

Apports des outils chimiques et isotopiques à l'identification des origines de la salinisation des eaux : cas de la nappe de la Chaouia côtière (Maroc)

Contribution of chemical and isotopic tools to the identification of water salinization origins : the case of coastal Chaouia aquifer (Morocco)

A. MARJOUA¹, PH. OLIVE² et C. JUSSERAND²

Reçu le 25 mars 1996, accepté le 18 juin 1997*.

SUMMARY

In West of Morocco, the coastal plain Chaouia is located between Casablanca and Azemmour (south-west of Casablanca) over a distance of 65 km (*Fig. 1*). This plain aquifer spreads over 1100 km² in semi-arid climatic conditions with about 370 mm. year⁻¹ of mean precipitation and 17°C in mean air temperature.

Irrigated agricultural farming is the main economic resource of the region. The only source of water is provided by highly mineralized ground waters, which are harmful for the rural population and agricultural irrigation. The chloride content represents the main contribution of the salinity of ground waters. Most of the previous authors and authorities have attributed the high mineralization to seawater intrusion (YOUNSI, 1994). The objective of the present study is to determine the cause of salinity, considering three hypothesis: seawater intrusion, leaching of salts and evaporation of water.

The environmental isotopes (²H, ¹⁸O, ³H, ¹⁴C) have been used with hydrogeology together with major and minor ion chemistry to identify the source of salinity and to estimate the residence time of ground water. Moreover an environmental isotope study was carried out in order to identify the origin of the salinization (MERLIVAT *et al.*, 1970; COTECCHIA *et al.*, 1974; GASPARINI, 1989; CABRAL *et al.*, 1991; GOMEZ-MARTOS *et al.*, 1993; HASHASH *et al.*, 1995).

Both isotopic studies and Br⁻/Cl⁻ ratios have been used to identify the salinity origin. The potential sources for this salinization are: seawater encroachment as a consequence of intense exploitation of the aquifer, dissolution of the halite from the several diapiric structures intruded in the aquifers. The isotopic waters sampling were carried out in August 1993 on several wells (*Fig. 2*), in order to study the variations of the oxygen-18, deuterium, tritium and carbon-

1. INGEMA, 4 rue Zalagh-Agdaï, 10000 Rabat, Maroc.

2. Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), Centre de Recherches Géodynamiques, 47 avenue de Corzent, B.P. 510, 74203 Thonon Cedex, France.

* Les commentaires seront reçus jusqu'au 20 juillet 1998.

14 isotopes. Table 1 shows the results of the isotope and chemical analyses carried out. As oxygen-18 data for local precipitation are not available in Morocco, the oxygen-18 and deuterium mean contents in precipitation were taken from stations of the International Atomic Energy Agency (IAEA) network near the studied area (*Gibraltar, Faro, Ponta Delgada*) and/or deduced from published isotopic composition of shallow groundwaters in Morocco (KABBAJ *et al.*, 1978; LOUVA and BICHARA, 1990; BOUCHAOU *et al.*, 1995); the mean values for the precipitation are $-4.0 \pm 0.5\text{‰}$ and $-23.0 \pm 2\text{‰}$ (*vs. V-SMOW*) respectively. The oxygen-18 and deuterium mean contents in ground waters are $-3.7 \pm 0.3\text{‰}$ and $-20.1 \pm 1.8\text{‰}$ (*vs. V-SMOW*) respectively. The relationship between the oxygen-18 and deuterium contents of some groundwater samples indicates a good fitting along the world meteoric line (CRAIG, 1961) (Fig. 3), suggesting that the ground waters are mainly of meteoric origin. There is no indication of possible mixing with seawater because there is no indication of a relation between the oxygen-18 content of the wells and their distance from the sea (Fig. 4). On the other hand, no isotopic enrichment is noted during the infiltration of water from precipitation and/or irrigation.

The diagram $d^{18}\text{O}-\text{Cl}^-$ (Fig. 5) shows that all the data do not lie along a theoretical mixing line with seawater and/or an evaporation line. Every ^{18}O data point is very close to the isotopic values of precipitation [$-4.0 \pm 0.5\text{‰}$ (*vs. V-SMOW*)] but with a large scatter in Cl^- content. In this zone, an increase in the salt concentration is not accompanied by an isotopic effect. The sources of the chloride must be found among the products of rock alteration, fertilizers and marine airborne salts. The recycling of salt water by irrigation increases the salinity of soil and ground waters.

Halite is characterized by a very low Br^-/Cl^- ratio (0.183×10^{-3}). Water in some wells presents Br^-/Cl^- ratios similar to those of halite, but most of the groundwater samples have a greater ratio. These results argue against the hypothesis of dissolution of halite in the aquifer formation. But the Br^-/Cl^- ratio alone is not sufficient for detecting a possible seawater intrusion.

During August 1994, 20 drilled wells were sampled over the study area for determining tritium concentrations. Carbon-14 activities were measured only on some samples. The relatively high tritium content in the majority of the sampled waters [between 2 and 9 tritium units (TU)] indicates a recent groundwater recharge (Table 1). The use of natural radioactive isotopes (^3H , ^{14}C) in the ground waters gives an estimate of mean residence time of 50 ± 20 years (mixing model). Some waters show a mean residence time greater than 100 years because they are isolated from the general circulation and limited to local spots. The recent ^{14}C activity of the ground water (≈ 100 pcm) allows us to reject the hypothesis of a mixing with paleoconnate waters as demonstrated elsewhere (SHIVANNA *et al.*, 1993).

In the case of the coastal Chaouia (semi-arid environment), the use of both chemical tracers (Cl^- , Br^-) and isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C) has shown that rainfall constitutes the essential origin of ground water in the area. The high salinity caused by seawater intrusion is probably limited in space to some coastal wells; neither evaporation of water before and during percolation, nor dissolution of evaporitic deposits (halite), has been found. The past marine transgression salt origin has also been discarded. The main source of the salinity is the washout of the rock alteration salts, fertilizers, marine airborne salts, and the unusable salts rejected by plants in the soil. Thus the increase of salinity is well explained by the recycling of salty ground waters by irrigation during at least thirty years.

Key words : semi-arid zone, water resources, salinization, tracer, environmental isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C).

RÉSUMÉ

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe libre de la Chaouia côtière montre une teneur excessive en sels dans ces eaux, spécialement des chlorures (jusqu'à $3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$). Cette salinité élevée peut, à terme, nuire gravement à l'économie de la région qui se consacre essentiellement à la culture maraîchère sous irrigation.

