

Nouvelle Approche Géologique et Géodynamique du Complexe Hydrothermal de Moulay Yacoub (Bordure Septentrionale du Sillon Sud Rifain)

New Geological and Geochemical Approach of the Moulay Yacoub Hydrothermal Complex (Northern Border of the South Rifain's Furrow)

A. LAKHDAR*; A. NTARMOUCHANT*; M. L. RIBEIRO***; M. BEQQALI*; K. EL OUADEIHE*; L. BENAABIDATE**;
M. DAHIRE*; Y. DRIUCHE & A. BEN SLIMANE*

Mots-clés: Sources thermales, faciès chimique, géothermométrie, Sillon Sud-Rifain, tectonique alpine.

Résumé: Les eaux thermales de Moulay Yacoub sourdent dans les formations miocènes du Sillon Sud Rifain. Ces eaux, à vertus thérapeutiques, sont caractérisées par une forte minéralisation en relation avec leur stockage et leur circulation dans des réservoirs de natures lithologiques variées. Elles comportent deux faciès chimiques: un faciès Cl-Na peu dilué et un faciès Cl-Ca-Mg, dominé par les eaux immatures. La comparaison géochimique et géothermométrique avec d'autres sources régionales suggère une origine plus profonde que le réservoir liasique. La découverte d'extrusions formées par des blocs de calcaire liasiques, métasédimentaires et magmatiques paléozoïques et de grandes masses doléritiques triasiques, suggère l'existence de formations perméables sous la couverture marneuse miocène. Les accidents profonds NE-SW, associés à un chevauchement aveugle, montrent une relation étroite avec les résurgences et les extrusions du socle anté-néogène. Au cours de leur transfert vers la surface, les eaux de Moulay Yacoub seront diluées à la suite de mélanges se produisant surtout dans le réservoir liasique.

Key-words: Thermal resurgences, chemical facies, geothermometry, South-Rifain, Alpine chain

Abstract: Moulay Yacoub thermal springs spouting out within Miocene sediments of the South Rifain Furrow. They are characterized by a strong mineralization dealing with their storage and their circulation in reservoirs with various lithologies. They contain two chemical facies: a less diluted Cl-Na facies and Cl-Ca-Mg facies dominated by immature waters. The geochemical and geothermometric comparison with the other regional sources suggests a deeper origin than the liasic reservoir. The discovery of extrusions formed by Liasic limestone blocks, Paleozoic magmatic and metasedimentary blocks as well as large Triassic doleritic masses suggests the existence of permeable formations under the Miocene marly cover. The deep accidents, NE-SW, dealing with active blind thrusts, shows a close relationship with resurgences and blocks extrusions of the pre-neogen basement. During their transfer toward the surface, Moulay Yacoub waters will be diluted after a deep mixture occurring largely in Liasic reservoir.

Palavras-chave: Rife (Marrocos), águas termais, quimismo, geotermometria, tectónica alpina.

Resumo: As águas termais de Moulay Yacoub surgem em formações miocénicas do Sulco Sul do Rife. São caracterizadas por forte mineralização, relacionada com a natureza do seu local de armazenamento e circulação em reservatórios de litologias variadas. Apresentam duas fácies químicas principais: uma Cl-Na, pouco diluída, e outra, Cl-Ca-Mg, dominada por águas imaturas. A comparação geoquímica e geotermométrica com outras fontes regionais sugere uma origem mais profunda que o reservatório liássico. A recente descoberta de extrusões de blocos de calcário liássico, de magmatitos paleozóicos, de metassedimentos e de grandes massas de doleritos triássicos, sugere a existência de formações permeáveis sob a cobertura margosa do Miocénico. Os acidentes profundos NE-SW, associados a um cavalgamento cego, sugerem uma relação estreita entre estas águas termais e as extrusões do soco ante-neogénicos. Durante a sua passagem para a superfície, as águas termais de Moulay Yacoub terão sido diluídas através de misturas ocorridas principalmente no reservatório liássico.

* UR «Dynamique de la lithosphère continentale et transfert de la matière». Faculté des Sciences Dhar El Mehraz. Fès, Maroc. atikalakhdar@yahoo.fr

** Laboratoire de géoressources et de l'environnement. FST, Fès, Maroc.

*** INETI, Lisbonne, Portugal.

INTRODUCTION

Situé au NW de l'Afrique, le Maroc occupe une position privilégiée par rapport à la façade atlantique qui constitue sa source principale d'arrosage (CARLIER, 1971; WINCKEL, 2002). En effet, le Maroc possède une réserve en eau souterraine non négligeable qui se manifeste sous forme de résurgences d'eau douce émergeant entre les formations argileuses sous-jacentes triasiques et celles de la plateforme carbonatée jurassique du domaine atlasique. Ce dernier constitue le plus grand réservoir en eau au Maroc. Cette réserve en eau alimente de nombreuses sources thermales sourdant soit au niveau des formations carbonatées jurassiques des Rides Sud Rifaines, soit dans les formations tertiaires à dominance marneuse du domaine rifain et du Sillon Sud Rifain (SSR). Ces sources chaudes constituent un système hydrothermal à la partie occidentale d'une ceinture orientée Est-Ouest allant depuis le Maroc jusqu'en Tunisie (Fig. 1).

On compte plus d'une vingtaine de sources thermales dans le Rif et le Prérif et le Sillon Sud Rifain. Les sources thermales marocaines sont considérées comme des eaux à vertu thérapeutique de première qualité, exploitées le plus souvent de façon artisanale. Ces dernières ont fait l'objet de plusieurs études le plus souvent mono-discipli-

naires et fragmentaires, ne permettant pas d'appréhender l'ensemble des mécanismes ayant contribué à ces résurgences (AMBROGGI, 1977; ZIADI, 1984; BAHAJ, 1989; 1994; 1996; BENAABIDATE, 1994; MIMI *et al.*, 1997; MIMI *et al.*, 1999; 2000; MORABITI, 2000; WINCKEL, 2002).

La présente note porte sur les sources thermominérales de Moulay Yacoub. Elle se propose par le biais d'une étude lithostratigraphique, structurale, géochimique et géothermométrique d'apporter une nouvelle approche du contexte géologique et géochimique de ces sources. Ceci permettra de mieux comprendre les mécanismes tectoniques responsables de ces résurgences et de mettre en évidence leurs caractéristiques typologiques et leur parenté chimique.

CADRE GEOLOGIQUE

Lithostratigraphie

Le village de Moulay Yacoub est situé à 25 km au NW de la ville de Fès. Il est caractérisé par la résurgence de nombreuses sources thermales sourdant au sein des formations miocènes du Sillon Sud Rifain. Ce dernier est localisé entre les domaines Rifain (Pré et Mésorifain),

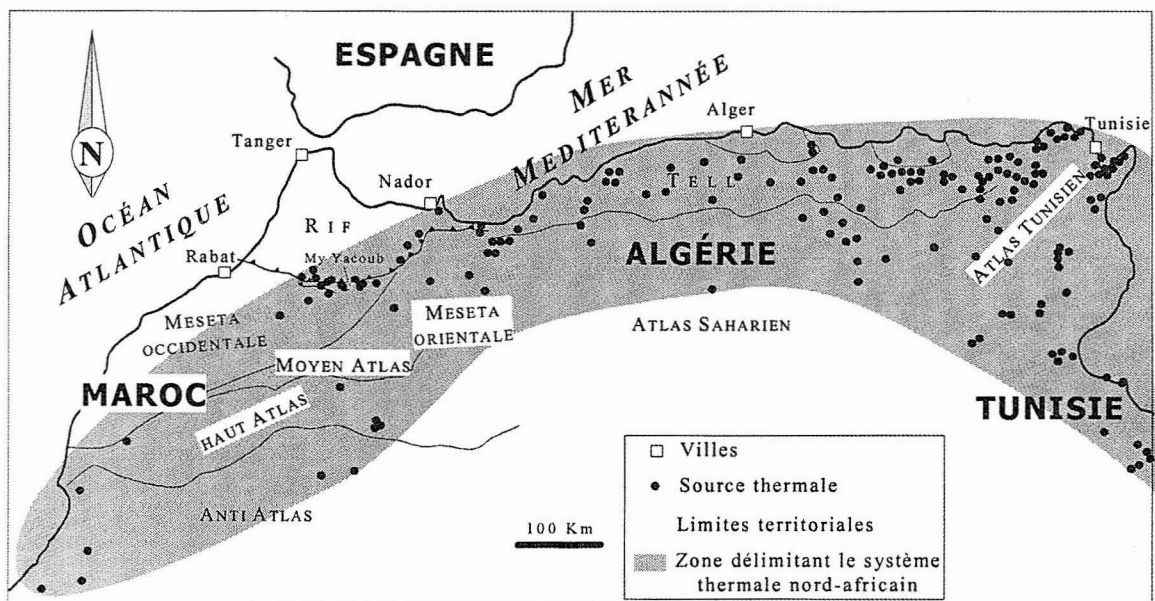


Fig. 1 – Répartition des sources thermales de la partie nord-africaine. (Mimi *et al.*).

– Distribution of thermal springs in northern Africa (Mimi *et al.*, 1999).

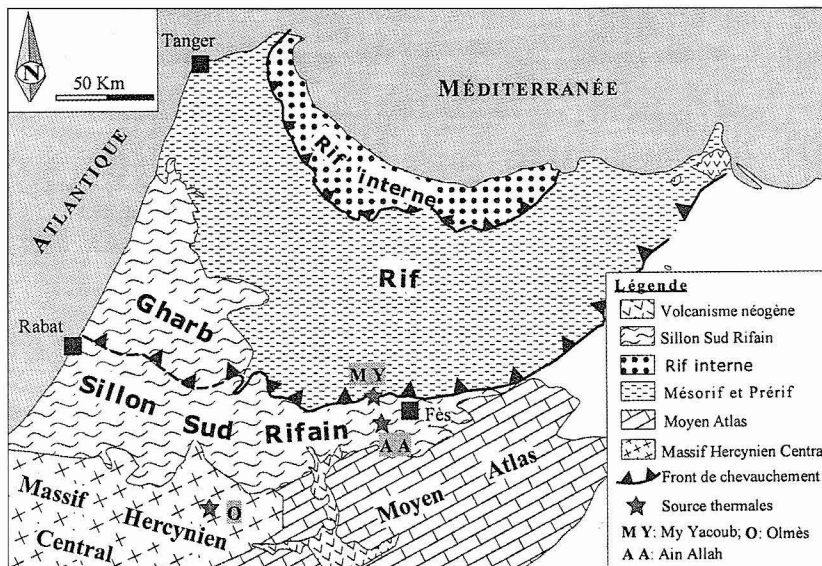


Fig. 2 – Cadre géologique des résurgences de Moulay Yacoub.

