



ETUDE DU POTENTIEL HYDROTHERMAL DE HAMMAM SOKHNA. EST ALGERIEN.

BOUDOUKHA A.¹, ATHAMNA M.¹, BENAABIDAT L.²

¹.Laboratoire de recherche en hydraulique appliquée. Université de Batna, Algérie.

².Laboratoire des Géosciences et Environnement. Faculté des sciences et techniques.
Université Sidi Mohamed Ben Abdellah. Fès Maroc.

Auteur correspondant : boudoukha_abderrahmane@yahoo.fr

RESUME.

La typologie chimique de la source thermale de Hammam Sokhna a été étudiée à l'aide d'outil géochimique en utilisant la modélisation inverse. L'application des différents diagrammes a permis de déterminer le faciès, l'origine et l'état d'équilibre de la phase solide avec la phase liquide. Ceci a permis de constater que les eaux sont sulfatées, chlorurées, sodiques. Cette parenté géochimique est liée à la dissolution la dissolution des minéraux évaporitiques, à la précipitation de minéraux carbonatés et à l'altération de silicates. La modélisation inverse montre que la phase liquide contient 36% de sulfates, 29% de carbonates et 7% de silice. L'origine de l'eau est en partie due à l'infiltration des eaux météoriques circulant en profondeur dans les roches sédimentaires.

Mots clés. Source thermale, Géochimie, Faciès, Modélisation, Hammam Sokhna, Algérie.

ABSTRACT

The chemical typology of the thermal spring of Sokhna Hammam was especially studied using geochemical tool by using inversed modeling. The application of various diagrams made it possible to determine the facies, the origin and the state of balance of the solid phase with the solid phase. This made it possible to realize that water is sulphated, chlorinated and sodic. This

geochemical relationship is dependent on dissolution of evaporitic minerals, on the carbonated mineral precipitation and the alteration of silicates. The inversed modeling shows that the liquid phase contains 36 % of sulfate, 29 % of carbonates and 7 % of silica. The origin of the water is partially due to the infiltration of meteoric waters circulating in depth in sedimentary rocks.

Keywords: thermal spring, geochemistry, facies, modeling, Sokhna Hammam, Algeria.

INTRODUCTION

Les eaux thermales acquièrent un nouvel intérêt pour l'homme et leurs systèmes hydrothermaux représentent une ressource énergétique qui a l'avantage d'avoir un faible impact sur l'environnement. La source de Hammam Sokhna se trouvant au sud sétifien dans l'Est algérien, fait partie de cet ensemble géothermale dont la température de l'eau à l'émergence varie entre 25°C et 43°C (Boudoukha et Athamna, 2012). Cette source est très sollicitée par de nombreux forages d'une faible profondeur (< 70 m) qui alimentent de nombreuses stations. Cette source émerge au milieu d'une vaste dépression relativement plane (900 à 910 m) sur la limite nord d'un lac salé (Chott El Baida) entourée par de nombreux massifs montagneux. Les eaux de cette source thermale sont considérées comme des eaux à vertu thérapeutique, exploitées de plus en plus de façon moderne. Cette dernière a fait l'objet de quelques études, le plus souvent mono-disciplinaires et fragmentaires, ne permettant pas d'appréhender l'ensemble des mécanismes ayant contribué à cette résurgence. La présente note se propose, par le biais d'outils géologique, géophysique, géochimique et géothermométrie, d'apporter une contribution qui permettra de mieux comprendre les mécanismes géochimiques responsables de cette typologie chimique.

CONDITIONS NATURELLES

Géologie

La région de Hammam Sokhna appartient au domaine sud sétifien où affleurent les formations carbonatées du Jurassique et du Crétacé (Wildi, 1983). Au Nord, on a Djebel Tnoutit, au Sud, Djebel Messaouda et Roknia, et à l'Ouest, Djebel Tella. On y rencontre également plusieurs affleurements du Trias salière à travers le terrain. Le centre de la plaine est caractérisé par deux terrains, le Quaternaire et le Mio-Pliocène (Vila, 1980), Fig. 1. Le Quaternaire est formé par des sols salés périodiquement inondables, formés par de la vase, des alluvions anciennes et des formations de pente. Le Mio-Pliocène est formé par des calcaires lacustres, des conglomérats et des marnes du Villafranchien qui sont bien représentés Nord de la source. On y trouve également des sables, des cailloutis, des conglomérats, des limons et des argiles rouges à gypse.

