

Caractérisation des eaux thermales de l'ensemble Sud sétifien. Est algérien

Characterization of thermal waters of the whole South Sétif. East Algerian

Abderrahmane Boudoukha et Malika Athamena

Volume 25, numéro 2, 2012

Reçu le 31 mai 2011, accepté le 30 avril 2012

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/1011602ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/1011602ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Boudoukha, A. & Athamena, M. (2012). Caractérisation des eaux thermales de l'ensemble Sud sétifien. Est algérien. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 25(2), 103–118. <https://doi.org/10.7202/1011602ar>

Résumé de l'article

Le Sud sétifien, situé au nord-est algérien, est le siège de plusieurs aquifères renfermant parfois de l'eau chaude dont la température varie entre 25 °C et 43 °C. Afin d'évaluer le potentiel en eau thermique de cet ensemble, nous avons utilisé une approche pluridisciplinaire axée sur la géologie, la géophysique, l'hydrodynamique et l'hydrochimie. Il ressort de cette approche que cet ensemble est caractérisé par la présence d'une série de horsts et de grabens. Les horsts sont formés par des calcaires et des dolomies, datés du Lias au Miocène, et les grabens ont permis l'instauration d'un système endoréique fermé occupé par des lacs salés. Ces massifs carbonatés affleurent au milieu d'une vaste plaine comblée par des formations alluvionnaires du Mio-Plio-Quaternaire. L'aperçu hydrogéologique montre que les formations du Crétacé peuvent offrir des possibilités aquifères non négligeables. L'outil hydrochimique montre que les eaux chaudes se caractérisent par la présence de trois faciès chimiques différents, le premier de type Cl-Na à l'Est, le second de type SO₄-Ca au centre et le troisième de type SO₄-Na à Ca à l'Ouest. Cette analyse a aussi permis d'attribuer au sodium, aux chlorures et aux sulfates une origine terrigène évaporitique, par le rapport molaire Sr²⁺/Ca²⁺. La salinité qui caractérise ces eaux thermales est principalement due à la circulation des eaux à grande profondeur dans les formations cristallophylliennes et les formations carbonatées qui sont en contact avec des formations terrigènes salifères. Le géothermomètre à silice montre que ces eaux thermales ont une température de 80 °C et que l'eau proviendrait d'une profondeur allant de 1 400 à 2 200 m à travers un système de failles qui affecte le socle. Il est montré que la baisse de la température de 40 °C est due en partie au mélange avec les eaux superficielles.

CARACTÉRISATION DES EAUX THERMALES DE L'ENSEMBLE SUD SÉTIFIEN. EST ALGÉRIEN

Characterization of thermal waters of the whole South Sétif, East Algerian

ABDERRAHMANE BOUDOUKHA^{1*} ET MALIKA ATHAMENA²

¹Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée, Université de Batna, Route de Biskra, 05 000 Batna, Algérie.

²Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée, Université de Batna, Route de Biskra, 05 000 Batna, Algérie

Reçu le 31 mai 2011, accepté le 30 avril 2012

RÉSUMÉ

Le Sud sétifien, situé au nord-est algérien, est le siège de plusieurs aquifères renfermant parfois de l'eau chaude dont la température varie entre 25 °C et 43 °C. Afin d'évaluer le potentiel en eau thermique de cet ensemble, nous avons utilisé une approche pluridisciplinaire axée sur la géologie, la géophysique, l'hydrodynamique et l'hydrochimie. Il ressort de cette approche que cet ensemble est caractérisé par la présence d'une série de horsts et de grabens. Les horsts sont formés par des calcaires et des dolomies, datés du Lias au Miocène, et les grabens ont permis l'instauration d'un système endoréique fermé occupé par des lacs salés. Ces massifs carbonatés affleurent au milieu d'une vaste plaine comblée par des formations alluvionnaires du Mio-Plio-Quaternaire. L'aperçu hydrogéologique montre que les formations du Crétacé peuvent offrir des possibilités aquifères non négligeables. L'outil hydrochimique montre que les eaux chaudes se caractérisent par la présence de trois faciès chimiques différents, le premier de type Cl-Na à l'Est, le second de type SO₄-Ca au centre et le troisième de type SO₄-Na à Ca à l'Ouest. Cette analyse a aussi permis d'attribuer au sodium, aux chlorures et aux sulfates une origine terrigène évaporitique, par le rapport molaire Sr²⁺/Ca²⁺. La salinité qui caractérise ces eaux thermales est principalement due à la circulation des eaux à grande profondeur dans les formations cristallophylliennes et les formations carbonatées qui sont en contact avec des

formations terrigènes salifères. Le géothermomètre à silice montre que ces eaux thermales ont une température de 80 °C et que l'eau proviendrait d'une profondeur allant de 1 400 à 2 200 m à travers un système de failles qui affecte le socle. Il est montré que la baisse de la température de 40 °C est due en partie au mélange avec les eaux superficielles.

Mots clés : *Eau thermique, Géologie, Horst, Hydrochimie, Karst, Sud sétifien, Algérie.*

ABSTRACT

The south setifian mountains, situated in the north-east of Algeria, are the seat of aquifers with thermal waters where the temperature varies between 25°C in the east and 43°C at the centre. In order to evaluate the thermal water potential of this whole region, we have employed a multidisciplinary approach involving geology, geophysics, hydrogeology and hydrogeochemistry. The results from this approach indicate that the whole region is characterized by the presence of a series of horsts formed by thick carbonated and karstified layers dating from the Lias to the Miocene, and grabens have allowed for the establishment of a closed endorheic system occupied by chotts and sebkhas, filled with salt water. These

massive carbonate outcroppings occur in the middle of the plain filled by Mio-Plio-Quaternary alluvial materials. This hydrogeological analysis indicates that these formations from the cretaceous era can offer considerable aquifer possibilities. The hydrochemical analysis showed that the waters of the region show three different chemical facies: the first, Cl-Na in the east; the second, $\text{SO}_4\text{-Ca}$ in the centre; and the third, $\text{SO}_4\text{-Na}$ to Ca, in the west. This hydrochemical analysis also allowed us to attribute the sodium, chloride and sulfate to an evaporative origin. The salinity that characterizes these thermal waters is mainly due to water circulation at great depths in the carbonate formations and to the alteration of the evaporate minerals during their ascent. The molar ratio $\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ confirmed this hypothesis. Different geo-thermometers, mainly that of silica, have shown that these thermal waters have a temperature of 80°C and come from a depth that varies between 1400 and 2200 m, through a fault system that affects the base. The decrease of the temperature to 40°C is likely due in part to mixing with surface water, as shown by the technique of Giggenbach.

Keywords: *Thermal water, Geology, Horst, Hydrochemistry, Karst, South sétifien, Algeria.*

1. INTRODUCTION

Le Sud sétifien se trouve au sud-est algérien (Figure 1a), à 300 km au sud-est d'Alger et à 100 km au sud de la Méditerranée. Cette région est caractérisée par la présence d'un certain nombre de sources d'importance variable (1 à 55 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$) dont trois sources thermales. Il s'agit de la source de Hammam Guergour au Nord-Ouest, celle de Hammam Ouled Yelles à l'Ouest et celle de Hammam Sokhna au centre (Figure 1b). La température de l'eau de ces sources varie entre 25 et 43 °C. Exploitées dès l'époque romaine pour leurs propriétés curatives, ces sources thermales sont considérées comme des eaux à vertu thérapeutique de bonne qualité et comptent parmi les plus connues en Algérie orientale. Actuellement, seule la source de Hammam Guergour débite en moyenne 45 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$, alors que les deux autres ont complètement tari et l'exploitation de l'eau chaude se fait par le biais de forages d'une centaine de mètres de profondeur chacun, réalisés au niveau des griffons. Le débit de ces ouvrages varie entre 8 et 30 $\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$.

Le Sud sétifien se présente comme une surface légèrement ondulée qui s'étend entre les monts du Hodna au Sud qui culminent entre 1 300 et 1 600 m et les monts de la Petite Kabylie au Nord où djebel Anini culmine à 1 500 m (Figure 1b). Entre ces deux domaines montagneux s'est développée une zone

relativement plane (900 à 950 m) marquée par la présence d'un endoréisme qui s'est traduit par l'apparition de dépressions fermées salées (chotts et sebkhas) qui jalonnent le pays d'Est en Ouest. Structuellement, le plancher de cette vaste plaine est troué par endroits par de petits massifs calcaires qui peuvent prendre l'allure d'un iceberg comme djebels Youssef, Braou, Tnoutit, etc.

Le climat de la région est de type méditerranéen, avec un hiver froid et humide et un été chaud et sec. Cette région est caractérisée par une saison pluvieuse de septembre à avril ou mai, si bien que la répartition des précipitations présente une grande variabilité interannuelle. Une grande partie de la pluie peut se concentrer en quelques semaines et se présenter sous forme d'intenses averses. De grandes sécheresses sont suivies le plus souvent par des pluies torrentielles. Les précipitations se produisent principalement sous forme de pluie et la région reçoit une lame d'eau annuelle qui varie entre 600 et 700 mm au Nord-Ouest, 300 et 400 mm au centre et 200 et 250 mm à l'Est. La température moyenne annuelle varie entre 13 °C au Nord et 15 °C au Sud; la valeur moyenne minimale correspond au mois de janvier (3 °C) alors que la valeur moyenne maximale (27 °C) coïncide avec le mois d'août. Ceci a abouti à un climat subhumide au Nord et semi-aride au Sud (MEBARKI, 2009).

