique magnésien représentant les sources émergeant au niveau des formations dolomitiques du Lias inférieur (échantillon 20). Le second est plus calcique représenté par les sources émergeant au niveau des calcaires du Lias moyen (échantillons 32 et 40).

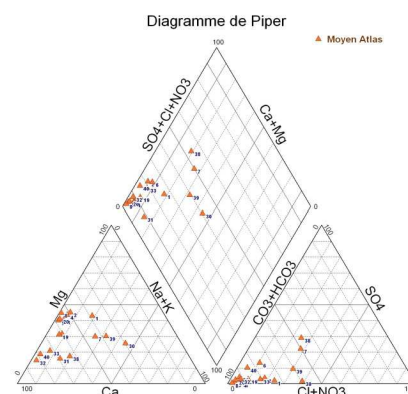


Figure 2. Représentation des résultats des analyses chimiques des eaux des sources étudiées

Ces deux représentants de base évoluent vers le pôle sodique (échantillon 39) pour le premier, et vers le pôle sulfaté (échantillon 38) pour le second. Au niveau des causses il y'a lieu de noter une évolution depuis des sources proches de leur zone d'alimentation (échantillons 5 et 8), vers des sources plus éloignées (échantillons 1 puis 7 puis

30). Au piedmont une évolution marquée depuis les sources du piedmont des Causses (échantillons 2, 3 et 4).

### 3.2. Relation $\delta^2H=f(\delta^{18}O)$

La représentation des teneurs isotopiques concernant 43 mesures relatives aux précipitations ayant une hauteur pluviométrique supérieure à 5mm et couvrant la période étalée entre 1994 et 2002 sur le diagramme  $\delta^2H=f(\delta^{18}O)$  fig.3, montre que les eaux de pluie décrivent une droite météorique locale (DML), d'équation  $\delta^2H = 6,9 * \delta^{18}O + 6,4$ . L'implantation de la droite des eaux météoriques mondiale (DMM) sur la même figure montre une proximité avec la DML pour les échantillons d'eau de pluie les plus enrichis; en revanche, les échantillons les plus appauvris sont situés au-dessus de la DMM, et décrivent une tendance plutôt méditerranéenne. Cette situation de la DML est retrouvée sur d'autres zones du Maroc (MICHELOT, 1991 ; MARAH et al., 2007). Elle est généralement attribuée à une coexistence dans cette zone de pluies d'origine atlantique et méditerranéenne. La projection sur le même graphe (figure 8), des teneurs isotopiques relatives aux sources émergeant de différents aquifères du moyen atlas, montre que l'ensemble de ces sources, se situent autour d'une droite de tendance très proche de la DML décrite plus haut, ce qui montre que les eaux qui ont alimenté ces sources se sont infiltrées sous une période climatique identique à celle régnant actuellement, et que cette infiltration est rapide sans stagnation favorable à une évaporation.

La seule exception est Ain Regraga (Echantillon N°30) située en dessous de la DMM, ce qui semble confirmer l'évaporation de ses eaux avant l'échantillonnage. Cette hypothèse est vérifiée par la situation de l'émergence au sein d'une zone de marécage sans limite étanche avec la nappe. Par ailleurs, cette figure montre aussi l'appauvrissement en isotopes lourds des eaux échantillonnées avec l'altitude. En effet, les sources du Moyen Atlas plissé sont les plus appauvries avec des valeurs de  $\delta^2H$  comprises entre -46 et -60,50 (V.SMOW ‰), et des valeurs de  $\delta^{18}O$  comprises entre -7,55 et -9,53 (V.SMOW ‰). Les sources des Causses moyen-atlasiques les suivent avec des valeurs de  $\delta^2H$  comprises entre -37,51 et -51,64 (V.SMOW ‰) et des valeurs de  $\delta^{18}O$  comprises entre -6,16 et -8,04 (V.SMOW ‰).

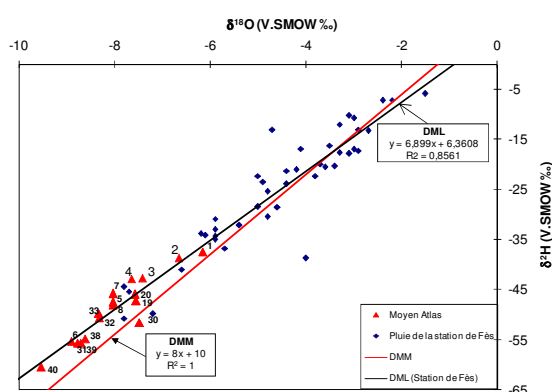


Figure 3. Variation des teneurs en  $^{18}O$  en fonction du  $^2H$  dans les eaux de pluie de la station de Fès (1994-2002) et dans les eaux des sources étudiées.