L'analyse structurale de la région de Sétif, laisse apparaître plusieurs phases tectoniques, mais c'est la dernière, post-tortonienne qui est responsable de l'orographie actuelle (Vila, 1980). Elle a abouti au comblement du bassin mio-pliocène alimenté par les sédiments provenant du démantèlement des reliefs environnants suite aux phases antérieures de compression et de tension.

Gravimétrie et géothermie

La carte gravimétrique de l'Algérie du Nord (Lagrula, 1951), fait apparaître les zones à anomalies positives et les zones à anomalies négatives. Plusieurs auteurs estiment que l'anomalie positive de ces zones ne s'explique que par une position du socle très proche de la surface (Grandjean et al., 1965). Dans les zones à anomalies positives, émergent la majorité des sources chaudes en particulier les sources hyperthermales et mésothermales (Bouchareb-Haouchine, 2012) dont fait partie la source de Hammam Sokhna. D'autre part, la carte du gradient géothermique (Kazi-Tani, 1986), montre que la source thermale de Hammam Sokhna, est située sur la zone à forte anomalie géothermique (4 à 4.5°C). Il s'avère donc que cette source thermale émerge dans une zone où toutes les conditions géophysiques et géothermiques sont favorables.

Climatologie

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 forte 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 orageuse et la région reçoit une lame d'eau annuelle qui varie entre 250 et 300 mm. La température moyenne annuelle est de 15°C, la valeur minimale correspond au mois de janvier (-5°C) alors que la valeur maximale (39°C) coïncide avec le mois d'août. Ceci a abouti à un climat semi-aride (Mebarki, 2009) où l'évaporation reprend près de 95% des précipitations alors que la recharge des aquifères est relativement faible (<2%) (Boudoukha et al., 2006).

Hydrogéologie

Les nombreuses études hydrogéologiques entreprises dans la région (Boudoukha, 2008 ; Khammoudj, 2009 ; Demdoun, 2010) ont permis de mettre en évidence deux grands types d'aquifères. Le premier aquifère superficiel est à porosité d'interstice et se trouve dans les formations du Mio-Plio-Quaternaire. Cet aquifère est surexploité et il n'a plus d'intérêt du point de vue hydrogéologique. Le second aquifère se trouve dans les formations carbonatées karsifiées du Jurassique et du Crétacé. Ces calcaires reposent sur les séries argilo-marneuses primaires imperméables et constituent un réservoir important dont le niveau statique est voisin de la côte 900 m. Ces calcaires disparaissent en profondeur sous les terrains du Mio-Plio-Quaternaire. Les deux aquifères sont séparées par une épaisse couche d'argile imperméable du Miocène.

Les diverses stations thermales se trouvant à Hammam Sokhna, sont alimentées par sept forages qui ont été réalisés dans un périmètre de 500 m du griffon de l'ancienne source. Cette situation a provoqué la disparition de la source et de l'étang qui occupait une superficie de près de 2 hectares. La profondeur de ces forages varie entre 60 et 120 m et leurs débits d'exploitation varient entre 5 et 10 l.s⁻¹. Le niveau statique de la nappe varie entre 1 et 10 m en s'éloignant de l'ancien griffon et il ne cesse de diminuer. Il est passé ainsi de 0 m en 2000 à 10 m en 2010.

