



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
جامعة زيان عاشور-الجلفة
Université Ziane Achour –Djelfa
كلية علوم الطبيعة و الحياة
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
قسم علوم الفلاحة و البيطرة
Département des Sciences Agronomiques et Vétérinaires

Mémoire de fin d'étude

En Vue De l'Obtention Du Diplôme De Master

Spécialité : Eau et Environnement

Thème :

**Étude de la qualité physico-chimique et bactériologique
de l'eau potable par approche statistique et indice de
qualité de l'eau (IQE)
(Cas de Hassi Bahbah et Ain Oussera)**

Présenté par : SAIHI AymenI brahim

DEVANT LE JURY :

Président : M. ELAHCENE Omar Pr Université de Djelfa

Promoteur : M. BOUTELDJAOUI Fatah MCA Université de Djelfa

Co-promoteur : M. HEBCHI Samir ADE unite Djelfa

Examineur : M. AZOUZI Blel Pr Université de Djelfa

Année Universitaire 2023/2024

DÉDICACES :

*Je dédie ce mémoire à mes chers parents,
pour leur amour inconditionnel et leur soutien constant,*

*À mes frères,
pour leur présence et leur encouragement,*

*À ma fiancée,
pour sa patience et son soutien précieux,*

*Et à toute ma famille,
avec amour et profonde reconnaissance.*

REMERCIEMENTS

J'exprime d'abord toute ma gratitude à mon promoteur : Dr BOUTEL DJAOUI Fatah pour son encadrement, ses conseils et encouragements. Je vous remercie profondément pour votre disponibilité et pour tous les efforts fournis pour mener à son terme ce mémoire.

Je tiens également à remercier mon co-promoteur Monsieur HEBCHI Samir, pour m'avoir fourni les données nécessaires et pour m'avoir offert l'opportunité d'effectuer un stage au sein de laboratoire de l'Algérienne des Eaux (ADE) de Djelfa.

Je souhaite également remercier les membres du jury, de bien vouloir juger mon travail et apporter leurs critiques constructives, leurs remarques pertinentes et leurs recommandations qui ont contribué à l'enrichissement de ce travail.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué à ce travail.

RÉSUMÉ

La présente étude est une combinaison des outils hydrogéochimiques, statistiques (ACP et CHA) et l'indice de qualité de l'eau (IQE) pour la caractérisation qualitative des ressources en eaux souterraines des aquifères de l'Albien de Ain Oussera et le Turonien de Hassi Bahbah de la Wilaya de Djelfa. Les résultats obtenus ont montré que l'abondance relative des principaux ions dans les eaux de la nappe de Ain Oussera est $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ pour les cations et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ pour les anions. Par ailleurs, concernant les eaux de la nappe de Hassi Bahbah l'abondance relative des principaux ions dans les eaux de la nappe de Ain Oussera est $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ pour les cations et $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ pour les anions. L'étude du faciès chimique des eaux de la zone d'étude montre la prédominance d'un faciès de type Ca-SO₄ pour la nappe de Hassi Bahbah et un faciès de type Na-Cl pour la nappe de Ain Oussea. Le chimisme des eaux souterraines de la zone d'étude est contrôlé principalement par la dissolution des minéraux évaporitiques et les échanges de base avec les argiles, relativement abondants dans les environnements semi-arides à arides. D'autre part, le processus anthropique (contamination par les nitrates) joue un rôle secondaire, avec des teneurs en NO_3^- des eaux souterraines conformes à la norme de potabilité exigée par la réglementation algérienne et celle de l'OMS (50 mg/L). Dans la région de Ain Oussera, la majorité des eaux souterraines sont adéquates pour la consommation humaine selon les normes Algériennes et celles fixées par l'OMS. Par ailleurs, les eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah sont fortement minéralisées et très dures, avec des concentrations en éléments majeurs souvent dépassant les normes de potabilité de l'eau destinée à la consommation humaine recommandées par l'OMS et l'Algérie.

Mots clés : Eau souterraine, Ain Oussera, Hassi Bahbah, hydrochimie, analyse en composantes principales (ACP), Classification Ascendante Hiérarchique, indice de qualité de l'eau (IQE).

ABSTRACT

The present study is a combination of hydrogeochemical, statistical (PCA and CHA) and water quality index (WQI) tools for the qualitative characterization of groundwater resources in the Ain Oussera Albian and HassiBahbah Turonian aquifers of the Djelfa Wilaya. The results show that the relative abundance of the main ions in the Ain Oussera aquifer is $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ for cations and $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ for anions. The relative abundance of the main ions in the waters of the Hassi Bahbah aquifer is $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ for cations and $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ for anions. The study of the chemical facies of the waters in the study area shows the predominance of a Ca-SO₄ type facies for the Hassi-Bahba groundwater and a Na-Cl type facies for the Ain Oussea groundwater. Groundwater chemistry in the study area is mainly controlled by the dissolution of evaporitic minerals and base exchanges with clays, which are relatively abundant in semi-arid to arid environments. On the other hand, the anthropogenic process (nitrate contamination) plays a secondary role, with NO₃⁻ levels in groundwater conforming to the potability standard required by Algerian and WHO regulations (50 mg/L). In the Ain Oussera region, the majority of groundwater is suitable for human consumption according to Algerian and WHO standards. On the other hand, groundwater in the Hassi-Bahbah region is highly mineralized and very hard, with concentrations of major elements often exceeding the potability standards for water intended for human consumption recommended by the WHO and Algeria.

Keywords: Groundwater, Ain Oussera, HassiBahbah, hydrochemistry, Principal Component Analysis (PCA), Hierarchical Ascending Classification, Water Quality Index (WQI)

الملخص:

يهدف هذا العمل الى دراسة الخصائص الفيزيوكيميائية للمياه الجوفية (منطقة عين وسارة وحاسي بحبح)، لتحديد العوامل الرئيسية التي تتحكم في المكونات الكيميائية للمياه. تم استخدام طريقة تجمع بين الاساليب الهيد وكيميائية، التقليدية، احصائيات متعددة المتغيرات (تحليل المركبات الرئيسية (ACP)، والتصنيف التصاعدي الهرمي (CAH) ومؤشر جودة المياه (IQE))، من اجل معرفة ملائمة هذه المياه للشرب. تظهر النتائج ان الوفرة النسبية للأيونات الرئيسية في المياه الجوفية لعين وسارة هي $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$ للكاتيونات و $NO_3^- > HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ للأنيونات. من ناحية أخرى، فيما يتعلق بالمياه الجوفية لحاسي بحبح، فان الوفرة النسبية للأيونات الرئيسية هي $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$ للكاتيونات و $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^- > NO_3^-$ للأنيونات. كما تظهر الدراسة الهيدروكيميائية، ان المياه الجوفية لعين وسارة تتميز بالسحنة (Na-Cl)، بينما تتميز المياه الجوفية لحاسي بحبح بالسحنة (Ca-SO₄). يتم التحكم في كيمياء المياه الجوفية في منطقة الدراسة بشكل رئيسي من خلال انحلال المتبخرات (الجبس، الهاليت والتبادل الايوني). كما تعتبر العوامل البشرية مثل استخدام المبيدات والاسمدة الكيميائية وتصريف مياه الصرف الصحي الغير معالجة، ذات تأثير ثانوي، حيث بينت التحاليل الفيزيوكيميائية ان تركيز النترات (NO_3^-) لا يتجاوز معايير منظمة الصحة العالمية والمعايير الجزائرية (50 ملغ/ل). كما ان غالبية المياه الجوفية في منطقة عين وسارة صالحة للاستهلاك البشري، وفق المعايير الجزائرية ومعايير منظمة الصحة العالمية. من ناحية أخرى، فان المياه الجوفية في منطقة حاسي بحبح عالية التمدن وعسرة جدا، وغالبا ما تكون تركيزات العناصر الكيميائية اعلى من معايير مياه الشرب التي توصي بها منظمة الصحة العالمية والجزائر.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، عين وسارة، حاسي بحبح، الهيدروكيمياء، تحليل المكونات الرئيسية (ACP)، التصنيف التصاعدي الهرمي (CAH)، مؤشر جودة المياه (IQE).

TABLE DES MATIÈRES

Dédicaces	
Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Table de matières	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Liste des abréviations	
Introduction générale	1
CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE	
I.1.Introduction	3
I.2 Caractéristiques physiques	3
I.2.1. La température (T)	3
I.2.2. Le pH	3
I.2.3. La Conductivité	3
I.2.4. Potentiel d'oxydoréduction (E _h)	4
I.2.5. Turbidité	4
I.3. Caractéristiques chimiques	4
I.3.1. Le Résidu sec	4
I.3.2. La dureté totale	4
I.3.3. Titre alcalimétrique complet (TAC)	5
I.3.4. Les éléments majeurs	5
I.3.4.1. Calcium (Ca ²⁺)	5
I.3.4.2. Magnésium (Mg ²⁺)	6
I.3.4.3. Sodium (Na ⁺)	6
I.3.4.4. Potassium (K ⁺)	6
I.3.4.5. Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	6
I.3.4.6. Chlorures (Cl ⁻)	6
I.3.4.7. Sulfates (SO ₄ ²⁻)	6
I.3.5. Les ions indicateurs de pollution	6
I.3.5.1. Nitrates (NO ₃ ⁻)	6
I.3.5.2. Nitrites (NO ₂ ⁻)	7
I.3.5.3. Ammonium	7
I.4. Indicateurs de contamination bactérienne :	7
I.4.1. Coliformes totaux	7
I.4.2. Coliformes fécaux	7
I.4.3. Streptocoques fécaux	8
I.4.4. Clostridium Sulfito-Réducteur	8
I.5. Conclusion	8
CHAPITRE II : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	
II.1 Introduction	10
II.2 Ain Oussera	11
II.2.1 Situation géographique	11
I.2.2 Synthèse climatique sur la région	12
II.2.2.1 Précipitation	12
II.2.2.2 Température	14
II.2.2.3 Les vents	14
II.2.2.4 L'humidité relative	15
II.2.3 Hydrographie	16

II.2.4 Contexte Géologique et Hydrogéologique	18
II.2.4.1. Trias	18
II.2.4.2. Jurassique	18
II.2.4.3. Crétacé inférieur	19
II.2.4.4. Crétacé supérieur	19
II.2.4.5. Tertiaire	19
II.2.4.6. Quaternaire	20
II.2.5. Hydrogéologique de Ain Oussera	22
II.3. Hassi Bahbah	24
II.3.1. Situation géographique	24
II.3.2. Géologie de Hassi bahbah	24
II.4. Conclusion	27

CHAPITRE III : MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1. Introduction	28
III.2. Campagne d'échantillonnage d'eau	28
III.3. La balance ionique	30
III.4. Méthodologie de traitements de données	30
III.4.1. Représentations graphiques des analyses hydrochimique	30
III.4.1.1. Diagramme de Piper	30
III.4.1.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff	30
III.4.1.3. Diagramme de Stiff	32
III.4.1.4. Classification de Stabler	32
III.4.1.5. Diagrammes binaires	33
III.4.1.6. Diagramme de Richards	33
III.4.1.7. Diagramme de Wilcox	35
III.5. Méthodes d'analyse statistique	35
III.5.1. Analyse en composantes principales « ACP »	35
III.5.2. Classification hiérarchique Ascendante « CHA »	36
III.5.3. Standardisation des données	36
III.6. L'indice de qualité de l'eau (IQE)	37
III.6.1. Objectif de l'indice de qualité de l'eau (IQE)	37
III.6.2. Les indices de la qualité de l'eau	37
III.6.2.1. L'indice de la qualité de l'eau (méthode de pondération)	37
III.6.2.2. L'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée	39
III.6.2.3. L'indice de qualité de l'eau du Conseil Canadien des ministres de l'environnement (CCMEIQE)	40
III.6.2.4. L'indice de qualité de l'eau National Sanitation Foundation (NSFWQI)	43
III.6.2.5. L'indice de qualité de l'eau de l'Oregon (OWQI)	44
III.6.2.6. L'indice de qualité de l'eau Dinius (DWQI)	44
III.7 Conclusion	45

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction	46
IV.2 Résultats des analyses physico-chimiques des eaux	47
IV.2.1 La nappe de l'Albien d'Ain Oussera	47
IV.2.1.1 Caractéristiques organoleptiques des eaux	47
IV.2.1.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux	48
IV.2.2 La nappe de Turonien de Hassi Bahbah	56
IV.2.2.1 Paramètres organoleptiques	56
IV.2.2.2 Paramètres physico-chimiques	58
IV.3. Représentation graphique des faciès chimiques	66
IV.3.1 Diagramme de Piper	66
IV.3.2 Diagramme de Schoeller-Berkaloff	68
IV.3.3 Diagramme de Stabler	70
IV.3.4 Diagramme de Stiff	73

IV.4 Mécanismes d'acquisitions de la minéralisation des eaux	75
IV.4.1 Corrélations éléments/résidu sec (TDS)	75
IV.4.2 Corrélations entre éléments majeurs	77
IV.5. Mise en évidence des échanges de base	82
IV.5.1 La relation $[(Na^+ + K^+) - Cl^-]$ vs $[(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$	82
IV.5.2 Indice d'échange de base (I.E.B)	83
IV.6 Indice de saturation des eaux	84
IV.6.1 Les minéraux évaporitiques	85
IV.6.2 Les minéraux carbonatés	85
IV.7 Étude Statistique	87
IV.7.1. Analyse statistique des données chimiques	87
IV.7.1.1. Statistique descriptive	87
IV.7.1.2. Matrice de corrélation	89
IV.7.1.3. Analyse en composantes principales « ACP »	91
IV.7.1.3.1 Projection des variables sur les plans factoriels	92
IV.7.1.3.2 Projection des individus sur les plans factoriels	93
IV.7.1.4. Classification Ascendante Hiérarchique	95
IV.8. Étude de la qualité des eaux	98
IV.8.1 Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Normes Algérienne	98
IV.8.2 Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Normes OMS	100
IV.8.3 Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes Algérienne	102
IV.8.4 Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes OMS	104
IV.8.5 Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice IQE	105
IV.9. Aptitude des eaux à l'irrigation	106
IV.9.1 Classification des eaux par la méthode de Riverside	106
IV.9.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox	108
IV.10. Paramètres bactériologiques	110
IV.11. Conclusion	111
Conclusion Générale	113

LISTE DES ABRÉVIATIONS

μs/cm :	Microsiemens par centimètre.
A.C.P :	Analyse en Composantes Principales.
A.D.E :	Algérienne Des Eaux
A.N.R.H :	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.
AEP :	Alimentation en Eau Potable.
B.I :	Balance ionique.
C.C.M.E:	Centre Canadien Ministériel de l'Environnement.
C.H.A :	Classification Hiérarchique Ascendante.
CE :	Conductivité électrique.
DIQE :	Dinius indice de qualité d'eau.
Eh :	Potentiel d'oxydoréduction.
FNDRA :	Fonds National de Développement de l'Agriculture.
FTU :	Formazine Turbidity Unit.
HB :	Hassi bahbah.
I.E.B :	L'indice d'échange de base.
I.Q.E :	Indice de qualité d'eaux.
I.S :	Indice de saturation.
J.O.R.A :	Journal Officiel de la République Algérienne.
N.A :	Normes Algérienne.
N.S.F :	National Sanitation Foundation.
NTU :	Nephelometric Turbidity Unit.
O.M.S :	Organisation Mondiale de la Santé.
OIQE :	Oregon indice de qualité d'eau.
pH :	Potentiel Hydrogène.
PSD :	Programmes Sectoriels de Développement.
R² :	Coefficient de détermination.
RN :	Route nationale.
RS :	Résidu sec
S.A.R :	Sodium Adsorption Ratio.
S.I.G :	Système d'Information Géographique.
TAC :	Titre Alcalimétrique Complet.
TDS :	Total Dissolved Solids.
TH :	Titre Hydrotimétrique.
USSL :	United States Salinity Laboratory.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	Relation entre la minéralisation et la conductivité électrique (Rodier, 1996).	4
Tableau I.2	Classification des eaux selon leur dureté totale (Sawer et Mccarthy, 1967)	5
Tableau I.3	Les paramètres bactériologiques selon l'OMS et le Journal officiel Algérien (OMS, 2011 ;JORA, 2011).	8
Tableau II.1	Caractéristiques des stations pluviométriques de la plaine d'Ain Oussera (Bendjedou, 2015).	12
Tableau II.2	Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations (ANRH, 1983 ; Azlaoui, 2018).	23
Tableau. III.1	Méthodes de mesure et d'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux (Voir annexe B pour les protocoles d'analyse physicochimiques).	29
Tableau. III.2	Classification de l'eau par degré d'aptitude à l'irrigation en utilisant la méthode SAR (Richards, 1954 ; Hadeff, 2023).	34
Tableau. III.3	Pondération des paramètres de qualité (Aissaoui et Fara, 2023).	38
Tableau. III.4	Evaluation de la qualité de l'eau (l'indice de Horton) (Benaissa et al,2022).	39
Tableau. III.5	Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE (Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Talhaoui et al,2020 ; Benferdia etKorichi, 2020).	40
Tableau. III.6	Avantages et inconvénients de l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée (Lakhrif et Hedidi, 2020).	41
Tableau. III.7	Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE _{CCME} (CCME, 2005).	43
Tableau. III.8	Classification de l'eau selon l'IQE _{NSF} (Al Yousif et Chabuk, 2023).	43
Tableau. III.9	Classification de l'eau selon l'IQE _{oregon} (Benrahou, 2023).	44
Tableau. IV.1	Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Ain Oussera, 2013).	47
Tableau. IV.2	Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Ain Oussera, 2023).	48
Tableau. IV.3	Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Hassi Bahbah, 2013).	57
Tableau. IV.4	Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (HassiBahbah, 2022).	58
Tableau. IV.5	Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER (Hassi Bahbah, Septembre 2022).	71
Tableau. IV.6	Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER (Ain Oussera, Mars 2023).	71
Tableau. IV.7	Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques.	90
Tableau. IV.8	Valeurs propres des composantes principales.	91
Tableau. IV.9	Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1 et F2.	93
Tableau. IV.10	Valeurs moyenne des paramètres physico-chimiques pour les principaux groupes sélectionnés.	94
Tableau. IV.11	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme Algérienne (Ain Oussera).	99
Tableau. IV.12	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme Algérienne (Hassi Bahbah)	100
Tableau. IV.13	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme OMS (Ain Oussera).	101
Tableau. IV.14	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme OMS (Hassi Bahbah).	102
Tableau. IV.15	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / NormesAlgérienne (Ain Oussera).	103
Tableau. IV.16	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / NormesAlgérienne (Hassi	103

	Bahbah).	
Tableau. IV.17	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes OMS (Ain Oussera).	104
Tableau. IV.18	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes OMS (Hassi Bahbah).	105
Tableau. IV.19	Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice IQE arithmétique pondéré 2023.	106
Tableau. IV.20	Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice IQE pondéré 2023.	106
Tableau. IV.21	Résultats des analyses microbiologiques des eaux (Ain Oussera).	110
Tableau. IV.21	Résultats des analyses microbiologiques des eaux (Hassi Bahbah).	110

LISTE DES FIGURES

Figure II.1	Zone d'étude (la plaine de Ain Oussera). (Azlaoui et al, 2021).	11
Figure II.2	Variation des précipitation moyennes mensuelles à 7 stations (Bendjedou, 2015).	12
Figure II.3	Variation des températures moyennes mensuelles à la station d'Ain Oussera (1991-2011) (Bendjedou, 2015).	14
Figure II.4	La vitesse moyenne mensuelle (Station d'Ain Oussera 1995-2004) (Azlaoui et al, 2021).	15
Figure II.5	L'humidité relatives moyenne mensuelles (Station d'Ain Oussera 1991-2011) (Bendjedou, 2015).	16
Figure II.6	Carte réseau hydrographique de la plaine d'Ain Oussera (Azlaoui, 2018)	17
Figure II.7	La coupe géologique synthétique de la région d'Ain Oussera (Bechtel, 1977 ; Mebrouk et al, 2007).	20
Figure II.8	Carte géologique de la zone d'étude (Azlaoui et al, 2021).	21
Figure II.9	Situation administrative de la commune de Hassi Bahbah (Sellali, 2019).	25
Figure II.10	La géologie de la commune de Hassi Bahbah (Sellali, 2019).	26
Figure III.1	Le diagramme de piper (Korchi et Magri, 2016).	31
Figure III.2	Diagramme de Schoeller-Berkaloff (Zereg, 2019).	31
Figure III.3	Diagramme de Stiff (Bouteldjaoui, 2020).	32
Figure III.4	Diagramme de Sabler (Belkacem et Mendi, 2020).	33
Figure III.5	Diagramme de Richards (Zereg, 2019).	34
Figure III.6	Diagramme de Wilcox (Bouteldjaoui, 2020).	35
Figure III.7	Représentation graphique de l'indice de qualité de l'eau (IQECCME) dans un espace tridimensionnel (Abbasi et Abbasi, 2012).	41
Figure IV.1	Variation de la turbidité des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	47
Figure IV.2	Variation de la température des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	49
Figure IV.3	Variation de pH au niveau des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	49
Figure IV.4	Variation de conductivité électrique de CE des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	50
Figure IV.5	Variation des concentrations de TDS des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	50
Figure IV.6	Variation des concentrations de TH des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	51
Figure IV.7	Variation des concentrations de Ca^{2+} des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	52
Figure IV.8	Variation des concentrations de Mg^{2+} des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	52
Figure IV.9	Variation des concentrations de Na^+ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	53
Figure IV.10	Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	53
Figure IV.11	Variation des concentrations de Cl^- des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	54
Figure IV.12	Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	55
Figure IV.13	Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	55
Figure IV.14	Variation des concentrations de NO_3^- des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	56
Figure IV.15	Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera.	56
Figure IV.16	Variation de la turbidité des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	57
Figure IV.17	Variation de la température des eaux souterraines de la région de Hassi	58

	Bahbah.	
Figure IV.18	Variation de pH au niveau des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	59
Figure IV.19	Variation de conductivité électrique de CE des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	60
Figure IV.20	Variation des concentrations de TDS des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	60
Figure IV.21	Variation des concentrations de TH des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	61
Figure IV.22	Variation des concentrations de Ca^{2+} des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	61
Figure IV.23	Variation des concentrations de Mg^{2+} des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	62
Figure IV.24	Variation des concentrations de Na^+ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	62
Figure IV.25	Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	63
Figure IV.26	Variation des concentrations de Cl^- des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	64
Figure IV.27	Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	64
Figure IV.28	Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	65
Figure IV.29	Variation des concentrations de NO_2^- des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	65
Figure IV.30	Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah.	66
Figure IV.31	Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Ain Oussera (Mars 2023).	67
Figure IV.32	Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah (Septembre 2022).	68
Figure IV.33	Diagramme de Schöeller-Berkaloff pour les eaux souterraines de Ain Oussera (Mars 2023).	69
Figure IV.34	Diagramme de Schöeller-Berkaloff pour les eaux souterraines de Hassi Bahbah (Septembre 2022).	70
Figure IV.35	Classification des eaux selon le diagramme de Stabler (Ain Oussera, Mars 2023).	72
Figure IV.36	Classification des eaux selon le diagramme de Stabler (Hassi Bahbah, Septembre 2022).	73
Figure IV.37	Classification des eaux selon le diagramme de Stiff (Ain Oussera, Mars 2023 et Hassi Bahbah, Septembre 2022).	74
Figure IV.38	Variation des concentrations des éléments majeurs en fonction de là avec la minéralisation totale des eaux TDS.	75
Figure IV.39	Rapport Na^+/Cl^- .	77
Figure IV.40	Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$.	78
Figure IV.41	Rapport $\text{Mg}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$.	79
Figure IV.42	Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$.	79
Figure IV.43	Rapport $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$.	80
Figure IV.44	Rapport $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^-$.	81
Figure IV.45	Rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$.	82
Figure IV.46	Corrélation $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-)$ en fonction de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ pour les eaux.	83
Figure IV.47	Variation d'indice d'échange de base des eaux souterraines de Ain Oussera et Hassi Bahbah.	84
Figure IV.48	Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis des minéraux	85

	évaporitiques (a : vis-à-vis de l'halite ; b : vis-à-vis de gypse).	
Figure IV.49	Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis des minéraux carbonatés (a : vis-à-vis de la calcite ; b : vis-à-vis de dolomite).	86
Figure IV.50	Valeurs propres de la matrice de corrélation.	91
Figure IV.51	Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.	92
Figure IV.52	Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2.	93
Figure IV.53	Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux des forages de la région d'Ain Oussera.	96
Figure IV.54	Dendrogrammes des individus de la composition chimique des eaux des forages de la région d'Ain Oussera.	97
Figure IV.55	Représentation des groupes d'échantillons sur le diagramme de Stiff.	97
Figure IV.56	Représentation des groupes d'échantillons sur le diagramme de Schöeller Berkaloff.	98
Figure IV.57	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages de Ain Oussera (Normes Algérienne).	99
Figure IV.58	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages de Hassi Bahbah (Normes Algérienne).	100
Figure IV.59	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages d'Ain Oussera (Norme OMS).	101
Figure IV.60	Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages de Hassi Bahbah (Norme OMS).	101
Figure IV.61	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Ain Oussera (Normes Algérienne).	102
Figure IV.62	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Hassi Bahbah (Norme Algérienne).	103
Figure IV.63	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Hassi Bahbah (Normes OMS).	104
Figure IV.64	Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Hassi Bahbah (Normes OMS).	105
Figure IV.65	Classification des points d'eau selon le diagramme de Riverside (Ain Oussera).	107
Figure IV.66	Classification des points d'eau selon le diagramme de Riverside (Hassi Bahbah).	108
Figure IV.67	Classification des eaux selon le diagramme de Wilcox (a : Ain Oussera ; b : Hassi bahbah).	109

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

1. Problématique

En Algérie, ces 20 dernières années ont été particulièrement caractérisées par une longue période de sécheresse due, non seulement à l'alternance habituelle entre périodes sèches et humides mais également, aux phénomènes des changements climatiques (Ouanouki, 2012; Ouanouki, 2014). Dans la wilaya de Djelfa caractérisée par un climat semi-aride à aride, les contraintes de la croissance démographique et les transformations économiques et sociales sont à l'origine d'une demande en eau sans cesse croissante (Ouanouki, 2014; Bendjedou, 2015). Les eaux souterraines constituent la principale ressource d'eau douce d'approvisionnement en eau potable de la population.