– Geological setting of Moulay Yacoub springs.

au Nord et le Massif Hercynien Central (Meseta marocaine) et le Moyen Atlas, au Sud (Fig. 2). Ces deux unités, bien individualisées par leur style de déformation et leur sédimentation, ont largement influencé l'évolution tectono-sédimentaire anté et post-néogène du SSR (ABDELKHALIKI, 1997; SENDIDE, 2000; WINCKEL, 2002; ZIZI, 2000).

Le Sillon Sud Rifain, où jaillissent les sources thermales de Moulay Yacoub, est défini comme un bassin d'avant fosse (WINCKEL, 2002; SENDIDE, 2000; LAKHDAR *et al.*, 2004) comblé par une épaisse série sédimentaire du Miocène et du Plioquaternaire. Dans la région de Moulay Yacoub, cette série est constituée de bas en haut par (Fig. 3):

- des marnes bleutées compactes du Tortonien basal (Marne bleue) imprégnés auprès des résurgences chaudes de cristaux jaunâtre de pyrite;
- une série marneuse du Messinien inférieure intercalée à la base par des niveaux noduleux calcaires et au sommet par des bancs sablo ferrugineux (Fig. 3). Elle est surmontée par une formation gréseuse à caractère turbiditique nommée "Grès I" (WERNLI, 1978);

- des marnes du Messinien supérieur marquée par des intercalations de bancs calcaires et surmontées par barre gréseuse nommée "Grès II" (WERNLI, 1978);

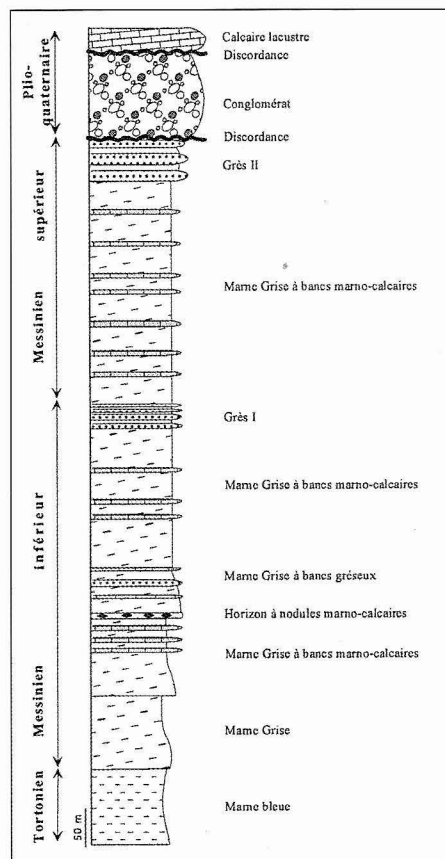


Fig. 3 – Colonne stratigraphique de la zone thermominérale de Moulay Yacoub.

– Stratigraphic column of Moulay Yacoub thermo-mineral zone.

- une formation chaotique d'une centaine de mètres environ de puissance, englobant des blocs décamétriques de nature et d'âge variable. Des blocs de calcaire jurassique et des grès du Miocène ont été identifiés. Ces dépôts présentent les mêmes caractéristiques que ceux générés au niveau des pentes où le topographie et la sédimentation sont contrôlés par les effets de la tectonique locale (SOUQUET *et al.*, 1987). En effet, Ces dépôts d'âges Pliocène moyen à supérieure, qualifiés comme catastrophiques, seraient en relation avec la surrection de l'anticlinal de la ride de Jbel Tghat (LAKHDAR, 2004; LAKHDAR *et al.*, 2005).

- des calcaires lacustres quaternaires.

Cette série est chevauchée au nord par les formations du domaine Préifain essentiellement composées de marnes gréseuses de l'Eocène et de l'Oligocène à caractère flyschöide (Fig. 4).

Les levés cartographiques et les nombreux sondages attestent de la présence d'un substratum meseto-atlasique plongeant vers le NNE avec une pente de 2-5% sous cette série néogène du SSR. Le substratum meseto-atlasique est formé soit par des calcaires et des dolomies liasiques, soit par des argiles rouge-bariolé triasiques ou, encore, par une série silto-gréseuse paléozoïque.

Dans le secteur d'étude, le substratum, composé essentiellement par les formations triasiques et crétacées, affleure au niveau des fronts de chevauchement de direction E-W (Fig. 4). Dans certains endroits, les formations triasiques apparaissent avec deux niveaux d'argile rouge très riches en évaporites, intercalées de basaltes doléritiques verdâtre. Le Crétacé est essentiellement formé de marnes verdâtres. Au cours de ce travail, des lambeaux de socles ont été identifiés pour la première fois. Ce sont de petites extrusions métriques à décamétriques de blocs de calcaire liasique et de blocs de nature magmatique et méta-sédimentaire très minéralisées appartenant au socle paléozoïque. Elles sont localisées au niveau de l'intersection entre les fronts de chevauchements E-W et les accidents NE-SW.

Cadre Structural

La structuration observée dans la région de Moulay Yacoub s'intègre dans le cadre de la tectonique chevauchante alpine de la chaîne rifaine. Cette structuration est induite par la migration des chevauchements vers l'extérieur de la chaîne rifaine.

Au nord de Moulay Yacoub, les formations pré-ifaines marno-calcaires de l'Eocène ont été affectées par plusieurs branches de chevauchement jalonnées parfois par des formations argileuses triasiques et crétacées

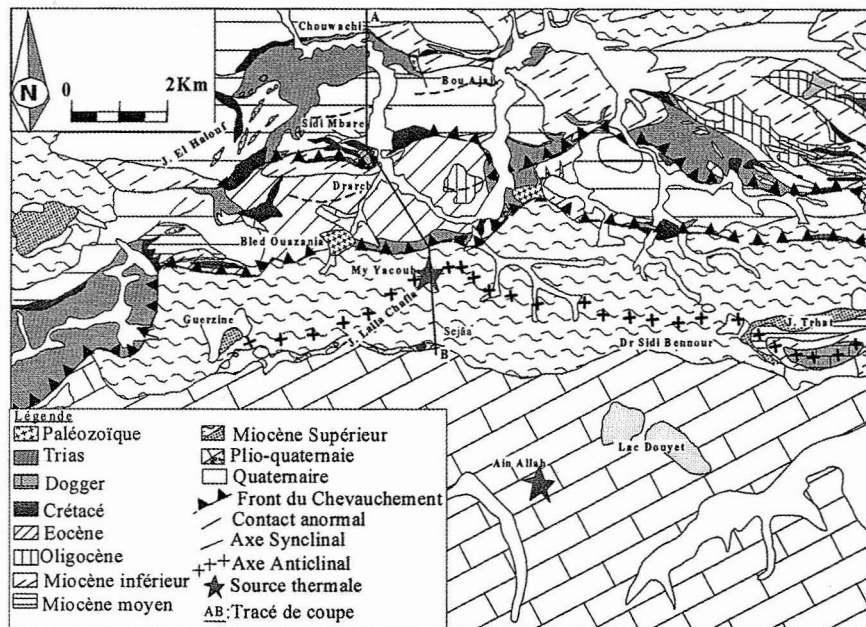


Fig. 4 – Carte géologique du secteur de Moulay Yacoub.

– Geological map of Moulay Yacoub area.

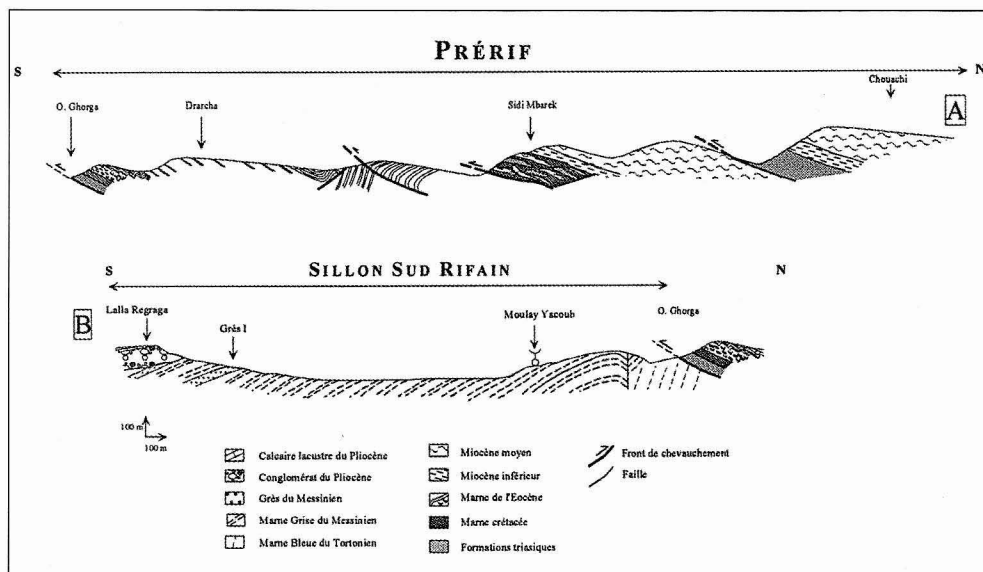


Fig. 5 – Coupe synthétique de la structuration de la région de Moulay Yacoub. A et B sont situés dans la Fig. 4.

– Synthetic cross section of Moulay Yacoub area featuring. A and B are situated in Fig. 4.

(Fig. 5). Les plis d'entraînements dessinés par les bancs marno-calcaires de l'Eocène et la schistosité très net près des plans de chevauchement, indiquent un charriage du Nord vers le Sud. Les mouvements chevauchants sont associés localement à des rétro-chevauchements, à rejet métrique bien enregistré par le décalage des bancs marno-calcaires.