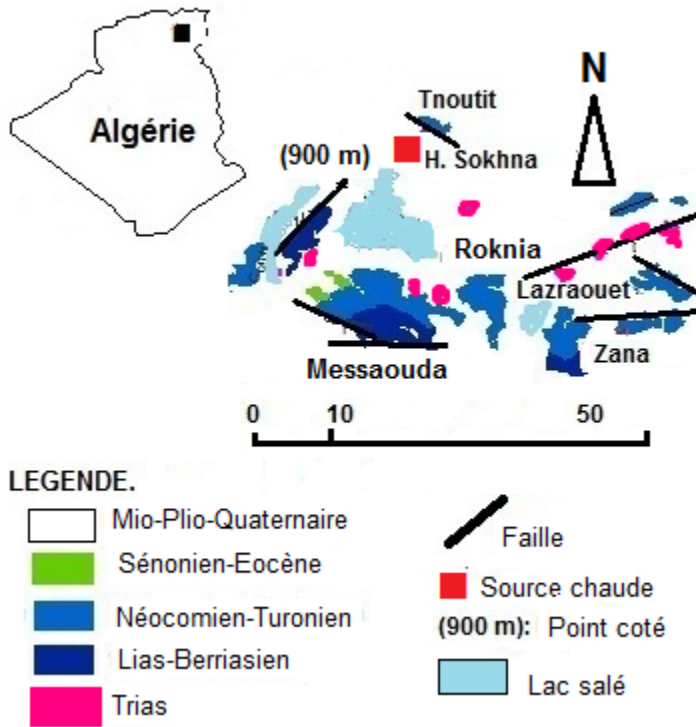


Figure 1 : Carte géologique schématique de la région de Hammam Sokhna.

L'étude des cuttings des forages a montré l'existence d'une première couche formée par des argiles, des alluvions et de la vase jusqu'à 32 m de profondeur. A partir de cette cote, on rencontre une deuxième couche plus résistante formée par des calcaires lacustres fissurés et karstifiés. Cette karstification se manifeste par la présence d'une série de pertes totales de boue de forage à 32m, 40m, 44m, 46m et 50m de profondeur. Les essais hydrodynamiques réalisés dans ces forages donnent des débits spécifiques qui varient entre $10.5 \text{ l.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ et $20 \text{ l.s}^{-1}.\text{m}^{-1}$ (Boudoukha et al., 2006).

Echantillonnage d'eau et analyses chimiques

Trois campagnes de terrain, conduites en 2006, 2008 et 2009 ont permis d'échantillonner les eaux thermales de la source de Hammam Sokhna. Les paramètres physico-chimiques ont été systématiquement mesurés in situ. Cette démarche est particulièrement utile afin d'identifier les différentes masses d'eau présentes sur le terrain. Ces mesures in situ concernent : la température de l'eau ($T_{\text{eau}}^{\circ\text{C}}$), la conductivité électrique (CE) et le potentiel hydrogène (pH). Les analyses chimiques en éléments majeurs : calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), bicarbonates (HCO_3^-) et silice (SiO_2) d'eau collectée ont été réalisées au Laboratoire du Centre de Recherche et de Développement de la SONATRACH par spectrométrie de masse à source de plasma (spectromètre ICP-MS VARIAN®, Liberty 200) et par absorption atomique. Tableau 1.

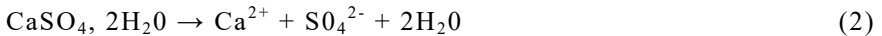
Tableau 1 : Paramètres physico-chimiques des eaux de la source thermale Hammam Sokhna exprimés en mg.l^{-1} , CE en $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et $T_{\text{eau}}^{\circ\text{C}}$.

