

---

---

# CARACTÉRISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX THERMO-MINÉRALES DES MONTS DE LA CHEFFIA (EXTRÊME NORD-EST ALGÉRIEN)

---

---

**Hacène ALAYAT et Christian LAMOUREUX**

*Processus et bilans des domaines sédimentaires<sup>1</sup>*

## Résumé

Les Monts de la Cheffia, situés à l'extrême nord-est algérien, sont le siège de sources thermominérales. Les plus visitées par les curistes sont celles de Hammam Sidi Trad, Zatout et Beni Salah. Les autres sont délaissées faute d'accès aménagés. Les résultats préliminaires de l'étude des eaux de ces griffons sont présentés dans cette note.

Les premières analyses, dont nous avons connaissance, remontent à 1968. Les données recueillies (2001, 2002) ont permis la caractérisation physico-chimique des eaux, illustrée par leur projection sur le diagramme de Piper et par l'analyse statistique. Nous avons pu identifier plusieurs faciès chimiques et distinguer deux groupes de griffons :

- l'un caractérise les eaux non salines ou peu minéralisées et à odeur d'hydrogène sulfuré représenté par Sidi Trad,
- l'autre caractérise les eaux très salines, riches en bicarbonate et en CO<sub>2</sub> dissous des autres griffons.

**Mots-clés** : Sources thermominérales, Méso- à Hyper-thermale, failles, hydrochimie, ACP

## Introduction

L'étude des caractéristiques des eaux thermo-minérales est souvent destinée à préciser les variations potentielles de leur qualité et de leurs origines [Tardy, 1980 ; Chevalier-Lemire et al., 1990] ou de présenter leur localisation [Djorfi, 1988]. Leur contamination par les eaux météoriques dont la pollution est souvent considérée comme le résultat d'une importante activité anthropique est, dans cette région, très limitée car très peu peuplée et l'agriculture utilise des méthodes traditionnelles souvent imposées par le relief tourmenté.

Cet article présente les variations dans la distribution des paramètres physico-chimiques des eaux thermo-minérales des monts de la Cheffia, analysés à partir de 6 campagnes de mesures réalisées entre 2001 et 2002 afin de mieux appréhender le fonctionnement de ces sources. L'analyse chimique d'échantillons d'eau prélevés dans 8 sites montre une variabilité des caractéristiques physico-chimiques dans l'espace et peu dans le temps. Pour obtenir une meilleure lisibilité des représentations graphiques des résultats

<sup>1</sup> UMR 8110 - USTL de Lille - 59655 Villeneuve d'Ascq - tel. 03 20 43 43 43

d'analyse obtenus, en évitant la quasi superposition des symboles induite par la faible variation temporelle, nous avons été amenés à ne reporter qu'une partie des résultats.

## Contexte géologique général

Les nombreuses études géologiques en Algérie avaient pour principal objectif d'améliorer la connaissance afin de faciliter l'identification et la localisation de gisements (d'eaux, souterrains, miniers, pétroliers,...). Selon les nombreux travaux qui existent [Joleaud, 1936 ; Kieken, 1961 ; Durand Delga, 1969 ; Raoult, 1974 ; Vila, 1980 ;...] la géologie de la région est très complexe en raison de nombreuses surfaces de chevauchement et de failles qui perturbent les successions de formations essentiellement sédimentaires surtout au cours des phases alpines.

Situées dans la partie nord du craton africain, les formations géologiques se répartissent en grands ensembles sédimentaires :