Des mesures isotopiques ($^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^2\text{H}/^1\text{H}$) couplées aux éléments chimiques, notamment Br^-/Cl^- , excluent l'hypothèse d'une intrusion marine généralisée. L'existence d'une paléosalinité (SHIVANNA *et al.*, 1993) n'est pas soutenue par les mesures des teneurs en isotopes radioactifs (^3H , ^{14}C). Il en est de même pour le lessivage de dépôts chlorurés préexistants dans les sédiments. L'apport essentiel en chlorures provient de l'altération de la roche mère, des fertilisants et des embruns marins lessivés par suite de l'irrigation et entraînés vers la nappe par percolation. Le recyclage de l'eau souterraine depuis au moins trente ans, par l'irrigation, n'a fait qu'augmenter cette salinité.

Toutefois en bordure de l'océan quelques puits semblent montrer la présence d'eau marine, en effet les débits d'exhaure des puits sont à la limite d'exploitation de la nappe et toute augmentation de débits dans ces puits engendrera fatalement une invasion marine généralisée.

Mots-clés : zone semi-aride, ressources en eau, salinisation, traçage, isotopes du milieu (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C).

INTRODUCTION

Les nappes côtières du Maroc représentent un capital hydraulique de haute valeur, ces zones côtières constituent des zones vivrières vouées au maraîchage. Du fait de leur vulnérabilité à l'invasion marine, leur exploitation et d'une façon générale leur gestion, est rendue difficile par les conflits d'usage entre gestion privée individuelle et gestion collective soutenue par la Direction de la Recherche et de la Planification des Eaux. La nappe de la Chaouia côtière en est un exemple (MARJOUA, 1995).

C'est une région à vocation agricole dont le maraîchage sous irrigation constitue la principale activité. Les eaux souterraines qui représentent les seules ressources en eaux sont actuellement trop minéralisées (jusqu'à $3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ en chlorures et $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ en sodium) pour l'alimentation en eau potable de la population rurale ($127 \text{ habitants} \cdot \text{km}^{-2}$, soit l'une des densités les plus fortes au Maroc) et pour l'irrigation. L'irrigation des cultures maraîchères par ces eaux, puis l'évapotranspiration entraînent une accumulation des sels dans le sol qui augmentent chaque année, conduisant ponctuellement à l'abandon de toute activité agricole. Cette situation préoccupe de plus en plus les autorités et les exploitants qui lient souvent cette augmentation de la salinité des eaux au phénomène d'invasion marine (YOUNSI, 1994). L'objectif de cette étude est donc de rechercher les causes potentielles de cette salinité excessive des eaux par le biais de l'outil isotopique et géochimique (MERLIVAT *et al.*, 1970 ; COTECCHIA *et al.*, 1974 ; GASPARINI, 1989 ; CABRAL *et al.*, 1991 ; GOMEZ-MARTOS *et al.*, 1993).

1 – CARACTÉRISTIQUES DE LA RÉGION ÉTUDIÉE

La plaine de la Chaouïa côtière est située le long de la côte atlantique marocaine. Elle s'étend de Casablanca à Azemmour (l'embouchure de l'oued Oum Rbia) sur une distance de 65 km et une largeur allant de 15 à 20 km et présente donc une forme grossièrement rectangulaire d'une surface d'environ 1 100 km². Cette zone représente un ensemble assez plat dont seuls quelques cordons dunaires parallèles à l'océan rompent la monotonie (*fig. 1*).

Le climat de la région est de type atlantique méridional, la pluviométrie est de l'ordre de 370 mm · an⁻¹ et la température est modérée (17 °C en moyenne). Cette région s'intègre dans la catégorie des zones semi-arides, ce caractère est atténué par la proximité de l'océan. Si l'hiver est doux et humide, l'été est par contre chaud et sec. Il est alors nécessaire de procéder à l'irrigation des cultures.

Certains caractères favorables (fertilité des sols, situation géographique...) confèrent à cette plaine une importance économique. Les investissements réalisés dans cette région exigent beaucoup d'eau, ce qui pousse les agriculteurs à creuser davantage de puits. Il en résulte une exploitation mal maîtrisée entraînant une dégradation de la quantité (baisse des niveaux statiques) et de la qualité des eaux (augmentation de la salinité).

La région étudiée abrite une nappe libre qui se développe dans la couverture grésocalcaire du Plioquaternaire et dans les schistes altérés du Primaire. Dans la partie sud-ouest de la région la nappe se développe dans les marnocalcaires du Cénomaniens qui s'intercalent entre les deux formations (Primaire et Plioquaternaire). La nappe s'écoule de façon uniforme vers l'océan, sauf au sud-ouest où se manifeste un drainage de la nappe par l'oued Oum Rbia (MARJOUA, 1995). Les eaux de la nappe sont fortement minéralisées, leur conductivité électrique peut atteindre 10 mS · cm⁻¹. La qualité de ces eaux est fonction de la nature lithologique de la matrice de l'aquifère où elles circulent, ainsi les eaux qui circulent dans l'aquifère constitué de schistes altérés du Primaire et les calcaires gréseux du Plioquaternaire sont généralement de mauvaise qualité, leur conductivité électrique varie généralement entre 4 et 6 mS · cm⁻¹. Les eaux qui circulent dans l'aquifère marnocalcaire du Cénomaniens sont relativement de bonne qualité et caractérisées par des conductivités électriques inférieures ou égales à 2 mS · cm⁻¹ (DRPE, 1994). On note une excellente corrélation entre la conductivité électrique des eaux et leurs teneurs en chlorures. Globalement les eaux ont un faciès de type chloruré sodique.

2 – MÉTHODES ANALYTIQUES UTILISÉES

L'analyse des chlorures et des bromures a été effectuée par chromatographie ionique au laboratoire de chimie, de la Station d'Hydrobiologie de l'Institut National de la Recherche Agronomique de Thonon-les-Bains. Les erreurs relatives sont de 5 % pour le Br⁻ et 3 % pour le Cl⁻.