Par ailleurs, on observe dans les formations marneuses du Miocène supérieur qui abritent les sources de

Moulay Yacoub, des plis d'entraînement à axe N110 à N120 et des pendages variant de 35°S à 50°N. Ces structures suggèrent la présence en profondeur d'une structure anticlinale qui pourrait être en relation avec le fonctionnement d'un chevauchement aveugle sous la couverture miocène (Fig. 6). La structure anticlinale de Moulay Yacoub serait le prolongement, vers l'Ouest, de l'extrusion jurassique de la ride anticlinale du Jbel Trhat sous la couverture néogène (Fig. 6). Le fonctionnement de ce chevauchement

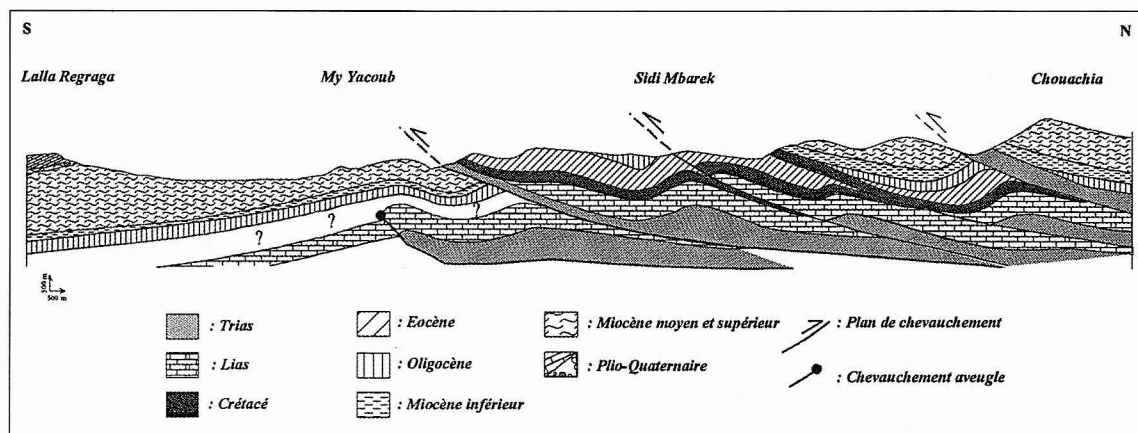


Fig. 6 – Coupe synthétique de la structuration de la région de Moulay Yacoub.

– Synthetic cross section of Moulay Yacoub area featuring.

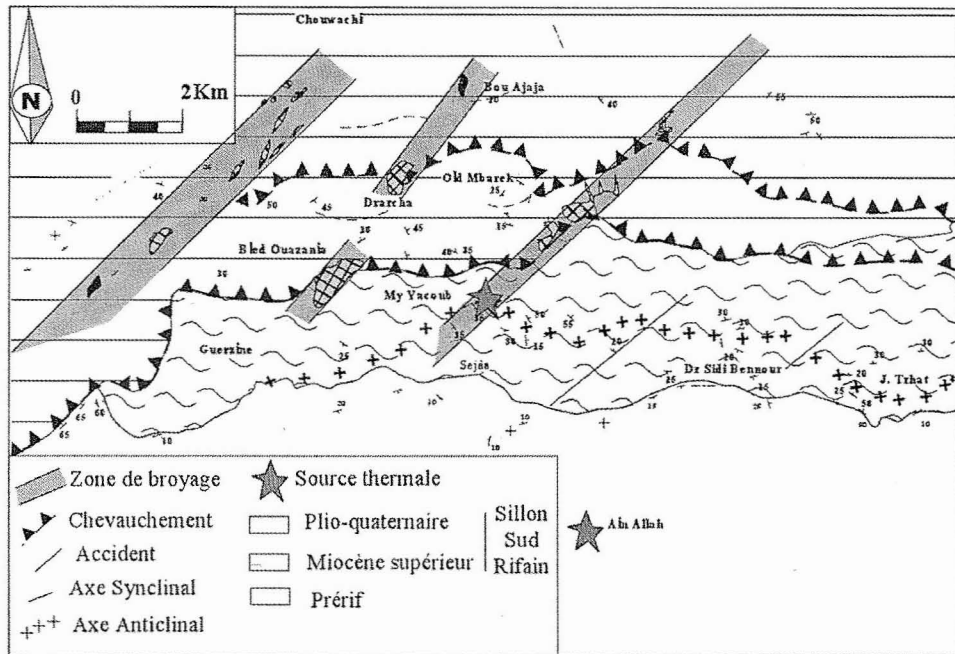


Fig. 7 – Carte structurale du secteur de Moulay Yacoub.

– Structural map of Moulay Yacoub area.

chement serait à l'origine de la surrection de la ride anticlinale de Moulay Yacoub générant vers le sud une pente où s'installeraient les dépôts chaotiques du Pliocène moyen à supérieure. En effet, le chevauchement aveugle suggéré sous la structure anticlinale de Moulay Yacoub se rattacherait, comme la plupart des fronts de chevauchements préifains, à un plan de décollements majeur placé au niveau du Trias (TEJERA & DUEE, 2003). Dans cette zone, considéré comme zone externe de la chaîne rifaine, le fonctionnement de ces chevauchements serait au moins d'âge pliocène moyen à supérieur. Cette interprétation permettrait d'intégrer la structuration de la région de Moulay Yacoub dans le même dispositif que celui observé au Nord dans le domaine Préifain.

Ce dispositif structural se complique par des accidents NE-SW, NW-SE et N-S qui parcourent cette région. En effet, ce style tectonique cassant rappelle celui du substratum meseto-atlasique (PIQUÉ *et al.*, 1998; WINCKEL, 2002). Ce dernier est disposé en plateaux étagés reflétant une organisation en blocs basculés (SABAOU, 1998; SOUFIANI *et al.*, 2002) en relation avec le rejeu des accidents NE-SW et NW-SE hérités du socle hercynien lors de la tectonique alpine. Ces accidents à jeu multiple se prolongent vers le nord dans le domaine rifain et vers le sud dans le domaine meseto-atlasique (LAVILLE *et al.*, 1991; AIT BRAHIM, 2003; MYSLIL, 1989; ASSEBRIY *et al.*, 2002;

ZERYOULI, 1997; WINCKEL, 2002). Ceux de direction NE-SW, à jeu apparent décrochant senestre, se manifestent au niveau du SSR par des flexures au niveau des calcaires quaternaires. (MOREL, 1989; ASEBRY, 1993; CHALOUAN *et al.*, 2001; AIT BRAHIM, 2003).

Dans le secteur d'étude, ces accidents, en particulier ceux de direction NE-SW, montrent une relation étroite avec les résurgences chaudes de Moulay Yacoub et les extrusions du socle (Fig. 7). Ces dernières sont localisées au niveau de l'intersection entre les fronts de chevauchements E-W et les accidents NE-SW. Une telle association s'expliquerait par des mouvements contemporains générés par ces deux accidents permettant d'une part la mobilisation du matériel profond et d'autre part sa remonté vers la surface.

CADRE HYDROGEOLOGIQUE

Le captage de l'eau thermal

Le complexe hydrothermal de My Yacoub s'étend sur une superficie de 300 hectares. Il comporte un griffon principal et six résurgences secondaires. Le volume des roches gorgées d'eau dépasse 500000 m³.

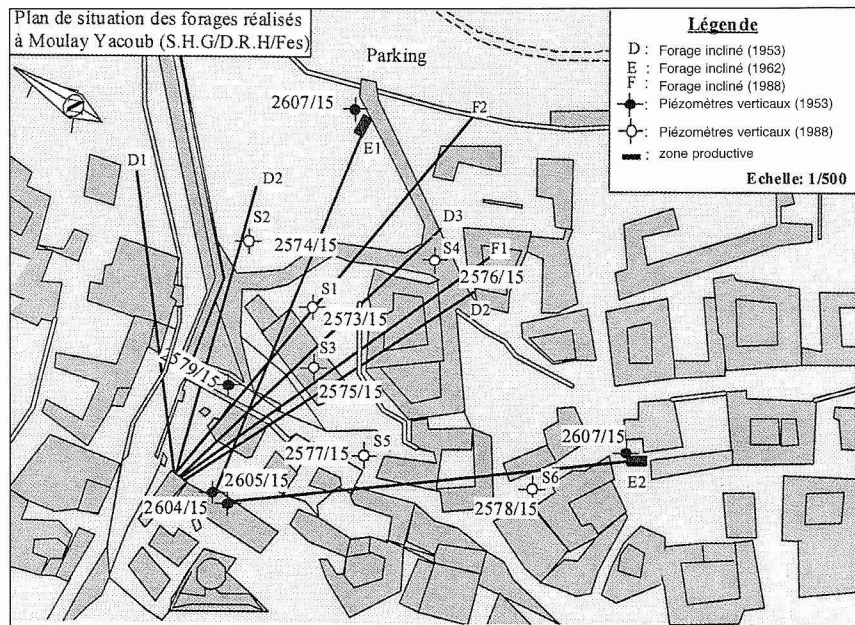


Fig. 8 – Carte de localisation des forages réalisés à My Yacoub.

– Situation of wells drilled in the Moulay Yacoub area.

Le complexe de My Yacoub a fait l'objet de plusieurs travaux de captage. Les premiers ayant débutés par un puit de profondeur 15 m suivi de six sondages verticaux (S1 à S6) de 40 m à 50 m de profondeur (Fig. 8). Par la suite ce complexe connaîtra l'implantation à la côte 283 m de 4 forages (D1 à D4) inclinés (11° à 30°) ayant doublé approximativement le débit (11 l/s à 14 l/s). Il s'est avéré que les forages inclinés ont améliorés le débit de deux fois plus que les forages précédents et depuis, d'autres forages inclinés se sont réalisés dans le complexe de My Yacoub, d'abord en 1962 par deux forages F1 et F2 et en 1988 par les forages E1 et E2 (Fig. 8). Ces deux derniers forages, ayant recoupé le tronç thermal principal jamais été atteint par les anciens travaux, ont fourni des débits considérables (16 l/s pour le forage E1 et 70 l/s pour le forage E2). Le tronç thermal correspondrait à des fissures ouvertes ayant une orientation NE-SW.

Evolution du débit

Les mesures et les suivies ponctuelles des données débitométriques sont difficiles à interpréter car elles expriment des valeurs de débits artificiels. Il est donc difficile de caractériser l'hydrodynamisme réel de ces

sources. A titre indicatif, le débit réel (débit détecté au niveau des forages profonds) des sources de My Yacoub, affiche des valeurs remarquables pouvant dépasser les 70 l/s.

La piézométrie des sources de My Yacoub

Le contrôle et le suivie de l'évolution piézométrique ont été réalisés aux cours des travaux de captage (DRH Fès). L'évolution piézométrique des sources thermales de My Yacoub atteste de la présence d'une nappe thermique en charge, à niveau stabilisé autour de la côte 284 m.

Sur les diagrammes représentant l'évolution du niveau piézométrique de ces sources (Fig. 9), apparaît une tendance régressive du niveau piézométrique depuis 1988. Cette baisse du niveau piézométrique qui apparaît clairement sur les différents diagrammes (Fig. 9) serait plutôt en relation avec une exploitation excessive dès l'année 1988, date de l'inauguration de la nouvelle station thermique, qu'avec une baisse liée aux variations climatiques. Les roches réservoirs se déchargeraient de leurs eaux suite à ce pompage excessif. Ainsi, tous les piézomètres situés dans le champ d'action des pompes seraient influencés par ces derniers.