- 1- La zone interne qui, dans le secteur, est surtout constituée par le socle kabyle, littoral, avec des massifs essentiellement métamorphiques anté-siluriens. Ce domaine est marqué par l'absence de formations du Mésozoïque et, localement, par une activité éruptive récente oligo-pliocène. La chaîne calcaire est surtout distinguée au sud de Collo, plus à l'ouest. Les flyschs crétacés, généralement allochtones, reposent sur les formations de la zone interne et la chaîne calcaire.
- 2- La zone externe comprend du nord au sud [Vila, 1980] : i) la zone ultra-tellienne aux formations bathyales du Crétacé et de l'Éocène et une série plus détritique au Sénonien et à l'Éocène ; ii) la zone tellienne *s.s.* est formée de Lias de plate-forme surmonté de Jurassique plus marneux, puis par le Crétacé qui, détritique, devient marneux à argilo-calcaire et enfin, l'Éocène aux marnes épaisses ; iii) la zone pénitellienne dont les séries néritiques sont carbonatées et marneuses. Ces unités sont très souvent impliquées dans de vastes ensembles allochtones qui impliquent le Trias gypsifère. Ce dernier, largement présent dans la partie plus méridionale des Djebels, n'affleure que dans le secteur SE de la région examinée mais sa présence en profondeur est probable comme en témoigne la teneur en chlorures et en soufre des eaux de beaucoup de points d'eau (sources, cours d'eau).
- 3- Le Numidien (Oligocène à Burdigalien), est représenté par une formation essentiellement gréseuse comportant à la base et au sommet respectivement des argiles sous-numidiennes et des argiles associées à des marnes supra-numidiennes.

## Les sources et leur contexte

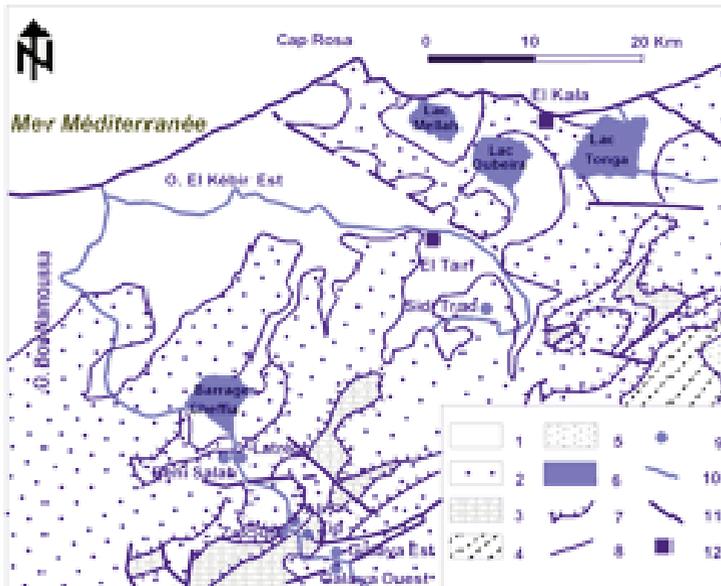
La source Sidi Trad est localisée dans des formations gréseuses numidiennes à une dizaine de kilomètres à l'est de Zitouna. Le lit du cours d'eau matérialise bien une zone de cisaillement senestre N130 à pendage de 60°S d'une puissance minimale de 20 m dont les rejeux ont été multiples.

Toutes les autres sont dans la haute vallée de Hammam, à 15-20 km au sud-ouest de Zitouna. Celles de Beni Salah, de Latrèch et de Zatout ont leurs exsurgences dans des

formations argiles à blocs numidiennes mais toujours à proximité de surfaces tectoniques (nappe de charriage) alors que celle de Zid est associée à des marno-calcaires à la géométrie très complexe des unités ultra-telliennes [Vila, 1980]. Nos investigations nous ont permis de localiser, à proximité d’Hammam Zatout, des griffons méconnus ou abandonnés faute de chemins d’accès (Sidi Ali, Galaya Est et Ouest) et de leur emplacement dans des sites accidentés. Dans des argiles à blocs numidiennes, leurs exurgences sont également associées à des surfaces tectoniques. Leurs eaux ont fait l’objet de mesures et d’analyses physico-chimiques pour la première fois en mars 2001. Galaya Est et Ouest, localisées seulement en période de basses eaux, dans le lit de l’oued Hammam, correspondent à deux plans d’eau de 1,5 m de diamètre, d’une profondeur n’excédant pas 30 cm et dont le fond est recouvert de résidus organiques. L’eau de ces sites, comme la traduction littérale de leur nom l’indique, est “bouillonnante” par l’effet de dégazage au contact de l’atmosphère (CO<sub>2</sub>, esters...). Par ailleurs, la température de l’eau est élevée, en dépit de leurs exurgences dans le lit mineur d’un oued à l’air libre.

