

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد الصديق بن يحيى - جيجل -

Université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : des Sciences de la Terre et de
l'Univers



كلية علوم الطبيعة والحياة
قسم: علوم الأرض والكون

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme : **Master Académique en Géologie**

Option : Hydrogéologie

Thème

Caractérisation physico-chimique et origine des eaux
thermo-minérales de la région de Mila (NE Algérie)

Membres de Jury

Président : Drouiche Abdelmalek

Examineur : Djorfi Samir

Encadrant : Debieche Taha-hocine

Présenté par :

M^{lle} Boulatrous Bouchra

M^{lle} Bounneche Ahlam

Année Universitaire 2020-2021

Numéro d'ordre (bibliothèque)

Remerciement

*A la fin de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements au **bon dieu** le tout puissant qui nous a ouvert les portes de la réussite, comme nous tiens à remercier toute personne ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail et en particulier un très grand remerciement à notre encadrant Monsieur « **Debieche Taha-Hocine** », pour son soutien, sa gentillesse et ses conseils judicieux. Merci beaucoup d'avoir été notre encadrant.*

Nous remercions tous les enseignants qui ont contribué à notre formation pendant les cinq ans.

*Nous remercions également Mademoiselle « **Hadaf Selma** » pour sa orientation et sa aide dans la réalisation des analyses chimiques au laboratoire de Génie Géologique (LGG) et l'enseignant « **Rouikha Youcef** » pour leur aide dans l'établissement d'une coupe géologique.*

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail. On les remercie aussi pour leurs critiques pertinentes qui vont sans doute améliorer la qualité scientifique de notre mémoire.

Bouchra et Ahlam

Dédicace

*Les louanges sont à **ALLAH** seigneur des mondes qui comble de grâce en me permettant d'achever en bonne santé ce modeste travail que je dédie :*

*Mes chers parents, « **Djamel** » et ma mère « **Chafia** » pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A Mes chères sœurs « **Sonia** » et son mari « **Walid** », « **Wissam** » et son mari « **Oussama** » et son enfant, **Ghaith**. « **Rahma** » et « **Asma** ».*

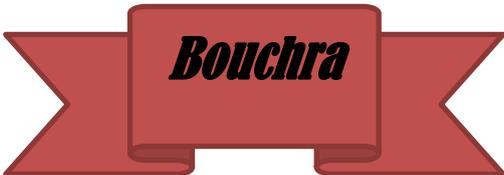
*A mon frère « **Aymen** »*

*Mon binôme de travail et belle-sœur « **Ahlam** » et tous mes copains*

*A tous mes chers amis sans exception **Sabrina, Aicha, Aida, Roumaïssa, Arafa.***

Toute la promotion du Master hydrogéologie.

Tous les enseignants et le personnel du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.



Bouchra

Dédicace

*Les louanges sont à **ALLAH** seigneur des mondes qui comble de grâce en me permettant d'achever en bonne santé ce modeste travail que je dédie :*

*Mes chers parents, « **Abdallah** » et ma mère « **Noura** » pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études.*

*A Mes chères sœurs « **Besma** » et son mari « **Raouf** », « **Sara** » et son mari « **Bilal** », « **Meriem** ».*

*A mes frères « **Houssam** » et « **Yacine** »*

*Mon binôme de travail et belle-sœur « **Bouchra** » et tous mes copains*

*A tous mes chers amis sans exception **Aicha, Aida, Roumaissa, Arafa.***

Toute la promotion du Master hydrogéologie.

Tous les enseignants et le personnel du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers.



Table de matières

Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des photos	
Liste des tableaux	
Résumé	
Introduction générale.....	01

Chapitre I : Rappel bibliographique

I.1. Introduction.....	02
I.2. Définition et classification des eaux thermo-minérales.....	02
I.2.1. Eau minéral	02
I.2.2. Eau thermo minérale	02
I.3. Caractéristiques des eaux thermo-minérales.....	03
I.3.1. Température.....	03
I.3.2. Minéralisation.....	04
I.4. Origine des eaux thermo minérales.....	04
I.5. Les systèmes hydrothermaux continentaux.....	05
I.6. Les sources thermales dans le monde.....	07
I.7. Les sources thermales du nord algérien.....	07
I.7.1. Gradient géothermique.....	07
I.7.2. Sources et température des eaux thermales.....	08
I.7.3. Faciès chimiques des eaux thermales.....	09
I.7.4. Exemple des sources thermales en Algérie.....	10
a. Source thermale de Boughrara.....	10
b. Source thermale de Bouhadjar.....	10
c. Source thermale de Debbagh	11
I.8. Conclusion.....	12

Chapitre II : Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction.....	13
II.2. Situation administrative.....	13
II.3. Contexte morphologique.....	13

II.4. Contexte climatologique.....	14
II.5. Contexte hydrologique.....	15
II.6. Contexte géologique.....	16
II.6.1. Stratigraphie.....	17
II.6.1.1. Tertiaire.....	17
II.6.1.2. Paléogène.....	18
II.6.1.3. Crétacé.....	19
II.6.1.3. Jurassique	19
II.6.1.3. Trias	19
II.6.2. Tectonique.....	19
II.7. Sources thermales.....	19
II.8. Conclusion.....	20

Chapitre III : Matériel et Méthodes

III.1. Introduction.....	21
III.2. Présentation des sources thermales étudiées.....	21
III.2.1. Zone de Beni-Haroun.....	22
III.2.2. Zone de Beni-Guécha.....	22
III.2.3. Zone de Zouaoui et Ouled Achour.....	23
III.3. Campagne de prélèvement d'eau.....	24
III.4. Mesures in-situ des paramètres physico-chimiques.....	25
III.5. Appareils et méthodes d'analyse des éléments majeurs.....	25
III.5.1. Méthode volumétrique (titrimétrie).....	26
III.5.2. Méthode spectrophotométrique ultraviolet-visible (UV-Vis).....	26
III.5.3. Méthode spectrophotométrique d'absorption moléculaire.....	26
III.6. Conclusion.....	27

Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1. Introduction.....	28
IV.2. Analyses physico-chimiques.....	28
IV.2.1. Mesures in situ.....	28
IV.2.2. L'interprétation.....	29
IV.3. Eléments majeurs.....	29
IV.3.1 interprétations.....	30
IV.4. Rapport caractéristique.....	33

IV.4.1. Rapport Ca/ HCO ₃ et Ca+Mg/HCO ₃	34
IV.4.2. Rapport Na/Cl.....	34
IV.4.3. Rapport Ca/SO ₄ et Ca+Mg/HCO ₃ + SO ₄	35
IV.5. Les faciès chimique.....	35
IV.5.1. Classification Collins ou Stabler.....	35
IV.5.2. Classification géochimique des eaux.....	36
IV.5.2.1 Diagramme de Piper.....	36
IV.5.2.2 Diagramme de Schoeller.....	37
IV.5.2.3 Diagramme triangulaire (Cl-SO ₄ -HCO ₃).....	38
IV.6. Profondeur des eaux thermo-minérales.....	40
IV.7. Modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique et chimique des sources thermo-minérales.....	41
IV.7.1. Zone de Béni Haroun.....	41
IV.7.2. Zone de Béni Guechat.....	41
IV.7.3. Zone de Ouled Achour.....	42
IV.8. Conclusion.....	43
Conclusion générale.....	44
Bibliographie	
Annexes	

Liste des figures

Figure.I.1 : Coupe géologique expliquant les eaux thermales de bourbonne-les-bains (France) d'origine vadose (www.chemindeleau.com).....	04
Figure.I.2 : Modèle conceptuel des circulations hydrothermales liées à la présence d'une source de chaleur magmatique (Curewitz and Karson, 1997).....	05
Figure.I.3 : Les systèmes hydrothermaux continentaux non magmatiques (Moeck, 2014)....	06
Figure.I.4 : Exemples de sources thermales dans le monde. (A Source thermale en France (www.pinterest.com), B Source thermale en Japon (Mandy,2014).....	07
Figure.I.5 : Carte du gradient géothermique du Nord de l'Algérie A- Kazi Tani (1986) et B- Saibi (2009).....	08
Figure.I.6 : Répartition spatiale des sources thermales au nord Algérien (Ouali 2015)	09
Figure.I.7 : Températures et faciès chimiques des sources thermales du Nord de l'Algérie (Abdellatif et al., 2006)	09
Figure.I.8 : Situation géographique de sources thermales de Boughrara (Tlemcen), Salhine (Biskra) et Meskoutine (Guelma) en Algérie	10
Figure.I.9 : Source thermale de Boughrara (Tlemcen)	10
Figure.I.10 : Source thermale de Bouhadjar (Ain Temouchent)	11
Figure.I.11 . Source thermal Hammam Debagh (Meskhoutaine) – Guelma	11
Figure.II.1 : Situation administrative de la wilaya de Mila	13
Figure.II.2 : Relief de la wilaya de Mila	14
Figure.II.3 : carte pluviométrique de la wilaya de Mila	15
Figure.II.4 : Le bassin versant Kébir Rhumel	16
Figure.II.5 :Schéma de la structuration alpine du méridional du N-W Algerien/ ferdjioua...	17
Figure.II.6 : log stratigraphique de la zone d'étude.	18
Figure.II.7 : les sources thermo-minérales de la wilaya de Mila.....	19
Figure.III.1 : Position de trois sources thermales étudiées de la région de Mila.....	21
Figure.III.2 : Sources thermales de Beni-Haroun	22
Figure.III.3 : Sources thermales de Beni-Guechat	23

Figure.III.4 : Sources thermales Zouaoui et Ouled Achour	24
Figure.IV.1 : Histogrammes représente les mesures in situ des eaux chaudes étudiée.....	28
Figure.IV.2 : Concentration des cations.....	30
Figure.IV.3 : Concentration des anions.....	31
Figure.IV.4 : Projection des points d'eau sur les graphes Ca / HCO_3 et $Ca + Mg / HCO_3$	34
Figure.IV.5 : Projection des points d'eau sur les graphes Na/Cl	35
Figure.IV.6 : Projection des points d'eau sur les graphes Ca/SO_4 et $Ca+Mg/HCO_3+ SO_4$	35
Figure.IV.7 : Représentation des analyses d'eau sur le diagramme de Piper.....	37
Figure.IV.8 : Représentation des analyses d'eau sur le diagramme de Schoeller.....	38
Figure.IV.9 : Classification des eaux chaudes étudiées selon le diagramme triangulaire ($Cl-SO_4-HCO_3$) de Giggenbach.....	40
Figure.IV.10 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des sources thermo-minérales de la zone Béni Haroun.....	41
Figure.IV.11 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des sources thermo-minérales de la zone Béni guechat.....	42
Figure.IV.12 : Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des sources thermo-minérales de la zone zouaoui	42

Liste des photos

Photo III.1 : GPS MAP 62 S de type Garmin.....	25
Photo III.2 : Appareils utilisés pour effectuer les mesures in-situ	25
Photo III.3 : Dispositif utilisé pour les analyses par la méthode titrimétrique.....	26
Photo III.4 : spectrophotomètre (VWR - UV 1600 PC)	26
Photo III.5 : Photomètre de flamme AFP 100	27

Liste des tableaux

Tableau.IV.4 : Calcul du pourcentage des éléments Cl et SO ₄	39
--	----

Résumé

Les eaux thermo-minérales en Algérie sont liées au processus de réchauffement des eaux météoriques sous l'effet du gradient géothermique. La région de Mila est un exemple où les eaux thermo-minérales émergent suite aux failles profondes et dans des formations différentes. L'analyse des résultats de trois zones (Béni-Haroun à formation carbonatées, Béni-Guechat à formation Triasique et Oued Achour – Zouaoui à formation marneuse et carbonatées) montre des températures d'eau oscillent entre 36,9 et 54°C, des conductivités entre 4900 µs/cm et 28000 µs/cm et une profondeur d'eau entre 462.5 à 785 m. L'analyse des résultats chimiques montre que l'émergence de ces sources est liée aussi aux formations triasiques soit en surface (Béni-Guechat) ou en profondeur (Béni-Haroun et Ouled Achour-Zouaoui). L'étude des rapports caractéristiques nous a permis de déterminer l'origine des éléments majeurs à l'exception du Na où on a observé un excès (sources Ouled Achour). La combinaison des résultats chimiques, nous a permis de dresser 3 schémas conceptuels pour le fonctionnement de ces sources thermo minérales.

Mots-clés : source thermo-minérale, hydrochimie, gradient géothermique, Mila.

Abstract

The thermo-mineral springs in Algeria are related to the heating process of meteoric waters under the effect of the geothermal gradient. The Mila region is one example where thermo-mineral waters emerge as a result of deep faults and in different formations. The analysis results of three zones (Béni-Haroun with carbonate formation, Béni-Guechat with Triassic formation and Oued Achour - Zouaoui with marl and carbonate formation) show that water temperatures vary between 36.9 and 54°C, conductivities between 4900 µs/cm and 28000 µs/cm and water depth between 462.5 and 785 m. The analysis of the chemical results shows that the emergence of these springs is also linked to the Triassic formations either on the surface (Béni-Guechat) or at depth (Béni-Haroun and Ouled Achour-Zouaoui). The study of the characteristic ratios allowed us to determine the origin of the major elements, except for Na⁺ where an excess was observed (Ouled Achour springs). The combination of the chemical results allowed us to draw up 3 conceptual schemes for the functioning of these thermo mineral springs.

Keywords: thermo-mineral spring, hydrochemistry, geothermal gradient, Mila.

ملخص

ترتبط الينابيع المعدنية الحرارية في الجزائر بعملية احترار المياه الجوفية تحت تأثير التدرج الحراري الأرضي. منطقة ميله هي مثال على ظهور المياه الحرارية المعدنية نتيجة فوالق عميقة وفي تكوينات مختلفة. التحاليل الكيميائية لمياه ثلاث مناطق (بني هارون بالتشكيلات الكربونات، بني-جشات بالتشكيلات الترياسي وواد عاشور-الزواوي بالتشكيلات مارنية وكربونات) توضح أن درجة حرارة المياه تتأرجح بين 36.9 و 54 درجة مئوية، وناقلية بين 4900 ميكروسمنس / سم و 28000 ميكروسمنس / سم وعمق المياه بين 462.5 و 785 م. تظهر التحليل الكيميائية أن ظهور هذه المصادر مرتبط أيضًا بالتشكيلات الترياسية إما على السطح (بني-جشات) أو في العمق (بني هارون وأولاد عاشور الزواوي). دراسة العلاقات المميزة بين العناصر الكيميائية مكنتنا من تحديد أصل العناصر الرئيسية باستثناء Na⁺ حيث لوحظ وجود فائض بمنبع ولاد عاشور. الجمع بين النتائج الكيميائية سمح لنا بوضع 3 مخططات مفاهيمية لسير هذه الينابيع المعدنية الحرارية.

الكلمات المفتاحية: المصدر الحراري المعدني، الكيمياء المائية، التدرج الحراري الأرضي، ميله.

Introduction générale

Introduction générale

Ce mémoire de fin d'étude a été consacré à l'étude de l'hydrochimie des eaux thermo-minérales et de leur origine dans la région de Mila (NE algérien). Ces eaux sont rarement étudiées, vu que son fonctionnement dépend de plusieurs paramètres et lié à des zones profondes et/ou lointaines de l'émergence de la source. Souvent les chercheurs utiliseront les signatures chimiques et hydrodynamiques ainsi que le contexte géologique pour comprendre l'origine et le cheminement des eaux de ces sources.

Dans cette étude, consacrée à la région de Mila, nous avons choisi trois zones (Béni Haroun, Béni Guechat et Ouled Achour - Zouaoui), où des sources thermo-minérales émergent dans des lithologies différentes (Carbonates, Trias et Carbonates-marnes). Cela a pour objectif d'étudier l'origine et le fonctionnement de ces sources, en s'appuyant sur la composition physico-chimique des eaux et sur la géologie des terrains.

Ce mémoire de fin d'étude est organisé en quatre chapitres :

- **Le premier** « rappel bibliographie », a pour objectif de donner un aperçu général sur les définitions et le fonctionnement des sources thermo-minérales, puis une présentation des sources thermales dans le monde et en Algérie ;
- **Le deuxième** « présentation de la zone d'étude » a pour but de présenter la wilaya de Mila sur le plan administratif, géomorphologique, géologique ainsi que la répartition spatiale de ces sources thermo-minérales ;
- **Le troisième** « matériels et méthodes » sera consacré à la présentation de la campagne d'échantillonnage et des méthodes et des matériels scientifiques utilisés pour réaliser les mesures in-situ et les analyses chimiques au laboratoire.
- **Le quatrième** « résultats et discussion », c'est le chapitre le plus intéressant de ce mémoire, où on présentera et on discutera les variations spatiales de la composition chimiques, les rapports caractéristiques, les faciès chimiques et l'origine des eaux thermo-minérales.

Enfin, on terminera par une conclusion générale et par les recommandations à suivre pour approfondir cette étude.

Chapitre I
Rappel bibliographique

I.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder les grandes lignes des eaux thermo-minérales. Au début, nous allons commencer par quelques définitions de base et classification des eaux thermo-minérales, puis on enchainera par les caractéristiques et les origines des eaux thermo-minérales et on terminera par une présentation des grands systèmes hydrothermaux continentaux ainsi que les principales sources thermales dans le monde et en Algérie.

I.2. Définition et classification des eaux thermo-ménirales

I.2.1 Eau minéral : Selon Larousse (Gaston,1989) , les eaux minérales sont des eaux qui contiennent des minéraux en dissolution et qu'on emploie en boisson, en bains, à des fins thérapeutiques.

I.2.2 Eau thermo minérale : C'est une eau, exploitée comme eau minérale, naturellement chaude à l'émergence .

Il existe de nombreuses classifications des sources en fonction de leur température ; les auteurs retiennent souvent trois catégories et par exemple :

- les sources froides en dessous de 20°C ;
- Les sources tièdes de 20 à 30°C ;
- Les sources chaudes au-delà de 30°C.

Mais de point de vue hydrogéologique, cette classification ne présente pratiquement pas d'intérêt, car les températures de 20°C et 30°C ne constituent pas des seuils aptes à séparer les sources en catégories différentes suivant le mode de circulation souterraine des eaux qui les alimentent. Une nouvelle classification a été proposée par plusieurs auteurs H.Schoeller (1965), P. Verdeil (1982) , H. Dib (1985), A. Issaadi (1992). Nous présentons ici celle du P. Verdeil (1982) où il range les eaux thermales comme suivant :

- Eaux athermales ou protothermales : eaux dont la température est inférieure à la température du lieu d'émergence.
- Eaux hypothermies : eaux dont la température est égale à la température moyenne du lieu d'émergence.
- Eaux mésothermes : eaux dont la température est comprise entre la température moyenne du lieu d'émergence entre 4°C et 37°C.
- Eaux ortho thermes : eaux dont la température est comprise entre 37°C et 45°C.
- Eaux hyperthermies : eaux dont la température est supérieure à 45°C.

I.3. Caractéristiques des eaux thermo-minérales

Ces eaux sont caractérisées par deux paramètres principaux : la température et la minéralisation. Les paramètres qui les contrôlent sont présentés comme suit :

I.3.1. Température

Elle est contrôlée par deux paramètres principaux :

a) Gradient géothermique

En raison de la chaleur terrestre interne, plus les eaux météoriques s'infiltrent dans le sol et plus elles deviendront plus chaudes. En dehors de zones où règnent des conditions exceptionnelles qui ne seront pas examinées ici, le gradient géothermique moyen est de 3°C pour 100 m. Le gain de température acquis par une eau ayant circulé en profondeur se mesure par la différence entre la température constatée à l'émergence (T_e), et la température constante qui règne dans le sol (T_s) à quelques mètres (10 à 20 en général) sous la surface (Gaston,1989). La profondeur (P) atteinte par les eaux, en prenant le gradient géothermique moyen, sera donc en mètres :
$$P = 100 \times \frac{(T_e - T_c)}{3}$$

b) Vitesse de la remontée des eaux

En effet, si la température au point bas de chaque aquifère dépend de la profondeur maximale atteinte par le circuit hydraulique et du gradient géothermique dans la région considérée, la température à l'émergence sera essentiellement en fonction de la vitesse de remontée de l'eau ; tout ce qui influencera cette vitesse se répercutera donc sur la température. Ce rôle primordial du facteur vitesse peut être observé facilement sur le terrain (Gaston,1989) :

➤ Sur certains gîtes hydrothermaux existent des émergences multiples donnant des eaux ayant rigoureusement la même minéralisation, et donc a priori la même origine, mais offrant par contre des températures diverses, certaines très basses. Or, on remarque que ces basses températures correspondent habituellement aux plus faibles débits, donc aux plus faibles vitesses.