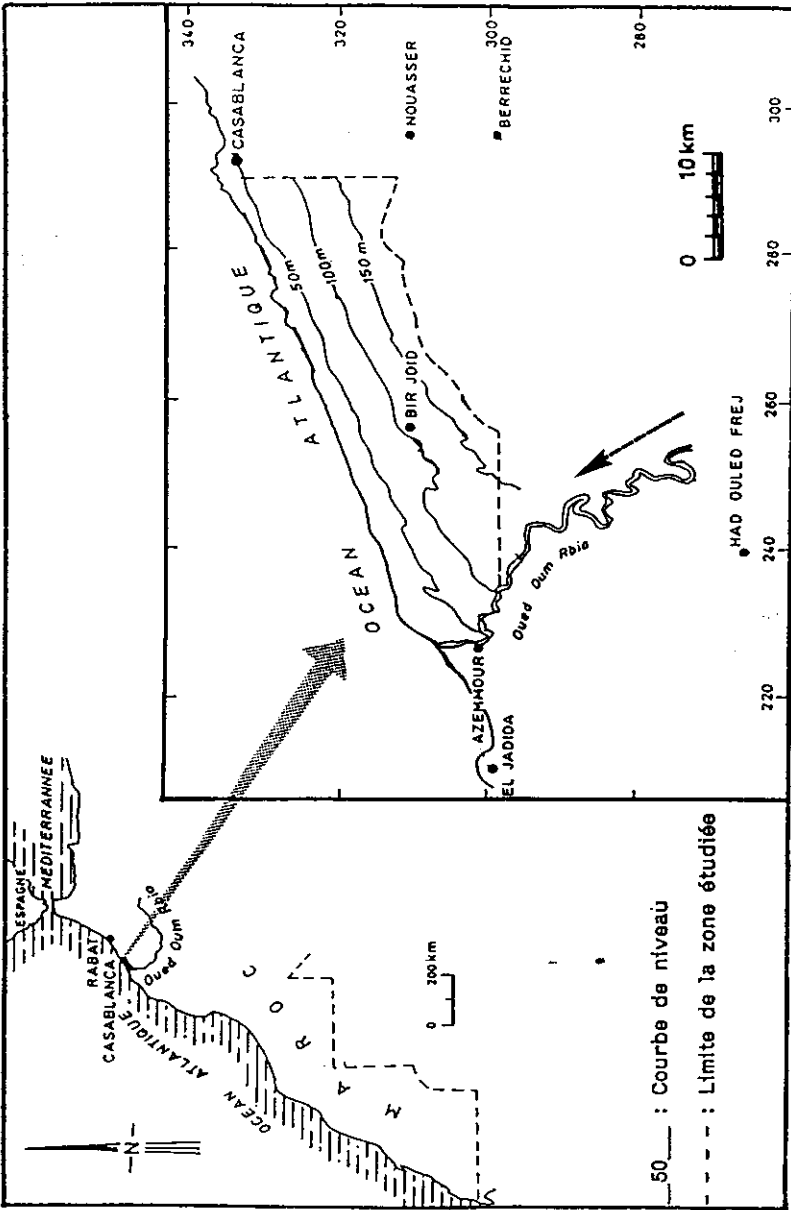


Figure 1 Carte de situation de la région de La Chaouia côtière.
Map showing the location of the coastal Chaouia area.

^{18}O : la teneur en oxygène-18 est obtenue après équilibration de 3 ml d'eau à 25 °C avec du CO_2 dont on détermine le rapport d'abondance isotopique $R = ^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ par spectrométrie de masse (EPSTEIN et MAYEDA, 1953). Cette teneur est exprimée en parts pour mille par rapport au standard international V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water).

$\delta = [(R_{\text{échantillon}} - R_{\text{standard}}) - 1] \cdot 10^3$. La reproductibilité est de $\pm 0,08$ et l'incertitude de la mesure est de $\pm 0,15$ %.

^2H : 10 μl d'eau sont vaporisés et réduit sur du Zinc à 450 °C, (COLEMAN *et al.*, 1982). La teneur en deutérium est exprimée en parts pour mille par rapport au standard international V-SMOW. La reproductibilité est de $\pm 0,6$ % et l'incertitude de la mesure est de ± 1 %.

^3H : après enrichissement électrolytique de l'eau, la teneur en tritium est déterminée par comptage en scintillation liquide (KAUFFMAN et LIBBY, 1954). La teneur en tritium est exprimée en Unité Tritium (UT).

(1UT = 10^{-18} atome de ^3H pour un atome de ^1H). L'incertitude de la mesure est de ± 1 UT.

^{14}C : le carbone minéral des échantillons d'eau est extrait sous forme de CO_2 , ce gaz est transformé en benzène puis analysé par comptage en scintillation liquide (NOAKES *et al.*, 1965 ; FONTES, 1971). La teneur en carbone-14 est exprimée en pcm (pourcent de carbone moderne), par rapport à l'activité du carbone moderne en 1950 (100 pcm). Les erreurs relatives de mesure de l'activité en radiocarbone par comptage en scintillation liquide vont de 1 à 10 %.

Les analyses isotopiques d' ^{18}O , ^3H , ^{14}C ont été effectuées à l'Université Pierre et Marie Curie (Centre de Recherches Géodynamiques de Thonon-les-Bains). L'analyse du deutérium a été effectuée au Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique d'Orsay (Université Paris Sud).

3 – RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

3.1 Étude du rapport Br^-/Cl^-

Des analyses de **bromures** et de **chlorures** ont été effectuées en chromatographie ionique sur une vingtaine d'échantillons prélevés durant l'été 1994 dans des puits de différente salinité et répartis sur l'ensemble de la région étudiée. La localisation des puits échantillonnés est représentée sur la figure 2. Les résultats chimiques et isotopiques des eaux des puits sont présentés dans le tableau 1.

Parmi les rapports ioniques normés aux chlorures, le rapport Br^-/Cl^- est souvent le plus pertinent pour préciser l'origine des chlorures dans les eaux souterraines (RITTENHOUSE, 1967). Dans le cas de la Chaouia côtière on considère que les seules sources de chlorures et de bromures dans les eaux sont l'eau de mer (dont le rapport pondéral est de $3,47 \cdot 10^{-3}$) et l'halite (dont le rapport pondéral est de $0,183 \cdot 10^{-3}$). Les eaux souterraines ont des rapports pondéraux Br^-/Cl^- largement supérieurs à celui de l'halite. Ceci permet donc d'exclure l'hypothèse de l'existence de l'halite dans la matrice de l'aquifère et de la concentration des

