

Mécanismes de fonctionnement des systèmes hydrothermaux.

Application aux eaux thermominérales algériennes et aux eaux de Hammam Bou-Hadjar

Abderrahmane ISSAADI

Laboratoire d'Hydrogéologie. IST/USTHB,
B.P. 32, El Alia Bab Ezzouar, Alger, Algérie

Résumé : Si les sources thermominérales ont été considérées jusqu'à une époque récente comme des phénomènes surnaturels auxquels les cultures et les civilisations ont attribué un caractère sacré, l'évolution des connaissances et l'utilisation de diverses disciplines scientifiques ont permis d'appréhender ces phénomènes et de comprendre leurs fonctionnements hydrogéologiques. Actuellement, les méthodes lithostratigraphiques et structurales, les études géochimiques classiques et isotopiques permettent d'expliquer la plupart des circuits hydrothermaux, de définir l'origine des eaux en précisant les zones d'alimentation, de transit et d'émergence, les processus d'acquisition de la température et de la minéralisation ainsi que de déterminer les températures acquises par les eaux au cours de leur enfouissement. Si bien qu'il nous est permis aujourd'hui de remplacer la notion de griffon et de captage au griffon par celle de système hydrothermal et de forage d'eau thermale, gage d'une bonne protection développement de la ressource. L'application de cette démarche méthodologique aux eaux thermominérales algériennes permet de définir les aires d'alimentation, la nature des réservoirs ainsi que les éléments structuraux responsables des émergences. Une approche circonstanciée aux eaux thermominérales de Hammam Bou Hadjar montre que l'hydrothermalisme constitue une clef vers une meilleure connaissance de la géologie profonde.

Mots-clés : Eau thermominérale, Faille, Réservoir, Zone d'alimentation, Géochimie, Isotope, Géologie profonde.

Behaviour mechanisms of hydrothermal systems.

Applying to algerian thermomineral waters and Hammam Bou-Hadjar spring

Abstract : If thermomineral springs have been considered until a recent time like supernatural phenomenons at which cultures and civilizations had assigned a sacred feature, the development of knowledges and the utilization of varied scientific disciplines had permitted to appreciate this phenomenons and to understand their hydrogeological behaviours. At the present time, lithostratigraphic and structural methods, hydrochemical and isotopic geochemical studies allows us to explain the most hydrothermal circuits, to define the origin of waters along specifying the feed, the transit and emergence areas, and acquiring process of temperature and mineralization and also to determine temperatures acquired by waters along their percolation. With the results that now we can change notions of «griffon» and «catchment at griffon» by «hydrothermal system» and «thermal waters boring», token of a good

protection the development of the resource. Applying this methodological steps to Algerian thermomineral waters permit to define feed areas, reservoirs nature and also structural elements which are answerable of emergences. A detailed approach of thermomineral springs of Hammam Bou-hadjar let us see that hydrothermal studies constitute a gateway to abest knowledge of the deep geology.

Key-words : Thermomineral water, Fault, Reservoir, Feed area, Geochemistry, Isotope, Deep geology.

I - ORIGINE ET MECANISMES DE FONCTIONNEMENT DES EAUX THERMOMINERALES

Grâce à l'utilisation récente des isotopes de la molécule d'eau et de la phase dissoute, particulièrement l'oxygène 18 et le deutérium, le tritium, le carbone 13 et 14, on admet actuellement que les eaux thermominérales proviennent d'eau d'infiltration.

Les circulations s'effectuent de la surface vers la profondeur puis de la profondeur vers la surface déterminant un circuit hydrothermal A,B,C,D où l'eau assure un brassage géochimique continu dans cette tranche de l'écorce terrestre (fig. 1).

Divers facteurs vont intervenir pour permettre les mécanismes de fonctionnement de ces eaux. Nous pouvons retenir :

- la différence de charge entre zone d'alimentation et zone d'émergence;
- la porosité, la perméabilité et la fracturation des terrains rencontrés qui tendent à diminuer avec la profondeur et entraîner des circulations de plus en plus lentes;
- la température qui augmente avec la profondeur (gradient géothermique, radioactivité, phénomènes d'oxydation, activité sismique);
- souvent la présence d'une source de chaleur avec apports de fluides, de vapeurs ou de gaz profonds particulièrement en pays cristallin et / ou volcanique;
- lors de la remontée vers la surface, les eaux traversent des terrains de plus en plus froids et des milieux à

perméabilité de plus en plus élevée conduisant le tronçon thermal souvent à se ramifier et déterminer ainsi plusieurs griffons dont un principal et d'autres secondaires;

- des mélanges avec des eaux plus froides, intermédiaires ou superficielles peuvent se produire.

On constate donc que s'il n'existe pas de coupure entre hydrogéologie de surface et hydrogéologie profonde en raison de l'origine même de l'eau qui y circule, par contre, les mécanismes de fonctionnement des eaux thermominérales deviennent plus complexes car les circulations sont plus profondes et corrélativement les facteurs susceptibles d'intervenir plus difficilement maîtrisables.

Cette spécificité nécessite des méthodes d'investigation plus adaptées avec une association intime de l'hydroclimatologie, de la géologie et de la géochimie.

Pour ce qui concerne l'hydroclimatologie, si la température de l'air permet surtout de préciser les limites de la thermalité des eaux et de caractériser une eau thermale, l'étude des précipitations conditionne les apports aux différents systèmes aquifères et permet d'estimer les volumes susceptibles de transiter par les nappes profondes et de commander ainsi le régime hydrologique des sources.

L'orohydrographie est aussi intéressante à discuter en raison de la localisation des sources au niveau des dépressions topographiques à proximité des oueds mais aussi et surtout de l'orientation des systèmes d'écoulement sur de grandes distances qui correspondent le plus souvent à des zones de faiblesse qui reflètent l'existence de failles profondes ou leurs