Située dans la partie centrale de l'Algérie du Nord, la zone d'étude (Ain Oussera et Hassi Bahbah) s'insère dans un vaste ensemble faisant partie des Hautes Plaines Algéroises. Elle se trouve dans une zone où la mobilisation des eaux superficielles est nulle et les besoins en eau pour les différents usages sont assurés par l'exploitation des eaux souterraines (Bendjedou, 2015). De ce fait, l'approvisionnement en eau de la zone d'étude repose sur les aquifères (Albien et Turonien) qui représentent d'importants réservoirs potentiels pouvant contenir les ressources en eau nécessaires. Ces ressources en eau sont soumises à une surexploitation notamment à usage agricole, surtout avec la politique nationale de développement agricole mise en œuvre par les programmes FNDRA (Fonds National de Régulation et de Développement Agricole) et PSD (Programmes Sectoriels de Développement). L'augmentation des surfaces irriguées a entraîné un fort accroissement des besoins en eau, et par conséquent un épuisement de la nappe albienne, une baisse significative du niveau piézométrique de la nappe, et une dégradation de la qualité chimique de ses eaux à l'échelle de la région (Bendjedou, 2015; Azlaoui, 2018). Il est donc essentiel de bien connaître cette ressource précieuse, de la préserver et de la gérer judicieusement pour assurer sa durabilité à long terme.

2. Objectifs de ce travail

- ✓ Étude des paramètres physico-chimiques des eaux des principaux aquifères de la région d'étude.
- ✓ Évaluation de la qualité de l'eau à des fins de consommation humaine en se basant sur les normes Algérienne et de l'OMS.
- ✓ Détermination des processus hydrogéochimiques régissant le chimisme des eaux de cet important système aquifère.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

3. Approche et méthodologie

Pour répondre à la problématique posée et atteindre les objectifs ciblés, une approche multidisciplinaire a été adoptée, intégrant des méthodes hydrogéochimique, statistique et l'indice de la qualité de l'eau IQE.

3. Structure de mémoire

Le manuscrit de mémoire s'organise en quatre (04) chapitres précédés par une introduction qui décrit la problématique et les objectifs visés dans cette étude.

Dans le **premier chapitre** nous présentons une synthèse bibliographique sur les caractéristiques physico-chimiques et bactériologiques, ainsi que les normes nationales et internationales de potabilité des eaux.

Le **deuxième chapitre** est consacré à la présentation générale de la zone d'étude avec une situation géographique, contexte climatique, synthèse géologique et hydrogéologique. Cette présentation permet de mieux comprendre les enjeux environnementaux et les défis auxquels la région doit faire face.

Le **troisième chapitre** est consacré à la présentation du matériel et des méthodes utilisés pour les analyses chimiques des eaux, ainsi que pour le traitement des données.

Le **quatrième chapitre** aborde l'étude de la chimie des eaux souterraines, afin de déterminer leurs faciès hydrogéochimiques, en se basant sur les résultats des analyses des éléments majeurs. En outre, il traite les indices de saturation des eaux vis-à-vis de quelques phases minérales, ainsi que les corrélations entre éléments majeurs afin de déterminer les origines et les mécanismes responsables de l'acquisition de la minéralisation des eaux. Ensuite, l'utilisation des méthodes statistiques multivariées, telles que la matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques, analyse en Composante principale (ACP) et la classification ascendante hiérarchique (CHA) permettra de compléter l'interprétation de l'étude hydrochimique. Enfin, l'indice de qualité de l'eau (IQE) est calculé pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines à la consommation humaine.

La conclusion générale : résume les principaux résultats et conclusions obtenus.

CHAPITRE I

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

L'étude de la chimie des eaux souterraines, vient en complément à toute étude hydrogéologique (Castany, 1963). Elle joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...etc.). La composition ionique des eaux souterraines varie sensiblement en fonction, des caractéristiques chimiques de la pluie et des eaux de surface, des propriétés des sols de ruissellement et de la nature lithologique de la roche encaissante (Appelo et Postama, 1996). Les eaux des précipitations ruissellent, s'infiltrent, se chargent en composants des sols et des roches mères dont elles peuvent acquérir des sels minéraux en grande quantité (calcium, magnésium, sulfates...) ou d'autres composés comme le fer, le manganèse (Ghodbane, 2018).

I.2 Caractéristiques physiques :

I.2.1. La température (T) :

La température joue un rôle important dans la solubilité des sels et des gaz et par conséquent sur la conductibilité. Elle varie en fonction de la température extérieure (l'air), des saisons, de la nature géologique et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol (Debieche, 2002). Les directives de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) fixent 12°C le niveau guide de la température de l'eau destinée à la consommation humaine, et à 25°C, la température à ne pas dépasser (Rodier et al, 2009).

I.2.2. Le pH

Le pH d'une eau est une mesure de son acidité ou de son alcalinité. Le pH des eaux naturelles est lié à la nature des terrains traversés. Dans la plupart des eaux naturelles, le pH dépend de l'équilibre calco-carbonique : $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \leftrightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (I.1) (Rodier et al, 2009). Généralement, les valeurs de pH des eaux naturelles sont comprises entre 6 et 8,5 (Rodier et al, 2009).

I.2.3. La Conductivité :

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes métalliques de 1 cm² de surface, séparées l'une de l'autre de 1 cm. La mesure de la conductivité permet d'apprécier rapidement mais très approximativement la minéralisation de l'eau et de suivre son évolution (Tableau I.1).

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.2.4. Potentiel d'oxydoréduction (Eh) : Ce paramètre nous permet de prévoir l'état des ions chimiques dans l'eau et la direction des réactions chimiques (oxydation ou réduction) (Debieche, 2002).

I.2.5. Turbidité

La turbidité est liée à la présence de particules organiques diverses, d'argile, de colloïdes de plancton, etc. Elle est exprimée généralement en NTU (Néphelométric Turbidity Unit) ou FTU (Formazin Turbidity Unit) (Rodier et al, 2009). Pour l'eau potable, les directives de l'OMS fixent comme valeur limite 5 unités NTU (OMS, 2008).

Tableau I.1 : Relation entre la minéralisation et la conductivité électrique (Rodier, 1996)

Conductivité électrique	Taux de minéralisation
0-100 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation très faible
100-200 $\mu\text{S}/\text{cm}$	Minéralisation faible
200-333 $\mu\text{S} / \text{cm}$	Minéralisation moyenne
333-666 $\mu\text{S} / \text{cm}$	Minéralisation moyenne accentuée
666-1000 $\mu\text{S} / \text{cm}$	Minéralisation moyenne importante
> 1000 $\mu\text{S} / \text{cm}$	Minéralisation élevée

I.3. Caractéristiques chimiques

I.3.1. Le Résidu sec

Le résidu sec représente la minéralisation totale de l'eau, la détermination du résidu sec sur l'eau non filtrée permet d'évaluer la teneur en matières dissoutes et en suspension d'une eau ; la mesure après filtration correspond aux matières dissoutes (Rodier et al, 2009). Pour des raisons de saveur, l'OMS recommande une valeur limite de 1000 mg/l dans l'eau destinée à la consommation humaine (OMS, 2008).

I.3.2. La dureté totale

La dureté d'une eau a un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés et correspond à la teneur en calcium et en magnésium (Rodier et al, 2009). Elle peut être temporaire ou permanente. La dureté temporaire, appelée aussi la dureté carbonatée est causée par la présence de calcium et de bicarbonates de magnésium. La dureté permanente, également

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

appelée la dureté non carbonatée est due à la présence de sulfates, chlorures et nitrates de calcium et de magnésium (FUNASA, 2013).

La dureté est mesurée par le titre hydrotimétrique exprimé en °F (degré français); 1 °F correspond à 10 mg de carbonate de Ca^{2+} dans 1 litre d'eau. Les eaux provenant de terrains calcaires et surtout de terrains gypseux peuvent avoir des duretés élevées susceptibles d'atteindre 1g/l de CaCO_3 , par contre les eaux en provenance de terrains cristallins, métamorphiques ou schisteux auront des duretés très faibles (Rodier et al, 2009).

La dureté totale est déterminée par l'équation suivante (Todd, 1980) :

$$\text{TH} = 2,497 \text{ Ca} + 4,117 \text{ Mg} \quad (\text{I.2}),$$

où les concentrations de Ca et Mg sont exprimées en meq/l

Tableau I.2 : Classification des eaux selon leur dureté totale (Sawer et Mccarthy, 1967)

TH (CaCO_3 en mg/l)	Type d' eau
< 75	Douce
75-150	Modérément dure
150-300	Dure
>300	Très dure

I.3.3. Titre alcalimétrique complet (TAC)

Le titre alcalimétrique complet (TAC) est l'expression de la teneur totale de l'eau en hydroxydes, carbonates et bicarbonates alcalins et alcalino-terreux. Entre les pH de 7.65 et 8.3, l'essentiel du TAC est constitué par les bicarbonates. Le TAC correspond à la somme (Rodier et al, 2009) :

$$\text{TAC} = [\text{HCO}_3^-] + 2 [\text{CO}_3^{2-}] + [\text{OH}^-] - [\text{H}_3\text{O}^+] \quad (\text{I.3})$$

I.3.4. Les éléments majeurs

I.3.4.1. Calcium (Ca^{2+}) : Le calcium, élément principal de la dureté de l'eau, est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature (Rahal, 2021). Dans les roches sédimentaires, il se présente sous forme de carbonates (Calcite (CaCO_3), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et aragonite (CaCO_3) et aussi dans les minéraux argileux sous forme de montmorillonite (Appelo et Postama, 1996, Debieche, 2002). Le calcium peut provenir

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

également des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), qui sont facilement solubles (Appelo et Postama, 1996) :

I.3.4.2. Magnésium (Mg^{2+}) : Il provient de la dissolution des roches magnésiennes, dolomitiques ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) et des minéraux ferromagnésiens, il provient aussi de formations métamorphiques telles que les micaschistes (Gaagai, 2017).

I.3.4.3. Sodium (Na^+)

L'origine de cet élément est liée principalement au lessivage des dépôts évaporitiques (l'halite, NaCl), des phénomènes d'évaporation, et à l'effet de la salinité marine (Appelo et Postama, 1996). La valeur proposée par l'OMS est fixée dans la limite de 200 mg/l, la même valeur préconisée par les normes algériennes (Gaagai, 2017).

I.3.4.4. Potassium (K^+)

La source principale de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables que ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite (KCl)), les argiles potassiques (illite) et de la dissolution des engrais chimiques (Debieche, 2002).

I.3.4.5. Bicarbonates (HCO_3^-)

Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son l'infiltration dans le sous-sol (Debieche, 2002).

I.3.4.6. Chlorures (Cl^-)

Les origines possibles de cet élément dans les eaux souterraines sont : dissolution du NaCl des roches évaporitiques, l'intrusion d'eau de mer et une origine anthropique (engrais organiques et inorganiques) (Debieche, 2002, Rodier et al, 2009). L'OMS recommande pour la teneur en chlorures dans l'eau destinée à la consommation humaine une valeur guide de 250 mg/L pour des considérations gustatives et des risques de corrosion (Rodier et al, 2009).

I.3.4.7. Sulfates (SO_4^{2-})

Dans les eaux souterraines, les sulfates proviennent de double origine : naturelle et/ou anthropique. Naturellement, ils existent dans de nombreux minéraux dont le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), l'anhydrite (CaSO_4), la barytine (BaSO_4), la célestite (SrSO_4) et l'epsomite ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), ils peuvent provenir également de l'oxydation de la pyrite (FeS_2) (Rabiet, 2006). Les origines anthropiques sont l'utilisation d'engrais chimiques en agriculture. Pour l'eau destinée à la consommation humaine, l'OMS recommande comme valeur limite 250 mg/L (Rodier et al, 2009).

I.3.5. Les ions indicateurs de pollution

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

I.3.5.1. Nitrates (NO_3^-)

Les nitrates (NO_3^-) sont des composés naturels présents dans l'environnement (l'eau et le sol), constituent le produit final essentiel du cycle de l'azote. À l'état naturel, les concentrations en nitrates dans les eaux souterraines sont faibles (<10 mg/l) (Belmiloud, 2017). La présence de nitrates en teneurs est un indice de pollution d'origine agricole, liée à l'utilisation intensive des engrais chimiques et organiques ; d'origine urbaine (dysfonctionnement des réseaux d'assainissement) ou industrielle (Ghodbane, 2018). La nitrification transforme les ions NH_4^+ et NH_3 en nitrites et nitrates. Les normes algériennes et O.M.S pour les nitrates dans l'eau potable est de 50 mg/l.

I.3.5.2. Nitrites (NO_2^-)

Les nitrites NO_2^- ou azote nitreux, représentent une forme moins oxygénée et moins stable, elle représente la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium, issus de processus de nitrification, c'est une forme toxique. On considère que la situation est très critique à partir d'une concentration de plus de 3 mg NO_2^- /l (Debieche, 2002, Rodier et al, 2009).

I.3.5.3. Ammonium

L'azote ammoniacal est assez souvent rencontré dans les eaux et traduit habituellement un processus de dégradation incomplète de la matière organique. L'ammonium est la forme d'azote la plus toxique (Debieche, 2002). Sa présence dans l'eau est liée soit aux rejets urbains soit aux rejets industriels (Gaagai, 2017).

I.4. Indicateurs de contamination bactérienne :

Les deux groupes de microorganismes les plus utilisés comme indicateurs de contamination bactérienne sont les coliformes totaux et les coliformes fécaux (Desjardins, 1990).

I.4.1. Coliformes totaux

Les coliformes appartiennent à la famille des Enterobacteriaceae (Delarras, 2003). Ce sont des bactéries à Gram négatif, non sporulée, aéro-anaérobies ou anaérobies facultatifs capables de se multiplier en présence de sels biliaires et de fermenter le lactose avec production de gaz à une température de 35 à 37°C.

I.4.2. Coliformes fécaux, ou coliformes thermo-tolérants, sont un sous-groupe des coliformes totaux ont la capacité de fermenter le lactose à une température de 44 °C en 24h l'existence de ces germes peut être une indication de la présence des micro-organismes entéro-pathogènes, comme les salmonelles (Chevalier, 2003). L'espèce la plus habituellement associée à ce groupe bactérien est Escherichia coli (E.coli), elle représente toutefois 80 à 90 % des coliformes thermotolérants détectés. Selon l'O.M.S, l'indicateur le plus précis pour estimer la

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

pollution fécale est en fait *E. coli*, en raison de son abondance dans les fèces humaines (jusqu'à 1 milliard de bactéries par gramme de matière fraîche), et de sa persistance pour être recherché (sa durée de détection dans l'eau à 20°C varie d'une semaine à un mois) (Debabza, 2005).

I.4.3. Streptocoques fécaux,

Les streptocoques fécaux (ou streptocoques du groupe D ou entérocoques) sont des bactéries aérobies-anaérobies facultatives, à Gram positif qui se présentent sous forme de coques en courtes chaînes (Chevalier, 2002). Ils se retrouvent habituellement dans les eaux souterraines à la suite d'une pollution d'origine fécale (Gleeson et Gray, 1997). Selon les directives des communautés européennes, les eaux d'alimentation ne doivent présenter aucun streptocoque fécal ni coliforme thermotolérant dans 100 ml d'eau (Bonney et al., 2002).

I.4.4. Clostridium Sulfito-Réducteur

Les Clostridium Sulfito-réducteurs sont des bacilles Gram positif anaérobies stricts capables de sporuler réduisant les sulfites en sulfures (Cavallo et al., 2002). Elles sont mises en évidence par culture à 37°C en 2 heures (Bonney et al., 2002).

Tableau I.3: les paramètres bactériologiques selon l'OMS et le Journal officiel Algérien

Paramètres	Selon l'OMS	Selon le journal algérien
Coliformes totaux	0/100 ml	Non mentionnés
Coliformes fécaux	0/100 ml	Non mentionnés
Streptocoques fécaux	0/100 ml	Non mentionnés
Clostridium Sulfito-Réducteur	0/100 ml	0/100 ml
Escherichia Coli	0/100 ml	0/100 ml
Salmonelles	0/100 ml	Non mentionnés

(OMS, 2011) ;(JORA, 2011).

I.5. Conclusion

La composition chimique des eaux souterraines dépend des caractéristiques chimiques de la pluie et des eaux de surface, des propriétés des sols, de la nature des roches traversées au cours de l'infiltration et du temps de contact de l'eau avec les minéraux et enfin du temps de renouvellement de l'eau de la nappe par l'eau d'infiltration. Les influences anthropiques comme le retour des eaux d'irrigation dans les régions à forte activité agricole peuvent

CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

également contribuer significativement à la minéralisation des eaux souterraines. L'interprétation des résultats des analyses chimiques, en tenant compte du contexte géologique et hydrogéologique du réservoir aquifère, permettra de mieux comprendre les mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux, ainsi que son évolution spatiale et temporelle

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DE LA ZONE

D'ÉTUDE

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à la présentation de la Zone d'étude. Il fournit des informations sur les raisons qui ont motivé le choix de la zone d'étude, ainsi que sur sa situation géographique, climatiques, hydrographiques. De plus, ce chapitre aborde également le contexte géologique et hydrogéologique de la région étudiée, en se basant sur une synthèse de certaines études et publications antérieures dans le sens de notre recherche (Caratini, 1970; ANRH, 1983; Ayad, 1983 ; Mebrouk, 1994; Maoui et al., 2009; Maoui et al., 2011; Ghibeche, 2011; Bendjedou, 2015; Azlaoui, 2018; Nour et Daoudi, 2020; Azlaoui et al., 2021). Le choix de la Zone d'étude (Ain Oussera et Hassi Bahbah) pour réaliser cette étude est basé sur plusieurs critères favorables. Tout d'abord, il y a la disponibilité de nombreuses données géologiques, et hydrogéologiques provenant de nombreux forages réalisés par divers programmes nationaux dans la région. Ces données ont été valorisées dans le cadre de ce mémoire, ce qui permet de mieux comprendre et d'améliorer l'accès à l'eau potable pour la population locale. De plus, ces données contribuent à améliorer les connaissances hydrogéochimiques des aquifères de l'Albien de Ain Oussera et le Turonien de Hassi Bahbah et à apporter une contribution précieuse à la communauté scientifique.

Pour toute étude des eaux souterraines, la connaissance de la géologie est indispensable surtout pour déterminer la perméabilité du substratum qui joue un rôle déterminant dans le ruissellement et l'infiltration des eaux. Ensuite, une description lithostratigraphique des formations géologiques sera donnée pour l'identification des aquifères caractérisant la zone d'étude. Il est également essentiel de disposer d'une connaissance approfondie des propriétés hydrogéologiques des principaux systèmes aquifères de la région, afin de mettre en place une stratégie efficace pour une meilleure gestion et protection de la ressource en eau souterraine.

L'étude des caractéristiques climatiques (précipitations, température, évapotranspiration), joue un rôle primordial dans la compréhension des mécanismes de recharge des nappes souterraines par infiltration des précipitations.

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.2 Ain Oussera :

II.2.1 Situation géographique :

La plaine d'Ain Oussera, située à environ 200 km au sud d'Alger, se trouve dans les hautes plaines semi-arides de l'Atlas Saharien, dans la wilaya de Djelfa, au centre-nord de l'Algérie. Elle s'étend sur une superficie d'environ 3790 km² (Bouteldjaoui et al, 2017).

Géographiquement, elle est délimitée par les massifs montagneux de Djebel Remila, Sbaa Rous et Oukat El Gharbi et Chergui au sud, et par les crêtes rectilignes de Koudiat Bou Chakeur et Djebel Es Sersou au nord. La plaine s'étire sur 105 km selon un axe nord-est - sud-ouest et sur 30 km suivant un axe perpendiculaire. Elle est située entre 2°15' et 3°45' de longitude Est et 35° et 35°40' de latitude Nord, offrant un paysage plat ou modérément ondulé (Figure II.1) (Azlaoui et al, 2021).

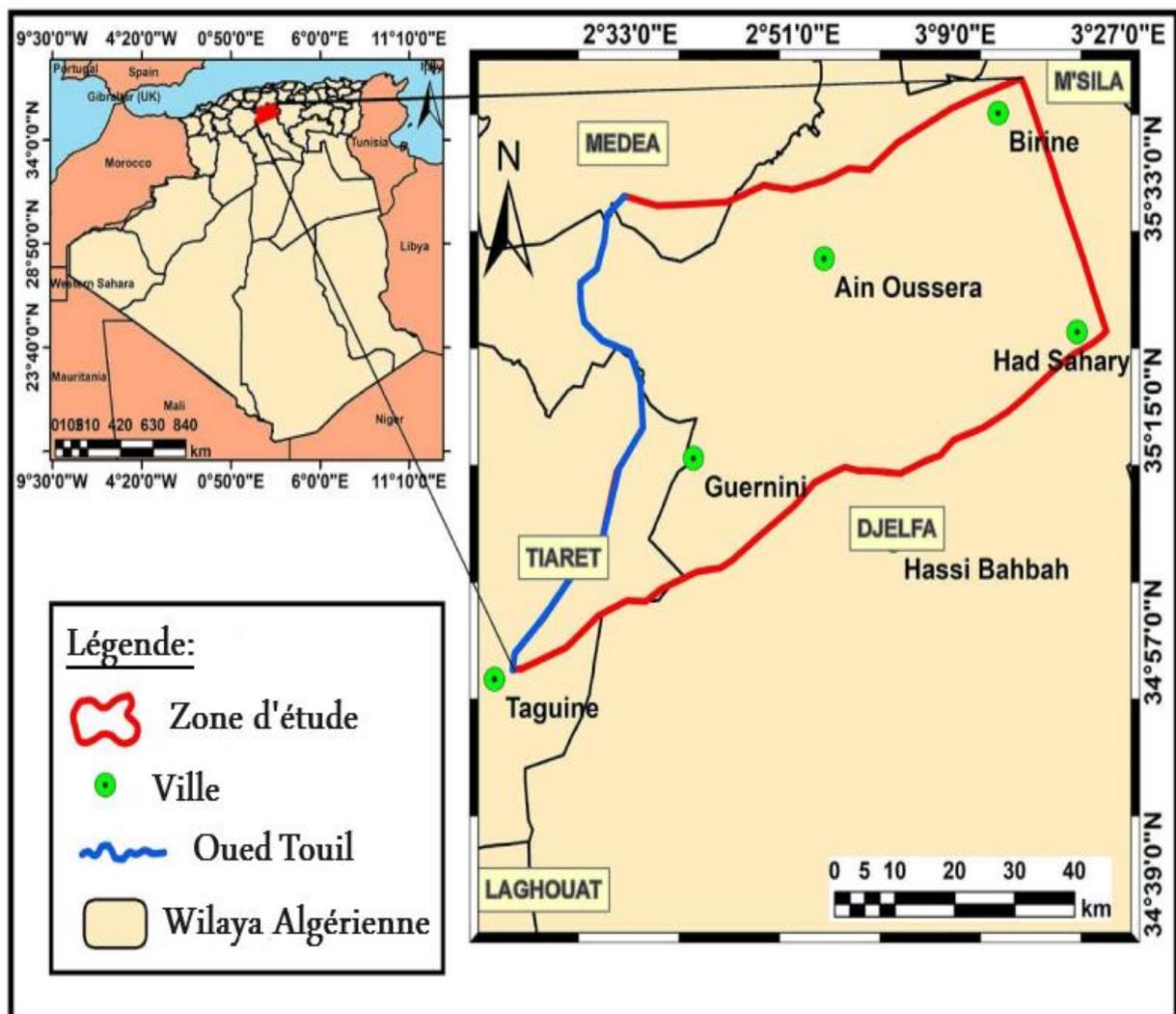


Figure II.1 Zone d'étude (la plaine de Ain Oussera) (Azlaoui et al, 2021).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.2.2 Synthèse climatique sur la région :

II.2.2.1 Précipitation :

La région de la plaine d'Ain Oussera est caractérisée par un climat semi-aride, avec des précipitations annuelles relativement faibles et très irrégulières (Azlaoui et al, 2021 ; Nour et Daoudi, 2020), variant entre 111 mm (Station de Zmalet el Amir Aek) à près de 300 mm à la station de Guelt Esstel. La répartition des précipitations est inégale, avec la majorité des pluies se produisant entre novembre et avril, et des étés très secs (Figure II.2) (Bendjedou, 2015).

Tableau II.1 : Caractéristiques des stations pluviométriques de la plaine d'Ain Oussera (Bendjedou, 2015).