**Matériels et méthodes**

Dans le cadre de ce travail, un programme de surveillance des griffons connus des Monts de la Cheffia, Sidi Trad, Zatout, Beni Salah, Zid, Latrèch (**Fig. 1**) a été mis en place en 2001, à raison de trois campagnes par an (mars, juillet, octobre). Les paramètres



**Figure 1 : Carte géologique simplifiée de la région, [Vila 1980, simplifiée]**

La frontière tunisienne est située à une quinzaine de km environ à l’est du port d’El Kala, pratiquement sur le bord droit de la figure. 1 : Quaternaire ; 2 : Flysch non différencié (surtout grès numidiens et argiles de base) ; 3 : Nappes ultra-telliennes ; 4 : Nappes telliennes ; 5 : Trias ; 6 : Étendues d’eau ; 7 : Chevauchements ; 8 : Contacts géologiques ; 9 : Griffons ; 10 : Oueds ; 11 : Failles ; 12 : Centres urbains.

physico-chimiques (pH, température et conductivité électrique) ont été mesurés *in situ* à l'aide d'une sonde multiparamètres (WTW). Les analyses chimiques ont été effectuées par absorption atomique à flamme pour les cations et par colorimétrie pour les anions.

## Résultats et discussion

### 1. Paramètres physiques

La température est la principale caractéristique des eaux étudiées (**tabl. I**). Hammam Sidi Trad et Galaya se classent comme des sources hyperthermales alors que les autres (Zatout, Zid, Sidi Ali, Beni Salah et Latrèch) le sont comme exurgences mésothermales. La conductivité électrique, exprimée en millisiemens par cm (mS/cm), est directement liée aux formations traversées dans le bassin hydrogéologique des griffons. Ces valeurs sont faibles pour Sidi Trad, moyennes pour Beni Salah et élevées pour les autres (eaux salines).

Sidi Trad est caractérisé par le plus fort débit et Zid par le plus faible. Ce débit subit de faibles fluctuations annuelles. Cependant, comme le captage correspond à un tuyau enfoncé par battage, nous pensons que ces fluctuations sont plutôt dues au colmatage par les colloïdes organo-minéraux.

Les odeurs sont causées par la présence dans l'eau de substances volatiles (esters, alcool d'origine organique...). En dehors de la prépondérance de vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub> contenus dans l'eau de Beni Salah, Latrech, Zatout et Sidi Ali, les autres substances volatiles se manifestent discrètement. L'odeur d'œuf pourri caractéristique de Sidi Trad, témoigne de la présence d'hydrogène sulfuré (H<sub>2</sub>S) d'origine interne.

**Tableau I : Conductivité électrique (CE), températures, pH et débits des eaux de griffons dans le NE algérien**

Griffons	CE mS/cm	T °C	pH	Débit l/S
Sidi Trad	0.5	60	7.57	0.9
Beni Salah	1.5	45	7.43	0.71
Latrèch	1.9	37	7.47	0.05
Zatout	2.2	46	7.32	0.36
Zid	2.3	40	6.72	0.09
Galaya W	2.7	68	6.35	/
Galaya E	2.7	69	6.59	/

### 2. Paramètres chimiques

#### *Rapports caractéristiques*

Le rapport Mg/Ca est caractéristique du parcours des eaux souterraines. Sa faible valeur traduit l'appauvrissement des eaux en Ca<sup>2+</sup> [Chevalier-Lemire et al., 1990] qui provoque une augmentation de la teneur en HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. (**tabl. II**).

**Tableau II – Les rapports caractéristiques**

Griffons	Na/K	Mg/Ca	Na/Ca
Sidi Trad	5.831	0.314	1
Zid	17.01	0.55	13.05
Galaya E	21.54	0.289	12.4
Galaya W	44.45	0.366	13.89
Beni Salah	49.32	0.707	18.01
Sidi Ali	50.13	0.41	12.18
Latrèch	226.8	0.165	17.4
Zatout	289.1	0.165	22.18

Le rapport Na/Ca traduit l'enrichissement en sodium des sources de la région étudiée, exceptée celle de Sidi Trad.

