

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université MUSTAPHA Stambouli
Mascara



جامعة مصطفى أسطبولي
معسكر

Faculté des sciences de la nature et de la vie
Département d'Agronomie
Laboratoire de Recherche sur les Systèmes Biologique et Géomatique (LRSBG)
Laboratoire de Bioconversion, Génie Microbiologique et Sécurité Sanitaire (LBGMSS)

THESE DE DOCTORAT 3EME CYCLE LMD

Filière : Sciences de la Terre et de l'Univers
Spécialité : Hydrogéologie, Sol et Environnement

Intitulée

**ÉTUDE HYDROCHIMIQUE ET QUALITE DES EAUX DE SOURCES
THERMALES DE LA VILLE DE BOUHANIFIA**

Présentée par : LAKROUT Ali

Le : 05/02/2026

Devant le jury :

Président	ELOUISSI Abdelkader	pr	Université de Mascara
Examineur	AZZAZ Habib	pr	Université de Mascara
Examineur	MAAMAR Boumediene	pr	Université de Tlemcen
Examineur	DARDOUR Abdessamad	MCA	Centre Universitaire de Naâma
Encadreur	MEDDAH Boumediene	pr	Université de Mascara

Année universitaire 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



REMERCIEMENTS

Je remercie Allah pour sa présence constante, pour m'avoir guidé, soutenu dans les moments difficiles, et donné la force, la patience et le courage nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je tiens tout d'abord à adresser mes plus profonds remerciements à Monsieur le Professeur **MEDDAH Boumediene**, mon directeur de thèse, pour m'avoir accordé sa confiance tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique, ses conseils éclairés, sa disponibilité constante et son encadrement bienveillant ont été essentiels à la réalisation de cette recherche. Son expertise et son exigence ont grandement contribué à enrichir cette thèse, et je lui suis profondément reconnaissant pour le soutien moral et intellectuel qu'il m'a apporté durant toutes ces années.

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'évaluer ce travail :

- **Monsieur le Professeur ELOUISSI Abdelkader**, Président du jury, pour avoir accepté de présider cette soutenance et pour l'intérêt porté à mes travaux.
- **Monsieur le Professeur AZZAZ Habib**,
- **Monsieur le Professeur MAAMAR Boumediene**,
- **Monsieur le Professeur DARDOUR Abdessamad**,

Je leur suis reconnaissant pour le temps qu'ils ont consacré à la lecture de ce manuscrit, la qualité de leurs remarques et suggestions, ainsi que pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de faire partie de ce jury.

Je remercie le **docteur Ali Rahmani, Salah Eddine**, enseignant dans **l'université des sciences et de la technologie Houari-Boumediène (USTHB)** pour son accompagnement tout au long de ces années, et l'ensemble des enseignants de **l'université Mustapha Stambouli**, pour leur appui académique.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Monsieur Baghdad Allem** du service hydraulique de Mascara, ainsi qu'à l'ensemble du personnel de l'Université de Mascara, en particulier celui de la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie. Mes remerciements s'adressent également à **Madame Kada Fatima Zohra** pour leur précieux soutien, tant moral que logistique.

Enfin, je remercie mes collègues et toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail.

DEDICAS

Je dédie ce travail à la mémoire de mon père **Ahmed Lakrout** (رحمه الله), qui a toujours souhaité ma réussite et attendu avec espoir que ce jour arrive. Je prie Dieu que ce travail puisse être une source de récompense pour son âme.

À ma chère mère – que Dieu la préserve – pour son soutien constant, ses prières, ses encouragements et sa foi inébranlable en moi, qui ont été une source précieuse de motivation.

À mon frère **Yousef** et à mes sœurs, pour leur présence continue à mes côtés, dans les moments heureux comme dans les épreuves.

À mon épouse **Djadir .K** pour sa présence bienveillante et son soutien moral tout au long de ce parcours.

À mes enfants **Abderrahmane** et **Ahmed**, qui remplissent ma vie de joie et de sourires.

À mes amis proches, pour leur fidélité et leur soutien, notamment dans les périodes les plus difficiles.

À tous mes collègues de travail, ainsi qu'à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont aidé ou encouragé tout au long de ce chemin.

Et à l'ensemble du personnel de l'Université **Mustapha Stambouli**, pour les moments partagés et l'accompagnement dans les démarches administratives.

Résumé

Les eaux thermales algériennes constituent une ressource naturelle stratégique. Une gestion durable et rationnelle de ces systèmes nécessite une connaissance approfondie de leurs caractéristiques hydrogéologiques, hydrodynamiques, géochimiques, ainsi que de leur qualité microbiologique. Située dans l'ouest de l'Algérie, la station thermale de Hammam Bouhanifia représente un aquifère d'intérêt majeur économique et thérapeutique. Son étude intégrée permet de mieux comprendre les enjeux liés à sa préservation et à sa valorisation. Cette thèse adopte une approche multidisciplinaire visant à caractériser les sources thermales de cette région à travers des analyses hydrogéochimiques et bactériologiques.

Les objectifs de ce travail sont :

- Identifier l'origine des eaux thermales ;
- Déterminer leurs propriétés physico-chimiques (température, pH, minéralisation, ...) ;
- Analyser leur composition bactérienne ;
- Examiner leurs interactions avec les formations géologiques.

La méthodologie repose sur :

- Campagne d'échantillonnage et des mesures in situ ;
- L'exploitation de données analytiques (ions majeurs, éléments traces, isotopes) ;
- L'application d'indices géochimiques et de modèles hydrogéologiques ;
- Une analyse comparative à partir d'études antérieures.

L'utilisation de géothermomètres a permis d'estimer la température des réservoirs, la profondeur de circulation, ainsi que le temps de séjour des eaux. Par ailleurs, une méthode d'analyse multicritères a été intégrée pour calculer un indice de balnéologie thermique, fondé sur des paramètres physico-chimiques. Cet indice original offre un outil d'aide à la décision pour une exploitation optimisée des sources thermales et pour la promotion du tourisme balnéologique.

Les résultats obtenus apportent une compréhension approfondie du fonctionnement du système hydrothermal de Hammam Bouhanifia et fournissent des bases scientifiques solides en faveur d'une gestion durable de cette ressource.

Mots clés : hydrochimie ; eaux thermales ; Hammam Bouhanifia ; qualité des eaux ; gestion durable

Abstract

Algerian thermal waters represent a strategic natural resource, both in terms of water supply and energy potential, particularly in the current context of transition toward renewable energy. The sustainable and rational management of these systems requires a thorough understanding of their hydrogeological, hydrodynamic, geochemical characteristics, as well as their microbiological quality.

Located in western Algeria, the Hammam Bouhanifia thermal station constitutes a major aquifer system. Its integrated study contributes to a better understanding of the challenges related to its preservation and enhancement. This thesis adopts a multidisciplinary approach to characterize the thermal springs of this region through hydrogeochemical and bacteriological analyses.

The objectives of this study are to:

- identify the origin of the thermal waters;
- determine their physicochemical properties (temperature, pH, mineralization, etc.);
- analyze their bacterial composition;
- examine their interactions with the surrounding geological formations.

The methodology is based on:

- field sampling campaigns and in situ measurements;
- analysis of chemical data (major ions, trace elements, isotopes);
- application of geochemical indices and hydrogeological models;
- a comparative analysis using previous studies.

The use of geothermometers allowed for the estimation of reservoir temperatures, depth of water circulation, and residence time. In addition, a multi-criteria analysis method was applied to calculate a thermal balneology index, based on physicochemical parameters. This original index serves as a decision-support tool for the optimized exploitation of thermal sources and the promotion of balneological tourism.

The results obtained provide a deeper understanding of the hydrothermal functioning of the Hammam Bouhanifia system and offer a solid scientific foundation for the sustainable management of this valuable resource.

Keywords: hydrochemistry; thermal waters; Hammam Bouhanifia; water quality; sustainable management

الملخص

تُعدّ المياه الحموية الجزائرية مورداً طبيعياً استراتيجياً، سواء من الناحية المائية أو الطاقوية، لاسيما في ظل التحول الحالي نحو الطاقات المتجددة. وتتطلب الإدارة المستدامة والرشيّدة لهذه الأنظمة فهماً معمقاً لخصائصها الهيدروجيولوجية، والهيدروديناميكية، والجيوكيميائية، إضافة إلى جودتها الميكروبيولوجية. تقع محطة حمام بوحنيفية في غرب الجزائر، وتُعتبر خزناً جوفياً ذا أهمية بالغة. ويساهم تحليلها المتكامل في فهم أفضل للتحديات المرتبطة بالحفاظ عليها وتأمينها. تعتمد هذه الأطروحة على مقارنة متعددة التخصصات تهدف إلى توصيف الينابيع الحموية في هذه المنطقة من خلال تحاليل هيدروجيوكيميائية وبيكتريولوجية. تهدف هذه الدراسة إلى:

- تحديد أصل المياه الحموية؛
- قياس خصائصها الفيزيائية والكيميائية (درجة الحرارة، الأس الهيدروجيني، نسبة التمعدن، إلخ)؛
- تحليل تركيبها البكتيري؛
- دراسة تفاعلها مع التكوينات الجيولوجية المجاورة.

تعتمد المنهجية على:

- حملات أخذ العينات والقياسات الميدانية؛
- استغلال البيانات التحليلية (الأيونات الرئيسية، العناصر النزرة، النظائر)؛
- تطبيق مؤشرات جيوكيميائية ونماذج هيدروجيولوجية؛
- تحليل مقارن اعتماداً على دراسات سابقة.

سمح استخدام الموازين الجيوحرارية بتقدير درجات حرارة الخزانات، وعمق دوران المياه، ومدة مكوثها. كما تم إدماج طريقة تحليل متعددة المعايير لحساب مؤشر بالينولوجي حراري، يستند إلى خصائص فيزيائية-كيميائية. ويُعد هذا المؤشر أداة مساعدة على اتخاذ القرار من أجل استغلال أنجع للينابيع الحموية، وتعزيز السياحة العلاجية. تُسهم النتائج المتوصل إليها في تعميق الفهم لآلية عمل النظام الحُموي لحمام بوحنيفية، كما تقدم أساساً علمياً متيناً لإدارة مستدامة لهذا المورد الطبيعي.

الكلمات المفتاحية: الهيدروكيمياة؛ المياه الحموية؛ حمام بوحنيفية؛ جودة المياه؛ الإدارة المستدامة

Liste des figures

Figure 1: Cycle de l'eau	4
Figure 2:Hammam turc	9
Figure 3:Le parcours de l'eau thermale.....	12
Figure 4:Les manifestations géothermiques en Afrique du nord (Saibi et al, 2024).....	14
Figure 5:les zones géothermales en algerie	16
Figure 6:situation de la zone d'étude	18
Figure 7: Les principaux griffons du Nord Algérien (Issadi, 1996).....	19
Figure 8:précipitations moyennes mensuelles pour la période 2006-2015	20
Figure 9:variations des températures 2006-2015	21
Figure 10:humidité de l'air en % pour la période 2006-2015	21
Figure 11:Précipitations en fonction de l'humidité.....	22
Figure 12:Humidité de l'air en fonction de la température	22
Figure 13:situation du bassin de Oued EL hamam (El Mahi et al 2012)	24
Figure 14:Courbe hypsométrique (El Mahi et al 2012)	25
Figure 15:Domaines géologiques et structuraux de l'Algérie (ASGA-2020).....	27
Figure 16:Coupe géologiques Nord - ouest montrant les principales unités structurales du Nord algérien (Chabou, 2015; Nedjraoui, 2017).....	27
Figure 17: Carte géologique de Mascara N212 Dalloni 1926, modifiée.....	28
Figure 18:Carte géologique de Mascara.....	30
Figure 19:Coupes Géologiques	31
Figure 20:carte géologie de la région nord west (Belhai et al, 2016)	32
Figure 21:coupes géologiques (Belhai et al, 2016)	34
Figure 22:Profile géologique transversal du barrage hydraulique de Bouhanifia décrivant les terrains Miocène locales de la région d'après Falconnier & Lombard, 1942 , modifiée par Benamar ,2023)	37
Figure 23:Coupe géologique régional du Profil A-B (Benamar ,2023).....	39
Figure 24: localisation des points d'eau (carte topographique de bouhanifia).....	43
Figure 25: Multiparamteres de terrain.....	44
Figure 26: Spectrophotomètre	45
Figure 27: Centrifugeuse	46
Figure 28: Logiciel Thermal process.....	48
Figure 29: Logicielle minitab	49
Figure 30: Stanford PowerShell pour les analyses géothermique.....	49

Figure 31: Les sources thermales de Bouhanifia en fonction des températures (carte topographique de bouhanifia).....	51
Figure 32:Variation spatiale de la température	53
Figure 33:Variation spatiale de pH	54
Figure 34:Variation spatiale de la conductivité électrique	55
Figure 35:variation spatiale de Magnésium	56
Figure 36:variation des concentrations de calcium	57
Figure 37:Variation du Na^+	58
Figure 38:variation des concentrations de K^+	59
Figure 39:Variation des sulfates SO_4^{2-}	60
Figure 40:variation des Chlorures Cl^-	61
Figure 41:variation des Bicarbonate HCO_3^-	62
Figure 42:Variation des nitrates NO_3^-	63
Figure 43:Diagramme de wilcox.....	64
Figure 44:diagramme de piper	65
Figure 45 : diagramme de Schoeller Berkaloff	66
Figure 46 : Diagramme de Durov - Cations ($\text{Na}^+ \text{K}^+$ vs Ca^{2+}).....	67
Figure 47 : diagramme de stiff	68
Figure 48 : diagramme de stabler.....	69
Figure 49 : diagramme de Giggenbach 1991	70
Figure 50 : diagramme de Giggenbach (1988).....	71
Figure 51 : Chloride-ppm	72
Figure 52 : $10\text{K}(10\text{K}+\text{Na})$	72
Figure 53 : $\log(\text{K}^2/\text{Mg})$	73
Figure 54 : Matrice de Pearson pour la source thermique de Bouhanifia	75
Figure 55: Eigen values.....	77
Figure 56: représentation graphique du première et deuxième composante	78
Figure 57: cluster classification.....	79
Figure 58:Cluster.....	80
Figure 59 : Températures de réservoirs estimés par des méthodes géothermométriques	86
Figure 60 : Hydrodynamiques de système thermal de Bouhanifia ((Benamar ,2023).....	89
Figure 61 : représentation graphique de profondeur estimée	90
Figure 62 : Variation de l'indice de qualité standar	94
Figure 63 : Radioactivité.....	97

Figure 64 : Poids des Sous-Critères Thérapeutiques.....	104
Figure 65 : Variation de l'indice IBT	108
Figure 66 : Capture d'écran de l'application HTML	112

Liste des tables

Tableau 1 : Caractéristiques des différents réservoirs (Chaine, 1992).....	5
Tableau 2 :transfert des flux du cycle de l'eau.....	6
Tableau 3 : précipitations mensuelles pour la période 2006-2015.....	20
Tableau 4 : classification de De Martone (1923)	23
Tableau 5 : logiciels utilisés	47
Tableau 6 : résultats des mesures in situ	52
Tableau 7 : résumé statistiques des paramètres in situ.....	52
Tableau 8 : Géochimie des sources de bouhanifia	55
Tableau 9 : résumé statistiques des paramètres physicochimique	56
Tableau 10 : Analyses bactériologique des sources de bouhanifia	74
Tableau 11 : les principaux composantes.....	76
Tableau 12 : Température estimé par les géothermomètres chimiques	84
Tableau 13 : Estimation de la profondeur d'émergence.....	87
Tableau 14 : échelle de classification de l'indice SOUBEIRAN	92
Tableau 15 : propriété thérapeutique des minéraux abondants dans les eaux thermales	93
Tableau 16 : Signature radioactive des eaux thermale de bouhanifia	96
Tableau 17 : Echelle de saaty	100
Tableau 18 : Echelle de saaty (Saaty 1990)	102
Tableau 19 : Matrice de comparaison	103
Tableau 20 : Matrice de comparaison SOUBEIRAN	104
Tableau 21 : matrice normalisée	105
Tableau 22 : Classification des sources selon l'indice IBT.....	106
Tableau 23 : les Normes ou standards microbiologiques des eaux thermales.	121

Table des matières

REMERCIEMENTS	I
DEDICAS.....	II
Résumé.....	III
Liste des figures	VIVI
Liste des tables	VIII
Table des matières	IIX
Liste des Abréviations	IXIV
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Concepts clés.....	3
1.1 Cycle Globale de l'eau	4
1.2 Estimation des flux d'eau dans le cycle global de l'eau.....	6
1.3 Processus du cycle hydrologique	6
1.3.1 Précipitation (pluie).....	6
1.3.2 Précipitation (neige)	6
1.3.3 L'évaporation.....	7
1.3.4 Infiltration.....	7
1.3.5 La fonte glaciaire.....	7
1.3.6 Le temps de résidence	7
1.4 Bilan hydrologique	8
1.5 L'histoire des eaux thermales et de la Balnéologie.....	8
1.6 Origine géologique et composition des eaux thermales.....	9
1.6.1 Utilisation dans l'Antiquité	9
1.6.2 Renaissance et émergence de l'approche empirique.....	9
1.6.3 Balnéologie contemporaine et approches cliniques	10
1.6.4 Les eaux thermales	10
1.6.5 Source Hypothermale	11
1.6.6 Source Hyperthermale.....	11
1.7 Processus d'Émergence des Sources Thermales	11
1.7.1 Gradient Géothermique	12

1.8 Aperçu sur l'hydrothermalisme en Algerie	12
1.8.1 Principales régions hydrothermales.....	13
1.8.2 Hamam Bouhanifia	14
1.8.3 Caractéristiques des eaux	14
1.8.4 Histoire et Exploitation	14
1.8.5 Importance Économique et Touristique	15
1.8.6 Comparaison avec d'autres Sites en Algérie	15
Chapitre II contexte de la zone d'étude	17
2.1 Etude Hydro climatologique	19
2.1.1 Introduction	19
2.1.2 Données climatiques	20
2.1.3 Précipitations	20
2.2 Type de climat.....	23
2.2.1 L'indice d'aridité de De MARTONE (1923).....	23
2.2.2 Hydrologie de Bouhanifia	23
2.3 Relief et altitudes.....	24
3.1 Domaines structuraux de l'Algérie.....	26
3.1.1 Nummulitique.....	28
3.1.2 Éocène	29
3.1.3 Oligocène	29
3.2 Néogène (Miocène et Pliocène)	29
3.3 Les facies du néogène et du quaternaire.....	35
3.3.1 Miocène inférieur marin (Burdigalien – Cartennien).....	35
3.3.2 Miocène continental	35
3.3.3 Miocène supérieur marin (Tortonien – Sahélien)	35
3.4 Tectonique Générale.....	37
3.5 Hydrogéologie.....	37
Chapitre III Matériels et méthodes.....	40
4.1 Échantillonnage	41
4.2 Conservation.....	41
4.3 Préparation	41

4.4 Stratégie d'échantillonnage	42
4.4.1 Méthodologie d'analyse	42
4.4.2 La méthode AHP (Analyse multicritères)	46
4.4.3 Domaines d'Application	46
4.4.4 Logiciels utilisés.....	47
Chapitre IV Resultats Et Discussions.....	50
5.1 La température.....	52
5.2 Potentiel d'hydrogène (pH)	53
5.3 Conductivité électrique et minéralisation.....	54
5.3.1 Répartition spatiale :.....	54
5.4 Les analyses physico-chimiques	55
5.5 les Cations	56
5.5.1 Le Magnésium Mg^{2+}	57
5.5.2 Le Calcium Ca^{2+}	57
5.5.3 Le Sodium Na^{+}	58
5.5.4 Le Potassium K^{+}	58
5.6 Les Anions.....	59
5.6.1 Le Sulfate SO_4^{2-}	59
5.6.2 Les Chlorures Cl^{-}	60
5.6.3 Les Bicarbonate HCO_3^{-}	61
5.6.4 Les Nitrates NO_3^{-}	62
5.7 Facies hydrogéochimique.....	64
5.7.1 Diagramme ternaire de Giggenbach.....	70
5.8 Analyse bactériologique	74
5.8.1 Analyse statistique.....	75
5.8.2 Matrice de corrélation de Pearson	75
5.8.3 Analyse en composante principale	76
6.1 Introduction	81
6.2 Les géothermomètres chimiques	81
6.2.1 Geothermometers Na-K-Ca (Fournier & Truesdell, 1973).....	81
6.2.2 Différentes variantes du géothermomètre Na-K	82

6.2.3 Géothermomètre K-Mg (Giggenbach, 1988)	82
6.3 Applications et limites.....	83
6.3.1 Estimation des profondeurs d'émergence	83
6.3.2 Température de réservoirs	83
6.3.3 Na-K-Ca (Fournier, 1973).....	84
6.3.4 Géothermomètres Na-K (1976–1988).....	85
6.3.5 Températures mesurées et géothermométries	86
6.3.6 Profondeur estimée.....	87
6.3.7 Types de réservoirs.....	88
6.3.8 Indices géochimiques : Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Mg^{2+}	88
6.4 Hydrodynamiques de système thermal des sources de Bouhanifia.....	88
Chapitre V : Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT	91
7.1 Indice de Balnéologie thermique.....	92
7.2 Indice de SOUBEIRAN	92
7.3 Définition et Calcul de l'Indice de SOUBEIRAN	92
7.4 Indice de BALTHAZARD	92
7.5 Équation Générale	93
7.6 Etude de la radioactivité naturelle	95
8.1 Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT	98
8.2 Introduction	98
8.3 Fondements Théoriques de l'AHP	100
8.3.1 Décomposition hiérarchique.....	100
8.3.2 Comparaisons par paires	100
8.3.3 Échelle de Saaty	100
8.4 Étapes de la Méthode AHP	101
8.4.1 Méthode approchée	101
8.4.2 Méthodologie	101
8.5 Définition de la Hiérarchie des Critères	101
8.6 Comparaison par Paires et Matrice de Poids.....	102
8.7 The fundamental scale.....	103
8.7.1 Les principaux critères utilisés sont les suivant :	103
8.7.2 Sous-Critères pour le Potentiel Thérapeutique :	103

8.7.3 Matrice de comparaison	103
8.7.4 Vérification de la cohérence de la matrice	105
8.7.5 Vérification Cohérence :	105
8.7.6 Equation finale AHP	105
8.8 Identification des sources les plus performantes.....	107
8.8.1 Les scores les plus élevés reviennent à	107
8.8.2 Sources à usage ciblé ou spécialisé	107
8.8.3 Sources à usage restreint ou doux	107
8.8.4 Implications et recommandations.....	108
8.8.5 Perspectives de valorisation et de recherche	110
8.8.6 Valorisation thérapeutique et thermale.....	110
8.8.7 Protection et aménagement	110
8.8.8 Recherche scientifique	110
8.8.9 Développement local.....	110
Conclusion :.....	114
Références bibliographiques	116
Annexes	120

Liste des Abréviations

ADE : Algériennes des eaux

ANRH : Agence nationale des ressources hydrauliques

ONM : Office National de la Météorologie

DHW : Direction de l'Hydraulique de Wilaya

AgNO₃ : Nitrate d'argent

BCPL : Bouillon Lactose au Pourpre Bromocérol

Ca²⁺ : Ion calcium

CaSO₄ : Sulfate de calcium

CE : Conductivité électrique

Cl⁻ : Ions Chlorure

D/C : Double concentration

E. coli : Escherichia coli

EDTA : Sel dissodique d'acide éthylène diamine tetracétique

EVA : Ethyle Violet Azide

F° : Degrés Français

HCL : Acide chlorhydrique

H₂C₂O₄ : Acide oxalique

HCO⁻³ : Ion bicarbonate

JORA : Journal Officiel de la République Algérienne

K⁺ : Ion potassium

KMnO₄ : Permanganate de potassium

M.E.S : Matière En Suspension

meq / l : Milliéquivalent par litre

Mg²⁺ : Ion Magnésium

MO : Matière Organique

nm : Nanomètre

N : Normalité

N.E.T : Noir d'Eriochrome

N° : Numéro

Na⁺ : Ion Sodium

Na₂SO₄ : Sulfate de sodium
NaOH : Hydroxyde de sodium
NO₂⁻ : Ion de Nitrite
NO₃⁻ : Ion de Nitrate
NPP : Nombre le plus probable
O.M.S : Organisation Mondiale de la Santé
pH : Potentiel d'Hydrogène
PO₄⁻² : Ion de phosphate
P.E : Prise d'Essaie
Q.s.p : Quantité suffisante pour
RS : Résidu sec
S/C : Simple concentration
SO₄⁻ : Ion de Sulfate
TA : Titre Alcalimétrique
TAC : Titre Alcalimétrique complet
TGEA : Gélose Tryptone Glucose Agar
TH : Titre Hydrotimétrique
TSE : Tryptone Sel Eau
UFC/ml : Unité Formant Colonies par millilitre
µs/cm : Micro Siemens par Centimètre

Introduction générale

L'eau constitue l'un des piliers fondamentaux du développement socio-économique et de la stabilité environnementale des nations. Dans un contexte mondial marqué par une demande croissante en ressources hydriques, associée à des changements climatiques et à une pression démographique accrue, la gestion durable des eaux devient un enjeu stratégique (Meddi et al., 2010). En Algérie, pays semi-aride à aride, cette problématique est particulièrement critique, avec des ressources en eau limitées et une dépendance accrue aux eaux souterraines (UNESCO, 2012).

Parmi ces ressources, les eaux thermales occupent une place singulière en raison de leur double utilité : d'une part, leurs propriétés thérapeutiques, exploitées depuis l'Antiquité (Romanazzi et al., 2015), et d'autre part, leur potentiel géothermique et touristique (Lund & Boyd, 2016). Comme le soulignent Bouchaou et al. (2008), ces eaux représentent un patrimoine naturel nécessitant une exploitation rationnelle et une préservation rigoureuse pour éviter leur dégradation.

L'Algérie compte plus de 120 sources thermales réparties sur son territoire, principalement concentrées dans les zones montagneuses et les bassins sédimentaires (Boutaleb et al., 2020). Ces eaux, issues de circulations hydrothermales profondes, présentent une grande variabilité physico-chimique, influencée par plusieurs facteurs :

- La lithologie des aquifères : La composition minéralogique des roches encaissantes joue un rôle clé dans la dissolution des éléments chimiques (Trabelsi et al., 2019).
- Les températures en profondeur : Les gradients géothermiques modifient les équilibres chimiques et favorisent la libération de certains ions (Edmunds & Shand, 2009).
- Les temps de résidence : Les interactions prolongées entre l'eau et la matrice rocheuse influencent la minéralisation et la composition isotopique (Clark & Fritz, 1997).

Cependant, ces ressources sont menacées par :

- La surexploitation : L'extraction excessive peut altérer les équilibres hydrodynamiques et réduire les débits naturels (UNESCO, 2012).
- La pollution anthropique : Les rejets domestiques, agricoles et industriels peuvent contaminer les aquifères (Ghiglieri et al., 2012).
- La variabilité climatique : La modification des régimes de précipitations affecte la recharge des nappes (Meddi et al., 2010). Une gestion durable de ces eaux exige donc une compréhension approfondie de leur fonctionnement hydrogéologique, de leur signature géochimique et de leur vulnérabilité aux pollutions.

La localité de Bouhanifia, située dans le nord-ouest algérien, abrite des sources thermales historiquement exploitées pour leurs vertus thérapeutiques. Ces eaux, associées à des systèmes géothermaux locaux, n'ont fait l'objet que d'études fragmentaires, malgré leur importance socio-économique croissante (Saibi, 2010). Comme le soulignent Fontes et al. (1982), « la connaissance de l'origine des eaux thermales est essentielle pour en assurer une exploitation durable et prévenir les impacts environnementaux ».

Or, les données actuelles sur leur composition chimique, leur origine et leur dynamique souterraine restent insuffisantes pour élaborer des stratégies de gestion optimisées. Une approche intégrée, combinant hydrogéologie, géochimie et outils isotopiques, s'avère donc indispensable pour combler ces lacunes.

La méthodologie suivie dans la réalisation de cette thèse repose sur trois axes principaux :

1- Caractérisation hydrochimique

- Identification des ions majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-)
- Évaluation de la minéralisation globale et classification des faciès chimiques via les diagrammes de Piper (1944) et Schoeller.
- Analyse des processus de dissolution minérale et des réactions d'échange cationique.

2- Évaluation de la qualité des eaux

- Application d'indices de qualité (indice de saturation, indice de pollution).
- Comparaison avec les normes nationales (ANRH) et internationales (OMS, 2017).
- Évaluation des risques sanitaires liés à la présence de contaminants (bactéries pathogènes).

3- Modélisation des processus géochimiques

- Identification des réactions dominantes (dissolution de gypse, altération des silicates).
- Utilisation de logiciels spécialisés (PHREEQC) pour simuler les équilibres chimiques.

Cette démarche s'inscrit dans le cadre des Objectifs de Développement Durable (ODD 6 : « Eau propre et assainissement ») et répond aux priorités du Plan National de l'Eau Algérien (PNE 2030).

Cette étude apportera une contribution majeure à la compréhension des mécanismes hydrogéochimiques gouvernant les eaux thermales de Bouhanifia, tout en proposant des solutions concrètes pour leur préservation. Les résultats obtenus présentent un document d'intérêt capital dans le contexte de la gestion et la valorisation des eaux thermales en tant que potentiel touristique important dans la région ouest de l'Algérie.

Chapitre I

Concepts clés

Chapitre I Concepts clés

Chapitre I : Concepts clés

1.1 Cycle Globale de l'eau

La circulation de l'eau à la surface de la Planète est décrite par l'ensemble des mouvements de l'eau à travers les différents réservoirs (Océan-atmosphère-continent) ; se déplacement se fait par l'intermédiaire d'un ensemble de processus météorologiques, biologiques et géologiques. L'énergie fournie par les rayonnements solaires c'est le moteur principal du cycle de l'eau, cette énergie favorise l'évaporation des eaux des océans et entraîne ainsi les autres échanges (Océan-Atmosphère-continent).

Le cycle global de l'eau, est généralement considéré comme un système fermé ; d'où la quantité de masse est préservée avec un changement de la phase de l'eau (Vapeur-solide-liquide).

Un schéma général simplifié du cycle de l'eau est illustré dans la figure 01 ci-dessous.

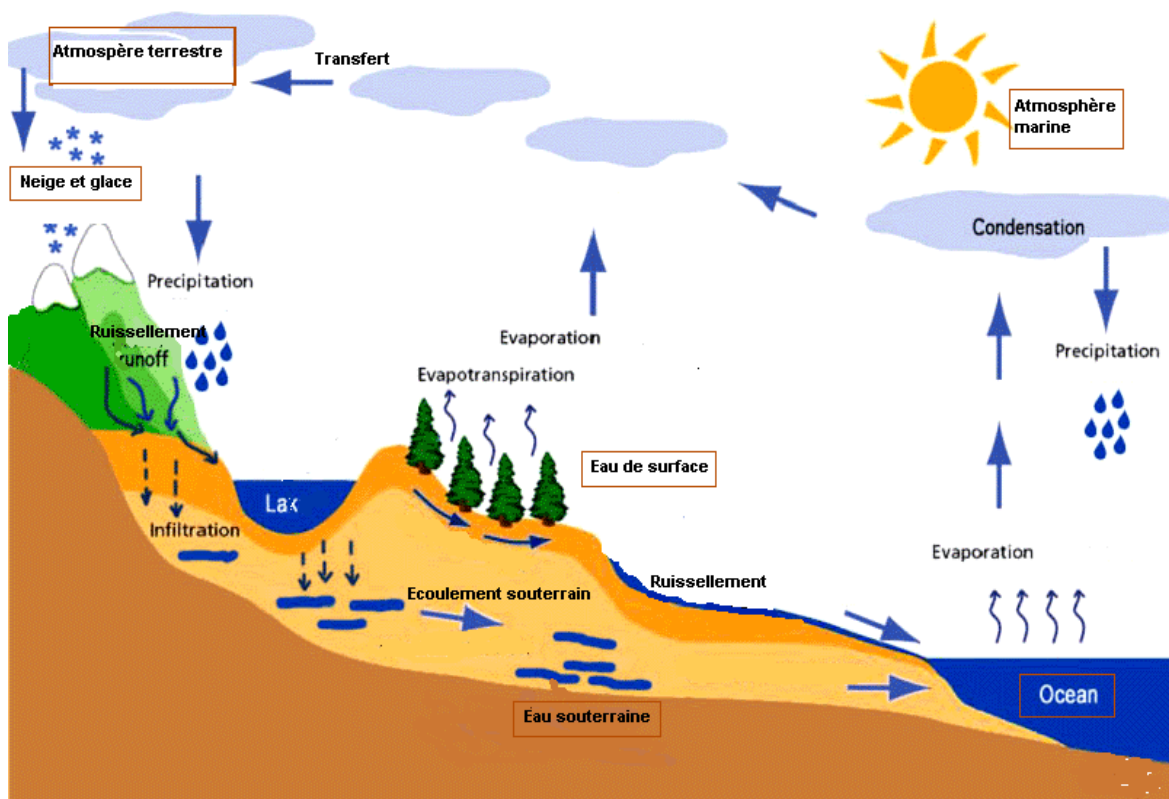


Figure 01: Cycle de l'eau (Brutsaert, W. (2005))

Chapitre I Concepts clés

Les réservoirs d'eau

Le cycle global de l'eau a six principaux réservoirs, endroits dans lesquels l'eau réside sous forme de trois phases : liquide, solide ou gazeuse. Le 1^{er} réservoir qui représente le noyau du cycle de l'eau formé par les océans, il est composé par trois couches (Couche superficielle ou de mélange avec 50 à 200 mètres d'épaisseur, la couche thermocline avec une profondeur qui varie de 200 à 1000 mètres, la dernière couche qui est la zone profonde ou abyssale).

L'atmosphère terrestre et océanique représente deux réservoirs, il joue un rôle fondamental dans le transport d'énergie autour de la planète. Les eaux souterraines représentent le 4^{ème} réservoir, ils englobent la zone saturée ; les nappes profondes fossiles ne participent pas au cycle hydrologique. Les eaux de surface forment le 5^{ème} réservoir, ils englobent les lacs, les rivières, la zone non saturée. Les glaciers, la neige et le permafrost forment ainsi un autre réservoir.

Tableau 01 : Caractéristiques des différents réservoirs (Chaine, 1992)

Réservoirs	Masse d'eau (X 10 ¹⁵ kg)	%
Eau salée		
Océans :		
océan superficiel	50 000	
Thermocline	460 000	
Abyssal	840 000	
Total	1 350 000	97.4
Eau douce		
Atmosphère marine	11	0.0008
Atmosphère terrestre	4.5	0.0003
Eaux de surface	275	0.02
Eaux souterraines	8 200	0.59
Neige, glaciers, permafrost	27 500	1.98

Chapitre I Concepts clés

1.2 Estimation des flux d'eau dans le cycle global de l'eau

L'eau se déplace entre les différents réservoirs par différents processus. Les flux du cycle de l'eau sont illustrés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 02 :transfert des flux du cycle de l'eau

Processus	Flux (X 10 ¹⁵ kg/an)
Evaporation des océans	435
Evaporation-transpiration terrestre	71
Précipitation sur les océans	398
Transfert de l'atmosphère marine vers l'atmosphère terrestre	37
Précipitation (pluie) sur la terre	107
Précipitation (neige) sur la terre	1
Fonte des neiges	1
Ruissellement	34
Infiltration	2
Ecoulement souterrain	2

Données modifiées de Chahine, de 1992, et de Gleick, P.H., 1993, pour créer un modèle d'état d'équilibre.

1.3 Processus du cycle hydrologique

1.3.1 Précipitation (pluie)

L'alimentation des réservoirs d'eaux souterraine, et des rivières et des lacs se produit grâce aux précipitations. Les précipitations renvoient l'eau atmosphérique de nouveau vers la surface sous forme de pluie et de neige. Pour que la précipitation se produise, l'eau doit d'abord se condenser ; la vapeur d'eau doit être convertie en liquide et cela implique un dégagement de chaleur. La condensation dépend d'un certain nombre de facteurs, mais en général, elle se produit quand l'air est saturé en vapeur d'eau puis refroidit.

1.3.2 Précipitation (neige)

La neige tombant à la surface d'un glacier s'accumule et se transforme en glace. L'importance de ce flux est proportionnelle à la surface de terre couverte par les glaciers. Il n'y a pas de mesure directe de ce flux.

1.3.3 L'évaporation

L'évaporation est possible dans le cas d'existence d'un gradient de pression de vapeur entre la surface évaporant et l'atmosphère. Une énergie de l'ordre de $2.44 \cdot 10^3 \text{ J/g}$ à 15° est nécessaire pour transformer l'eau en vapeur (AIEA, 2008), cette énergie est fournie par les radiations solaire et la chaleur de l'atmosphère.

Ce mécanisme est contrôlé par deux facteurs à savoir la différence entre la pression de vapeur de l'air (e_A) et la pression de vapeur saturante (e_s) à la température de la surface évaporant, cette différence est appelée déficit de saturation. Le deuxième facteur, est le transport de vapeur ; le mouvement vers le haut dans une couche limite se fait par diffusion moléculaire, au dessus de ce niveau la vapeur se déplace et il est emporté par le mouvement turbulent de l'air, en relation avec la vitesse du vent.

1.3.4 Infiltration

Une partie des précipitations efficace rejoint les nappes d'eau souterraine, cette phénomène est produit par le biais d'une formation géologique perméable, ou grâce à un réseau de fracturation dense ce qui favorise une infiltration rapide des eaux vers la profondeur. L'eau liquide tombant sur la surface a plusieurs possibilités :

- Elle peut tomber dans une étendue d'eau ou couler en surface mais la majorité s'infiltrer dans le sol où elle occupe les pores.
- La fraction de cette eau qui n'est pas rapidement employée par les plantes s'infiltrer plus loin et rejoint le réservoir d'eaux souterraines.
- Sur une échelle globale, il est difficile de mesurer ce flux directement, ainsi des évaluations sont faites entre la différence des précipitations et des flux superficiels.

1.3.5 La fonte glaciaire

La glace des glaciers coule lentement des endroits d'accumulation sur les bords, où elle peut fondre. Le flux qui résulte de la fonte des glaces peut s'ajouter au flux d'infiltration (Infiltration lente et indirect).

1.3.6 Le temps de résidence

L'eau ne circulent pas constamment d'un réservoir à un autre mais peuvent demeurer un temps plus ou moins long dans un réservoir. C'est le temps de résidence (Turn over time). Il est égal à la quantité d'eau contenue dans le réservoir divisé par la somme des flux d'entrée ou la somme des flux sortants.

1.4 Bilan hydrologique

Le bilan hydrique à l'échelle du bassin hydrologique est fondé sur les lois de la continuité et de la conservation de la masse ; il permet d'évaluer les transferts d'eau au niveau d'un système hydrologique ; la base de ce bilan est la différence entre les flux d'eau entrants (Inflow) et les flux d'eau sortant (Outflow) ; en ajoutant la variation du stock. Pour une période d'étude suffisamment longue (30 ans), on peut supposer que la variation des stocks est nul, et les pertes d'eau par infiltration profonde est négligée ; Les différents termes de ce bilan sont explicités par les équations suivantes (Thompson, 1999) :

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad (\text{I.1})$$

$\frac{dS}{dt}$: Storage variation;

$I(t)$: input to the hydrological system;

$Q(t)$: output from the hydrological system

Lorsque la variation du stock est négligeable l'équation II.1 devient :

$$I(t) = Q(t) \quad (\text{II.2})$$

Par similarité avec le cycle hydrologique à l'échelle du bassin versant on peut écrire l'équation (II.2) comme suit

$$P + \text{inflow} = \text{ETR} + \text{Runoff} + \text{GWR} + \text{outflow} \quad (\text{II.3})$$

P: précipitations moyenne annuelle [mm/an]

Inflow : flux d'eau de d'autre bassin [mm/an]

ETR: évapotranspiration réel [mm/an]

Run off: Ecoulement de surface [mm/an]

GWR : recharge moyenne [mm/an]

Oufflow : flux sortant [mm/an].

1.5 L'histoire des eaux thermales et de la Balnéologie

L'eau thermale, par définition, est une eau souterraine qui atteint naturellement une température supérieure à celle de la surface terrestre. Elle est souvent enrichie en minéraux à travers son long parcours dans les couches géologiques. L'intérêt thérapeutique des eaux thermales est documenté depuis l'Antiquité. Aujourd'hui, la balnéologie, qui est l'étude scientifique de l'utilisation thérapeutique des bains et des eaux thermales, constitue un domaine à part entière dans la médecine intégrative.

1.6 Origine géologique et composition des eaux thermales

Les eaux thermales proviennent de l'infiltration des eaux de pluie dans le sous-sol, où elles sont chauffées par le gradient géothermique (en moyenne 3 °C par 100 m). Durant leur circulation profonde, elles se chargent en éléments minéraux (calcium, magnésium, bicarbonates, sulfates, etc.) selon la nature des roches traversées. Les eaux peuvent être sulfatées, chlorurées, ferrugineuses ou sulfurées, et possèdent souvent des propriétés bactériologiquement pures.

1.6.1 Utilisation dans l'Antiquité

Les premières mentions des eaux thermales apparaissent dans les textes d'Hippocrate (400 av. J.-C.), où il différencie les eaux selon leur goût, couleur et effets. Les Romains ont systématisé l'usage thermal à travers les thermes, intégrant l'eau dans leur hygiène et leur médecine. Galien et Asclépiade vantaient les bienfaits des bains dans le traitement des maladies articulaires et dermatologiques.

Certains sites étaient qualifiés de miraculeux, et les cures s'effectuaient sous une dimension spirituelle plus que médicale.

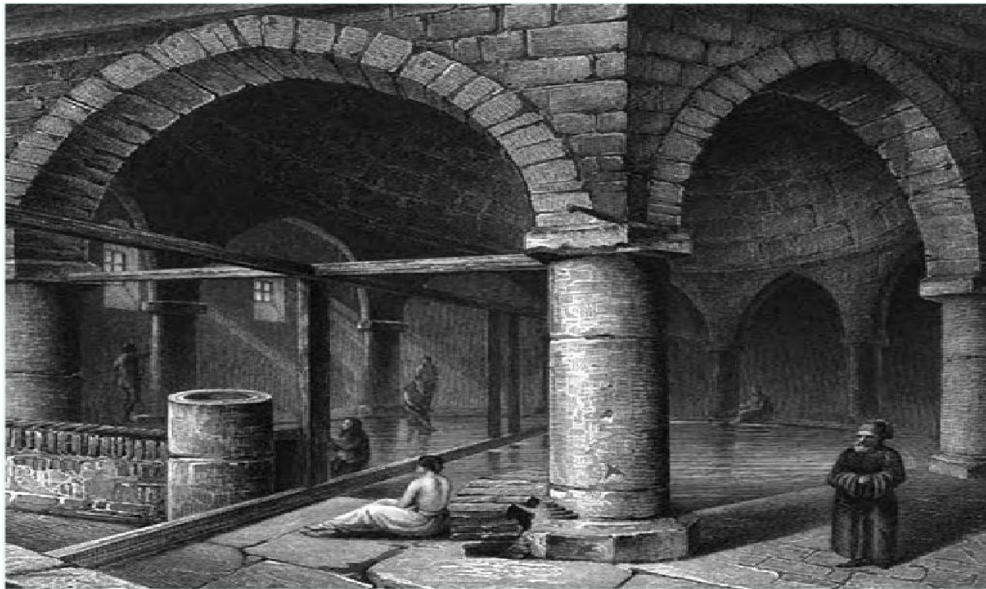


Figure 02: Hammam turc

1.6.2 Renaissance et émergence de l'approche empirique

À la Renaissance, des savants comme Paracelse (XVI^e siècle) ont relancé l'étude des eaux thermales. Il affirmait que « l'eau contient l'âme des minéraux » et s'intéressait à la synergie entre éléments chimiques et propriétés curatives. On assiste à la fondation des premiers établissements thermaux structurés, notamment en France et en Allemagne (Paracelse et al 1538).

Avec les avancées de la chimie et de la médecine, les eaux thermales sont analysées selon leur teneur en ions. Des classifications apparaissent (eaux bicarbonatées, sulfurées, etc.). Des chercheurs comme Balne, Rocques ou Leclerc fondent une base scientifique à la balnéothérapie. Des indications thérapeutiques sont établies selon les pathologies : rhumatismes, affections respiratoires, maladies digestives ((Paracelse et al 1538).

1.6.3 Balnéologie contemporaine et approches cliniques

La balnéologie moderne s'intègre dans des protocoles médicaux reconnus, notamment en France, Allemagne, Italie et Japon. Des études cliniques démontrent les effets bénéfiques des cures thermales sur l'arthrose, les lombalgies chroniques et l'anxiété. La médecine thermique est encadrée, prescrite, et parfois remboursée dans certains systèmes de santé (J-L. Bosson et al 2021).

