

CARACTERISATION ISOTOPIQUE DES EAUX DU GRANITE ET DE L'AUREOLE METAMORPHIQUE D'OULMES (MAROC CENTRAL)

Ph. Olive¹, A. Dassargues², O. Grière³, I. Ruthy², A.El Youbi⁴

¹ Professeur émérite, 1C Avenue du Léman, 74200 Thonon-Les-Bains, France.

² Hydrogéologie et Géologie de l'Environnement, Dept GéomaC, Université de Liège, B52/3 Sart-Tilman, 4000 Liège, Belgique.

³ Pôle Environnement, Saunier & Associés, 205 avenue Clemenceau, 92024 Nanterre Cedex, France.

⁴ Eaux Minérales d'Oulmès, ZI de Bouskoura, Casablanca, Maroc.

corresponding author: Ph. Olive, olive87@wanadoo.fr

Résumé. Dans le bassin d'Oulmès sont exploitées et commercialisées par la société des Eaux Minérales d'Oulmès qui constitue le plus gros embouteilleur d'eaux minérales du Maroc :Sidi Ali Lala Haya.

Le pluton granitique, d'âge hercynien, d'Oulmès est un granite à biotite et muscovite. Il présente une fracturation très marquée et un système filonien très développé. L'altération, très poussée, se manifeste par une arénitisation généralisée qui s'étend en profondeur. Le kaolin caractérise cette altération d'origine hydrothermale. L'eau de Lalla Haya émerge dans les granites à la faveur de fissures à une température de 42°C, il s'agit d'une eau carbo-gazeuse, bicarbonatée sodique.

L'auréole métamorphique générée par ce granite englobe la formation des schistes en dalles, roches métapélitiques cambro-ordoviciennes homogènes. L'eau de Sidi Ali est faiblement minéralisée, elle aussi bicarbonatée sodique avec une pression partielle de CO₂ non négligeable. L'utilisation de l'outil isotopique a permis de préciser un certain nombre de points concernant la recharge et l'écoulement des eaux souterraines dans le bassin d'Oulmès.

Les teneurs en ¹⁸O d'une vingtaine de sources situées autour du site et étagées entre 300 et 2000 m s'alignent suivant un gradient de -0,21 ‰/100 m. La zone de recharge commune des eaux du granite et des schistes en dalle se situe vers 1100/1300 m. De plus le rapport ¹⁸O/D pour ces deux types d'eau indique un appauvrissement en ¹⁸O de près de 1 ‰ dû à un échange avec le CO₂ magmatique.

Le temps de séjour moyen des eaux dans l'auréole métamorphique est de quelques dizaines d'années (présence de ³H thermonucléaire) et, au moins, de plusieurs centaines d'années dans les eaux du massif granitique (absence de ³H thermonucléaire). De la remontée de CO₂ magmatique, à ¹⁴C mort, il résulte que la teneur en ¹⁴C du carbone minéral dissous est quasiment nulle et qu'il vieillit, plus ou moins, les activités en ¹⁴C du carbone minéral dissous des eaux de l'auréole.

En conclusion l'eau qui s'infiltré dans les fractures du massif granitique où elle se réchauffe suivant un gradient géothermique d'environ 40°C/km. Comme le géothermomètre Na/K indique une température de 165 °C, elle atteint une profondeur de l'ordre de 2 à 3 km. Elle s'est enrichie en CO₂ magmatique et remonte par effet de gaz lift et donne naissance à Lalla Haya. Cette remontée ne se limite pas au seul massif granitique mais s'étend à l'auréole métamorphique en profitant des fractures du massif et des filons de quartz en provenance du batholite où elle se mélange, en proportions variables, aux eaux récentes qui se sont infiltrées directement sur les schistes en dalles.

Ce sont ces fluides hydrothermaux qui ont donné naissance aux dépôts hydrothermaux autrefois exploités en mines (Sn).

Keywords- Oulmès. Eaux minérales. Hydrogéologie générale. Hydrologie isotopique: ¹⁸O, D, ¹³C, ³H, ¹⁴C. Datation des eaux. CO₂ magmatique

I. Introduction

Dans le bassin d'Oulmès, situé dans le Plateau Central au nord de la Meseta marocaine qui se termine au niveau d'une ligne Rabat- Meknès (Fig.1), sont exploitées et commercialisées par la société des Eaux Minérales d'Oulmès- le plus gros embouteilleur d'eaux minérales du Maroc- les eaux de Sidi Ali et de Lala Haya.

Ce plateau est situé à une altitude légèrement supérieure à 1000 m dans une zone au climat semi-aride. La température moyenne annuelle et les précipitations moyennes annuelles sont respectivement 16°C et 700 mm pour la période de 1972 à 2000. La saison humide s'étend d'octobre à avril avec 92% des précipitations observées durant cette période.