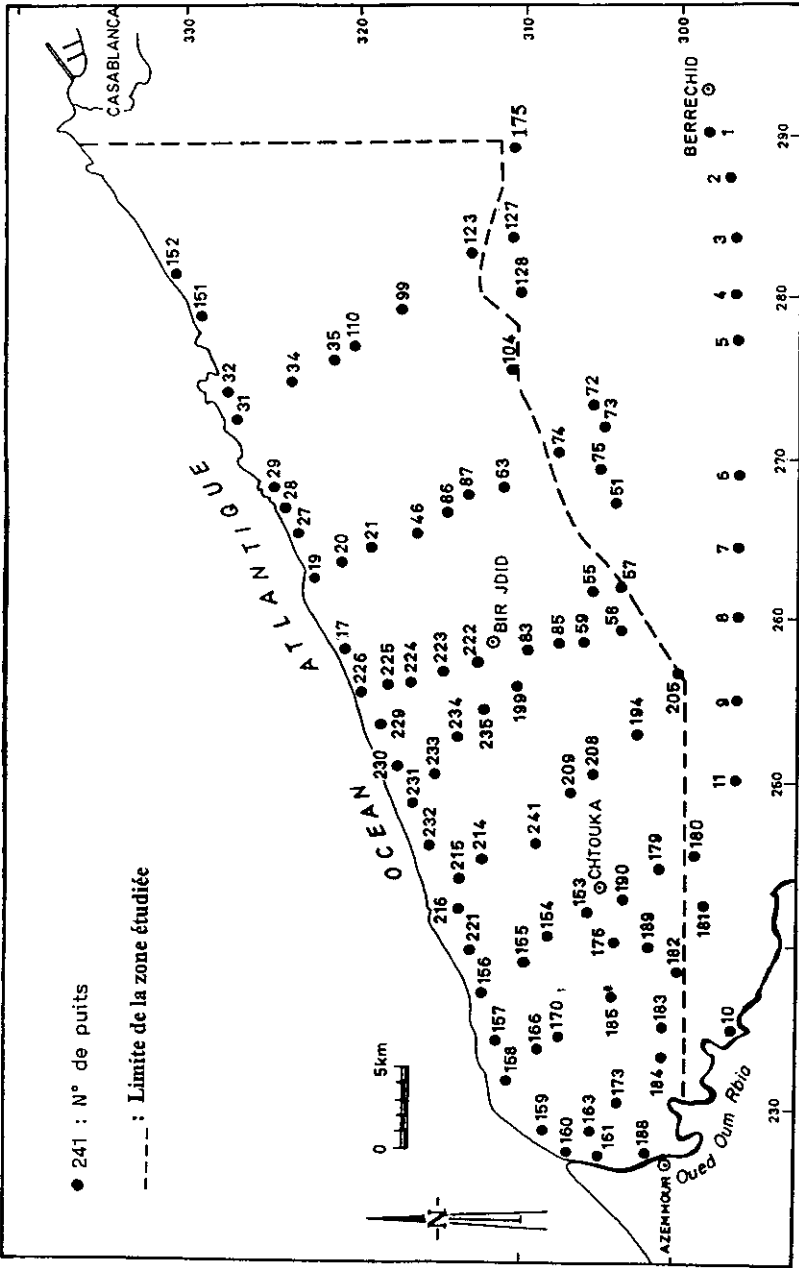


Figure 2 Carte de situation des puits échantillonnés.
 Map showing the location of sampling wells.

Tableau 1 Résultats des analyses chimiques et isotopiques.**Table 1** Results of chemical and isotopic analyses.

n° puits	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	Br ⁻ /Cl ⁻ (*1 000)	18O ‰vs V-SMOW	2H ‰VS V-SMOW	3H (U.T.)	14C (P.C.M.)
1,00	3 524,0	8,95	2,54	-3,21	-	7,00	-
2,00	632,1	-	-	-4,01	-	-	-
3,00	779,0	2,01	2,58	-3,67	-	0,40	-
4,00	1 384,6	-	-	-3,61	-	-	-
5,00	752,5	-	-	-4,07	-	-	-
6,00	4 010,0	10,17	2,54	-3,71	-	4,00	-
7,00	842,8	-	-	-4,41	-	-	-
8,00	108,0	0,17	1,57	-4,34	-	1,50	-
9,00	1 023,4	-	-	-4,16	-	-	-
10,00	1 173,9	-	-	-4,10	-	0,50	-
11,00	1 438,0	5,16	3,59	-3,85	-	3,90	-
17,00	2 230,4	-	-	-3,65	-	-	-
19,00	1 496,0	-	-	-3,78	-	-	-
20,00	1 182,9	-	-	-3,62	-	-	-
21,00	1 077,0	4,30	3,99	-3,56	-	0,70	95,70
27,00	1 601,3	-	-	-3,68	-	-	-
28,00	1 083,6	-	-	-4,00	-	-	-
29,00	1 502,0	-	-	-3,74	-	-	-
31,00	1 576,0	6,10	3,87	-3,38	-	9,20	-
32,00	2 001,7	-	-	-3,62	-	-	-
34,00	904,0	3,87	4,28	-3,81	-	0,00	93,50
35,00	848,8	-	-	-3,52	-	-	-
46,00	1 167,9	-	-	-3,76	-	-	-
51,00	930,1	-	-	-3,82	-	-	-
55,00	1 378,6	-	-	-3,78	-21,70	-	-
57,00	2 116,0	-	-	-3,82	-	-	-
58,00	2 709,0	-	-	-3,58	-	-	-
59,00	1 920,4	-	-	-3,75	-	-	-
63,00	2 019,7	-	-	-3,96	-	-	-
72,00	1 622,4	-	-	-4,81	-	-	-
73,00	918,0	-	-	-4,44	-	-	-
74,00	2 209,3	-	-	-3,89	-	-	-
75,00	993,3	-	-	-3,72	-	-	-
83,00	1 167,9	-	-	-3,71	-	-	-
85,00	1 673,6	-	-	-3,81	-	-	-
86,00	1 074,6	-	-	-3,65	-21,20	-	-
87,00	687,0	2,03	2,95	-3,94	-	5,80	-
99,00	1 846,0	5,51	2,98	-3,79	-21,60	3,20	-
104,00	602,0	-	-	-3,36	-	-	-
110,00	583,9	-	-	-3,42	-	-	-
123,00	583,9	-	-	-3,42	-	-	-
152,00	2 082,9	-	-	-3,36	-	-	-
153,00	957,2	-	-	-3,82	-	-	-
154,00	403,3	-	-	-3,81	-	-	-
155,00	463,5	-	-	-4,03	-	-	-

Tableau 1 Résultats des analyses chimiques et isotopiques.**Table 1** Results of chemical and isotopic analyses.