Année	2006	2008	2009
CE	3600	3200	3710
T_{eau}	39.2	43.4	44.5
pH	7.65	7.55	7.25
Ca^{2+}	160	174	153
Mg^{2+}	94	52	58
Na^+	475	430	420
K^+	12	10	12
Cl^-	860	775	814
SO_4^{2-}	376	370	230
HCO_3^-	329	207	232
SiO_2	21.1	25.3	27.2

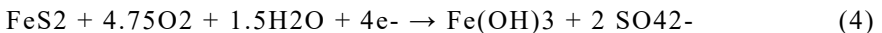
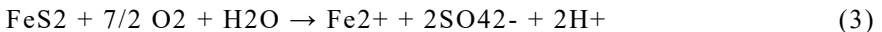
RESULTATS ET INTERPRETATION

Hydrogéochimie

Ces eaux thermales émergent avec une température qui varie entre 39.2 °C et 44,5 °C. Pendant la période d'échantillonnage, la température semble augmenter et ceci en liaison avec la cote de pompage qui augmente avec le temps à cause du rabattement du niveau dynamique. Ces eaux sont considérées, selon la classification de Castany, (1967), comme mésothermales. Le pH de ces eaux est légèrement alcalin ($7,25 < \text{pH} < 7,65$) et la salinité est moyenne étant donné que la conductivité électrique varie entre 3200 et 3710 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. 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 en liaison avec des formations terrigènes salifères. Le diagramme de Piper (Fig. 2) et celui de Langelier-Ludwing (Fig. 3) confirment cette hypothèse et montrent respectivement que les eaux de la source présentent un faciès $\text{SO}_4\text{-Cl-Na}$ où l'augmentation de la concentration des chlorures et des sulfates se fait en parallèle avec celle du sodium et du potassium. Les fortes teneurs de Na^+ , Cl^- et SO_4^{2-} , peuvent suggérer la dissolution des sels de chlorures et de sulfates selon les formules 1 et 2.



Les sulfates peuvent également provenir de la dissolution des minéraux sulfurés comme la pyrite ou la marcassite selon la formule (3) (Droubi et al., 1976) ou la formule (4) proposée par Appeelo et Postma, (1993) :



Cette typologie a été également démontrée dans les études antérieures (Boudoukha et Athamna, 2012). Au cours de la période 2006-2009, ces eaux on peut évoluer ce qui témoigne de leur stabilité et donne des indications sur leur origine.

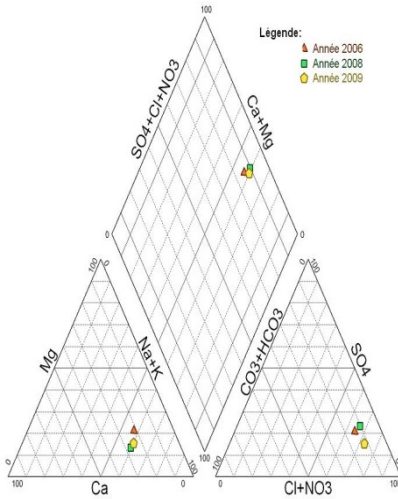


Figure 2 : Diagramme de Piper.

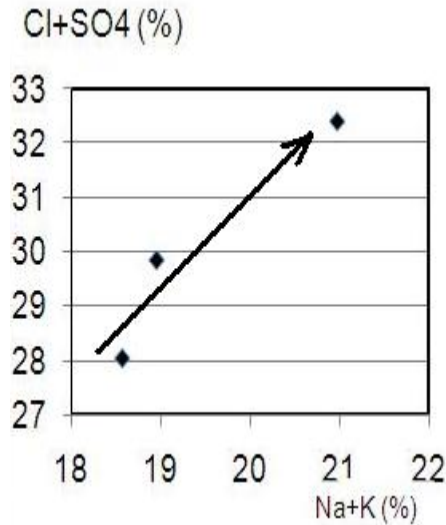


Figure 3 : Diagramme de Langelier-Ludwing.

Géothermométrie

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 (Boudoukha et Athamna, 2012). Pour la source de Hammam Sokhna, les points s'alignent sur la courbe de la calcédoine (Figure.4). Les températures des eaux, estimées à l'origine à l'aide du géothermomètre calcédoine (Arnorsson, 1975), varient entre 72.7 et 79.8 °C. On remarque que les valeurs calculées sont supérieures aux valeurs mesurées, suite à une dissipation moyenne de 32°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) les eaux de la source thermique de Hammam Sokhna, se montrent influencées en partie par une dilution par les eaux superficielles infiltrées, probablement dans les formations carbonatées karstifiées du Jurassique et du Crétacé (Figure.5).