En plus des activités liées à l'embouteillage des eaux minérales, la région est connue pour ses cultures fruitières fournissant des produits en primeur sur les marchés occidentaux. Ces activités pourraient constituer un risque à moyen ou long terme pour la qualité des eaux souterraines. D'autre part, les eaux usées de la ville d'Oulmès ne sont pas traitées et se ré-infiltrent en partie dans le sous-sol. Il est donc prioritaire et primordial d'appréhender autant que faire ce peu les parcours et temps de séjour de l'eau en souterrain pour permettre une gestion future de la protection des sources et plus généralement de la ressource en eau souterraine dans la région.

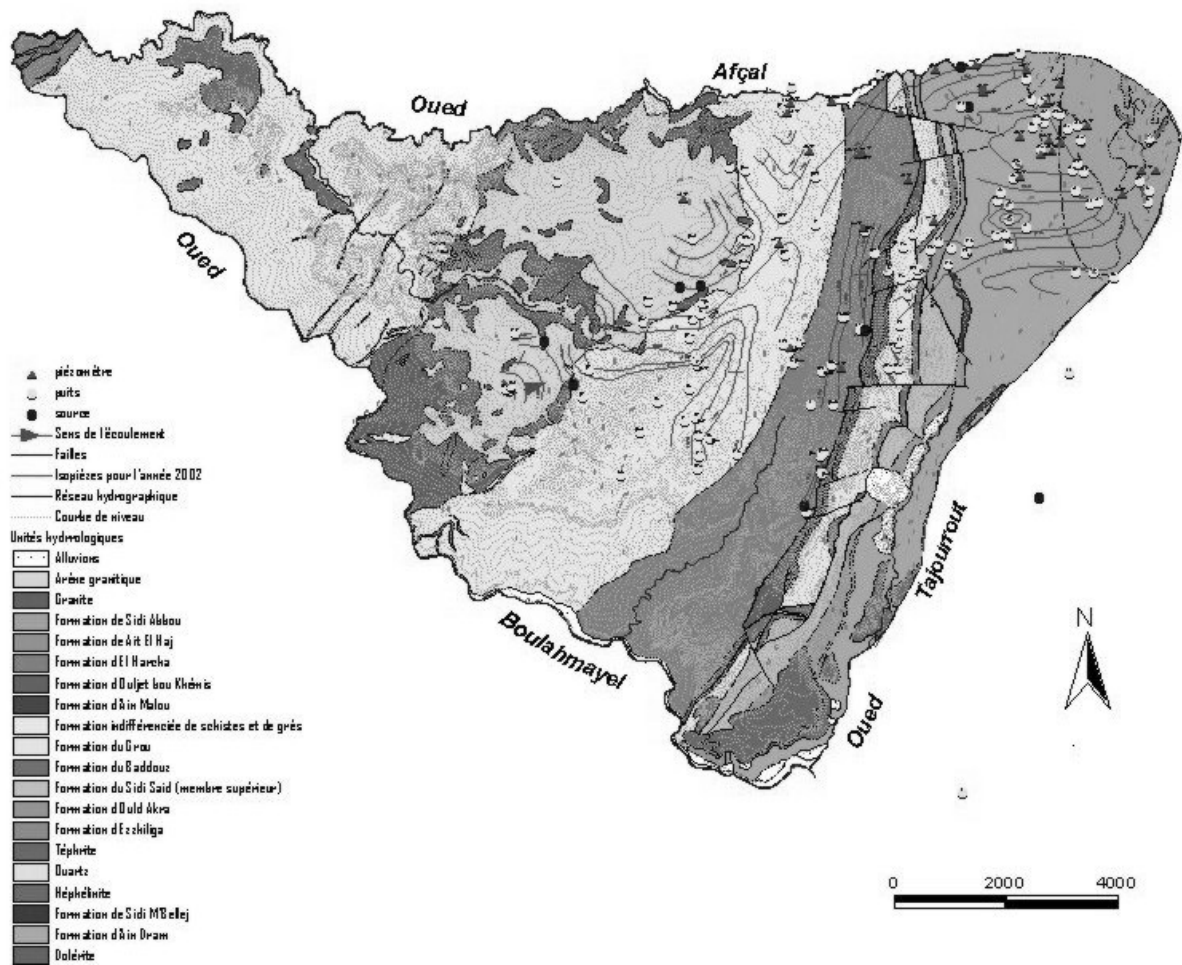


Fig. 2 : Image simplifiée de la carte hydrogéologique réalisée par l'ENIM et l'ULg (Orban et al., 2005).

Cette formation est composée de calcaires gréseux à alternance de schistes et grès du Viséen supérieur à moyen (Tahiri, 1991). Devrait également être considérée comme zone d'infiltration, mais dans une moindre mesure, la formation dévonienne de Aïn Dram, affleurant dans la zone d'altitude égale ou supérieure à 1100 m et composée de schistes à rares bancs de nodules gréseux ou carbonatés.