Le réseau hydrographique de la région s'est trouvé désorganisé par l'effet combiné de la tectonique et le contraste climatique entre le Nord subhumide et le Sud semi-aride. Ceci a conduit à l'installation d'un réseau hydrographique permanent au Nord représenté principalement par oued Bousselem qui se jette dans la mer et temporaire au Sud, drainé par les chotts et les sebkhas.

Cette région a fait l'objet de plusieurs études géologiques comme celles menées par VILA (1980) et WILDI (1983), géophysiques comme celles qui ont été effectuées par la COMPAGNIE GÉNÉRALE DE GÉOPHYSIQUE (1969, 1972 et 1973) et TOUBAL (2005) et hydrogéologiques, comme celles qui ont été effectuées par BOUDOUKHA (1988 et 1998), GHEBOULI (2008), KHAMMOUDJ (2009) et DEMDOUM (2010). Les études hydrothermales qui ont été menées à l'échelle nationale (ATHAMENA, 2007; BOUCHARB-HAOUCHINE, 1993; BOUCHARB-HAOUCHINE et al., 1994; BOUCHARB-HAOUCHINE et BOUDOUKHA, 2009; DIB-ADJOUL, 1985; DJIDI et al., 2008; FAKRAOUI, 2007; ISSAADI, 1992, 1996) et à l'échelle maghrébine (LAHLOU MIMI et al., 1998) ont été déterminantes pour mieux cerner les grands réservoirs hydrothermaux potentiels, mais elles n'ont pas permis d'appréhender l'ensemble des mécanismes contribuant à

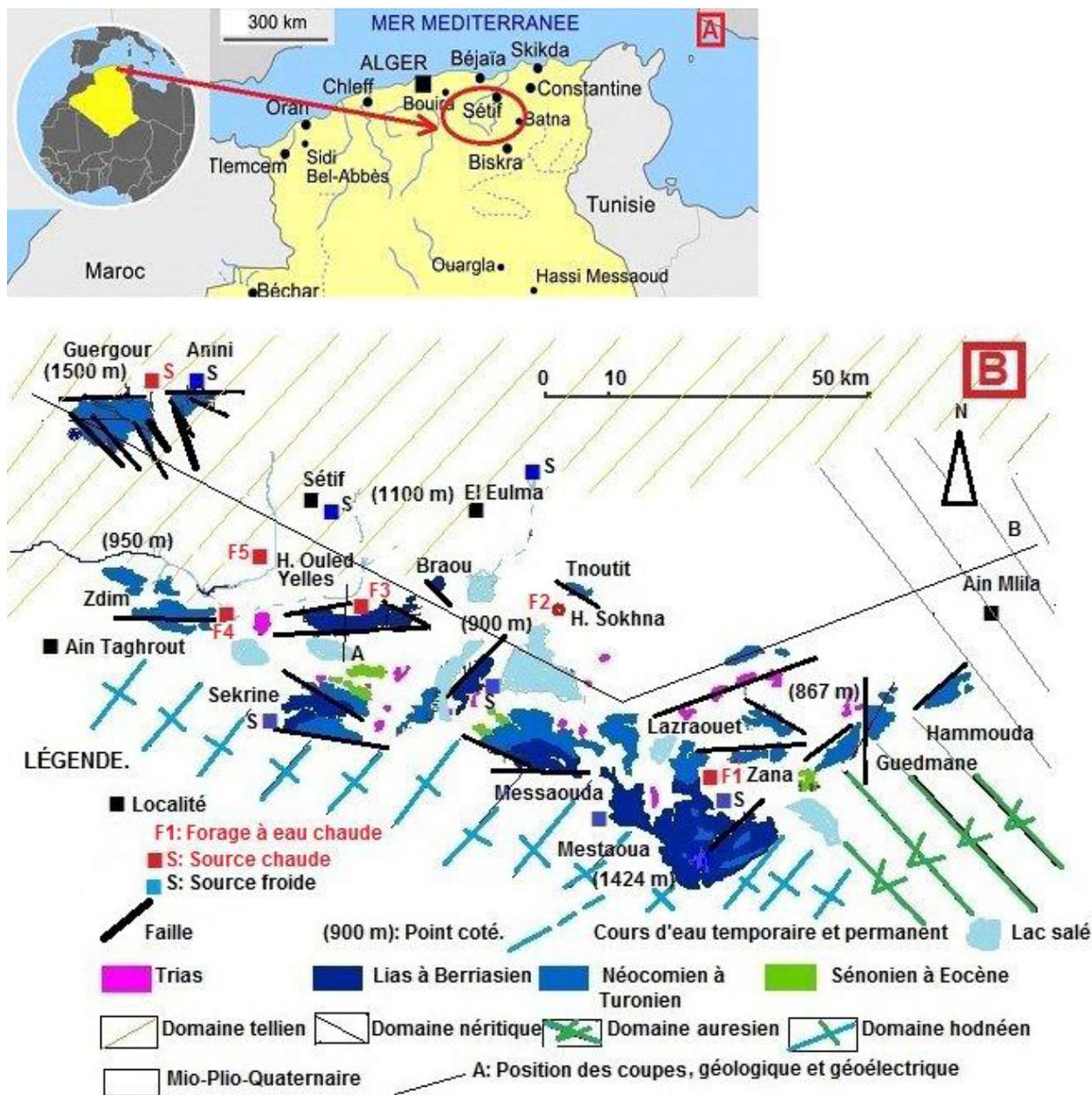


Figure 1. Situation géographique et géologique de la zone d'étude. A : Localisation géographique. B : Carte géologique.

Location and geology of the study area. A: Geographical location. B: Geological map.

l'émergence des sources thermales du Sud sétifien. La présente note, qui porte sur la région, se propose, par le biais d'une étude géologique, géophysique, géochimique et géothermométrique, d'apporter une nouvelle approche du contexte structural et géochimique de ces points d'eaux thermales. Ceci permettra de mieux comprendre les mécanismes tectoniques responsables de ces émergences et de mettre en évidence leurs caractéristiques typologiques et leur parenté chimique.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 Géologie

L'aire étudiée appartient à la chaîne Alpine qui constitue l'ossature des reliefs de toute l'Algérie septentrionale au nord de la flexure saharienne. Cette orogénèse n'est elle-même

qu'une partie des chaînes qui ceinturent la Méditerranée occidentale depuis les îles des Baléares. À l'échelle régionale, entre les séries telliennes au Nord et les séries hodnéennes au Sud, apparemment semblables (marnes épaisses et riches intercalations lumachelliques) s'interposent des faciès de mer agitée très peu profonde et d'une grande homogénéité, qui définissent l'organisation sétifienne. Cet ensemble formé par un alignement de petits reliefs carbonatés et gréseux (VILA, 1980), appelé « ensemble ou domaine sud sétifien », s'étend sur une aire de plus de 120 km d'Est en Ouest et de 60 km du Nord au Sud entre le méridien de Ain Taghrout à l'Ouest et celui de Ain M'Lila à l'Est (Figure 1b).

2.1.1 Analyse lithostratigraphique

La série s'étale du Lias inférieur, avec des calcaires dolomitiques et gréseux, à l'Eocène également carbonaté et gréseux avec parfois d'épaisses couches marneuses. Cet ensemble affleure au milieu d'une vaste plaine comblée par des calcaires lacustres et des conglomérats surmontés par des argiles rouges parfois gypseuses et des alluvions, d'âge Mio-Plio-Quaternaire. Cette formation peut avoir 300 à 500 m d'épaisseur (BOUDOUKHA *et al.*, 1997). La région comporte également plusieurs pointements triasiques qui occupent des positions anticlinales extrusives en liaison avec les formations sud sétifiennes. Ce complexe est formé par un amas de gypse broyé à petits cubes calcaro-dolomitiques accompagnés de cargneules, de grès verdâtres à ciment argileux et de roches vertes à tendance ophitique. Cet ensemble comporte également des extrusions décamétriques à centimétriques de blocs de nature magmatique et méta-sédimentaire très minéralisées appartenant au socle paléozoïque. Le tout est emballé dans des argiles multicolores (VILA, 1980).

2.1.2 Analyse structurale

La région comporte trois ensembles. On distingue du Nord au Sud et de haut en bas (Figure 1b) :

- le système septentrional des djebels Guergour et Anini au nord de Sétif, qui apparaît en fenêtre tectonique sous les nappes telliennes. Le massif constitue un vaste dôme monoclinal dont le pendage général des couches est N 90° E 10 à 25° S. Ce massif a subi une intense fracturation qui se matérialise par un réseau de failles subverticales qui l'ont disloqué en plusieurs blocs, lui attribuant une structure en horst;
- le domaine médian des djebels Zdim, Youssef, Brao et Tnoutit possède une série carbonatée allant du Lias au Cénomani. Cet ensemble a une structure anticlinale faiblement inclinée vers le Nord. On note l'absence d'affleurements du Sénonien et de l'Eocène;
- l'ensemble méridional des djebels Sekrine, Messaouda, Mestaoua, Lazraouet, Zana, Guedmane et Hammouda,

présente le même dispositif structural avec une masse de dolomie jurassique qui repose sur une épaisse série marno-calcaire (300 m). On note que cette série possède une mince couverture sénonienne et éocène où l'abondance des biosparites indique un milieu peu profond.