Aujourd'hui, l'exploitation des eaux thermales doit s'inscrire dans une logique de durabilité. La protection des aquifères, la qualité bactériologique et l'impact environnemental des établissements thermaux sont au cœur des préoccupations. Le thermalisme s'oriente aussi vers le bien-être, la prévention du vieillissement, la remise en forme et la santé mentale (Fournier, R.2005).

L'histoire des eaux thermales témoigne d'une évolution constante, mêlant traditions ancestrales et validation scientifique. La balnéologie, longtemps considérée comme une pratique marginale, se voit aujourd'hui reconnue comme une approche thérapeutique complémentaire fondée sur des bases scientifiques solides. Face aux enjeux de santé publique et de durabilité, le thermalisme reste un domaine en pleine redéfinition, alliant patrimoine naturel et innovation médicale (Bourdeau, P.2011).

1.6.4 Les eaux thermales

Une eau thermale est une eau d'origine souterraine, réchauffée par des processus géothermiques, émergeant à une température supérieure à la température moyenne annuelle de l'air local d'au moins 5°C (Bakalowicz et al., 1987).

Elles sont caractérisées par

- Une Température : >20°C (parfois jusqu'à 80°C+).
- Une Composition : Minéralisée (sulfates, bicarbonates, oligo-éléments).
- Une Circulation profonde (500 à 3 000 m) dans des roches perméables.

1.6.5 Source Hypothermale

Une source hypothermale est une source dont l'eau émerge à une température inférieure à 30°C, mais présentant une minéralisation thérapeutique.

Elles sont caractérisées par

- Une Température : 20–30°C (en dessous de la température corporelle).
- Un Usage : Balnéothérapie douce (relaxation, dermatologie légère).

1.6.6 Source Hyperthermale

C'est une source hyperthermale émet une eau à température très élevée, souvent >50°C, voire >90°C dans les zones volcaniques. Généralement elles sont caractérisées par

- Une Température : 50°C à 350°C (fumeurs noirs océaniques).
- Contexte : Zones géodynamiques actives (volcans, dorsales).
- Exemples : Geysers du Yellowstone (USA), Chaudes-Aigues (France, 82°C).

1.7 Processus d'Émergence des Sources Thermales

L'eau de pluie s'infiltré en profondeur à travers les fractures et les surfaces perméables de la croûte terrestre (Bear, 1972). Une fois en subsurface, elle est progressivement réchauffée, soit par le gradient géothermique moyen (environ 30°C par kilomètre), soit par des sources de chaleur magmatiques locales (Muffler et Cataldi, 1978). Cette eau chauffée devient moins dense et remonte vers la surface sous l'effet de la poussée hydrostatique (Domenico et Schwartz, 1998) ou emprunte des failles actives et des conduits volcaniques (Hochstein et Browne, 2000). Finalement, elle émerge sous forme de sources thermales naturelles ou peut être exploitée par des forages géothermiques (Axelsson et Gunnlaugsson, 2000).

Plusieurs paramètres contrôlent ce processus on peut citer :

- La perméabilité des roches, qui conditionne la circulation des fluides (Ingebritsen et al., 2006) ;
- Le gradient thermique local, qui détermine l'intensité du réchauffement (Turcotte & Schubert, 2014) ;
- L'activité tectonique, à travers le réseau des fractures qui facilite la remontée des eaux chaudes (Sibson, 2000).

Chapitre I Concepts clés

1.7.1 Gradient Géothermique

C'est l'augmentation de la température avec la profondeur, exprimée en °C/100 m.

Les valeurs varient en fonction de la lithologie et l'épaisseur ; a titre d'exemple :

- Global : 3°C/100 m (standard).
- Zones volcaniques : Jusqu'à 10°C/100 m.
- Bassins sédimentaires : <2°C/100 m.

La variation de température en fonction de la profondeur est donnée comme suit :

$$\text{Gradient} = \frac{\Delta T}{\Delta Z} \quad (\Delta T = \text{température}, \Delta Z = \text{profondeur})$$



Figure 03: Le parcours de l'eau thermique

<https://www.medecinethermale.fr/magazine/2023/02/27/5-choses-a-savoir-sur-le-fonctionnement-dune-station-thermale/>

1.8 Aperçu sur l'hydrothermalisme en Algérie

L'hydrothermalisme désigne les phénomènes liés aux eaux chaudes d'origine géothermique, souvent associées à des activités volcaniques ou tectoniques. En Algérie, ces sources thermales sont nombreuses et exploitées depuis l'Antiquité, notamment pour leurs vertus thérapeutiques. Parmi ces sites, Hamam Bouhanifia (dans la wilaya de Mascara) est l'une des stations thermales les plus réputées du pays, décrite comme "un joyau thermal du Maghreb" (Bouabdellah et al., 2018).

Chapitre I Concepts clés

La distribution des eaux thermo-minérales en Algérie est très irrégulière. Le nombre de sources augmente progressivement en se rapprochant de l'est. Cette répartition semble suivre celle des gisements minéraux. Ainsi, on dénombre une vingtaine de sources minérales dans la région d'Oran, une quarantaine dans celle d'Alger et environ 150 dans la région de Constantine.

Dans le Nord, sur une zone s'étendant de l'Atlas saharien jusqu'à la mer, émergent plus de 200 sources chaudes. Leur température varie entre 22 et 98 °C, et leur minéralisation totale en sels dissous se situe entre 4 et 10 g/l. Les réservoirs se trouvent généralement à des profondeurs comprises entre 1 500 et 2 500 m.

Au Sud, l'eau de l'Albien s'étend sur une superficie de 600 000 km². Elle est semi-libre dans la partie ouest et captive et chaude uniquement dans la partie est (Figure 05) . La profondeur du toit de l'aquifère à l'est varie entre 1 000 et 2 600 m, avec une température moyenne de l'eau de 60 °C et un débit d'exploitation de 4 m³/s. La salinité de l'eau est d'environ 3 g/l.

Le potentiel géothermique, obtenu en cumulant le débit total des sources chaudes et celui de l'aquifère de l'Albien exploité, dépasse 700 MW.

L'Algérie possède un potentiel géothermique important en raison :

- De son relief varié (Atlas tellien, Atlas saharien, Hoggar).
- De l'activité tectonique liée à la "convergence des plaques africaine et eurasiennne" (Saadi et al., 2020).
- Des vestiges d'anciens volcans (ex. : volcanisme néogène dans le nord).

1.8.1 Principales régions hydrothermales

- Nord (Tell) : Sources chaudes liées aux zones de subduction (ex. Hammam Righa, Hammam Melouane).
- Hauts Plateaux et Atlas tellien: Sources associées aux failles (ex. Hammam Bouhanifia, Hammam Salhine). Selon Kherroubi (2017), "ces eaux proviennent de circulations profondes le long des fractures crustales".
- Sud (Hoggar) : Activité géothermique résiduelle.

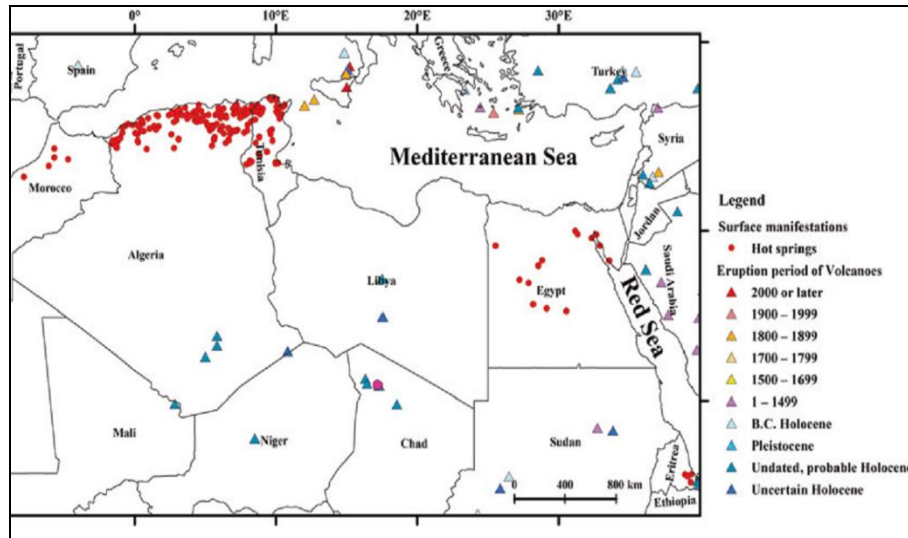


Figure 04: Les manifestations géothermiques en Afrique du nord (Saïbi et al, 2024)

1.8.2 Hammam Bouhanifia

Situé à environ 20 km de Mascara, dans une zone montagneuse, ce site est alimenté par plusieurs sources chaudes.

Les eaux thermo-minérales de cette région, notamment celles de Hammam Bouhanifia et Hammam Rabi, proviennent essentiellement de l'infiltration des précipitations au sein des formations carbonatées des monts de Saïda. Ces reliefs, rattachés à l'Atlas tellien dans l'Ouest algérien, offrent un contexte géologique favorable à la pénétration et à la circulation souterraine des eaux à travers les fissures et les structures karstiques.

Au cours de leur cheminement en profondeur, les eaux se chargent en éléments minéraux au contact des roches encaissantes et se réchauffent progressivement avant de réapparaître en surface sous forme de sources thermo-minérales.

1.8.3 Caractéristiques des eaux

- Température : Entre 50°C et 70°C (Benaïssa et al., 2019).
- Composition : Riches en sulfures, sodium, calcium et magnésium (eaux sulfurées sodiques). "Leur minéralisation est attribuée à l'interaction eau-roche dans les réservoirs géologiques profonds" (Belhai et al., 2016).
- Vertus thérapeutiques : Traitement des rhumatismes, maladies de peau et troubles respiratoires.

1.8.4 Histoire et Exploitation

- Connue depuis l'époque romaine ("Aquae Calidae").
- Réaménagé à l'époque ottomane puis pendant la colonisation française.
- Aujourd'hui, c'est une station thermale moderne avec infrastructures hôtelières.

1.8.5 Importance Économique et Touristique

- Thermalisme médical : Attire des patients pour des cures.
- Tourisme : Hamam Bouhanifia est un lieu de détente prisé.
- Défis : "La gestion durable des ressources thermales nécessite une régulation des prélèvements" (Drouiche, 2022).

1.8.6 Comparaison avec d'autres Sites en Algérie

- Hammam Righa (Aïn Defla) : Eaux à 60°C, fréquenté depuis l'Antiquité.
- Hammam Meskhoutine (Guelma) : Une des sources les plus chaudes (98°C). "Son débit exceptionnel en fait un site unique en Afrique du Nord" (Yousfi et al., 2018).
- Hammam Salhine (Oum El Bouaghi) : Eaux réputées pour les soins cutanés.

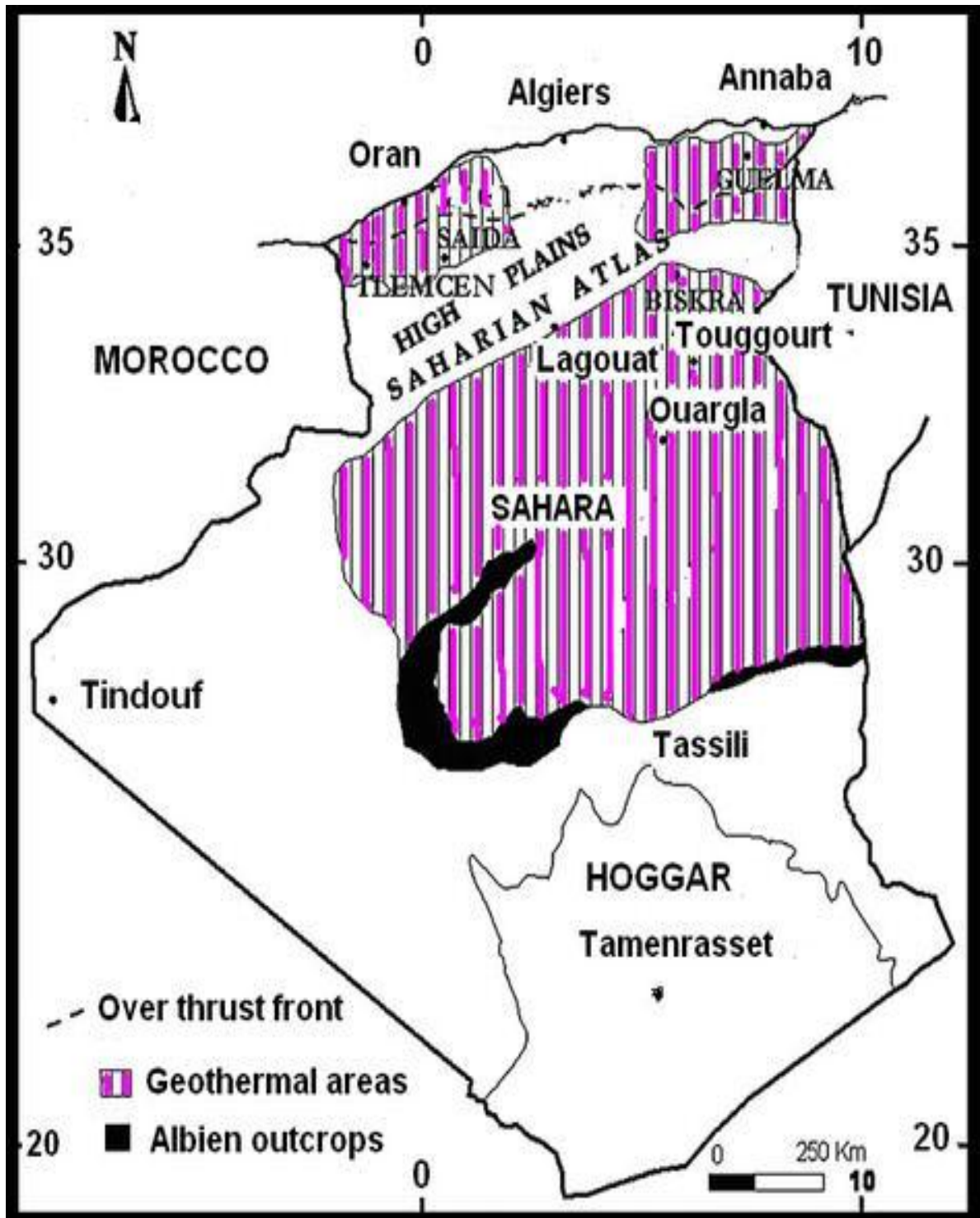


Figure 05: les zones géothermales en algérie
(<https://www.intechopen.com/chapters/77317>)

Chapitre II contexte de la zone d'étude

Chapitre II contexte de la zone d'étude

2 La zone d'étude

La zone thermale de Bouhanifia se situe dans le bassin de l'Oued El Hammam, qui s'étend sur une superficie de 14 389 km². Elle est localisée à environ 25 km au sud-ouest de la ville de Mascara (Figure 06). La région de Bouhanifia se trouve dans la partie nord de l'Atlas tellien, à une altitude de 230 mètres.

La zone thermale de Bouhanifia est délimitée comme suit :

- Au nord-est : par les montagnes de Beni Chougrane (avec une altitude d'environ 800 mètres).
- À l'ouest : par les monts de Bouhanifia.
- Au sud : par les massifs karstiques jurassiques de Saïda (avec une altitude d'environ 1 200 mètres).

Les sources chaudes de Bouhanifia se trouvent sur la rive droite de l'Oued El Hammam, où elles sont principalement recueillies au sud-est par le barrage hydraulique de Bouhanifia. Elles s'étendent vers la section nord-ouest, s'étirant jusqu'à un site connu sous le nom de « Grotte aux Pigeons ». Cette région est également réputée pour abriter une forte concentration de sources thermales, appelées localement « sources Hammat », sur une distance d'environ 7 km (Benamar et al., 2021).

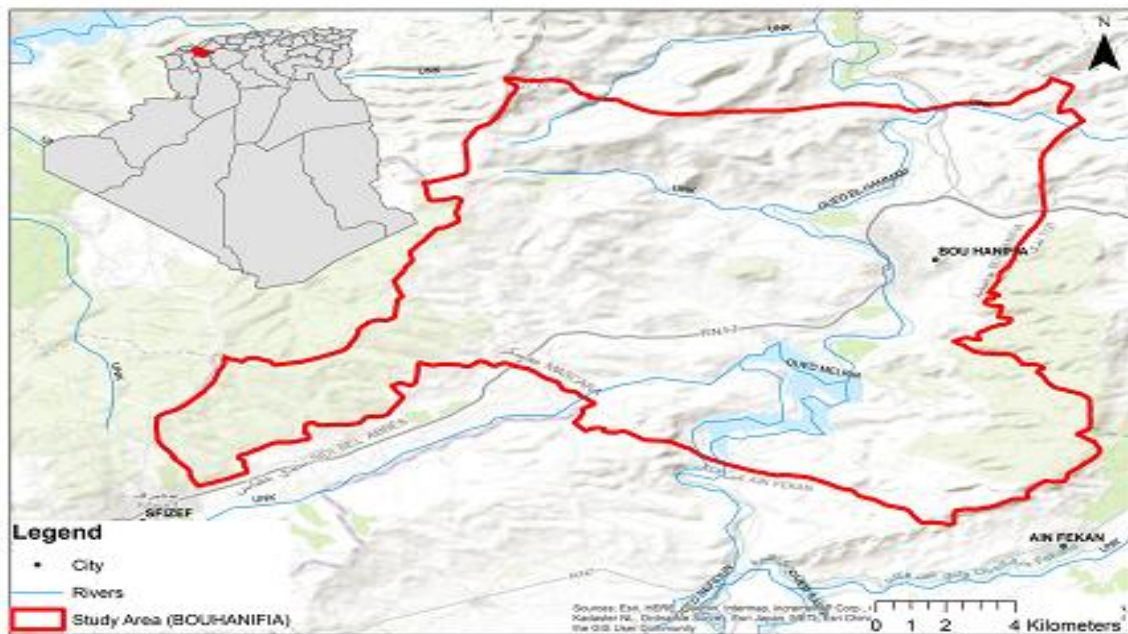


Figure 06: situation de la zone d'étude

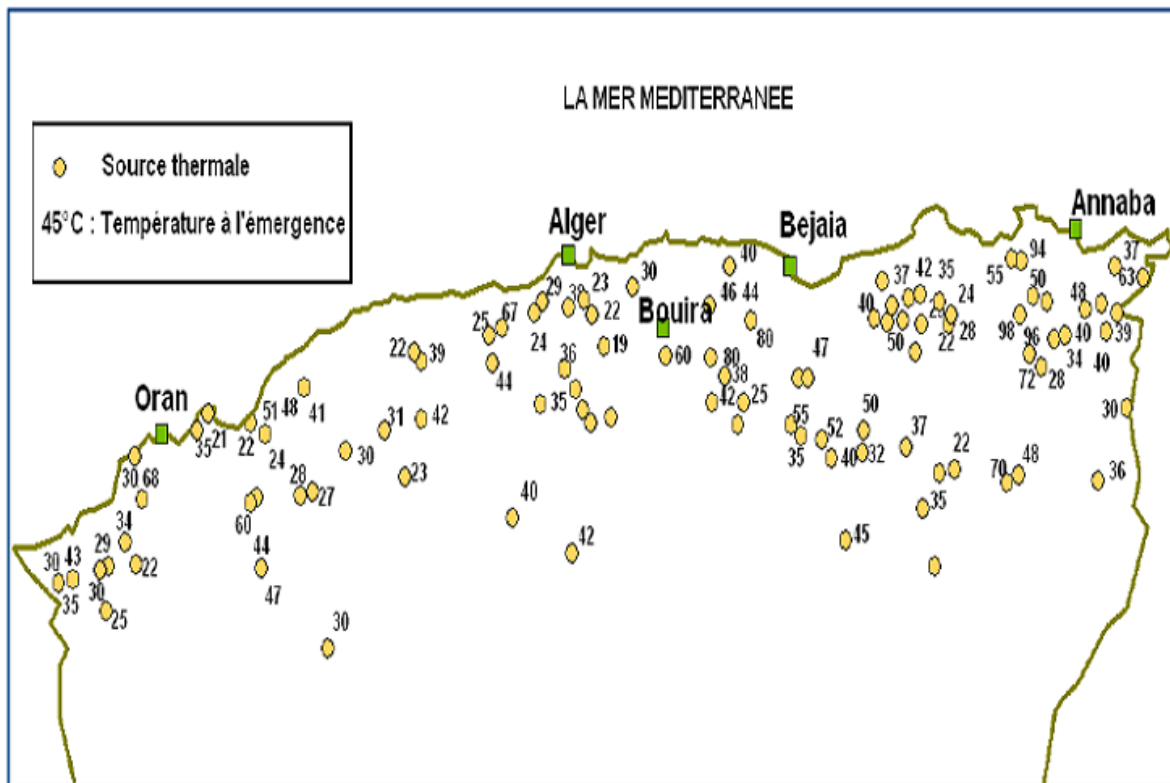


Figure 07: Les principaux griffons du Nord Algérien (Issadi, 1996)

2.1 Etude Hydro climatologique

2.1.1 Introduction

L'étude hydroclimatologique est une étape essentielle pour analyser les interactions entre les conditions climatiques et le cycle hydrologique. Elle vise aussi à comprendre comment les variations du climat influencent les ressources en eau, notamment à travers la distribution des précipitations, l'évaporation, l'infiltration et l'écoulement des cours d'eau. L'étude hydroclimatologique est un outil fondamental pour comprendre la dynamique géothermique, et comprendre les interactions avec le climat et les ressources en eau souterraines.

L'évolution des conditions climatiques affecte directement le régime des précipitations, l'infiltration de l'eau et la recharge des aquifères profonds qui alimentent les sources thermales. Les fluctuations climatiques influencent également les paramètres hydrologiques, et hydrodynamique de l'aquifère.

Les données hydroclimatique (Précipitations, température, humidité et vent) sont collectées auprès l'office national de la météorologie (ONM) ; la période d'observation couvre la période 2006-2015.

Chapitre II contexte de la zone d'étude

2.1.2 Données climatiques

2.1.3 Précipitations

La variation mensuelle des précipitations moyenne est illustrée dans la figure 08 et le tableau 03

Tableau 03:précipitations mensuelles pour la période 2006-2015

Jan	Fevr	Mars	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Tota
56,6	45,8	37,4	60,1	23,0	13,5	3,1	6,9	23,0	42,9	58,2	47,4	417,9

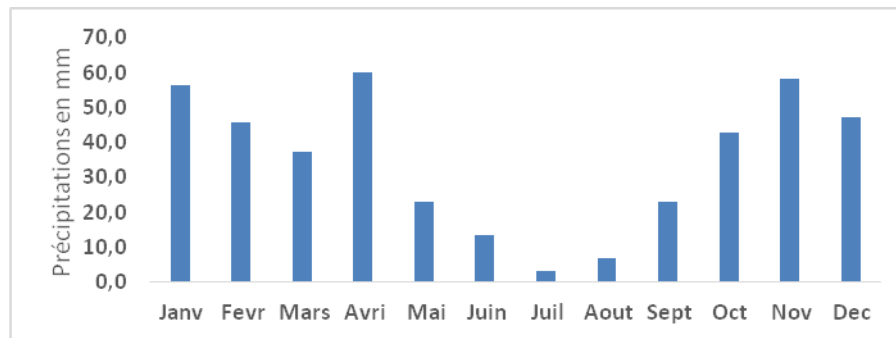


Figure 08:précipitations moyennes mensuelles pour la période 2006-2015

Les résultats illustré dans la figure 08 montrent une variation remarquable dans les valeurs des précipitations pour la période observée, le mois le plus sec correspond au juillet avec une précipitation de 3 mm ; le mois le plus arrosé est celui d'Avril avec une précipitation moyenne de 60 mm. Les précipitations annuelles atteignent une moyenne de 417 mm.

La figure 09, montre la variation des températures pour la même période d'observation ;

Chapitre II contexte de la zone d'étude

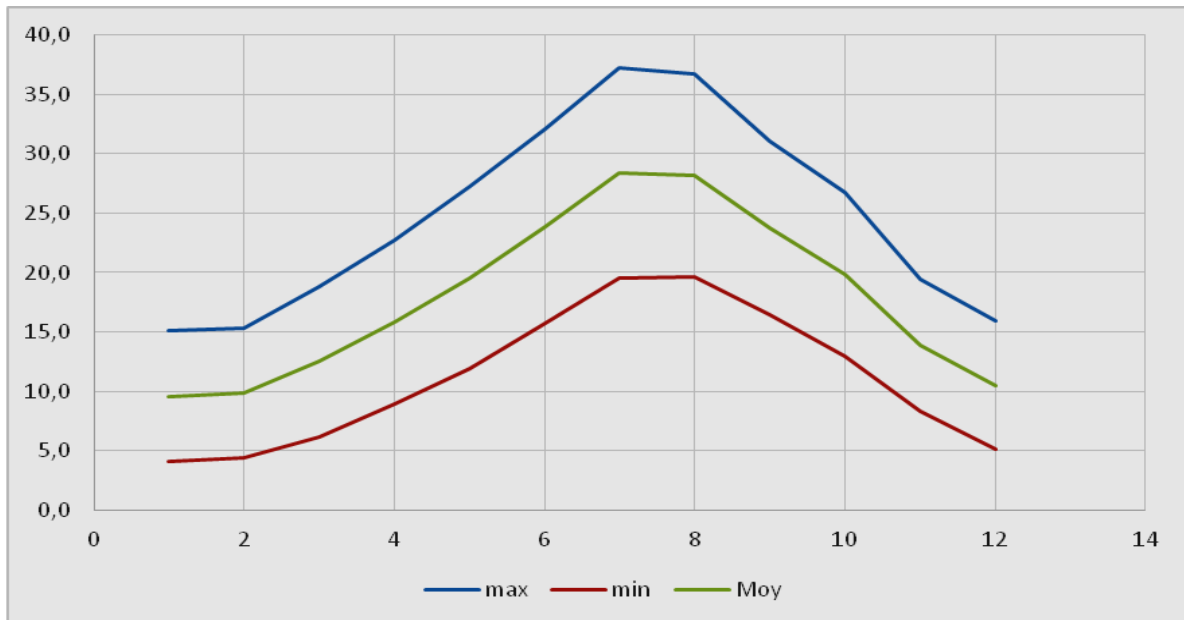


Figure 09: variations des températures 2006-2015

La température est un indicateur climatique très important pour les études hydrologique, la région d'étude se caractérise par des températures moyennes qui varient entre 9,6°C correspond au mois de janvier ; et 28,4°C correspond au mois d'aout.

La figure 10 illustre la variation mensuelle de l'humidité de l'air,

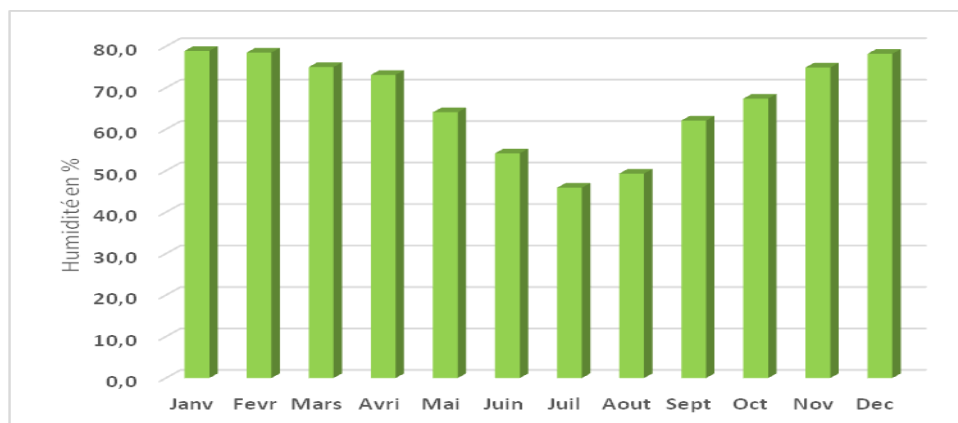


Figure 10: humidité de l'air en % pour la période 2006-2015

L'humidité relative de l'air exprime la saturation en vapeur d'eau, la variation mensuelle de l'humidité dans la région varie entre 45% observé dans le mois de juillet ; et 79% correspond au mois de janvier.

Les figures 11 et 12 montrent la corrélation entre les précipitations et l'humidité de l'air, l'humidité et la température.

Chapitre II contexte de la zone d'étude

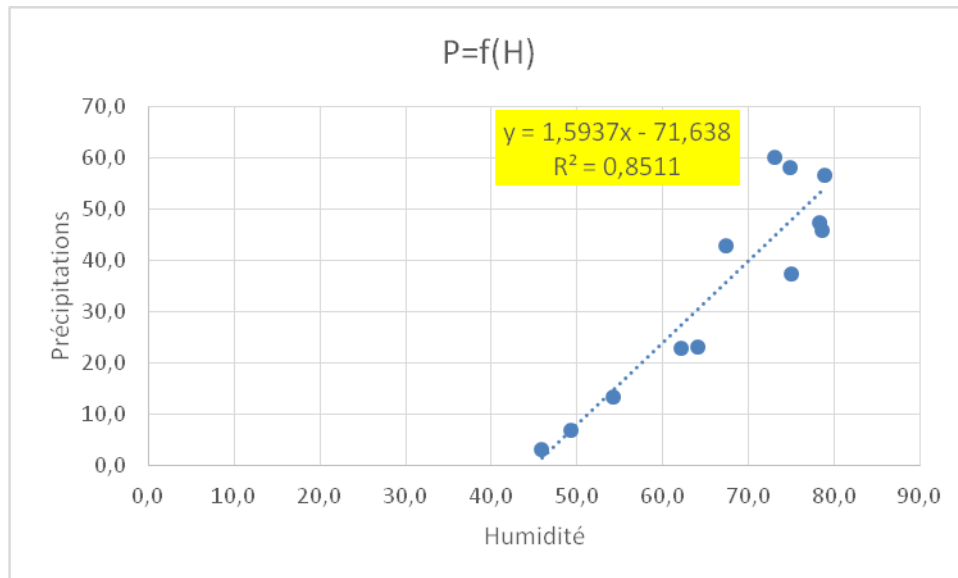


Figure 11: Précipitations en fonction de l'humidité

L'interprétation de la corrélation entre les variables Précipitations et Humidité révèle une relation étroite et directe entre elles, comme le montre le coefficient de détermination ($R^2 = 0,85$). Ce coefficient, qui mesure la proportion de la variance dans les précipitations expliquée par l'humidité, indique que près de 85 % de la variation des précipitations peuvent être attribuée aux variations de l'humidité.

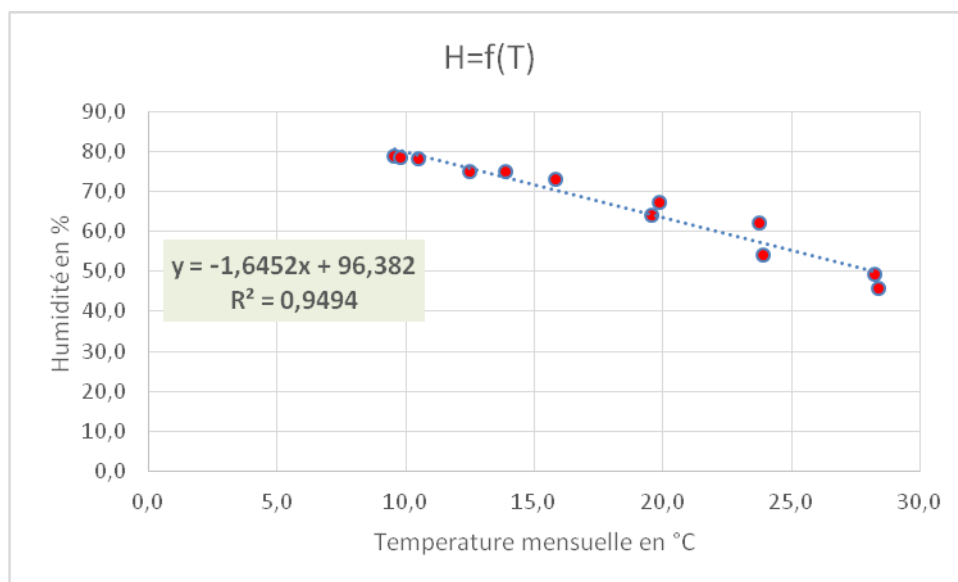


Figure 12: Humidité de l'air en fonction de la température

De l'autre côté, il est observé que la variation de l'humidité est étroitement liée aux fluctuations des températures de l'air. La figure 6 met en évidence une corrélation inverse entre l'humidité et la température mensuelle, avec un coefficient de détermination remarquable atteignant environ 0,94.

Chapitre II contexte de la zone d'étude

Cette forte corrélation entre l'humidité et la température suggère que lorsque la température de l'air augmente, l'humidité tend à diminuer, et vice versa. Cette relation est cohérente avec les principes de thermodynamique atmosphérique, où une augmentation de la température peut entraîner une évaporation plus rapide de l'humidité, réduisant ainsi le taux d'humidité relative dans l'air.

2.2 Type de climat

2.2.1 L'indice d'aridité de De MARTONE (1923)

Pour déterminer le type de climat dominant dans la région de Bouhanifia, nous utilisons l'indice d'aridité de De Martonne (1923). Cet indice permet de classer le climat dominant en se basant sur deux paramètres principaux : la température et les précipitations. Indice annuelle (Ia)

Il est calculé par la formule suivante :

$$Ia = \frac{P}{T+10}$$

Où Ia : indice d'aridité annuelle de De Martonne, P : précipitation moyenne annuelle en mm, T ; température moyenne annuelle en °C

Suivant les valeurs obtenues on peut déduire facilement le type de climat dominant dans la région d'étude.

$$Ia = \frac{417}{18 + 10} = 14,89$$

Tableau04 : classification de De Martone (1923)

Indice d'aridité	Type de climat
I=5	Climat hyper-aride
5 < I < 7.5	Climat désertique
7.5 < I < 10	Climat steppique
10 < I < 20	Climat-semi-aride
20 < I < 30	Climat tempéré

L'indice d'aridité calculé pour la région de Bouhanifia (Période 2006-2015) est de l'ordre de 14,89 cette valeur correspond à un climat de type semi-aride.

2.2.2 Hydrologie de Bouhanifia

Le bassin versant de l'Oued El Hammam (code 11), d'une superficie de 8 348 km², se situe au nord-ouest de l'Algérie. S'étirant sur le flanc nord des hautes plaines oranaises, il présente une forme allongée avec une altitude moyenne de 790 m (El Mahi et al 2012).

Chapitre II contexte de la zone d'étude

2.3 Relief et altitudes

- 65% du bassin se trouve en dessous de 1 000 m d'altitude.
- 3,6% du territoire culmine à plus de 1 200 m d'altitude.
- Le point culminant dépasse les 1 400 m à proximité de la confluence avec la Macta

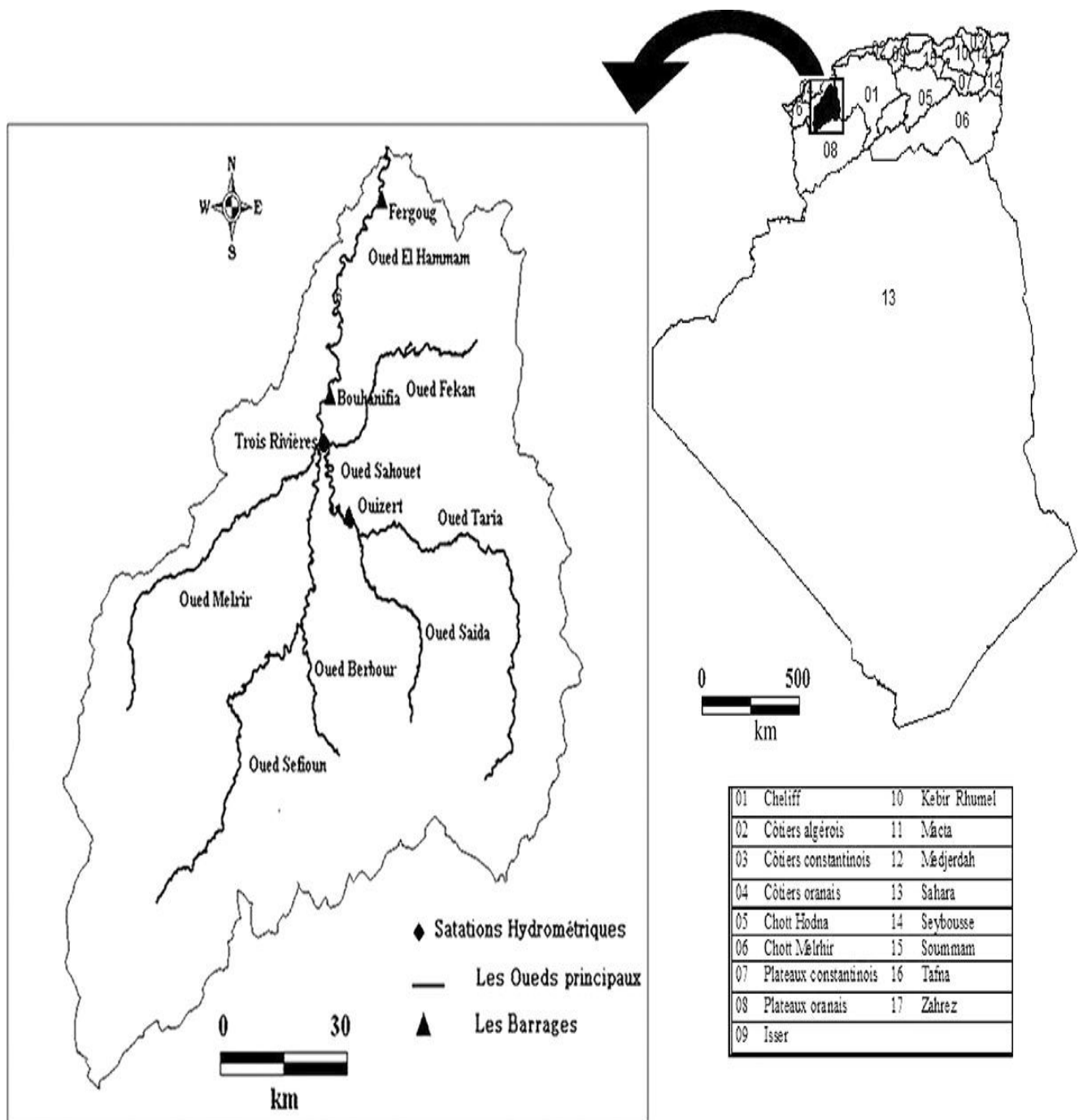


Figure 13 :situation du bassin de Oued EL hamam (El Mahi et al 2012)

Chapitre II contexte de la zone d'étude

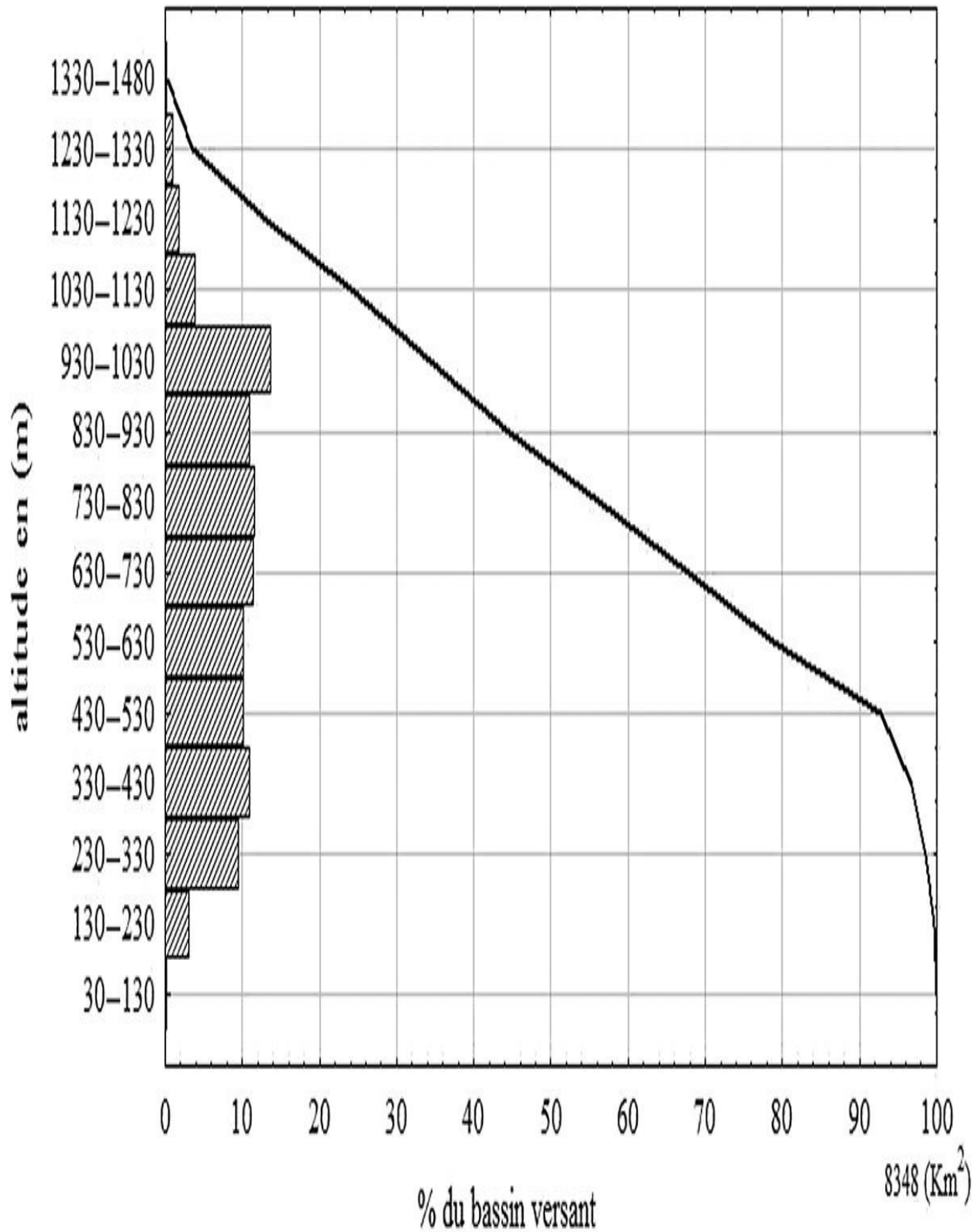


Figure 14 : Courbe hypsométrique (El Mahi et al 2012)

Chapitre II contexte de la zone d'étude

3 Contexte géologique et hydrogéologique

L'hydrogéochimie des eaux thermales de Bouhanifia est influencée par des paramètres essentiels tels que le contexte climatique, qui régit l'alimentation du réservoir, et la géologie du système. Une connaissance approfondie de la géologie régionale est capitale pour comprendre les mécanismes d'alimentation, identifier les processus géochimiques qui influencent la minéralisation et la composition chimique des eaux thermo minérales de la région.

3.1 Domaines structuraux de l'Algérie

L'Algérie fait partie de l'ensemble Nord-Ouest africain, et si l'on examine un schéma structural de cette zone, deux domaines principaux sont mis en évidence:

- i. Un domaine méridional, le Sahara, où affleurent les socles précambriens du Hoggar et des Eglab, et leur couverture phanérozoïque la dalle saharienne. Leur équivalent marocain correspond à l'Anti-Atlas.
- ii. Un domaine septentrional, la zone atlasique, comportant un Atlas saharien au Sud, qui se prolonge à l'Ouest (Maroc) par le Haut Atlas et à l'Est par l'Atlas tunisien. Au Nord, l'Atlas tellien, domaine varié et très complexe ayant aussi des équivalents au Maroc (le Rif et le Pré-Rif) et en Tunisie (Kroumirie et Nefza, 1970–1980).

Entre les deux Atlas affleurent les Hautes plaines qui se terminent à l'est par la chaîne du Hodna et se continuent à l'Ouest par la Meseta oranaise et au-delà des Atlas (Haut et moyen Atlas) par la Meseta marocaine, qui se noie dans l'Atlantique. Entre les ensembles sud (plate-forme saharienne) et Nord (l'ensemble atlasique), un énorme accident de valeur continentale est connue ; l'Accident Sud Atlasique (ASA), qui va d'Agadir (Maroc), jusqu'à Gabes (Tunisie). Il passe en Algérie aux environs de Biskra, Laghouat... (Fabre, J.1976).