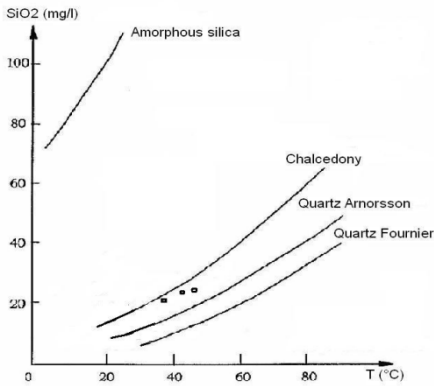


Figure 4 : Relation Température-silice appliquée de la source thermale Hammam Sokhna.

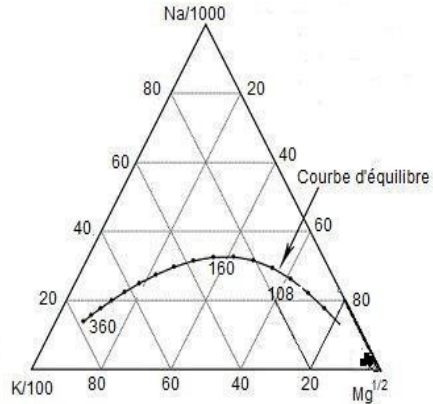


Figure 5 : Diagramme de Gigenbach appliqué à la source thermale Hammam Sokhna.

Tableau 2 : Indices de stabilité des eaux de la source thermale Hammam Sokhna vis-à-vis des éléments carbonatés et des éléments évaporitiques.

Année	2006	2008	2009
Calcite	3.25	3.07	2.86
Aragonite	3.11	2.94	2.73
Dolomite	6.53	5.86	5.58
Gypse	1.11	1.20	0.99
Anhydrite	1.00	1.11	0.91
Halite	-2.45	-2.55	-2.52
Quartz	2.38	2.34	2.21
Chrysotile	6.16	5.27	3.77
Sépiolite	6.68	5.91	4.65
CO ₂	-0.58	-0.65	-0.27

Modélisation

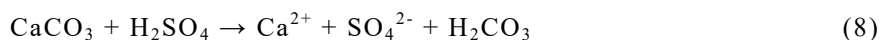
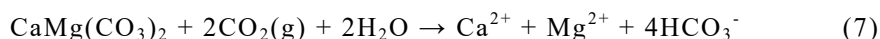
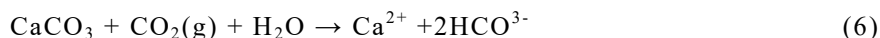
Le chimisme de l'eau est acquis par l'interaction de l'eau avec les roches encaissantes. Ce mécanisme a été étudié à l'aide de l'indice de saturation (IS) de quelques minéraux évaporitiques, carbonatés, la silice et le CO₂ dissous. Cette simulation a été réalisée à l'aide du programme Phreeqc (Parkhurst et al., 1980) qui permet de calculer l'IS défini par la formule 5.

$$IS = \log (IAP/K) \quad (5)$$

où IAP est l'activité de l'ion et K, la constante d'équilibre. L'équilibre est atteint lorsque $IS=0$. Si $IS>0$, l'eau est sursaturée, la précipitation des minéraux est nécessaire pour atteindre l'équilibre, par contre si $IS<0$, l'eau est sous-saturée, la dissolution des minéraux est nécessaire pour atteindre l'équilibre. Les valeurs de l'IS des échantillons d'eau ont été reportées dans le tableau 2. Cette modélisation a permis également d'aboutir à la distribution des espèces pouvant exister dans la solution. La solution est dominée par les évaporites qui représentent 36%, suivies par les carbonates avec 29% et la silice avec 7%. Le reste est représenté par les ions en solutions.