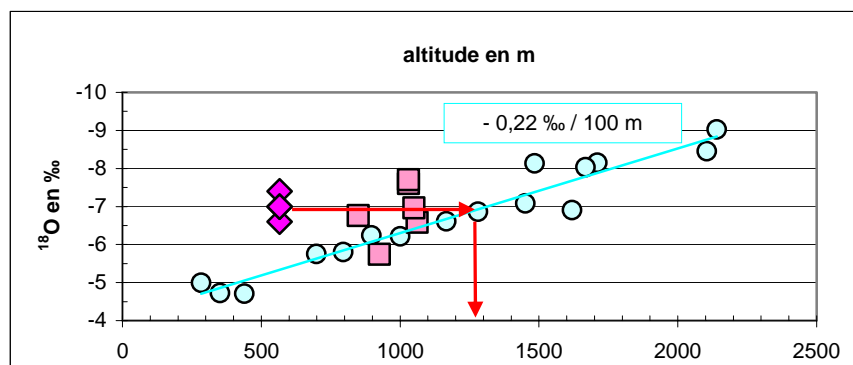


Fig. 3 : Gradient isotopique altitudinal. Ronds bleus : teneur en ^{18}O de quinze puits ou sources dont l'altitude va de 300 à 2100 m autour du plateau d'Oulmès et dont l'emplacement est reporté Fig1 Rectangles violets : eaux de type Sidi Ali et losanges violets : Lalla Haya

IV. Oxygène-18 et deutérium : échanges isotopiques avec du CO₂ magmatique.

Sur la Fig.4 les quinze puits ou sources se répartissent sur la droite $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 9 \text{ ‰}$, très proche de la classique World Meteoric Water Line (WMWL : $\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10 \text{ ‰}$). Ce graphique indique que l'eau des quinze sources ou puits n'a pas été évaporée, sa composition est donc bien représentative de la pluie, de même les eaux du site d'Oulmès ne sont pas non plus évaporées.

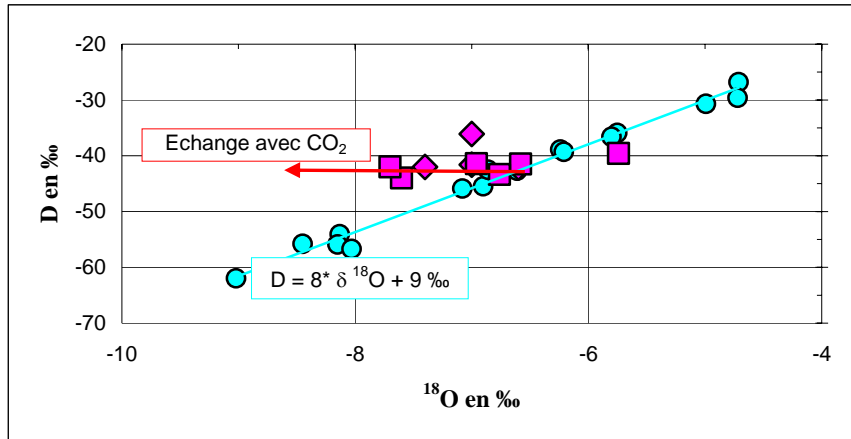
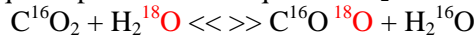


Figure 4 : Echanges isotopiques en ¹⁸O entre H₂O d'Oulmès et CO₂ magmatique où le CO₂ s'enrichit et l'eau s'appauvrit d'environ 1 ‰ par simple bilan. Ronds bleus : teneur en ¹⁸O de quinze puits ou sources dont l'altitude va de 300 à 2100 m sur un transect NW/SE aboutissant à Oulmès. Rectangles violets : eaux de type Sidi Ali et losanges violets : Lalla Haya

Par contre ces dernières se situent à gauche de la WMWL, ce qui traduit un échange isotopique qui modifie la composition en ¹⁸O de l'eau. Echange qui ne peut avoir lieu qu'entre H₂O et CO₂ :



Le facteur de fractionnement à l'équilibre ϵ est 30 ‰ à 100°C :

$$\epsilon^{18}O_{CO_2-H_2O} = \left[\frac{{}^{18}O/{}^{16}O}{{}^{18}O/{}^{16}O} \right]_{CO_2} \approx 1,030$$

Ce fractionnement est tel, dans cet échange, que le CO₂ s'enrichit et l'eau s'appauvrit d'autant. Pour les eaux d'Oulmès l'appauvrissement est d'environ 1 ‰.

Un tel échange implique une concentration très importante en CO₂ dont la provenance est à rechercher dans le dégazage magmatique. Si cet échange n'est pas trop surprenant pour les eaux carbogazeuses de Lalla Haya, on remarquera que les eaux de type Sidi Ali sont elles aussi affectées par cet échange avec du CO₂ profond. Ainsi un forage de reconnaissance réalisé dans le secteur de la source Sidi Ali dans la formation des schistes en dalles (Ordovicien) a permis de mettre évidence la présence de CO₂ à une concentration de l'ordre de 2 g/L.