Chapitre II contexte de la zone d'étude

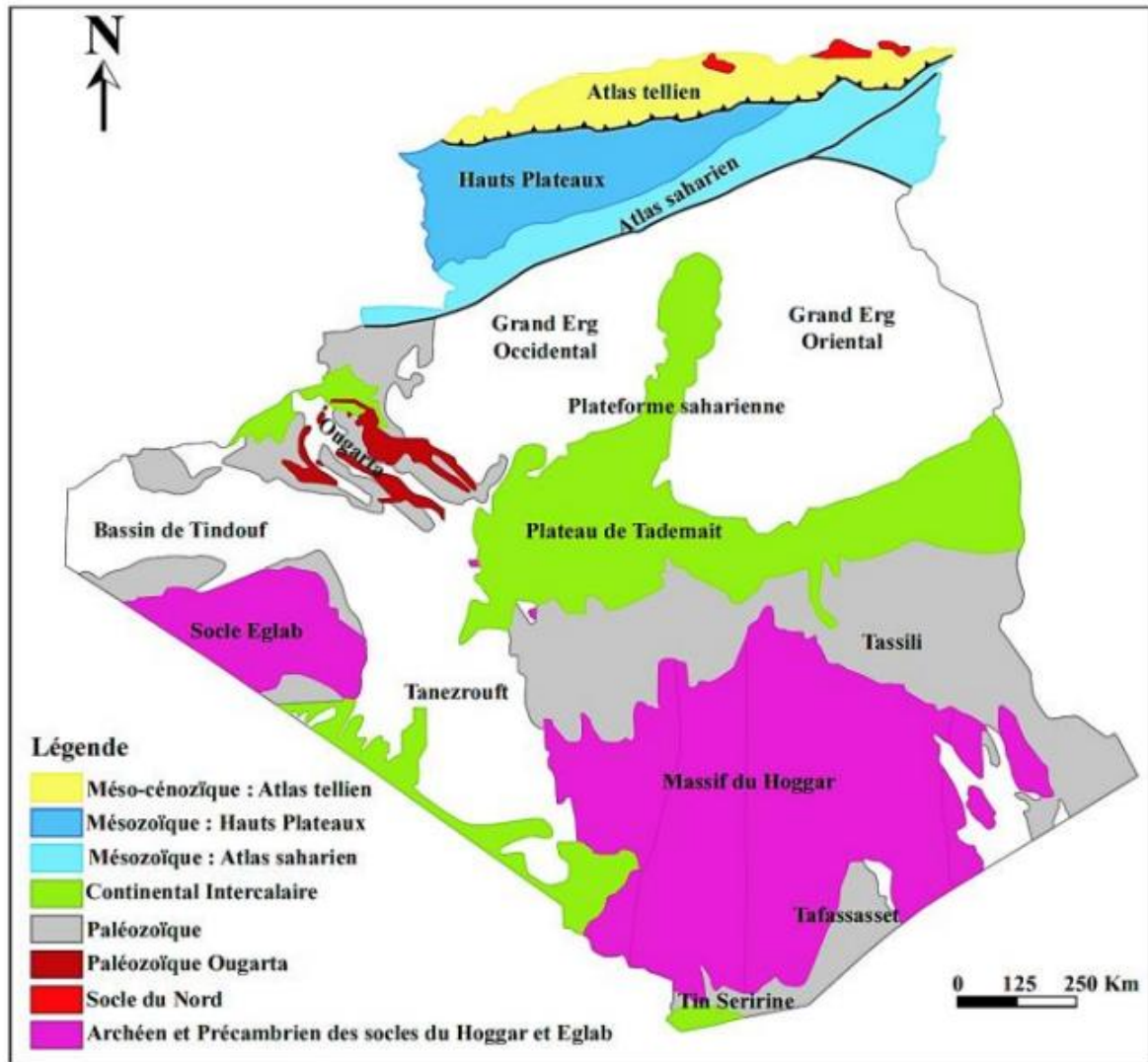


Figure 15: Domaines géologiques et structuraux de l'Algérie (ASGA-2020)

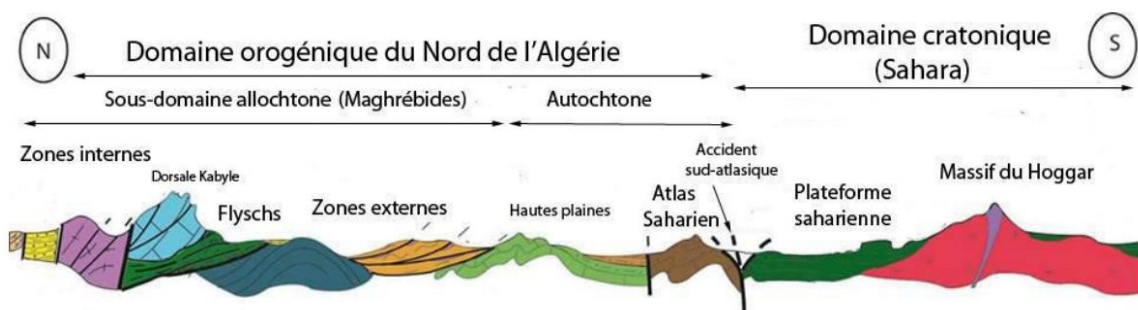


Figure 16: Coupe géologiques Nord - ouest montrant les principales unités structurales du Nord algérien (Chabou, 2015; Nedjraoui, 2017)

Chapitre II contexte de la zone d'étude

La géologie de la région autour du centre de Bouhanifia, décrite par M.A. Cornet, révèle une séquence d'événements géologiques ordonnés chronologiquement.

3.1.1 Nummulitique

- Le sillon sud-tellien se distingue à nouveau, formant un bras de mer étroit.
- Des dépôts du Sénonien sont déposés, comprenant des calcaires crayeux blancs ou bleuâtres avec du silex noir, abondamment exposés le long des deux rives de l'Oued el Hammam.

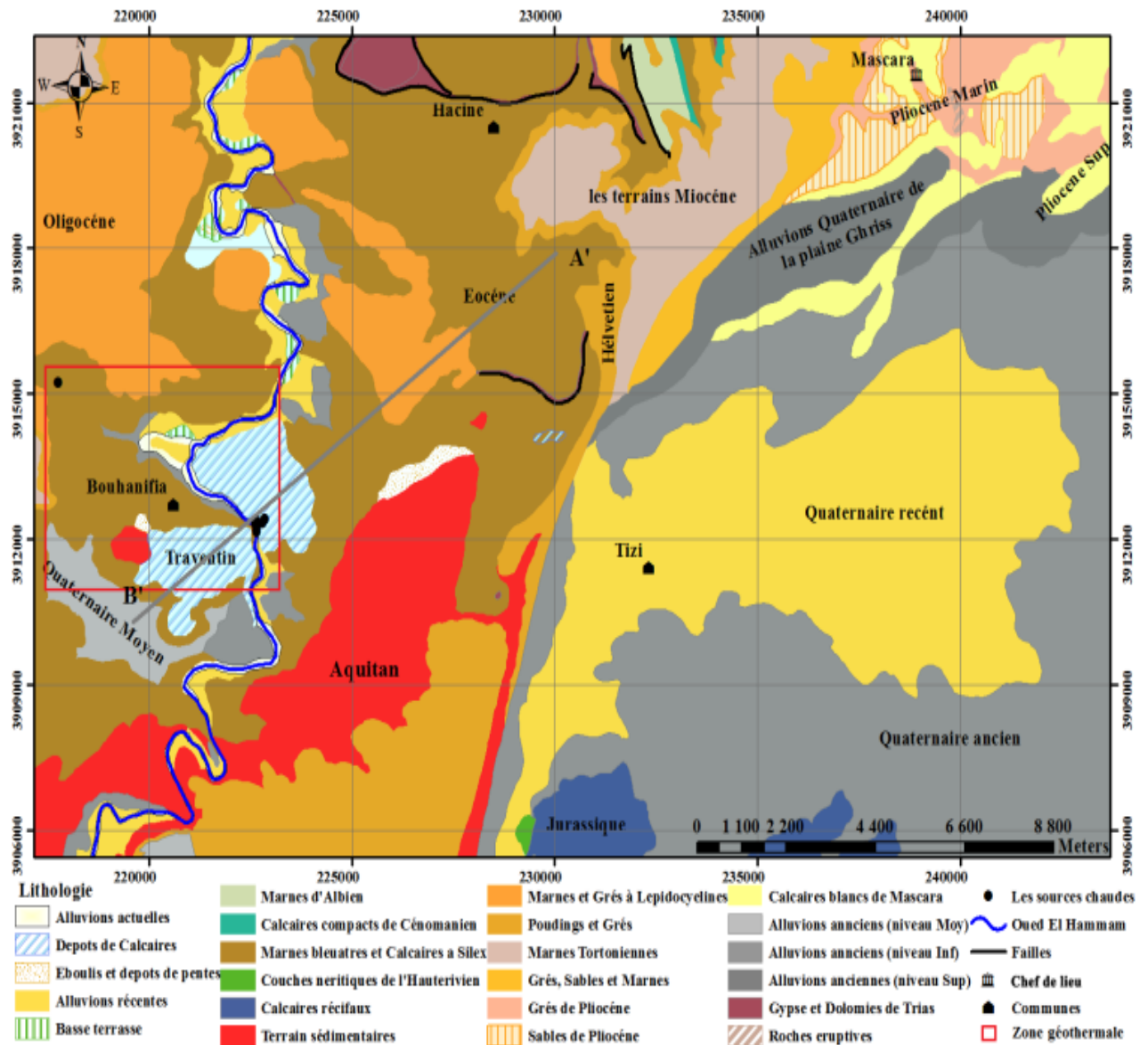


Figure 17: Carte géologique de Mascara N212 Dalloni 1926, modifiée

Chapitre II contexte de la zone d'étude

3.1.2 Éocène

Le sommet de l'Éocène présente un faciès moins profond, caractérisé par des grès à Thersitées, indiquant une surrection éonummulitique et une importante régression.

La totalité du bassin de l'Oued el Hammam émerge pour la première fois, entraînant une phase d'érosion consécutive aux importants plissements affectant le sillon sud-tellien.

3.1.3 Oligocène

Une transgression oligocène s'étend jusqu'à la lisière nord de la Meseta oranaise, déposant des grès et des marnes blanches à Lepidocyclines, avec des lentilles fréquentes de calcaire à lithothamnium.

Une émergence totale de l'Algérie au Nummulitique supérieur entraîne une intense érosion des sommets et le dépôt d'un aquitanien continental, caractérisé par des couches rouges, des grès et des sables, localisés dans de multiples bassins continentaux.

3.2 Néogène (Miocène et Pliocène)

Durant le Miocène et le Pliocène, une succession de dépôts marins et continentaux se dépose sur cette paléogéographie complexe. Deux transgressions successives sont identifiables dans le Néogène : Une au Miocène inférieur, avec des dépôts marins discordants sur un substratum fortement plissé, suivis de niveaux continentaux supérieurs du Miocène, comprenant des marnes dures, des grès, et des conglomérats.

Une autre au Pliocène, avec une base encore marine au nord-ouest du bassin, mais avec des calcaires lacustres importants dans la partie moyenne et des dépôts détritiques dans la partie supérieure, comprenant des limons roses ou rouges, des conglomérats, et des croûtes

Chapitre II contexte de la zone d'étude

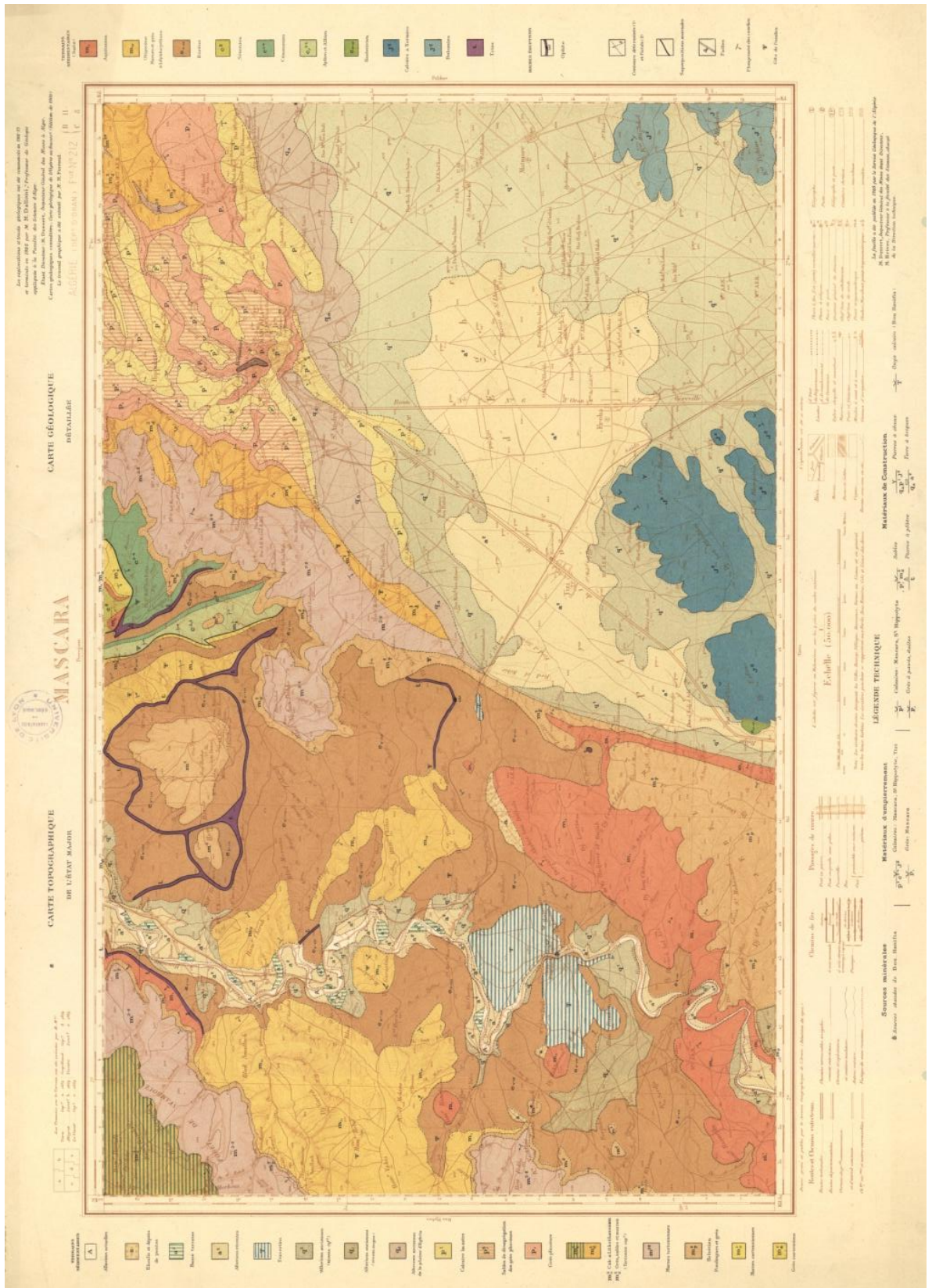


Figure 17: Carte géologique de Mascara

Chapitre II contexte de la zone d'étude

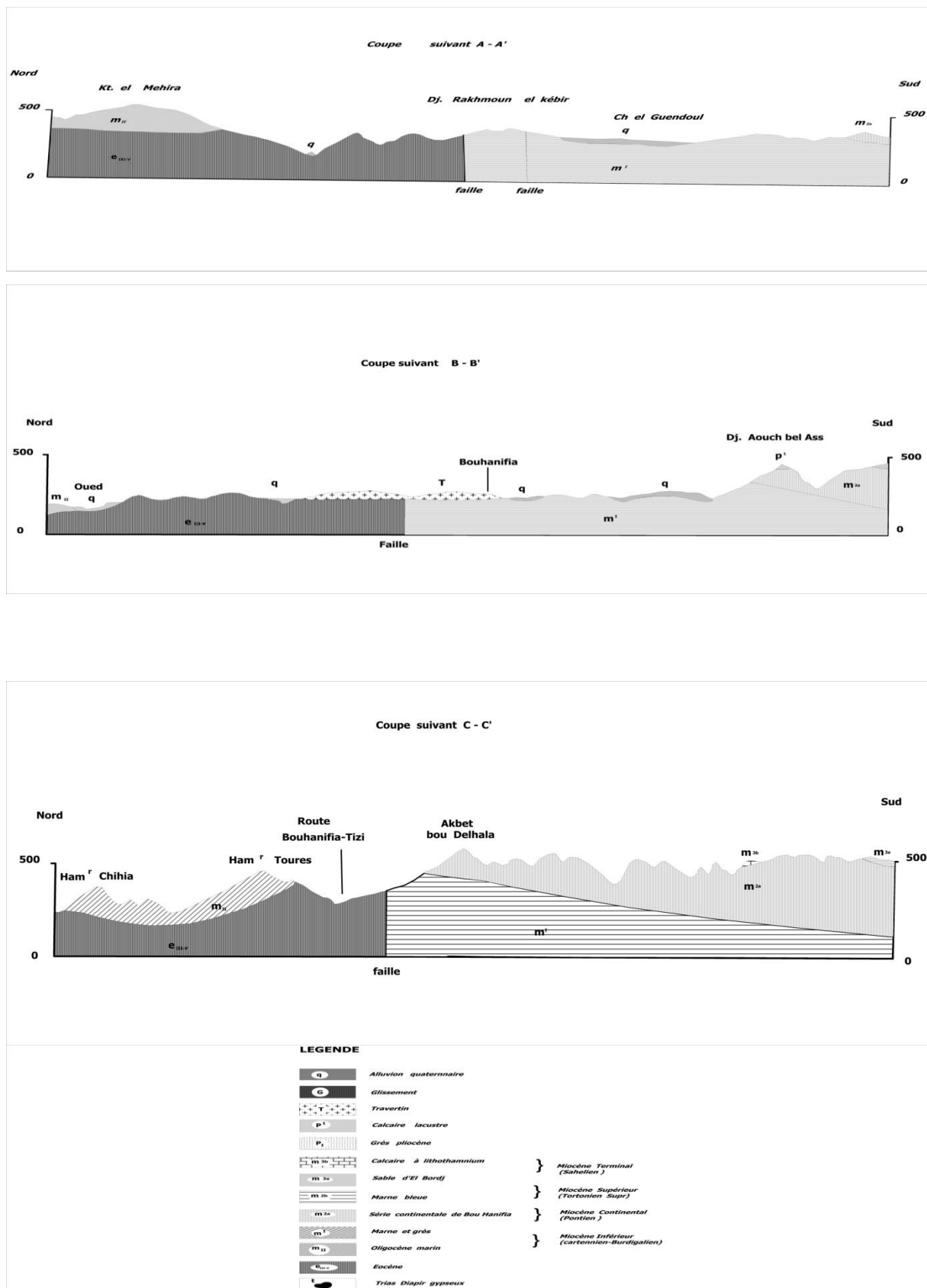


Figure 18: Coupes Géologiques (Benamar et al ,2023)

Chapitre II contexte de la zone d'étude

La partie septentrionale de l'Algérie présente une géologie complexe appartenant à la marge nord-africaine et s'intègre dans la ceinture alpine-maghrébine, qui s'étend de Gibraltar à la Sicile-Calabre (Domzig et al. 2006 ; Auboin et Durand-Delga 1971).

La zone d'étude se situe dans les domaines externes (Fig. 2), dits zones telliennes (Wildi 1983), caractérisées principalement par des plis miocènes et des nappes de charriage B, chevauchant vers le sud l'avant-pays atlasique.

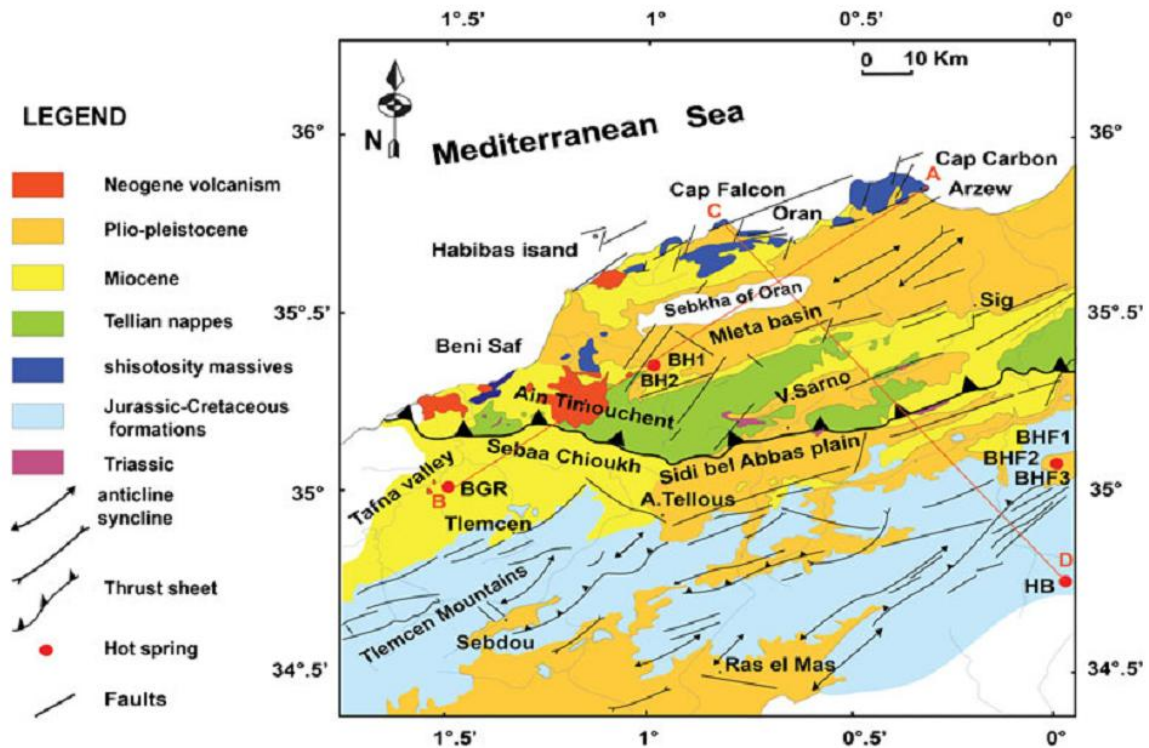


Figure 19: carte géologique de la région nord west (Belhai et al, 2016)

On a **Bouhdjar** (BH1 et BH2) et **Bouhanifia** (BHF1, BHF2 et BHF3).

Au nord, les massifs côtiers schisteux du Cap Carbon et du Cap Falcon reposent sur un socle granitique et métamorphique d'âge paléozoïque, recouvert par une séquence mésozoïque argileuse et évaporitique.

Au sud, les bassins de Habra, Mleta et Tafna, d'âge miocène à plio-pléistocène, sont principalement constitués de grès, d'argiles et de conglomérats, formés lors de la phase extensive du Miocène inférieur. L'activité tectonique extensive dans le bassin de Mleta se manifeste par une plaine saline (Sebka d'Oran), composée essentiellement d'une séquence évaporitique messinienne, mise en place lors du Miocène supérieur avec la fermeture de la Méditerranée (Aifa et al. 2003). Depuis le Crétacé supérieur, cette sebka a évolué selon une dynamique propre, influencée par une faille profonde d'orientation NE-SW.

Chapitre II contexte de la zone d'étude

Les bassins post-charge miocènes sont principalement affectés par des failles inverses NE-SW et des plis en échelon, développés lors de la phase compressive du Miocène supérieur au Quaternaire récent, résultant de la fermeture de la Méditerranée. Ce raccourcissement, lié à la convergence des plaques ibérique et eurasienne, est estimé entre 3 et 6 mm/an (Belabbès et al. 2008 ; Nocquet et Calais 2004 ; Serpelloni et al. 2007).

Ces bassins post-charge miocènes sont situés entre l'unité de charriage de Sebaa Shioukh et les massifs côtiers au nord. L'unité de Sebaa Shioukh est principalement constituée de carbonates et dolomies marines d'âge crétacé, affleurant entre les monts de Tlemcen et le bassin miocène de Mleta. Dans cette zone, le socle évaporitique triasique borde des failles profondes NE-SW, ayant engendré des extrusions localisées de gypse et d'anhydrite au Trias supérieur. Plus au sud, les monts de Saida sont formés d'épaisses séries jurassiques de dolomies et carbonates, résultant de la superposition de phases extensives et compressives d'âge alpin depuis le Crétacé supérieur. Ces structures s'étendent jusqu'aux monts de Tlemcen avec une orientation ENE-OSO à E-O, formant des horsts.

Dans l'extrême nord de la région, entre les secteurs d'Aïn Témouchent et Beni Saf, une activité magmatique post-collisionnelle de type calco-alcalin et basaltique alcalin s'est manifestée (Fig. 3a). Cette activité est associée à des processus tectoniques régionaux le long d'une ceinture orientée NE, s'étendant de la zone d'Alboran au Tell algérien, ainsi qu'au Moyen Atlas et à l'Anti-Atlas marocains. Sa signature géochimique est comparable à celle d'un basalte d'île intra-océanique (Chalouan 2008).

Pour ce magmatisme orogénique néogène du nord-ouest algérien, l'âge des roches calco-alcalines varie entre 7,5 et 11,5 Ma, tandis que celui des basaltes alcalins est compris entre 0,8 et 3,9 Ma (Coulon et al. 2000 ; Louni-Hacini et al. 1995). Ces éruptions sont observées dans l'unité de Sebaa Shioukh, la région d'Aïn Témouchent, et à proximité du champ géothermique de Bouhdjar (BH1 et BH2).

Chapitre II contexte de la zone d'étude

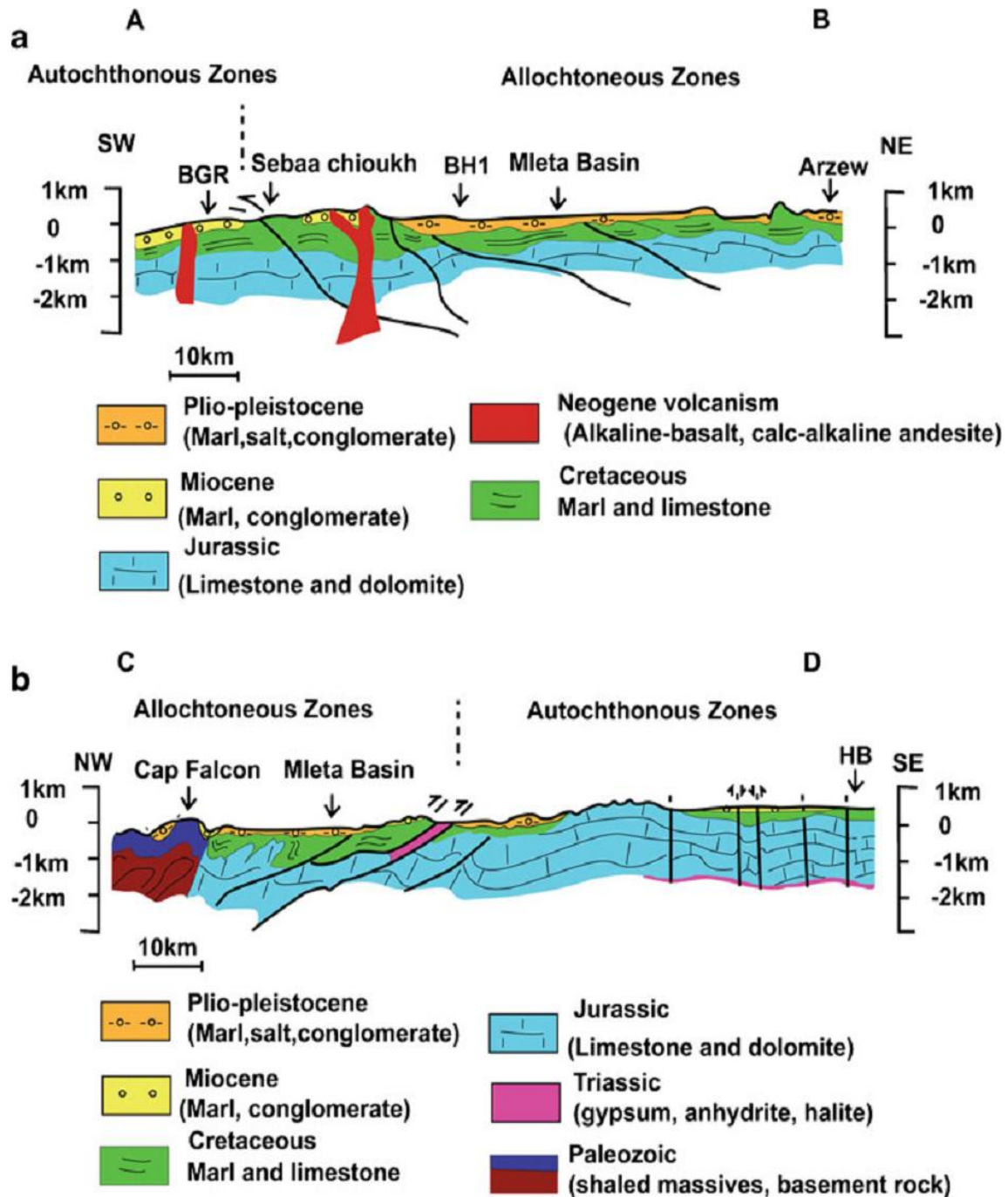


Figure 20: coupes géologiques (Belhai et al, 2016)

Ces schémas illustrent une zone de contact entre des terrains **autochtones** (restés en place) et des zones **allochtones** (déplacées). Les lignes noires avec des flèches indiquent des **failles de chevauchement**, où des roches anciennes ont été poussées par-dessus des formations plus récentes lors de collisions tectoniques.

Chapitre II contexte de la zone d'étude

La région présente une grande diversité de roches :

Socle ancien : Des massifs paléozoïques profonds visibles au niveau de Cap Falcon.

Couches intermédiaires : Des formations massives de calcaires et dolomies du Jurassique et du Crétacé.

Couche de "savon" : La présence de **Trias** (gypse et sel) qui a servi de lubrifiant pour le glissement des nappes terrestres.

Bassins récents : Des zones comme le bassin de la **Mleta** remplies de sédiments plus tendres (marnes et conglomérats).

La coupe (a) met en évidence du **volcanisme néogène** (en rouge), montrant que de la lave a traversé l'empilement sédimentaire pour atteindre la surface.

3.3 Les facies du néogène et du quaternaire

3.3.1 Miocène inférieur marin (Burdigalien – Cartennien)

Aux environs de Bouhanifia, les affleurements du Miocène inférieur sont limités au nord par une faille orientée approximativement est-ouest, passant au nord du village. Cette faille est délimitée par le versant septentrional du Rkhmoun el Kebir et la source de Aïn Tizi. Au sud de cet accident, les marnes inférieures affleurent largement. Elles sont de nature bréchique, avec une épaisseur pouvant atteindre 500 mètres. (Saadi, M. 1990).

3.3.2 Miocène continental

Une importante série continentale succède au Miocène marin inférieur. Une faune de vertébrés découverte au niveau du barrage de Bouhanifia est comparable aux faunes pontiennes. De nombreuses variations de faciès sont observées, attestant parfois de récurrences marines de courte durée ou de phases lagunaires.

Au barrage de Bouhanifia, le complexe continental comprend essentiellement :

- un ensemble sableux d'environ 70 m d'épaisseur,
- surmonté d'un ensemble marno-gréseux d'environ 100 m.

La faune à Hipparion se situe environ 150 m au-dessus du sommet du Miocène marin. La puissance totale du complexe continental atteint environ 400 mètres.

À l'est, vers Tizi et Aïn Fekan, le sommet passe à des calcaires à Lithothamnium, tandis que la base est saumâtre et marneuse.

3.3.3 Miocène supérieur marin (Tortonien – Sahélien)

Une récurrence marine vient coiffer la série continentale pontienne, correspondant à la partie supérieure du Tortonien. Le faciès est moins argilo-marneux que celui du Miocène inférieur :

Chapitre II contexte de la zone d'étude

les marnes bleues sont généralement sableuses et passent latéralement à des faciès détritiques qui peuvent envahir l'ensemble de la formation.

Conglomérats et grès de base

Vers Tizi, il s'agit de grès glauconieux jaunâtres, parfois fins mais le plus souvent grossiers, évoluant vers des conglomérats très fossilifères avec de fréquentes intercalations marneuses. Leur épaisseur varie de 20 à 100 m.

Au sud de Bouhanifia, le passage du Miocène continental au Miocène marin terminal s'effectue progressivement, avec l'apparition de bancs à *Ostrea orassissima* marquant l'influence marine nette.

Marnes bleues

Les marnes bleues tortoniennes sont surtout développées au nord, dans la partie aval du bassin. Au sud, le faciès devient majoritairement sableux.

Sables d'El Bordj

Comme au nord de Mascara, le faciès sableux repose sur les marnes bleues sous forme de sables fins jaunâtres, avec des passées marneuses et des intercalations de calcaires à Lithothamnium

Pliocène

Des lambeaux de grès grossiers pliocènes affleurent au sud ou au sud-ouest de Bouhanifia, tandis que des calcaires lacustres sont visibles à l'est, en bordure de la plaine de Ghriss.

Quaternaire

Les alluvions quaternaires, non différenciées sur l'extrait de carte ci-joint, comprennent :

- des alluvions anciennes, occupant de vastes surfaces entre 5 et 60 mètres au-dessus du lit actuel de l'Oued el Hammam : sables, argiles à galets, limons, lentilles de graviers, tufs, grès grossiers et poudingues ;
- une terrasse haute d'environ 20 m, composée d'éléments moins solidement cimentés que ceux des alluvions anciennes ;
- une basse terrasse, formée de limons.

Enfin, d'importants dépôts de travertins ("onyx calcaire") forment deux massifs situés de part et d'autre du village de Bouhanifia. Ils ont été déposés par des sources thermales en lien avec les fractures affectant la région, obstruant partiellement d'anciens griffons(Moulay, M. 1996).

Chapitre II contexte de la zone d'étude

3.4 Tectonique Générale

Les sédiments accumulés dans le sillon Sud-tellien, coincés contre le bord septentrional de la Méséta, ont été violemment plissés par une première phase post-éocène qui amène la discordance du Néogène sur son substratum plissé.

Des mouvements post-burdigaliens sont à l'origine des transgressions et régressions qui ont affecté la région au Néogène, et d'une fréquente discordance post-cartennienne.

La cuvette de Mascara est une zone d'effondrement soulignée par la topographie actuelle à la bordure NW de la plaine d'Eghris, Où le pli brutal est souligné par de nombreux décrochements.

Un deuxième et important accident de direction E.NE-W.SW vraisemblablement contemporain de l'effondrement de la cuvette lacustre de MASCARA (début du Pliocène) passe au Nord de Bouhanifia où il est jalonné par les dépôts de travertins.

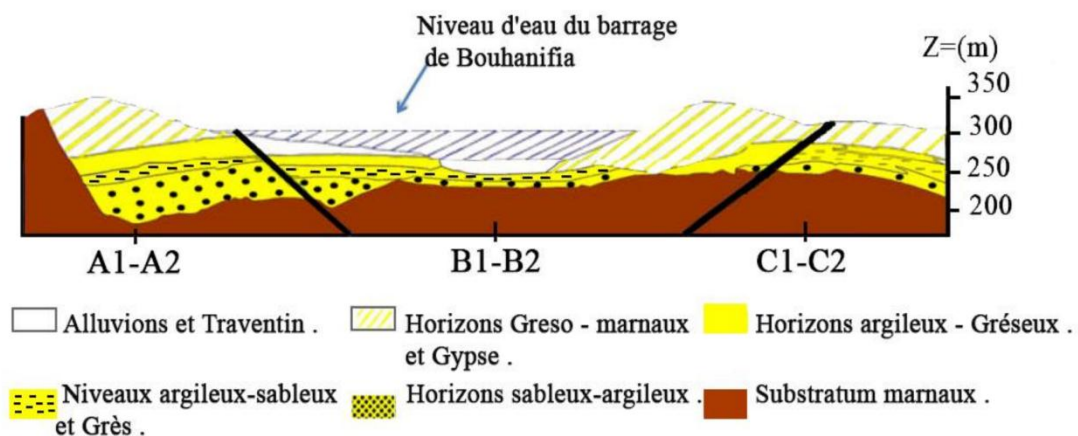


Figure 21: Profil géologique transversal du barrage hydraulique de Bouhanifia décrivant les terrains Miocène locaux de la région d'après Falconnier & Lombard, 1942, modifiée par Benamar, 2023)

Le site repose sur un **socle marneux** profond, surmonté d'une alternance de couches sédimentaires (argiles, sables et grès). Le réservoir (zone **B1-B2**) occupe une cuvette naturelle située entre **250 et 280 m** d'altitude.

Instabilité : Deux **failles majeures** fracturent le terrain, créant des zones de faiblesse structurelle.

Étanchéité : La présence de **gypse** (soluble) et de couches sableuses pose des risques de fuites et de cavités souterraines sous l'effet de l'eau.

3.5 Hydrogéologie

Le terrain le plus ancien affleurant près de Bouhanifia est l'Éocène, fortement tectonisé, qui borde au nord la grande faille de Bouhanifia. Formé de calcaires crayeux et d'argiles,

Chapitre II contexte de la zone d'étude

l'Éocène est globalement peu perméable, y compris dans sa partie supérieure pourtant gréseuse.

L'Oligocène marin, transgressif et en discordance sur l'Éocène, est de nature marno-gréseuse. Les importants affleurements de Hamr Chihia à l'est et de Koudiat el Mehira à l'ouest ne présentent, dans leur partie inférieure, aucune résurgence observable.

L'Éocène et l'Oligocène, qui recouvrent pratiquement toute la zone située au nord de la faille de Bouhanifia, sont très fortement érodés et ne jouent qu'un rôle très limité dans l'hydrologie souterraine.

Le Miocène inférieur, transgressif sur l'Éocène et l'Oligocène, présente à sa base un niveau détritique de puissance variable, qui n'affleure pas dans les environs immédiats de Bouhanifia. Cet ensemble est constitué de plusieurs centaines de mètres d'argiles marneuses ; malgré la présence de niveaux gréseux, il est pratiquement imperméable.

Ce sont ces argiles marneuses qui affleurent autour de Bouhanifia, au sud de la faille, où elles sont partiellement recouvertes par les travertins, ainsi qu'au sud-ouest, où elles sont partiellement masquées par les alluvions quaternaires du Chabet el Guendoul. Dans la partie basse de ce chabet, un niveau grossier du Miocène inférieur, alimenté par la nappe des alluvions, donne naissance à de petites résurgences, dont les eaux très chargées en sels dissous provoquent des glissements dans les marnes (Terral, M. 1957).

Le Miocène continental, qui affleure largement au Djebel Mamat (au sud-est de Bouhanifia) et au sud du barrage, est argilo-gréseux et semi-perméable. Il contient une nappe phréatique qui alimente quelques affluents de la rive droite de l'Oued el Hammam – le Chabet Bénian, par exemple. Cependant, la plus grande partie de cette nappe est drainée par l'Oued el Hammam en amont du barrage, ou vers la plaine de Tizi, à l'est, car l'ensemble montre un net pendage vers le sud-est.

Ce sont les petites résurgences de cette nappe qui provoquent, dans les marnes du Miocène inférieur, les importants glissements observés à l'est de Bouhanifia, en bordure de la faille.

Le Djebel Rakhmoun el Kébir, couronné de grès, ne donne naissance qu'à quelques petites résurgences (Moulay, M. 1996).

Le Miocène supérieur argileux n'affleure qu'à quelques kilomètres à l'ouest de Bouhanifia, tandis que le Miocène terminal, très perméable (calcaires à Lithothamnium et sables d'El Bordj), qui coiffe le Djebel Mamat, est drainé vers la plaine de Tizi, à l'est.

Chapitre II contexte de la zone d'étude

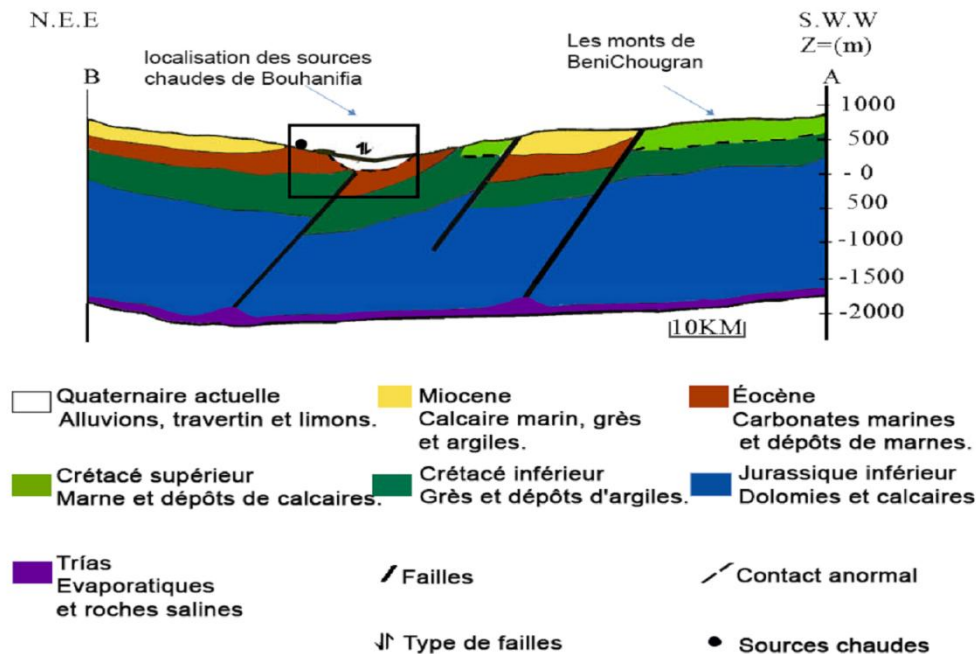


Figure 22: Coupe géologique régionale du Profil A-B (Benamar, 2023)

Les grès pliocènes n'apparaissent aux environs de Bouhanifia que sous forme de quelques lambeaux, tandis que les calcaires lacustres n'affleurent qu'en bordure de la plaine de Tizi. Les travertins, très perméables, possèdent un impluvium de plusieurs kilomètres carrés suffisant pour alimenter une nappe superficielle qui se mélange à des résurgences thermo-minérales profondes. Reposant le plus souvent sur des argiles, cette nappe des travertins, qui sourd notamment en bordure de l'Oued el Hammam, à un kilomètre au nord de Bouhanifia, est très chargée en sels dissous et de température élevée. C'est cette nappe qui est à l'origine des glissements observés à l'ouest du village. Ces résurgences, très diffuses, sont difficiles à capter (Benaïssa, M., & Chafai, S. 2004).

Les alluvions quaternaires, en particulier la terrasse de 20 à 60 m, très perméable, sont drainées par l'Oued el Hammam, dont les alluvions récentes, souvent très grossières, sont également très perméables.

Aucun des ensembles étudiés jusqu'ici n'alimente directement les sources thermales de Bouhanifia. En effet, ces sources, dont la température atteint 67 à 68 °C, ont une origine profonde. Elles doivent être alimentées par les terrains du Jurassique ou du Crétacé, la remontée des eaux étant facilitée par les grandes failles qui délimitent l'Éocène au sud (Aït Brahim, L., et al 1990).

Chapitre III

Matériels et méthodes

Chapitre III Matériels et méthodes

Chapitre III Matériels et méthodes

Dans cette partie, nous allons décrire les étapes suivies pour la réalisation des travaux discutés dans cette thèse. Nous commencerons par l'échantillonnage, le prélèvement, les analyses, le traitement des données, ainsi que l'analyse et la représentation des données obtenues.

4.1 Échantillonnage

L'échantillonnage est une étape clé, souvent négligée. Le principal problème à résoudre est la représentativité de l'échantillon, un défi particulièrement accentué dans le cas des éléments traces en raison de leur faible concentration.

Ainsi, la connaissance de l'état physique, de la stabilité, de l'homogénéité, de la quantité et de la matrice de l'échantillon permet à l'analyste de planifier une méthode d'échantillonnage appropriée. Elle lui permet également de déterminer les méthodes de conservation des échantillons, les phases de prétraitement telles que la dissolution, la préconcentration (si nécessaire) et la détection. Il s'agit d'un point critique à maîtriser pour le choix de la méthode d'analyse et de la technique instrumentale (Riasares, 2012).

4.2 Conservation

Il est indispensable de bien conserver l'échantillon en l'état jusqu'au moment de l'analyse, en général à basse température (surtout pour des échantillons ayant une certaine activité enzymatique ou une prolifération de microorganismes), et/ou à l'abri des radiations ultraviolettes, dans une ambiance sèche (échantillons hygroscopiques) et dans des conteneurs inertes vis-à-vis des éléments à analyser.

4.3 Préparation

La préparation de l'échantillon pour l'analyse dépend de l'état physique de l'échantillon et passe normalement par une étape de dissolution pour les échantillons solides, et de filtration ou séparation des solides en suspension dans le cas des échantillons liquides et gazeux.