Code	Station	Coordonnées		Alt (m)	Période	Moyenne annuelle (mm)
		Long	Lat			
011205	Ain Oussera	2.9038	35.4525	690	1914-2011	231.1
011206	Cahbounia	2.6040	35.5433	665	1980-2004	142.2
011101	Guelt esstel	3.0169	35.1670	918	1914-1979	297.6
011102	Had Sahary	3.3686	35.3548	830	1967-2011	227.9
011106	Birine	3.2223	35.6292	745	1985-2007	228.8
010704	Ksar chellala	2.3199	35.2132	850	1985-2007	214.9
010502	Zmalet Amir Aek	2.3083	34.8972	850	1980-2004	111.0

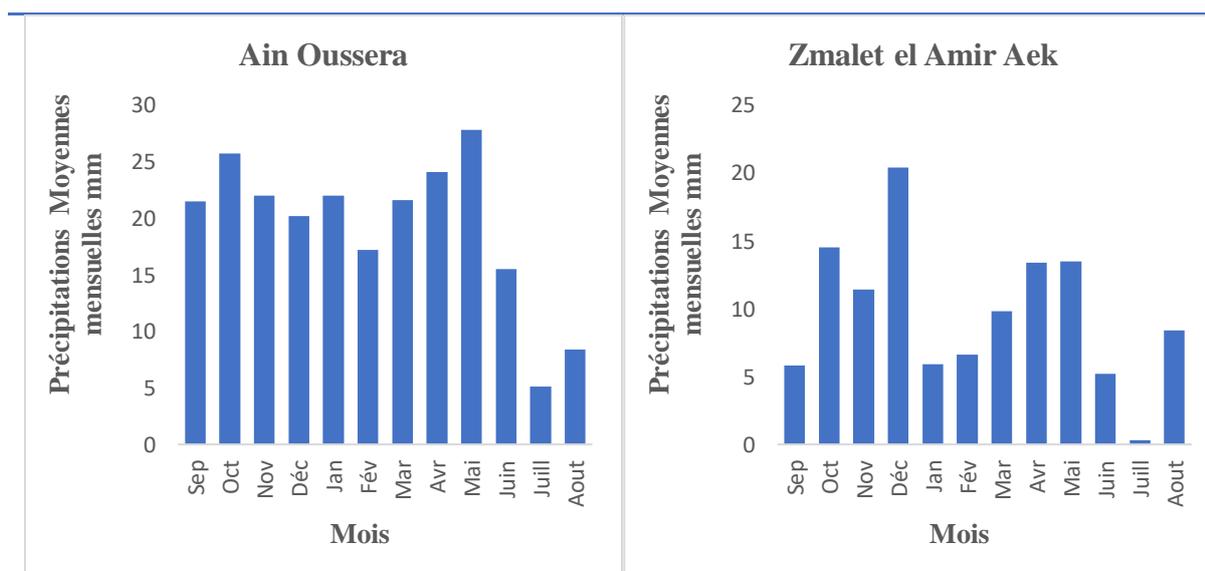
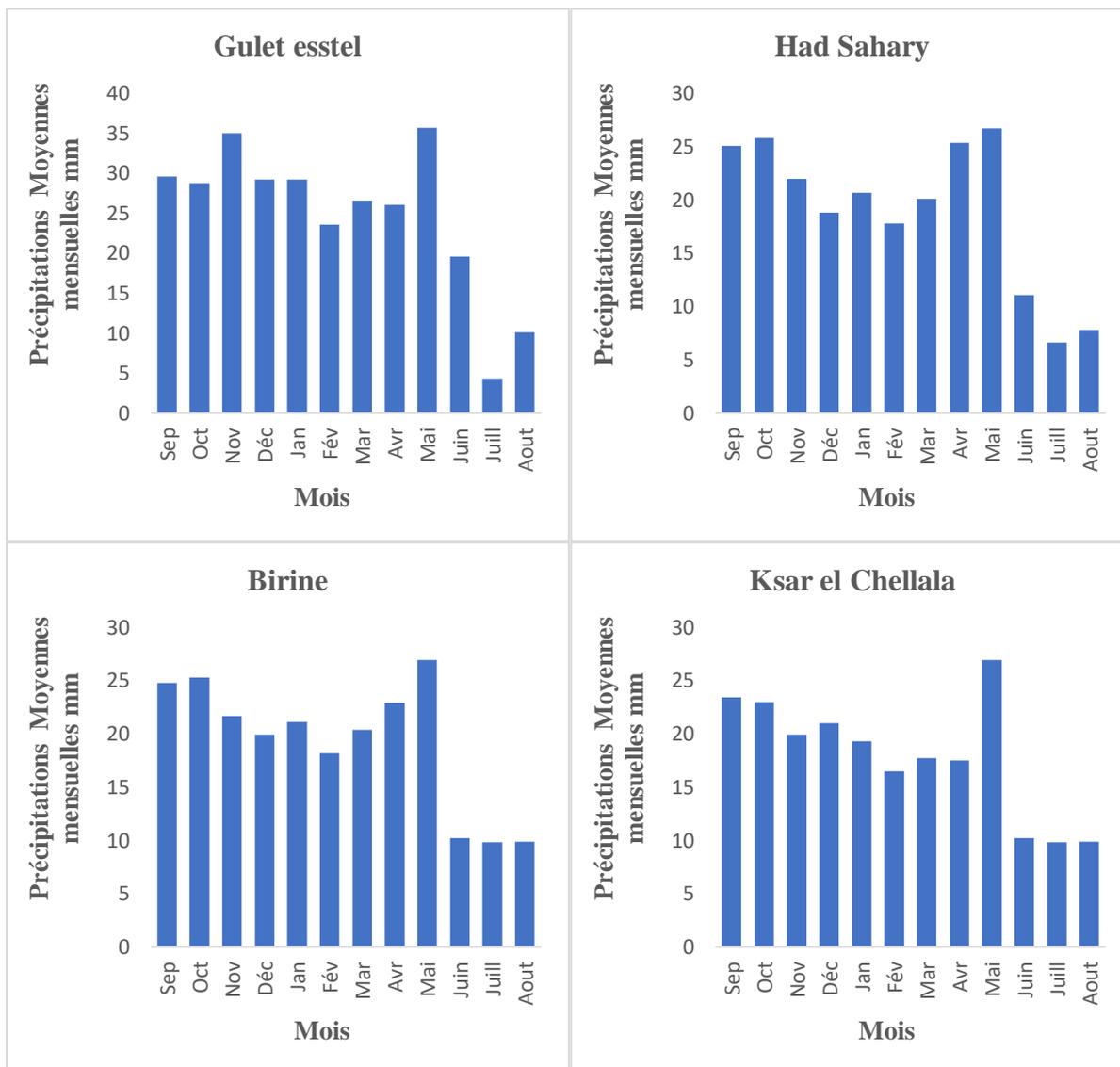


Figure II.2 Variation des précipitation moyennes mensuelles à 7 stations (Bendjedou, 2015).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE



CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.2.2.2 Température :

La station météorologique d'Ain Oussera a enregistré des températures moyennes mensuelles sur une période de 21 ans, révélant une grande variabilité saisonnière, les températures minimales moyennes atteignent leur plus bas point avec une moyenne de 1.63°C et les températures maximales moyennes atteignent leur apogée, avec une moyenne de 37.71°C (Figure II.3) (Bendjedou, 2015). La région de Ain Oussera se caractérise par des étés chauds avec des températures très élevées. En hiver, elle connaît une baisse significative des températures, souvent accompagnée de formation de gelée blanche (Bouabdallah, 2015).

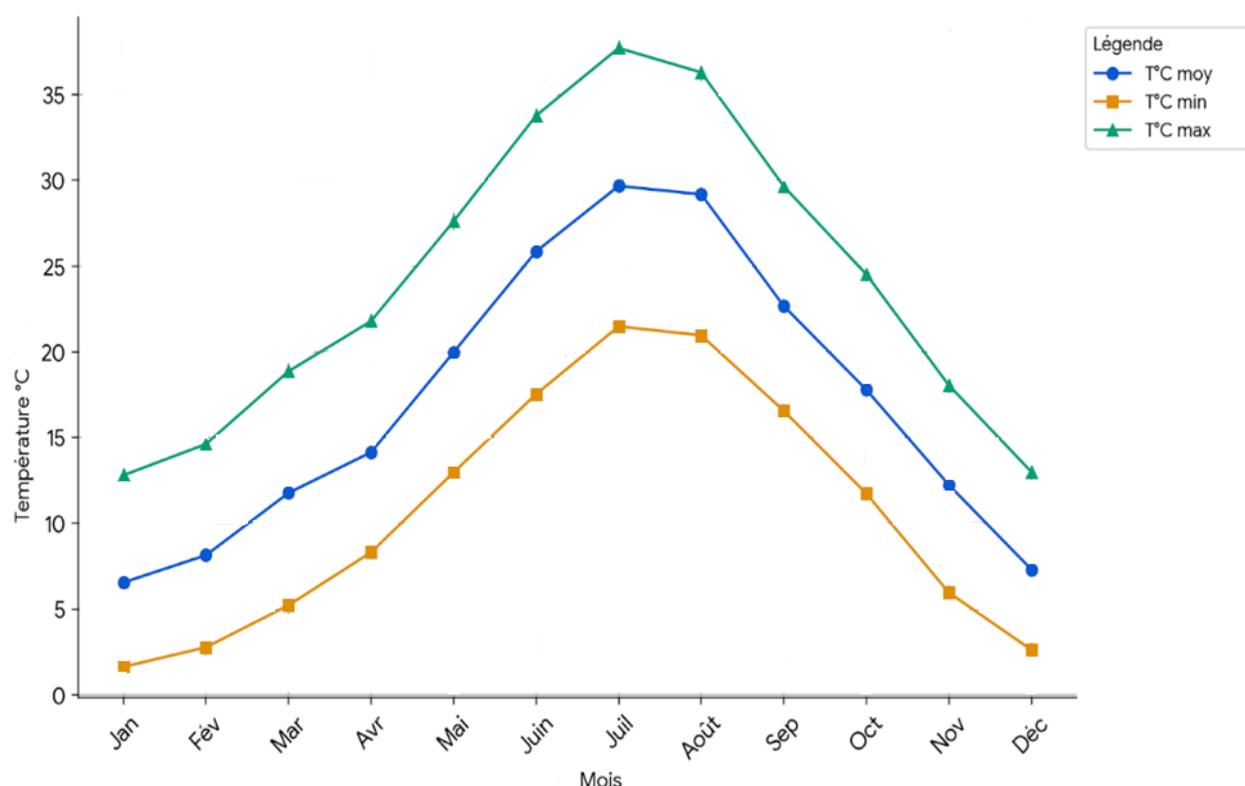


Figure II.3 Variation des températures moyennes mensuelles à la station d'Ain Oussera (1991-2011) (Bendjedou, 2015).

II.2.2.3 Les vents :

Le vent est un facteur climatique important qui influence non seulement l'évaporation mais aussi la distribution des précipitations et les conditions météorologiques générales. Ils se distinguent par trois paramètres clés : sa vitesse, sa fréquence et sa direction.

Les variations saisonnières de la vitesse du vent à Ain Oussera sont principalement dues à la circulation atmosphérique à grande échelle. En hiver, les vents dominants proviennent du secteur ouest et amènent l'humidité du nord, ce qui se traduit par des vitesses de vent plus

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

élevées. En été, les vents dominants proviennent du secteur sud-est et peuvent être chauds et secs, ce qui explique les vitesses de vent plus faibles observées pendant cette saison (Azlaoui et al, 2021).

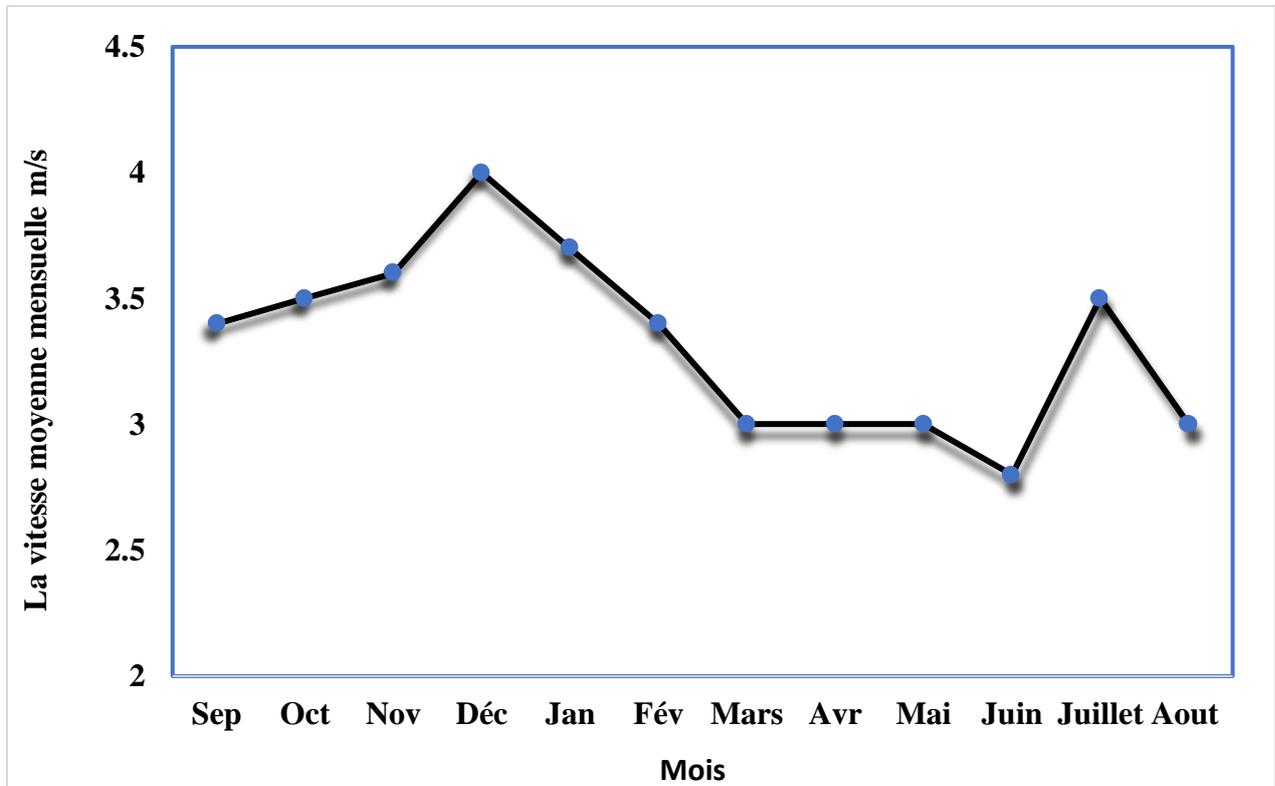


Figure II.4 La vitesse moyenne mensuelle (Station d'Ain Oussera 1995-2004) (Azlaoui et al, 2021).

II.2.2.4L'humidité relative:

L'humidité relative est inférieure à 50 % en juin, juillet et août, montrant des écarts assez importants entre les saisons hivernale et estivale. En juillet, elle atteint en moyenne un minimum d'environ 34 %, tandis qu'en janvier, elle atteint un maximum d'environ 81 %. (Bendjedou, 2015 ; Azlaoui, 2018).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

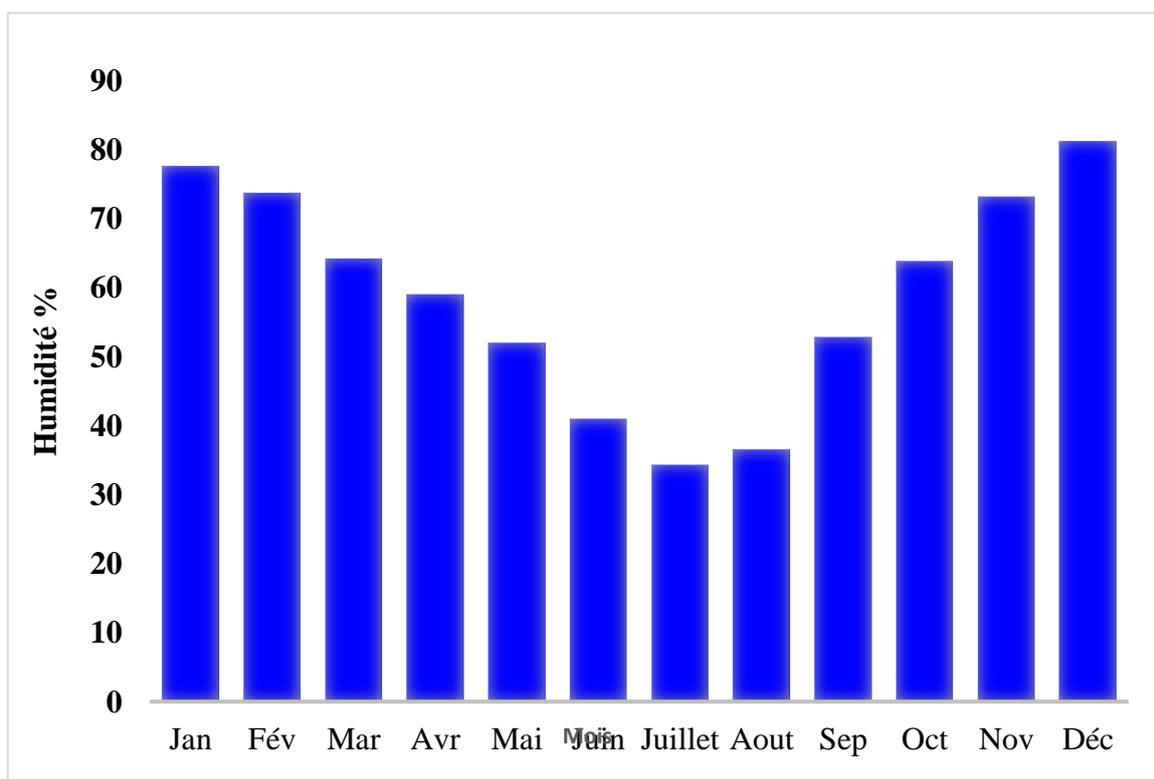
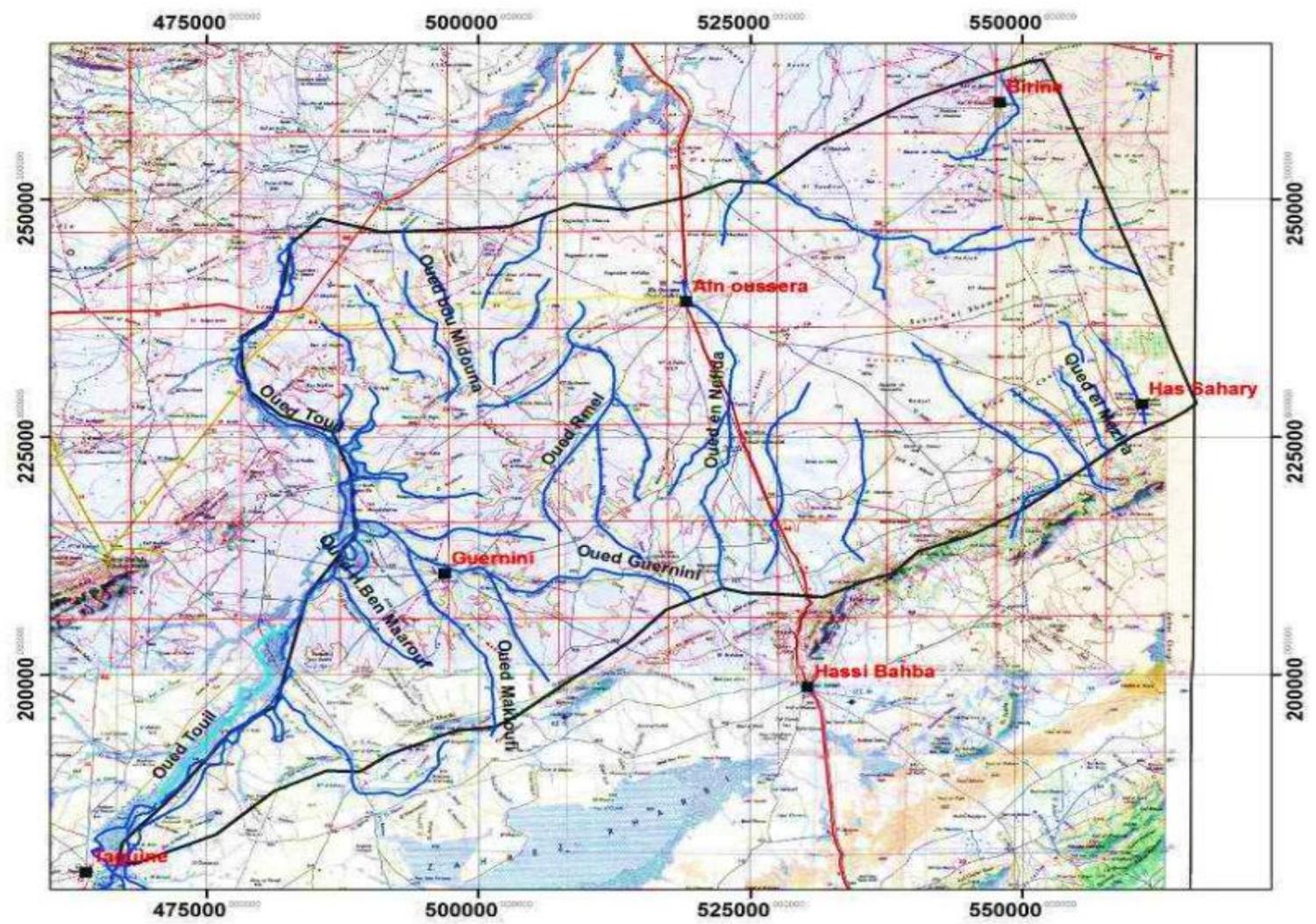


Figure II.51 l'humidité relatives moyenne mensuelles (Station d'Ain Oussera 1991-2011)(Bendjedou, 2015).

II.2.3 Hydrographie

La plaine d'Ain Oussera, traversée par divers oueds, fait partie du bassin hydrographique du Cheliff-Zahrez, dominé par l'Oued Touil (Azlaoui, 2018). Le réseau hydrographique de cette région est peu développé et se caractérise par un régime irrégulier, avec des écoulements principalement sous forme de crues, orientés du sud vers le nord en raison des paramètres morphométriques du bassin. Les oueds, souvent rectilignes en raison de la fracturation du sol, incluent des sous-bassins comme DaitBoughzoul, avec les oueds Mouilah, Boucedraia, Ouerq, et NaharOussel, et Dait El Firania, avec les oueds El Guessar, El Merabet, Faid El Karia, Mertim, Fourtas, et Meriza (Bendjedou, 2015). Ces cours d'eau tendent à se perdre dans la plaine, probablement à cause des failles drainantes au sud de la ville. L'Oued Touil, principal cours d'eau, reçoit les eaux des affluents Makhloufi, Ben Maarouf, et Guernini. De nombreux oueds, tels que Rehma, Emberk, et Miloud, restent secs la majeure partie de l'année, mais en hiver et au printemps, ils peuvent contribuer à l'alimentation des nappes souterraines malgré le manque de densité du réseau de surveillance (Azlaoui, 2018 ; Bendjedou, 2015 ; Nour et Daoudi, 2020).



LEGENDE:

- Ville Events
- Réseau Hydrographique
- Limite_Nappe Albien

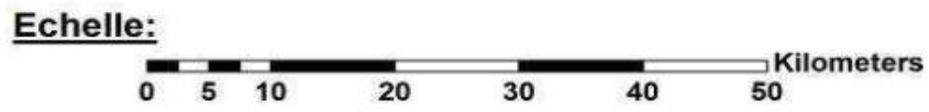


Figure II.6 Carte réseau hydrographique de la plaine d'Ain Oussera (Azlaoui, 2018)

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.2.4 Contexte Géologique et Hydrogéologique :

La région de Ain Oussera, située dans les hautes plaines algéroises, fait partie de l'ensemble pré-atlasique (Bendjedou, 2015). Située entre les structures plissées de l'Atlas saharien et le domaine tellien, qui comprend des unités autochtones, para-autochtones et des nappes de glissement (Larbi, 1983), la plaine de Ain Oussera se présente comme un vaste anticlinorium à cœur d'âge Crétacé. Cet anticlinorium est compliqué par un système d'anticlinaux développés sur les versants Sud et Nord, avec un axe passant par Bou Cedraïa (Caratini, 1970 ; Ayad, 1983 ; Mebrouk, 1994; Maoui et al, 2011 ; Bendjedou, 2015).

Les dépôts quaternaires recouvrent presque toute la plaine (plus de 70%). Sur les flancs Sud et Nord, les formations crétacées affleurent à Koudiat es Seguía, El Fia, El Mouilah, Doghmane, et En Nesser (ANRH, 1983). La série stratigraphique a été déduite à partir de différents forages profonds réalisés dans les régions de Bou Cedraïa (1200 m) et El Khrachem (1100 m), révélant des formations illustrées dans la carte géologique. Cette description lithostratigraphique est basée sur des études antérieures de la région (Caratini, 1970 ; Mebrouk, 1994 ; ANRH, 1983).

II.2.4.1. Trias

Dans la plaine de Ain Oussera, les formations triasiques ne sont pas visibles en surface mais ont été identifiées à une profondeur de 1300 mètres par le forage de Bou Cedraïa (Mebrouk, 1994). La séquence se compose de :

- Une série détritique inférieure (139 m) : Grès fins associés à des calcaires marneux et des conglomérats.
- Une série argileuse (270 m) : Anhydrite, calcaire à anhydrite, dolomie et calcaire (Azlaoui, 2018 ; Mebrouk, 1994).

II.2.4.2. Jurassique

Non visible dans la région, le Jurassique est caractérisé par les formations suivantes :

Lias : Calcaires récifaux (biolithes), parfois argileux, avec à la base de rares bancs de dolomies microcristallines et quelques niveaux de calcaires marneux (300 m). Au-dessus se trouvent des marno-calcaires, des marnes, des calcaires plus ou moins marneux et des marnes plus ou moins gréseuses (40 m) (Maoui et al, 2011).

Dogger : Calcaires finement gréseux surmontant des calcaires légèrement argileux (205 m).

Callovien-Oxfordien : Niveaux détritiques de grès fins quartzitiques alternant avec des argiles marneuses, et des dépôts d'éléments très fins et durs à ciment marno-argileux. À la base, on observe de minces bancs de calcaires plus ou moins marneux (750 m).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Oxfordien au Valanginien : Marnes argileuses avec parfois de rares passages calcaires peu épais. Cette série est surmontée par des terrains graveleux et calcaires (1950 m) (Bendjedou, 2015).

II.2.4.3. Crétacé inférieur

Néocomien : Limité à la zone d'étude, caractérisé par des grès argileux fins avec des niveaux de grès à ciment calcaire gréseux quartzeux dans sa partie moyenne (200 m) (Azlaoui, 2018).

Barrémien : Affleure à la surface dans les environs immédiats de la plaine d'Ain Oussera (Djebel Doghmane, El Khatoua, oued el bagra, El Mouilah). La lithologie comprend des grès argileux fins, avec deux niveaux de grès à ciment calcaréomarneux dans sa partie moyenne (200 m). Une série plus épaisse (450 m) est constituée de grès grossiers avec intercalations argilo-marneuses et quelques bancs de calcaires gréseux, souvent stratifiés entrecroisés et de granulométrie variable (Bendjedou, 2015).

Aptien : Affleure au sud dans la chaîne des Sebaa Rous, au nord autour de l'anticlinal Djebel Doghmane, région de Ben Mekki, oued Mouilah, et DrâaDiba. La série comprend des grès à ciment calcaire, des calcaires, des bancs gréseux avec intercalations de calcaires marneux, et des calcaires gréseux, avec une épaisseur pouvant atteindre 200 m (Azlaoui, 2018).

Albien : Visible dans plusieurs localités, caractérisé par des grès grossiers à ciment calcaire siliceux, avec des intercalations d'argiles dans sa partie moyenne. Au-dessus se trouve une formation argilo carbonatée épaisse, suivie de grès grossiers durs à ciment calcaire. L'épaisseur moyenne de cette formation est d'environ 150 m (ANRH, 1983 ; Ayad, 1983).

II.2.4.4. Crétacé supérieur :

Cénomaniens : Vaste zone avec alternance de calcaire, calcaire dolomitique, calcaire marneux, marnes et argiles gréseuses. Épaisseur de 200 à 220 m dans certaines régions, et de 150 m dans d'autres (Azlaoui, 2018).

Turonien : Épaisseur variant de 150 à 100 m d'est en ouest, caractérisé par des marnes, calcaires et calcaires dolomitiques formant des corniches. Présence notable d'une couche d'anhydrite de 2 m dans certaines sections (Nour et Daoudi, 2020).