Le rapport Na/K est de l'ordre de 47 pour l'eau de mer actuelle. Il est inférieur à 10 pour l'eau de pluie [Stournaras G. et al., 1989]. Ce rapport scinde les griffons en trois groupes :

- Sidi Trad, avec un rapport inférieur à l'eau de pluie,
- Sidi Ali, Beni Salah, Galaya E et Galaya W, avec un rapport inférieur ou voisin à l'eau de mer,
- Zatout et Latrèch, avec un rapport très élevé.

#### *Cations et anions majeurs*

Les teneurs en Ca+Mg, Na+K, HCO<sub>3</sub>+CO<sub>3</sub> et Cl+SO<sub>4</sub> (**tabl. III**) montrent que le principal radical acide est le bicarbonate pour les sources de Sidi Trad, Zatout, Beni Salah Latrèch et Zid et les chlorures pour toutes les autres. Le principal radical basique est le calcium pour la source de Sidi Trad (53 %) et le sodium (> 90 %) pour toutes les autres.

Les eaux des sources des Monts de la Cheffia présentent des teneurs en nitrates si faibles (le maximum très ponctuel ≤ 7 mg/l) que nous ne l'avons pas pris en compte dans les teneurs ci-dessus [Tardy, 1980]. Ces eaux ont également de faibles teneurs en calcium (14 à 50 mg/l) et en magnésium (5 à 19 mg/l) par rapport à la minéralisation globale. Ces valeurs plaident en faveur d'une absence de pollution par les eaux de surface ou de subsurface.

**Tableau III : Teneurs en cations et anions des eaux des griffons du NE algérien**

Griffons	Ca+Mg		Na+K		HCO <sub>3</sub> +CO <sub>3</sub>		Cl+SO <sub>4</sub>	
	meq/l	%	meq/l	%	meq/l	%	meq/l	%
Sidi Trad	2.76	52.98	2.45	47.02	4.1	78.39	1.13	21.61
Sidi Ali	1.19	10.19	12.87	89.81	8.19	39.35	7.24	60.65
Zid	1.16	10.07	17.48	89.93	10.19	53.53	8.19	46.47
Galaya E	1.16	9.05	22.26	90.95	15	40.37	11.38	59.63
Galaya W	2.58	8.78	25.94	91.22	11	40.61	16.25	59.39
Beni Salah	2.46	8.46	25.57	91.54	11.14	53.08	16.29	46.92
Latrèch	2.82	6.22	24.85	93.78	10.9	55.44	16.8	44.56
Zatout	2.32	4.95	20.72	95.05	13.11	56.86	11.38	43.14

### *Diagramme de Piper<sup>2</sup>*

Le report des résultats d'analyses sur un diagramme triangulaire montre que les eaux de :

- Zatout, Zid, Beni Salah, Latrèch sont bicarbonatées sodiques ;
- Sidi Ali, Galaya E et Galaya W sont chlorurées sodiques, les éléments ioniques obtenus proviennent probablement du lessivage des évaporites triasiques qui existent en profondeur ;
- Sidi Trad sont bicarbonatées calciques indiquant un contact important avec des calcaires sous-jacents et autochtones ou allochtones, non visibles à l'affleurement.

Le diagramme de Piper sépare distinctement les eaux de Sidi Trad des eaux des autres griffons.

### *pH*

Le pH des eaux de ces sources présente des différences assez faibles (**Tabl. 1**), les valeurs obtenues étant de  $7,00 \pm 0,70$ . L'alcalinité des eaux de Beni Salah et Latrèch est probablement attribuable surtout aux bicarbonates et aux carbonates. La précipitation de carbonate de calcium que connaît Zatout, Sidi Ali, Zid, Latrèch est induite par le dégagement de CO<sub>2</sub> libre, qui se traduit par une diminution du pH montrant que l'eau de ces sites est incrustante.

### **3. Évolution des caractéristiques physico-chimiques**

La confrontation de données ponctuelles les plus anciennes (1968) à diverses périodes de l'année avec celles de 2001 obtenues sur des échantillons prélevés lors de périodes analogues montre que la température a peu varié, excepté celle de Zatout qui a perdu 5 à 6 °C. Entre autres, les débits de ce griffon et celui de Zid sont réduits de moitié.