Il est souvent nécessaire de réaliser une étape de préconcentration permettant d'augmenter la concentration relative de l'élément dans l'extrait à analyser. Cette étape n'est recommandée que dans le cas où l'échantillon ne peut être analysé directement en raison de la trop faible concentration de l'élément trace. Pour cela, il existe de nombreuses techniques résumées dans le tableau 1 concernant tant les échantillons solides que liquides ou gazeux.

Les analyses effectuées comprennent d'une part les paramètres physico-chimiques, en l'occurrence la température et la conductivité électrique de l'eau, les solides totaux dissous

Chapitre III Matériels et méthodes

(TDS), le pH, et d'autre part les paramètres chimiques que sont les ions majeurs et mineurs.

Composants majeurs :

Calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), hydrogénocarbonates (HCO_3^-), sulfates (SO_4^{2-}).

Composants mineurs :

Sodium (Na^+), potassium (K^+), chlorures (Cl^-), nitrate (NO_3^-).

4.4 Stratégie d'échantillonnage

Un réseau d'échantillonnage a été soigneusement choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives sur la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de Hamam Bouhanifia.

Les échantillons ont été prélevés lors d'une campagne réalisée en novembre 2017. Treize points d'eau ont été sélectionnés. La situation géographique des points d'eau est illustrée par la carte de la figure 26.

La collecte des échantillons est effectuée dans des flacons en polyéthylène (500 ml) bien rincés avec l'eau distillé.

4.4.1 Méthodologie d'analyse

Les échantillons collectés ont été analysés au niveau de laboratoire de l'entreprise FERTIEL au niveau de Annaba. Les analyses ont porté sur les ions les plus répandus et les plus abondants dans les eaux souterraines. Il s'agit des cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) et les anions (Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-}).

Les paramètres in-situ tel que : La température, le pH, la conductivité électrique et le potentielle d'oxydoréduction ont été mesurés sur terrain à l'aide d'un appareil multiparamétrique de type PCE-PHD (Figure 27).

Chapitre III Matériels et méthodes

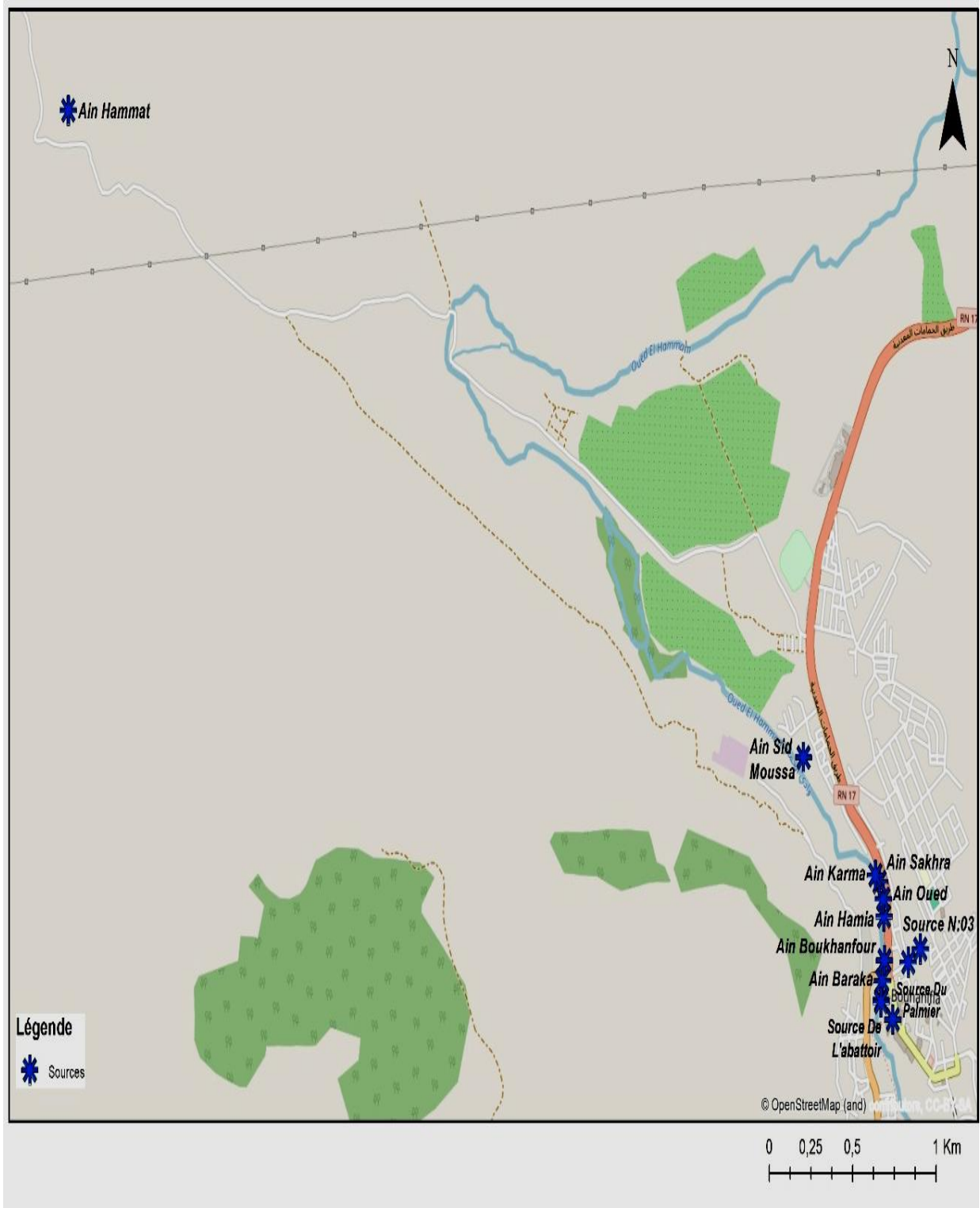


Figure 23:localisation des points d'eau (carte topographique de bouhanifia)

Chapitre III Matériels et méthodes



Figure 24: Multiparamètres de terrain

Les échantillons filtré et acidifié (1% v / v) HNO_3 ont été analysés pour les cations (Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+) par un spectrophotomètre d'absorption atomique (SAA). Pour les analyses des anions nous avons utilisé la méthode de mercure thiocyanate pour les chlorures (Cl^-), la méthode turbidimétrique pour les sulfates (SO_4^{2-}), la méthode colorimétrique pour les nitrates (NO_3^-). Ces méthodes sont conformes aux procédures approuvées par United States Environmental Protection Agency ou (EPA, 1983). Les bicarbonates (HCO_3^-) ont été déterminés par la méthode potentiométrique (Rodier et al. 2009).

Chapitre III Matériels et méthodes



Figure 25: Spectrophotomètre



Figure 26:Centrifugeuse

4.4.2 La méthode AHP (Analyse multicritères)

L'AHP (Analytic Hierarchy Process) ou Processus Hiérarchique Analytique est une méthode d'aide à la décision multicritère développée par Thomas L. Saaty dans les années 1970. Elle est utilisée pour résoudre des problèmes complexes impliquant des critères multiples, souvent contradictoires, en structurant les éléments du problème dans une hiérarchie et en utilisant des comparaisons par paires.

4.4.3 Domaines d'Application

- Cartographie , étude de vulnérabilité , zones potentielle de recharge
- Choix stratégiques (investissements, localisations)
- Évaluation des risques
- Gestion des ressources naturelles
- Marketing et études de satisfaction

Chapitre III Matériels et méthodes

4.4.4 Logiciels utilisés

Dans le cadre de cette étude, plusieurs logiciels spécialisés ont été utilisés pour le traitement des données, l'analyse géochimique, la modélisation et l'estimation des températures des réservoirs géothermaux. Ces outils ont permis d'assurer une approche rigoureuse et multidisciplinaire.

Tableau 05 : logiciels utilisés

Logiciel	Fonction Principale	Application dans l'Étude
ArcMap (ESRI)	Système d'Information Géographique (SIG)	Cartographie des sources thermales, analyse spatiale des données géochimiques et structurales.
Diagrammes	Génération de diagrammes géochimiques (ex : Piper, Schoeller, Giggenbach)	Classification des eaux, identification des facies hydrochimiques et des processus d'échange.
Thermalprocess 1.0	Modélisation géochimique et estimation des températures de réservoirs	Calcul des températures en profondeur à partir des équilibres géothermomètres.



Chapitre III Matériels et méthodes

Waterquality evaluator

Reporting Edit Data processing Help

LabelLegend

N°	Nom_com	Temp	Ca	Mg	K	Na	HCO3	SO4	Cl	NO3	NO2	CE	PH	Balace	PCO2	Origine	Roche_Detail	rSOCl
1	de l'abattoir	41,30	154,8	48,95	25,21	229,4	622,5	141	344	0,58	0,01	2320	6,98	-20,72	402,10	Mixte ou indéterminée		
2	ain Baraka	49,60	151,8	47,61	24,2	226,7	622,44	133	324	0,69	0,01	2420	6,58	-20,04	1 010,10	Mixte ou indéterminée		
3	ain hamia	53,70	159	45,65	24	223,7	622,44	182	318	0,48	0,01	2480	6,5	-20,54	1 214,40	Mixte ou indéterminée		
4	ain oued	52,40	159,5	45,42	23,93	224,2	622,44	191	262	0,62	0,02	2350	6,46	-16,65	1 331,50	Mixte ou indéterminée		
5	Ain sakhra	45,80	164,7	47,12	24,2	228,2	622,44	188	280	0,47	0,01	2500	6,17	-16,89	2 596,30	Météorique (infiltration		
6	Ain karma	47,10	165,1	46,99	23,84	225,6	622,44	162	276	0,55	0,01	2410	6,5	-16,69	1 214,40	Mixte ou indéterminée		
7	Ain sid Moussa	26,90	177,9	54,44	22,31	234,3	622,5	152	294	0,8	0,01	2370	7,32	-15,56	183,80	Mixte ou indéterminée		
8	Ain Hammat	52,80	213,8	60,91	44,22	333,3	622,44	322	322	0,96	0,01	3260	6,19	-3,52	2 479,40	Mixte ou indéterminée		
9	Source N°06	42,40	166,1	64,03	23,69	237,7	622,44	241	290	0,54	0,01	2520	6,76	-15,63	667,30	Mixte ou indéterminée		
10	Source Du Pont	51,60	154,5	44,86	23,54	224,8	622,44	136	270	0,63	0,01	1880	6,65	-16,70	859,70	Evaporitique		
11	Source N°03	65,60	166,3	43,78	22,84	218,9	622,44	228	268	0,654	0,01	2440	6,44	-18,34	1 394,30	Evaporitique		
12	ain Boukhanfour	49,20	152,3	46,67	23,84	225,6	622,44	187	262	0,65	0,01	2340	6,6	-16,61	964,60	Mixte ou indéterminée		
13	du Palmier	64,50	160,2	44,16	23,08	218,5	622,5	134	258	0,64	0,01	2350	6,4	-16,63	1 528,80	Mixte ou indéterminée		

Active Windows

DATA BASE WQI-chart NO3-Chart IEB rNaCl=f(PCO2) SAR TH HHR NPI Ratio Geothermie Observations TabSheet13 Restuls Gridre Gigen

Figure 28 :Logiciel Thermal process

Chapitre III Matériels et méthodes

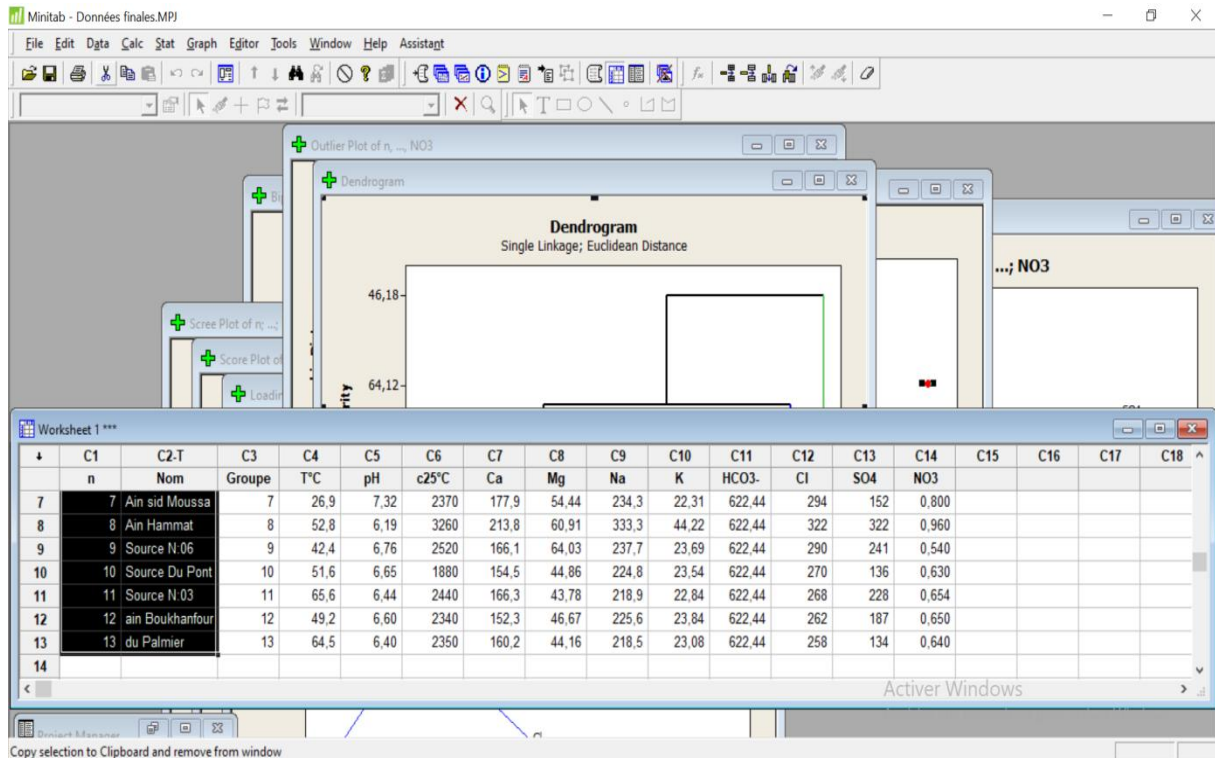


Figure 29: Logicielle minitab

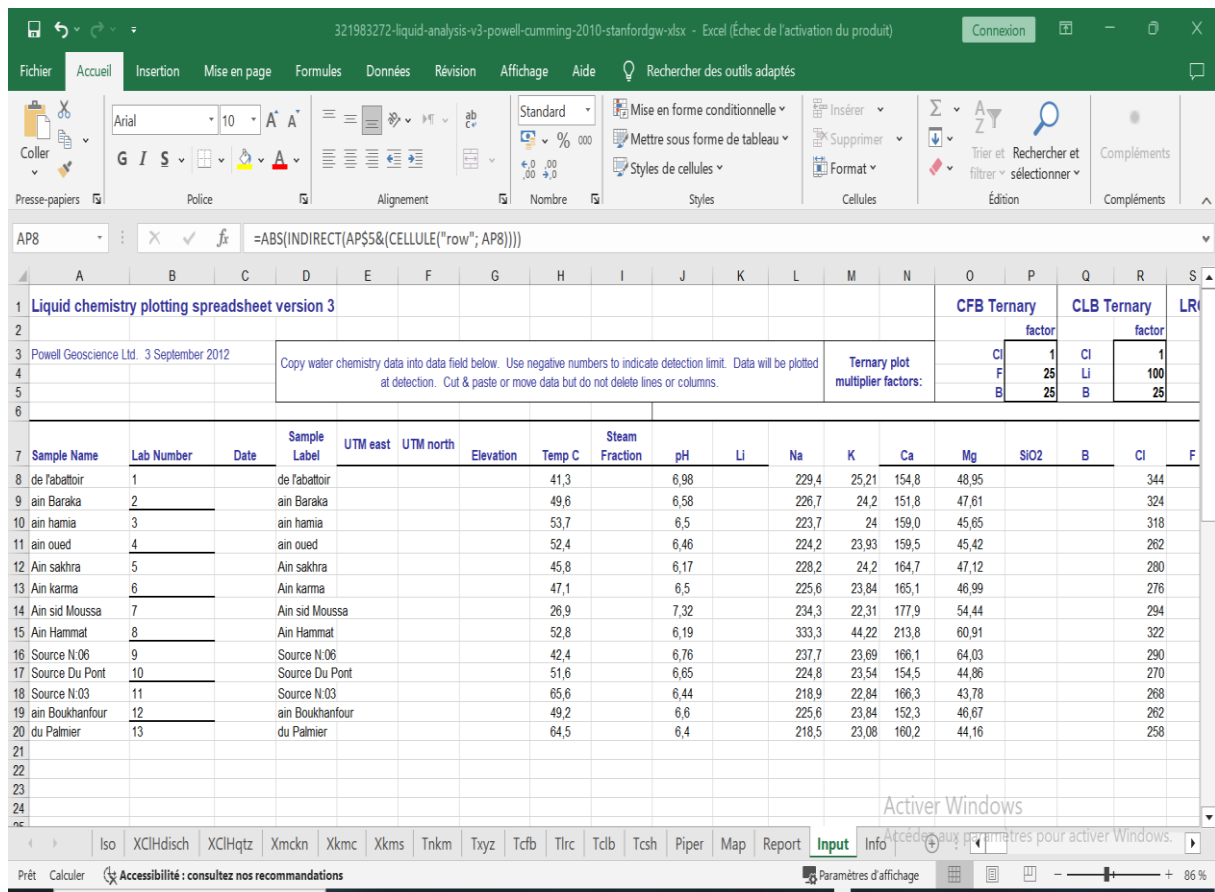


Figure 27: Stanford PowerShell pour les analyses géothermique

Chapitre IV

Résultats Et

discussions

Chapitre IV Résultats Et discussions

5 Hydrogéochimie et qualité des eaux

Dans cette section, nous présentons les principaux résultats obtenus au cours des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse. Nous commençons par l'analyse des paramètres physico-chimiques et bactériologiques des eaux thermales.

Les mesures in situ sont synthétisées dans le tableau 06. Un résumé statistique de ces paramètres est fourni dans le tableau 07.

La carte suivante montre la localisation des sources thermales de Bouhanifia, regroupé par températures ;

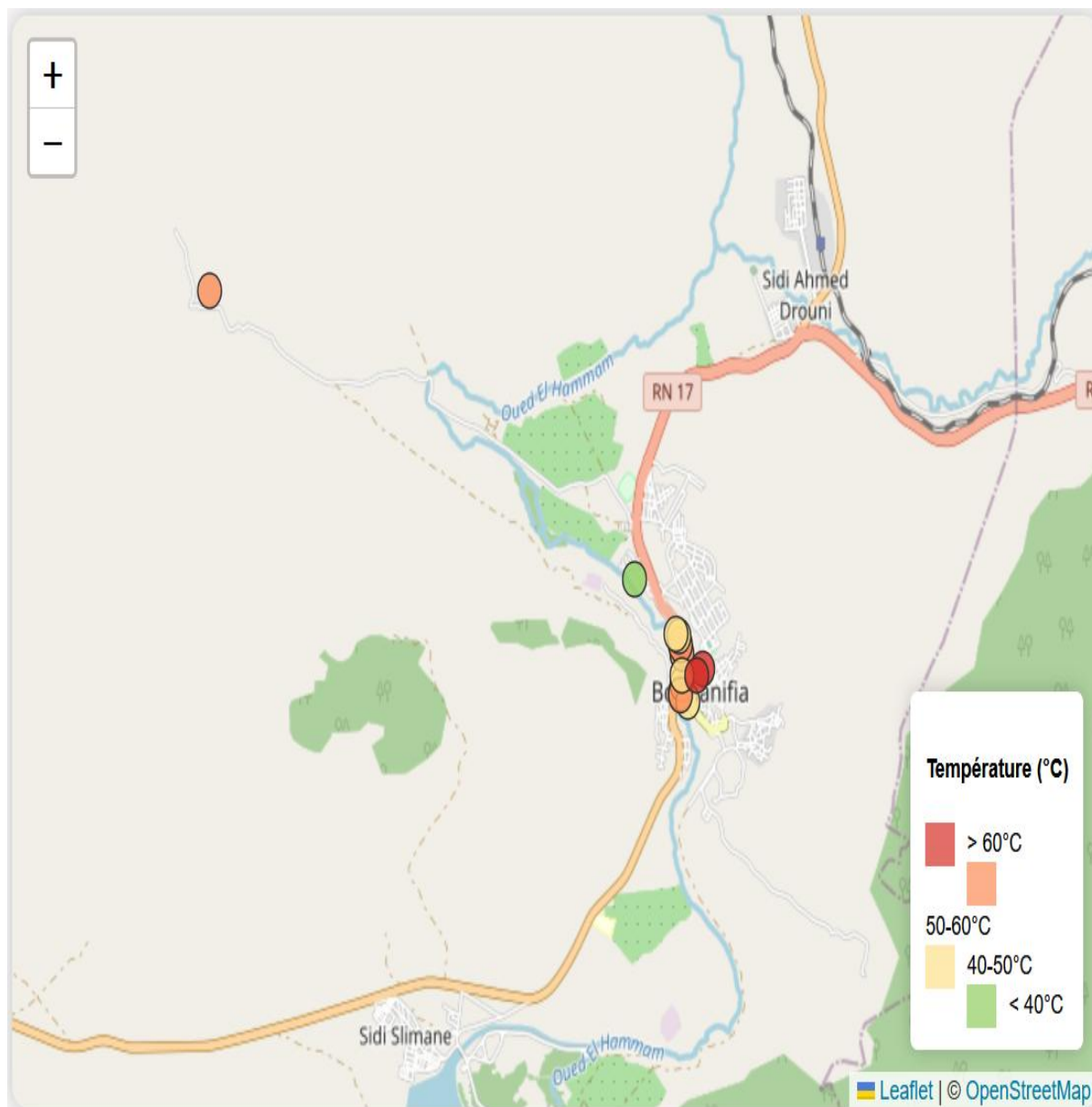


Figure 28: Les sources thermales de Bouhanifia en fonction des températures (carte topographique de bouhanifia)

Chapitre IV Résultats Et discussions

Tableau 06 : résultats des mesures in situ

ID	Source Name	T°C	PH	EC (ms)	Latitude	Longitude
1	Source De L'abattoir	41.3	6.98	2.32	35.314956	-0.050915
2	Ain Baraka	49.6	6.58	2.42	35.315551	-0.050848
3	Ain Hamia	53.7	6.50	2.48	35.317514	-0.050819
4	Ain Oued	52.4	6.46	2.35	35.318046	-0.0509
5	Ain Sakhra	45.8	6.17	2.50	35.318564	-0.051164
6	Ain Karma	47.1	6.50	2.41	35.318758	-0.051431
7	Ain Sid Moussa	26.9	7.32	2.37	35.322227	-0.056304
8	Ain Hammat	52.8	6.19	3.26	35.340766	-0.105562
9	Source N:06	42.4	6.76	2.52	35.314375	-0.05012
10	Source Du Pont	51.6	6.65	1.88	35.314886	-0.050912
11	Source N:03	65.6	6.44	2.44	35.316577	-0.048389
12	Ain Boukhanfour	49.2	6.60	2.34	35.316168	-0.050741
13	Source Du Palmier	64.5	6.40	2.35	35.316152	-0.049161

Tableau 07: résumé statistiques des paramètres in situ

Paramètres	CD(ms)	T°	Ph
min	1,88	26,90	6,17
max	3,26	65,60	7,32
moyenne	2,43	49,45	6,58
SDV	0,28	9,50	0,30
CV	0,12	0,19	0,05

5.1 La température

La température est un indicateur important pour déterminer l'origine et la profondeur des eaux souterraines. Une augmentation de la température de l'eau indique une circulation profonde. La mesure de la température aide à interpréter les résultats obtenus.

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'une sonde **PHD PCE Instrument**.

D'après le tableau 05, nous constatons une **variation significative** de la température, qui oscille entre **27 °C et 65.6 °C** :

- **La valeur minimale** (27 °C) a été mesurée au niveau de **Aïn Sidi Moussa** ;
- **La valeur la plus élevée** (65.6 °C) a été enregistrée au niveau de **Source 3**.

Chapitre IV Résultats Et discussions

Cette variation s'explique par la **profondeur d'émergence**, ainsi que par les **conditions thermiques du réservoir hydrogéologique**. La détermination de la profondeur peut être effectuée en utilisant un **géothermomètre au sodium ou au silicium**.

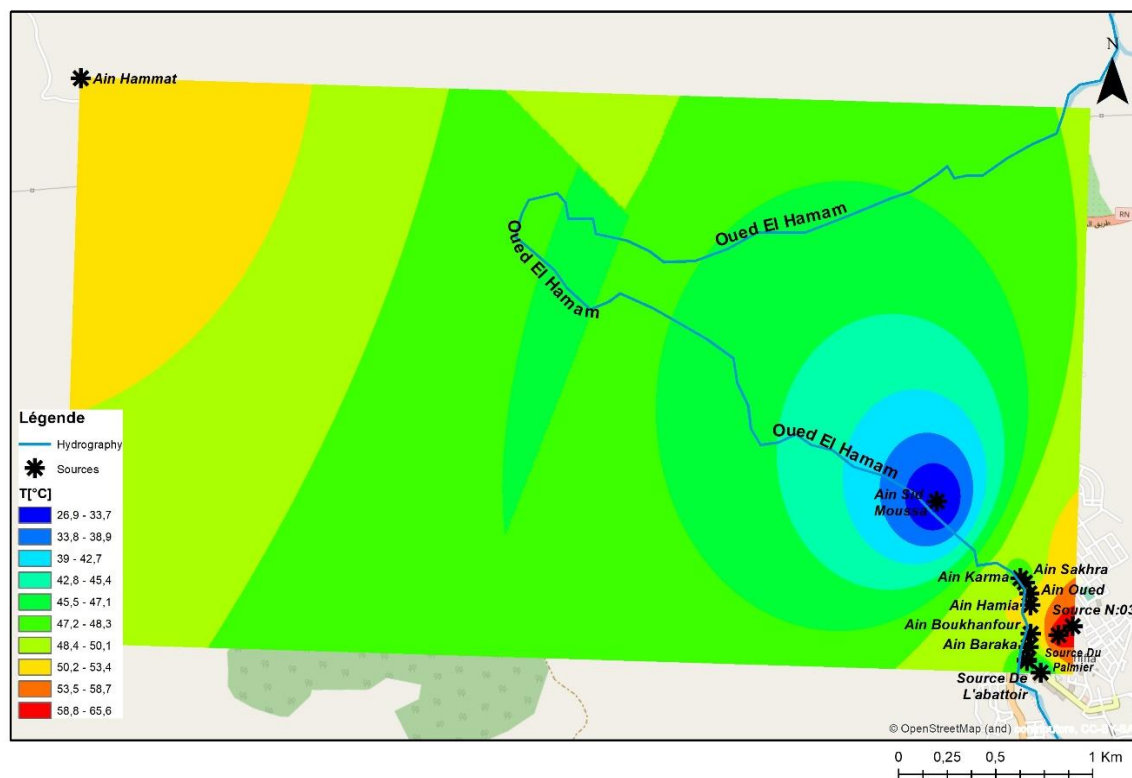


Figure 29: variation spatiale de la température

5.2 Potentiel d'hydrogène (pH)

Ce paramètre mesure l'alcalinité et l'acidité de l'eau. Il permet d'identifier et de caractériser la nature géochimique des terrains traversés. Les variations du pH sont contrôlées par la teneur en CO₂ et par la composition géochimique des roches traversées.

Le pH a une grande importance dans la précipitation du CaCO₃ (Kimblin, 1995 ; Ali Rahmani & Chibane, 2022). Il reflète également l'état des processus de minéralisation dans l'aquifère. Sa valeur dépend de plusieurs facteurs, tels que la température et la concentration en dioxyde de carbone (CO₂).

Dans les sources de Bouhanifia, le pH varie entre 6,0 et 7,32, ce qui indique une eau légèrement acide à neutre.

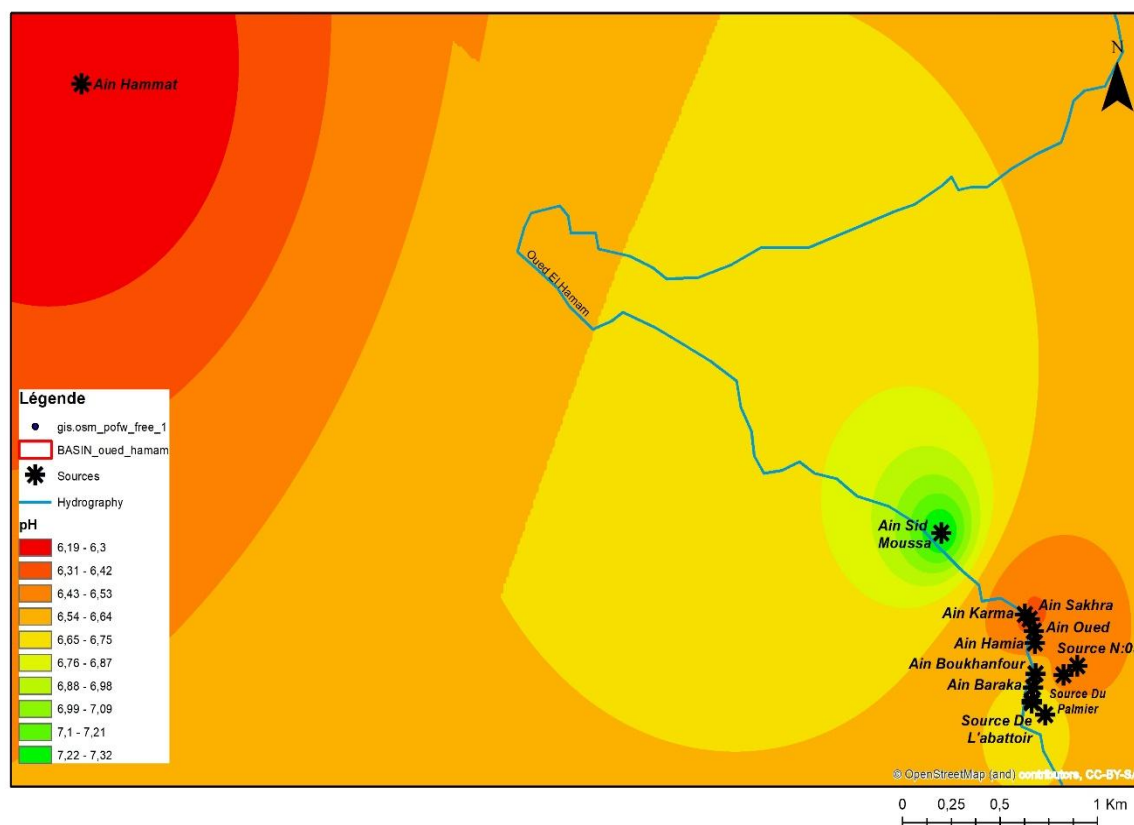


Figure 30: Variation spatiale de pH

La répartition spatiale du pH montre que les eaux sont légèrement acides dans la région nord-ouest de l'oued Hammat, tandis qu'elles tendent vers une neutralité dans la partie sud-est.

5.3 Conductivité électrique et minéralisation

La conductivité électrique (CE) reflète la teneur en sels minéraux dissous dans l'eau, exprimée par sa capacité à conduire un courant électrique. Les valeurs de la conductivité dépendent, entre autres, de la quantité de sels présents dans l'eau (Manuella Delalande, 2008). Les mesures montrent une fluctuation de la conductivité électrique entre 1,88 et 3,26 mS/cm :

- La valeur minimale (1,88 mS/cm) a été enregistrée à la source du Pont ;
- La valeur la plus élevée (3,26 mS/cm) a été mesurée à la source Ain Hammat.

Cette amplitude s'explique par les processus géochimiques auxquels ces eaux sont soumises lors de leur minéralisation.

5.3.1 Répartition spatiale

Les teneurs les plus élevées se localisent dans la région nord-ouest, comme le montre la carte de la figure 34.

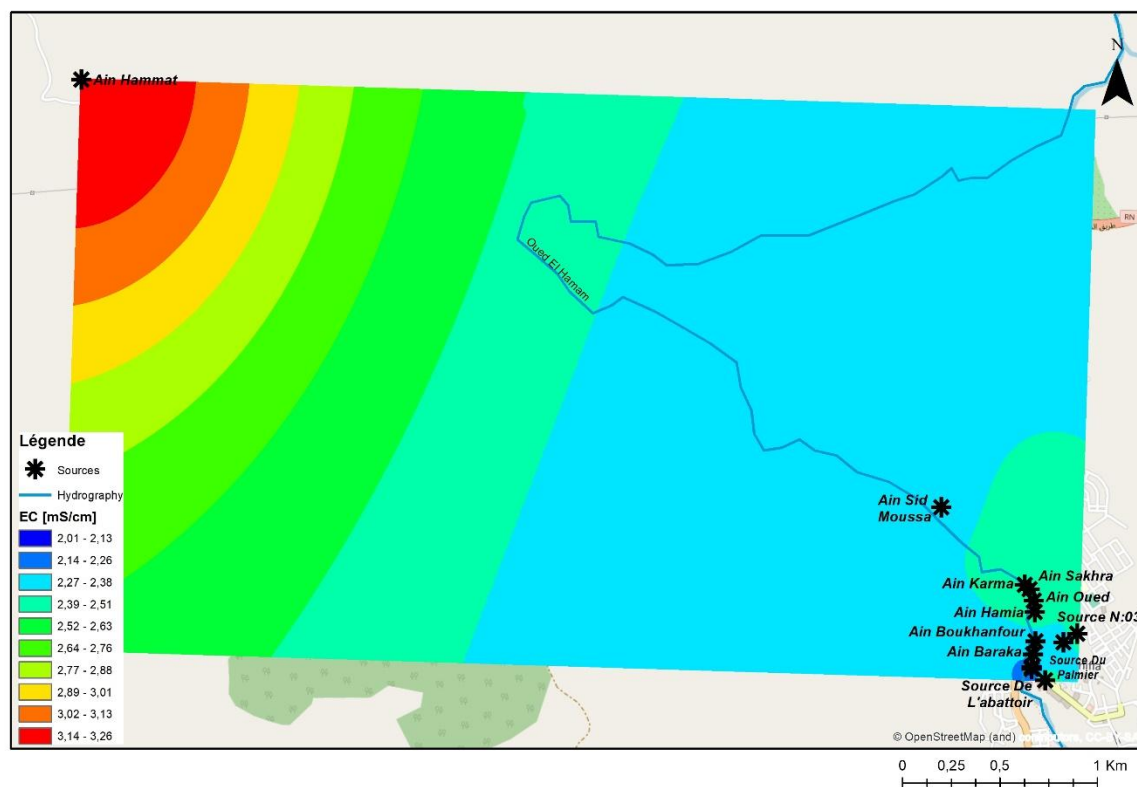


Figure 31: Variation spatiale de la conductivité électrique

5.4 Les analyses physico-chimiques

Les résultats des analyses physicochimiques sont reportés dans le tableau 08.

Tableau 08 : Géochimie des sources de bouhanifia

N°	Nom	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
1	De l'abattoir	8.20	0.58	344.00	229.40	25.21	48.95	154.80	141.00
2	Ain Baraka	8.40	0.69	324.00	226.70	24.20	47.61	151.80	133.00
3	Ain hamia	8.80	0.48	318.00	223.70	24.00	45.65	159.00	182.00
4	Ain oued	8.40	0.62	262.00	224.20	23.93	45.42	159.50	191.00
5	Ain sakhra	8.40	0.47	280.00	228.20	24.20	47.12	164.70	188.00
6	Ain karma	8.80	0.55	276.00	225.60	23.84	46.99	165.10	162.00
7	Ain sid moussa	8.40	0.80	294.00	234.30	22.31	54.44	177.90	152.00
8	Ain hammat	12.00	0.96	322.00	333.30	44.22	60.91	213.80	322.00
9	Source N:06	6.80	0.54	290.00	237.70	23.69	64.03	166.10	241.00
10	Source du pont	7.20	0.63	270.00	224.80	23.54	44.86	154.50	136.00
11	Source N:03	8.40	0.65	268.00	218.90	22.84	43.78	166.30	228.00
12	Ain boukhanfour	8.20	0.65	262.00	225.60	23.84	46.67	152.30	187.00
13	Du palmier	8.40	0.64	258.00	218.50	23.08	44.16	160.20	134.00

Chapitre IV Résultats Et discussions

Tableau 09 : résumé statistiques des paramètres physicochimique

Nom	HCO ₃ ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	SO ₄ ²⁻ mg/l
Max	12.00	0.96	344.00	333.30	44.22	64.03	213.80	322.00
Min	6.80	0.47	258.00	218.50	22.31	43.78	151.80	133.00
Mean	8.49	0.64	289.85	234.68	25.30	49.28	165.08	184.38
SDV	1.15	0.13	27.27	28.92	5.50	6.22	15.66	51.94
CV	0.14	0.20	0.09	0.12	0.22	0.13	0.09	0.28

Les 13 sources analysées montrent une **composition minérale riche**, typique des eaux thermales. Elles sont toutes **faiblement bicarbonatées, fortement chlorurées et sulfatées**, avec une prédominance notable des **ions sodium (Na⁺), calcium (Ca²⁺) et magnésium (Mg²⁺)**. Ces signatures révèlent une origine **profonde**, avec un fort degré d'interaction eau-roche.

5.5 les Cations

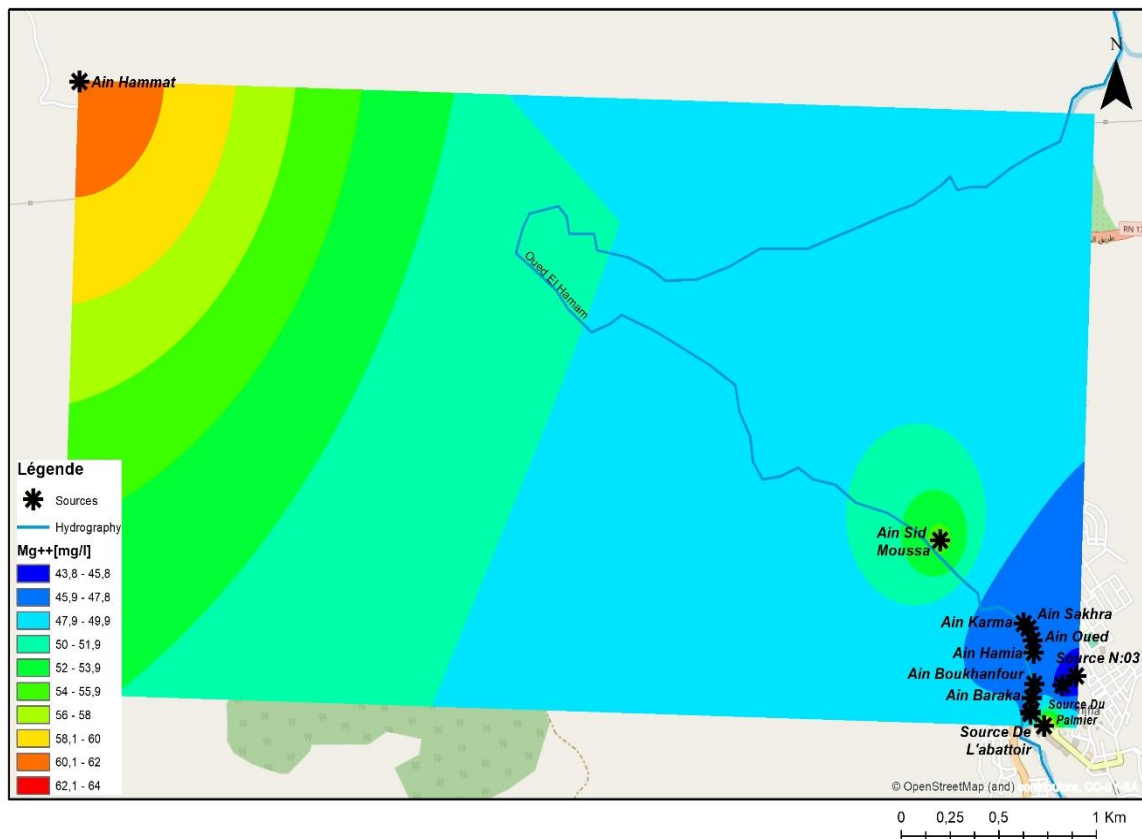


Figure 32: variation spatiale de Magnésium Mg²⁺

Chapitre IV Résultats Et discussions

5.5.1 Le Magnésium Mg^{2+}

Le contact des eaux avec les formations salifères riches en magnésium ($MgSO_4$) et la dissolution des roches dolomitique, basaltique et argileux lors de la recharge est l'origine de magnésium dans les eaux souterraine.

Le taux de dissolution est conditionné par la teneur en CO_2 dans l'eau, ce qui favorise l'échange géochimique.

Les concentrations de Magnésium varient de 44 mg/l mesurée au niveau de la source N°3, la valeur maximale est d'environ 64 mg/l mesurée au niveau de la source N°6.

La teneur moyenne en Magnésium est de l'ordre de 49.28 mg/l , avec un coefficient de variation de l'ordre 13 % .

5.5.2 Le Calcium Ca^{2+}

Le calcium est présents dans les roches cristallines et les roches sédimentaire, ils sont très solubles et sont donc largement représentés dans la plupart des eaux. Les teneurs en calcium varie de 152 mg/l mesuré au niveau de Ain Baraka à 213 mg/l mesuré au niveau de Ain Hammat avec une moyenne de 165 mg/l. L'amplitude de variation est d'environ 9%

En revanche, la teneur en calcium provient de la dissolution des roches carbonates et calcaires ($CaCO_3$) et aussi des roches gypsifère ($CaSO_4 \cdot 2 H_2O$).

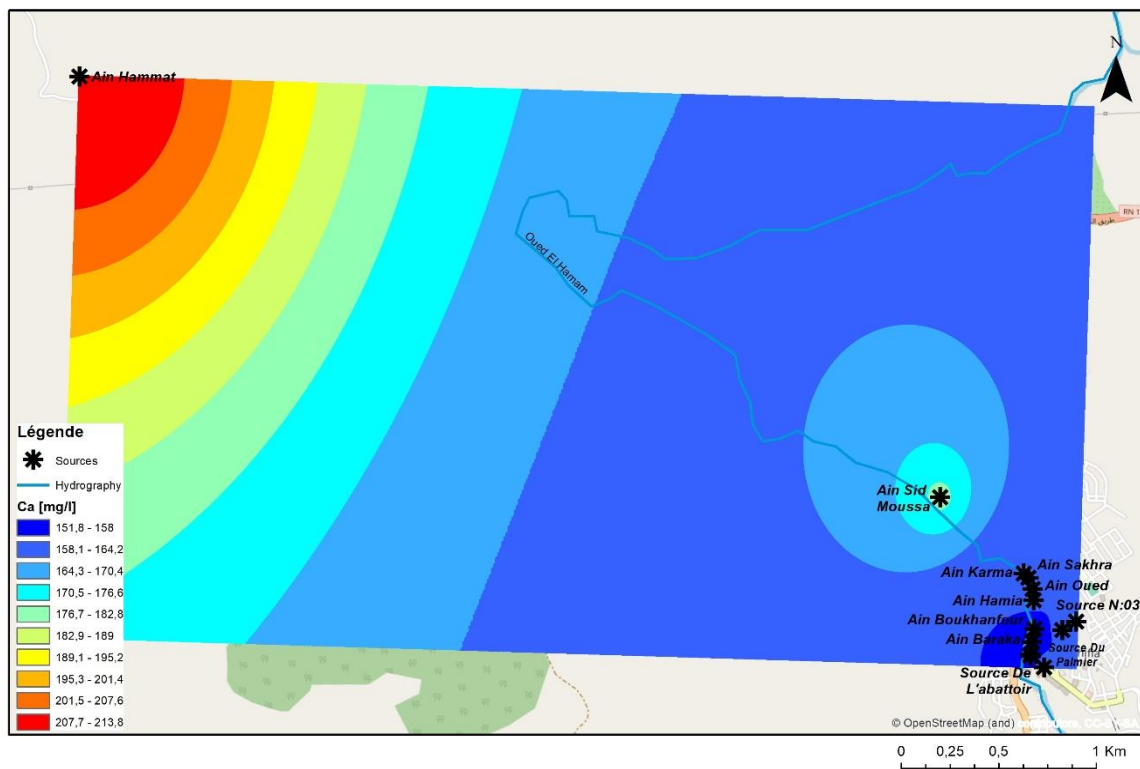
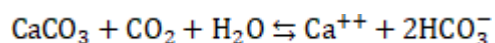


Figure 33: variation des concentrations de calcium Ca^{2+}

Chapitre IV Résultats Et discussions

La dissolution de ces roches est contrôlée par la teneur en CO₂ ou bien le pH des eaux.

La réaction de dissolution peut s'exprimer par l'équation suivante :



5.5.3 Le Sodium Na⁺

Les concentrations des ions de sodium se varient entre une valeur minimale de 219 mg/l mesurée au niveau de la source de Palmier, et une valeur maximale autour de 333 mg/l mesurée au niveau de la source Ain Hammat. Les paramètres statistiques indiquent une variation de 12%.