II.2.4.5. Tertiaire

Sénonien : Présence à Kef Nesser et Ras en Nokra, composé d'alternances de calcaires biolithiques, parfois oolithiques, et de marnes, avec une épaisseur de 450 m.

Éocène : Présent dans la région de Birine, formé par des calcaires à Numulites, des calcaires marneux et des marnes gypseuses. Recouvert par des dépôts du Quaternaire (Bendjedou, 2015).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

Miocène : Affleurant à l'ouest d'Ain Oussera à Bled Boudoumia et NegarZeïna, il se compose principalement de marnes gréseuses et d'argiles, avec des intercalations de grès et de calcaires. Son épaisseur atteint environ 172 m (Maoui et al, 2009).

II.2.4.6. Quaternaire

Couvre une grande partie de la plaine avec un encroûtement calcaire au-dessus de formations gréseuses (Maoui et al, 2009). Les alluvions modernes des vallées fluviales sont composées de sables limoneux, d'argiles plus ou moins sableuses et de galets, avec une nappe aquifère peu profonde exploitée par de nombreux puits (Bendjedou, 2015 ; Mebrouk, 1994).

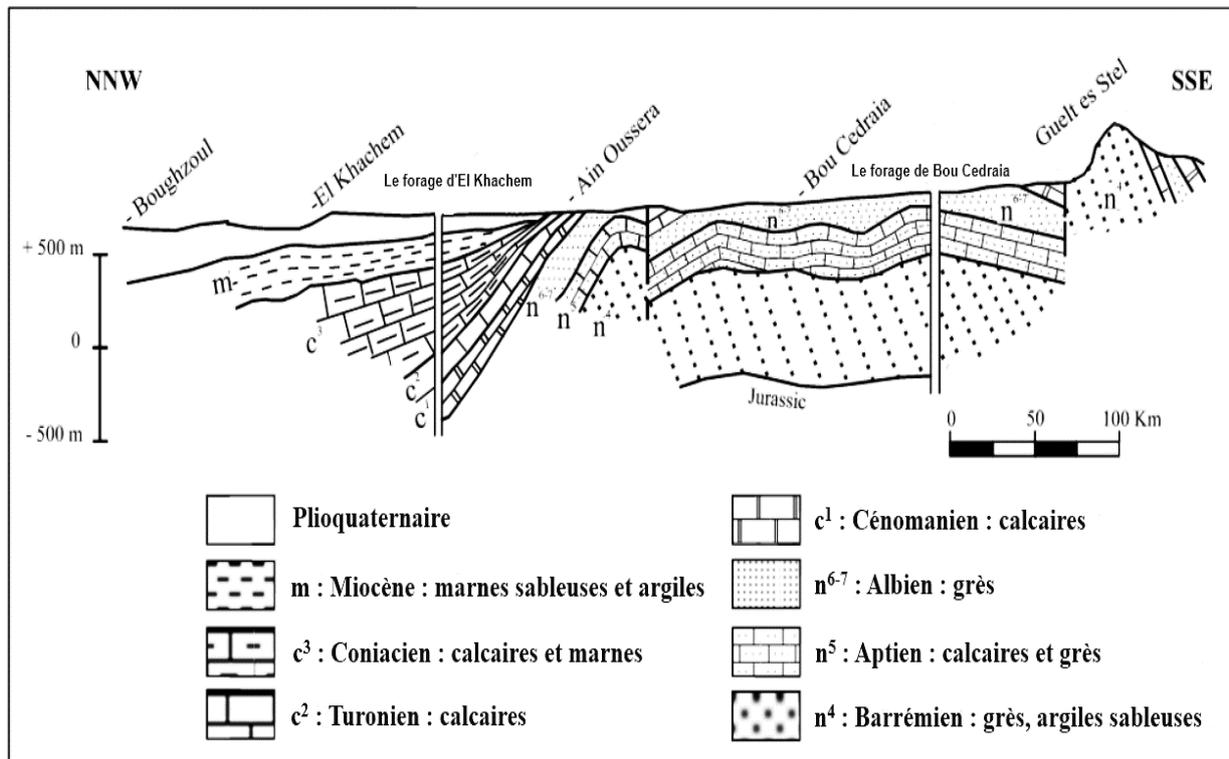


Figure II.7 La coupe géologique synthétique de la région d'Ain Oussera (Bechtel, 1977 ; Mebrouk et al, 2007)

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

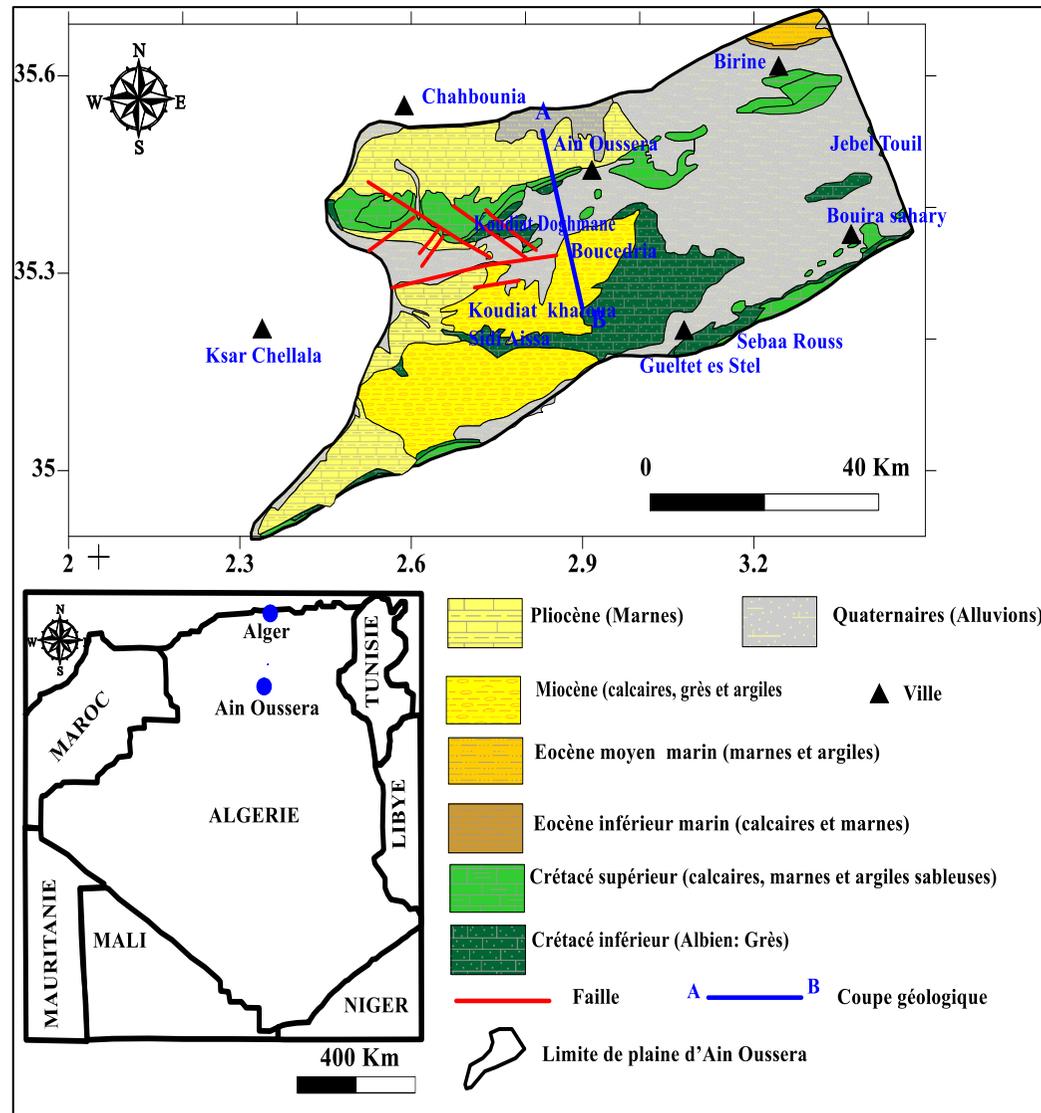


Figure II.8 Carte géologique de la plaine d'Ain Oussera (Extrait de la carte géologique de l'Algérie du Nord au 1/500 000).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.2.5 Hydrogéologique de Ain Oussera :

La plaine d'Ain Oussera contient diverses formations aquifères avec des potentialités hydrauliques différentes. Ces formations comprennent le remplissage quaternaire, les grès du Miocène, les calcaires inférieurs de l'Éocène, les calcaires du Turonien et du Cénomaniens, ainsi que les grès d'Albo-Barremien. Les grès de l'Albien inférieur forment le principal aquifère dans la zone étudiée. Il s'agit d'un aquifère libre d'une épaisseur considérable, variant entre 83 m et 225 m, avec une épaisseur moyenne de 150 m (Azlaoui et al., 2017).

La région d'Ain Oussera a été classée en quatre entités hydrogéologiques distinctes (Ayad, 1983) :

a) Un aquifère peu profond dans les dépôts plio-quaternaires : principalement constitué de conglomérats et de poudingues très communs dans la plaine. De nombreux puits tirent de l'eau de ces formations. L'eau a une teneur en sel relativement faible avec un résidu sec moyen de 1,5 g/l. L'aquifère quaternaire repose sur l'Albien, en particulier là où la plaine s'étend dans la partie centrale de l'anticlinal (Mebrouk et al, 2007 ; Azlaoui, 2018).

b) Les dépôts turoniens : L'aquifère du Turonien, situé principalement dans les régions d'Ain Oussera, Taguine, et les contreforts nord de l'Atlas saharien, est caractérisé par des calcaires fissurés et une profondeur allant de 14,5 m à 43 m (Azlaoui, 2018). Il est rarement exploité en raison de sa faible productivité, de sa profondeur et de sa salinité élevée (au-dessus de 3 g/l). Ce réservoir aquifère, confiné sous les marnes miocènes et les formations du Coniacien, constitue une partie importante du grand anticlinal structurant la zone nord de la plaine (Mebrouk et al, 2007).

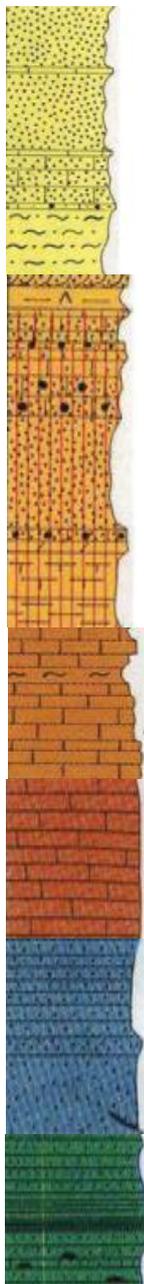
c) Les grès albien : Dans la plaine d'Ain Oussera, l'Albien constitue le plus grand aquifère de la région, caractérisé par des grès continentaux perméables (Mebrouk et al, 2007 ; Maoui et al 2009). Il affleure en plusieurs points (Bendjedou, 2015), principalement au centre de la plaine où la nappe phréatique est souvent non confinée. À d'autres endroits, l'aquifère peut être confiné ou semi-confiné. Contrairement à la formation Aptienne, l'Albien est peu cloisonné par les argiles, facilitant ainsi la circulation des eaux souterraines. Les forages, d'une profondeur de 100 m à 300 m, captent ces grès avec des débits variant de 20 l/s à 75 l/s et des débits spécifiques de 1 à 7 l/s/m (Azlaoui, 2018 ; Nour et Daoudi, 2020). La teneur en soluté de l'eau albienne est généralement faible, avec un résidu sec inférieur à 1 g/l, et le substratum comprend des calcaires et des grès, souvent accompagnés de niveaux marneux de l'Aptien.

d) La formation barrémienne : La formation barrémienne, similaire à l'Albien en termes de lithologie, est constituée principalement de grès blancs friables avec des couches de marnes grises, d'argile gréseuse et de dolomie à la base, sur une épaisseur totale de 350 mètres. Elle

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

est considérée comme un réservoir majeur en raison de sa grande épaisseur et de sa bonne perméabilité. Cependant, la qualité de l'eau y est médiocre, avec un total des solides dissous de 4 g/l, ce qui limite son exploitation (Mebrouk et al, 2007 ; Nour et Daoudi, 2020 ; Azlaoui, 2018).

Tableau II.2 Caractéristiques hydrogéologiques des différentes formations (ANRH, 1983 ; Azlaoui, 2018).

Symbole	Système	Etage	Facies lithologique	Caractéristiques de l'aquifère	Epaisseur (m)
	Quaternaire		Alluvion récente et sable argileux	Nappe superficielle a porosité d'interstice exploitée par des puits et des forages peu profonds	10 à 30
		Miocène	Grès et argiles sableuses	Aquifère perméable limité, exploité par des puits au niveau du Birine	170
	Tertiaire	Eocène	Calcaire a silex	Aquifère fissuré a potentialité faible exploité par des puits	-
		Turonien	Calcaire dolomitique	Aquifère fissuré a potentialité limitée Non exploité	150
	Crétacé Supérieur	Cénomanien	Calcaire dolomitique marneux calcaire	Aquifère a perméabilité des fissures, Non exploité	200 à 280
		Crétacé Inférieur	Albien inf	Grèsbeigefriable a ciment calcaire sable et argile	Aquifère a potentialité hydraulique importante exploité par des forages
	Barrémien		Grès grossier a ciment calcaire et passées d'argiles	Aquifère perméable Non exploité, mauvaise qualité d'eau	350

II.3 Hassi Bahbah :

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.3.1 Situation géographique :

La commune de Hassi Bahbah est située au Nord des monts d'Oued Nail qui forment la chaîne de l'Atlas saharien. La commune est une zone de contact entre les hautes plaines et l'Atlas Saharien, Comprise entre les coordonnées : 3° 0' et 3° 2' Est, 35° 2' et 35° 5' Nord. Le chef-lieu de la commune est situé sur la route nationale (RN01) à 50 Km/s au Nord du chef-lieu de wilaya (Figure II.9). Elle est située dans une position centrale par rapport à l'ensemble de la wilaya et du pays, elle couvre une superficie de 773,74 km² et totalise une population de 98 827 hab. La route nationale (RN01) et le chemin de wilaya n° 166 lui permettent d'être en contact, pratiquement avec toutes les régions du pays (Sellali, 2019).

Elle est limitée :

Au sud : par Djebel Sahari ;

A l'Ouest : par le Zahrez Gharbi ;

Au Nord : par les monts Kaskas de Khaizar, et de Taicha ;

A l'Est : par Oued FaidJanal et le ChattZahrez Est.

Elle est limitée administrativement par :

Au Nord : par la commune de BouiratLahdab, et de Guernini ;

Au sud : par la commune de Ain Maabed ;

II.3.2 Géologie de Hassi bahbah :

La géologie de Hassi Bahbah, fortement influencée par les mouvements de l'Atlas Saharien, repose principalement sur des formations crétacées (Sellali, 2019). Le Turonien, bien que moins épais (150 m) que dans d'autres régions, joue un rôle clé dans l'hydrogéologie locale. Composé de calcaires massifs fossilifères et de niveaux marneux, sa fissuration lui confère une bonne capacité aquifère. Son affleurement local, notamment près de Hassi Bahbah, le rend accessible pour l'exploitation des eaux souterraines (Bouteldjaoui, 2020).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

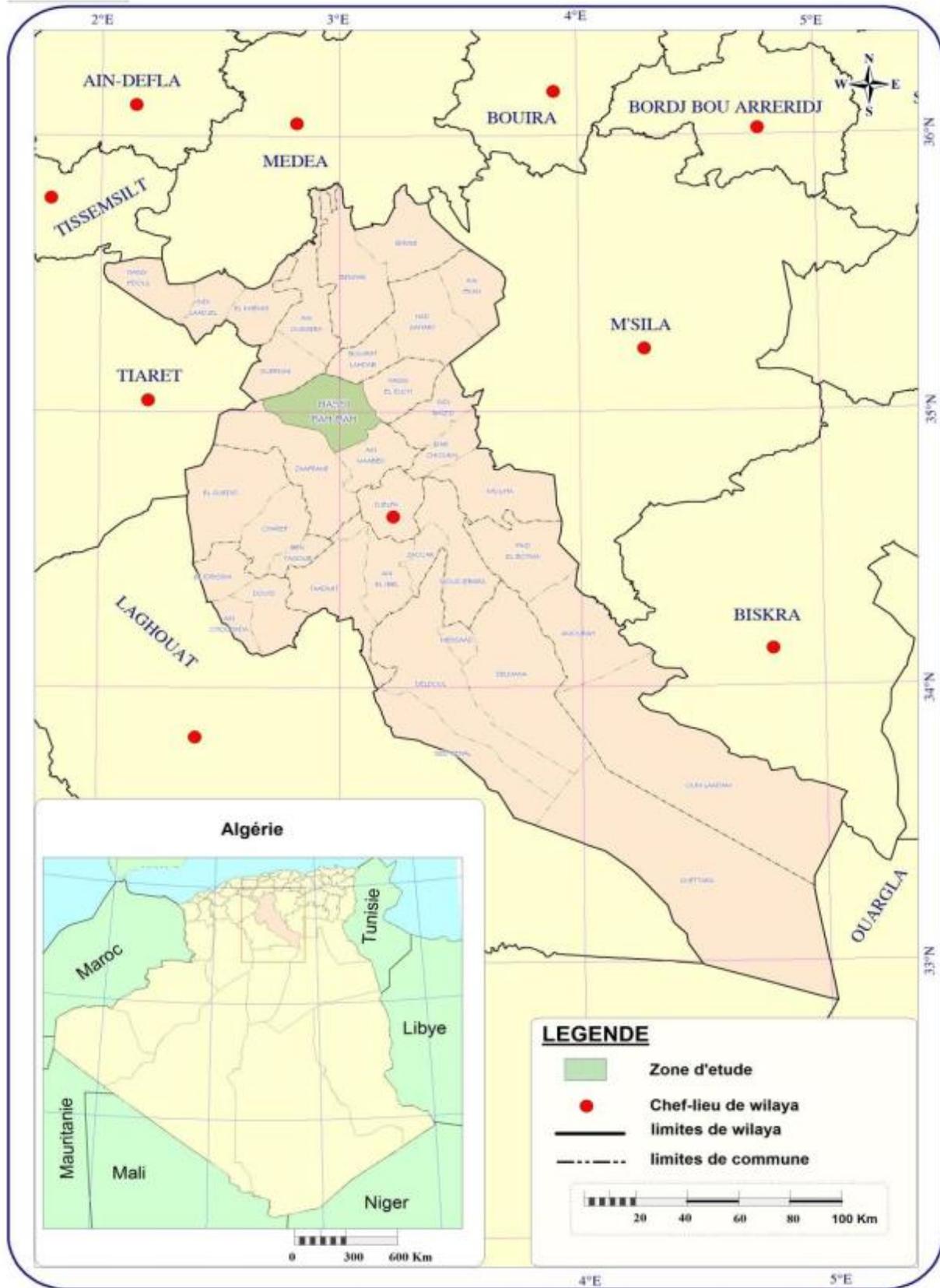


Figure II.9 Situation administrative de la commune de HassiBahbah(Sellali, 2019).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE



Figure II.10 La géologie de la commune de HassiBahbah(Sellali, 2019).

CHAPITRE II PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

II.4. Conclusion :

La présentation de la zone d'étude nous a permis de ressortir les conclusions suivantes :

La région d'AinOussera, située dans les hautes plaines semi-arides de l'Atlas Saharien, présente un paysage majoritairement plat ou légèrement ondulé, ce qui influence le drainage et l'écoulement des eaux de surface.

L'étude hydroclimatologiques de la région Ain Oussera, nous permet de constater que le climat de la zone d'étude est de type semi-aride a hiver froid , caractérisé par par des précipitations faibles et irrégulières, avec une moyenne annuelle variant entre 111 mm et 300 mm (Bendjedou, 2015). L'humidité relative connaît des variations saisonnières importantes. Les vents, notamment ceux du sud-est en été, peuvent accentuer la sécheresse.

Le réseau hydrographique, peu développé, est dominé par l'Oued Touil, sujet à des écoulements irréguliers principalement sous forme de crues. De nombreux oueds restent secs une grande partie de l'année, limitant leur contribution à la recharge des nappes souterraines.

Sur le plan hydrogéologique, les principales formations aquifères de la plaine de Ain Oussera sont représentées essentiellement par le remplissage du Quaternaire, des grès Miocènes, des Calcaires Turoniens, des gypses de Cénomaniens et des grès de Albo-Barrémien. Les potentialités du crétacé supérieur, du Miocène et du Quaternaire sont très limitées. La nappe Albienne renferme les meilleures potentialités en eau dans la région d'Ain Oussera. Elle est captée par de nombreux forages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP) de la population et aux exploitations agricoles.

La région de HassiBahbah, située au contact des hautes plaines et de l'Atlas Saharien, bénéficie d'une position centrale au sein de la wilaya de Djelfa et du pays.

Les formations du Crétacé supérieur, notamment le Turonien, constituent la base géologique de la région. Le Turonien, composé de calcaires massifs fossilifères fissurés, présente une bonne capacité aquifère. Son affleurement local facilite l'exploitation des eaux souterraines.

*CHAPITRE III. MATÉRIELS ET
MÉTHODES*

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.1. Introduction :

Le deuxième chapitre (II) est consacré à la présentation du matériel et des méthodes les différentes méthodes d'investigation utilisées pour l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre de ce travail. Dans cette étude, la caractérisation et de classification hydrogéochimiques des eaux souterraines sont basées sur l'utilisation de trois approches : (1) l'interprétation de la composition chimique des eaux, (2) les outils hydrochimiques (les diagrammes de (Piper, Schöeller-Berkaloff, Stiff et Stabler), les diagrammes binaires, et l'indice d'échange de base (I.E.B)) et (3) les méthodes d'analyse statistiques multivariées (l'analyse en composantes principales (ACP), classification ascendante hiérarchique (CAH)). La combinaison du traitement statistique qui comprend une classification ascendante hiérarchique (CAH) et l'analyse en composante principale (ACP) fait partie des plus couramment utilisées dans les études hydrogéochimiques.

L'approche de l'indice de qualité de l'eau (IQE) constitue un outil intéressant pour une évaluation qualitative des pour la consommation humaine. En d'autres termes, le WQI résume les grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en expressions simples (e.g. excellente, bonne, mauvaise, etc...) pour une compréhension facile et cohérente destinée aux décideurs et au public concernés

III.2. Campagne d'échantillonnage d'eau

Dans le cadre de cette étude, deux campagnes d'échantillonnage d'eau souterraines ont été réalisées par l'A.D.E ; la première a concerné l'ensemble de la zone d'étude (Ain Oussera et Hassi Bahbah) et a porté sur des forages destinés à l'alimentation en eau potable (AEP), en aout 2013. La deuxième campagne a été réalisée en mars 2023 (Ain Oussera) et septembre 2022 (Hassi Bahbah). Les paramètres physico-chimiques mesurés dans cette étude sont : le pH, la température (T), le total des solides dissous (TDS), la conductivité électrique (CE), et les concentrations des principaux cations et anions, à savoir le sodium (Na^+), le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{2+}), le calcium (Ca^{2+}), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^{2-}), les chlorures (Cl), l'ammonium (NH_4^+), les nitrates (NO_3^-), les nitrites (NO_2^-).

Les appareils utilisé pour la réalisation des analyses physicochimiques selon les méthodes d'analyse chimique recommandé par Rodier et al (2009) et sont récapitulés dans le tableau suivant (Tableau. III.1)

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tableau. III. 1 : Méthodes de mesure et d'analyse des paramètres physico-chimiques des eaux (Voir annexe B pour les protocoles d'analyse physicochimiques).

Paramètres	Méthode	Référence d'Appareil	Photos
pH	pH-mètre	Adwa ad1000	
Conductivité électrique	Conductimètre	Hanna Edge	
Turbidité	Turbidimètre	Hach TL2300	
Calcium Magnésium Chlorure	Volumétrie au laboratoire de L'A.D.E	/	
Nitrate Nitrite Phosphore Sulfate Ammonium	Spectrophotomètre au laboratoire de L'A.D.E	Hach Odyssey DR2500	
Sodium Potassium	Spectrophotomètre d'émission de flamme laboratoire de L'A.D.E	Jenway PFP7	

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.3. La balance ionique

La vérification de l'erreur analytique de la concentration des ions analysés a été faite par l'électro neutralité (erreur de balance) selon l'équation suivante (Formule III.1), où toutes concentrations sont exprimées en méq/l (Hadeff, 2023) :

$$B. I = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

Pour une bonne mesure, l'erreur de bilan de charge doit être inférieure à $\pm 5\%$. Une erreur de bilan de charge (BI) allant jusqu'à $\pm 10\%$ est acceptable (Hem 1985 ; Hounslow 1995 ; Katz et Collins 1998 ; Kermanshahi et al., 2010 ; Kloppmann et al., 2011 ; Kaka et al. 2011 ; Abreha 2014 ; Al-Shujairi 2016).

III.4. Méthodologie de traitements de données

III.4.1. Représentations graphiques des analyses hydrochimiques

De nombreuses représentations graphiques, telles que Piper (1944), Stiff (1951), Schoëller (1956), Stabler, Wilcox (1955) et Richards (1954) ont été utilisées pour simplifier et faciliter l'interprétation des données analytiques des eaux, pour déterminer leur origine ainsi que pour évaluer leur aptitude aux différents usages :

III.4.1.1. Diagramme de Piper

Le diagramme se compose d'un losange central et de deux triangles, l'un pour les cations (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , et Mg^{2+}), et l'autre pour les anions (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , et SO_4^{2-}) (Figure III.1) (Yebdri, 2023). Les points ont d'abord été tracés dans les diagrammes triangulaires de cations et d'anions, puis projetés sur le losange en localisant l'intersection de deux lignes parallèles aux côtés extérieurs du diagramme (Bourjila, 2023). C'est là que les faciès hydrochimiques ont été définis (Bourjila, 2023). Cette représentation permet de mettre en évidence les évolutions chimiques ainsi que les différentes minéralisations dans un système aquifère (Appelo et Postma, 2005). Le traitement et l'élaboration du diagramme de Piper s'est effectué à l'aide du logiciel DIAGRAMME d'Hydrochimie (Simler, 2009).