Ces indices montrent que, outre la halite, tous les minéraux sont sursaturés ($IS>0$), traduisant un temps de contact avec la roche assez long pour permettre leur dissolution. Les indices 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 est la plus plausible comme il a été démontré auparavant par Boudoukha et Athamna, (2012).

L'utilisation du diagramme d'équilibre eau-minéraux carbonatés (Drever, 1988), montre que l'eau est en équilibre avec la dolomite et l'aragonite. Fig. 6. Cette dissolution se fait dans les conditions naturelles selon les réactions 6, 7 et 8 (Garrels and Mackenzie, 1971). Cette dernière permet l'augmentation de la teneur des sulfates dans l'eau.



L'évolution hydrochimique a été également étudiée à l'aide des diagrammes de stabilité des minéraux argileux (Drever, 1988), carbonatés et évaporitiques (Arnorsson, 1975). Le report des analyses sur ces diagrammes, montre les eaux de la source sont en équilibre avec la smectite calcique $(Na,Ca)(Al,Mg)_6(Si_4O_{10})_3(OH)_6 \cdot nH_2O$, qui après altération, libère des ions Na^+ , pouvant contribuer à l'augmentation de la salinité. Fig. 7. De même que l'utilisation du diagramme d'équilibre eau-carbonates-évaporites permet de voir que l'eau de la source thermale est en équilibre avec le gypse, sa dissolution se fait selon la formule 2. Fig. 8. Il ressort de ces divers diagrammes, que

l'interaction eau-roche est le principal mécanisme de l'évolution de la chimie de l'eau selon le modèle suivant :

Aragonite (CaCO_3) + smectite ($(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Al}, \text{Mg})_6(\text{Si}_4\text{O}_{10})_3(\text{OH})_6 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) + gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + CO_2 (g) + halite (NaCl) + H_2O chaude \rightarrow enrichissement de l'eau surtout en SO_4^{2-} , Na^+ et Cl^- selon les réactions citées plus haut. La teneur en Ca^{2+} , Mg^{2+} et HCO_3^- n'étant pas dominants, ont dû précipiter sous forme de carbonates.

Donc ces diagrammes montrent les minéraux mis en jeu dans l'équilibre avec la phase liquide et révèlent les principales réactions géochimiques qui contrôlent la chimie des eaux thermales de cette source.

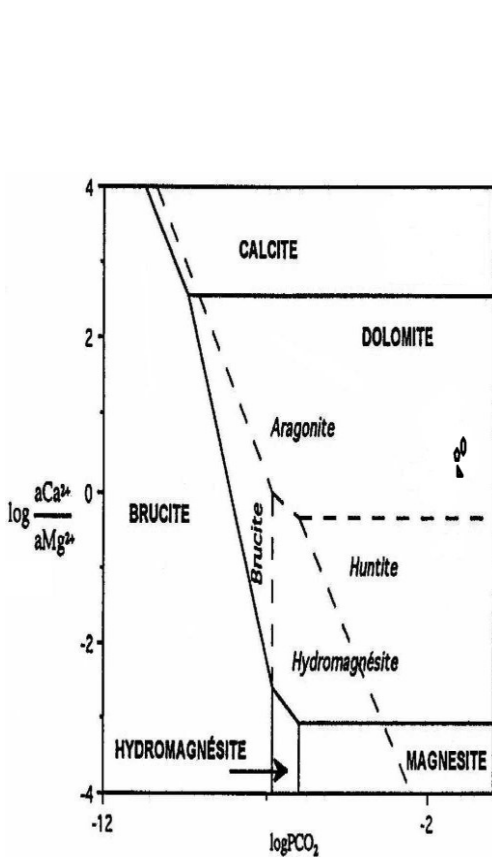


Figure 6 : Diagramme d'équilibre des minéraux carbonatés.