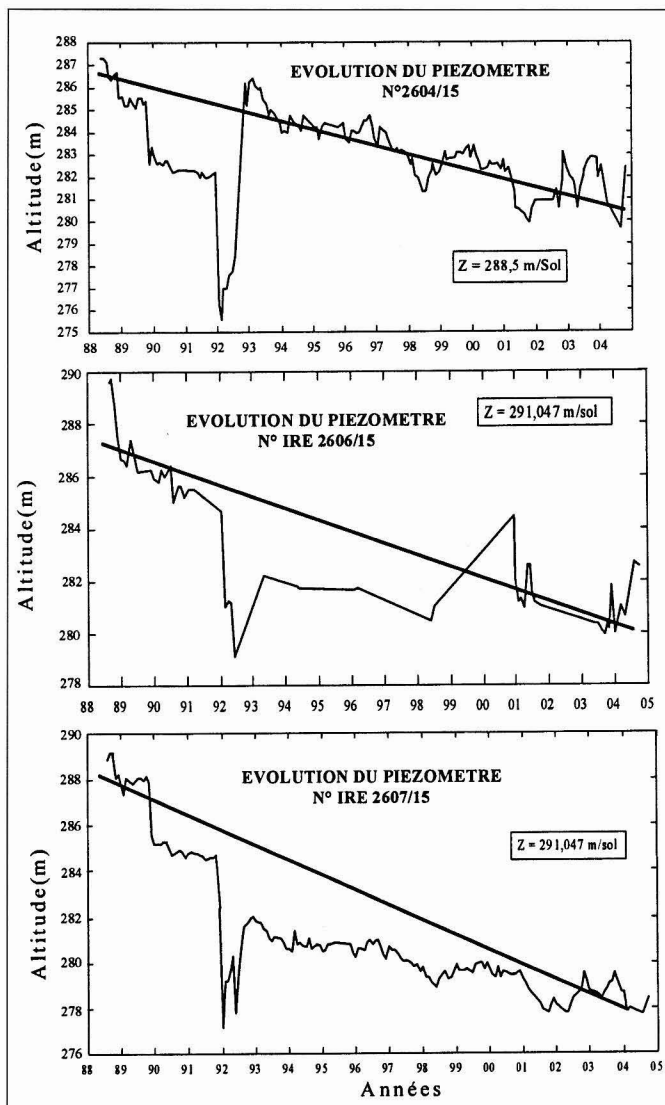


Fig. 9 – Diagrammes d'évolution piézométrique de la source de My Yacoub.

– Variation of piezometric level of Moulay Yacoub spring.

Par ailleurs, deux niveaux de travertins fossilisant les anciennes traces d'émergences d'eau chaudes ont été identifiés dans la région (Fig. 10). Ces deux niveaux sont situés à des altitudes de 340 m et 300 m, au dessus du griffon principal actuel (282 m). Le premier niveau date de plusieurs millénaires (12000 ans), âge correspondant au Pléistocène et le deuxième date de plusieurs siècles (2000 ans). Le dénivelé montré par ces niveaux de travertins, en allant du plus ancien vers le plus récent, a été attribué à une baisse du niveau piézomè-

trique de la nappe chaude. Or, l'étude structurale, que nous avons réalisé dans la région, a révélé l'existence probable d'une ride anticlinale active de type Thart sous les marnes miocènes. La surrection de cette ride, lié à l'activation du chevauchement aveugle, serait non seulement en relation avec les dépôts plio-quaternaires mais également avec un soulèvement locale du site de My Yacoub, ce qui engendrerait l'étagement des travertins et la baisse des niveaux de résurgences actuelles (Fig. 10).

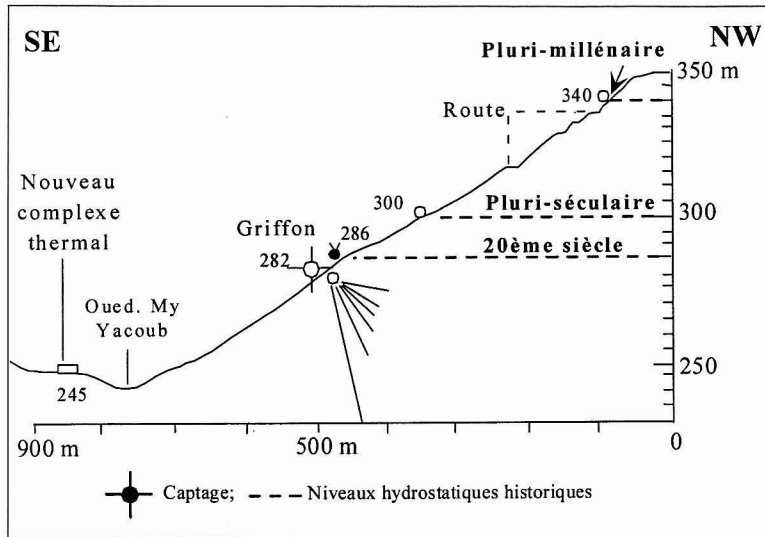


Fig. 10 – Coupe montrant l'étagement des niveaux de travertins dans le temps d'après AMBROGGI (1977).

– Travertine terracing in time, according to AMBROGGI (1977).

GEOCHIMIE

Caractères généraux

L'étude géochimique des eaux thermales de Moulay Yacoub sera basée sur le traitement des analyses en éléments majeurs et traces. Ces analyses chimiques sont consignées dans les tableaux 1 et 2.

Au sein des marnes du Miocène supérieur, les sources thermales de Moulay Yacoub, jaillissent à des températures oscillant entre 51°C et 58°C, elles sont considérées, selon la classification de CASTANY (1967), comme des eaux hyperthermales. Ces eaux, à pH neutre ($6,8 < \text{pH} < 6,6$), sont également caractérisées par une forte conductivité électrique ($C = 95,7 \text{ mS/cm}$). Leur composition gazeuse est dominée par l'azote (46%) suivie du méthane

TABLEAU 1

Paramètres physiques et composition en éléments majeurs des eaux thermales de Moulay Yacoub.

Moulay Yacoub thermal waters: physical parameters and composition (major elements).

Paramètres	Paramètres physiques			Concentration des éléments majeurs (mg/l)							
	T (°C)	pH	Conductivité électrique (mS/cm)	Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄	SiO ₂
Bahaj S. 89	58	6,7	50,2	1100	297	9800	260	17500	231	0,4	30
Bahaj S. 94	52	6,3	95,7	1045	285	8715	277	16700	275	93	31,5
Bahaj S. 96	57	6,8	45,4	979	268	800	275	15000	220	26	31
Morabiti 2000	51	6,5	41,5	1080	363	1800	391	18815	270	43,3	14
Benaabidate 2000	54	6,7	50,2	1076,1	289,4	9354,1	242,4	17748	195,3	39,4	30,8
BRGM 74				1073	286,2	9354,5	242,2	17769,5	195,2	39,3	47
BRGM 77	54	7,8	22	1043	290	9200	290	17395	256	5	33
BRGM 77	43	8	21	1044	295	9180	284	17573	274	37	30
BRGM 77	54	8,6	160	92,4	202	1208	37	785	860	1560	20

TABLEAU 2

Composition en éléments traces des eaux thermales de Moulay Yacoub.

Moulay Yacoub thermal waters: composition (trace elements).

Paramètres	Concentration des éléments en traces en (µg/l)												
	Al	B	Li	Rb	Sr	Ba	Fe	Mn	Zn	Cu	Co	Ni	As
Bahaj S. 89	299	7500	11600	920	9700	9500	59	14	15	59	59	59	
Bahaj S. 94	5	7090	13391	1180	41018	20034	9	19	428	5,1	0,7	15	0,4
Bahaj S. 96	20	7200	14000	1100	58000	24000	79	20	400	3,5	2,5	20	0,2
Morabiti 2000	5	7600	30000	1100	58200	6200	5	30	5	6		20	*
Benaabidate 2000	*	7500	60000	*	96800	9500	*	*	*	*	*	*	*
BRGM 74	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
BRGM 77	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
BRGM 77	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
BRGM 77	10	5000	9450	750	67000	30000	100	10	70	10			

TABLEAU 3

Composition en gaz des eaux thermales de Moulay Yacoub.

Moulay Yacoub thermal waters: composition in gas.

Gaz %	CO ₂	O ₂	N ₂	Ar	H ₂ S	CH ₄	H ₂
C. Chapon 1962	2,21	0,1	95,47	0,04	0,32	1,81	0,05
Ambroggi 1977	9,9	0,05	46	0,6	0,12	42,5	
Benaabidate 2000	55,5	1,3	10,1	0,1	25,2	7,6	0,2

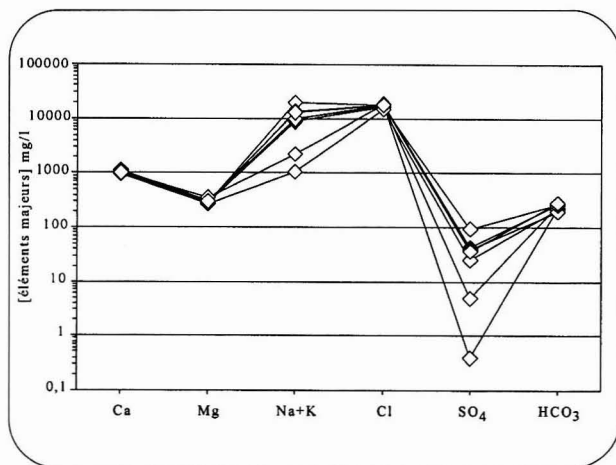


Fig. 11 – Classification des eaux de Moulay Yacoub sur le diagramme de SCHOELLER (1962).

– Classification of Moulay Yacoub waters in SCHOELLER diagram (1962).

(42,5%), du dioxyde de carbone (9,9%) et l'éthane (1%). L'oxygène, l'argon et l'hydrogène y sont présents sous forme de traces (Tableau 3).

Les éléments majeurs

Sur le diagramme de SCHOELLER (1962) (Fig. 11), les eaux de Moulay Yacoub présentent un faciès chimique de type Cl-Na avec des fortes concentrations en Cl⁻ (18815 mg/l) et en éléments alcalins (1853,8 mg/l). Ces eaux montrent des concentrations de l'ordre de 419,8 mg/l en Mg²⁺, de 1110 mg/l en calcium, de 305 mg/l en bicarbonate et des teneurs faibles en sulfate (100 à 0,4 mg/l) traduites par une anomalie négative sur ce diagramme (Fig. 11).