L'interprétation de l'étude géophysique de la CGG (1973) a permis de préciser la structure de ce domaine sud sétifien. Nous avons pris comme exemple le sondage électrique vertical (SEV) 5E exécuté au droit d'un forage de 400 m de profondeur, situé aux abords immédiats du massif de djebel Youssef (Figure 2b). La coupe lithologique de ce forage (Figures 2a et 2b) montre un recouvrement alluvionnaire de 90 m, puis une couche argilo-marneuse de 30 m d'épaisseur. Les formations carbonatées (calcaire et dolomie) traversées par ce forage commencent à partir de 120 m de profondeur. La courbe du SEV est de type H, où la formation résistante (1 000 ohm•m⁻¹), commence à partir de 120 m de profondeur. Cette formation appartient probablement au Jurassique selon les données géologiques de terrain (Figure 2a). L'interprétation des différentes courbes des SEV a permis de tracer une coupe géoélectrique au niveau de chaque massif du domaine sud sétifien. Ces coupes montrent une continuité des massifs carbonatés en profondeur jusqu'à plus de 1 000 m (Figure 2b). Les études récentes (ATHAMNA, 2007; DEMDOUM, 2010; ISSAADI, 1992; TOUBAL, 2005) ont permis d'attribuer à ce domaine une structure en horsts et en grabens (Figure 2c). Ces derniers ont permis l'installation d'une série de dépressions fermées, de type sebkha, drainant la majorité des eaux de surface et souterraines de la région. Cette tectonique a abouti à un système de failles conjuguées de directions E-W, NW-SE et NE-SW en étroite relation avec les sources thermales.

À l'échelle régionale, les formations du Sud sétifien s'enfoncent vers l'Ouest sous la nappe des Biban (Figure 2c) et leur témoin le plus occidental est constitué par les pointements du massif de l'Azerou à dominance carbonatée d'âge Jurassique (COIFFAIT et VILA, 1976). Vers le NE, les formations du Sud sétifien s'enfoncent sous la nappe néritique constantinoise constituée essentiellement de terrains carbonatés du Mésozoïque (VILA, 1980).

2.2 Hydrogéologie

Les nombreuses études hydrogéologiques entreprises dans la région ont permis de mettre en évidence deux grands types d'aquifères. Le premier, superficiel, à porosité d'interstices dans les formations du Mio-Plio-Quaternaire, le second, à perméabilité de fissures, dans les formations carbonatées et gréseuses du Sud sétifien. Les seconds présentent aussi une karstification et sont drainés par de nombreuses sources d'eau froide telles que celle de Ain Roua au Nord, Ain Sidi Messaoud et Ain Baida, respectivement au nord-est et au sud

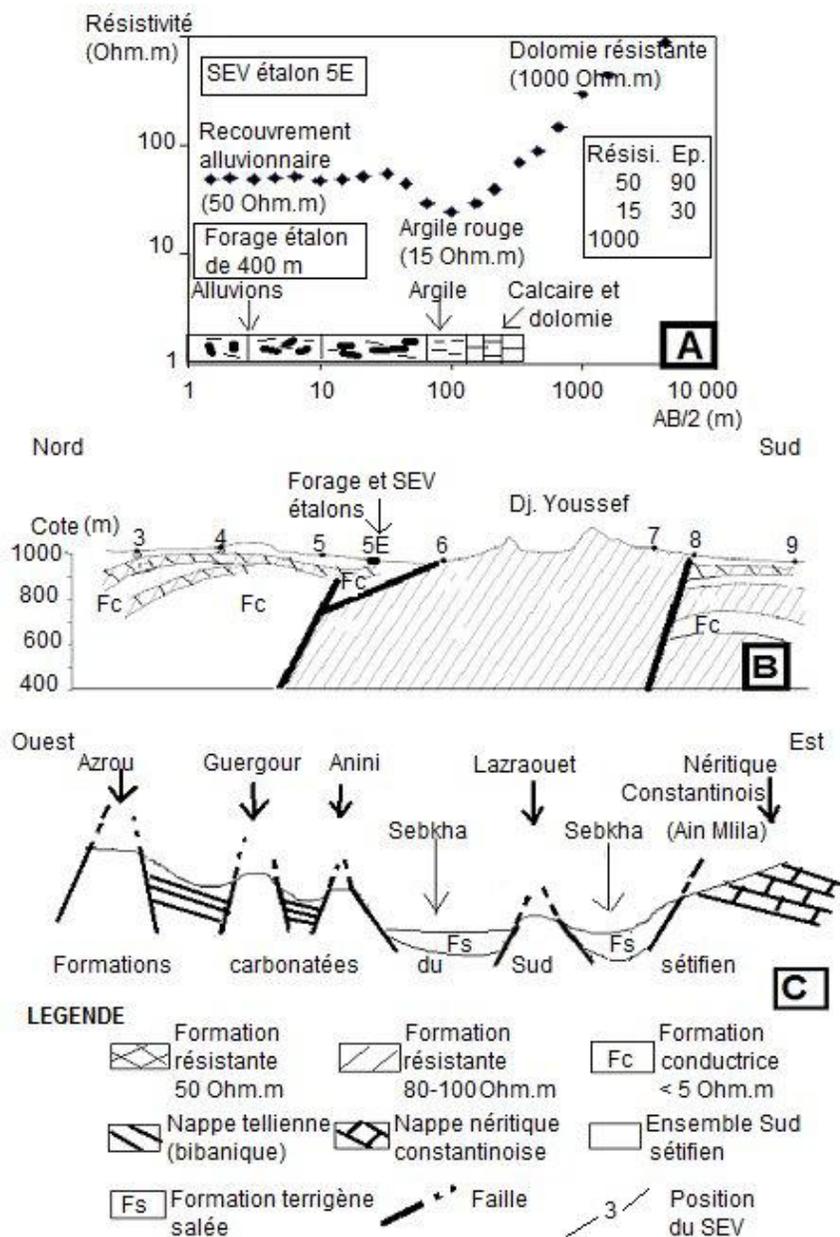


Figure 2. A : Courbe du SEV étalon. B : Coupe géoélectrique au niveau de djebel Youssef dans le Sud sétéfien. C : Coupe structurale schématique du Sud sétéfien.
A: Standard curve of vertical electrical sounding. B: Goelectrical cross-section at Djebel Youssef in the South Sétif. C: Schematic structural cross-section of South Sétif.

d'El Eulma, Ain Zana au sud-est, qui émergent dans les zones les plus basses topographiquement, souvent au croisement des failles. L'aquifère superficiel est complètement désaturé suite à un excès de pompage. Le bilan hydrogéologique du système aquifère de la région, établi par modélisation hydrodynamique, est déficitaire (BOUDOUKHA, 1988; DJEMBA, 2001). Les pompages pratiqués par les différents utilisateurs (agricoles, industriels et privés) sont largement supérieurs aux entrées représentées essentiellement par les infiltrations efficaces et les limites à flux entrant à partir des formations carbonatées limitrophes. À titre d'exemple, dans le secteur sud d'El Eulma

(Figure 1b), le niveau piézométrique a ainsi baissé d'une profondeur d'environ de 1,5 m en 1972 à 42 m en 1986. Le substratum formé par les argiles se trouve à une profondeur de 45 m (BOUDOUKHA, 1988). Cette situation a induit une accélération de la chute du niveau piézométrique et une disparition des sources qui émergent de cet aquifère. Suite à cette situation, les services de l'hydraulique ont ciblé les réservoirs carbonatés pour alimenter une bonne partie de la population. Les réservoirs carbonatés sont représentés par les séries calcaro-dolomitiques des djebels Zdim, Youssef,

Braou, Tnoutit, Messaouda, etc., qui constituent un véritable « château d'eau » pour la région. Il s'agit :

- des dolomies du Jurassique supérieur qui ont une épaisseur d'environ 300 m. Bien fracturée, cette formation est susceptible de développer un aquifère karstique;
- des calcaires et des dolomies du Néocomien qui présentent une bonne perméabilité et une karstification, du fait des diaclases qui recoupent les joints de stratification créant facilement des vides de dissolution. Les petites sources et les grottes qui se trouvent à la base de cette formation témoignent d'une circulation d'eau souterraine;
- des calcaires du Barrémien et de l'Aptien, dont l'épaisseur avoisine les 350 m, qui présentent un réseau de failles et de diaclases bien développé;
- des calcaires albo-cénomaniens qui présentent les mêmes caractéristiques citées plus haut. Malgré leur faible épaisseur et leur extension réduite, ils ont un rôle hydrogéologique important dans la mesure où ils constituent une limite à flux imposé pour l'aquifère superficiel.

Les forages qui ont été implantés dans ces formations ont donné des débits spécifiques qui varient entre 2 et 14 L•s⁻¹•m⁻¹ (BOUDOUKHA, 1998). Certains de ces forages débitent de l'eau relativement chaude dont la température varie entre 25 et 43 °C.

Les formes karstiques de surface dans ces formations sont très limitées à l'exception de quelques gouffres accessibles à partir de la surface dans l'ensemble des aquifères carbonatés. Par contre, aux djebels Guergour et Anini, l'exokarst est bien développé avec un réseau de lapiez très caractéristique. La réalisation de forages dans ces formations carbonatées a permis de détecter la présence de cavités, témoignant de l'existence d'un endokarst bien développé. D'après BOUDOUKHA (2008), ces pertes sont pratiquement toutes aquifères, surtout quand elles se trouvent au-delà de 100 m de profondeur. Les pertes de subsurface sont quasiment sèches suite à l'abaissement généralisé du niveau piézométrique dans la région. Les études récentes (BOUDOUKHA *et al.*, 2006) montrent que ces aquifères karstiques sont recouverts, en partie, par l'aquifère superficiel.

Les études géologiques et minières qui ont abordé le phénomène de minéralisation dans les karsts (BOUTALEB, 2001) ont montré que la karstification semble se situer entre le Sénonien supérieur et les mouvements tangentiels du Miocène. Au niveau des djebels Guergour et Anini au Nord-Ouest et djebel Youssef au Sud, la direction des corps minéralisés en liaison avec la circulation du fluide thermal dans le réseau karstique correspond généralement à la famille de failles de

direction NNW-SSE. Parfois on observe quelques phénomènes karstiques qui se font selon une direction E-W (GLAÇON, 1967).