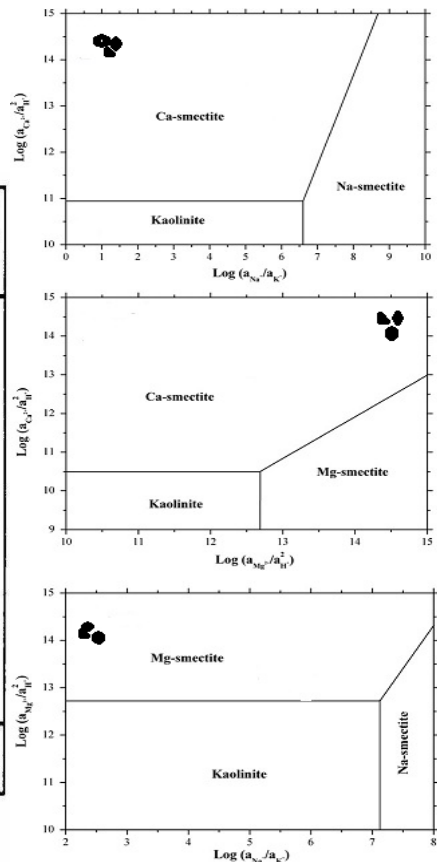


Figure 7 : Diagramme de stabilité des minéraux argileux.

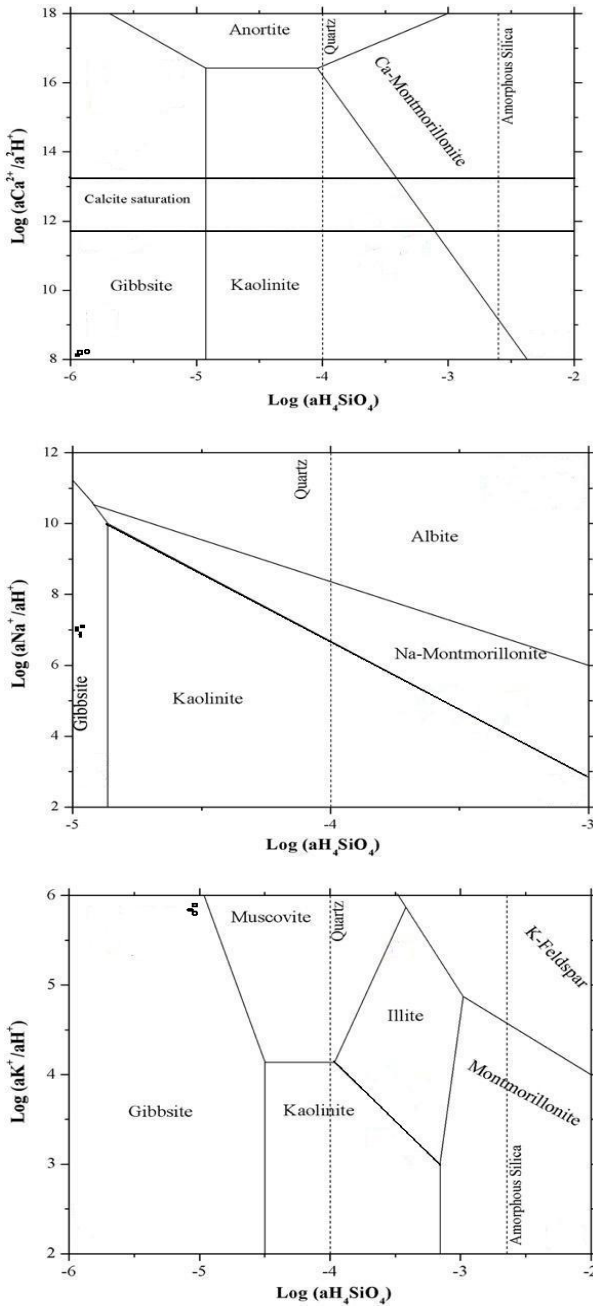


Figure 8 : Diagramme d'équilibre eau-carbonates-évaporites.