En revanche, sur le diagramme de PIPER (1946), la composition chimique de ces eaux atteste de l'existence de deux faciès hydrochimiques (Fig. 12):

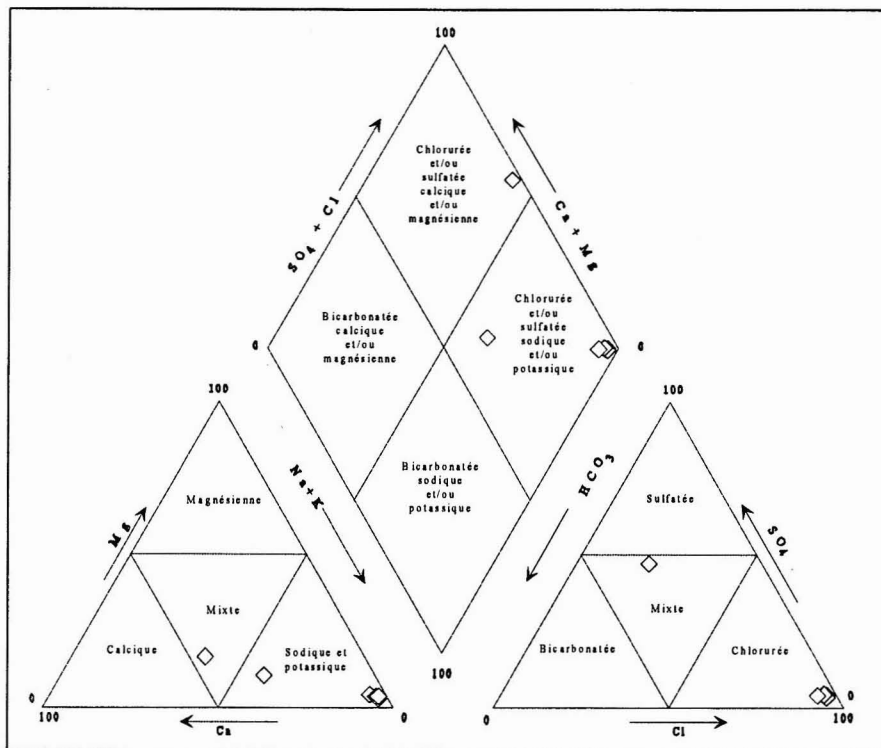


Fig. 12 – Classification des eaux thermales de Moulay Yacoub sur le diagramme de PIPER (1946). Les points analytiques représentent les eaux thermales captées par forage incliné.

– Classification of Moulay Yacoub waters in PIPE diagram (1946). Samples represent thermal waters captured by inclined wells.

- un faciès Cl-Na;
- et un faciès Cl-Ca et Mg.

Sur les diagrammes de D'AMORE *et al.* (1983) qui caractérisent mieux les affinités des eaux minéralisées avec leur encaissant lithologique, les deux faciès chimiques des eaux thermales de Moulay Yacoub se distinguent nettement par leurs spectres (Fig. 13):

- les premiers spectres sont caractérisés par des valeurs très faibles des paramètres B et F et des teneurs élevées du paramètre D. Ces valeurs sont comparables à celles du spectre de type γ défini par D'AMORE *et al.* (1983) (Fig. 14). Elles indiquent que les eaux thermales de Moulay Yacoub ont circulé à des profondeurs importantes à travers d'un socle cristallophyllien de nature lithologique variée. Ces spectres correspondent au faciès chloruré sodique;

- les deuxièmes, qui correspondent au faciès hydrochimique Cl-Na-Mg, ne sont comprables à aucun des

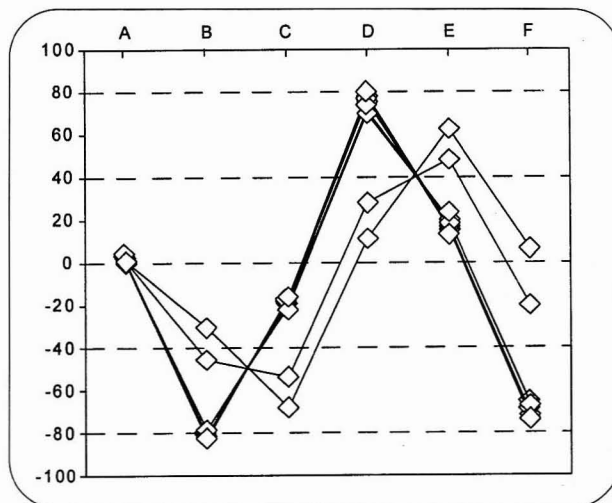


Fig. 13 – Caractérisation des eaux thermales de Moulay Yacoub par le diagramme IGR (D'AMORE *et al.*, 1983).

– Characterization of Moulay Yacoub's thermal waters by a IGR diagram (D'AMORE *et al.*, 1983).

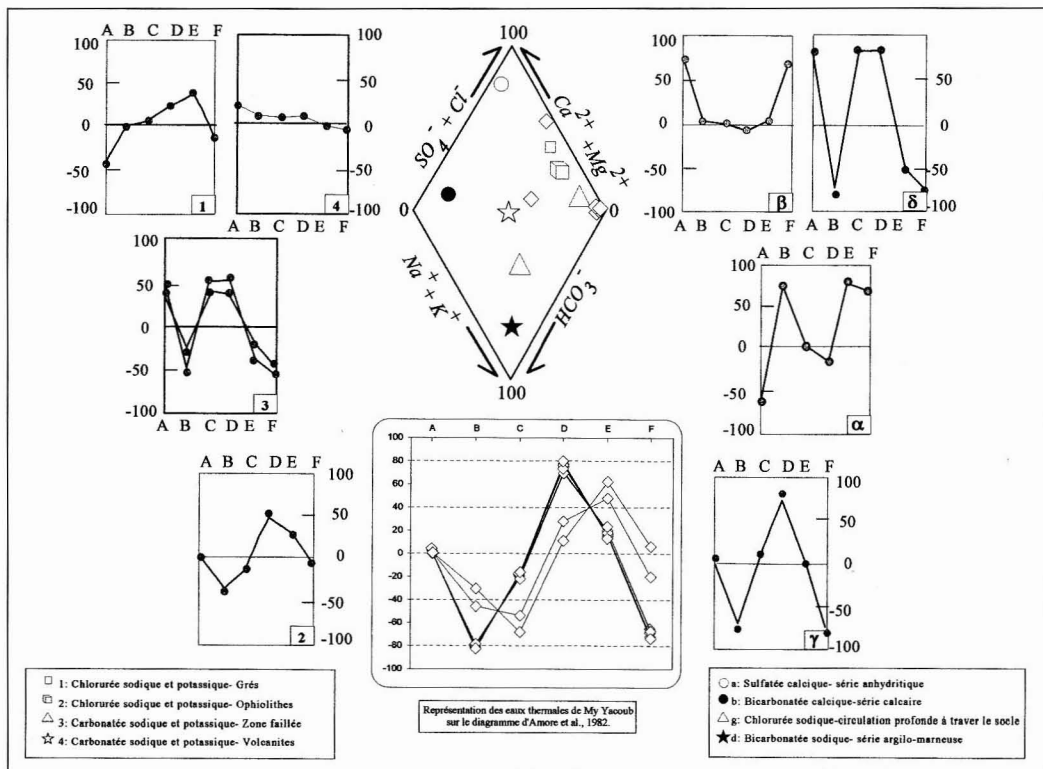


Fig. 14 – Représentation graphique des diagrammes de référence établies par D'AMORE *et al.* (1983).

– Graphic representation of the reference diagrams established by D'AMORE *et al.* (1983).

spectres définis par D'AMORE *et al.* (1983). Cependant, les valeurs des paramètres définies sont proches de celles des eaux caractérisant le socle (spectre γ) avec une nette variation observée au niveau des paramètres D (+80% < D < +10%), F (-74% < F < 6%) et B (-83% < B < -23%) (Tableau 2). Les variations du paramètre D et F seraient en relation avec la circulation de ces eaux à travers les réservoirs calcaro-dolomitique du Lias et/ou doléritique du Trias. Ceci, est traduit par une augmentation de la teneur en Mg^{2+} et Ca^{2+} et une diminution de la teneur en Na^+ ;

- En revanche, les fluctuations du paramètre B traduiraient une circulation de ces eaux au sein des formations riches en évaporites comme les argiles du Trias ou encore les marnes du Miocène.

- Les éléments en traces.

Pour mieux caractériser les variations des éléments en traces et métalliques nous avons choisi la représentation des concentrations sur un diagramme semi-logarith-

mique (Fig. 15). Les éléments sont classés sur ce diagramme selon leur masse atomique, depuis les éléments à mobilité facile dans les eaux chaudes (en particulier ceux qui ont une affinité avec les éléments alcalins) vers les éléments métalliques très lourds et difficiles à drainer par les eaux chaudes.

Sur ce diagramme, la composition chimique des eaux thermales de Moulay Yacoub montre des concentrations anormalement élevées en certains éléments en traces et en éléments métalliques (Tableau 2). En effet, le Sr affiche des teneurs variant de 96800 $\mu g/l$ à 9700 $\mu g/l$, suit du Li (60000 $\mu g/l$), du Ba (30000 $\mu g/l$), du B (7600 $\mu g/l$) et du Rb (1180 $\mu g/l$). Ces teneurs anormalement élevées traduiraient une circulation profonde de fluides hydrothermaux au contact d'un encaissant de nature magmatique et/ou cristallophyllienne. Cette suggestion a été attribuée à d'autres sources thermominérales marocaines (exemple la source de Tiouka) ayant des teneurs comparables à celles de Moulay Yacoub (MYSLIL, 1984; WINCKEL, 2002).

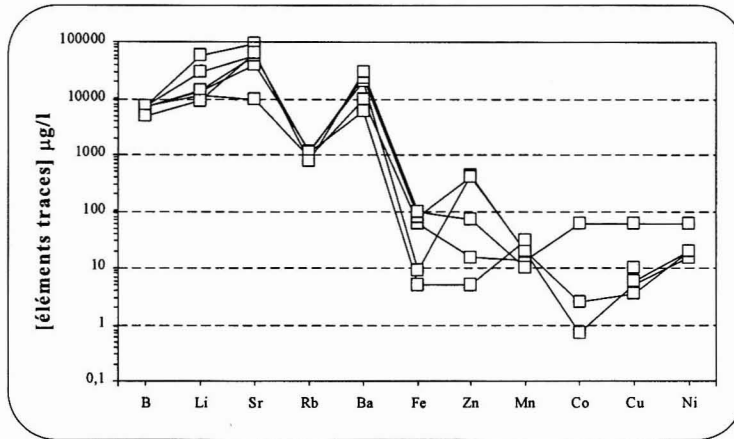


Fig. 15 – Représentation graphique de la composition en éléments en traces des eaux de Moulay Yacoub sur un diagramme semi-logarithmique.

– Graphic representation of trace elements composition of Moylay Yacoub thermal waters on a semi-logarithmic diagram.