La minéralisation des eaux a peu ou pas changé ; les eaux de Zid, Zatout et Beni Salah sont restées salines.

## **Analyse statistique des données**

L'analyse statistique des données physico-chimiques – 10 variables, 34 individus – a été réalisée par l'analyse en composante principale (ACP). La matrice des corrélations nous donne une première idée des associations existant entre les différentes variables telles que Na, Cl, HCO<sub>3</sub>, SO<sub>4</sub> et CE (conductivité électrique). Ces paramètres sont relativement bien corrélés entre eux.

Les valeurs propres de la matrice des corrélations permettent de mesurer le pourcentage de la variance expliquée par chaque factoriel. Nous apporterons une attention importante aux variables ayant une forte contribution positive ou négative à l'axe factoriel, ce qui facilitera la compréhension de la source de variabilité expliquée par cet axe.

Le premier plan factoriel s'est révélé suffisant pour traduire l'essentiel de cette inertie. Sur les graphiques issus de l'analyse factorielle, nous voyons des regroupements, des oppositions et des tendances directionnelles.

---

<sup>2</sup>. La rédaction de la revue tient à la disposition des lecteurs qui en feront la demande les diagrammes de Piper concernant le faciès chimique des eaux thermominérales des Monts de la Cheffia et leur évolution de même que les graphiques indiquant la position des variables dans le premier plan factoriel et la représentation des sources dans le plan factoriel I et II.

L'axe I exprime 66,09 % de la variance et oppose les éléments majeurs au pH et à la température. Il traduit l'augmentation de la dissolution des éléments avec la baisse du pH et de la température. Il explique la minéralisation des eaux. Enfin, le calcium et les nitrates se différencient sur l'axe II qui exprime 10,90 % de la variance.

Les eaux des sources permettent d'identifier une typologie à partir de leur minéralisation et nous avons celles de :

- Sidi Trad qui se situent dans le domaine des eaux peu minéralisées et à température élevée ;
- Sidi Ali, Galaya E et W qui sont riches en chlorures et en sulfate appartiennent aux eaux salines ;
- Latrèch, Zatout, Beni Salah et Zid qui sont riches en bicarbonate et pauvres en calcium. Il existe de petites variations à l'intérieur de ce groupe. Parmi celles-ci, celles de Zatout et Beni Salah sont plus acides et celles de Zid sont plus salines ce qui explique la position dans la partie négative sur l'axe II.

## Conclusion

La solubilité des carbonates et des évaporites et la tectonique de la région font que ces formations sont des aquifères très importants. La structure géologique et les relations entre les diverses unités géologiques permettent les échanges directs d'eau, dont la manifestation essentielle est l'apparition de griffons. En l'absence de données hydrogéologiques et hydrodynamiques, le levé de la carte géologique et les analyses chimiques des eaux étaient les seuls moyens existants pour l'étude hydrogéologique de cette région.

Ce travail donne des observations intéressantes sur un ensemble de huit sources thermales du N E algérien. Dans les Monts de Cheffia, nous distinguons des eaux peu minéralisées à odeur d'hydrogène sulfuré, qui émergent dans le nord du massif, dans les grès et des eaux salines au sud, qui apparaissent dans les argiles à blocs et les marno-calcaires.

La projection des analyses d'eau des huit griffons sur le diagramme de Piper nous a permis, en premier lieu, de voir apparaître trois faciès d'eau. Sidi Trad est caractérisé généralement par le type bicarbonaté calcique. Les autres sources sont carbonatées sodiques ou chlorurées sodiques. La salinité des sources situées dans le sud du massif reflète la présence de formations triasiques (gypse, sel gemme, potasse) dans leur bassin hydrogéologique.

Le faciès géochimique qui domine est, pour les cations,  $Na > Ca > Mg$  et pour les anions  $HCO_3 > Cl > SO_4$ . Ce type reste constant quelle que soit la période. Les faibles teneurs en calcium et magnésium plaident en faveur d'une absence de pollution par les eaux de surface ou de subsurface.

Une comparaison de l'évolution des mêmes données sur quatre de ces sources déjà mesurées en 1968 permet de constater une constance des propriétés chimiques.