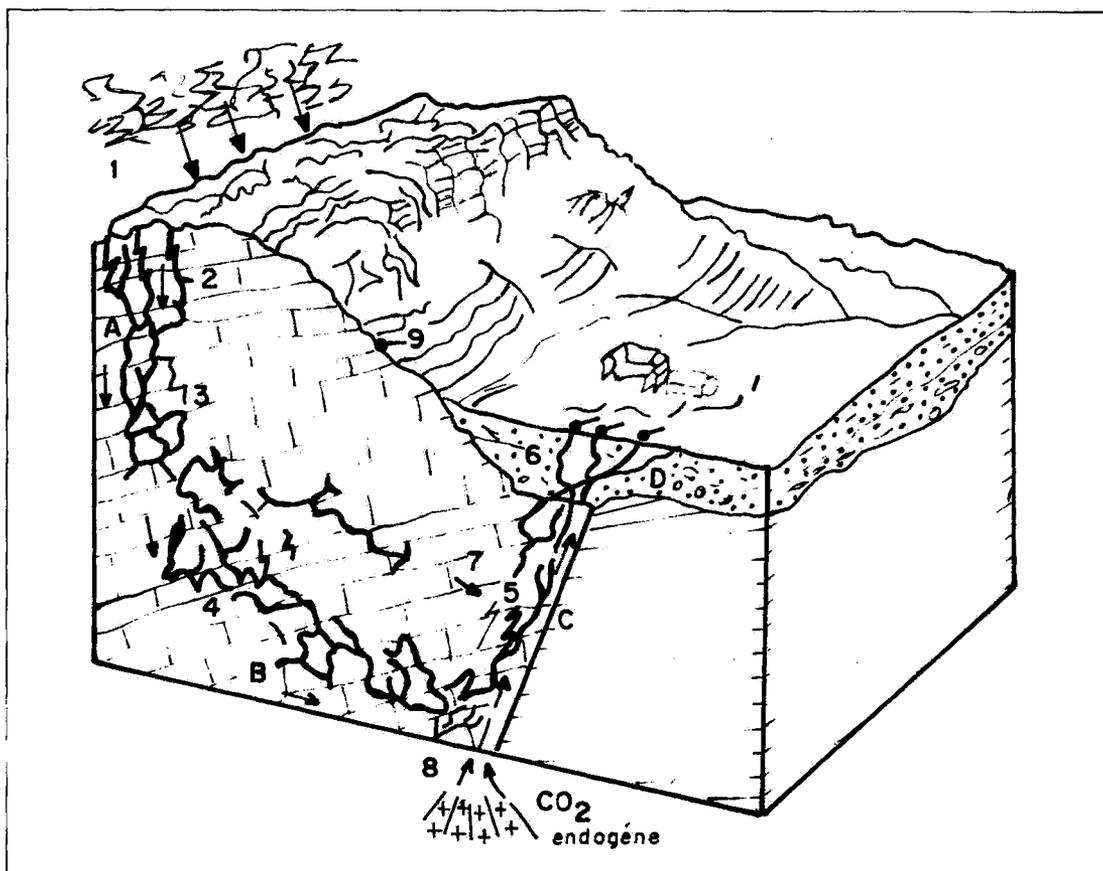


Fig. 1 - Schéma de fonctionnement des systèmes hydrothermaux (d'après F. Lundt, 1991, modifié)
 Diagram of thermomineral waters behaviour (by F. Lundt, 1991, modified)

1 - Zone d'alimentation, 2 et 3 - Zones d'infiltration, 4 - Zone de circulation profonde, 5 - Zone de remontée des eaux vers la surface, 6 - Zone de mélange avec des eaux superficielles et ramification du tronc thermal, 7 - Mélange avec des eaux semi-profondes, 8 - Apports de fluides et/ou de gaz profonds, 9 - Source froide. A-B-C-D = Circuit hydrothermal.

satellites responsables de la remontée des eaux vers la surface.

L'étude géologique reste l'élément fondamental qu'il convient d'analyser sous deux aspects :

- l'aspect lithologique concerne la nature, la répartition spatiale et la disposition structurale des terrains. Couplé aux investigations géophysiques et aux données de forages existants, cette approche permet de préciser les horizons aquifères. Les affleurements correspondent aux zones d'infiltration, en profondeur ils commandent les zones d'accumulation. Par ailleurs, la minéralisation

des eaux dépendra en premier lieu de la nature des roches traversées;

- l'aspect structural s'intéressera particulièrement à définir les accidents importants ou leurs satellites responsables de la remontée des eaux vers la surface. Cela est possible par l'analyse structurale classique mais aussi par les autres moyens mis à notre disposition tels que l'imagerie satellite et la géophysique.

A l'émergence, ce sont les caractéristiques géochimiques ainsi que leurs suivis dans le temps

qu'il convient d'étudier. Il s'agit des paramètres physiques, chimiques en éléments majeurs, mineurs et traces, des dépôts et des gaz aux émergences, de la radioactivité ainsi que des isotopes de la molécule d'eau et de la phase dissoute. Ces différents paramètres permettent en particulier :

- de caractériser les eaux à l'émergence;
- de définir les facteurs géologiques qui déterminent l'origine et la nature de la composition chimique, c'est à dire de préciser les relations entre les eaux et le milieu dans lequel elles ont été mises en contact et dont elles reflètent les réalités à leurs émergences;
- d'utiliser les géothermomètres chimiques et isotopiques afin d'apprécier les températures atteintes dans les réservoirs profonds;
- de confirmer ou d'infirmer l'origine profonde des eaux, la mobilité et l'ouverture des fractures profondes;
- de préciser l'origine des eaux, des substances dissoutes et gazeuses ainsi que les aires d'alimentation.

La synthèse de ces différentes approches permettra de préciser au mieux les mécanismes de fonctionnement des systèmes hydrothermaux et de déterminer une ou plusieurs cibles de forage (emplacement et profondeur) en précisant le protocole de réalisation (technique de forage, dimensionnement et équipement). L'exécution de ce forage devrait permettre :

- d'empêcher tout mélange avec des eaux d'une autre nature;
- de définir les caractéristiques et la conformité de l'eau thermominérale captée qui doivent être égales ou voisines des eaux de la source principale;
- de définir les conditions d'exploitation en précisant en particulier le débit maximum à respecter pour éviter tout déséquilibre hydrodynamique du système hydrothermal.

II - APPLICATION A L'ECHELLE DE L'ALGERIE DU NORD

1 - Eléments structuraux responsables de la remontée des eaux vers la surface

En Algérie du Nord, l'étroite dépendance entre tracé des oueds et axes structuraux, l'orientation des principaux oueds calquée sur les accidents transverses aux directrices du relief actuel ainsi que la linéarité des chotts et sebkhas sur de grandes distances sont autant d'arguments qui permettent de lier les orientations moyennes des oueds à des zones de faiblesse pouvant refléter l'existence de grands accidents de socle. *Si bien que la localisation des sources thermominérales ne s'explique pas seulement par une faible charge hydrostatique au niveau des dépressions topographiques mais aussi et surtout par l'existence d'accidents importants ou de leurs satellites qui permettent la remontée des eaux vers la surface.*

A la lumière des travaux géologiques régionaux, des études néotectoniques basées sur les analyses microtectoniques et les mécanismes au foyer et des alignements décelables sur les images satellites, il apparaît que l'Algérie du Nord soit affectée par un système de failles qui s'organisent selon quatre directions principales.

- **Les accidents subméridiens ou transversales**
Définies par L. Glangeaud (1951), les transversales correspondent à des accidents crustaux qui se traduisent par des décrochements senestres d'orientation moyenne NO20°E. Ils se présentent généralement en faisceaux étroits qui combinent failles décrochantes, plis locaux et sont jalonnés de diapirs triasiques gypso-salin. Ces accidents correspondent très souvent à des jeux ou rejeux tectoniques récents, postérieurement à la tectonique spectaculaire du Tertiaire.

Depuis L. Glangeaud qui a décrit six de ces transversales, d'autres auteurs, en particulier G. Dubourdieu (1962), R. Guiraud (1967), J. Devaux (1967), P. Guardia (1975) et S. Elmi (1982) ont signalé l'existence de ces structures transverses.

L'alignement des zones sismiques suivant ces directions atteste du rejeu récent de ce système (Kazi Tani, 1986; Issaadi, 1992).