Il se produit donc des remontées de CO₂ profond au travers des formations schisteuses. Différentes émanations gazeuses se retrouvent au niveau de quelques sources dans le secteur telle par exemple la source Ain Karrouba.

V. Eléments majeurs

Sur le Tab. 1 on a reporté les valeurs moyennes, ainsi que leurs variations, sur une vingtaine d'analyses des éléments majeurs, réalisées durant la décennie 1995/2005, sur les eaux de Sidi Ali et Lalla Haya.

Si ces deux types d'eaux font partie de la même famille : celle des eaux bicarbonatées sodiques, elles diffèrent largement d'un point de vue quantitatif : conductivité huit fois plus grande pour Lalla Haya par exemple. La température va du simple au double, indiquant un parcours plus profond pour Lalla Haya. Nitrates et sulfates présentent de grandes variations dues à un milieu réducteur qui est modifié lors du prélèvement.

Mais l'originalité des eaux d'Oulmès est due à un mélange avec de l'eau de mer incluse dans les sédiments de l'aquifère et la dissolution de CO₂ profond.

1995/2005		Sidi Ali	Lalla Haya
Terrain :	°C	~ 20	40 ± 2
	pH	6,50 ± 0,30 (5 %)	6,10 ± 0,15 (2 %)
	µS/cm	280 ± 20 (7 %)	2200 ± 176 (8 %)
Laboratoire : teneurs en mg/L et variations en %	Ca	12,5 ± 1,9 (15 %)	168 ± 5 (3%)
	Mg	8,6 ± 3,7 (43 %)	50,1 ± 7,3 (15 %)
	Na	22,8 ± 5,1 (22 %)	254 ± 31 (12 %)
	K	3,0 ± 0,7 (23 %)	25,3 ± 1,6 (6 %)
	HCO ₃	75,3 ± 15,3 (20 %)	1010 ± 60 (6 %)
	Cl	19,2 ± 5,0 (26 %)	290 ± 14 (5 %)
	SO ₄	47 ± 30 (64 %)	16,3 ± 8,4 (52 %)
NO ₃	0,2 ± 0,1 (50 %)	0,2 ± 0,1 (50 %)	

Tab. 1 : Valeurs moyennes des éléments majeurs sur les eaux de Sidi Ali et Lalla Haya durant la période 1995/2005. Entre parenthèses figure la marge de variation exprimée en %.

V. Mélange avec de l'eau de mer et dissolution de CO₂ magmatique.

La Fig. 5 traduit le fait que les teneurs en chlorures et en sodium des deux types d'eaux résultent d'un mélange entre l'eau infiltrée à 1100 m et de l'eau de mer fossilisée dans les sédiments de l'aquifère: environ 2 ‰ pour Sidi Ali et 20 ‰ pour Lalla Haya. Notons que les très faibles proportions de ce mélange, où l'eau de mer présente une teneur voisine de 0 ‰ en ¹⁸O, ne modifient pas la teneur en ¹⁸O des eaux souterraines.

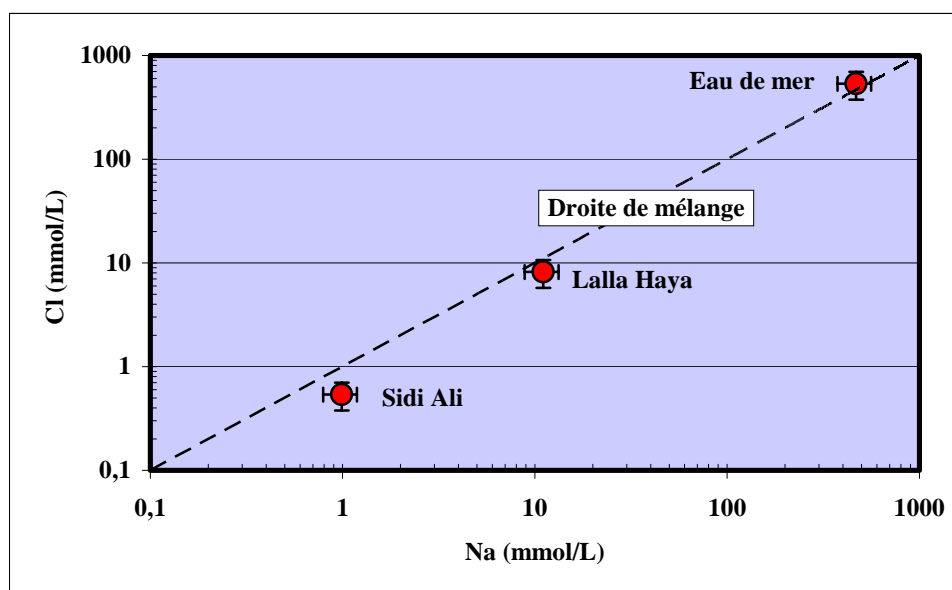


Fig. 5 : les teneurs en Cl et en Na, exprimées en mmol/L, résultent d'un mélange, à 2 ‰ pour Sidi Ali et 20 ‰ pour Lalla Haya, entre de l'eau de mer restée dans le sédiment et l'eau de la recharge.

