

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

Année 2017

Faculté des Sciences de l'Ingénierat
Département d'hydraulique

THESE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de

Doctorat en Hydraulique

Domaine : Sciences et techniques

Filière: Hydraulique

Option: Hydraulique

THEME

***LES EAUX THERMO-MINERALES ET DEVELOPPEMENT
DURABLE : CAS DE HAMMAM MESKOUTINE ET HAMMAM
OULED ALI (NORD-EST ALGERIEN)***

Présenté par : BENAMARA Abdelwaheb

Directrice de Thèse : KHERICI-BOUSNOUBRA. H Pr. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

DEVANT LE JURY

Président: MEKSAOUINE Mohammed

Pr. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Examineurs: BENHAMZA Moussa

Pr. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

KACHI Slimane

Pr. Univ. 08 Mai 1945 -Guelma

DJIDEL Mohamed

Pr. Univ. Ouargla

BOUTAGHANE Hamouda

MCA. Univ. Badji Mokhtar-Annaba

Invitée: KHERIFI Wahida

MCB. CRSTRA. Biskra

REMERCIEMENTS

REMERCIEMENTS

A la fin de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements au bon dieu le tout puissant qui m'a ouvert les portes de la réussite, comme je 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 ma directrice Pr Mme KHERICI-BOUSNOUBRA Houria, pour son soutien, sa gentillesse et ses conseils judicieux.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.

- MEKSAOUINE Mohammed, Professeur, Université de Badji Mokhtar-Annaba;
- BENHAMZA Moussa, Professeur, Université de Badji Mokhtar-Annaba;
- KACHI Slimane, Professeur, Université de 08 Mai 1945-Guelma;
- DJIDEL Mohamed, Professeur, Université d'Ouargla;
- BOUTAGHANE Hamouda, MCA, Université de Badji Mokhtar-Ann;
- Invitée: KHERIFI Wahida, MCB. CRSTRA. Biskra.

Mes remerciements les plus sincères à monsieur le directeur et le personnel du laboratoire SOLS ET HYDRAULIQUE, pour bien avoir voulu mettre à ma disposition tout le matériel nécessaire en réactifs et instruments (VALISE HANNA INSTRUMENT) pour les analyses physico-chimiques in situ dans les meilleures conditions.

Mes remerciements aux enseignants du département d'hydraulique et amis de toujours pour leur soutien moral, pour leurs conseils et orientations pendant toute la période de mon travail.

Mes remerciements vont également à mes collègues de travail à la D.H.W de Guelma en général, et la subdivision d'hydraulique de Hammam Meskoutine en particulier.

Mes remerciements les plus sincères à tous les techniciens des différents laboratoires pour bien avoir voulu mettre à ma disposition tout le matériel nécessaire en réactifs et instruments pour les analyses physico-chimiques dans les meilleures conditions.

-Monsieur Hacène Kibeche laboratoire de DDS Guelma.

- Ma femme Hedjal Sihem doctorante en hydrogéologie université Badji Mokhtar Annaba.

- Boudjahem Fayçal chef de station d'épuration de Guelma.

- Douakha M^{ed} AMBT Hammam Meskoutine.

J'adresse également mes remerciements à tous mes amis qui ont inscrit au doctorat pour ses disponibilités.

REMERCIEMENTS

DEDICACE

A l'entame de cette thèse de recherche, je dédie ce travail à mes très chers parents :

Ma chère mère pour sa tendresse, sa patience et son soutien morale

Mon cher père pour son guide vers le droit chemin, sa générosité, ses encouragements et soutien sans limite.

A tous mes frères et mes sœurs et leurs enfants.

A mes oncles et mes tantes et leurs enfants.

A tous mes amis et mes cousins et leurs enfants.

A tous mes collègues de la promotion de doctorat,

A la mémoire de mon amis Fouad Boussakhria, que dieu leur bénisse dans son vaste paradis.

RESUME

Depuis longtemps, les sources chaudes naturelles dans le monde ont joué un rôle considérable dans les sociétés humaines. L'Algérie est considérée parmi les pays riches en eaux thermo-minérales, près de 200 sources ont été inventoriées, qui sont réparties à travers le territoire Nord algérien, majoritaires à l'extrême du Nord-est algérien, parmi ces régions la wilaya de Guelma qui renferme un nombre important des sources thermo minérales le cas de la région de Hammam Meskoutine ainsi que la zone de Hammam Ouled Ali. D'où l'objectif de notre étude.

La région d'étude appartient aux nappes épi-telliennes qui résultent d'une poussée vers le sud de la chaîne du Djebel Dëbagh, où affleure un substratum formé de calcaires Crétacés, sur lequel sont charriées les nappes telliennes, constituées de marnes noires ou grises intercalées de bancs calcaires appartenant au Crétacé et au Tertiaire. Ces conditions géologiques favorisent l'émergence d'un nombre non négligeable des sources thermo-minérales.

Pour mieux comprendre les caractéristiques physico chimiques, l'origine de la minéralisation des eaux de ces sources et sa qualité en matière d'irrigation une étude hydrochimique a été effectuée en deux périodes de prélèvements (2016).

Les résultats obtenus montrent que les faciès chimiques dominants selon le diagramme de Piper est Bicarbonatée magnésien et sulfaté calcique sont à l'origine de lessivage des terrains calcaréo-dolomitiques du Crétacé. La classification de Richards montre que ces eaux gardent même qualité pour l'irrigation dans le temps et dans l'espace. En effet ces eaux peuvent être utilisées pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, à condition que ces sols soient bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée. Le calcul de l'indice de saturation selon le logiciel « PhreeqC » montre que la composition chimique des eaux thermo-minérales est particulièrement interférant avec les minéraux carbonatés qui sont présents largement dans le réservoir. Alors la dissolution de carbonates calciques et magnésiens amène l'eau à saturation vis à vis de ces minéraux. Cependant, l'absence des minéraux évaporitiques dans le réservoir aquifère, à travers le Trias gypso-salin entraîne une sous saturation vis-à-vis de ceux-ci.

Les eaux thermo minérales sont spécifiquement caractérisées par leur teneur en sels dissous, leur température et les gaz qu'elles contiennent. Du fait de leur composition, où interviennent encore des éléments en traces, elles ont généralement un aspect bénéfique dans le traitement de certaines maladies. L'utilisation de l'énergie géothermique est multiple, elles vont des utilisations directes telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la production d'électricité. Elle reste l'un des paramètres les plus importants dans le développement socio-économique local de la région.

Mots clés : eaux thermo-minérales, analyse chimique, minéralisation, développement durable, Hammam Meskoutine.

ABSTRACT

Since a long time, the natural hot springs in the world have played a considerable role in human societies. Algeria is considered among the countries rich in thermo-mineral waters, nearly 200 springs have been inventoried, which are distributed throughout the northern Algerian territory, majority in the extreme north-east of Algeria, among these regions the Wilaya of Guelma which contains a significant number of thermal mineral springs the case of Hammam Meskoutine and Hammam Ouled Ali region, Hence the purpose of our study.

The study area belongs to the epi-Tellian aquifers which result from a thrust towards the south of the Djebel D bagh range, where a substratum formed of Cretaceous limestone's is exposed, on which are carried Tellian layers, consisting of black or gray marls Intercalated limestone banks belonging to the Cretaceous and the Tertiary. These geological conditions favor the emergence of a non-negligible number of thermo-mineral springs.

To better understand the physico-chemical characteristics, the origin of the mineralization of the water from these springs and its quality in terms of irrigation, a hydrochemical study was carried out in two sampling periods (2016).

The results obtained show that the dominant chemical facies according to the Piper diagram are magnesium and sulphate-calcium bicarbonate, causing leaching of the Cretaceous calcar dolomitic soils. The Richards classification shows that these waters retain the same quality for irrigation in time and space. Indeed, these waters can be used for the irrigation of crops tolerant to salts, provided that these soils are well drained or of good permeability and the salinity must be controlled. The calculation of the saturation index according to the "PhreeqC" software shows that the chemical composition of thermo-mineral waters is particularly interfering with the carbonate minerals which are present largely in the reservoir. Then the dissolution of calcium and magnesium carbonates brings the water to saturation with respect to these minerals. However, the absence of evaporitic minerals in the aquifer reservoir, through the gypsum-saline Triassic, leads to under-saturation of these deposits.

Thermal mineral waters are characterized specifically by their content of dissolved salts, their temperature and the gases they contain. Because of their composition, where trace elements are still present, they generally have a beneficial effect in the treatment of certain diseases. The use of geothermal energy is multiple, ranging from direct uses such as fish farming, greenhouse heating and electricity production. It remains one of the most important parameters in the local socio-economic development of the region.

Key words: thermo-mineral waters, chemical analysis, mineralization, sustainable development, Hammam Meskoutine.

ملخص

تاريخيا، لعبت الينابيع الساخنة الطبيعية في العالم دورا هاما في المجتمعات البشرية. وتعتبر الجزائر من بين أغنى البلدان في المياه الحرارية المعدنية، حيث توجد حوالي 200 ينبوع منتشرة في الشمال الجزائري، والغالبية موجودة في الشمال الشرقي للجزائر. من بين هذه المناطق التي تحتوي على عدد كبير من المصادر الحرارية منطقة حمام المسخوطين ومنطقة حمام أولاد علي الموجودة في ولاية قالمة والتي هي هدف دراستنا

تنتمي منطقة الدراسة الى برنامج التحصين الموسع التلى الناتجة عن دفع سلسلة جنوب جبل دباغ. وهي مطاردة مع ركيزة تتكون من الحجر الجيري الطباشيري، مصنوعة من المارل الاسود أو الرمادي مقم بطبقات الحجر الجيري التي تنتمي إلى العصر الطباشيري والعصر الثالث. هذه الظروف الجيولوجية شجعت على ظهور عدد كبير من الينابيع المعدنية الحرارية.

من أجل فهم أفضل الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الساخنة أصل تمعدن المياه ونوعيتها بالنسبة للري اجريت دراسة هيدروكيميائية على فترتين عام 2016 .

تصنيف ريتشاردز يدل على أن هذه المياه تحتفظ بنفس الجودة لأغراض الري في الزمان والمكان. في الواقع هذه المياه يمكن أن تستخدم لري المحاصيل مع نسبة مسموحة للملح ، شريطة أن تكون هذه التربة ذات نفاذية جيدة والملوحة يجب ان تكون مراقبة .

حساب مؤشر التشبع تبين أن التركيب الكيميائي للمياه الحرارية المعدنية تتدخل خاصة مع معادن الكربونات الموجودة على نطاق واسع في الخزان. في حين تحليل كربونات الكالسيوم والمغنيسيوم يجلب الماء للتشبع فيما يتعلق بهذه المعادن. ومع ذلك، فإن عدم وجود المعادن المتبخرة في طبقة المياه الجوفية، من خلال الترياسي يؤدي الى عدم التشبع وجها لوجه من هذه المعادن.

في الواقع، تتميز هذه المياه تحديدا باحتوائها على نسب من الأملاح الذائبة ودرجة الحرارة وكذا بعض الغازات الموجودة بها. نظرا لتكوينها الكيميائي المتميز تكون مفيدة في علاج بعض الأمراض. تتولد من هذه المياه أي المياه الحارة طاقة حرارية تعتبر من ابرز معايير التنمية والنمو الاقتصادي للبلد. لاستخدامها في مجالات عديدة، مثل تربية الأحياء المائية والتدفئة المسببة للاحتباس الحراري وإنتاج الكهرباء وكذا في الزراعة و الري

الكلمات المفتاحية: المياه الحرارية المعدنية، التحليل الكيميائي، تمعدن، التنمية المستدامة، حمام مسكوتين

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	
TABLE DES MATIERES	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
INTRODUCTION GENERALE	1-4
CHAPITRE I- CADRE PHYSIQUE	
I- Situation géographique	5
II- Contexte socio-économique	5
III- Géomorphologie générale	6
1- Le relief	6
IV- Réseau hydrographique	6
V- Conclusion	9
CHAPITRE II-GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE	
I- géologie régionale	10
II- Les différents domaines structuraux	10
1- Le domaine interne	10
2- Le socle kabyle	10
3- La Dorsale Kabyle (la chaîne calcaire)	11
III- Le domaine des flyschs Crétacés-Paléogènes	11
1- Le flysch mauritanien	11
2- Le flysch massylien	11
3- Le flysch numidien	12
IV- Le domaine tellien (domaine externe)	12
1- La série ultra tellienne	12
2- Les séries telliennes (sens strict)	12
3- La série tellienne de Hammam Ouled Ali	13
4- La série tellienne de la région de Ras El Agba - Sellaoua Announa	13
V- L'unité néritique constantinoise	13
VI- Litho-stratigraphie de la constantinoise orientale	14
1- À l'Est de Djebel Débagh	14
2- À l'Ouest du Djebel Débagh	15
3- À Hammam Ouled Ali	15
4- Au Douar Bouzitoune- Heliopolis	15
5- À la station du Nador	15
VII- Le dispositif structural	16
1- La phase atlasique	17
2- La phase miocène inférieure	17
3- La phase tectonique post-nappe	17
VIII- Reconstitution paléogéographique	17

TABLE DES MATIERES

IX- Géologie locale	18
1- Hammam Meskoutine	18
2- Lithostratigraphie	18
2.1- Le Crétacé	19
2.2- L'Eocène supérieur et de l'Oligocène	19
2.3- Miocène continental	20
2.4- Quaternaire	20
3- Tectonique de Débagh	21
3.1- Déformations cassantes	22
3.2- Déformations souples	22
4- Influence du complexe structural	23
5- Hammam Ouled Ali	24
5.1- Le quaternaire	24
5.2- Nappe numidienne	24
5.3- Nappe épi-tellienne	24
X- Les caractéristiques hydrogéologiques	25
1- Introduction	25
2- Identification des nappes	26
2.1- La nappe alluviale de Guelma	26
2.2- La nappe des formations carbonatées d'Héliopolis-Fejouj	26
2.3- La nappe des formations carbonatées : région de Ras El Agba-Sellaoua-Announa	27
2.4- La nappe des formations carbonatées de la région de Bouhachana-Ain Larbi	27
3- Etablissement des coupes hydrogéologiques	27
3.1- Interprétations des coupes hydrogéologiques	27
XI- Les conditions géologiques d'émergence des sources thermales	28
XII. Conclusion	29
CHAPITRE III. CLIMATOLOGIE	
I- Introduction	32
II- Les stations météorologiques	32
III- Les températures	32
IV- Les précipitations	33
1- Analyse statistique des données pluviométriques	33
2- Ajustement des précipitations annuelles à une loi de Gauss	33
3- Précipitations moyennes mensuelles	35
4- Régime mensuel	36
5- Répartition saisonnière des précipitations	37
6- Précipitations annuelles	38
7- Diagramme pluvio-thermique	40
V- Indices climatiques	41
1- Calcul de l'indice d'aridité de MARTONNE (1923)	41
1.1- L'indice d'aridité annuel	41
1.2- L'indice d'aridité mensuel	41
VI- Bilan d'eau	42
1- L'évapotranspiration	43
1.1- L'évapotranspiration potentielle (ETP)	43
1.2- L'évapotranspiration réelle (ETR)	44
1.3- Discussion des résultats	47
2- L'estimation du ruissellement	48

TABLE DES MATIERES

3- Estimation de l'infiltration	49
VII- Conclusion	49
CHAPITRE IV. FACIES CHIMIQUE ET EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE	
I- Introduction	51
1- Matériels et méthodes	51
II- Le chimisme des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	51
1- Faciès chimique	53
1.1- Diagramme de piper	53
1.2- Diagramme de Schöller Berkaloff	53
III- Les Paramètres physico-chimiques	56
1- Les paramètres physiques	56
1.1- Le potentiel d'Hydrogène (pH)	56
1.2- Températures (T°C)	57
1.3- La conductivité électrique (CE)	57
1.4- La salinité	58
1.5- L'Oxygène dissous (O ₂)	59
2- Les paramètres chimiques	60
2.1. Calcium (Ca ²⁺)	60
2.2. Sodium (Na ⁺)	61
2.3. Magnésium (Mg ²⁺)	61
2.4. Potassium (K ⁺)	62
2.5. Chlorure (Cl ⁻)	62
2.6. Sulfates (SO ₄ ²⁻)	63
2.7. Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	63
IV- Le chimisme des eaux de sources thermo-minérales du Hammam Ouled Ali	64
1- Classification chimique des eaux de sources	65
1.1- Diagramme de Piper	65
1.2- Diagramme de Schoeller-Berkaloff	67
V- Les Paramètres physico-chimiques	56
1- Les paramètres physiques	69
2- Les paramètres chimiques	71
2.1. Calcium (Ca ²⁺)	71
2.2. Sodium (Na ⁺)	71
2.3. Magnésium (Mg ²⁺)	71
2.4. Potassium (K ⁺)	71
2.5. Chlorure (Cl ⁻)	72
2.6. Sulfates (SO ₄ ²⁻)	72
2.7. Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	73
VI- Conclusion	74
CHAPITRE V- APTITUDE DES EAUX THERMOMINERALES A L'IRRIGATION	
I- Introduction	75
II- Les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	75
III- Les paramètres des eaux à usage agricoles	75
1- La conductivité électrique (CE)	77
2- Les chlorures	77
3- Le Carbonate de Sodium Résiduel (RSC)	78
4- L'indice de perméabilité	79

TABLE DES MATIERES

5- Risque de magnésium	80
6- Le pourcentage du sodium	80
7- Taux d'absorption du Sodium(SAR)	81
IV- Classification de Richards	82
V- Les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali	84
1- La conductivité électrique	85
2- Les chlorures	86
3- Le Carbonate de Sodium Résiduel	86
4- L'indice de perméabilité	87
5- Risque de magnésium	88
6- Le pourcentage du sodium	89
7-Taux d'absorption du Sodium (SAR)	89
VI- Classification de Richards	90
VII- Conclusion	91
CHAPITRE VI. INDICE DE SATURATION ET ORIGINE DE LA MINÉRALISATION	
I- Introduction	93
II- Etats des minéraux dissous dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	93
1- Calcul de l'indice de saturation (IS)	93
2- Reconstitution des sels dissous	96
III- Etude des valeurs relatives	98
1- Les rapports caractéristiques	98
1.1- Rapport $r \text{Mg}^{2+} / r \text{Ca}^{2+}$	98
1.2- Rapport $r \text{SO}_4^{2-} / r \text{Cl}^-$	99
1.3- Rapport $r \text{Na}^+ / r \text{Cl}^-$	99
IV- Etats des minéraux dissous dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali	99
1- Calcul de l'indice de saturation (IS)	99
V- Reconstitution en sels dissous	102
VI- Etude des valeurs relatives	104
1- Les rapports caractéristiques	104
1.1- Rapport $r \text{Mg}^{2+} / r \text{Ca}^{2+}$	105
1.2- Rapport $r \text{SO}_4^{2-} / r \text{Cl}^-$	105
1.3- Rapport $r \text{Na}^+ / r \text{Cl}^-$	105
VII. Conclusion	105
CHAPITRE VII. ORIGINE DES TRAVERTINS ET AFFAISSEMENT DE LACASCADE DE H-MESKOUTINE	
I- Introduction	106
II- Précipitation du carbonate de calcium	106
III- Formation des roches calcaires	106
1- Dépôts d'origine chimique	107
2- Dépôts d'origine biologique	107
IV- Différents types de travertins	107
V- Les formations travertineuses dans le monde	108

TABLE DES MATIERES

1- Les cascades de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali (Algérie)	108
VI- Déformation et affaissement de la cascade hydrothermale de Hammam Meskoutine	109
1- Phénomène mécanique de déshydratation	110
2- Étude du sol	110
VII- La reconstitution de la cascade hydrothermale de Hammam Meskoutine	116
1- Etude hydro-chimique	116
2- Matériels et méthodes	116
3- Evolution des paramètres physico-chimiques analysés in situ	118
3.1- La température	118
3.2- Le pH	119
3.3- La conductivité	120
3.4- L'évolution du Cl, HCO ₃ , CaCO ₃ et SO ₂	120
VIII- Conclusion	122
CHAPITRE VIII. THERMALISME ET DEVELOPPEMENT DURABLE	
I- Introduction	123
II- Evolution des thermes et du thermalisme dans le monde	123
1- Chez les Grecs	123
2- Chez les Romains	124
3- Les bains Islamiques	124
III- Thermalisme moderne	124
IV- Thermalisme en Algérie	124
V- Les modes de fonctionnement	125
VI- Classification des eaux thermales	125
VII- Types de sources	126
1- Source chaude	126
2- Source de chaleur	127
3- Les geysers	127
VIII- Developpement durable	128
1- Géothermie	128
2- La géothermie dans le monde	128
3- La géothermie en Algérie	129
4- Les différents types de la géothermie	130
5- Domaines d'applications de la géothermie	130
6- Avantages et inconvénients de la géothermie	131
6.1- Avantages	131
6.2- Inconvénients	132
7- Exemple d'exploitation des eaux chaudes dans le chauffage des locaux	132
7.1- Introduction	132
7.2- Chauffage des Bungalows du complexe Hammam Chellala	132
8- Hydrothérapie	133
8.1- Les pathologies traitées par l'eau thermale	133
8.2- Dimension sociale du thermalisme	134
8.2.1- Le curiste	134

TABLE DES MATIERES

8.2.2- La cure thermale	134
8.2.3- La station thermale	135
8.2.4- Tourisme thermal	135
9- L'évolution des touristes et curistes dans la région d'étude	135
9.1- À Hammam Meskoutine	135
9.2- À Hammam Ouled Ali	136
10- Participation des stations thermales au développement durable	136
10.1- Sur le plan économique	136
10.2- Sur le plan social	137
10.3- Sur le plan de santé et bien-être	137
11- Impact des effets négatifs sur le thermalisme dans la zone d'étude	138
IX- Conclusion	138
CONCLUSION GENERALE	140
REFERENCES BIBLIOGRAPHIES	
ANNEXE 1: LES FORMATIONS TRAVERTINEUSES	
1- HAMMAM MESKOUTINE	
2- LES 10 EXTRAORDINAIRES FORMATIONS TRAVERTINEUX DANS LE MONDE	

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1: Situation géographique des sites d'observation	05
Figure 2: Carte du relief et du réseau hydrographique de la wilaya de Guelma (Mouchara; 2009)....	08
Figure 3: Schéma structural de la chaîne des Maghrébines (Delga et Fontboté, 1980).	10
Figure 4: Coupe représentant les différentes formations de Dj. Debagh (Benrabah ; 2013).....	13
Figure 5: Situation actuel de la plate-forme néritique constantinoise par rapport au domaine des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie Nord-Orientale. Bureau ,1970 et Vila ,1980 modifiée) in (Ben Ali; 2014)	14
Figure 6: Les formations autochtones des séries néritiques constantinoises de la région de.....	16
Figure 7: Extrait de la carte géologique de Hammam Meskoutine Feuille n° 53. Echelle 1/50000	19
Figure 8: Log stratigraphique du Djebel Debagh (SONAREM ; 1976) in (Ben Ali et al.; 2014).	21
Figure 9: Coupe géologique; Source Raoult ; 1973	23
Figure 10: Extrait de la carte géologique de Guelma feuille n°54. Echelle 1/50000	25
Figure 11: Coupe hydrogéologique dans la région de Hammam Ouled Ali (Gaud; 1974)	28
Figure 12: Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma (Gaud; 1974).....	29
Figure 13: Schéma explicatif : phénomène d'émergence des sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali; Source: Kahalerras;1968	30
Figure 14: Températures mensuelles moyennes.....	33
Figure 15: Ajustement graphique à une loi de Gauss des précipitations annuelles St de Héliopolis (1989/90-2012/2013).....	34
Figure 16: Ajustement graphique à une loi de Gauss des précipitations annuelles St du barrage de Hammam Débagh (1989/90-2012/2013).....	34
Figure 17: Variations mensuelles du coefficient de variation	35
Figure 18: Répartitions mensuelles moyennes des précipitations à travers les deux stations.....	36
Figure 19: Régime pluvial mensuel des différentes stations	37
Figure 20: Répartition saisonnière des pluies.....	38
Figure 21: Evolution moyenne annuelle des précipitations à travers les deux saisons.....	39
Figure 22: Carte pluviométrique de la zone d'étude	39
Figure 23: Diagramme pluvio-thermique des deux stations (1989/90-2012/13)	40
Figure 24: Indice mensuel d'aridité à trvers la zone d'étude (1989/90-2012/13).....	42
Figure 25: Bilan d'eau de C.W.Thornthwaite à la station du barrage de Hammam Débagh (1989/90-2012/13).....	46
Figure 26: Bilan d'eau de C.W.Thornthwaite à la station d'Héliopolis (1989/90-2012/13).....	47

LISTE DES FIGURES

Figure 27: Carte d'inventaire des points de prélèvements dans la région de Hammam Meskoutine..	52
Figure 28: Diagramme de Piper des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Hautes eaux ; b) Basses eaux	54
Figure 29 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Hautes eaux ; b) Basses eaux	55
Figure 30: La variation du pH dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine	56
Figure 31: La variation de la température dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine	57
Figure 32: La variation de la conductivité électrique dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine	58
Figure 33: La variation de la salinité dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine	59
Figure 34: La variation d'O ₂ dissous dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine	59
Figure 35: Evolution spatio-temporelle du calcium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	60
Figure 36: Evolution spatio-temporelle du sodium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	61
Figure 37: Evolution spatiotemporelle du magnésium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	61
Figure 38: Evolution spatio-temporelle du potassium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	62
Figure 39: Evolution spatio-temporelle du chlorure dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	62
Figure 40: Evolution spatio-temporelle du sulfate dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	63
Figure 41: Evolution spatio-temporelle du bicarbonate dans les eaux de sources thermo-minérale Hammam Meskoutine	63
Figure 42: La variation saisonnière des paramètres chimiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine	64
Figure 43: Carte d'inventaire de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali	65
Figure 44: Diagramme de Piper des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des hautes eaux	66
Figure 45: Diagramme de Piper des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des basses eaux	66
Figure 46: Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des hautes eaux	68

LISTE DES FIGURES

Figure 47: Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des basses eaux.....	68
Figure 48: L'évolution spatio-temporelle des paramètres physiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali : a) La conductivité électrique; b) La température; c) PH; d) O ₂ dissous; e) La salinité.....	70
Figure 49: L'évolution spatio-temporelle des cations des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali : a) Ca ; b) Mg ; c) Na ; d) K	72
Figure 50: L'évolution spatio-temporelle des anions des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali: a) HCO ₃ ; b) Cl ; c) SO ₄	74
Figure 51: La variation des chlorures dans les différentes sources de Hammam Meskoutine	78
Figure 52: La variation du carbonate de sodium résiduel dans les différentes sources de Hammam Meskoutine.....	79
Figure 53: La variation de l'indice de perméabilité dans les différentes sources de Hammam Meskoutine.....	79
Figure 54: La variation du risque de magnésiums dans les différentes sources de Hammam Meskoutine.....	80
Figure 55: La variation du pourcentage du sodium dans les différentes sources de Hammam Meskoutine.....	81
Figure 56: La variation du taux de SAR dans les différentes sources de Hammam Meskoutine	82
Figure 57: Aptitude des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine à l'irrigation selon la classification de Richards : a) Hautes eaux : b) Basses eaux.....	84
Figure 58: La variation des chlorures dans les différentes sources de Hammam Ouled Ali.....	86
Figure 59: La variation du RSC dans les différentes sources de Hammam Ouled Ali.....	87
Figure 60: La variation de l'indice de perméabilité dans les différentes sources de Hammam Ouled Ali	88
Figure 61: La variation du risque de magnésiums dans les différentes sources de Hammam Ouled Ali	88
Figure 62: La variation du Na% dans les différentes sources de Hammam Ouled Ali.....	89
Figure 63: La variation du SAR dans les différentes sources de Hammam Ouled Ali.....	90
Figure 64: Aptitude des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali à l'irrigation selon la classification de Richards : a) Hautes eaux : b) Basses eaux	91
Figure 65: Etat des minéraux évaporitiques dans les eaux thermo-minérales de Hammam Meskoutine: a) Basses eaux; b) Hautes eaux	95
Figure 66: Etat des minéraux carbonatés dans les eaux thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Basses eaux; b) Hautes eaux	96

LISTE DES FIGURES

Figure 67: Représentation des sels dissous des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine: a) Basses eaux; b) hautes eaux.....	97
Figure 68: Etat des minéraux carbonatés dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali. a) Hautes eaux; b) Basses eaux.....	101
Figure 69: Etat des minéraux évaporitiques dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali. a) Hautes eaux; b) Basses eaux.....	102
Figure 70: Représentation les sels dissous des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali.....	103
Figure 71: Baishuitai, Yunnan, Chine.....	108
Figure 72: Mammoth Hot Springs, États-Unis	108
Figure 73: cascade Hammam Meskoutine (Benamara; 2011).....	109
Figure 74: cascade Hammam Ouled Ali (Benamara; 2017).....	109
Figure 75: Localisation des points de prélèvement.....	111
Figure 76: Appareil de cisaillement rectiligne à la boîte	112
Figure 77: La courbe de la contrainte en fonction de déplacement.....	113
Figure 78: Contrainte normale en fonction de cisaillement.....	114
Figure 79: Points d'analyse	117
Figure 80: L'évolution de la température.....	118
Figure 81: Le coefficient de dégradation de la température (hautes et basses eaux).....	119
Figure 82: La variation spatiotemporelle du pH en fonction de la température.....	119
Figure 83: La variation spatiotemporelle de la conductivité en fonction de la température.....	120
Figure 84: Variation spatiotemporelle de différents paramètres chimiques (Cl^- ; dureté; SO_4^{2-} ; HCO_3^-) en fonction de la température (hautes et basses eaux).....	121
Figure 85: Source chaude en Etats Unis	126
Figure 86: Source chaude en Algérie (cascade de Hammam Meskoutine).....	126
Figure 87: Geyser du château (Etats Unis).....	127
Figure 88: Geyser d'Island.....	128
Figure 89: Carte géologique du Nord de l'Algérie, Source : (Fekraoui et al.; 1995).....	130
Figure 90: Schéma de la partie expérimentale (Semmar; 2002).....	133
Figure 91: Evolution de curistes et touristes dans le site thermal de Hammam Meskoutine	136
Figure 92: Evolution de curistes et touristes dans le site thermal de Hammam Ouled Ali	136

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

	<i>Page</i>
Tableau 1: Les caractéristiques des stations météorologiques.....	32
Tableau 2: Température moyenne mensuelle en °C.....	32
Tableau 3: Variabilité spatio-temporelle des pluies dans la région du Hammam Débagh et Hammam Ouled Ali.....	35
Tableau 4: Coefficient pluviométrique relatif mensuel d'après méthode d'Angot /1895.....	37
Tableau 5: Répartitions saisonnières des précipitations.....	38
Tableau 6: Indice d'aridité annuel (A) des deux stations (1989/90-2012/13).....	41
Tableau 7: Indice mensuel d'aridité (I) (1989/90-2012/13).....	42
Tableau 8: Calcul de l'E.T.P selon la méthode C.W. Thornthwaite (1989/90-2012/13).....	43
Tableau 9: Estimation de l'ETR annuelle selon la méthode de Turc.....	44
Tableau 10: Estimation de l'ETR annuelle selon la méthode de COUTAGNE.....	45
Tableau 11: Bilan Hydrique de Thornthwaite de la station du barrage de Hammam Débagh.....	46
Tableau 12: Bilan Hydrique de Thornthwaite de la station d'Héliopolis (1989/90-2012/13).....	47
Tableau 13: Récapitulatif des ETR calculé par les différentes méthodes.....	48
Tableau 14: Estimation de ruissellement selon la formule de Tixeront-Berkaloff.....	49
Tableau 15: Estimation de l'infiltration selon l'équation globale du bilan d'eau.....	49
Tableau 16: Les coordonnées des différents points de prélèvement.....	52
Tableau 17: Traitement statistique des paramètres physiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine.....	56
Tableau 18: Paramètres statistiques des ions majeurs des eaux de sources thermo-minérales.....	60
Tableau 19: Les coordonnées des différents points de prélèvement de Hammam Ouled Ali.....	64
Tableau 20: Les faciès chimiques selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	67
Tableau 21: Les paramètres physiques des eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali.....	69
Tableau 22: Paramètres statistiques des ions majeurs des eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali.....	71
Tableau 23: Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation.....	76
Tableau 24: Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation de Hammam Meskoutine (2016).....	76
Tableau 25: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon les normes d'irrigation de la conductivité électrique.....	77
Tableau 26: Classification des eaux de sources de Hammam Maskoutaine selon les normes.....	77
Tableau 27: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon RSC.....	78
Tableau 28: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon IP.....	79

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 29: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon Mg R (%).....	80
Tableau 30: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon Na%.....	81
Tableau 31: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon SAR	82
Tableau 32: Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation de Hammam Ouled Ali (2016).....	85
Tableau 33: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon les normes d'irrigation de la conductivité électrique	85
Tableau 34: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon les normes d'irrigation des chlorures.....	86
Tableau 35: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon RSC.....	87
Tableau 36: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon IP (%).....	87
Tableau 37: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon Mg R (%)	88
Tableau 38: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon Na%	89
Tableau 39: Classification des eaux de sources de Hammam Ouled Ali selon SAR (méq/l).....	89
Tableau 40: Indice de saturation des minéraux dissous dans les eaux thermo-minérales du Hammam Meskoutine.....	93
Tableau 41: Les sels dissous des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine.....	98
Tableau 42: Les rapports caractéristiques des sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine .	99
Tableau 43: Indice de saturation des minéraux dissous dans les eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali	100
Tableau 44: Les sels dissous des eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali.....	104
Tableau 45: Les rapports caractéristiques des eaux de sources thermo-minérales du Hammam Ouled Ali.....	104
Tableau 46: Tableau récapitulatif des résultats des essais.....	112
Tableau 47: Classification des sols selon la norme de cohésion	116
Tableau 48: Travaux in situ et appareillage.....	117
Tableau 49: Classification des eaux thermales (Moret; 1946).....	125
Tableau 50: Production électrique par les énergies renouvelables (Fekraoui; 1999)	129
Tableau 51: Les différentes applications de la géothermie (Diagramme de Lindal).....	130

INTRODUCTION GENERALE

L'eau thermale à une origine purement météorique avec une domination de sa minéralisation par dissolution des minéraux de l'aquifère sous une puissante pression partielle de CO₂ (Kallegis et Lambrakis, 2005). La dissolution de certains minéraux des calcaires est due à la forte température des eaux provenant initialement de la surface, sous l'influence des vapeurs d'eau surchauffée (Povara et al., 2008). Autrefois les eaux thermo-minérales sont considérées comme miraculeuses, leurs origines sont énigmatiques et laissent les gens à inventer des histoires bien adaptées à leurs situations.

Actuellement, grâce aux recherches nous connaissons mieux aujourd'hui l'origine de quelques émergences thermales et le mécanisme de leur manifestation, connaissances géologiques des gisements, chimie des eaux, relation entre les structures géologiques, composition des eaux thermo-minérales et orientations thérapeutiques, tel est le vaste domaine de la connaissance de la ressource naturelle jusqu'à son émergence thermo-minérale. Les caractéristiques des eaux thermo-minérales sont affecté pour définir les changements éventuelles de leur qualité et de leurs origines (Alayat et al.; 2007).

L'importance de l'eau était bien connue dans la préhistoire et dans l'ancienne du monde. Il y a, dans les poèmes homériques, plusieurs descriptions de baignades froides et chaudes, témoin de leur emploi dans la culture grecque antique. Les romains, héritiers de la culture étrusque, a fait les bains une question sociale et publique, et à Rome le thermale atteint un haut degré de perfection (Melillo, 1995).

Dans les temps anciens, la présence de sources chaudes ne trouvait que d'explications dans les effets religieuses. Jusqu'au XIXème siècle, les textes ne traitent que des aspects descriptifs des eaux thermales et de leurs effets thérapeutiques (Baudry ; 1736, Socquet ; 1824). Dès les premiers âges de l'humanité, les eaux chaudes ont été cherchées par l'être humain pour se soigner, elles sont utilisées dans le traitement de diverses pathologies (Laure Sanders, 2006). Des milliers des stations thermales dans le monde complet reçoivent, des millions de curistes (Duriez; 2006): l'Europe de l'Ouest, l'Europe de l'Est, l'Afrique du Nord, le Moyen et le Proche-Orient, les Antilles et Cuba, l'Amérique du Sud et l'Asie. La géothermie reste un des paramètres les plus prépondérants dans le développement et l'accroissement économique d'un pays (Semmar et al.; 2002). Certaines sources des énergies renouvelables sont évaluées à la géothermie. Les potentialités d'utilisation de cette énergie géothermique sont multiples et variées. Elles conduisent des utilisations directes, telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie aux utilisations industrielles, telles que la production d'électricité.

En Algérie les ressources géothermiques sont de type bas enthalpie, et la majorité de ces ressources géothermiques sont situés dans le Nord- est du pays, la hydrothérapie demeure pratiquement la seule utilisation directe de cette énergie, et parfois le chauffage du locaux.

La grande richesse de l'Algérie en eaux thermo-minérales est très connue depuis longtemps, cependant la répartition spatiale de ces eaux est très irrégulière. Le nombre des sources thermo-minérales augmente lorsqu'on se rapproche de l'est algérien. Cette propriété thermo-minérale est contenue plus de 200 sources ou sites thermaux comptés, ce qui représente des futurs pôles thermaux à développer et investissements touristiques.

La région d'étude recèle un potentiel historique et naturel digne d'un pôle touristique de premier plan, capable d'offrir aux visiteurs une gamme diversifiée de services, le thermalisme s'y impose inévitablement en tant qu'atout maître. Les stations thermales de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali, ont basé leurs activités économiques sur les bains médicaux, dont la majorité sont exploitées par les privés. Ces eaux à des compositions très variées et répondant à tous les besoins de la thérapeutique moderne (Ehrmann, 1922).

Dans le nord-est Algérien les eaux thermo-minérales constituent une merveille cascade, occupe une surface presque verticale de trente mètres de hauteur et une centaine de mètres de largeur. La surface tombante est coupée en différents points comme par des étages de vasques élégantes qui amortissent la chute de l'eau. L'eau coule en abondance, affectant les couleurs les plus variées, aux endroits secs ou à courant peu considérable, ses incrustations calcaires sont colorées en teintes diverses dont les jaunes rougeâtres provenant de la présence de champignons microscopiques. L'histoire merveilleuse se raconte la légende de Hammam Meskoutine sous la tente, se propage dans les douars, et devient bientôt une croyance. Un arabe riche et puissant avait une sœur, elle est la trop belle, il voulut l'épouser, malgré la défense absolue du Coran. Quand la fête débute et les plats de couscous et de viande des moutons sont servis aux invités, cependant où le couple damné va se retirer, les éléments sont bouleversés, la foudre gronde, le feu du diable sort de la terre, des eaux brûlantes inondent le lieu du fête. Alors le calme se rétablit, on trouve l'arabe et sa sœur, les gens de loi, les invités, les danseuses et les esclaves changés en pierres. Les cônes représentent tous les acteurs de ce drame. Mais la source rejette encore des grains de couscous pétrifiés. En fin nous connaissons l'origine de ces merveilles formations (cônes, cascades,...) et nous avons l'explication qui nous éclaire les récits merveilleux, dont le temps et la tradition nous dérobent le sens caché. Reste la science seule qui peut le découvrir, car elle dévoile les lois éternelles et immuables qui régissent les phénomènes naturels.

INTRODUCTION GENERALE

Cependant les activités et l'intrusion humaine sur ces eaux les rendent parfois polluer ou les dévient de leurs chemins, cette dernière action nuit à l'aspect physique des cascades telle que celle de Hammam Meskoutine. À long terme ces faits peuvent devenir néfaste et faire disparaître ce beau paysage. Donc il est temps de bien réagir afin de sauvegarder ce patrimoine national.

PROBLIMATIQUE

Comme partout dans le monde, les eaux thermo-minérales restent toujours un domaine très vaste à explorer tant au point de vue origine que qualité. En Algérie, depuis longtemps les eaux thermo-minérales ont pris une attention particulière et ont toujours joué un rôle socio-économique important. Les eaux thermo-minérales avant de se refroidir, déposent des sels minéraux, ces derniers peuvent être de formes banales ou des formes d'architecture extraordinaire et spectaculaire (cascade). Cependant l'exploitation intensive et anarchique de ces eaux, donne un affaissement ou un éboulement de ces formes.

La dégradation de la cascade risque de nuire au développement durable du secteur socio-économique de la région. Afin de la préserver, la cascade doit être prise en charge et attirer l'attention des autorités. Cette situation nous a laissé s'approcher du problème, de l'étudier scientifiquement et de contribuer à sa résolution.

Pour mieux comprendre l'origine de quelques émergences thermo-minérales, chimie des eaux, minéralisation, thermalité, orientation thérapeutique et touristique, une étude détaille ces connaissances sur les sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine et Ouled Ali (Guelma).

Pour pouvoir éclairer cette problématique et détailler tous les points soulevés, les parties suivantes ont été abordées :

- La première partie contient trois chapitres cadre physique de l'étude (situation géographique ou on a présenté les deux sites thermaux Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali), géologie et hydrogéologie (d'une importance capitale dans la présente étude, qui met en évidence l'influence de la lithologie sur l'émergence des sources thermo-minérales, l'explication de l'alimentation des aquifères et la relation nappes souterraines et sources thermo-minérales) et climatologie (qui nous renseignera sur le bilan hydrique).
- L'analyse hydrochimique constitue la partie principale de notre travail, elle est basée sur les analyses effectuées au niveau des eaux de sources thermo-minérales de la région de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali.
- La troisième partie concerne le chapitre du thermalisme et développement durable, qui explique le rôle thérapeutique des eaux thermo-minérales, ainsi l'intérêt socio-économique lié aux sources thermo-minérales.
- Une conclusion générale assemble tous les points importants de notre étude.

PARTIE I: CADRE GENERAL

❖ ***CHAPITRE I: CADRE PHYSIQUE***

❖ ***CHAPITRE II: GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE***

❖ ***CHAPITRE III: CLIMATOLOGIE***

CHAPITRE I: CADRE PHYSIQUE

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE

La zone d'étude comprend deux sites d'observation : Hammam Meskoutine et Ouled Ali. Ils sont situés dans la wilaya de Guelma (Nord-est Algérien), entre la latitude $36^{\circ}27'00''$ et $36^{\circ}36'00''$ Nord et la longitude $7^{\circ}12'00''$ et $7^{\circ}24'00''$ Est (Figure 1). Administrativement, la zone d'étude est limitée au Nord par les wilayas d'Annaba et de Skikda ; au Sud par Oum-El Bouaghi et Constantine.

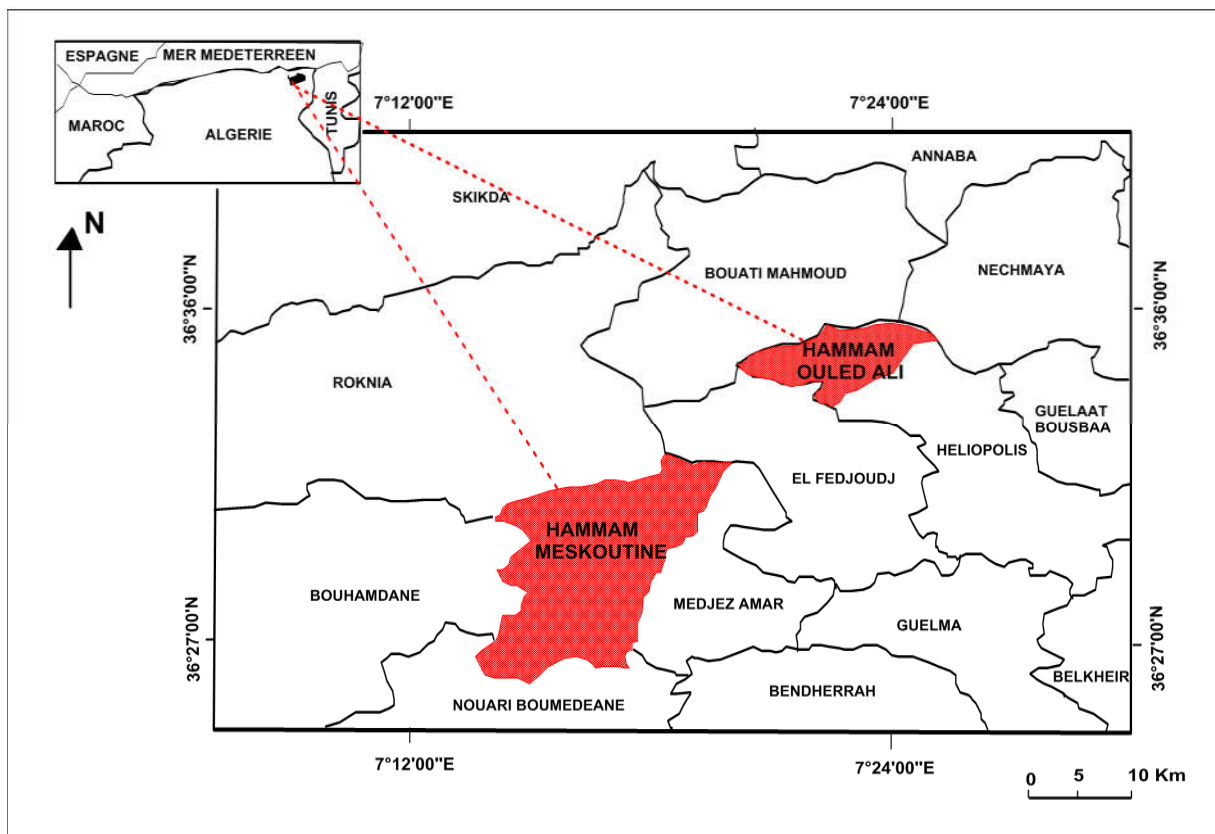


Figure 1: Situation géographique des sites d'observation

II. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

La région d'étude est un pôle régional incontournable en termes de thermalisme avec les sources de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali. Elle recèle un potentiel historique et naturel digne d'un pôle touristique de premier plan, capable d'offrir aux visiteurs une gamme diversifiée de services, le thermalisme s'y impose incontestablement en tant qu'atout maître. A Hammam Meskoutine il s'agit d'un complexe (Hammam Chellala) et trois stations thermales (Ben Nadji, Kharchiche et la vieille station thermale), elles reçoivent en nombre plus d'un million de visiteurs par an (curistes et touristes), venant de toutes les régions du pays et

parfois de l'étranger. Ces stations créent une dynamique sur le plan économique. L'utilisation et l'exploitation des eaux thermo-minérales constituent une hauteur très élevée de recettes, d'autres activités commerciales et artisanales sont développées comme emplois. À une quinzaine de kilomètres du chef-lieu de la wilaya de Guelma, l'agglomération de Hammam Ouled Ali, relevant de la commune d'Héliopolis. Il s'agit qu'une station thermale communale depuis les années soixante-dix. En effet, depuis des années, ce petit village abrite deux complexes thermaux gérés par des privés, le Complexe Bouchahrine et le Complexe Thermal El Baraka.

Pour promouvoir le tourisme dans cette région, les autorités locales ont mis en œuvre un large programme de développement de l'industrie touristique qui vise, notamment, à favoriser les investissements dans la filière thermique. Ainsi une étude envisagée pour l'aménagement et l'extension des zones touristiques à vocation thermique, à Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali, permettra de renforcer davantage le tourisme thermal dans cette wilaya en lui faisant faire un "grand bond qualitatif", selon le directeur de wilaya du tourisme.

III. GEOMORPHOLOGIE GENERALE

1. LE RELIEF

Le relief de la région d'étude est diversifié, on retient essentiellement une importante couverture forestière composé dans sa majorité par des montagnes, dont les principales sont :

- Taya (Bouhamdane) qui culmine à 1208 m,
- Debagh qui culmine à 1060 m.

Au Nord-Ouest, les derniers abrupts calcaires de djebel Debagh (1060 m) se confondent dans les formations marneuses ou gréseuses à relief plus doux. Djebel Taya (1208 m) l'autre calcaire continue vers l'Ouest, il sépare le bassin d'oued Saf saf au Nord et le bassin d'oued Bouhamdane au Sud.

À l'ouest de la zone d'étude, les reliefs sont très variés, la vallée large et profonde de l'oued Cherf qui s'écoule au Sud vers le Nord, dans les plaines élevées de la région de Ras El Agba (700 – 800 m), et les vallées profondes en aval et amont de Bordj Sabath.

IV. RESEAU HYDROGRAPHIQUE

Le réseau hydrographique principal et localisé au long des axes des principaux plissements. Il est situé dans la région Nord-est du territoire national, le bassin du Seybouse s'étend sur une longueur de 240 km. Il touche près de 86 communes sur 7 wilayas de l'est du pays : Annaba, El Tarf, Skikda, Oum El Bouaghi, Constantine, Souk Ahras et Guelma.

D'après (l'A.N.R.H.; 2005) les principaux cours d'eau qui constituent le réseau hydrographiques sont :

L'Oued Seybouse (57,15 km) présente l'axe de drainage du bassin versant. Il a un apport annuel de 408 Hm³/an à la station de Boudaroua et prend naissance dans les hautes plaines de (Haracta, Ain Abid et Sedrata), et il se jette dans la Méditerranée après un parcours de 160 km (Debbieche; 2002). Le débit varie de (0 à 100 m³.S⁻¹), il peut atteindre les valeurs de 630 m³.S⁻¹ (observées le 01/01/1985, selon l'A. N. R. H. d'Annaba).

Ses principaux affluents sont (Figure 2):

- L'Oued Bouhamdane (45,37 km) résulte de la jonction de deux cours d'eau importants : l'oued Sabath et l'oued Zenati, drainant respectivement une superficie de 296.09 Km² et de 592.15 Km² et dont la confluence donne naissance à l'oued Bouhamdane qui reçoit dans sa rive gauche oued El Hamira. Ce dernier apporte 96 Hm³ /an, à la station de Medjez Amar II.
- L'Oued Cherf (36,46 km), au Sud-ouest, apporte 107 Hm³/an à la station de Medjez Amar I.
- L'Oued Mellah au sud-est a un apport de 151 Hm³/an, à la station de Bouchegouf.

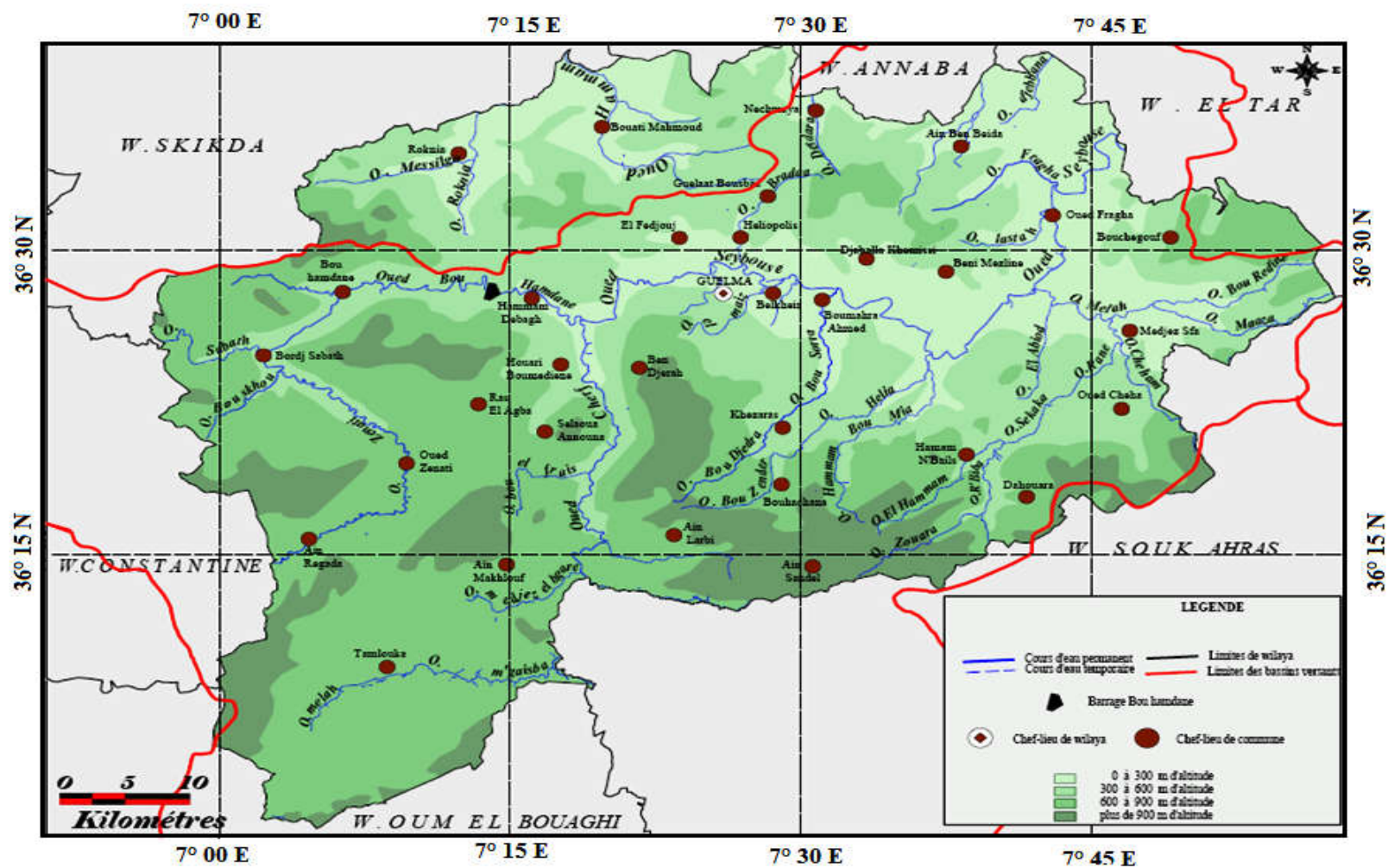


Figure 2: Carte du relief et du réseau hydrographique de la wilaya de Guelma (Mouchara; 2009)

V- CONCLUSION

La région d'étude est un pôle régional incontournable en termes de thermalisme avec les sources de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali. Elle est située au nord-est Algérien entre la latitude 36°27'0" et 36°36'00" Nord et la longitude 7°12'00" et 7°24'00" Est. Elle recèle un potentiel historique et naturel digne d'un pôle touristique de premier plan, capable d'offrir aux visiteurs une gamme diversifiée de services, le thermalisme s'y impose incontestablement en tant qu'atout maître. Le relief est diversifié, on retient essentiellement une importante couverture forestière composé dans sa majorité par des montagnes, dont les principales sont: Taya (Bouhamdane) qui culmine à 1208 m, et Debagh qui culmine à 1060 m. les principaux cours d'eau qui constituent le réseau hydrographiques sont: L'Oued Seybouse (57,15km), L'oued Bouhamdane (45,37 km), l'Oued Cherf (36,46 km) et l'Oued Mellah.

CHAPITRE II: GEOLOGIE ET HYDROGEOLOGIE

I. GEOLOGIE REGIONALE

La chaîne des maghrébines d'Algérie orientale (la chaîne alpine d'Afrique du Nord) fait partie de l'orogène alpin périméditerranéen (Delga, 1969) d'âge tertiaire. Cette chaîne s'étend sur 2000 km de l'Ouest à l'Est à partir de l'Espagne du Sud à l'arc calabro-sicilien, et surtout contient le Rif marocain, l'Atlas littoral d'Algérie (kabylie et Tell), de Tunisie (kroumirie – Nefza) et enfin la Sicile Calabre (Italie) (Lahondère, et Chouabbi, 1987). Elle se trouve entre deux plaques paléo-marge, l'Afrique (au Sud) et l'Europe (au Nord). On distingue généralement dans ce domaine les zones internes, qui représentées par différents massifs, et les zones externes situées le long de la côte méditerranéenne. Cette chaîne (Figure 3) a connu des domaines structuraux (le domaine des nappes ou domaine allochtone).

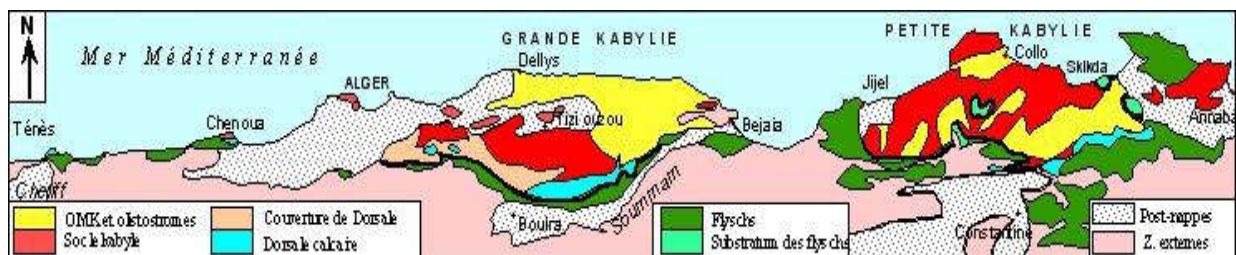


Figure 3 : Schéma structural de la chaîne des Maghrébines (Delga et Fontboté, 1980).