2.3 Stratégie d'échantillonnage

Les eaux thermales constituent une mémoire qui apporte en surface des indications sur le réservoir profond. Leur étude géochimique représente un outil de reconnaissance qui, de manière complémentaire aux autres approches (géologiques, géophysiques, hydrodynamiques, etc.), permet de mieux déterminer leur origine, le circuit souterrain emprunté et les mélanges éventuels avec les eaux froides superficielles. Pour aborder ce contexte, un échantillonnage a intéressé six points d'eau (une source et cinq forages) dont les eaux ont fait l'objet d'analyses chimiques (Figure 1b). Ces points d'eau sont notés :

- F1 : pour le forage de Zana situé à l'Est entre les formations carbonatées du Lias-Berriasien et Néocomien-Turonien;
- F2 : pour le forage de Hammam Sokhna situé au sud des dolomies du Néocomien-Turonien de djebel Tnoutit. Il s'agit d'une ancienne source qui, sous l'effet d'un pompage intensif à l'aide de cinq forages implantés dans un rayon de 100 m, a complètement tari. Ces forages totalisent un débit global de 40 à 50 L•s⁻¹ selon la saison;
- F3 : pour le forage de Bendiab situé sur le flanc nord du djebel Youssef formé par des calcaires du Lias-Berriasien;
- F4 : pour le forage de Zdim situé sur le flanc est du massif calcaire du Néocomien-Turonien;
- F5 : pour le forage de Hammam Ouled Yelles situé au centre de la plaine au niveau d'une ancienne source qui a tari sous l'effet d'un pompage de 30 L•s⁻¹;
- S : pour la source thermale de Hammam Guergour située sur le flanc nord de djebel Guergour.

Les échantillons prélevés au niveau des forages ont été pris après 10 min de pompage pour éliminer les eaux souterraines stockées dans l'ouvrage. Ces échantillons ont été prélevés à l'aide de trois flacons en polypropylène lavés à l'acide. Chaque échantillon a été filtré immédiatement sur le site à l'aide de filtres de 0,45 µm d'acétate de cellulose. Le filtrat pour les analyses des éléments traces et des cations a été stocké dans des flacons de 250 cm³ en polyéthylène et immédiatement acidifié à pH<2 par ajout d'acide nitrique MerckTM ultrapur. Les échantillons dont l'eau est destinée à l'analyse des anions n'ont pas été acidifiés. Tous les échantillons ont été conservés dans une glacière à une température inférieure à 4 °C et transférés au laboratoire et conservés dans un réfrigérateur à une température inférieure à 4 °C jusqu'à ce qu'ils soient analysés avec un délai d'une semaine au maximum. La température (T) de l'eau, le

pH et la conductivité électrique (CE) ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un multi-paramètre WTW (P3 MultiLine pH / LFSET). Les éléments chimiques analysés sont : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorure (Cl^-), bicarbonate (HCO_3^-), sulfate (SO_4^{2-}), nitrate (NO_3^-), silice (SiO_2), cadmium (Cd^{2+}), nickel (Ni^{2+}), baryum (Ba^{2+}), lithium (Li^+), aluminium (Al^{3+}), plomb (Pb^{2+}), fer (Fe) et strontium (Sr^{2+}). Trois méthodes d'analyse ont été utilisées pour déterminer les concentrations des différents éléments chimiques. Le dosage de la teneur des bicarbonates et des chlorures a été fait par titrimétrie. Les cations y compris les éléments traces ont été dosés à l'aide d'une absorption atomique à flamme de type Perkin Elmer, 1100B et par titrage potentiométrique comme proposé par RODIER (1996). Les nitrates ont été déterminés selon la technique préconisée par le Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec (CEAEQ, 2008). Les résultats des analyses ont été reportés dans le tableau 1.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Géochimie

Ces eaux thermales émergent avec des températures qui varient entre 25,1 °C à Zana au Sud-Est et 43,1 °C à Hammam Sokhna au centre. Elles sont considérées, selon la classification proposée par CASTANY (1967), comme mésothermales. Ces eaux, à pH de neutre à fort (7,17 < pH < 7,88), sont caractérisées par une conductivité électrique moyenne (1 700 à 4 200 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). Cette salinité permet de noter que la circulation de l'eau s'est faite en grande partie dans des terrains non salifères, probablement dans un système de failles affectant les formations carbonatées. Le diagramme de Schoeller-Berkaloff (Figure 3) montre que les eaux de la région présentent trois faciès chimiques différents. Le premier, de type Cl-Na à l'Est (Zana et Sokhna), le second, de type SO_4 -Ca au centre (Bendiab, Zdim et Yelles) et le troisième, de type SO_4 -Na à Ca, au Nord-Ouest (Guegour). Ces faciès chimiques témoignent

d'une circulation dans des terrains carbonatés qui sont en contact avec les formations terrigènes salifères.

La méthode d'IIRG (Institut International des Recherches Géothermiques) développée par D'AMORE *et al.* (1983), constitue l'outil le plus utilisé pour la détermination de la nature lithologique du réservoir des eaux thermales. Le principe de cette méthode repose sur l'utilisation des rapports des concentrations des éléments majeurs et la somme des cations $\Sigma(+)$ et des anions $\Sigma(-)$ exprimées en $\text{m}\text{éq}\cdot\text{L}^{-1}$. Six paramètres (A, B, C, D, E et F), sans unité, sont ainsi définis et normalisés entre -100 et +100 de la manière suivante :

- $A = 100 \times ((\text{HCO}_3 - \text{SO}_4) / \Sigma(-))$

Ce paramètre aide à différencier entre les eaux circulant à travers les terrains calcaires de celles qui traversent des couches évaporitiques.

- $B = 100 \times ((\text{SO}_4 / \Sigma(-)) - (\text{Na} / \Sigma(+)))$

Le paramètre B permet la discrimination entre les eaux enrichies en sulfate circulant dans les terrains évaporitiques et les eaux enrichies en sodium rencontrées dans les terrains sédimentaires argilo-marneux.

- $C = 100 \times ((\text{Na} / \Sigma(+)) + (\text{Mg} / \Sigma(-)))$

Ce paramètre tend à distinguer entre les eaux dérivées des flyschs ou « volcanites » et celles venant des séries carbonatées-évaporitiques ou à partir d'un socle schisto-quartzitique. Les deux types d'eaux ont des teneurs élevées en Na^+ , mais les premières ont une teneur très faible en Cl^- et les secondes ont un rapport Na/Cl proche de 1.

- $D = 100 \times ((\text{Na} - \text{Mg}) / \Sigma(+))$

Ce paramètre individualise les eaux ayant circulé dans les calcaires dolomitiques.

Tableau 1. Concentrations des éléments majeurs et silice ($\text{m}\text{éq}\cdot\text{L}^{-1}$).
Table 1. Concentration of major elements and silica ($\text{m}\text{éq}\cdot\text{L}^{-1}$).

Point d'eau	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	K^+	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	NO_3^-	SiO_2	T°C	pH	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
F1	4,9	4,6	8,7	0,1	8,9	4,6	5,1	1,9	20,9	25,1	7,88	1 800
F2	8,1	7,7	20,7	0,3	28,1	7,8	5,4	2	27,2	29,2	7,67	3 600
F3	6,3	5,4	5,2	0,1	5,5	7,1	5,1	0,8	27,8	34,5	7,33	1 700
F4	8,8	5,6	5,4	0,1	5,1	8,5	3,6	0,9	35,6	43,1	7,17	1 700
F5	18,1	11,9	13,1	0,2	16,5	20,9	4,8	1	28,3	42,1	7,43	3 200
S	8,8	4,8	10,9	0,3	10,1	10,4	4,5	0,48	39,5	42,3	7,37	4 200

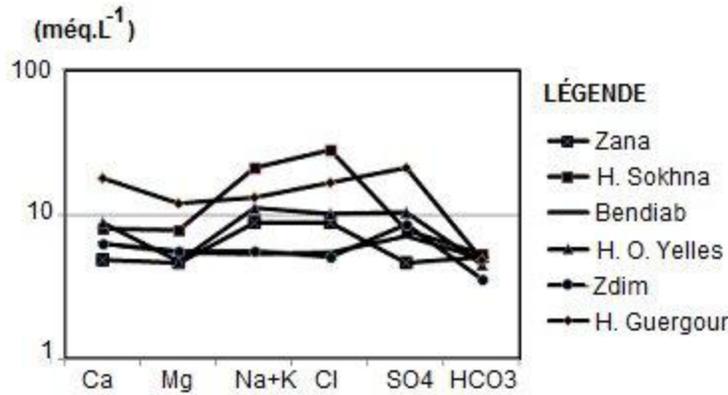


Figure 3. Diagramme de Schoeller-Berkaloff appliqué aux eaux thermales du Sud sétifien.
Schoeller-Berkaloff diagram applied to thermal waters of South Sétif.

$$E = 100 \times ((Ca + Mg)/\Sigma(+) - HCO_3/\Sigma(-))$$

Le paramètre E distingue principalement les circulations dans les réservoirs carbonatés de celles dans les réservoirs sulfatés.

$$F = 100 \times (Ca - Na - K)/\Sigma(+)$$

Le paramètre F révèle la croissance de la teneur en K dans les échantillons d'eaux.

Les valeurs permettent d'établir des diagrammes rectangulaires et de les comparer aux diagrammes de référence (α , β , γ et δ) établis par les auteurs (Figure 4a). Appliquée aux eaux chaudes du Sud sétifien (Figure 4b), cette méthode montre trois configurations rectangulaires différentes intermédiaires entre les standards théoriques de référence.