III.4.1.2. Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller (Schoeller, 1956) est un diagramme semi-logarithmique des concentrations des principaux constituants ioniques dans l'eau (SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ / K^+) (Amor et Ben Messaoud, 2022). Les concentrations de chaque ion dans chaque échantillon sont représentées par des points sur sept lignes équidistantes et les points sont reliés par une ligne (Zereg, 2019). Cette représentation permet aussi la détermination du faciès chimique d'une eau (Schöeller, 1956, Appelo et Postama, 1996).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

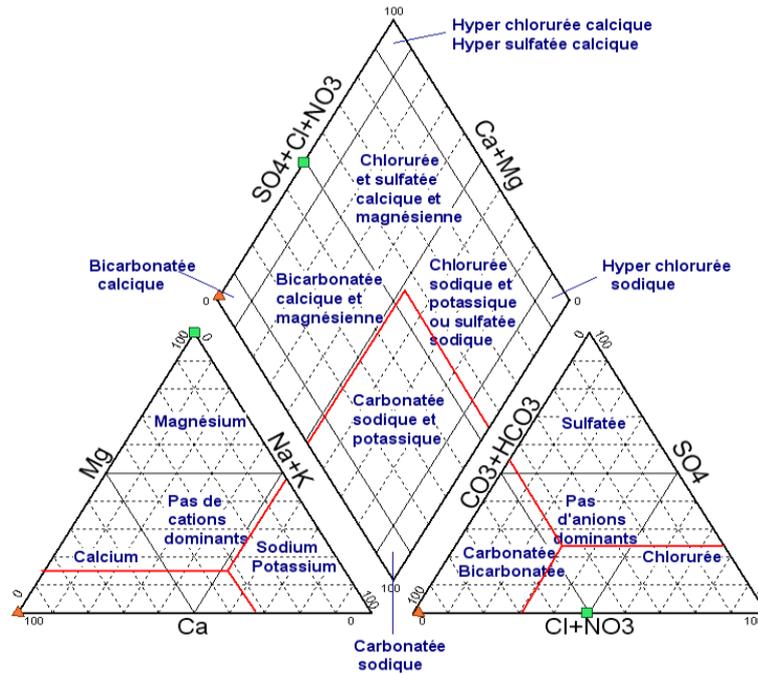


Figure III.1 : le diagramme de piper (Korchi et Magri, 2016)

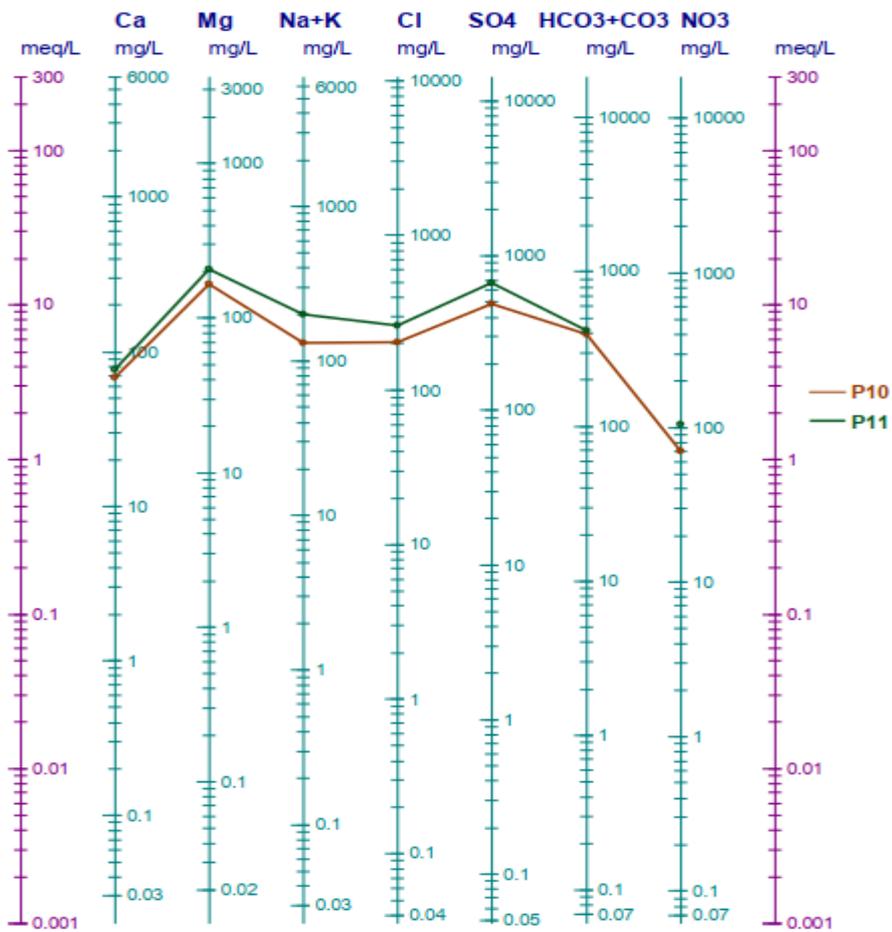


Figure III.2 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff (Zereg, 2019).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.4.1.3. Diagramme de Stiff

Stiff (1951) a créé un diagramme pour distinguer les types d'eaux souterraines en utilisant un polygone. Les ions majeurs sont affichés sous forme de trois axes horizontaux en meq/l, avec les cations tracés à gauche et les anions tracés à droite. Les paires cation-anion sont présentées de haut en bas du diagramme comme suit : Na-Cl, Ca-HCO₃, et Mg-SO₄ (Bourjila, 2023; Belkacem et Mendi, 2020). Ainsi la distinction du faciès de l'eau se base sur la forme du polygone (Hassane Saley, 2018) qui donne une idée sur les espèces dominantes et la parenté chimique (Bouteldjaoui, 2020).

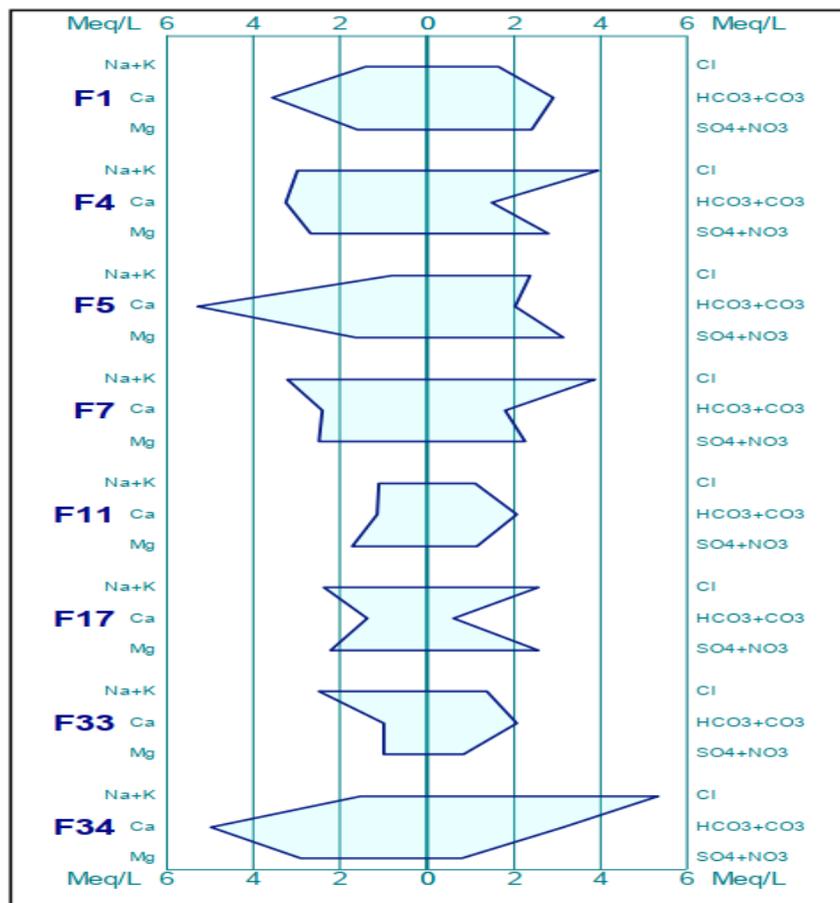


Figure III.3 : Diagramme de Stiff (Bouteldjaoui, 2020).

III.4.1.4. Classification de Stabler

Cette classification est basée sur la comparaison des quantités en réactions des cations et des anions exprimées en pourcentage (%) par rapport à la concentration totale des éléments majeurs, en utilisant d'une part la formule caractéristique de Stabler (III.2) et de classer séparément les anions et les cations par ordre décroissant pour déterminer les faciès chimiques et d'autre part la représentation des éléments majeurs en utilisant le logiciel DIAGRAMMES (Figure III.4) (Simler 2009 ; Touhari, 2015).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

$$r\% = (r/c) * 100 \quad \text{(III.2)}$$

r : quantité en réaction de l'ion considéré en méq/l ;

c : concentration totale en méq/l.

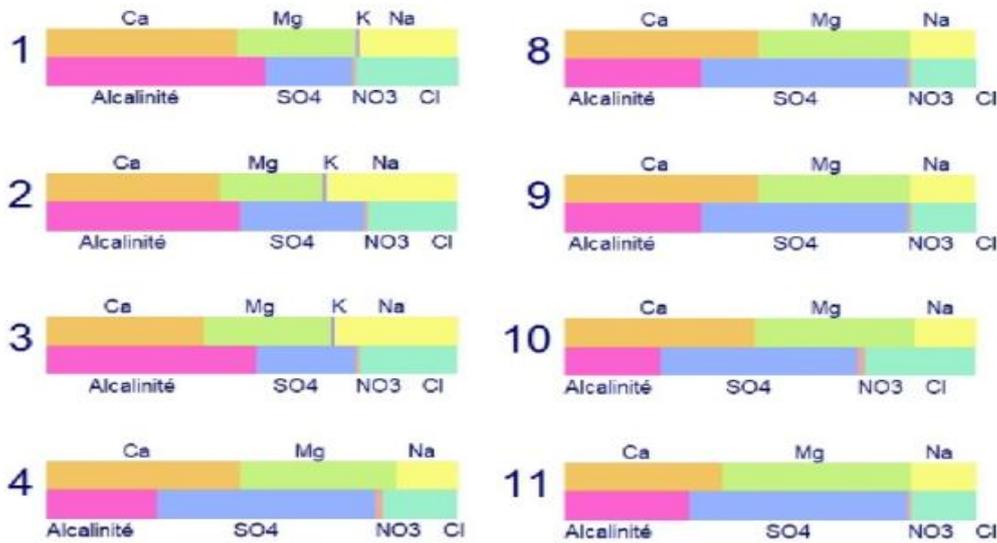


Figure III.4 : Diagramme de Sabler (Belkacem et Mendi, 2020).

III.4.1.5. Diagrammes binaires

Les diagrammes binaires sont des représentations graphiques des différents paramètres chimiques souvent utilisés en hydrogéologie. L'interprétation de ces diagrammes est basée sur la présence ou l'absence de corrélation avec les éléments chimiques considérés afin d'identifier les processus géochimiques responsables de leur origine (Nouradine, 2023).

III.4.1.6. Diagramme de Richards

Le diagramme de salinité (Richards, 1954) est une classification qui est basée sur deux paramètres : le rapport de sodium absorbé (SAR) (équation III.3) et la conductivité électrique (CE en $\mu\text{S}/\text{cm}$) (Figure III.5) pour évaluer l'aptitude de cette eau à l'irrigation. Il met en évidence cinq classes de qualité d'eau : excellente, bonne, acceptable, médiocre et mauvaise (Tableau III.2) (Richards, 1954 ; Hadeff, 2023).

$$\text{S. A. R} = \frac{Na^+}{\sqrt{Ca^{2+} + Mg^{2+}}/2} \quad \text{(III.3)} \quad (\text{Gapone, 1933 ; Durand, 1982})$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l.

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tableau. III.2 : Classification de l'eau par degré d'aptitude à l'irrigation en utilisant la méthode SAR (Richards, 1954 ; Hadeff, 2023)

Degré	Qualité	Classes	Etat d'utilisation
1	Excellente	C1-S1	L'eau peut être utilisée en toute sécurité pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	L'eau peut être utilisée sans contrôle spécial pour l'irrigation de plantes modérément tolérantes au sel sur des sols bien perméables.
3	Admissible	C3-S1 C3-S2 C2-S3	L'eau convient à l'irrigation de cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés. Cependant, il est nécessaire de surveiller les changements de salinité.
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	L'eau est fortement minéralisée, elle peut convenir à l'irrigation de certaines espèces tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant pas à l'irrigation mais pouvant être utilisée dans certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes très tolérantes au sel.

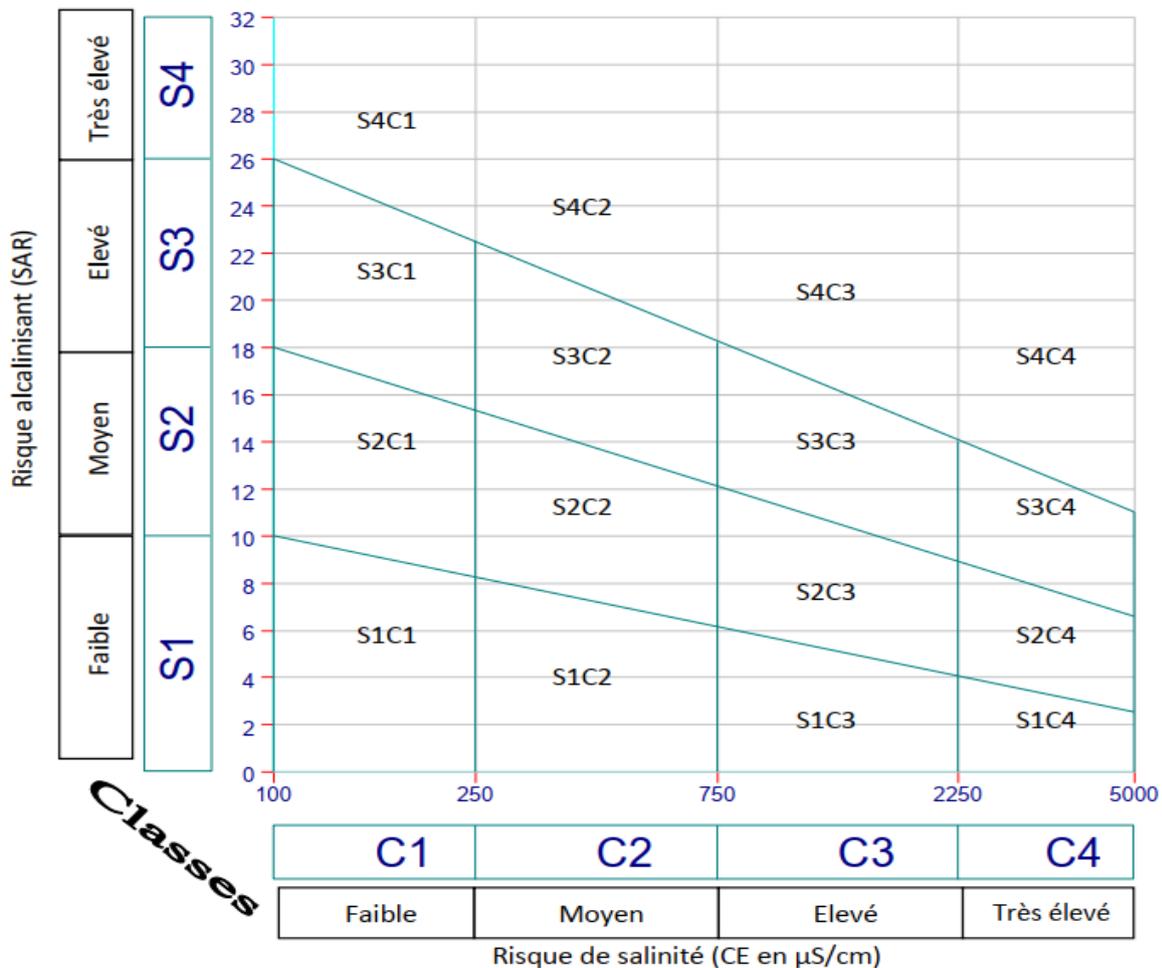


Figure III.5 : Diagramme de Richards (Zereg, 2019).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.4.1.7. Diagramme de Wilcox

Le diagramme de Wilcox (1955), permet également de faire une classification des eaux en fonction de leur aptitude à l'irrigation (Kerai, 2017). Il prend en compte le pourcentage en sodium (%Na) (équation III.4) et la conductivité électrique (CE) (Korchi et Magri, 2016 ; Hassane Saley, 2018).

$$\%Na^+ = \frac{Na^+ + K^+}{Na^+ + K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+}} \times 100 \quad \text{(III.4) (Wilcox, 1955)}.$$

Tous les ions sont exprimés en méq/l.

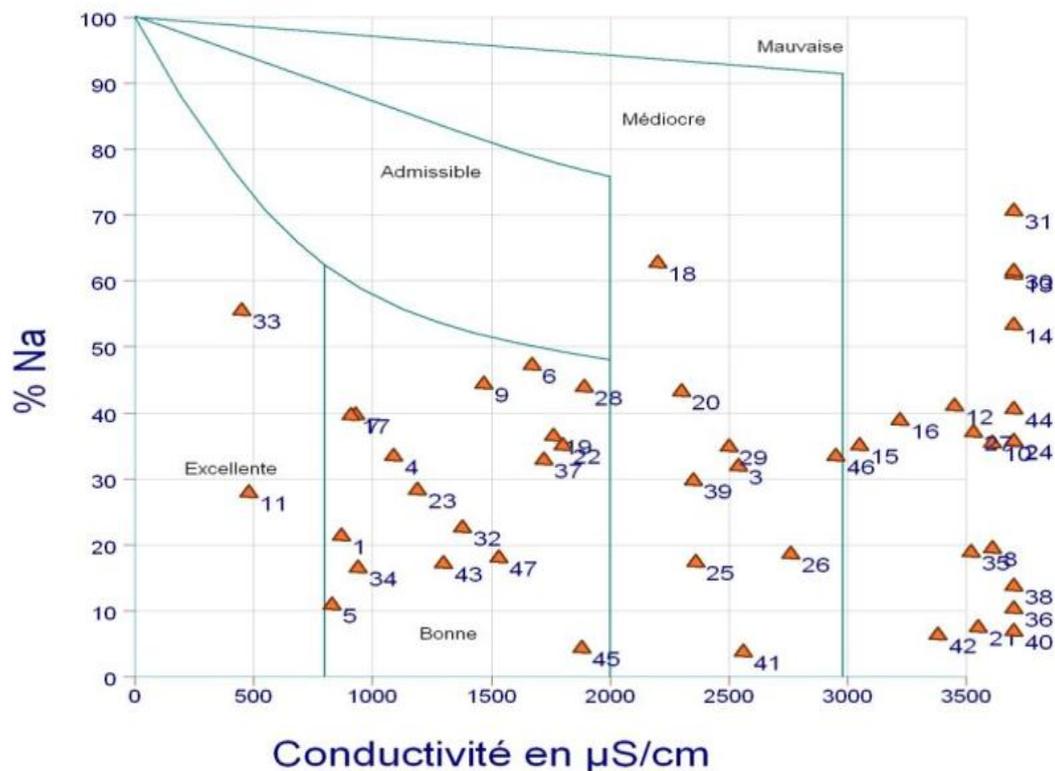


Figure III.6 : Diagramme de Wilcox (Bouteldjaoui, 2020).

III.5. Méthodes d'analyse statistique

III.5.1. Analyse en composantes principales « ACP »

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode statistique essentiellement descriptive, son objectif est de présenter sous forme graphique, le maximum de l'information contenue dans un tableau de données (Yidana et al. 2008 ; Ben alaya, 2014). La première étape consiste à calculer les coefficients de corrélation entre les variables. Par la suite, les axes de projection sont assimilés aux vecteurs propres de la matrice de corrélation (Yidana et al. 2008 ; Ben alaya, 2014).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les données utilisées pour l'analyse en composantes principales sont centrées et réduites, c'est-à-dire que chaque variable a une moyenne nulle et une variance égale à 1 (Najib, 2014 ; Amor et Ben Messaoud, 2022).

III.5.2. Classification hiérarchique Ascendante « CHA »

L'analyse hiérarchique ascendante (CHA) est une technique de classification hiérarchique des données qui est largement appliquée dans les sciences de la Terre (Davis, 1986), et qui est souvent utilisée dans la classification des données hydrogéochimiques (Steinhorst et Williams, 1985 ; Schot et Van Der Wal, 1992 ; Ribeiro et Macedo, 1995 ; Güler et al, 2002 ; Hachaichi, 2016).

L'objectif de cette méthode est de définir un critère d'agrégation des classes, qui peut être défini par la mesure du degré de ressemblances existant entre les échantillons (El Yaouti et al, 2008 ; Ben Alaya et al, 2014). Il s'agit d'une distance géométrique dans un espace multidimensionnel (Gutierrez, 2003 ; Amor et Ben Messaoud, 2022). Elle se calcule ainsi :

$$\text{distance}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = [\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2]^{1/2} \quad \text{(III.5)}$$

Le résultat est donné sous forme d'un dendrogramme horizontal ou vertical qui classe les observations ou variables par groupes ou sous-groupes ayant le même poids ou les mêmes caractéristiques (Soro et al, 2019). Le nombre de classes obtenus dépend du niveau de la coupure de l'arbre choisie « phenon line » (Ben Alaya et al, 2014). Les critères d'agrégation, après le calcul des distances, sont utilisés pour la détermination des classes d'échantillons (Templ et al. 2008, Yidana et al. 2008). Cette ressemblance se fait suivant le critère de (Ward, 1963), qui donne de meilleurs résultats que d'autres méthodes (Ben Alaya et al, 2014).

III.5.3. Standardisation des données

Les deux méthodes d'analyse statistiques multi variées utilisées dans ce travail nécessitent une standardisation des données, afin d'inclure, dans une même classification, des variables internes mesurées à l'aide d'échelles non comparables (Venugopal et al, 2008). De ce fait peu importe l'unité de chaque variable mesurée, chacune aura un poids équivalent dans la classification. La valeur standardisée est notée Z_{ij} (III.6) (Medina et Herrera 2003 ; Ben Alaya, 2014) :

$$Z_{ij} = (X_{ij} - X_m) / \sigma_i \quad \text{(III.6)}$$

Où X_{ij} est la valeur réelle de la variable, X_m est la valeur moyenne de la variable réelle et σ_i est son écart-type.

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.6. L'indice de qualité de l'eau (IQE)

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une méthode simple utilisée dans le cadre de l'analyse de la qualité générale de l'eau. Il s'agit de réduire une grande quantité d'informations en un seul chiffre, généralement sans dimension, de manière simple et reproductible. Le IQE est établi à partir d'un groupe de paramètres clés, ce qui permet de passer d'un ensemble de données volumineuses à une valeur unique et facile à comprendre (Zhang, 2019 ; Ni Made et Ni Wayan, 2019 ; Randriamahefa et al,2020 ; Sourogou et al, 2021).

L'indice de qualité de l'eau (IQE) a été proposé initialement par Horton comme une nouvelle méthode d'évaluation de la qualité de l'eau (Zhang, 2019). Ensuite, en 1970, Brown et al ont développé un indice de qualité de l'eau (IQE) plus général (Trikey et al,2015).

III.6.1. Objectif de l'indice de qualité de l'eau (IQE) (Abbasi et Abbasi, 2012)

- Allocation des ressources : Les indices peuvent guider les gestionnaires dans l'attribution des fonds et la définition des priorités en matière de gestion de l'eau.
- Classement des allocations : Les indices permettent de comparer la qualité de l'eau entre différentes régions ou zones géographiques.
- Application des normes : Les indices aident à évaluer si les normes légales et les critères en place sont respectés ou dépassés dans des zones spécifiques.
- Analyse des tendances : Les indices peuvent montrer l'évolution de la qualité de l'eau au fil du temps, indiquant des améliorations ou des dégradations.
- Information du public : Les indices offrent une mesure simple et compréhensible de la qualité de l'eau, permettant d'informer le public sur l'état des différentes sources d'eau.
- Recherche scientifique : Les indices sont utiles pour résumer une grande quantité de données en un seul score, facilitant ainsi l'évaluation de l'efficacité des mesures de restauration écologique, des stratégies de traitement de l'eau, ou l'impact des activités humaines sur la qualité de l'eau.

III.6.2. Les indices de la qualité de l'eau

III.6.2.1. L'indice de la qualité de l'eau (méthode de pondération) :

Cette méthode a été initialement proposée par Horton (1965) et Brown et al (1970). Dans cette approche, Une valeur numérique appelée poids (Wight), comprise entre 2 et 5, est attribuée à chaque paramètre, reflétant son degré d'influence sur la qualité de l'eau (Varol et Davraz, 2015) Un poids (w_i) est affecté à un paramètre en tenant compte de son importance relative dans l'évaluation de la qualité totale d'une eau. Dans l'exemple du

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Tableau 1, le poids maximal de 5 a été assigné aux nitrates en raison de leur importance majeure dans l'évaluation de la qualité de l'eau (Ramakrishnalal et al., 2009 ; Zmaiche et al, 2019 ; Aissaoui et Fara, 2023).

Tableau. III.3 : Pondération des paramètres de qualité (Aissaoui et Fara, 2023).

Paramètres chimiques	Poids (w_i)	Poids relatif (W_i)	Normes OMS
pH	4	0,083	6,5 – 9
CE	4	0,083	200-1100
Turbidité	2	0,041	1
Nitrates (NO_3^-)	5	0,104	50
Chlorure (Cl^-)	3	0,062	250
Sulfates (SO_4^{2-})	4	0,083	250
Calcium (Ca^{2+})	2	0,041	75
Magnésium (Mg^{2+})	2	0,041	30
Sodium (Na^+)	2	0,041	200

Calcul du poids relatif (W_i) :

Le calcul du poids relatif (W_i) de chaque paramètre est effectué en suivant l'équation suivante

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{III.7})$$

W_i est le poids relatif, w_i est le poids de chaque paramètre et n est le nombre des paramètres.

Calcul de l'échelle d'évaluation de la qualité q_i :

L'échelle d'évaluation de la qualité (q_i) de chaque paramètre est calculée par division de la concentration de chaque paramètre par la norme respective de l'OMS et multiplier par 100.

$$q_i = (C_i/S_i) \times 100 \quad (\text{III.8})$$

q_i : échelle d'évaluation de la qualité.

C_i : la concentration de chaque paramètre en mg/l.

S_i : la norme de l'OMS de chaque paramètre en mg/l.