II. LES DIFFERENTS DOMAINES STRUCTURAUX

D'après Vila, (1980), Le secteur d'étude appartient à l'ensemble géologique du Tell externe d'Algérie Nord orientale. On distingue du Nord vers le Sud, plusieurs domaines structuraux et Paléogéographiques bien distincts :

1. LE DOMAINE INTERNE

Il comprend le socle kabyle et sa couverture sédimentaire du Paléozoïque au Tertiaire, bordés au sud par la dorsale Kabyle ou chaîne calcaire (Ben Ali et al.; 2014).

2. LE SOCLE KABYLE

Il est représenté par des formations cristallophylliennes. D'après (Delga ; 1969, Raoult ; 1974 et Bouillin ; 1977), le socle kabyle comporte de bas en haut les ensembles suivants :

- Un ensemble cristallin profond appartenant au faciès des granulites ;
- Un ensemble gneissique, admettant des intercalations de quartzites, d'amphibolites, de marbres et de pyroxénites ;

- Un ensemble phylladitique qui a subi un métamorphisme de basse pression avec une zone inférieure à biotite et une zone supérieure à chlorite.

3. LA DORSALE KABYLE (LA CHAÎNE CALCAIRE)

Elle constitue la couverture sédimentaire de la bordure méridionale du socle kabyle. Elle comprend des formations Permo-Trias au Lutétien (Ben Ali, et al. 2014).

D'après (Raoult ; 1974 et Vila ; 1980), les termes qui forment cette chaîne concordent à trois domaines paléogéographiques, on distingue du Nord vers le Sud :

- La Dorsale interne : représentée par une série complète allant du Permo-Trias à l'Oligocène ;
- La Dorsale médiane : caractérisée par des dépôts constants à dominante marneuse et à microfaune pélagique du Turonien ou Lutétien, présentant une lacune du Crétacé moyen ;
- La Dorsale externe : elle est définie par des terrains du Jurassique et du Crétacé supérieur et par un Eocène détritique et lacuneux.

III. LE DOMAINE DES FLYSCHS CRETACES-PALEOGENES

D'après Raoult (1972), les terrains allochtones sont d'âge Crétacé à Eocène. Ce domaine contient deux grands groupes de flyschs, le flysch mauritanien et le flysch massylien. Un 3^{ème} groupe du flysch appelé le flysch numidien (ce groupe et le plus récents).

1. LE FLYSCH MAURITANIEN

Ce flysch représente une série qui change du Malm au Priabonien. On distingue de bas en haut (Ben Ali, et al. 2014):

- Des calcaires du Tithonique-Néocomien, ils passent vers le haut à une forte masse de grès (flysch de Guerrouch) de l'Albo-Aptien et de pelite ;
- Des microbrèches silicifiées à ciment sparitique à quartz détritique du cénomaniens et Turonien inférieur ;
- Un ensemble complexe de marnes, sableux et de calcaires microbréchiques, des conglomérats au sommet et, des grès micacés du Turonien au Lutétien supérieur.

2. LE FLYSCH MASSYLIEN

En 1969 Raoult a été proposé le terme de flysch massylien pour déterminer les formations détritiques schisto-quartzeuses (flysch albo-aptien de Glangeaud, 1932).

Ce dernier comprend les termes lithologiques suivants :

- Argiles et grès plus ou moins quartzitiques de l'Albo-Aptien ;

- Des phtanites argileuses et conglomérats avec des marnes à bancs calcaires du Cénomaniens inférieur ;
- Des marnes et des argiles schisteuses à lits de grès calcaireux et des conglomérats du Sénonien.

3. LE FLYSCH NUMIDIEN

Composés de niveaux gréseux d'âge Oligocène terminal-aquitaniens épais de plusieurs centaines de mètres qui reposent sur des argilites multicolores oligocènes. Ces flyschs reposent anormalement à la fois sur les zones internes et sur les zones externes (Ben Ali, et al. 2014).

IV. LE DOMAINE TELLIEN (DOMAINE EXTERNE)

Ce domaine est constitué par un ensemble de nappes allochtones pelliculaires constituées principalement de marnes d'âge Crétacé moyen à Néogène et qui ont été charriées sur une centaine de km vers le Sud. Ce dernier se subdivise en quatre séries qui sont du nord au sud (Vila; 1980) :

1. LA SERIE ULTRA TELLIENNE

En 1969 Delgadé désigne les séries superposées anormalement au Crétacé néritique constantinois du Djebel Débagh et du Douar Bouzitoune dans la région de Guelma sous le terme ultra-tellien. Ces séries sont définies par le critère simple de dominance des faciès clairs durant tout le Crétacé (Benmarce; 2007).

2. LES SERIES TELLIENNES (SENS STRICT)

Ces séries (Figure 4) vont du Trias au Lutétien et présentent des variations du faciès dans le temps. A un Lias de plate-forme succède un Jurassique plus marneux ; le Crétacé d'abord détritique puis devient marneux à argilo-calcaire. L'Eocène se caractérise par des marnes épaisses avec le classique faciès des calcaires Yprésien (Benrabah; 2013).

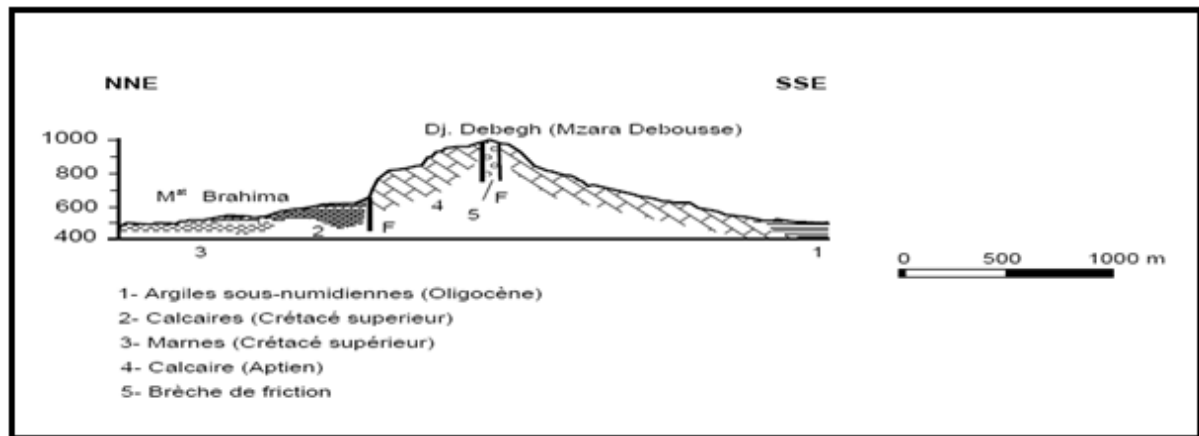


Figure 4: Coupe représentant les différentes formations de Dj. Debagh (Benrabah ; 2013)

3. LA SERIE TELLIEUNE DE HAMMAM OULED ALI

Elle affleure au pied du Djebel Bou Sbaa et autour du pointement néritique du Djebel Debagh. Cette unité regroupe tous les terrains situés sur la série néritique constantinoise et la nappe ultra-tellienne du djebel Bou Sbaa (Vila; 1971). Ce regroupement est justifié par une remarquable dominante des teintes noires dans les faciès.

4. LA SERIE TELLIEUNE DE LA REGION DE RAS EL AGBA - SELLAOUA ANNOUNA

Elle correspond au domaine tellien externe constitué de formations paléogènes où l'on distingue :

- L'unité tellienne à Globigérines : comprend un Paléocène constitué de marnes, un Yprésien à calcaires en bancs à lumachelles et à Globigérines et un Lutétien inférieur à marnes noires à débris d'huîtres et à boules jaunes carbonatées (Kef Er Rih, Bouhachana).

- L'unité tellienne à nummulites : comprend un Paléogène à marnes noires et un Eocène calcaire massif à nummulites surmontés par une puissante série marneuse à boules jaunes et à huitres d'âge Lutétien (Dj. Bardo).

V. L'UNITE NERITIQUE CONSTANTINOISE

Le domaine néritique Constantinois qui appartient au domaine tellien a fait l'objet de nombreuses études (Deleau; 1938, Delga; 1969, Vila; 1969-1980, Lahondère et Magne ; 1983) (Figure 5). Ce domaine néritique forme des massifs isolés de tailles variables ; caractérisé par des dépôts triasiques, jurassiques et Crétacés (Mouchara; 2009). Cette unité constitue l'essentiel des reliefs calcaires des monts du Hammam Débagh, Djebel Oum Settas et le Djebel Taya (Mansouri; 2009).

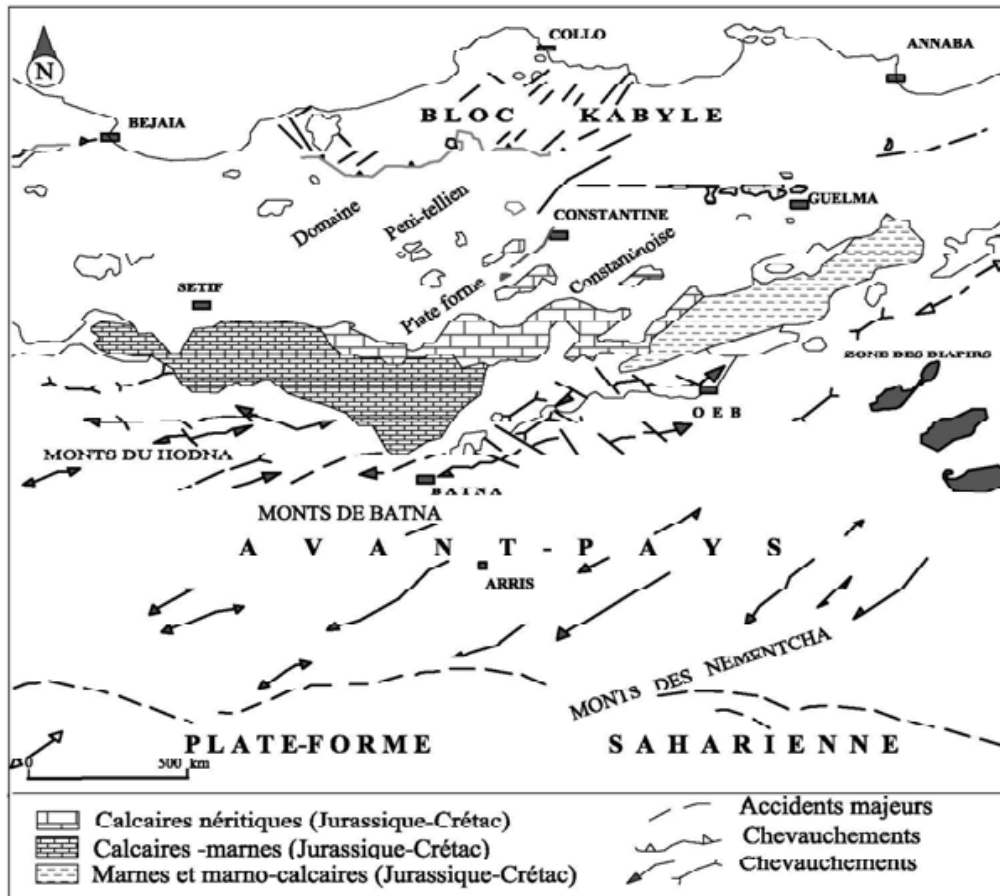


Figure 5: Situation actuel de la plate-forme néritique constantinoise par rapport au domaine des zones externes de la chaîne alpine d'Algérie Nord-Orientale. Bureau ,1970 et Vila ,1980 modifiée) in (Ben Ali; 2014)

VI. LITHO-STRATIGRAPHIE DE LA CONSTANTINOISE ORIENTALE

1. À L'EST DE DJEBEL DEBAGH

Djebel Debagh qui fait partie de la mole néritique constantinoise présente des terrains autochtones d'âge jurassique et crétacé supportant les formations allochtones des unités telliennes. Les formations autochtones essentiellement carbonatées correspondent à des dépôts de plateforme interne parfois confinés avec une nette tendance à l'ouverture au crétacé supérieur (Figure 6). On distingue de haut en bas (Ben Ali; 2014):

- Les niveaux siliceux : ce sont des roches très minéralisées et mal stratifiées résultant d'une silicification au niveau d'une zone de broyage entre le calcaire à silex du sommet du Sénonien supérieur et les calcaires à silex de l'Eocène allochtone tellien ;
- Les calcaires massifs organo-détritiques à orbitoïdes cf. Média D'ARCH attribués au Campanien ;
- Les dolomies noires à la base, épaisses de 250 à 300 mètres, largement cristallines supportent toute la série.

2. À L'Ouest du Djebel Débagh

- Les alternances de calcaires massifs et de dolomies sombres superposées aux dolomies noires massives du Jurassique ;
- Le reste du Barrémien, l'Aptien, l'Albien et le Cénomaniens inférieur sont identiques tout le long du Djebel Débagh ;
- Sénonien : y débute par des termes plus anciens à abondants débris organiques. Il repose directement sur des couches à grandes Orbitolines roulées du Cénomaniens. La suite de la série Sénonienne, peu épaisse, est analogue à celle décrite ci-avant et atteint aussi le Maestrichtien élevé (Benmarce; 2007, Ben Ali et al.; 2014).

3. À HAMMAM OULED ALI

A l'Est de la station thermale, affleure une fenêtre d'une série à faciès carbonatés biodétriques d'âge Sénonien sous les marno-calcaires de la série ultra-tellienne (Benmarce; 2007).

4. AU DOUAR BOUZITOUNE- HELIOPOLIS

Ces affleurements présentent une série complète, à côté de la piscine romaine d'Héliopolis où sont datés (Ben Ali; 2014):

- L'Aptien supérieur à *Orbitolina Subconcava Parocos kinolina Sunnilandensis* ;
- Le Vraconien Cénomaniens inférieur à Orbitolines roulées et à Mélobésiées ;
- Le Sénonien transgressif sur des niveaux à orbitoïdes *Medina*, *Sidérolites Vidali*, *Globotruncana Linnei* du Campanien ou du Maestrichtien basal.

5. À LA STATION DU NADOR

Près de la gare ferroviaire de Nador, sous les calcaires massifs à *Rudistes* du Barrémien, les niveaux à *Favreina Salevensis* et *F. Prusensis* au-dessus d'un ensemble de couches pélitiques ou gréseuses rouges attribuées au Trias moyen et supérieur témoigne du passage Jurassique Crétacé (Ilavsky et Snopkova, 1987).

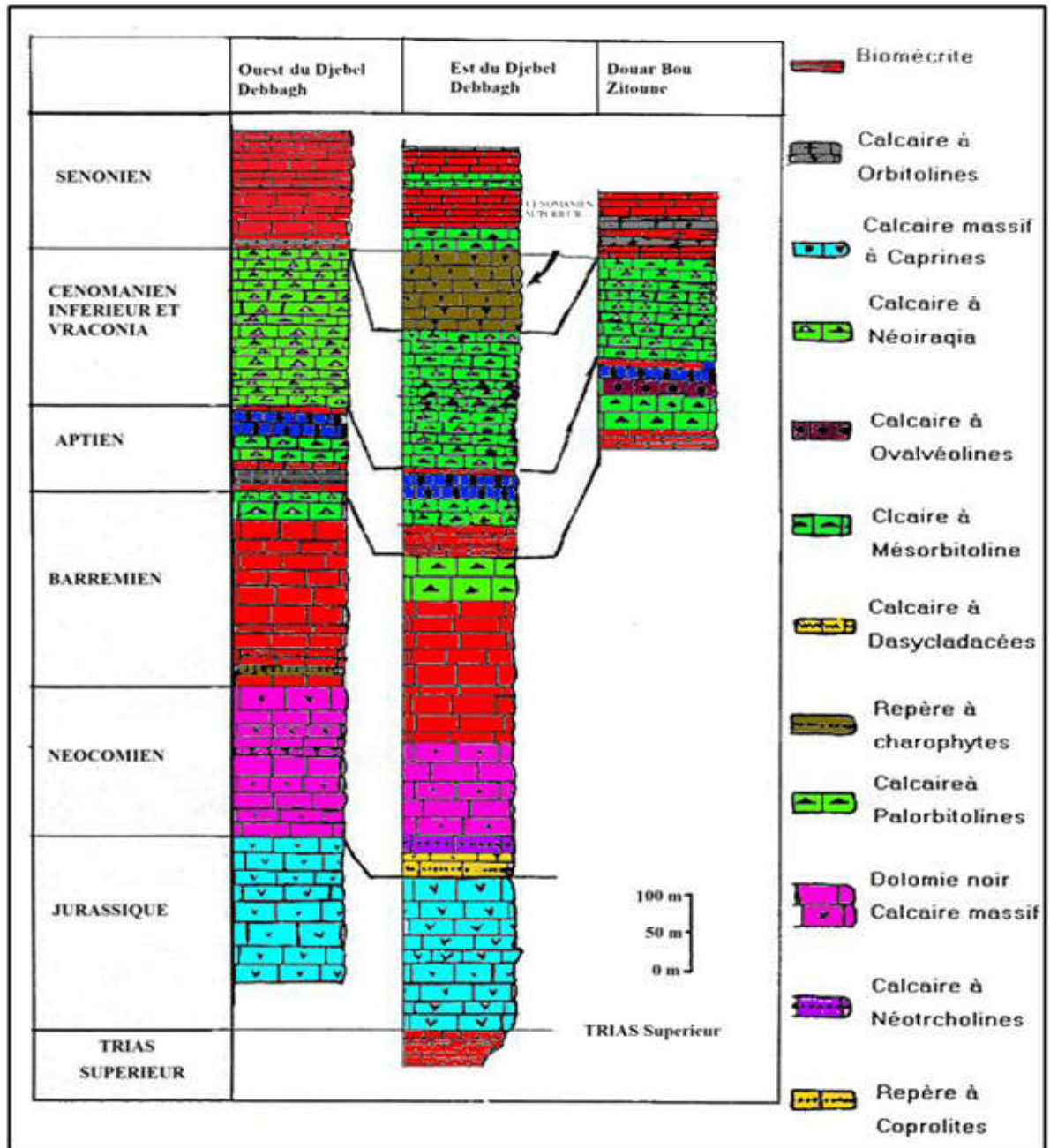


Figure 6: Les formations autochtones des séries néritiques constantinoises de la région de Guelma (Vila; 1980) in (Ben Ali et al.; 2014)

VII. LE DISPOSITIF STRUCTURAL

La structure actuelle de la région d'étude est la conséquence d'une série de mouvements tectoniques (Benmarce; 2007). Les différentes phases mises en évidence peuvent se résumer ainsi :

1. LA PHASE ATLASIQUE

Elle marque la fin d'un grand cycle de sédimentation dans le bassin maghrébin qui a commencé avec les dépôts du Trias supérieur jusqu'au Lutétien. Elle est responsable de la genèse des flysch et des nappes telliennes, y compris les plus méridionales où sont enregistrés des plis couchés spectaculaires (Benmarce; 2007).

2. LA PHASE MIOCENE INFÉRIEURE

Elle est responsable de la naissance de l'édifice actuel (Benmarce; 2007).

- Ecaillage et charriage des nappes telliennes ;
- Ecaillage de l'avant pays ;

3. LA PHASE TECTONIQUE POST-NAPPE

Du tortonien à l'actuel, la région a connu le jeu de plusieurs déformations plicatives et cassantes qui se sont succédées et/ou sont combinées (Vila; 1980). Ces accidents ont dessiné un réseau spectaculaire de failles de direction atlasique ou d'Est en Ouest. L'accident qui borde au Nord du bassin Mio-Pliocène de Guelma est bien défini. Cette grande faille est interceptée par de petites failles qui lui sont perpendiculaires.

Le bassin de Guelma a connu plusieurs cycles de remplissage liés à la tectonique régionale. On peut remarquer que les sources thermo minérales se situent au croisement des plis de direction (NE-SW). Dans la première direction il s'agit de la tectonique de mise en place des nappes, dans la deuxième orientation (N-S), c'est la tectonique de réajustement de l'édifice et la naissance du relief actuel (Benmarce; 2007).

VIII. RECONSTITUTION PALEOGEOGRAPHIQUE

La manifestation de phases tectoniques donne la disposition actuelle des différentes unités allochtones. Les premiers traits de la paléogéographie de ces massifs à l'âge du Jurassique, ou ils apparaissent comme une plate-forme bordée au Sud-est par un sillon des Sellaoua, ce dernier est caractérisé par une sédimentation pélagique. Ils ont été le siège d'une sédimentation de plate-forme carbonatée sous faible tranche d'eau ou la dolomitisation y était importante. Les formations numidiennes viennent ensuite pour couronner tout l'ensemble. A partir du Miocène supérieur ; la mer miocène a connu une régression synchrone avec des mouvements de réajustement de l'édifice. Ces derniers ont conduit à la naissance du bassin actuel de Guelma. Ce phénomène d'éventrement vers le début du Quaternaire est facilité par l'existence de grands reliefs endossant le bassin au Nord par Djebel Houara et au Sud par la Mahouna. L'érosion continue à laquelle était exposé cet édifice a mis à jour les alluvions couvrant toute la vallée et formé les terrasses :

- Miocène supérieur: naissance et remplissage du bassin ;
- Plio-Quaternaire : éventrement du bassin- naissance de la vallée de la Seybouse ;
- Quaternaire : écoulement - érosion dans le bassin ;
- Quaternaire récent : dépôts des alluvions (Benmarce; 2007).

IX. GEOLOGIE LOCALE

1. HAMMAM MESKOUTINE

La région d'étude appartient aux nappes épi telliennes qui résultent d'une poussée vers le sud de la chaîne du Djebel Debagh du Grar et du Kef-Hahouner, où affleure un substratum formé de calcaires Crétacés (Mansouri; 2009), sur lequel sont charriées les nappes telliennes, constituées de marnes noires ou grises intercalées de bancs calcaires appartenant au Crétacé et au Tertiaire. Une autre nappe, dite des Flysch Crétacé, recouvre globalement les nappes Telliennes, composée de schistes noirs, de puissants bancs de grés et localement de poudingues.

La structure régionale a une direction Est-ouest, et présente des fractures aussi bien parallèles à l'allure générale que perpendiculaires à celle-ci. Plusieurs de ces Fractures sont le siège d'une circulaire géothermale.

La dépression qui forme le réservoir aquifère de la vallée de Guelma est remplie par les alluvions Plio-Quaternaires. Ce remplissage constitue l'ancienne et l'actuelle terrasse de la vallée de la Seybouse (Mansouri; 2009)

2. LITHOSTRATIGRAPHIE

Hammam Meskoutine est caractérisé par des formations géologiques appartenant aux différents âges. Nous décrirons successivement les principales formations allant d'âge plus ancien au d'âge plus récent qui sont (Figure 7).

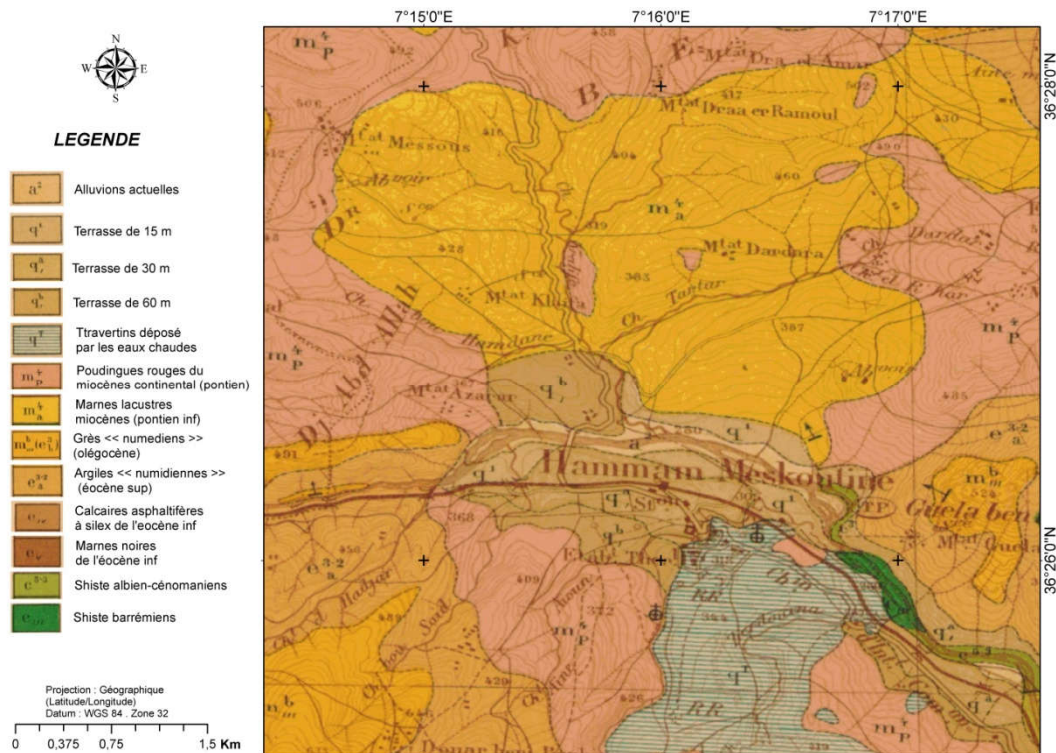


Figure 7: Extrait de la carte géologique de Hammam Meskoutine Feuille n° 53.

(Deleau; 1938). Echelle 1/50000

2.1. Le Crétacé

Le crétacé inférieur est représenté par des schistes d'âge barrémien et le crétacé supérieur est caractérisé par des schistes datant l'Albien-cénomaniens (Figure 8). Ces formations on les retrouve uniquement à l'extrémité Est de la plaine alluviale (les terrasses).

2.2. L'Eocène supérieur et de l'Oligocène

Elles sont représentées par des formations de type flysch, avec leur faciès gréseux et argilo-gréseux habituel. Ces formations sont représentées par :

- Les grès numidiens, grossiers, quartzeux, jaune rouille, en bancs très épais constituant les arêtes rocheuses du Nord et Nord-est de Hammam Meskoutine ;
- Les argiles numidiens : ce sont des formations bleues ou altérés en jaune et souvent feuilletées et schisteuses, intercalées parfois, de bancs de quartzites et/ou de marno-calcaires en plaquettes (Lahondère; 1987). Elles couvrent la majeure partie de la zone d'étude avec une épaisseur de 100 mètres.

2.3. Miocène continental

Elle Est représenté par des poudingues rouges à galets de grès priaboniens, de calcaires Crétacés, sables grossiers, dont la pâte est rouge vermillon. Cette formation est située au sud du Dj Debagh.

Les argiles à gypse ce sont des marnes violacées renferment des lentilles de grès quartzite, et des marno-calcaires. Tous ces dépôts lacustres se prolongent dans le bassin de Guelma (C'est une dépression, allongée d'Ouest en Est et entourée au Nord comme au Sud par les nappes telliennes et numidiennes qui forment le relief de la région).

2.4. Quaternaire

Le Quaternaire comprend des formations variées, les unes d'origine marine (sable de plage), les autres révèlent de sédimentation continentale (dépôts alluvionnaires grès, terre rouge, dunes, éboulis, alluvions..). Elles sont localisées dans la vallée des oueds Bouhamdane, Mougger, Hammam représenté par les terrasses:

Les basses terrasses (*Pléistocène récent*) : caractérisées par des graviers et limons dominant de 10 à 15 mètres, dans le lit des oueds Bouhamdane, Mougger et Hammam.

Les moyennes terrasses (*Pléistocène ancien*) : située surtout entre 20 et 25 mètres, au-dessus du lit des oueds Bouhamdane (Hammam Meskoutine), Hammam (Gallieni), et Mougger (ilot du k^t Enchir) et constituée de sable et limons et des blocs roulés dans une matrice argileuse de couleur ocre.

Les hautes terrasses (*Pléistocène ancien*) : ce sont des formations qui présentent un épandage en pente douce. Elles sont constituées par des limons bien développées entre 40 à 50 mètres du niveau actuel de l'oued Bouhamdane, oued Hammam, au Nord-Ouest de Gallieni. Un ilot est isolé dans la vallée d'oued de Roknia, à l'Ouest de Roknia.

Les alluvions limoneuses (*Néopleistocène*) qui trouvés au fond des vallées. Les travertins et tufs quaternaires sont localisés au plateau du Roknia et Hammam Meskoutine avec une épaisseur de 50 mètres.

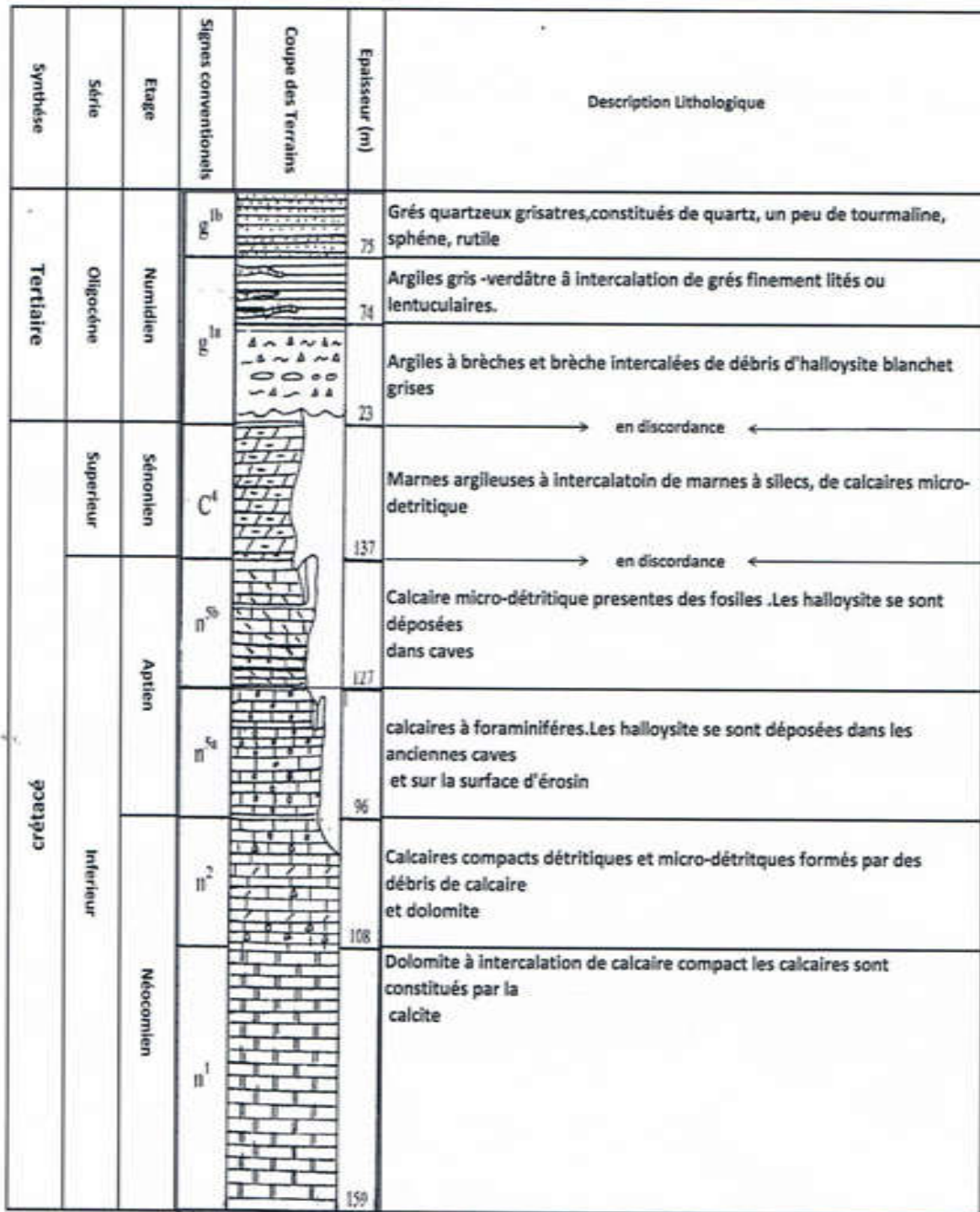


Figure 8: Log stratigraphique du Jebel Debagh (SONAREM ; 1976) in (Ben Ali et al.; 2014).

3. TECTONIQUE DE DEBAGH

Le massif de Débagh structurellement représente d'un anticlinal affleurai sous l'effet d'un grand pli. Cette zone connaît plusieurs périodes à des accidents violents et souples qui ont changé le visage de ce massif au cours du temps. D'après De La Chavane (1910), les effets tectoniques dans la région de Guelma se sont manifestés surtout par des phénomènes de

compression et de refoulement intense des plis qui sont en général déversés vers le Sud et le Sud-est (Ben Ali et al.; 2014).

3.1. Déformations cassantes

Les déformations cassantes sont représentées par des nombreuses failles de différentes orientations et de différents effets sur le massif (Ben Ali et al.; 2014).

- Une Faille de direction NO-SE d'un aspect transversal qui décale la structure anticlinale vers le Sud, qui recoupe des séries de faille plus anciennes d'orientation Est-ouest.
- Une Faille orientée N-S. Cette faille affecte les grès de la nappe numidienne.
- Au Sud du massif du djebel Débagh on trouve des accidents qui recoupent la faille NO-SE.
- Faille de direction Est-ouest : accident d'âge poste-miocène.

D'après J.F Raoult (1972), l'accident d'âge poste-miocène est le plus important qui limite le massif de Débagh au Sud, et met en contact la série néritique constantinoise (de Guelma) avec les formations du bassin mio-pliocène.

3.2. Déformations souples

Débagh est formée d'une manière souple au début de sa genèse (Figure 9), il subira à des facteurs tectoniques violents et cassants qui lui donneront leur forme actuelle (Ben Ali et al.; 2014).

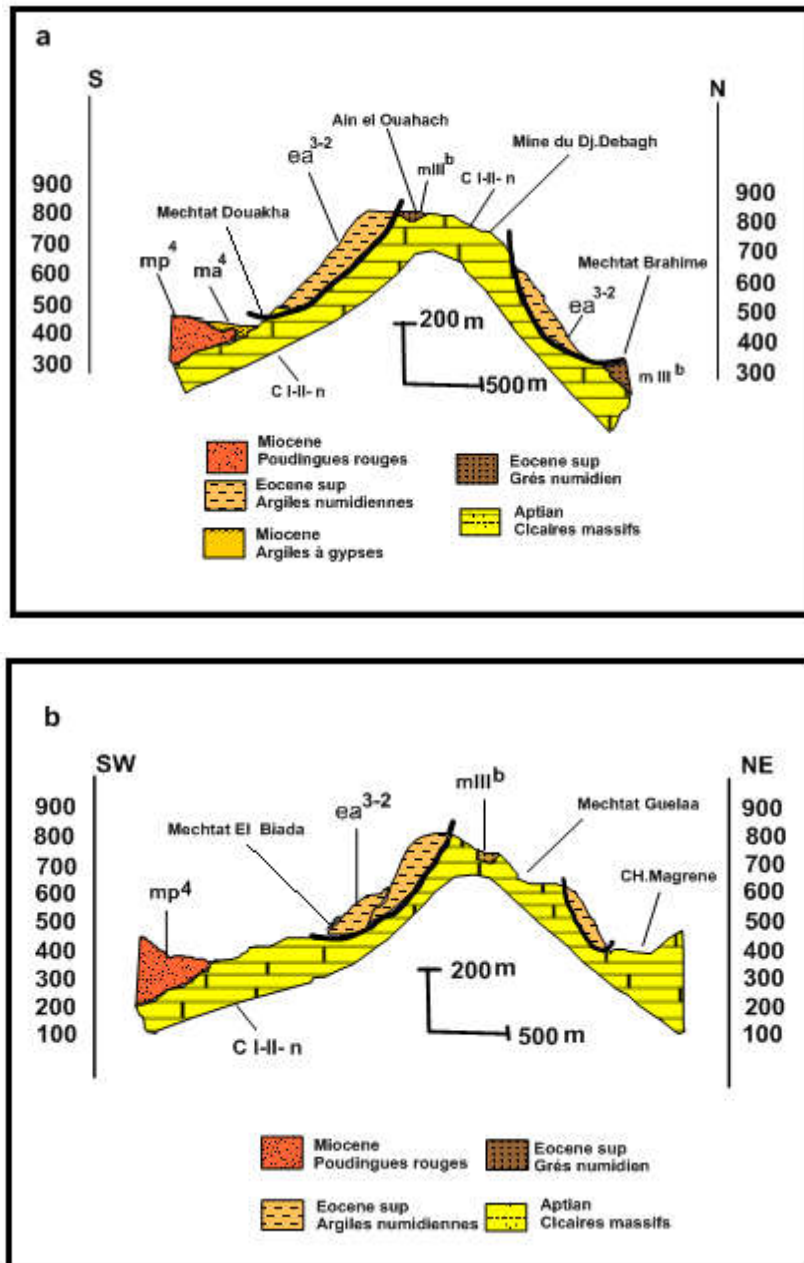


Figure 9: Coupes géologiques; Source (Raoult ; 1973)

4. INFLUENCE DU COMPLEXE STRUCTURAL

La litho-stratigraphie et le cadre structural auront un rôle essentiel au niveau de la localisation des points d'émergences en raison de l'intervention des diverses formations en accident sous formes d'écran conduisant les eaux vers la surface. Dans le tell, on pourrait s'attendre a priori a une influence prépondérante des formations allochtones. Des mouvements posthumes du socle ont permis la mise en place d'un réseau de failles conjuguées d'orientation générale, N 115°, N 140°, N 20° E, N 60° E, ou même N90°, responsable du découpage des formations calcaires en grands panneaux, les uns demeurés en surface et servent de zone d'infiltration, les autres affaissés et constituent les zones de gisements ou de circulation des eaux thermo-

minérales liées à cette fracturation profonde. Les eaux thermo-minérales ne font que franchir la couverture des nappes en fonction des conditions lithologiques ou tectoniques locales qui commandent en dernier ressort la position des griffons (Rihia et al.; 2004).

5. HAMMAM OULED ALI

5.1. Le quaternaire

Comprend les formations suivantes : limons, sables grès, terre rouge, dunes, éboulis, alluvions... Elles sont localisées dans la vallée d'oued Hammam Ouled Ali.

5.2. Nappe numidienne

Est une série essentiellement gréseuses de type flysch, en gros banc, montrant souvent des niveaux des niveaux à dragées centimétriques de quartz blanc ou rose, les minces intercalations argileuses blanches, jaune- verdâtre ou crème sont azoïque

5.3. Nappe épi-tellienne

Elle est caractérisée par un Barrémo-Aptien marno-calcaire sombre à ammonites, un albien schisteux noirâtres, une barre de marno-calcaires plis clairs du Vraconien-Cénomaniens inférieur le Sénonien noir est visible dans la fenêtre du Hammam Ouled Ali et les Argiles vari colores écrasées et brèches gypseuses à « glaçons » de dolomies en plaquette ou de calcaires vermiculés du Trias moyen (Figure 10).

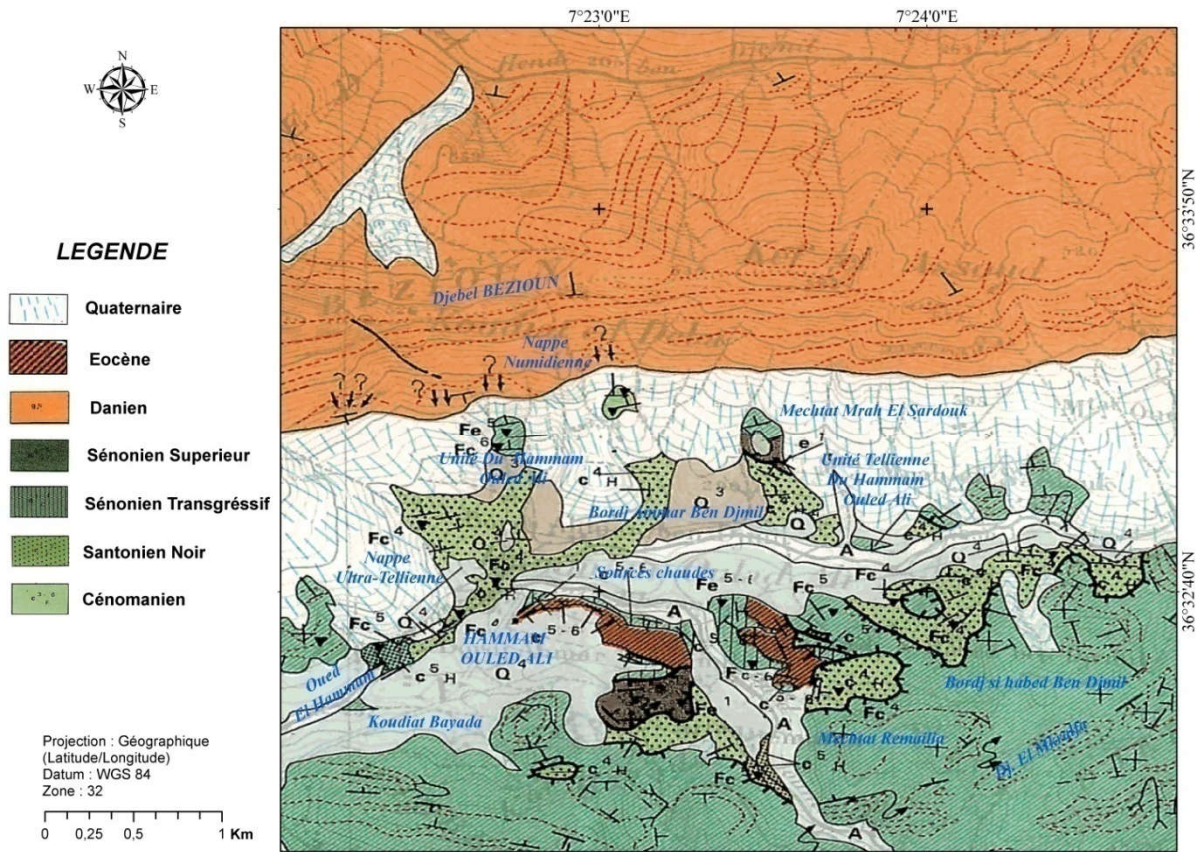


Figure 10: Extrait de la carte géologique de Guelma feuille n°54. Echelle 1/50000

X. LES CARACTERISTIQUES HYDROGEOLOGIQUES

1. INTRODUCTION

L'étude hydrogéologique d'un bassin est nécessaire pour la détermination des différents aquifères existants et pour une meilleure connaissance de différentes formations qui les constituent. L'essai d'identification est la détermination de leurs caractéristiques hydrogéologiques, qui permet de connaître les potentialités des eaux souterraines dans la région. Ainsi la protection des nappes aquifères et l'étude d'impact de pollution, passe impérativement par la reconnaissance de la géométrie, structure de la nappe aquifère et de sa dynamique.

Il s'agit dans le système hydrogéologique quatre nappes aquifères : la nappe alluvionnaire de Guelma, la nappe des formations carbonatées d'Héliopolis-Fejouj, la nappe des formations carbonatées : région de Ras El Agba-Sellaoua-Announa et la nappe des formations carbonatées de la région de Bouhachana- Ain Larbi.

2. IDENTIFICATION DES NAPPES

2.1. La nappe alluviale de Guelma

Elle est constituée de trois différentes unités selon la lithologie et la stratigraphie, Cette nappe d'âge Mio-Plio-Quaternaire (Sogr ah; 2005). Ces unités sont des alluvions perméables, elles sont alimentées par les eaux d'infiltrations des pluies et les apports latéraux du bassin versant de l'Oued Seybouse. L'unité de basse terrasse représente la vallée actuelle de l'oued Seybouse avec une altitude de 220 mètres à l'Ouest et 120 mètres à l'Est. L'unité la moyenne terrasse représente la vallée ancienne avec une altitude de 230 mètres à 280 mètres. L'unité la haute terrasse représente l'unité des travertins ou la plaine des calcaires travertineux avec une altitude de 250 mètres.

La nappe actuelle (basse terrasse) : est formée de matériaux d epos es dans le lit majeur du cours d'eau. Ce sont essentiellement des alluvions grossières d'une épaisseur moyenne de l'ordre de 10m reposant sur un substratum marneux à gypse.

La nappe ancienne (haute terrasse) : est située au Sud de la moyenne terrasse et est formée d'alluvions grossières Plio-quaternaires (galets, graviers, gr es, sables et quelques passées argileuses) perméables. La couche superficielle montre une affinité argileuse nette. Le substratum est aussi constitué de marnes à gypses et d'argiles du Miocène jusqu'à l'Oued Boussora. Vers l'Est, il est constitué d'argiles éocènes. L'épaisseur de cette partie de la nappe aquifère est plus importante que celles des deux premières et varie de 50 à 150 mètres.

La nappe des calcaires travertineux (la moyenne terrasse) : est constituée d'un matériel détritique relativement fin en alternance avec des passées argileuses. Le substratum est toujours marneux à gypse. On remarque que l'épaisseur est plus importante que celle de la basse terrasse.

2.2. La nappe des formations carbonatées d'Héliopolis-Fejoui

Elle est constituée essentiellement par des formations calcaires bio-détritiques ou micritiques et Calcar eo-dolomitiques du Sénonien supérieur, difficiles d'être aquifères (Droque, 1971; de Marsily, 1981).

Les affleurements néritiques sont visibles dans le Djebel D ebagh à 1411m etres d'altitude, d'après (Raoult, 1975) il y a d'autres affleurements qui apparaissent en mamelons vers l'Est, au Sud de Hammam D ebagh, à Hammam Br edaa (Héliopolis) et au Sud-ouest l'ouest de Guelma Nador respectivement.

Les limites en profondeur de la nappe sont inconnues, compte tenu de sa couverture par les nappes telliennes et ultra telliennes. Lors de la réalisation des forages (Benmarce; 2007), le néritique du secteur d'étude recèle une karstification très intéressante (située à des

profondeurs variables entre 50 et 350 mètres) du point de vue étude et exploitation du système.

2.3. La nappe des formations carbonatées : région de Ras El Agba-Sellaoua-Announa

Dans cette zone on distingue deux unités géologiques différentes :

- L'unité géologique appartenant à la nappe tellienne : les terrains éocènes de faciès marno-calcaires renferment des niveaux aquifères. On observe quelques sources à la base de la barre calcaire yprésienne.

D'après (Vila, 1980) les formations calcaires font partie des séries du Paléogène tellien. On distingue de haut en bas dans les forages de reconnaissance et d'exploitation qui sont réalisés à Ain Brinis (i) marnes grises d'âge Lutétien, (ii) calcaires massifs d'âge yprésien et (iii) marnes à débris d'âge Paléocène.

- L'unité géologique appartient aux Sellaoua : les sources sortant de ces calcaires sont plus importantes que celles de l'unité tellienne, les principales sont Ain Beida et A. Karma (Sellaoua Announa).

2.4. La nappe des formations carbonatées de la région de Bouhachana-Ain Larbi

Dans cette nappe les formations calcaires affleurent par endroits notamment sur la rive droite d'Oued Halia (Bouhachana) et constituent la continuité des séries de Sellaoua Announa. Les logs stratigraphiques des forages indiquent la présence de zones fissurées et karstifiée à profondeur 70 à 100 mètres en moyenne, d'après les pertes et absence de remontée des cuttings.

3. ETABLISSEMENT DES COUPES HYDROGEOLOGIQUES

Les coupes hydrogéologiques a pour but, reconstituer la géométrie de l'aquifère, le type et la nature des nappes aquifères et l'évolution latérale de la nappe en se référant aux colonnes stratigraphiques des forages, leur profondeur, l'altitude topographique et les distances entre eux.

3.1. Interprétations des coupes hydrogéologiques

Au niveau du Hammam Ouled Ali (Figure 11), les calcaires parfois compacts parfois fissurés prennent la forme d'un anticlinal ; ils sont le siège d'une nappe captive, dont l'épaisseur captant est d'environ 45 mètres. Ces calcaires ont une puissance d'environ 320 m (Forge HB1). Ces formations sont surmontés par des marnes très épaisses environ 200 mètres à l'ouest, qui constituent le toit de cette nappe captive et le substratum d'une nappe libre formée par des graviers sableux.

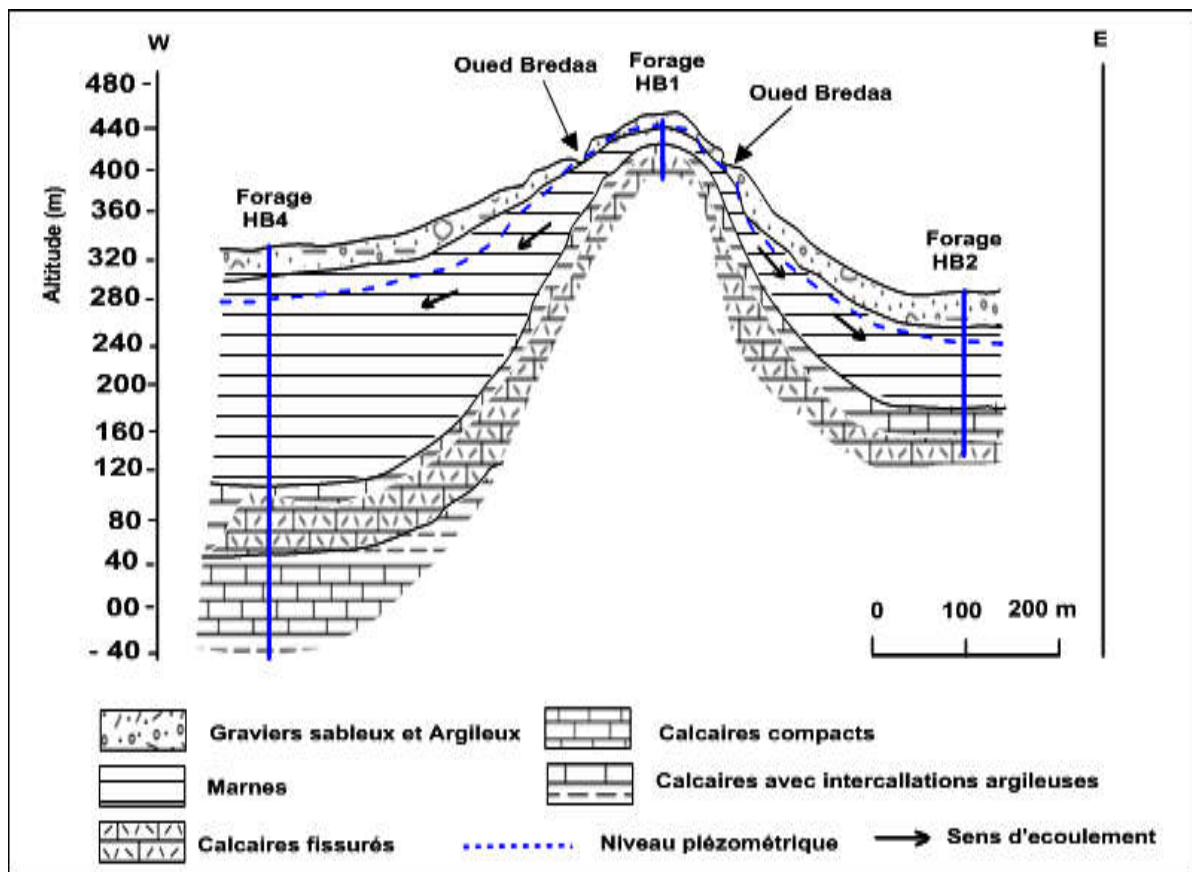


Figure 11: Coupe hydrogéologique dans la région de Hammam Ouled Ali (Gaud; 1974)

La coupe hydrogéologique (Figure 12) montre la liaison entre la nappe de la basse terrasse et la haute terrasse qui se fait par la moyenne terrasse. On y observe presque les mêmes ensembles aquifères qui se prolongent vers le Sud. Cependant on peut faire les remarques suivantes :

- Les alluvions grossières (cailloutis et sables) qui forme les basses terrasses sont plus épaisses (environ 15 mètres).
- Les sables fins forment la moyenne terrasse ont une épaisseur de 25 à 35 mètres, d'où une présence d'un horizon argileux à une épaisseur moyenne de l'ordre de 8 mètres qui s'intercale dans les alluvions.
- L'épaisseur de hautes terrasses est très important atteint les 100 mètres (elle atteint 110 mètres en piézomètre). Cette dernière est formée de dépôts Plio-quaternaire grossiers. Il s'agit de cailloutis et de graviers avec des petites lentilles d'argiles de faible épaisseur.

- Le substratum miocène marneux présent un soubassement au centre de la plaine. Les calcaires travertineux sont négligeables et refluent au sud de la plaine vers le mont de la Mhaouana.

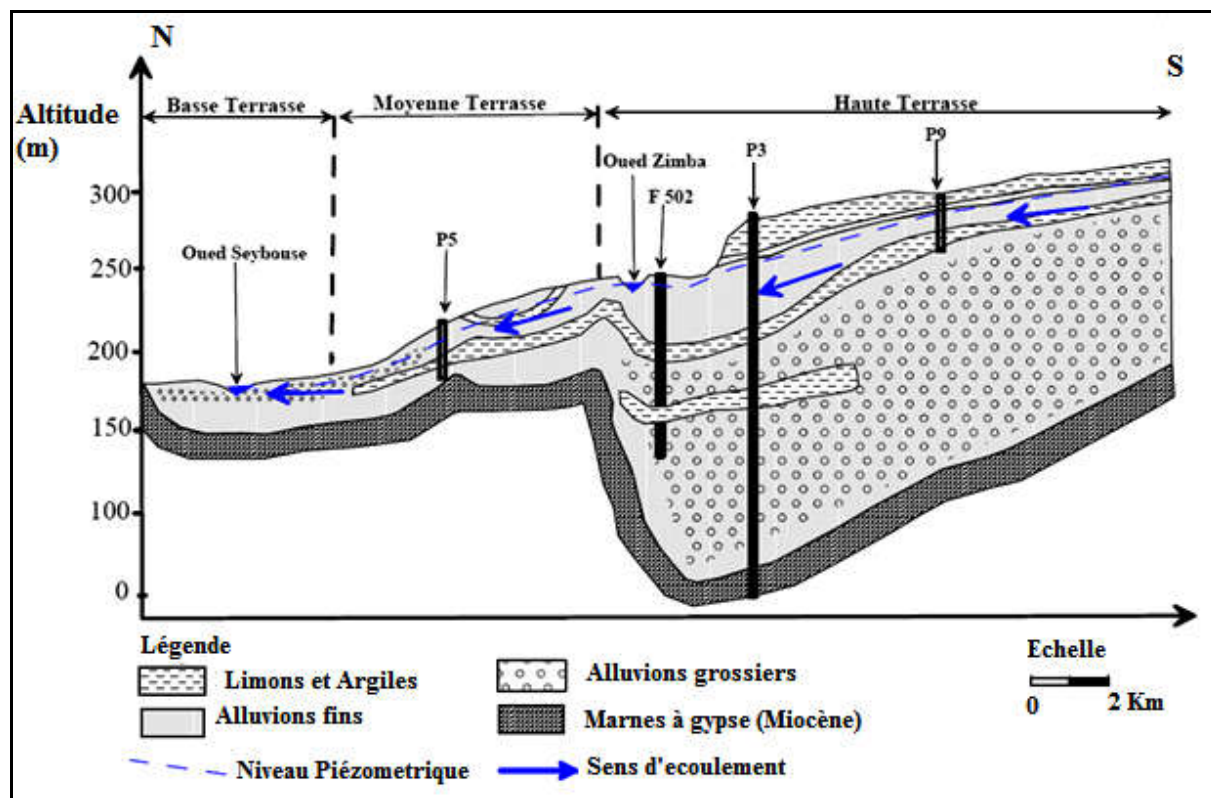


Figure 12: Coupe hydrogéologique dans la plaine de Guelma (Gaud; 1974)

XI. LES CONDITIONS GEOLOGIQUES D'EMERGENCE DES SOURCES THERMALES

Les sources thermales se trouvent dans un bassin miocène. Elles émergent dans des travertins quaternaires déposées par les eaux chaudes. Les eaux jaillissent à la faveur des failles. La région d'étude comporte des concrétions calcaires correspondant chacune à d'anciens griffons qui se sont arrêtés de couler lorsqu'ils ont atteint une hauteur voisine de 3 mètres pour être remplacés par d'autres exutoires. Lorsque le griffon fonctionnait, ses parois étaient réchauffées et toute la colonne d'eau se trouvait à une température de 100°C.