➤ Sur diverses sources on peut observer une augmentation simultanée de la température et du débit, sans altération de la qualité des eaux. Cette constatation est faite en période de hautes eaux froides, la contre-pression de celles-ci refoulant vers les émergences captées des eaux chaudes qui, auparavant se perdaient. L'augmentation du débit impliquant alors celle de la vitesse

➤ Il arrive que le débit d'une source se trouve augmenté à la suite de l'exécution dans son voisinage d'un nouveau captage à plus grande profondeur, et l'on constate alors que la température de cette source est, elle aussi augmentée.

I.3.2. Minéralisation

La minéralisation des eaux dépend naturellement de celle des terrains lessivés. L'eau se charge d'autant plus que les roches au contact desquelles elle circule sont plus solubles ; mais de nombreux facteurs interviennent qui font varier la quantité de sels dissous, température, durée du contact, texture des roches, etc.

En fait, il semble ressortir que les eaux sulfurées sodiques viennent des terrains primaires, les eaux chlorurées et sulfatées viennent des terrains secondaires et les eaux bicarbonatées viennent des terrains tertiaires.

I.4. Origine des eaux thermo minérales

Les eaux thermo-minérales viennent de la profondeur puisque la source de chaleur est en bas, mais la question qui se pose c'est par rapport à l'origine de ces eaux. Il y a deux types : l'une élaborée au sein même de la Terre, elle est dite juvénile et l'autre météorique et dite vadose. A noter que dans la littérature (Gaston,1989) on trouve souvent, pour désigner les eaux thermo-minérales, des appellations autres que juvéniles ou vadoses et notamment : artésiennes, filoniennes, interstratifiées, vauclusiennes, géothermales, hypogènes, etc. En fait. Ces termes ne qualifient pas l'origine première de l'eau, mais plutôt un aspect de l'aquifère qui les contient.

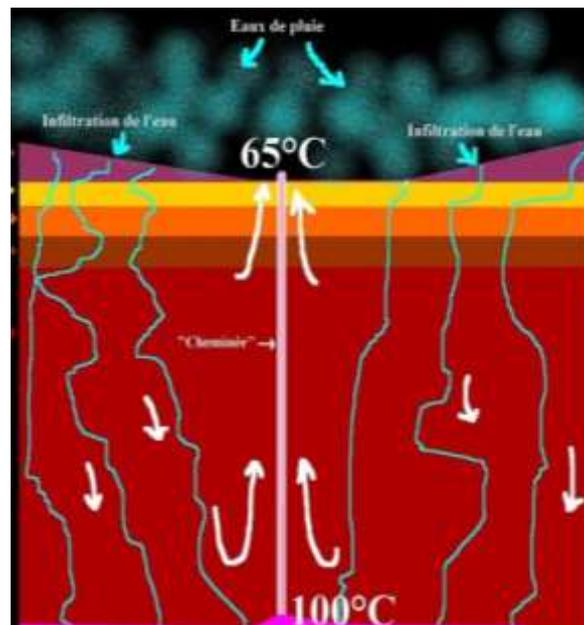


Fig.I.1. Coupe géologique expliquant les eaux thermales de bourbonne-les-bains (France) d'origine vadoses (www.chemindeleau.com).

I.5. Les systèmes hydrothermaux continentaux

Il existe plusieurs types de systèmes hydrothermaux continentaux dans le monde, les plus étudiés sont associés à des sources de chaleurs anormales, tel que du volcanisme (ex : Islande) ou du plutonisme (ex : Geysers, USA). Ils impliquent l'infiltration de fluides marins ou météoriques dans la croûte (Henley and Ellis, 1983), au dessus d'une chambre volcanique ou d'un pluton (Fig.I.1) . La chaleur dégagée par ces corps magmatiques réchauffe les fluides dont la masse volumique diminue (convection libre), ce qui provoque leur remontée à la surface à la faveur de failles ou des couloirs fracturés.

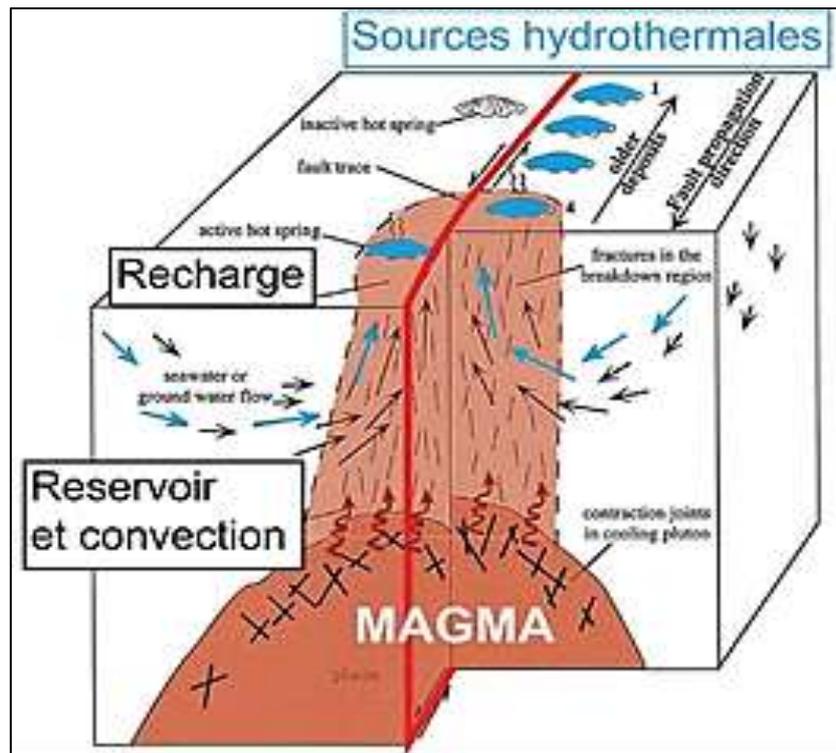


Fig.I.2. Modèle conceptuel des circulations hydrothermales liées à la présence d'une source de chaleur magmatique. (Curewitz and Karson, 1997)

Néanmoins, de nombreux systèmes hydrothermaux existent sans manifestation de magma en profondeur (Moeck, 2014). Les plus étudiés sont associés à des zones d'extension (rift, graben) ou à des bassins (intra-cratoniques ou d'avant-pays) (Faulds et al., 2010). Ceux en contexte orogénique sont moins étudiés.

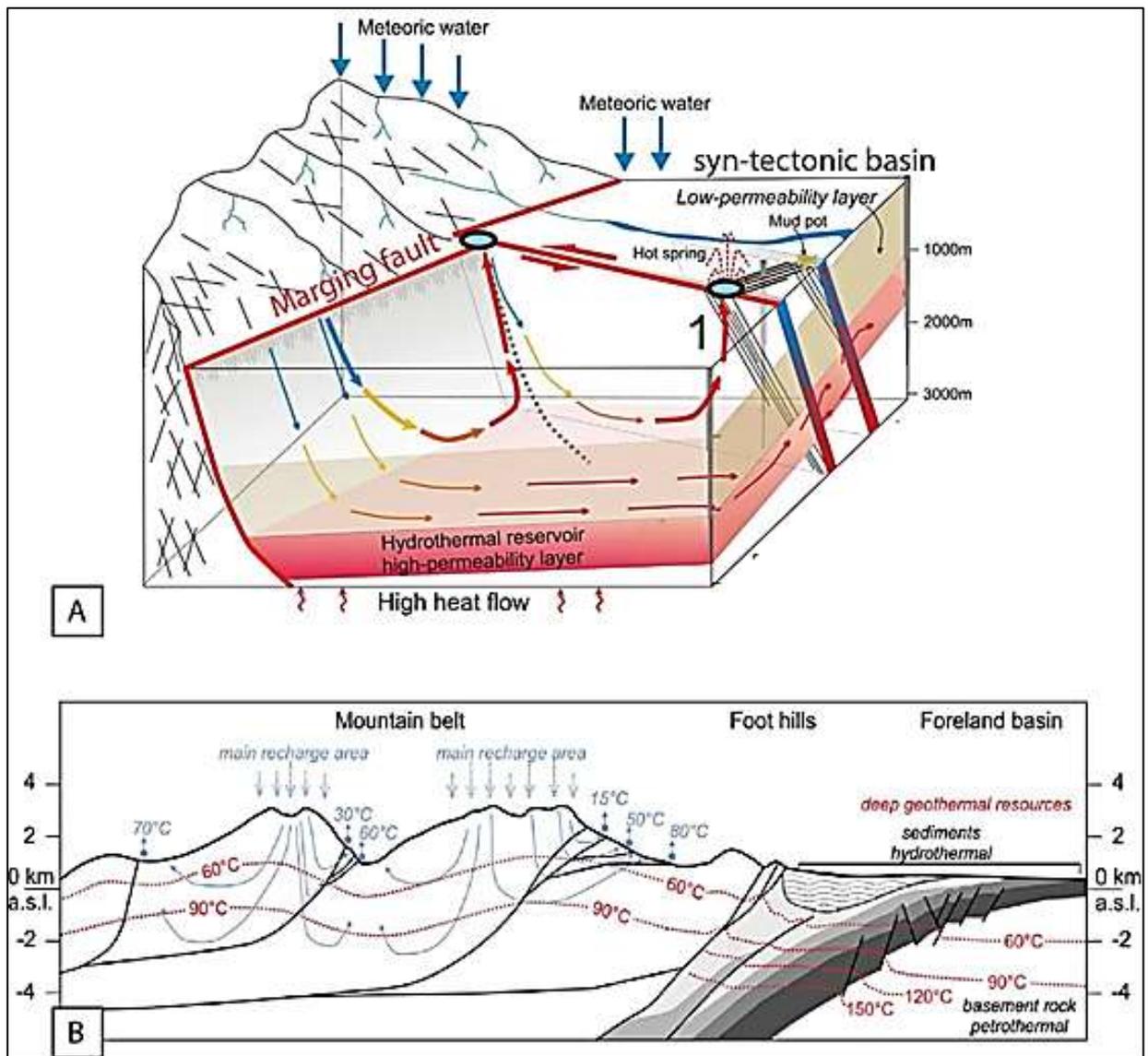


Fig.I.3. Les systèmes hydrothermaux continentaux non magmatiques (Moeck, 2014).

- Les systèmes hydrothermaux en contexte extensif (figure I.3A): Les fluides météoriques s'infiltrent sur les reliefs ou le long des failles bordières. Ils circulent en profondeur dans des compartiments très perméables : les bassins syn-tectoniques ou le long des failles. Ils s'y réchauffent grâce au flux de chaleur élevé dans les zones d'extension. Ils remontent à la surface sous l'effet des forces de flottement (convection libre) le long des failles, et notamment aux intersections de celles-ci.

- Les systèmes hydrothermaux en contexte orogénique (figure I.3B): les fluides s'infiltrent sur les reliefs. Ils sont transférés en profondeur sous l'effet du gradient topographique (lignes de courant en bleu) en direction des flancs du massif ou des vallées (convection forcée). Ils se réchauffent sous l'effet du gradient géothermique, la forme des isothermes étant contrôlée par la topographie, la tectonique, et la production de chaleur. Les résurgences se situent au niveau des bas topographiques à la faveur d'accidents locaux (failles, éboulement,...).

I.6. Les sources thermales dans le monde

Il existe plusieurs sources thermales dans le monde avec des températures et des compositions chimiques différentes. Nous présentons ci-dessous deux sources thermales l'une en France et l'autre au Japon.

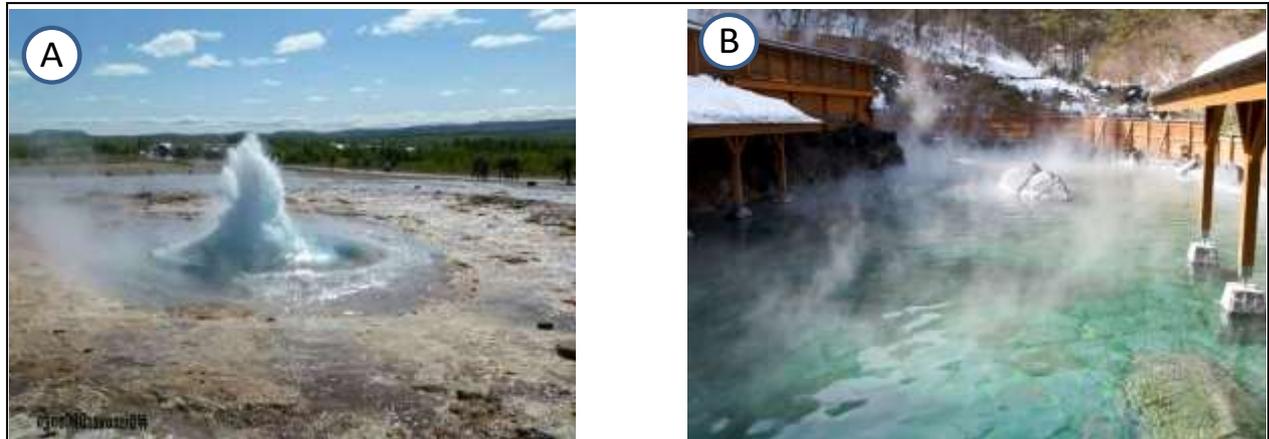


Fig.I.4. Exemples de sources thermales dans le monde. A) Source thermale en France (www.pinterest.com), B) Source thermale en Japon (Mandy,2014).

I.7. Les sources thermales du nord algérien

Dans ce sous-chapitre, nous allons au début présenter le gradient géothermique du nord algérien, puis la répartition spatiale des sources thermales ainsi que leur faciès chimique et on terminera par la présentation de trois sources représentatives du nord algérien.

I.7.1. Gradient géothermique

Une première esquisse du gradient géothermique du Nord de l'Algérie est réalisée par Kazi Tani (1986) à l'aide des diagraphies thermométriques continues, où des relevés de températures donnent une approche globale du gradient géothermique du Nord de l'Algérie (Fig. I-5 A). D'après cette carte, le gradient géothermique moyen du Nord de l'Algérie est de l'ordre de $4\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. La périphérie sud limitée par l'Atlas saharien, le gradient est de $3\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, il augmente en se dirigeant vers le Nord pour atteindre des valeurs maximales de $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ au nord-est et nord-ouest de l'Algérie.

Dans la nouvelle carte de gradient géothermique (Fig. I-5 B) sont mises en évidence trois zones distinctes d'anomalies majeures, avec un gradient géothermique généralement supérieure à $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$: une anomalie à l'est (dans le Constantinois algérien), avec un gradient moyen qui dépasse $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$; une autre anomalie au centre, avec un gradient moyen variant entre 5 et $7^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ et une dernière anomalie à l'ouest (l'Oranie), où le gradient géothermique est de l'ordre de $5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.

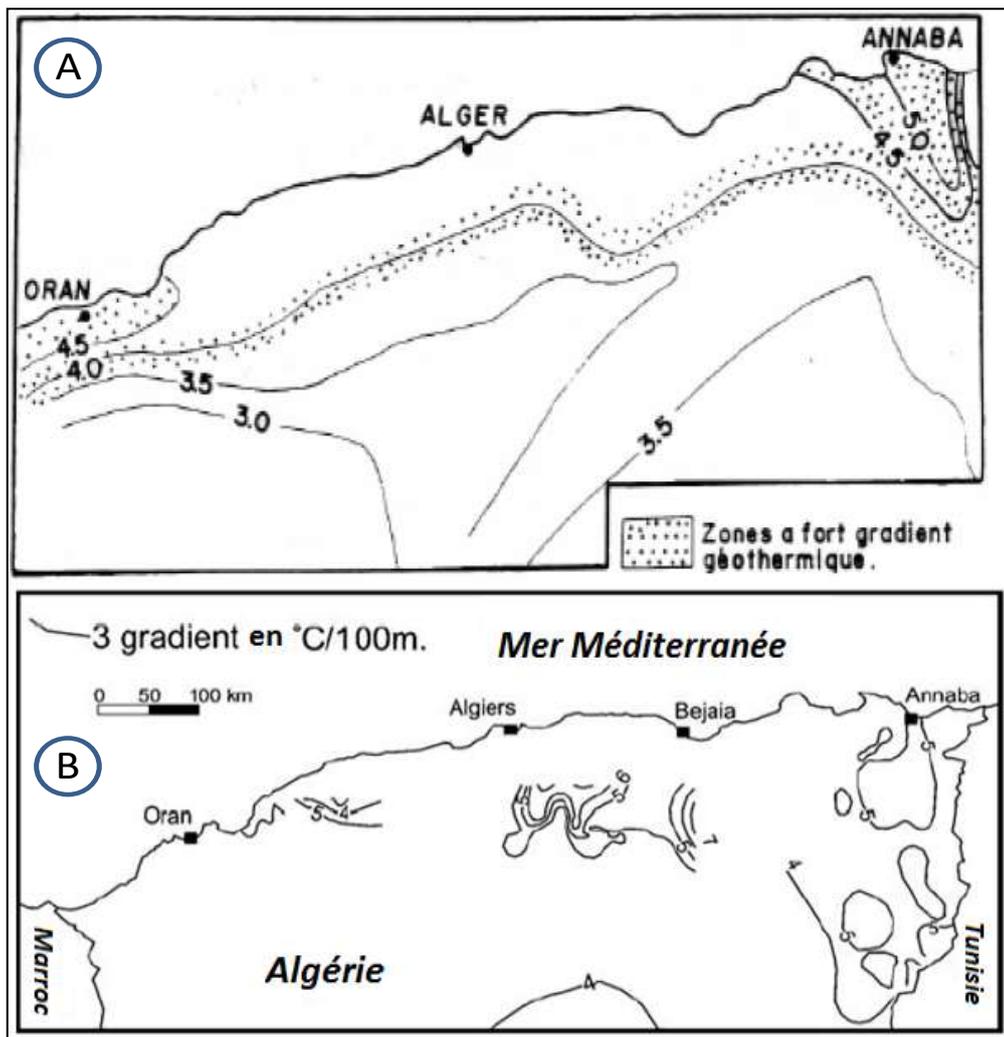


Fig.1.5. Carte du gradient géothermique du Nord de l'Algérie. A) Kazi Tani (1986) et B) Saïbi (2009)

I.7.2. Sources et température des eaux thermales

Il existe sur le territoire algérien plus de 200 sources thermales avec une croissance régulière lorsqu'on se déplace vers l'Est. Les températures mesurées à l'émergence peuvent atteindre 98°C (Hammam Maskoutaine) (Fig.I.6).

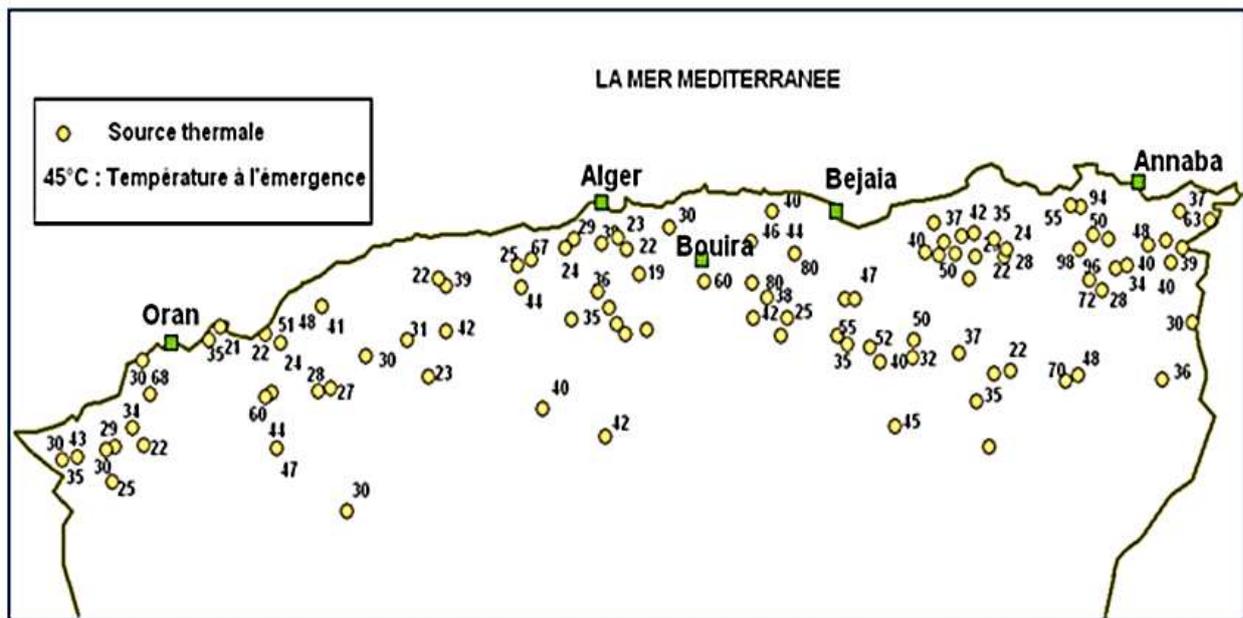


Fig.I.6. Répartition spatiale des sources thermales au nord Algérien (Ouali 2015)

I.7.3. Faciès chimiques des eaux thermales

Les faciès chimiques de ces eaux thermales sont présentés principalement par trois familles : chloruré, sulfaté et bicarbonaté.