Le système du carbone est représenté sur le Tab. 2. On constate le rôle joué par du CO₂ d'origine magmatique. En effet dans un sol la pression partielle de CO₂ est de 10 à 100 fois celle du CO₂ atmosphérique. C'est d'ailleurs les valeurs rencontrées dans les eaux du Maroc (Winckel, 2002). Au dessus de 100 fois, comme pour Lalla Haya et d'autres sources carbogazeuses du Maroc (Winckel, 2002), on doit faire appel à du CO₂ d'origine profonde.

1995/2005		Sidi Ali	Lalla Haya
Terrain	°C	20	40
	pH	6,5	6,1
	Alcalinité (mécq/L)	1,23	16,56
Calculs	C _T (mmol/L)	2,17	42.41
	H ₂ CO ₃ (% de C _T)	43	61
	HCO ₃ ⁻ (% de C _T)	67	39
	pCO ₂ équi / pCO ₂ atm	80	3780

Tab. 2: le système du carbone dans les eaux du site d'Oulmès.

C_T = carbone minéral total dissous exprimé en millimoles de carbone par litre d'eau.

Rapport de la $pCO_{2\text{équi}}$ = pression de CO₂ en équilibre avec le C_T sur la pCO₂ atmosphérique.

Les isotopes du carbone, ¹³C stable et ¹⁴C radioactif, permettent de quantifier la part de ce CO₂ profond. Sur le Tab. 3 sont reportés les résultats d'une campagne réalisée en août 2004 sur différents forages de reconnaissance dans le secteur de la source Sidi Ali et la source Lalla Haya.

Août 2004	³ H (UT)	¹⁴ C _T (pCm)	¹³ C (‰)
Lalla Haya	≤ 1,5	0,6 ± 0,2	- 2,12
Forage F6		77,6 ± 1	- 16,5
Forage F5	≤ 1,9	48,9 ± 0,8	- 11,7
Forage PZ5	≤ 2,4	45,1 ± 0,6	- 11,9
CO ₂ du sol		100	- 22
CO ₂ magmatique		0	- 3,5
Carbonate des schistes en dalles			- 9,6

Tab. 3 : tritium (³H) en Unité Tritium (UT), activité en ¹⁴C exprimée en pourcents de carbone moderne (pCm), teneur en ¹³C exprimée en pour mille (‰).

En italique : valeurs classiquement retenues

Les teneurs en ¹³C et en ¹⁴C permettent de distinguer un CO₂ d'origine biologique produit dans le sol à -22 ± 2 ‰ et à 100 pCm d'un CO₂ d'origine magmatique à -5 ± 2 ‰ et à 0 pCm. A Lalla Haya une mesure a été réalisée sur le gaz : -3,5 ‰ (Winckel, 2002).

Le diagramme de la Fig. 6 indique clairement que le CO₂ magmatique intervient, tant pour le ¹³C que pour le ¹⁴C, pour 100 % dans le C_T de Lalla Haya et de 30 à 50 % pour les eaux de type Sidi Ali. Ce qui veut dire, aussi, que la remontée du CO₂ magmatique ne se limite pas au seul batholite granitique mais intéresse aussi, par les fractures, sa couverture sédimentaire.

Du CO₂ peut aussi être produit, à haute température, par décarbonatation. Ce processus est ici de faible importance car, d'une part la teneur en carbonates des schistes en dalles est très faible, < 1 %, et comme sa teneur en ¹³C est -9,6 ‰ et que le CO₂ produit est enrichi de 1 à 2 ‰ par rapport au carbonate précurseur, ce qui entraînerait un CO₂ avec un ¹³C d'environ - 8 ‰ bien plus négatif que le CO₂ mesuré à - 3,5 ‰.

Ce vieillissement du C_T des eaux de type Sidi Ali par le CO₂ magmatique n'empêche pas que l'on a affaire à des eaux récentes. En effet des eaux âgées de 200 et 500 ans présenteraient des activités en ¹⁴C abaissées respectivement de 2 et 6 pCm, ce qui diminuerait sensiblement la qualité d'ajustement de la droite de corrélation de la Fig.6.

Finalement on peut avancer, pour les eaux de type Sidi Ali un âge inférieur à 200 ans. On notera d'autre part les 0,6 pCm mesurés sur les eaux de Lalla Haya résultent probablement d'un mélange avec de l'eau souterraine peu profonde à 100 pCm. Dans ce cas l'apport d'eau peu profonde reste inférieur à 1 %.