Au contraire, dans les fissures virtuelles, dépourvues de circulation, la température devait varier progressivement entre 100°C au niveau de la couche aquifère profonde et 20°C température moyenne de surface. Le volume spécifique moyen sur cet intervalle est de 1,093. La différence de pression à la base est de 0.024 h en mètres d'eau. Cette différence est capable de surmonter une surcharge sur le griffon de 3 m d'eau c'est que $0.024 > 3m$ d'où $h=125$ m (Rihia et al; 2004).

A Hammam Ouled Ali les émergences se trouvent sur la rive gauche de l'oued El Hammam (Figure 13) au Nord de la chaîne calcaire néritique de Djebel Débagh. Les sources chaudes sortent au niveau de la ligne de fracture (Rihia et al; 2004).

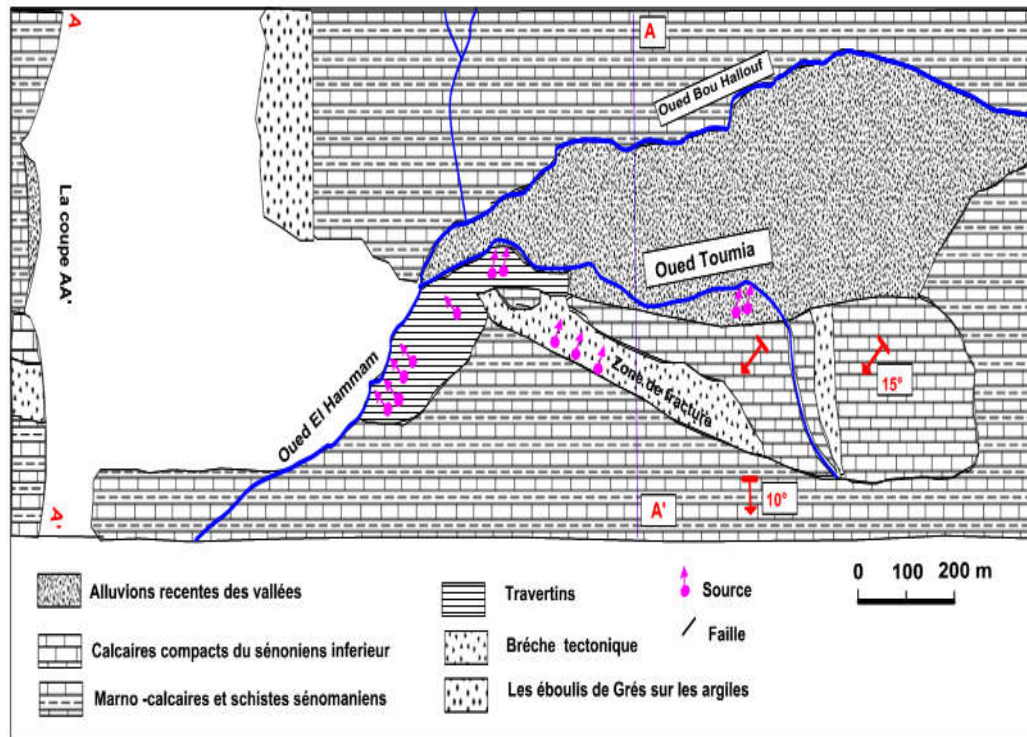


Figure 13: Schéma explicatif : phénomène d'émergence des sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali; Source: Kahalerras;1968

XII. CONCLUSION

La zone d'étude fait partie de la chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des maghrébines qui y fait partie eux même de l'orogénèse alpin périméditerranéen, d'âge tertiaire. Elle correspond à une dépression à valeur de bassin allongé d'Est en Ouest dans laquelle se sont accumulés des dépôts du Néogène et du quaternaire. Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud à des reliefs appartenant pour l'essentiel au domaine tellien constitué de marnes et de carbonates d'âge méso- cénozoïque et dont la sédimentation, de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique (unités telliennes). Le néritique constantinois qui présente la terminaison orientale du domaine, apparaît à la faveur de fenêtres, à Djebel Débagh, à l'Est de Hammam Ouled Ali, à Héliopolis et à Nador. De l'Ouest à l'Est ces formations carbonatées constituent le substratum des nappes telliennes de Guelma.

La géologie du Djebel Débagh, permet de dégager plusieurs problèmes, la résolution de ces problèmes permettre de mieux comprendre l'évolution sédimentaire et structurale de cette partie qui appartenant au domaine néritique constantinois dans la région de Guelma.

L'analyse lithologique montre que les formations sont surmontées par les unités allochtones, qui présentent une certaine monotonie (calcaire, calcaire dolomitique, et marnes argileuses).

La litho-stratigraphie et le cadre structural auront un rôle essentiel au niveau de la localisation des points d'émergences en raison de l'intervention des diverses formations sous formes d'écran conduisant les eaux vers la surface.

La zone étudiée comprend deux grands ensembles aquifères dont l'intérêt hydrogéologique diffère d'un ensemble à l'autre. L'ensemble aquifère de la vallée des oueds qui comprennent des nappes parfois libre et dans un endroit captive formées essentiellement par des formations Plio-quaternaires (les nappes alluvionnaires). La nappe des travertins très intéressante, formée par des calcaires. L'analyse des données hydrogéologiques confirme non seulement le schéma hydrogéologique conceptuel généralement admis pour cette région mais apporte aux nouveaux résultats entre autre :

- La définition et la caractérisation des principaux axes d'écoulements souterrains.
- L'alimentation des nappes superficielles est due essentiellement aux calcaires fissurés.

CHAPITRE III. CLIMATOLOGIE

I. INTRODUCTION

L'étude climatique permet la détermination des termes du bilan hydrique par la connaissance notamment des précipitations, des températures, de l'évapotranspiration, du ruissellement et de l'infiltration. Ce dernier facteur associé à la superficie de la zone peut donner le volume d'eau infiltré dans la nappe. Dans les mécanismes de pollution l'infiltration efficace et le ruissellement entraînent de manière très différente les polluants, aussi dans le domaine agricole l'infiltration permet l'entraînement en profondeur des fertilisants et des pesticides. Dans le cas du ruissellement, les déchets liquides sont entraînés vers les cours d'eau (l'oued) avec une dilution proportionnelle aux précipitations efficaces.

II. LES STATIONS METEOROLOGIQUES

Cette étude est basée essentiellement sur les données météorologiques (précipitations et les températures), des stations climatiques les plus proches des sites étudiés (Tableau 1)

Tableau 1: Les caractéristiques des stations météorologiques

Station	Longitude	Latitude	Altitude en (m)	Période d'observation
Barrage H. Débagh	07° 15' E	36°27' N	350	1989/90-2012/13
Héliopolis	07° 44' E	36° 40' N	260	

III. LES TEMPERATURES

La température est un paramètre caractérisant le climat, trouve son importance dans l'évolution du déficit d'écoulement qui rentre dans l'estimation du bilan d'eau.

Notre analyse des données de la température est basée sur les données relevées au niveau de la station du barrage de Hammam Débagh et Héliopolis de la période allant de 1989/90 à 2012/13. Les séries d'observations sont consignées au tableau ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2: Température moyenne mensuelle en °C

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Année
St. barrage de Hammam Débagh (série 1989-1990 /2012-2013)													
Moy	25,2	20,4	13,7	10,2	9,1	9,8	12,9	16,4	21,3	30,2	30	29,7	19,1
St. d'Héliopolis (série 1989-1990 /2012-2013)													
Moy	25.45	21	14.5	11.2	9.1	9.8	12.9	15.4	21.3	29.2	31.5	30.7	19.34

L'examen des températures moyennes mensuelles (Figure 14) relève que le mois le plus froid est le mois de janvier (09 °C), le mois du juillet étant le plus chaud (30.2 °C à la station du barrage de Hammam Débagh et 31.5 °C à la station d'Héliopolis).

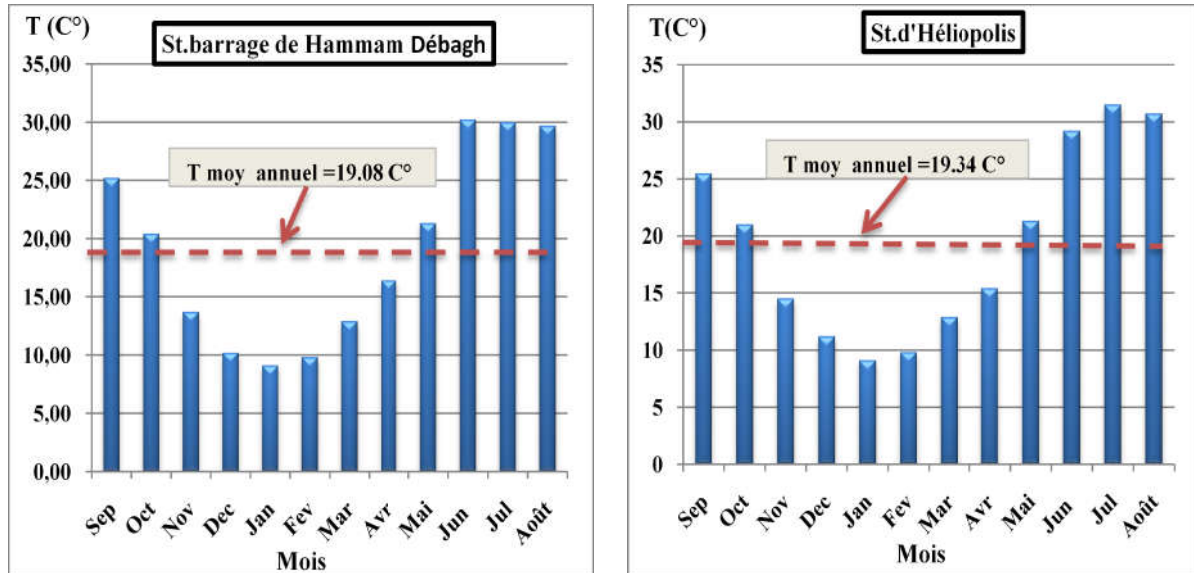


Figure 14: Températures mensuelles moyennes

IV. LES PRECIPITATIONS

1. ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES PLUVIOMETRIQUES

En vue d'une utilisation effective des données pluviométriques, l'analyse primaire de ces séries semble primordiale. Elle permet de contrôler.

- La vraisemblance de l'information.
- L'homogénéité spatiale et temporelle des données.
- La représentativité de mesures.

2. AJUSTEMENT DES PRECIPITATIONS ANNUELLES A UNE LOI DE GAUSS

Avant de pouvoir exploiter les données pluviométriques dans la région d'étude ; il importe de les ajuster tout d'abord à la loi normale ou loi Gaussienne sur une période de 24 ans allant de 1989/90 à 2012/13, nous avons réalisé un examen visuel sur les valeurs de précipitations à l'échelle annuelle des deux stations Hammam Débagh et Héliopolis.

Cette loi est définie par la fonction de répartition suivante : $F(U) = 1\sqrt{2\pi} \int e^{-\frac{1}{2}U^2} dU$

Avec U : Variable réduite de Gauss F : Fréquence

Le report des points figuratifs des précipitations annuelles des deux stations pluviométriques (Figure 15; Figure 16) montre un alignement des points selon une droite théorique qui traduit la bonne adéquation de la loi normale.

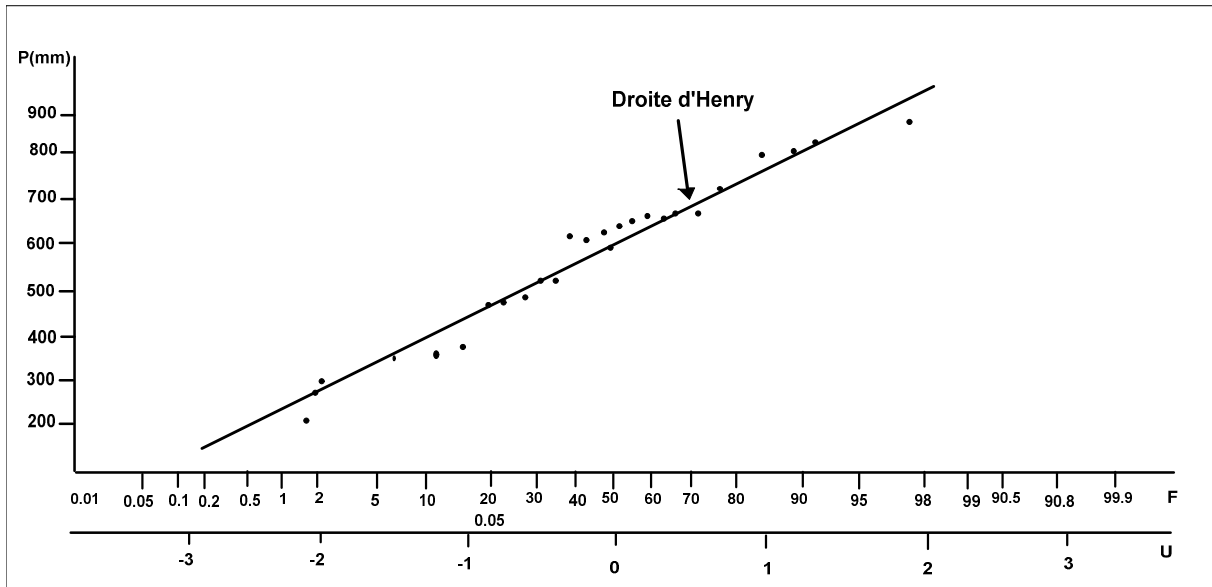


Figure 15: Ajustement graphique à une loi de Gauss des précipitations annuelles St de Héliopolis (1989/90-2012/2013)

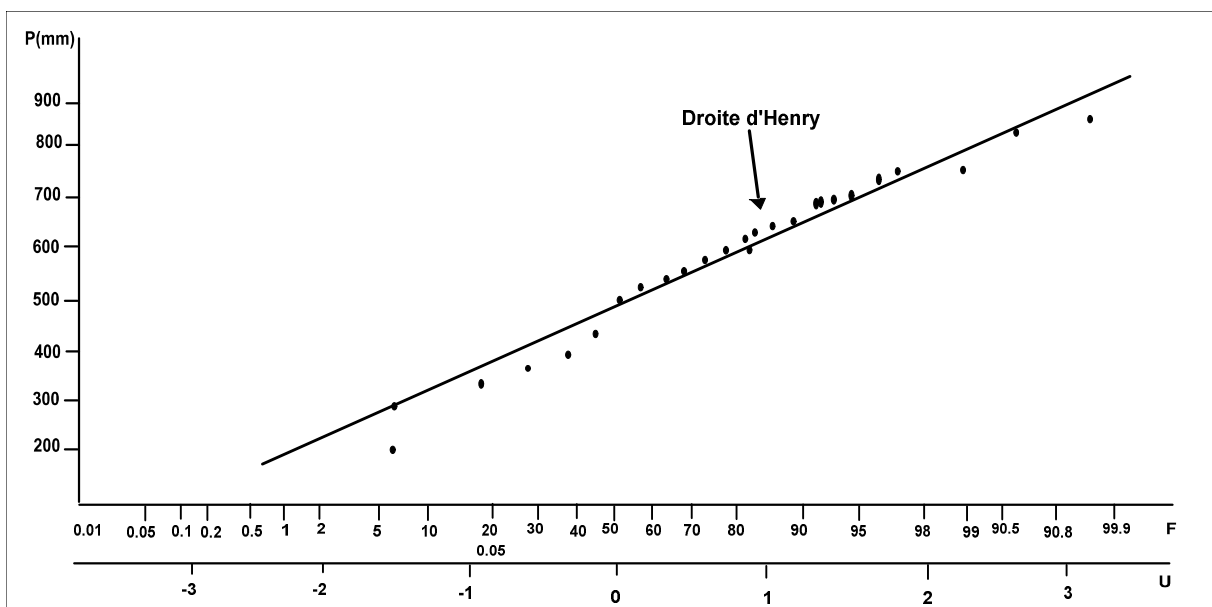


Figure 16: Ajustement graphique à une loi de Gauss des précipitations annuelles St du barrage de Hammam Débagh (1989/90-2012/2013)

3. PRECIPITATIONS MOYENNES MENSUELLES

A partir des données pluviométriques observées aux stations énumérées dans le (Tableau 1). On a déterminé la moyenne des hauteurs de pluies mensuelles et annuelles concernant ces stations. Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles sont représentées dans le tableau suivant (Tableau 3).

Tableau 3: Variabilité spatio-temporelle des pluies dans la région du Hammam Dèbagh et Hammam Ouled Ali

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Année
Hammam Dèbagh (série 1989/90-2012/2013)													
moy	38.04	42.78	65.58	89.23	85.79	69.46	60.83	57.10	50.57	17.43	4.03	9.91	590.74
max	114.4	125	214.3	253.1	233.3	211	231.9	126.4	127.5	63.4	23.3	32.3	845.2
min	2.8	3	8.6	23	10.7	1.6	9.5	12	2.5	0	0	0	188
CV%	88.68	67.60	91.38	70.19	68.21	78.38	76.24	53.21	77.14	111.7	154	98.31	28.84
Héliopolis (série 1989/90-2012/2013)													
moy	36.73	41.96	66.38	90.20	86.60	67.23	62.09	63.83	42.95	14.99	2.78	10.40	586.15
max	101.9	114.2	200.1	248.6	220.2	212.7	207.6	187.2	106.9	70.5	24.2	45.8	840.9
min	0	13	7.5	4.8	13.7	1.6	5	15.8	3.7	0	0	0	286.8
CV%	76.49	71.75	93.31	69.32	65.63	77.81	71.64	68.33	76.61	112.6	194	117.4	26.66

La variabilité temporelle, traduite par le coefficient de variation (CV), qui sont représentées dans la figure 17 et le tableau 3.

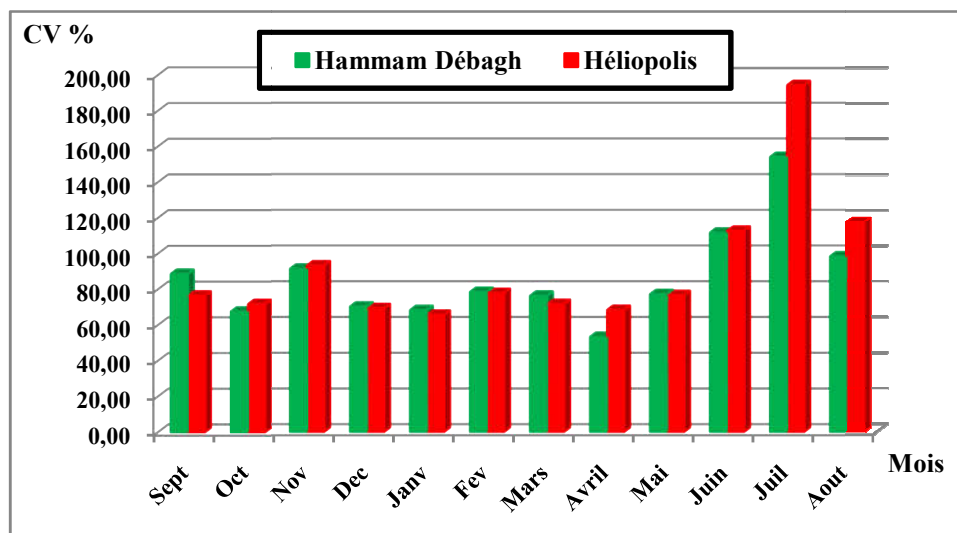


Figure 17: Variations mensuelles du coefficient de variation

La variabilité temporelle traduite par le coefficient de variation, est très net à l'échelle mensuelle [CV > 50 %]; elle est beaucoup plus accentuée pendant la saison estivale [CV > 100 %] avec un maximum de 194 % durant le mois du juillet au niveau de la station du

Héliopolis. À la base annuelle, la variabilité est relativement beaucoup plus faible d’une station à l’autre, ils sont compris entre 26 et 38 % ce qui traduit par une certaine régularité de la distribution des précipitations moyennes annuelles (Tableau 3).

Les valeurs moyennes mensuelles des précipitations sont traduites dans les histogrammes (Figure 18), l’évolution de cette pluviométrie montre que la pluviosité dans cette région se caractérise par hautes valeurs de précipitations en hiver dont le mois de Décembre est le plus arrosé pour les deux stations avec une valeur de 89.23 mm enregistrée à la station du Hammam Débagh, 90.20 mm à Héliopolis , et une diminution des amplitudes pluviométriques observées au cours des mois les plus secs sont respectivement les mois de Juillet, Août et Juin.

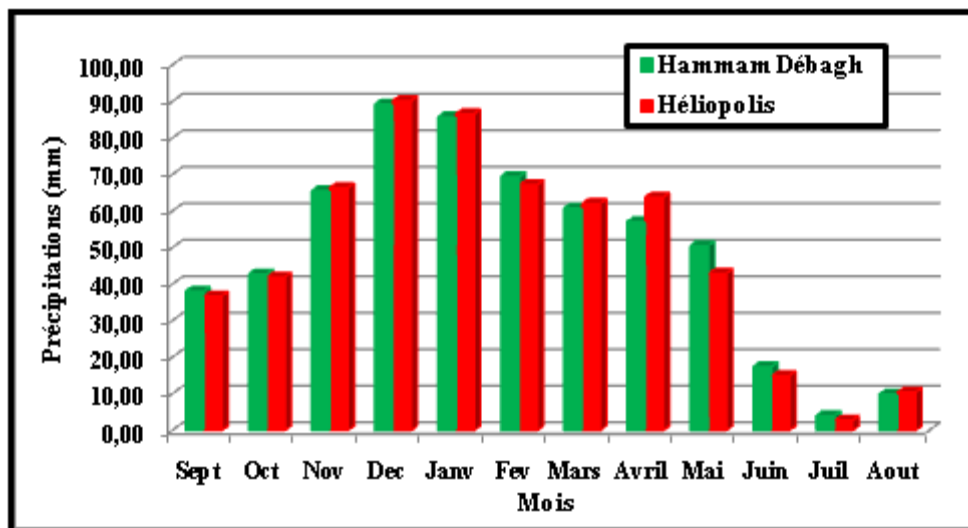


Figure 18: Répartitions mensuelles moyennes des précipitations à travers les deux stations

4. REGIME MENSUEL

L’étude du régime mensuel est facilitée par le calcul des coefficients pluviométriques relatifs grâce à la formule d’Angot 1895, qui exprime de la manière suivante :

$$Cp = 365 \frac{Pi/ni}{p} \tag{Équation 1}$$

Avec

Cp: coefficient pluviométrique relatif mensuel ;

Pi : Précipitation du mois en mm ;

p : Précipitation moyenne annuelle en mm ;

ni : nombre de jours dans le mois.

Tableau 4: Coefficient pluviométrique relatif mensuel d'après méthode d'Angot /1895

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août
St. Barrage de Hammam Dèbagh												
Cp	0.80	0.87	1.38	1.81	1.75	1.51	1.24	1.20	1.03	0.37	0.08	0.20
St. d'Héliopolis												
Cp	0.76	0.84	1.38	1.81	1.74	1.44	1.25	1.32	0.86	0.31	0.06	0.21

Le coefficient pluviométrique relatif mensuel nous permet de diviser l'année en deux saisons la saison humide et la saison sèche, le mois est pluvieux si son coefficient est supérieur ou égale à l'unité et sec dans le cas contraire. On observe (Tableau 4) une saison pluvieuse de sept mois pour la station du barrage de Hammam Dèbagh contre une saison sèche de cinq mois. La station d'Héliopolis est caractérisée par deux saisons qui sont pratiquement égales. D'après le graphe (Figure 19), il est appaait clairement que le mois de décembre est le mois le plus pluvieux ou le coefficient pluviométrique est de l'ordre de 1.81 pour les deux stations et que la pluviométrie minimale enregistrée au mois de juillet se situe entre (0.06 et 0.08) pour les deux stations.

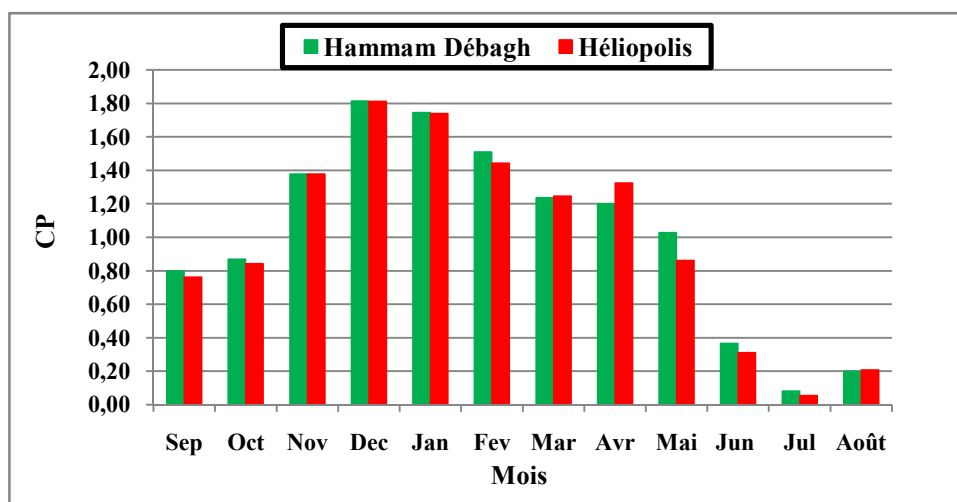


Figure 19: Régime pluvial mensuel des différentes stations

5. REPARTITION SAISONNIERE DES PRECIPITATIONS

Le tableau n°5 récapitule les valeurs des hauteurs saisonnières des deux stations observées dans cette étude.

Tableau 5: Répartitions saisonnières des précipitations

Stations	Saisons							
	Automne		Hiver		Printemps		Eté	
	Total	%	Total	%	Total	%	Total	%
Barrage de Hammam Débagh	146.40	25	244.48	41	168.49	29	31.38	5
Héliopolis	230	25	377	41	201	29	22	5

Il ressort du tableau ci-dessus (Tableau 5) que l'hiver est la saison où sont enregistrées les plus grandes quantités de pluie en moyenne de 244.48 mm, soit 41 % des pluies totales annuelles et la saison la plus sèche est l'été (5%).

L'automne et le printemps sont les saisons où la lame d'eau tombée en automne, équivalent à peu près à la quantité de pluie printanière environ de 25 à 29 % des pluies totales annuelles. Nous constatons que la lame d'eau saisonnière précipitée au niveau des deux stations est du même ordre de grandeur. La figure suivante (Figure 20) traduit la répartition saisonnière des pluies dans la zone d'étude.

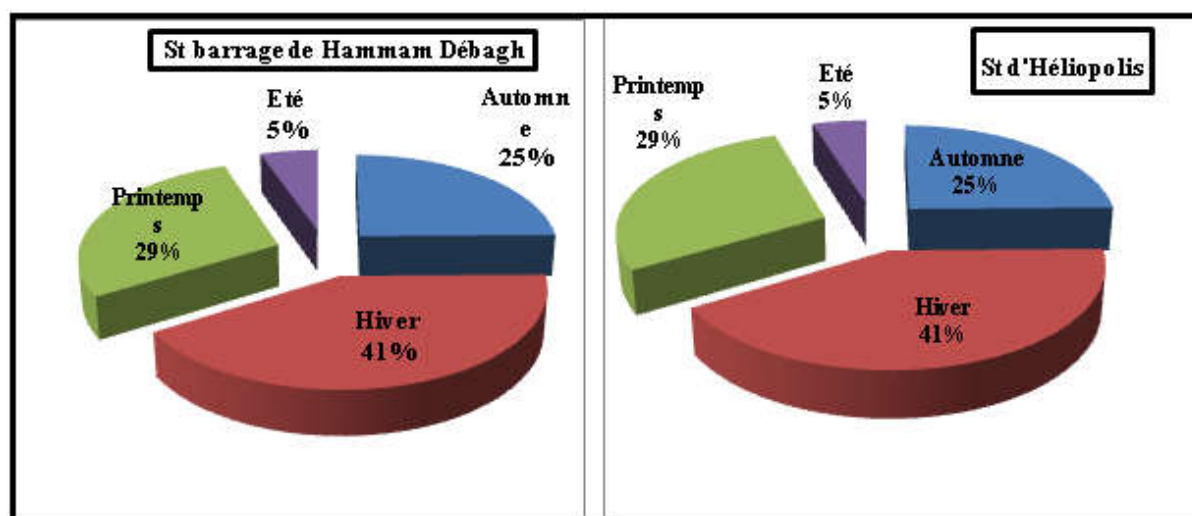


Figure 20: Répartition saisonnière des pluies

6. PRECIPITATIONS ANNUELLES

La Figure 21 illustre bien l'évolution des hauteurs annuelles des pluies (séries d'observations de 24 années), inégalement répartie au cours d'une même année et d'une année à l'autre.

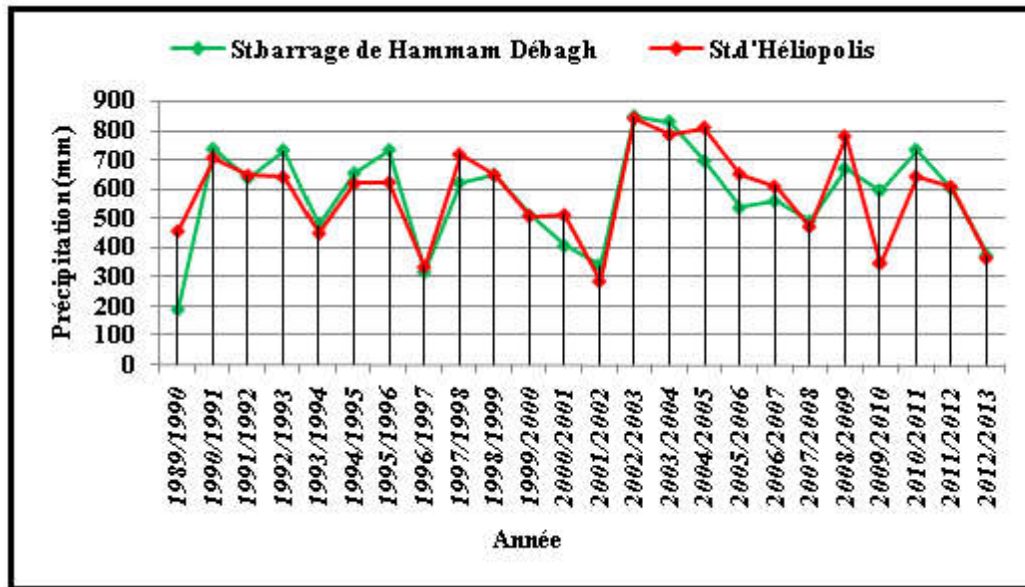


Figure 21: Evolution moyenne annuelle des précipitations à travers les deux saisons

Les moyennes interannuelles des deux stations ne relèvent que de la plus forte pluviométrie moyenne enregistrée à la station d’Héliopolis avec une moyenne environ 586.15mm. Les hauteurs maximales des précipitations atteignent 845 mm au niveau de la station du barrage de Hammam Dèbagh au cours de l’année (2002 /2003) tandis que la pluviométrie minimale est de l’ordre de 188 mm/an à la station du barrage de Hammam Dèbagh en (1989/1990).

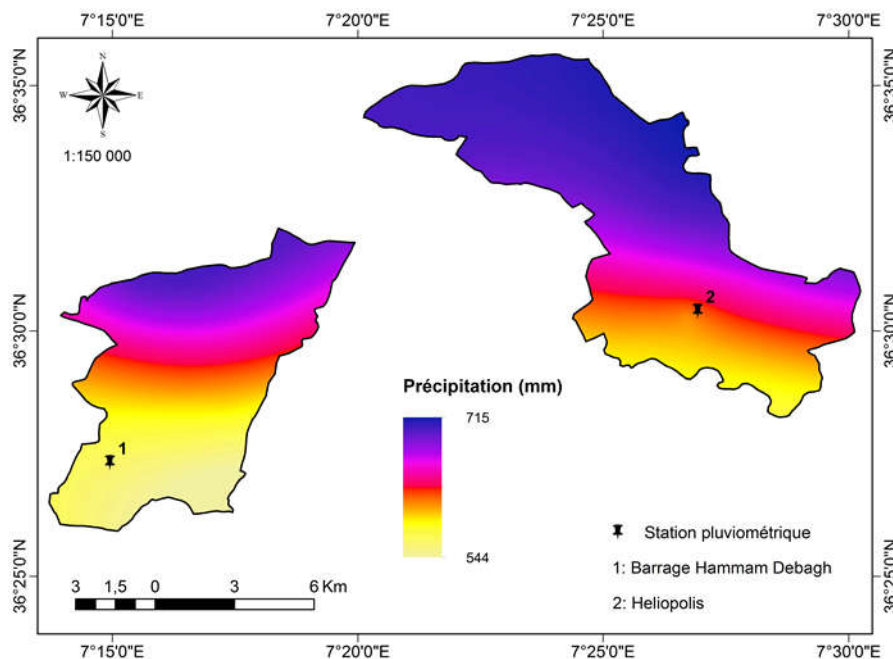


Figure 22: Carte pluviométrique de la zone d’étude

7. DIAGRAMME PLUVIO-THERMIQUE

Le diagramme pluvio-thermique représentant les températures en double échelle des précipitations selon la définition de Gaussen 1958.

La saison sèche est d'une grande importance, pour mieux connaître la saison déficitaire de l'année, afin de pouvoir répondre aux besoins de la demande en eau.

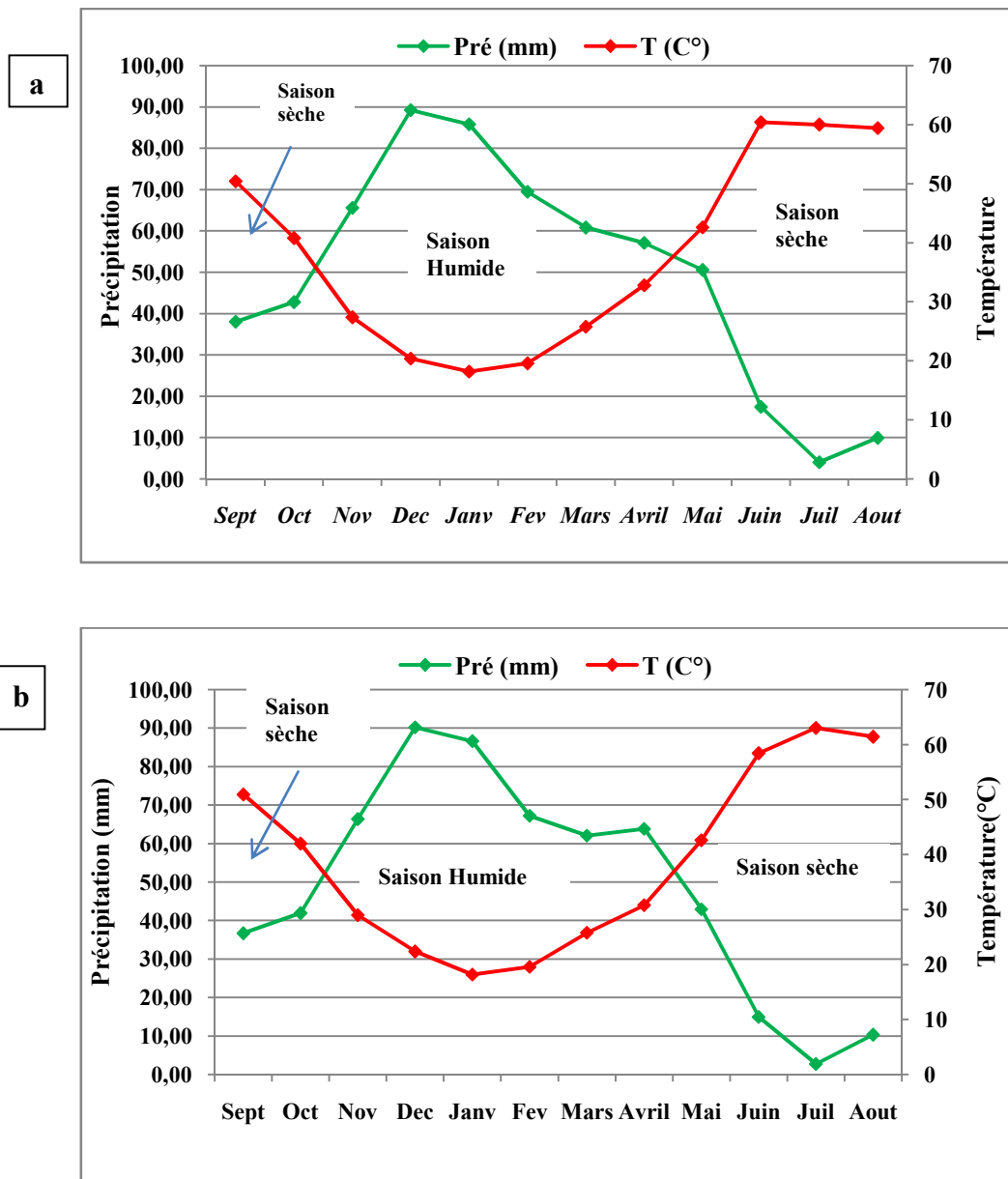


Figure 23: Diagramme pluvio-thermique des deux stations (1989/90-2012/13)

a : St barrage de H Debagh ; St d'Heliopolis

Les diagrammes pluvio-thermiques analysés pour les deux stations où on distingue une saison sèche s'étendant au début de mai jusqu'à la fin du mois d'octobre et une saison humide allant de novembre jusqu'à la fin d'avril pour les deux stations (Figure 23).

V. INDICES CLIMATIQUES

Le calcul des indices climatiques donne un aperçu sur les caractéristiques du climat de la région. Nous calculons en premier l'indice de Martonne, qui va nous renseigner sur les caractéristiques régionales du climat.

1. CALCUL DE L'INDICE D'ARIDITÉ DE MARTONNE (1923)

Défini par la formule et la classification suivantes :

1.1. L'indice d'aridité annuel

La formule climatique de Martonne est appelée indice d'aridité, il est en fonction de la température et de la précipitation :

$$A = \frac{P}{T+10} \quad \text{Équation 2}$$

Avec :

P : précipitation moyenne annuelle en (mm).

T : température moyenne annuelle en C°.

A : indice d'aridité annuelle.

Selon De Martonne

- Si $A < 5 \Rightarrow$ le climat est hyperaride.
- Si $5 < A < 7.5 \Rightarrow$ le climat est désertique
- Si $7.5 < A < 10 \Rightarrow$ le climat est steppique.
- Si $10 < A < 20 \Rightarrow$ le climat est semi-aride
- Si $20 < A < 30 \Rightarrow$ le climat est tempéré
- Si $A > 30 \Rightarrow$ l'écoulement est abondant (climat humide)

Tableau 6: Indice d'aridité annuel (A) des deux stations (1989/90-2012/13)

Stations	P (mm)	T (°C)	A	Observation
Hammam Dèbagh	578.82	19.1	19.95	Climat semi-aride
Héliopolis	586.15	19.34	19.98	Climat semi-aride

Selon le tableau ci-dessus (Tableau 6), la région d'étude est caractérisée par un climat semi-aride.

1.2. L'indice d'aridité mensuel

On peut également calculer les indices d'aridité mensuels (pour déterminer les mois les plus secs) en utilisant les hauteurs moyennes des précipitations mensuelles interannuelles (mm) et

les températures mensuelles interannuelles (°C) de la période prise pour l'étude (1989-90/2012-13) dans la formule :

$$I = \frac{12P}{T+10} \quad \text{Équation 3}$$

Tableau 7: Indice mensuel d'aridité (I) (1989/90-2012/13)

Mois	S	O	N	D	J	F	Mars	Avr	Mais	Juin	Jul	Aout
Hammam Dèbagh	13.0	16.9	33.2	53.0	53.9	42.1	31.9	26.0	19.4	5.2	1.2	3.0
Héliopolis	12.43	16.24	32.51	51.06	54.41	40.75	32.54	30.15	16.47	4.59	0.80	3.07

Les résultats obtenues (Tableau 7) montre que notre région d'étude est caractérisée par une variation du type du climat d'un mois à l'autre où le climat est hyperaride pendant l'été (juin-juillet et aout), semi-aride pour les mois de mai, septembre et octobre alors que le climat humide marque le reste des mois de l'année (Figure 24).

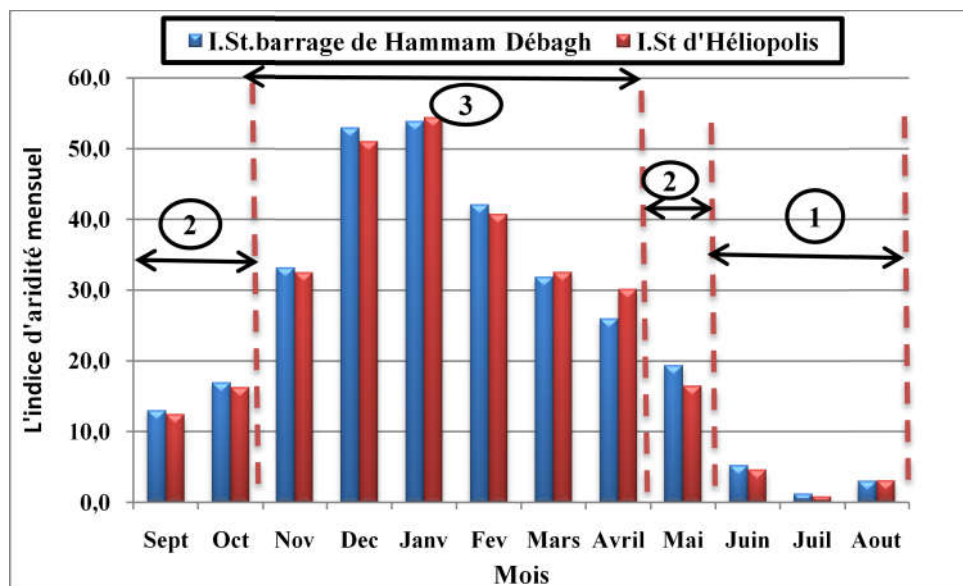


Figure 24: Indice mensuel d'aridité à travers la zone d'étude (1989/90-2012/13)

1. Climat hyperaride ; 2. Climat semi-aride ; 3. Climat est tempéré

VI. BILAN D'EAU

L'établissement du bilan d'eau, pour une période donnée, a pour but la connaissance de la répartition plus ou moins grossière des précipitations entre les composantes suivantes l'évapotranspiration, le ruissellement et l'infiltration. Ainsi, pour déterminer le bilan de la région d'étude il est indispensable d'évaluer ses composantes.

Le calcul du bilan d'eau relatif à la période (1989/90-2012 /13) repose sur l'application de l'équation suivante :

$$P = E + R + I \quad \text{Équation 4}$$

Avec :

P: Pluviométrie moyenne annuelle en mm

E: Evapotranspiration réelle moyenne annuelle en mm

R: Ruissellement moyen annuel en mm

I: Infiltration moyenne annuelle en mm

1. L'EVAPOTRANSPIRATION

Le paramètre évapotranspiration a une grande importance pour les études hydrologiques, car il intéresse le bilan hydrologique ainsi que les réserves souterraines. Nous appelons évapotranspiration la quantité d'eau perdue par le sol pendant une période déterminée par évaporation directe et par consommation due aux végétaux. On peut aussi définir l'évapotranspiration comme étant l'ensemble des phénomènes d'évaporation des plans d'eau (processus physique) et de la transpiration des plantes (phénomènes biologiques), on distingue;

1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Elle représente la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant, si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'est pas un facteur limitant. Pour calculer l'ETP, on applique la formule empirique de C.W. Thornthwaite qui se base essentiellement sur la température de l'air.

$$ETP = 16 (10 T / I)^a * K \quad \text{Equation 5}$$

$$i = (T/5)^{1.5} \quad I = \sum_{1}^{12} i \quad a = 1.6/100 * I + 0.5$$

Avec

ETP: l'évapotranspiration potentielle mensuelle en [mm]

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en [°C].

i : Indice thermique mensuel.

I : indice annuel de chaleur.

K : Coefficient d'ajustement mensuel.

Les résultats de l'E.T.P mensuelles sont reportés dans le tableau ci-dessous (Tableau 8).

Tableau 8: Calcul de l'E.T.P selon la méthode C.W. Thornthwaite (1989/90-2012/13)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Jun	Juil	Août	Année
L'évapotranspiration potentielle en (mm)													
St. Barrage H Débagh	118.2	72.6	28.78	14.9	12.73	14.45	32.6	52.96	98.8	201.8	202.4	185.5	1035.81
Héliopolis	119.2	75.7	31.37	17.4	12.2	13.9	31.6	45.40	97.2	187.3	222.4	197.4	1050.9

1.2. L'évapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle s'identifie au déficit d'écoulement et peut se calculer à partir de nombreuses formules qui induisent l'utilisation de deux paramètres climatiques à savoir : la pluviométrie et la température. L'évapotranspiration réelle est en fonction de la quantité de pluie tombée dans le bassin de la réserve maximale en eau du sol.

▪ Formule de Turc

Turc a proposé une formule permettant l'évaluation d'ETR annuelle d'un bassin versant en fonction des températures et des précipitations moyennes annuelles applicable à tous les climats.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)}} \quad \text{Équation 6}$$

Où $L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$

Avec:

P : désigne précipitation moyenne annuelle (mm)

L : désigne un paramètre dépendant de la température (T)

T : désigne la température moyenne annuelle (°C).

Les calculs de l'ETR sont reportés dans le tableau ci-après (Tableau 9)

Tableau 9: Estimation de l'ETR annuelle selon la méthode de Turc

Paramètres	P (mm)	T (C°)	L	ETR (mm)
St. Barrage H Débagh	578.82	19.1	1126	536.44
Héliopolis	586.15	19.34	1145	543.74

▪ Formule de COUTAGNE

L'ETR peuvent être estimés en fonction de la température moyenne annuelle et de la précipitation moyenne annuelle, selon la formule suivante applicable si : $1/8\lambda < P < 1/2\lambda$

$$ETR = P - \lambda P^2 \quad \text{Équation 7}$$

Où $\lambda = 1 / (0.8 + 0.14 T)$

Avec :

P : désigne la précipitation moyenne annuelle en (m)

λ : désigne un paramètre dépendant de la température.

T : désigne la température moyenne annuelle en (°C).

Tableau 10: Estimation de l'ETR annuelle selon la méthode de COUTAGNE

Paramètres	P (m)	T (C°).	λ	$1/8\lambda$	$1/2\lambda$	ETR [mm]
St. Barrage H Débagh	0.578	19.1	0.288	0.434	1.736	481
Héliopolis	0.586	19.34	0.285	0.439	1.754	488

▪ Formule de Thornthwaite

D'après Thornthwaite, le bilan mensuel peut être établi avec l'intégration des précipitations et l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette méthode permet l'estimation pour chaque mois des paramètres suivants :

- L'évapotranspiration réelle (ETR).
- la réserve facilement utilisable (RFU).
- Le déficit agricole (DA).
- L'excédent [water surplus](Ex).

Le bilan d'eau de Thornthwaite retrace le schéma des échanges et du transfert des eaux à l'intérieur d'une région. Le principe est basé sur deux cas:

Cas : $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$

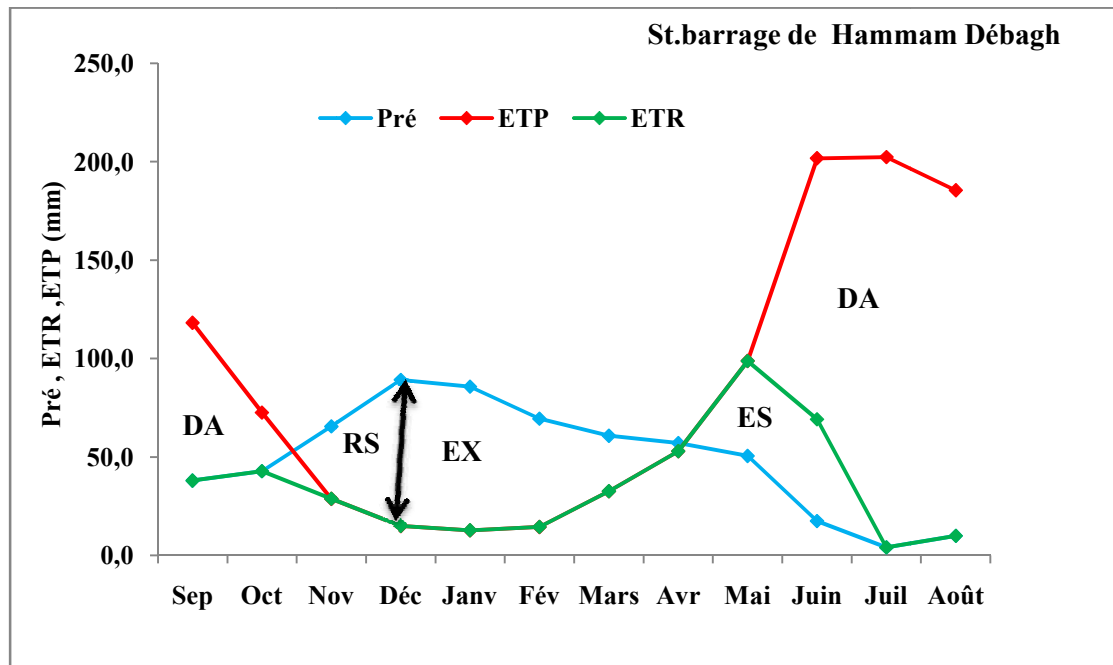
Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation [un sol saturé, quand il aura absorbé une lame d'eau équivalente à une précipitation de 100 mm], le surplus, représentera l'écoulement superficiel.

Cas : $P < ETP$

- On évapore toute la pluie.
- On prend la RFU [jusqu'à la vider] l'eau nécessaire pour satisfaire le pouvoir évaporant.
- Si la RFU =0, la quantité DA = ETP-ETR représente le déficit agricole c'est-à-dire la quantité qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

**Tableau 11: Bilan Hydrique de Thornthwaite de la station de Hammam Dèbagh
(1989/90-2012/13)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
Pré	38.0	42.8	65.6	89.2	85.8	69.5	60.8	57.1	50.6	17.4	4.0	9.9	590.7
T°C	25.2	20.4	13.7	10.2	9.1	9.8	12.9	16.4	21.3	30.2	30.0	29.7	
k	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
i	11.31	8.24	4.54	2.91	2.46	2.74	4.14	5.94	8.79	14.84	14.70	14.48	95.10
ETP	118.18	72.60	28.78	14.93	12.73	14.45	32.60	52.96	98.83	201.82	202.40	185.53	1035.81
RFU	0	0	36.8	100.00	100	100	100	100	51.7	0	0	0	
ETR	38.0	42.8	28.78	14.93	12.73	14.45	32.60	52.96	98.83	69.2	4.0	9.9	419.2
EX	0	0	0	11.1	73.1	55.0	28.2	4.1	0	0	0	0	171.5
DA	80.14	29.82	0	0	0	0	0	0	0	132.65	198.36	175.62	616.6



**Figure 25: Bilan d'eau de C.W.Thornthwaite à la station du barrage de Hammam Dèbagh
(1989/90-2012/13)**

DA : Déficit agricole, RS : recharge du stock, EX : excédent, ES : épuisement du stock.

Tableau 12: Bilan Hydrique de Thornthwaite de la station d'Héliopolis (1989/90-2012/13)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Janv	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Août	Total
Pré	36.73	41.96	66.38	90.20	86.60	67.23	62.09	63.83	42.95	14.99	2.78	10.40	586.2
T°C	25.45	21	14.5	11.2	9.1	9.8	12.9	15.4	21.3	29.2	31.5	30.7	
k	1.03	0.97	0.86	0.81	0.87	0.85	1.03	1.1	1.21	1.22	1.24	1.16	
i	11.48	8.61	4.94	3.35	2.46	2.74	4.14	5.41	8.79	14.11	15.81	15.21	97.06
ETP	119.24	75.68	31.37	17.39	12.19	13.87	31.56	45.40	97.20	187.28	222.41	197.36	1050.94
RFU	0	0	35.0	100.00	100	100	100	100	45.8	0	0	0	
ETR	36.7	41.96	31.37	17.39	12.19	13.87	31.56	45.40	97.20	60.75	2.78	10.40	401.6
EX	0	0	0	7.83	74.4	53.4	30.5	18.4	0	0	0	0	184.6
DA	82.51	33.72	0	0	0	0	0	0	0	126.53	219.63	186.96	649.4

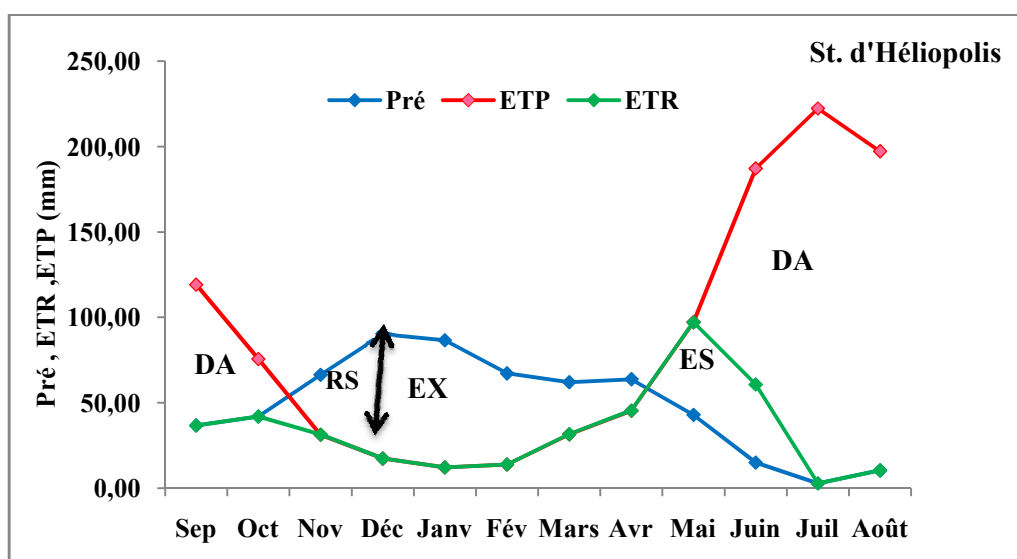


Figure 26: Bilan d'eau de C.W.Thornthwaite à la station d'Héliopolis (1989/90-2012/13)

L'examen des tableaux 11 et 12, permet de conclure que :

- La reconstitution de la réserve du sol commence en Novembre et atteint son maximum (100 mm) durant la période allant de Décembre jusqu'au mois d'Avril ;
- L'écoulement commence au mois de Janvier et cesse au mois de Mai ;
- A partir du mois de Mai Les précipitations ne satisferont plus l'évapotranspiration et c'est le début de l'épuisement de la réserve qui se poursuivra jusqu'à la vider ;
- Un déficit agricole s'observe entre juin et Octobre correspondant à la période d'irrigation.

1.3. Discussion des résultats

Les différentes valeurs de l'évapotranspiration réelle obtenues par l'emploi des différentes formules sont rassemblées dans le tableau ci-après (Tableau 13).

Tableau 13: Récapitulatif des ETR calculé par les différentes méthodes

Méthode	St du barrage de Hammam Debagh	St d'Héliopolis
C.W.THORNTHWAITE	419.2	401.6
TURC	536.44	543.74
COUTAGNE	481	488

Selon les résultats obtenus (Tableau 13), on peut dire que les valeurs de l'ETR obtenues par la méthode de TURC et COUTAGNE sont supérieures à celles obtenues par la méthode de Thornthwaite.

L'utilité de la comparaison réside dans les écarts décelés lors de l'application des trois méthodes pour aboutir à une meilleure approche à l'estimation de l'ETR ce qui par suite fera ressortir la formule qui est mieux appropriée dans la zone d'étude. Étant donné que les formules élaborées chacune en un lieu différent. Il est clair que la formule de C.W.Thornthwaite convient aux régions humides tempérées contrairement à celle de TURC qui présente un caractère universel. Pour clore notre analogie, la méthode de C.W.Thornthwaite s'avère la plus efficace, en plus de la similitude des circonstances dans lesquelles elle a été émise, avec notre région d'étude, elle admet un coefficient de correction k.

2. L'ESTIMATION DU RUISSELLEMENT

Pour déterminer le bilan hydrologique. Il est nécessaire d'évaluer le ruissellement dans le but d'apprécier l'importance de l'érosion mécanique et chimique qui affecte la surface de la terre. Le ruissellement (R) peut être calculé par la formule Tixeront Berkaloff.

$$R = \frac{P^3}{3(ETP)^2} \quad \text{Equation 8}$$

Si : $P < 600$

Cette formule est modifiée par Romantchok [1974] comme suit :

$$R = \frac{P^3}{3} \quad \text{Équation 9}$$

Si : $P > 600$

Avec :

P: Précipitation moyenne en m.