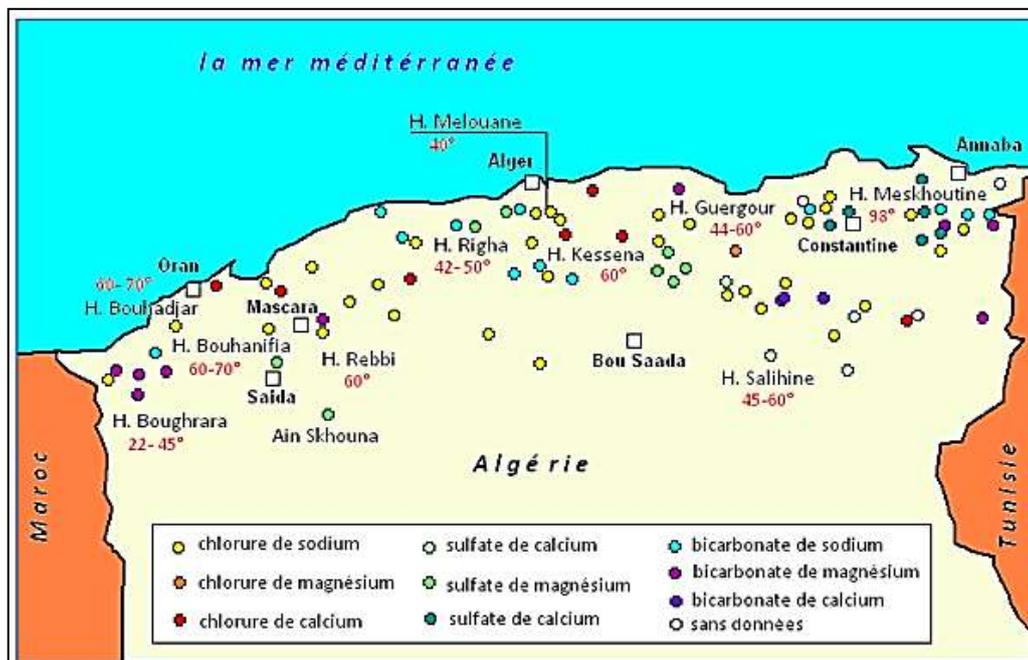


Fig.I.7. Températures et faciès chimiques des sources thermales du Nord de l'Algérie (Abdellatif et al., 2006).

Les sources thermales les plus minéralisées sont en relation directe avec les sédiments gypso-salins du Trias si répandu en Algérie (Souali, 2008), ce cas est rencontré à titre d'exemple à Hammam Melouane 29.42 gr/l, Hammam El Biban 15g/l, Hammam Salhine 9 g/l.

1.7.4. Exemple des sources thermales en Algérie

Parmi les nombreuses sources thermales qui existent en Algérie, on peut citer quelques sources : Boughrara (Tlemcen), Salhine (Biskra), Meskoutine (Guelma).

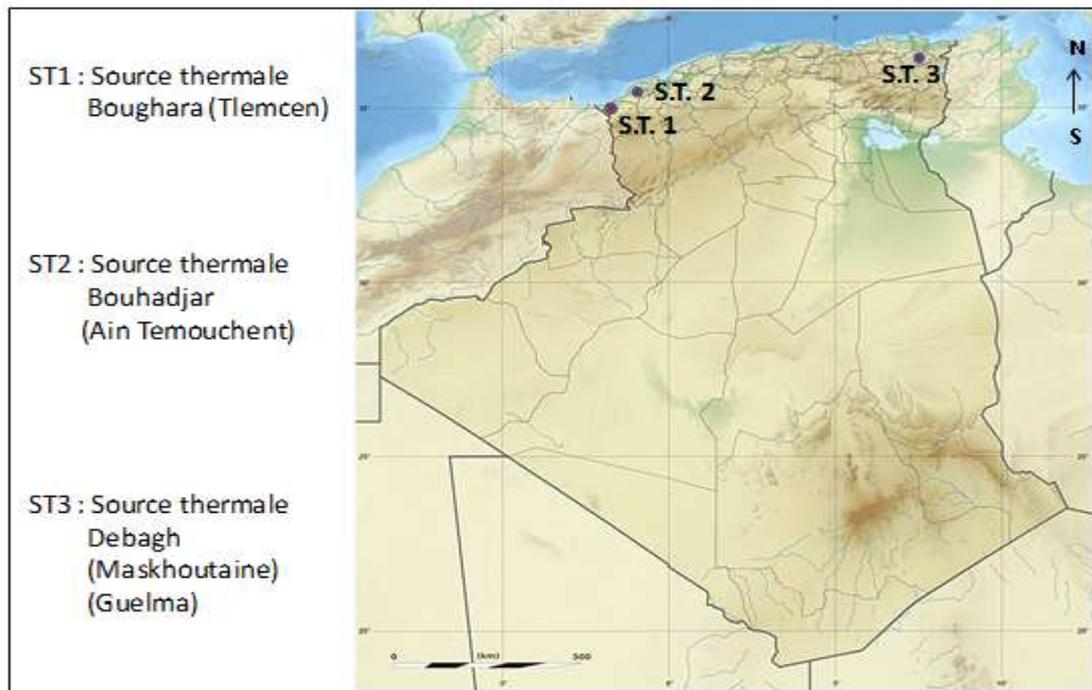


Fig.I.8. Situation géographique de sources thermales de Boughrara (Tlemcen), Salhine (Biskra) et Meskoutine (Guelma) en Algérie

a) Source thermale de Boughrara

Elle est située à 282 mètres d'altitude à l'extrême Ouest du pays, sur les bords de l'Oued Tafna (Fig.I.9) à proximité de la ville frontalière de Maghnia. Ses eaux sont sulfatées et bicarbonatées sodiques, émergent à une température de 45°C. Elle est mise en exploitation en 1974.

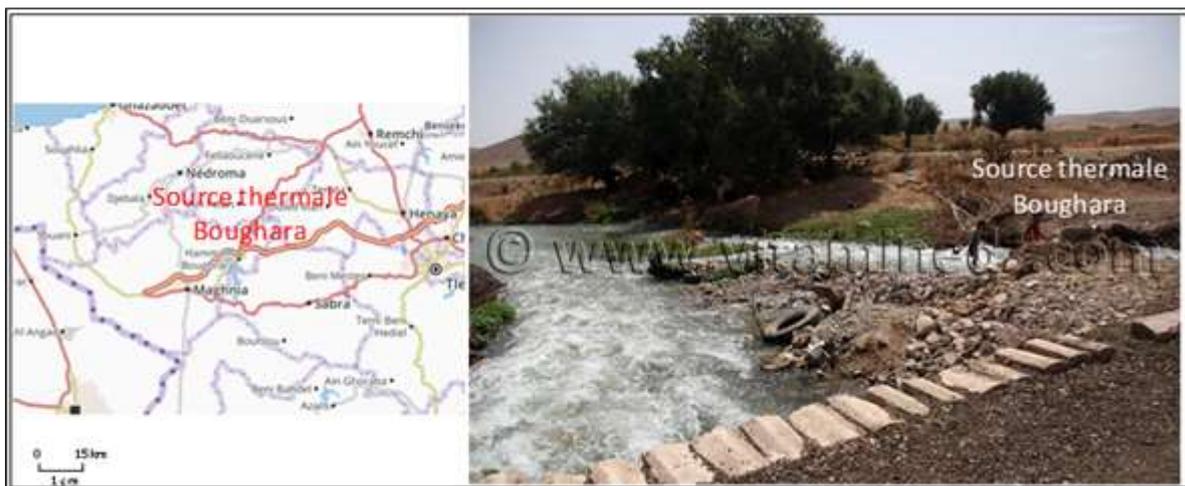


Fig.I.9. Source thermale de Boughrara (Tlemcen)

b) Source thermale de Bouhadjar

Elle est située à 21 Km à la ville d'Aïn Témouchent, s'élève sur une altitude de 150 mètres (Fig.I.10). Elle est mise en exploitation en 1974, on y dénombre une quarantaine de sources secondaires en majorité chaudes, entre 35 et 72°C. Les eaux chaudes et sulfureuses jaillissent des entrailles de la roche appelées « Dracones ». Le faciès chimique de ses eaux est chlorurées Sodiques.

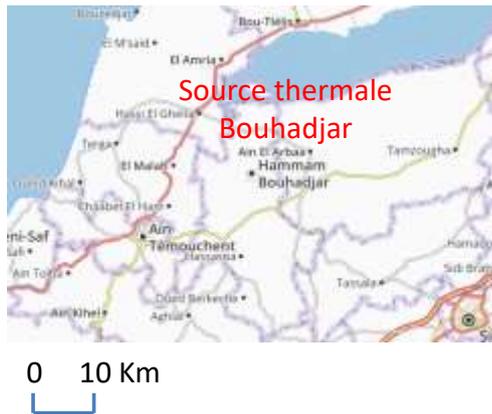


Fig.I.10. Source thermale de Bouhadjar (Ain Temouchent)

c) Source thermale de Debagh (Maskoutine)

Il est situé à l'Est Constantinois, à 110 Km de Constantine et 20 Km de Guelma, à 320 mètres d'altitude (Fig.I.11). Elle est la source la plus florissante de l'Algérie et ses eaux sont les plus chaudes il existe neuf sources hyperthermales dont la température de l'eau varie entre 90 et 98°C.

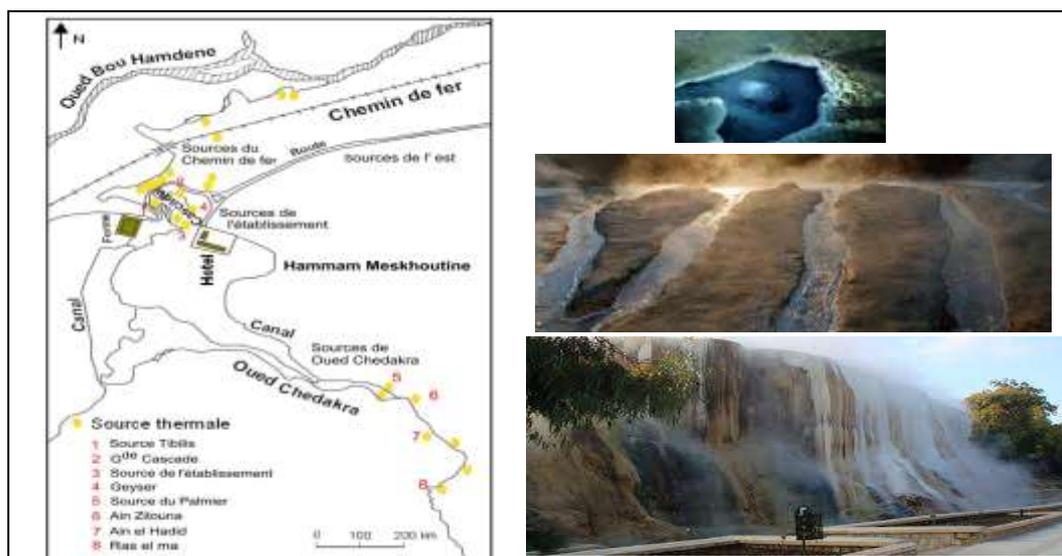


Fig.I.11. Source thermal Hammam Debagh (Meskhoutine) – Guelma

I.8.Conclusion

Ce chapitre montre d'une manière générale les différents mécanismes de base qui permettent la formation des eaux thermo-minérales ainsi que des exemples de source au monde et en Algérie. La partie des sources thermales en Algérie a été développée en présentant plus de détail sur le gradient thermique en Algérie, la répartition spatiale des sources et l'illustration de trois sources.

Chapitre II

Présentation de la zone d'étude

II.1. Introduction

Ce chapitre a pour objectif de faire une présentation de la zone d'étude de point de vue administrative, géographique, morphologique et géologique. Cela permettra de bien connaître le contexte global des sources thermo-minérales de la région de Mila.

II.2. Situation administrative

La zone d'étude fait partie de la wilaya de Mila (NE algérien). Elle est limitée au Nord par la wilaya de Jijel, à l'Ouest par la wilaya de Sétif, à l'Est par la wilaya de Constantine et d'Oum El Bouaghi et au Sud par la wilaya de Batna.

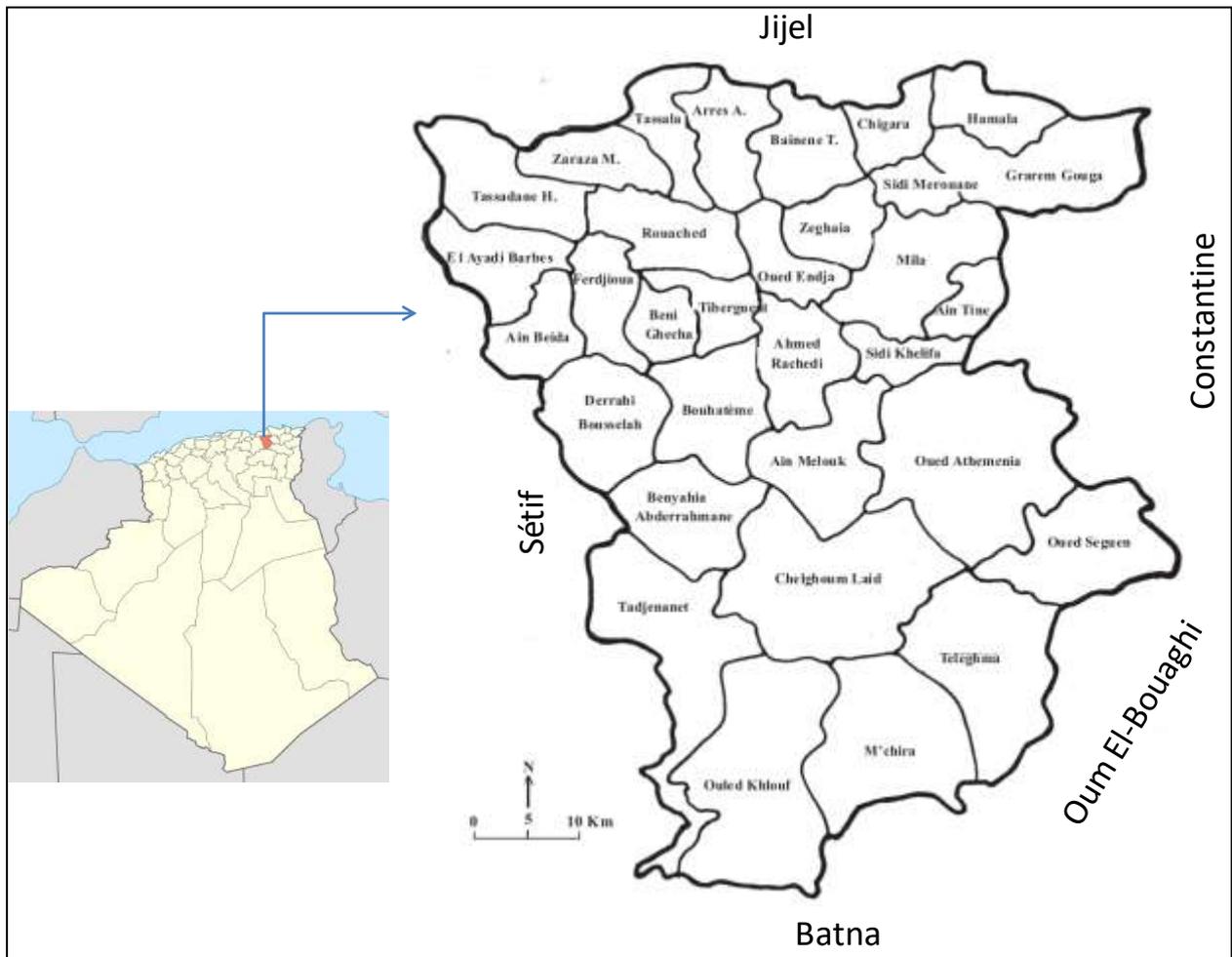


Figure II.1 : Situation administrative de la wilaya de Mila

II.3. Contexte morphologique

Sur le plan morphologique, la wilaya de Mila est caractérisée par un relief varié, constitué essentiellement de :

- Zone montagneuse constituée essentiellement d'une succession de massifs montagneux (massifs telliens) limitant la wilaya dans sa partie septentrionale (Djebel Tamezguida(1600m), Djebel Zouara(1300m), Djebel M'Sid Aicha (1300m)).

- Zone de piémonts et collines qui couvre la région centrale du piémont tellien, et constituée par les plaines intra-montagneuses de Ferdjioua et l'Oued Endja (400m), des collines présentant un relief montagneux très désordonné à l'Est et des dépressions de Ain Tinn, Sidi Khelifa, Ferdjioua à l'Ouest. Des basses collines (de 500m à 600m d'altitude) constituent la dépression de Mila avec des massifs isolés tels les djebels Akhel, Boucharef, Oukissène et Ahmed Rachedi.

- Zone des hautes plaines au Sud, constituée essentiellement par les vastes plaines (800 à 900m) de Chelghoum Laid, Tadjenanet et Télèghma. Dans cette zone émergent des massifs montagneux isolés tels que : Dj. Grouz (1187m), Dj. Meziot (1127m), Dj. Ghrour (1271m).