n° puits	Cl ⁻ (mg/l)	Br ⁻ (mg/l)	Br/Cl ⁻ (*1 000)	¹⁸ O ‰vs V-SMOW	² H ‰VS V-SMOW	³ H (U.T.)	¹⁴ C (P.C.M.)
156,00	520,7	-	-	-3,55	-	-	-
157,00	1 836,1	-	-	-3,33	-	6,20	-
158,00	1 264,2	-	-	-3,45	-19,50	-	-
159,00	3 413,3	-	-	-3,30	-	-	-
160,00	1 505,0	5,10	3,39	-3,23	-	-	-
161,00	1 514,0	-	-	-3,97	-	-	-
16300	382,3	-	-	-3,70	-	-	-
166,00	292,0	-	-	-3,70	-18,50	-	-
170,00	234,8	-	-	-3,77	-21,30	-	-
173,00	228,0	0,54	2,37	-3,87	-	0,80	59,60
175,00	114,0	0,37	3,25	-3,89	-	5,70	-
176,00	216,7	-	-	-3,86	-23,30	-	-
179,00	710,4	-	-	-3,50	-	-	-
180,00	397,3	-	-	-3,41	-	-	-
181,00	154,0	0,77	5,00	-3,49	-	4,90	85,58
183,00	719,4	-	-	-3,72	-	-	-
184,00	608,0	-	-	-3,90	-	-	-
185,00	577,9	-	-	-3,88	-	-	-
188,00	-	-	-	-3,74	-	-	-
189,00	529,8	-	-	-3,80	-	-	-
190,00	529,8	-	-	-3,69	-	-	-
194,00	1 538,1	-	-	-3,86	-	-	-
199,00	1 896,0	5,87	3,10	-3,84	-	6,30	-
205,00	2 004,7	-	-	-3,39	-	-	-
208,00	3 612,0	-	-	-3,80	-	2,60	-
209,00	2 347,8	-	-	-3,30	-16,80	-	-
214,00	397,3	-	-	-3,89	-21,00	-	-
215,00	779,6	-	-	-3,79	-	-	-
216,00	966,2	-	-	-3,76	-	-	-
221,00	978,2	-	-	-3,62	-	-	-
222,00	1 068,5	-	-	-3,84	-	-	-
223,00	1 622,4	-	-	-3,52	-	5,60	100,33
224,00	1 447,8	-	-	-3,57	-17,70	-	-
225,00	1 533,2	-	-	-3,66	-	-	-
226,00	2 979,9	-	-	-3,32	-	-	-
229,00	2 772,0	8,50	3,07	-3,37	-	6,20	-
230,00	2 411,0	-	-	-3,63	-	-	-
231,00	2 820,0	8,60	3,05	-3,39	-	-	-
232,00	2 450,0	-	-	-3,30	-	-	-
233,00	3 064,2	-	-	-3,55	-	-	-
234,00	2 251,5	-	-	-3,78	-19,10	-	-
235,00	2 784,2	-	-	-3,77	-21,20	-	-
241,00	0 254,0	0,71	2,80	-3,79	-	6,70	78,96
Eau de mer	19 500,0	67,70	3,47	-0,00	-0,00		

eaux souterraines en sels par dissolution de celle-ci. D'autre part les sels apportés par les précipitations, les aérosols et les embruns marins présentent généralement des rapports Br^-/Cl^- voisins de l'eau de mer (MEYBECK, 1984), malheureusement à ce stade de notre étude, nous ne possédons aucune valeur mesurée au Maroc.

3.2 Traçage isotopique naturel

Les isotopes stables de la molécule d'eau : ^{18}O , ^2H permettent un traçage isotopique naturel des eaux. Les isotopes radioactifs : ^3H et ^{14}C nous permettent d'estimer le temps de séjour moyen des eaux. L'origine de la salinité élevée des eaux ne peut être déterminée avec certitude sur la seule base des analyses chimiques des éléments majeurs. La comparaison avec les teneurs en isotopes stables et radioactifs apparaît à ce titre très complémentaire (HASHASH et ARANYOSSY, 1995).

3.2.1 Isotopes stables : ^{18}O , ^2H

L'interprétation porte sur l'analyse isotopique de 100 échantillons (88 en ^{18}O , 12 en ^2H), prélevés durant l'été 1993, dans des puits de différentes salinités, répartis sur l'ensemble de la plaine. Les résultats analytiques sont présentés dans le tableau 1.

L'absence de données isotopiques de référence sur les précipitations au Maroc et dans la région d'étude, nous a amené à prendre comme référence les données mesurées dans les stations de l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique proches de notre zone d'étude (Gibraltar, Faro, Ponta Delgada) (IAEA, 1992) et les données isotopiques sur les aquifères superficiels au Maroc (KABBAJ *et al.*, 1978 ; LOUVAT et BICHARA, 1990 ; BOUCHAOU *et al.*, 1995). Les teneurs isotopiques moyennes des précipitations annuelles dans la Chaouia sont donc estimées à $-4,0 \pm 0,5 \text{ ‰}$ (vs V-SMOW) pour l' ^{18}O et à $-23,0 \pm 2 \text{ ‰}$ (vs V-SMOW) pour le ^2H .

Les teneurs en isotopes stables des eaux souterraines montrent une certaine homogénéité des valeurs (groupées entre $-4,8$ et $-3,2$ en ^{18}O et entre $-23,3$ et $-16,8$ en ^2H). La teneur isotopique moyenne des eaux souterraines est de $-3,7 \pm 0,3 \text{ ‰}$ (vs V-SMOW) pour l' ^{18}O et de $-20,1 \pm 1,8 \text{ ‰}$ (vs V-SMOW) pour le ^2H . Ces teneurs en ^{18}O et en ^2H s'inscrivent donc dans la gamme des teneurs des précipitations.

Les compositions isotopiques des eaux souterraines se répartissent sur une droite de pente 8 [$\delta^2\text{H} = (8,3) * \delta^{18}\text{O} + 10,4$, ($n = 12$, $r = 0,76$)] caractéristique des eaux météoriques mondiales [$\delta^2\text{H} = 8 * \delta^{18}\text{O} + 10$] (CRAIG, 1961) (fig. 3). La relation $\delta^2\text{H} = f(\delta^{18}\text{O})$ ne met donc pas en évidence un enrichissement isotopique des eaux de la nappe avant et durant leur infiltration. Les eaux souterraines sont donc d'origine essentiellement météorique.

Aucune relation n'est mise en évidence entre les teneurs en ^{18}O des eaux souterraines et la distance des puits par rapport à la mer. Ces teneurs varient autour de la teneur moyenne des précipitations qui est de $-4,0 \pm 0,5 \text{ ‰}$ (vs V-SMOW) (fig. 4).

Le diagramme illustrant la relation (^{18}O versus Cl^-) montre que les teneurs en ^{18}O restent relativement constantes quelles que soient les teneurs en chlorures