R: Ruissellement en m.

ETP: Evapotranspiration potentielle en m.

Etant donné que la pluviométrie dans la zone d'étude est inférieure à 600 mm/an dans les deux stations étudiées, pour l'estimation du ruissellement, la formule de Tixeront-Berkaloff est applicable.

La lame d'eau ruisselée des précipitations des deux stations est reportée dans le tableau ci-dessous.

Tableau 14: Estimation de ruissellement selon la formule de Tixeront-Berkaloff

Stations	St du barrage de Hammam Debagh	St d'Héliopolis
R (mm)	60.25	60.78

3. ESTIMATION DE L'INFILTRATION

L'infiltration représente la quantité d'eau qui pénètre dans le sol et le sous-sol pour alimenter les aquifères. Le paramètre est difficile à évaluer car, il échappe aux mesures directes, grâce à l'équation du bilan hydrique on peut déduire les infiltrations.

$$P = ETR + R + I \Rightarrow I = P - (ETR + R) \quad \text{Équation 10}$$

Avec

I: infiltration en (mm).

P: précipitations annuelles en (mm)

R : ruissellement de surface en (mm).

ETR: évapotranspiration réelle en (mm).

Les calculs de l'infiltration sont reportés dans le tableau ci-après (Tableau 15).

Tableau 15: Estimation de l'infiltration selon l'équation globale du bilan d'eau

Stations	P	ETR	R	I
St barrage de Hammam Débagh	578.82	419.2	60.25	99.37
St d'Héliopolis	586.15	401.6	60.78	123.70

On remarque que les quantités des eaux du ruissellement et de l'infiltration sont faibles par rapport aux valeurs des paramètres tels que l'ETR et l'ETP.

VII. CONCLUSION

Du point de vue climatique, l'étude montre que les régions de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali sont soumises à un climat méditerranéen caractérisé par une saison humide qui s'étale du mois d'octobre au mois de Mai. Quant à la saison sèche, elle s'étend sur le reste de l'année. La pluviométrie moyenne sur une période de 24 ans au niveau des deux stations climatiques prises en compte est de 582.49mm. Une grande partie de ces pluies participe au phénomène de l'évapotranspiration soit une lame d'eau de 410 (mm).

L'infiltration est de l'ordre de 111.53 mm, soit 19 % des précipitations qui pourront jouer un rôle important dans la recharge des nappes d'eau souterraines. La température moyenne annuelle varie entre 19.1° et 19.34 °C.

PARTIE II: ETUDE HYDRO-CHIMIQUE

- ❖ ***CHAPITRE IV: FACIES CHIMIQUE ET EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE***
- ❖ ***CHAPITRE V: APTITUDE DES EAUX THERMO-MINERALES A L'IRRIGATION***
- ❖ ***CHAPITRE VI: INDICE DE SATURATION ET ORIGINE DE LA MINERALISATION***
- ❖ ***CHAPITRE VII: ORIGINE DES TRAVERTINS ET AFFAISSEMENT DE LA CASCADE DE H-MESKOUTINE***

CHAPITRE IV. FACIES CHIMIQUE ET EVOLUTION SPATIOTEMPORELLE

I. INTRODUCTION

Toute étude hydrogéologique doit être complétée par une étude chimique qualitative qui permet de connaître :

- Les critères physico-chimiques de la qualité des eaux de ses sources thermo-minérales, ainsi qu'à établir la relation géologie-chimie ;
- L'origine de la minéralisation des eaux des sources thermo-minérales.

L'analyse hydrochimique qui constitue la partie principale de notre travail est basée sur les analyses effectuées au niveau des eaux de sources thermo-minérales de la région de Hammam Meskoutine et la région de Hammam Ouled Ali.

1. MATERIELS ET METHODES

Deux campagnes d'analyses ont été effectuées comme suit :

- 1^{ère} campagne : 15 Février 2016
- 2^{ème} campagne : 15 juin 2016

A cet effet, l'échantillonnage a été effectué au niveau de deux (02) régions (Hammam Meskoutine et la région de Hammam Ouled Ali), dont dix (10) stations préalablement positionnées. Soit au total 40 échantillons d'eau à analyser au laboratoire au cours des campagnes.

Parmi les éléments majeurs étudiés ont été retenus: les paramètres physico-chimiques (pH, température, TDS, conductivité, oxygène dissous) sont mesurés in situ à l'aide d'un appareil multi-paramètres. Les teneurs en Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} ont été déterminées par la méthode d'analyse standard : volumétrie (colorimétrique), les concentrations des Na^+ et K^+ par spectrophotomètre d'absorption atomique. Ces analyses ont été réalisées par le laboratoire (l'Algérienne des eaux (ADE) –SKIKDA).

II. LE CHIMISME DES EAUX DE SOURCES THERMO-MINERALES DE HAMMAM MESKOUTINE

Les points de prélèvement (Figure 27), sont largement réparties sur la zone d'étude ont été choisies de telle sorte qu'elles soient représentatives, accessibles, témoins des caractéristiques réelles de ces eaux au niveau des différents sites prospectés et permettant de cerner l'ensemble des processus physiques et chimiques définissant le fonctionnement de cet système géothermal.

Tableau 16: Les cordonnés des différents points de prélèvement

points	Nom	X	Y	Z (m)
1	Ain Skhouna	7°15'8.0401"	36°25'36.3168"	561
2	Chedakha 01	7°15'55.4082"	36°26'45.4809"	331
3	Chedakha 02	7°15'59.0487"	36°26'56.9568"	313
4	Cascade 01	7°16'8.3560"	36°27'28.1806"	290
5	Cascade 02	7°16'11.7907"	36°27'29.0742"	304
6	Cascade 03	7°16'11.8528"	36°27'31.7037"	299
7	Source Ain Echfa	7°16'9.9926"	36°27'32.2608"	294
8	Source Plateau Des Cônes	7°16'15.9024"	36°27'30.2371"	302
9	Chemin De Fer	7°16'31.5265"	36°27'32.1507"	278
10	Source Charchar	7°16'25.2107"	36°27'36.1808"	272

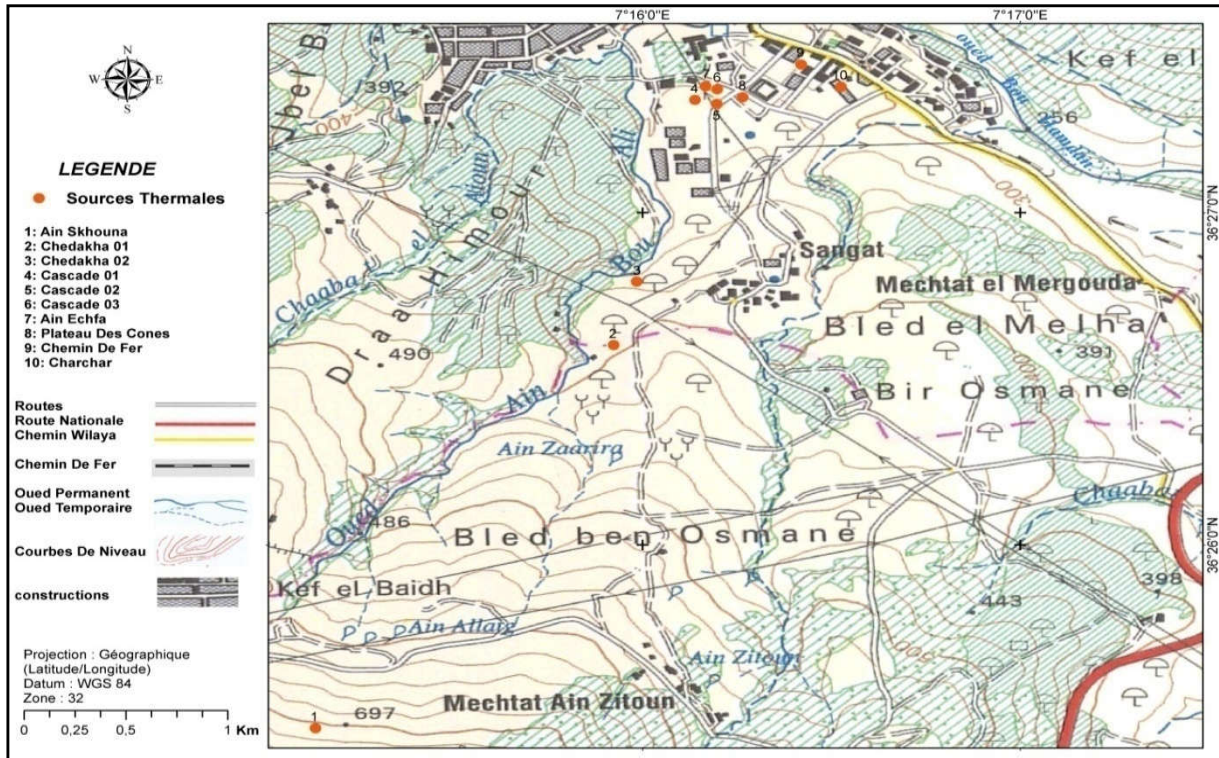


Figure 27: Carte d'inventaire des points de prélèvements dans la région de Hammam Meskoutine

1. FACIES CHIMIQUE

1.1. Diagramme de piper

Le diagramme de Piper permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements par famille présentant des faciès similaires, permettant ainsi une première classification des échantillons les uns par rapport aux autres avant une étude plus détaillée point par point (Piper; 1944).

Les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine ont une composition chimique étroitement liée aux terrains qui les contiennent, afin de déterminer l'origine des eaux souterraines, les résultats des analyses chimiques de ces eaux portés sur le diagramme de Piper (Figure 28), permet de déterminer les tendances chimiques des eaux de sources.

D'une manière générale, quel que soit la période (étiage ou crue) les faciès des eaux sont presque identiques où le faciès dominant est chloruré et sulfaté calcique et magnésien (Benamara et al., 2017).

1.2. Diagramme de Schöller Berkloff

De même, on a procédé au report des résultats d'analyses sur le diagramme de Schöller-Berkloff (Figure 29), et on a révélé l'existence des faciès suivants :

- Bicarbonaté magnésien.
- Sulfaté magnésien.

Ces faciès sont à l'origine de la dissolution des terrains calcaréo-dolomitiques du crétacé et lessivage des formations évaporitiques.

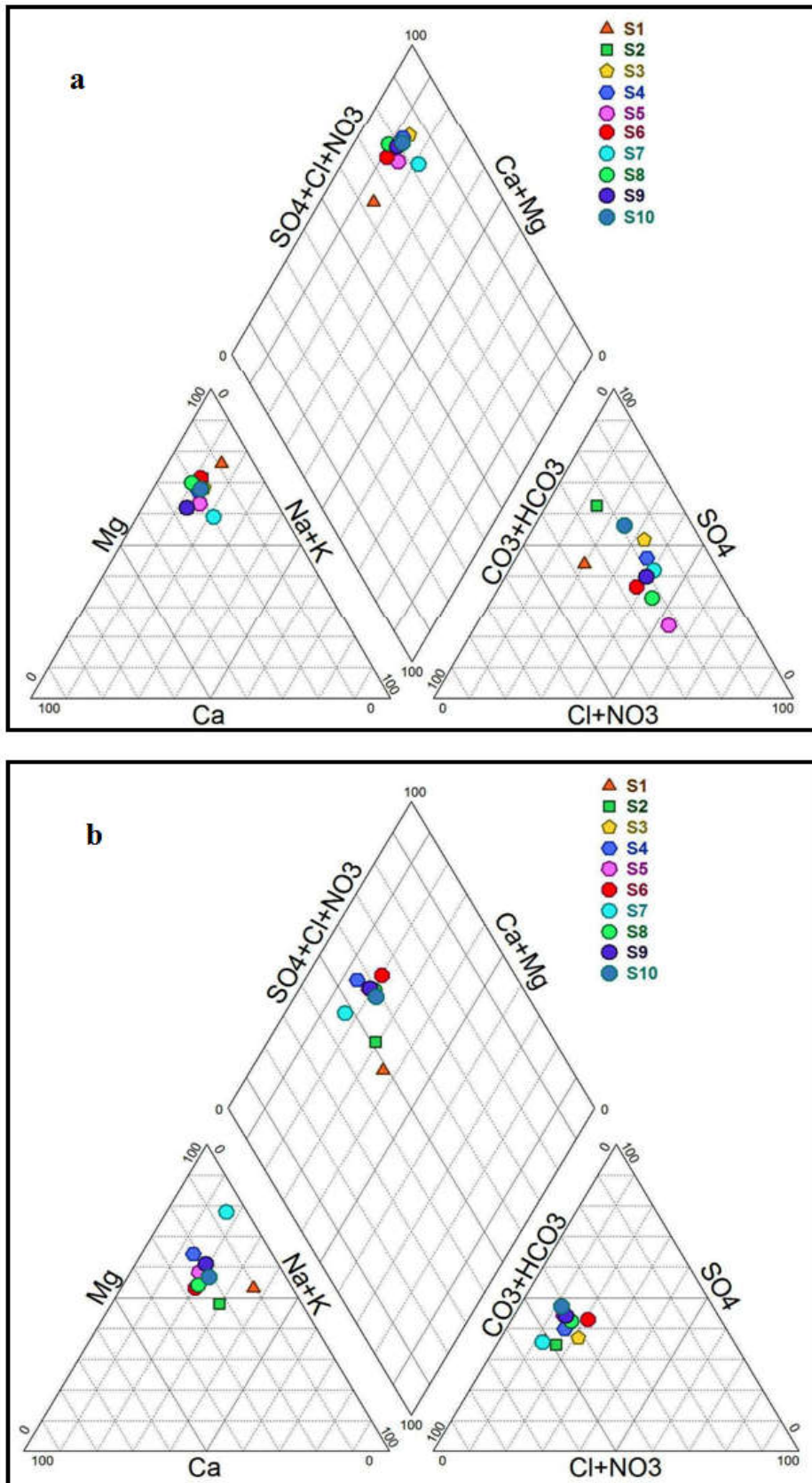


Figure 28: Diagramme de Piper des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Hautes eaux ; b) Basses eaux

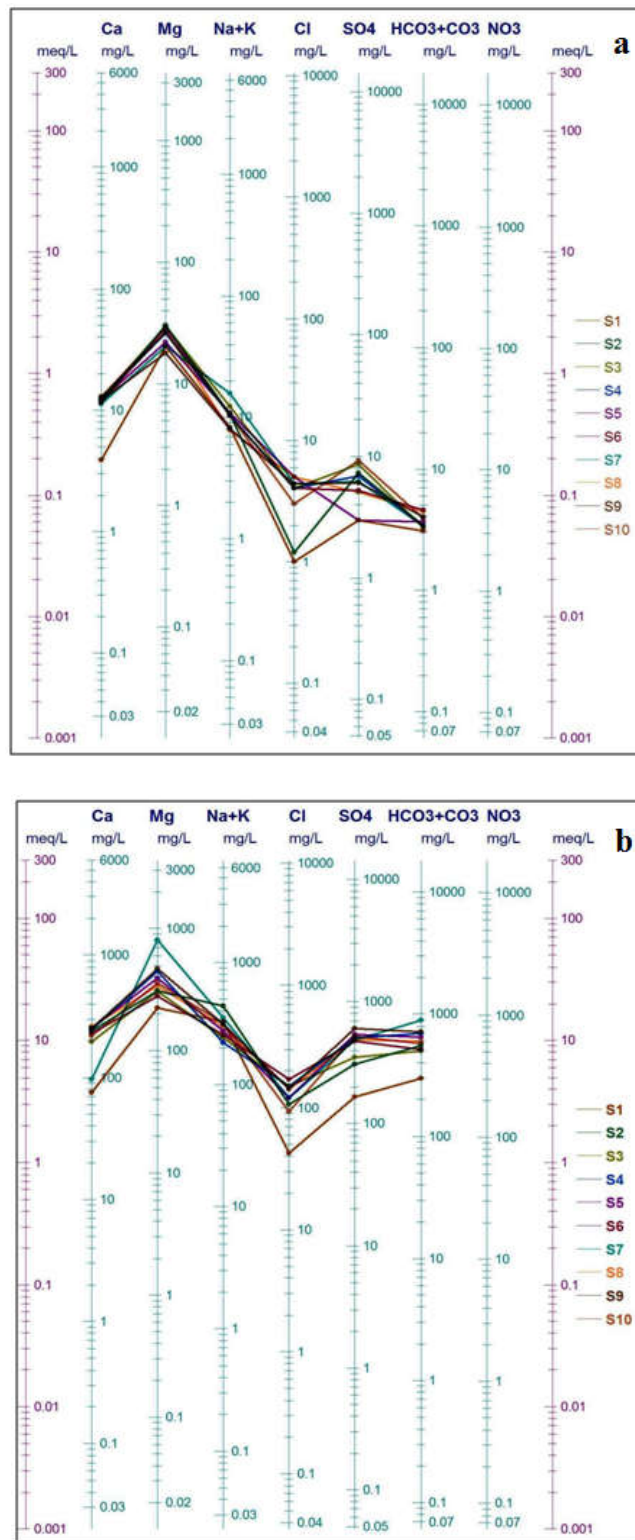


Figure 29: Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a)Hautes eaux ; b) Basses eaux

III. LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

1. LES PARAMETRES PHYSIQUES

Le traitement statistique des différents paramètres physiques a été effectué et reporté sur le tableau 17.

Tableau 17: Traitement statistique des paramètres physiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

		T(C°)	PH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Salinité (g/l)	O ₂ dissous
Basses eaux	Max	96	7.58	2200	1	1.7
	Min	41	6.74	733	0.1	1.29
	Moy	82.9	6.99	1813	0.83	1.48
	Ecartype	17.73	0.26	404.98	0.26	0.15
	CV %	21.39	3.75	22.34	31.65	10.40
Hautes eaux	Max	94	7.51	2360	1.1	1.7
	Min	39	6.01	810	0.1	1.29
	Moy	81.40	6.70	2008.7	0.9	1.5
	Ecartype	17.93	0.49	434.01	0.28	0.15
	CV%	22.02	7.27	21.61	32.52	10.04

D'après le tableau ci-dessus, on remarque que les paramètres physiques des sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine conservent même allure (évolution dans le temps) pour les deux compagnes.

1.1. Le potentiel d'Hydrogène (pH)

La variabilité temporelle du pH traduite par le coefficient de variation, elle est relativement beaucoup plus faible d'une source à l'autre, et même d'une compagne à l'autre ils sont compris entre 3 et 7 % ce qui traduit par une certaine régularité de ce paramètre (Tableau 17).

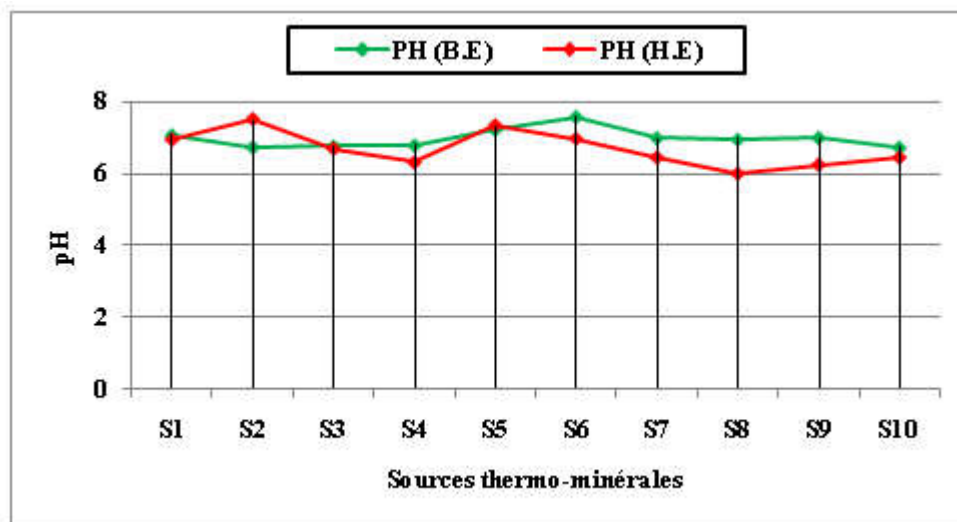


Figure 30: La variation du pH dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine

L'ensemble des sources présentes des valeurs de pH qui varient entre 6.74 à 7.58 en période des basses eaux et entre 6.01 à 7.51 en haute eaux (Figure 31). Les sources qui ont un PH < 7 indiquent que l'eau a un bref contact avec les roches (Berkani et al.; 2016)

1.2. Températures (T°C)

La température de l'eau dépend des échanges thermiques avec l'air ambiant et du rayonnement solaire. La température influence des paramètres comme (l'oxygénation, la conductivité, la solubilité de différentes substances, ...etc.).

L'analyse des résultats obtenus pendant les périodes d'étiage et de crue révèle que les températures des eaux de sources thermo-minérales sont légèrement plus élevées en étiage que pendant la période de crue. Elle oscille entre 41 à 96 °C (basses eaux) et (39 à 94°C) en hautes eaux (Figure 31). Où la plus forte valeur est enregistrée au niveau des sources de la grande cascade de Hammam Meskoutine.

Donc on peut dire que la température de toutes les sources est supérieure à la température moyenne annuelle de l'air. Ce qui explique un thermalisme de basse enthalpie (Arnórsson; 2000).

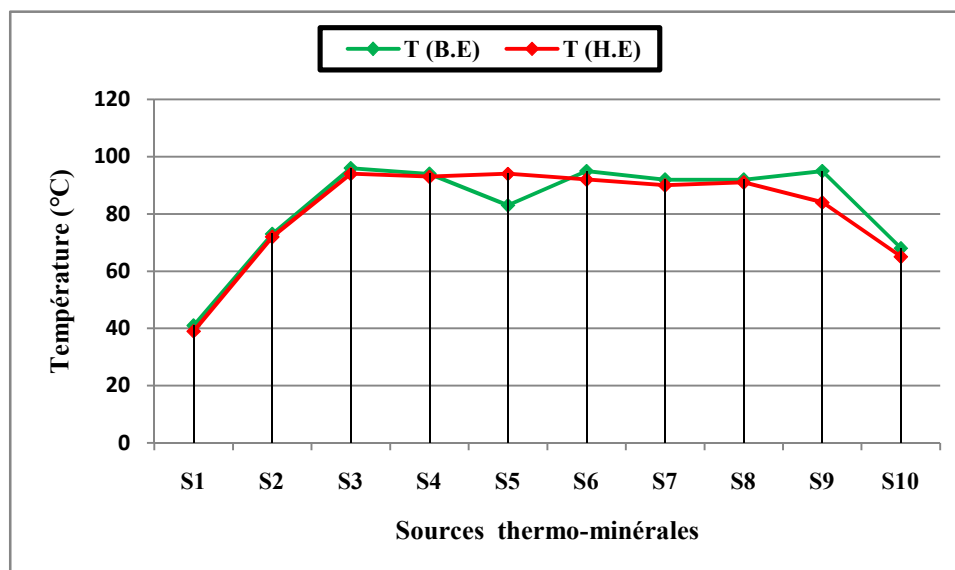


Figure 31: La variation de la température dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine

1.3. La conductivité électrique (CE)

D'après l'analyse des résultats de l'évolution de la conductivité électrique dans les eaux de sources, apparaissent des variations spatio-temporelles de ce facteur similaires à celles de la salinité (Figure 32). On peut éventuellement déduire qu'au niveau de chaque source la conductivité suit d'une façon similaire les mêmes fluctuations que la salinité.

Les valeurs de conductivité électriques mesurées sur terrain pour les eaux de sources varient pendant la période sèche entre un minimum de 733 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans la source d'Ain Skhouna (S1) et un maximum de 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans la source de Chedakha (S3).

Pendant la période des hautes eaux, les concentrations enregistrées sont légèrement moins élevées que celles enregistrées durant la période des basses eaux, Les variations de la conductivité électrique ne présentent pas de tendance saisonnière marquée, néanmoins elles traduisent la forte minéralisation des eaux de sources de la région qui peut être interpréter par la nature des terrains traversés (Calcaires, calcaires-dolomitiques et travertins).

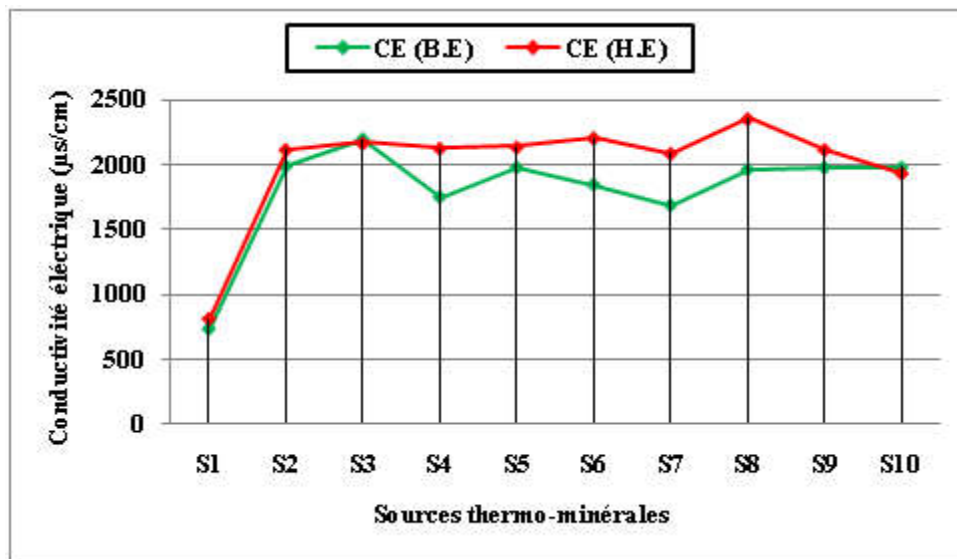


Figure 32: La variation de la conductivité électrique dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine

1.4. La salinité

La salinité mesure la concentration d'une eau en sels dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium, sulfate de magnésium ...etc.). Les salinités mesurées au niveau des eaux de sources varient de 0.83 mg/l (basses eaux) et 0.9 mg/l (hautes eaux) (Figure 33). Cette forte valeur de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution.

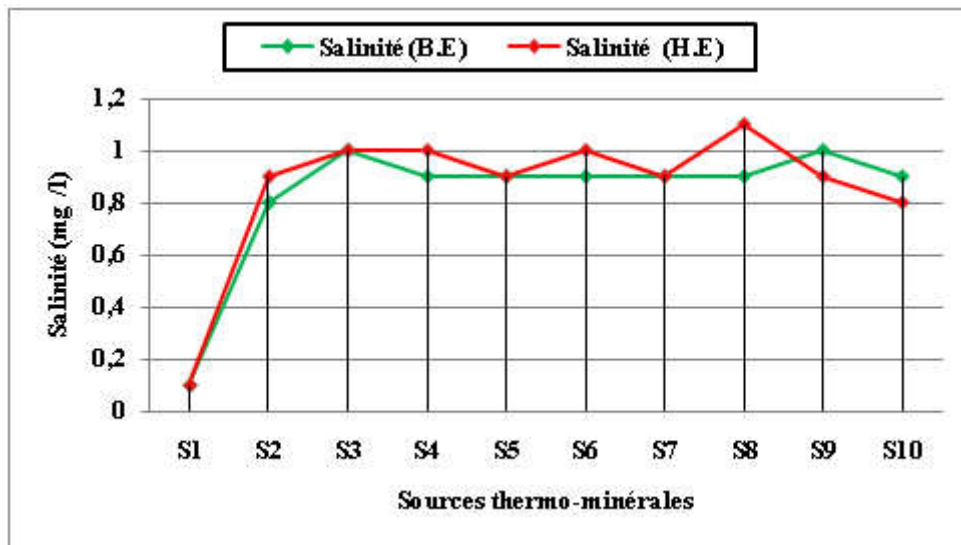


Figure 33: La variation de la salinité dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine

1.5. L'Oxygène dissous (O₂)

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que la pression partielle d'oxygène dans le liquide et l'air soit en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau: la saturation en O₂ diminue lorsque la température et l'altitude augmente (Benrabah; 2013).

L'analyse du profil de l'oxygène dissous au niveau des différents sites d'étude fait apparaître que l'évolution temporelle de ce paramètre est très faible d'une source à l'autre, dont la valeur moyenne au sein des différentes stations oscille entre 1.48 mg/l (basses eaux) et 1.50 mg/l (hautes eaux) (Figure 34).

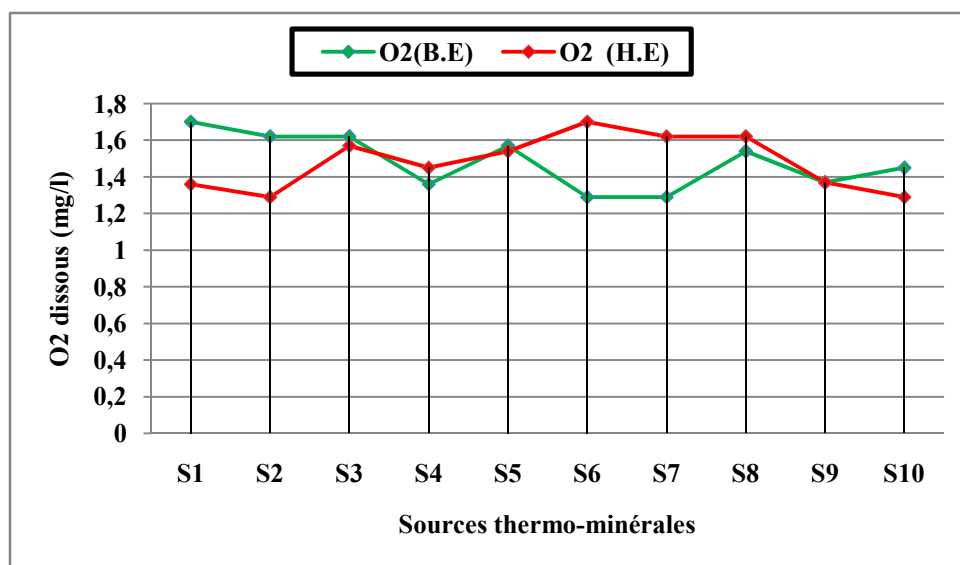


Figure 34: La variation d'O₂ dissous dans les eaux de sources de Hammam Meskoutine

2. LES PARAMETRES CHIMIQUES

Les résultats des analyses chimiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine durant les deux campagnes de prélèvements sont présentés ci-dessous (Tableau 18).

Tableau 18: Paramètres statistiques des ions majeurs des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

		Ca ⁺²	Mg ⁺²	Na ⁺²	K	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻
Basses	Moy	206.80	394.20	163.50	104.78	123.51	601	515
	Min	75	225	142.99	58.11	42.6	300	475
	Max	260	804	184	188.76	170.3	900	600
	Ecartype	66.95	162.50	29	38.92	36.53	159.13	43.87
	CV %	32.38	41.22	17.74	37.15	29.58	26.48	8.52
Hautes	Moy	226.7	299.1	183.7	99.5	127.8	226.9	289.9
	Min	78	214	114	60.89	35.5	190	143
	Max	260	366	260	173.9	177.5	280	440.23
	Ecartype	53.37	53.12	44.89	37.09	50.98	30.58	99.59
	CV%	23.54	17.76	24.44	37.27	39.89	13.48	34.36

2.1. Calcium (Ca²⁺) est liée, soit à la dissolution des formations gypseuses CaSO₄, soit à la dissolution des formations carbonatées CaCO₃. La teneur en calcium varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés. On constate que la plus forte concentration est enregistrée au niveau de la source S8 (260 mg/l basses eaux) et 255 mg/l au niveau de la source S9 en hautes eaux (Figure 35).

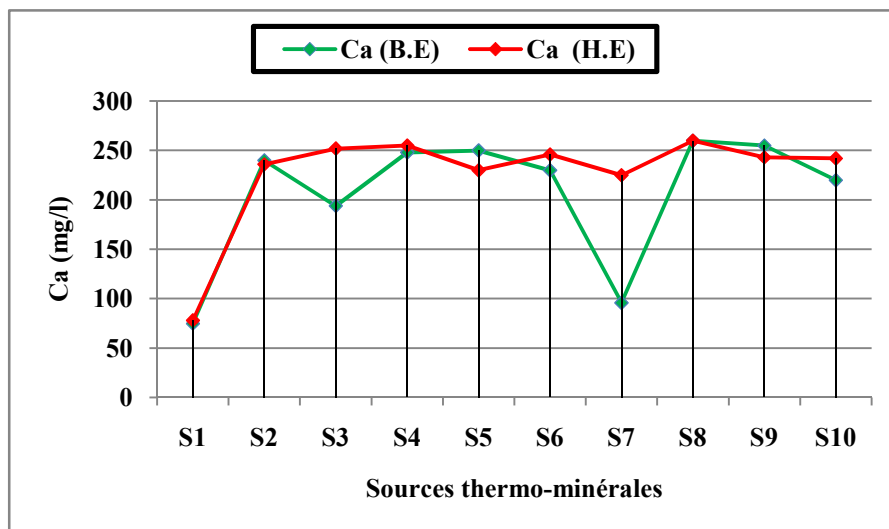


Figure 35: Evolution spatio-temporelle du calcium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

2.2. **Sodium (Na^+)**: Les teneurs en sodium variant entre 128 et 274 mg/l en basses eaux et entre 114-260 mg/l en hautes eaux (Figure 36). Ces paramètres émergent dans les dépôts du marno-calcaires de l'écène inférieur.

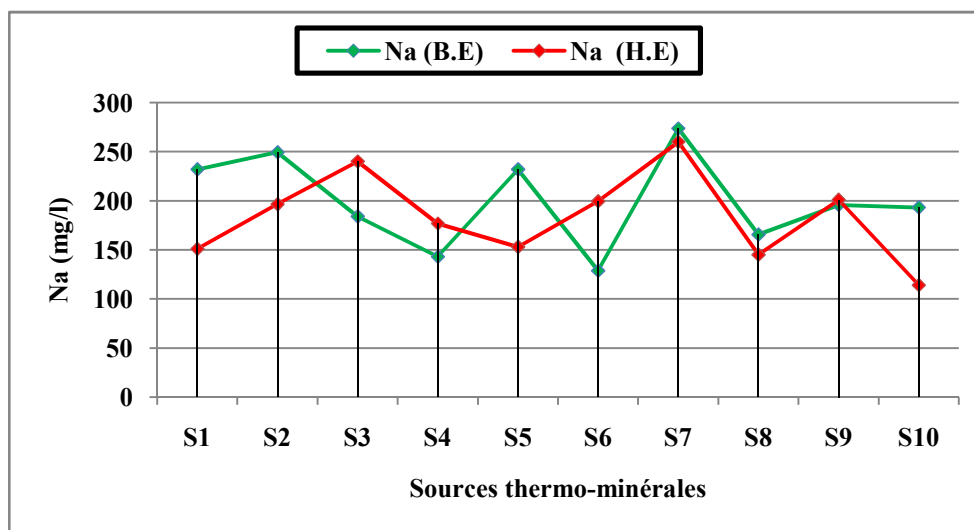


Figure 36: Evolution spatio-temporelle du sodium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

2.3. **Magnésium (Mg^{2+})** : le magnésium accompagne le calcium, ce qui laisse supposer qu'ils ont la même origine, il provient des minéraux solubles tels que le gypse, la calcite et la dolomie, qu'on trouve dans les calcaires et les travertins du Hammam Meskoutine. Les analyses effectuées ont montrés que la concentration atteint son maximum dans la source S7 avec une valeur de l'ordre de 804 mg/l, et une faible valeur enregistrée au niveau de la source S1 (225 mg/l) en basses eaux. En hautes eaux on remarque que le maximum est enregistré au niveau de la source S8 avec une valeur de 254 mg/l, et la faible valeur au niveau de la source S1 (71mg/l) (Figure 37).

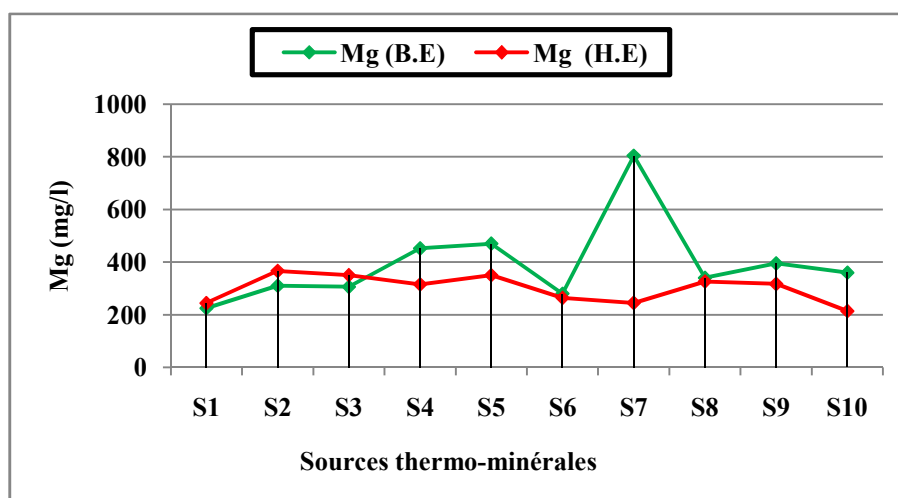


Figure 37: Evolution spatio-temporelle du magnésium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

2.4. Potassium (K^+) : les concentrations du potassium sont assez faibles par rapport aux autres éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+). D'après la (Figure 38), la valeur la plus faible est observée au niveau de la source S3 avec une dose de 58 mg/l en basses eaux et 60.89 mg/l au niveau de la source S9 en hautes eaux. Le maximum est de 188 mg/l à la source S2 (basses eaux) est de l'ordre de 173.1 mg/l au niveau de la source S7 en hautes eaux.

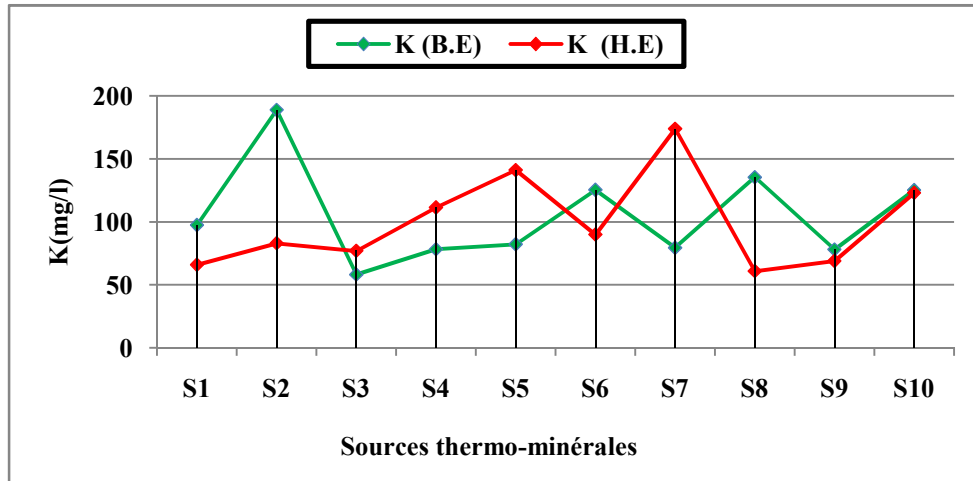


Figure 38: Evolution spatio-temporelle du potassium dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

2.5. Chlorure (Cl) : la source principale de chlorure dans les eaux est due à la dissolution de roches sédimentaires qui se sont déposées en milieu marin et qui n'ont pas été complètement lessivées, et à la présence d'évaporites. Les teneurs en chlorure sont généralement faibles, variant entre 42 et 170 mg/l en période des basses eaux, et oscille entre 35.5 et 177.5 mg/l en période des hautes eaux (Figure 39).

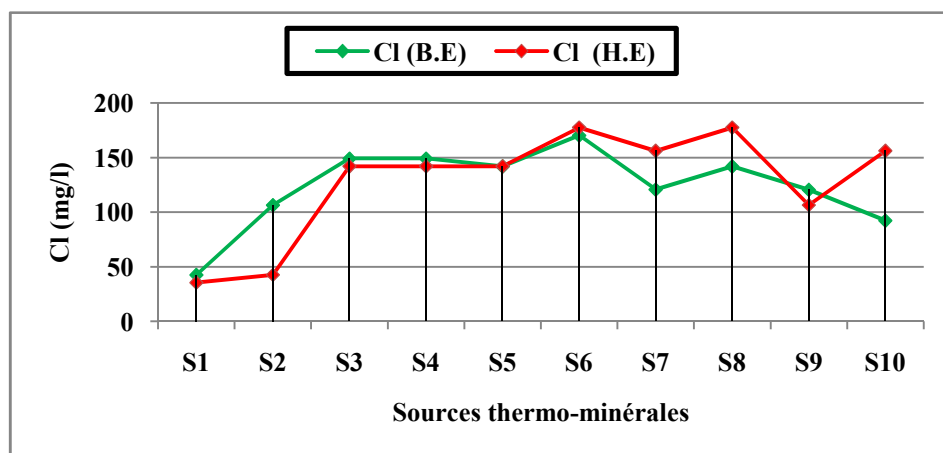


Figure 39: Evolution spatio-temporelle du chlorure dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

2.6. *Sulfates* (SO_4^{2-}) provient probablement des formations marneuses et gypseuses du l'éocène inférieur, le maximum est observé dans la source S5 avec une valeur de 600 mg/l concentrés dans les basses eaux, et 440 mg/l au niveau de la source S9 dans les hautes eaux. Le minimum est observé dans la source S1 avec une valeur de (165.21mg/l basses eaux) et une valeur de l'ordre de (143 mg/l à la source S1 et S6 hautes eaux) (Figure 40).

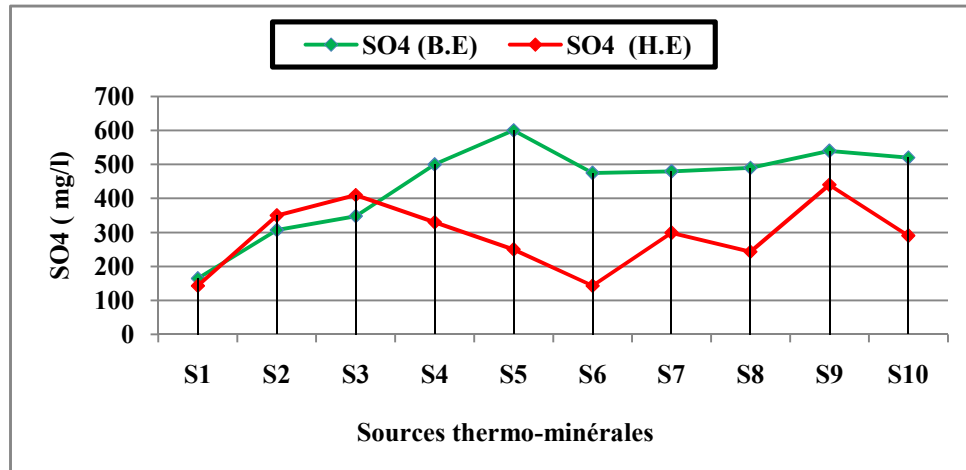


Figure 40: Evolution spatio-temporelle du sulfate dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

2.7. *Bicarbonates* (HCO_3^-) le graphe ci-dessous montre qu'en période des basses eaux les teneurs sont assez variables allant de 300 à 900 mg/l, la plus forte concentration est enregistrée dans les stations S7, en période des hautes eaux, les valeurs sont assez proches passant de 190 à 280 mg/l enregistrées respectivement aux sources S1 et S5 (Figure 41).

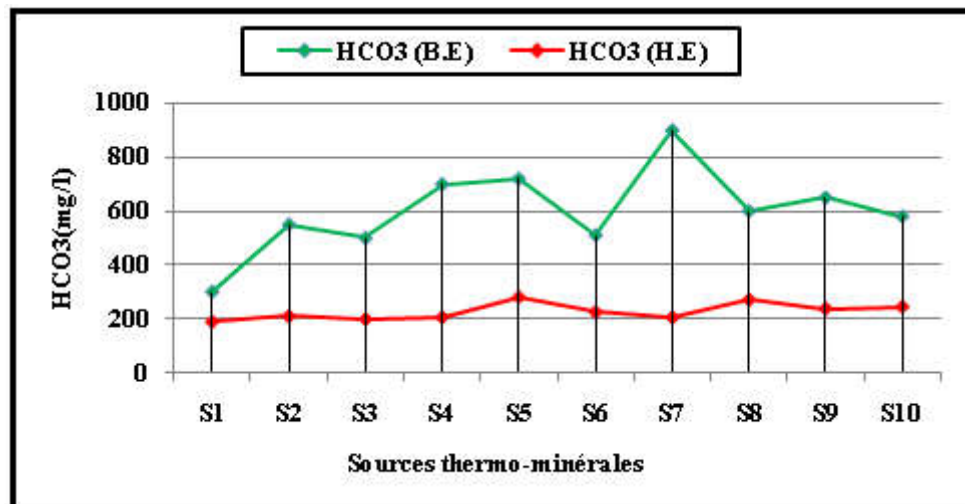


Figure 41: Evolution spatio-temporelle du bicarbonate dans les eaux de sources thermo-minérale Hammam Meskoutine

- Les cations majeurs, présentant l'ordre suivant d'abondance : $Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$ en étiage, gardent le même ordre d'abondance en période de crue.
- Les anions les plus abondants en étiage sont par ordre chronologiques des concentrations moyennes les bicarbonates suivi des sulfates et enfin les chlorures. Au période de crue les $SO_4^{2-} > HCO_3^- > Cl^-$.
- La variabilité des concentrations des différents paramètres traduite par le coefficient de variation (CV%) (Figure 42), elle est relativement faible pour 75% des cations, mais elle est très net à l'échelle des anions entre les deux compagnes, ils sont compris entre 13 et 26 % pour les bicarbonates et 9 et 34% pour les sulfates.

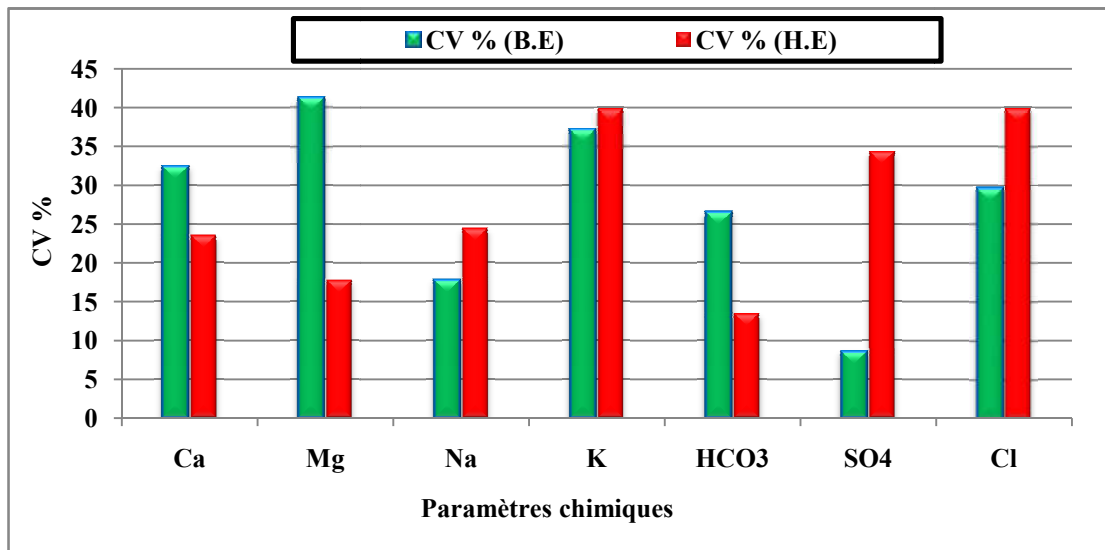


Figure 42: La variation saisonnière des paramètres chimiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

IV. LE CHIMISME DES EAUX DE SOURCES THERMO-MINERALES DU HAMMAM OULED ALI

Les caractéristiques des sources thermo-minérales du Hammam Ouled Ali sont illustrées dans le tableau ci- dessous (Tableau 19)

Tableau 19: Les cordonnés des différents points de prélèvement de Hammam Ouled Ali

Sources	N°	X	Y	Z(m)
S1	101-1-054	918000	373900	230
S2	101-2-054	919000	373900	230
S3	101-3-054	919000	374000	230
S4	101-4-054	919000	374000	230
S5	101-5-054	919200	374100	230
S6	101-6-054	919200	374100	230
S7	101-7-054	919300	374000	240
S8	101-8-054	919350	374000	240
S9	101-9-054	919400	374000	240
S10	101-10-054	919800	374000	240

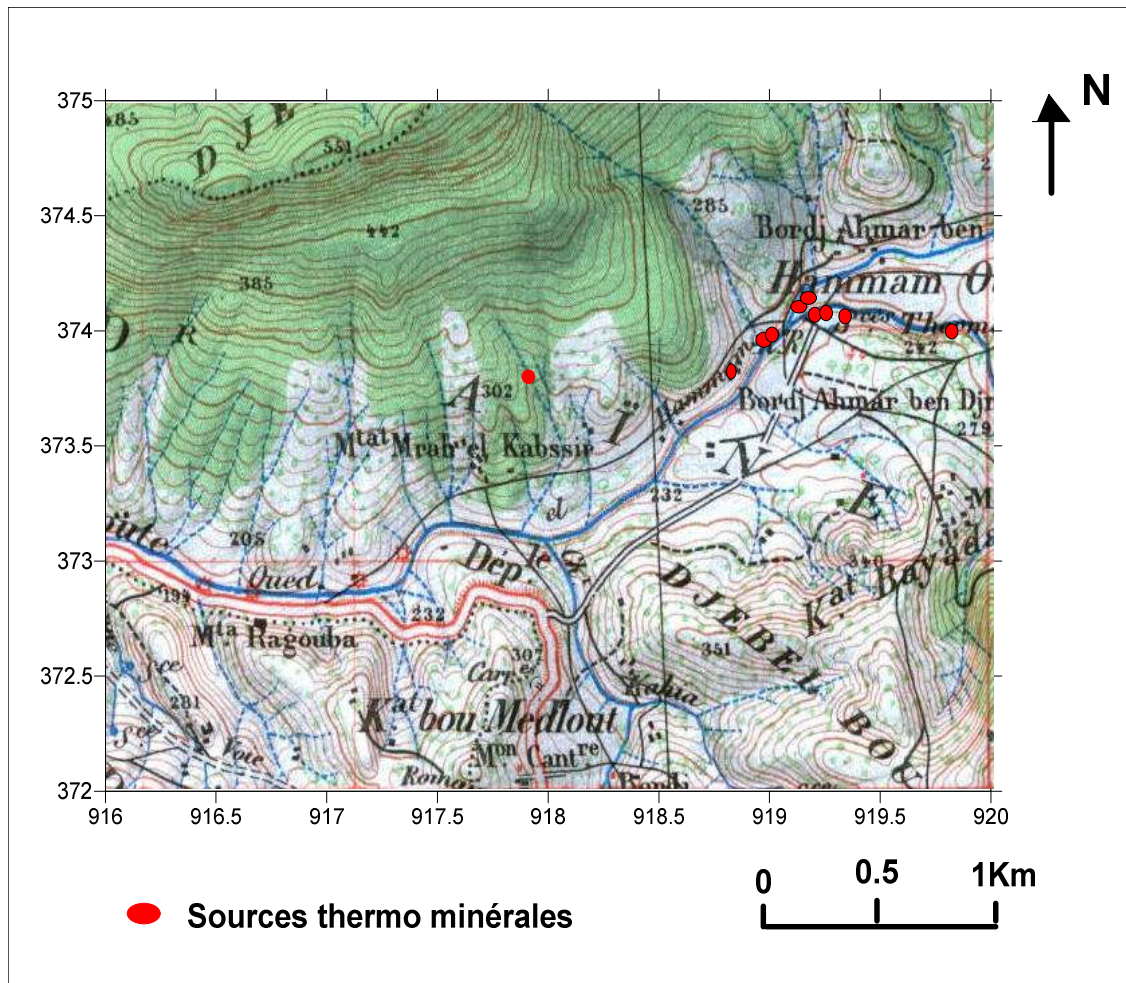


Figure 43: Carte d'inventaire des sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

1. CLASSIFICATION CHIMIQUE DES EAUX DE SOURCES

1.1. Diagramme de Piper

La représentation graphique des résultats des analyses de ces eaux sur le diagramme triangulaire de Piper a mis en évidence l'incidence de la géologie sur la qualité des eaux, a permis aussi d'estimer les pourcentages des éléments chimiques et leur classification. Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès des eaux lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants.

La classification de piper (Figure 44; Figure 45) montre que quel que soit la période (étiage ou crue), les eaux de sources appartiennent à la famille chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne est globalement identique à celle de Hammam Meskoutine.

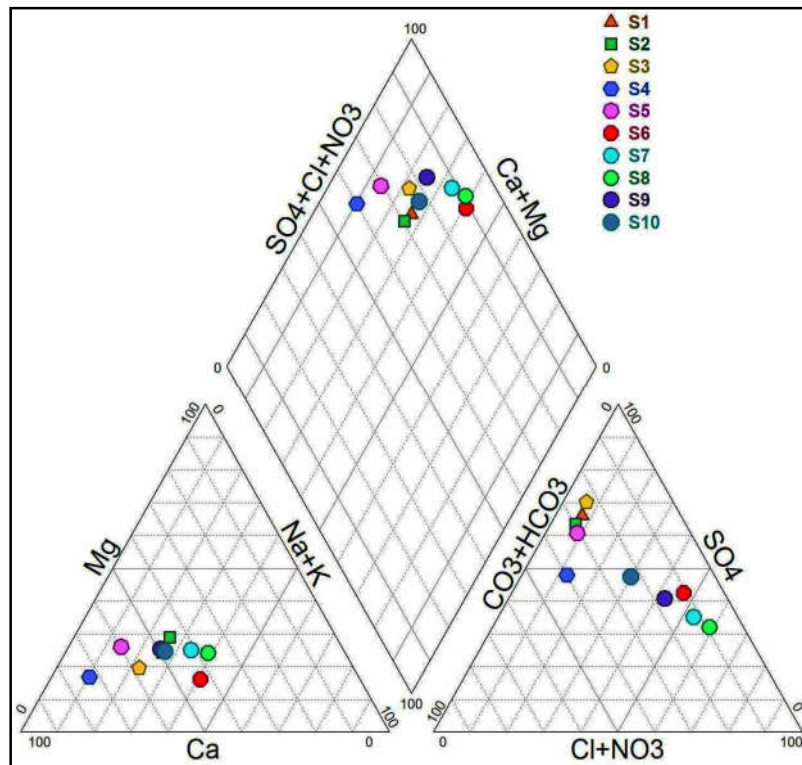


Figure 44: Diagramme de Piper des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des hautes eaux

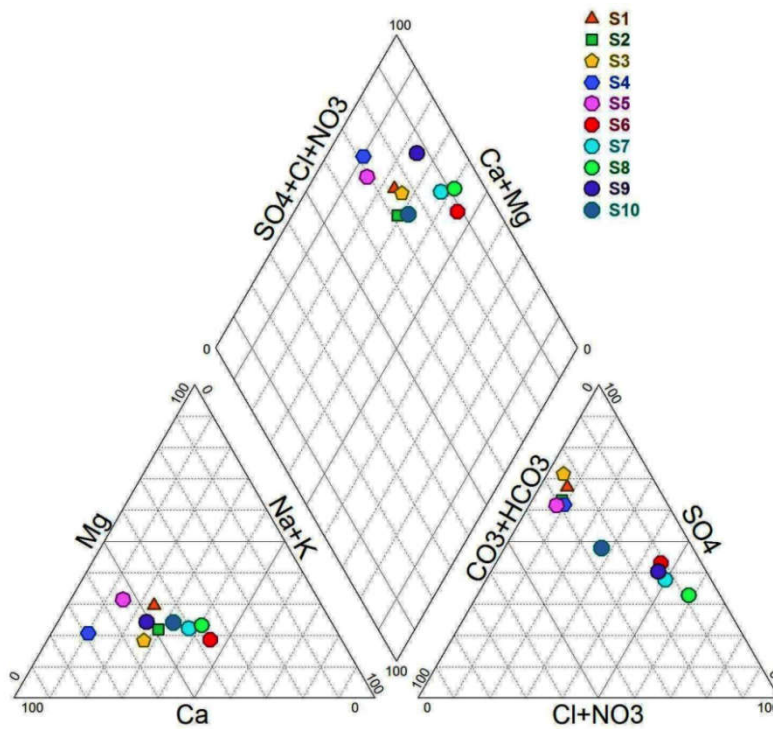


Figure 45: Diagramme de Piper des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des basses eaux

1.2. Diagramme de Schoeler-Berkaloff

La précédente interprétation montre la présence de dix faciès chimiques. Pour déterminer le faciès chimique de chaque échantillon nous allons utiliser le diagramme de Schoeler-Berkaloff (Figure 46; Figure 47). Les résultats des analyses chimiques de ces eaux ont été reportés sur le diagramme ce qui nous a permis d'en déduire que les eaux de sources présentent des faciès chimiques différents dont le faciès dominant est sulfaté calcique (Tableau 20) qui serait lié au lessivage des formations évaporitiques. Le faciès chloruré calcique reflète l'influence des massifs calcaires du sénoniens inférieur. Cependant le faciès chloruré-sodique magnésien, leur provenance géologique peut être due à la dissolution des formations marneuses, gréseuses et argileuses.