- **Les accidents orientés NE-SW** - Ces accidents montrent une orientation moyenne N 50° E et s'observent partout en Algérie du Nord. Ils sont particulièrement représentés dans les domaines tellien et saharien comme l'atteste la fréquence des injections triasiques et les décrochements senestres qui affectent les panneaux concernés. Ils bordent souvent les bassins néogènes et leurs tracés peuvent être parfois soupçonnés comme l'accident qui limite la bordure rectiligne du Chott Chergui et qui se poursuit dans les monts de Chellala et du Djebel Nador. Dans les régions où prédominent les formations compétentes (monts de Constantine, Méséta Oranaise...), ces accidents morcellent les massifs en grands panneaux déterminant ainsi un ensemble de horsts et de grabens particulièrement propices à la remontée des eaux thermominérales. *Ces accidents de direction atlasique peuvent donc correspondre au rejeu d'anciens accidents.*

- **Les accidents directionnels W-E** - Généralement, ce sont des accidents de grande extension qui se manifestent par des décrochements dextres et déterminent les cours de nombreux oueds. Pour illustrer l'importance de ces failles, citons deux exemples :

* dans la bordure méridionale du massif de petite Kabylie, l'existence de ce type d'accidents est attesté par l'alignement des massifs jurassico-crétacés depuis M'cid Aïcha à l'Ouest jusqu'au djebel Debar à l'Est;

* entre la zone bibanique et sud-bibanique passe une flexure plurikilométrique de Berrouaghia à l'Ouest jusqu'aux Bibans à l'Est. Cet accident est matérialisé au niveau des anticlinaux par des injections triasiques.

L'alignement des foyers sismiques suivant cette direction ainsi que la présence de nombreuses sources thermominérales à proximité de ce type d'accidents témoignent de leur rôle essentiel dans la remontée des eaux vers la surface.

- **Les accidents orientés NW-SE** - Les nombreux accidents qui appartiennent à ce système sont généralement complémentaires des failles transverses NE-SW. J. Devaux (1969) en a décrit un certain nombre à décrochement dextre. Pour notre part, signalons l'importance de la faille de Gafsa qui limite la partie occidentale des monts de Nementcha, passe par le couloir de Biskra, se prolonge par l'extrémité sud-ouest des monts du Hodna ainsi que les failles des régions orientales de l'Algérie qui affectent le Quaternaire et déterminent des fossés d'effondrement ou encore la ligne tectonique à jeu dextre Négrine-Béjaïa (Kazi-Tani, 1986). *Généralement les sources à thermalisme actif s'alignent sur ces accidents.*

Par ailleurs, les manifestations magmatiques situées aussi bien dans le domaine interne qu'externe sont mises en place postérieurement à la tectonique spectaculaire des nappes telliennes et s'arrêtent au début du Quaternaire. Depuis, l'Algérie se trouve dans un contexte structural compressif auquel on associe l'activité sismique du Maghreb et l'apparition ou le rejeu de failles d'orientation surtout W-E à décrochements dextres.

Si l'initiation magmatique Miocène est liée à l'évolution tectonique des bassins néogènes septentrionaux post-nappe, il n'en demeure pas moins que sa mise en place nécessite l'existence d'une composante distensive profonde permettant la montée du magma. C'est ainsi que A. Mauffret et al. (1987) pensent que les pointements volcaniques se seraient mis en place le long d'une zone de décrochement dextre d'orientation W-E. A Béjaïa-Amizour, les émissions volcaniques paraissent liées à deux accidents majeurs NNE-SSW, l'un passant au niveau du bassin de la vallée de la Soummam à Béjaïa, l'autre à proximité d'El Aouana (Semroud, 1981).

Le volcanisme Plio-Quaternaire serait dû à des épisodes extensifs récents. Celui de la Tafna est aligné suivant un accident transverse (Tafna-Magoura) d'orientation moyenne N 20° E (Guardia, 1980). Néanmoins, ce volcanisme pourrait s'être épanché à la

faveur de mouvements distensifs dans un environnement globalement compressif (Meghraoui *et al.*, 1984).

Un certain nombre de sources thermominérales présentant des caractéristiques particulières, telles que des dégagements gazeux abondants, sont plus ou moins directement liées au magmatisme.

En définitif, il apparaît une étroite relation entre les sources thermominérales et les accidents transverses. Cette relation est d'autant plus marquée lorsque ces accidents sont recoupés par le deuxième système de failles orientées W-E à NW-SE. C'est particulièrement à leur intersection qu'apparaissent les sources les plus chaudes et celles qui présentent des dégagements gazeux abondants (CO₂ d'origine endogène; Issaadi, 1992). Il s'agit là des témoins de l'activité récente ou actuelle de ces accidents responsables de la remontée des eaux vers la surface (fig. 2).

2 - Les réservoirs

Mis à part les Kabylies qui constituent les affleurements les plus importants des terrains anciens, le Paléozoïque et le socle cristallin polymétamorphique reconnus un peu partout à travers l'Algérie doivent être considérés dans leur ensemble comme imperméables. En effet, gneiss et micaschistes peuvent être imprégnés d'eau dans la zone d'altération superficielle et ne permettent pas aux eaux de s'infiltrer profondément. Associés à ces formations, les affleurements primaires ont une extension réduite. Leurs constitutions lithologiques caractérisées par la diversité des faciès expliquent leurs rôles hydrologiques limités. On ne rencontrera alors dans ces terrains anciens que des sources froides à débits insignifiants. Cependant les intercalations de quelques lentilles calcaires métamorphiques ou de calcaires dolomitiques déterminent l'existence de quelques sources froides à débits plus importants mais à caractère temporaire, en raison de l'extension réduite et de la perméabilité limitée de ces formations. Exceptée la source minérale

de Stora située à l'Ouest de Skikda, nous ne connaissons aucune source thermominérale qui émerge directement des formations anciennes.

Du point de vue hydrologique, si les formations triasiques par suite de leur position structurale et leur faciès globalement argileux sont très peu perméables et ne peuvent constituer de véritables réservoirs aquifères, par contre leur nature gypso-saline jouera un rôle prépondérant dans la contamination des aquifères liasiques et surtout dans la mise en solution des éléments minéraux. En Algérie du Nord, le chimisme de nombreuses sources thermominérales est particulièrement influencé à divers degrés par ces formations.

Les séries jurassiques affleurent aussi bien dans le domaine tello-rifain qu'atlasique. Sous l'angle hydrologique, ces terrains particulièrement calcaires et dolomitiques présentent un intérêt certain. On y retrouve toutes les caractéristiques de la circulation des eaux dans les roches fissurées et / ou karstifiées telles que :

- l'extension des affleurements et l'importance des épaisseurs;
- des sommets élevés et des dénivelés accusés entre massifs et plaines environnantes;
- une fissuration prononcée;
- une morphologie superficielle et profonde de type karstique, parfois très développée;
- la présence de sources qui émergent directement de ces massifs ou à leur proximité immédiate.

Ainsi, les formations jurassiques constituent de véritables réservoirs qui emmagasinent la majeure partie des précipitations (pluie et neige). Les eaux s'infiltrent et circulent à des profondeurs plus ou moins importantes pour réapparaître sous forme d'émergences commandées par la lithologie, les conditions géologiques et géomorphologiques locales.