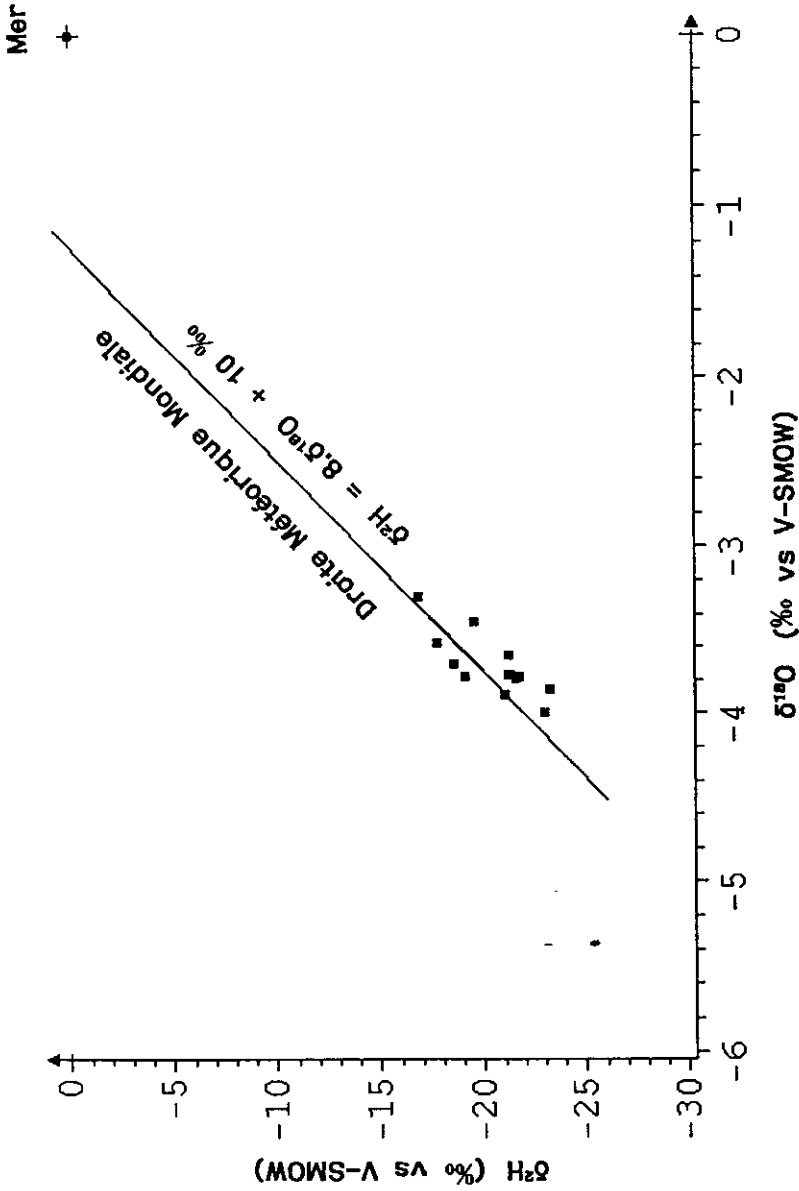
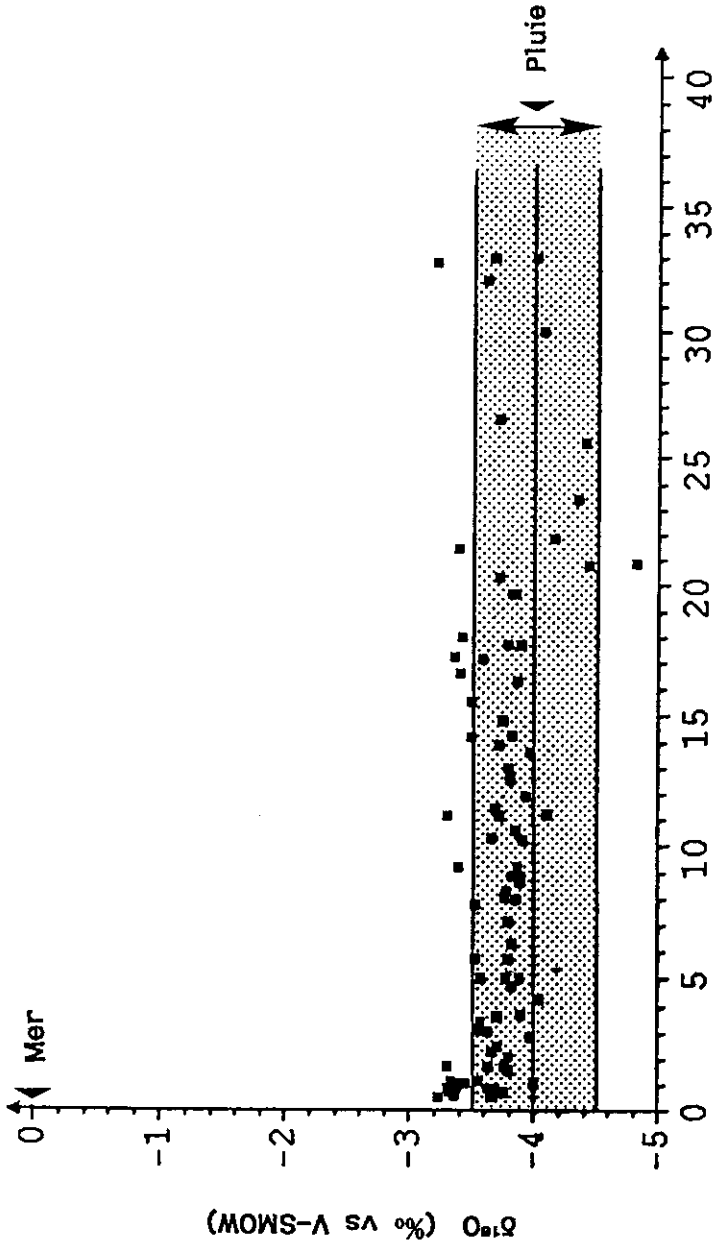


Figure 3 Relation oxygène-18 – deutérium dans les eaux souterraines.
 Relationship between oxygen-18 and deuterium in ground waters.



Distance des puits par rapport à la mer (km)

Figure 4 Teneurs en oxygène-18 et distance des puits par rapport à la mer.
Oxygen-18 content in wells as a function of their distance from the sea.

(fig. 5). Cette relation ne met pas en évidence le phénomène de mélange entre l'eau douce et l'eau de mer puisque tous les points sont situés loin du « pôle mer » et de la droite de mélange. De même tous les points sont situés loin de la relation d'évaporation ^{18}O vs Cl^- d'un bassin à réduction de volume s'évaporant en conditions naturelles, ce qui exclut le phénomène d'évaporation des eaux avant et durant leur infiltration.

La charge saline des eaux a donc pour origine essentielle la dissolution d'espèces minérales chlorurées. Dans le contexte de notre zone d'étude, les chlorures proviennent de fertilisants contenant des impuretés chlorurées, d'embruns marins et des sels de l'altération des roches mères. Ces sels sont lessivés par les eaux de pluie et d'irrigation et entraînés vers la nappe.

Le mécanisme qui régit cette augmentation de la salinité des eaux peut s'expliquer comme suit : dans la région, l'irrigation des plantes par des eaux salées entraîne une salinisation progressive du sol. En effet des études effectuées dans ce sens (DPA El Jadida, 1991, 1992, 1993) montrent que les teneurs en sels du sol augmentent après chaque cycle de culture (de 30 à 90 mg Cl. 100 g^{-1} de sol pour la pomme de terre par exemple). La nature sablo-argileuse du sol de la région favorise le lessivage de ces sels vers la nappe (les nitrates y sont détectés). Il est donc indiscutable que les sels non utilisés par les plantes et particulièrement les chlorures viennent saliniser les eaux de la nappe (TURNER, 1987).