Tableau 20: Les faciès chimiques selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff

Faciès chimiques	Sources thermo-minérales	
	Hautes eaux	Basses eaux
Sulfaté-Calcique	S1, S2, S3, S5, S9et S10	S1, S2, S3, S4, S5, S7, S9et S10
Sulfaté-Sodique	S6	S6
Bicarbonaté-Calcique	S4	
Chloruré- Sodique	S8	S8
Chloruré- calcique	S7	

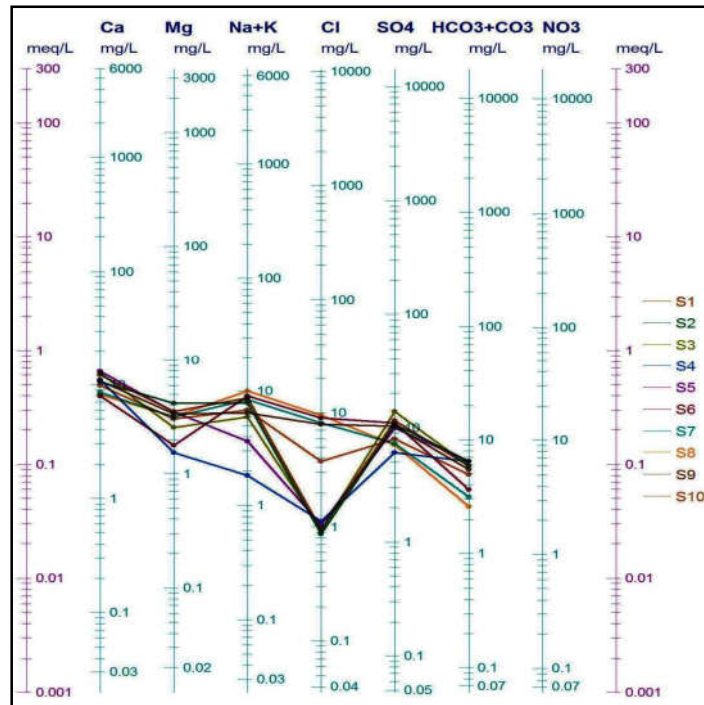


Figure 46: Diagramme de Schoeler-Berkaloff des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des hautes eaux

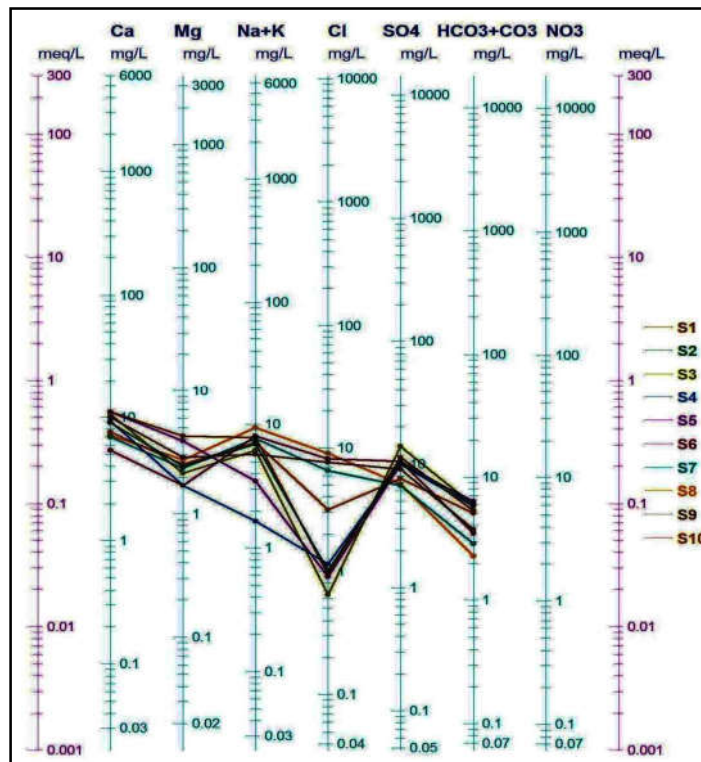


Figure 47: Diagramme de Schöeller-Berkaloff des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali en période des basses eaux

V. LES PARAMETRES PHYSICO-CHIMIQUES

1. LES PARAMETRES PHYSIQUES

Les résultats des paramètres physiques sont illustrés dans le tableau ci-dessous (Tableau 21)

Tableau 21: Les paramètres physiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

		T(C°)	PH	CE (µS cm/1)	Salinité (g/l)	O ₂ dissous
Basses eaux	Max	58	7.25	1580	1	1.85
	Min	31	6.1	1130	0.1	1.29
	Moy	50.2	6.675	1343.5	0.76	1.54
	Ecartype	7.84	0.35	173.78	0.25	0.18
	CV %	15.62	5.24	12.94	32.32	11.56
Hautes eaux	Max	58	7.2	1520	1	1.9
	Min	48	6.2	1020	0.1	1.29
	Moy	52.55	6.727	1278	0.78	1.57
	Ecartype	3.6	0.3	215.3	0.3	0.2
	CV%	6.82	4.46	16.85	36.08	11.10

- La température moyenne des sources thermo-minérales est oscille entre 50 en période des basses eaux et 52 °C, en période des hautes eaux.
- Les eaux de sources thermo-minérales présentent un pH oscillant entre 7.25 et 6.1 (Basses eaux), tandis qu'en période des hautes eaux varient entre 7.2 et 6.2, proche de la neutralité (Tableau 21).
- Les valeurs de la conductivité électrique sont inférieures à celles des eaux de sources du Hammam Meskoutine, au niveau de Hammam Ouled Ali, les concentrations moyennes oscillent entre 1343 (Basses eaux) et 1278 µs/cm (hautes eaux). Le graphe (Figure 48a) montre que les concentrations de la conductivité électrique sont l'égerment augmentées en période d'étéage est expliquée par la lithologie des terrains traversés (terrains évaporitiques), qui sont plus sensibles aux altérations chimiques entre autre, la faible vitesse d'écoulement des eaux et, par conséquent, le temps de contact prolongé entre l'eau et les formations géologiques, favorise la dissolution des sels et donne des eaux fortement minéralisées.
- Concernant la salinité, la variabilité est relativement beaucoup plus faible d'une compagne à l'autre où le CV compris entre 32 et 36 %, Les salinités mesurées au niveau des eaux de sources varient de 0.76 mg/l (basses eaux) et 0.78 mg/l (hautes eaux). Ces valeurs sont inferieur par rapport à la salinité des sources de Hammam Meskoutine.
- Selon le graphe (Figure 48d), l'oxygène dissous au niveau des différentes sources fait apparaître que l'évolution temporelle de ce paramètre est très faible d'une source à l'autre, dont la valeur moyenne au sein ces différentes stations oscille entre 1.54 mg/l (basses eaux) et

1.57 mg/l (Hautes eaux). Ces valeurs sont l'égerment élevées aux valeurs mesurées dans les sources de Hammam Meskoutine qui peuvent être dû à l'abaissement des températures et l'altitude.

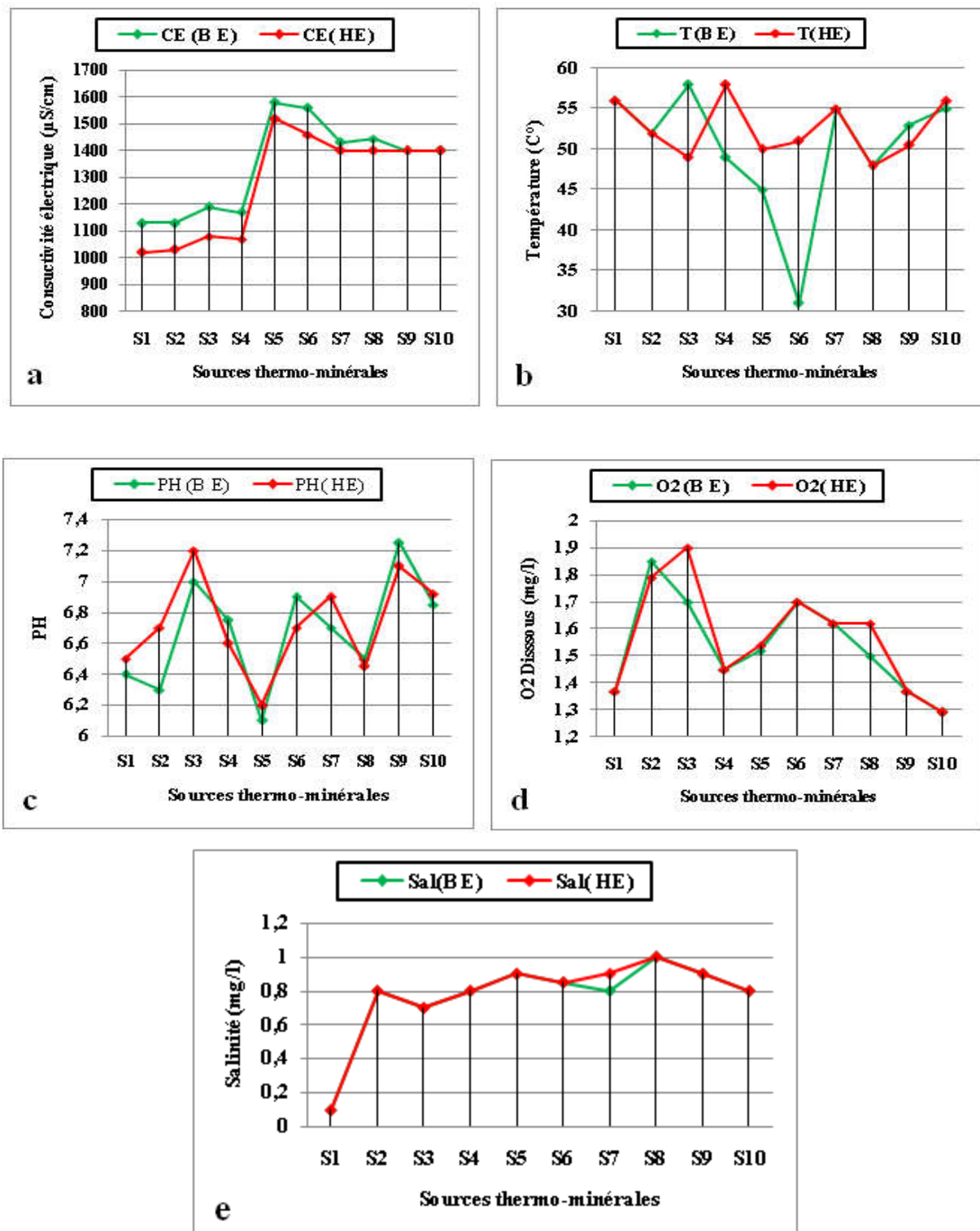


Figure 48: L'évolution spatio-temporelle des paramètres physiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali : a) La conductivité électrique ; b) La température ; c) PH; d) O₂ dissous ; e) La salinité

2. LES PARAMETRES CHIMIQUES

Les résultats des analyses chimiques des eaux de sources thermo-minérales durant les deux campagnes de prélèvement sont présentés ci-dessous (Tableau 22).

Tableau 22: Paramètres statistiques des ions majeurs des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

		Ca	Mg	Na	K	Cl	HCO ₃	SO ₄
Basses	Max	220.5	51.3	197.7	120.3	320	385	670.3
	Min	108	20.2	33.7	6.9	22.9	138.4	321.7
	Moy	175.67	31.94	121.09	45.33	138.98	286.17	461.8
	Ecartype	38.98	10.26	45.94	36.75	124.29	89.26	105.92
	CV %	22.19	32.14	37.94	81.06	89.43	31.19	22.94
Hautes	Max	260.5	49.34	206.77	125.3	340	390.78	532.2
	Min	158	18.2	123.4	6.32	30.75	158.54	289
	Moy	208.29	35.49	163.90	46.76	153.57	309.54	410.21
	Ecartype	41.3	10.7	19.6	40.5	146.6	99.7	102.7
	CV%	19.83	30.13	11.95	86.63	95.46	32.21	25.04

2.1. Calcium [Ca⁺]

Les concentrations des calciums varient suivant la nature des terrains traversés. Où la plus forte concentration est enregistrée au niveau de la source S5 pendant les deux périodes de prélèvements (221 à 261 mg/l) (Figure 49a).

2.2. Magnésium [Mg⁺]

Les sources de Hammam Ouled Ali sont caractérisées par des faibles teneurs en Mg, pendant les deux campagnes, où la valeur moyenne est de l'ordre de 32 mg/l (basses eaux) et 35 mg/l (Hautes eaux). Les concentrations de ce paramètre constituent 1/4 que les paramètres enregistrées au niveau des sources de Hammam Meskoutine, cette variation est due à la géologie du terrain.

2.3. Sodium [Na⁺]

Les teneurs moyennes en sodium variant entre 121 mg/l (basses eaux) et 163 mg/l (hautes eaux). La source principale de ce paramètre dans les eaux est due à la dissolution de roches sédimentaires (sables, argiles, évaporites).

2.4. Potassium [K⁺]

Les concentrations du potassium sont assez variable (Figure 49d) durant les deux périodes de prélèvement (basses et hautes eaux), la valeur la plus élevée est enregistrée au niveau de la source S1 avec 125.3 mg/l, les valeurs les plus faibles sont celles enregistrées au niveau de la source S4 avec 6,32 mg/l et ceci pendant les deux périodes de prélèvements. Néanmoins les concentrations mesurées sont très variables dans le temps et dans l'espace.

Sur le plan cationique, les concentrations des Ca, Mg, Na et k sont légèrement élevées en période des hautes eaux (Figure 49).

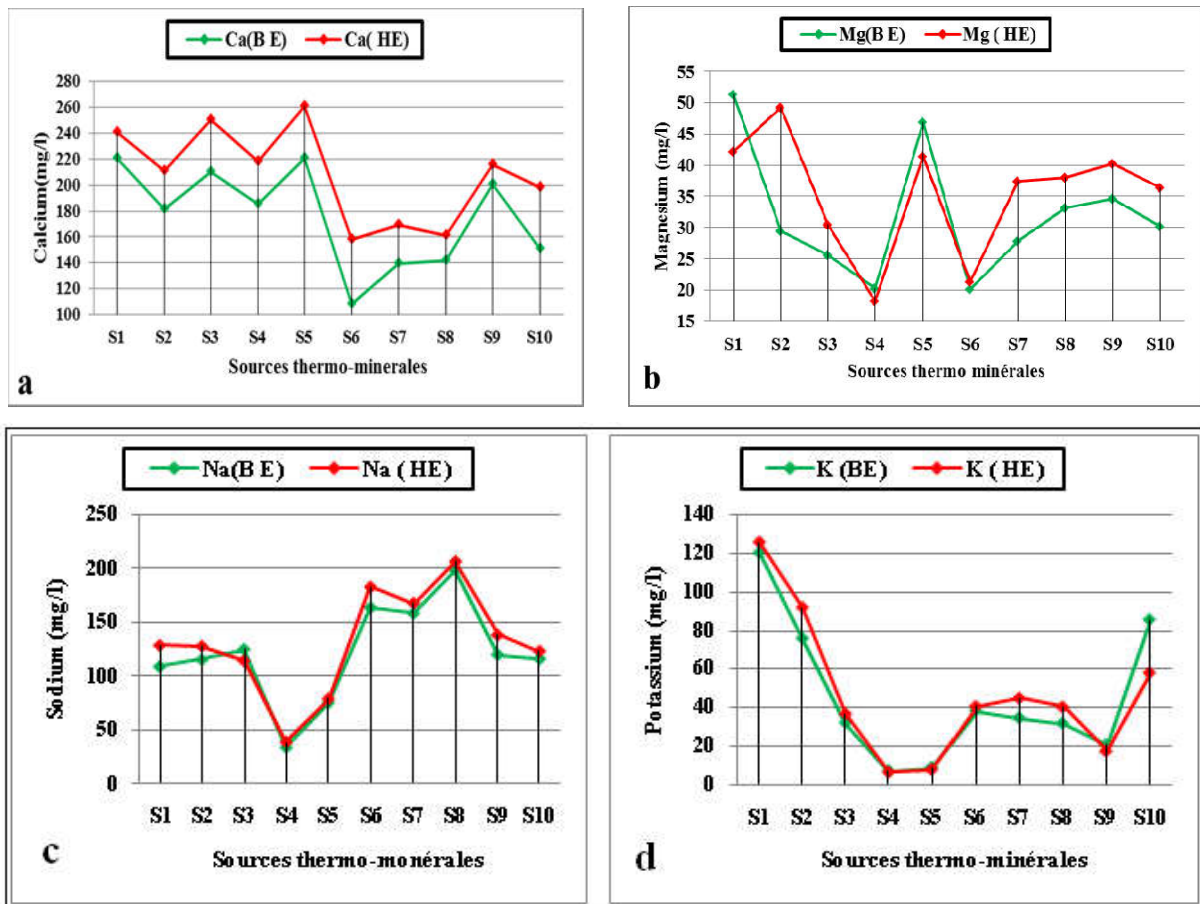


Figure 49: L'évolution spatio-temporelle des cations des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali : a) Ca ; b) Mg ; c) Na ; d) K

2.5. Bicarbonate [HCO_3^-]

La présence des bicarbonates dans les eaux est due à la dissolution de roches carbonatées ou bicarbonatées traversées par cette dernière. Les teneurs en bicarbonates des eaux nous donnent des informations sur la nature du milieu (acide ou basique), car un pH acide conduit à des teneurs en bicarbonates élevées.

Pendant les deux campagnes d'échantillonnage, la plus forte concentration est de 390.78 mg/l, elle est observée au niveau de la source S2, et la faible concentration est de l'ordre de 158.54 mg/l au niveau de la source S8 (Figure 50a).

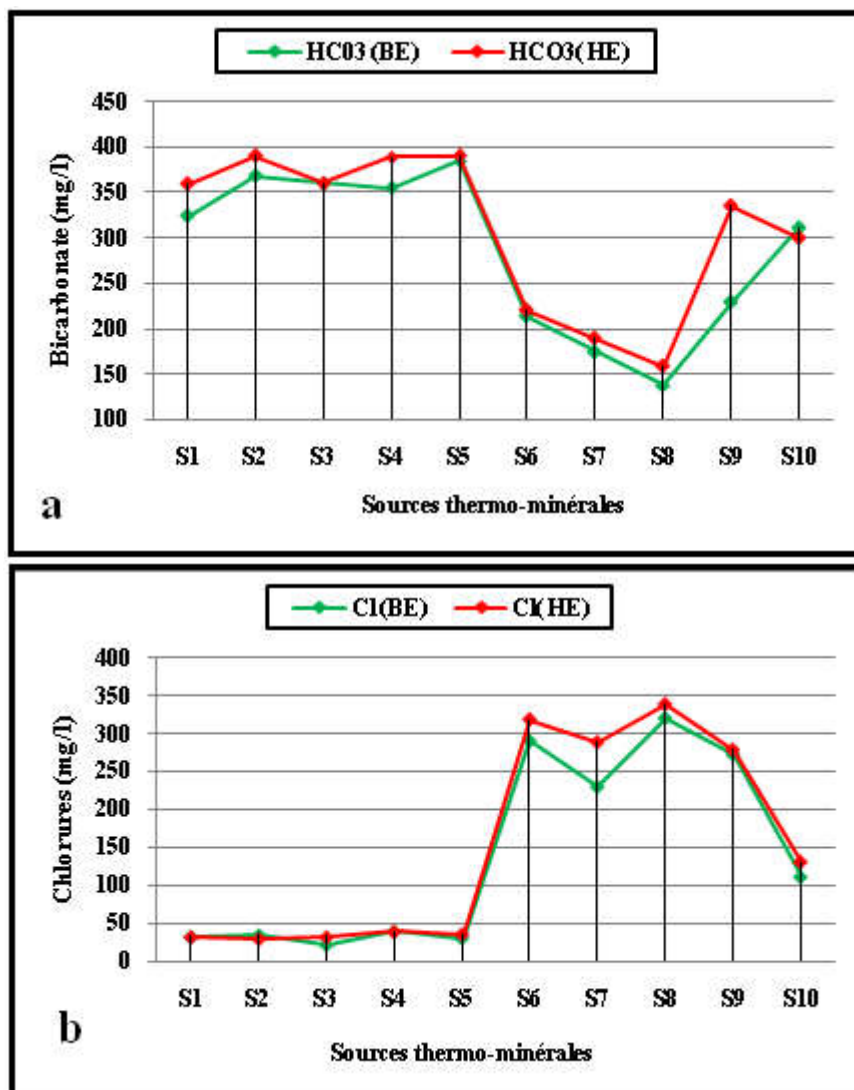
2.6. Chlorure [Cl]

Le graphe ci-dessous montre (Figure 50b) qu'entre les deux périodes de prélèvements, les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali présentaient des teneurs en

chlorures inférieurs à 50 mg/l, dans les premières cinq sources, puis les valeurs dépassent les 290 mg/l au niveau de sources (S6, S7 et S8).

2.7. Sulfates [SO_4^{2-}]

Les teneurs en sulfates sont assez variables allant de 289 à 670 mg/l, la plus forte concentration est enregistrée dans la source S3, pendant la période de prélèvement, les valeurs sont assez proches pour la même source (Figure 50c), à l'exception la source S4 où la concentration passant de 289 à 476 mg/l enregistrées respectivement en période des hautes eaux et période des basses eaux.



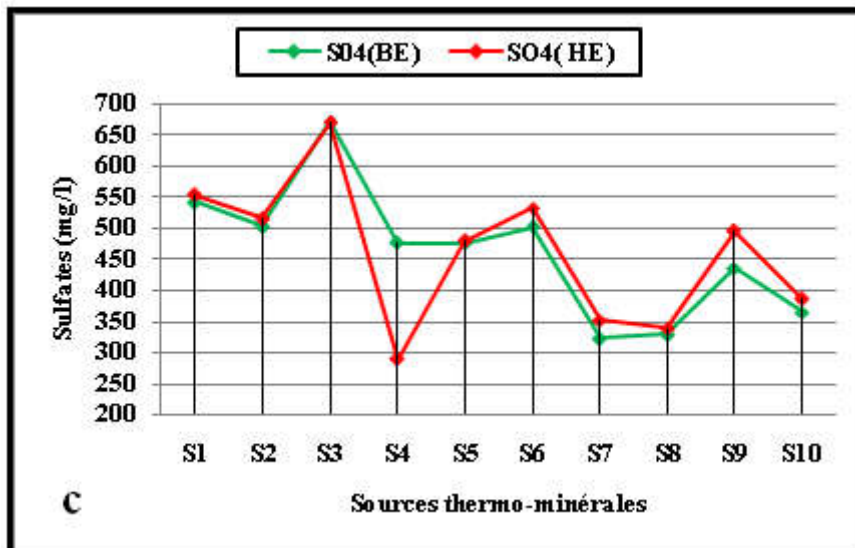


Figure 50: L'évolution spatio-temporelle des anions des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali: a) HCO_3 ; b) Cl ; c) SO_4

VI. CONCLUSION

Le chimisme des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali est influencé par la nature lithologique de l'aquifère (roche réservoir) et, lié au lessivage des formations rencontrées, leurs affectant un faciès dominant bicarbonatée magnésien et sulfaté magnésien pour les eaux de sources Hammam Meskoutine, ainsi que le faciès sulfaté calcique caractérise les eaux de Hammam Ouled Ali.

Les paramètres physico-chimiques des eaux de sources donnent un aperçu sur les eaux profondes qui sont d'une nature saline fortement minéralisées.

CHAPITRE V. APTITUDE DES EAUX THERMOMINERALES A L'IRRIGATION

I. INTRODUCTION

La zone d'étude est une région essentiellement à vocation agricole où elle est observée sur l'ensemble de la zone, avec une très grande variété de cultures, céréalières maraîchères et arboricoles. Le recours à l'irrigation pour la majorité de ces cultures est inévitable y a contraint les agriculteurs à utiliser les eaux de sources thermo-minérales pour l'irrigation, non sans conséquences sur la qualité des sols et de l'eau lui-même.

II. LES EAUX DE SOURCES THERMO-MINERALES DE HAMMAM MESKOUTINE

Les eaux de sources thermo-minérales utilisées pour l'irrigation peuvent varier considérablement en qualité selon le type et la quantité de sels dissous. Les sels sont présents dans l'eau d'irrigation en quantités relativement petites mais significatives. Ils proviennent de la dissolution ou l'altération des roches et du sol, y compris la dissolution de la chaux, le gypse et d'autres minéraux du sol lentement dissous. Ces sels sont transportés avec l'eau où que ce soit. Dans le cas de l'irrigation, les sels sont appliqués avec l'eau et restent dans le sol lorsque l'eau s'évapore ou est utilisée par la culture.

L'exploitation de l'eau géothermale a été une opportunité pour le développement agricole (Hachicha et al.; 2012). Dans cette étude nous allons mettre en évidence l'utilisation des eaux de la région à des fins agricoles.

III. LES PARAMETRES DES EAUX A USAGE AGRICOLES

L'aptitude de l'eau à l'irrigation peut être jugée non seulement à partir de la concentration totale en sels, mais aussi par le type de sels et les ions qui la constituent (Rouabhia et al.; 2010). Il est donc impératif d'étudier les paramètres qui définissent les caractéristiques des eaux destinées à l'irrigation. Le tableau ci-dessous récapitule les paramètres les plus importants, qui intervenant dans la qualité de l'eau destinée à l'irrigation.

Tableau 23: Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation

Paramètres	Formules
Carbonates de sodium résiduels	$RSC = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$ Eaton 1950
Sodium Adsorption	$SAR = Na^+ / [Ca^{2+} + Mg^{2+}]^{1/2}$ Richards 1954
Indice de perméabilité	$IP = [(Na^+ + \sqrt{HCO_3}) / (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)] \times 100$ Doneen 1962
Le pourcentage en sodium	$\%Na = [(Na + K) / (Ca + Mg + Na + K)] \times 100$ Wilcox 1948
Risque de magnésium	$Mg H. = [(Mg^{2+}) / (Ca^{2+} + Mg^{2+})] \times 100$ Paliwal 1972

Chacun des paramètres ci-dessus (Tableau 23) a une incidence sur qualité de l'eau d'irrigation. Cependant, chaque source d'eau aura sa pertinence spécifique ou sa nature dangereuse selon la présence ou l'absence de chacun des constituants. Différents constituants chimiques interagissent les uns avec les autres et provoquent un effet complexe sur les propriétés des sols et la croissance des plantes.

Les facteurs les plus importants, intervenant dans la qualité de l'eau pour l'irrigation sont illustrées dans le Tableau ci-dessous (Tableau 24).

Tableau 24: Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation de Hammam Meskoutine (2016)

Sources	CE	Cl ⁻	SAR	RSC	Na	IP	Mg R
	μS/cm	méq/l			(%)		
Hautes eaux							
S1	733	1	5,59	-17,58	14,11	17,06	83,91
S2	1992	1.2	6,19	-28,81	16,25	18,80	72,10
S3	2200	4	5,66	-27,00	19,09	21,89	69,83
S4	1754	4	5,10	-38,59	22,06	23,24	67,31
S5	1982	4	5,21	-35,01	20,51	21,29	71,72
S6	1850	5	3,62	-26,47	35,86	37,76	64,14
S7	1691	4.4	4,99	-57,05	29,30	28,44	64,47
S8	1965	5	4,74	-31,49	21,24	25,15	67,63
S9	1982	3	5,40	-39,87	18,71	21,73	68,50
S10	1980	4.4	4,81	-31,49	20,18	20,99	59,58
Basses eaux							
S1	810	1.20	3,75	-38,86	25,41	27,05	83,33
S2	2120	3	5,20	-38,49	20,15	20,45	68,28
S3	2170	4.20	5,21	-35,62	22,91	23,46	72,44
S4	2130	4.20	5,09	-36,08	21,28	20,40	75,23
S5	2140	4	5,11	-30,61	20,16	18,59	75,81
S6	2210	4.80	4,83	-28,31	24,25	24,65	66,99
S7	2090	3.40	4,63	-35,74	33,23	30,57	93,31
S8	2360	4	5,16	-34,67	16,37	18,09	68,55
S9	2120	3.39	5,04	-25,91	21,41	22,65	72,08
S10	1937	2.60	4,58	-17,58	21,32	19,95	73,17

1. LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE (CE)

La conductivité électrique est un excellent indicateur de la minéralisation qui reflète la concentration de l'ensemble des minéraux dissous (Rodier; 2009). Généralement, toutes les eaux d'irrigation avec une CE inférieure à 2000 µs/cm sont considérées comme approprié, sauf dans certaines situations (les cultures sensibles et les sols hautement argileux de mauvaise perméabilité. La valeur idéale est inférieure à 750 µs/cm (Wilcox; 1955).

Dans notre étude, les mesures de la conductivité électrique (Tableau 25), donnent des valeurs oscillant entre 2360 µS/cm (Basses eaux) et 733 µS/cm (hautes eaux). Selon (Wilcox; 1955), 80% des sources de Hammam Meskoutine en période des basses eaux sont adaptées pour l'irrigation (CE > 2000 µS/cm). En période des hautes, la majorité des sources présentent un état de qualité médiocre pour l'irrigation.

Tableau 25: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine selon les normes d'irrigation de la conductivité électrique

Qualité	CE (µs/cm)	Hautes eaux	Basses eaux
Excellent	250		
Bonne	250 -750		S1
Admissible	750 – 2000	S1, S10	S2, S4, S5, S6, S7, S7, S9, S10
Mediocre	2000- 3000	S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9	S3
Mauvaise	3000		

2. LES CHLORURES

L'ion des chlorures sont classé comme un paramètre toxique pour les plantes (Ayers, Westcot; 1985). On considère les chlorures jusqu'à une concentration de 4 méq/l, les eaux sont adaptées à l'irrigation. Cela peut causer plusieurs problèmes dans les cultures à la concentration de 10 méq/l. Concernant les chlorures, en période des basses eaux montrent qu'on a deux classes : la première ou les chlorures ne posent pas de problème, se classe représentant 50 % des sources et la deuxième classe est caractérisée par une toxicité croissante). En période des hautes, les sources gardent la même classification à l'exception les sources S7 et S10 présenteraient des risques de toxicité croissants (Tableau 26; Figure 51). Donc selon la classification des chlorures, la majorité des eaux de sources sont impropres à l'irrigation (Bouaroudj et al. 2014).

Tableau 26: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine selon les normes d'irrigation des chlorures

Qualité	Cl (méq/l)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent (pas de toxicité)	< 4	S1, S2, S7, S9, S10	S1, S2, S9
Mauvaise (toxicité croissant)	4 -10	S3, S4, S5, S6, S8	S3, S4, S5, S6, S7, S8, S10
Mediocre (toxicité grave)	> 10		

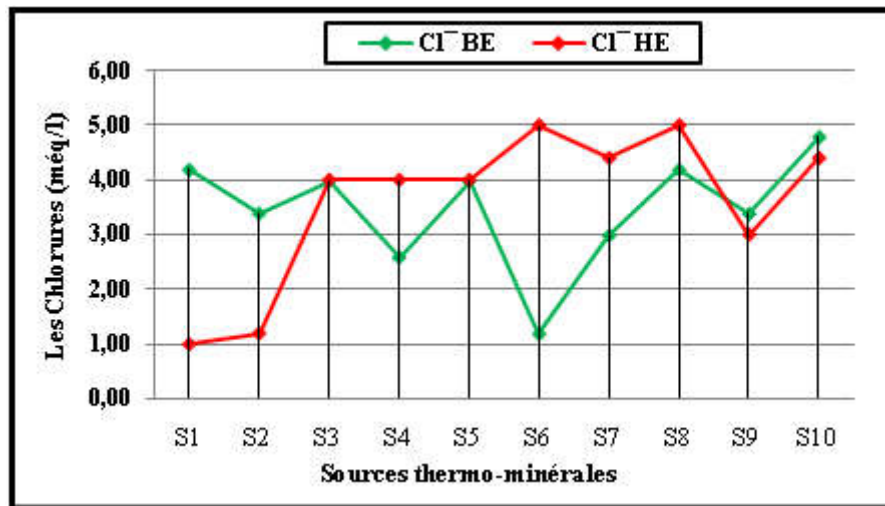


Figure 51: La variation des chlorures dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

3. LE CARBONATE DE SODIUM RESIDUEL (RSC)

L'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation en se basant uniquement sur le SAR minimise très souvent le risque de sodisation et d'alcalinisation de ces eaux lorsque le faciès chimique n'est pas chloruré. C'est pourquoi on a tenu compte de l'alcalinité résiduelle comme une autre approche dans l'évaluation de la qualité des eaux d'irrigation (Richards; 1954).

RSC est restée négative pour tous les échantillons d'eau dans cette étude, montrant que l'eau est de bonne qualité pour une utilisation dans l'irrigation (Tableau 27).

Tableau 27: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine selon RSC

Qualité	RSC (méq/l)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	<0	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10
Bonne	0-2.5		
Admissible	2.5-5		
Mauvaise	5 -7.5		
Mediocre	> 7.5		

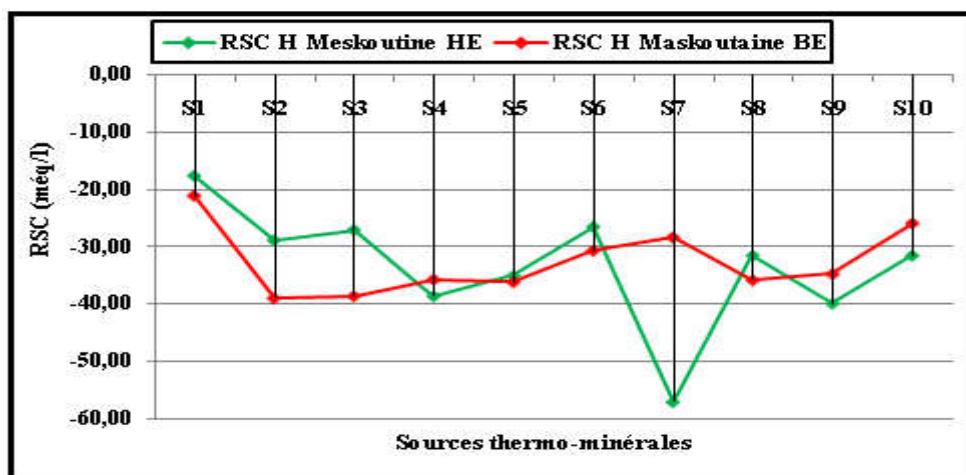


Figure 52: La variation du carbonate de sodium résiduel dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

4. L'INDICE DE PERMEABILITE

Les valeurs de l'indice de perméabilité ont été trouvées dans la gamme de (17 à 37 %) avec une valeur moyenne de (22.1). Ainsi, l'eau de la majorité de ces sources se trouve dans la classe III (mauvaise qualité) ne conviennent pas avec 25% de perméabilité maximale, pendant la période des basses eaux ainsi que la période des hautes (Figure 53). Cette mauvaise perméabilité attache l'apport d'eau à la culture. Elle devient difficile pour les commodes culturales sur les parcelles agricoles (Benziane et al.; 2012).

Tableau 28: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine selon IP

Qualité	IP (%)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	>70		
Bonne	25-75	S1, S6, S7	S6, S7, S8
Mauvaise	<25	S2, S3, S4, S5, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S9, S10

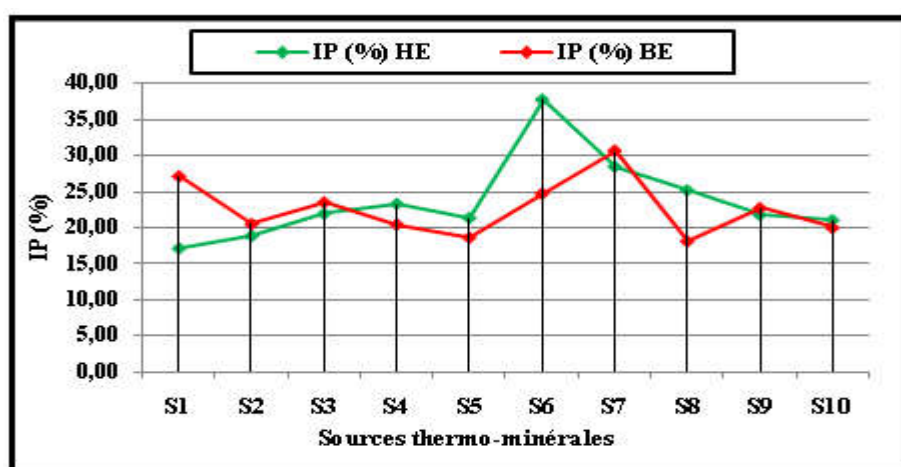


Figure 53: La variation de l'indice de perméabilité dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

5. RISQUE DE MAGNESIUM

Il est largement rapporté que Ca et Mg ne se comportent pas de manière identique dans les systèmes du sol, et le Mg détériore la structure du sol en particulier où les eaux dominent le sodium et très salé. Un niveau élevé de Mg favorise habituellement une augmentation et développement de Na échangeable dans les sols irrigués (FAO; 2008). L'eau avec un risque de magnésium inférieur à 50 convient Pour l'irrigation (Paliwal; 1972).

Tableau 29: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine selon Mg R (%)

Qualité	Mg R (%)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	<50		
Bonne			
Mauvaise	>50	S1, S2, S3, S4, S5, S6 , S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6 , S7, S8, S9, S10
Mediocre			

Les résultats obtenus montrent (Tableau 29; Figure 54) que le risque de magnésium était supérieur à 50 % dans toutes les sources et au cours de la période de prélèvements. Donc les eaux de sources inappropriées pour l'irrigation.

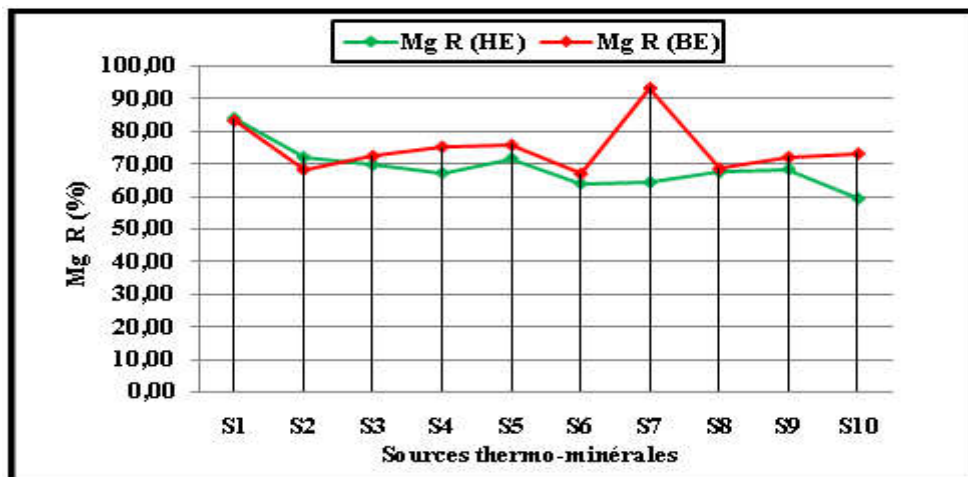


Figure 54: La variation du risque de magnésiums dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

6. LE POURCENTAGE DU SODIUM

Le pourcentage du sodium et suivant leurs normes (Wilcox ; 1948), nous donne les deux classes de ces eaux de sources pour l'irrigation (Tableau 30; Figure 55).

Tableau 30: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon Na%

Qualité	Na (%)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	<20	S8	S1, S2, S3, S9
Bonne	20-40	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S9, S10	S4, S5, S6, S7, S8, S10
Admissible	40-60		
Mauvaise	60-80		
Mediocre	>80		

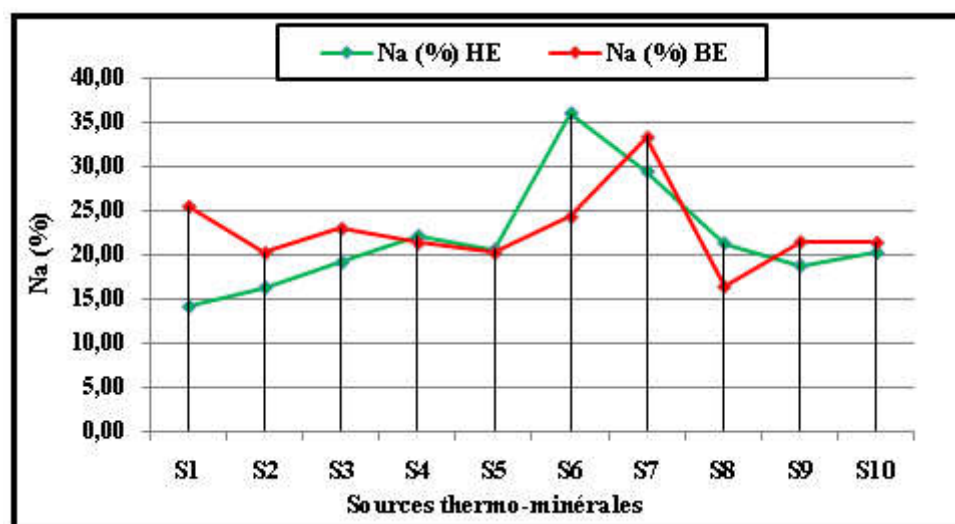


Figure 55: La variation du pourcentage du sodium dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

Le tableau de classification des eaux de sources, nous permettent de dire qu'en générale ces eaux sont bonnes pour l'irrigation avec un Na% comprise entre 14 et 36 % (période des hautes eaux) et entre 16 et 33% (période des basses eaux).

7. TAUX D'ABSORPTION DU SODIUM(SAR)

L'aptitude des échantillons d'eau de puits a été évaluée en déterminant la valeur du ratio d'adsorption de sodium (SAR) et ils ont été classés selon différentes classes d'irrigation sur la base des risques de salinité et d'alcalinité. Le paramètre du rapport d'adsorption de sodium évalue le risque de sodium par rapport aux concentrations de calcium et de magnésium. Le taux d'adsorption de sodium est utilisé pour prédire le potentiel d'accumulation de sodium dans le sol, qui résulterait de l'utilisation continue d'eau sodique.

Les valeurs de SAR variaient de 3.62 à 6.19 en hautes eaux et de 3.75 à 5.21 en basses eaux. Les données révèlent que tous les échantillons d'eau tombent dans la classe à faible teneur en sodium (Tableau 31; Figure 56). Cela implique qu'aucun risque d'alcalin n'est prévu pour les cultures. Donc les eaux de sources dans la zone de Hammam Meskoutine sont classées comme excellentes à permises pour l'irrigation.

Tableau 31: Classification des eaux de sources de Hammam Meskoutine selon SAR

Qualité	SAR(méq/l)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	<10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10
Bonne	10-18		
Admissible	18-26		
Mauvaise	>26		

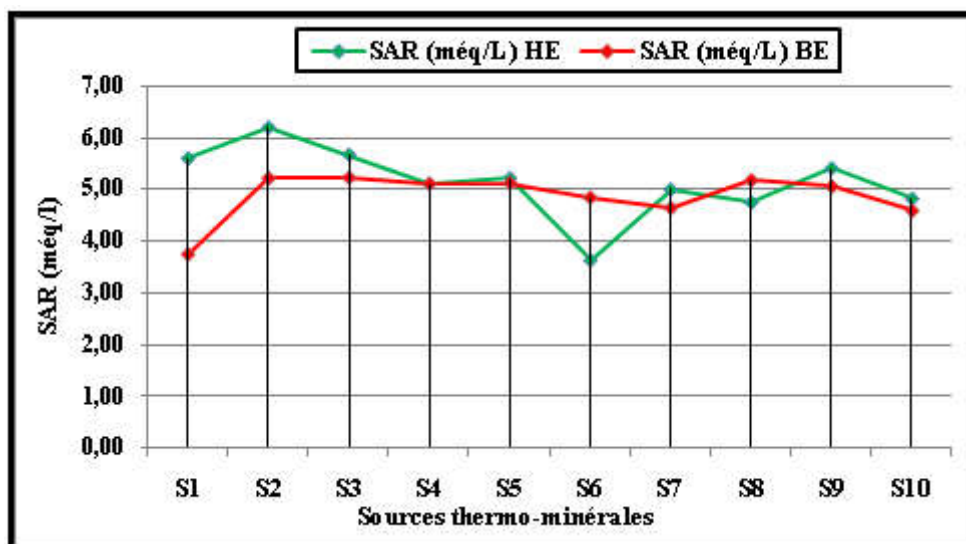


Figure 56: La variation du taux de SAR dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

IV. CLASSIFICATION DE RICHARDS

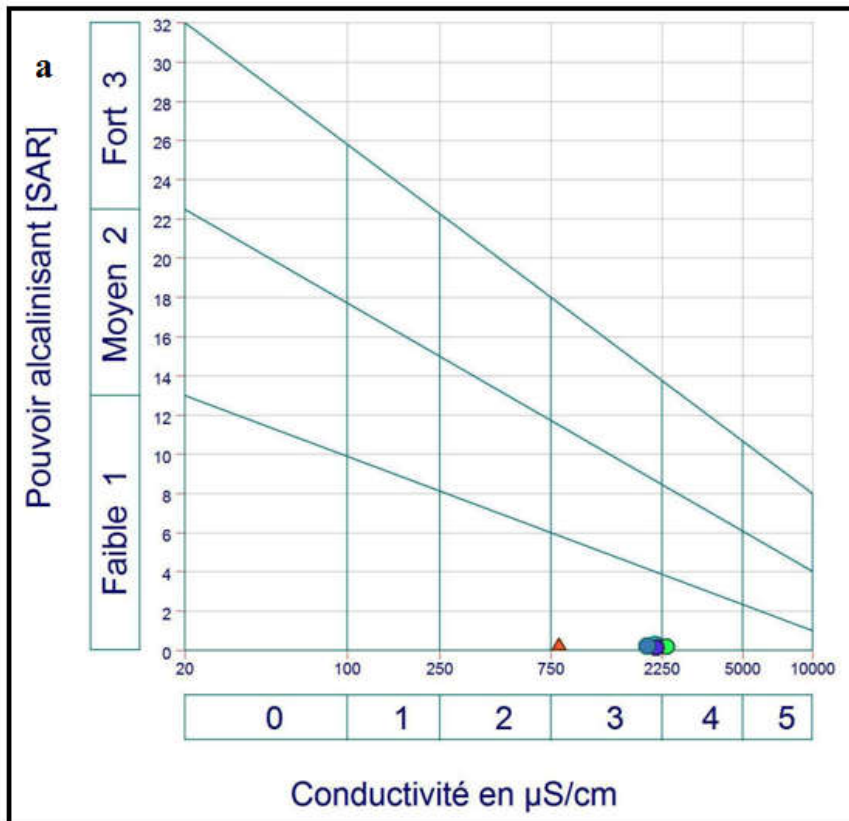
Un échange de base se produit lorsque la concentration des ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent le plus fréquemment les cations Ca^{+2} . Une eau chargée en sels peut provoquer cette action, la qualité de l'eau pour l'irrigation est déterminée à l'aide de la valeur du sodium absorbable (Sodium Absorption Ratio, SAR). Cette méthode fait intervenir et le risque d'alcalinisation des sels, pour une même conductivité (Diagramme de Richards). Les échantillons analysés ont été reportés sur ce diagramme (Figure 57) et on fait ressortir les classes suivantes :

La classe 2 : Elle caractérise une eau bonne pour l'irrigation et pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes aux sels, présentant ainsi un danger faible de salinité et d'alcalinité, donc, elles sont moyennement admises à l'irrigation. Cette classe représente les eaux de faible minéralisation que l'on rencontre dans la source S1 en période des basses eaux ;

La classe 3 : Généralement, cette classe renferme des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, à condition que ces sols soient bien drainés ou de bonne

perméabilité et la salinité doit être contrôlée. Cette classe représente un taux semblable (90% des sources pendant les deux campagnes de prélèvements ;

La classe 4 : Eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés. Cette classe représente 10% que l'on rencontre dans la source S8 en période des hautes eaux.



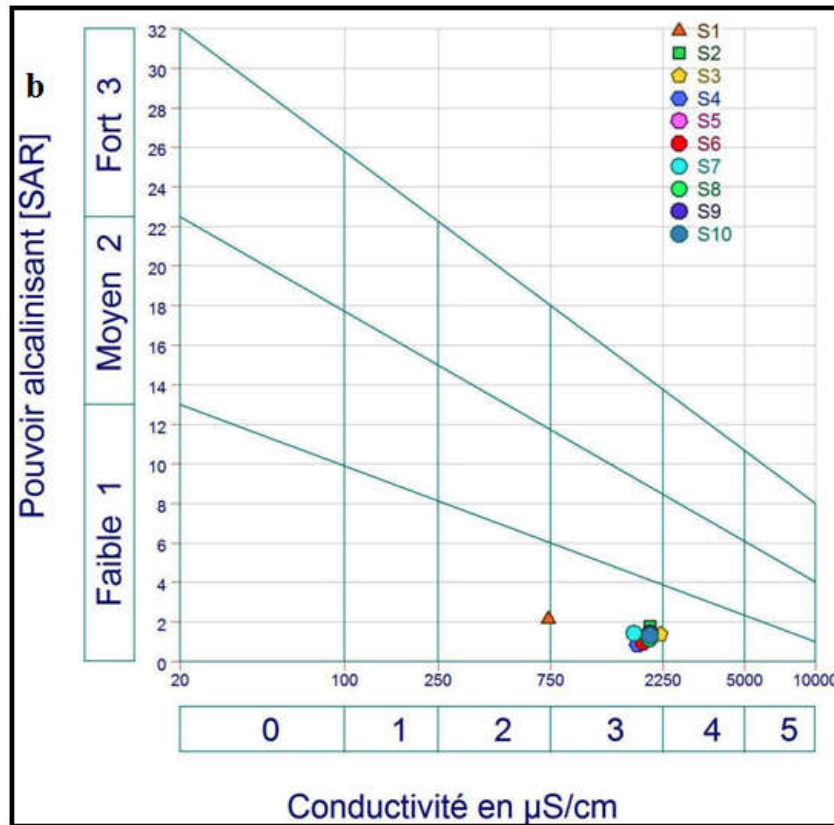


Figure 57: Aptitude des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine à l'irrigation selon la classification de Richards : a) Hautes eaux : b) Basses eaux

La classification de Richards montre que l'ensemble des sources analysées se situent dans les deux classes dont le risque de salinisation est moyen à fort. Donc Il ressort de cette classification que dans l'ensemble l'usage de ces sources pour l'irrigation dans cette région durant les deux périodes (basses eaux, hautes eaux), convient à l'irrigation de certaines espèces tolérantes aux sels sous certaines conditions (perméabilité élevée du sol, bonne lixiviation).

V. LES EAUX DE SOURCES THERMO-MINÉRALES DE HAMMAM OULED ALI

Les résultats des paramètres des eaux de sources thermo-minérales destinées à l'irrigation sont résumés dans le tableau ci-dessous (Tableau 32).

Tableau 32: Paramètres de la qualité de l'eau d'irrigation de Hammam Ouled Ali (2016)

Sources	CE	Cl ⁻	SAR	RSC	Na	IP	Mg R
	μS/cm	még/l			(%)		
Hautes eaux							
S1	1020	0.94	3.71	-6.30	22.99	11.15	22.59
S2	1030	0.86	3.55	-4.65	24.63	12.07	28.00
S3	1080	0.93	3.71	-5.83	23.71	9.43	16.91
S4	1070	1.13	3.41	-2.42	11.79	5.16	12.24
S5	1520	1.04	3.84	-6.47	17.07	8.67	20.93
S6	1460	9.01	2.96	-4.02	42.60	12.62	18.39
S7	1400	8.17	3.16	-6.69	36.49	12.91	26.97
S8	1400	9.58	3.11	-7.17	42.27	14.82	28.18
S9	1400	7.89	3.53	-5.54	29.22	11.62	23.70
S10	1400	3.72	3.38	-5.24	27.14	10.69	23.47
Basses eaux							
S1	1130	0.94	3.63	-6.99	20.42	11.05	27.94
S2	1130	1.01	3.21	-2.07	27.09	10.12	21.28
S3	1190	0.65	3.40	-3.41	28.67	9.87	16.86
S4	1170	1.14	3.18	-1.81	11.65	5.35	15.43
S5	1580	0.90	3.60	-5.06	17.71	9.24	26.17
S6	1560	8.17	2.50	-1.61	46.80	12.80	23.76
S7	1430	6.49	2.85	-4.78	40.35	12.07	25.00
S8	1445	9.01	2.91	-6.28	44.68	14.23	28.05
S9	1400	7.69	3.38	-7.02	27.94	10.12	22.37
S10	1400	3.15	2.96	-2.04	29.16	10.57	25.07

1. LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE

La classification des eaux de sources selon la conductivité électrique montre que les eaux sont admissibles pour l'irrigation (Tableau 33).

Tableau 33: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon les normes d'irrigation de la conductivité électrique

Qualité	CE (μS/cm)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	250		
Bonne	250 -750		
Admissible	750 – 2000	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10
Mediocre	2000- 3000		
Mauvaise	3000		

2. LES CHLORURES

La classification des eaux thermo-minérales selon les chlorures (Tableau 34, Figure 58) montrent qu'on a deux classes identiques pour les deux campagnes d'échantillonnages, six (06) sources représentent des eaux bonne ou la teneur en chlorures est inférieure 4 méq/l, et le reste de sources correspondant à des eaux mauvaise, pour lesquelles la teneur en chlorures est comprise entre 4 et 9.58 méq/l, où les sources présenteraient des risques de toxicité croissants.

Tableau 34: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon les normes d'irrigation des chlorures

Qualité	Cl (méq/l)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent (pas de toxicité)	< 4	S1, S2, S3, S4, S5, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S10
Mauvaise (toxicité croissant)	4 -10	S6, S7, S8, S9	S6, S7, S8, S9
Mediocre (toxicité grave)	> 10		

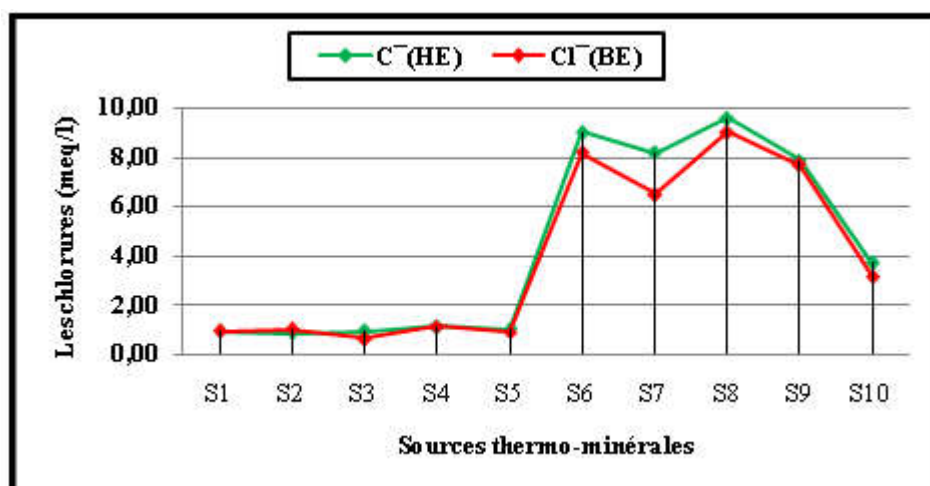


Figure 58: La variation des chlorures dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

3. LE CARBONATE DE SODIUM RESIDUEL

La concentration de bicarbonates a été observée dans la gamme de 2.27 à 6.41. Dans l'eau ayant une concentration élevée de bicarbonate, il y a une tendance à précipiter le calcium et le magnésium. Quand cela se produit, il y a une réduction de la concentration du calcium et du magnésium et une augmentation relative du sodium.

Le calcium et le magnésium sont précipités sous forme de carbonates, et tout carbonate ou bicarbonate résiduel est laissé en solution Comme risque de RSC ou de bicarbonate (Haritash et al.; 2014). Dans notre cas, les eaux de sources appartiennent au bien à la catégorie excellente (RSC <0) (Tableau 35). Donc cette eau peut être utilisée en toute sécurité pour l'irrigation (Figure 59).