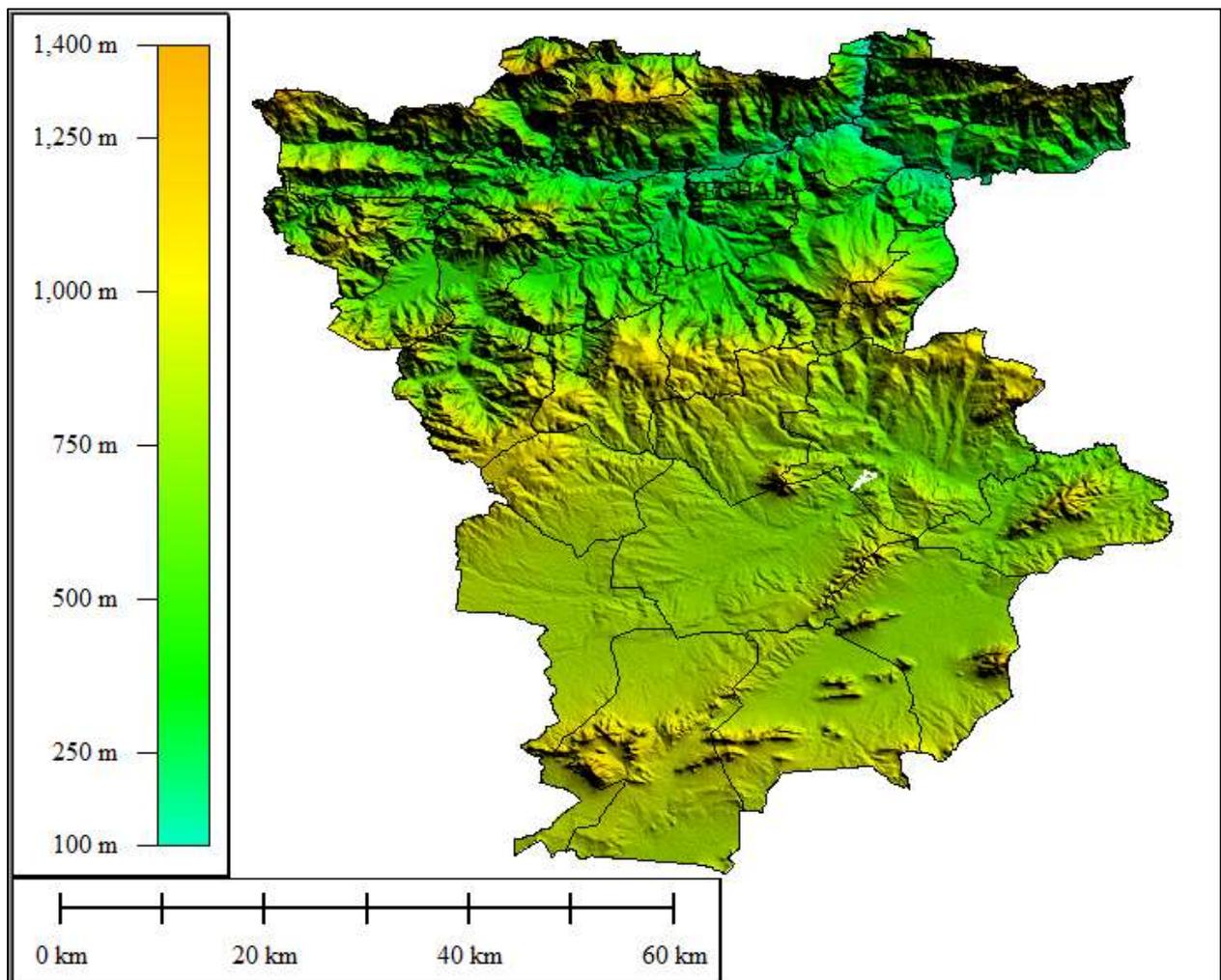


Figure II.2 : Relief de la wilaya de Mila

II.4. Contexte climatologique

La région de Mila est caractérisée par un climat de type méditerranéen caractérisé par des hivers doux et humides, des printemps et des automnes souvent humides et des étés secs. Une définition de la zone méditerranéenne a été proposée par Le Houérou (1980) : Pluviométrie annuelle supérieure à 400 millimètres, Pluviométrie estivale/ Moyenne des températures

maximales du mois le plus chaud inférieur à 7°C (Le Houérou, 1980). Les valeurs de précipitations de la zone d'étude sont comprises entre 350 et 1100 mm

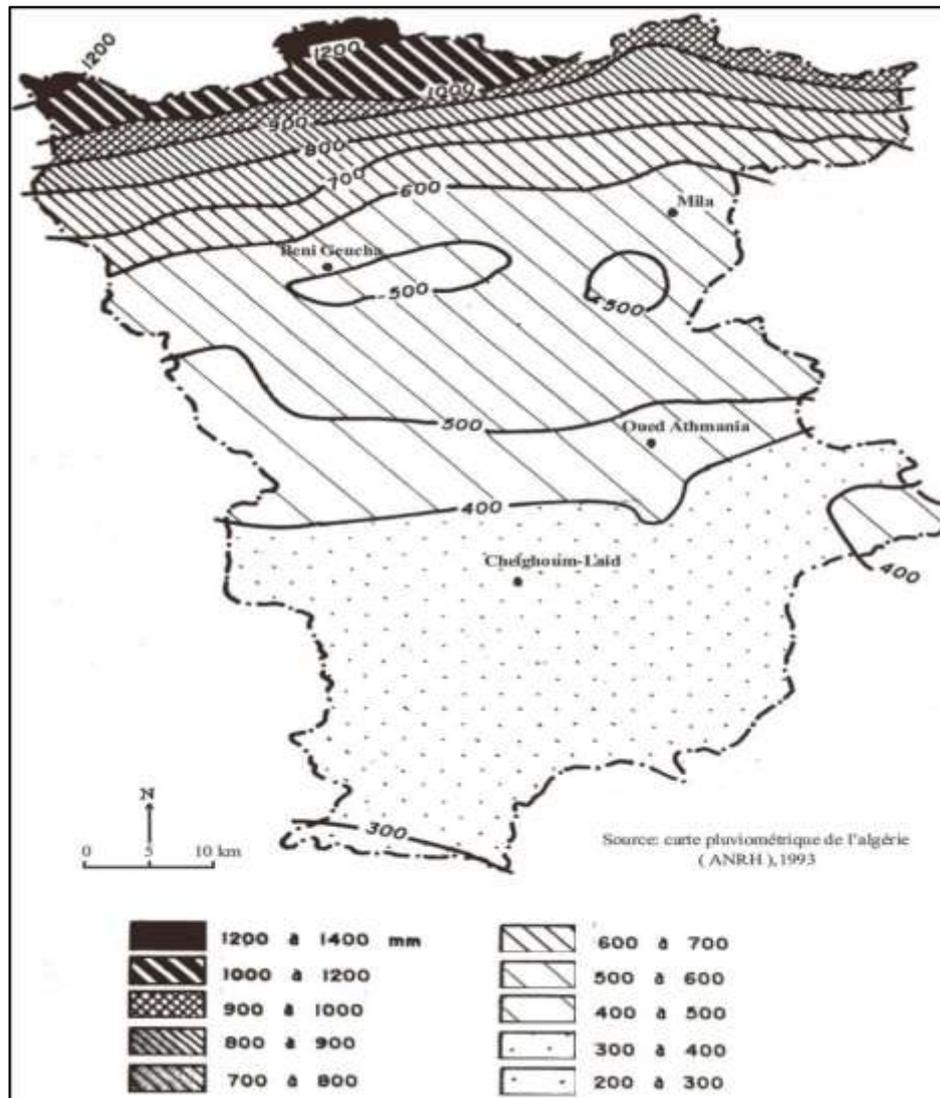


Figure II.3 : carte pluviométrique de la wilaya de Mila

II.5. Contexte hydrologique

La wilaya de Mila est caractérisée par un climat humide et des terres fertiles au Nord et sec et semi-aride à arides au Sud. Elle appartient au bassin versant Kébir Rhumel avec un important contexte hydrologique composé de rivières (Oued Rhumel, Oued Seguène, Oued Bou Selah, Oued Endja, Oued Smendou, Oued Kebir ...) et des barrages (barrage Béni Haroun, barrage Oued Athmania, barrage Hammam Grouz).

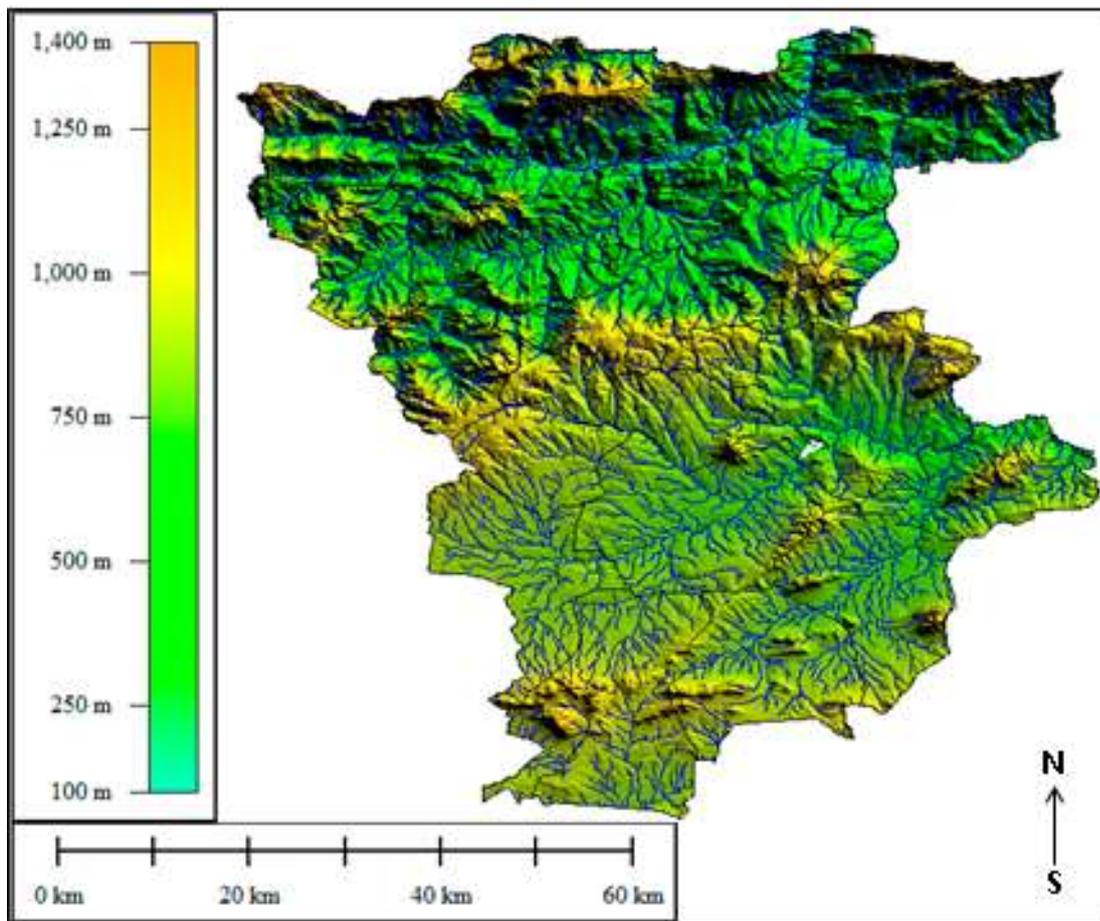
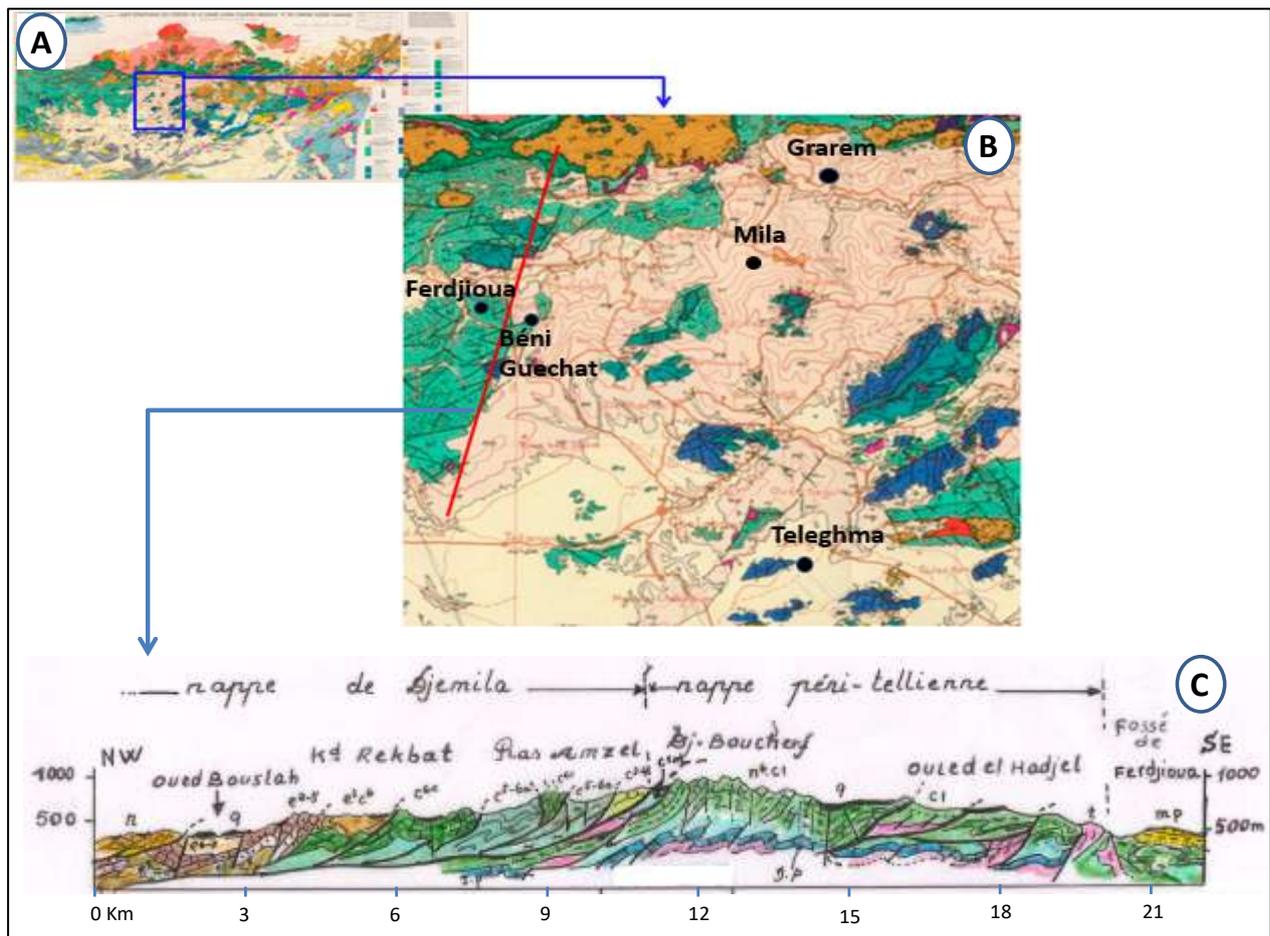


Figure II.4 : Réseau hydrographique de la wilaya de Mila

II.6. Contexte géologique

Plus de la moitié du territoire de la wilaya de Mila est recouvert par des formations essentiellement continentales post-nappes du Moi-Plio-Quaternaire. Le reste est occupé par les terrains précambriens du socle kabyle et par les formations géologiques du mésozoïque et du cénozoïque (figure II-5).



Légende des nappes et des âges

Nappe péni-tellienne de boucherf et ahmed rachedi : C¹M : marnes calcaires à rotalipores –rosalines / boues / enticul. N⁶-C¹ : Cénomaniens. N⁶-C¹ : Albien sup. à Cénomaniens : barre calcaire à silex noirs.

C¹ : Crétacé inf. indifférencié de bou-cherf

Nappe de djemila : e⁶⁻⁷ : Lutétien supérieur à Priabonien : marnes noires à boules jaunes. e⁴⁻⁵ : Yprésien-lutébien inférieur : calcaire à silex noirs. e³⁻⁵ : Maastrichien à Paléocène : Marnes noires à fausses b.jaunes. C^{6-c} : Campariens sup. à Maastrichien. Barre marno-calcaire à inocéran. C^{5-6a} : Campariens sup. et Maastrichien inf : marnes sombres à f. b.jaunes. C³⁻⁴ - C⁴ : Sénonien inf : altern.marneuse et marno-calcaire. C¹ : Cénomaniens : biosparites à orbitdines-préalvéolines. N : nappe numidienne. MP : Mio-Pliocène transgressif et discordant. JP : Jurassique présumé. T : Trias exotique. q : dépôts récents

Légende des couleurs : Jaune : miocène marin transgressif indifférencié des nappes telliennes et de leur avant pays allochtone, parautochtone ou autochtone ; Rose : trias gréseux de l'airech ; Vert : complexe stratifié de yaddène et roches effusives ; Orange : grès numidien séries mixtes ; Bleu : cénomaniens, turonien et sénonien transgressif ; Bleu siel : crétacé moyen à paléocène.

FigII.5 : Schéma de la structuration alpine du méridional du N-W Algérien/ ferdjiova –ouest de mila, réalisée en collaboration avec l'enseignant M. Y. Rouikha. **A :** Carte structurale au 1/500 000 de la chaîne Alpine d'Algérie orientale et des confins Algéro-Tunisiens. **B :** Extrait de la région de Mila. **C :** Coupe géologique de la zone d'étude selon la direction NW-SE.

II.6.1. Stratigraphie

Les formations géologiques qui composent la zone d'étude sont présentées comme suit, du plus récent au plus ancien :

II.6.1.1. Tertiaire

Maastrichien à Paléocène : marnes noires à fausses boules jaunes

II.6.1.2. Paléogène

Lutétien supérieur à Priabonien : marnes noires à boules jaunes

Yprésien-Lutesien inférieur : calcaire à silex noirs

II.6.1.3. Crétacé

Maastrichien à Paléocène : marnes noires à fausses boules jaunes

Sénonien inf : alternance marneuse et marno-calcaire

Campanien sup. à Maastrichien. Barre marno-calcaire à inocéran

Cénomaniens : biosparites à orbitdines-préalvéolines

Albien sup. à Cénomaniens : barre calcaire à silex noirs

II.6.1.4. Jurassique : jurassique présumé

II.6.1.5. Trias : trias exotique

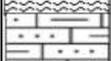
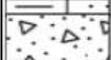
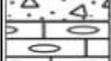
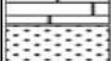
	Marnes noires à fausses boules jaunes	Marnes noires à fausses	TERTIAIRE
	Marnes noires à boules jaunes	Lutétien supérieur à	PALEOGENE
	Calcaire à silex noirs	Yprésien-lutesien inférieur	CRETACE
	Marnes noires à fausses boules jaunes	Maastrichien à paléocène	
	Barre marno-calcaire à inocéran	Campanien sup. à	
	Biosparites à orbitdines-préalvéolines	Cénomaniens	
	Barre calcaire à silex noirs	Albien sup	
	Altern.marneuse et marno-calcaire	Cénomaniensénonien inf	
		Jurassique présumé	JURASSIQUE
		Trias exotique	TRIAS
		Trias exotique	TRIAS

Fig. II.6 : Log stratigraphique des formations géologiques de la zone d'étude.

II.6.2. Tectonique

Les nappes telliennes sont les éléments structuraux dominants. Elles sont affectées par une tectonique de nappes, d'âge Priabonien (Vila, 1980). La nappe numidienne a été cisailée en masse où elle présente un contact anormal plat. Elle est peu représentée dans le bassin. Sa

structure complexe est d'origine purement tectonique. (Benabbas, 2006) Les nappes telliennes sensu- stricto forment un ensemble structural continu sur plusieurs kilomètres. La direction des axes des plis varie de N40° E à N90° E. Elles reposent sur la nappe péni-tellienne et sur la nappe néritique constantinoise.

La nappe péni-tellienne est plissée assez lourdement aux Djebels Chettabah et Grouz. (Benabbas, 2006). Au Sud, La nappe péni-tellienne à nummulites repose sur la nappe néritique constantinoise. Cette dernière constitue les plus hauts reliefs carbonatés de la région. Cette unité possède un style particulier. Elle s'est déplacée en bloc, comme une immense banquise carbonatée, transportant ses structures propres, acquises à partir du Sénonien supérieur (failles de direction atlasiques), mais surtout au cours du plissement Priabonien (Vila, 1980). Le contact de base de la nappe néritique cisaille clairement des structures plicatives anciennes.

II.7. Sources thermales

La wilaya de Mila est connue par l'existence de plusieurs sources thermales. 23 points d'émergence ont été recensés (figure II.7). Elle est liée en partie à la tectonique intense de la région qui favorise la remontée rapide des eaux en gardant des températures élevées.

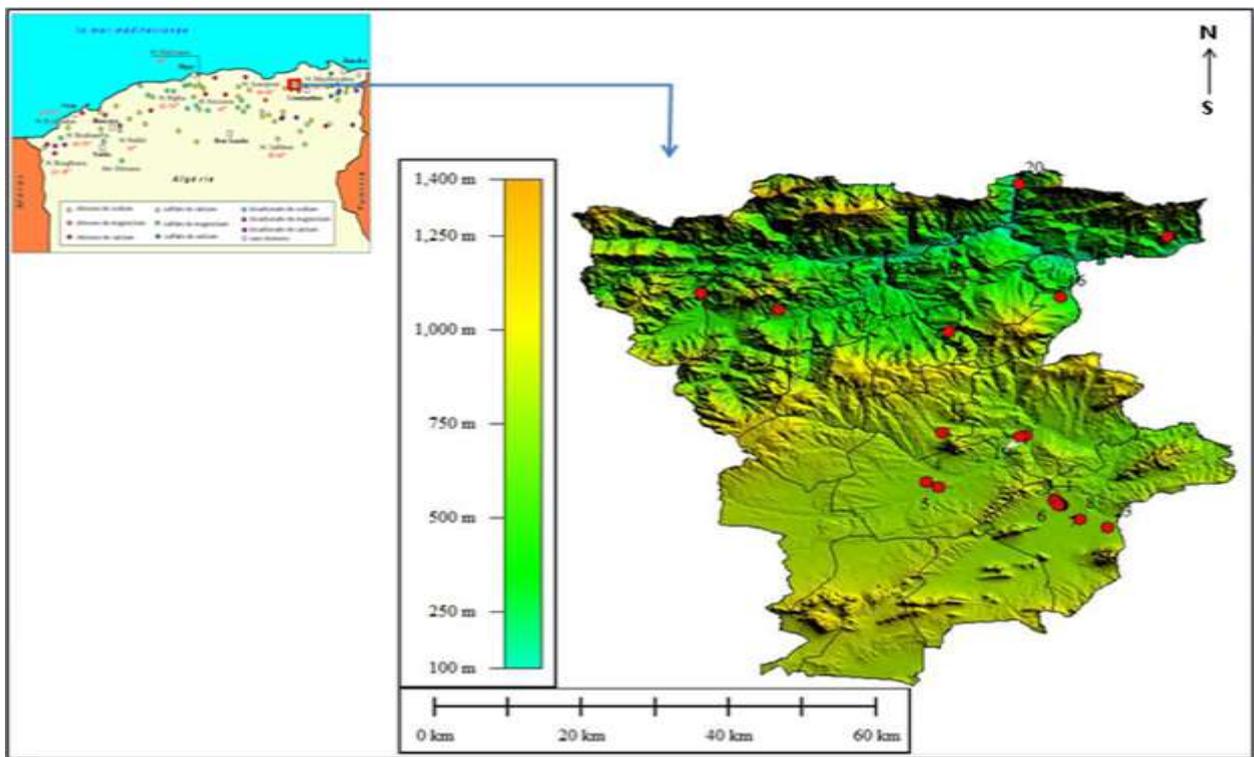


Fig.II.7 : Sources thermo-minérales de la wilaya de Mila.