Par ailleurs, dans les eaux de Moulay Yacoub, les teneurs en éléments métalliques sont également importantes. Elles varient de 59 µg/l et 3,9 µg/l pour le Cu, de 100 µg/l jusqu'à 5 µg/l pour le Fe, de 30 µg/l à 10 µg/l pour le Mn, de 5 µg/l à 428 µg/l pour le Zn, de 0,7 µg/l et 59 µg/l pour le Co et de 15 µg/l et 59 µg/l pour le Ni.

Les éléments métalliques lourds ne sont véhiculés que par des fluides sous des conditions de température et de pression très élevées. Leurs teneurs, dans les eaux de Moulay Yacoub, suggèrent, pour ces eaux, une circulation très profonde à travers un socle de nature magmatique et cristallophyllienne très minéralisé. D'ailleurs, les extrusions du socle, découvertes dans cette région, sont essentiellement de nature magmatique et métamorphique très riches en minéralisation. Ces extrusions, qui reflètent la nature du substratum, sont intimement associées au gisement hydrothermal de Moulay Yacoub. Elles sont associées à un réseau d'accidents NE-SW sur lequel sourdent les résurgences de Moulay Yacoub. Ceci suggère une relation génétique entre ces eaux chaudes et ces minéralisations, pouvant expliquer la richesse de ces eaux en éléments métalliques.

GEOOTHERMOMETRIE

Une source thermominérale constitue un indice de surface d'une anomalie géothermique. Cette dernière est généralement en relation avec une origine profonde ou

peu profonde avec, le plus souvent, une élévation du gradient géothermique lié à une activité thermique d'origine variée (tectonique, magmatique). Les sources étudiées appartiennent à la zone externe de la chaîne rifaine où le gradient géothermique a été estimé à 45°C/Km (MIMI *et al.*, 1997; 1999; ZARHLOULE, 2004).

Tenant compte de cette valeur, les estimations de la température du réservoir profond et des profondeurs de circulation des eaux thermales de Moulay Yacoub seront approchées à partir de l'application des géothermomètres des alcalins définis par les différents auteurs (Tableau 4). En effet, seulement les valeurs obtenues par la méthode de TRUESDELL (1976) seront prises en considération dans ce travail. Ces dernières, donnent des températures et des profondeurs comparables à celles obtenues par les prospections géophysiques (MYSLIL, 1984; ONAREP*, 1992; ZIZI, 2000) et les données des forages (exemple 1,6km pour le forage de Aïn Allah) (Forage 2370/15. DRH Fès). Ces températures sont de l'ordre de 47°C < T < 290°C. Les eaux thermales des sources de Moulay Yacoub auraient, donc, circulé à des profondeurs comprises entre 1,2 km et 6,4 km. Ces profondeurs correspondraient respectivement au réservoir liasique et à des réservoirs plus profonds que celui du Lias. En effet, le sondage effectué dans la région de Moulay Yacoub (WINCKEL, 2002) a rencontré le Lias à 1200 m de profondeur et le toit du Trias serait situé entre 1300 m et 1400 m de profondeur (ONAREP, 1992).

* Office National de Recherches et d'Exploitations Pétrolières.

TABLEAU 4

Paramètres de D'AMORE des eaux thermales de Moulay Yacoub.

Parameters of D'AMORE in Moulay Yacoub thermal waters.

Paramètres	A	B	C	D	E	F
Bahaj S. 89	1	-83	-16	78	15	-74
Bahaj S. 94	1	-82	-17	77	15	-72
Bahaj S. 96	1	-31	-68	11	62	6
Morabiti 2000	1	-45	-53	28	48	-20
Morabiti 1996	1	-81	-18	75	16	-71
Benaadibate 2000	0	-83	-16	78	15	-73
Rachid Z. 1970	0	-79	-19	71	20	-67
Rachid Z. 1974	0	-79	-21	70	20	-67
DRE 62	0	-84	-16	78	16	-72
BRGM 74	0	-83	-16	78	15	-73
BRGM 77	1	-83	-16	78	15	-74
BRGM 77	1	-83	-16	78	15	-73

En outre, sur le diagramme triangulaire de GIGGENBACH (1988) qui permet de renseigner sur l'origine des eaux (superficielles, profondes ou de mélange), sur leur taux de dilution partielle et sur la température du dernier équilibre, le report des analyses chimiques des sources

thermominérales de Moulay Yacoub permet d'identifier également deux groupes (Fig. 16):

- le premier groupe indique des eaux ayant subi des taux de dilution partielle allant de 4 à 10 fois;

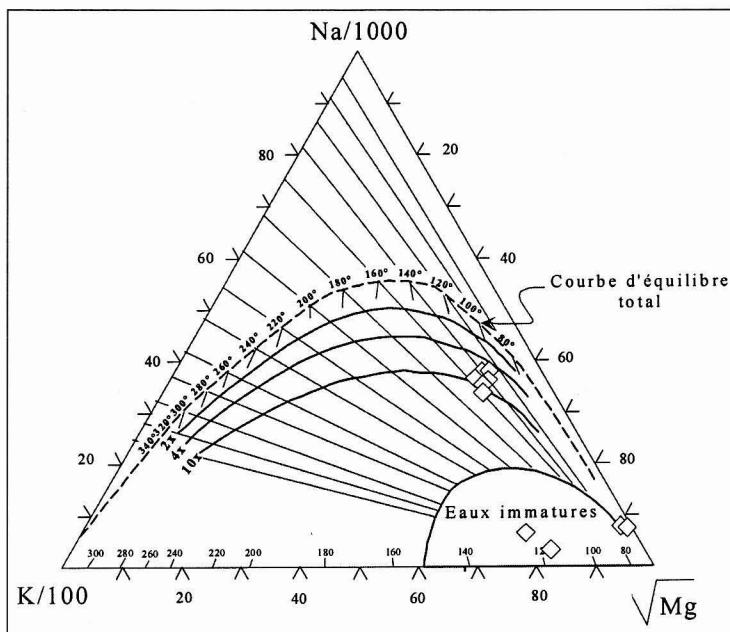


Fig. 16 – Représentation des eaux de Moulay Yacoub sur le diagramme de GIGGENBACH (1988).

– Representation of Moulay Yacoub waters on GIGGENBACH diagram (1988).

• le deuxième groupe est situé dans le domaine des eaux superficielles. Cette position pourrait s'expliquer par un mélange des eaux thermales avec des eaux superficielles devenant de plus en plus important, de telle sorte que les eaux superficielles puissent imposer leur caractère chimique sur les eaux chaudes.

APPROCHE SUR L'ORIGINE DES EAUX DE MOULAY YACOUB

Comparaison géochimique

La signature géochimique et l'identification des deux faciès au sein des sources de Moulay Yacoub nous ont conduit à comparer ces dernières avec d'autres dont l'origine est bien cernée. Ces sources thermales sont respectivement celle de Aïn Allah et celle d'Oulmès (Fig. 2). La première est captée directement du réservoir calcaire-dolomitique liasique. La deuxième sourd au niveau du socle hercynien est constitué par des séries sédimentaires de nature silicoclastique et carbonatée ainsi que des roches magmatiques essentiellement granitiques. Cette comparaison sera basée d'une part sur les teneurs en éléments majeurs et en trace et d'autre part sur une approche géothermométrique.

Sur le diagramme semi-logarithmique de SCHOELLER (1962) (Fig. 17), les sources chaudes de Moulay Yacoub sont très minéralisées. Elles possèdent des teneurs en

cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ et Na^+) et en anion (Cl^-) nettement supérieur à celles des sources d'Oulmès et d'Aïn Allah. En revanche, leurs teneurs en anion sulfate (SO_4^{2-}), sont comparables à celles d'Oulmès et d'Aïn Allah tandis que leur concentration en anion HCO_3^- est identique à celle d'Aïn Allah. La forte minéralisation des eaux de Moulay Yacoub traduirait une circulation à travers des niveaux lithologique de nature variée. En effet, l'étude lithostratigraphique de cette région atteste de l'existence de trois réservoirs potentiels qui sont: le socle paléozoïque, les dolérites triasiques et les calcaires liasiques, séparés de bas en haut par des formations imperméables argileuses du Trias et marneuses du Crétacé et du Miocène.

En outre, les spectres des eaux chaudes de Moulay Yacoub sont parallèles à celui d'Oulmès, ce qui traduirait une circulation de ces eaux à travers des réservoirs de nature lithologique semblable. La couverture triasique et néogène très riche en évaporites seraient responsables de la forte minéralisation des eaux de Moulay Yacoub.

Par ailleurs, sur le diagramme semi-logarithmique de la Fig. 18, les concentrations en éléments-trace et métalliques, affichées par les sources thermales de Moulay Yacoub, sont également comparables à celles des eaux d'Oulmès. Ces deux sources possèdent des teneurs supérieures à celles des eaux d'Aïn Allah captées directement du réservoir calcaire-dolomitique liasique. Ce dernier a été considéré jadis comme l'unique réservoir pour les sources de Moulay Yacoub (AMBROGGI, 1977; ZIADI, 1984; BAHAI, 1989; 1994; 1996; BENAABIDATE, 1994;

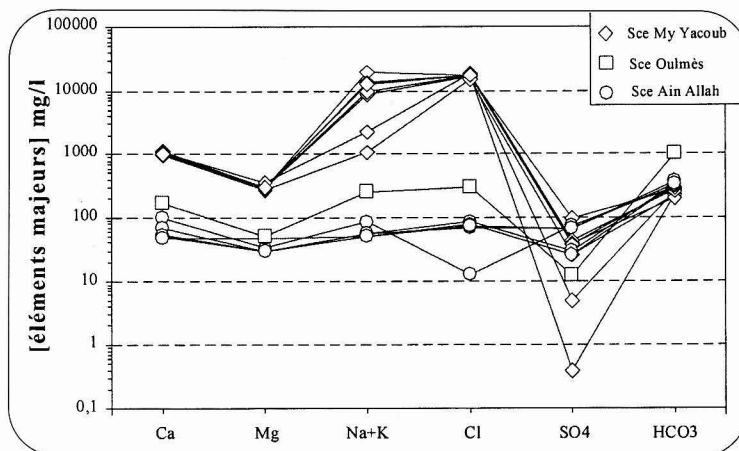


Fig. 17 – Comparaison de la composition en éléments majeurs sur le diagramme de SCHOELLER (1962).

– Comparison of major elements composition on SCHOELLER diagram (1962).