Tableau 35: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon RSC

Qualité	RSC (még/l)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	< 0	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10
Bonne	0 - 2.5		
Admissible	2.5 - 5		
Mauvaise	5 - 7.5		
Mediocre	> 7.5		

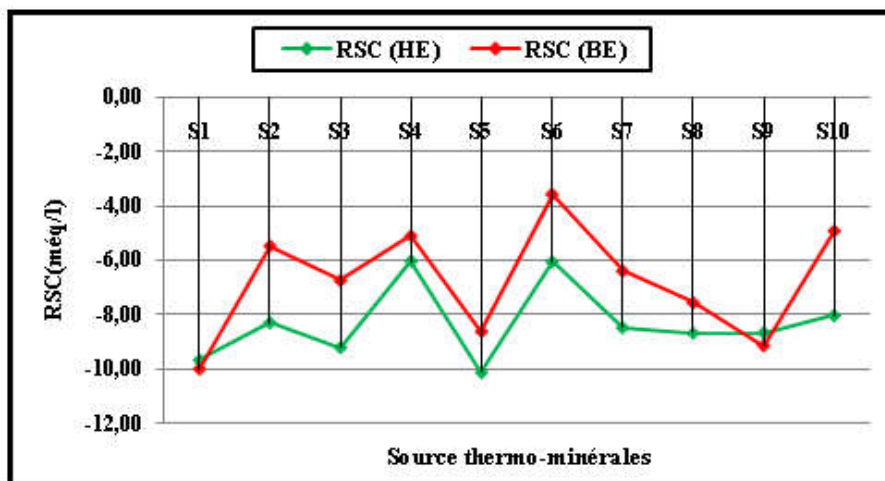


Figure 59: La variation du RSC dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

4. L'INDICE DE PERMEABILITE

Les valeurs de l'indice de perméabilité des eaux de sources se situaient dans la fourchette de 5,16 à 14,82 %, ces faibles valeurs (IP < 25) suggérant leurs inadéquations à l'irrigation pour toutes les sources analysées et pendant les deux périodes de prélèvements (Figure 60).

Tableau 36: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon IP (%)

Qualité	IP (%)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	>70		
Bonne	25-75		
Mauvaise	<25	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10

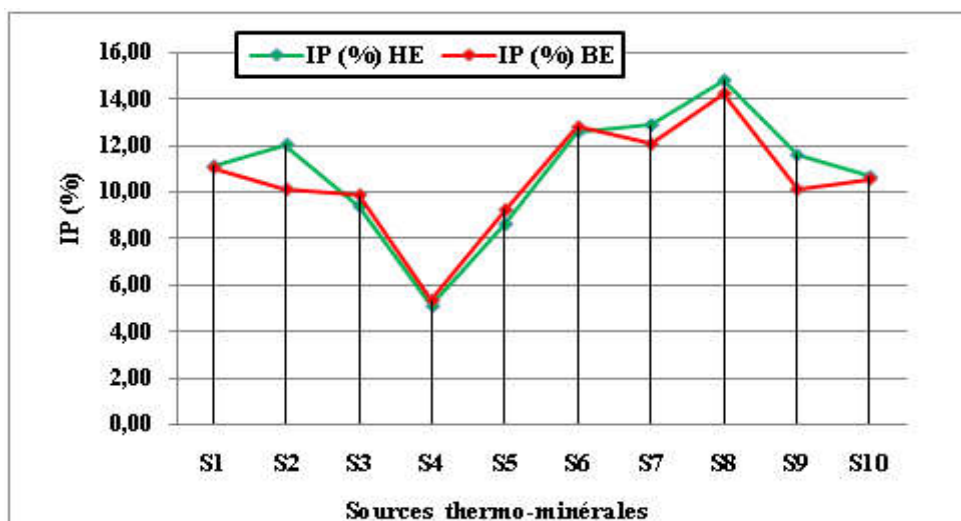


Figure 60: La variation de l'indice de perméabilité dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

5. RISQUE DE MAGNESIUM

Les résultats obtenus montrent (Tableau 37; Figure 61) que le risque de magnésium était inférieur à 50 % dans toutes les sources et au cours de la période de prélèvements. Donc les eaux de sources sont bonnes pour l'irrigation.

Tableau 37: Classification des eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon Mg R (%)

Qualité	Mg R (%)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	< 50	S1, S2, S3, S4,S5,S6 ,S7, S8,S9, S10	S1, S2, S3, S4,S5,S6,S7, S8,S9, S10
Bonne			
Mauvaise	> 50		

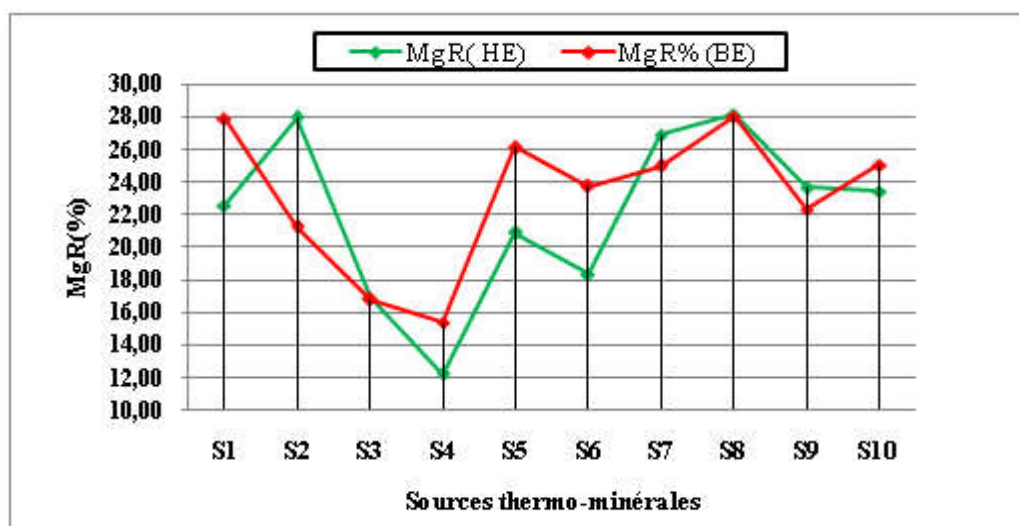


Figure 61: La variation du risque de magnésiums dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

6. LE POURCENTAGE DU SODIUM

La classification des eaux de sources par rapport au pourcentage de sodium (Tableau 38; Figure 62) montre que les eaux sont convenable à l'irrigation quelque au cours de la période d'étude.

Tableau 38: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon Na%

Qualité	Na (%)	Hautes eaux	Basses eaux
Excellent	<20	S4, S5	S4, S5
Bonne	20-40	S1, S2, S3, S7, S9, S10	S1, S2, S3, S9, S10
Admissible	40-60	S6, S8	S6, S7, S8
Mauvaise	60-80		
Mediocre	>80		

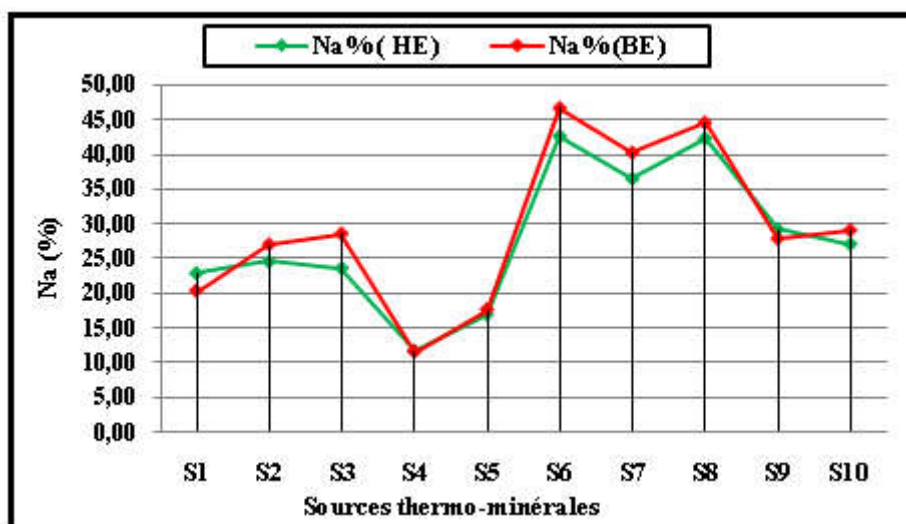


Figure 62: La variation du Na% dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

7. TAUX D'ABSORPTION DU SODIUM (SAR)

L'eau des sources avec un SAR se situe entre 0 et 3.84 (Tableau 39; Figure 63) peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec une faible accumulation de sodium.

Tableau 39: Classification des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali selon SAR (még/l)

Qualité	SAR(még/l)	Basses eaux	Hautes eaux
Excellent	< 10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10	S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S8, S9, S10
Bonne	10-18		
Admissible	18-26		
Mauvaise	> 26		

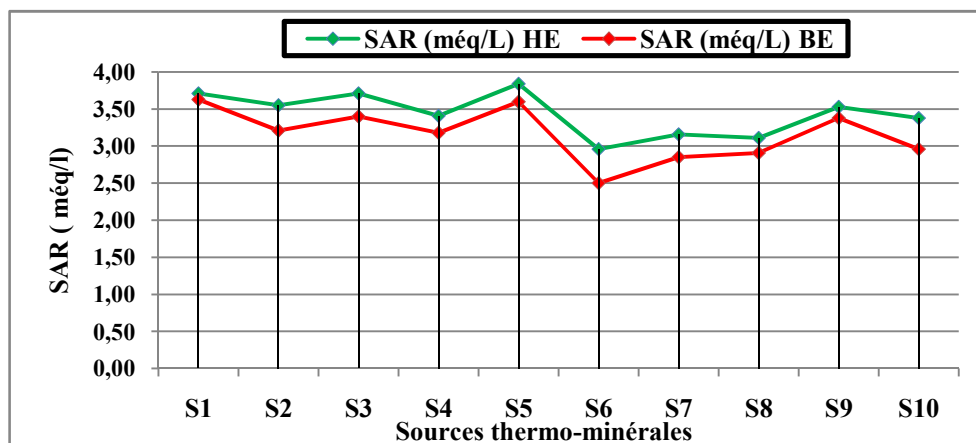
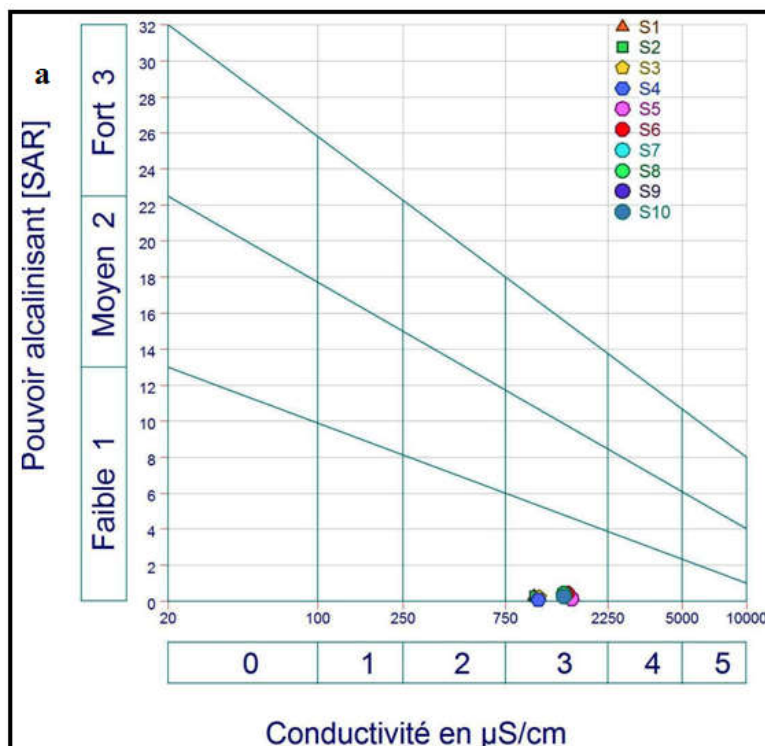


Figure 63: La variation du SAR dans les différentes sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

VI. CLASSIFICATION DE RICHARDS

Les différentes valeurs ont été portées sur le diagramme de Richards (Figure 64), à partir de cette répartition, il en résulte que : Les eaux de sources de Hammam Ouled Ali conservent, en général, les mêmes qualités pour l'irrigation au cours de toute la période d'observation pour les deux (2) campagnes. En effet ces eaux peuvent être utilisées pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, à condition que ces sols soient bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée.



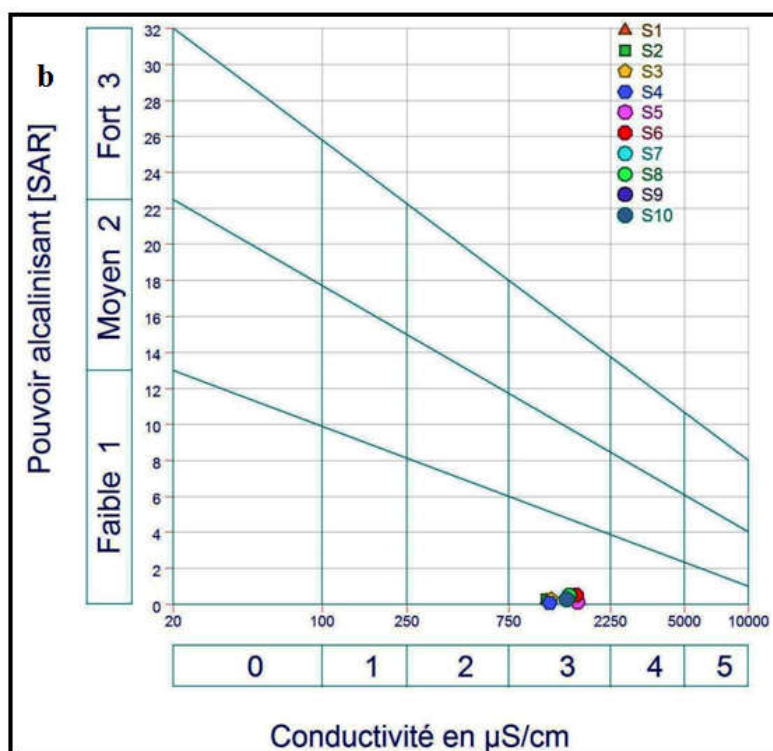


Figure 64: Aptitude des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali à l'irrigation selon la classification de Richards : a) Hautes eaux : b) Basses eaux

VI. CONCLUSION

Pour l'irrigation nous avons évalué la qualité des eaux thermo-minérales dans la région de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali (Guelma).

- L'analyse de tous les paramètres caractérisant la salinité, pendant toute la période d'observation, a permis d'évaluer la qualité de ces eaux par des méthodes classiques. Cette évaluation a révélé que les eaux sont d'une salinité forte, notamment au niveau de la majorité des sources de Hammam Meskoutine. Néanmoins, les eaux prendraient une qualité admissible dans la région de Hammam Ouled Ali. D'où la possibilité de leur utilisation pour l'irrigation ;
- Selon le risque de magnésium, dans la région de Hammam Ouled Ali, les valeurs sont inférieures à 50%, suggérant leur adéquation, alors qu'au niveau de sources de Hammam Meskoutine les valeurs tombent dans catégorie inadéquate avec Mg supérieure à 50%, indiquant leur effet néfaste sur le rendement des cultures ;
- Selon la valeur moyenne du SAR qui reste faible, les eaux de sources des deux sites d'étude présentent un faible danger d'alcalinisation, cette hypothèse c'est confirmée par le RSC, dont la valeur est inférieure à zéro ($RSC < 0$ méq/l), et pourraient être utilisées en irrigation sur tout type de sol ;

➤ La classification des eaux thermo minérales, selon Richards a montré une distribution semblable des classes d'aptitude à l'irrigation dans le temps (au cours de la période de prélèvements) et dans l'espace (Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali). En effet ces eaux de sources thermo-minérales peuvent être utilisées pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, à condition que ces sols soient bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée.

CHAPITRE VI. INDICE DE SATURATION ET ORIGINE DE LA MINÉRALISATION

I. INTRODUCTION

Le degré de saturation de l'eau peut être estimé par le calcul de l'indice de saturation, qui atteint la valeur zéro quand la solution est en équilibre avec une phase solide (l'eau et le minéral). Un indice de saturation négatif indique une sous saturation (l'eau peut dissoudre le minéral) et un indice positif indique une sursaturation vis-à-vis des minéraux (l'eau peut précipiter le minéral).

L'interprétation thermodynamique en utilisant la simulation de la concentration des ions majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+) sous l'effet de l'évaporation isotherme à 25°C, par le logiciel thermodynamique « PhreeqC » en terme d'équilibres sels/solution, a donné les résultats présentés dans le tableau ci-dessous.

II. ETATS DES MINÉRAUX DISSOUS DANS LES EAUX DE SOURCES THERMO-MINÉRALES DE HAMMAM MESKOUTINE

1. CALCUL DE L'INDICE DE SATURATION (IS)

Les résultats sont reportés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 40: Indice de saturation des minéraux dissous dans les eaux thermo-minérales du Hammam Meskoutine

Les minéraux dissous dans les eaux thermales		Les émergences									
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Basses eaux											
Minéraux évaporitiques	Halite	-3.79	-3.59	-3.61	-3.83	-3.75	-3.99	-3.57	-3.66	-3.76	-3.81
	Anhydrite	1.61	0.99	1.55	1.37	1.64	0.39	1.24	1.48	1.68	1.63
	Sylvite	-4.05	-4.08	-3.98	-3.83	-3.82	-3.89	-3.63	-4.15	-4.17	-3.80
	Gypse	1.22	0.62	1.26	1.22	1.28	0.51	1.05	1.09	1.29	1.24
Minéraux carbonatés	Calcite	3.35	3.16	3.62	2.95	3.46	2.48	3.08	3.19	3.53	3.88
	Dolomie	6.78	7.16	7.50	6.24	6.89	5.69	6.41	6.38	7.05	7.67
	Aragonite	3.24	3.05	3.51	2.84	3.36	2.35	2.97	3.09	3.43	3.78
Hautes eaux											
Minéraux évaporitiques	Halite	-4.24	-4.13	-3.55	-3.67	-3.73	-3.50	-3.45	-3.65	-3.75	-3.78
	Anhydrite	0.55	1.43	1.74	1.64	1.46	1.22	1.52	1.48	1.66	1.29
	Sylvite	-4.11	-4.32	-4.04	-3.84	-3.72	-3.79	-3.58	-3.97	-4.14	-3.50
	Gypse	0.70	1.25	1.37	1.27	1.09	0.86	1.17	1.13	1.36	1.17
Minéraux carbonatés	Calcite	2.25	3.41	2.90	2.57	3.57	3.21	2.64	2.36	2.43	2.49
	Dolomie	4.67	6.90	5.57	4.96	7.01	6.39	5.17	4.63	4.75	5.13
	Aragonite	2.12	3.30	2.80	2.46	3.47	3.10	2.54	2.26	2.32	2.37

les concentrations des différents éléments majeurs ; cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), anions (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), des eaux de sources thermo-minérales sont légèrement sursaturées en éléments évaporitiques telles que l'anhydrite (CaSO_4) et le Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) avec des indices de saturations allant de 0.39 à 1.68 en période des basses eaux et 0.55 à 1.66 en période des hautes eaux . Donc cette saturation est presque régulière dans les deux compagnes de prélèvements. Cette eau est donc susceptible de précipiter le minéraux Gypse ou l'Anhydrite.

Une sous saturation est visible (Figure 65a; Figure 65b) vis à vis l'élément Halite (NaCl) et Sylvite (KCl), avec des valeurs négatives de l'indice de saturation allant de - 4.24 (NaCl) à - 4.32(KCl). Dont les eaux les plus sous saturées par cet élément sont celles des sources S1et S2. Dans ce cas, l'eau peut dissoudre la minérale halite d'où l'augmentation des concentrations des Cl et Na dans l'eau avec des valeurs maximales retrouvées pour les deux compagnes respectivement de 125 et 173 mg/l (Figure 65b).

Quant à l'état de saturation des éléments carbonatés, les eaux de sources du Hammam Meskoutine présentent un indice positif (>1) ce qui indique une sursaturation allant d'un de 2.25 à 3.88 pour l'aragonite et de 2.12 à 3.78 pour la calcite. L'eau peut précipiter ces minéraux d'où une baisse des concentrations du calcium dans l'eau (Benamara et al., 2017).

La dolomite affiche une sursaturation plus importante pour les deux compagnes allant jusqu'à un indice de saturation de 7.67 dans les sites de prélèvements. Dans ces sources, des éléments carbonatés précipitent sous forme de dolomie.

Il est important de connaître les indices de saturation des minéraux à prédire quels sont ceux qui peuvent précipiter lors de l'extraction et l'utilisation des eaux (Tarcen et al., 2000).

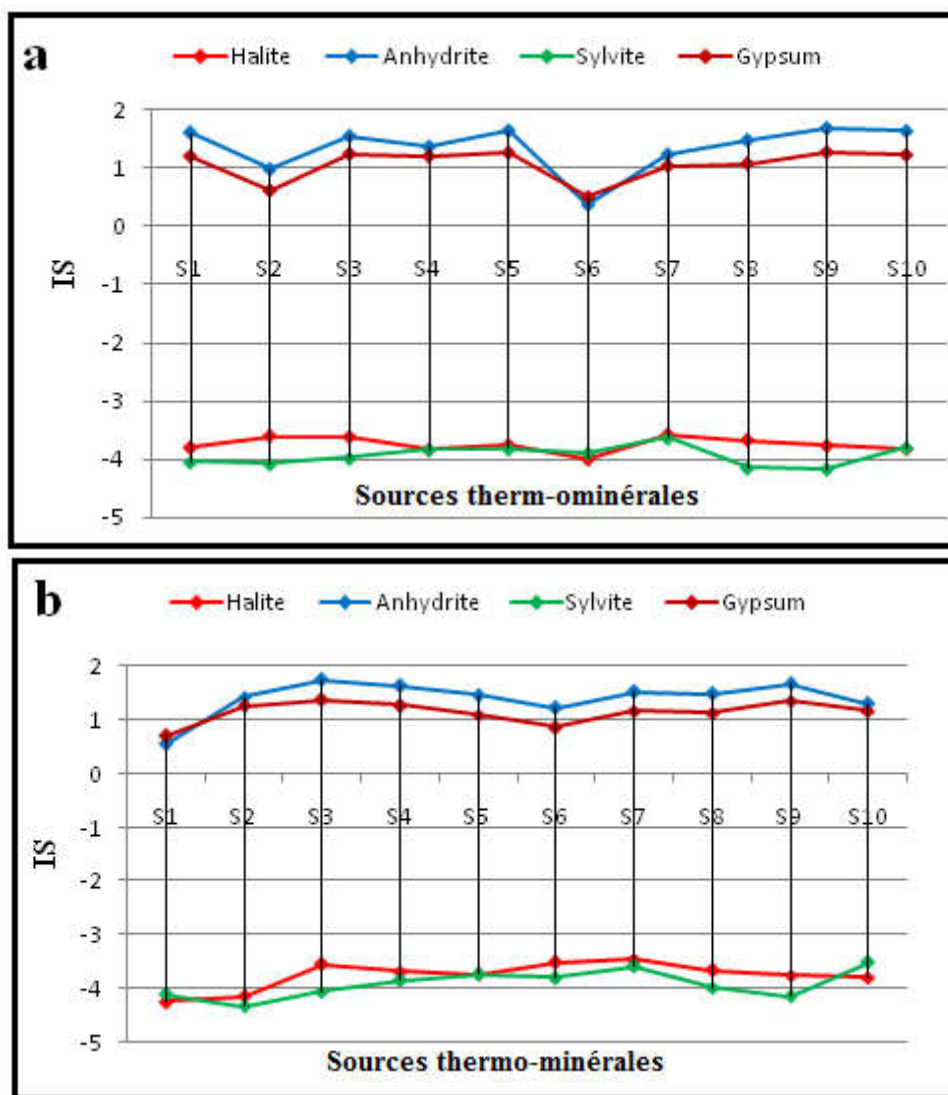


Figure 65: Etat des minéraux évaporitiques dans les eaux thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Basses eaux ; b) Hautes eaux

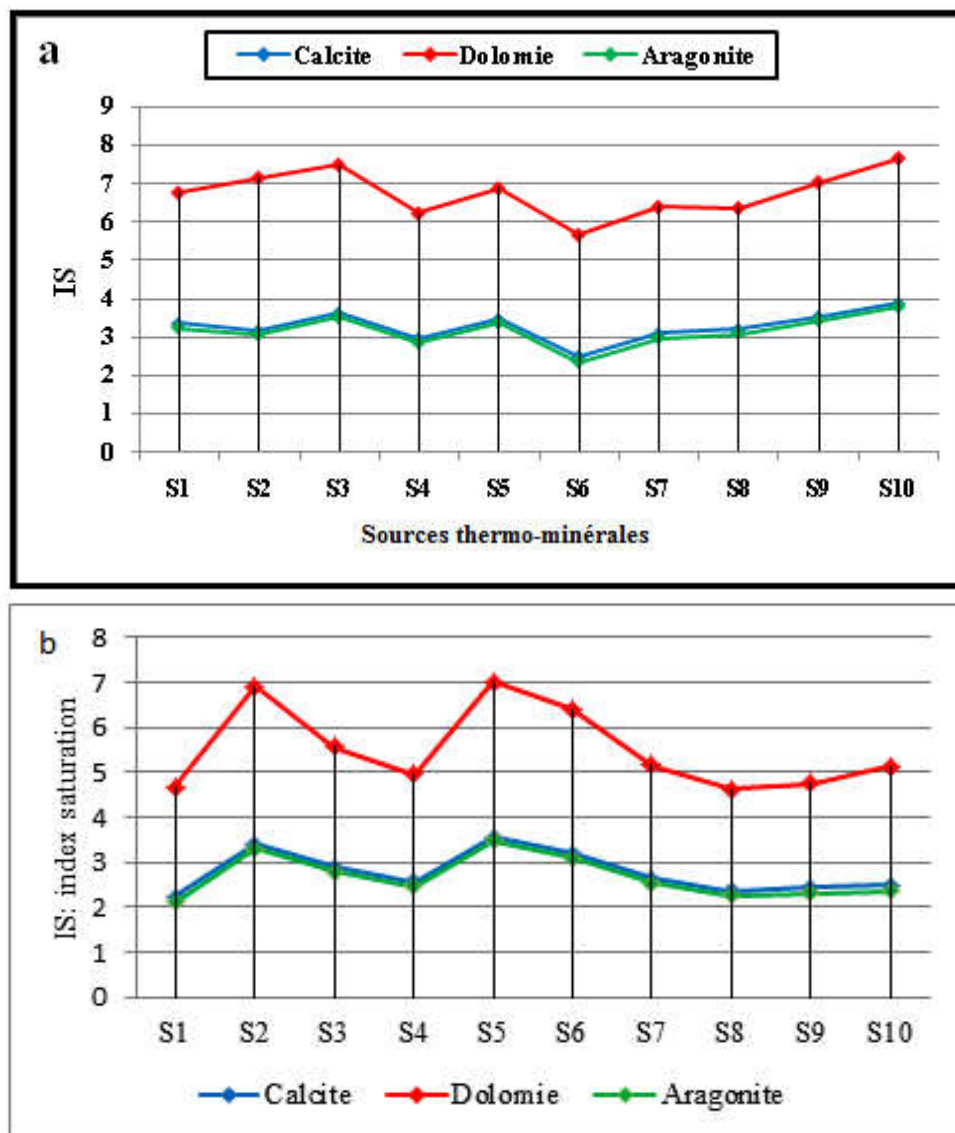


Figure 66 : Etat des minéraux carbonatés dans les eaux thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Basses eaux ; b) Hautes eaux

2. RECONSTITUTION DES SELS DISSOUS

La composition en sels dissous illustrée dans (Figure 67), montre une prédominance des bicarbonates de calcium qu'on pourrait attribuer aux formations carbonatées, mais avec une variation dans les sels secondaires avec un excès de magnésium et de sulfates (basses eaux) et de sulfates et chlorures (hautes eaux). L'excès de calciums et de magnésiums fait penser à un réservoir calcaire dolomitique avec une forte minéralisation en sulfate qui peut prévenir au lessivage des évaporites, de gypse, de pyrite ; l'excès de chlorures serait attribué au lessivage des couches argileuses qui les surmontent. La composition chimique des eaux thermo-minérales est particulièrement interférant avec les minéraux carbonatés qui sont présents largement dans le réservoir. Alors la dissolution de carbonates calciques et magnésiens amène

l'eau à saturation vis à vis de ces minéraux. Cependant, l'absence des minéraux évaporitiques dans le réservoir aquifère, à travers le Trias gypso-salin entraîne une sous saturation vis-à-vis de ceux-ci (Bouchareb-Haouchine; 2012).

Les sels reconstituent sont portés dans (Tableau 41). Ces reconstitutions ont pour but essentiel de rendre compte de l'influence possible des caractéristiques physicochimiques de la roche aquifère sur la composition chimique des eaux de sources. Les sels reconstitués ont basé sur la teneur relative de certains ions et selon le cas suivant :

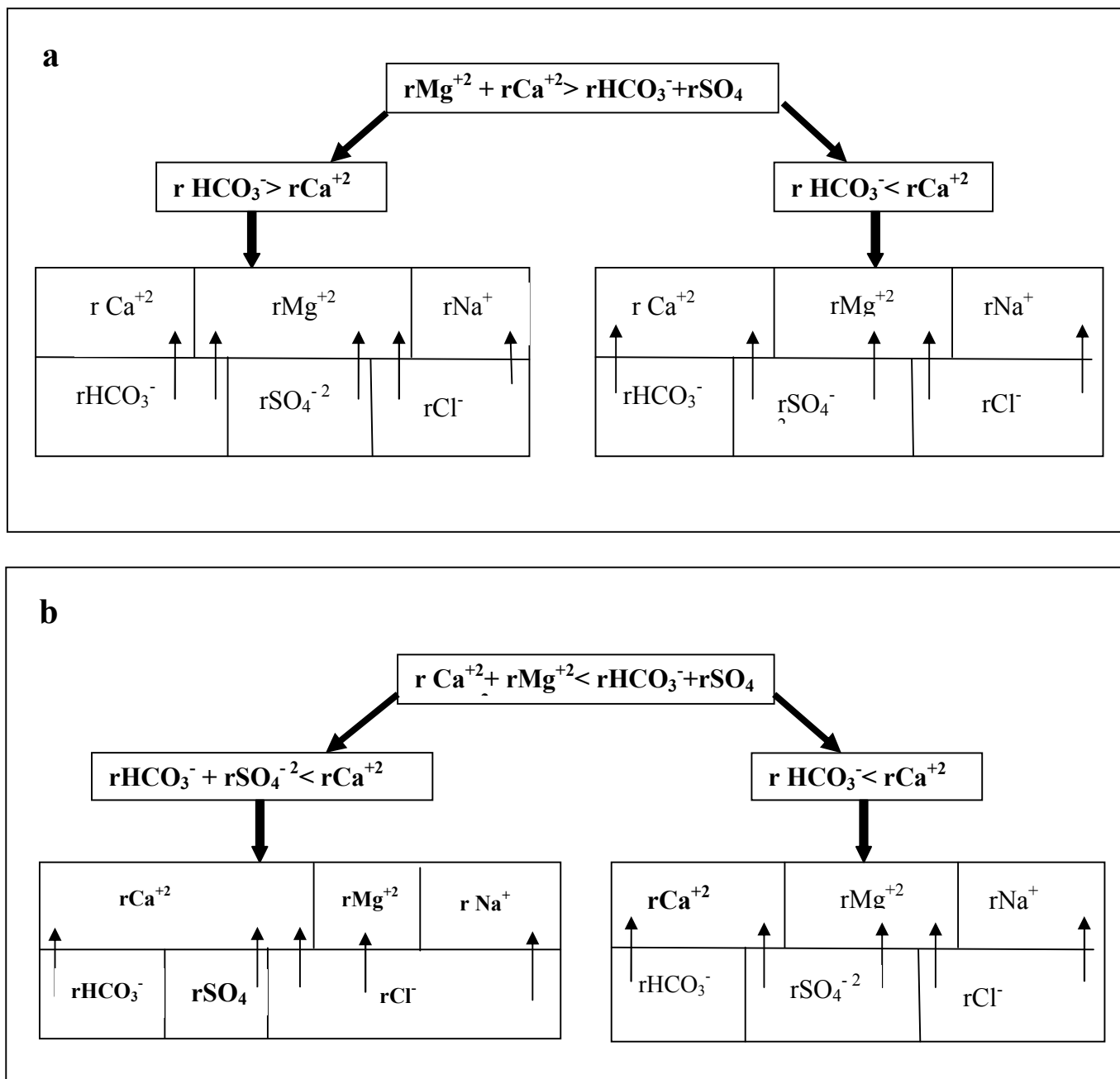


Figure 67: Représentation des sels dissous des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine : a) Basses eaux ; b) hautes eaux

Tableau 41: Les sels dissous des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

Sources	Formule ionique		Les sels dissous
Basses eaux			
S1	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, (HCO_3)_2Mg, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S2	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S3	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S4	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S5	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S6	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S7	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, (HCO_3)_2Mg, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S8	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S9	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S10	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
Hautes eaux			
S1	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S2	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S3	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S4	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S5	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S6	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S7	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S8	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$
S9	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg, Cl_2Mg, NaCl$
S10	$r Ca^{+2} + r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- + r SO_4^{-2} < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, Cl_2Ca, Cl_2Mg, NaCl$

III. ETUDE DES VALEURS RELATIVES

1. LES RAPPORTS CARACTERISTIQUES

L'origine des éléments chimiques des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine proviennent principalement des éléments des formations géologiques traversées au cours de leurs parcours. Pour la détermination de cette origine, l'étude de variation de quelques rapports caractéristiques est utilisée, ceux-là permettent :

- De voir l'évolution chimique des eaux pendant leur trajet souterrain ;
- Ainsi que le contact avec le milieu géologique ;
- Donner des indications sur la zone d'alimentation et la circulation des eaux souterraines. (Schöeller, 1965).

Pour ces raisons les rapports étudiés sont : $r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$, $r SO_4^{2-} / r Cl^-$ et $r Na^+ / r Cl^-$. Les résultats sont présentés dans le tableau 19.

1.1. Rapport $r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$

Pendant les deux périodes d'échantillonnage, le rapport $r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$ donne des valeurs supérieures à 1, ce qui laisse supposer la dominance des ions Mg^{2+} sur les ions Ca^{2+} qui traduit en général l'abondance des faciès dolomitique sur le faciès calcaires dans la lithologie des terrains traversés.

1.2. Rapport $r SO_4^{2-} / r Cl$

Durant la période de prélèvement, on a toutes les sources où $r SO_4^{2-} / r Cl > 1$, traduisant la prédominance des sulfates qui sont liées essentiellement au lessivage des terrains gypsifères, ainsi que de l'oxydation des sulfures (pyrites), à l'exception au niveau de la source S6 où $r SO_4^{2-} / r Cl < 1$ ceci traduit la prédominance des chlorures qui proviennent du lessivage des terrains argileux.

1.3. Rapport $r Na^+ / r Cl$

Les résultats du rapport $r Na^+ / r Cl$ (Tableau) pendant les deux campagnes de prélèvements a donné des valeurs supérieures à 1 montrant un excès des teneurs en Na^+ , qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodiques (autre que l'halite). L'augmentation des teneurs en Na^+ qui a accompagné les faibles teneurs en Cl^- est due probablement au phénomène d'échange de base car les argiles du substratum peuvent libérer des ions Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+} .

Tableau 42: Les rapports caractéristiques des sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine

Sources	$r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$		$r SO_4^{2-} / r Cl$		$r Na^+ / r Cl$	
	B. E	H. E	B. E	H. E	B. E	H. E
S1	5.0	5.21	2.9	2.98	8.4	6.57
S2	2.2	2.58	2.1	6.08	3.6	7.12
S3	2.6	2.31	1.7	2.14	1.9	2.61
S4	3.0	2.06	2.5	1.72	1.5	1.92
S5	3.1	2.54	3.1	1.30	2.5	1.66
S6	2.0	1.79	2.1	0.60	1.2	1.73
S7	14.0	1.81	2.9	1.42	3.5	2.57
S8	2.2	2.09	2.6	1.01	1.8	1.26
S9	2.6	2.17	3.3	3.06	2.5	2.91
S10	2.7	1.47	4.2	1.38	3.2	1.13

IV. ETATS DES MINERAUX DISSOUS DANS LES EAUX DE SOURCES THERMO-MINÉRALES DE HAMMAM OULED ALI

1. CALCUL DE L'INDICE DE SATURATION (IS)

L'indice de saturation des eaux de sources sont consignés dans le tableau suivant (Tableau 43)

Tableau 43: Indice de saturation des minéraux dissous dans les eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

Les minéraux dissous dans les eaux thermales de Hammam O Ali		Les émergences									
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Hautes eaux											
Minéraux évaporitiques	Halite	-7.02	-7.06	-7.08	-7.44	-7.18	-5.87	-5.95	-5.80	-6.06	-6.43
	Anhydrite	-0.64	-0.72	-0.53	-0.90	-0.78	-1.00	-0.97	-1.01	-0.79	-0.83
	Sylvite	-6.88	-7.04	-7.43	-8.03	-7.93	-6.19	-6.33	-6.30	-6.76	-6.60
	Gypse	-0.66	-0.73	-0.56	-0.88	-0.68	-0.81	-0.94	-0.98	-0.75	-0.84
Minéraux carbonatés	Calcite	0.23	0.40	0.93	0.33	-0.13	-0.22	0.19	-0.02	0.67	0.49
	Dolomie	0.13	0.62	1.36	0.06	-0.61	-0.89	0.19	-0.20	1.08	0.71
	Aragonite	0.10	0.28	0.81	0.21	-0.26	-0.35	0.06	-0.15	0.55	0.37
Basses eaux											
Minéraux évaporitiques	Halite	-7.09	-7.03	-7.20	-7.48	-7.26	-5.95	-6.08	-5.83	-6.13	-6.53
	Anhydrite	-0.69	-0.80	-0.58	-1.05	-0.83	-1.20	-1.01	-1.09	-0.81	-0.94
	Sylvite	-6.88	-7.01	-7.65	-7.95	-7.94	-6.20	-6.56	-6.40	-6.71	-6.48
	Gypse	-0.70	-0.77	-0.61	-1.00	-0.74	-0.96	-1.01	-1.02	-0.79	-0.95
Minéraux carbonatés	Calcite	0.04	-0.12	0.66	0.36	-0.30	-0.24	-0.07	-0.46	0.82	0.29
	Dolomie	-0.11	-0.59	0.82	0.23	-0.82	-0.82	-0.38	-1.08	1.34	0.35
	Aragonite	-0.08	-0.25	0.54	0.23	-0.43	-0.38	-0.20	-0.59	0.70	0.17

L'indice de saturation pour les eaux de Hammam Ouled Ali (Figure 68 et Figure 69) montre que:

- Concernant les minéraux carbonatés, en période des hautes eaux, les eaux de la majorité de sources (Tableau 43), sont sursaturées et tendent à se précipiter sous forme d'aragonite, de calcite et de dolomie. Néanmoins au niveau de sources (S5, S6 et S8) les eaux sont sous saturées ce qui provoque la dissolution en entraînant un enrichissement des eaux en calciums, magnésiums. En période des basses eaux, les sources S1, S2, S5, S6, S7, S8 sont sous saturées, tandis que le reste des sources sont sur saturées.

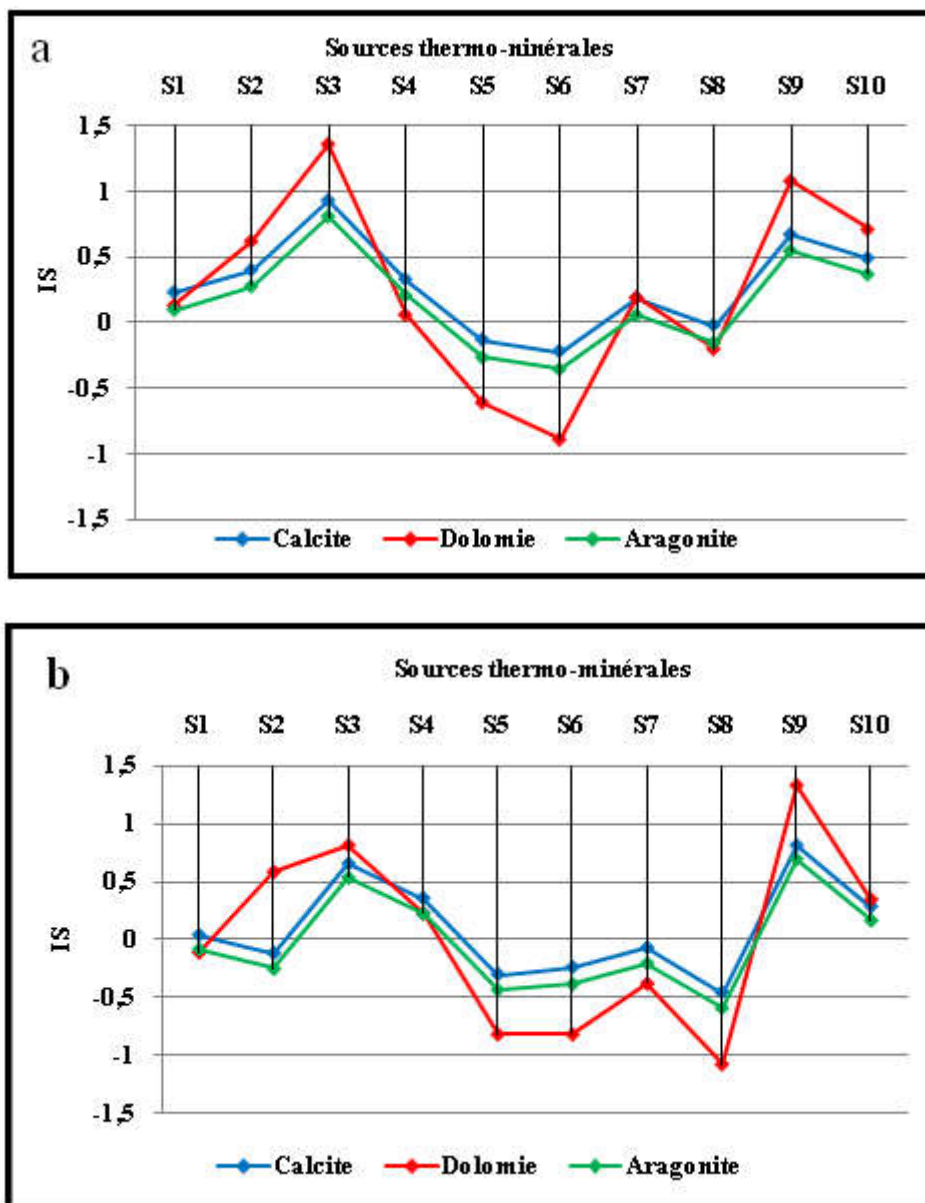


Figure 68: Etat des minéraux carbonatés dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali. a) Hautes eaux ; b) Basses eaux

Pendant les deux périodes de prélèvements les eaux de sources sont sous-saturées par rapport au minéraux évaporitiques ce qui provoque la dissolution en entraînant un enrichissement des eaux de la région en sodium et en chlorures (Figure 69);

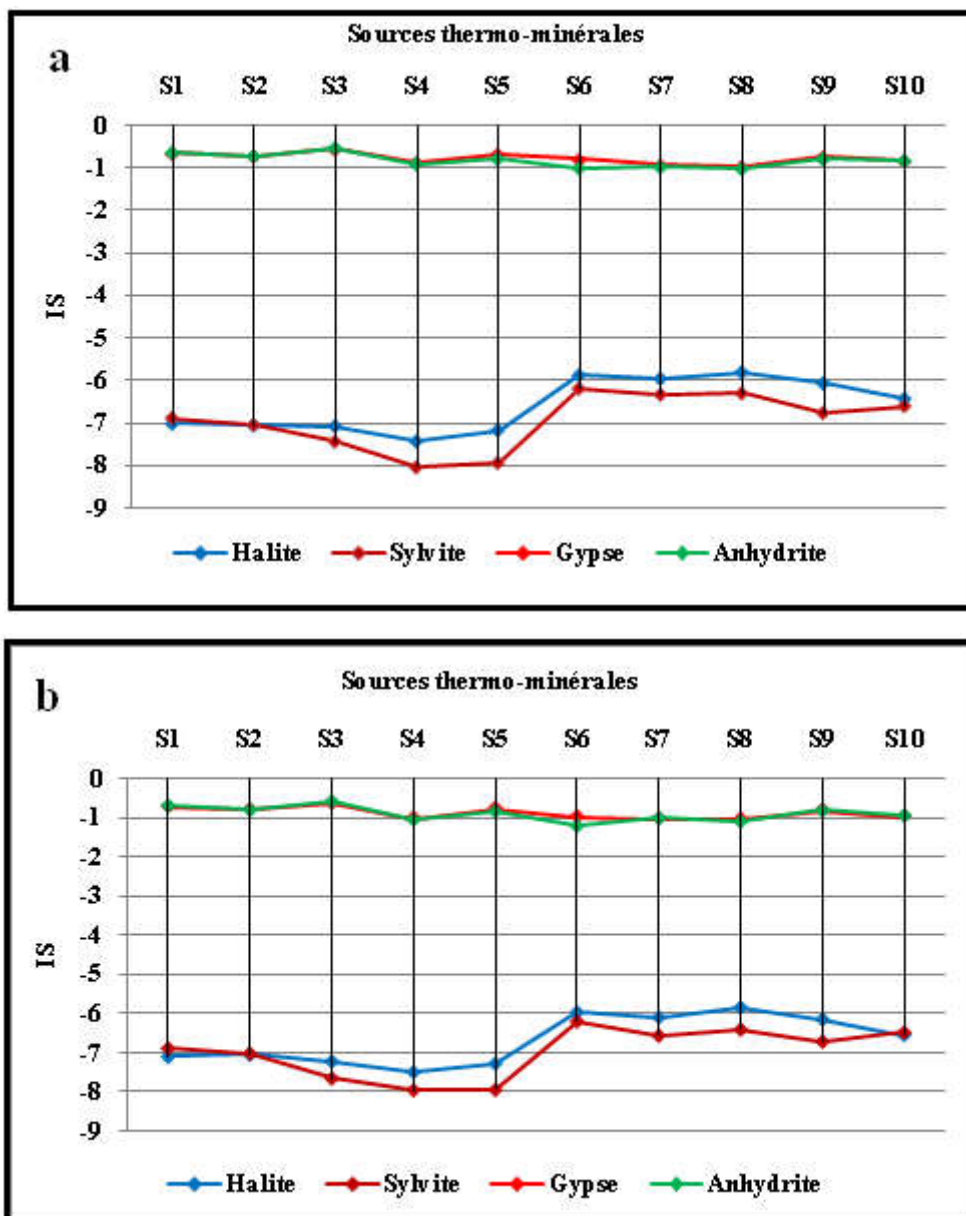


Figure 69: Etat des minéraux évaporitiques dans les eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali. a) Hautes eaux ; b) Basses eaux

V. RECONSTITUTION EN SELS DISSOUS

Pendant les deux périodes de prélèvements (Tableau 44), la composition en sels dissous montre une prédominance des bicarbonates de calcium et de magnésium qu'on pourrait attribuer aux formations carbonatées et l'apparition de SO_4Ca , $\text{SO}_4(\text{Na})_2$ et Na Cl comme des sels secondaires. Les premiers (SO_4Ca) proviennent du substratum marneux gypsifères et les seconds proviennent des lentilles argileuses localisées dans les différents niveaux dans les alluvions.

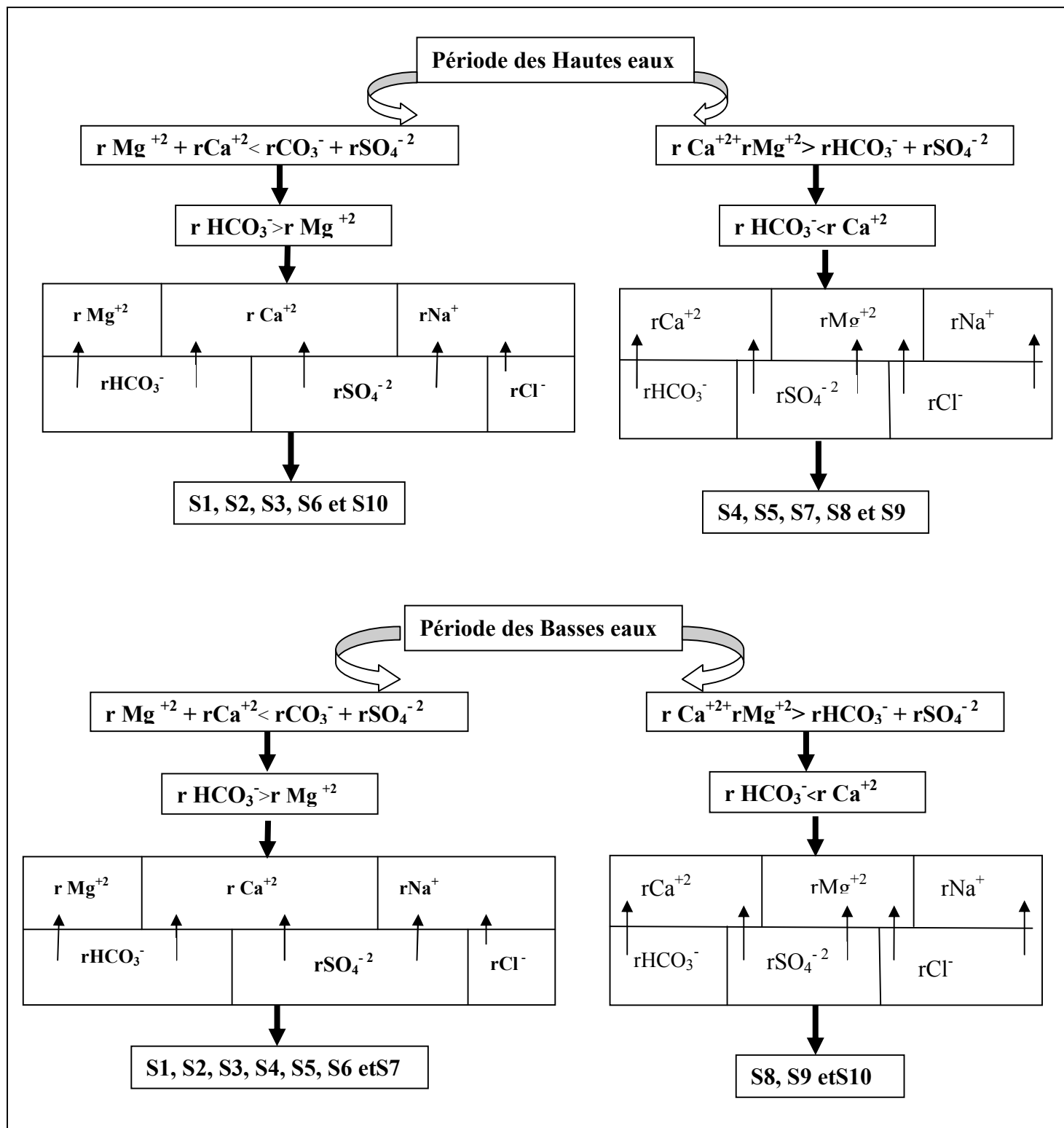


Figure 70: Représentation les sels dissous des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

Tableau 44: Les sels dissous des eaux thermo-minérales de Hammam Ouled Ali

source	Formule ionique		Les sels dissous
Hautes eaux			
S1	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S2	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S3	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S4	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S5	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S6	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S7	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S8	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S9	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S10	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
Basses eaux			
S1	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S2	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S3	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S4	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S5	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S6	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S7	$r Mg^{+2} + r Ca^{+2} < r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- > r Mg^{+2}$	$(HCO_3)_2Mg, (HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4(Na)_2, NaCl$
S8	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S9	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$
S10	$r Ca^{+2} r Mg^{+2} > r HCO_3^- + r SO_4^{-2}$	$r HCO_3^- < r Ca^{+2}$	$(HCO_3)_2Ca, SO_4Ca, SO_4Mg Cl_2Mg, NaCl$

VI. ETUDE DES VALEURS RELATIVES

1. LES RAPPORTS CARACTERISTIQUES

Nous avons étudiés les rapports suivants : $r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$, $r SO_4^{2-} / r Cl^-$ et $r Na^+ / r Cl^-$ et les résultats sont présentés dans le tableau 45.

Tableau 45: Les rapports caractéristiques des eaux de sources thermo-minérales du Hammam Ouled Ali

Sources	rMg^{2+}/rCa^{2+}		$rSO_4^{2-}/r Cl^-$		$r Na^+/r Cl^-$	
	B. E	H. E	B. E	H. E	B. E	H. E
S1	0.39	0.29	11.95	12.24	5.00	5.96
S2	0.27	0.39	10.41	12.49	4.97	6.48
S3	0.20	0.20	21.65	15.00	8.39	5.35
S4	0.18	0.14	8.66	5.33	1.28	1.49
S5	0.35	0.26	11.06	9.61	3.64	3.30
S6	0.31	0.23	1.28	1.23	0.87	0.88
S7	0.33	0.37	1.03	0.90	1.06	0.89
S8	0.39	0.39	0.76	0.74	0.95	0.94
S9	0.29	0.31	1.18	1.31	0.68	0.76
S10	0.33	0.31	2.41	2.16	1.60	1.44

1.1. Rapport $r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$

Pendant les deux périodes d'échantillonnage, le rapport $r Mg^{2+} / r Ca^{2+}$ donne des valeurs inférieures à 1. Ceci peut être expliqué par la présence des formations sableuses et alluvionnaires surmontant les formations carbonatées.

1.2. Rapport $r SO_4^{2-} / r Cl$

Lorsque ce rapport est supérieur à 1; ceci est observé au niveau de 90% des sources (S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7, S9, et S10, traduisant la prédominance des sulfates qui sont liées essentiellement au lessivage des évaporitiques.

Lorsque ce rapport est inférieur à 1 c'est le cas de la source S8, ceci traduit la prédominance des chlorures qui proviennent du lessivage des terrains argileux.

1.3. Rapport $r Na^+ / r Cl$

Lorsque ce rapport est supérieur à 1 ; il y a la prédominance du sodium cette prédominance s'explique par l'existence des argiles.

Lorsque ce rapport est inférieur à 1, c'est le cas de 30 %, il traduit la prédominance des chlorures, qui sont liés aux terrains salifères, aux argiles.

VII. CONCLUSION

L'étude de l'indice de saturation montre que les eaux des sources thermo-minérales sont sous saturées par rapport aux minéraux évaporitiques (Halite, Sylvite, gypse et Anhydrite), qui entraînent un enrichissement des eaux de sources en sodium et en chlorures pour les deux sites et le long de la période d'échantillonnage.

Une sursaturation vis à vis des minéraux carbonatés, favorisant ainsi une sédimentation surtout sous la forme de dolomie dans Hammam Meskoutine, Au niveau de Hammam Ouled Ali, en période des hautes eaux, les eaux de la majorité de sources, sont sursaturées et tendent à se précipiter sous forme d'aragonite, de calcite et de dolomie. Néanmoins au niveau de sources (S5, S6 et S8) les eaux sont sous saturées ce qui provoque la dissolution entraînant un enrichissement des eaux en calciums, magnésiums. En période des basses eaux, les sources S1, S2, S5, S6, S7, S8 sont sous saturées, et le reste des sources sont sur saturées. La reconstitution des sels dissous montre une prédominance des bicarbonates de calcium et de magnésium dans les sources de Hammam Ouled Ali et bicarbonates de calcium au niveau de Hammam Meskoutine.

CHAPITRE VII. ORIGINE DES TRAVERTINS ET AFFAISSEMENT DE LACASCADE DE H-MESKOUTINE

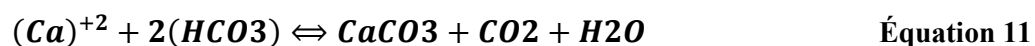
I. INTRODUCTION

Les travertins ou tufs calcaires forment au même titre que les concrécionnements dans les grottes, une forme de distribution, dans le paysage, d'une partie des carbonates issus de la dissolution des massifs quarstifiés (Magnin et al.; 1991). Les travertins hydrothermaux, dont le calcium provient du lessivage de roches perméables diverses, il existe une relation entre ces travertins et les karsts (Martel; 1921, Lambert; 1956, Fénélon; 1968, Nicod; 1981, Nampy et Macaire; 1989, Ford et Williams; 1989).