### 3.3. Gradient isotopique altimétrique

Un gradient isotopique a été déterminé par l'établissement d'une droite qui relie les points représentatifs de sources dont les bassins versants sont bien connus et présentant une altitude moyenne proche de celle de la zone d'émergence. Cette tendance traduit un gradient altimétrique de  $-0,27\%$  par 100m d'élévation (SEFRIQUI *et al.* 2010).

La comparaison de ce gradient avec les résultats antérieurs obtenus à l'échelle du Maroc permet de souligner des résultats semblables au sein du Rif (ABHL, 2002), au niveau du bassin d'Errachidia (EL OUALI 1999, EL OUALI *et al.* 1999) et au niveau du bassin de Tadla (BOUCHAOU *et al.*, 1995). Ces résultats permettent de préciser celui obtenu par Marcé (1975) qui a évalué ce gradient à  $-1\%$  par 350m, soit  $-0,286\%$  par 100m.

### 3.4. Altitude des zones de recharge

L'application de l'équation de la tendance, retrouvée plus haut, aux teneurs en Oxygène 18 de chacune des sources analysées (Tab 2.) a permis la détermination de l'altitude moyenne des zones d'alimentation des sources qui font l'objet de la présente étude. La lecture des résultats, à la lumière des données hydrogéologiques locales et régionales permet d'émettre les remarques suivantes : Pour les sources des Causses moyen-atlasiques, les différences d'altitudes entre la zone de recharge et la zone d'émergence varie de 10m pour la source de Zerrouka(N°5), à 372m pour la source Regraga(N°30).

Cette évolution semble être liée à la structure des bassins drainés par ces sources. En effet, cette différence est sensible entre le bassin versant de Zerrouka appartenant au Causse d'Ifrane, plus ou moins tabulaire (Bentayeb et Leclerc, 1977), et le bassin de Ain Maarouf puis vers le bassin d'Ain Regraga dont les altitudes sont de plus en plus élevés. Bien que cette différence soit identique entre les sources de Ain Sidi Rached et Ain Titzil, elle a une signification différente. En effet, La première est située sur un bassin plus ou moins penté (Causse de Ras El Ma), et relativement limité, alors que la seconde est située sur un bassin plus ou moins tabulaire (Causse de Guigou) mais plus étendu.

Ces observations confirment les résultats des analyses chimiques qui soulignent une évolution depuis des sources proches de leur zone d'alimentation (Zerrouka et Sidi Rached), vers des sources plus éloignées de leur zone d'alimentation (Ain Regraga et Ain Titzil).

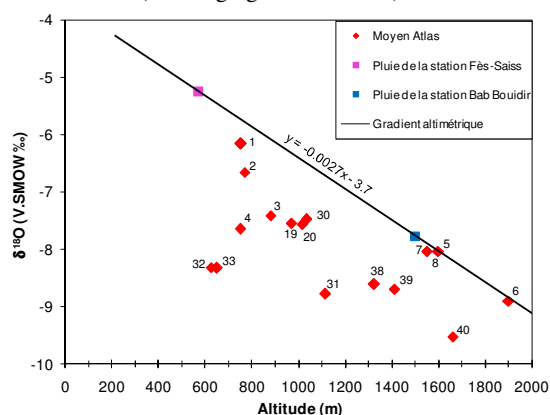


Figure 4. Gradient isotopique régional altimétrique et évolution de la teneur en Oxygène-18 en fonction de l'altitude des sources étudiées

Une alimentation à partir des affleurements basaltiques et/ou du sous-écoulement de l'oued Guigou. Le second est

constitué des sources n°20, 39, 19, 38, 40 et 31 respectivement. Ces sources décrivent une relation

N°	Nom	Z(m)	$\delta^{18}\text{O}$	Z rechar.	Diffère
1	Ain Maarouf	752	-6.16	915	163
2	Ain Aghbal	769	-6.66	1100	331
3	Ain Ribaa	880	-7.42	1381	501
4	Ain Bittit	750	-7.65	1467	717
5	Ain Zerrouka	1597	-8.03	1607	10
6	Ain Aberchane	1900	-8.90	1930	30
7	Ain Titzil	1550	-8.04	1611	61
8	Ain Sidi Rached	1550	-8.04	1611	61
19	El Anssar	968	-7.55	1430	462
20	Ain Ras El Ma	1015	-7.57	1437	422
30	Ain Regrag	1032	-7.48	1404	372
31	Bouk	1114	-8.78	1885	771
32	Ain Sebou	625	-8.32	1715	1090
33	Timedrine	650	-8.33	1718	1068
38	Ain marmocha	1324	-8.61	1822	498
39	Skhounate S.Mdez	1410	-8.70	1855	445
40	Ain Tataw	1660	-9.53	2163	503

isotopique de même pente que le gradient régional, avec un appauvrissement plus marqué, que les eaux de pluie, étant donnée leur situation en plus haute altitude d'une part, et le fonctionnement analogue lié à une structure hydrogéologique semblable pour les différents panneaux du Moyen Atlas plissé d'autre part. Le troisième est constitué par les sources (n°33 et 32 respectivement). Ces sources sont celles qui sont les plus éloignées de leur zone de recharge avec des différences d'altitude avoisinant les 1100m, ce qui justifierait les grands débits de ces sources. Tableau 2. Altitudes de recharge des principales sources du Moyen Atlas déduites à partir du gradient des teneurs en Oxygène-18 avec l'altitude.