L'étude de quelques paramètres d'identification des eaux thermominérales et l'utilisation de l'analyse en composantes principales montre un regroupement très net

des individus issus de l'hydrolyse des évaporites et donc de la prééminence de ce phénomène dans la minéralisation des eaux.

Pour des réservoirs différents, nous observons dans le nord du massif une bonne constance de la teneur en Na+K de l'ordre de 50 % lorsque la minéralisation est faible et uniquement issue de l'hydrolyse des silicates. L'intervention dans le sud du massif de carbonates et d'évaporites entraîne une minéralisation élevée des eaux, qui se caractérise par une légère variabilité de la teneur en Na+K (89 à 96 %) et la teneur en bicarbonate atteint le double de la valeur observée dans le premier réservoir, soit près de 80 %.

## Références

- Allard P. Caractéristiques géochimiques des volatils émis par l'éruption volcanique de novembre 1978, dans le rift d'Asal. *Bull Soc Géol Fr* 1980;22:825-830.
- Baria R, lanyon GW and Hearn K. Microseismic fracture location system for the Rosemanowes Quarry HDR reservoir ; European community HYDR Geothermal Energy Research Evaluation Workshop, Brussels, 30 june 1983.
- Barrabe L et Deicha G. Réanimation des magmas et interprétation de quelques particularités de leurs éléments de premières consolidations. *Bull Soc Géol Fr* 1957;7:159.
- Beswick J. Drilling deep geothermal wells in Cornish granite, In Géodrilling APR. 1983, Camborne School Of Mines (1981-1983), Geothermal Energy Project, Bimonthly reports 1983.
- Chevalier-Lemire G, Pigassou R, Rigaiil R, Vilmus T. Étude des variations naturelles du débit des sources thermales à Luchon (Haute-Garonne, France). *BULL BRGM* 1990;4:287-296.
- Cummings RG, Arundale CJ, Bivins RL, Burness HS, Drake RH and Norton RD. The use of hot dry rock geothermal resources for space heating, a case study : los alamos national laboratory, report la 9541 ms, 1982.
- Djorfi S. *Étude des eaux minérales et thermales du nord-est algérien et leur importance socio-économique*. Th. Doct. PhD, Univ. d'état d'Azerbaïdjan (URSS),1988:196p.
- Djorfi S. *Étude des conditions lithostructurales et hydrogéologiques des sources thermominérales du nord-est algérien*. Colloque Intern. Terre et eau, Univ. Annaba – Algérie, 2004:4p.
- Durand Delga M. Mise au point sur la structure du Nord-Est de la Berbérie. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, N.S., *Bull Soc Géol fr* 1969;7,xiii:328-337, 7 fig., Paris.
- Joleaud L. Étude géologique de la région de Bône-la Calle. *B S G A* 1936;2, n° 12, 199 p,25 fig., 2 tabl., 4 pl.
- Raoult JF. *Géologie du centre de la chaîne numidique (Nord du constantinois, Algérie)*. Thèse Sc. Paris. Mém. Soc. géol. Fr., N.S., LIII, mém. 1974; n° 121,163p, 62 fig., 9 pl.h.t., carte géol.h.t., Paris.
- Kieken M. *Les traits essentiels de la géologie algérienne*. 1961.
- Stournaras G, Panagoupoulos A, Sotiropoulou K. La signification hydrogéologique des conditions hydrochimiques et géomorphologiques d'un terrain gypseux. Les sources de Drymos (Grèce occidentale). *Annales de l'université de Provence* 1989;XVI, n° 4:311-320.
- Tardy Y. *Géochimies des interactions entre les eaux, les minéraux et les roches*. S.A.R.L. ELEMENTS édit. Tarbes, 1980,199 p.
- Travi Y, Mudry J. Méthode pour l'évaluation et la gestion du risque nitrate dans les aquifères de socle de la zone sahéenne d'Afrique de l'Ouest. *BULL BRGM* 1997;1:13-21.

- Villa JM. *La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins algéro-tunisiens*. Thèse de doctorat ès sciences naturelles, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 1980; 2 t, 665 p, 199 fig., 40 pl.