L'analyse de leur faciès et de leurs séquences sédimentaires peut fournir des renseignements sur les paléo fonctionnements, et sur les conditions environnementales des paléo fonctionnements des massifs karstiques d'amont. Toutefois, les ensembles travertineux ont l'avantage sur le concrécionnement souterrain d'être directement corrélables avec d'autres types de formations sédimentaires (colluvions, alluvions, sols...) ou avec des éléments morphologiques du paysage dans lequel s'inscrivent ces séquences carbonatés (feuilles, pollens, mollusques, insectes, charbons de bois...) y sont souvent très abondants et constituent autant de témoins des environnements contemporains de la mise en place de ces formations. Les édifices travertineux (travertins et dépôts associés) sont des indicateurs écologiques et géomorphologiques de révolution des milieux fluviatiles des régions karstiques (Vaudour, J. 1994).

II. PRECIPITATION DU CARBONATE DE CALCIUM

La précipitation du carbonate de calcium suit la réaction suivante :



Cette précipitation est facilitée par les organismes à coquille (mollusques, oursins, coraux, algues planctoniques...), la respiration des êtres vivants et par le brusque dégazage des eaux. Il existe plusieurs modes de formation des roches calcaires, ou roches carbonatées :

III. FORMATION DES ROCHES CALCAIRES

La plupart des roches sédimentaires sont des calcaires composés principalement de carbonate de calcium. Le calcium provient de l'altération d'autres roches comme le basalte ou le gneiss. Les carbonates sont présents dans les solutions qui ont dissous du gaz dioxyde de carbone. Ainsi les massifs calcaires sont altérés par l'action chimique du dioxyde de carbone contenu dans les eaux de ruissellement. Des quantités importantes de calcaire sont ainsi dissoutes. Les

minéraux en solution sont entraînés par l'eau vers les lieux de dépôts. La diversification des calcaires (nature et aspect) procède des formalités dans lesquelles ils se sont déposés, des organismes fossilisés qui les composent mais aussi de l'origine chimique ou biologique des dépôts (Jackson;1997, Barth; 2007, Tilling; 2007).

1. DEPOTS D'ORIGINE CHIMIQUE

L'eau contient une grande quantité du calcaire dissous, la précipitation des particules de calcaire deviennent insolubles, lorsque le dioxyde de carbone se fuit (Bouamara et al).

- Lors des précipitations l'accumulation des éléments minimes a abouti à la composition de la roche calcaire, qui sont généralement fossilifères ;
- Le dégazage des eaux souterraines provoque une précipitation locale qui produit selon les évènements, les travertins, ou stalactites et stalagmites. Ces calcaires se transforment dans un milieu continental qui sont rarement fossilifères ;
- Les êtres vivants peuvent résulter d'une forte accumulation de coquilles ou de carapaces calcaires comme la craie, ou être bio construits (calcaire récifal), qui sont toujours fossilifères ;

2. DEPOTS D'ORIGINE BIOLOGIQUE

Plusieurs animaux et végétaux vivent dans l'eau utilisant le calcaire dissous pour faire leur propre structure. Les structures calcaires qu'ils ont produites s'accumulent dans les dépôts sédimentaires. Ainsi les fossiles formés peuvent constituer la presque totalité de la roche calcaire. Alors on distingue :

- particulièrement les calcaires récifaux qui contiennent des coraux fossiles ;
- les calcaires conchyliens qui contiennent des restes de coquilles de mollusques bivalves et de mollusques gastéropodes ;
- les calcaires à globigérines composés d'animaux microscopiques.

IV. DIFFERENTS TYPES DE TRAVERTINS

Plusieurs formations travertineuses ont été proposées suite de (Martin et Bakalowics; 1988), on distingue deux groupes simplement :

- les travertins de source ;
- les travertins de la vallée ou de rivière.

La différence entre ces deux groupes et le niveau de leur lieu de développement, niveau de la précocité de la précipitation carbonatée et par, la grande complexité plus ou moins des systèmes hydrologiques dont ces groupes sont tributaires. La rapidité de la précipitation des carbonates et la distance d'apparition des travertins au-delà de l'exutoire appartiennent de nombreux paramètres physico-chimiques et biochimiques, déterminés par un ensemble de facteurs inséparables à la nature et à l'évolution interne et externe de la propriété amont.

V. LES FORMATIONS TRAVERTINEUSES DANS LE MONDE

Il existe des meilleures formations extraordinaires dans des différents pays du monde comme les états unis, la Turquie, le Japon, la Chine, l'Iran, Guatemala, le Mexique, l'Italie, l'Islande et la Nouvelle Zélande (Figure 71; Figure 72).



Figure 71 : Baishuitai, Yunnan, Chine



Figure 72: Mammoth Hot Springs, États-Unis

1. LES CASCADES DE HAMMAM MESKOUTINE ET HAMMAM OULED ALI (ALGERIE)

La cascade de Hammam Meskoutine est des meilleures cascades dans le monde c'est une image magistrale d'une cataracte pétrifiée (Figure 73). Cette cascade est due aux griffons dont elle reçoit les eaux thermales. Elle constitue une merveille formation, elle occupe une surface verticale de trente mètres de hauteur et une centaine de mètres de largeur au-dessus d'oued

Chédakha. Elle a des couleurs plus variées, dont les jaunes rougeâtres provenant de la présence de champignons microscopiques, et d'une blancheur brillante, là où l'eau coule en profusion. La cascade de Hammam Ouled Ali est une autre image occupe presque une surface latérale de trois mètres de hauteur et environ six mètres de largeur (Figure 74).



Figure 73: cascade Hammam Meskoutine (Benamara; 2011)

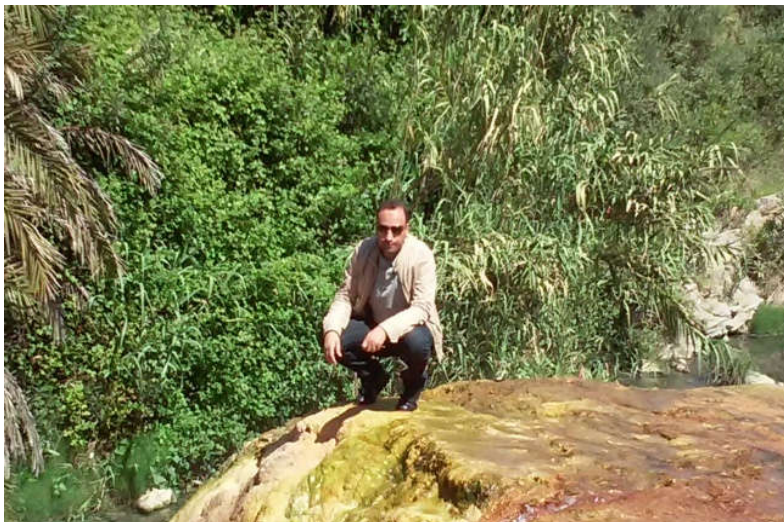


Figure 74: cascade Hammam Ouled Ali (Benamara; 2017)

VI. DEFORMATION ET AFFAISSEMENT DE LA CASCADE HYDROTHERMALE DE HAMMAM MESKOUTINE

Lors de la remontée des eaux thermo-minérales profondes peuvent se refroidir au contact avec l'air libre et prendront la température ambiante du milieu, donc la variation de la température modifie les caractéristiques chimiques de ces eaux thermo-minérales, en effet la solubilité des minéraux variant avec la température, les solutions peuvent se trouver sur saturées par rapport

aux quelques minéraux et précipiter, ce qui affecte leur teneur en élément dissous. Comme peuvent devenir sous-saturées par rapport à d'autres minéraux et les dissoudre si ce dernier est présent dans les couches traversées, ceci peut provoquer une ou plusieurs précipitations de minéraux par l'effet d'ion commun.

Pendant les années quatre-vingt, un affaissement soudain a été effectué à la cascade de Hammam Meskoutine après 15 jours de la déviation de quelques émergences thermales à ses parcours naturels, cette partie est affaissée brutalement et la zone effondrée présente des ruptures. La dégradation des formations géologiques argileuses d'origine calcaire travertin (Maison et al.; 2009), nuit à l'aspect physique de la cascade.

Après cet effondrement; ils ont annulé cet aménagement (déviation) et retourner l'écoulement de ces sources thermo-minérales à leur état naturel et avec le temps la cascade prend sa forme actuelle. Donc la pérennité d'écoulement des eaux thermo-minérales fortement minéralisées est le premier facteur indispensable à la consolidation ainsi que l'évolution de roche qui forme la cascade de Hammam Meskoutine. Pour démontrer cette idée, on a deux outils :

- Une étude du sol au niveau d'un sol sec formant la cascade a été effectuée au mois de Mai 2014, sur trois sites d'observation.
- Une étude hydro-chimique d'une source thermo-minérale au niveau de la cascade depuis l'émergence jusqu'à la fin de son parcours.

1. PHENOMENE MECANIQUE DE DESHYDRATATION

L'affaissement de la cascade de Hammam Meskoutine, nous a laissé penser à un problème mécanique, c'est-à-dire qu'une dégradation de la roche par déshydratation serait à l'origine de l'effondrement d'une partie de la cascade. L'étude des caractéristiques mécaniques de la roche saine déshydratée, s'impose.

2. ÉTUDE DU SOL

Les essais mécaniques sont réalisés au laboratoire LTP-EST Annaba, sur des échantillons de la roche de la cascade de Hammam Meskoutine, qui ont été effectués en mai 2014 sur (03) trois points de prélèvement (Figure 75). L'échantillonnage se fait par découpage par un couteau et le maître dans un seau, afin de transporter au laboratoire.

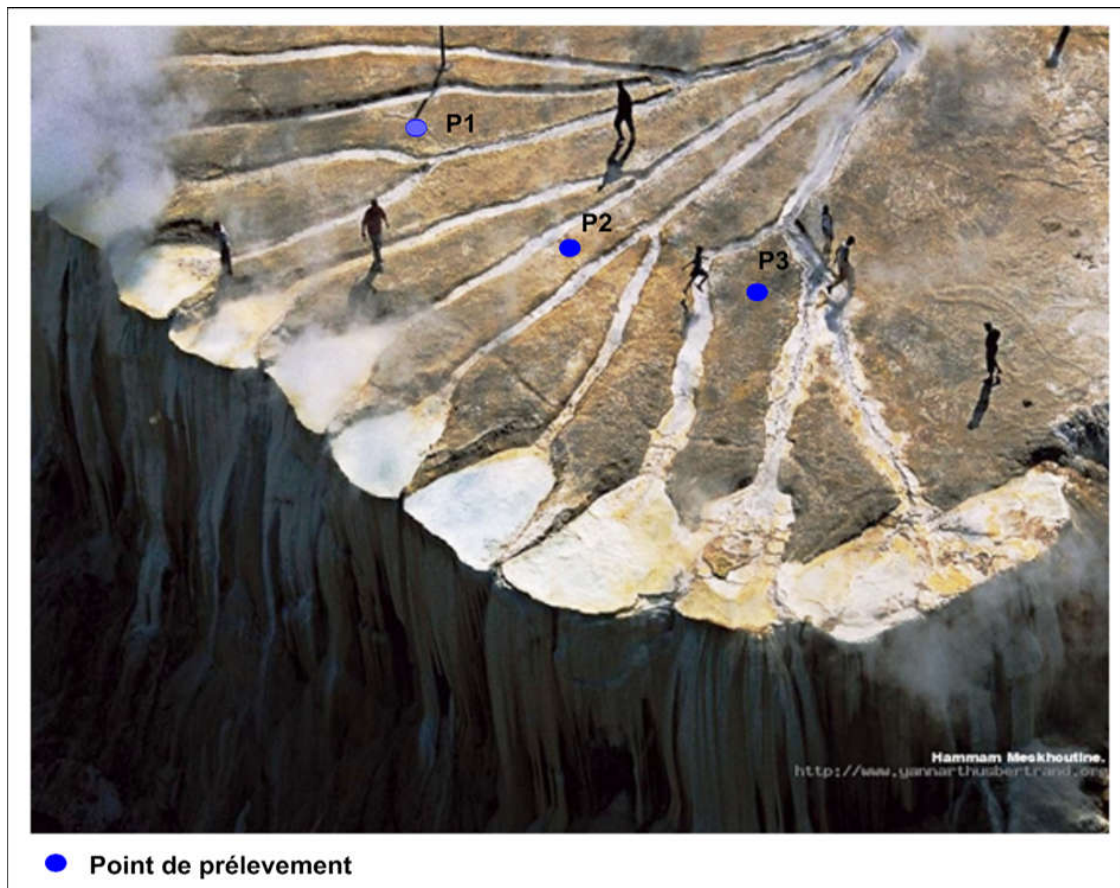


Figure 75: Localisation des points de prélèvement

L'essai mécanique au cisaillement rectiligne réservé pour des sols prélevés qui se constitue essentiellement de la roche de partie endommagée de la cascade. Il s'agit de l'essai de cisaillement à la boîte, cisaillement directe NF P 94-071.1 conformément aux exigences de la norme française AFNOR. L'appareil de cisaillement de référence WYKEN FARRANCE est utilisé pour cet essai de reconnaissance des sols naturels (Figure 76). Ce test est effectué sans consolidation préalable, drainages fermés, sous une vitesse statique constante de cisaillement de l'ordre de (0,4 mm/mn). Dont les boîtes de l'appareil utilisées sont de 60 mm de côté comme étant la dimension correspondante au diamètre maximum des grains du sol ($d_{max} < 5\text{mm}$). Des capteurs de déplacements sont mis en place pour mesurer les déplacements verticaux et horizontaux (δ_l ; δ_h), et d'autres capteurs de force sont mis aussi pour la mesure des efforts horizontaux de cisaillements (T).



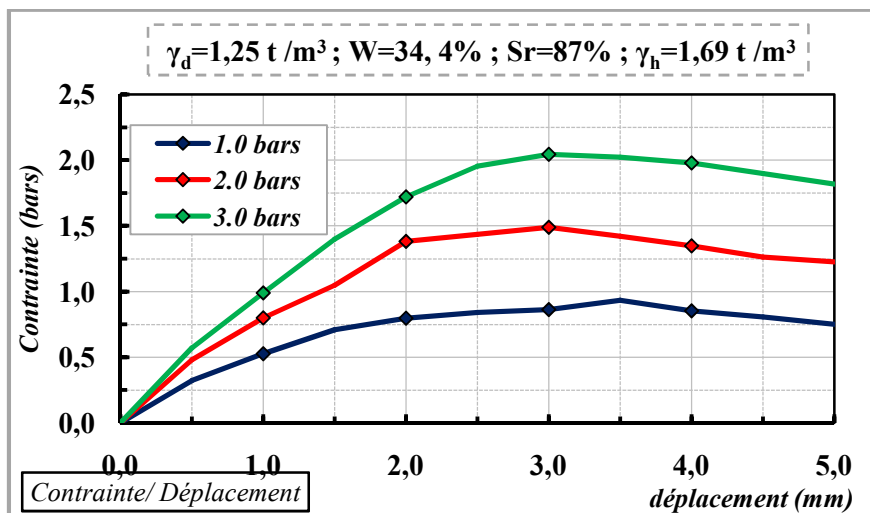
Figure 76: Appareil de cisaillement rectiligne à la boîte

La détermination de la courbe intrinsèque du sol étudié permet de calculer la résistance de la roche détruite au cisaillement sous une contrainte normale et d'en déduire les caractéristiques mécaniques de la roche endommagée. Les expériences réalisées ont permis de calculer les paramètres mécaniques à savoir l'angle de frottement interne, densité, teneur en eau et le cisaillement sous une vitesse de cisaillement de 0,4 mm/mn (Tableau 46).

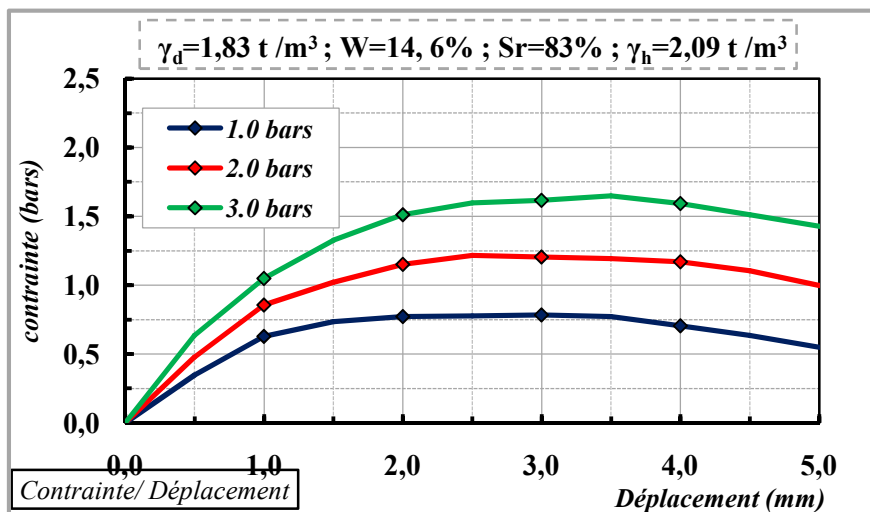
Tableau 46: Tableau récapitulatif des résultats des essais

LTP Est Unité d'Annaba		ESSAI DE CISAILLEMENT A LA BOITE								
		Norme : NF P : 94-071.1								
Provenance : cascade de Hammam Meskoutine		Type d'essai : CU								
GUELMA		Coefficient de l'anneau <k> : 0,35.								
Sondage –puits : surface		Vitesse de cisaillement : 0,4 mm/mn.								
Opérateur : LTP-EST ANNABA		Nature de sol : calcaire.								
Profondeur : surface										
N° d'essai		I			II			III		
Densité sèche	$\gamma_d(t/m^3)$	1,25			1,83			1,56		
Teneur en eau	W (%)	34,4			14,6			23,4		
Degré de saturation	Sr (%)	87			83			91		
Densité humide	$\gamma_h(t/m^3)$	1,69			2,09			1,93		
Cisaillement rectiligne	σ (bars)	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0	1,0	2,0	3,0
	C (bars)	0,38			0,35			0,45		
	ϕ (°)	29,03			23,42			26,47		
	Type d'essai	CU			CU			CU		

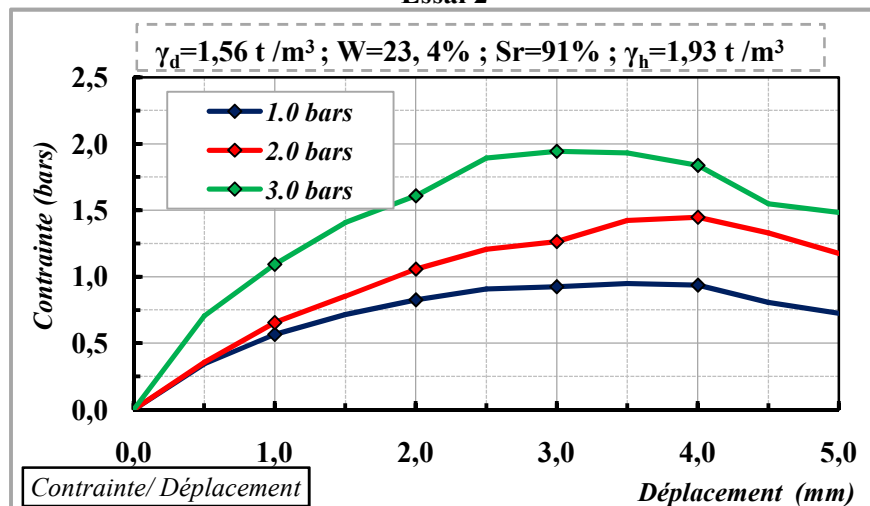
Pour déterminer ces caractéristiques, trois essais mécaniques ont été réalisés au niveau de la roche calcaire de la cascade après sa dégradation, et ont été présentés sous formes de deux types de courbes de cisaillement l'une est «Contrainte-Déplacement » et l'autre « Contraint normale-Contrainte de cisaillement ». (Figure 77; Figure 78).



Essai 1



Essai 2



Essai 3

Figure 77: La courbe de la contrainte en fonction de déplacement

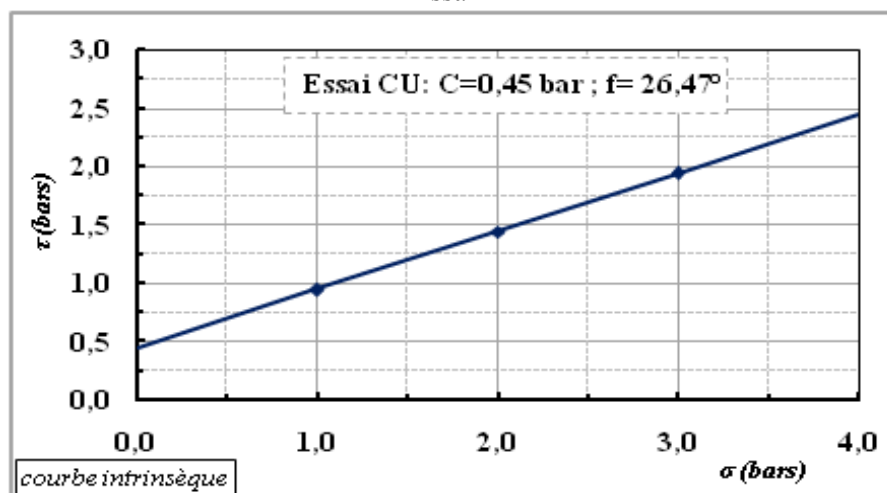
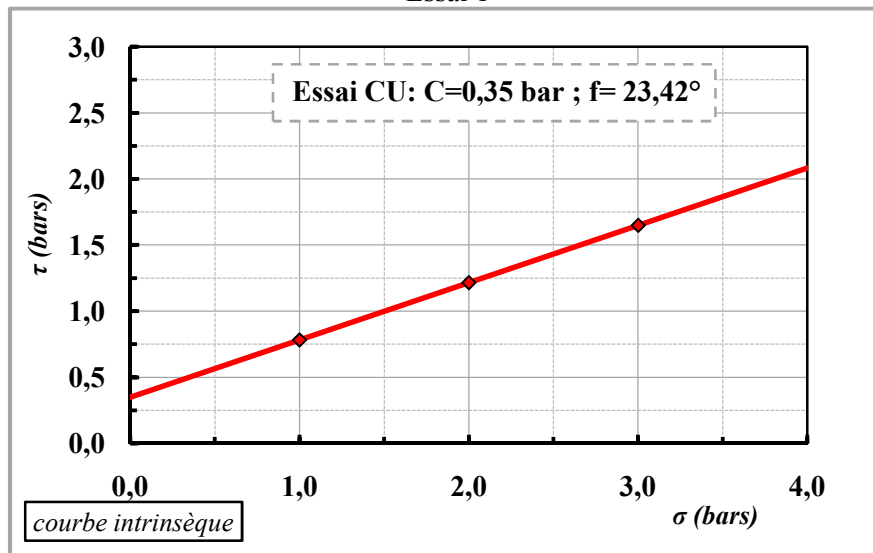
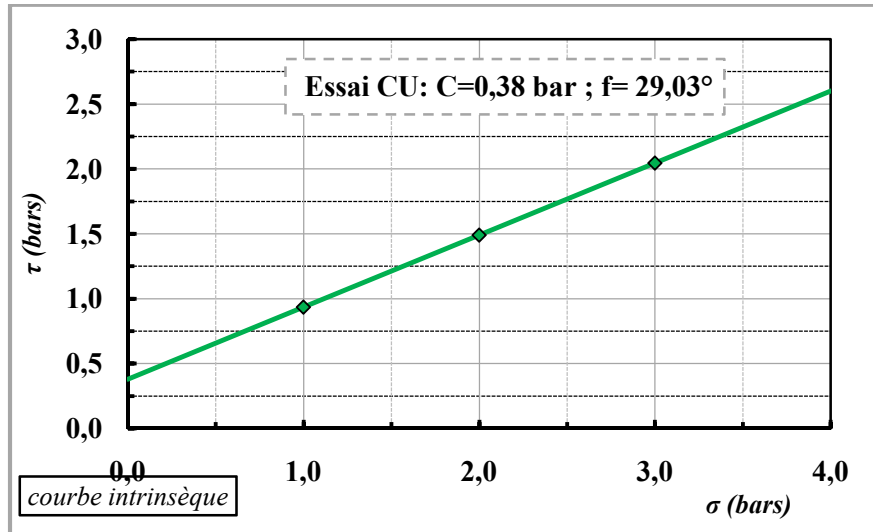


Figure 78: Contrainte normale en fonction de cisaillement

Les courbes contrainte en fonction de déplacement (Figure 77) montrent que en abscisses les déplacements sont proportionnels aux allongements de la demi-boîte inférieure, donc à la déformation de l'échantillon tandis que pour les ordonnées les indications du comparateur de l'anneau, sont approximativement proportionnelles aux différentes forces de cisaillement, parce que la courbe d'étalonnage de l'anneau qui donne la force en fonction de l'indication du comparateur est approximativement linéaire. En effet l'absence quasi systématique de pic sur les courbes contrainte déformation obligent à déterminer de façon arbitraire l'hypothèse de déformation retenue pour les résultats expérimentaux, cependant en se référant aux paramètres déterminées à partir des courbes intrinsèques.

La courbe contrainte normale en fonction de cisaillement pour les trois essais est (Figure 78) un modèle linéaire qui représente la variation de la contrainte tangentielle appliquée sur le sol calcaire au moment de sa rupture, en fonction de la contrainte normale appliquée. Cette droite est appelée courbe intrinsèque qui mentionne la constante de cohésion (C), l'angle de frottement (ϕ).

La constante C correspond à la contrainte de cisaillement qui peut être supportée par le matériau sous une contrainte moyenne et l'angle du frottement interne du matériau.

Si (C) est nul et ϕ non nul, le matériau est dit pulvérulent. Si ϕ est nul et C non nul, le matériau est purement cohérent.

Le couple du paramètre mécanique C et ϕ varie respectivement entre (0.38 bars; 29.03°), (0.35 bars; 23.42°) et (0.45 bars; 26.47°). Les valeurs de la cohésion C et l'angle de frottement interne présentées dépendent du taux de déformation retenu au niveau des courbes contrainte- déplacement pour déterminer les couples σ et τ représentés dans un diagramme de type Mohr-Coulomb (Figure 77) ou courbe intrinsèque, ces valeurs utilisées dans ce cas présent correspondent à une valeur maximale de la contrainte tangentielle τ , la moyenne de la cohésion et l'angle de frottement donnent un couple de (0.39 bars; 26.30°), on remarque que l'angle de frottement interne est élevé et la cohésion est faible. Cependant ils sont différents de zéro. Donc selon les résultats obtenues des trois essais au niveau de la roche testé est caractérisée par un angle de frottement interne est légèrement élevé et un faible constante de cohésion qui permet de le classer comme un sol de faible résistance au cisaillement mais n'est pas tassant selon la norme de la résistance de cisaillement (Tableau 47).

Tableau 47: Classification des sols selon la norme de cohésion

C_u (kPa)	Résistance au cisaillement
<10	Extrêmement faible
10-20	Très faible
20-40	faible
40-75	Moyenne
75-150	Elevée
150-300	Très élevée
>300	Extrêmement élevée

VII. LA RECONSTITUTION DE LA CASCADE HYDROTHERMALE DE HAMMAM MESKOUTINE

1. ETUDE HYDRO-CHIMIQUE

L'objectif de cette étude a été consacré au suivi spatiotemporel de quelques paramètres physico-chimiques des sources thermo-minérales en fonction de la température, la pente du terrain et la distance entre les points d'analyse. Pour atteindre cet objectif, une analyse hydrochimique reposant sur 10 points ont été choisis depuis l'émergence jusqu'à la fin de son parcours au niveau de la cascade de Hammam Meskoutine.

2. MATERIELS ET METHODES

Les eaux thermo-minérales présentent des caractéristiques particulières relativement aux eaux naturelles, l'échantillon ne peut être transporté au laboratoire dans des conditions ressemblant au terrain, la température régit la presque totalité des réactions physiques, chimiques et biologiques (Chapman; 1996). Il se pose alors le problème de conservation des prélèvements. Ainsi, nous avons adopté un matériel de terrain (valise HANNA instrument HI.3817) qui permet d'analyser les échantillons dans les conditions naturelles. La valise contient un pH-mètre HI 98107, et des paramètres : bicarbonates HI 3811, dureté HI 3812, chlorures HI 3815, sulfites HI 3822.

Ainsi les mesures de la température, du potentiel d'hydrogène (pH), potentiel redox (Eh), le taux de la salinité (TDS) ont été mesurées in situ au moyen d'un appareil multi paramètre de marque (consort C51) (Tableau 48).

Tableau 48: Travaux in situ et appareillage

Paramètres mesurés	Appareil utilisé
Température (°C)	multi paramètre de marque (consort c51).
pH	pH-mètre HI 98107, marque HANNA
Conductivité (µS/cm)	multi paramètre de marque (consort c51).
Salinité (mg/l)	multi paramètre de marque (consort c51).
Eh	multi paramètre de marque (consort c51).
Chlorures	valise HANNA instrument HI 3815
Bicarbonates	valise HANNA instrument HI 3811
Sulfites	valise HANNA instrument HI 3822
Dureté totale	valise HANNA instrument HI 3812

Un nombre de 10 échantillons prélevés en 2014 (février et juillet) au point du jaillissement de la source jusqu'à la précipitation des minéraux, où l'équidistance entre le point de prélèvements à l'autres est de l'ordre de 2.5 mètres (Figure 79).

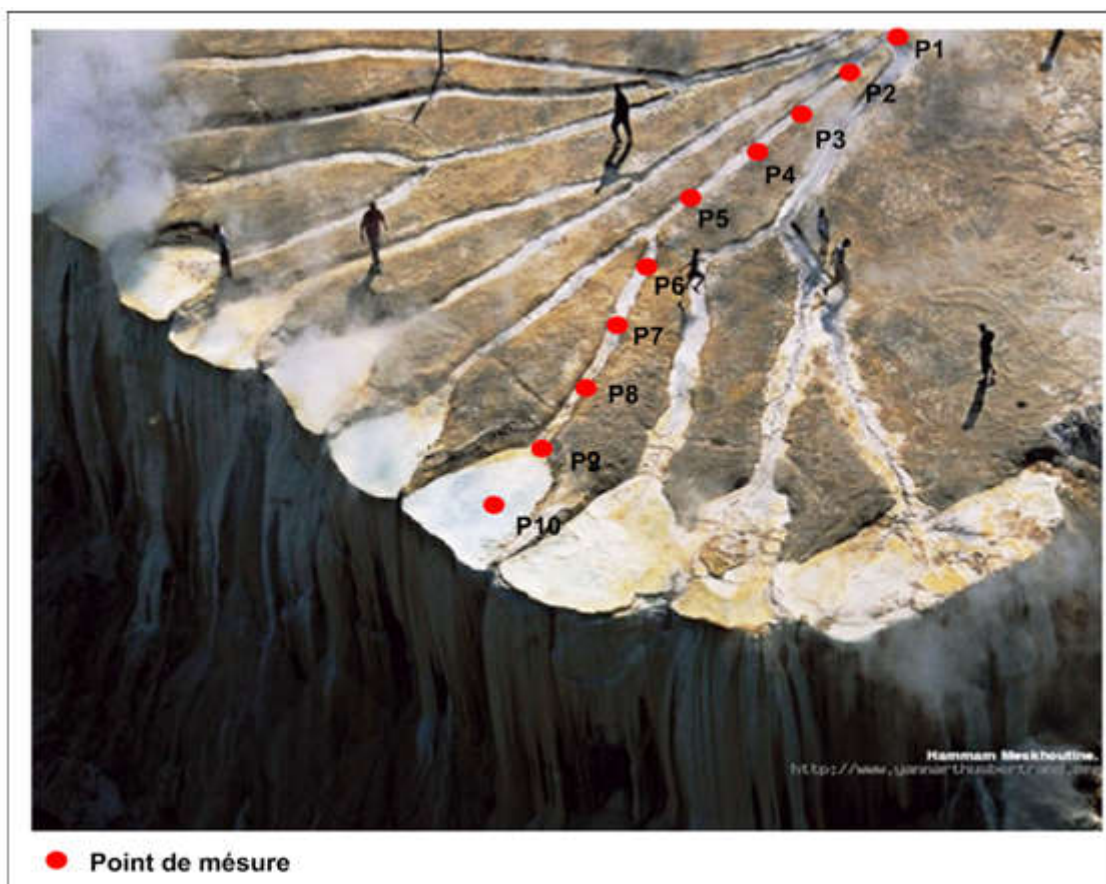


Figure 79: Points d'analyse

3. EVOLUTION DES PARAMETRES PHYSICO-CIMIQUES ANALYSES IN SITU

3.1. La température

Le graphe (Figure 80) montre que l'évolution de la température des eaux de la source thermo-minérale mesurée au niveau de 10 points, apparaissent des variations spatio-temporelles de ce facteur similaires pendant les deux périodes (février et juillet) où la plus forte valeur est enregistrée en P1, elle est de l'ordre de 94°C, et la valeur le plus faible au point P10 (42.5 °C).

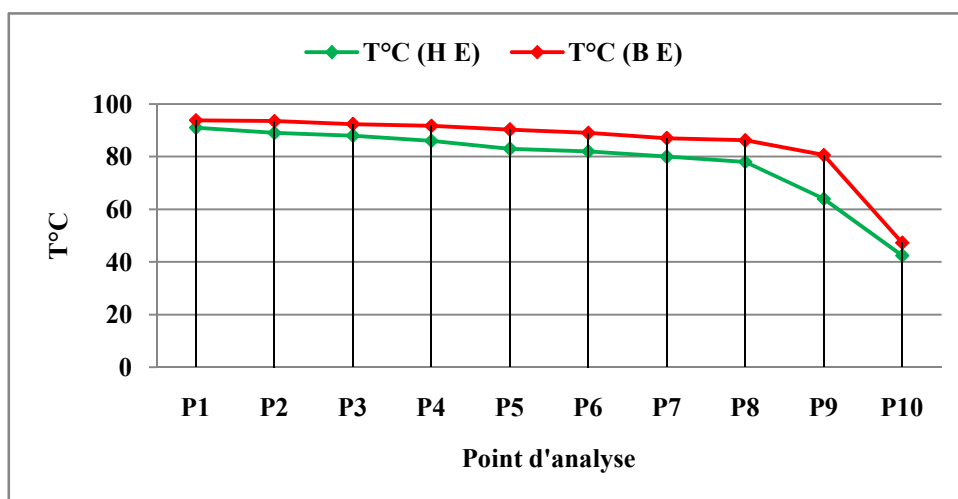


Figure 80: L'évolution de la température des eaux thermo-minérales de H Meskoutine

Ainsi que le suivi de la température d'amont (point d'émergence) en aval (point de précipitation) de la cascade sur une distance de 25 mètres montre une dégradation de la température qui se traduit par un coefficient de dégradation (Cd), qui varie entre 0 à 1.86 en période des basses eaux et comprise entre 0 à 1.94 pendant la période des hautes eaux (Figure 81). Le coefficient de dégradation est calculé par la formule suivante :

$$Cd = \frac{T_i - T_{(i+1)}}{D} \quad \text{Équation 12}$$

Ou Cd : coefficient de dégradation ;

D : distance entre les points d'analyse égale 2.5 m ;

T_i : la température ($i = 0$ à 10).

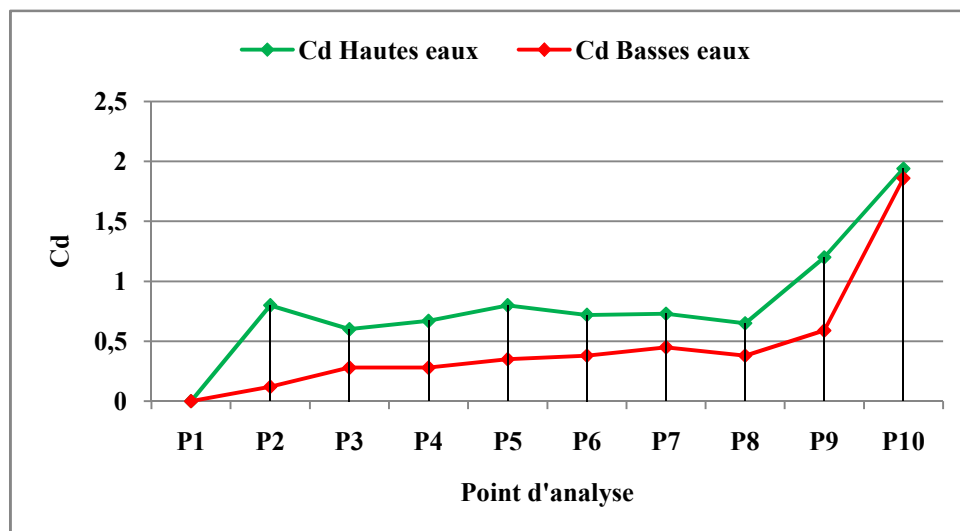


Figure 81: Le coefficient de dégradation de la température (hautes et basses eaux) des eaux thermo-minérales de H Meskoutine

3.2. Le pH

Le suivi et l'analyse de ce paramètre pendant les deux périodes d'étude montrent que les eaux thermo-minérales sont faiblement acides à légèrement alcalines (Figure 82). L'acidité des eaux enregistrées pendant le mois de février est certainement liée à l'action des pluies tandis que la légère alcalinité des eaux des sources enregistrées au mois de juillet au point P10 avec un pH de 8.4 peut être due au fait que ce point est situé sur un substrat contenant carbonate et bicarbonates, comme ceci a été démontré par l'étude géologique.

Selon les graphes ci-dessous on remarque que le pH augmente avec la diminution de la température.

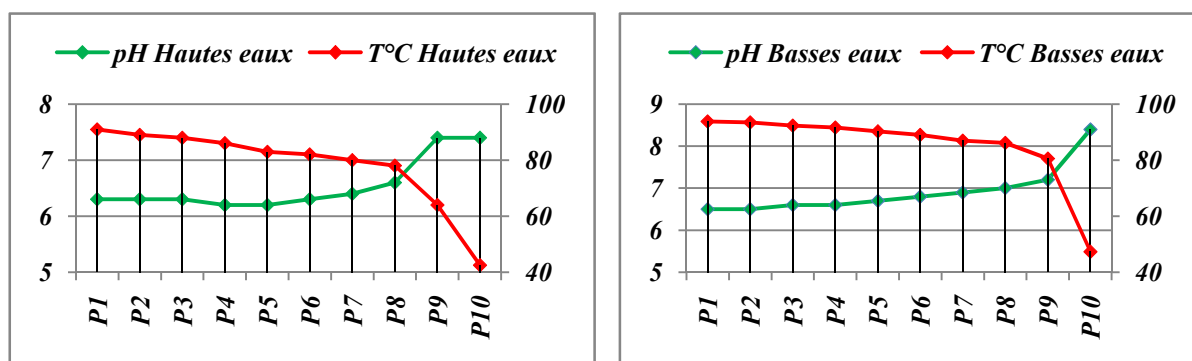


Figure 82: La variation spatiotemporelle du pH en fonction de la température des eaux thermo-minérales de H Meskoutine

3.3. La conductivité

Les valeurs de la conductivité électrique sont légèrement élevées au mois de juillet par rapport à celles qui enregistrées au mois de février, cette variation qui due à une concentration importante des sels à cause des fortes évaporations.

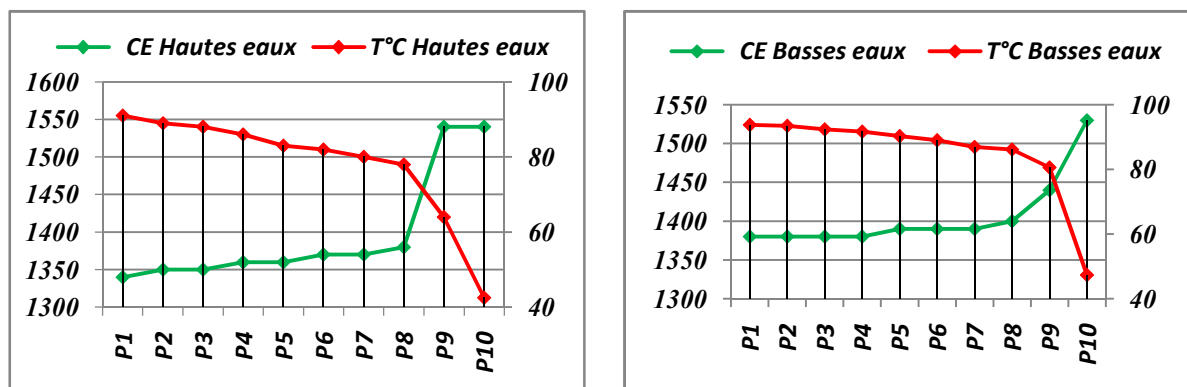


Figure 83: La variation spatiotemporelle de la conductivité en fonction de la température des eaux thermo-minérales de H Meskoutine

3.4. L'évolution du Cl, HCO₃, CaCO₃ et SO₂

Les graphes montrent que les concentrations des paramètres mesurés augmente dans le temps et d'un point à l'autre où les fortes valeurs sont enregistrées au P9 et P10. Toutefois la température des eaux de ces derniers points est presque la moitié qui elle enregistrée aux points qui situent en amont de la cascade.

La diminution de la température avec l'augmentation des concentrations des paramètres donne une intersection au P8 (Figure 84). Cette intersection constituée deux zones bien distinctes que l'on peut dire la première est une zone de dégazage et la deuxième zone de précipitation des sels minéraux.

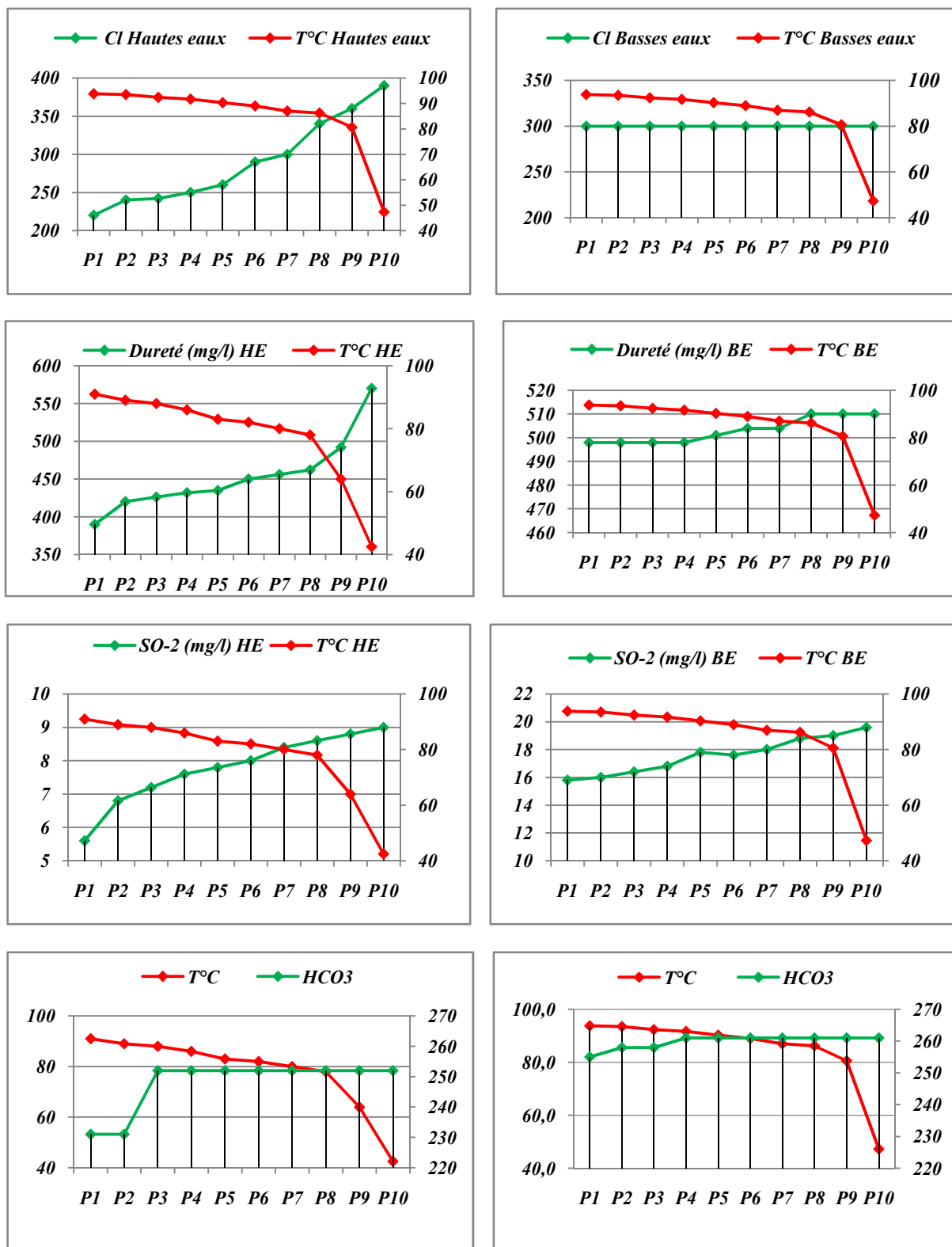


Figure 84: Variation spatiotemporelle de différents paramètres chimiques (Cl⁻; dureté; SO₄²⁻; HCO₃⁻) en fonction de la température (hautes et basses eaux) des eaux thermo-minérales de H-Meskoutine

Selon les résultats obtenues on peut dire que la pérennité d'écoulement des sources thermo-minérales est un facteur indispensable à la formation de la roche de la cascade de Hammam Meskoutine, ces eaux de sources est fortement minéralisée quand elles jaillissent à la surface, sa température avec le temps et la topographie du terrain est diminué, l'abaissement cette dernière est favorise la précipitation des minéraux et forme des sels minéraux telque les carbonates de calciums et de magnésiums.

VIII. CONCLUSION

Les édifices travertineux (travertins et dépôts associés) sont des indicateurs écologiques et géomorphologiques de révolution des milieux fluviatiles des régions karstiques. La précipitation du carbonate de calcium donne plusieurs formations carbonatées (les travertins de source et les travertins de la vallée ou de rivière). Parmi ces formations on peut citer la magnifique cascade, les connes stalagmiformes qui apparaissent dans notre zone d'étude. La dégradation de ces formations nuit à l'aspect physique des cascades (affaissement de la cascade de Hammam Meskoutine). De ce fait il a été question d'élaborer une étude sur l'affaissement de la cascade hydrothermale de Hammam Meskoutine. Pour cette raison l'étude bibliographique menée a été focalisée sur les essais de cisaillement rectiligne et le choix a été basé sur l'utilisation la plus large dans le domaine de la géotechnique. Donc les résultats obtenues des trois essais au niveau de la roche testé est caractérisée par un angle de frottement interne est légèrement élevé et un faible constante de cohésion qui permet de le classer comme un sol de faible résistance au cisaillement mais n'est pas tassant selon la norme de la résistance de cisaillement.

Selon les résultats obtenues on peut dire que la pérennité d'écoulement des sources thermo-minérales est un facteur indispensable à la formation de la roche de la cascade de Hammam Meskoutine, ces eaux sont fortement minéralisées quand elles jaillissent à la surface, sa température avec le temps et la topographie du terrain est diminué, l'abaissement cette dernière est favorise la précipitation des minéraux et forme des sels minéraux telque les carbonates de calciums et de magnésiums.

***PARTIE III: THERMALISME ET DEVELOPPEMENT
DURABLE***

***❖ CHAPITRE VIII: THERMALISME ET DEVELOPPEMENT
DURABLE***

CHAPITRE VIII. THERMALISME ET DEVELOPPEMENT DURABLE

I. INTRODUCTION

Le thermalisme est la science d'utilisation des eaux de sources chaudes minérales à des limites thérapeutiques ou de bien-être ou de remise en forme. Dans les temps anciens, la présence de sources chaudes ne trouvait que d'explications dans les impressions religieuses. Jusqu'au XIX^{ème} siècle, les textes ne traitent que des aspects descriptifs des eaux thermales et de leurs effets thérapeutiques (Baudry; 1736, Socquet; 1824, Durand-Fardel; 1857) commence à évoquer l'origine des eaux thermales comme "des volcans réduits à la partie aqueuse" ou encore des "émanations gazeuses, lesquelles arrivent à la surface condensées en eaux minérales et thermales". Le débat sur l'origine juvénile ou météorique des eaux thermales commence. Une eau de source est qualifiée de thermale lorsque sa température est supérieure de 5°C à la température moyenne annuelle de l'air ambiant (Bakalowicz et al., 1987). L'eau thermale représente donc une grande fraction des eaux contenues dans les roches puisque 50% de cette ressource se situe à plus de 800 mètres de profondeur (Castany; 1982). Cependant, seule une faible partie des eaux thermales rejoint la surface.

II. EVOLUTION DES THERMES ET DU THERMALISME DANS LE MONDE

Dès les premiers âges de l'humanité, les eaux chaudes ont été cherchées par l'être humain pour se soigner. Le thermalisme est une pratique au siècle des lumières, en tant que phénomène socio-économique.

1. CHEZ LES GRECS

De nombreux auteurs s'intéressent à la nature et aux caractères médicaux des eaux thermales, depuis 800 avant J.C.

- Hérodote : père du thermalisme a posé les origines de la crénothérapie (durée de la cure, choix de la saison, techniques des bains...).
- Aristote : a annoncé la vertu surnaturelle des vapeurs émanées des sources thermales vers 300 avant J.C.
- Galien (Grec venu d'Asie) : a annoncé sa croyance dans les eaux thermales et les bains de boue. Les sources thermales occupaient des zones fondamentaux dans les gymnases grecs, elles été utilisé pour se nettoyer, prendre du plaisir et se détendre avant et après l'exercice physique. (Kerourio; 2007, Janicot; 2009, Fansto; 2001, Moreno et al., 2001, Ibtisam; 2011)

2. CHEZ LES ROMAINS

Les thermes publics étaient considérés comme des lieux majeurs de la cité (depuis 200 avant J.C). Les romains ont construit de villas et de maisons thermales en Italie le climat est doux, ils s'ajoutaient les eaux thermales dont l'efficacité était désormais appréciée à l'enseigne de la science médicale. Les traitements utilisées sont diverses : immersions en piscines, bains individuels et applications locales. (Dominique et al.2009, Dupont et al. 2009, Ibtisam; 2011)

3. LES BAINS ISLAMIQUES

Dans la culture islamique, l'homme peut être revitalisé de diverses façons : par la purification de quelques organes du corps, par la prière, ou par les bains. Les hammams publics sont entretenus, C'est dans le bain « Hammam » que l'ablution est faite pour faire la prière, et les ont été conçus en adoptant l'exemple romain pendant le VIIIème siècle (Slimani; H). Par ailleurs, la civilisation arabo-musulmane a accordé une grande place aux sources thermales sous forme de hammams, souvent attribués aux marabouts des villages (Boulifa; 2015).

III. THERMALISME MODERNE

Du sixième au dix-huitième siècle, le thermalisme a vécu une période d'hibernation. Vers la fin du dix-huitième siècle, les constructions gagnent en surfaces et en complexité. Des surfaces thermales pour contribuer à la définition d'un nouveau modèle thermal citadin. Ce dernier a mis en place des approches médicales nouvelles du thermalisme liées à une grande variété de cures et de traitements. La partie médicale prend un grand essor dans ces stations et cela concerne aussi l'hydrothérapie et l'hygiène. Les villes thermales étaient utilisées comme structures médicales, elles sont développées en stations de luxe. Ainsi des changements des villes d'eau se substituent jusqu'à nos jours, avec des glissements lors des deux guerres mondiales. (Slimani; H)

IV. THERMALISME EN ALGERIE

L'Algérie est l'un des pays qui compte plus de 200 sources chaudes, qui sont les plus réputées sur le plan de la qualité et de la beauté. Dont la majorité est localisée au Nord-est algérien. Et sur les sites répertoriés, des établissements thermaux sont constitués au sens propre du terme, Il s'agit de :

- La station thermale de Hammam Essalihine de Khenchela qui dispose de plusieurs bassins d'eau chaude. Situé dans les montagnes des Aurès, c'est la plus belle source thermale d'Algérie et l'une des plus belles au monde.

- La station thermale de Hammam Meskoutine de Guelma dont l'arrivée en eau chaude se fait par le biais d'une cascade, le plus chaud d'Algérie et la deuxième source d'eau la plus chaude (97 °C) au monde après celles d'Islande.

- La station thermale de Hammam Guedjima à Gosbat, près de Batna, dispose de l'une des sources d'eau les plus chaudes d'Algérie avec une température de 40,8 °C. Il est visité par environ 150 personnes par jour, malgré le manque de publicité et de développement du site, par le simple bouche à oreille.

- La station thermale de Saïda jaillit à 63 °C.

- La station thermale de Hammam Ouled Ali situé à Guelma.

V. LES MODES DE FONCTIONNEMENT

Les eaux thermales sont habituellement alimentées par les eaux météoriques (Blavoux; 1995) et l'origine juvénile proposée par (Moret; 1946). Les sources thermales se distinguent en fonction de deux critères : le mode de réchauffement des eaux et le moteur de la remontée des eaux vers la surface.

Le fonctionnement de tous les systèmes thermaux est marqué par 3 étapes :

- l'infiltration des eaux météoriques vers la profondeur ;
- le réchauffement des eaux ;
- la remontée rapide à la surface.

VI. CLASSIFICATION DES EAUX THERMALES

Les sources thermales se classe en fonction de quatre critères (Moret; 1946): le type d'émergence, l'origine des eaux, la cause de la remontée et l'origine de la température (Tableau 49).

Tableau 49: Classification des eaux thermales (Moret; 1946)

type d'émergence	Origine des eaux	cause de la remontée	origine de la température
Diaclases	vadoses juvéniles mixtes	pression hydrostatique	Gradient géothermique Volcanisme Réactions physico-chimiques exothermiques
Failles		force expansive de la	
Filons		vapeur d'eau	
contact sédimentaire		gaz en suspension	
plissement		différence de densité	
griffon diffus		capillarité	

VII. TYPES DE SOURCES**1. SOURCE CHAUDE**

Une source chaude est une source dont l'eau qui sort du sol est chauffée par un processus géothermique (Figure 85 et 86). Il y a des sources chaudes sur tous les continents, ainsi qu'au fond des mers. On admet quelques définitions de la source chaude comme suit :

Toute source géothermique est une source dont la température est supérieure à la température de son environnement ; et aussi la température est supérieure à 36,7 °C.



Figure 85: Source chaude en Etats Unis



Figure 86: Source chaude en Algérie (cascade de Hammam Meskoutine)

2. SOURCE DE CHALEUR

En général, la température des roches de la croûte terrestre accroît en fonction de la profondeur. L'eau thermale qui provient d'une source chaude est échauffée par une chaudière géothermale (l'énergie thermique de la terre appelle donc gradient géothermique). Si l'eau enfonce en profondeur, réchauffer au contact des roches chaudes, c'est la chaleur des sources chaudes des régions non volcaniques. Dans la plupart des zones volcaniques, la température de sources chaudes est souvent proche de 100 °C.

3. LES GEYSERS

Un geyser est un type particulier de source d'eau chaude qui jaillit par intermittence (Figure 87, Figure 88) en projetant de l'eau à haute température et de la vapeur. Le geyser dit « gazeux ». Il s'agit généralement d'une source chaude qui, lorsque du gaz est expulsé, fait remonter les bulles d'eau qui explosent au contact de la surface et qui créent une large colonne d'eau, souvent de courte durée. Ces eaux chaudes naturelles ont des températures qui dépassent souvent 60 °C.



Figure 87: Geyser du château (Etats Unis)



Figure 88: Geysers d'Island

VIII. DEVELOPPEMENT DURABLE

1. GEOTHERMIE

La géothermie est un mot qui indique la science qui étudie les phénomènes thermiques internes du globe terrestre, et la technologie qui vise à l'exploiter, géo exprime (la terre) et thermos exprime (la chaleur). Elle aussi désigne l'énergie géothermique originaire de l'énergie de la terre qui est transformée en chaleur. Elle apparaît comme une partie non négligeable de l'avenir énergétique de la planète. L'exploitation de cette dernière consiste à injecter de l'eau dans un forage profond et à la récupérer chaude par un autre forage. L'implantation de telles infrastructures doit se faire dans les zones à fort gradient géothermique. (Bertani; 2005) prépare un bilan des ressources géothermiques mondiales. En 2003 Les Philippines produisent une capacité importante d'énergie géothermique avec 9253 GWh/an soit 19,1% de la production d'énergie nationale. L'énergie géothermique française est représentée généralement par la région géothermale de Bouillante en Guadeloupe (Traineau et al.; 1997), actuellement des études se pivotent vers des ressources des autres départements d'outre-mer (Genter et al.; 2004). Le site de Soultz-Sous-Forêts, en métropole, sert à développer l'exploitation de ce type d'énergie (Gérard et al.; 2006).