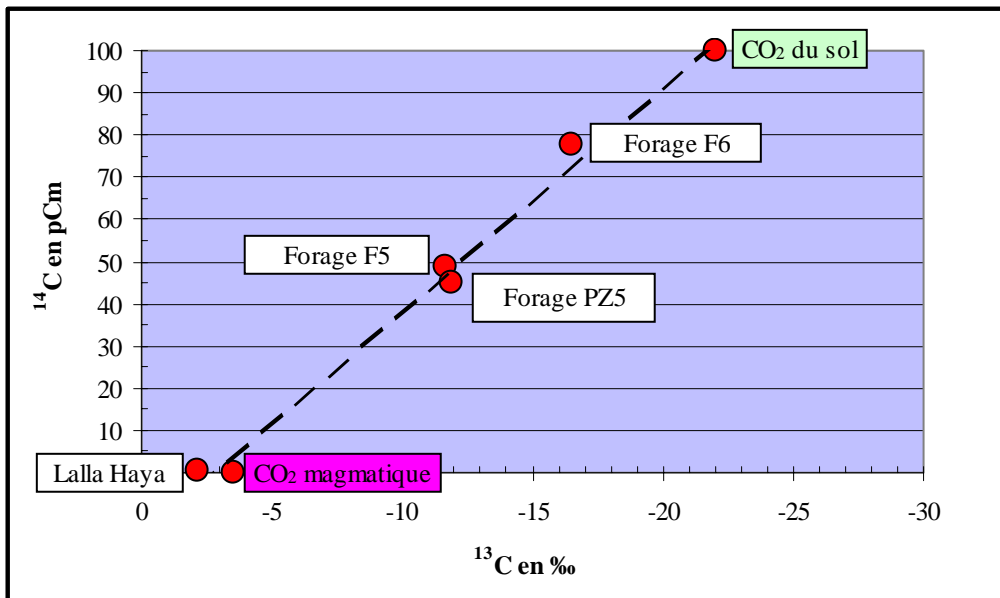


Fig.6 : Teneurs en ^{13}C , exprimées en ‰, et en ^{14}C , exprimées en pCm, du carbone minéral total dissous des eaux de Lalla Haya et de trois forages voisins de Sidi Ali ainsi que des deux pôles : CO_2 du sol et CO_2 magmatique

VI : Datation des eaux par le tritium

Sur la *figure 7* on a représenté, pour la période 1950/2003 les teneurs en ^3H dans les précipitations. Les essais thermonucléaires aériens ont débuté en 1952 pour atteindre un maximum de 3000 UT en 1963. Seules des eaux âgées de 50 ans atteindraient des valeurs mesurables : 17 UT en 2005 et 30 UT en 2013, 50 ans après le pic de 1963 :

$$C_T = C_0 * e^{-\left[\frac{T}{18}\right]}$$

Avec, C_0 teneur en ^3H dans les précipitations, C_T teneur en ^3H après T années.

Compte tenu des valeurs mesurées, Tab. 3, toutes inférieures au seuil de mesure d'environ 2 UT, on peut en conclure que les eaux d'Oulmès sont âgées de plus de 50 ans. Plus jeunes les teneurs auraient été supérieures à 10 UT en 2004.

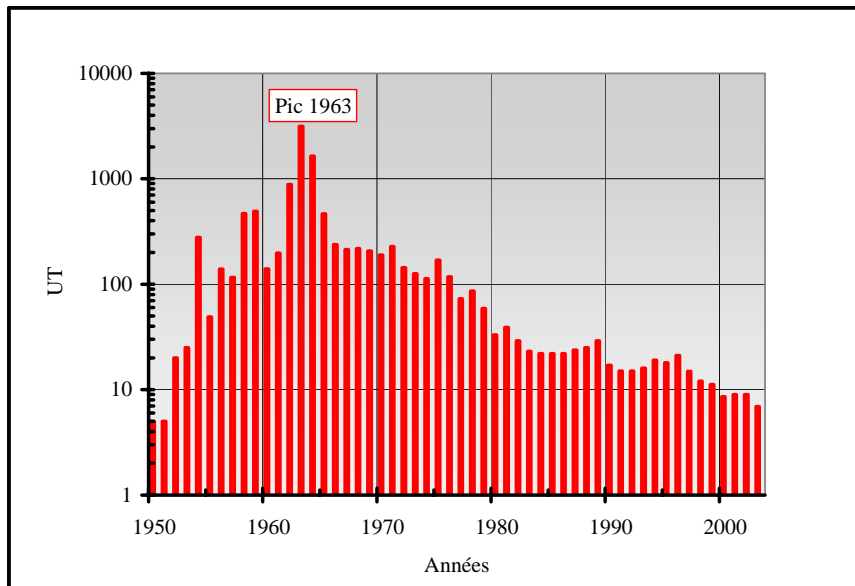


Figure 7 : teneurs en tritium (^3H), exprimées en Unité Tritium (UT) de 1950 à 2003 dans les précipitations,

VII. Estimations de la vitesse effective et du bilan hydrique

Dans l'aquifère sédimentaire fracturé composé principalement de schistes localement gréseux et de quartzites, des conductivités hydrauliques de l'ordre de 1.10^{-5} m/s ont été déterminées (Orban *et al.*, 2005) sur la base d'une série de pompages d'essai réalisés en divers puits. On peut considérer que ces points correspondent aux zones les plus perméables. Une valeur moyenne de conductivité hydraulique (K) de 1.10^{-6} m/s et une porosité effective de transport (n_e) de l'ordre de 1% (porosité de fissure) sont estimées pour représenter (en première approche) les propriétés de ce massif fissuré.