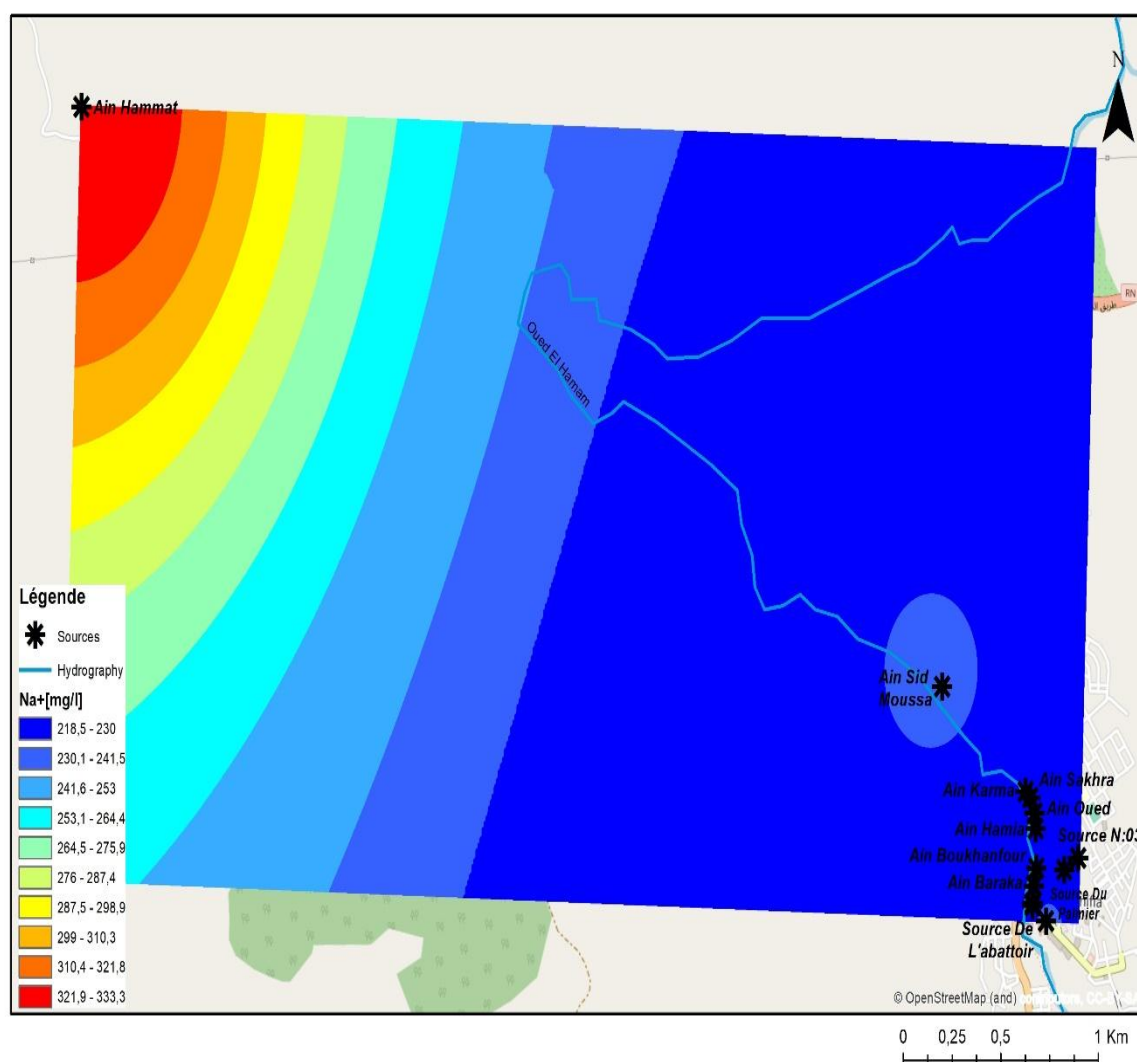


Figure 34: Variation du Na⁺

5.5.4 Le Potassium K⁺

Le potassium est moins répandue dans la nature, il est étroitement rattaché au Sodium, les concentrations tolérée pour cet élément est autour de **12 mg/l**.

Chapitre IV Résultats Et discussions

Les concentrations de Potassium varient entre **22.31 mg/l** et **44.22 mg/l** avec un coefficient de variation autour de 22 %, l'écart mesuré par rapport à la moyenne est d'environ **5.50 mg/l**.

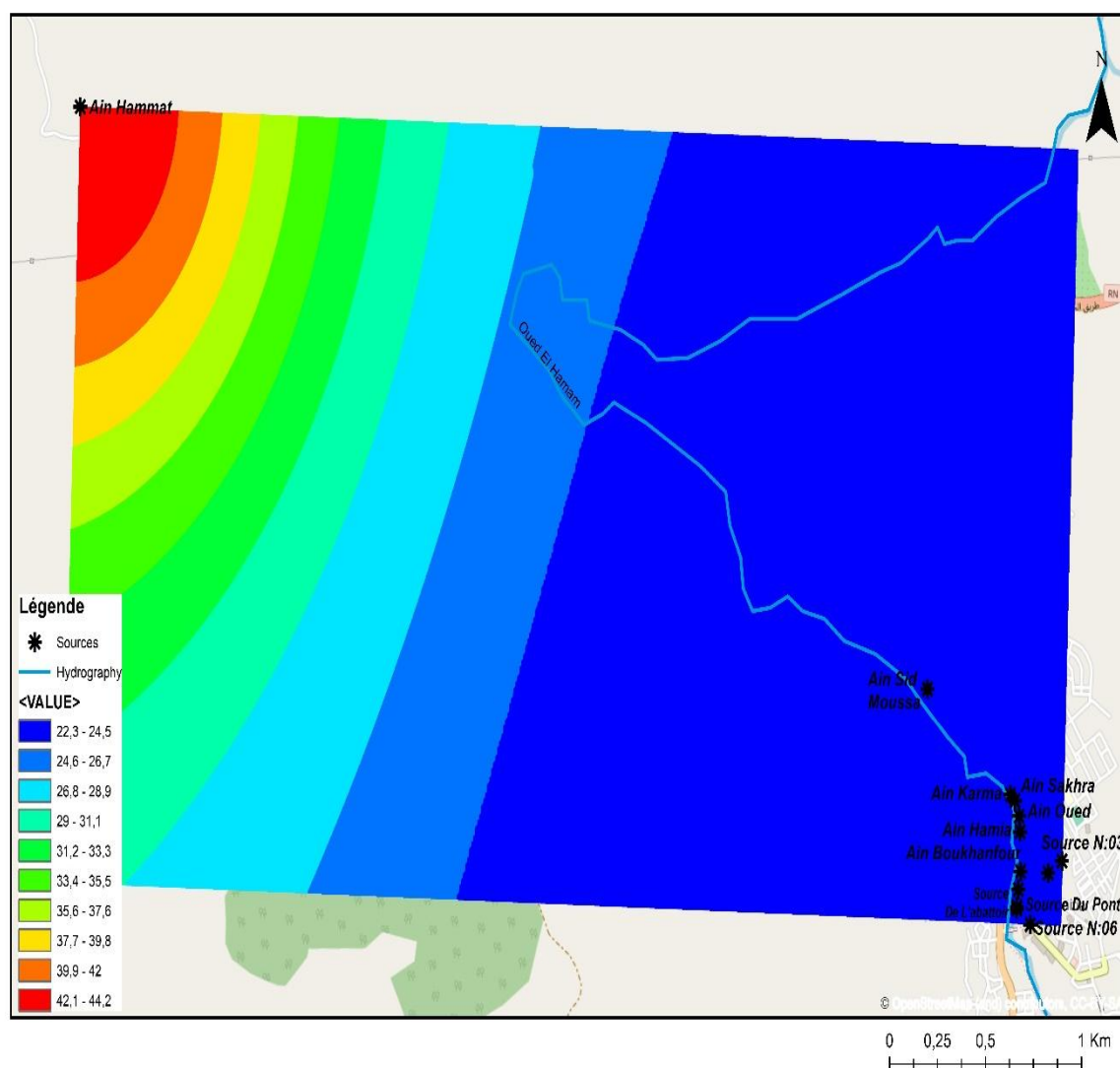


Figure 38:variation des concentrations de K^+

5.6 Les Anions

5.6.1 Le Sulfate SO_4^{2-}

Les sulfates ont plusieurs origines à savoir la dissolution des formations gypsifère, ainsi l'oxydation des sulfates métalliques. D'après les résultats d'analyse on constate que les concentrations des sulfates sont varié entre **133 mg/l** et **322 mg/l**. Le coefficient de variation est de l'ordre de 28%.

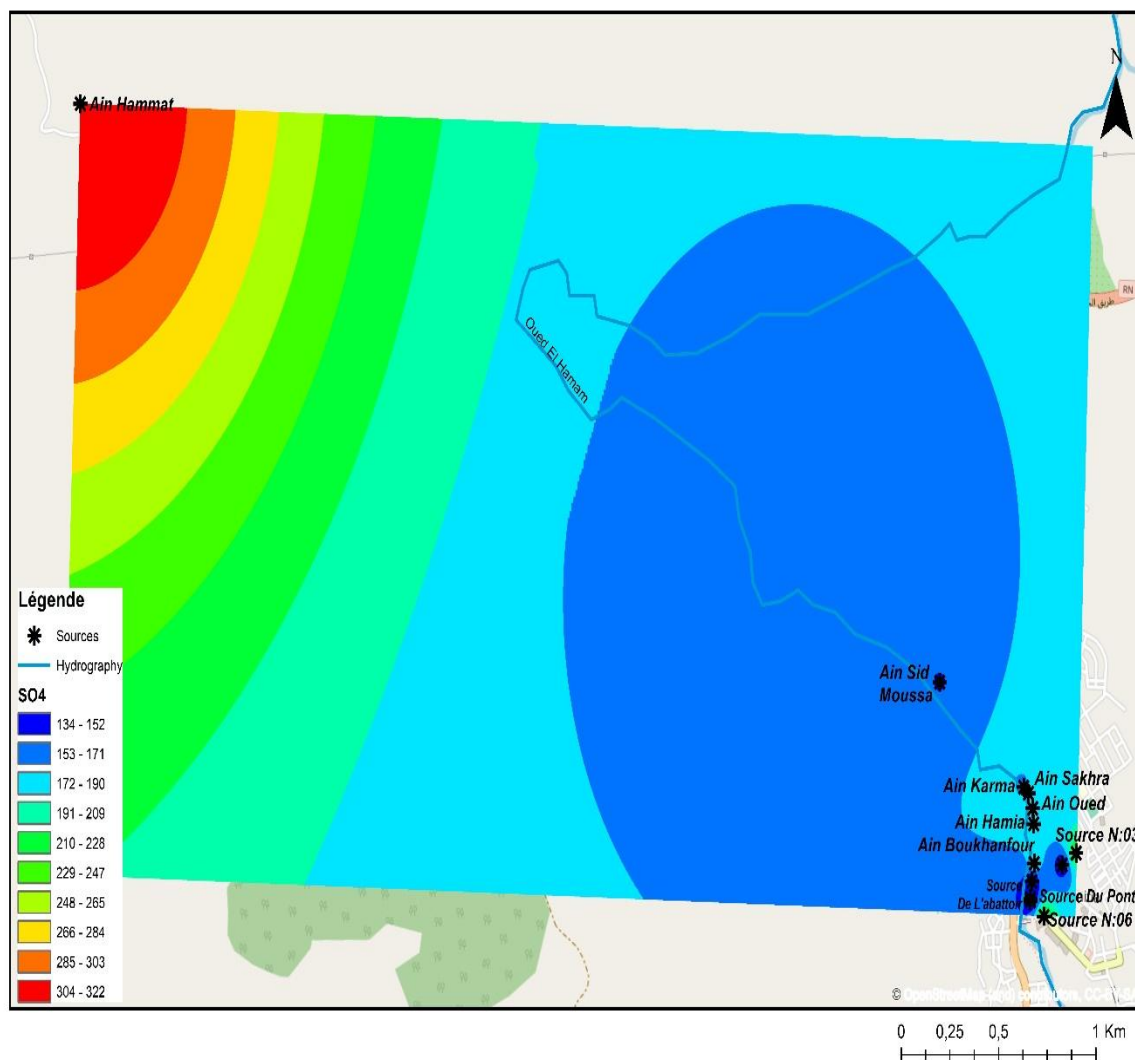


Figure 39: Variation des sulfates SO_4^{2-}

5.6.2 Les Chlorures Cl^-

Les ions des Chlorures se retrouvent sous forme de sels de sodium (NaCl), de Potassium (KCl) et de Calcium ($CaCl_2$), ils sont très mobile, leur présence est dépend de la roche encaissante, les rejets urbains et industrielles, et les dépôts atmosphériques.

Les concentrations des chlorures varient entre 258 mg/l, et 344 mg/l. Le coefficient de variation pour les ions des chlorures est autour de 9%.

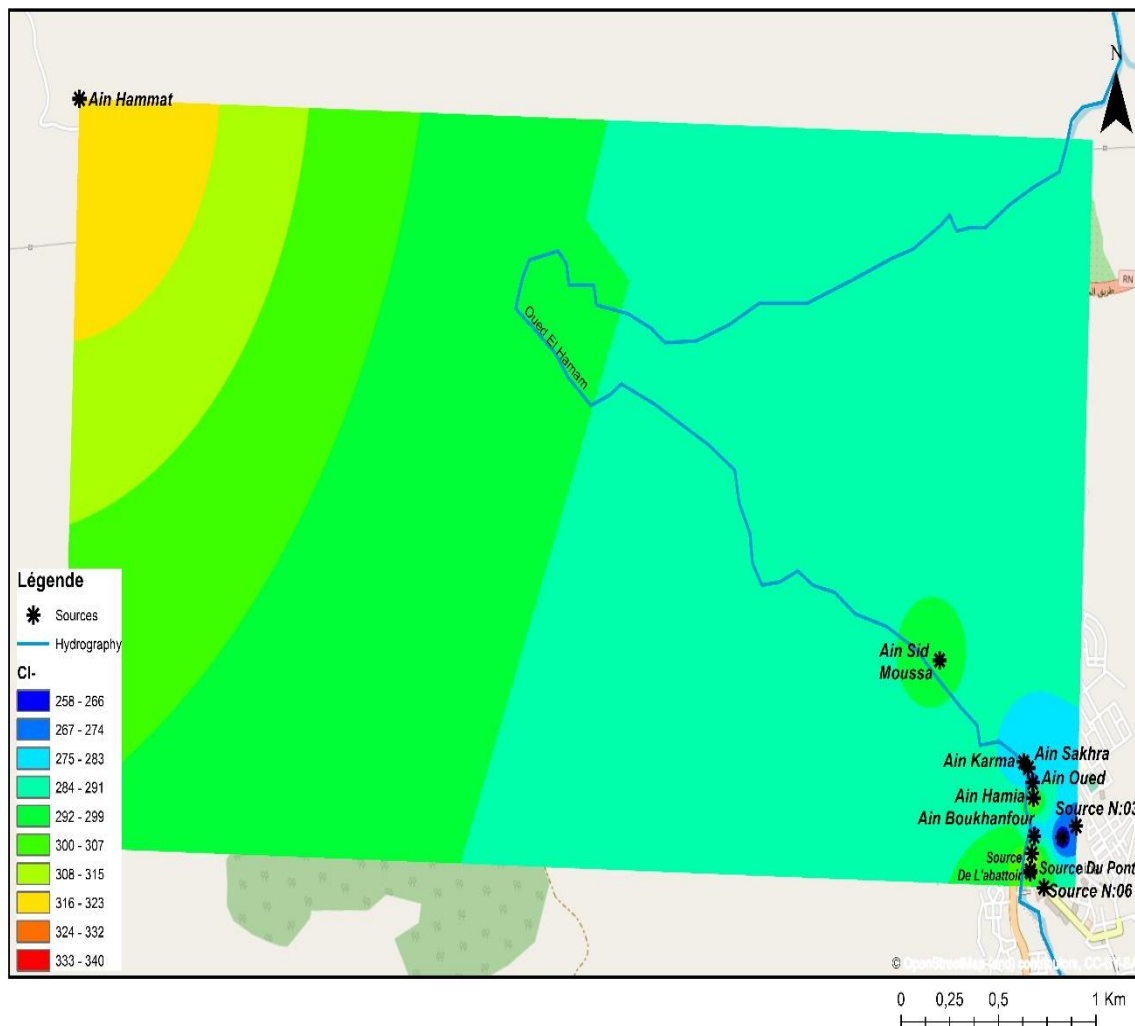
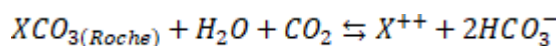


Figure 35:variation des Chlorures Cl⁻

La forte teneur en chlorure peut être expliquée par le contact avec des formations gypsifère, le phénomène d'évaporation, peut augmenter les teneurs en chlorures.

5.6.3 Les Bicarbonate HCO₃⁻

Les bicarbonates sont présent en abondance dans les eaux souterraine, sont le résultat de l'équilibre physico-chimique entre les roche encaissante, l'eau et le CO₂, selon l'équation suivante :



Avec X : désigne un élément chimique de la roche

Les concentrations des bicarbonates sont varie de 6.80 mg/l à 12 mg/l avec une moyenne de 8.49 mg/l.

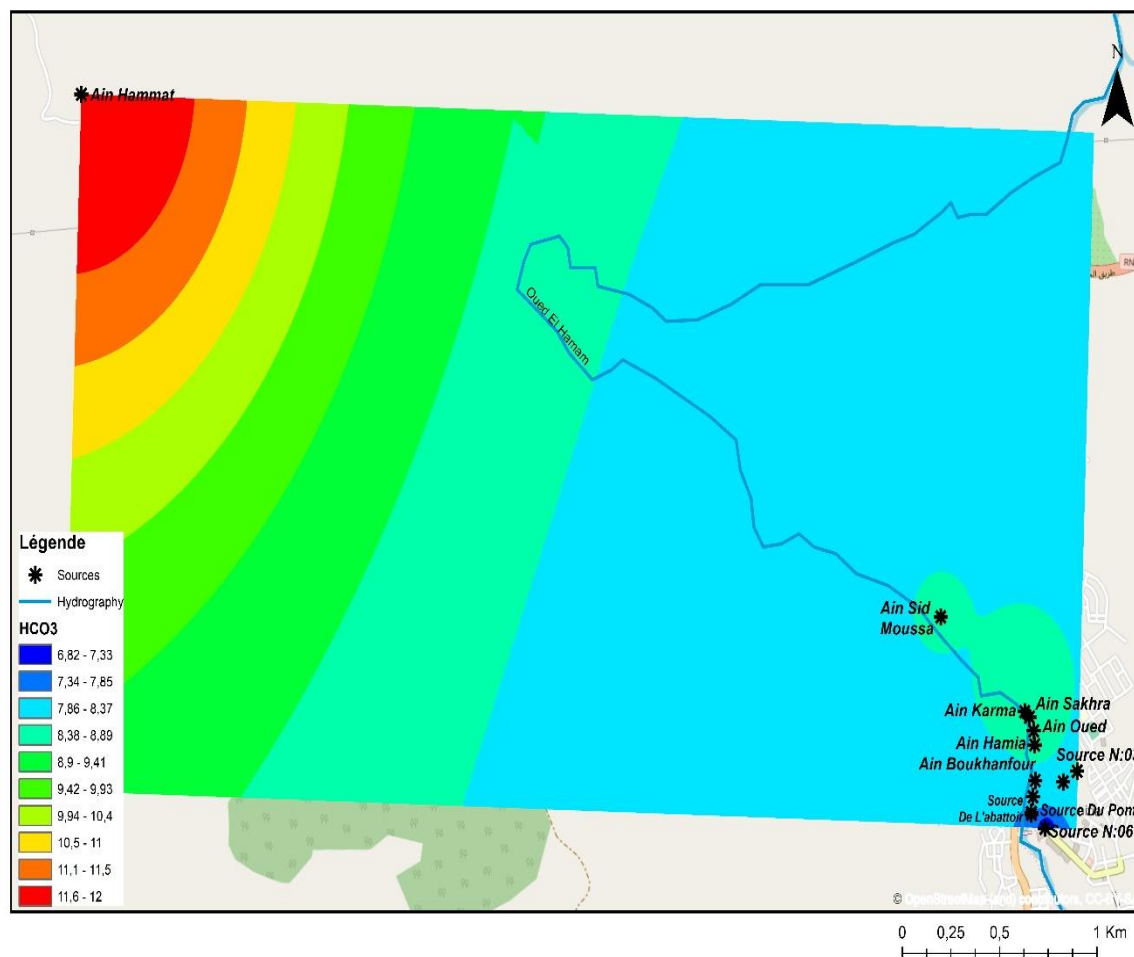


Figure 36: variation des Bicarbonate HCO₃⁻

Les teneurs sont contrôlées par nombreux paramètres (température de l'eau, concentration du (CO₂) dissous, nature et types des terrains encaissante).

5.6.4 Les Nitrates NO₃⁻

Les nitrates ont plusieurs origines à savoir l'azote organique, l'ammoniaque, les nitrites, les rejets urbain.

Les teneurs en nitrates dans les eaux souterraines sont variables à l'échelle temporelle cela est dépend de la saison (Hiver, été), les concentrations dans les eaux non polluées le taux de nitrates peut se varie de 1 à 15mg/l.

Les concentrations des nitrates mesurés varient entre 0.47 et 1 mg/l avec une moyenne de l'ordre de 0.64 mg/l. Avec une amplitude de variation de l'ordre de 20%, ce qui explique une faible fluctuation ;

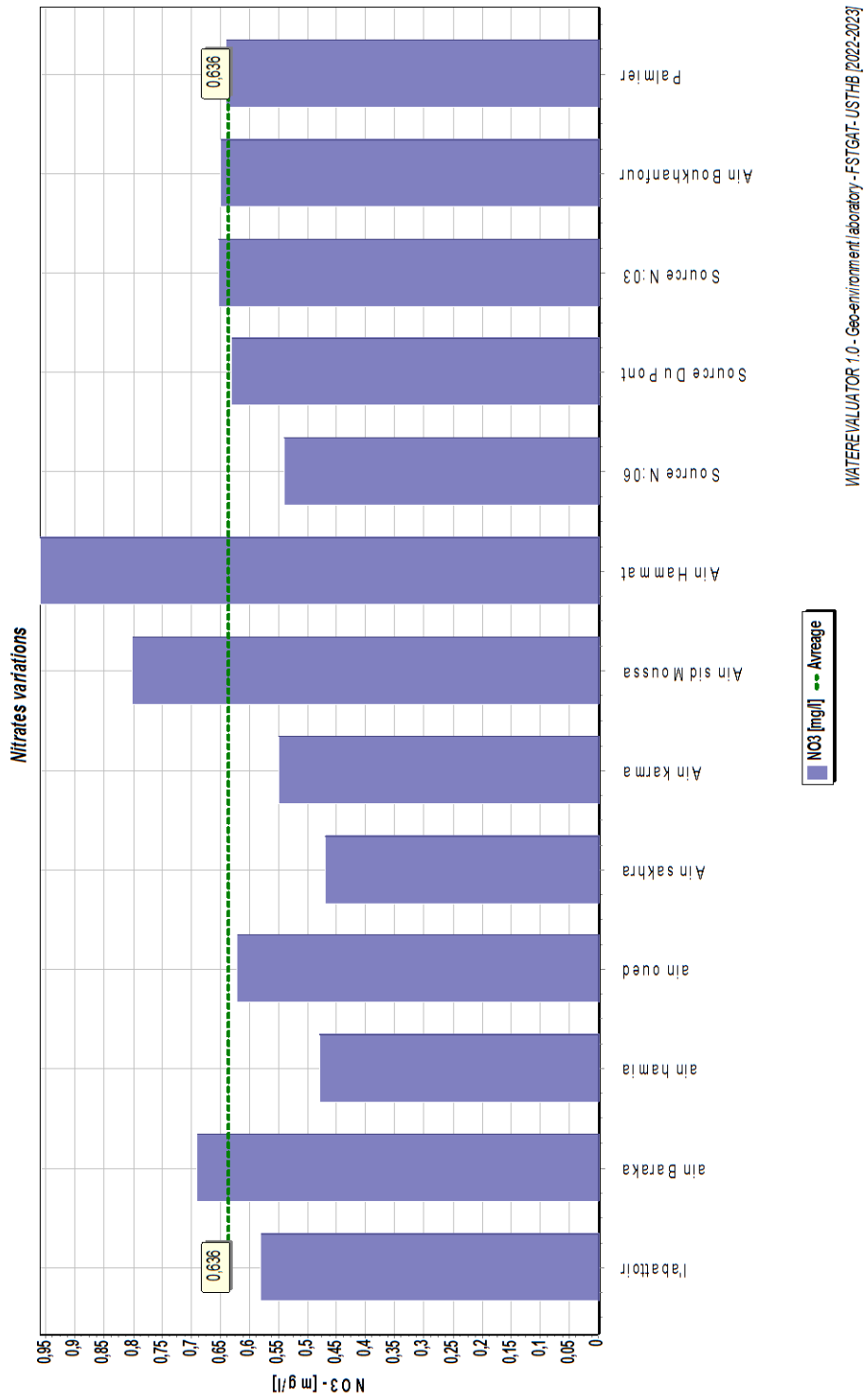


Figure 37: Variation des nitrates NO₃.

- Les nitrates (NO_3^-) présents à de faibles concentrations (0,5 à 1 mg/L) proviennent essentiellement de processus naturels liés au cycle de l'azote. Ils résultent principalement de la dégradation de la matière organique dans les sols et de la transformation biologique de l'azote atmosphérique par les microorganismes. Une contribution humaine légère peut parfois exister, notamment à travers les activités agricoles ou les rejets domestiques, mais ces teneurs restent généralement représentatives du fond naturel. À ces niveaux, les nitrates sont très inférieurs aux normes de potabilité et ne présentent pas de risque pour la santé.

5.7 Facies hydrogéochimique

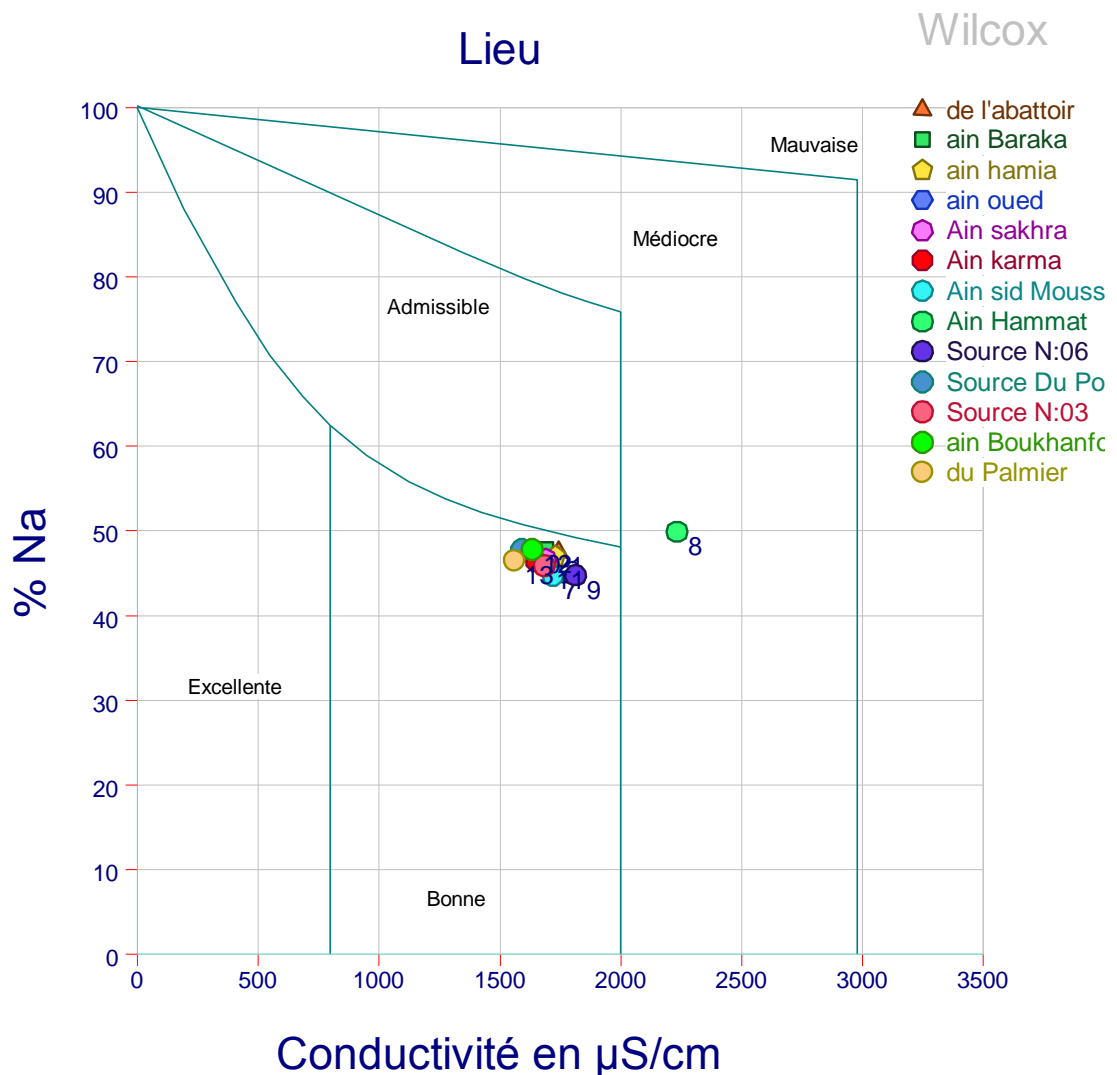


Figure 38: Diagramme de wilcox

Le diagramme de Wilcox montre que la majorité des eaux analysées sont bonne à l'exception de la source Ain Hammat.

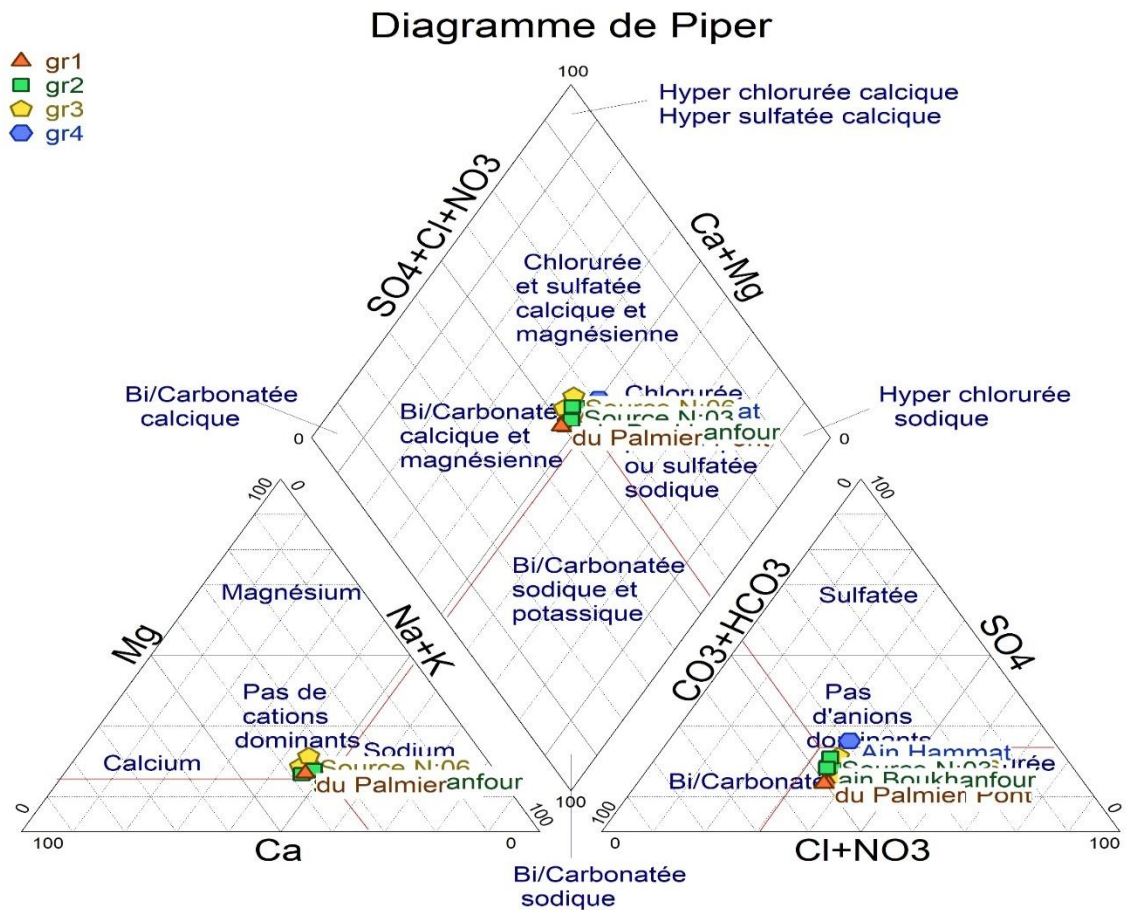


Figure 39: diagramme de piper

Les faciès hydrogéochimique sont illustrés dans la figure (44) ; l'ensemble eaux de la région est de type Chloruré sodique ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$).

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff est un outil utilisé en hydrogéochimie pour représenter les concentrations des principaux ions dissous dans les eaux naturelles (en meq/L ou mg/L) sur une échelle logarithmique (Figure 45) ;

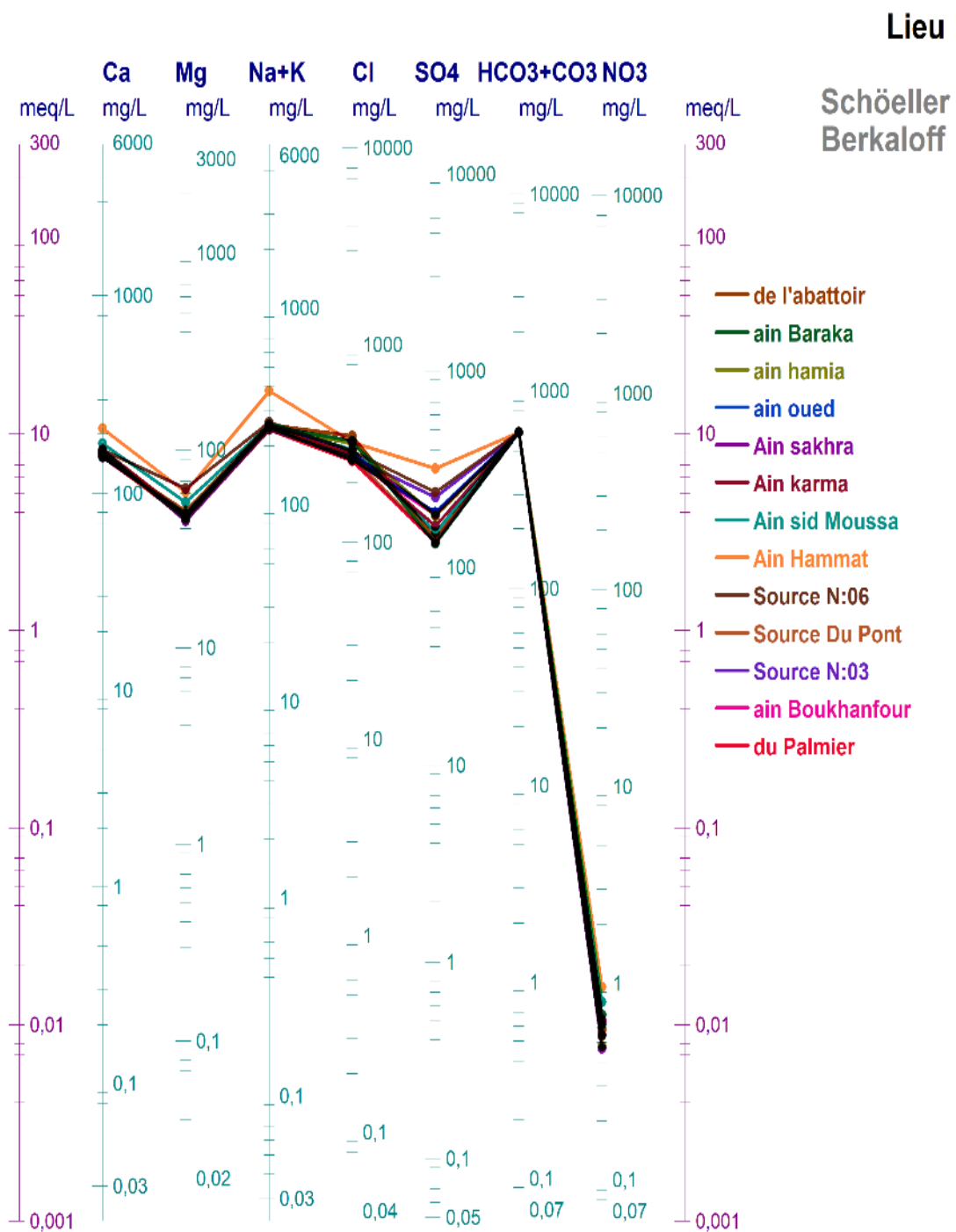


Figure 40 : diagramme de Schoeller Berkaloff

D'après les résultats on observe que le faciès dominant est :

- Chloruré sodique ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$), Avec une contribution secondaire de sulfates (SO_4^{2-}) et de bicarbonates (HCO_3^-).

Ce faciès est typique des eaux thermales profondes, souvent associées à des roches évaporitiques (sel, gypse) ou des milieux de dissolution de roches anciennes.

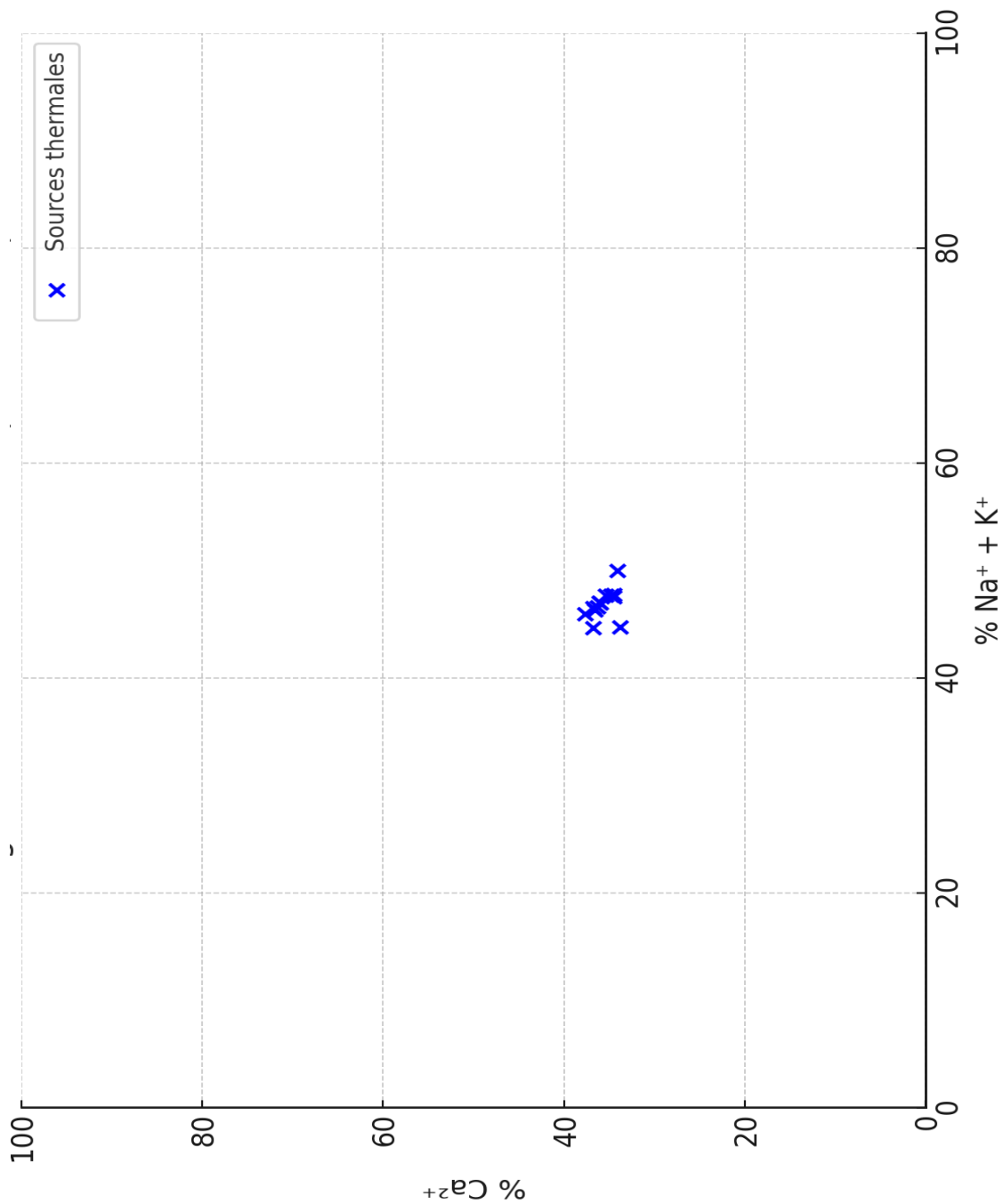


Figure 41 : Diagramme de Durov - Cations ($\text{Na}^+ \text{K}^+$ vs Ca^2)

Le diagramme de Stiff est une autre méthode graphique utilisée pour représenter la composition ionique des eaux, en traçant les concentrations des cations (à gauche) et des anions (à droite) en meq/L. La forme de la figure permet de comparer visuellement les caractéristiques des eaux.

Faciès chimique global : chloruré sodique (Na-Cl) → caractéristique :

- Des circulations profondes, contact avec des formations salines, processus de dissolution d'halite.
- Parfois associé à une origine marine fossile ou circulation longue durée dans des roches anciennes.

La présence de HCO_3^- peut indiquer un mélange partiel avec une recharge de surface ou des interactions avec des roches carbonatées.