2. LA GEOTHERMIE DANS LE MONDE

Plusieurs sources d'énergies renouvelables confrontées à la géothermie (Tableau 50), la production électrique par la géothermie dans le monde est estimée à 42 053 GWh/an, elle se classe au premier rang avec 79,6 % pour une capacité installée de 7 049 MWe (Fekraoui et al.;

1999) en 1996. La puissance totale est estimée à près de 37.000 GWh/an pour une capacité placée de près de 10.000 GWh/an (Fekraoui; 1988). Le mode d'exploitation le plus répandu dans le monde, est l'utilisation directe de cette énergie, qui se répartit comme suit :

Chauffage des foyers: 33 %, Hydrothérapie: 19 %, Chauffage des serres: 14 %, Pompe à chaleur: 12 %, Aquaculture: 11 %, Industrie: 10 %.

Tableau 50: Production électrique par les énergies renouvelables (Fekraoui; 1999)

Source	Capacité placée		Production par an	
	MWe	%	GWh/an	%
Géothermie	7049	52,0	42053	79,6
Energie éolienne	6050	44,7	9933	18,6
Energie solaire	175	1,3	229	0,4
Energie des vagues	264	2,0	602	1,2

3. LA GEOTHERMIE EN ALGERIE

Les ressources géothermiques en Algérie sont de type bas enthalpie, et la majorité de ces ressources géothermiques sont situés dans le Nord- est du pays. Près de 200 sources ont été inventoriées, elles sont réparties à travers tout le territoire Nord Algérien, majoritaires au Nord-est (Ouali; 2005). Parmi les plus importantes, nous pouvons citer Hammam Meskoutine (98 °C) à Guelma, notre zone d'étude. Les éventualités d'utilisation de l'énergie géothermique sont multiples et variées. Elles vont des utilisations directes, telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie aux utilisations industrielles, telles que la production d'électricité. Actuellement, en Algérie, la balnéothérapie demeure pratiquement la seule utilisation directe de cette énergie. Des études en géothermie montrent que le Nord de l'Algérie (Figure 89) compte un nombre important de sources thermales (Kedaidet al.; 1988 ; Rezig; 1991; Rezig; 1992).

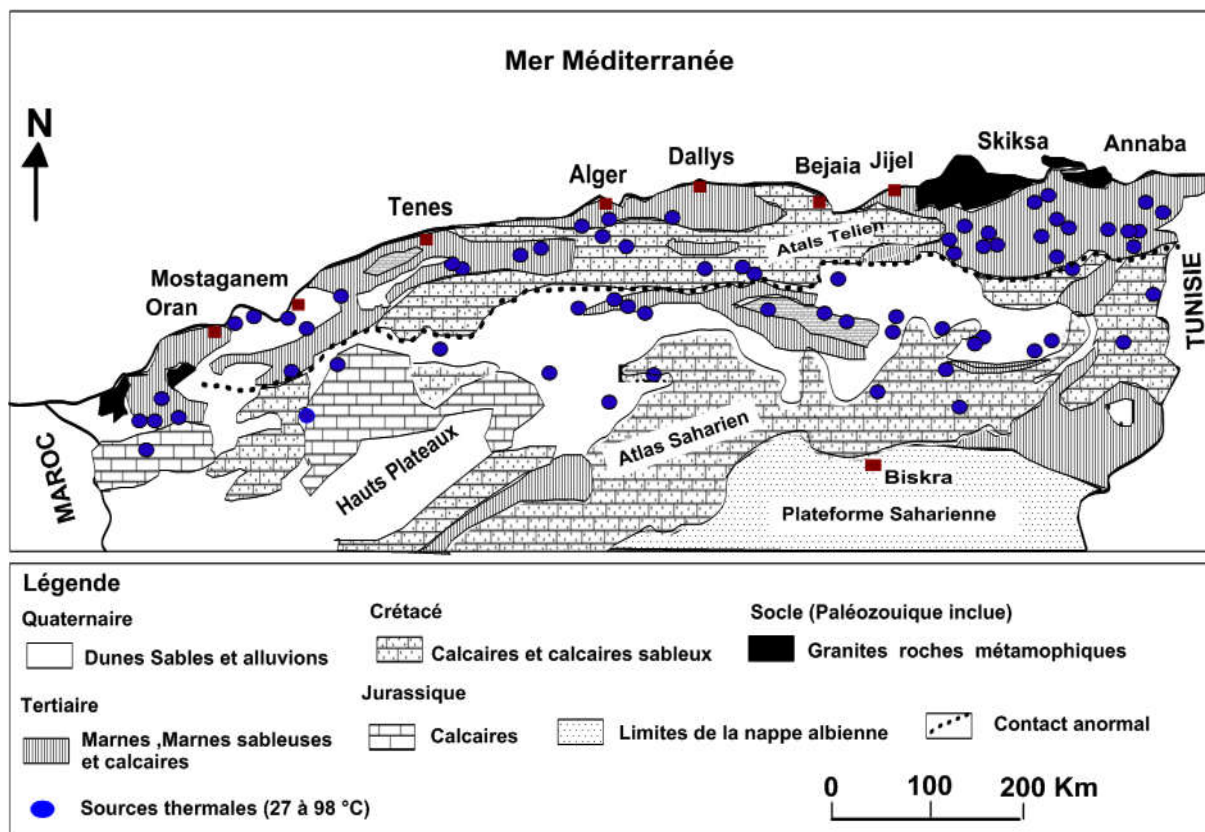


Figure 89: Carte géologique du Nord de l'Algérie, Source : (Fekraoui et al.; 1995)

4. LES DIFFERENTS TYPES DE LA GEOTHERMIE

On différencie généralement trois types de géothermie :

- la géothermie peu profonde (moins de 1500 m) à basse température ;
- la géothermie profonde à haute température (plus de 150 °C) ;
- la géothermie très profonde à très haute température.

5. DOMAINES D'APPLICATIONS DE LA GEOTHERMIE

Dès 1973, Lindal avait synthétisé dans un tableau les applications possibles de la géothermie.

Tableau 51: Les différentes applications de la géothermie (Diagramme de Lindal)

Température (°C)	Domaine d'utilisation	
200 et plus		
190	Réfrigération par absorption	Production d'électricité
180	Préparation de pâte à papier	
170	Fabrication d'eau lourde	

160	Séchage de poisson, séchage de bois	par méthode
150	Fabrication d'alumine	conventionnelle
140	Séchage de produits agricoles	Production d'électricité par cycle binaire
130	Evaporation	
120	Production d'eau douce par distillation	
110	Séchage de parpaings de ciment	
100	Séchage de légumes	
90	Déshydratation	
80	Chauffage urbain - chauffage de serres	
70	Réfrigération	
60	Elevage d'animaux	
50	Balnéothérapie	
40	Chauffage de sols	
30	Piscine, fermentation	
20	Pisciculture	

6. AVANTAGES ET INCONVENIENTS DE LA GEOTHERMIE

6.1. Avantages

- La géothermie est une ressource inépuisable, tant que la quantité d'énergie captée n'est pas supérieure à la chaleur provenant du centre de la terre.
- Elle ne produit aucun déchet.
- Est une source d'énergie indigène et respectueuse de l'environnement. Elle n'engendre aucune pollution, aucune dioxyde de carbone dans l'atmosphère, et remplace les énergies fossiles comme le pétrole ou le gaz, ainsi de manière idéale.
- Disponibilité permanente, ne dépend pas des conditions climatiques, des saisons ou des heures de la journée.
- Elle fait partie des énergies renouvelables inépuisables, donc durables.
- Elle est exploitable partout et dans tous les types de sous-sol.

- Les coûts d'exploitation sont faibles. Les frais reliés à la marche d'une pompe à chaleur géothermique sont faibles.
- L'installation demande peu ou pas d'entretien. Un contrôle de la bonne marche de l'installation est toutefois souhaitable au minimum tous les deux ans.

6.2. Inconvénients

Il faut nettoyer les systèmes qui sont caractérisés originellement par l'existence de saumure naturelle remontée à partir des cassures du granit. Trois problèmes principaux se posent :

- Afin d'accroître ou maintenir les performances hydrauliques des puits, et après forage, des injections nécessaires d'eaux ou excitations hydrauliques qui sont faites uniquement par fracturation hydraulique, pour rouvrir périodiquement ces fractures préexistantes qui tendent à se refermer ou se colmater.
- Dans la roche chaude et fracturée le fluide qui circule est toujours salé, corrosif et chargé de atomes probablement corrodantes, radioactives ou susceptibles de participer à l'encroûtement par précipitation de sels minéraux (entartrage) qui peut perturber ou bloquer la fermeture de vannes. La précipitation est limitée en surface par le maintien d'une forte pression dans les tuyauteries (20 bars), qui rend l'installation plus dangereuse en cas de fuite.
- En cas de problèmes de chocs thermiques, la chaleur est une source de dilatation thermique, qui peut endommager certaines parties vulnérables des installations.

7. EXEMPLE D'EXPLOITATION DES EAUX CHAUDES DANS LE CHAUFFAGE DES LOCAUX

7.1. Introduction

L'énergie sous toutes ses formes reste un des paramètres les plus prépondérants dans le développement et la croissance économique d'un pays. Elle peut constituer sous certaines conditions, la solution de substitution aux énergies dites conventionnelles. Le choix du site de Hammam Chellala (Guelma), et basé sur :

Eaux thermales sont très chaudes (environs 98 °C) ;

Très basse température en hiver (environ 2 °C), d'où l'importance du chauffage ;

La situation géographique ;

Et l'existence d'un complexe thermique avec son centre de soins et autres bungalows (Semmar; 2002).

7.2. Chauffage des Bungalows du complexe Hammam Chellala

La partie expérimentale consiste à immerger les échangeurs dans un bassin d'eau chaude bien isolé. Donc la chaleur sera transmise du fluide chaud au fluide qui circule à l'intérieur des

échangeurs (Figure 90). Ce fluide chauffé sera pompé pour alimenter les radiateurs à l'intérieur des bungalows. La chaleur sera transmise du radiateur à l'air intérieur par convection (Semmar; 2002).

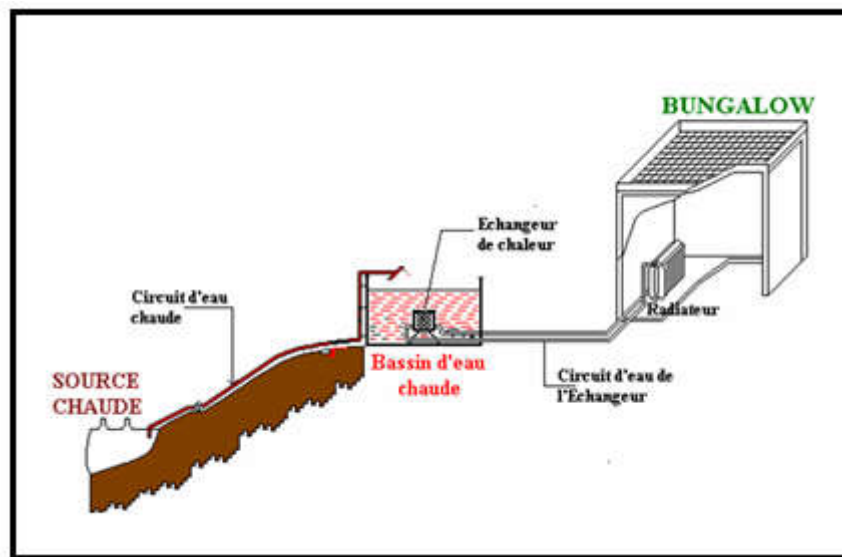


Figure 90: Schéma de la partie expérimentale (Semmar; 2002)

8. HYDROTHERAPIE

Une cure thermale utilise de l'eau minérale découlant d'une résurgence pure, elle est difficile de soigner, alléger certains problèmes de santé. Cette cure est réalisée dans une station thermale qui comprend des soins à base d'eau thermale, de gaz thermal, des boues thermales et se développe sur trois semaines par un médecin (généraliste ou spécialiste).

Beaucoup des traitements sont appliqués à plusieurs affections et problèmes pathologiques, et ce, suivant les sources d'eau. Les cures thermales sont souvent recommandées aux personnes souffrant de rhumatismes, et de maladies de l'appareil locomoteur, de maladies de peau (eczéma, psoriasis,...), d'affections cardio-vasculaires, dans le sevrage tabagique, les perturbations endocriniennes, le surpoids, ou les maladies respiratoires d'origine allergique. Le thermalisme offre des soins nombreux en fonction des affections : bains en baignoire ou en piscines, douches stimulantes ou émollientes, aérosols, douches pharyngées, inhalations de vapeurs thermales, cataplasmes de boues. La cure en elle-même peut s'associer à des activités de remise en forme telles que massages, relaxations, gymnastique.

8.1. Les pathologies traitées par l'eau thermale

Les traitements thermaux sont exhibés pour des maladies chroniques, suivie par un traitement classique ou une protection d'obstacles de certaines maladies. Une thérapeutique peut être effectuée pour compléter des traitements classiques ou peut être prescrite en première

intention pour le traitement de maladies chroniques ou de séquelles cicatricielles, dans certains cas. Plusieurs pathologies sont recommandées par la médecine thermale:

- Affections des muqueuses bucco-linguales ;
- Troubles du développement de l'enfant : (énurésie) ;
- Maladies cardiovasculaires ;
- Maladies digestives et troubles du métabolisme ;
- Gynécologie ;
- Dermatologie ;
- Phlébologie ;
- Voies respiratoires et ORL ;
- Rhumatologie, séquelle de traumatisme ostéo-articulaires / neurologie ;
- Affections urinaires ;
- Affections psychosomatiques.

8.2. Dimension sociale du thermalisme

La dimension sociale du thermalisme est incontestable. Elle peut s'appréhender à travers une analyse du curiste, de la cure thermale, de la station thermale (Roques; 2003).

8.2.1. Le curiste

Est un élément de personnage singulier qui accepte le voyage, à des époques, ou dans des conditions particulières, qui en font une allure volontariste. L'excellence sanitaire est attestée par la vision critique portée sur le déroulement des soins et des perspectives vis à vis du corps médical thermal. L'excellence sociétale est encore bien recherchée par l'agent huppé que par des personnes plus réservés, chacun se constituant une société conforme à ses goûts et qu'il cherche bien souvent à prolonger d'une cure sur l'autre (Roques; 2003).

8.2.2. La cure thermale

Est un traitement singulière, géré le plus communément de façon individuelle mais dans un cadre collectif à l'établissement thermal. Les soins se déroulent selon une planification rigoureuse nécessaire à l'exploitation de l'établissement comme à la satisfaction du curiste. La cure constitue un regroupement de patients messagers de problèmes de santé semblables dans un espace limité et cela pendant une période de 2 à 3 semaines admettant des changes et des reflets sur les problèmes de santé (Roques; 2003).

8.2.3. La station thermale

Son établissement est obéissant aux lois de la nature, en l'occurrence de la géologie. Si certaines ressources se sont trouvées sur de grandes voies de communications et se sont engagées depuis l'antiquité dans un textile citadin qui a persisté. On voit donc que la dimension sociale, individuelle et collective, et dans ce cas sociétale comme économique est incontestable d'une part, forte d'autre part. Le thermalisme a donc une dimension sociale (Roques; 2003).

8.2.4. Tourisme thermal

Nous savons que le concept « Tourisme » signifie le fait de voyager, ou de parcourir pour son plaisir, ce qui peut impliquer la consommation d'une nuitée auprès d'un hôtel, la distraction dans des foires, des salles de jeux, ...etc. Et quand on se déplace pour exploiter les eaux de sources minérales on est obligé de prendre un repas ou passer la nuit dans un hôtel ou dans une auberge. Ce déplacement peut être qualifié soit d'infligé soit libre (Slimani; H).

Déplacement infligé, la personne est obligée de se déplacer pour exploiter et utiliser les eaux d'une source thermale, pour se faire guérir d'une maladie ou d'une souffrance. Car, elle a entendu parler des bienfaits des eaux de telle ou telle source, sur la santé du patient. On parle, alors, du tourisme thermal de santé (Slimani; H).

Déplacement libre est un déplacement non cadré, la personne se déplace pour chercher le plaisir pendant ses vacances, dans des sites thermaux et bénéficier de ses eaux minérales. Ce déplacement est appelé tourisme thermal de bien-être. Ainsi, pour tirer davantage profit de la présence des (Visiteurs-Touristes) et exploiter de plus en plus la source minérale, les responsables œuvrent pour installer ou faire installer les équipements nécessaires et diversifier les offres touristiques : réseau routier, cafés, restaurants, hôtels, ...etc. (Slimani; H).

9. L'EVOLUTION DES TOURISTES ET CURISTES DANS LA REGION D'ETUDE

Pour repérer ce développement, on s'appuiera sur le nombre de visiteurs en générale qui ont fréquenté les stations thermales dans la région d'étude durant l'année 2015.

9.1. À Hammam Meskoutine

Le graphique ci-dessous (Figure 91) a révélé qu'en dépit de la supériorité de l'augmentation du nombre de touristes par rapport à celui des curistes, le premier est atteint son maximum le mois d'avril et un minimum au mois de juillet. Pour les curistes le taux de fréquentation atteint un maximum au mois de mai, et un minimum au mois de juillet.

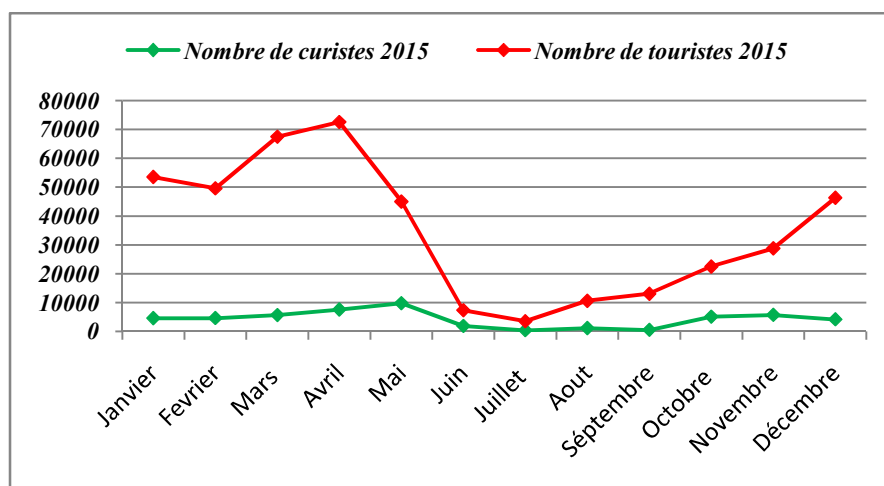


Figure 91: Evolution de curistes et touristes dans le site thermal de Hammam Meskoutine

9.2. À Hammam Ouled Ali

Dans le site de Hammam Ouled Ali (Figure 92) on remarque que, le taux de fréquentation des touristes atteint un maximum au mois de mars et un minimum au mois de juillet. Pour les curistes le taux augmente au mois de janvier et diminue au mois de juillet.

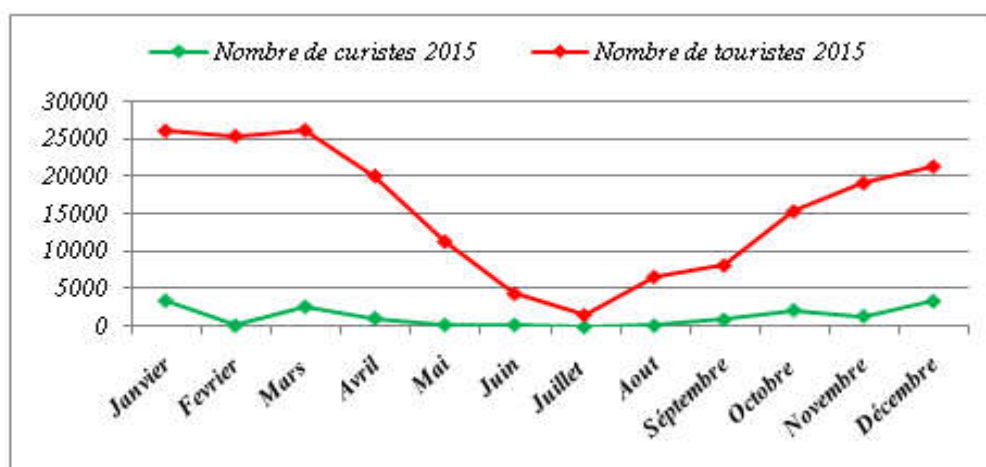


Figure 92: Evolution de curistes et touristes dans le site thermal de Hammam Ouled Ali

10. PARTICIPATION DES STATIONS THERMALES AU DEVELOPPEMENT DURABLE

Dans la mesure où les deux sites thermaux accueillent plus d'un million de visiteurs par an, ils créent une dynamique sur différents plans.

10.1. Sur le plan économique

Les budgets qui abritent les deux sites thermaux de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali sont constitués à des recettes de l'exploitation des eaux thermo-minérales. Cette

exploitation recouvre le loyer des sources et des locaux qui sont mis à la disposition des activités et des marchands parallèles. Des nombreux de locaux destinés pour l'offre touristique dans les deux sites thermaux (bungalows, chambres d'hôtel,..).

Des activités commerciales, artisanales et de services se sont développées, dans ce sens, comme emplois induits des stations thermales : bazars, cafés populaires, petits restaurants, marchands de légumes, boucheries, kiosques pour repas rapides, vendeurs de bouteilles en plastiques, boutiques, locaux d'articles artisanaux, parkings, transport traditionnel, ... etc.

Le visiteur d'une des deux sites, prend au moins un café, et bois de l'eau, c'est-à-dire, dépenser quelques DA. La majorité des visiteurs viennent du loin. Et quand on passe la nuit sur les lieux, on est forcé de prendre une douche ou un bain, prendre des repas, acheter des trucs artisanaux, utiliser les parkings. Et quand le visiteur-touriste vient pour séjourner pendant les vacances, la facture augmente.

10.2. Sur le plan social

Les sites thermaux de la région d'étude contribuent corrélativement à la diminution du chômage de la population. Cette diminution se fait, soit de manière directe, soit de manière indirecte, ou encore de façon induite.

- Au niveau indirect, les activités créées sur les sources thermales sont des emplois créés par les fournisseurs, les secteurs de l'esthétique et de l'alimentaire. Les deux ont des emplois indirects chez les compagnies de transport qui sont en place.

- Les emplois induits sont les activités qui se développent en parallèle avec le thermalisme.

- Pour les emplois directs, ce sont toutes les personnes actives employées par les sociétés qui exploitent les sources thermales ou par les hôtels qui reçoivent les visiteurs. Ces sont octroyés aux jeunes des douars et du village avoisinant. Ce qui garantira, relativement un niveau de vie social acceptable.

10.3. Sur le plan de santé et bien-être

Les eaux thermo-minérales des sites thermaux admettent particulièrement, suivant une conversation conduit par notre application avec le médecin de l'établissement, la guérison des maladies chroniques liées à l'appareil respiratoire, et secondairement, les pathologies dermiques (psoriasis) et gynécologiques (douleurs chroniques pulviennes). Le thermalisme permet et participe à la santé de l'être humain à travers l'emploi des modes, eaux minérales, vapeur d'eau, et en utilisant des techniques et des méthodes efficaces.

Pour les visiteurs-touristes, qui viennent voir le site, pour s'amuser et prendre de l'air pur qui caractérise les reliefs du lieu, permettent ses bienfaits, et ne reviennent que pendant les vacances de printemps ou d'été.

11. IMPACT DES EFFETS NEGATIFS SUR LE THERMALISME DANS LA ZONE D'ETUDE

La politique des cures thermales œuvre pour un déplacement saisonnier des populations qui coïncide, habituellement, avec la saison touristique (vacances scolaires, congrès,...) doit prévoir, à côté de l'établissement thermal, des équipements pour hébergement, distraction, relaxation,

Par ce geste, toutes les secteurs devraient coordonner leurs activités sous le patronage et la protection réglementaire des pouvoirs publics, pour exploiter de manière durable la source thermique. Cependant des effets négatifs sont influencés sur le thermalisme en générale (l'écologie, influence socio-économique et l'impact du cout de vie).

- Des déchets qui sont parfois allégées par les visiteurs et les résidents dans les rues font perdre graduellement la beauté de l'endroit et sa spiritualité.

Malheureusement, trois effets négatifs ont été avancés par la population enquêtée des autochtones et des visiteurs :

- des maisons ont été préparées principalement pour l'hébergement des visiteurs, mais avec des prix très élevés.

- des mauvaises pratiques d'harcèlement qui exercent par les autochtones, activités commerciales et de services, parallèles au thermalisme. Cet effet diminue le nombre de visiteurs, est due principalement à le harcèlement de genre : location de place, repas à des prix trop chers,..... Et le visiteur déplore ce type de pratiques qui sont hors de nos valeurs.

- Le troisième est lié à la destruction graduelle du patrimoine culturel et des croyances relatives à la spiritualité des sites thermaux.

La majorité des personnes enquêtées (autochtones) déplore l'augmentation du coût de la vie. En effet, comparativement au niveau des prix en vigueur dans le reste du pays, les prix des produits alimentaires, notamment les légumes et fruits, la viande durant la haute saison, été et vacances de printemps connaissent une augmentation courante qui peut atteindre 100%.

IX. CONCLUSION

Le thermalisme est une pratique au siècle des lumières, en tant que phénomène socio-économique, dès les premiers âges de l'humanité. Les sources thermales se classe en fonction

de quatre critères : le type d'émergence, l'origine des eaux, la cause de la remontée et l'origine de la température. La cure thermique a un aspect préventif, elle prend la forme d'une éducation thérapeutique. La formation doit aussi permettre au malade de mieux collaborer avec les soignants. Cela comprend des activités désensibilisation, d'information, d'apprentissage et d'accompagnement concernant la maladie et le traitement.

L'efficacité thérapeutique des cures thermales et de la balnéothérapie en général fait l'objet d'un débat scientifique. Les éventualités d'utilisation de l'énergie géothermique sont multiples et variées. Elles vont des utilisations directes, telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie aux utilisations industrielles, telles que la production d'électricité. En Algérie, la balnéothérapie demeure pratiquement la seule utilisation directe de cette énergie. Le développement durable est généralement compris comme la prise en compte assimilée de trois nécessités: le développement économique, la viabilité environnementale et l'équité sociale.

Les statistiques de différentes stations thermales de la zone d'étude montrent que le taux de fréquentation atteint son maximum au mois d'avril dans la majorité des stations thermales et atteint son minimum au mois de juillet.

CONCLUSION GENERALE

Le présent travail est consacré à l'étude des sources thermales dans la région de Guelma (cas de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali) pour attribuer une origine géologique aux eaux de ces sources.

La zone d'étude fait partie de La chaîne alpine d'Afrique du Nord ou chaîne des Maghrébines qui y fait partie eux même de l'orogénèse alpin périméditerranéen, d'âge tertiaire. Elle correspond à une dépression à valeur de bassin allongé d'Est en Ouest dans laquelle se sont accumulés des dépôts du néogène et du quaternaire. Ce bassin est adossé au Nord comme au Sud à des reliefs appartenant pour l'essentiel au domaine tellien constitué de marnes et de carbonates d'âge méso- cénozoïque et dont la sédimentation, de mer ouverte, s'est effectuée en domaine pélagique (unités telliennes). Le néritique constantinois qui présente la terminaison orientale du domaine, apparait à la faveur de fenêtres, à Djebel Debagh, à l'Est de Hammam Ouled Ali, à Héliopolis et à Nador. De l'Ouest à l'Est ces formations carbonatées constituent le substratum des nappes telliennes de Guelma.

La géologie du Djebel Débagh, permet de dégager plusieurs problèmes, la résolution de ces problèmes permettre de mieux comprendre l'évolution sédimentaire et structurale de cette partie qui appartenant au domaine néritique constantinois dans la région de Guelma. L'analyse lithologique montre que les formations sont surmontées par les unités allochtones, qui présentent une certaine monotonie (calcaire, calcaire dolomitique, et marnes argileuses).

La litho-stratigraphie et le cadre structural auront un rôle essentiel au niveau de la localisation des points d'émergences en raison de l'intervention des diverses formations sous formes d'écran conduisant les eaux vers la surface.

De point de vue hydrogéologique deux grands ensembles aquifères dont l'intérêt hydrogéologique diffèrent d'un ensemble à l'autre. L'ensemble aquifère de la vallée des oueds qui comprennent des nappes parfois libre et dans un endroit captive formées essentiellement par des formations Plio-quaternaires (les nappes alluvionnaires). La nappe des travertins très intéressante, formée par des calcaires. Donc l'analyse des données hydrogéologiques confirment non seulement le schéma hydrogéologique conceptuel généralement admis pour cette région mais apporte aux nouveaux résultats entre autre :

- La définition et la caractérisation des principaux axes d'écoulements souterrains.
- L'alimentation des nappes superficielles est sue essentiellement aux calcaires fissurés.

CONCLUSION GENERALE

Cette étude montre que les régions de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali sont soumises à un climat méditerranéen caractérisé par une saison humide s'étale depuis le mois d'octobre jusqu'à mai et la saison sèche s'étend sur le restant de l'année.

La pluviométrie moyenne sur une période de 24 ans au niveau des deux stations climatiques prises en compte est de 582.49 (mm). Une grande partie de ces pluies participent au phénomène de l'évapotranspiration soit une lame d'eau de 410 (mm).

L'infiltration est de l'ordre de 111.53 mm, soit 19 % des précipitations qui pourront jouer un rôle important dans la recharge des nappes d'eau souterraines. La température moyenne annuelle varie entre 19.1° et 19.34 °C.

Le chimisme des eaux de sources thermo-minérales de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali est influencé par la nature lithologique de l'aquifère (roche réservoir) et, lié au lessivage des formations rencontrées, leurs affectant un faciès dominant bicarbonaté magnésien et sulfaté magnésien pour les eaux de sources Hammam Meskoutine, ainsi que le faciès sulfaté calcique caractérise les eaux de Hammam Ouled Ali.

Les paramètres physico-chimiques des eaux de sources donnent un aperçu sur les eaux profondes qui sont d'une nature saline fortement minéralisées.

Les eaux des sources sont sursaturées par rapport aux minéraux évaporitiques (Halite, Sylvite, gypse et Anhydrite), qui entraînent un enrichissement des eaux de sources en sodium et en chlorures pour les deux sites et le long de la période d'échantillonnage.

Les eaux sont en sursaturation vis à vis des minéraux carbonatés, favorisant ainsi une sédimentation surtout sous la forme de dolomie dans Hammam Meskoutine, Au niveau de Hammam Ouled Ali, en période des hautes eaux, les eaux de la majorité de sources, sont sursaturées et tendent à se précipiter sous forme d'aragonite, de calcite et de dolomie. Néanmoins au niveau de sources (S5, S6 et S8) les eaux sont sous saturées ce qui provoque la dissolution en entraînant un enrichissement des eaux en calciums, magnésiums.

En période des basses eaux, les sources S1, S2, S5, S6, S7, S8 sont sous saturées, et le reste des sources sont sur saturées.

La reconstitution des sels dissous montre une prédominance des bicarbonates de calcium et de magnésium dans les sources de Hammam Ouled Ali et bicarbonates de calcium au niveau de Hammam Meskoutine.

Pour l'irrigation nous avons évalué la qualité des eaux thermo-minérales dans la région de Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali (Guelma).

CONCLUSION GENERALE

L'analyse de tous les paramètres caractérisant la salinité, pendant toute la période d'observation, a permis d'évaluer la qualité de ces eaux par des méthodes classiques. Cette évaluation a révélé que les eaux sont d'une salinité forte, notamment au niveau de la majorité des sources de Hammam Meskoutine. Néanmoins, les eaux prendraient une qualité admissible dans la région de Hammam Ouled Ali. D'où la possibilité de leur utilisation pour l'irrigation ;

➤ Selon le risque de magnésium, dans la région de Hammam Ouled Ali, les valeurs sont inférieures à 50%, suggérant leur adéquation, alors qu'au niveau de sources de Hammam Meskoutine les valeurs tombent dans catégorie inadéquate avec Mg supérieure à 50%, indiquant leur effet néfaste sur le rendement des cultures ;

➤ Selon la valeur moyenne du SAR qui reste faible, les eaux de sources des deux sites d'étude présentent un faible danger d'alcalinisation, cette hypothèse c'est confirmée par le RSC, dont la valeur est inférieure à zéro ($RSC < 0$ méq/l), et pourraient être utilisées en irrigation sur tout type de sol ;

➤ La classification des eaux thermo-minérales, selon Richards a montré une distribution semblable des classes d'aptitude à l'irrigation dans le temps (au cours de la période de prélèvements) et dans l'espace (Hammam Meskoutine et Hammam Ouled Ali). En effet ces eaux de sources thermo-minérales peuvent être utilisées pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, à condition que ces sols soient bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée.

Les édifices travertineux (travertins et dépôts associés) sont des indicateurs écologiques et géomorphologiques de révolution des milieux fluviaux des régions karstiques. La précipitation du carbonate de calcium donne plusieurs formations carbonatées (les travertins de source et les travertins de la vallée ou de rivière). Parmi ces formations on peut citer la magnifique cascade, les connes stalagmiformes qui apparaissent dans notre zone d'étude. La dégradation de ces formations nuit à l'aspect physique des cascades (affaissement de la cascade de Hammam Meskoutine). De ce fait il a été question d'élaborer une étude sur l'affaissement de la cascade hydrothermale de Hammam Meskoutine. Pour cette raison l'étude bibliographique menée a été focalisée sur les essais de cisaillement rectiligne et le choix a été basé sur l'utilisation la plus large dans le domaine de la géotechnique. Donc les résultats obtenus des trois essais au niveau de la roche testé est caractérisée par un angle de frottement interne est légèrement élevé et un faible constante de cohésion qui permet de le classer comme un sol de faible résistance au cisaillement mais n'est pas tassant selon la norme de la résistance de cisaillement.

CONCLUSION GENERALE

Selon les résultats obtenues on peut dire que la pérennité d'écoulement des sources thermo-minérales est un facteur indispensable à la formation de la roche de la cascade de Hammam Meskoutine, ces eaux sont fortement minéralisées quand elles jaillissent à la surface, sa température avec le temps et la topographie du terrain est diminuée, l'abaissement cette dernière est favorise la précipitation des minéraux et forme des sels minéraux telque les carbonates de calciums et de magnésiums.

Le thermalisme est une pratique au siècle des lumières, en tant que phénomène socio-économique, dès les premiers âges de l'humanité. Les sources thermales se classe en fonction de quatre critères : le type d'émergence, l'origine des eaux, la cause de la remontée et l'origine de la température. La cure thermale a un aspect préventif, elle prend la forme d'une éducation thérapeutique. La formation doit aussi permettre au malade de mieux collaborer avec les soignants. Cela comprend des activités désensibilisation, d'information, d'apprentissage et d'accompagnement concernant la maladie et le traitement.

L'efficacité thérapeutique des cures thermales et de la balnéothérapie en général fait l'objet d'un débat scientifique. Les éventualités d'utilisation de l'énergie géothermique sont multiples et variées. Elles vont des utilisations directes, telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie aux utilisations industrielles, telles que la production d'électricité. En Algérie, la balnéothérapie demeure pratiquement la seule utilisation directe de cette énergie. Le développement durable est généralement compris comme la prise en compte assimilée de trois nécessités: le développement économique, la viabilité environnementale et l'équité sociale.

Les statistiques de différentes stations thermales de la zone d'étude montrent que le taux de fréquentation atteint son maximum au mois d'avril dans la majorité des stations thermales et atteint son minimum au mois de juillet.

Recommandations

Le thermalisme représente un investissement important dans la zone d'étude, ce domaine devrait être porté par une politique contenant les facteurs suivants :

- Aménager et préserver les sources thermo-minérales non exploitées (abandonnées) ;
- Gestion optimale et durable des sources thermo-minérales ;
- Développer les domaines d'utilisation des eaux thermo-minérales exemple: chauffage du serre, pisciculture, production d'électricité ;

CONCLUSION GENERALE

- Orientation des autorités vers l'investissement à vocation thermique (construction des complexes touristiques selon les normes internationales) ;
- Ouverture des accès vers les sites thermaux et réalisations des parkings pour éviter la circulation.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

1. Alayat, H., & Lamouroux, C. (2007). Caractérisation physico-chimique des eaux thermo-minérales des monts de la Cheffia (extrême Nord-Est algérien). *La presse thermal et climatique*, 144, 191-199.
2. Allison, I. N. S. A. Lyon, SOGREA. (2005). Consultants, www.canoe-hydro.Com ; Manuel d'utilisation de Canoe.
3. Assassi, I. b. e. f. la plate-forme carbonates apto-cénomaniennes de djebel Debagh central, constantinois oriental (nord-est algérien): interprétation paléo environnementale. *Géologie fondamentale*, 103.
4. Ayers, R.S.; Westcot, D.W. (1985). Water quality for agriculture. FAO Irrigation and Drainage paper 29, Rev 1. FAO, Rome, p 174.
5. Arnórsson, S. (2000, May). The quartz and Na/K geothermometers. I. New thermodynamic calibration. In *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000, Kyushu-Tohoku, Japan* (pp. 929-934).
6. Barth, TET (2007). Quartzite. Dans: McGraw Hill Encyclopedia of Science & Technology, 10e édition. McGraw-Hill. Volume 14. 722.
7. Baudry... (1736). *Traité des eaux minérales de Bourbonne-les-Bains: contenant une explication metod. Sur tous leurs usages.* Sirot.
8. Bakalowicz, M., & Jusserand, C. (1987). Etude de l'infiltration en milieu karstique par les méthodes géochimiques et isotopiques. Cas de la Grotte de Niaux (Ariège, France). *Bulletin Centre d'Hydrogéologie*, Bulletin Centre d'Hydrogéologie, Univ. Neuchâtel, 7, 265-83.
9. Benamara A., Kherici-Bousnoubra H., Bouabdallah F. (2017). Thermo-mineral waters of Hammam Meskoutine (North-east Algeria): Composition and origin of mineralization. *Journal of Water and Land Development*. No. 34 p. 47–57. DOI: 10.1515/jwld-2017-0037.
10. Benmarce, K. 2007. Caractéristiques physico-chimiques et isotopiques des eaux souterraines dans la région de Guelma (nord-est algérien), mémoire de magister; université Badji Mokhtar – Annaba.
11. Ben Ali, I., Bekkouche, Y. (2014). Etude Géologique, Minéralogique et Géochimique des Argiles Kaoliniques Du Gisement de Djebel Debagh (Guelma). Mémoire d'ingénieur, université KasdiMerbah – Ouargla.
12. Benziane, A., Boualla, N., & DERRICHE, Z. (2012). Aptitude des eaux du bassin de la Grande Sebka d'Oran à l'irrigation. *Journal of Applied Biosciences*, 56, 4066-4074.
13. Benrabah, S., Bousnoubra, H., Kherici, N., & Cote, M. (2013). Caractérisation de la qualité des eaux de l'oued Kebir Ouest (Nord-est Algérien). *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 26(1), 30-39.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

14. Bertani, R. (2005). World geothermal power generation in the period 2001–2005. *Geothermics*, 34(6), 651-690.
15. Blavoux, B., & Letolle, R. (1995). Dossier-Appports des techniques isotopiques à la connaissance des eaux souterraines. *Géo-chronique-Revue d'Information d'Expression Française en Sciences de la Terre*, (54), 12-15.
16. Bouamara, A.; Alileche, A. Les roches sédimentaires : mémoire des paysages anciens. Pour www.pass-education.fr
17. Bouaroudj S., Kadem, D.E.D. (2014). Evaluation de la Qualité d'eau d'irrigation des oueds: RhumeletBoumerzoug (Constantine).Scientific and technicalreview. LIEE N° 24 -25.
18. Bouchareb-Haouchine, F. Z. (2012). Etude Hydro-chimique des Sources Thermales de l'Algérie du Nord-Potentialités Géothermiques (Doctoral dissertation, Thèse Doctorat en Sciences, USTHB, Algérie, p 135).
19. Bouillin, J. P. (1977). Géologie alpine de la Petite Kabylie dans les régions de Collo et d'El Milia (Algérie) (Doctoral dissertation).
20. Boulifa, F. (2015). Le tourisme de santé: serait-il une nouvelle relance pour le tourisme tunisien. *Tourisme & Territoires/Territories & Tourism*, 4
21. Brémond, R., & Vuichard, R. (1973). Paramètres de la qualité des eaux (pp. 182-184). Ministère de la protection de la nature et de l'environnement, Secrétariat permanent pour l'étude des problèmes de l'eau.
22. Campy, M., & Macaire, J. J. (1989). Géologie des formations superficielles: géodynamique-faciès-utilisation. Masson.
23. Castany, G. (1982). Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie, Tunisie). Aquifères du Continental intercalaire et du complexe terminal [nappe captive, système multicouche, hydrodynamique, gestion des ressources en eau, milieu aride]. *Bulletin du Bureau de Recherches Géologiques et Minières Section 3 Hydrogéologie Géologie de l'Ingénieur*.
24. Chapman, PM (1996). Présentation et interprétation des données de la triade de la qualité des sédiments. *Écotoxicologie*, 5 (5), 327-339.
25. Chouabbi, A. (1987). Etude géologique de la région de Hammam N'Bails (SE de Guelma, Constantine, Algérie) (Doctoral dissertation, Thèse de doctorat de troisième cycle, Université de Paul Sabatier de Toulouse, 1987, 123p).
26. Coiffait, P. E., Durand-delga, M., Feinberg, H., Lahondere, J. C., & Magne, J. (1983). Age post-oligocène de la mise en place d'éléments allochtones ultra telliens au Sud-Ouest de Constantine (Algérie). *Comptes rendus des séances de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique-physique, chimie, sciences de l'univers, sciences de la terre*, 297(9), 735-742.
27. Debieche, T. H. (2002). Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle: application à la basse plaine de la Seybouse Nord-Est algérien (Doctoral dissertation, Université de Franche-Comté).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

28. De La Chavanne, J. D. (1910). La région de Guelma: étude spéciale des terrains tertiaires. Jourdan.
29. Deleau, P. (1938). Etude géologique des régions de Jemmapes, d'Hamman-Meskoutine et du col des Oliviers. Service de la carte géologique de l'Algérie.
30. Dominique, A., Labondette, JP. (2009). Le petit Futé Antalya Bordrum ; 95p ; 68-72.
31. Drogue, C. (1971, October). Coefficient d'infiltration ou infiltration efficace, sur les roches calcaires. In Actes colloque d'hydrologie en pays calcaire, Besançon (pp. 121-131).
32. Durand Delga, M. (1969). Mise au point sur la structure du Nord-est de la Berbérie. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, NS. Bull. soc. Géol. fr.,(7), xiii, 328-337.
33. Durand-Delga, M., &Fontboté, J. M. (1980). Le cadre structural de la Méditerranée occidentale. Mem. BRGM, 15, 677-685.
34. Durand-Fardel, M. (1857). Traité thérapeutique des eaux minérales de France et de l'étranger et de leur emploi dans les maladies chroniques. Germer Baillière.
35. Duriez, A. (2006). Origine et processus de minéralisation d'eaux thermales en milieu continental méditerranéen: cas du système géothermal des Thermopyles (Grèce) (Doctoral dissertation, Thèse, N° d'ordre: 85 47. Université Paris Sud 11, Faculté des Sciences d'Orsay).
36. Dupont, B., Puech-Dupont, ML. (2009). Les stations thermales en Roumanie. La pharmacie de Rocheville. Le cannet.
37. Ehrmann, M. (1922). Préparateur de géologie à la Faculté l'Alger Bulletin de la Société de Géographie d'Alger et de l'Afrique du Nord, 1er trimestre, n°87.http://alger-roi.fr/Alger/algerie_touristique/textes/chapitre3.htm
38. Fansto, Z. (2001). La ville de Rome sous le haut empire. Pallas revue d'étude antique ; 55 ; 267-285.
39. FAO. (2008). Guide for laboratory establishment for plant nutrient analysis. FAO, Rome.
40. Fénelon, P. (1968). Les reliefs karstiques du Périgord. Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-ouest, 39(2), 151-168.
41. Fekraoui, A. (1988). Geothermal resources in Algeria and their possible use. Geothermics, 17(2-3), 515-519.
42. Fekraoui, A et Abouriche, A (1999). Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie Eléments de l'Atlas Géothermique - Centre de Développement des Energies Renouvelables. BP 62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger.
43. Ford, DC, & Williams, PW (1989). Karst géomorphologie et l'hydrologie (Vol. 601). Londres: Unwin Hyman.
44. Genter, A. et al., (2004). Synthèse méthodologique sur l'exploration haute énergie dans les DOM : approche géologique. Projet GHEDOM. Rapport BRGM n°RP 53 130-FR, 85p.
45. Gérard, J. P., Conroy, T., Bonnetain, F., Bouché, O., Chapet, O., Closon-Dejardin, M. T., ...& Seitz, J. F. (2006). Preoperative radiotherapy with or without concurrent fluorouracil and

REFERENCES BIBLIOGRAPHIES

- leucovorin in T3-4 rectal cancers: results of FFCO 9203. *Journal of Clinical Oncology*, 24(28), 4620-4625.
46. Glangeaud, L. (1932). Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Imprimerie de l'Université Y. Cadoret.
47. Hachicha, F., & Krichen, L. (2012). Rotor power control in doubly fed induction generator wind turbine under grid faults. *Energy*, 44(1), 853-861.
48. Ibtisam, MA. (2011). Le thermalisme en oto-rhino-laryngologie (A propos de 64 cas).
49. Ilavsky, J., & Snopkova, P. (1987). Découverte d'Acritarches paléozoïques dans les terrains métamorphiques de l'Edough (Wilaya d'Annaba, Algérie). *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 305(10), 881-884.
50. Jackson, JA (1997). *Glossaire de géologie*, 4e édition. Institut géologique américain.
51. Janicot, B. (2009). Quelques aspects de la vie thermale à travers les âges en Grèce et en Gaule. *Revue « Noël »*; Aout.
52. Kahalerras, A. (1968). *Projet des stations thermales Hammam Ouled Ali, Reconnaissance Hydrogéologique*. Département d'Annaba; commune d'Héliopolis.
53. Kedaid, F. Z., Rezig, M., Abouriche, M., & Fekraoui, A. (1988). Carte géothermique préliminaire du Nord de l'Algérie Au 1/100 000. Rapport interne, CDER.
54. Kerourio P. 2007. Le tourisme de santé : thermalisme et thalassothérapie en France et dans le monde. *Géo-tourisme*.
55. Lahondere, C. (1987). Contribution à l'étude du genre *Salicornia* L. en Corse. *Bull. Soc. Bot. Centre-Ouest*, ns, 18, 73-78.
56. Lambert, M. (1956). LES «Réformés» D'Urukagina. *Revue d'Assyriologie et d'archéologie orientale*, 50 (4), 169-184.
57. Lambrakis, N., & Kallergis, G. (2005). Contribution à l'étude des sources thermales grecques: caractéristiques hydrogéologiques et hydro-chimiques et origine des eaux thermales. *Hydrogeology Journal*, 13 (3), 506-521.
58. Lindal, B. (1973). Industrial and other applications of geothermal energy :(except power production and district heating).
59. Maison, T., Laouafa, F., Delalain, P., Fleureau, J. M., Hamza, M., Shahien, M., & El-Mossallamy, Y. (2009). Microscopic analysis of shrinkage and swelling mechanisms in clayey soils. In *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The academia and practice of geotechnical engineering*, Alexandria, Egypt, 5-9 October 2009. (pp. 660-663). IOS Press.
60. Magnin, F., Guendon, J. L., Vaudour, J., & Martin, P. (1991). Les travertins; accumulations carbonatées associées aux systèmes karstiques, séquences sédimentaires et paléo-environnements quaternaires. *Bulletin de la Société géologique de France*, 162(3), 585-594.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

61. Mansouri Z. (2009). Les ressources en eau et gestion intégrée du bassin versant de l'oued Bouhamdane (Nord-Est Algérien). Mémoire de magister ; U. B Mokhtar-Annaba.
62. Marsily, GD (1981). Hydrogéologie quantitative. Masson
63. Martel, É. A. (1921). Nouveau traité des eaux souterraines. Librairie Octave Doin, Gaston Doin, éditeur.
64. Melillo L. (1995). Thermalisme dans le monde antique *Med Secoli* ; 7 (3): 461-83. Italien. PMID: 11623482.
65. Moreno, FQ., Gachet, B., Vittone, R. (2001). Histoire des thermes et du thermalisme. Projet de diplôme de réhabilitation de la station thermale de Coria ; juin.
66. Moret, L. (1946). Les sources thermo-minérales: hydrogéologie-géochimie-biologie. Masson et Cie.
67. Mouchara N. (2009). Impact des lâchées de barrage de Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la Seybouse dans sa partie amont (Nord-est Algérien). Mémoire de magister; université Badji Mokhtar Annaba.
68. Nicod, J. (1981). Thème I. Répartition, classification, relation avec les milieux karstiques et karstification (Distribution, classification, relation with karstic medium and karstification). *Bulletin de l'Association de géographes français*, 58(479), 181-187.
69. Ouali, S. (2008). Les sources Thermales en Algérie, Division Energie Solaire Thermique et Géothermie.
70. Paliwal, KV. (1972). Irrigation with saline water. IARI Monograph no 2 (New series), New Delhi, p 198.
71. Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 25(6), 914-928.
72. Povara, I., Simion, G., & Marin, C. (2008). Thermo-mineral waters from the Cerna Valley Basin (Romania). *Studia UBB Geologia*, 53(2), 41-54.
73. Raoult, J. F. (1972). Précisions sur le flysch massylien: série stratigraphique, variation de faciès, nature du matériel remanié (Nord Constantinois, Algérie). *Bulletin du Muséum d'Histoire Naturelle d'Afrique du Nord*. T63.
74. Raoult, J. F. (1974). Géologie du centre de la Chaîne numidique: Nord du Constantinois, Algérie. Société géologique de France.
75. Raoult, J. F. (1975). Évolution paléogéographique et structurale de la chaîne alpine entre le golfe de Skikda et Constantine. *Bull. Soc. Géol. Fr. série II*, 66, 391-409.
76. Rezig, M. (1991). Etude géothermique du nord-est de l'Algérie (Doctoral dissertation).
77. Rezig, M. (1992). Etude Géothermique de l'Extrémité Est de l'Atlas Saharien.
78. Richards, LA. (1954). Diagnosis and improvement of saline alkali soils. In: agriculture, handbook no 60. US Department of Agriculture, Washington, p 160.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

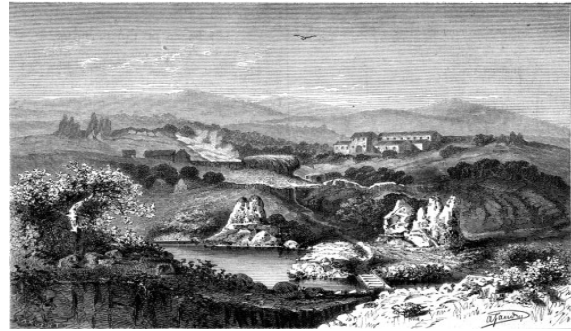
79. Rihia, F., Baadi, H. (2004). Le thermalisme de l'extrême Est Algérien (Guelma, Souk Ahras, Skikda, Annaba et El Tarf. Mémoire d'ingénieur; Université Mentouri, Constantine.
80. Rodier, J. (2009). L'Analyse de l'eau 9eme Edition Dunod, Paris.
81. Roques, CF. (2003). Société française d'hydrologie et de climatologie médicales, Service de Médecine Physique & de Réadaptation du CHU de Toulouse Faculté de Médecine Rangueil - Université Paul Sabatier (Toulouse III). La presse thermale et climatique 2003; 140: 15-19.
82. Rouabhia, A.E.K., Djabri L. (2010). L'irrigation et le risque de pollution saline exemple des eaux souterraines de l'aquifère Miocène de la plaine D'EL MA EL ABIOD [Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°8. pp. 55-67.
83. Sanders, L. (2006). Les eaux thermales en traitement adjuvant dermatologique et dermo-cosmétique : exemple de l'eau thermale d'Avène. Sciences pharmaceutiques. <dumas-00794112>.
84. Schöeller, H. (1934). Les échanges de bases groupent dans les eaux souterraines; Trois exemples sont Tunisie. Bull SocGéolFr, 4, 389-420.
85. Schöeller, H. (1965). Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and techniques of groundwater investigations and development. UNESCO, 54-83.
86. Semmar, D., Lafri, D., Hamid, A., Kharchi, R., & Sami, S. (2002). Chauffage des Bungalows de Hammam Chellala par Energies Géothermiques.
87. Slimani, H. Le thermalisme et le développement durable dans la région de Fès – Boulemane. FSJES de Fès 28, B; D. Mohamed Belarbi Alaoui, Lidou, Fès (Maroc) E-mail : hamidslimani@yahoo.fr
88. Socquet, J. M. (1824). Essai analytique, médical et topographique, sur les eaux minérales, gazeuses-acidules et thermo-sulfureuses, de la perrière, près Moutiers, en Savoie. J.-M. Barret.
89. Tarcan, T., Siroky, MB, Krane, RJ, &Azadzoï, KM (2000). Isoprostane 8-epi PGF2a, un produit du stress oxydatif, est synthétisé dans la vessie et provoque détusor contraction des muscles lisses. Neurourology et urodynamique, 19 (1), 43-51.
90. Tardy, M. (1980). Contribution à l'étude géologique de la Sierra Madre orientale au Mexique.: Stratigraphie, évolution paléogéographique et évolution tectonique sur un profil du secteur transverse de Parras; organisation et géodynamique de la Sierra Madre orientale au passage Domaine alpin caraïbe-Cordillère ouest-américaine (Doctoral dissertation, Université Pierre et Marie Curie-Paris VI).
91. Tilling, Robert I. (2007). Ignimbrite. Dans: McGraw Hill Encyclopedia of Science & Technology, 10e édition.McGraw-Hill. Volume 9. 20-21.
92. Traineau, H., Sanjuan, B., Beaufort, D., Brach, M., Castaing, C., Correia, H., ...&Herbrich, B. (1997). The Bouillante geothermal field (FWI) revisited: new data on the fractured geothermal reservoir in light of a future stimulation experiment in a low productive well. In Proc 22nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-155.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

93. Varet, J. (2011). Nouveaux métaux stratégiques, enjeux pour l'Europe. 5 rue Antoine Petit 45000 Orléans site Internet: <http://www.lacado.fr>, 197.
94. Vaudour, J. (1994). Évolution holocène des travertins de vallée dans le Midi méditerranéen français. *Géographie physique et Quaternaire*, 48(3), 315-326.
95. Vila, J. M. (1970). Le Djebel Edough; un massif cristallin externe du Nord-est de la Berberie. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(5), 805-812.
96. Vila, J. M. (1971). Essai d'interprétation structurale d'un profil transversal du Nord-est de la Berberie entre les régions d'Annaba (Bône) et de Guelma. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7(1-2), 85-99.
97. Vila, JM (1980). La chaîne alpine d'Algérie orientale et des confins Algero-tunisiens (thèse de doctorat).
98. Wilcox, LV. (1948). The quality of water for agricultural use. US Dept Agriculture Tech. Bull. 1962, Washington DC. 8 p.
99. Wilcox, LV. (1955). Classification and use of irrigation water. USDA, Circular 969, Washington, DC, p 19.

ANNEXE 1 : LES FORMATIONS TRAVERTINEUSES

1. HAMMAM MESKOUTINE



Prise le 5 février 1976

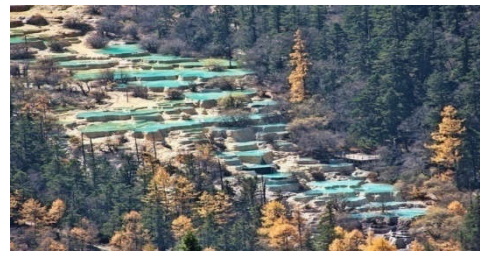




2. LES 10 EXTRAORDINAIRES FORMATIONS TRAVERTINEUX DANS LE MONDE



Pamukkale, Turquie



Huanglong, la province du Sichuan, en Chine



Baishuitai, Yunnan, (région tibétaine), la Chine



Semuc Champey, Guatemala



Badab-e Sirt, l'Iran



Mammoth Hot Springs, États-Unis



Hierve el Agua, Mexique



Waimangu, Nouvelle-Zélande



Hammam Meskoutine, Algérie



Cascade Del Gorello un Saturnia, Toscane, Italie