Calcul de l'indice global de la qualité de l'eau (IQE) pondérée

La détermination de l'indice de qualité de l'eau pondérée est effectuée à partir des équations suivantes :

$$SI_i = w_i \times q_i \quad (\text{III.9})$$

$$IQE = \sum SI_i \quad (\text{III.10})$$

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Évaluation de la qualité de l'eau selon l'indice (IQE) pondéré :

Le tableau suivant présente les classes de qualité de l'eau définies par l'indice de Horton en fonction de la valeur finale de l'indice de qualité de l'eau (IQE).

Tableau. III.4 : Evaluation de la qualité de l'eau (l'indice de Horton) (Benaissa et al,2022)

Indice de Qualité de l'Eau (IQE)	Classe de Qualité
<50	Excellente qualité
50-100	Bonne qualité
100-200	Qualité médiocre
200-300	Qualité mauvaise
>300	Impropre à la Consommation

III.6.2.2. Indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée (Brown et al, 1972)

La méthode de l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée classe la qualité de l'eau en fonction du degré de pureté en utilisant des variables de qualité de l'eau les plus couramment mesurés (Awachat et Salkar,2017 ; Aissaoui et Fara, 2022)

Calcul du poids relatif (W_i) :

Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (W_i), spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée selon la formule suivante :

$$W_i = \frac{K}{S_i} \quad \text{(III.11)}$$

Où :

K : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de l'équation suivante

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n 1/S_i} \quad \text{(III.12)}$$

n : nombre de paramètres

S_i : valeur maximale de la norme standard de chaque paramètre en mg/l sauf pour le pH, la T°C et la conductivité électrique.

Calcul de l'échelle d'évaluation de la qualité Q_i :

L'échelle d'évaluation de la qualité Q_i est utilisée pour évaluer la qualité de l'eau ou d'autres environnements naturels en fonction de plusieurs paramètres de qualité. Est calculée par la formule suivante :

$$Q_i = (C_i / S_i) \times 100 \quad \text{(III.13)}$$

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

C_i : la concentration de chaque paramètre.

S_i : la norme de référence.

Calcul de l'indice global de la qualité de l'eau (IQE) arithmétiques pondérée : La dernière étape consiste à calculer l'indice global de la qualité de l'eau à l'aide de l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad \text{(III.14)}$$

Evaluation de la qualité de l'eau selon l'indice (IQE) arithmétiques pondérée :

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau IQE (Tableau III.5).

Tableau. III.5 : Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE (Brown et al., 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Talhaoui et al, 2020 ; Benferdia et Korichi, 2020)

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0 - 25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
> 25 - 50	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
>50 - 75	Très mauvaise qualité	Irrigation et industrie
>75 - 100	Très mauvaise qualité	Irrigation
>100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

III.6.2.3. L'indice de qualité de l'eau du Conseil Canadien des ministres de l'environnement (CCMEIQE) :

L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE-CCME), développé par le Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement, a été inspiré par l'indice créé en 1997 par le Ministère de l'Environnement, des Terres et des Parcs de la Colombie-Britannique (Trikey et al, 2015). Conçu pour être utilisé par diverses agences à travers le monde, cet indice offre un modèle flexible, capable de s'adapter aux conditions spécifiques des sites et aux traitements requis pour évaluer la qualité de l'eau potable (Restrepo et al, 2022 ; Benaissa et al, 2022). Il permet une personnalisation en attribuant des valeurs à différentes combinaisons de paramètres spécifiques (Chidiac et al, 2023 ; Benrahou, 2023).

Concept de l'IQE du CCME :

L'IQE combine trois mesures de variance (L'étendue F1, La fréquence F2 et l'amplitude F3) pour produire un chiffre unique sans unité qui reflète la qualité globale de l'eau à un site donné par rapport aux critères choisis (CCME, 2005). Le score final, compris entre 0 et 100, indique qu'un score de 100 signifie que toutes les variables respectaient ou dépassaient les

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

critères définis pendant toute la période de surveillance (Awachat et Salkar, 2017 ; Al Yousif et Chabuk, 2023).

Avantages et inconvénients de l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée

Les avantages et les inconvénients de l'indice de qualité de l'eau sont consignés dans le Tableau. III.6.

Tableau. III.6 : Avantages et inconvénients de l'indice de qualité de l'eau arithmétique pondérée (Lakhrif et Hedidi, 2020)

Avantages	Inconvénients
<p>Intégration des Données Physico-Chimiques : Il incorpore les valeurs de divers paramètres physico-chimiques de la qualité de l'eau dans une formule mathématique, reflétant ainsi l'état écologique de l'eau.</p>	<p>Informations Insuffisantes sur la Qualité Globale : Cet indice peut ne pas fournir une image complète de la situation réelle de la qualité de l'eau.</p>
<p>Importance des Paramètres Individuels : Il met en évidence l'importance relative de chaque paramètre dans l'évaluation et la gestion de la qualité de l'eau.</p>	<p>Omission de Certains Paramètres : Il ne tient pas compte de tous les paramètres nécessaires pour décrire pleinement la qualité de l'eau.</p>
<p>Évaluation de la Potabilité : Il peut servir à évaluer si les sources d'eau de surface et souterraines sont adaptées à la consommation humaine.</p>	<p>Effets de la Pollution Non Exhaustifs : Il ne quantifie que les effets directs de la pollution sur une masse d'eau, laissant de côté certains impacts indirects.</p>

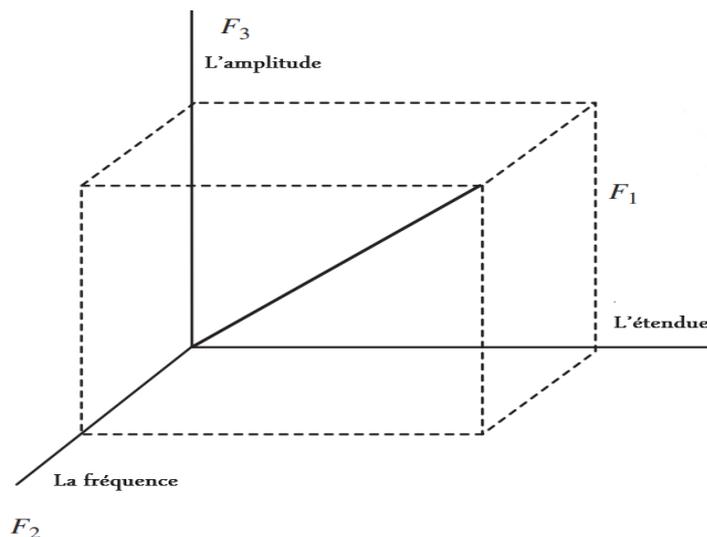


Figure III.7 Représentation graphique de l'indice de qualité de l'eau (IQE_{CCME}) dans un espace tridimensionnel (Abbasi et Abbasi, 2012).

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Calcul de l'IQE du CCME :

L'étendue F1 :

C'est le pourcentage de paramètres qui affichent au moins un dépassement de critères de qualité.

$$F1 = \left(\frac{\text{nombre de paramètres non conformes}}{\text{nombre total de paramètres}} \right) \times 100 \quad (\text{III.15})$$

La fréquence F2 :

C'est le pourcentage de résultats analytiques, tous paramètres confondus, dépassent les critères.

$$F2 = \left(\frac{\text{nombre de résultats non conformes}}{\text{nombre total de résultats}} \right) \times 100 \quad (\text{III.16})$$

L'amplitude F3 :

C'est l'écart entre les résultats analytique non conforme et les critères de qualité, F3 est calculé en trois étapes :

$$\text{Coefficient de l'écart} = \left(\frac{\text{valeur du résultat non conforme}}{\text{critère}} \right) - 1 \quad (\text{III.17})$$

$$\text{sncé} = \left(\frac{\sum_{i=1}^n \text{Coefficient de l'écart}}{\text{nombre total de résultats}} \right) \quad (\text{III.18})$$

$$F3 = \left(\frac{\text{sncé}}{0,01 \text{ sncé} + 0,01} \right) \quad (\text{III.19})$$

Calcul de l'indice global de la qualité de l'eau CCME :

Les trois mesures (F1, F2, F3) sont combinées dans la formule finale de l'IQE du CCME :

$$\text{IQE}_{\text{CCME}} = 100 - \left(\frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732} \right) \quad (\text{III.20})$$

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

Classification des eaux basées sur les valeurs IQE_{CCME} :

Tableau. III.7 : Classification et usage possible de l'eau selon l'IQE_{CCME} (CCME, 2005)

Classe de IQE	Type d'eau	Description
95 à 100	Excellente	La qualité de l'eau est préservée, pratiquement aucune menace ni détérioration n'étant décelée.
80 à 94	Bonne	La qualité de l'eau est préservée, seule une menace ou une détérioration mineure étant observée
65 à 79	Satisfaisante	La qualité de l'eau est ordinairement préservée, mais elle est occasionnellement menacée ou détériorée
45 à 64	Douteuse	La qualité de l'eau est fréquemment menacée ou détériorée
0 à 44	Mauvaise	La qualité de l'eau est presque toujours menacée ou détériorée

II.6.2.4. L'indice de qualité de l'eau National Sanitation Foundation (NSFWQI)

L'Indice de Qualité de l'Eau (WQI) développé par la National Sanitation Foundation (NSF) des États-Unis, souvent appelé NSFWQI, a été introduit par Brown en 1965 en tant que version améliorée du modèle Horton (Uddin et al, 2021 ; Benaissa et al, 2022 ; Chidiac et al, 2023). Cet indice utilise une sélection rigoureuse de neuf paramètres de qualité de l'eau, incluant la température, le pH, la turbidité, les coliformes fécaux...etc (Abbasi et Abbasi, 2012). La méthode de sélection des paramètres repose sur la technique Delphi, garantissant une évaluation exhaustive et précise (Restrepo et al, 2022).

NSFWQI été calculé à partir d'une courbe de pondération, fournit une échelle de 0 à 100, classant la qualité de l'eau de "Très Mauvaise" à "Excellente" (Tyagi et al, 2013).

Tableau. III. 8 : Classification de l'eau selon l'IQE_{NSF} (Al Yousif et Chabuk, 2023)

Classe de IQE	Type d'eau
90 à 100	Excellente
70 à 90	Bonne
50 à 70	Satisfaisante
25 à 50	Mauvais
0 à 25	Très mauvais

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

III.6.2.5. L'indice de qualité de l'eau de l'Oregon (OWQI) :

L'OWQI a été développé dans les années 1970 par le Département de la Qualité de l'Environnement de l'Oregon, aux États-Unis. Son objectif était de résumer et d'évaluer l'état et les tendances de la qualité de l'eau, conformément aux rapports d'évaluation de la qualité de l'eau exigés par la loi. Inspiré par l'indice de qualité de l'eau de la National Sanitation Foundation (Brown et al., 1970 ; Brown et al., 1973), La différence réside dans la méthode de calcul et dans le poids des paramètres qui n'est même pas pris en compte dans ce cas (Lakhrif et Hedidi, 2020), il a employé la technique Delphi pour sélectionner les variables de qualité de l'eau (Abbasi et Abbasi, 2012). L'OWQI initial a été abandonné en 1983 à cause des ressources énormes requises pour son calcul et la présentation des résultats (Trikey et al,2015). Les progrès en matière de logiciels et de matériel informatique, ainsi que le besoin d'une information accessible sur la qualité de l'eau, ont relancé l'intérêt pour cet indice (Chidiac et al, 2023). L'expression mathématique de cette méthode utilise le concept de moyenne arithmétique et elle est donnée par la formule suivante :

$$IQE_{\text{oregon}} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{S_i^2}}} \quad (\text{III.21})$$

Où :

n : nombre de sous-indices.

Si : sous-indice de ce paramètre.

Tableau III.9 : Classification de l'eau selon l'IQE_{oregon} (Benrahou, 2023).

Valeur de l'IQE	Évaluation de la qualité de l'eau
90 - 100	Excellent
85 - 89	Bon
80 - 84	Passable
60 - 79	Médiocre
10 - 59	Très mauvais

III.6.2.6 L'indice de qualité de l'eau Dinius (DWQI) :

Développé par Dinius en 1972, représentait une avancée significative dans l'évaluation environnementale. Il visait à fournir un cadre pour mesurer la qualité de l'eau en intégrant différents paramètres environnementaux (Guechi et Leulmi,2015). L'indice de qualité de l'eau

CHAPITRE III. MATÉRIELS ET MÉTHODES

de Dinius est un modèle multiplicatif qui intègre divers paramètres essentiels pour l'évaluation de la qualité de l'eau (Chidiac et al, 2023). Dinius a largement utilisé la technique Delphi pour la prise de décision. L'indice comprend 12 paramètres tels que l'oxygène dissous, coliformes, E. coli, le pH et l'alcalinité (Abbasi et Abbasi, 2012). Chaque paramètre a été pondéré en fonction de son importance évaluée par les membres du panel Delphi. Les fonctions de sous-indices correspondant à chaque paramètre ont été combinées à l'aide d'une méthode d'agrégation multiplicative, reflétant ainsi leur contribution collective à l'évaluation globale de la qualité de l'eau (Trikey et al,2015).

$$\mathbf{IQE}_{\text{Dinius}} = \sum_{i=1}^n l_i \quad (\text{III.22})$$

Où :

l_i : Sous-indice de paramètre i. W_i : poids relatifs.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté le matériel des analyses physico-chimiques, ainsi que l'ensemble des méthodes utilisées pour le traitement des données hydrochimiques.

Les outils hydrogéochimiques (Piper, Schoeller-Berkaloff, Stiff, Stabler) permettent d'identifier les facies hydrogéochimiques des eaux.

Les techniques d'analyse statistique comme l'ACP, la CAH permettent de regrouper les échantillons en fonction de leurs caractéristiques chimiques pour en faciliter l'interprétation des données hydrochimiques, afin de comprendre les principaux facteurs naturels et anthropiques qui contrôlent la minéralisation des eaux souterraines.

L'indice de la qualité de l'eau (IQE) est une des techniques les plus efficaces permettant d'évaluer la qualité des eaux sur la base de l'influence de plusieurs paramètres physico-chimiques.

L'indice de la qualité de l'eau (IQE) est une des techniques les plus efficaces permettant d'évaluer l'aptitude d'une eau à la consommation humaine sur la base de l'influence de plusieurs paramètres physico-chimiques.

L'utilisation des approches hydrochimiques combinées aux méthodes statistiques constituent les principaux outils pour atteindre les objectifs de ce travail.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.1 Introduction

L'étude de la chimie des eaux est une méthode de prospection hydrogéologique qui permet la caractérisation des aquifères (Aboubakar, 2012). En effet, la composition chimique des eaux souterraines dépend en grande partie du type de roche encaissante, des évolutions hydrodynamiques des écoulements, de la profondeur des écoulements (température) et de la zone climatique (Dakoure, 2003). Dans un système aquifère, ces processus aident à clarifier les contributions de l'interaction roche-eau ainsi que les influences anthropiques sur les eaux souterraines (Allia, 2018).

En effet, l'activité anthropique a une influence non négligeable sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines (Touhari, 2015). Son origine peut être double :

- L'activité agricole : avec des apports de K^+ , Ca^{2+} , NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ et PO_4^{3-}
- Les rejets des eaux usées : avec un apport de Na^+ , K^+ , NO_3^- , Cl^- et quelques métaux lourds.

L'objectif de l'étude hydrochimique consiste à :

- Étude des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines, afin d'établir l'état actuel de la chimie des eaux et son évolution en fonction de la variation des paramètres physicochimiques de l'eau;
- déterminer les faciès chimiques, l'origine et les processus de la minéralisation des eaux, l'état de saturation des eaux vis-à-vis les minéraux carbonatés et évaporitiques;
- Évaluation de la qualité des eaux destinée à différents usages (eau potable, irrigation).

Ensuite, l'étude hydrochimique sera complétée par l'apport de l'approche statistique qui aide les méthodes hydrochimiques classiques (diagrammes de Piper (1944), de Stiff (1951) et Schoeller-Berkaloff (1962), diagrammes binaires et l'indice de saturation) à l'interprétation des données hydrochimiques. Dans cette étude, à la fois l'analyse en composantes principales (ACP) et l'analyse hiérarchique ascendante (HCA) ont été réalisées afin de mieux contraindre l'interprétation des données (Ben Alaya et al., 2014; Güler et al., 2002; Cloutier et al. 2008).

Enfin, l'indice de qualité de l'eau (IQE) est calculé pour évaluer l'aptitude de l'eau à la consommation humaine (Ramakrishnaiah et al., 2009). Il s'agit d'un outil mathématique permettant de fournir un modèle complet de la qualité des eaux en un seul nombre en utilisant les normes de la potabilité de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et Algérienne (Ramakrishnaiah et al., 2009; Abbasi et al., 2012).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.2 Résultats des analyses physico-chimiques des eaux

IV.2.1 La nappe de l'Albien d'Ain Oussera

IV.2.1.1 Caractéristiques organoleptiques des eaux

La turbidité

La turbidité n'a été mesurée qu'en 2023. Les eaux analysées présentent une turbidité qui varie de 0,44 à 3,63 NTU avec une moyenne de 1,08 NTU (Figure IV.1), ce qui est inférieur à la limite fixée par la norme algérienne (5 NTU) ainsi que par la norme de l'OMS (5 NTU). Les valeurs les plus élevées de la turbidité sont mesurées au niveau des forages F1 et F14

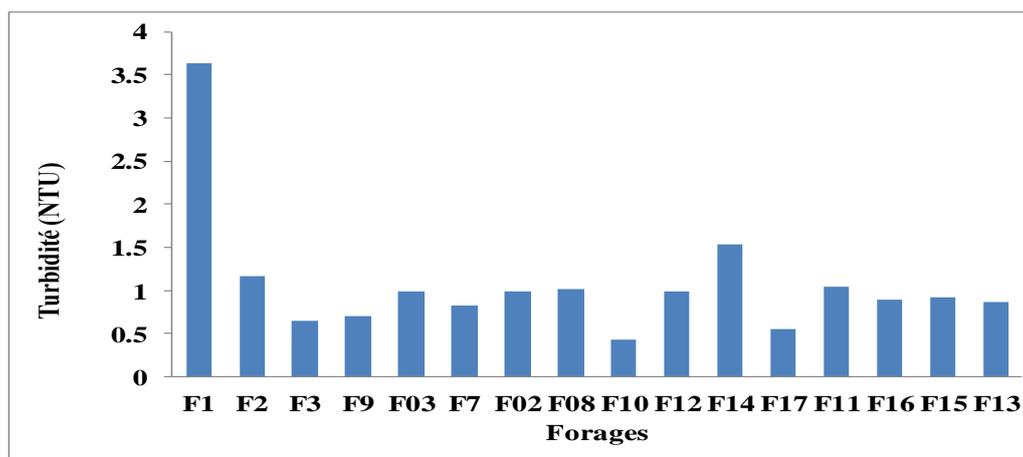


Figure IV.1: Variation de la turbidité des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Tableau IV.1 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Ain Oussera, 2013)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type	Coef de variation (%)	Norme Algérienne	Norme OMS
pH	7.58	7.89	7.72	0.10	1.29	9	9.5
T (°C)	5.90	10.70	9.18	1.35	14.75	25	25
CE (µS/cm)	1624	3300,00	2170,44	571,27	26,32	2800	1500
SAL (%)	0,80	1,70	1,10	0,32	28,75	-	-
TDS (mg/L)	794	1666,00	1074,89	296,89	27,62	1500	1000
Ca ²⁺ (mg/L)	80	160,00	107,02	27,35	25,56	200	200
Mg ²⁺ (mg/L)	57,34	129,27	80,08	24,88	31,07	150	50
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,08	0,18	0,10	0,03	29,85	0,5	0,5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	180	520,00	328,89	101,02	30,72	400	250
Cl ⁻ (mg/L)	433,10	795,20	564,84	115,09	20,38	500	250
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	183	219,60	201,02	12,43	6,18	-	-
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,59	28,15	8,58	9,00	104,84	50	50
TH (mg/L CaCO ₃)	447,50	883,20	601,96	164,17	27,27	500	300
TAC	15	18,00	16,48	1,02	6,18	-	-

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.2 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Ain Oussera, 2023)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Coef de variation (%)	Norme Algérienne	Norme OMS
Ph	7,10	7,55	7,34	0,13	1,79	9	9,5
Turb (NTU)	0,44	3,63	1,08	0,73	67,68	5	5
T (°C)	19	19,90	19,53	0,34	1,75	25	25
CE (µS/cm)	961	3554	1936,38	751,16	38,79	2800	1500
SAL (%)	0,40	1,70	0,91	0,37	40,99	-	-
TDS (mg/L)	480	1777	967,94	375,71	38,82	1500	1000
Ca ²⁺ (mg/L)	52,80	171,20	92,40	33,76	36,53	200	200
Mg ²⁺ (mg/L)	34,02	136,08	69,61	30,29	43,51	150	50
Na ⁺ (mg/L)	50	290	140,88	64,22	45,58	200	200
K ⁺ (mg/L)	4,20	14,10	9,53	2,91	30,48	12	12
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	105	690	342,19	185,84	54,31	400	250
Cl ⁻ (mg/L)	136,12	709	357,17	163,46	45,76	500	250
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	183	229,36	209	14,62	7,00	-	-
NO ₃ ⁻ (mg/L)	1,73	26,92	9,76	8,07	82,62	50	50
TH (mg/LCaCO ₃)	280	988	517,75	250,99	39,79	500	300
TAC	15	18,80	17,13	1,20	7,00	-	-

IV.2.1.2 Caractéristiques physico-chimiques des eaux

Les paramètres physiques

La température (°C)

La température des eaux souterraines varie de 5,90 à 10,70 °C (moyenne : 9,18°C) et de 19 à 19,90 °C (moyenne : 19,53°C) respectivement en 2013 et 2023 (Figure IV.2). Ces valeurs ne dépassent pas la norme algérienne et la norme de l'OMS (25°C).

Le potentiel hydrogène (pH)

L'aquifère de Ain Oussera est caractérisé par des eaux alcalines. En effet, les valeurs de leur pH sont comprises entre 7,58 et 7,89 (moyenne : 7,72) en 2013 et entre 7,10 et 7,55 (moyenne : 7,34) en 2023 (Figure IV.3). Les valeurs du pH (Tableau IV.1 et IV.2) montrent que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme Algérienne (6,5 à 9) et OMS (6,5 à 8,5) de la potabilité.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

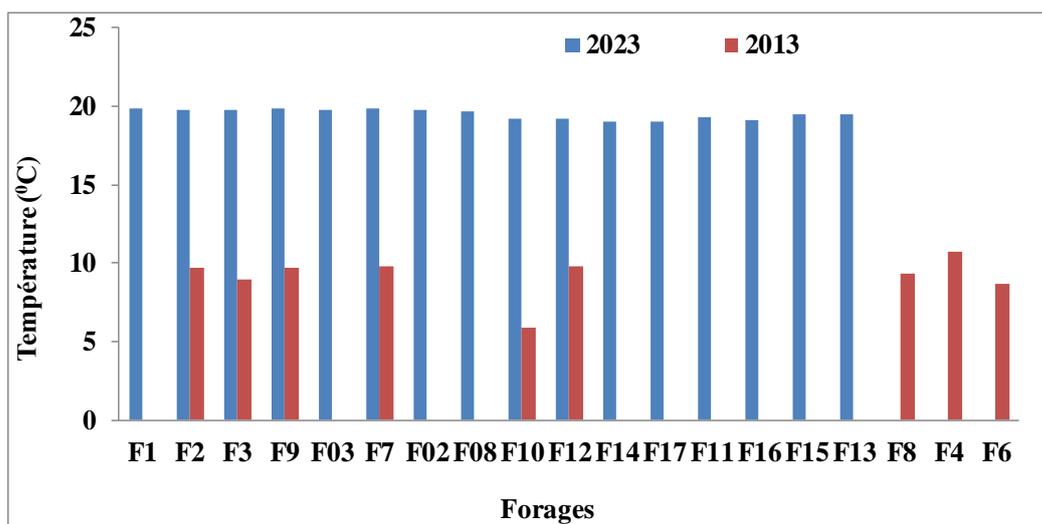


Figure IV.2: Variation de la température des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

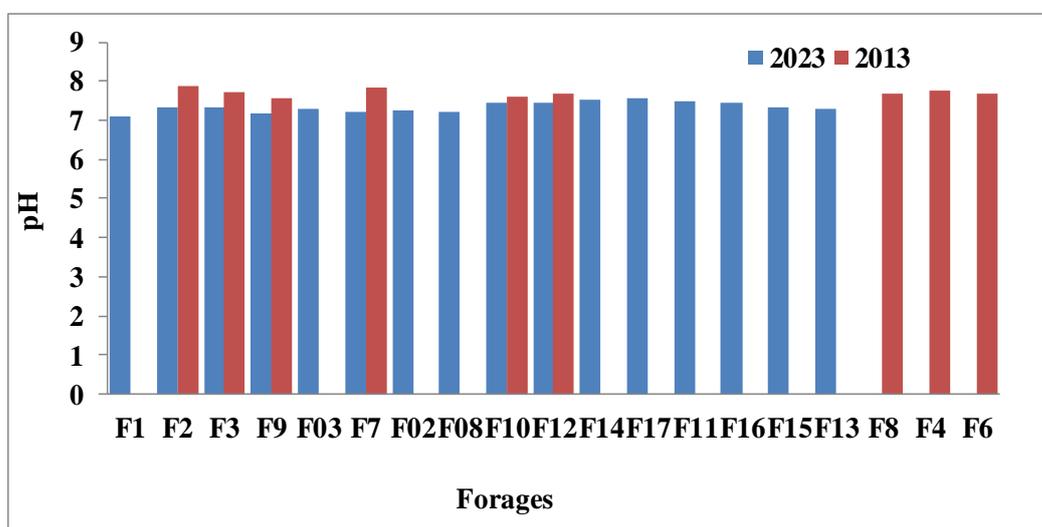


Figure IV.3: Variation de pH au niveau des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique : les valeurs de la CE des eaux varient de 1624 à 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (moyenne : 2170,44 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en 2013 et de 961 à 3554 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (moyenne : 1936,38 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en 2023 (Figure IV.4). Les fortes valeurs de CE sont observées au niveau des forages (F02, F03, F7, F08, F9). Les valeurs de CE enregistrées au niveau des forages (F7, F08 et F9) dépassent la norme algérienne de qualité de l'eau potable (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$), alors que 13 points d'eau (81,25%) dépassent la norme de l'OMS (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

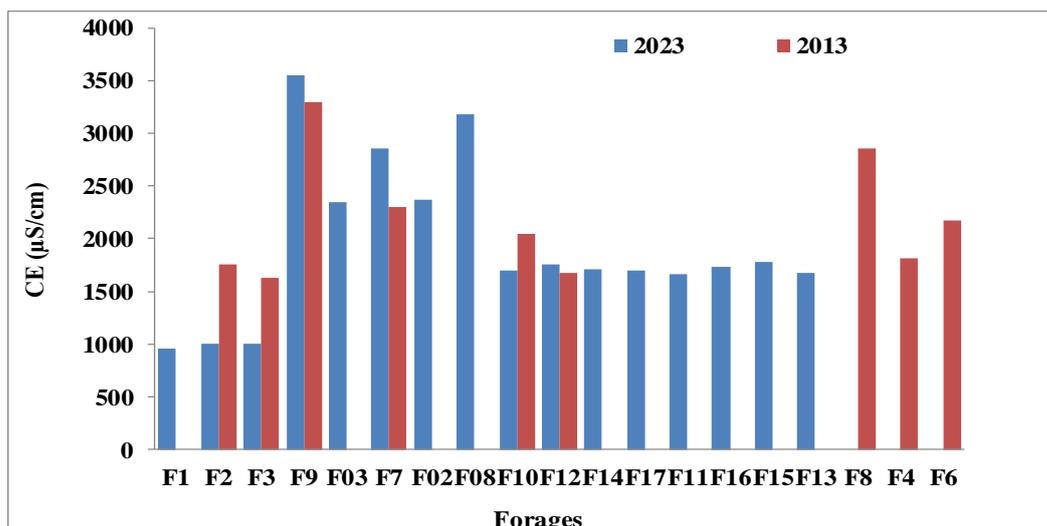


Figure IV.4 : Variation de conductivité électrique de CE des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Les solides dissous totaux (TDS)

Les valeurs enregistrées de TDS varient entre 794 et 1666 mg/L (moyenne : 1074,89 mg/L) en 2013, puis entre 480 et 1777 mg/L (moyenne : 967,94) en 2023 (Figure IV.5). Les concentrations élevées de TDS sont mesurées au niveau des forages (F9, F08), dépassant la norme algérienne (1500 mg/L), alors que 6 points d'eau (37,5%) dépassent la norme de l'OMS (1000 mg/L).