#### 4. Conclusion

La résolution des problématiques soulevées par les études antérieures permet ainsi d'améliorer la connaissance des réservoirs drainés et d'aider à la quantification des ressources en eau pour une protection plus efficace et une gestion plus rationnelle de ces ressources.

La caractérisation chimique de ces eaux montre que leur composition est le reflet de celle des roches-réservoirs qu'elles drainent d'une part et de l'évolution qu'elles subissent au cours de leur écoulement au sein de ces réservoirs d'autre part.

Le gradient altimétrique pour l'Oxygène 18 est établi à -0.27‰ par 100m. L'application de ce gradient aux teneurs isotopiques des sources analysées permet de remonter à des altitudes moyennes de recharge de ces sources. La confrontation de ces résultats aux données hydrogéologiques locales et régionales montre une concordance notable pour les sources dont les bassins versants étaient connus dans une large part, et une orientation précieuse de la connaissance pour les sources dont les bassins étaient mal définis. Ces résultats contribuent d'une manière certaine à la définition des zones de l'aquifère concernées par la recharge des sources, et aident à définir une stratégie de protection de cette ressource.

#### Références

- AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU LOUKKOS 2002. Etude isotopique de la dorsale calcaire du Rif- Rapport interne.
- BENTAYEB A. & LECLERC C. 1977. Le Causse moyen-atlasique. In « Ressources en Eau du Maroc » – Tome III, Editions du Service Géologique du Maroc, pages 37-84.
- BOUCHAOU L., MICHELOT J-L., CHAUVE P., MANIA J. & MUDRY J. 1995. Apports des isotopes stables à l'étude des modalités d'alimentation des aquifères du Tadla (Maroc) sous climat semi-aride – C. R. Acad. Sci. Paris, série Ila 320,1995, 95–101.
- CHAMAYOU J., COMBE M., GENETIER B. & LECLERC C. 1975. Le bassin de Meknès-Fès. In « Ressources en Eau du Maroc » – Tome II, Editions du Service Géologique du Maroc, pages 41-71.
- DU DRESNAY R. & STUDER G. 1975. Carte géologique d'El Hajeb au 1/100.000° - Notes et mémoires N° 160 du Service Géologique du Maroc.
- EL OUALI A. 1999. Modalités d'alimentation et échanges entre aquifères de piémont en conditions climatiques arides. Cas des systèmes aquifères du Haut Atlas/bassin crétacé d'Errachidia (Maroc) – Thèse d'État, Université Mohamed-V-École Mohammadia d'ingénieurs, Rabat, 1999, 182 p.
- EL OUALI A., MUDRY J., MANIA J., CHAUVE P., ELYAMINE N. & MARZOUK M. 2000. Present recharge of an aquifer in a semi-arid region : an example from the turonian limestones of the Errachidia basin, Morocco Environmental Geology 38(2) Springer verlag.
- ESSAHLAOUI A. 2000. Contribution à la reconnaissance des formations aquifères dans le bassin de Meknès-Fès (Maroc). Prospection géoélectrique, étude hydrogéologique et inventaire des ressources en eau. Thèse Doct. en Sc. App., Ecole Mohammadia d'Ingénieurs, Rabat, Maroc, 258p.
- MARAH H., ZINE N., QURTOBI M. & ZEROUALI A. 2007. Sens d'écoulement, vitesse et âge des eaux de l'aquifère turonien du bassin de Tadla (Maroc) – AJEAM-RAGEE, August 2007, Vol. 12, page 1-12.
- MARCE A. 1975. Contribution des méthodes isotopiques à l'étude des modalités d'alimentation et de renouvellement des réserves souterraines du Maroc – SGN. 447. LAB. BRGM, Orléans.
- MICHELOT J.L. 1991. Hydrogéologie isotopique des systèmes aquifères de Fès-Meknès, Errachidia et Kheng-el-Hammam – Projet MOR/8/004, AIEA, Vienne, (1991).
- SEFRIQUI S, FASSI FIHRI O, EL OUALI A, MARAH H, NEWMAN B & ESSAHLAOUI A 2010. Utilisation des outils isotopiques pour la détermination de l'altitude de recharge des principales sources du bassin de Sebou – Maroc, Revue Geomaghreb N°6 année 2010.