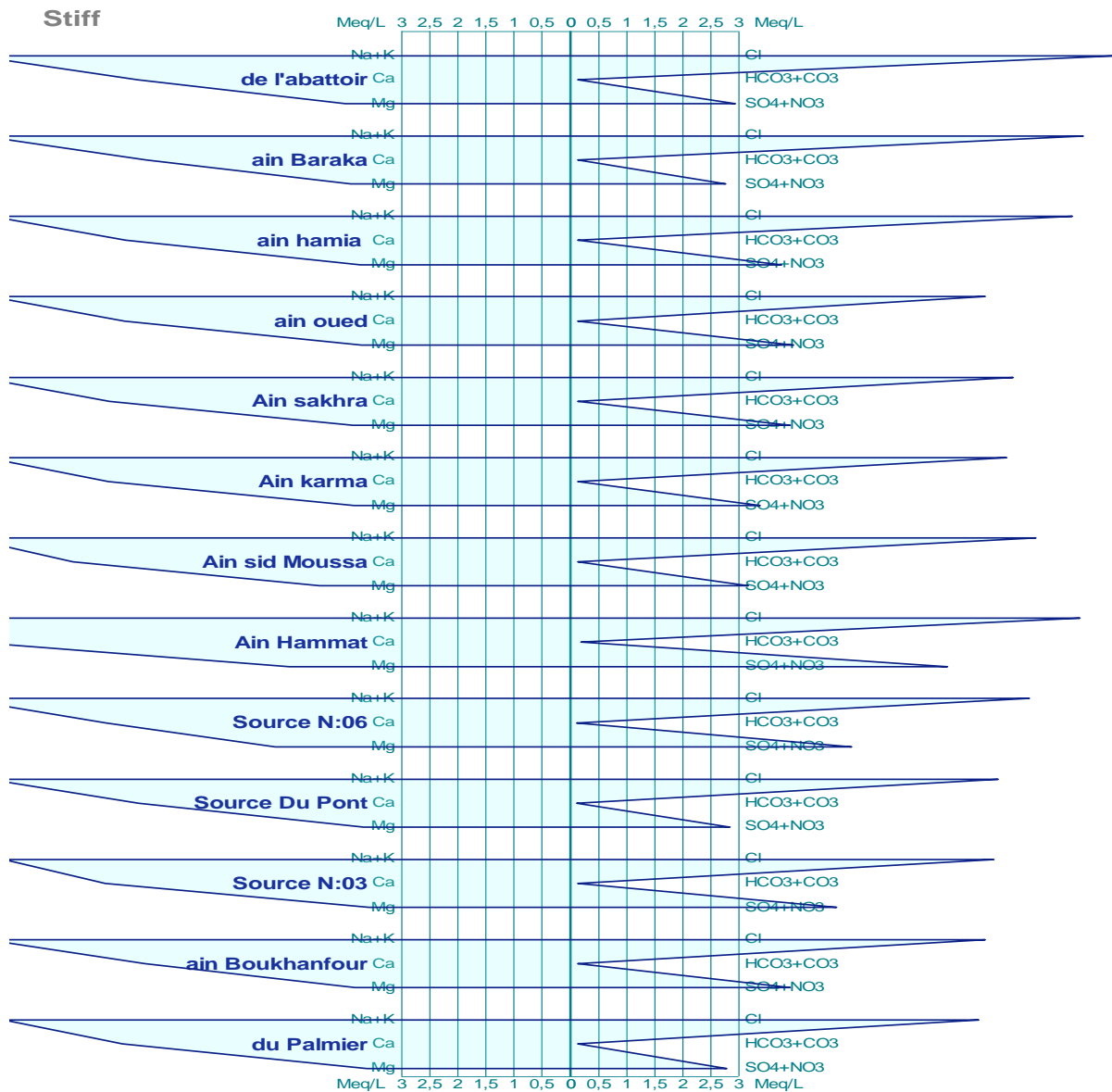


Figure 42 : diagramme de stiff

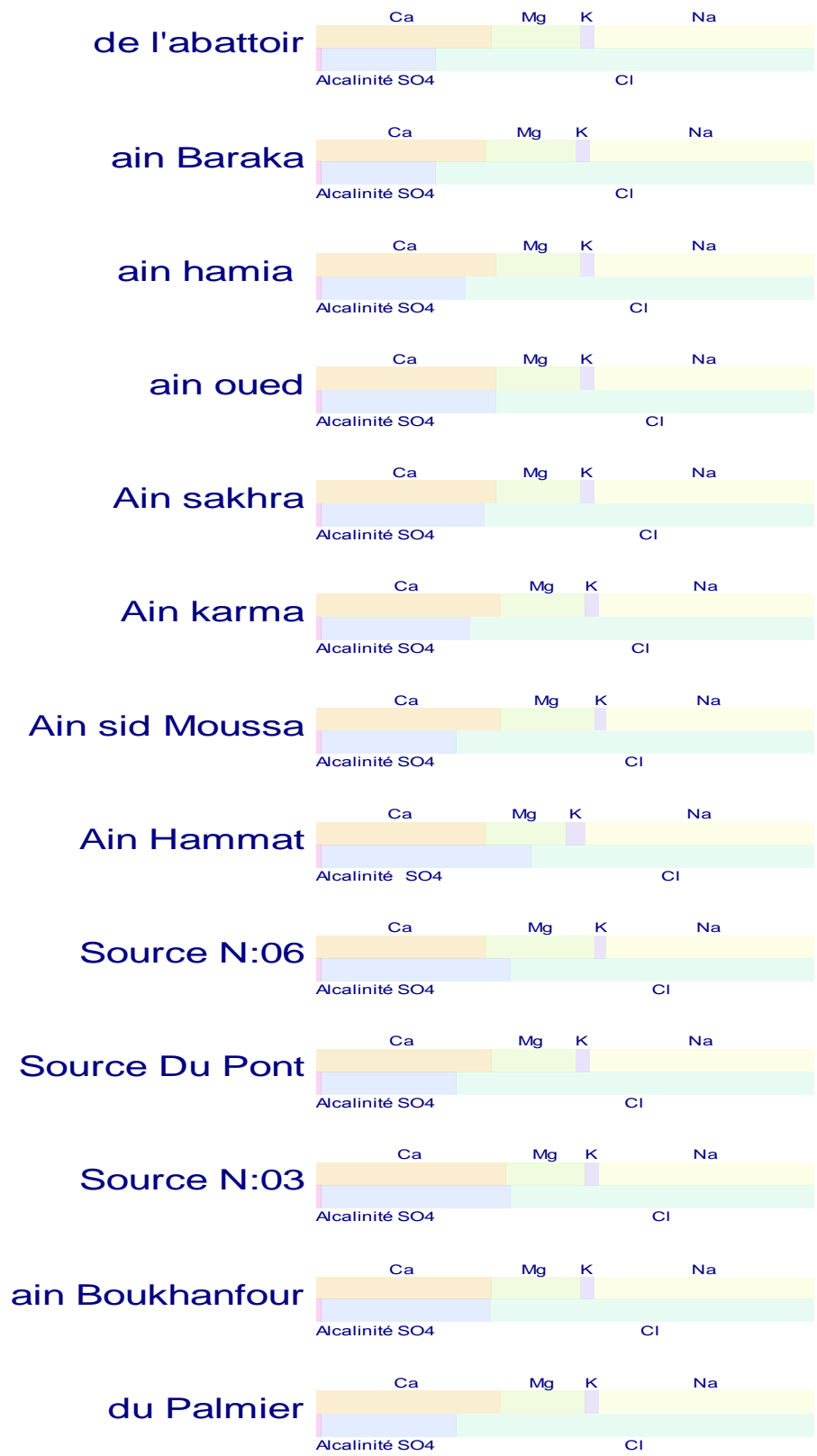


Figure 43 : diagramme de stabler

5.7.1 Diagramme ternaire de Giggenbach

Le diagramme ternaire de Giggenbach (1991) est un outil utilisé en hydrogéochimie pour classer les eaux géothermales en fonction de leurs concentrations relatives en trois anions majeurs : HCO_3^- (bicarbonate), SO_4^{2-} (sulfate) et Cl^- (chlorure).

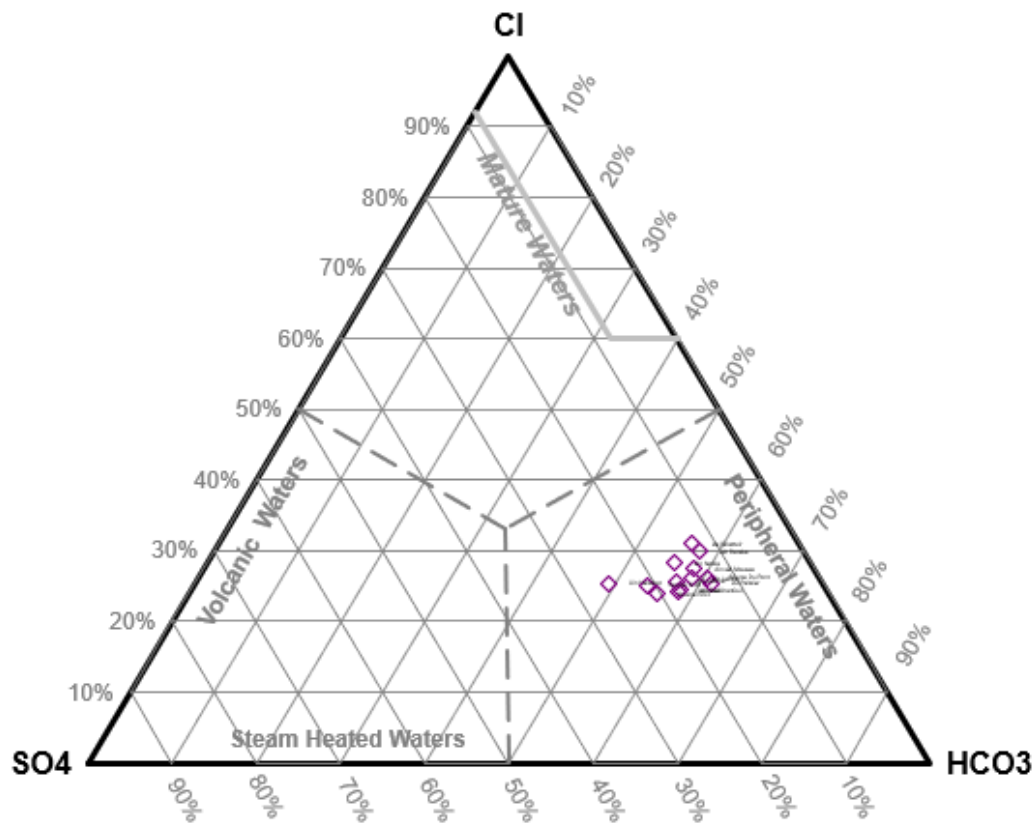


Figure 49:diagramme de Giggenbach 1991

Les résultats obtenus révèlent que les eaux analysées se situent dans la zone correspondant aux eaux périphériques (peripheral waters). Cela indique :

- une influence marquée des eaux météoriques ou des interactions eau-roche à basse température,
- des caractéristiques typiques des systèmes géothermaux peu profonds ou situés en périphérie des zones à forte activité thermique.

Le diagramme proposé par Giggenbach (1988) (Figure 52), est couramment utilisé pour analyser les relations entre les concentrations de potassium, sodium, magnésium et calcium dans les eaux géothermales. Cet outil permet d'identifier les processus de dissolution et de précipitation de minéraux tels que la silice, les carbonates et les argiles au sein des systèmes thermiques. La position des échantillons sur ce diagramme fournit des indications précieuses sur les interactions entre l'eau et les minéraux, ainsi que sur l'origine et l'évolution géochimique des eaux géothermales.

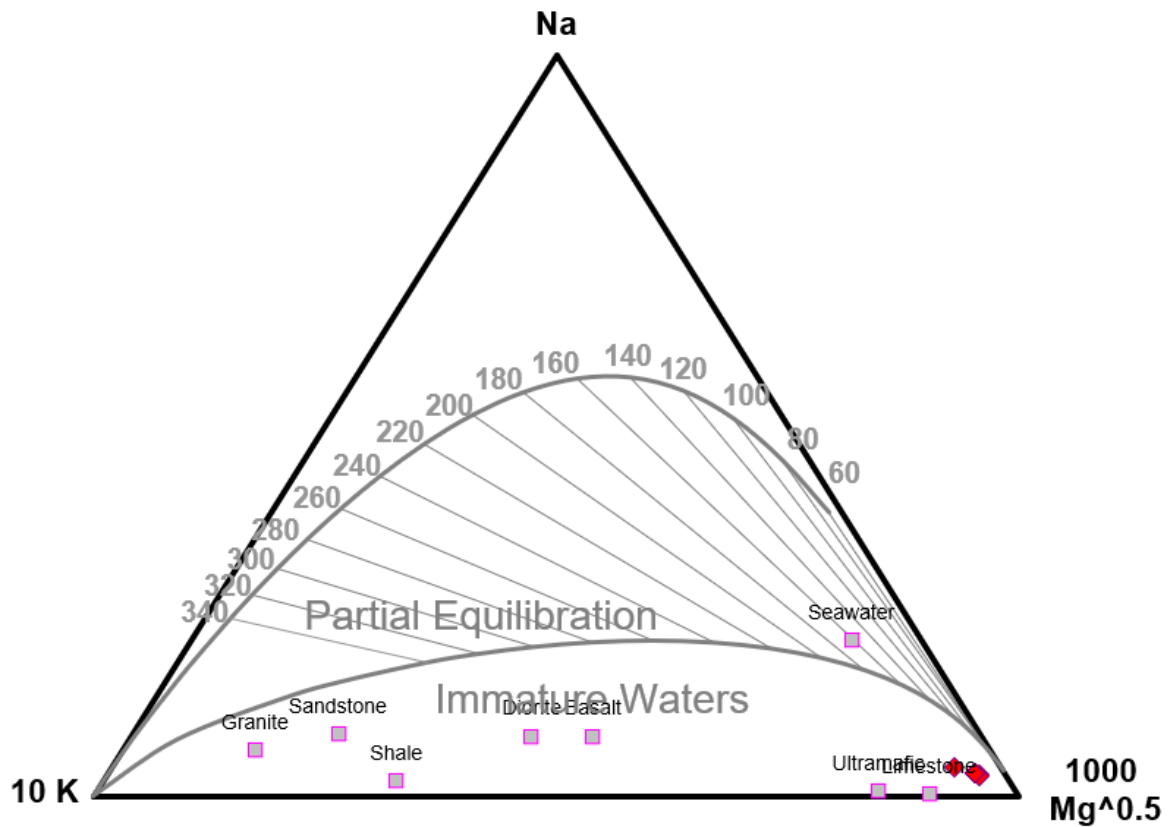


Figure 44:diagramme de Giggenbach (1988)

Les résultats illustrés dans la Figure 50 montrent que les sources thermales de Bouhanifia se situent au-dessus de la ligne d'équilibre, à proximité des terrains calcaires. Cela confirme la forte influence de ces formations géologiques dans des conditions de températures élevées et donne également une indication sur les mécanismes d'écoulement et l'hydrodynamique de la circulation dans le système hydrothermal.

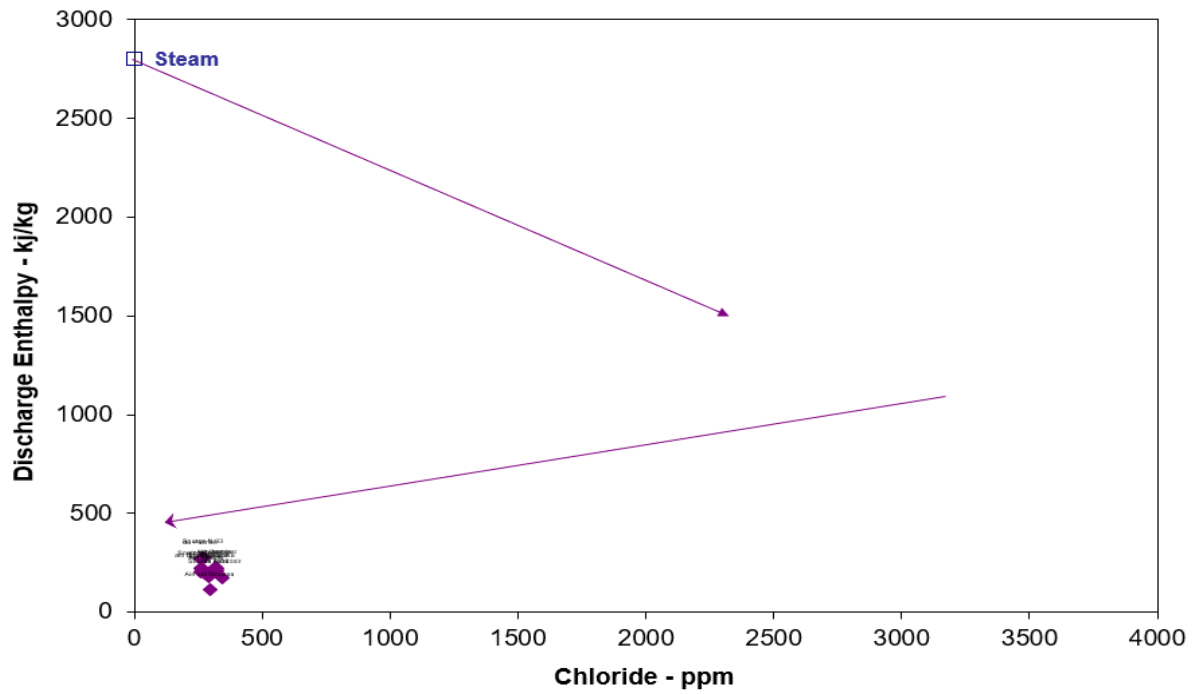


Figure 45: Chloride-ppm

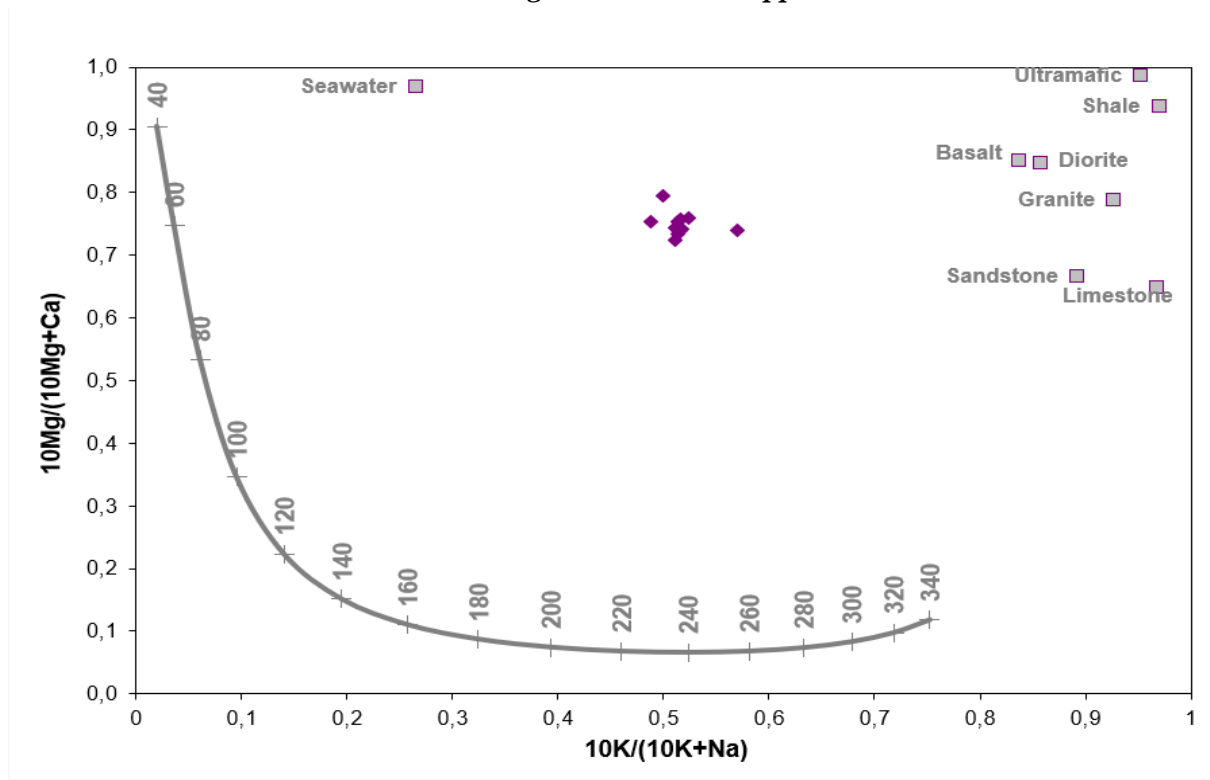


Figure 46: 10K/(10K+Na)

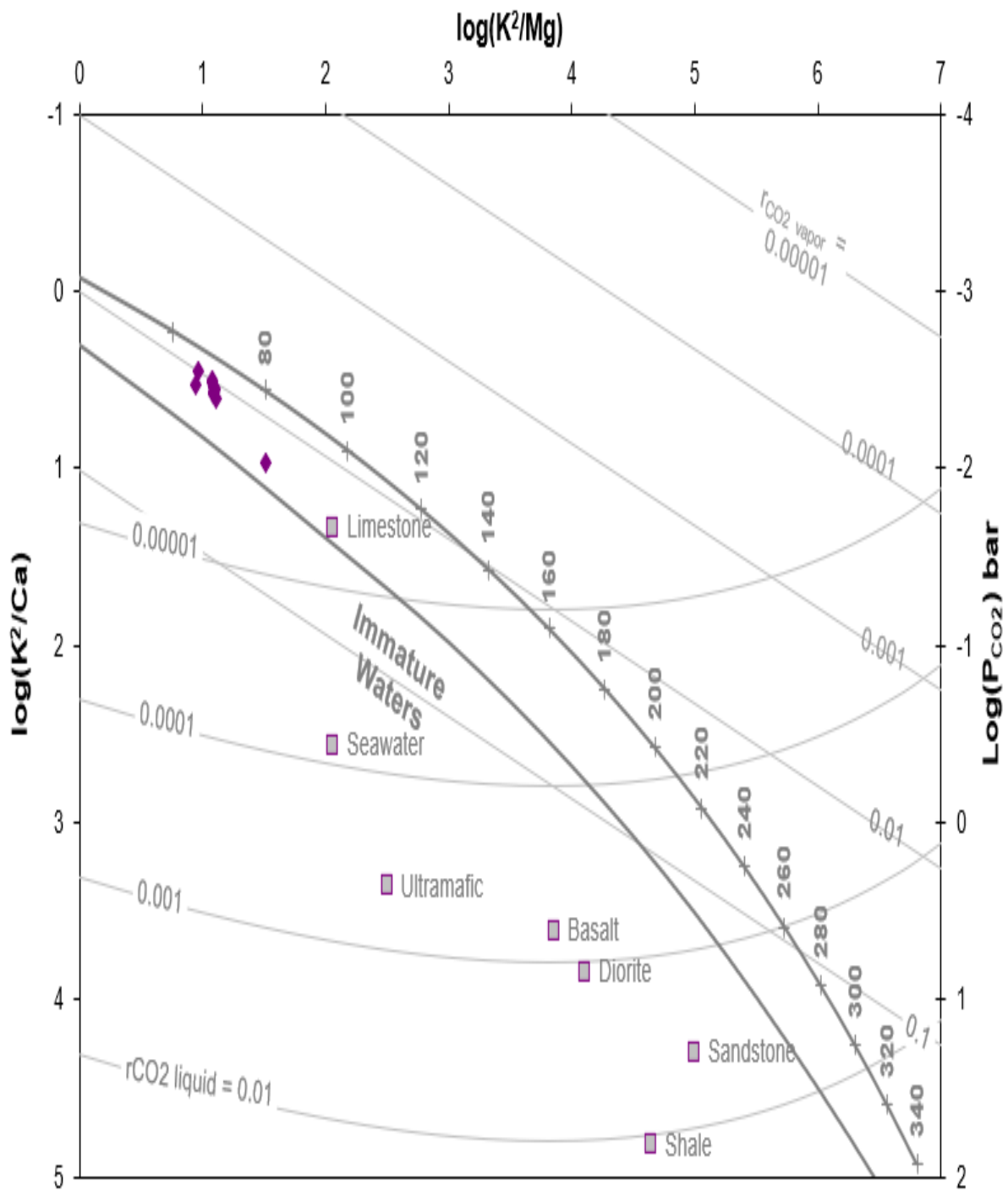


Figure 47: $\log(K^2/Mg)$

5.8 Analyse bactériologique

Le tableau 10 présente les résultats de l'analyse bactériologique des eaux de source.

Tableau 10 : Analyses bactériologique des sources de bouhanifia

Sources name	Temperature	Aerobic germs	coliforms	Fecal coliform	fecal streptococci	Clostridium sulphito reducers
Standards	25°C	20	<10	Absence	Absence	Absence
les palmiers	60.1°C	11	absence	absence	absence	absence
El.amel	64.9°C	10	absence	absence	absence	absence
Source N°3	66.9°C	3	absence	absence	absence	absence
Source N°6	44.3°C	25	93	absence	absence	absence
Source du pont	51.2°C	10	absence	absence	absence	absence
boukhanfour	/	0	absence	absence	absence	absence
Source N°2	/	0	absence	absence	absence	absence

Les eaux des sources de la région de Bouhanifia ont été analysées pour évaluer leur conformité aux standards microbiologiques. Les paramètres étudiés incluent la température, les germes aérobies, les coliformes totaux, les coliformes fécaux, les streptocoques fécaux et les Clostridium sulfito-réducteurs. Les normes de référence indiquent une température optimale de 25°C, un seuil maximal de 20 UFC/mL pour les germes aérobies, et une absence obligatoire des autres indicateurs de contamination fécale.

Les sources **Les Palmiers, El Hammat, Source N°3 et Source du Pont** présentent des températures élevées, variant entre **51,2°C et 66,9°C**, les analyses microbiologiques révèlent une absence totale de coliformes fécaux, streptocoques fécaux et Clostridium, confirmant leur innocuité sanitaire. Les germes aérobies restent dans les limites acceptables (3 à 11 UFC/mL), indiquant une faible charge microbienne globale. Ces résultats confirment que ces eaux, bien que thermales, sont **propres à une utilisation sécuritaire**, sous réserve d'un suivi régulier. La **Source N°6** se distingue par une température modérée (44,3°C) mais affiche des anomalies microbiologiques. Bien que les indicateurs de contamination fécale (coliformes fécaux, streptocoques, Clostridium) soient absents, la présence de **93 coliformes totaux** (dépassant largement la norme de <10) et un taux de germes aérobies à **25 UFC/mL** (au-dessus du seuil de 20) soulèvent des questions. Cette contamination pourrait provenir de matières organiques environnementales (végétation, sol) plutôt que d'une pollution fécale.

Toutefois, une **étude complémentaire** est nécessaire pour identifier la source exacte et évaluer les risques pour la santé publique.

Les sources **Boukhanfour** et **Source N°2** présentent des caractéristiques remarquables : absence totale de germes aérobies (0 UFC/mL) et de tous les indicateurs de contamination. ces résultats suggèrent une eau **très pure**, potentiellement protégée par des conditions géologiques ou un isolement naturel.

La majorité des sources de Bouhanifia respectent les normes microbiologiques, malgré leurs températures élevées caractéristiques des eaux thermales. La **Source N°6** nécessite une attention particulière en raison de sa charge en coliformes totaux, justifiant des analyses supplémentaires (identification des souches, tests chimiques). Enfin, les sources exemptes de micro-organismes (Boukhanfour, Source N°2) mériteraient une étude approfondie pour comprendre leur origine et leur potentiel d'exploitation. Une **surveillance régulière** et une **protection des captages** sont recommandées pour maintenir la qualité de ces ressources hydriques.

5.8.1 Analyse statistique

5.8.2 Matrice de corrélation de Pearson

La matrice de corrélation de Pearson est un tableau qui montre les coefficients de corrélation de Pearson r entre plusieurs variables. Elle permet de mesurer l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives.

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

La figure suivante montre la matrice de corrélation pour les eaux thermale de Bouhanifia ;

Variable	Temp	Ca	Mg	K	Na	HCO3	SO4	Cl	NO3	CE	PH	WQI
Temp	1,00	-0,09	-0,48	0,09	-0,05	-0,30	0,16	-0,35	-0,07	0,06	-0,72	-0,32
Ca	-0,09	1,00	0,64	0,86	0,91	-0,03	0,78	0,23	0,72	0,84	-0,21	0,87
Mg	-0,48	0,64	1,00	0,53	0,67	-0,01	0,62	0,37	0,41	0,60	0,21	0,78
K	0,09	0,86	0,53	1,00	0,98	-0,18	0,75	0,40	0,69	0,84	-0,40	0,79
Na	-0,05	0,91	0,67	0,98	1,00	-0,14	0,77	0,40	0,73	0,85	-0,27	0,87
HCO3	-0,30	-0,03	-0,01	-0,18	-0,14	1,00	-0,44	0,18	0,16	-0,17	0,59	0,00
SO4	0,16	0,78	0,62	0,75	0,77	-0,44	1,00	0,10	0,42	0,82	-0,43	0,69
Cl	-0,35	0,23	0,37	0,40	0,40	0,18	0,10	1,00	0,18	0,39	0,24	0,46
NO3	-0,07	0,72	0,41	0,69	0,73	0,16	0,42	0,18	1,00	0,52	0,08	0,61
CE	0,06	0,84	0,60	0,84	0,85	-0,17	0,82	0,39	0,52	1,00	-0,41	0,67
PH	-0,72	-0,21	0,21	-0,40	-0,27	0,59	-0,43	0,24	0,08	-0,41	1,00	0,08
WQI	-0,32	0,87	0,78	0,79	0,87	0,00	0,69	0,46	0,61	0,67	0,08	1,00

Figure 48: Matrice de Pearson pour la source thermale de Bouhanifia

Les résultats montrent une forte corrélation entre les paires suivantes (Ca-Mg ; Ca-Na ; Ca-SO4 ; Ca-CE ; Mg-K ; Mg-Na ; Mg-SO4; Mg-CE ; K-Na; K-SO4; K-CE; Na-SO4; Na-CE HCO3-PH; SO4-CE). Cette forte corrélation est expliquée par le contact entre les eaux infiltrées et la roche encaissante.

5.8.3 Analyse en composante principale

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) en hydrochimie est une méthode statistique multivariée utilisée pour réduire la complexité des données chimiques et identifier les sources ou processus dominants qui contrôlent la composition chimique des eaux (nappe, rivière, source thermique, etc.).

L'analyse en composante principale pour les eaux de Bouhanifia a été effectuée par le logiciel Minitab ; les résultats sont présentés dans le tableau 11 et les figures

Tableau 11 : les principales composantes

Variable	PC1	PC2	PC3	PC4
T°C	-0,017	0,611	-0,058	-0,229
pH	-0,116	-0,598	0,239	-0,117
c25°C	0,39	0,084	-0,197	0,119
Ca	0,399	-0,009	0,212	0
Mg	0,303	-0,318	0,061	0,491
Na	0,416	-0,006	0,004	-0,116
K	0,402	0,088	-0,099	-0,219
Cl	0,166	-0,339	-0,775	-0,32
SO ₄	0,36	0,168	0,055	0,422
NO ₃	0,302	-0,096	0,489	-0,581

L'analyse en composantes principales révèle que les quatre premières composantes expliquent à elles seules 93 % de la variance totale du jeu de données, ce qui indique qu'elles capturent l'essentiel de l'information géochimique. Cette forte proportion suggère que ces composantes principales traduisent les processus dominants contrôlant la composition chimique et permettent ainsi d'interpréter de manière fiable l'origine des eaux thermales étudiées.

➤ Composante 1 (F1 – 55,4 %) : Il s'agit de la composante la plus influente, traduisant la majeure partie de la variabilité observée dans les données. Elle reflète très probablement un processus géochimique principal (par exemple, l'altération des roches, la minéralisation, etc.).

➤ Composante 2 (F2 – 22,3 %) : Bien que secondaire, cette composante conserve une contribution significative, mettant en évidence un processus complémentaire ou une autre source de variabilité chimique.

➤ Composantes 3 et 4 (F3 – 8,4 % ; F4 – 7,4 %) : Moins dominantes, ces composantes conservent néanmoins un intérêt analytique, notamment pour affiner l'interprétation des mécanismes hydrochimiques plus subtils.

➤ Les composantes restantes (F5 à F10) présentent des contributions inférieures à 3 % cumulées, et peuvent être considérées comme négligeables dans l'analyse et l'interprétation globale.

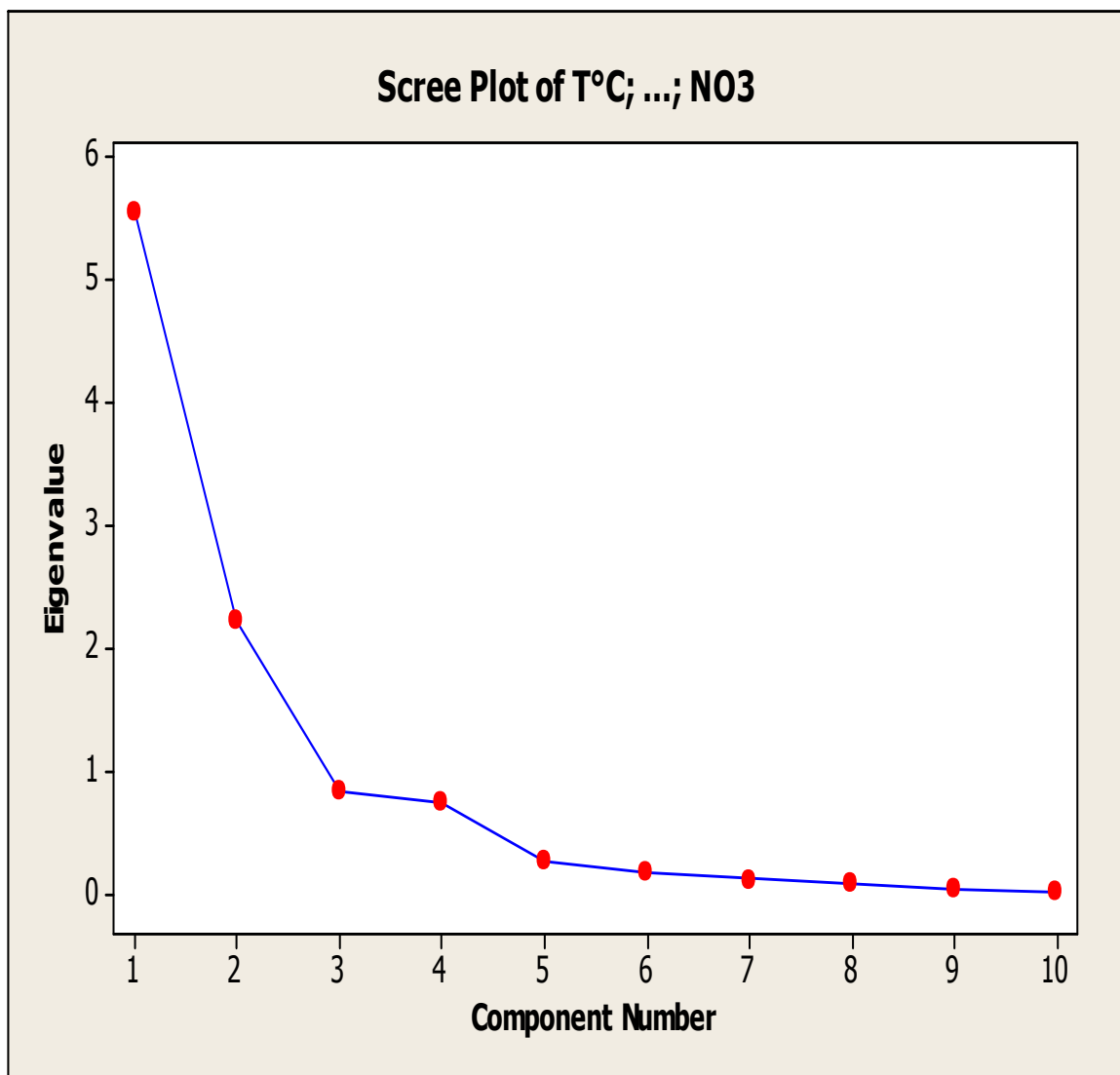


Figure 49: Eigen values

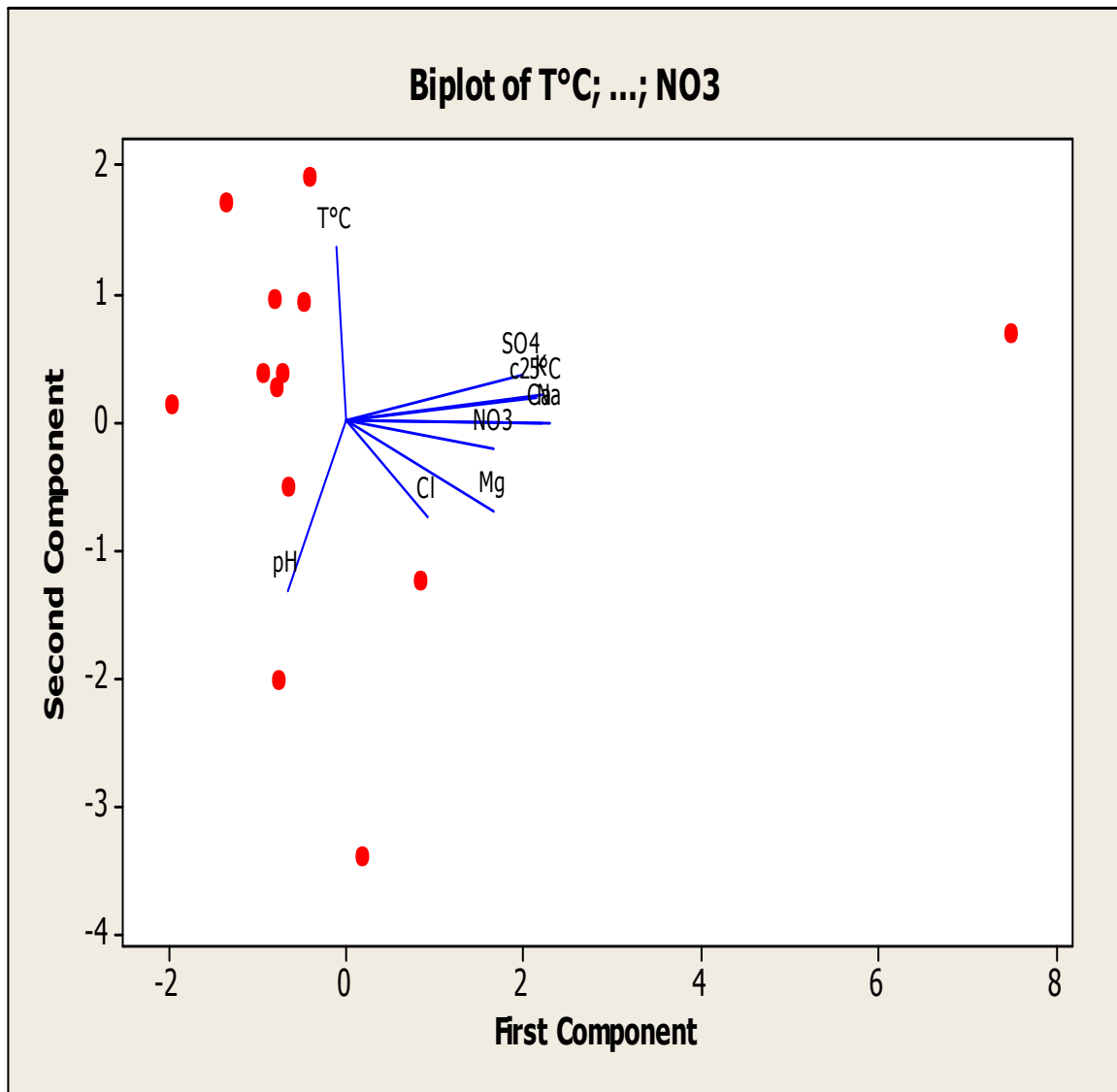


Figure 50:représentation graphique du première et deuxième composante

La Minéralisation dominante (dissolution de roches) est expliquée par F1

Gradient thermal et pH, séparant potentiellement les eaux géothermales des eaux superficielles F2

Le Mélange : eaux profondes salines (Cl^-) vs. Eaux superficielles contaminées (NO_3^-). F3

La Minéralisation locale en sulfates (Mg-SO_4). F4

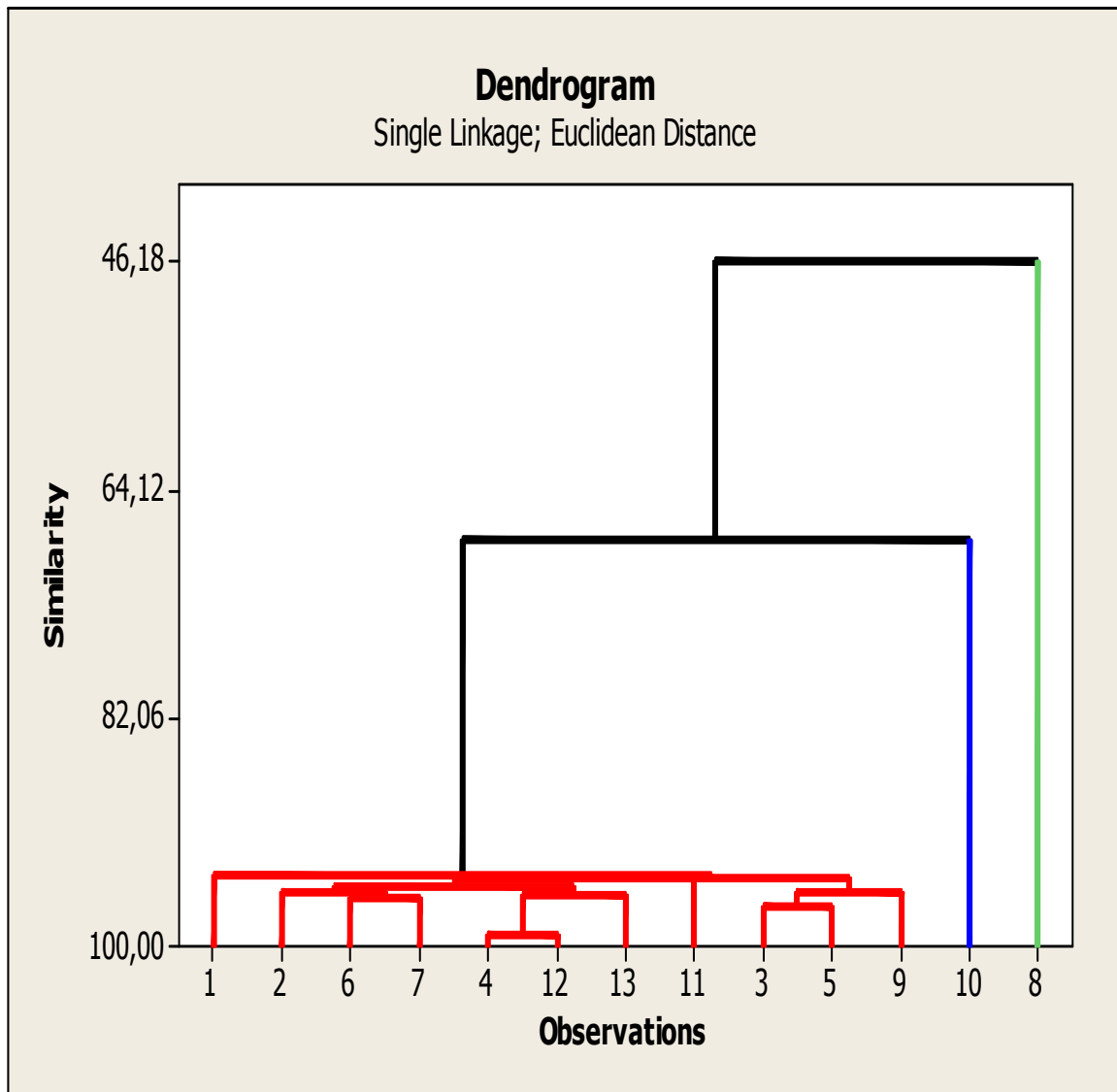


Figure 51: cluster classification

L'analyse par clustering k-means des paramètres majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) des treize sources thermales visait à mettre en évidence des groupes distincts de minéralisation et, par conséquent, des modes de circulation et d'interaction roche-eau différenciés. Cette approche statistique permet de classer objectivement les eaux selon leur teneur ionique, ouvrant une fenêtre sur la profondeur de circulation, la lithologie traversée et le potentiel géothermique de chaque source.

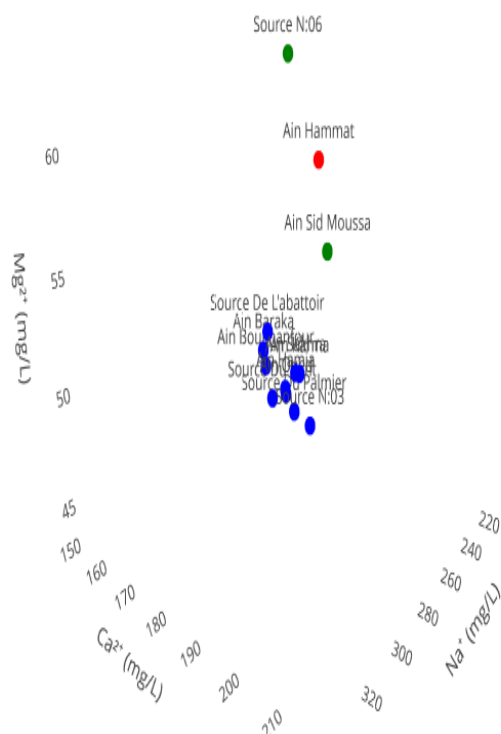


Figure 58:Cluster

Les données de concentration en sodium, calcium et magnésium (mg/L) ont été soumises à un algorithme k-means en trois clusters. Les centroïdes initiaux ont été choisis parmi les trois premières sources, puis itérés jusqu'à convergence. Chaque source a ainsi reçu un label de cluster, révélant une structure en trois groupes selon son degré de minéralisation cationique.

Le clustering a dégagé trois catégories bien définies :

- Cluster 1 : constitué uniquement d'Ain Hammat, avec les teneurs les plus élevées (Na \approx 333 mg/L, Ca \approx 214 mg/L, Mg \approx 61 mg/L).
- Cluster 2 : regroupe Ain Sid Moussa et Source N:06, présentant des concentrations intermédiaires (Na \approx 236 mg/L, Ca \approx 172 mg/L, Mg \approx 59 mg/L).
- Cluster 3 : les dix autres sources forment un groupe homogène de minéralisation plus modérée (Na \approx 225 mg/L, Ca \approx 159 mg/L, Mg \approx 46 mg/L).

Le positionnement d'Ain Hammat dans un cluster à part souligne une eau à forte minéralisation, probablement le reflet d'un temps de séjour prolongé et d'un échange étendu avec les roches encaissantes (silicates et carbonates). Ce profil chimique s'accompagne également de la température la plus élevée mesurée, suggérant un réservoir profond à potentiel géothermique marqué.

Le deuxième groupe (Ain Sid Moussa, Source N:06) présente un niveau de minéralisation supérieur à la moyenne, notamment en calcium, témoignant d'une circulation plus élaborée ou d'une zone de fracture spécifique facilitant l'équilibre avec des faciès carbonatés. Ces deux sources pourraient ainsi correspondre à des affluents intermédiaires entre les niveaux superficiels et profonds du système hydrothermal.