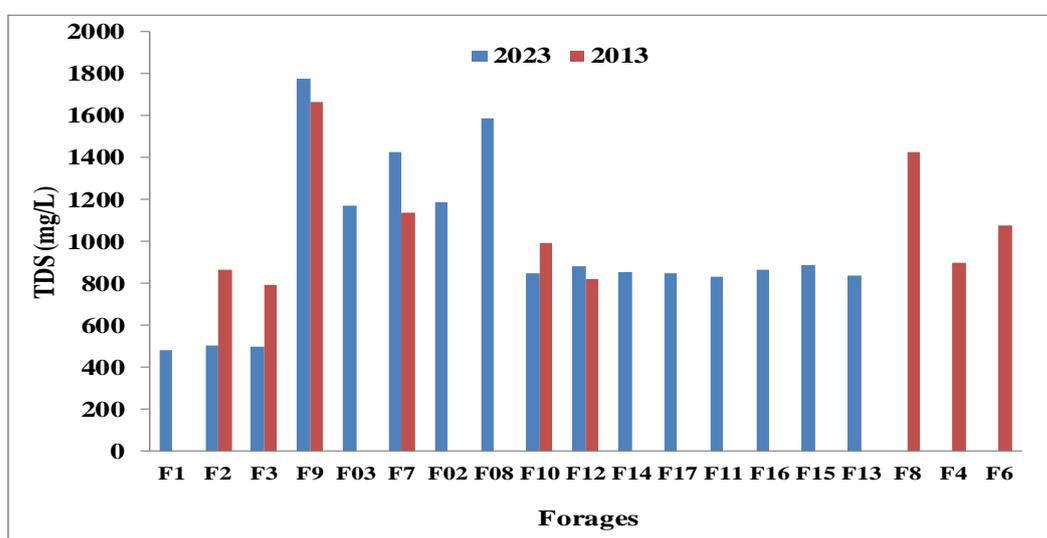


Figure IV.5: Variation des concentrations de TDS des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Les paramètres chimiques

La dureté totale (TH)

Les valeurs de la dureté (TH) sont comprises entre 447,50 et 883,20 mg/L de CaCO_3 (moyenne : 601,96 mg/L de CaCO_3) en 2013, puis entre 280 et 988 mg/L de CaCO_3

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

(moyenne : 517,75 mg/L de CaCO₃) en 2023 (Figure IV.6). Les concentrations élevées de TH sont observées au niveau des forages (F08, F9, F7, F02, F03) et dépassant la norme algérienne (500 mg/L de CaCO₃), alors que 13 points d'eau (81,25 %) dépassent la norme de l'OMS (300 mg/L de CaCO₃).

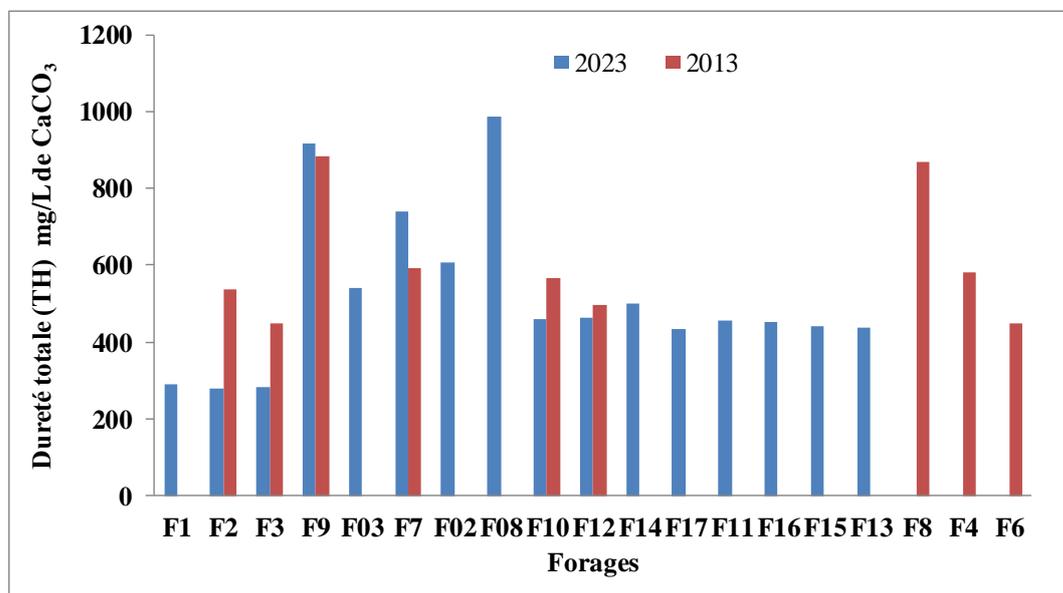


Figure IV.6: Variation des concentrations de TH des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Les ions majeurs

L'ordre des concentrations de cations et d'anions (mg/L) des paramètres analysés en 2023 est $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ respectivement.

Les cations

Le Calcium (Ca²⁺) :

La teneur en calcium est comprise entre 80 et 160 mg/L (moyenne : 107,02 mg/L) et entre 52,8 à 171,20 mg/L (moyenne : 92,4 mg/L) respectivement en 2013 et 2023 (Figure IV.7). Les teneurs maximales ont été enregistrées au niveau des forages (F08, F9, F02, F7). Cependant, les valeurs ne dépassent pas la norme algérienne et la norme de l'OMS (200 mg/l).

Le Magnésium (Mg²⁺) :

Les teneurs en Mg²⁺ varient entre 57,34 et 129,27 mg/L (moyenne : 80,08 mg/L) et entre 34,02 et 136,08 mg/L (moyenne : 69,61 mg/L) respectivement en 2013 et 2023 (Figure IV.8). Les fortes valeurs de Mg²⁺ sont mesurées au niveau des forages (F7, F08 et F9), les teneurs ne dépassent pas la norme algérienne (150 mg/l). En revanche, les concentrations de Mg²⁺ dans 13 forages (81,25%) dépassent la norme de l'OMS (50 mg/L).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

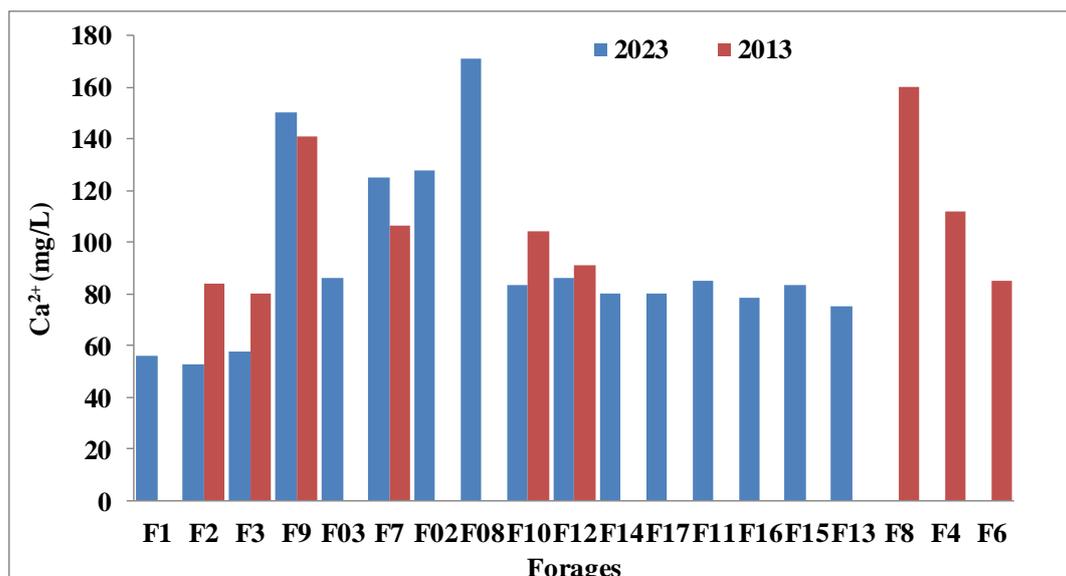


Figure IV.7: Variation des concentrations de Ca²⁺ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

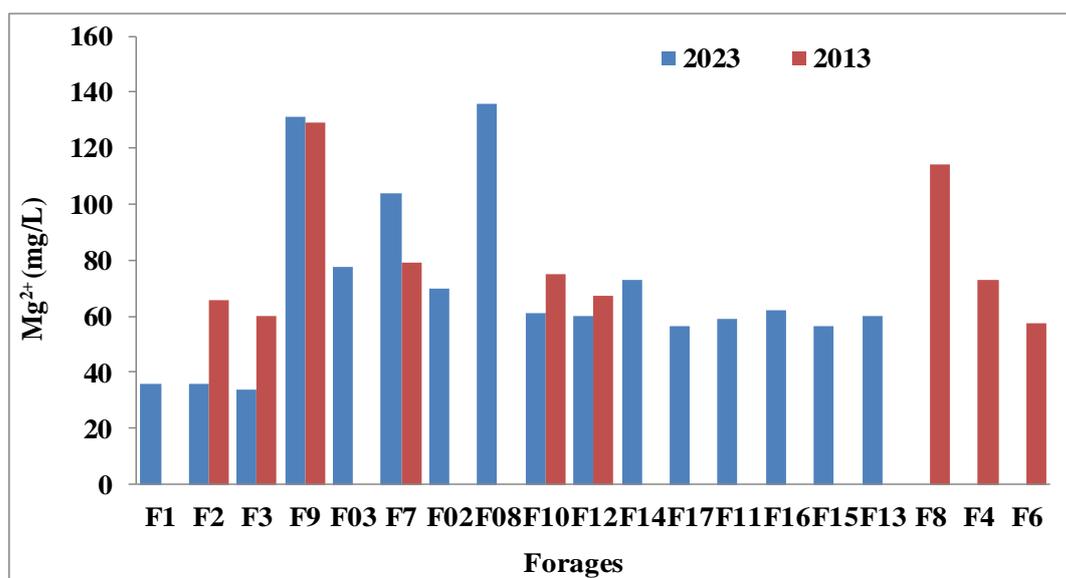


Figure IV.8: Variation des concentrations de Mg²⁺ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Le sodium (Na⁺) :

Les teneurs en sodium n'ont été mesurées qu'en 2023. Elles oscillent de 50 à 290 mg/L avec une moyenne de 140,88 mg/L (Figure IV.9). Les valeurs maximales sont mesurées dans les forages (F08 et F9), dépassant la norme algérienne et celle de l'OMS pour l'eau potable (200 mg/L).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

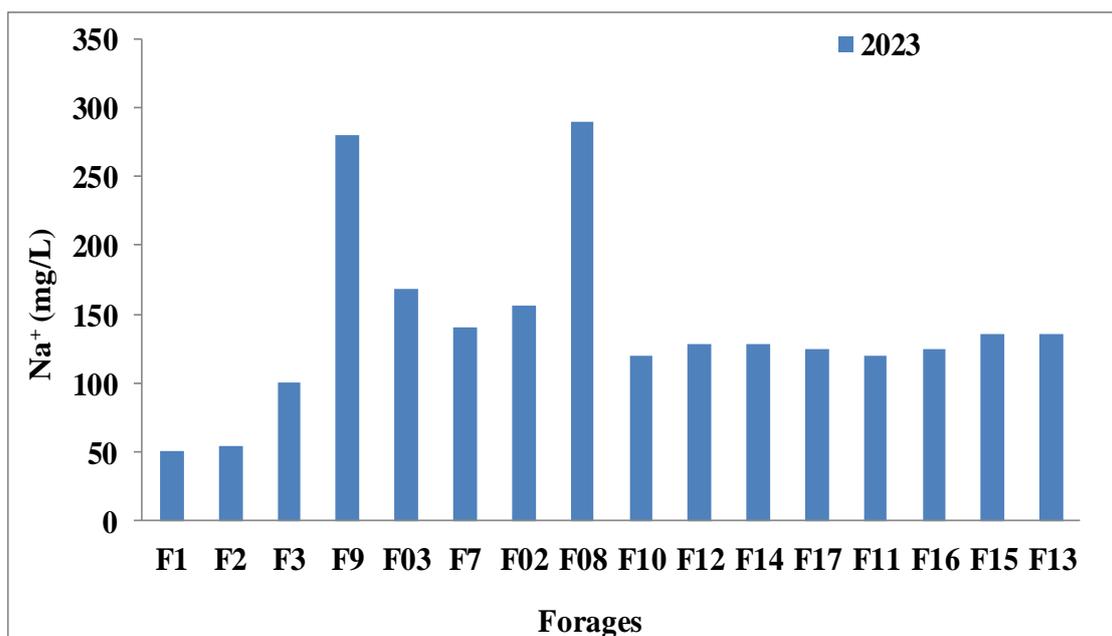


Figure IV.9: Variation des concentrations de Na⁺ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Le Potassium (K⁺) :

Les teneurs en potassium n'ont été mesurées qu'en 2023. Elles varient de 4,20 à 14,10 mg/L avec une moyenne de 9,53 mg/L (Figure IV.10). Les teneurs maximales en K⁺ ont été enregistrées au niveau des forages (F02, F03, F7, F9 et F15), dépassant la norme algérienne et celle de l'OMS pour l'eau potable (12 mg/L).

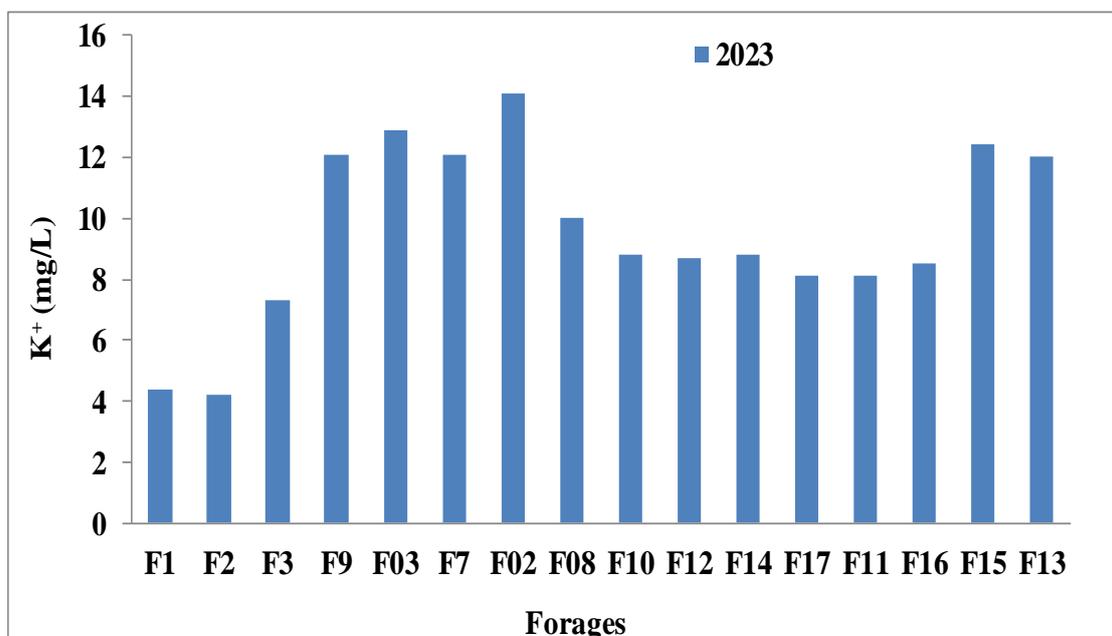


Figure IV.10: Variation des concentrations de K⁺ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les chlorures (Cl⁻)

Les teneurs en chlorures (Cl⁻) sont comprises entre 433,10 mg/L et 795,20 mg/L (moyenne : 564,84 mg/L) et entre 136,12 et 709 mg/L (moyenne : 357,17 mg/L) respectivement en 2013 et 2023 (Figure IV.11). Les valeurs les plus élevées sont mesurées au niveau des forages (F9, F08, F6, F7, F4, F03), dépassant la norme algérienne (500 mg/L). Cependant, les teneurs en Cl⁻ dépassent largement la norme fixée par l’OMS de 250 mg/L pour l'eau potable pour la quasi-totalité des points d'eau.

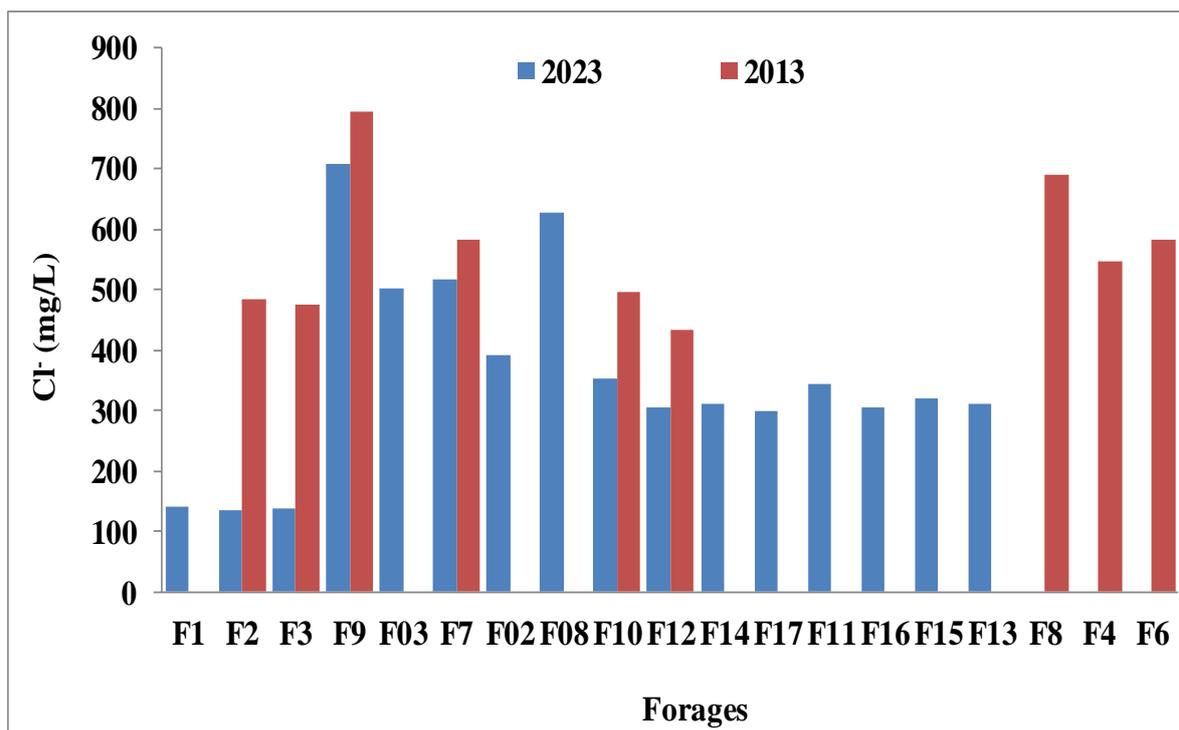


Figure IV.11: Variation des concentrations de Cl⁻ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Les sulfates (SO₄²⁻)

Les teneurs en SO₄²⁻ oscillent entre 180 et 520 mg/L (moyenne : 328,89 mg/L) en 2013, et varient entre 105 à 690 mg/L (moyenne : 342,19 mg/L) en 2023 (Figure IV.12). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des forages (F9, F08, F7, F03, F02) dépassant la norme algérienne (400 mg/L). Cependant, les teneurs en SO₄²⁻ dépassent largement la norme fixée par l’OMS de 250 mg/L pour l'eau potable pour la majorité des points d'eau (66,7%).

Les bicarbonates (HCO₃⁻)

Les concentrations en bicarbonate varient de 183 mg/L à 219,6 mg/L (moyenne : 201,02 mg/L) en 2013, et varient entre 183 à 229,36 mg/L (moyenne : 209 mg/L) en 2023 (Figure IV.13).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

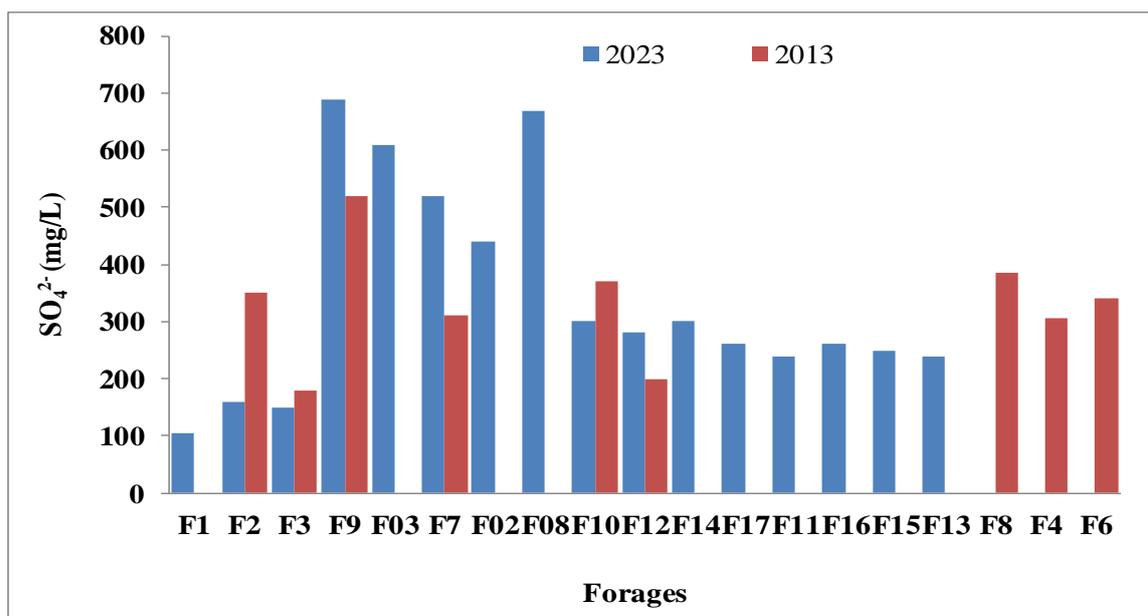


Figure IV.12: Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

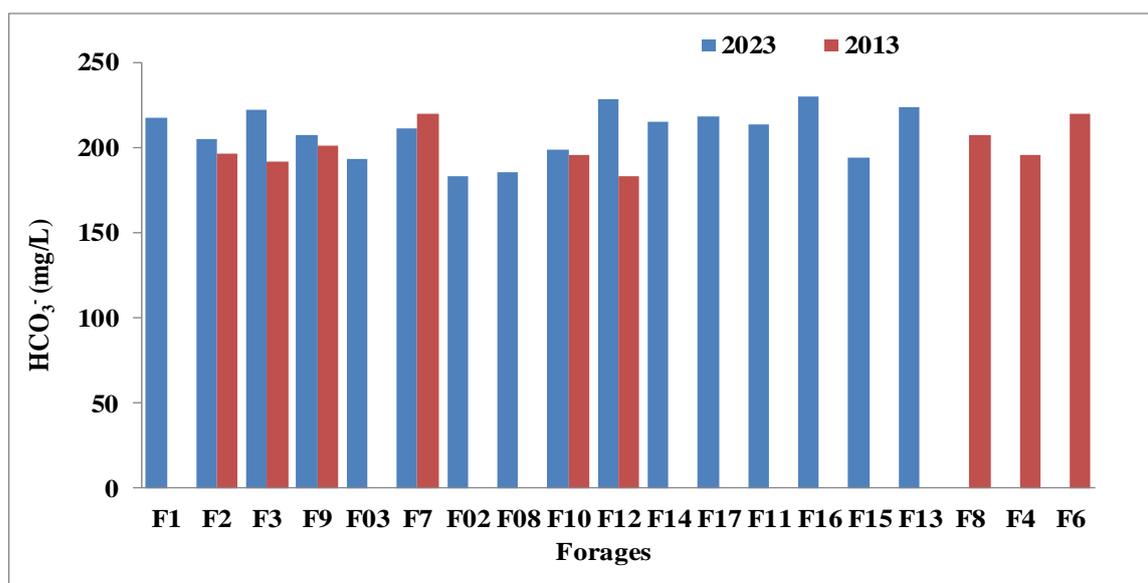


Figure IV.13: Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

Paramètres de pollution

Les nitrates (NO_3^-)

Les concentrations enregistrées sont comprises entre 0,59 et 28,15 mg/L (moyenne : 8,58 mg/L) et entre 1,73 et 26,92 mg/L (moyenne : 9,76 mg/L) respectivement en 2013 et 2023 (Figure IV.14). Elles sont inférieures au niveau admissible recommandé par la norme Algérienne et l'OMS (50 mg/L) pour l'eau potable.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ammonium (NH_4^+)

Les teneurs en ammonium varient de 0,08 à 0,18 mg/l avec une moyenne de 0,1 mg/L en 2013 (Figure IV.15). Ces teneurs sont inférieures la norme de potabilité fixée par l'OMS et Algérienne (0,5 mg/L).