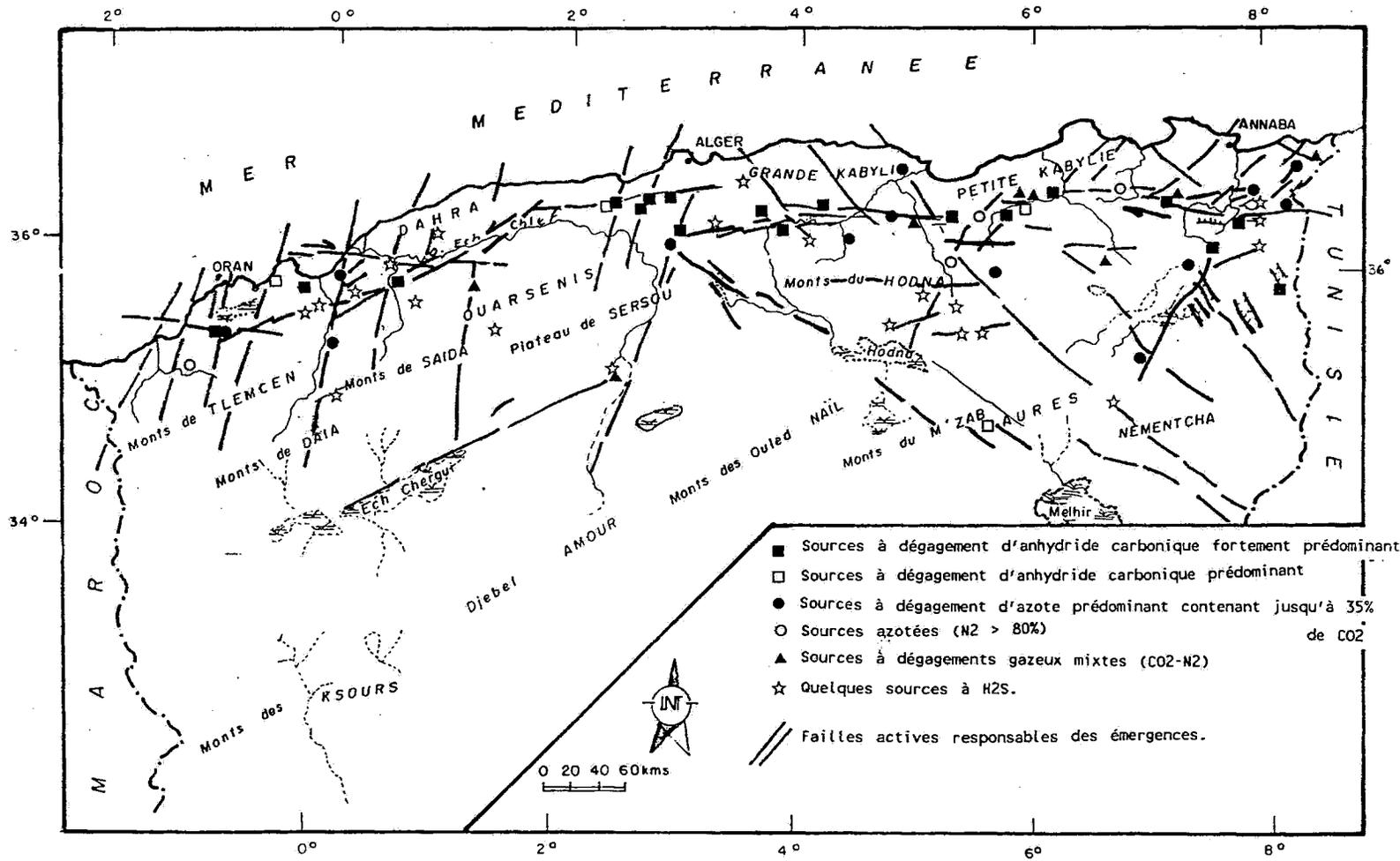


Fig. 2 - Relations sources thermominérales à dégagements gazeux et failles majeures
Relations between thermomineral waters with gas and principal faults

De nombreuses sources thermominérales sont liées à ce type de fonctionnement.

Les affleurements crétacés sont très répandus en Algérie septentrionale, particulièrement au niveau des Atlas tellien et saharien.

Le Crétacé inférieur et moyen à faciès gréseux (régions sud-telliennes et hauts plateaux), calcaire ou calcaréo-dolomitique (Tell oriental et secteur sud oriental) constitue de bons réservoirs. Ils sont d'autant plus importants lorsqu'ils sont superposés au Jurassique supérieur carbonaté, déterminant ainsi un ensemble hydrogéologique perméable en grand.

Le Crétacé supérieur n'est pas favorable à la constitution de réservoirs importants. Si au niveau de la zone tellienne, les formations à dominante marneuse conditionnent beaucoup plus le ruissellement que l'infiltration des apports, par contre dans les régions où les faciès carbonatés prennent une plus grande importance, les conditions sont plus favorables. Seulement, la disposition des calcaires qui surmontent parfois une épaisse série marneuse du Sénonien inférieur ne permet pas aux eaux de s'infiltrer profondément.

Le Paléogène présente globalement les mêmes caractéristiques hydrologiques que le Crétacé supérieur. Toutefois, l'Eocène calcaire prend de l'importance dans les régions kabyles où lithologiquement, il peut être regroupé avec les calcaires liasiques. Dans ce cas, cet ensemble perméable en grand peut jouer le rôle de récepteur et de transit vers la profondeur. La perméabilité verticale limitée du socle de même que la disposition structurale en écaille ne permettent que des circulations peu profondes.

Les terrains néogènes et quaternaires remplissent les grandes vallées, les plaines sub-côtières et intérieures. La nature, l'extension et l'épaisseur des sédiments déterminent l'existence d'un ou de plusieurs aquifères superposés. La profondeur de circulation des eaux, les accidents profonds responsables de la remontée des gaz, les niveaux gypseux Messiniens

ainsi que la proximité des roches éruptives sont autant de facteurs qui expliquent la présence et les caractéristiques des sources thermominérales.

Enfin, les roches magmatiques Mio-Plio-Quaternaires représentées par un ensemble de roches effusives et intrusives constituent le long du littoral algérien des massifs isolés, de faibles extensions dont la nature lithologique ne leur permet pas de jouer un rôle hydrologique important. Toutefois, lorsque les coulées basaltiques sont prismées, elles peuvent devenir perméables et permettre aux eaux de s'infiltrer assez profondément pour réapparaître avec des températures indiquant nettement un certain degré de thermalisme. C'est particulièrement le cas des sources liées aux basaltes de la région de Béni-Saf.

3 - Les zones d'alimentation

La présence de Tritium dans les eaux thermominérales de l'Algérie du Nord (résultats entre 0 et 20 U.T.) est la preuve de l'origine météorique des eaux. Une eau tritiée qui s'infiltré dans le sol sans subir d'apports extérieurs perdra la moitié de son activité radioactive en 12.43 ans. A sa réapparition en surface, cette eau sera d'autant plus pauvre en tritium qu'elle se sera infiltrée profondément. C'est particulièrement le cas des eaux thermominérales qui présentent à leurs émergences les plus faibles teneurs, si bien entendu elles ne subissent pas de mélanges d'eaux froides au cours de leurs remontées vers la surface. C'est souvent le cas en raison de la ramification du filon thermal ou de l'existence d'un ou de plusieurs réservoirs intermédiaires.