Enfin, le troisième cluster, majoritaire, regroupe des eaux à minéralisation plus faible, caractéristiques d'un régime de circulation relativement superficiel ou rapide. Leur faciès homogène bicarbonaté sodique-potassique et leurs températures plus basses confirment un domaine hydrochimique de fond de bassin, où l'eau interagit principalement avec des roches mixtes sur des distances limitées.

Le modèle k-means a mis en évidence trois paliers hydrochimiques parmi les sources thermales étudiées, chacun reflétant une profondeur et un temps de résidence différents. Cette segmentation fournit un cadre pour orienter les investigations futures : études isotopiques, cartographie des fractures principales ou modélisation thermique. Elle ouvre également la voie à l'optimisation de l'exploitation de ces ressources, adaptée à leur potentiel géochimique et géothermique propre à chaque cluster.

Model conceptuels et simulation

6.1 Introduction

L'estimation de la température du réservoir et de sa profondeur représente un élément essentiel pour la gestion durable du système hydrothermal de la région de Bouhanifia. Bien que l'alimentation de ce réservoir s'effectue principalement par des mécanismes de recharge naturelle via l'infiltration des précipitations, ce chapitre propose une approche quantitative basée sur les géothermomètres empiriques pour calculer ces deux paramètres clés (température et profondeur). La simulation a été établie par le logiciel (Waterquality 1.1) modifié pour cette étude.

6.2 Les géothermomètres chimiques

Les géothermomètres chimiques sont des outils essentiels pour estimer la température des réservoirs géothermaux à partir de la composition des eaux thermales. Ces méthodes reposent sur les équilibres chimiques entre certains éléments (Na, K, Ca, Mg) qui varient en fonction de la température.

6.2.1 Geothermometers Na-K-Ca (Fournier & Truesdell, 1973)

La formule proposée par Fournier et Truesdell (1973) intègre les concentrations en sodium (Na), potassium (K) et calcium (Ca) :

$$T = \frac{1647}{\{ \log(\text{Na}/\text{K}) + b [\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) + 2.06] + 2.47 \}} - 273$$

- **b est un coefficient ajustable en fonction de la dominance du calcium :**
 - $b = 4/3$ si $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) > 0$ (eaux riches en Ca),
 - $b = 1/3$ si $\log(\sqrt{\text{Ca}/\text{Na}}) < 0$ (eaux pauvres en Ca).

Ce géothermomètre est particulièrement utile pour les eaux ayant une teneur significative en calcium, comme celles circulant dans des réservoirs carbonatés.

6.2.2 Différentes variantes du géothermomètre Na-K

Plusieurs auteurs ont proposé des équations ajustées pour estimer les températures des réservoirs à partir du rapport Na/K :

- **Fournier (1979) :**

$$T = 1217 / [\log(\text{Na}/\text{K}) + 1.483] - 273$$

- **Truesdell (1976) :**

$$T = 856 / [\log(\text{Na}/\text{K}) + 0.857] - 273$$

- **Giggenbach (1988) :**

$$T = 1390 / [\log(\text{K}/\sqrt{\text{Mg}}) + 1.750] - 273$$

- **Tonani (1980) :**

$$T = 883[\log(\text{NaK}) + 0.780] - 273$$

- **Nieva & Nieva (1987) :**

$$T = 1178[\log(\text{NaK}) + 1.470] - 273$$

- **Arnórsson et al. (1982) :**

$$T = 933[\log(\text{NaK}) + 0.993] - 273$$

Ces différentes formulations montrent des variations dans les coefficients, reflétant des ajustements en fonction des contextes géochimiques régionaux.

6.2.3 Géothermomètre K-Mg (Giggenbach, 1988)

Le rapport K/Mg est particulièrement sensible aux basses températures (< 150 °C) et permet d'estimer les températures en phase d'équilibre avec les minéraux argileux :

$$T = 4410[\log(\text{KMg}) + 14] - 273$$

Ce géothermomètre est utile pour évaluer les processus de mélange ou de refroidissement des eaux géothermales.

6.3 Applications et limites

- Les géothermomètres Na-K sont plus fiables pour les hautes températures (> 150 °C), tandis que K-Mg est adapté aux basses températures.
- La présence de calcium peut fausser les estimations, d'où l'importance d'utiliser Na-K-Ca dans les eaux dures.
- Les différences entre les équations proviennent des conditions géologiques locales (roches hôtes, temps de résidence, mélange d'eaux).

L'utilisation combinée de plusieurs géothermomètres permet une estimation plus précise des températures des réservoirs géothermaux. Ces outils sont indispensables pour l'exploration et l'exploitation des ressources géothermales en Algérie et ailleurs.

6.3.1 Estimation des profondeurs d'émergence

Sur la base d'un gradient thermique moyen de l'ordre de 3°/100m et 4,29 °C/100m (Bouchareb Haouchine, 2012) et une température moyenne de surface T₀ de 20°C nous avons calculé la profondeur moyenne d'émergence par la formule suivante :

$$Profondeur = \frac{T_{géo} - T_0}{Gradient}$$

6.3.2 Température de réservoirs

Dans le cadre de l'évaluation des conditions thermodynamiques du réservoir, plusieurs géothermomètres chimiques ont été appliqués aux analyses des eaux thermales de Bouhanifia. Ces géothermomètres reposent sur les équilibres chimiques entre certaines espèces dissoutes, reflétant les températures atteintes en profondeur.

Le tableau 12 résumé les valeurs de température estimée à l'aide de différents géothermomètres chimiques, sur la base des concentrations ioniques mesurées dans les eaux thermales.

L'analyse comparative des températures calculées permet d'évaluer la cohérence des résultats obtenus et d'identifier les éventuelles anomalies ou influences superficielles pouvant altérer l'interprétation géothermique.

ID	Source Name	Na-K-Ca (Fournier 1973)	Na-K (Fournier 1979)	Na-K (Truesdell 1976)	Na-K (Giggenbach 1988)	Na-K (Tonani 1980)	Na-K (Nieva 1987)	Na-K (Arnorsson 1982)	K-Mg (Giggenbach 1988)
1	Source De L'abattoir	93,97	225,36	198,36	240,1	234,76	211,97	204,97	29,95
2	Ain Baraka	92,85	222,8	195,11	237,72	231,1	209,46	201,9	30,2
3	Ain Hamia	91,31	223,24	195,67	238,13	231,73	209,89	202,42	30,08
4	Ain Oued	91,16	222,79	195,09	237,71	231,08	209,45	201,88	30,09
5	Ain Sakhra	91,01	222,22	194,38	237,19	230,28	208,9	201,21	30,15
6	Ain Karma	90,3	221,91	193,99	236,9	229,84	208,6	200,84	30,27
7	Ain Sid Moussa	86,74	212,97	182,74	228,57	217,21	199,85	190,19	31,55
8	Ain Hammat	111,5	242,63	220,59	256,08	259,82	228,87	225,87	25,92
9	Source N:06	90,55	216,84	187,6	232,19	222,66	203,64	194,79	31,74
10	Source Du Pont	91,36	221,11	192,98	236,16	228,71	207,82	199,89	30,18
11	Source N:03	88,3	220,8	192,58	235,87	228,26	207,51	199,51	30,34
12	Ain Boukhanfour	92,18	221,91	193,99	236,9	229,84	208,6	200,84	30,24
13	Source Du Palmier	89,5	221,87	193,94	236,86	229,79	208,56	200,79	30,29
	Moyenne	92,36	222,80	195,16	237,72	231,16	209,47	201,93	30,08

Tableau 12 : Température estimée par les géothermomètres chimiques

Les données de géothermométrie chimique présentées dans le Tableau 12 révèlent des variations significatives dans les températures estimées du réservoir pour les 13 sources thermales. Ces différences proviennent des équilibres thermodynamiques distincts et des hypothèses sous-jacentes à chaque géothermomètre :

6.3.3 Na-K-Ca (Fournier, 1973)

Ce géothermomètre donne les températures les plus basses (86,74–111,5 °C), probablement en raison de sa sensibilité aux eaux riches en calcium, ce qui pourrait indiquer un mélange

avec des eaux souterraines peu profondes ou une dissolution de carbonates (Arnórsson et al., 1983). Ain Hammat (111,5 °C) se distingue, reflétant peut-être un réservoir plus profond et moins dilué.

6.3.4 Géothermomètres Na-K (1976–1988)

Tous les modèles Na-K suggèrent des températures de réservoir comprises entre 190 et 260 °C, avec une légère variation.

- Giggenbach (1988) et Fournier (1979) montrent une bonne cohérence ($\Delta T < 10$ °C pour la plupart des sources).
- Tonani (1980) produit des estimations légèrement plus élevées (p. ex., 259,82 °C pour Ain Hammat), probablement en raison de son étalonnage pour les systèmes à haute température (Nicholson, 1993).

La faible dispersion des résultats Na-K confirme la présence d'un système géothermal à enthalpie modérée à élevée sous la zone d'étude.

K-Mg (Giggenbach, 1988)

Les températures constamment basses (25,92–31,74°C) indiquent un rééquilibrage à faible profondeur ou un mélange avec des eaux froides (Pang et Reed, 1998). Ceci est particulièrement visible pour la Source N:06 (31,74°C), qui pourrait représenter une zone de drainage périphérique.

- Ain Hammat présente des températures anormalement élevées pour tous les géothermomètres, ce qui suggère :
 - Une source de chaleur profonde avec un refroidissement conductif minimal.
 - Une zone de remontée rapide des fluides, limitant les pertes thermiques (Verma et Santoyo, 1997).
- Ain Sid Moussa et la Source N:06 affichent les températures Na-K-Ca les plus basses et K-Mg les plus élevées, impliquant un mélange important avec des eaux superficielles ou une proximité avec des zones de recharge.
- La cohérence globale entre les géothermomètres Na-K (malgré des calibrations différentes) renforce leur fiabilité pour l'évaluation des réservoirs dans ce contexte géologique.

La figure suivante illustre la variation de la température de réservoirs en fonction de chaque géothermomètre ;

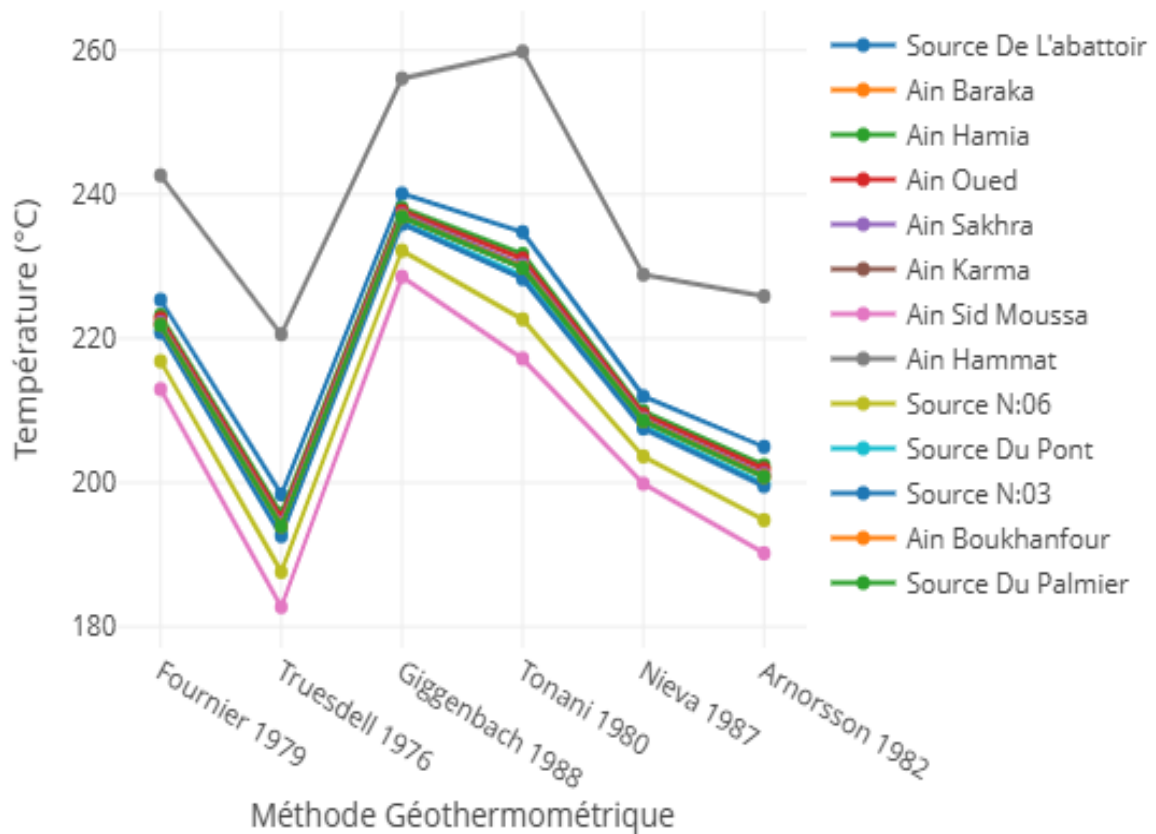


Figure 59 : Températures de réservoirs estimés par des méthodes géothermométriques

6.3.5 Températures mesurées et géothermométriques

La température mesurée varie de 26,9 °C (Ain Sid Moussa) à 65,6 °C (Source N:03), tandis que les températures calculées par le géothermomètre Na-K de Fournier (1979) oscillent entre 212,97 °C et 242,63 °C. Ces températures élevées suggèrent que les eaux proviennent de réservoirs géothermiques profonds.

Selon Fournier (1979), le géothermomètre Na-K repose sur l'équilibre chimique entre le sodium et le potassium dans les eaux géothermales, ce qui permet d'estimer la température du réservoir en profondeur, indépendamment du refroidissement en surface.

Tableau 13 : Estimation de la profondeur d'émergence

ID	Source	T. mesurée (°C)	T. Na-K-Ca (Fournier 1973) (°C)	Profondeur estimée (km)		Type de réservoir probable
				3°C/100m	4.29°C/100m	
1	Source De L'abattoir	41,3	93,97	1,76	1,23	Calcaire fracturé (Na ⁺ , Cl ⁻ , HCO ₃ ⁻ élevés)
2	Ain Baraka	49,6	92,85	1,44	1,01	Calcaire dolomitique profond
3	Ain Hamia	53,7	91,31	1,25	0,88	Calcaire ou grès chaud, SO ₄ ²⁻ élevé
4	Ain Oued	52,4	91,16	1,29	0,90	Dolomie fracturée, SO ₄ ²⁻ élevé
5	Ain Sakhra	45,8	91,01	1,51	1,05	Calcaire à dominance Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻
6	Ain Karma	47,1	90,3	1,44	1,01	Calcaire dolomitique profond
7	Ain Sidi Moussa	26,9	86,74	1,99	1,39	Réservoir mixte (superficiel + profond), Mg ²⁺ élevé
8	Ain Hammat	52,8	111,5	1,96	1,37	Réservoir profond dans grès ou volcanique
9	Source N:06	42,4	90,55	1,61	1,12	Grès ou calcaire confiné, SO ₄ ²⁻ + HCO ₃ ⁻ élevés
10	Source Du Pont	51,6	91,36	1,33	0,93	Calcaire dolomitique profond
11	Source N:03	65,6	88,3	0,76	0,53	Réservoir profond, probablement grès / dolomie
12	Ain Boukhanfour	49,2	92,18	1,43	1,00	Calcaire, SO ₄ ²⁻ modéré, Na ⁺ /Cl ⁻ équilibré
13	Source Du Palmier	64,5	89,5	0,83	0,58	Réservoir profond dolomitique ou gréseux

6.3.6 Profondeur estimée

Les profondeurs varient de 0,58 km à 2 km, ce qui correspond à des systèmes profonds et bien confinés. Les plus grandes profondeurs sont associées à des températures Na-K-Ca plus élevées (ex. Ain Hammat, 111.5 °C à 1,96 km).

Giggenbach (1988) explique que des profondeurs supérieures à 4 km sont typiques des systèmes géothermiques profonds, où les échanges thermiques entre la roche et l'eau atteignent un équilibre minéral stable.

6.3.7 Types de réservoirs

1 Réservoirs carbonatés (calcaire/dolomie)

La majorité des sources (ex. Ain Baraka, Ain Karma, Source Du Pont) indiquent des réservoirs profonds dans des calcaires ou dolomies fracturés. Ces milieux sont propices à la circulation des eaux thermales :

Selon Arnórsson et al. (1983), les roches carbonatées fracturées permettent une bonne circulation des fluides, surtout lorsqu'elles sont associées à des failles ou des zones de cisaillement.

2 Réservoirs gréseux ou mixtes

Certaines sources comme Ain Hammat et Source Du Palmier suggèrent des réservoirs gréseux ou mixtes, ce qui est typique des systèmes plus perméables avec des composantes volcaniques possibles.

Sanyal et Koenig (1990) soulignent que les grès peuvent servir de bons aquifères géothermiques, surtout quand ils sont bien cimentés et fracturés.

6.3.8 Indices géochimiques : Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Mg^{2+}

- Des concentrations élevées de Na^+ , Cl^- , HCO_3^- dans Source de l'Abattoir indiquent un réservoir profond et confiné.
- La présence importante de SO_4^{2-} dans des sources comme Ain Hamia et Ain Oued peut traduire un apport d'origine sulfatique :

Ellis & Mahon (1977) signalent que les eaux riches en SO_4^{2-} proviennent souvent de l'oxydation de pyrite ou de la dissolution d'anhydrite dans les réservoirs profonds.

- Ain Sid Moussa, avec une température mesurée basse (26,9 °C) et une teneur élevée en Mg^{2+} , reflète un réservoir mixte où l'eau a probablement subi un mélange avec des eaux superficielles froides, ce qui dilue la signature thermique :

Giggenbach (1983) note que le Mg^{2+} est un bon indicateur de mélange avec des eaux froides de surface.

6.4 Hydrodynamiques de système thermal des sources de Bouhanifia

Les propriétés thermo-physiques des formations carbonatées (calcaires et dolomies), caractérisées par une conductivité thermique moyenne d'environ 1,3 W/m·K et une capacité thermique proche de 840 J/kg·K ;

L'influence du refroidissement par mélange avec les aquifères superficiels ;

L'alimentation des eaux à partir des reliefs des monts de Benichougran.

Ces éléments indiquent un système profond affecté par des processus de refroidissement secondaire lors de la remontée.

En revanche, les eaux thermales de Saïda semblent mieux correspondre au géothermomètre au quartz conducteur.

Dans cette région, le gradient géothermique est estimé à environ 3,25 °C/100 m (32,5 °C/km) d'après Bouchareb-Haouchine (2012).

Les sources de Saïda paraissent moins affectées par les phénomènes de mélange avec des eaux peu profondes ou par une recharge latérale importante. De plus, selon Belhai et al. (2015), la distance plus réduite entre l'aire d'alimentation et la zone d'émergence favorise une remontée plus rapide des eaux vers la surface, limitant ainsi les pertes thermiques.

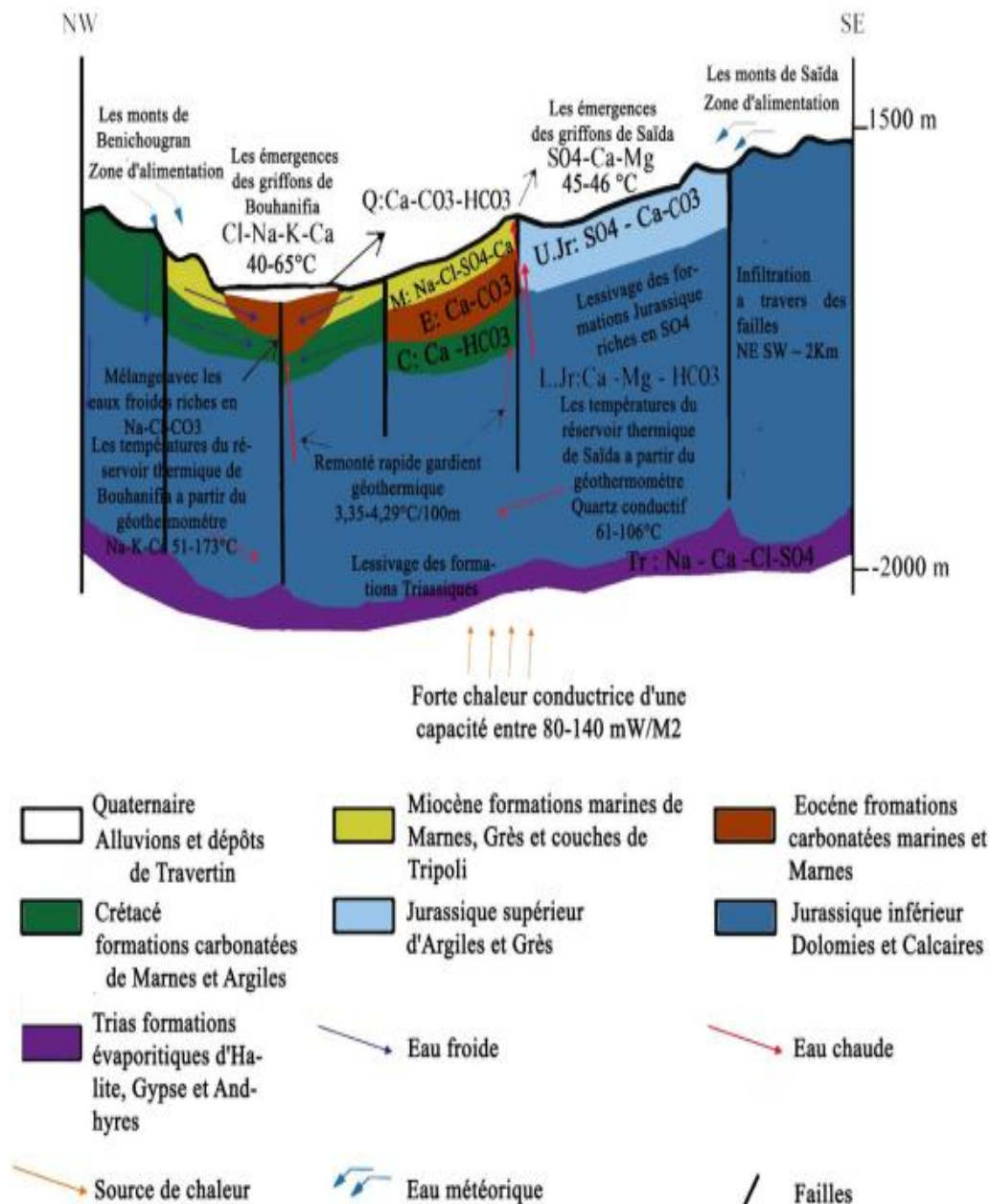


Figure 60 : Hydrodynamiques de système thermal de Bouhanifia ((Benamar ,2023)

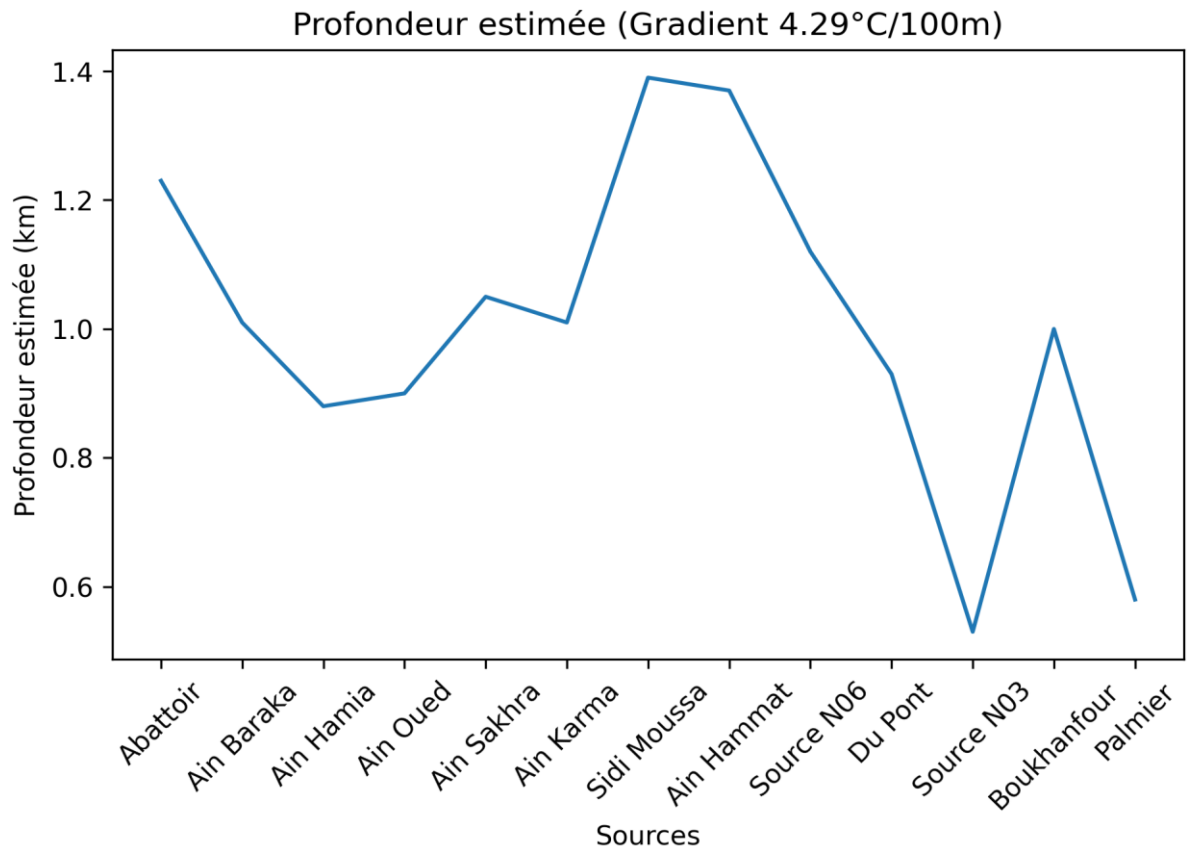
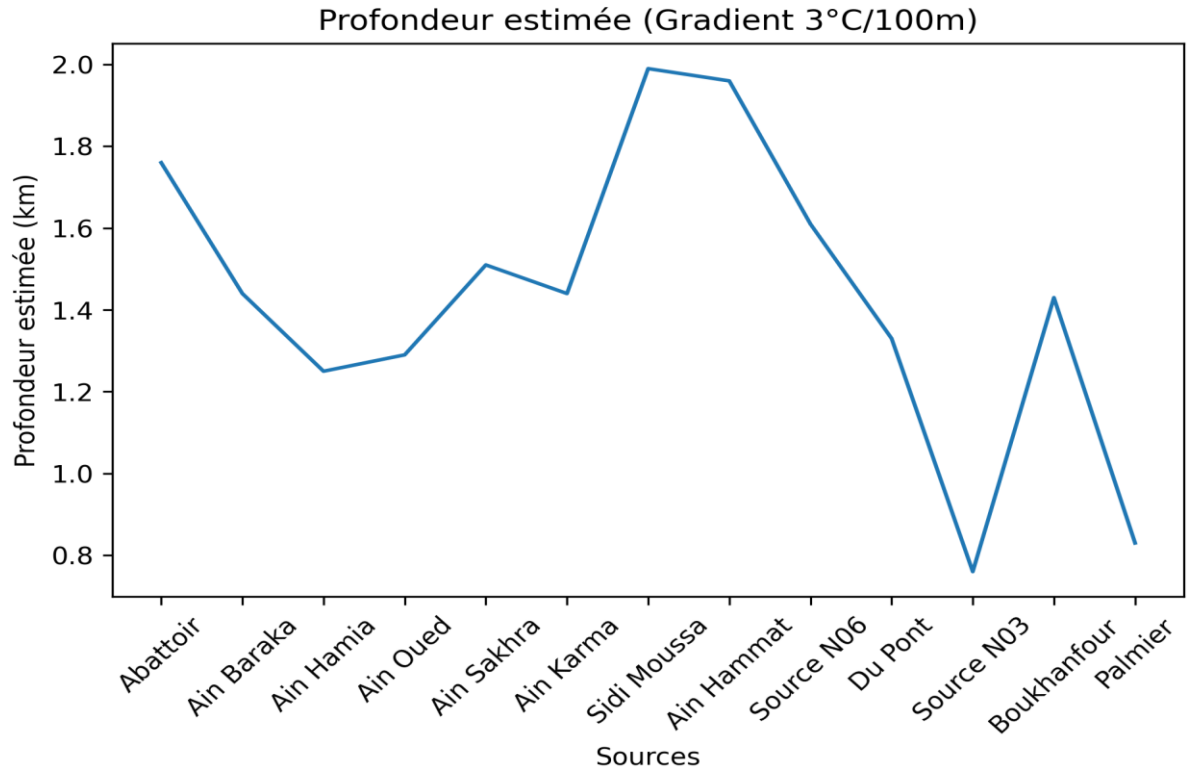


Figure 61 : représentation graphique de profondeur estimée

Chapitre V
Analyse multicritères
et indice de
balnéologie
thermique IBT

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

7.1 Indice de Balnéologie thermique

7.2 Indice de SOUBEIRAN

L'indice de SOUBEIRAN est un indicateur historique utilisé en hydrologie médicale et en balnéothérapie pour évaluer la minéralisation globale des eaux thermales et leur potentiel thérapeutique. Il a été proposé par le chimiste et pharmacien français Eugène Soubeiran (1797-1859), pionnier dans l'étude scientifique des eaux minérales.

7.3 Définition et Calcul de l'Indice de SOUBEIRAN

L'indice repose sur la somme des principaux minéraux et oligo-éléments présents dans l'eau, exprimée en grammes par litre (g/L). Il permet de classer les eaux thermales selon leur richesse en composés actifs.

Formule originale (simplifiée) :

$$\text{Indice SOUBEIRAN} = \text{SO}_4^{2-} + \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{SiO}_2 + \text{Fe}^{2+/3+}$$

(en g/L, après évaporation des matières fixes résiduelles)

Tableau 14 : échelle de classification de l'indice SOUBEIRAN

Valeur (g/L)	Classification	Potentiel Thérapeutique
< 1	Eau très faiblement minéralisée	Peu adaptée aux cures (ex : eaux de source)
1-5	Eau faible à moyennement minéralisée	Usage léger (dermatologie, affections urinaires)
5-20	Eau minéralisée	Cures thermales classiques (rhumatologie, voies respiratoires)
> 20	Eau fortement minéralisée	Usages spécifiques (boues thermales, pathologies lourdes)

7.4 Indice de BALTHAZARD

L'indice de BALTHAZARD est une évolution de l'indice de SOUBEIRAN, développé pour mieux refléter l'efficacité thérapeutique des eaux minérales en attribuant des coefficients d'activité spécifiques à chaque minéral. Il est largement utilisé en hydrologie médicale pour évaluer scientifiquement le potentiel curatif des eaux thermales.

Contrairement à l'indice de SOUBEIRAN (simple somme des minéraux), BALTHAZARD introduit des coefficients de pondération thérapeutique basés sur :

- L'action physiologique des ions (ex : effets anti-inflammatoires du soufre).

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

- La biodisponibilité et la concentration efficace pour un usage médical.

L'indice se calcule comme une somme pondérée des concentrations des minéraux, multipliées par leurs coefficients d'activité respectifs.

7.5 Équation Générale

$$\text{Indice BALTHAZARD} = \sum(C_i \times k_i)$$

Où :

- C_i = Concentration du minéral i (en g/L ou mg/L).
- k_i = Coefficient thérapeutique du minéral i .

Tableau 15 : propriété thérapeutique des minéraux abondants dans les eaux thermales

Minéral/Oligo-élément	Coefficient (k_i)	Justification (Effets Thérapeutiques)
Sulfates (SO_4^{2-})	1.5 - 2.0	Action anti-inflammatoire (rhumatologie).
Bicarbonates (HCO_3^-)	1.2	Neutralisation de l'acidité gastrique.
Calcium (Ca^{2+})	1.0	Renforcement osseux, antiallergique.
Magnésium (Mg^{2+})	1.3	Relaxant musculaire, anti-stress.
Soufre ($\text{S}^{2-} / \text{H}_2\text{S}$)	2.5	Dermatologie, voies respiratoires.
Sodium (Na^+)	0.5	Équilibre hydrique (effet limité en cure).
Silice (SiO_2)	0.8	Régénération tissulaire (peau, cartilage).
Fer ($\text{Fe}^{2+} / \text{Fe}^{3+}$)	1.1	Antianémique.

L'indice de WQI a été calculé par le logiciel waterquality, les résultats sont illustrée dans la figure suivante ;

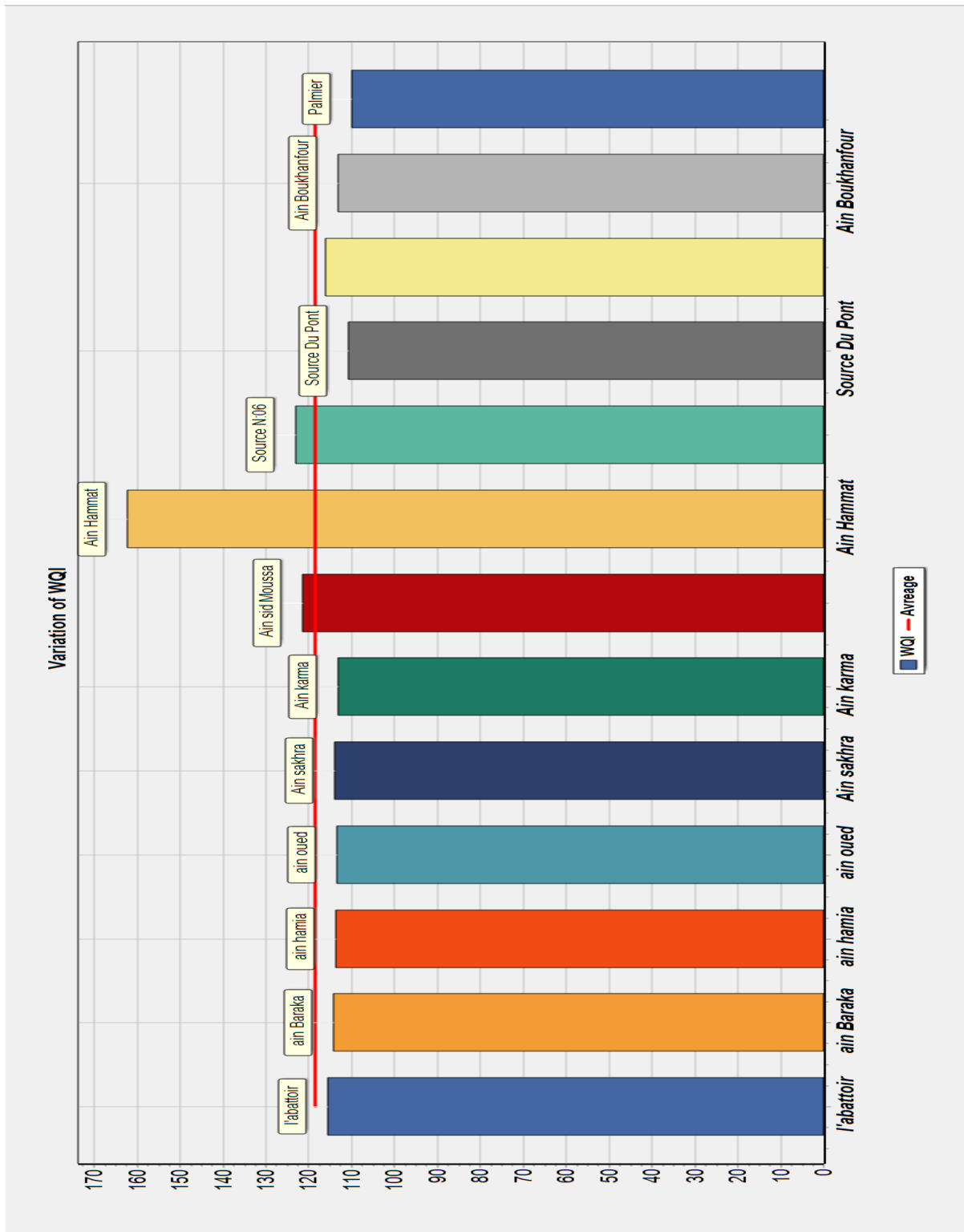


Figure 52 : Variation de l'indice de qualité standard

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Les résultats indiquent que toutes les eaux des sources de Hammam Bouhanifia présentent un indice de qualité des eaux (WQI) supérieur à 100, ce qui révèle une qualité d'eau très mauvaise, impropre à la consommation humaine.

7.6 Etude de la radioactivité naturelle

Les eaux de Bouhanifia sont classées comme eaux thermales à haute radioactivité, le tableau suivant montre les valeurs de la radioactivité d'après I. POUGET et D. CHOUGHAK (1923).

D'un point de vue géologique, l'ensemble des sources s'ancrent dans les formations du Crétacé, caractérisées par des niveaux calcaires perméables. Cette configuration favorise à la fois l'infiltration des eaux météoriques et leur réchauffement en profondeur par gradient géothermique.

Concernant la radioactivité, les valeurs d'émanation en radon (Ra) varient fortement selon les sources, allant de 0.0 à 27 milli-microcuries/litre. Les teneurs les plus élevées sont relevées :

- à la source de l'abattoir (27 et 23.6 m μ Ci/l),
- à la source des bains turcs pour femmes (14.1 m μ Ci/l),
- et à la source près de la rivière (8.3 m μ Ci/l).

Ces valeurs suggèrent une activité géothermique localisée plus marquée dans ces zones, en lien probable avec des zones de fracture ou de circulation plus intense, facilitant la remontée des gaz radioactifs.

Enfin, les valeurs de résistivité mesurées (entre 349 et 519 ohm.cm) confirment une relative conductivité du sous-sol, compatible avec la présence d'eaux minéralisées, et fournissent des indices sur la nature des roches traversées. Les résistivités les plus faibles (ex. Grotte aux Pigeons, 349 ohm.cm) peuvent traduire une minéralisation plus importante ou un contexte géologique plus argileux ou ferrugineux.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Tableau 16 : Signature radioactive des eaux thermale de bouhanifia

Nom de la source	Caractéristique de la source	Température	Émanation Ra en (milli microcurie/l)	Formation géologique	Résistivité
1/source des bains turcs pour les hommes	bicarbonatée calcique légèrement sulfureuse	61.5°	0.0	Crétacé	510
2/ source des bains turcs pour les femmes	bicarbonatée calcique	51.9°	14.1	Id	519
Radioactivité de l'air au-dessus de la piscine			0.04	Crétacé	
3/Eau des Bains (au griffon et au robinet des bains)	Bicarbonatée calcique	66.3°	3	Id	515
4/Eau des Bains refroidie	Id	38° à 44°	0.0	Id	
5/Source du Palmier	légèrement sulfureuse	66.5°	0.14	Id	515
6/Source de l'abattoir (près du pont)	Bicarbonatée cal	52°	27	Id	496
7/ Source de l'abattoir (près du pont)	Id	43°	23.6	Id	496
8/ Source de l'Hôtel de Vichy	Id	55°	1.26	Id	512
9/ Source du bord de la rivière, près de l'Hôtel de Vichy	Id	56°	8.3	Id	512
10/ Source froide captée à 300 m. en amont du pont	Id	26°	0.0	Id	
11/ Source de la Grotte aux pigeons, à 7 km. de Bouhanifia	Bicarbonatée calcique ferrugineuse	48°	0.04	Crétacé	349
12/Radioactivité du gaz émis par la source	Id		0.99	Id	

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

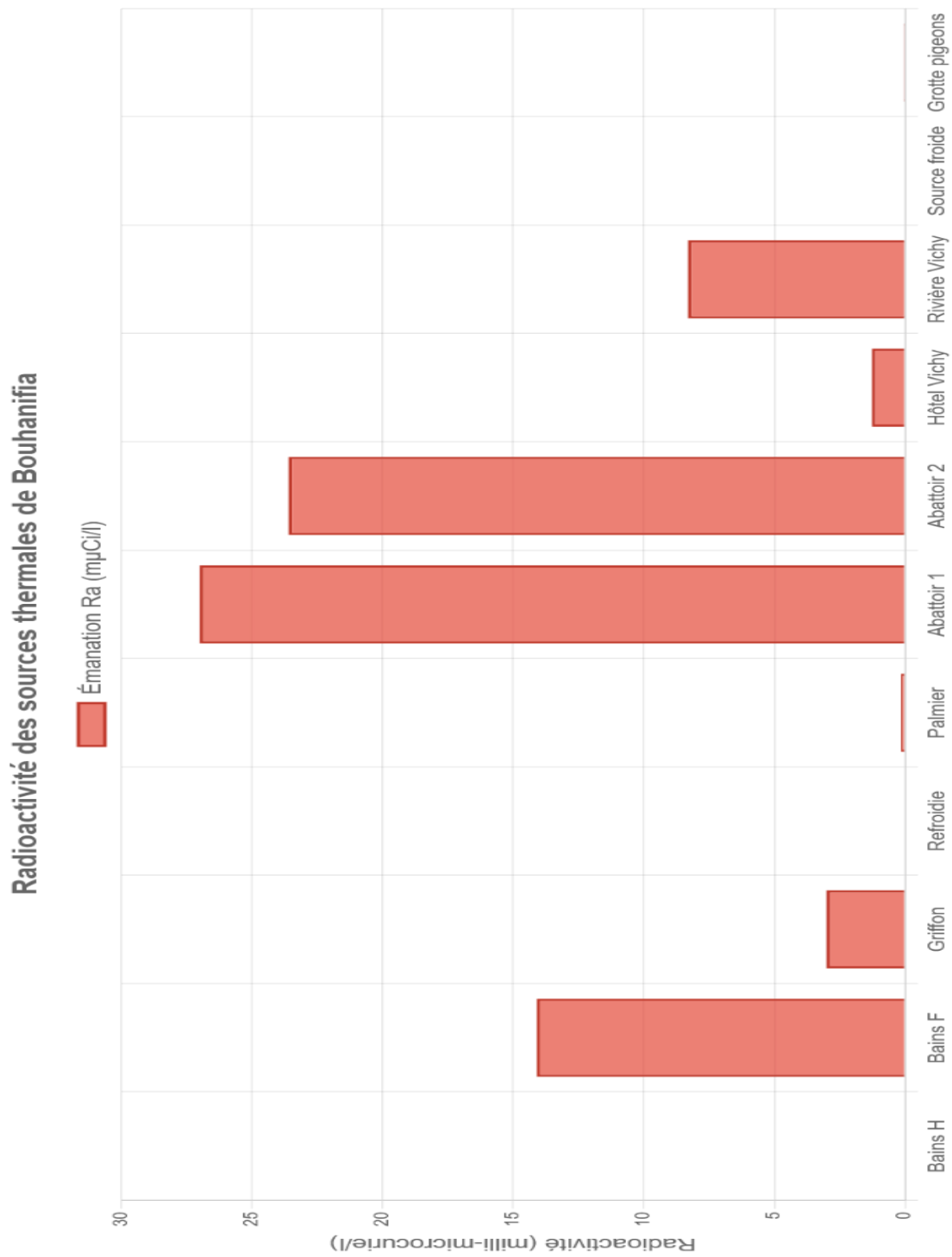


Figure 53: Radioactivité

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.1 Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.2 Introduction

L'évaluation de la qualité des eaux constitue une étape essentielle pour assurer une gestion durable des ressources hydriques, particulièrement dans les zones soumises à des pressions anthropiques ou à un contexte hydroclimatique vulnérable. Cette évaluation revêt également une importance majeure dans le domaine de la **balnéologie**, où les eaux thermales sont exploitées pour leurs propriétés thérapeutiques. En effet, la composition minérale, la température et les caractéristiques physico-chimiques de ces eaux influencent directement leur efficacité dans le traitement de diverses affections (rhumatismes, dermatoses, troubles respiratoires, etc.). Ainsi, une analyse rigoureuse de leur qualité est indispensable pour garantir à la fois leur innocuité et leur potentiel curatif. Dans ce cadre, les outils d'aide à la décision multicritère, tels que la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process), se révèlent particulièrement adaptés pour structurer l'analyse et faciliter une prise de décision rigoureuse et objective.

Développée par Thomas L. Saaty dans les années 1980, la méthode AHP repose sur la décomposition hiérarchique d'un problème en objectifs, critères, sous-critères et alternatives, et sur l'évaluation relative de ces éléments à travers des comparaisons par paires (Saaty, 1980). L'une de ses forces réside dans sa capacité à combiner des données quantitatives (mesures analytiques) et des jugements d'experts, tout en fournissant un indicateur de cohérence du raisonnement. Dans les études hydrogéochimiques, et plus particulièrement dans les approches de classement, d'interprétation et de valorisation des eaux thermales, cette méthode offre un cadre structuré pour hiérarchiser les ressources selon leur potentiel et leur qualité.