L'altitude de la zone de recharge, établie à partir des données de l'oxygène-18 (Fig 3) est comprise entre 1100 et 1300 m et le parcours moyen (L) de l'eau infiltrée dans ces zones serait estimé de l'ordre de 5000 à 8000 m. Dans ce cas, le gradient ($\Delta h/L$) moyen de ce parcours est compris entre 0,06 et 0,0125.

En appliquant la loi de Darcy exprimant une vitesse effective,

$$v_e = \frac{K \cdot \Delta h}{n_e \cdot L}$$

on trouve une valeur comprise entre $1,25 \cdot 10^{-6}$ et 6.10^{-6} m/s, soit de 40 à 190 m par an.

Avec une telle vitesse moyenne, sur un trajet moyen de 5000 à 8000 m, on en déduit un âge moyen des eaux de Sidi Ali, à leur émergence, compris entre 26 et 200 ans.

Le calcul du bilan hydrologique dans le plateau d'Oulmès a été établi selon la méthode des bilans de Thornthwaite (Dadi, 1998). L'évapotranspiration réelle avait été estimée à 318.9 mm/an, l'infiltration à 381.9 mm/an, les précipitations moyennes annuelles étaient de 700 mm (1972-2001). Cependant des calculs basés sur des données plus récentes et plus fiables ont été réalisés par Elbatloussi et Laziri (2004) en simulant par le sous-modèle hydrologique d'EPIC-MAILLE (Erosion Productivity Impact Calculator) les différents termes de l'équation du bilan hydrologique. Elles ont trouvé des fourchettes d'infiltration dépendantes de la lithologie des formations géologiques mais comprises entre 150 et 190 mm/an/m² pour les zones correspondant à des altitudes supérieures à 1100 m sur le plateau. La partie correspondant à la formation calcaire de Sidi Abbou couvre de l'ordre de 6 km² et celle de Ain Dram (schistes à nodules gréseux ou calcareux) de 10,5 km². Cette dernière formation est très schisteuse et d'autre part dans les zones concernées par la formation calcaire, des pompages peu profonds importants ont lieu (zone fruitière) et localement le gradient piézométrique superficiel semble dirigé vers le Nord. Par conséquent, la valeur de l'infiltration efficace en profondeur pourrait être réduite de moitié et être estimée à une valeur réaliste de 80 mm/an/m². Ces estimations mènent à une valeur globale d'infiltration utile à l'alimentation des sources de l'ordre de $1,3 \cdot 10^6$ m³/an. Ce chiffre peut être utilement comparé aux débits actuellement connus, évalués à près de 10^6 m³/an (20 L/s pour Lalla Haya et 11 L/s pour Sidi Ali).

VIII. Géothermomètre et profondeur de circulation.

Compte tenu des teneurs en Na, dues à une participation de 2 % d'eau de mer fossile, nous n'utiliserons pas le rapport Na/K mais la teneur en silice qui, de plus, varie peu avec la pression. Pour Lalla Haya, la teneur en SiO₂ (Cidu et Bahaj, 2000) est de 152 mg/L (= $2,5 \cdot 10^{-3}$ mol/L), soit une température de :

$$\log(SiO_2) = -\frac{1306}{T} + 0,38, \text{ soit } T = 438 \text{ }^\circ\text{K} = 165 \text{ }^\circ\text{C}$$

Le gradient géothermique étant compris entre 40 et 55 °C/km (Rimi, 1999), la profondeur atteinte par les eaux de Lalla Haya, dont la température à l'émergence est de 42 °C, est de:

$$\text{profondeur} = \frac{165 - 42}{40 \text{ à } 55} \approx 2 \text{ à } 3 \text{ km}$$

VII. Conclusions

L'apport de la géochimie, notamment isotopique, sur le site d'Oulmès, a permis de mettre en évidence un certain nombre de processus :

1) les eaux de Lalla Haya, à 560 m d'altitude, dans le cœur du batholite de granite et celles de Sidi Ali autour de 1000 m dans la couverture sédimentaire, se sont infiltrées à une *altitude commune comprise entre 1100 et 1300 m* dans des massifs calcaires situés probablement à plusieurs km au sud de la localité d'Oulmès (Fig.3).

2) Durant leur trajet souterrain les eaux, d'abord probablement de type bicarbonaté-calcique dans la zone de recharge, s'enrichissent progressivement en Cl et Na en se mélangeant faiblement (< 1 %) au contact de l'eau de mer piégée dans les sédiments d'origine marine jusqu'à devenir de type chloruré-sodique (figure 5).