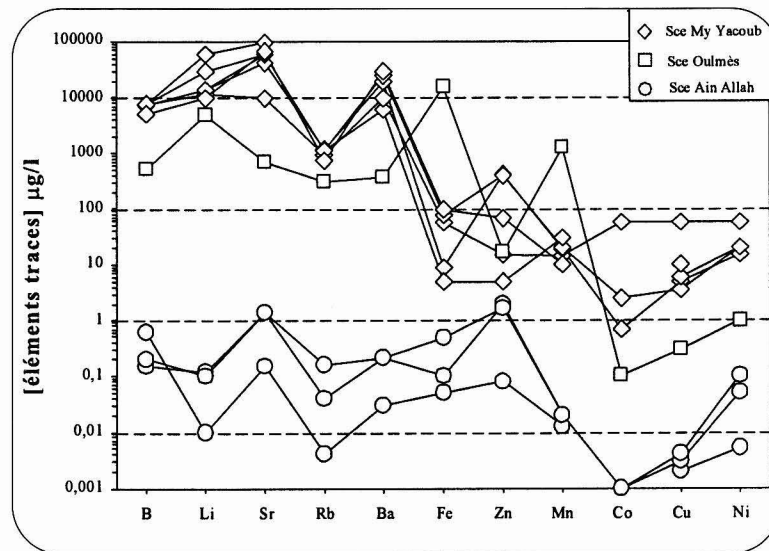


Fig. 18 – Comparaison de la composition en éléments en traces sur un diagramme semi-logarithmique.

– Comparision of trace elements composition on a semi-logarithmic diagram.

2000; MORABITI, 2000; WINCKEL, 2002; MIMI *et al.* 1997; 1999). Cependant, les teneurs élevées, surtout en Baryum et en Rubidium, suggèrent une circulation profonde de fluides hydrothermaux au sein d'un encaissant de nature cristallophyllienne (MYSLIL, 1984; WINCKEL, 2002). Ceci traduirait, pour les eaux de Moulay Yacoub, une circulation à travers un socle cristallophyllien plus profond que les formations triasiques et supposerait l'existence d'un ou plusieurs réservoirs plus profonds que le réservoir liasique. L'enrichissement marqué par les spectres de ces eaux en éléments B, Li, Sr, Rb et Ba, par rapport aux eaux d'Oulmès (Fig. 18), serait en relation avec l'interaction de ces eaux avec la couverture triasique, mésozoïque et cénozoïque très riches en évaporite. Ces interactions se dérouleraient au cours de l'ascension de ces eaux à partir des réservoirs cristallophylliens.

Comparaison géothermométrique

L'approche géothermométrique par la méthode de TRUESDELL (1976) prise en considération dans ce travail (Tableau 5), donne des estimations des profondeurs de 4,2 km pour la source d'Oulmès et de 1 à 1,72 km pour celle d'Aïn Allah. Dans le secteur d'étude, si on néglige la couverture secondaire et tertiaire (épaisseur \approx 2 km),

la profondeur la plus importante, estimé par la méthode de Truesdell pour les eaux de Moulay Yacoub ($6,4 - 2 = 4,4$ km), serait comparable à celle estimée pour les eaux chaudes d'Oulmès (ce travail). Ceci suggère, pour les eaux de Moulay Yacoub, une circulation à travers un socle cristallophyllien plus profond que le réservoir des formations triasiques et supposerait, comme suggéré par les éléments en traces, l'existence d'un ou plusieurs réservoirs en dessous du réservoir liasique.

Toutefois, certaines profondeurs affichées par les sources étudiées sont comparables à celles estimées pour la source d'Aïn Allah, ce qui reflète la profondeur du réservoir liasique. Celui-ci correspondrait au dernier aquifère où ont séjourné les eaux thermales de Moulay Yacoub avant de jaillir en surface.

Sur le diagramme de GIGGENBACH (1988) (Fig. 19), les sources d'Aïn Allah et de Oulmès occupent le domaine des eaux immatures superficielles. Les eaux d'Oulmès seraient influencées par l'infiltration des eaux superficielles à travers le couloir de cisaillement NE-SW sur lequel se place cette source (TAHIRI & HEOPFFNER, 1987; TAHIRI, 1991). Par contre les eaux d'Aïn Allah seraient des eaux immatures ayant circulé à travers le socle liasique en provenance du Causse Moyen Atlasique. Cette circulation, facilitée par les accidents non colmatés, se ferait par paliers depuis la zone de recharge (Causse Moyen Atlasique) vers la zone de

TABLEAU 5

Températures et profondeurs calculées par les méthodes géothermométriques des eaux thermales de Moulay Yacoub.

Temperatures and depths of Moulay Yacoub thermal waters, calculated by geothermometric methods.

Méthode	Température en °C					Profondeur en Km				
	Truesdel	Tonani	Arnorsson	Fournier	Giggenbach	Tr	Ton	Arn	Fr	Gig
Bahaj S. 89	78,792	101,748	90,14	124,81	144,888	1,7509	2,261	2,0031	2,774	3,2197
Bahaj S. 94	90,515	114,657	101,58	135,281	154,984	2,0114	2,548	2,2573	3,006	3,4441
Bahaj S. 96	375,11	436,946	367,46	352,142	354,892	8,3358	9,71	8,1659	7,825	7,8865
Morabiti 2000	290,12	338,879	290,37	294,076	303,024	6,4472	7,531	6,4527	6,535	6,7339
Morabiti 1996	98,568	123,542	109,42	142,394	161,817	2,1904	2,745	2,4315	3,164	3,5959
Benaabidate 2000	77,322	100,13	88,70	123,485	143,608	1,7183	2,225	1,9712	2,744	3,1913
Rachid Z. 1974	47,215	67,112	59,12	95,8769	116,77	1,0492	1,491	1,3138	2,131	2,5949
BRGM 74	77,268	100,07	88,65	123,437	143,561	1,7171	2,224	1,97	2,743	3,1902
BRGM 77	89,96	114,045	101,04	134,789	154,509	1,9991	2,534	2,2453	2,995	3,4335
BRGM 77	88,712	112,67	99,82	133,68	153,443	1,9714	2,504	2,2183	2,971	3,4098
BRGM 77	88,05	111,94	99,18	133,091	152,875	1,9567	2,488	2,204	2,958	3,3972
Intervalles	20-350	20-350	20-250	20-350	20-350					

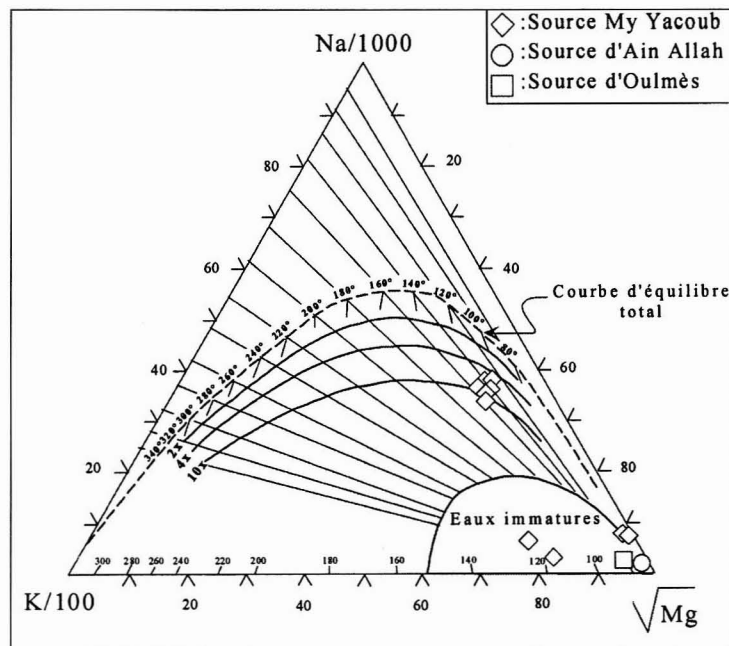


Fig. 19 – Comparaison des sources étudiées sur le diagramme de GIGGENBACH (1988).

– Comparison of studied springs on the GIGGENBACH diagram (1988)

décharge (SSR) (LAHRACHE *et al.*, 1998; SENDIDE, 2000). Par ailleurs, les sources thermales, localisées au niveau du calcaire liasique des rides sud rifaines, sont pratiquement dominées par les eaux superficielles (ZIADI, 1984; BAHAJ, 1989; 1994; 1996; BENAABIDATE, 1994; 2000; MORABITI, 2000; WINCKEL, 2002). Le réservoir liasique serait un lieu où se produiraient les mélanges des eaux immatures avec celles provenant des réservoirs plus profonds.

Ainsi, les sources du secteur d'étude, dominées par les eaux superficielles, sont celles qui correspondent au groupe du faciès Cl-Ca-Mg. Ces eaux ont une signature géochimique traduisant d'une part une circulation à travers le socle cristallophyllien et triasique et d'autre leur passage et leur mélange avec les eaux immatures dans le réservoir calcaire-dolomitique liasique. Par contre, les sources du faciès Cl-Na, les moins diluées et dont la signature chimique atteste également d'une circulation à travers le socle cristallophyllien, échapperaient à ce réservoir au cours de leur ascension vers la surface. En effet, les accidents profonds NE-SW, sur lesquels se positionnent ces sources, faciliteraient non seulement la communication et la circulation des ces eaux entre les différents réservoirs mais également leur transfert vers la surface.

CONCLUSION

L'étude pluridisciplinaire menée sur les sources thermominérales de Moulay Yacoub apporte une nouvelle approche géologique et géochimique de ce complexe hydrothermal. En effet, cette étude met l'accent sur l'origine de ces eaux ainsi que sur les phénomènes qui se seraient déroulés au cours de leur transfert vers la surface.

La région de Moulay Yacoub est constituée par une série sédimentaire dominée par des dépôts marneux à caractère imperméable. La découverte de blocs de calcaire liasique et de blocs métamorphiques et magmatiques paléozoïques ainsi que la présence de grande masse doléritique triasique, suggère l'existence de formations perméables sous cette couverture. L'étude lithostratigraphique réalisée dans cette région atteste de la présence de trois réservoirs potentiels qui sont: le socle paléozoïque, les dolérites triasiques et les calcaires liasiques.

Les eaux thermales de Moulay Yacoub possèdent un faciès principal chloruré-sodique et un faciès secondaire

chloruré-calcique et magnésien. Cette signature géochimique est en relation avec le stockage et l'interaction de ces eaux avec l'encaissant des réservoirs potentiels de nature lithologique diversifiée. Ces eaux montrent une forte minéralisation et des teneurs importantes en éléments en traces et en éléments métalliques comparables à celles des sources chaudes d'Oulmès. Ceci traduirait pour les eaux de Moulay Yacoub une circulation à travers un socle plus profond que les formations triasiques et supposeraient l'existence d'un ou plusieurs réservoirs plus profonds que le réservoir liasique. En effet, la découverte des extrusions métasédimentaires et magmatiques riches en minéralisation reflète la nature de ce substratum et expliquerait les teneurs importantes de ces eaux en éléments traces et en éléments métalliques. Ces extrusions minéralisées montrent également une relation génétique avec ce gisement hydrothermal puisqu'elles sont intimement associées au même réseau des accidents sur lequel sourdent ces sources. L'affleurement des ces extrusions, au niveau de l'intersection entre les fronts de chevauchements E-W et les accidents NE-SW, s'expliquerait par des mouvements contemporains, générés par ces deux accidents. Les accidents NE-SW à jeu décrochant permettraient la mobilisation du matériel profond et ceux de direction E-W à jeu chevauchant faciliterait sa remonté vers la surface.