La légende des sources

1.Hammam El Hadj Lakhder, 2. Bouchahrine thermes, 3. Hammam Sultanes, 4. Hammam Gergour, 5. Hammam Laala Bouali, 6. Hammam minérale, 7. Hammamat les frères Menacer, 8.Hammam Teleghma, 9. Hammam Ain Alminen, 10. Ouled Aissa 11. Hammam Menchar Ali, 12. Hammam Menchar Ammar, 13. Hammam Chaouach, 14. Hammam Saffsaf, 15. Hammam Beni Guechat, 16. Hammam Dar Echikh, 17. Source Dar Elfouini, 18. Hammam

Abdellah, 19. Hammam Grouz, 20. Hammam Béni Haroun, 21. Hammam Ouled Achour, 22. Hammam Etouma, 23. Hammam les frères Maarouf.

II.8. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de montrer à la fois les situations administrative et géographique de la zone d'étude ainsi que son contexte morphologique, hydrologique, géologique et tectonique.

Les formations géologiques composantes de l'entourage des sources sont très accidentées et composées du Trias (gypse, argile et brèche gypseuse) et du jurassique (calcaire et dolomie). Ces formations sont très susceptibles de contenir des réservoirs d'eau, vu leur forte solubilité dans l'eau à caractère acide et leur exposition à une tectonique dense qui facilite la circulation des eaux entre les formations géologiques.

Les failles profondes favorisent la remontée rapide des eaux et l'apparition des eaux thermales.

Chapitre III
Matériel et Méthodes

III.1. Introduction

Ce chapitre est très intéressant dans une étude scientifique car il nous permettra de voir les différents équipements et méthodes utilisés et de montrer la crédibilité des données et des résultats obtenus. Dans ce chapitre, nous allons au début présenté l'inventaire des sources thermales étudiées, du mode de prélèvement, des mesures in-situ et puis les différents méthodes et équipements utilisés pour réaliser les analyses chimiques au laboratoire.

III.2. Présentation des sources thermales étudiées

Pour étudier les sources thermales de la région de Mila, nous avons choisi trois zones de sources représentatives et proches de la wilaya de Jijel (figure III.1). La première est celle de Beni-Haroun, où les sources thermales émergent dans les formations calcaires (figure III.2) ; la deuxième est celle de Beni-Guécha (figure III.1), où les sources thermales émergent dans les formations triasiques (figure III.3) ; et la troisième est celle Ouled Achour et Zouaoui (figure III.1), où les sources thermales émergent dans un contact calcaire-marne (figure III.4).

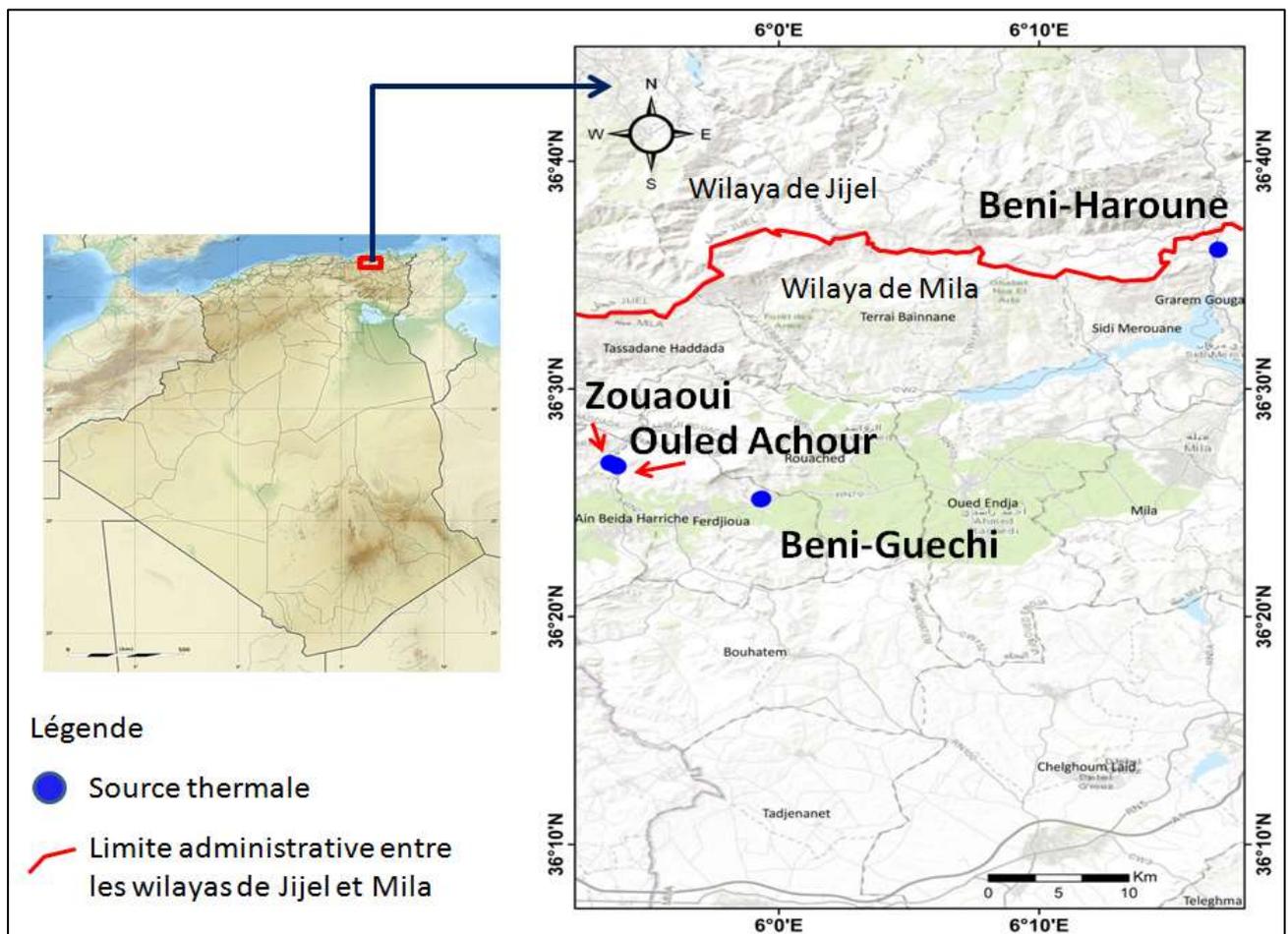


Figure III.1 : Position de trois sources thermales étudiées de la région de Mila

III.2.1. Zone de Beni-Haroun

Elle contient deux sources thermales espacées par une distance d'environ 50 m. La première est nommée BH1 et la deuxième BH2 (figure III.2).

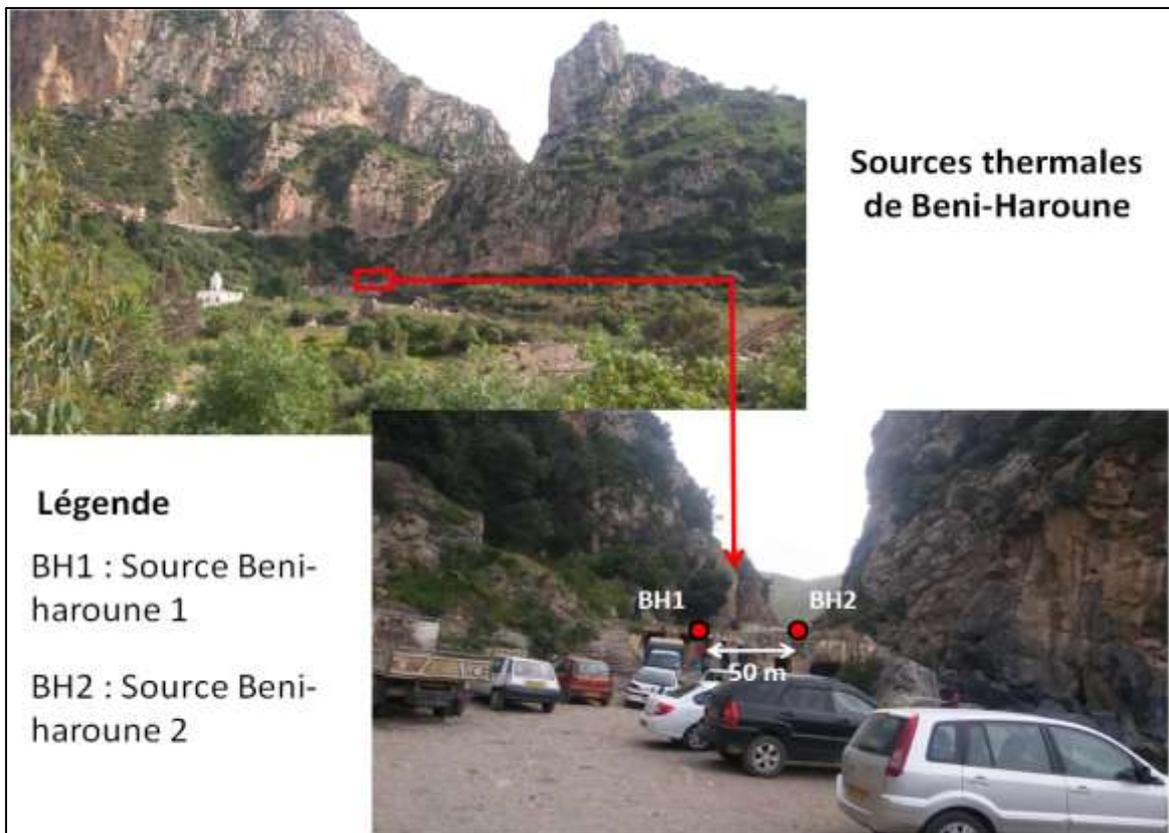


Figure III.2 : Sources thermales de Beni-Haroun

III.2.2. Zone de Beni-Guécha

Elle est composée de trois sources thermales nommées dans ce mémoire par BG1, BG2 et BG3 (figure III.3).



Figure III.3 : Sources thermales de Beni-Guechat

III.2.3. Zone de Zouaoui et Ouled Achour

Elle est composée de trois source thermales, deux appelées sources d'ouled Achour (OA1 et OA2) et l'autre Zouaoui (Z1) (figure III.4). Les trois sources sont réparties sur une distance d'environ 475 m. Les sources OA2 et Z1 se situent au voisinage de l'oued.

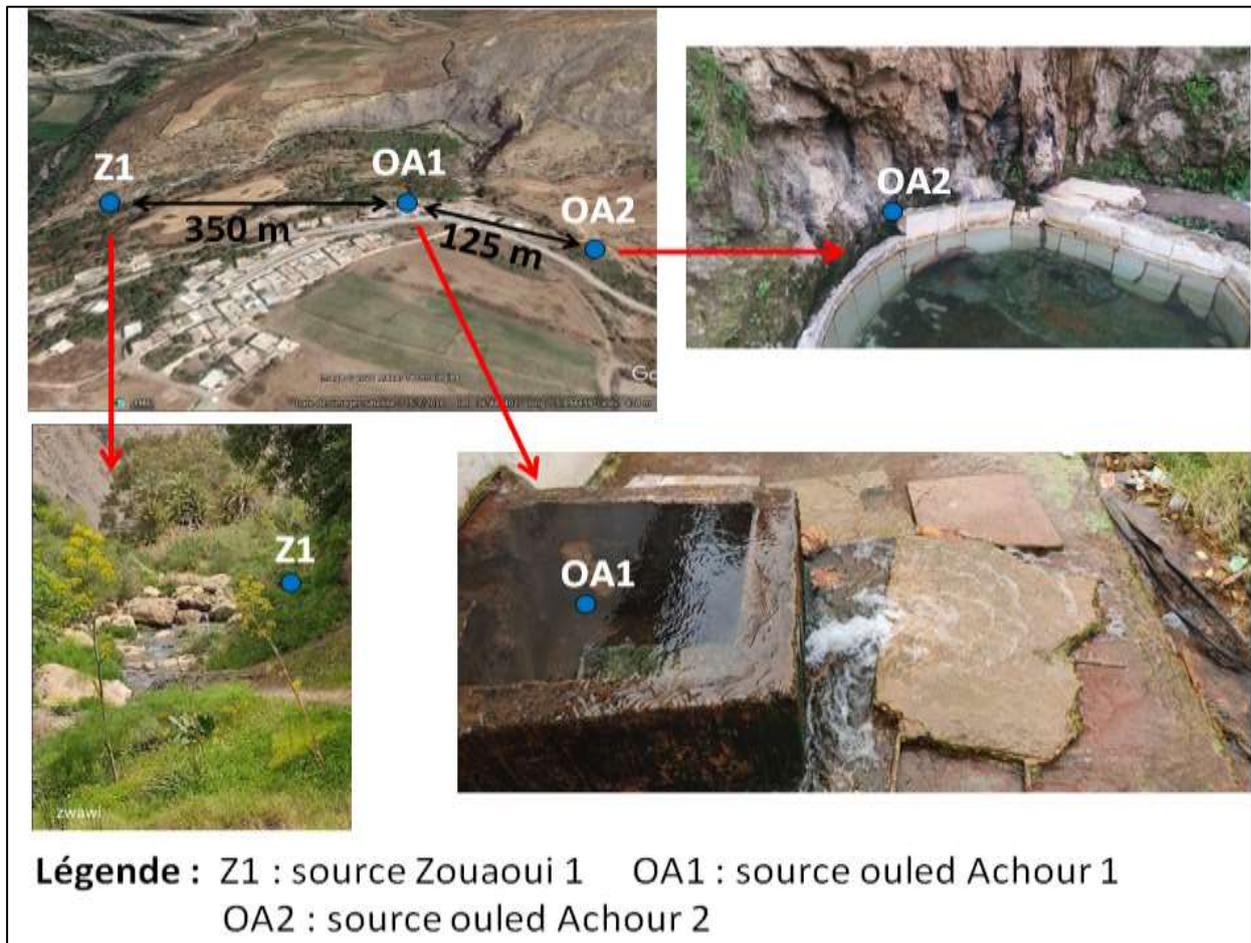


Figure III.4 : Sources thermales Zouaoui et Ouled Achour

III.3. Campagne de prélèvement d'eau

Les prélèvements d'eau ont été effectués lors de la campagne d'échantillonnage du 10/04/2021. Au total 8 échantillons ont été prélevés (un échantillon pour chaque source) dans des flacons en polyéthylène. Avant le prélèvement, les flacons sont rincés trois fois par l'eau de la source puis remplis jusqu'au débordement puis renfermés d'une manière à éviter l'entrée de l'air à l'intérieur du flacon. Les échantillons sont ensuite conservés à l'abri de la lumière jusqu'au moment de l'analyse.

Les coordonnées des points d'eau ont été prise in-situ à l'aide d'un GPS de type Garmin - GPS MAP 62 S (photo III.1)



Photo III. 1 : GPS MAP 62 S de type Garmin

III.4. Mesures in-situ des paramètres physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques (pH, Température et conductivité) ont été mesurés in-situ à l'aide d'un pH-mètre de terrain, de marque Hanna (photo III.2 A) pour mesurer le pH ; un thermomètre de marque Hanna (photo III.2 B) pour mesurer la température ; et d'un conductimètre de terrain, de marque Hanna (HI 8733) (photo III.2 C), pour mesurer la conductivité. Ces équipements ont été calibrés à l'aide des étalons, un jour avant la campagne de prélèvement, pour s'assurer de ses mesures

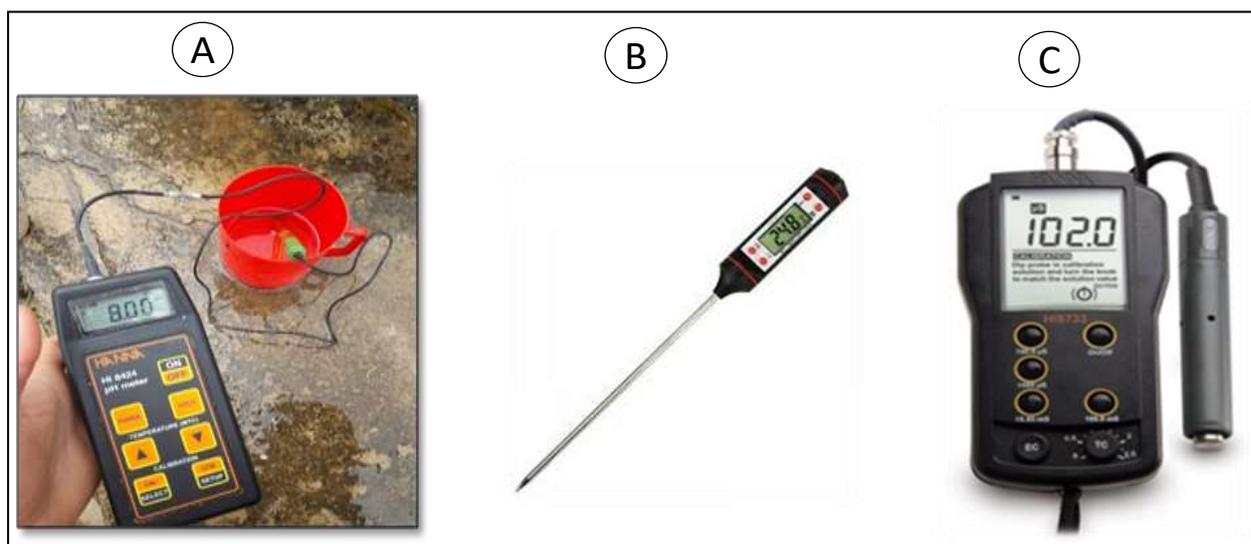


Photo III.2 : Appareils utilisés pour effectuer les mesures in-situ des paramètres physico-chimiques

Légende

A : pH-mètre ; B : thermomètre ; C: conductimètre

III.5. Appareils et méthodes d'analyse des éléments majeurs

L'analyse des éléments majeurs a été faite au laboratoire de Génie Géologique (LGG) à l'exception de Na^+ et K^+ , où l'analyse a été faite au laboratoire pédagogique de chimie. Au total 3 méthodes d'analyse ont été utilisées :

a) Méthode volumétrique (titrimétrie)

Cette méthode a été utilisée pour doser le calcium, la dureté totale (TH), les chlorures et les bicarbonates. Le dispositif expérimental utilisé est présenté dans la photo III.3.

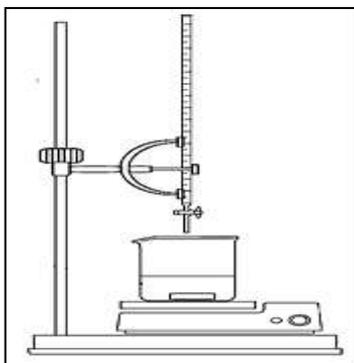


Photo III.3 : Dispositif expérimental utilisé pour les analyses par la méthode titrimétrique

b) Méthode spectrophotométrique ultraviolet-visible (UV-Vis)

La spectrométrie d'absorption moléculaire est une technique applicable à l'analyse qualitative et quantitative qui permet le mesurage de la concentration d'un composé dissous dans la solution. Cette méthode a été utilisée pour doser les sulfates (SO_4^{2-}). L'appareil utilisé est de mark VWR (UV 1600 PC) (photo III.4).