La région de Zana et Sokhna à l'Est s'adapte beaucoup plus au standard de référence « δ » des formations argileuses, mais plutôt marquée par les paramètres « D » et « E » au lieu des paramètres « C » et « D ». Les paramètres « D » et « E » témoignent d'une circulation dans un réservoir carbonaté enrichi en sodium à partir des formations terrigènes salifères lors de la remontée vers la surface. Il faut noter également que la valeur du paramètre « F » est très significative ($F=$) pour le cas de Sokhna, traduisant une circulation dans des terrains granitiques et/ou volcaniques.

La région de Zdim, Yelles et Bendiab au centre s'adapte beaucoup plus au standard de référence « γ » que le standard « α », le paramètre « β » n'étant pas significatif (<25 %). Ce standard est caractéristique d'une circulation profonde dans un socle cristallin. Lors de la remontée, les eaux ont traversé une formation carbonatée, les paramètres « E+ » et « A- » étant très significatifs.

La région de Guergour à l'Ouest s'adapte également au standard de référence « γ » mais avec des paramètres « D » et « E » beaucoup plus forts. Cette région se distingue de la précédente par une faible valeur du paramètre « β » et une forte valeur du paramètre « δ ».

L'application des diagrammes de l'IIRG permet de dire que les solutions chaudes sont d'origine profonde, ayant circulé dans un socle cristallophyllien et dans des formations carbonatées en liaison avec les terrains terrigènes salifères.

Le diagramme de Langelier-Ludwing (Figure 5) montre également cette influence des terrains salifères sur le chimisme des eaux thermales de la région. Ainsi, l'augmentation de la concentration du sodium et du potassium se fait en parallèle avec celle des chlorures et des sulfates (Figure 5a), mais d'une manière inverse avec celle des éléments carbonatés (Figure 5b). Cette tendance pourrait être due à un échange de base Na-Ca avec les argiles, entraînées des profondeurs par la dysharmonie thermique affectant la région, comme il a été démontré par CHULLI *et al.* (2011) dans un cas similaire à Sfax en Tunisie orientale.

L'acquisition des teneurs en Cl^- et Na^+ peut également résulter de la dissolution de l'halite ou à partir d'un mélange avec de l'eau de mer. Cette deuxième hypothèse se trouve écartée du fait de l'éloignement de la mer Méditerranée (plus de 100 km). Par contre, la présence de nombreux lacs salés dans la région peut justifier la présence de ces fortes teneurs.

Il est connu que le chlore est une espèce chimique très mobile, interagissant faiblement avec l'encaissant, et qui fait partie des éléments dits conservatifs, fréquemment employés comme traceurs pour les études de cycle hydrologique. Les points analytiques des sources thermales du Sud sétifien, reportés dans un diagramme Na^+/Cl^- , montrent une bonne distribution

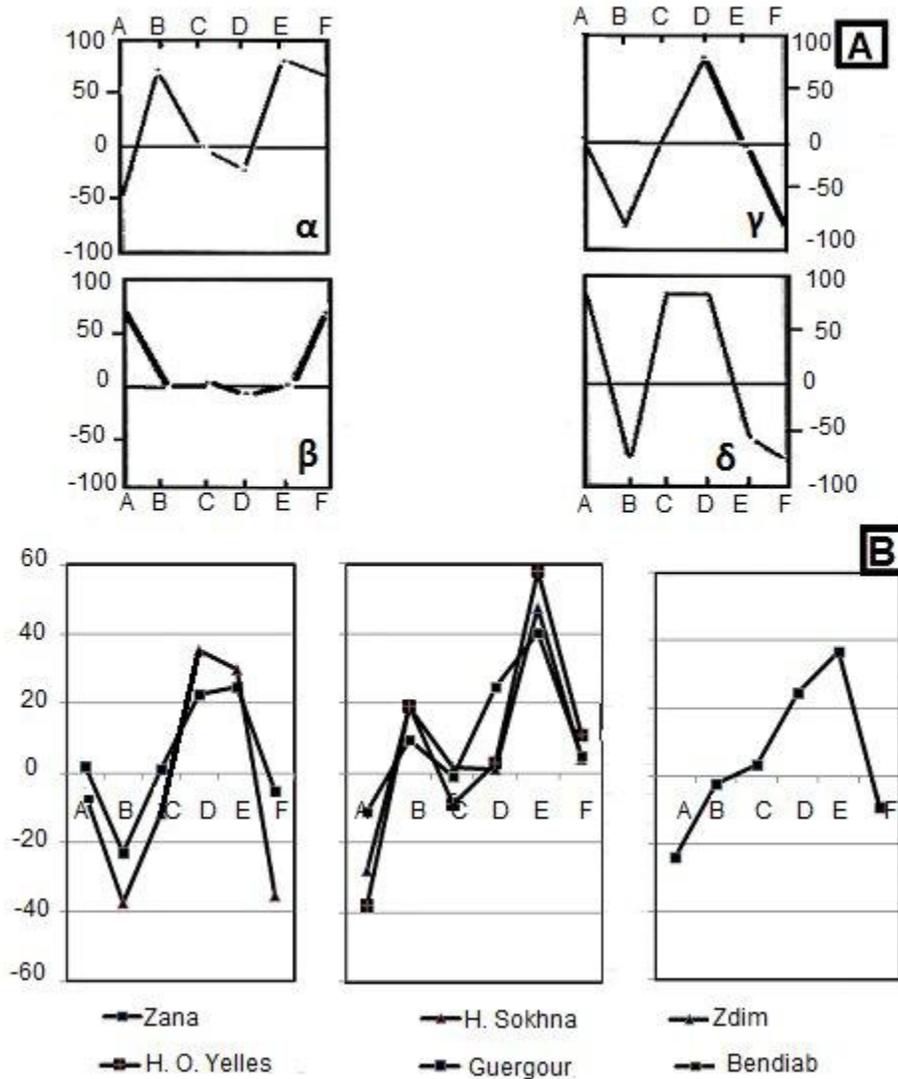


Figure 4. A : Diagramme de l'Institut international des recherches géothermiques de référence - α : série évaporitique; β : circulation dans les calcaires; γ : circulation profonde à travers un socle cristallin; δ : formation argileuse.

B : Diagramme de l'Institut international des recherches géothermiques appliqué aux eaux thermales du Sud sétifien.

A: Reference diagram of the International institute of geothermal research - α : evaporative sequence; β : circulation in limestone; γ : deep circulation through a crystalline basement; δ : argillaceous formation.

B: Diagram of the International institute of geothermal research applied to the thermal waters of South Sétif.

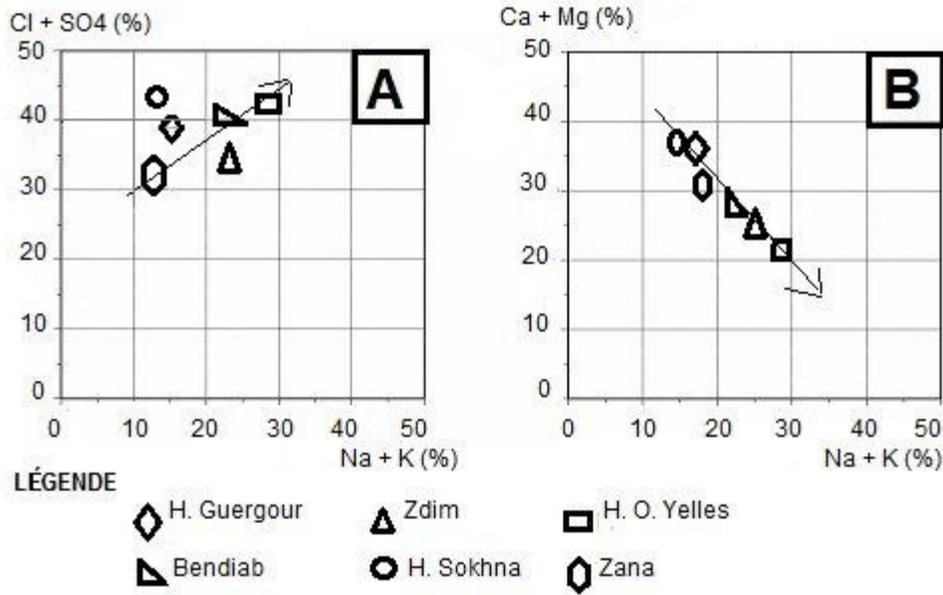


Figure 5. Diagrammes de Langelier-Ludwing appliqués aux eaux thermales du Sud sétifien. A : Relation $Cl+SO_4-Na+K$; B : $Ca+Mg-Na+K$.
Langelier-Ludwing diagrams applied to the thermal waters of South Sétif. A: Relationship $Cl+SO_4-Na+K$; B: Relationship $Na+Ca-Mg+K$.