Ces alignements structuraux, en particulier ceux de direction NE-SW, qui atteignent des profondeurs importantes, faciliteraient la communication entre les différents réservoirs et l'acheminement de ces eaux profondes vers surface. Ces eaux proviendraient à partir des profondeurs estimées entre 1,2 km et 6,4 km. Au cours de leur transfert vers la surface, ces eaux vont être diluées suite à des mélanges réalisés en grande partie dans le réservoir liasique. Ce dernier, considéré comme le réservoir le plus important de ce domaine, serait le siège des mélanges des eaux du faciès Cl-Ca-Mg avec les eaux superficielles des formations carbonatées. Par contre, le transfert des eaux thermales du faciès Cl-Na, les moins diluées, se ferait directement vers la surface par l'intermédiaire de ces accidents sans séjourner dans le réservoir liasique.

Le prolongement de ces accidents dans le domaine rifain, au nord et méseto-atlasique au sud favoriserait également la circulation profonde des eaux météoriques à partir des zones de recharge (Rif au Nord et Moyen Atlas au Sud) vers la zone de décharge correspondant au SSR.

REFERENCES

- ABDELKHLIKI, L. (1997) – Evolution tectono-sédimentaire des dépôts gravitaires dans le Prérif interne de l'unité de Habt (Rif externe occidental, Maroc): Mise en place dans les bassins néogènes d'avant-fosse. *Thèse de 3^{ème} cycle, Univ. Mohamed V. Rabat (Maroc)*. 160 p.
- AÏT BRAHIM, L. (2003) – Cinématique des principales failles de la chaîne rifaine, cadre sismotectonique et risques sismiques. *Trav. Inst. Sci. Rabat, Série Géol. & Géogr. Phys.*, **21**, pp. 14-150.
- AÏT BRAHIM, L. & CHOTIN, P. (1984) – Mise en évidence d'un changement de direction de compression dans l'avant-pays rifain (Maroc) au cours du Tertiaire et du Quaternaire. *Bull. Soc. Géol., France*, **26**, (4), pp. 681-691.
- AMBROGGI, R. (1977) – Expertise géologique et hydrogéologique du Site thermal de Moulay Yacoub. *Rapp. Inédit. BRGM. France*.
- ASEBRY, L.; AZDIMOSA, A. & BOURGOIS, J. (2003) – Structure du Rif externe sur la transversale du Massif de Kétama. *Trav. Ins. Sci. Rabat, Série Géol. & Géogr. Phys.*, **21**, pp. 27-46.
- BAHAJ, S. (1997) – *Studio géochimico delle acque termali del Marocco centro-settentrionale (Rif – Méridionale E Oulmès)*. Doctorato Di Ricerca in Scienze. Consorzio genova-cagliari-torino (Ix Ciclo). 144 p.
- BENAABIDATE, L. (1994) – *Contribution à l'étude hydrogéothermique du Maroc nord-occidental (Rharb, Rides et Sais)*. Thèse de 3^{ème} cycle, Sfax (Tunisie).
- BENAABIDATE, L. (2000) – *Caractérisation du bassin versant de Sebou: Hydrologie, Qualité des eaux et géochimie des sources thermales*. Docteur Es-sciences, Univ S M B A, Fes(Maroc). 228p.
- BENSHILI, K. (1989) – Lias-Dogger du Moyen Atlas plissé (Maroc). Sédimentologie, biostratigraphie et évolution paléogéographique. *Doc. Lab. Géol., Lyon*, **106**, 285 p.
- CARLIER, P. (1971) – La plaine du Kerte. In ressources en eau du Maroc, domaine du Rif et du Maroc oriental, *Notes et Mémoires du service géologique n.° 231*, 141-166. Géologie structurale *C.R. Acad. Sci. Paris*, **309**, (II), p. 2053-2059, 1989.
- CHALOUAN, A.; MICHARD, A.; FEINBERG, H.; MONTIGNY, R. & SADDIQLI, O. (2001) – The Rif mountain building (Morocco): A new tectonic scenario. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, **5**, pp. 603-616.
- CIDU, R.; BAHAI, S. (2000) – Geochemistry of thermal waters from Morocco. *Geothermics*, **29**, pp 407-430.
- D'AMORE, F.; SCANDIFFIO, G. & PANICHI, C. (1983) – Some observations on the chemical classification of ground waters. *Geothermics*, **12**, pp. 141-148.
- EL MORABITI, K. (2000) – *Contribution à la connaissance géologique, hydrochimique et isotopique des eaux thermales du Maroc septentrional*. Thèse d'Etat, Université Mohammed V, 226 p.
- GIGGENBACH, W. F. (1988) – Geothermal solute equilibrium. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **52**, 2749-2765.
- LAKHDAR, A. (2004) – Le système hydrothermal de Moulay Yacoub (Bordure septentrionale du Sillon Sud Rifain occidental) contexte géologique, hydrochimie, géothermie et circulation hydrothermale. *Mém. DESA, Univ S M B A, Fes (Maroc)*. 86 p
- LAKHDAR, A.; NTARMOUCHANT, A.; BEN ABBOU, M.; RIBEIRO, M. L.; EL HAMZAoui, O.; EL OUADEIHE, K. & HESSANE, M. A. (2004) – Minéralisations sulfurées et activité hydrothermale post-miocène: impact sur la signature géochimique des eaux thermales de Moulay Yacoub (Bordure septentrionale du Sillon Sud Rifain Occidental, Maroc Septentrional). *4^{ème} Coll. 3MA, pg7. Agadir (Maroc)*.
- LAKHDAR, A.; NTARMOUCHANT, A.; BENAABIDATE, L.; BENSLIMANE, A.; EL OUADEIHE, K. & HESSANE, M. (2005) – Les sources thermales de Moulay Yacoub. Nouvelle approche hydrogéochimique. *3^{ème} Journées Internationale des géosciences de l'environnement. El Jadida (Maroc)*.
- MIMI, A.; BEN DHIA, H.; BOURI, S.; LAHRACH, A.; BEN AABIDATE, L. & BOUCHAREB-HAOUCHIM, F. Z. (1997) – Application of chemical geothermometers to thermal springs of the Maghreb, North Africa. *Geothermics*, **27**, (2), pp. 211-233.
- MIMI, A.; ZARHLOULE, Y.; BOURI, S.; OUDA, B.; LAHRACH, A.; BEN AABIDATE, L. & BEN DHIA, H. (1999) – Géochimie des eaux chaudes et prospection hydrothermale au Maghreb (NW Afrique): Caractérisation du réservoir d'origine et indices thermiques. *Bull. Liaison. Sci. Afro-quèbècois*, **II**, pp. 89-104.
- MOREL, J. L. (1989) – Evolution paléogéographique et tectonique du Rif (Maroc) du Tortonien à l'actuel. *Comptes Rendues de l'Acad. Sc.. Sire 2*, **309**, (20), pp. 2053-2059. Gauthier-Villars, Paris, França.
- MORLEY, C. K. (1992) – Tectonic and sedimentary evidence for synchronous and out-of-sequence thrusting. Larach-aciloh area, western Moroccan Rif. *Journal of the Geological Society*, **149**, London, pp. 39-49.
- MYSLIL, V. (1984) – Rapport de Mission. Mins Energy et Min (Maroc).
- PIQUE, A.; AIT BRAHIM, L.; AIT OUALI, R.; AMRHAR, M.; CHARROUD, M.; GOURMELEN, C.; LAVILLE, E.; REKHISS, F. & TRICART, P. (1998) – Evolution structurale des domaines atlasiques du Maghreb au Méso-Cénozoïque, le rôle des structures héritées dans la déformation du domaine atlasique de l'Afrique du nord. *Bull. Soc. Géol. France*, **6**, 797-810.
- PLATZMAN, E. S.; PLATT, J. P. & OLIVIER, P. (1993) – Palaeomagmatic rotations and fault kinematics in the Rif Arc of Morocco. *Journal of the Geological Society, London*, **150**, pp. 707-718.
- RIMI, A. (2001) – Carte du gradient géothermique au Maroc. *Bull. Inst. Sci. Rabat*, **23**, pp 1-6.
- SABAoui, A. (1998) – *Rôles des inversions dans l'évolution Méso-cénozoïque du Moyen Atlas Septentrional (Maroc). L'exemple de la transversal El Menzel-Ribat Al Khayr-Bou Iblan*. Thèse d'Etat –Es-Sciences. Fac. Scie. Fès. p. 432.
- SENDIDE, O. (2000) – *Etude qualitative des eaux de la nappe phréatique du bassin de Fès-Mèknes : Caractérisation, évolution, modélisation mathématique et moyenne de protection*. Thèse de 3^{ème} cycle. Tunisie.

- SOUFIANI, N. & FEDAN, B. (2002) – Les dépôts bathoniens du synclinal d'El Mers (Moyen Atlas, Maroc): Unités formationnelles, analyse du cadre géodynamique. *Bull. Inst. Sci. Rabat*, **24**, pp. 1-14.
- SOUQUET, P. & DERAMOND, J. (1989) – Séquence de chevauchements et séquence de dépôt dans un bassin d'avant-fosse. Exemple du sillon crétacé du versant sud des Pyrénées (Espagne). *C. R. Ac. Sc. Paris*.
- TAHIRI, A. & HOEPPFNER, C. (1987) – La faille d'Oulmès: cisaillement ductile et tectonique tangentielle, Maroc Central Hercynien. *Bull. Inst. Sc. Rabat*, **11**, pp. 59-6.
- TAHIRI, A. (1991) – *Le Maroc central septentrional: stratigraphie, sédimentologie et tectonique du paléozoïque; un exemple de passage de zone internes aux zones externes de la chaîne hercynienne du Maroc*. Thèse ès Sciences, Univ. de Bretagne Occidentale, Brest, 215 p.
- TEJERA, J.; DE LEON & DUEE, G. (2003) – Relationships between the Neogene foredeep basins of the western external rifian belt related to the Arbaoua-Jebha transform fault consequences for the interpretation of the evolution of the rifian belt (Morocco).

Artigo recebido em Novembro de 2006

Aceite em Fevereiro de 2007