Si les résultats analytiques en Oxygène 18 obtenus sur les eaux thermominérales à travers l'Algérie du Nord, compris entre -6.63‰ et -10.10‰, peuvent traduire des valeurs hétérogènes, en fait à l'échelle régionale, elles sont assez homogènes et les faibles différences observées sont liées aux altitudes d'émergences des sources comme l'indiquent, à titre d'exemple, ces quelques valeurs minimales et maximales (tableau I).

**Tableau I - Valeurs minimales et maximales d'oxygène
18 des sources thermominérales selon les régions
*Minimal and maximal values of oxygen 18 in
thermomineral springs of different regions***

Régions	Valeurs minimales	Valeurs maximales
Maghnia	-7.51‰	-7.26‰
Méséta Oranaise	-8.54‰	-7.23‰
Constantinois	-8.29‰	-7.71‰
Hodna Aurès Nementcha	-9.67‰	-8.49‰
Nord Constantinois	-8.88‰	-7.97‰
Nord Sétifien	-8.87‰	-8.10‰
Atlas saharien central	-9.39‰	-8.72‰

La carte des précipitations moyennes annuelles (M. Chaumont et P. Paquin, 1971) ainsi que la distribution de la nivosité (P. Seltzer, 1946) à travers l'Algérie du Nord montre clairement que les monts de Tlemcen-Daïa-Saïda, de l'Ouarsenis, des Bibans, de Grande et Petite Kabylie, des Aurès, de Sétif et du Constantinois sont des régions où l'on observe les maximas pluviométriques et neigeux. La répartition géographique des sources thermominérales aux abords immédiats de ces reliefs est particulièrement significative. Ces derniers représentent des aires d'alimentation et d'infiltration d'autant plus favorables qu'ils sont constitués globalement de massifs carbonatés particulièrement fissurés et diaclasés où la morphologie karstique superficielle est souvent bien développée.

III - LES EAUX DE HAMMAM BOU-HADJAR

1 - Historique

Depuis les temps les plus reculés, l'homme préhistorique s'est intéressé aux sources thermominérales et a laissé des témoins de son passage. A Hammam Bou-Hadjar, Stéphane Eselle et Mc Carthy ont récolté de nombreux silex taillés qui permettent de faire remonter l'utilisation de ces eaux au delà du Néolithique. Hammam Bou-Hadjar s'appelait dans l'antiquité Dracones, on aurait donc là la preuve de l'existence d'une station balnéaire à cette époque.

Les premiers travaux scientifiques que nous avons retrouvés remontent à 1823, année à laquelle fut mise en place une réglementation sur des données médicales précises. Hammam Bou-Hadjar devait recevoir un agrément le 27 Juillet 1879.

2 - Situation géologique (fig. 3)

Dans l'Oranie, seul le domaine externe de l'orogénèse alpine est représenté. Les massifs littoraux sont séparés des monts des Tessala et des Béni Chougrane, domaine des nappes telliennes, par les bassins de la M'léta et de l'Habra. Ces derniers forment un sillon qui s'allonge suivant une direction WSW-ENE. Les séries autochtones de la partie septentrionale rigide de la Méséta Oranaise se prolongent vers le Nord sous les séries telliennes, tertiaires et quaternaires. L'épisode volcanique à caractère alcalin d'âge Pliocène et Quaternaire ancien est connu dans la région d'Aïn-Témouchent. Sa mise en place serait due à des épisodes extensifs récents qui auraient permis la remontée du magma.

Du point de vue tectonique, on distingue :

- un premier système d'accidents représentés par les failles transverses orientées NNE-SSW;
- un deuxième système de failles d'orientation globale NE-SW marque les limites de plaine;
- un troisième système d'accidents mis en évidence par les récents travaux de néotectonique (A. Mauffret *et al.*, 1986) montrent une orientation générale W-E.

Ces trois systèmes d'accidents sont confirmés par la linéarité du réseau hydrique, les directions linéamentaires et les alignements sismiques obtenus grâce à l'interprétation des photos satellites (fig. 4) et de la répartition des foyers séismiques (fig. 5).

Dans ce contexte géologique, les sources de Hammam Bou-Hadjar apparaissent à proximité de la

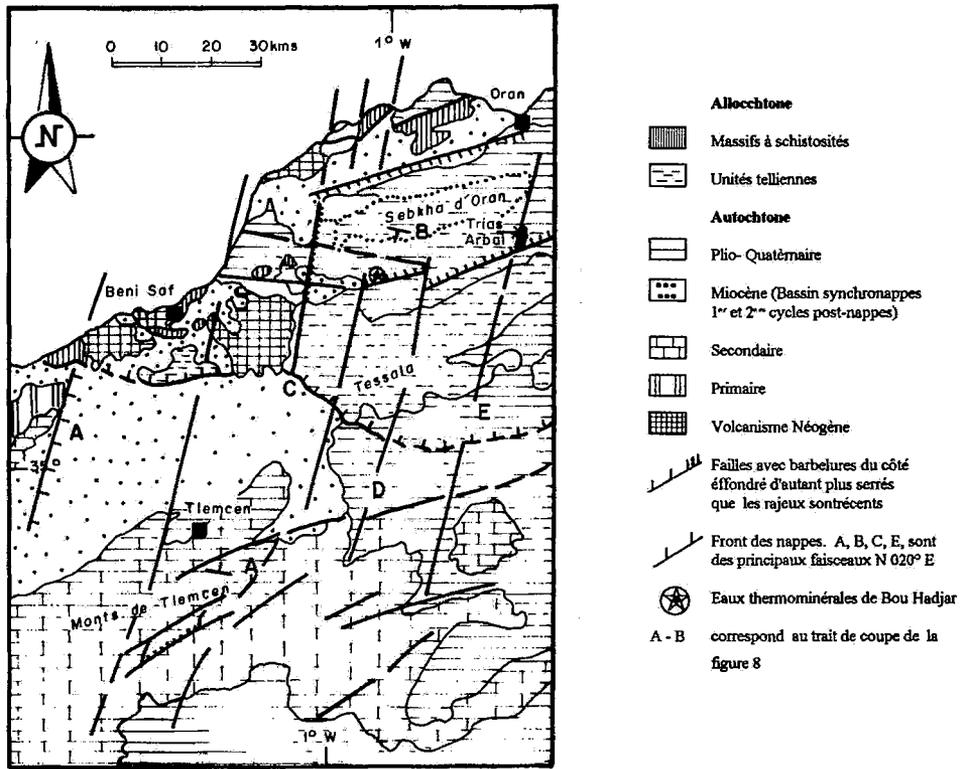


Fig. 3 - Les sources thermominérales dans le cadre de la géologie de l'Oranie centrale
 (d'après travaux B. Fenet, 1975 et P. Guardia, 1975)
Thermomineral waters springs in the geological framework of "Oranie centrale"
 (according with B.Fenet, 1975 and P. Guardia, 1975)

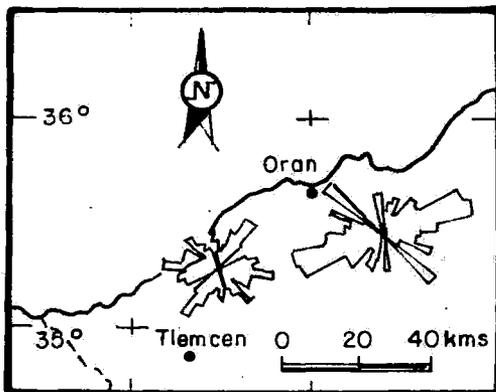


Fig. 4 - Rosaces de distribution des directions linéamentaires
Distribution roses of lineamentary directions

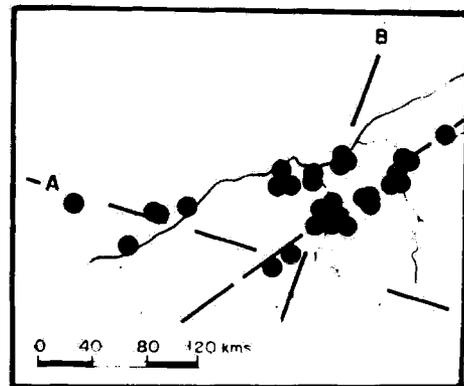


Fig. 5 - Alignements sismiques selon la carte d'épicentres des principales secousses sismiques 1908-1980
Seismic alignment according to the map of epicentres of principal earth tremors 1908-1980

bordure Nord des monts des Tessala à l'intersection des trois systèmes de failles.