On constate que cette infiltration des eaux vers la nappe ne modifie pas la teneur des eaux en ^{18}O et en ^2H . En effet on sait que l'extraction de l'eau du sol par les racines n'est pas isotopiquement fractionnante (BARIAC *et al.*, 1989). Par contre les racines sont fractionnantes pour les sels et en particulier pour les chlorures. Donc la teneur du sol en sels augmente sans qu'il y ait d'enrichissement isotopique des eaux. Le recyclage des eaux souterraines par l'irrigation (= sur la moitié de la superficie de la région étudiée) depuis au moins trente ans et l'infiltration naturelle à partir des précipitations favorisent le lessivage des sels contenus dans les sols. Les solutions salines percolent ensuite et rejoignent la nappe.

3.2.2 Isotopes radioactifs : ^3H , ^{14}C

L'interprétation porte sur l'analyse en tritium d'une vingtaine d'échantillons prélevés durant l'été 1994, dans des puits de diverses profondeurs répartis sur l'ensemble de la région étudiée. Certaines eaux ont fait aussi l'objet d'analyses en carbone-14. Les résultats analytiques sont présentés dans le tableau 1.

Les teneurs en tritium dans les puits échantillonnés varient entre 0 et 9 UT. Pour la majorité des eaux analysées l'activité en tritium est significative et varie entre 2 et 9 UT. Pour certains puits côtiers et certaines zones à salinité élevée, on note que les teneurs en tritium sont importantes (groupées entre 6 et 9 UT), ce qui montre le caractère récent de ces eaux et l'importance de la recharge dans ces zones (l'activité en ^{14}C moderne et présence des nitrates dans les eaux). Par une approche quantitative et en utilisant le modèle exponentiel (HUBERT et OLIVE, 1995) le temps de séjour moyen des eaux de la nappe a été estimé à 50 ± 20 ans.

Les eaux de trois prélèvements ne contenant pas de tritium mesurable (≤ 1 U.T) ont été analysées en vue de leur datation par le ^{14}C . Le temps de séjour moyen de ces eaux est supérieur à 100 ans. Ces eaux suivent des chemine-

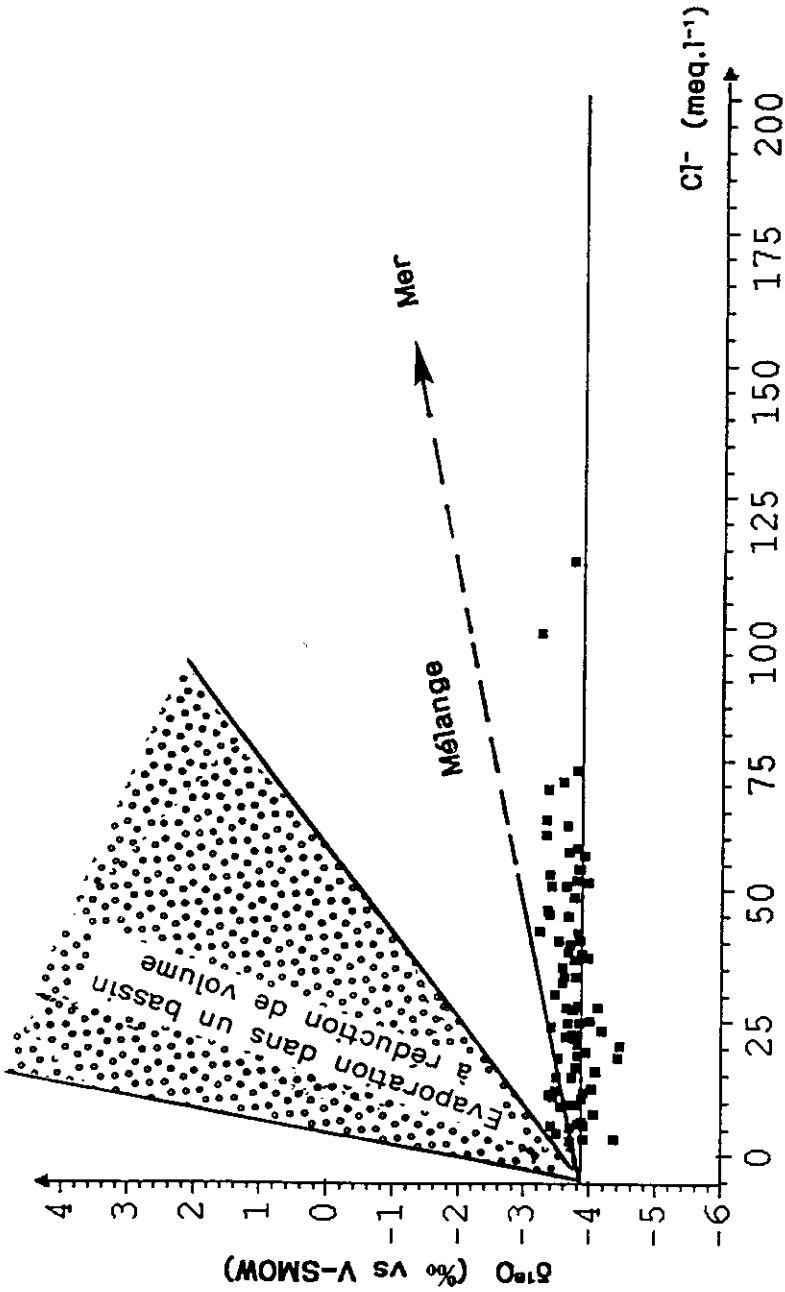


Figure 5 Teneurs en chlorures et en oxygène-18 dans les eaux souterraines. Oxygen-18 and chloride contents of ground waters.

ments plus lents dans des zones particulières, limitées à des hétérogénéités géologiques locales.

L'examen des teneurs en tritium et en carbone-14 montre une certaine dispersion des valeurs dans la nappe, cette hétérogénéité est déjà mise en évidence par les teneurs en chlorures et en nitrates. Ceci laisse supposer que l'hétérogénéité de la recharge est liée aux modes d'irrigation, aux propriétés d'infiltration dans le soi et à l'épaisseur de la zone non saturée. La détermination d'âges récents par les isotopes radioactifs (^3H , ^{14}C) exclut l'hypothèse de l'existence d'une paléosalinité héritée d'une transgression marine (eaux connées dans l'aquifère) (SHIVANNA *et al.*, 1993).

4 – CONCLUSIONS

L'utilisation de l'approche chimique (Cl^- , Br^-) et isotopique (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C) nous a permis d'exclure l'hypothèse d'une augmentation de la salinité des eaux par dissolution de l'halite, ou par évaporation des eaux avant et durant leur infiltration. Cette augmentation de la salinité des eaux ne semble pas provenir d'une contamination marine. La salinité élevée des eaux liée essentiellement aux chlorures a pour origine le lessivage de fertilisants chlorurés, des sels non utilisés par les plantes (particulièrement les chlorures) et des embruns marins. Le recyclage des eaux souterraines par irrigation favorise cette salinisation.