Photo III.4 : spectrophotomètre (VWR - UV 1600 PC).

c) Méthode spectrophotométrique d'absorption moléculaire

Cette méthode repose sur le principe qu'un atome soumis à un rayonnement d'énergie E . Les électrons de l'atome passent à un état excité, où le niveau d'énergie est le plus élevé. C'est le phénomène d'absorption. Cette méthode a été utilisée pour doser le sodium (Na^+) et le potassium (K^+). L'appareil utilisé est le photomètre de flamme AFP 100 (Photo III.5).



Photo III.5 : Photomètre de flamme AFP 100

Les trois méthodes utilisées ont été calibrées à l'aide de la droite de calibration effectuée par des étalons. Une deuxième vérification des résultats a été faite à l'aide des eaux à concentrations connues analysées avec les échantillons.

III.6. Conclusion

Ce chapitre nous a permis de montrer à la fois la localisation géographique des zones de sources thermales étudiées, le mode d'échantillonnage, les méthodes et les appareils scientifiques utilisés pour faire les mesures in-situ des paramètres physico-chimiques et l'analyse des éléments majeurs au laboratoire.

Il nous a aussi montré les différentes méthodes utilisées pour vérifier les résultats des mesures et des analyses et de s'assurer de la crédibilité des résultats obtenus.

Chapitre IV
Résultats et discussion

IV.1. Introduction

L'eau thermale circule en profondeur et remonte en surface à travers les failles. Elle est caractérisée par une température et une minéralisation élevée et parfois riches en gaz. Le contact des eaux chaudes avec le réservoir favorise la dissolution des minéraux.

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats des mesures physico-chimiques in-situ et des analyses chimiques des éléments majeurs des eaux thermales de trois zones (Béni-Haroun, Béni-Guechat, Ouled Achour - Zouaoui) de la wilaya de Mila.

IV.2. Analyses physico-chimiques

Les résultats des mesures in-situ des paramètres physico-chimiques (T, pH et conductivité) sont présentés dans la figure IV.1.

IV.2.1. Mesures in situ

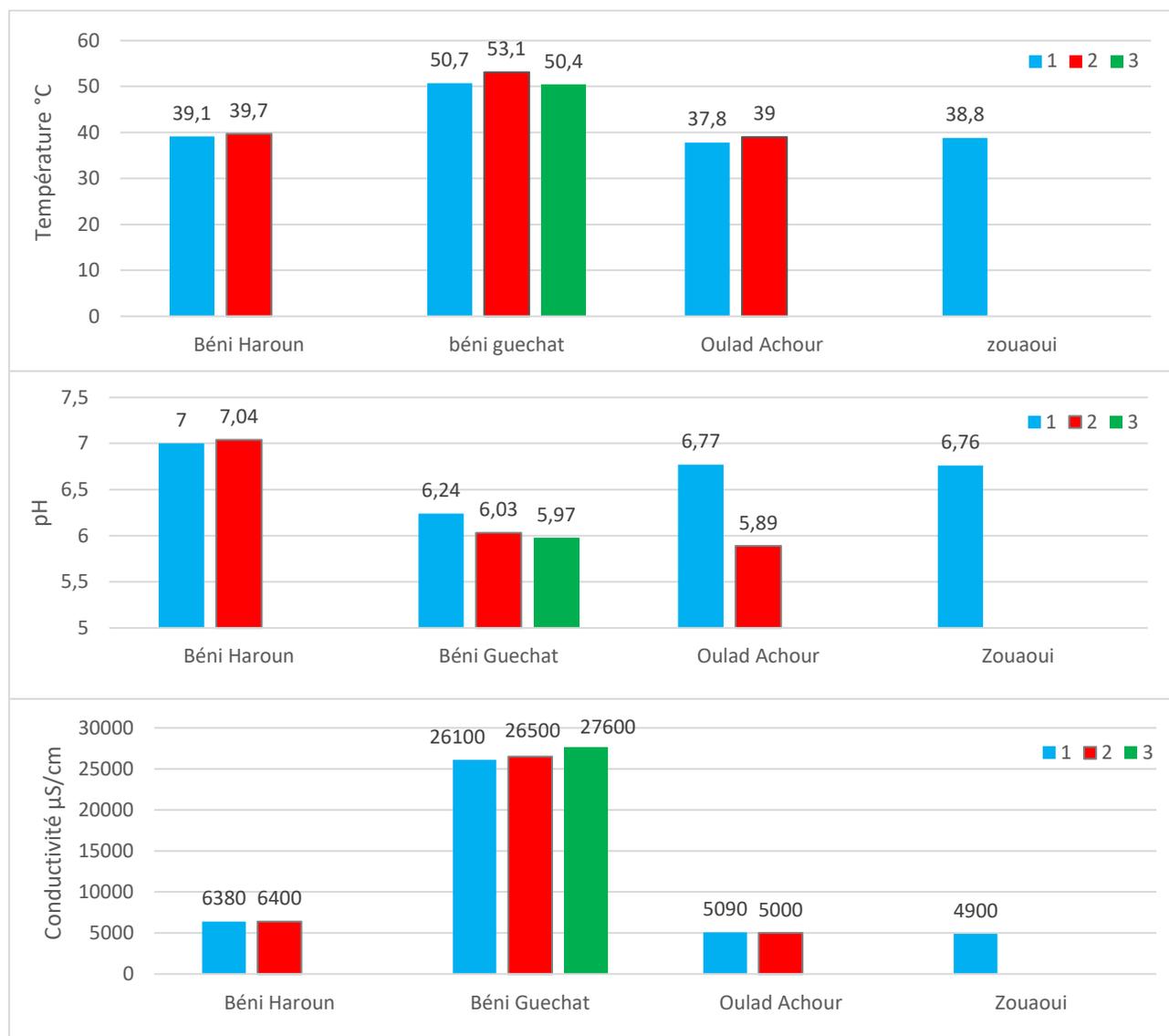


Fig.IV.1. Histogrammes représente les mesures in situ des eaux chaudes étudiée.

IV.2.2. L'interprétation

Cette figure montre que la température minimale (37.8 °C) est enregistrée dans la source d'Ouled Achour 1 et la température maximum (53.1 °C) est enregistrée dans la source de Béni-Ghuechat 2.

La comparaison entre les trois zones montre que les sources de la zone de Béni-Guechat sont les plus chaudes avec une température qui varie entre 50.4 et 53.1°C. Par contre les autres zones (Béni-Haroun et ouled Achour – Zouaoui) présentent des températures comparables qui varient entre 37.8 et 39.7°C. Cette différence indique des origines différentes de ces zones.

Selon la classification des eaux thermales (Verdeil 1982), les eaux de ces trois zones varient entre deux classes : la classe des eaux chaudes (30 – 50 °C) présente par les zones de Beni-Haroun et la zone d'ouled Achour - Zouaoui et la classe des eaux très chaude (50-100°C) pour la zone de Béni-Guechat.

Les valeurs mesurées de la conductivité varient entre 4 900 et 27 600 µS/cm. Les valeurs les plus élevées sont observées dans les sources de la zone Beni-Guechat (26 100 à 27600 µS/cm), puis les sources de la zone de Beni-Haroun (6400 µS/cm) et les plus basses sont celle de la zone Ouled Achour – Zouaoui (4900 – 5090 µS/cm). Ces valeurs indiquant que les sources de Beni-Guechat sont les plus chargées, sûrement dû à la dissolution des formations triasiques où les sources émergent.

Le potentiel hydrogène (pH) mesuré sur les trois zones montre un pH neutre dans les sources de Béni-Haroun (7 à 7.04), et un pH légèrement acide dans les autres zones avec des valeurs les plus faible (5.97 à 6.24) aux sources de Béni-Guechat.

D'après les valeurs de ces trois paramètres physico-chimiques, on peut dire que ces eaux de source sont thermo-minérales, vu que la température est supérieure à 37°C et la conductivité est supérieure ou égale à 4900 µS/cm, à pH neutre à acide.

VI. 3. Eléments majeurs

La composition chimique des eaux thermales est liée au type de réservoir, la vitesse d'écoulement et au temps de contact eau-roche. Les concentrations des cations et des anions dans les eaux de sources de notre étude sont présentées dans la figure IV-2 et IV-3.

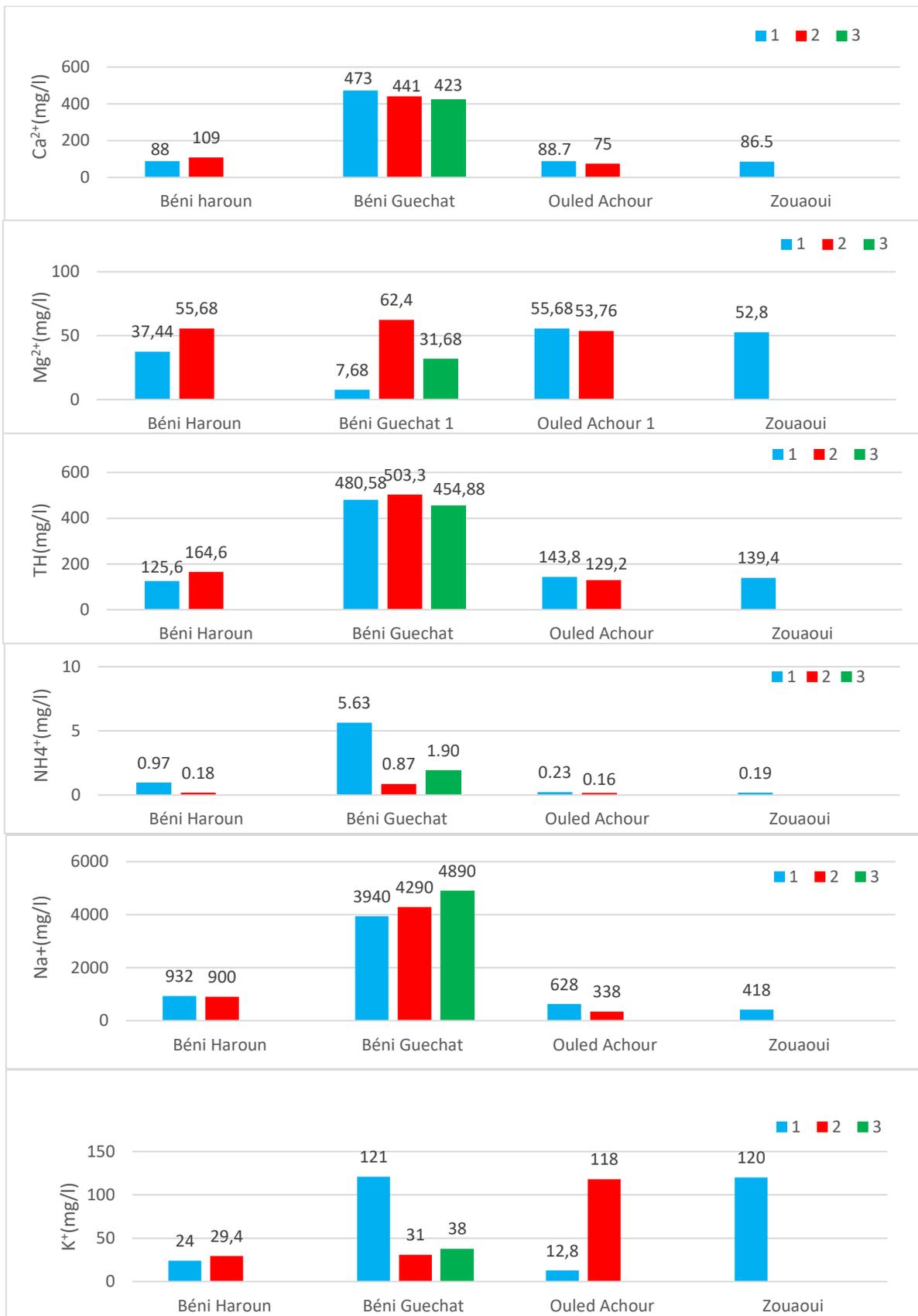


Fig.IV.2. Concentration des cations.

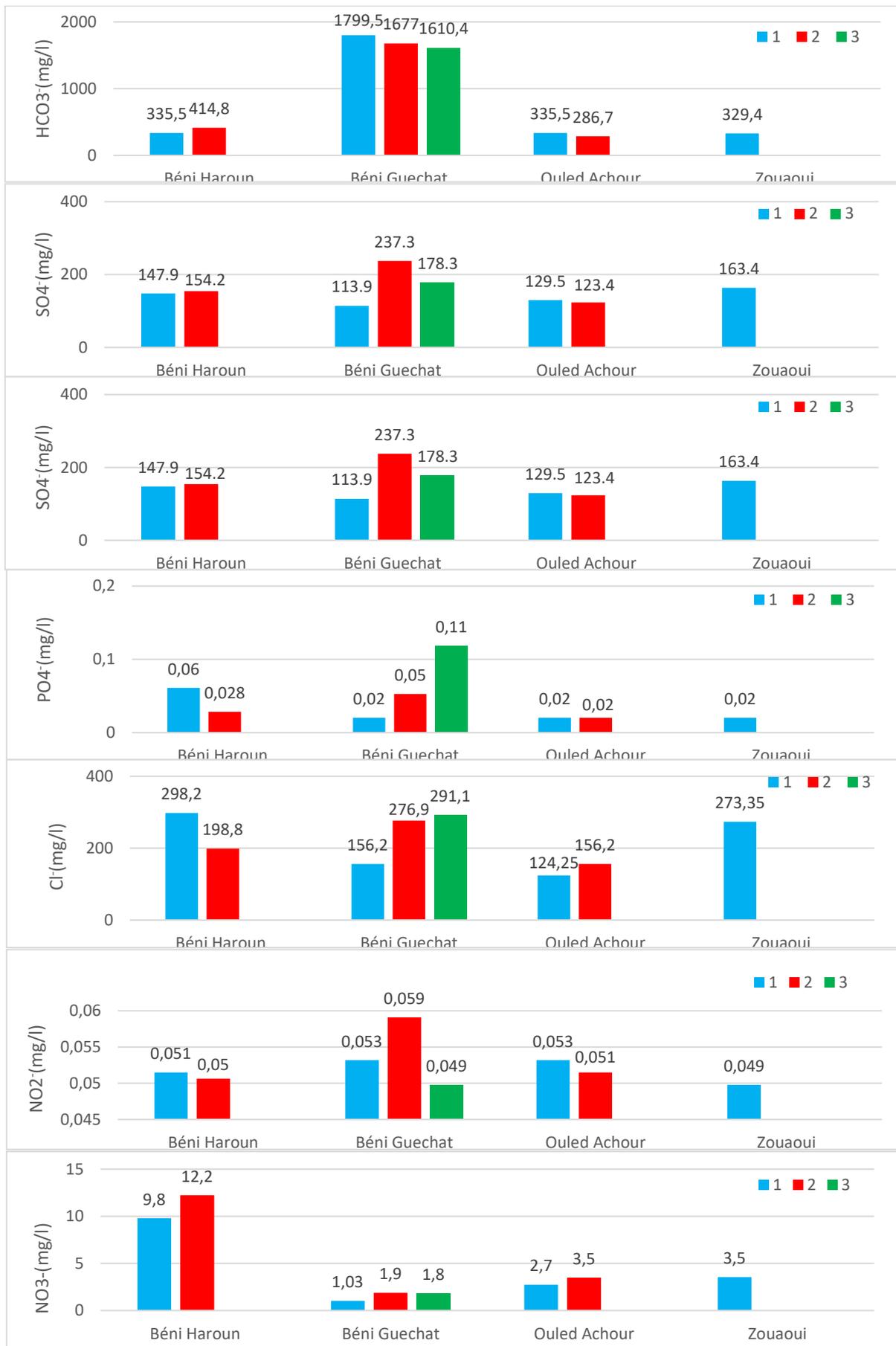


Fig.IV.3. Concentration des anions.

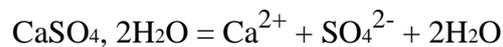
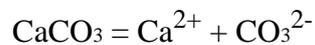
IV.3.1. Interprétation

La figure des cations montre que le sodium est le plus dominant (418 – 4890 mg/L), puis le calcium (75 – 473 mg/L) et puis le potassium (12 – 120 mg/L). Les autres cations présentent des concentrations inférieures à 120 mg/L. Les fortes concentrations en calcium, ammonium, sodium sont observées au niveau des sources de la zone de Beni-Guechat.

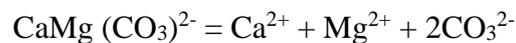
La figure des anions montre que l'anion le plus présent est les bicarbonates (335 – 1799 mg/L), puis les chlorures (124 – 298 mg/L), et puis les sulfates (113 – 237 mg/L). Les autres anions présentent des concentrations inférieures à 12 mg/L. Les fortes concentrations en bicarbonates et en sulfates sont observées dans les sources de la zone Beni-Guechat. Les chlorures sont observés dans les 3 zones avec des concentrations maximums qui varient entre 273 et 298 mg/L. On constate aussi l'existence des nitrates (9 – 12 mg/L) dans les eaux thermo-minérales de Beni-Haroun, cela peut être expliqué par un contact entre les eaux thermales (origine profonde) et les eaux de la nappe riche en nitrates.

L'origine de ces ions chimiques peut être expliquée par la dissolution des formations géologiques comme suit :

Calcium (Ca²⁺) : dissolution des formations carbonatées (CaCO₃), d et des formations gypseuses (CaSO₄).



Magnésium (Mg²⁺) : il est lié à la dissolution de la magnésite et de la dolomite, selon les deux formules suivantes :

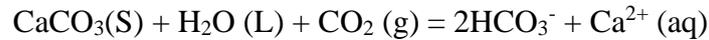


La présence du magnésium indique généralement des eaux à transit lent (Bakalowiz, 1994).

Chlorures (Cl⁻) et sodium (Na⁺) : ils sont dus à la dissolution des formations salifères (halite (NaCl)) selon la formule suivante :



Bicarbonates (HCO_3^-) : la présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (cipolins, calcaires) par des eaux chargées en gaz carbonique. L'équation de la dissolution est la suivante :



Les eaux thermo-minérales de la zone de Beni-Haroun sont caractérisées par la présence moyenne en calcium (88-109 mg/L) et en magnésium (37 – 55 mg/L) et élevée en bicarbonates (335 à 414 mg/L), en sulfates (147 – 154 mg/L) et en chlorures (198 – 298 mg/L). Cela peut s'expliquer, en partie, par la dissolution des formations carbonatées (calcaire et dolomie) et les formations salifères (halite et gypse). Les formations carbonatées sont observées en surface de la zone d'étude (voir Fig III.2) et les formations salifères, on suppose que les eaux thermo-minérales en les traversées en profondeur (voir la coupe, FigII.5).

Les eaux thermo-minérales de la zone de Beni-Guechat sont les plus chargées et elles sont caractérisées par des eaux riches en calcite (423 – 472 mg/L), en sodium (3940 – 4890), en bicarbonates (1610 – 1799 mg/L), en sulfates (113 – 237 mg/L) et en chlorures (156 – 291 mg/L). Ces ions sont liés aux formations triasiques (halites et gypses) observées sur le site des sources et aux formations carbonatées (calcaire) sûrement présente en profondeur. La forte concentration des bicarbonates par rapport au calcium et du sodium par rapport aux chlorures indiquant l'existence d'autre origine pour les bicarbonates et le sodium. Les bicarbonates on peut l'expliqués par les eaux riches en CO_2 et Na^+ par les roches métamorphiques.

Les eaux thermo-minérales de la zone de Ouled Achour – Zouaoui sont les moins chargée et se caractérisent par des concentrations moins élevées en bicarbonates (286 – 335 mg/L), en sodium (338 – 628 mg/L), en sulfates (123 – 163 mg/L) et en chlorures (124 – 273 mg/L). Ces ions peuvent venir des formations carbonatées (marnes et calcaire) observées sur le site (voir Fig III.4) et des formations triasiques moins importantes en profondeur.

VI.4. Rapports caractéristiques

Pour étudier l'origine des éléments majeurs dans l'eau, nous nous sommes basés sur l'étude des rapport caractéristiques en milliéquivalent par litre. Trois rapports caractéristiques ont été étudiés, le premier concerne l'origine des bicarbonates, le deuxième concerne l'origine de Na et Cl et le troisième concerne l'origine des sulfates.