3 - Géochimie

La température a évolué entre 37.5°C et 70°C au niveau des nombreux griffons. Le suivi dans le temps du griffon le plus chaud montre un écart thermique de

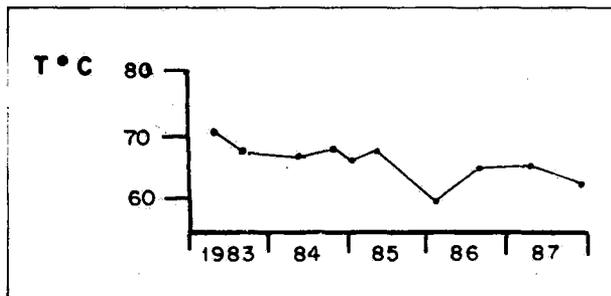


Fig. 6 - Evolution de la température des eaux à l'émergence la plus chaude
Evolution of waters temperature at the hottest emergence

9°C entre les valeurs minimales et maximales (fig. 6). Les pH sont acides entre 6.18 et 6.87 et les conductivités électriques mesurées à 20°C ont varié entre 9270 et 11480 micro-mhos/cm (tableau II).

Le chimisme montre qu'il s'agit d'une eau à faciès chloruré sodique riche en bicarbonate de calcium (fig. 7). Les éléments mineurs tels que le fluor, le bore, le rubidium ou le lithium sont bien représentés tout comme le CO₂ dont les concentrations varient entre 630mg/l et 1140mg/l. La teneur en radon est évaluée à 22.8 millimicrocuries/l.

Les dépôts solides aux émergences forment de véritables carapaces dont l'essentiel est constitué de carbonates de chaux.

La diffractométrie aux rayons X effectuée sur poudre totale montre qu'il s'agit de calcite avec un peu de quartz et les analyses chimiques ont permis de préciser les concentrations (tableau III). Ces dépôts

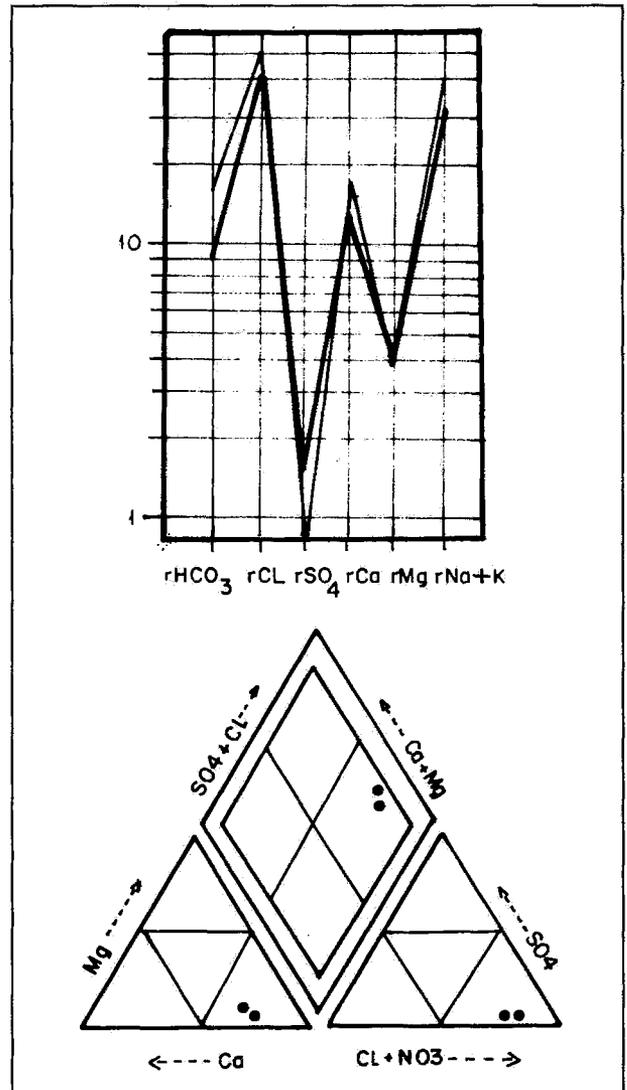


Fig. 7 - Représentations graphiques sur diagramme semi-log et diagramme de piper des eaux thermominérales de Hammam Bou-Hadjar
(Concentrations minimales et maximales au niveau de l'émergence la plus chaude)

Graphics representations in semi-log diagram and Piper diagram of thermomineral waters of Hammam Bouhadjar (minimal and maximal concentrations at the hottest emergence)

ont pour origine des réservoirs carbonatés dont la dissolution est provoquée par un excès d'acide carbonique véhiculé par les eaux, les carbonates précipitent au contact de l'air.

Tableau II - Résultats des mesures physico-chimiques, chimiques et isotopiques. Les teneurs sont exprimées en mg/l, La conductivité en micromhos/cm à 20°C et intéressent les eaux qui émergent au niveau du griffon le plus chaud
Isotopical, chemical and physico-chemical results. The concentrations are exprimed in mg/l, the conductivity in micromhos/cm at 20°C. This results interest the water of the hottest spring

	T°C	pH	Conductivité	HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na	K	SiO ₂
Minimum	61	6.18	9270	573.4	1592.5	32.9	264.0	38.9	765.9	49.0	46.0
Maximun	70	6.87	11480	719.8	1615.3	74.0	814.0	43.7	954.0	57.0	60.8

	Br	I	F	B	Li	Rb	Mn	NH ₄	Sr	Fe	Cu	Pb	As
Minimum	2.0	0.1	2.2	1.2	1.2	0.8	Tr	0.3	5.8	Tr	Tr	1.0	1.0
Maximum	2.2	0.2	2.3	1.6	2.3	1.1	0.3	0.5	6.6	0.1	0.5	1.8	1.1

	Cd	Ni	Ba	Cr	Al
Minimum	Tr	0.2	0.2	0.1	1.0
Maximum	0.5	0.5	0.5	0.2	1.2

	H3 (U.T)	O18 (‰)	C13 (‰)
Minimum	3.1	-7.99	-6.03
Maximum	5.3	-7.74	-4.74

Tableau III - Résultats moyens des analyses chimiques des dépôts
Mean results of chemical analysis of deposits

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO ₃	MnO	CaO	MgO	NaO ₂	K ₂ O	TiO ₂
3.58%	0.11%	0.60%	0.05%	42.90%	6.0%	0.08%	0.10%

P.A.F. à 1000°C
41.61%

Les gaz associés aux sources de Hammam Bou-Hadjar sont dominés par le CO₂ qui représente plus de 70% de la phase gazeuse. Les concentrations en Helium qui varient selon les émergences entre 0% et 12% sont dues à la désintégration radioactive des minerais d'uranium et de thorium qui accompagnent les eaux dans leur remontée vers la surface.