($R = 0,99$) autour d'une droite de pente légèrement supérieure à celle de la halite (Figure 6). En d'autres termes, le ratio molaire Na/Cl moyen de ces échantillons est similaire à celui de la halite (Na/Cl halite = 1,00). Cette approche tend donc à indiquer que la salinité de l'eau thermique résulterait d'une dissolution des formations salifères. D'autre part, la bonne concordance sulfates-calcium ($r = 0,98$) et C.E. - $HCO_3/(Cl + SO_4)$ appuie cette hypothèse (Figures 7 et 8). La présence de sulfates en grandes quantités dans les eaux des sources thermales (7 à 20 $meq \cdot L^{-1}$) pourrait également être attribuée à la dissolution de l'anhydrite ou de la pyrite selon la formule proposée par APPELO et POSTMA (1993) :



Le rapport molaire (Sr^{2+}/Ca^{2+}) permet de renseigner sur l'origine de la salinité et d'appuyer cette hypothèse. D'après MEYBECK (1984), il est supérieur à 5 ‰ dans les évaporites du Trias alpin, par contre, au Maroc, il est supérieur à 7 ‰ dans les eaux de l'aquifère turonien du bassin de Tadla (HSISSOU *et al.*, 1996). En Algérie, il est supérieur à 3 ‰ dans les évaporites du Djurdjura (ABDESSELAM *et al.*, 2000) et il est supérieur à 5 ‰ dans les eaux souterraines de l'aquifère superficiel de Loutaya (BRINIS *et al.*, 2009). Ce rapport varie entre 19 et 63 ‰ dans les eaux thermales du Sud sétifien, ce qui est caractéristique d'une eau qui a circulé dans des terrains qui sont en contact avec les formations terrigènes. BRADY et WALTER (1992) ont montré que l'augmentation de la température de l'eau accélère les réactions chimiques, ce qui pourrait expliquer les fortes valeurs des rapports molaires Sr^{2+}/Ca^{2+} . HSISSOU *et al.* (1996), GOUAIDIA *et al.* (2005 et 2006) et LAMBRAKIS

et KALLERGIS (2005) ont montré également que la salinité des eaux est contrôlée par les chlorures, le sodium et les sulfates.

Comme il ressort clairement, les eaux thermales acquièrent leur composition chimique en profondeur par interaction avec les roches carbonatées en contact avec les sédiments terrigènes salifères. Ce mécanisme a été également étudié à l'aide de l'indice de saturation (IS) de quelques minéraux évaporitiques (halite, anhydrite, gypse), carbonatés (aragonite, calcite, dolomite), la silice et le CO_2 dissous. Cette simulation a été établie à l'aide du programme Phreeqc (PARKHURST *et al.*, 1980). Les indices de saturation (Tableau 2) montrent que les minéraux évaporitiques sont sous-saturés ($IS < 0$) traduisant un temps de contact avec les minéraux assez long pour permettre leur dissolution, accélérée par la température du fluide hydrothermal. Les indices de saturation positifs des minéraux carbonatés indiquent que l'eau a subi des changements importants suite à un dégazage de CO_2 ($IS < 0$). D'après DJIDI *et al.* (2008), ce dégazage se produit généralement lors de la recharge des aquifères karstiques ou suite à l'élévation de la température de l'eau, générant la précipitation de la calcite. La deuxième hypothèse indiquerait que le temps de contact avec les minéraux est assez court.

3.2 Les éléments traces

La composition chimique des eaux thermales du Sud sétifien (Tableau 3) montre des concentrations élevées en certains éléments traces et métalliques ($1,4 < Cd < 35 \mu g \cdot L^{-1}$, $19 < Ni < 92 \mu g \cdot L^{-1}$,

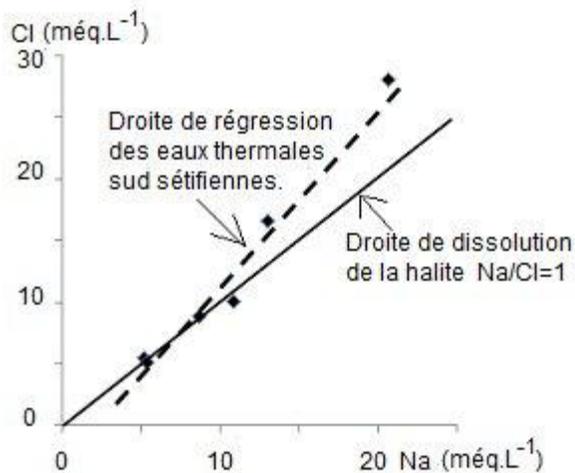


Figure 6. Relation Na-Cl des eaux thermales du Sud sétifien.
Relationship Na-Cl in the thermal waters of South Sétif.

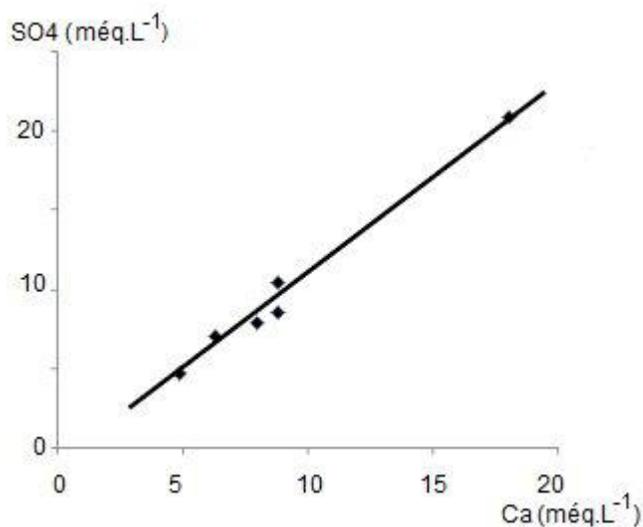


Figure 7. Relation Ca-SO₄ des eaux thermales du Sud sétifien.
Relationship Ca-SO₄ in the thermal waters of South Sétif.

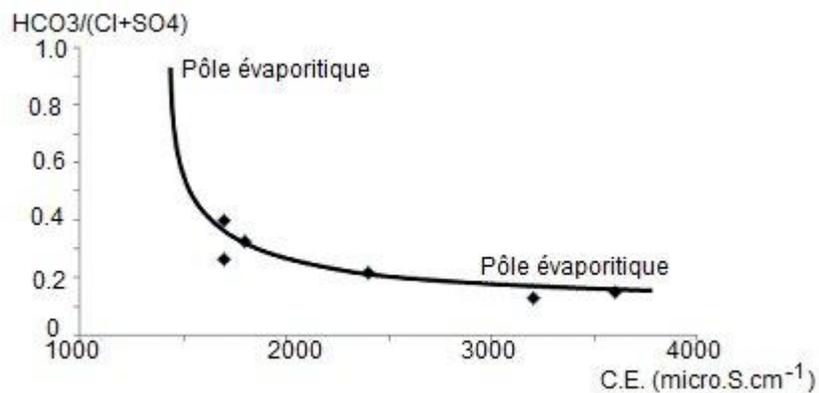


Figure 8. Relation C.E.- $\text{HCO}_3/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ des eaux thermales du Sud sétifien.
Electrical conductivity relationship with $\text{HCO}_3/(\text{Cl}+\text{SO}_4)$ in the thermal waters of South Sétif.

Tableau 2. Indices de stabilité des eaux thermales du Sud sétifien.
Table 2. Stability indices of the thermal waters of south Sétif.

Point d'eau	Halite	Anhydrite	Gypse	SiO ₂	Calcite	Aragonite	Dolomite	CO ₂ (gaz)
Zana	-5,83	-1,56	-1,34	-0,77	0,73	0,59	1,57	-2,44
Sokhna	-5,06	-1,28	-1,08	-0,67	0,72	0,58	1,6	-2,2
Bendiab	-6,28	-1,27	-1,09	-0,71	0,4	0,26	0,94	-1,83
Yelles	-5,73	-0,99	-0,86	-0,61	0,57	0,44	1,12	-1,87
Zdim	-6,32	-1,13	-1,01	-0,66	0,21	0,08	0,59	-1,57
Guergour	-5,47	-0,58	-0,45	-0,75	0,86	0,73	1,77	-1,94

Tableau 3. Concentrations des éléments traces et métalliques.
Table 3. Concentrations of trace and metallic elements.

Point d'eau	Cd ²⁺ (µg•L ⁻¹)	Ni ²⁺ (µg•L ⁻¹)	Ba ²⁺ (µg•L ⁻¹)	Al ³⁺ (µg•L ⁻¹)	Pb ²⁺ (µg•L ⁻¹)	Li ⁺ (µg•L ⁻¹)	Sr ²⁺ (µg•L ⁻¹)	Fe (µg•L ⁻¹)
F1	1,4	19	43	800	160	110	1 700	290
F2	11	29	70	1 130	180	280	2 370	560
F3	15	36	50	1 200	170	110	2 070	240
F4	16	38	52	1 800	320	280	1 700	190
F5	35	92	59	3 440	530	250	11 460	250
S	20	42	56	1 530	230	380	3 600	350

43<Ba<70 µg•L⁻¹, 800<Al<3 440 µg•L⁻¹, 160<Pb<530 µg•L⁻¹, 110<Li<380 µg•L⁻¹, 1 700<Sr<11 460 µg•L⁻¹, 190<Fe<560 µg•L⁻¹). D'après LAKHDAR *et al.* (2006), les éléments métalliques lourds ne sont véhiculés par les fluides que sous des conditions de température et de pression très élevées. Dans le Sud sétifien, ces fortes teneurs traduisent des circulations profondes au contact d'un encaissant de nature magmatique et/ou cristallophyllienne très minéralisé. Les extrusions du socle associées aux formations triasiques qui jalonnent le Sud sétifien sont essentiellement de nature magmatique et métamorphique et très riches en minéralisations. Ces extrusions, qui reflètent la nature du substratum, sont intimement associées aux différents gisements hydrothermaux du Sud sétifien. Ceci suggère une relation génétique entre ces eaux chaudes et ces minéralisations, pouvant expliquer la richesse de ces eaux en éléments traces et métalliques.