CONCLUSION

L'étude du chimisme de l'eau de la source thermale de Hammam Sokhna à l'aide des différents outils géologiques, géophysiques, hydrochimiques, couplé avec la modélisation inverse, a permis de déterminer ses caractéristiques typologiques. De faciès sulfaté, chloruré, sodique, l'eau de la source thermale a acquis cette typologie en grande partie en profondeur où la température moyenne est de 75°C. Ces conditions ont permis l'altération des différents minéraux tels que l'aragonite, la dolomite, la smectite et le gypse, en présence du gaz carbonique dissous. Dans ces conditions, l'eau se trouve sursaturée en anhydrite, aragonite, calcite, calcedoine, chrysotile, dolomite, gypse, sépiolite, talc et en silice mais sous-saturée uniquement en halite selon les différentes valeurs de l'indice de stabilité. Cette circulation permet alors la dissolution des minéraux évaporitiques la précipitation de minéraux carbonatés et l'altération de silicates.

BIBLIOGRAPHIE

- APPELO C.A.J., POSTMA D. (1993). Geochemistry, groundwater and pollution. *J. Hydrol.*, 155, 295-296.
- ARNORSSON, S. 1975. Application of the silica geothermometer in low-temperature hydrothermal areas in Iceland. *American Journal of Science*, 275, 763-784.
- BOUCHAREB-HAOUCHINE F. Z. 2012. Etude hydrochimique des sources thermales de l'Algérie du Nord. Potentialités géothermiques. Thèse de Doctorat d'Etat en Sciences de la Terre. Spécialité : hydrogéologie. Fac. Sc. Terre. Géo. Amen. USTHB. Alger.
- BOUDOUKHA A. (2008). Identification des aquifères profonds par la prospection électrique. Application à l'Est algérien. *Sci. Technol. A*, 28, 47-52.
- BOUDOUKHA A. et ATHAMENA M., 2012. Caractérisation des eaux thermales de l'ensemble sud sétifien. Est algérien. *Revue des Sciences de l'Eau* 25(2) 103-119.
- 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.

- CASTANY G. (1967). *Traité pratique des eaux souterraines*. Dunod (Éditeur), Paris.
- 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.
- 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.
- DREVER, J.I. (1988). *The Geochemistry of Natural Waters*. Prentice-Hall, New Jersey.
- DROUBI A., CHEVERRY C., FRITZ B., TARDY Y. (1976). Géochimie des eaux et des sels dans les sols des polders du lac Tchad: Application d'un modèle thermodynamique de simulation de l'évaporation. *Chemical Geology*.17:165-177.
- GARRELS R.M., MACKENZIE F.T. (1971). *Evolution of Sedimentary Rocks*. Norton, New York.
- GIGGENBACH W.F. (1988). Geothermal solute equilibria, Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochim. Cosmochim.*, 52, 2749–2765.
- GRANDJEAN A., GUIRAUD R., POLVECHE J. (1965). Le séisme de M'Sila, travaux de collaborateurs. *Bull. serv. Géol. Algérie*
- KAZI-TANI N. (1986). *Evolution géodynamique de la bordure nord-africaine : le domaine intraplaque nord-algérien. Approche mégaséquentielle*. Thèse Doctorat es-Sciences, Université de Pau, France.
- KHAMMOUDJ D. (2009). *Dynamique des systèmes et stratégie d'aménagement et gestion de la ressource en eau en zone semiaride : cas de la région d'El Eulma. W de Sétif*. Thèse de Doctorat, Univ. Annaba, Algérie.
- LAGRULA J. (1951). *Etude gravimétrique de l'Algérie – Tunisie*. Bull. Serv. Carte Géol. Algérie, 4ème série, Géophysique n°2,99-106.
- MEBARKI A. (2009). *Ressources en eau et aménagement en Algérie. Les bassins hydrographiques de l'Est*. Office des Publications Universitaires, Algérie.
- PARKHURST D.L., THORSTENSON D.C., PLUMMER L.N. (1980). PHREEQC. A Computer Program for Geochemical Calculations. *US Geol. Surv. Water-Resources Invest. Rept*, 80-96.
- 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.
- 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.