Les eaux de Hammam Bou-Hadjar sont tritiées. Les résultats obtenus évoluent entre 3.1 et 5.27 ± 0.5 U.T. La présence de cet isotope radioactif est la preuve de l'origine météorique des eaux.

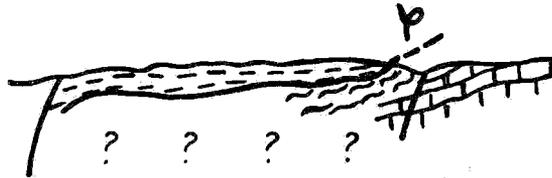
Enfin, l'utilisation de la géothermométrie permet de retenir une température de l'ordre de 150°C à 160°C dans le réservoir profond. En effet, si les résultats obtenus (tableau IV) sont assez divergents, T₁ et T₄ donnant des valeurs pratiquement identiques de même que T₆ et T₁₁. Le géothermomètre T₈ conduit à une valeur intermédiaire. Le géothermomètre silice semble correspondre à un résultat minimum en raison en particulier des variations des paramètres physico-chimiques qui indiquent un mélange avec des eaux, certes profondes, mais plus froides que celles qui circuleraient dans le réservoir.

Si T₈ ne devrait pas être retenu à cause des dépôts calcaires aux émergences, il apparaît donc que T₆ et T₁₁ pourraient représenter la température des eaux atteinte dans le réservoir profond. Les eaux devraient donc circuler à une profondeur de l'ordre de 1500m à 1600m. Par conséquent, le réservoir principal des eaux de Hammam Bou-Hadjar doit correspondre aux formations du Jurassique inférieur.

Tableau IV - Résultats des calculs géothermométriques
Geothermometers results

T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
104	74	53	107	94	155	133	263	47	157/65	78

T₁ = Géothermomètre Quartz;
 T₂ = Géothermomètre Calcédoine;
 T₃ = Géothermomètre Cristoballite;
 T₄ = Géothermomètre Na/Li;
 T₅, T₆ et T₇ = Géothermomètres Na/K;
 T₈ = Géothermomètre Na-K-Ca;
 T₉ et T₁₀ = Géothermomètres CO₂/SO₄;
 T₁₁ = Diagramme d'équilibre;
 T₁₂ = Géothermomètre géologique



Coupe synthétique selon W. WILDI, 1983
(Synthetic section by W. Wildi, 1983)

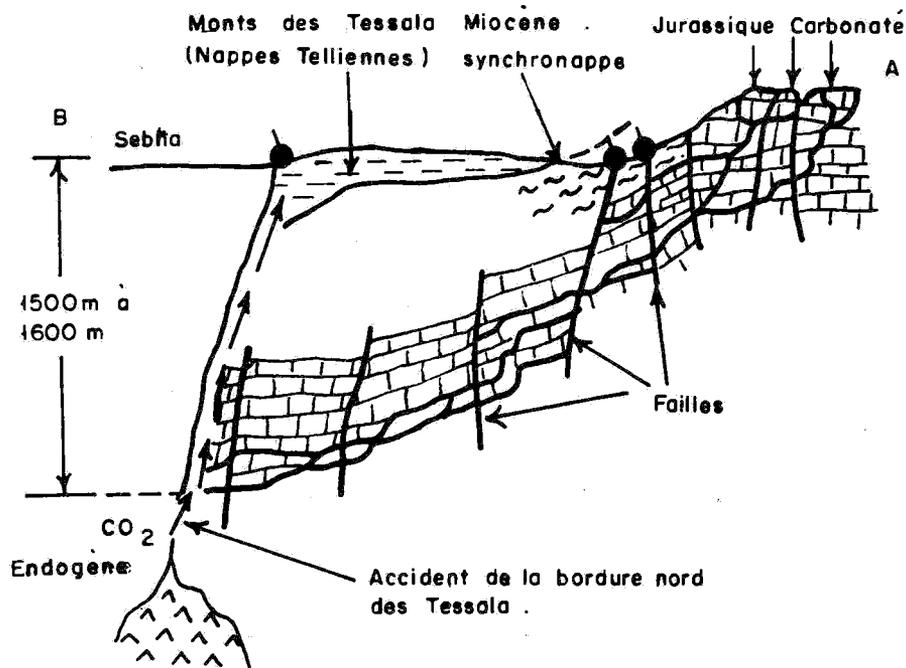


Fig. 8 - Coupe schématique montrant le fonctionnement des eaux thermominérales de Hammam Bou-Hadjar
A-B renvoie au trait de coupe de la fig. 3

*Schematic section showing off the behaviour of thermomineral waters of Hammam Bouhadjar
Cross section A-B see fig.3*

4 - Synthèse des résultats

Compte tenu de toutes ces données, il nous est possible de préciser les mécanismes de fonctionnement des eaux de Hammam Bou-Hadjar (fig. 8).

A l'échelle régionale, le seul réservoir possible correspond aux formations carbonatées du Jurassique

qui plongent vers le Nord sous le bassin synchronappe.

Les monts de Tlemcen, Daïa et Saïda sont des régions où l'on observe les maximas pluviométriques et neigeux et représentent des aires d'alimentation d'autant plus favorables qu'ils sont constitués de massifs carbonatés particulièrement fissurés et diaclasés où la morphologie karstique superficielle est

souvent bien développée. Les résultats en oxygène 18 des eaux de Hammam Bou-Hadjar qui évoluent entre -7.74‰ et -7.99‰ sont très proches de ceux des pluies dans les monts de Tlemcen entre 1050m et 1150m d'altitude. On peut donc considérer que les eaux de pluie et de fonte des neiges s'infiltrent dans le Jurassique carbonaté, circulent vers le Nord à environ 1500m de profondeur sous le bassin synchronappe. Arrivées au niveau de l'intersection des trois systèmes de failles en bordure des Tessala, elles remonteraient donnant les émergences de Hammam Bou-Hadjar. Cette remontée est facilitée par l'action du CO₂ d'origine profonde, volcanique comme l'indiquent les résultats en carbone 13 qui évoluent entre -4.74‰ et -6.03‰ ainsi que la proximité des affleurements volcaniques d'Aïn Témouchent. un mélange doit se produire avec des eaux plus froides provenant des calcaires messiniens, seul réservoir intermédiaire possible, comme en témoigne la variation dans le temps des paramètres physico-chimiques et chimiques des eaux au niveau de l'émergence la plus chaude.