VI.4.1. Rapports Ca / HCO₃ et Ca + Mg / HCO₃

Le premier rapport (Ca / HCO₃) a pour objectif d'étudier l'origine due aux formations calcaire (CaCO₃). La projection des points montre une présence plus élevée des bicarbonates par rapport aux calcites dans les sources therm-minérales de Béni-Ghechat et une légère élévation des bicarbonates par rapport aux calcites pour les sources de la zone de Béni-haroune. Pour les sources de Ouled Achour – Zouaoui on observe un équilibre entre les deux éléments chimiques.

La représentation des concentrations des bicarbonates par rapport à la somme de la calcite et du magnésium, indique un équilibre pour deux sources l'une de la zone de béni-Haroun et l'autre de Béni-Guechat indique l'origine combiné des calcaires et de la dolomie (CaMg (CO₃)₂). Les autres points de deux zones indiquant une légère présence élevée des bicarbonates indiquant surement une autre origine qui peut être liée à la présence de CO₃ dans les eaux thermo-minérales (Fig.IV.4).

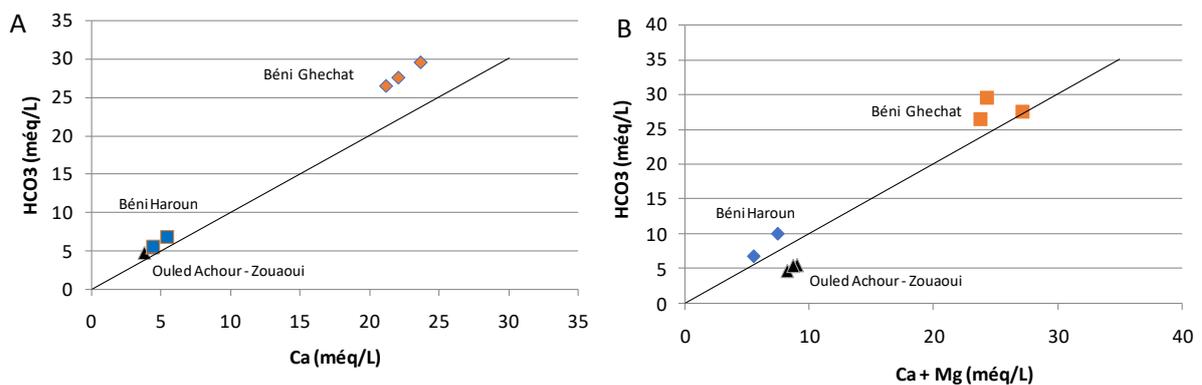


Fig.IV.4. Projection des points d'eau sur les graphes Ca / HCO₃ et Ca + Mg / HCO₃

VI.4.2. Rapport Na/Cl

Ce rapport indique l'origine des formations de l'halite (NaCl) pour Na et Cl. La projection des points d'eau sur le diagramme montre un équilibre entre Na et Cl pour les sources de Béni-Haroun et par une sous concentration pour les concentrations de la zone de Ouled Achour – Zouaoui et des faibles concentrations de Cl par rapport à Na pour les eaux des sources de Béni Guechat.

Ces fortes concentrations en Na, on n'a arrivé à déterminer son origine pour cela on recommande une étude détaillée pour connaître son origine (Fig.IV.5).

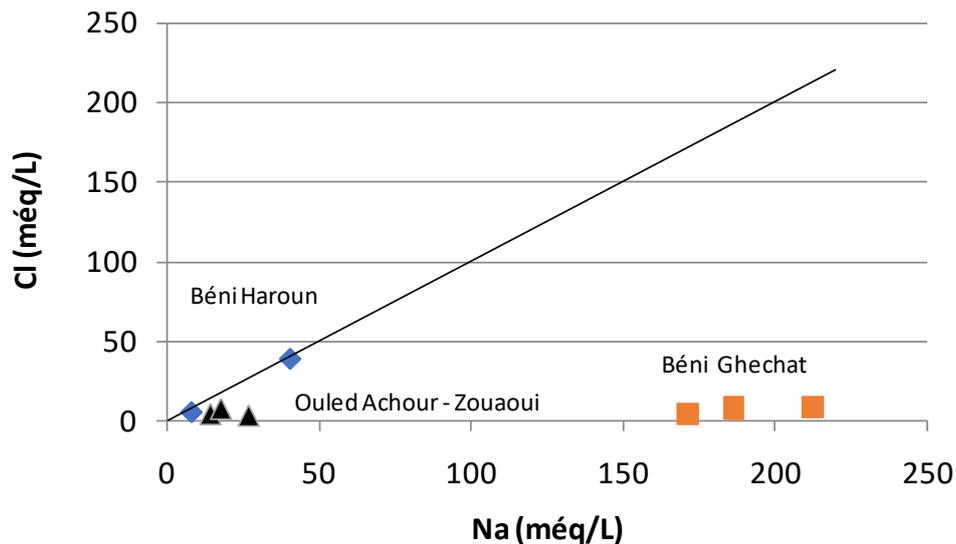


Fig.IV.5. Projection des points d'eau sur les graphes Na / Cl

VI.4.3. Rapports Ca / SO₄ et Ca+Mg / HCO₃ + SO₄

Le rapport Ca/SO₄ a pour objectif d'étudier l'origine sulfatée (CaSO₄ · 2 H₂O) des sulfates. La projection des points (figure) montre que les eaux de Béni-haroun sont en équilibre, celle d'Ouled Achour – Zouaoui présentent une légère faible concentration de SO₄, par contre les eaux de Béni-Ghechat présentent des faibles concentrations indiquant un apport plus important pour le calcium qui peut être lié au calcaire (fig.IV.6)

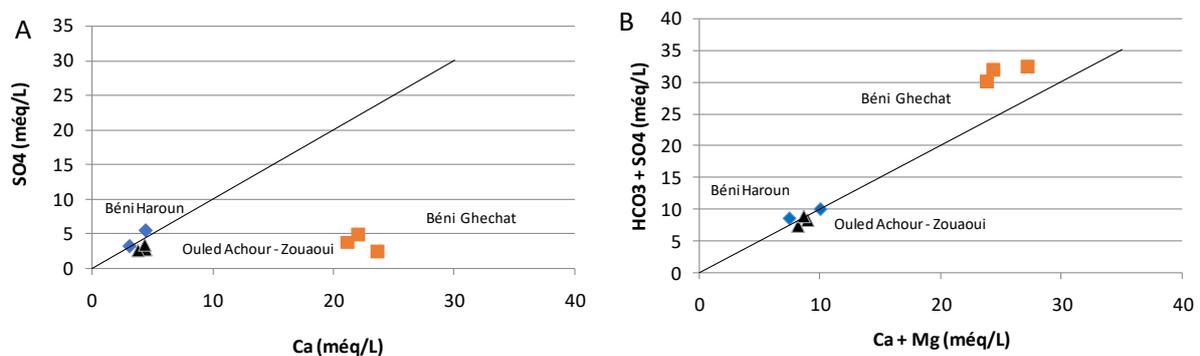


Fig.IV.6 Projection des points d'eau sur les graphes Ca / SO₄ et Ca+Mg / HCO₃ + SO₄

IV.5. Les facies chimiques

IV.5.1. Classification de Collins ou Stabler

Le diagramme de Stabler représente la contribution de chaque espèce ionique à la somme cationique ou à la somme anionique. Les unités sont milliéquivalents par litres (milliEq.l⁻¹).

Cette classification, nous permet de déterminer facilement le faciès chimique de l'eau, en prenant l'anion et le cation majeur. L'appellation du faciès commence par l'anion puis le cation.

La formule caractéristique des eaux thermo-minérales des 3 zones d'étude est comme suit :

- Béni Haroun 1 et 2 :
 $r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Ca}^{2+} > r\% \text{Mg}^{2+}$
- Béni Guechat 1 2 et 3 :
 $r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Ca}^{2+} > r\% \text{Mg}^{2+}$
- Ouled Achour : Le faciès chimique des eaux est bicarbonaté sodique avec :
 Ouled Achour 1: $r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{SO}_4^{2-} > r\% \text{Cl}^-$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Ca}^{2+} > r\% \text{Mg}^{2+}$
 Ouled Achour 2: $r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Ca}^{2+} > r\% \text{Mg}^{2+}$
- Zouaoui
 $r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{2-}$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Ca}^{2+} > r\% \text{Mg}^{2+}$

Le faciès chimique des eaux est de type Bicarbonaté sodique pour les trois zones étudiées (Béni Haroun, Béni Guechat, Ouled Achour et Zouaoui).

IV.5.2. Classification géochimique des eaux

IV.5.2.1. Diagramme de piper

Le diagramme Piper, permet de visualiser l'évolution géochimique spatiale (un prélèvement de plusieurs échantillons d'eau d'un même aquifère) ou temporelle (plusieurs prélèvements d'eau d'un aquifère en différentes saisons climatiques).

La représentation des données physico-chimiques sur le diagramme de piper montre plusieurs faciès chimiques qui dépendent de la nature géologique des aquifères.

Le report de 8 échantillons prélevés au niveau des Hammams dans la région de Mila sur le diagramme de piper (Fig.IV.4) montre une variabilité du faciès chimique des eaux. Ces derniers sont divisés en deux faciès chimiques :

- **Bicarbonatée sodique et potassique** seulement pour Béni Guechat 1 2 et 3
- **Chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique** pour Béni Haroun 1 et 2, Ouled Achour 1 et 2 et Zouaoui.

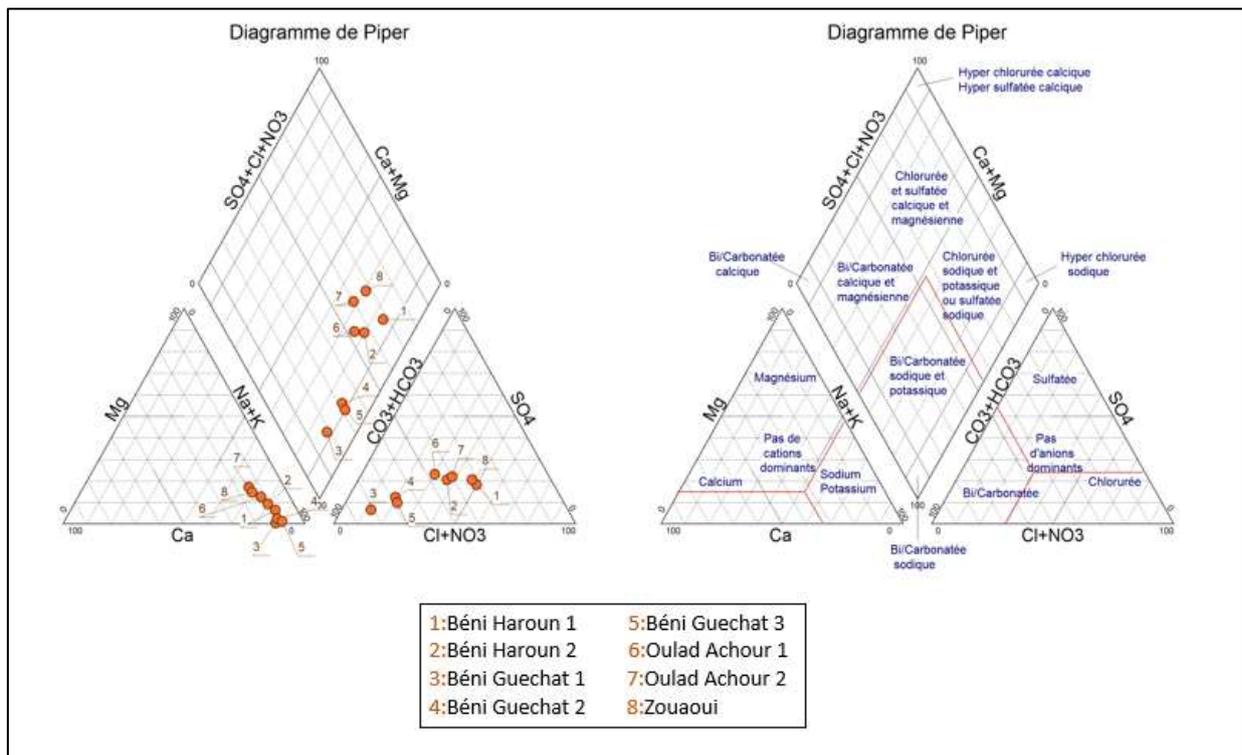


Fig.IV.7. Représentation des analyses d'eau sur le diagramme de Piper

Ce diagramme montre que les eaux thermo-minérales des zones de Béni-Haroun, ouled Achour et Zouaoui sont comparable et différent par rapport aux eaux de Beni-Guechat. Dans la même zone on peut trouver des légères différences mais le même faciès chimique, cela peut s'expliquer que chaque zone a la même origine des eaux, mais l'émergence en surface se fait avec des chemins différents ce qui produit des légères modifications dans les concentrations.

IV.5.2.2. Diagramme de Schoeller

C'est un diagramme à échelle logarithmique. Il permet de représenter les concentrations, en mg/l des cations et des anions selon l'ordre suivant : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ et NO_3^- . Cette méthode nous permet d'identifier facilement les faciès chimiques et la quantité des ions dans l'eau.

La représentation de nos analyses sur le diagramme montre l'existence de deux ensembles l'un pour les eaux thermo-minérales de Béni Guechat (bicarbonaté sodique) fortement minéralisées et l'autre pour les eaux thermo-minérales de Béni Haroun, Ouled Achour et Zouaoui (bicarbonaté sodique) mais moins minéralisé.

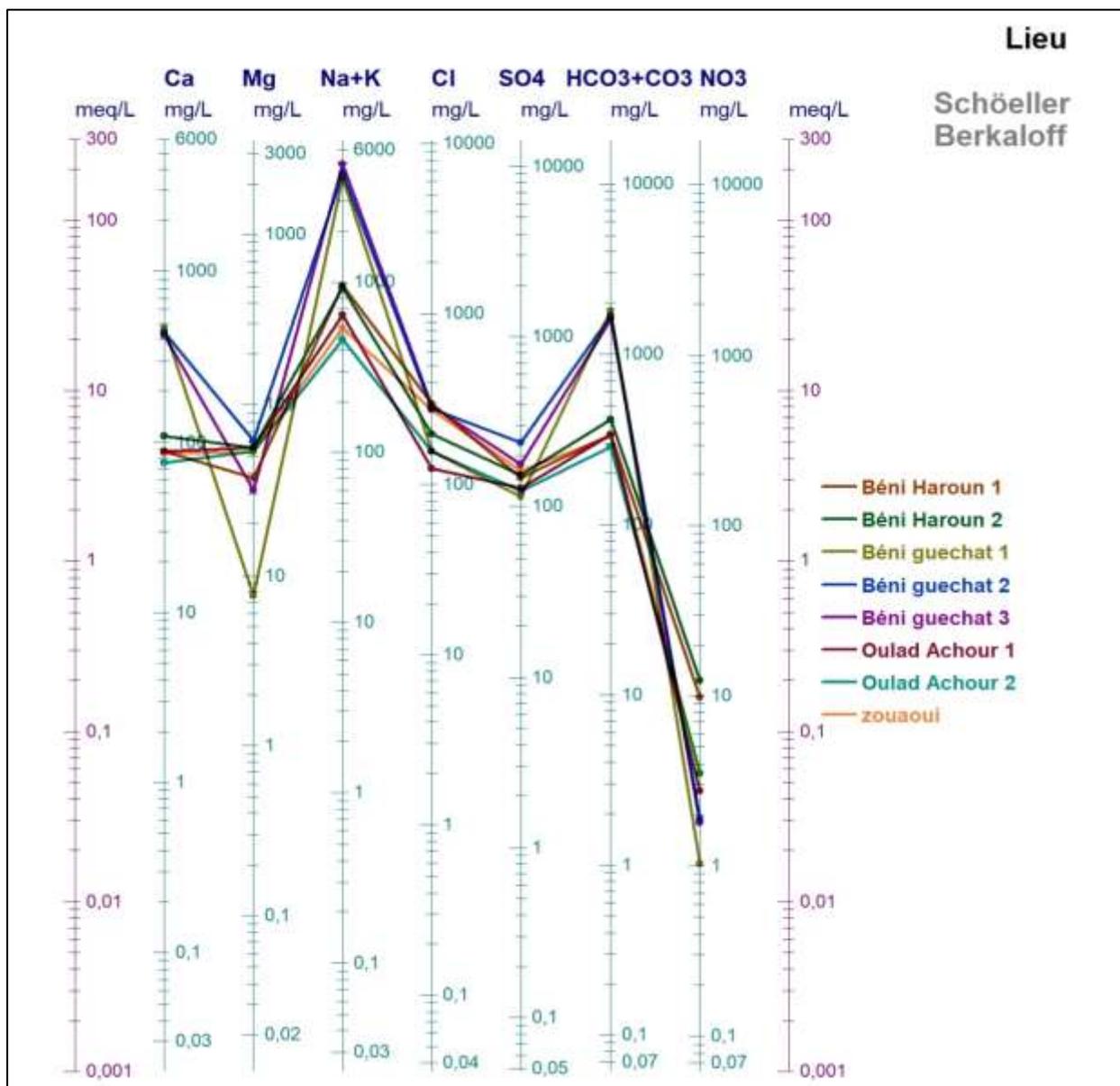


Fig.IV.8. Représentation des analyses d'eau sur le diagramme de Schoeller

IV.5.2.3. Diagramme triangulaire (Cl-SO₄-HCO₃) de Giggenbach

Ce diagramme ternaire Cl-SO₄-HCO₃ (Giggenbach, 1991) classe les eaux géothermiques sur la base des anions majeurs, c'est-à-dire Cl, SO₄ et HCO₃.

La source de Cl⁻ est l'eau de mer et la dissolution des roches ; pour le SO₄, une petite quantité provient de l'eau de mer ; mais une grande quantité est généralement dérivée de l'oxydation du sulfure dans la vapeur volcanique. Le carbonate est présent à la périphérie des systèmes à haute température. Le CO₂ est obtenu par le dégazage de formations volcaniques comme les intrusions profondes. Dans l'eau froide, le carbonate provient de sources biologiques.

Les concentrations élevées de sulfate et de carbonate ainsi obtenues peuvent donner des résultats erronés du géothermomètre à cations. Dans certains anciens systèmes magmatiques,

l'équilibre avec les minéraux d'altération s'établit en présence d'un excès de sulfate dans l'eau et l'acidité de l'eau n'est pas augmentée.