3) Le pluton granitique forme une barrière sub-verticale perpendiculaire au sens de l'écoulement des eaux et oriente leur remontée vers la surface. Le géothermomètre SiO₂ indique alors une température de 165°C et, compte tenu du gradient géothermique régional, ~ 50°C/km, la profondeur de 2000 m est atteinte où règne une pression de ~ 800 atmosphères.

4) Arrivée dans le pluton, et à cette profondeur, l'eau dissout un important flux de CO₂ magmatique. Ce flux favorise la remontée des eaux qui empruntent les fractures verticales affectant le massif. Ce flux, centré sur le pluton, affecte aussi, mais dans une moindre mesure, la frange des terrains sédimentaires.

5) L'âge moyen des eaux de Sidi Ali est de plusieurs dizaines d'années : plus de 50 ans avec le tritium, de 30 à 200 ans avec Darcy et moins de 200 ans avec le radiocarbone.

6) A la suite de cette première campagne, il est envisagé de mettre en œuvre :

a) des mesures des teneurs en ³H avec des seuils de mesure à 0,1 UT, couplées avec les teneurs en hélium-3, produit de désintégration du ³H et calculer ainsi plus précisément l'âge T, en années, des eaux :

$$T = 18 * \ln \left(\frac{{}^3\text{He}}{{}^3\text{H}} + 1 \right)$$

b) la mesure des teneurs en chlore-36, de période de demi-vie égale à 300 000 ans afin de dater les eaux de Lalla Haya, mesure impossible avec le ¹⁴C.

c) La signature de la remontée de fluides magmatiques sera validée par des mesures du rapport isotopique ³He/⁴He, qui caractérise bien la contribution mantellique.

7) Compte tenu de l'intérêt scientifique et de l'enjeu économique couplé à l'enjeu écologique de la zone, il serait bon d'envisager une grande partie du site d'Oulmès, comme premier « parc naturel hydrogéologique » du Maroc en suivant en cela les suggestions émises par de Marsily (1991). Néanmoins, les zones d'infiltration préférentielles situées entre 1100 et 1300 m d'altitude devraient être localisées sur le terrain en fonction des lithologies rencontrées.

Références

Boutaleb M. (1988) - Reconstitution de l'évolution tectono-métamorphique, magmatique et hydrothermale du district stannio-wolframifère de Walmès (Maroc central) (thèse).

Cidu R., Bahaj S., 2000. Geochemistry of thermal waters from Morocco. *Geothermics*, 29, 407-430.

Dadi, S., 1998, Contribution à l'étude hydrologique et hydrochimique du plateau d'Oulmès (Maroc Central, Maroc), Thèse Université CADI AYYAD, 182p.

Dadi S., Razack M., Laziri F., Boutaleb M., El Boukhari A.M., 1998. Synthèse hydrogéologique et caractérisation hydrogéochimique des eaux souterraines du massif cristallophyllien d'Oulmès (Maroc). *Hydrogéologie*, 1, 41-51.

Dahamani M., Sawyer E. W., 2001. Variabilité géochimique dans l'auréole métamorphique d'Oulmès (Maroc central). *Bulletin de l'Institut scientifique, section Sciences de la Terre*, 23, 7-20.

Elbatloussi D. et Laziri F. (2004) - Application du sous-modèle hydrologique d'EPIC-MAILLE à un aquifère fissuré : Cas du plateau d'Oulmès (Maroc central, MAROC) (travail de fin d'études ENIM -ULg - FUSAGx)

Gmira A., 1996. Altération des granites d'Oulmès (Maroc central). Mécanismes et produits de la kaolinisation. *Docum. Lab. Géol. Lyon*, 139, 148 p.

Marsily G. de, 1991. Création de parcs naturels hydrogéologiques. *S.R.E.T.I.E.*, 34, 5-7.

Orban Ph., Ruthy, I., Elbatloussi, D., Dadi, S. and Dassargues, A., 2005, Characterisation of fissured aquifers in the semi-arid region of the mid-Atlas plateau (Oulmès, Morocco), dans ce volume.

Rimi A., Chalouan A., Bahi L., 1998. Heat flow in the westernmost part of the alpine Mediterranean system (The Rif, Morocco). *Tectonophysics*, 285, 135-146.

Ruthy, I., Orban, Ph., Elbatloussi, D., Dadi, S., Dassargues, A., 2005, Developing tools for managing hydrogeological data in a semi-arid region : the case study of Oulmès (Morocco), dans ce volume.

Tahiri A. (1991) - Le Maroc central septentrional : stratigraphie, sédimentologie et tectonique du paléozoïque, un exemple de passage des zones internes aux zones externes de la chaîne hercynienne du Maroc (thèse).

Winckel A., 2002. Etablissement d'une typologie des eaux thermales par une approche hydrochimique, isotopique et tectonique. Exemple du Maroc. 2002. Thèse Université Paris-Sud, 306 p.