3.3 Géothermométrie

La géothermométrie est un outil qui permet l'estimation de la profondeur des réservoirs géothermiques et la température des derniers équilibres chimiques ou isotopiques avant l'émergence. Les eaux profondes et les gaz arrivent à la surface et apportent généralement avec eux leur histoire géochimique. Toutefois, pendant son ascension, l'eau chaude peut subir un mélange avec les eaux froides superficielles pouvant

compliquer l'utilisation des géothermomètres chimiques, cela conduirait soit à une surestimation, soit à une sous-estimation des températures. À noter que la remontée des eaux thermales depuis leurs réservoirs d'origine s'accompagne généralement d'une diminution de la température et d'un changement de la minéralisation totale. D'après BOURI *et al.* (2007), l'utilisation des géothermomètres suppose qu'il n'y a pas de changement chimique significatif de l'eau au cours de sa remontée, malgré les différents refroidissements possibles et souvent remarquables. Pour estimer la température du dernier équilibre thermodynamique, on a appliqué plusieurs géothermomètres, mais il semble que celui de la silice (quartz) est le mieux adapté aux eaux thermales du Sud sétifien. Les températures des eaux, estimées à l'origine, varient entre 70 °C à l'Est et 93 °C au centre. Cette dernière valeur, très supérieure aux températures mesurées, montre ainsi une dissipation moyenne de 45 °C au cours de la remontée d'eau du réservoir jusqu'à la surface du sol. Cette dissipation pourrait être due, soit à un mélange avec les eaux de surface, soit à la diffusion thermique liée au long trajet parcouru par ces eaux pour arriver en surface. Placées dans le diagramme triangulaire K-Na-Mg^{1/2} de GIGGENBACH (1988) (Figure 9), les eaux thermales du Sud sétifien se montrent influencées en partie par une dilution par les eaux superficielles infiltrées, probablement dans les formations carbonatées karstifiées et gréseuses.

Cet outil géothermique a permis également d'estimer la profondeur des différents réservoirs. D'après BOUCHARBHAOUCHINE *et al.* (1994), ISSAADI (1996) et ISSAADI et BOUCHARBHAOUCHINE (1997), le Sud sétifien appartient à une zone où le gradient géothermique est de $35\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$. Ceci permet d'estimer la profondeur du réservoir géothermique à 1 400 m dans la partie Est et entre 1 800 m et 2 200 m dans la partie Ouest.

3.4 Modèle de fonctionnement

Les formations du Sud sétifien sont constituées en majorité par des calcaires, des dolomies et des grès. Ces massifs ont une aire de recharge directe très réduite si l'on ne considère que

leur surface d'affleurement, ce qui ne permet pas de justifier les débits exploités aux différents forages. D'après ISSAADI (1992), la zone de recharge de ces aquifères hydrothermaux est à rechercher plus loin. L'analyse de la position structurale de cet ensemble permet de dire qu'à l'Ouest, l'alimentation du réservoir thermal pourrait se faire à partir de l'Azerou, qui constitue le prolongement des formations sud sétifiennes sous la nappe bibanique. Par contre, à l'Est, l'alimentation du réservoir thermal se ferait à partir des calcaires jurassiques de la nappe néritique constantinoise (Figure 10). Les eaux s'infiltrent jusqu'au réservoir carbonaté se trouvant entre 1 400 et 2 200 m de profondeur en contact avec le socle cristallophyllien. Les eaux infiltrées se réchauffent et acquièrent leur minéralisation initiale (carbonatée) et remontent le long d'un conduit thermal en contact avec une formation terrigène salifère qui lui permet d'acquérir un second faciès (salifère). L'eau chaude

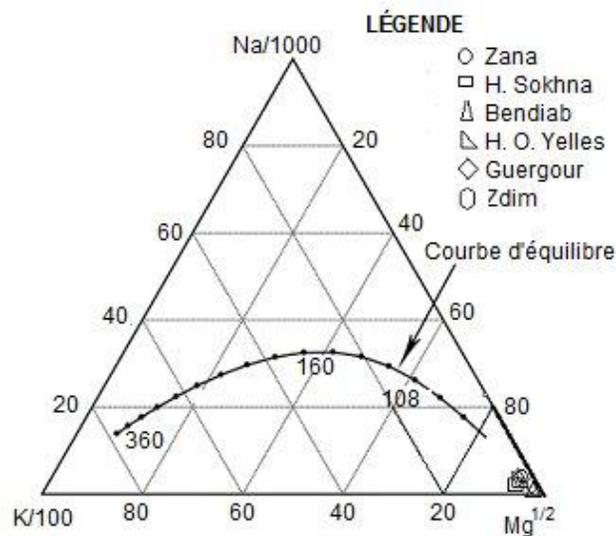


Figure 9. Diagramme triangulaire K-Na-Mg^{1/2} de Giggenbach appliqué aux eaux thermales du Sud sétifien.
Triangular Giggenbach diagram (K-Na-Mg^{1/2}) applied to the thermal waters of South Sétif.

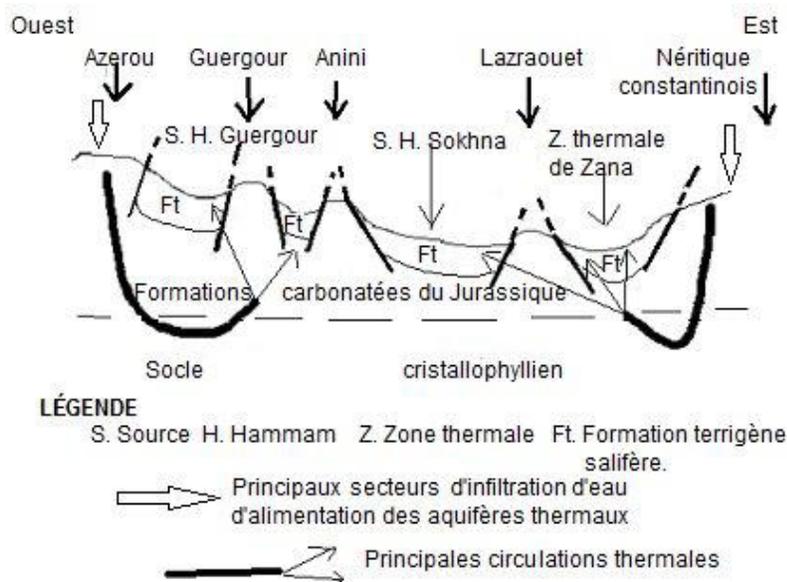


Figure 10. Modèle conceptuel de fonctionnement.
Conceptual model.

émerge en surface pour donner les sources de H. Guergour, H.O. Yelles et H. Sokhna, ou rester en subsurface dans des formations perméables pour former des zones thermales telles que celles de Zana à l'Est et Zdim à l'Ouest. Cette eau ne sera alors exploitable que par le biais de forages d'une profondeur moyenne allant de 100 à 120 m.

4. CONCLUSION

La méthodologie adoptée a montré que les massifs carbonatés de l'ensemble sud sétifien présentent une structure en horsts et grabens, limités par de grandes failles qui faciliteraient la communication entre les différents réservoirs et l'acheminement des eaux thermales profondes jusqu'à la surface. Ce réservoir géothermal se trouve dans les formations carbonatées du Jurassique entre 1 400 m à l'Est et 2 200 m au centre et à l'Ouest où les eaux acquièrent leur minéralisation originelle (carbonatée) et se minéralisent davantage en chlorures, sodium et sulfates au contact des formations terrigènes salifères et par échange de base avec les argiles. Au cours de la remontée, l'eau thermale traverse des terrains perméables et donne, à l'Est, les zones thermales de Zana et Hammam Sokhna et, à l'Ouest, celles de djerbel Youssef, Hammam Ouled Yelles et Hammam Guergour. Ces eaux ont un faciès qui varie selon les régions avec, à l'Est, un faciès de type Cl-Na, au centre, un faciès de type SO₄-Ca et, à l'Ouest, un faciès de type SO₄-Na à Ca. Ces eaux montrent également des teneurs importantes en éléments traces et métallifères témoins d'une circulation profonde à travers le socle cristallophyllien.

REMERCIEMENTS

Cette étude a été réalisée dans le cadre d'une thèse de doctorat et les auteurs remercient vivement les évaluateurs anonymes ainsi que M. Patrick LACHASSAGNE pour leurs remarques qui ont permis d'améliorer la première version du manuscrit.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ABDESSELAM M., J. MANIA, J. MUDRY, J.P., GÉLARD, P. CHAUVE, H. LAMI et C. AIGOUN (2000). Arguments hydrogéochimiques en faveur de Trias évaporitique non affleurant dans le massif du Djurdjura (dorsale kabyle, élément des Maghrébines). *Rev. Sci. Eau*, 13, 155-166.

APPELO C.A.J. et D. POSTMA (1993). Geochemistry, groundwater and pollution. *J. Hydrol.*, 155, 295-296.

ATHAMENA M. (2007). *Étude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud sétifien*. Mémoire de Magister, Univ. Batna, Algérie, 150 p.

BOUCHAREB-HAOUCHINE F.Z. (1993). *Apport de la géothermométrie et des données de forages profonds à l'identification des ressources géothermiques de l'Algérie du Nord*. Application à la région du Hodna. Mémoire de Magister, Univ. Alger, Algérie, 105 p.

BOUCHAREB-HAOUCHINE, F.Z., A. ISSAAD et H. BENDHIA (1994). Estimation and interpretation of geothermal gradient in Northern Algeria. *Bull. Serv. Geol. Algeria*, 5, 69-74.

BOUCHAREB-HAOUCHINE F.Z. et A. BOUDOUKHA (2009). Hydro-geochemical and litho-structural approach of deep circulations in the mounts of Hodna, Algeria. *Eur. J. Sci. Res.*, 37, 12-20.

BOUDOUKHA A. (1988). *Hydrogéologie et modélisation du système aquifère des dépressions fermées d'El Eulma N.E Algérien*. Thèse de Doctorat, Univ. Franche-Comté, Besançon, France, 184 p.