Le diagramme de Giggenbach est obtenu par la sommation de la concentration de l'ensemble des trois constituants :

$$S = C(\text{Cl}) + C(\text{SO}_4) + C(\text{HCO}_3)$$

Et calcul du pourcentage de constituants individuels :

$$\% \text{Cl} = 100 C(\text{Cl}) / S; \% \text{SO}_4 = 100 C(\text{SO}_4) / S; \% \text{HCO}_3 = 100 C(\text{HCO}_3) / S$$

Avec S : la somme, c : concentration en mg/l

IV.1. Tableau des calculs de pourcentage des éléments Cl, SO₄, HCO₃

Nom	S	% Cl	% SO ₄	% HCO ₃
Béni Haroun 1	781.6	38.15	18.92	42.92
Béni Haroun 2	767.83	25.9	20.08	54.02
Béni Guechat 1	2067.6	7.55	5.5	87.03
Béni Guechat 2	2191.8	12.63	10.83	76.53
Béni Guechat 3	2079.8	14	8.57	77.43
Ouled Achour1	589.3	21.08	21.97	56.93
Ouled Achour 2	566.3	27.58	21.79	50.62
Zouaoui	766.1	35.68	21.32	42.99

L'ensemble des échantillons analysés sur les sources thermales de la wilaya de Mila ont été représentée sur le diagramme triangulaire (Cl-SO₄-HCO₃) de Giggenbach

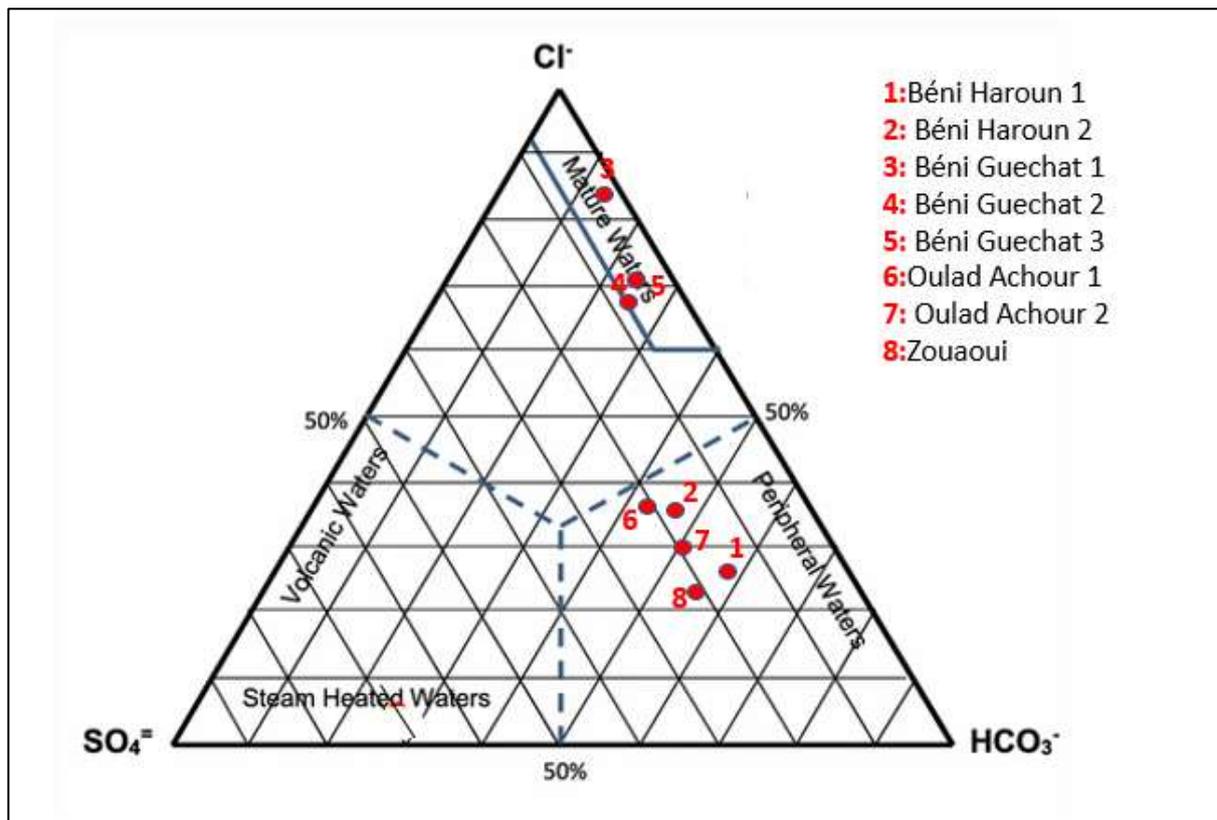


Fig.IV.9. Classification des eaux chaudes étudiées selon le diagramme triangulaire (Cl-SO₄-HCO₃) de Giggenbach.

Le diagramme ternaire Cl-SO₄-HCO₃ est couramment utilisé pour la classification des fluides thermiques. Le diagramme indique plusieurs types de fluides thermiques tels que les eaux immatures, les eaux périphériques, les eaux volcaniques et les eaux chauffées à la vapeur.

On remarque que les trois stations de Béni Guechat (1, 2 et 3) qui sont les plus chaudes (plus de 50°C) par rapport à les autres stations sont dans la zone où les eaux immature c'est-à-dire les eaux les plus profondes. Par contre les autres stations : Béni Haroun 1 et 2, Oulad Achour 1 et 2, et Zouaoui sont dans la zone où les eaux périphériques.

Les géothermomètres et le diagramme ternaire Cl-SO₄-HCO₃ sont utilisés pour étudier les températures des réservoirs et la composition de l'eau des réservoirs de puits et de sources chaudes sélectionnés.

IV.6. Profondeur des eaux thermo-minérale

Les eaux thermo-minérale du nord-est algérien sont d'origine météorique et l'augmentation de la température des eaux est liée essentiellement au gradient thermique (Gaston, 1989). Selon Kazi Tani (1986), le gradient géothermique de la région de Mila est d'environ 4°C par 100 m. En partant d'une température moyenne des nappes superficielles de 20°C et une température moyenne des eaux thermo-minérale de 38.5 pour la zone de Ouled Achour – Zouaoui, de 39.4°C pour la zone Béni-Haroun et de 51.4 pour la zone de Béni-Guechat, on constate une augmentation de température de l'eau de 18.5 pour la zone de Ouled

Achour – Zouaoui, de 19.4°C pour la zone Béni-Haroun et de 31.4 pour la zone de Béni-Guechat. En appliquant la règle de trois par rapport au gradient géothermique on peut déduire que la profondeur des eaux est de 462.5 m pour la zone de Ouled Achour – Zouaoui, de 485 m pour la zone Béni-Haroun et de 785 m pour la zone de Béni-Guechat.

IV.7. Modèle conceptuel du fonctionnement hydrodynamique et chimique des sources thermo-minérales

Selon le contexte géologique et les réponses hydrochimiques des sources thermo-minérales, nous allons proposer 3 schémas conceptuels pour ces trois zones à eaux thermo minérales :

IV.7.1. Zone de Béni Haroun

Le schéma de Béni-Haroun repose sur l'hypothèse que les eaux thermo minérales sont liées aux montagnes de voisinage ou lointaine, ou l'infiltration des eaux est importante, puis ces s'infiltré progressivement en profondeur, jusqu'au moment elle rencontre une faille où la remonté rapide des eaux conserve une grande partie de la température.

La chimie des eaux fait apparaitre la présence des calcaires en surface et des formation gypsifère en profondeur

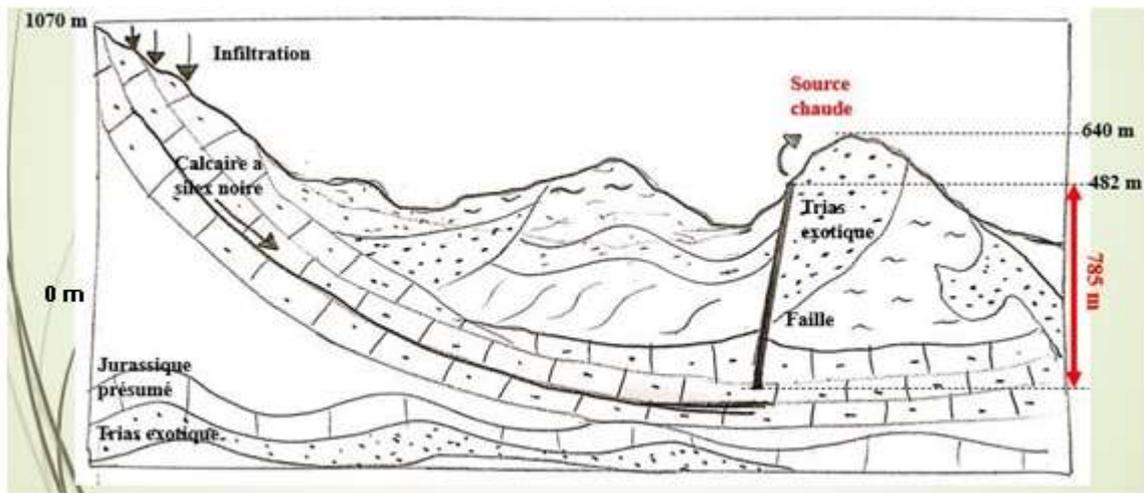


Fig.IV.10. Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des sources thermo-minérales de là de la zone Béni Haroun.

IV.7.2. Zone de Béni Guechat

Elle est comparable à la précédente sauf que l'émergence se fait dans les formations gypsifères et les eaux rencontrent les formations carbonatées en profondeur.

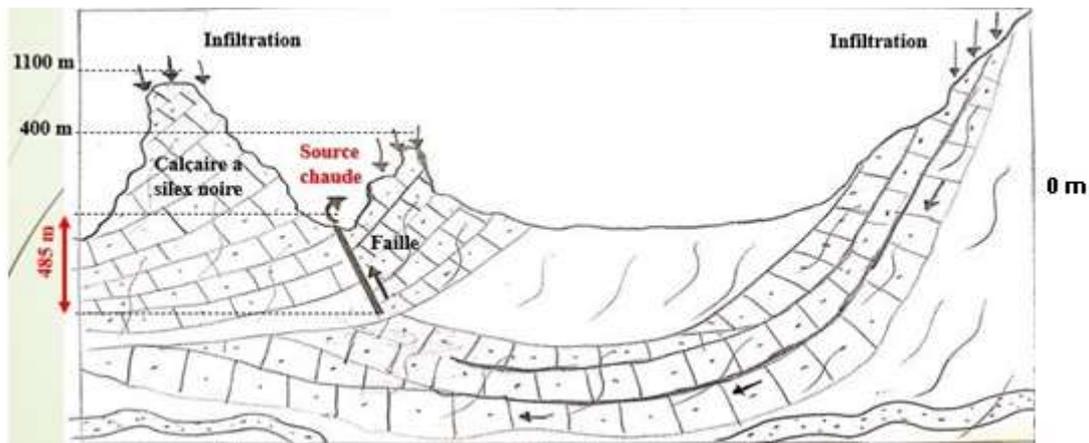


Fig.IV.11. Schéma conceptuel de l'hydrodynamique des sources thermo-minérales de la zone Béni Guechat

IV.7.3. Zone de Ouled Achour - Zouaoui

L'émergence des sources thermo-minérales se fait dans un contact anormal entre les marnes et les calcaires. L'origine de ces eaux est météorique et provient sûrement des infiltrations dans les montagnes, puis s'infiltrer à des profondeurs importantes puis refonte rapidement à travers les failles.

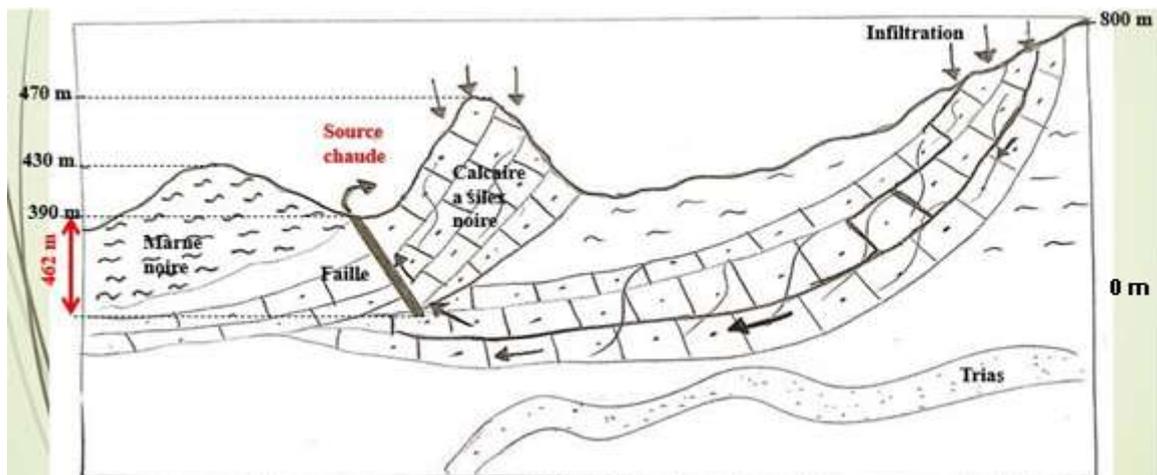


Fig.IV.12 Schéma conceptuel du fonctionnement hydrodynamique des sources thermo-minérales de la zone Ouled Achour et Zouaoui

IV.8. Conclusion

Ce chapitre, nous a permis de montrer une chimie déférente des sources, liée principalement aux formations géologiques rencontrées lors du cheminement des eaux. Le faciès chimique des eaux de source est chloruré et bicarbonaté. Les sources de la zone de Béni-Guechat est la plus minéralisée et la plus chaudes, indiquant une origine profonde

L'étude des rapports caractéristiques montrent l'origine de certains éléments chimiques mais certains n'ont pas été identifiés, pour cela une étude détaillée (isotopes, suivi plus long et analyses détaillées (éléments majeurs, ETM, ec.).

L'interprétation de diagramme triangulaire (Cl-SO₄-HCO₃) de Giggenbach nous montre que les eaux de la zone Béni Guechat sont les plus profondes par rapport aux autres zones.

Conclusion générale

Les eaux thermo-minérales attirent, souvent, la curiosité des gens et de la population par ses caractéristiques physico-chimiques, son origine et ses utilisations thérapeutiques. Dans ce mémoire, nous avons concentré sur l'aspect hydrogéologique (hydrodynamique et hydrochimique) de ces eaux. Nous avons traité ces eaux en utilisant les caractéristiques géologiques (lithologie et tectonique) et les réponses hydrochimiques. Les zones à eaux thermo-minérales qui ont été choisies pour cette étude sont trois (Beni-Haroun, Béni Guechat, Ouled Achour-Zouaoui) et se situent dans la wilaya de Mila (NE algérien). Une campagne de prélèvement a été réalisée le 10/04/2021. Au total 8 échantillons ont été prélevés, 2 à 3 échantillons par zone, avec des mesures in-situ des paramètres physico-chimiques (T, pH et conductivité) et des analyses au laboratoire (éléments majeurs).

De point de vue géologique, cette zone est caractérisée par nappes de charriage et une tectonique intense. Les formations géologiques présentes sont souvent des formations carbonatées (calcaire et dolomie), des marnes et des formations triasiques. Les trois sites choisis se localisant dans des formations différentes : les sources de Béni Haroun se trouvent dans les formations carbonatées, les sources de Béni Guechat émergent dans les formations triasiques et les sources de Ouled Achour-Zouaoui apparaissant dans le contact entre les marnes et les formations carbonatées. Ces sources ont un point commun est que leur émergence est liée à des failles.

Selon les résultats des mesures in-situ des paramètres physico-chimiques, on constate que la température des eaux fluctue entre une 36.9°C (Ouled Achour) et 53.1°C (Béni Guechat) et la conductivité entre 4900 $\mu\text{s/cm}$ (Zouaoui) et 28000 $\mu\text{s/cm}$ (Beni Guechat). Les eaux sont à caractère neutre (pH = 7.04 à Béni Haroun) à acide (pH = 5.97 à Béni Guechat).

L'analyse de la variation de la température entre les eaux thermo minérales et les eaux de nappe (20°C), selon un gradient thermique de 4°C/100 m, nous a permis d'estimer une profondeur de ses eaux et qui est comme suit : 462.5 m pour la zone de Ouled Achour – Zouaoui, 485 m pour la zone Béni-Haroun et 785 m pour la zone de Béni-Guechat.

Les résultats d'analyses chimiques montrent une dominance des cations pour le sodium (418 – 4890 mg/L), le calcium (75 – 473 mg/L) et le potassium (12 – 120 mg/L) et une dominance des anions pour les bicarbonates (335 – 1799 mg/L), les chlorures (124 – 298 mg/L) et les sulfates (113 – 237 mg/L). Le faciès chimique des eaux thermo-minérales de ces trois zones (Béni Haroun, Béni Guechat, Ouled Achour et Zouaoui) est Bicarbonaté sodique selon la

classification de stabler et bicarbonatée sodique et potassique pour Béni Guechat et chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique pour Béni Haroun et Ouled Achour – Zouaoui selon la classification de Piper

L'analyse des rapports caractéristiques (Ca / HCO_3 et $\text{Ca} + \text{Mg} / \text{HCO}_3$) montre que l'origine de Ca, Mg et HCO_3 est liée principalement aux formations carbonatées (Calcaire et dolomie) pour les trois zones des eaux thermo-minérales. Par contre l'analyse du rapport (Na/Cl) montre que Na et Cl ont origine de l'halite pour les sources de Béni-Haroun mais pour les autres sources, on observe un léger déficit en Cl pour les sources d'Ouled Achour – Zouaoui et un fort déficit de Cl pour les sources de Béni Guechat. Les rapports Ca / SO_4 et $\text{Ca}+\text{Mg} / \text{HCO}_3 + \text{SO}_4$ montreront que l'origine de Ca dans les sources de Béni-haroun et de ouled Achour-Zouaoui est lié aux formations risiques (gypse) et dans les sources de Béni-Guechat est lié aux formation carbonatées et triasiques.

La projection des points d'eau sur le diagramme triangulaire ($\text{Cl-SO}_4\text{-HCO}_3$) de Giggenbach montre que les eaux de Béni Guechat sont les plus chaudes (plus de 50°C) et se situent dans la zone des eaux immature c'est-à-dire les eaux les plus profond Par contre les autres zones : Béni Haroun et Oulad Achour-Zouaoui se situent dans la zone où les eaux sont périphériques.

En combinant les résultats des analyses chimiques, nous avons proposé 3 schémas conceptuels pour le fonctionnement des sources de ces trois zones à eaux thermo-minérales, en partant du principe que l'origine des eaux est météorique, cas de l'Algérie.

Cette étude reste incomplète et pour une étude plus détaillée de ces sources, nous recommandons :

- Des analyses plus détaillées (éléments traces, isotopes...) des eaux pour connaître l'origine exacte des eaux ;
- Un suivi continu de la chimie et du débit des sources pour connaître leur variation en fonction des pluies ;
- Utiliser plus de diagrammes et de rapports caractéristiques spécifiques aux eaux thermo-minérales.

BIBLIOGRAPHIE

Audrey, T. (2017). Interactions entre tectonique et hydrothermalisme : rôle de la faille normale de la Têt sur la circulation hydrothermale et la distribution des sources thermales des Pyrénées Orientales. Thèse pour obtenir le grade de docteur. Délivré par l'Université de Montpellier pp. 29,30.

Benabbas, C. (2006). Evolution Mio-Plio-Quaternaire de l'Algérie Nord orientale : Apport de la photogéologie et analyse morpho structurale. Université de Constantine, 256 p.

Caston, F. (1989). La vie des eaux thermo-minérales » pp. 29, 31, 32, 65, 69,80.

Mamouri, M. (2015). Le thermalisme de la région de Mila. Mémoire de magistère. Université de Constantine 75p.

Ouali, S. (2008). Les sources thermales en Algérie. Recherche et développement pp. 17, 18.

Oyun-Erdene, G (2003). Interpretations of chemical composition of geothermal fluide from ÁRSKÓGSSTRÖND, DALVÍK, and HRÍSEY, N-ICELAND and in the khangal area, Mongolia. Institute of Chemistry and Chemical Technology Mongolian Academy of Sciences Peace Mongolia. Pp. 224, 225.

Sanjuan, B. Darnet, M. Jacob, T.H. Jeanpert, J. Lesimple, S. (2020). Evaluation du potentiel géothermique de la Grande Terre (Nouvelle-Calédonie). BRGM, 14 p.

Vila, J.M. (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des cofins d'Algéro –tunisiens I.II.III. Thèse Es- sciences Paris, 671 p.

Site Web

www.chemindeleau.com

www.pinterest.com

www.tourdumonde.fr

Annexe

Mode opératoire des analyses chimiques

Le mode opératoire utiliser pour faire les analyses chimiques est le suivant :

- **Calcium (Ca^{+2})**

- Prendre 25 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 1 ml de la solution NaOH à 2N.
- Ajouter une pincée de l'indicateur de Murexide.
- Titrer avec la solution EDTA 0.01 mol/l jusqu'au virage (violet).

- **Dureté (Ca^{+2} Mg^{+2})**

- Prendre 25 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 2 ml de la solution tampon pH10.
- Ajouter 2 gouttes de l'indicateur de noir eriochrome (NET).
- Titrer avec la solution EDTA 0.01 mol/l jusqu'au virage (bleu).

- **Chlorures (Cl^-)**

- Prendre 20 ml de la solution d'indicateur de chromate de potassium (K_2CrO_4) à 100 ml (coloration jaunâtre).
- Titre avec la solution nitrate d'argent ($AgNO_3$) à 0.02N jusqu'à (coloration rougeâtre).

- **Sulfates (SO_4^{2-})**

- Prendre 20 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 1 ml solution stabilisante.
- Agiter énergiquement pendant 1 ml.
- Ajouter 0.4 ml de la solution de chlorure de baryum à 0.01 ml.
- Agiter énergiquement pendant 1 ml.
- Passer l'échantillon au spectrophotomètre à $\lambda=420nm$.

Le résultat est donné directement en mg/l.

- **Bicarbonate (HCO^{-3})**

- Prélever 25 ml d'eau à analyser.
- Ajouter 3 gouttes rouges méthyl.
- Titrer par la solution $H_2SO_4^{-2}$ (0.002N) jusqu'au virage (coloration rose).