En balnéologie moderne, où l'objectif est souvent de valoriser les propriétés thérapeutiques des eaux minérales naturelles, la méthode AHP permet d'intégrer des indicateurs spécialisés, comme l'indice SOUBEIRAN, dans une évaluation multicritère. Cet indice, conçu pour apprécier le potentiel thérapeutique d'une eau thermale en fonction de sa composition chimique et de sa température, devient un critère pertinent parmi d'autres dans les analyses décisionnelles multicritères (AHP, ANP), aux côtés de paramètres comme le pH, la teneur en éléments traces, la radioactivité naturelle, ou encore la stabilité physico-chimique dans le temps.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Ainsi, l'intégration de l'indice SOUBEIRAN dans une démarche AHP permet de :

- Classer les stations thermales selon leur potentiel thérapeutique global.
- Valider scientifiquement des allégations thérapeutiques attribuées aux eaux utilisées en soins.
- Guider des campagnes de forage ou d'aménagement en orientant les priorités vers les sources les plus prometteuses en termes de bénéfices thérapeutiques et de durabilité.

Comme l'ont souligné Feizizadeh et al. (2014) et Yazdanpanah et al. (2020), l'AHP est une méthode très employées dans l'analyse de la qualité des eaux souterraines dans des contextes complexes, car elle permet de construire des modèles hiérarchiques adapté au contexte géologique et régionale.

Dans le cas des eaux thermales de Bouhanifia, nous avons utilisé cete méthode pour hiérarchiser les sources selon des critères hydrogéochimiques, thérapeutiques et de vulnérabilité, afin de définir les priorités d'exploitation et de protection, tout en favorisant une valorisation raisonnée dans le cadre du développement local durable.

Le recours à la méthode AHP s'explique par la nature complexe du problème étudié, qui nécessite la prise en compte simultanée de plusieurs facteurs interdépendants. Dans ce type d'analyse, les paramètres considérés sont souvent nombreux et de nature différente (quantitative et qualitative), ce qui rend indispensable l'utilisation d'un outil d'aide à la décision structuré.

L'AHP permet d'organiser le problème sous forme hiérarchique, en distinguant clairement l'objectif principal, les critères d'évaluation et les éventuelles alternatives. Cette structuration facilite la compréhension du modèle décisionnel et améliore la transparence méthodologique.

Un autre avantage majeur de cette approche réside dans la comparaison par paires des critères. Ce principe permet d'attribuer des poids relatifs en fonction de leur importance respective dans le contexte de l'étude, au lieu d'adopter une pondération arbitraire. De plus, la vérification de la cohérence des jugements renforce la fiabilité des résultats obtenus.

Enfin, la méthode AHP est particulièrement adaptée aux études environnementales et hydrogéologiques, où les décisions reposent sur l'intégration de multiples variables spatiales et thématiques. Elle constitue ainsi un outil pertinent pour hiérarchiser les facteurs influençant le phénomène étudié et pour appuyer la prise de décision de manière rationnelle et justifiée.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.3 Fondements Théoriques de l’AHP

8.3.1 Décomposition hiérarchique

Structurer le problème en niveaux (objectif, critères, sous-critères, alternatives).

8.3.2 Comparaisons par paires

Évaluer l’importance relative des éléments deux à deux.

- Calcul des priorités : Utilisation d’une échelle de Saaty (1 à 9) pour quantifier les préférences.
- Vérification de la cohérence : S’assurer que les jugements sont logiques (via l’indice de cohérence).
- Vecteurs propres : On calcule le vecteur propre de la matrice pour obtenir les poids relatifs de chaque critère ou alternative.
- Cohérence : Un indice de cohérence (CI) et un rapport de cohérence (CR) permettent de vérifier si les jugements sont logiques.

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

$$CR = \frac{IC}{RI}$$

$CR < 0.1 \rightarrow$ *cohérence acceptable*

8.3.3 Échelle de Saaty

Tableau 17 : échelle de Saaty

Valeur	Définition
1	Égalité d’importance
3	Importance faible
5	Importance forte
7	Importance très forte
9	Importance extrême
2,4,6,8	Valeurs intermédiaires

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.4 Étapes de la Méthode AHP

Étape 1 : Structuration de la Hiérarchie

- **Niveau 1** : Objectif global (ex : "Choisir un fournisseur").
- **Niveau 2** : Critères (ex : Coût, Qualité, Délai).
- **Niveau 3** : Sous-critères (si nécessaire).
- **Niveau 4** : Alternatives (ex : Fournisseur A, B, C).

Étape 2 : Comparaisons par Paires

- Construire une **matrice de comparaison** pour chaque niveau.

Étape 3 : Calcul des Pondérations (Vecteurs propres)

- Normaliser la matrice et calculer les **valeurs propres**.

8.4.1 Méthode approchée

Somme des colonnes.

Normalisation (diviser chaque élément par la somme de sa colonne).

Moyenne des lignes → **Pondérations**.

Étape 4 : Vérification de la Cohérence

- **Indice de Cohérence (IC)** = $(\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$
- **Ratio de Cohérence (RC)** = IC / Indice Aléatoire (IA)
- **RC < 0,10** → Jugements cohérents.

Étape 5 : Agrégation des Résultats

- Calcul du **score global** des alternatives en combinant les pondérations.

8.4.2 Méthodologie

Dans cette section, nous détaillons la méthodologie adoptée pour le calcul de l'Indice de Balnéologie Thermale (IBT). Cet indice a été développé dans le cadre du présent travail à travers une approche d'analyse multicritère.

8.5 Définition de la Hiérarchie des Critères

L'AHP repose sur une **décomposition hiérarchique** du problème en :

- **Objectif principal** : Évaluer la qualité balnéologique des eaux thermales (IBT).
- **Critères principaux** : Facteurs influençant la qualité thermique (ex : composition minérale, température, propriétés thérapeutiques).
- **Sous-critères** : Paramètres détaillés pour chaque critère.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.6 Comparaison par Paires et Matrice de Poids

Pour chaque niveau, une matrice de comparaison par paires est construite en utilisant une échelle de 1 à 9 (Saaty, 1980), (Tableau 18):

Tableau 18 : Echelle de saaty (Saaty 1990)

Intensité de l'importance sur une échelle absolue	Définition	Explication
1	Importance égale	Deux activités contribuent de manière égale à l'objectif.
3	Importance modérée de l'un par rapport à l'autre	L'expérience et le jugement privilégient nettement une activité par rapport à une autre.
5	Importance essentielle ou forte	L'expérience et le jugement privilégient nettement une activité par rapport à une autre.
7	Très grande importance	Une activité est fortement favorisée et sa prédominance démontrée dans la pratique
9	Extrême importance	Les preuves en faveur d'une activité plutôt qu'une autre sont d'une affirmation de la plus haute qualité.
2.4.6.8	Valeurs intermédiaires entre les deux jugements adjacents	Quand un compromis est nécessaire
Réciproques	Si l'activité A possède l'un des nombres ci-dessus qui lui est attribué par rapport à l'activité B, alors A possède la valeur réciproque par rapport à B.	
Rationnels	Rations issues de l'échelle	Si la cohérence devait être imposée en obtenant n valeurs numériques pour couvrir la matrice

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.7 L'échelle fondamentale

8.7.1 Les principaux critères utilisés sont les suivant :

1. Température (T)
2. Minéralisation (EC)
3. pH
4. Potentiel Thérapeutique (PT)

8.7.2 Sous-Critères pour le Potentiel Thérapeutique :

- Indice de SOUBEIRAN
- Teneur en $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$
- Bicarbonates (HCO_3^-)
- Sulfates (SO_4^{2-})

8.7.3 Matrice de comparaison

Le regroupement des critères principaux permet d'établir la matrice de jugement (ou de comparaison). Cette matrice constitue une étape essentielle pour déterminer les poids relatifs attribués à chaque paramètre, en fonction de leur importance dans l'évaluation.

Dans le cadre de ce travail, nous avons identifié la température, le pH, la minéralisation ainsi que le potentiel thérapeutique comme des paramètres clés dans le calcul et la classification des eaux thermales.

Les résultats de cette analyse sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 19 : Matrice de comparaison

Critère	T	EC	Ph	PT
T	1,00	0,50	3,00	0,33
EC	2,00	1,00	4,00	0,50
pH	0,33	0,25	1,00	0,20
PT	3,00	2,00	5,00	1,00

Le sous-groupe **PT** (Potentiel Thérapeutique) regroupe l'ensemble des éléments chimiques impliqués dans les propriétés thérapeutiques des sources thermales.

Les résultats correspondants sont présentés dans le tableau suivant :

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Tableau 20 : Matrice de comparaison SOUBEIRAN

Sous-Critère	SOUBEIRAN	Ca+Mg	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻
SOUBEIRAN	1,00	2,00	3,00	2,00
Ca+Mg	0,50	1,00	2,00	1,00
HCO₃⁻	0,33	0,50	1,00	0,50
SO₄²⁻	0,50	1,00	2,00	1,00

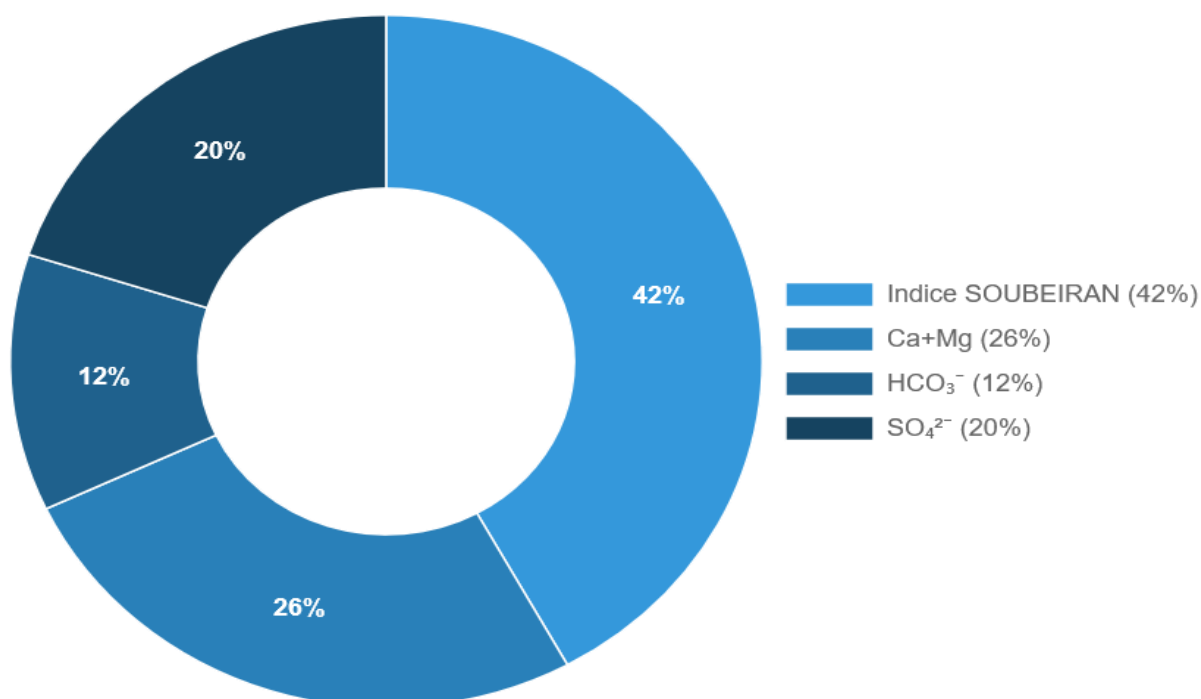


Figure 54 : Poids des Sous-Critères Thérapeutiques

La matrice normalisée, issue du processus d'analyse multicritère, est présentée dans le tableau ci-dessous. Elle permet de déterminer les poids relatifs (**w**) attribués à chaque critère en fonction de leur importance dans l'évaluation des eaux thermales.

Ces poids indiquent que le potentiel thérapeutique (PT) est le critère dominant (45 %), suivi de la minéralisation (EC) avec 29 %, puis de la température (T) avec 18 %. Le pH a un poids relativement faible (8 %), reflétant une contribution moindre dans le processus de classification des eaux thermales.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Tableau 21 : matrice normalisée

Critère	T	EC	pH	PT	Moyenne → Poids (w)
T	0,16	0,13	0,23	0,18	0.18 (18%)
EC	0,32	0,27	0,31	0,27	0.29 (29%)
pH	0,05	0,07	0,08	0,11	0.08 (8%)
PT	0,47	0,53	0,38	0,44	0.45 (45%)

8.7.4 Vérification de la cohérence de la matrice

- Vecteur propre approximatif : [0,18 ; 0,29 ; 0,08 ; 0,45]
- Valeur propre maximale (λ_{max}) : 4,08
- Indice de cohérence (IC) :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{4,08 - 4}{3} = 0,27$$

Ration de cohérence (RC) :

$$RC = \frac{IC}{RI} = \frac{0,27}{0,9} \approx 0,30 \text{ (pour } n = 4, RI = 0,90)$$

Puisque $RC < 0,1$, la matrice est **considérée comme cohérente**, ce qui valide la fiabilité des poids obtenus pour les critères analysés.

Poids Normalisés pour le PT

- SOUBEIRAN : **0.42**
- Ca+Mg : **0.26**
- HCO_3^- : **0.12**
- SO_4^{2-} : **0.20**

8.7.5 Vérification Cohérence :

- $\lambda_{max} = 4,05$, $RC = 0,02 < 0,1 \rightarrow$ **Valide.**

Après la normalisation des paramètres nous avons obtenus l'équation finale pour calculer le score de l'indice de Balnéologie

8.7.6 Equation finale AHP

$$\text{Score} = 0,18 \times T + 0,29 \times EC + 0,08 \times PH + 0,45 \times PT$$

$$\text{Ou } PT = 0,42 \times \text{SOUBEIRAN} + 0,26 \times (\text{Ca} + \text{Mg}) + 0,12 \times HCO_3^- + 0,20 \times SO_4^{2-}$$

Les résultats d'analyse multicritères sont présentés dans le tableau suivant

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Tableau 22 : Classification des sources selon l'indice IBT

ID	Source	Score IBT	Observations & Recommandations
1	Source Abattoir	0.83	Excellente pour rhumatologie/digestion (température et pH optimaux).
2	Ain Baraka	0.73	Rhumatologie modérée (pH légèrement acide).
3	Ain Hamia	0.74	Traitements intensifs (forte teneur en Ca+Mg).
4	Ain Oued	0.72	Usage mixte (éviter bains prolongés, pH acide).
5	Ain Sakhra	0.73	Thermalisme curatif (pH très bas, usage contrôlé).
6	Ain Karma	0.74	Bien-être (eau relaxante, cures courtes).
7	Ain Sid Moussa	0.62	Thermalisme doux (enfants/peaux sensibles).
8	Ain Hammat	0.86	Meilleure source : Dermatologie (sulfurée) et rhumatologie sévère.
9	Source N:06	0.84	Polyvalente (minéralisation élevée, cures complètes).
10	Source Du Pont	0.68	Balnéologie légère (faible minéralisation).
11	Source N:03	0.68	Eaux très chaudes (usage médical strict).
12	Ain Boukhanfour	0.74	Usage général (équilibre température/minéraux).
13	Source Du Palmier	0.65	Thermalisme spécialisé (contrôle médical requis).

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

L'application de la méthode AHP à l'évaluation des sources thermales de la région a permis de classer les eaux selon leur potentiel thérapeutique, en tenant compte la température, le pH, la minéralisation, et la présence d'éléments actifs (soufre, calcium, magnésium, etc.). Les scores obtenus reflètent à la fois la qualité intrinsèque des eaux et leur adéquation avec des usages médicaux spécifiques.

8.8 Identification des sources les plus performantes

8.8.1 Les scores les plus élevés reviennent à

- Ain Hammat (0.86) : Elle se distingue par sa richesse en éléments sulfurés et sa température idéale, ce qui en fait une source de référence pour les traitements dermatologiques (eczéma, psoriasis) ainsi que pour les affections rhumatismales sévères.
- Source N°06 (0.84) et Source Abattoir (0.83) suivent de près, avec un profil polyvalent grâce à une minéralisation équilibrée et des paramètres physico-chimiques optimaux. Elles peuvent être recommandées pour des cures complètes à visée curative ou préventive, dans des établissements thermaux bien équipés

8.8.2 Sources à usage ciblé ou spécialisé

- Des sources comme Ain Hamia, Ain Karma, Ain Boukhanfour, ou Ain Baraka présentent des scores moyens élevés (0.73–0.74), indiquant une bonne qualité globale, mais avec des indications thérapeutiques plus ciblées. Par exemple, Ain Hamia se prête à des traitements intensifs en raison de sa richesse en calcium et magnésium, utiles pour la reminéralisation osseuse.
- Ain Sakhra et Ain Oued (scores autour de 0.72–0.73) exigent une certaine précaution d'usage, notamment à cause d'un pH acide qui peut limiter la durée des bains, ou d'une composition nécessitant un encadrement médical pour les bains prolongés.

8.8.3 Sources à usage restreint ou doux

Les scores les plus faibles sont observés chez :

- Ain Sid Moussa (0.62), Source Du Palmier (0.65), Source Du Pont (0.68), et Source N°03 (0.68), indiquant une utilisation plus restreinte. Ces sources peuvent convenir pour :
 - Des applications douces (enfants, peaux sensibles),
 - Des usages bien-être ou relaxants (bains légers),

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

- Ou nécessitent un contrôle médical strict, notamment dans le cas de températures très élevées (Source N°03).

8.8.4 Implications et recommandations

- L'utilisation de l'AHP a permis une vision hiérarchisée et rationnelle des potentialités thérapeutiques des sources.
- Il est recommandé de valoriser en priorité les sources à score élevé (Ain Hammat, N°06, Abattoir) dans les stratégies de développement thermal de la région.
- Pour les sources à usage ciblé, des fiches d'indication thérapeutique pourraient être développées pour guider les cures.
- Les sources à score faible devraient faire l'objet de surveillances régulières et être intégrées dans des parcours de soins doux ou spécialisés.

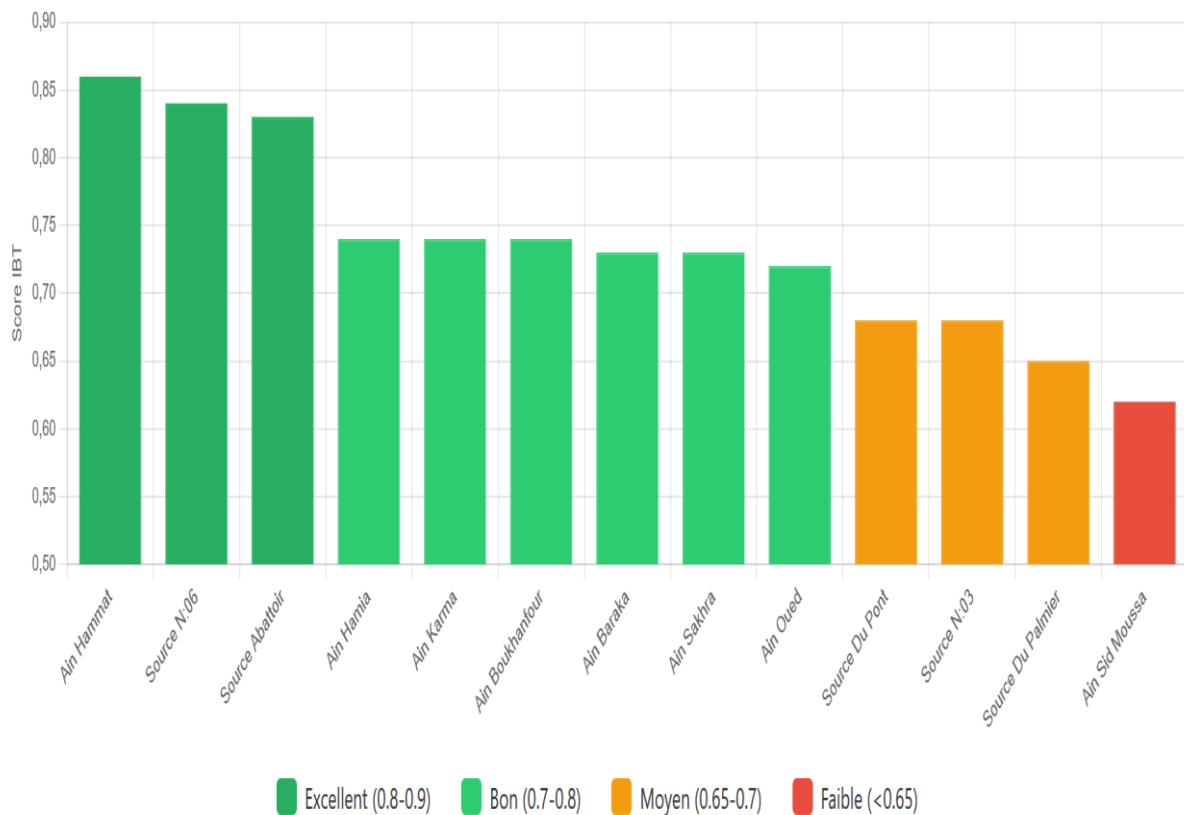


Figure 55 : Variation de l'indice IBT

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

L'analyse croisée des scores AHP avec les paramètres géothermiques des 13 sources thermales étudiées permet d'établir une hiérarchisation intégrée de leur potentiel thérapeutique, qualité hydrogéochimique et caractéristiques géologiques.

Les sources Ain Hammat (0.86), Source N°06 (0.84) et Source Abattoir (0.83) se distinguent par :

- Des températures élevées mesurées (41,3 à 52,8 °C).
- Des températures Na-K supérieures à 220 °C, traduisant une origine géothermale profonde.
- Des profondeurs estimées entre 4,6 et 5,2 km, associées à des réservoirs gréseux, volcaniques ou calcaires fracturés.
- Des compositions chimiques riches en HCO_3^- , SO_4^{2-} et Na^+ , favorisant des effets bénéfiques pour la rhumatologie, la dermatologie et les troubles digestifs.

Ces sources devraient être priorisées pour les usages thérapeutiques spécialisés, notamment dans les cures prolongées et les traitements cliniques sous supervision médicale.

Des sources telles que Ain Karma (0.74), Ain Hamia (0.74), Ain Boukhanfour (0.74) et Ain Sakhra (0.73) présentent des scores intermédiaires, mais avec des atouts notables :

- Réservoirs calcaires ou dolomitiques profonds, stables et bien minéralisés.
- Températures entre 45 et 53 °C, avec des profondeurs >4,7 km.
- Convient aux cures de bien-être, rééducation fonctionnelle et relaxation, particulièrement pour les personnes âgées ou les sportifs.

Les sources comme Source Du Pont (0.68), Source N°03 (0.68), Source Du Palmier (0.65) et Ain Sid Moussa (0.62) requièrent une attention particulière :

- Températures très élevées (jusqu'à 65,6 °C) ou très basses (26,9 °C), impliquant un encadrement thérapeutique rigoureux.
- Présence de Mg^{2+} élevé ou faible minéralisation, qui limite certains usages dermatologiques ou digestifs.
- Profondeurs et réservoirs variés, suggérant une possible connexion mixte entre nappes profondes et superficielles, potentiellement sensibles à la pollution.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

8.8.5 Perspectives de valorisation et de recherche

Les résultats obtenus ouvrent la voie à plusieurs **perspectives prometteuses**, à la fois scientifiques, économiques et sanitaires :

8.8.6 Valorisation thérapeutique et thermique

- Les eaux de Bouhanifia peuvent être labellisées comme eaux thermales médicinales, sous réserve d'un suivi régulier.
- Leur utilisation en cures thermales (rhumatologie, dermatologie, troubles respiratoires) peut être renforcée par l'aménagement de structures adaptées (bains, hammams, établissements thermaux).
- Une mise en bouteille ou une utilisation dans les produits cosmétiques est envisageable pour les sources les plus pures.

8.8.7 Protection et aménagement

- Mettre en place une zone de protection sanitaire autour de chaque source pour éviter les pollutions diffuses.
- Réaménager les captages, en particulier celui de la Source n°6, pour éviter les infiltrations superficielles.

8.8.8 Recherche scientifique

- Lancer une étude isotopique et hydrodynamique des aquifères thermaux pour comprendre les temps de circulation et les mécanismes de recharge.
- Créer une base de données régionale sur la qualité et les usages des eaux thermales du nord-ouest algérien.
- Intégrer ces eaux dans les modèles géothermiques régionaux, en lien avec les structures tectoniques.

8.8.9 Développement local

- Appuyer la création d'un pôle thermal régional autour de Bouhanifia, associant tourisme, santé, et développement durable.
- Former les acteurs locaux à la gestion intégrée des ressources thermales.
- Sensibiliser la population à l'importance de préserver la qualité de l'eau thermique, bien commun précieux.

Nous avons pu synthétiser les résultats de cette étude à travers une application HTML, pour visualiser l'ensemble des données et des indices clés.

Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT

Évaluation des Eaux Thermales de Bouhanifia

Analyse multicritère par méthode AHP - Indice de Balnéologie Thermale (IBT)

Résumé des Résultats

L'application de la méthode AHP a permis de classer 13 sources thermales selon leur potentiel thérapeutique, en intégrant des critères comme la température, le pH, la minéralisation et la composition chimique.

Potentiel Thérapeutique

45%

Critère dominant

Minéralisation (EC)

29%

Température

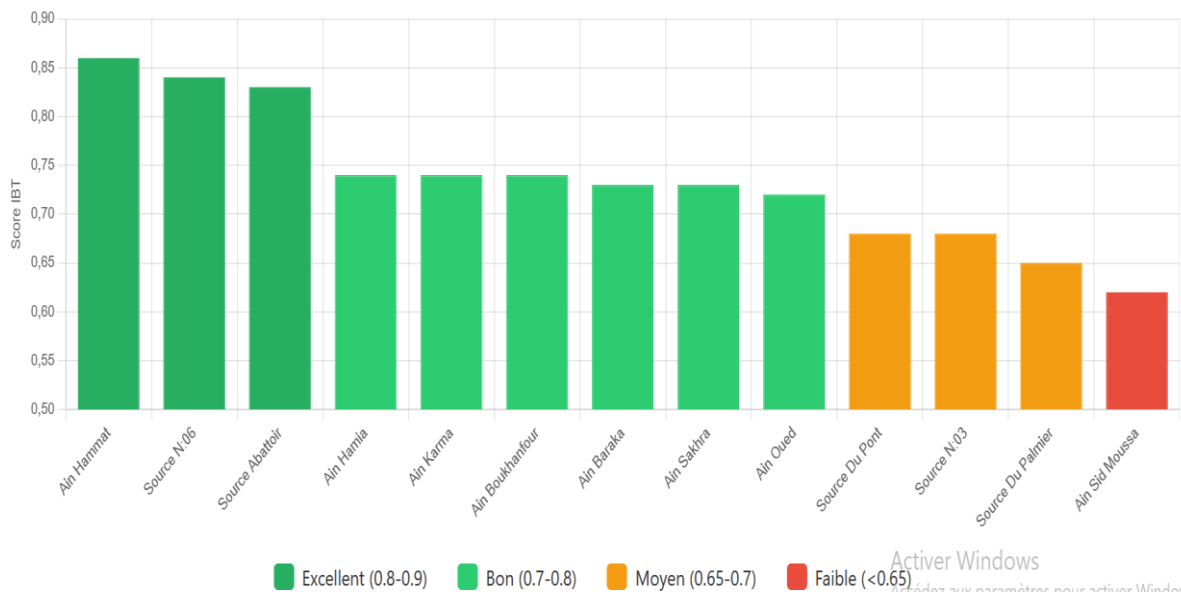
18%

pH

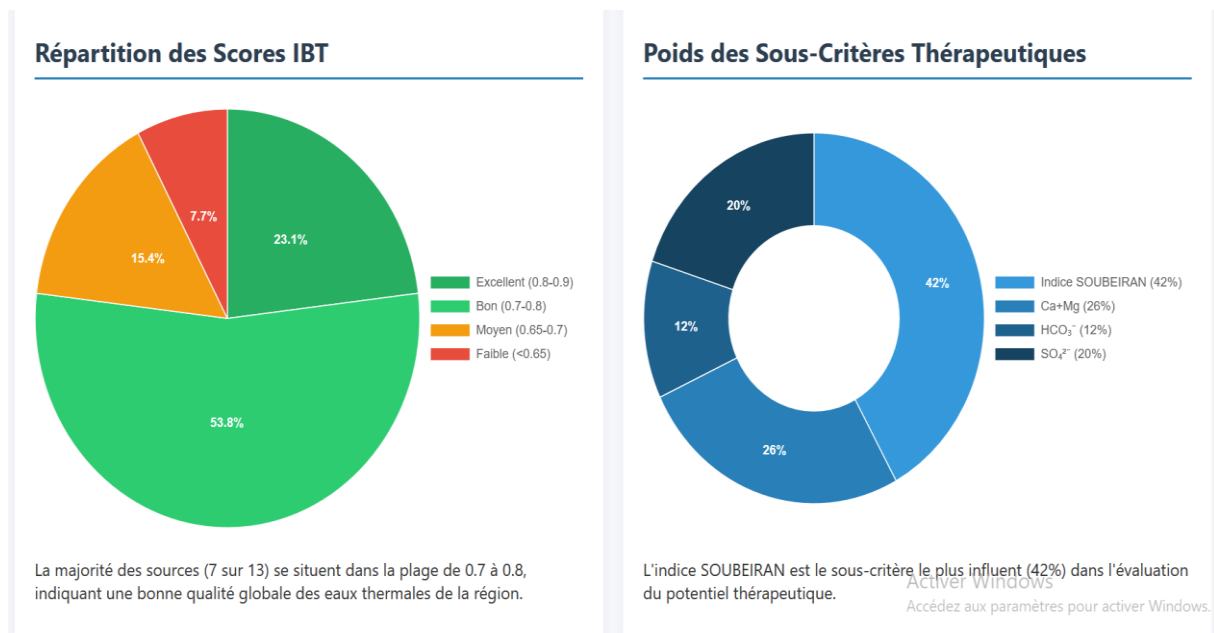
8%

Activer Windows
Accédez aux paramètres pour activer Windows.
Critère mineur

Classement des Sources Thermales par Score IBT



Chapitre V Analyse multicritères et indice de balnéologie thermique IBT



Source	Score IBT	Classification	Recommandations
Ain Hammat	0.86 Excellent	Meilleure source	Dermatologie (sulfurée) et rhumatologie sévère
Source N:06	0.84 Excellent	Polyvalente	Minéralisation élevée, cures complètes
Source Abattoir	0.83 Excellent	Excellente	Rhumatologie/digestion (température et pH optimaux)
Ain Hamia	0.74 Bon	Traitements intensifs	Forte teneur en Ca+Mg
Ain Karma	0.74 Bon	Bien-être	Eau relaxante, cures courtes
Ain Boukhanfour	0.74 Bon	Usage général	Équilibre température/minéraux
Ain Baraka	0.73 Bon	Rhumatologie modérée	pH légèrement acide
Ain Sakhra	0.73 Bon	Thermalisme curatif	pH très bas, usage contrôlé
Ain Oued	0.72 Bon	Usage mixte	Éviter bains prolongés, pH acide
Source Du Pont	0.68 Moyen	Balnéologie légère	Faible minéralisation
Source N:03	0.68 Moyen	Usage médical strict	Eaux très chaudes
Source Du Palmier	0.65 Moyen	Thermalisme spécialisé	Contrôle médical requis
Ain Sid Moussa	0.62 Faible	Thermalisme doux	Enfants/peaux sensibles

Figure 56 : Capture d'écran de l'application HT

Conclusion

Conclusion

Conclusion :

L'étude menée sur les eaux thermales de Hammam Bouhanifia s'inscrit dans une dynamique de connaissance, de valorisation et de préservation des ressources hydrothermales du nord-ouest algérien. Elle vise à caractériser la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de différentes sources de Bouhanifia, dans le but d'évaluer leur aptitude aux usages thérapeutiques et thermaux, et de comprendre les mécanismes géochimiques et géologiques responsables de leur minéralisation.

Située dans la wilaya de Mascara, la station thermale de Bouhanifia bénéficie d'un contexte géologique favorable à l'émergence de sources d'eaux chaudes, notamment en raison de la présence de formations géologiques anciennes, riches en éléments solubles, et d'une activité tectonique susceptible de favoriser les circulations profondes.

Les analyses physico-chimiques menées sur les échantillons prélevés ont permis de mettre en évidence une minéralisation relativement élevée des eaux, avec des concentrations significatives en cations majeurs (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et anions (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-). Ces éléments traduisent une interaction prolongée entre les eaux et les roches encaissantes, ainsi qu'un temps de résidence élevé dans les aquifères profonds.

Les faciès géochimiques dominants sont chlorurés sodiques, ce qui témoigne d'une origine géothermale profonde et d'un parcours souterrain à travers des formations évaporitiques et carbonatées. Certaines sources présentent également un faciès bicarbonaté calcique ou mixte, indiquant des processus de dissolution de roches carbonatées ou un mélange avec des eaux plus superficielles.

Les températures enregistrées à la sortie des sources, comprises entre 44.3°C et 66.9°C, confirment le caractère thermal des eaux. Les sources El Amel, Les Palmiers et Source n°3 affichent les températures les plus élevées (supérieures à 60°C), révélant une circulation profonde des eaux souterraines. Ces températures sont compatibles avec les usages thérapeutiques tels que les bains thermaux, les inhalations, ou encore la balnéothérapie.

Les résultats bactériologiques actualisés constituent une étape importante dans l'évaluation de la qualité globale des eaux. Ils permettent de confirmer ou d'infirmer l'aptitude de ces eaux à un usage médical ou cosmétique, en s'appuyant sur des normes sanitaires strictes.

Les résultats montrent que six des sept sources analysées sont conformes aux normes sanitaires, avec une absence totale de coliformes fécaux, streptocoques fécaux et clostridiums sulfito-réducteurs. Le nombre de germes aérobies mésophiles reste largement inférieur au

Conclusion

seuil de 20 germes/ml dans la plupart des sources, ce qui est un indice favorable de potabilité et de pureté bactériologique.

La seule exception concerne la Source n°6, qui présente une contamination importante par les coliformes totaux (93/100 ml) et un dépassement des germes aérobies (25 germes/ml). Cela indique une pollution probable d'origine superficielle, peut-être liée à un mauvais captage, à une infiltration de ruissellement ou à une proximité de zones d'activités humaines non contrôlées.

Ces résultats mettent en évidence la nécessité d'un suivi sanitaire régulier, notamment sur les sources vulnérables, mais confirment aussi le haut potentiel thérapeutique des autres sources thermales de Bouhanifia.

L'analyse combinée des paramètres physico-chimiques et des températures permet de formuler plusieurs hypothèses sur l'origine des eaux thermales :

- Les eaux sont probablement issues de précipitations infiltrées en altitude, ayant circulé en profondeur à travers des formations géologiques perméables, telles que les carbonates et les évaporites du Crétacé.
- Elles sont chauffées par gradient géothermique ou éventuellement par un flux thermique anormal lié à la tectonique locale.
- Leur temps de séjour long favorise les échanges ioniques et la dissolution des minéraux, ce qui explique leur forte minéralisation.

La relative constance des débits dans certaines sources confirme l'existence d'un réservoir souterrain semi-confiné, relativement stable, mais qui mérite une évaluation quantitative à travers un suivi piézométrique ou isotopique.

Limites de l'étude

Malgré la richesse des résultats obtenus, l'étude présente certaines limites :

- Les analyses isotopiques (^{18}O , 2H , 3H), qui permettent d'affiner l'origine et l'âge des eaux, n'ont pas pu être réalisées.
- Le comportement saisonnier des sources n'a pas été étudié. Les variations annuelles de température, de débit et de qualité ne sont donc pas connues.
- La Source n°6 nécessite une investigation plus poussée pour identifier l'origine exacte de la contamination.
- Certaines sources (Boukhanfour, Source n°2) n'ont pas pu être analysées en température ou en débit, ce qui limite l'évaluation complète de leur potentiel.

Références bibliographiques

1. Arnórsson, S., et al. (1982). The use of mixing models and chemical geothermometers for estimating underground temperatures in geothermal systems. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*.
2. Bear, J. (1972). *Dynamics of Fluids in Porous Media*. Dover.
3. Bouchaou, L., Michelot, J. L., Vengosh, A., Hsissou, Y., Qurtobi, M., Gaye, C. B., Bullen, T. D., & Zuppi, G. M. (2008). Application of multiple isotopic and geochemical tracers for investigation of recharge, salinization, and residence time of water in the Souss–Massa aquifer, southwest of Morocco. *Journal of Hydrology*, 352(3-4), 267–287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.01.022>
4. Boutaleb, A., Bouaicha, F., & Abdelbaki, C. (2020). Hydrogeochemical characterization of thermal waters in northeastern Algeria. *Environmental Earth Sciences*, 79(8), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-08904-9>
5. Clark, I., & Fritz, P. (1997). *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. CRC Press.
6. Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley.
7. Edmunds, W. M., & Shand, P. (2009). *Natural Groundwater Quality*. Wiley-Blackwell.
8. El Mahi, A., Meddi, M., & Bravard, J. P. (2012). Analyse du transport solide en suspension dans le bassin versant de l'Oued El Hammam (Algérie du Nord). *Hydrological Sciences Journal*, 57(8), 1642-1661.
9. Fontes, J. C., Garnier, J. M., & Letolle, R. (1982). Les isotopes stables (^{18}O , ^2H) et le tritium dans les eaux thermales : exemples du Massif Central français. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 46(10), 1863–1872. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(82\)90118-8](https://doi.org/10.1016/0016-7037(82)90118-8)
10. Fournier, R.O., & Truesdell, A.H. (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.
11. Ghiglieri, G., Barbieri, G., Vernier, A., & Carletti, A. (2012). Potential risks of nitrate pollution in aquifers from agricultural practices in the Nurra region, northwestern Sardinia, Italy. *Journal of Hydrology*, 472-473, 126–138. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.022>
12. Giggenbach, W.F. (1988). Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*.

Références bibliographiques

13. Hochstein, M. P., & Browne, P. R. L. (2000). Surface manifestations of geothermal systems. *Encyclopedia of Volcanoes*.
14. Ingebritsen, S. E., Sanford, W. E., & Neuzil, C. E. (2006). *Groundwater in Geologic Processes*. Cambridge UP.
15. Lund, J. W., & Boyd, T. L. (2016). Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review. *Geothermics*, 60, 66–93.
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2015.11.004>
16. Meddi, M., Hubert, P., & Bendjoudi, H. (2010). Evolution des régimes pluviométriques dans le bassin de la Macta (Algérie). *Hydrological Sciences Journal*, 55(3), 408–420. <https://doi.org/10.1080/02626661003780409>
17. Nieva, D., & Nieva, R. (1987). Developments in geothermal energy in Mexico. *Geothermics*.
18. OMS (Organisation Mondiale de la Santé). (2017). *Guidelines for Drinking-water Quality* (4e éd.). Genève. <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>
19. Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions of the American Geophysical Union*, 25(6), 914–928.
<https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
20. Riansares MUÑOZ-OLIVAS, 2012, Détermination d'éléments traces dans l'environnement, Techniques de l'Ingénieur, Université Complutense de Madrid.
21. Romanazzi, A., Darrah, T. H., & Fendorf, S. (2015). Historical and current use of thermal waters in balneology and hydrology. *Applied Geochemistry*, 57, 56–70.
<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.01.012>
22. Saaty, Thomas L. "The Analytic Hierarchy Process." *European Journal of Operational Research* 48 (1990): 9-26.
23. Saibi, H. (2010). Geothermal resources in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(3), 1124–1132. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.006>
24. Trabelsi, R., Abid, K., & Zouari, K. (2019). Hydrogeochemical and isotopic characterization of thermal waters in Tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 151, 54–65. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.11.017>
25. UNESCO. (2012). *Gestion durable des eaux souterraines : Guide pour les décideurs*. Programme hydrologique international.
<https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000217413>

Références bibliographiques

26. Feizizadeh, B., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Environmental Management*, 54(6), 1399–1415.
27. Ghosh, S., & Ghosh, S. (2018). Groundwater quality assessment using AHP and geostatistical techniques: a case study of a semi-arid region in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), 1-15.
28. Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Wiley, New York.
29. Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modeling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230(1–3), 1–22.
30. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
31. Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill, New York.
32. Soubeyran, A. (1957). *Les eaux minérales: classification et emploi thérapeutique*. Presses Universitaires de France.
33. Yazdanpanah, M., Yousefi, Z., & Rezaei, M. (2020). Application of AHP-GIS model for groundwater quality assessment in semi-arid regions. *Environmental Earth Sciences*, 79(5), 1-15.
34. Malczewski, J. (1999). *GIS and Multicriteria Decision Analysis*. Wiley, New York.
35. Mendoza, G. A., & Martins, H. (2006). Multi-criteria decision analysis in natural resource management: A critical review of methods and new modeling paradigms. *Forest Ecology and Management*, 230(1–3), 1–22.
36. Feizizadeh, B., Jankowski, P., & Blaschke, T. (2014). A GIS based spatially-explicit sensitivity and uncertainty analysis approach for multi-criteria decision analysis. *Environmental Management*, 54(6), 1399–1415.
37. Ghosh, S., & Ghosh, S. (2018). Groundwater quality assessment using AHP and geostatistical techniques: a case study of a semi-arid region in India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 190(9), 1-15.
38. Soubeyran, A. (1957). *Les eaux minérales: classification et emploi thérapeutique*. Presses Universitaires de France.
39. Hippocrate. (400 av. J.-C.). *Corpus Hippocraticum*.
40. Paracelse. (1538). *De natura rerum*.
41. Balne, P. (1875). *Traité de balnéologie médicale*.

Références bibliographiques

42. Roques, C.-F. (2012). Le thermalisme en médecine. Académie nationale de médecine.
43. Leclerc, H. (1927). Précis de phytothérapie.
44. INSEP. (2020). Études cliniques sur la balnéothérapie.
45. POUGET et D. CHOUCHEK, 1923, Radioactivité d'eaux de sources du département d'Oran, Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord : Juin 1923.
46. Brutsaert, W. (2005). Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press.
47. Couvre les fondements physiques du cycle de l'eau.
48. Fournier, R. (2005). Les eaux thermales : Ressources, exploitations et enjeux environnementaux. Revue de Géographie Alpine, 93(2), 67–80.
49. Bourdeau, P. (2011). Tourisme de santé et développement durable : vers une réinvention du thermalisme ? Mondes du Tourisme, (4), 18–30.
50. Fabre, J. (1976). Géologie du Sahara septentrional. SNED, Alger
51. Saadi, M. (1990). Stratigraphie et tectonique du Miocène dans la région de Bouhanifia (Algérie occidentale). Thèse de Doctorat, Université d'Oran.
52. Moulay, M. (1996). Travertins et phénomènes hydrothermaux à Bouhanifia (Algérie occidentale). Bulletin du Service Géologique National, 7(1), 75–84. étude régionale sur les travertins thermaux de Bouhanifia.
53. Terral, M. (1957). Géologie des formations miocènes dans la plaine de Ghriss et le secteur de Bouhanifia. Thèse d'État, Université de Montpellier.
54. Benaïssa, M., & Chafai, S. (2004). Géotechnique et instabilités sur terrains marneux et travertins à Bouhanifia. Revue Algérienne de Géologie, 11, 41–55.
55. Aït Brahim, L., et al. (1990). Circulation des eaux thermo-minérales dans les zones tectoniques du Maghreb. Hydrogéologie, 1, 31–42.
56. bosson j.-l., chenot j.-f., bensoussan r., et al. Médecines thermales et douleurs : lombalgies chroniques, gonarthrose, fibromyalgie. Rapport de l'Académie nationale de médecine, séance du 25 mai 2021. Paris : Académie nationale de médecine, 2021. Disponible sur : <https://www.academie-medecine.fr>

Annexes

Annexes

Tableau 23 : les Normes ou standards microbiologiques des eaux thermales.

Paramètre microbiologique	Norme généralement admise	Signification sanitaire
Escherichia coli	Absence / 100 mL	Indicateur de contamination fécale récente
Entérocoques intestinaux	Absence / 100 mL	Indicateur de contamination fécale
Coliformes totaux	Absence ou très faible	Indicateur d'hygiène du captage
Salmonella spp.	Absence	Bactérie pathogène digestive
Pseudomonas aeruginosa	Absence	Risque d'infections cutanées (bains)
Staphylococcus aureus	Absence	Risque d'infections cutanées
Flore totale à 22°C	Valeur contrôlée	Indicateur de charge microbienne globale
Flore totale à 37°C	Valeur contrôlée	Indicateur de germes d'origine humaine

Principales normes microbiologiques des eaux thermales (références générales basées sur les recommandations internationales comme celles d'Organisation mondiale de la Santé et la réglementation d'Union européenne).