BOUDOUKHA A. (1998). *Hydrogéologie des hautes plaines sétifiennes et hydrochimie des eaux souterraines*. Thèse de Doctorat, Univ. Annaba, Algérie, 230 p.

BOUDOUKHA A. (2008). Identification des aquifères profonds par la prospection électrique. Application à l'Est algérien. *Sci. Technol. A*, 28, 47-52.

BOUDOUKHA A., W.M. KOWALSKI et A. PHARISAT (1997). Évolution des sédiments lacustres Plio-Villafranchiens des dépressions fermées d'El Eulma. Est algérien. *Bull. Soc. Sci. Nat. Pays Montbéliard*, 187-200.

BOUDOUKHA A., D. KHAMOUDJ et L. DJABRI (2006). Conséquence d'une surexploitation d'un aquifère en pays semi-aride : cas de la nappe superficielle d'El Eulma (Est Algérien). *L'eau souterraine dans les Pays Méditerranéens*, 17, 459-465.

BOURI S., M. GASMI, M. JAOUADI, M. SOUISSI, A. MIMI, A. LAHLOU et H. DHIA (2007). Étude intégrée des données de surface et de subsurface pour la prospection des bassins hydrogéothermiques : cas du bassin de Maknassy (Tunisie centrale). *Hydrol. Sci. J.*, 52, 1298-1315.

- BOUTALED A. (2001). *Les minéralisations à Pb-Zn du domaine Sétifien-Hodna : Géologie, pétrographie des dolomies, microthermométrie et implications métallogéniques*. Thèse de doctorat d'état en géologie minière, IST. USTHB, Algérie, 350 p.
- BRADY P.V. et J.V. WALTER (1992). Surface chemistry and silicate dissolution at elevation temperature. *Am. J. Sci.*, 292, 639-658.
- BRINIS N., A. BOUDOUKHA, L. DJABRI et J. MANIA (2009). La salinité des eaux souterraines de la zone Est de la plaine d'El Outaya. Région de Biskra, Algérie. *Bul. Serv. Géol. Algérie*, 20, 49-61.
- CASTANY G. (1967). *Traité pratique des eaux souterraines*. DUNOD (Éditeur), Paris, 661 p.
- CENTRE D'EXPERTISE EN ANALYSE ENVIRONNEMENTALE DU QUÉBEC (2008). *Détermination des nitrates et des nitrites : méthode colorimétrique automatisée avec le sulfate d'hydrazine et le N.E.D., MA. 300 – NO₃ 1.0, Rév. 1*. Ministère du Développement durable, de l'Environnement et des Parcs du Québec, 12 p.
- C.G.G (1969). *Étude par prospection géophysique dans la plaine de Gadaine, de Zana et d'El Madber*. Ministère de l'Hydraulique, DHW de Batna, Algérie, 39 p.
- C.G.G (1972). *Étude par prospection géophysique dans la plaine de Ain Djasser (ex Bourzhel)*. Ministère de l'Hydraulique, DHW de Batna, Algérie, 22 p.
- C.G.G (1973). *Étude par prospection géophysique sur les hautes plaines de Sétif*. Ministère de l'Hydraulique, DHW de Sétif, Algérie, 53 p.
- CHULLI B., J. MAKNI, M. BEDIR et H. BENDHIA (2011). Une approche multidisciplinaire pour la prospection des bassins hydrogéothermiques : cas du Sahel de Sfax (Tunisie orientale). *Hydrol. Sci. J.*, 56, 507-520.
- COIFFAIT P.E. et J.M. VILA (1976). La série des Azerou (région des Biban, Algérie), un témoin de la plate-forme néritique sétifienne sous la nappe bibanique. *C.R. Somm. Soc. Géol. Fr.*, 269-271, Paris, France.
- D'AMORE F., G. SCANDIFIO et C. PANICHI (1983). Some observations on the chemical classification of ground waters. *Geothermics*, 12, 141-148.
- DEMDOUM. A. (2010). *Étude hydrogéologique de la région d'El Eulma et le problème de la qualité des eaux*. Thèse de Doctorat, Univ. Constantine, Algérie, 205 p.
- DIB-ADJOUL H. (1985). *Le thermalisme de l'Est algérien*. Thèse de Doctorat, Univ. Alger, Algérie, 281 p.
- DJEMBA S. (2001). *Étude hydrogéologique et modélisation du système aquifère de Baida Bordj, El Eulma*. Mémoire de magister, Univ. Tébessa, Algérie, 182 p.
- DJIDI K., M. BAKALOWICZ et A. BENALI (2008). Mixed, classical and hydrothermal karstification in a carbonate aquifer hydrogeological consequence. The case of the Saida aquifer system, Algeria. *C.R. Geosci.*, 340, 462-473.
- FEKRAOUI A. (2007). Caractéristiques géochimiques des eaux géothermales de la région d'Oran. *Rev. Ener. Renouv.*, 07, 75-80.
- GHEBOULI S. (2008). Origine de la salinité des eaux souterraines : cas des hautes plaines sétifiennes. Nord-Est algérien. *Sci. Technol. A*, 28, 37-46.
- GIGGENBACH W.F. (1988). Geothermal solute equilibria, Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim.*, 52, 2749-2765.
- GLAÇON J. (1967). Recherches sur la géologie et les gites métallifères du Tell sétifien. *Bull. Serv. Geol. Alger*, 552 p.
- GOUAIDIA I., A. BOUDOUKHA et A. PHARISAT (2005). Impact de la lithologie et la sécheresse sur le chimisme des eaux souterraines d'une nappe en zone semi-aride; cas de la nappe alluvionnaire de Meskiana. *Bull. Soc. Sci. Nat. Pays Montbéliard*, 245-255.
- GOUAIDIA L., A. BOUDOUKHA, L. DJABRI L. et A. DJERRAB (2006). Impact des activités agricoles et de la nature de la couche vadose sur l'évolution des nitrates dans la plaine de Meskiana (NE algérien). *L'eau souterraine dans les Pays Méditerranéens*, 17, 37-46.
- HISSOU Y., P. CHAUVE, J. MANIA, A. MANGIN, M. BAKALOWICZ et A. GRAIZ (1996). Caractérisation des eaux de l'aquifère du Turonien du bassin de Tadla (Maroc) par le rapport des concentrations molaires Sr²⁺/Ca²⁺. *J. Hydrol.*, 183, 445-451.
- ISSAADIA. (1992). *Le thermalisme dans son cadre géostructural, apports à la connaissance de la structure profonde de l'Algérie et de ses ressources géothermales*. Thèse de Doctorat, Univ. Alger, Algérie, 274 p.

- ISSAADI A. (1996). Mécanismes de fonctionnement des systèmes hydrothermaux. Application aux eaux thermominérales algériennes et aux eaux de Hammam Bou-Hadjar. *Bull. Ser. Géol. Algérie*, 7, 71-85.
- ISSAADI A. et F.Z. BOUCHAREB-HAOUCHINE (1997). Estimation du flux de chaleur en Algérie du Nord à partir de la thermométrie silice. *Bull. Ser. Geol. Algérie*, 8, 29-39.
- KHAMMOUDJ D. (2009). *Dynamique des systèmes et stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau en zone semi-aride : cas de la région d'El Eulma. W de Sétif*. Thèse de Doctorat, Univ. Annaba, Algérie, 273 p.
- LAHLOU MIMI A., H. BENDHIA, S. BOURI, A. LAHRECH, L. BENABIDET et F.Z. BOUCHAREB-HAOUCHINE (1998). Application of chemical geothermometers to thermal springs of the Maghreb. North Africa. *Geothermics*, 27, 211-233.
- LAKHDAR A., A. NTARMOUCHENT, M. RIBEIRO, M. BEQQALI, K. EL OUADECHE, L. BENABIDETE, M. DAHIRE, Y. DRIOUCHE et A. BENSLIMANE (2006). Nouvelle approche géologique et géodynamique du complexe hydrothermal de Mouley Yakoub (Bordure septentrionale du sillon Sud Rifain). *Comunicações Geologicas*, 93, 185-204.
- LAMBRAKIS N. et G. KALLERGIS (2005). Contribution to the study of Greek thermal springs: hydrogeological and hydrochemical characteristics and origin of thermal waters. *Hydrogeol. J.*, 13, 506-521.
- MEBARKI A. (2009). *Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est*. Office des Publications Universitaires, Algérie, 389 p.
- MEYBEK M. (1984). *Les fleuves et le cycle géochimique des éléments*. Thèse de Doctorat d'état, Univ. Paris VI, ENSup., 506 p.
- PARKHURST D.L., D.C. THORSTENSON et L.N. PLUMMER (1980). *PHREEQC. A computer program for geochemical calculations*. US Geol. Survey Water Resource Invest. Rept., pp. 80-96.
- RODIER J. (1996). *L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer*. 8^e édition, DUNOD (Éditeur), Paris, 1365 p.
- TOUBAL A. (2005). Regard sur les perspectives hydrogéologiques profondes des hautes plaines sétifiennes à travers la prospection électrique. *Bull. Serv. Geol. Algérie*, 16, 55-67.
- VILA J.M (1980). *La chaîne alpine d'Algérie orientale et les confins algéro-tunisiens*. Thèse de Doctorat, Univ. Pierre et Marie Curie, Paris VI, France, 665 p.
- WILDI W. (1983). La chaîne tello-rifaine (Algérie, Maroc, Tunisie) : structure, stratigraphie et évolution du Trias au Miocène. *Rev. Geol. Dynam. Geogr. Phys.*, Paris, Masson, 201-297.