Dans les puits côtiers le débit actuel de l'exhaure est à la limite des possibilités d'exploitation de la nappe. Des précautions doivent être prises pour éviter le danger d'une invasion marine qui pourrait nuire gravement à l'économie de la région. De même des mesures doivent être conduites afin d'améliorer les pratiques agricoles en utilisant de nouvelles techniques d'irrigation moins consommatrices d'eau et en optant pour une fertilisation raisonnée (engrais, pesticides,...).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BARIAC, T., JUSSERAND, C., MARIOTTI, A. (1989). Évolution spatio-temporelle de la composition isotopique de l'eau dans le continuum sol-plante-atmosphère. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 54 : 413-424.
- BOUCHAOU, L., CHAUVE, P., MANIA, J., MUDRY, J., MICHELOT, J.L. (1995). Apports des traçages artificiel et naturel à la connaissance des circulations et des zones de recharge en région semi-aride : Cas de l'Atlas de Beni Mellal (Maroc). *Rev. Sci. Eau*, 8 : 43-55.
- CABRAL, J.M.P., CARREIRA, P.M., VIEIRA, M.C. (1991). Study of groundwater salinization in Algarve, Portugal, using environmental isotope techniques. *Isotope Techniques in Water Resources Development. International Atomic Energy Agency*, Vienna, 694-697.
- COLEMAN, M.L., SHEPHERD, T.J., DURHAM, J.J., ROUSE, J.E., MOORE G.R. (1982). Reduction of water with Zinc for hydrogen isotope analysis. *Anal. Chem.*, 54 : 993-995.

- COTECCHIA, V., TAZIOLI, G.S., MAGRI, G. (1974). Isotopic measurements in research on seawater ingression in the carbonate aquifer of the Salentine Peninsula, southern Italy. *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, vol. I, *International Atomic Energy Agency*, Vienna, 445-463.
- CRAIG, H. (1961). Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133 : 1702-1703.
- CRAIG, H. (1961). Standards for reporting concentrations of deuterium and oxygen-18 in natural waters. *Science*, 133 : 1833-1834.
- DPA El Jadida (1991). Rapport d'activité. *Direction Provinciale de l'Agriculture d'El Jadida*, Maroc, 56 p.
- DPA El Jadida (1992, 1993). Rapport d'activité. *Direction Provinciale de l'Agriculture d'El Jadida*, Maroc, 82 p.
- DRPE (1994). Étude hydrogéologique du système aquifère de la Chaouia côtière. Phase I : synthèse hydrogéologique, hydrochimique et programme de travail de la phase II, rapport n° 2, *Direction de la Recherche et de la Planification des Eaux*, Rabat, Maroc, 45 p.
- EPSTEIN, S., MAYEDA, T.K. (1953). Variations of ^{18}O contents of waters from water sources. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 4 : 213-224.
- FONTES, J.CH. (1971). Un ensemble destiné à la mesure de l'activité du radiocarbone naturel par scintillation liquide. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.*, 13 (1) : 67-86.
- GASPARINI, A. (1989). Hydrochimie et géochimie isotopique de circulations souterraines en milieu volcanique sous climat semi-aride (Grande Canarie, Iles Canaries). *Thèse de Doct. Univ. Paris sud*, 261 p.
- GOMEZ-MARTOS, M., ALBERT-BELTRAN (1993). Determination of salinity in the Benisa depression (Alicante). *Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere. International Atomic Energy Agency*, Vienna, 527-530.
- HASHASH, A., ARANYOSSY, J.F., (1995). Mise en évidence de l'origine de la salinité des eaux de l'aquifère de Sarafand (sud-Liban). *Inter. Ass. Hydr. Sci.*, 232 : 35-41.
- HUBERT, P., OLIVE, PH. (1995). Modélisation par une loi gamma de la distribution des temps de séjour de l'eau dans les systèmes hydrogéologiques en régime permanent. *Tracer Technologies for Hydrological Systems, Int. Ass. Hydr. Sci.*, 229 : 211-217.
- IAEA (1992). Statistical Treatment of Data on Environmental Isotopes in Precipitation. *International Atomic Energy Agency*, Vienna. *Tech. Rep. Ser.*, 331 : 100-111.
- KABBAJ, A., ZERYOUHI, I., CARLIER, Ph., MARCE, A. (1978). Contribution des isotopes du milieu à l'étude de grands aquifères du Maroc. In « *Isotope hydrology 1978* », II : 491-524.
- KAUFMAN, S., LIBBY, W. (1954). The natural distribution of tritium. *Phy. Rev.*, 93 (6) : 1337-1344.
- LOUVAT, D., BICHARA, S. (1990). Étude de plusieurs systèmes aquifères du Maroc à l'aide des isotopes du milieu. *Rapport IAEA, Vienne*, 30pp.
- MARJOUA, A. (1995). Approche géochimique et modélisation hydrodynamique de l'aquifère de la Chaouia côtière (Maroc) : origines de la salinisation des eaux. *Thèse de Doct. Univ. P.-M. Curie*, Paris VI, 179 p.
- MEYBECK, M. (1983). Influences des précipitations atmosphériques sur la composition chimique des eaux de surface. In « Les fleuves et le cycle géochimique des éléments ». *Thèse de Doct. Univ. P.-M. Curie*, Paris, : 1-30.
- MERLIVAT, L., VUILLAUME, Y. (1970). Caractérisation de l'intrusion marine, dans la nappe de la Crau, à l'aide du deutérium. *Bull. Bur. Et. Géol. Min.*, Section II, 2 : 81-85.
- NOAKES, J.E., KIM, S.M., AKERS, L.K. (1967). Recent improvements in benzene chemistry for radiocarbon dating. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 31 : 1094-1096.
- RITTENHOUSE, G. (1967). Bromid in oil field waters and use in determining possibilities of origin of these waters. *Bull. Am. Assoc. Pet. Geol.*, 51 : 2430-2440.
- SHIVANNA, K., NAVADA, S.V., NAIR, A.R., RAO, S.M. (1993). Isotope and geochemical evidence of past seawater salinity in Midnapore groundwaters. *Isotope techniques in the study of past and current environmental changes in the hydrosphere and the atmosphere. International Atomic Energy Agency*, Vienna, 199-212.

TURNER (1987). Environmental isotope hydrology of salinized experimental catchments. *J. of Hydrol.*, 94 : 89-107.

YOUNSI, A.K. (1994). Étude des mécanismes des intrusions marines vers le système aquifère compris entre oued Oum Rbia et

Bir Jdid : Hydrogéologie, Hydrodynamique, Hydrochimie et modélisation mathématique. *Thèse de Dip. Et. Sup.*, Univ. Chouaïb Doukkali, Faculté des Sciences d'El Jadida, Maroc, 127 p.