IV - CONCLUSION

L'hydrothermalisme, discipline spécifique de l'hydrogéologie nécessite l'association intime de l'hydroclimatologie, de la géologie et de la géochimie. En effet, si les zones d'alimentation, de transit et d'émergences des sources dépendent de la connaissance des conditions lithostructurales locales et régionales, thermalité et composition chimique des eaux sont le résultat de plusieurs processus, tels que:

- la profondeur d'infiltration, donc de la température et de la pression;
- la vitesse de circulation lors de la descente et de la remontée;
- la surface de contact de la roche et sa nature;
- la dimension et le degré d'ouverture des discontinuités (fissures, diaclases et autres);

- les éléments dissous entraînés à l'entrée du circuit hydrothermal;

- les éléments provenant de plus grande profondeur.

Ces divers processus permettent de comprendre et d'expliquer les caractéristiques de ces eaux.

A plus petite échelle, l'examen de la répartition des sources thermominérales de même que la connaissance de leurs caractéristiques physico-chimiques, montrent à quel point leurs positions semblent peu attribuables au hasard, mais au contraire en liaison avec les discontinuités majeures qui expliquent très souvent l'alignement des séismes et du volcanisme. Le trait fondamental commun paraît correspondre à un tracé linéaire, reflet d'une interprétation de la géologie profonde et inversement, les outils de la géologie fondamentale et de la géophysique contribuent à une meilleure maîtrise dans l'étude de la répartition des eaux thermominérales.

L'auteur tient à exprimer ses remerciements au Professeur P. VERDEIL pour sa lecture critique du manuscrit.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Auclair, D., Biehler, J. 1967.** Etude géologique des hautes plaines Oranaises entre Tlemcen et Saïda. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie* (Nelle série) n° 34, pp. 3-45.
- Augier, C. 1967.** Quelques éléments essentiels de la couverture sédimentaire des hauts-plateaux. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie* (N^{elle} série) n° 34, pp. 47-80.
- Bellion, J.-C. 1976.** Etude géologique et hydrogéologique de la terminaison occidentale des monts du Belezma. *Thèse Paris VI*.
- Benest, M. 1982.** Importance des décrochements senestres et dextres dans les monts de Tlemcen-Daïa. *Rev. Géol. Dyn et de Géogra. Physique*. Vol. 23, fasc. 4 pp. 345-362.
- Bouillin, J.-P. 1986.** Le «bassin maghrébin». Une ancienne limite entre l'Europe et l'Afrique à l'Ouest des Alpes. *Bull. Soc. Géol. de France* (8) -II, n° 4 pp. 547-558.
- Caire, A. et al. 1953.** Interprétation tectonique de la chaîne des bibans. *Bull. Soc. Géol. de France*, T III, pp. 941-973.
- Caratini, B. 1978.** Etude géologique de la région de Chellala-Reibeill. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie*. Tome 1 et 2.

MECANISMES DE FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES HYDROTHERMAUX

- Chaumont, M. et Paquin, P. 1971.** Carte pluviométrique de l'Algérie au 1/500.000 *Soc. Hist. Nat. Afr.* du Nord Alger.
- Devaux, J. 1968.** Recherche de l'organisation des contraintes dans le tréfond de l'Algérie du Nord *Bull. Serv. Carte géol. Algérie.* 39, pp. 41-69.
- Elmi, S. 1970.** Rôle des accidents décrochants de direction NNE-SSW dans la structure des monts de Tlemcen *Bull. Soc. Hist. Nat. Afrique du Nord.* T61, fasc. 3-4 pp. 3-8.
- Fenet, B. 1975.** Recherches sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'orogène nord-maghrébin: les monts du Djebel Tessala et les massifs du littoral oranais. *Thèse de Doctorat ès Sciences.* Université de Nice 301p., 101 fig., 4 pl.
- Glangeaud, L. 1952.** Histoire géologique de la province d'Alger. XIX^{ème} congrès géologique international Algérie. *Monographies régionales* n° 1 série n° 25.
- Guardia, P. 1975.** Géodynamique de la marge alpine de l'Oranie occidentale. Thèse de Doctorat ès Sciences. Université de Nice.
- Guiraud, R. 1977.** Sur la néotectonique des régions Ouest-Constantinoises. *B.S.G.F.* 19 (3) pp. 645-650.
- Hatzfeld D. 1977.** Etude de la sismicité dans la région de l'arc de Gibraltar et de l'Algérie du Nord. *B.S.G.F.* 19 (4) pp. 741-747.
- Issaadi, A. 1987.** Modèle de circulation des eaux souterraines dans les massifs du Guerioun-Fortass (Sud-Constantinois). Algérie. *Bull. Cent. Hydrogéol. CHE.* n° 7, pp. 107-121.
- Issaadi, A. 1988.** Les eaux carbo-gazeuses de la Mitidja occidentale. I^{ères} journées Tunisiennes de géologie appliquée, vol.2, pp.273-291. Sfax.
- Issaadi, A. 1992.** Le thermalisme dans son cadre géostructural. Apports à la connaissance de la géologie profonde de l'Algérie et de ses ressources géothermales. Thèse de Doctorat d'Etat. U.S.T.H.B.
- Issaadi, A. 1994.** Présentation de la carte des eaux thermaminérales algériennes. *Publ. Soc. Intern. des techniques hydrothermales.* n° 3. XII^{èmes} journées mondiales du thermalisme. Hammamet.
- Kazi-Tani, N. 1986.** Evolution géodynamiques de la bordure Nord-Africaine. Approche mégaséquentielle. Thèse de Doctorat ès Sciences. Université de Pau.
- Kieken, M. 1962.** Esquisse tectonique de l'Algérie. *Bull. Serv. Carte géol. Algérie.* (31) 19 p.
- Lagrula, J. 1960.** Etude gravimétrique de l'Algérie-Tunisie. *Bull. Serv. Géol. Algérie* 4^{ème} série, n° 2.
- De Launay, L. 1891.** Recherche, captage et aménagement des sources thermominérales. Ed. CH. Béranger.
- Mégartsi, M. 1985.** Le volcanisme Mio-Plio-Quaternaire de l'Oranie Nord-occidentale. Thèse de Doctorat ès Sciences. U.S.T.H.B.
- Nedjaï, R., Issaadi, A. 1989.** Le thermalisme de l'Algérie centrale. 28th inter. Géol. Cong. Washington. A-C, U.S.A.
- Perrodon, A. 1957.** Etude géologique des bassins néogènes sub-littoraux de l'Algérie occidentale. *Publ. Serv. Carte géol. Algérie.* n° 12 N^{ème} série. n°12, Alger. 343 p.
- Philip, H. et al. 1977.** Détermination de la direction de raccourcissement de la phase compressive quaternaire en Oranie. *Rev. Géogr. Phys. Géol. Dyn.* vol. XIX Fasc. 4, pp. 315-324, Paris.
- Semroud, B. 1981.** Evolution pétrologique du complexe magmatique néogène de la région de Béjaïa-Amizour. Thèse de Doctorat ès Sciences. U.S.T.H.B.
- Verdeil, P., Issaadi, A. 1985.** Le thermalisme de l'Ouest Algérien dans le cadre de la tectonique globale. 5^{ème} Sem. Nat. des Sciences de la Terre. Alger.
- Vila, J.-M. 1980.** Evolution paléogéographique et structurale de la chaîne alpine d'Algérie. Thèse de Doctorat ès Sciences. Univ. P.M. Curie. Paris VI.
- Wildi, W. 1983.** La chaîne tello-rifaine. Structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Géol. Dyn. et Géogr. phys.* 24, pp. 201-297.