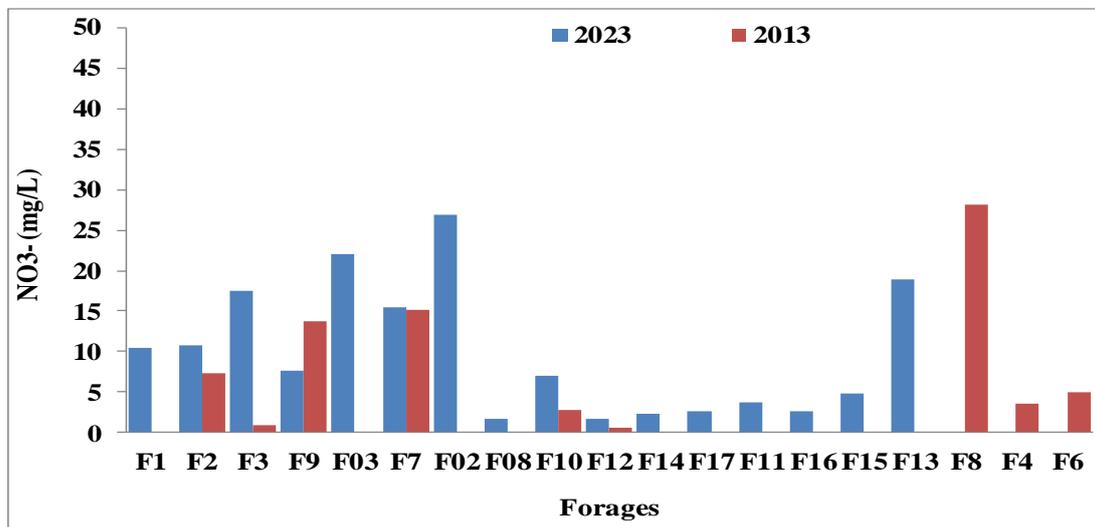


Figure IV.14: Variation des concentrations de NO_3^- des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

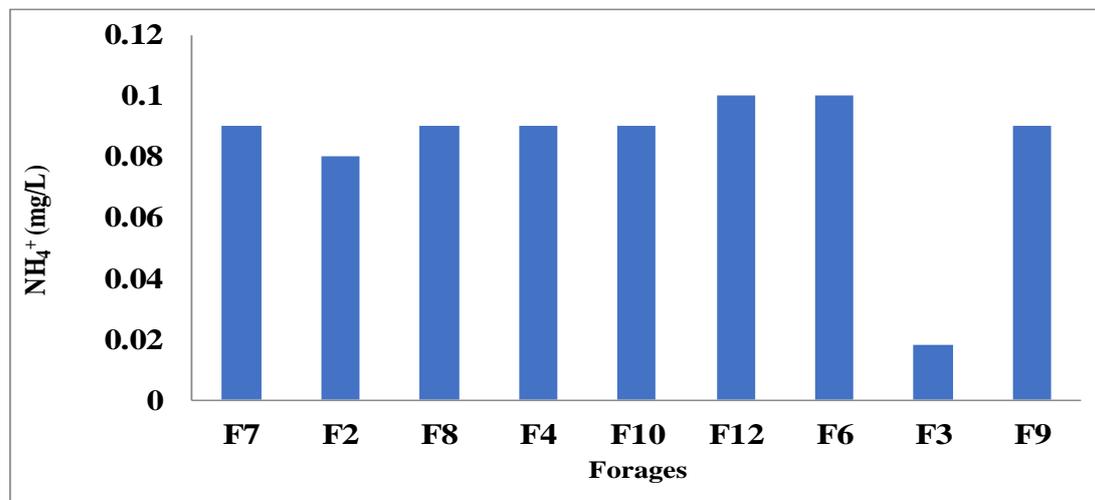


Figure IV.15: Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines de la région d'Ain Oussera

IV.2.2 La nappe de Turonien de Hassi Bahbah

IV.2.2.1 Paramètres organoleptiques

La turbidité

La turbidité n'a été mesurée qu'en 2022. Elle varie de 0,9 à 1,4 NTU avec une moyenne de 1,14 NTU (Tableau IV.4 ; Figure IV.16), ce qui est inférieur à la limite fixée par la norme

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

algérienne (5 NTU) ainsi que par la norme de l'OMS (5 NTU). Les valeurs les plus élevées de la turbidité sont mesurées au niveau des forages HB9 et H65.

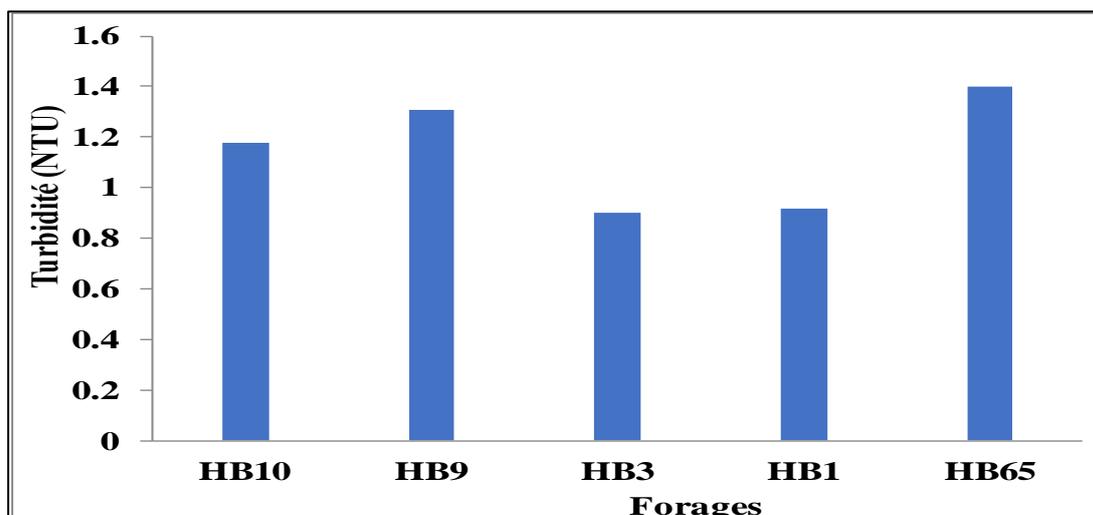


Figure IV.16: Variation de la turbidité des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Tableau IV.3 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Hassi Bahbah, 2013)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type	Coef de variation (%)	Norme Algérienne	Norme OMS
pH	7,67	8,01	7,81	0,14	1,81	9	9,5
T (°C)	6,70	9,70	7,82	1,06	13,62	25	25
CE (µS/cm)	1847,00	2840,00	2442,83	367,89	15,06	2800	1500
SAL (%)	0,90	1,40	1,22	0,19	15,95	-	-
TDS (mg/L)	901,00	1416,00	1208,67	188,34	15,58	1500	1000
Ca ²⁺ (mg/L)	212,80	300,00	250,20	37,10	14,83	200	200
Mg ²⁺ (mg/L)	97,20	133,60	109,57	13,46	12,29	150	50
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,01	0,13	0,10	0,04	44,05	0,5	0,5
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	280,00	375,00	310,83	35,27	11,35	400	250
Cl ⁻ (mg/L)	355,00	750,00	556,47	146,62	26,35	500	250
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	222,00	263,50	241,33	17,14	7,10	-	-
NO ₃ ⁻ (mg/L)	3,57	9,03	6,10	2,26	37,07	50	50
TH (mg/L CaCO ₃)	990,8	1298,2	1076,02	117,41	10,91	500	300
TAC	18,20	21,60	19,78	1,40	7,09	-	-

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.4 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (Hassi Bahbah, 2022)

Paramètres	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart type	Coef de variation (%)	Norme Algérienne	Norme OMS
PH	6,89	7,07	6,97	0,07	1,06	9	9,5
Turb (NTU)	0,90	1,40	1,14	0,23	19,86	5	5
T (°C)	24,80	30,20	28,88	2,29	7,93	25	25
CE (µS/cm)	2492	2957,00	2720,60	196,23	7,21	2800	1500
SAL (%)	1,20	1,40	1,30	0,10	7,69	-	-
TDS (mg/L)	1246,00	1478,00	1360,20	97,97	7,20	1500	1000
Ca ²⁺ (mg/L)	227,20	376,00	277,44	59,27	21,36	200	200
Mg ²⁺ (mg/L)	100,00	132,86	111,12	13,15	11,83	150	50
Na ⁺ (mg/L)	88,00	112,00	104,20	9,50	9,11	200	200
K ⁺ (mg/L)	1,00	12,00	7,20	5,67	78,81	12	12
NH ₄ ⁺ (mg/L)	0,10	0,20	0,14	0,04	30,51	0,5	
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	380,00	580,00	504,00	80,19	15,91	400	250
Cl ⁻ (mg/L)	262,23	347,41	321,87	34,27	10,65	500	250
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	183,00	213,50	201,53	13,38	6,64	-	-
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,01	0,04	0,03	0,01	39,12	0,2	1
NO ₃ ⁻ (mg/L)	0,00	23,37	7,03	9,41	133,81	50	50
TH (mg/L CaCO ₃)	1000	1480	1144	199,20	17,41	500	300
TAC	15,00	17,50	16,52	1,10	6,65	-	-

V.2.2.2 Paramètres physico-chimiques

Les paramètres physiques

La température (°C)

Les températures de l'eau varient de 6,7 et 9,7°C en 2013 (Figure IV.17). Ces valeurs ne dépassent pas la norme algérienne et la norme de l'OMS (25°C). En 2022, les températures de l'eau oscillent entre 24,8 et 30,2°C (Tableau IV.3 et IV.4), dépassant la norme algérienne et la norme de l'OMS (25°C).

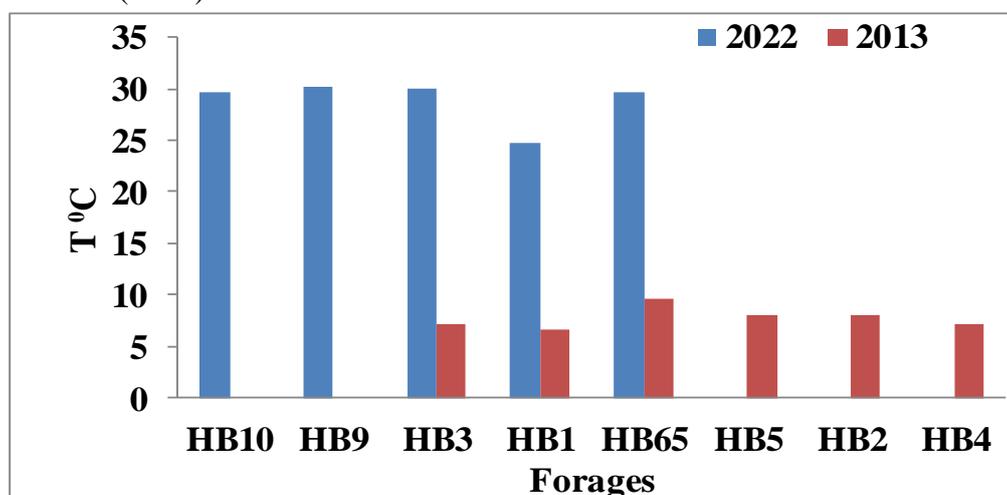


Figure IV.17: Variation de la température des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le potentiel hydrogène (pH)

Les eaux de Hassi Bahbah sont généralement alcalines. Les valeurs de pH mesurées varient entre 7,67 et 8,01 (moyenne : 7,81) en 2013, et entre 6,89 et 7,07 (moyenne : 6,97) en 2022 (Figure IV.18). Les valeurs du pH (Tableau IV3 et IV4) montrent que tous les points d'eau se trouvent dans l'intervalle de la norme Algérienne (6,5 à 9) et OMS (6,5 à 8,5) de la potabilité.

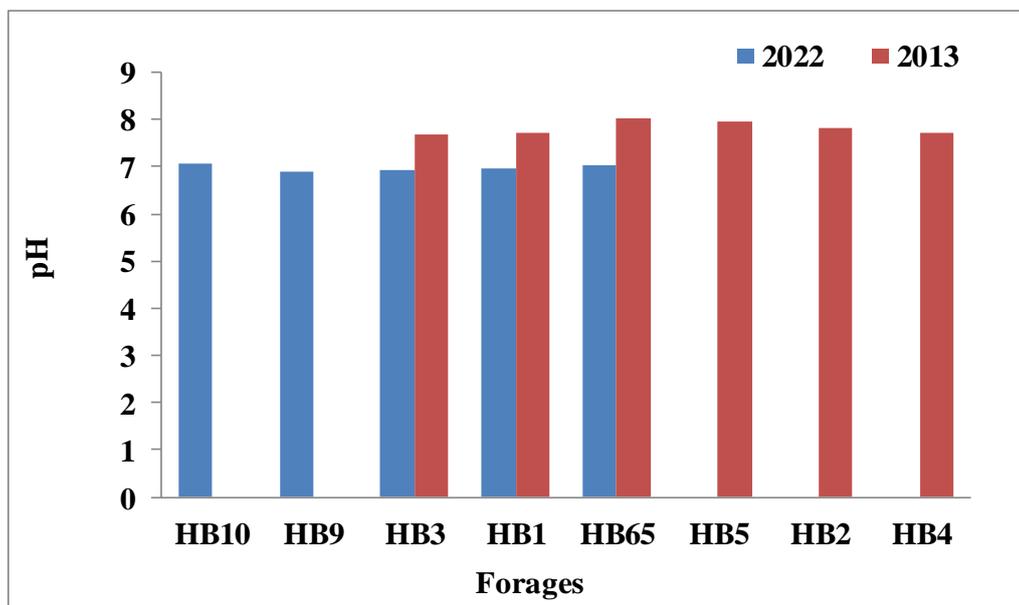


Figure IV.18: Variation de pH au niveau des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique des eaux échantillonnées varie de 1847 à 2840 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (moyenne : 2442,83 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en 2013, et de 2492 à 2957 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (moyenne : 2720,60 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en 2022 (Figure IV.19). Les fortes valeurs de CE sont observées au niveau des forages (HB1, HB2 et HB9), dépassant la norme algérienne de qualité de l'eau potable (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Cependant, tous les échantillons d'eau de la nappe dépassent la norme de l'OMS (1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

Les solides dissous totaux (TDS)

Les valeurs de TDS ont compris entre 901 et 1416 mg/L avec une moyenne de 1208,67 mg/L en 2013, et entre 1246 et 1478 mg/L avec une moyenne de 1360,2 mg/L en 2022 (Figure IV.20). Les concentrations élevées de TDS sont mesurées au niveau des forages (HB1, HB2 et HB9) et ne dépassent pas la norme algérienne (1500 mg/L), alors que tous les échantillons d'eau de la nappe dépassent la norme de l'OMS (1000 mg/L).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

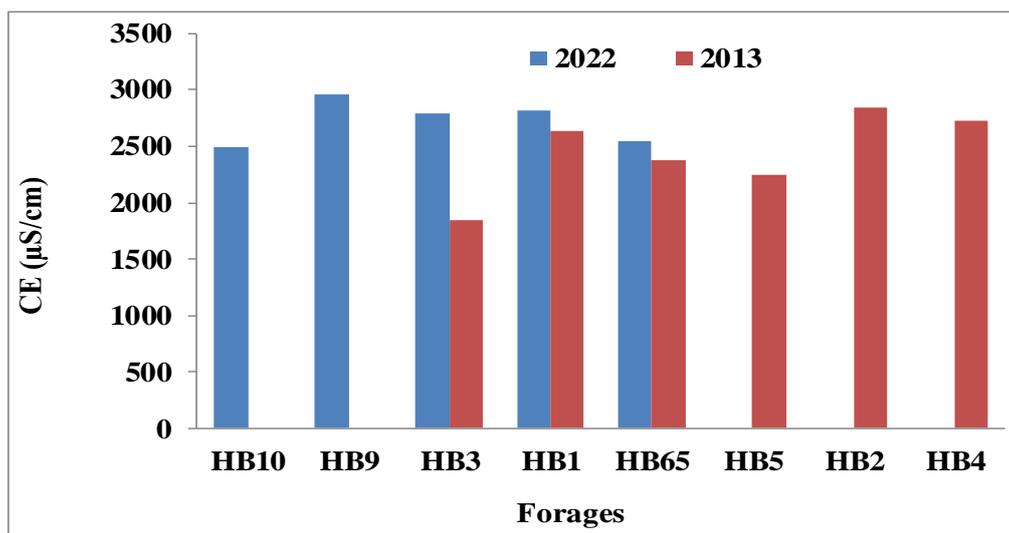


Figure IV.19 :Variation de conductivité électrique de CE des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

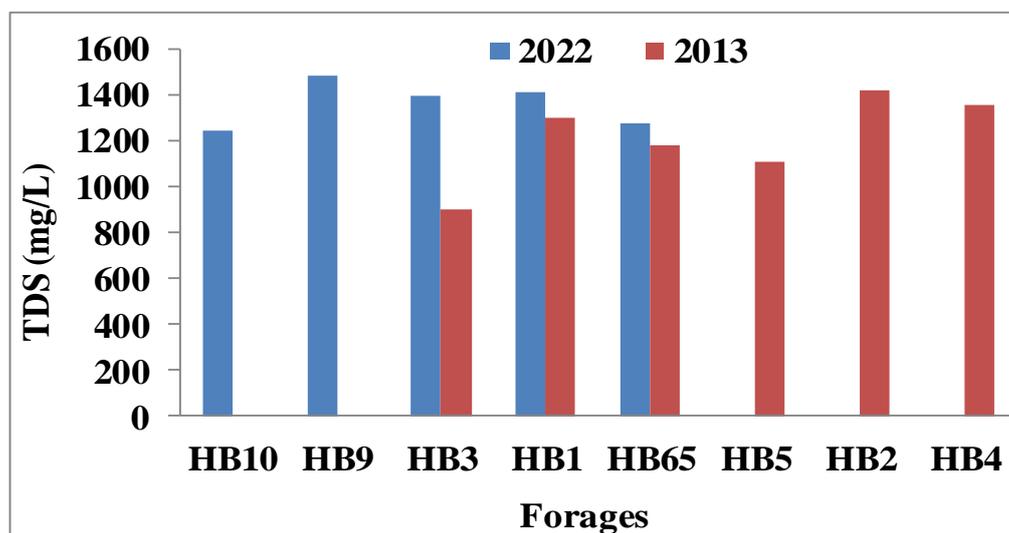


Figure IV.20:Variation des concentrations de TDS des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Les paramètres chimiques

La dureté (TH)

La dureté (TH) varie de 990,8 à 1298,2 mg/L de CaCO_3 (moyenne : 1076,02 mg/L de CaCO_3) en 2013, et de 1000 à 1480 mg/L de CaCO_3 (moyenne : 1144 mg/L de CaCO_3) en 2022 (Figure IV.21). Les concentrations de TH de tous les échantillons d'eau de la nappe dépassent la norme algérienne (500 mg/L de CaCO_3) et la norme de l'OMS (300 mg/L de CaCO_3).

Les ions majeurs

L'ordre des concentrations de cations et d'anions (mg/L) des paramètres analysés en 2022 est $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ et $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ respectivement.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

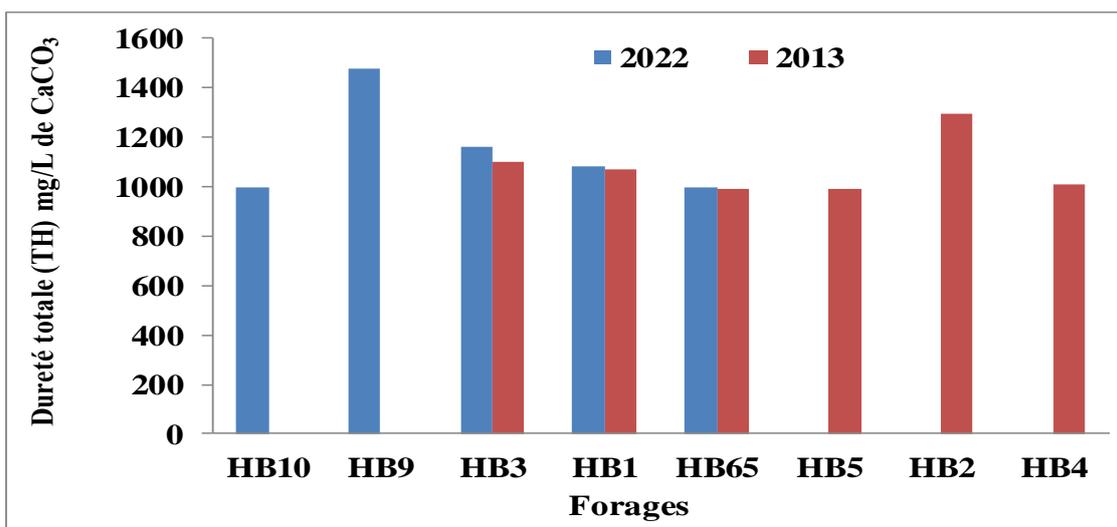


Figure IV.21: Variation des concentrations de TH des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Le Calcium (Ca^{2+})

Les teneurs en Ca^{2+} mesurées vont de 212,8 à 300 mg/L avec une moyenne de 250,2mg/L en 2013, et de 227,2 à 376 mg/L avec une moyenne de 277,44 mg/L en 2022 (Figure IV.22). Les valeurs les plus élevées de Ca^{2+} ont été enregistrées au niveau des forages (HB9, HB2 et HB3). Il est à signaler que tous les échantillons d'eau de la nappe dépassent la norme Algérienne et la norme de l'OMS (200 mg/l).

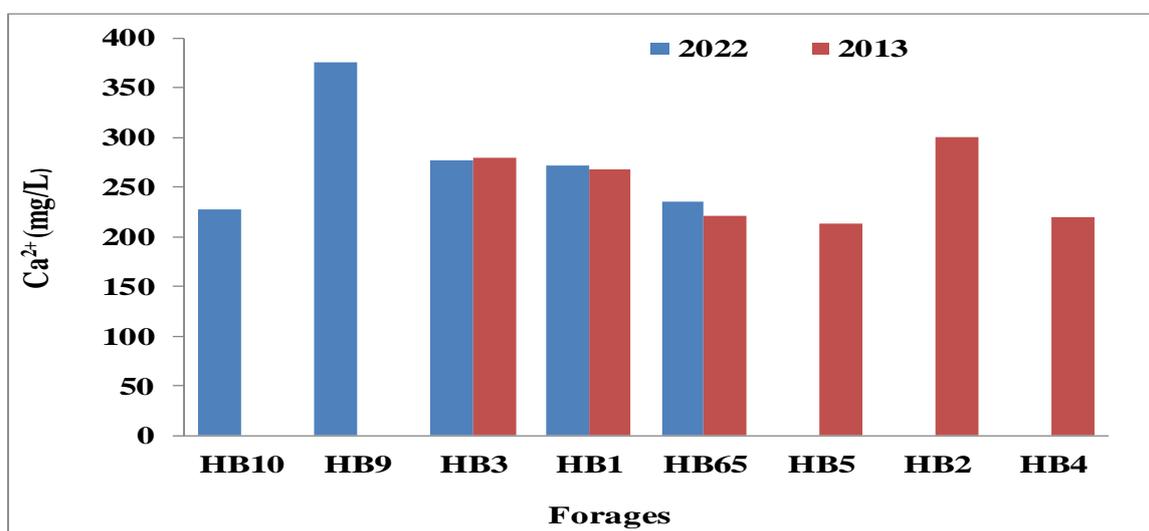


Figure IV.22: Variation des concentrations de Ca^{2+} des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Le Magnésium (Mg^{2+})

Les concentrations de Mg^{2+} oscillent entre 97,20 et 133,6 mg/L (moyenne : 109,57 mg/L) en 2013, et entre 100 et 132,86 mg/L (moyenne : 111,12 mg/L) en 2022 (Figure IV.23). Les fortes valeurs de Mg^{2+} sont mesurées au niveau des forages (HB9 et HB2).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les teneurs en Mg^{2+} de tous les échantillons d'eau ne dépassent pas algérienne (150 mg/l). En revanche, les concentrations de Mg^{2+} de tous les échantillons d'eau dépassent la norme de l'OMS (50 mg/L).

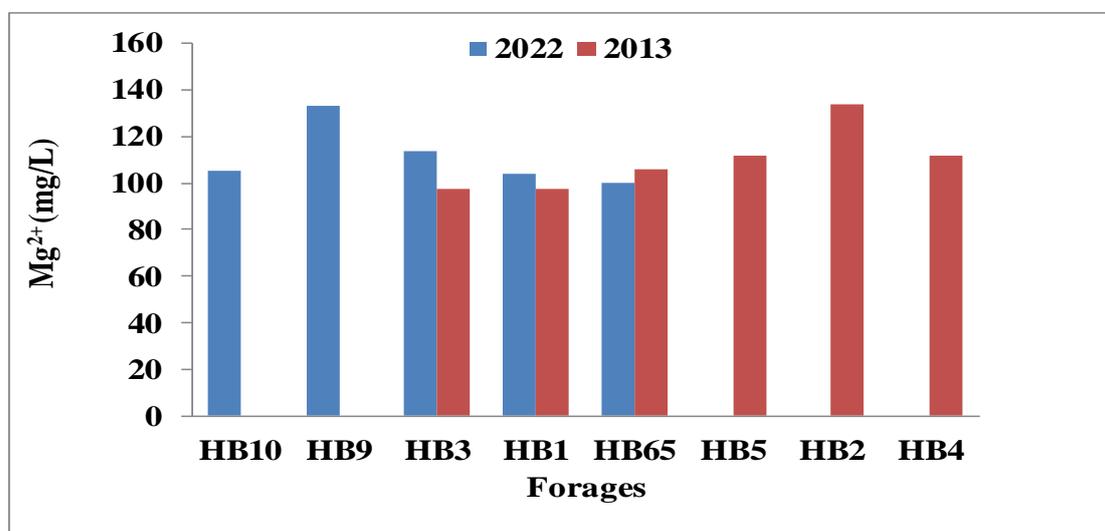


Figure IV.23: Variation des concentrations de Mg^{2+} des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Le sodium (Na^+) :

Les teneurs en sodium n'ont été mesurées qu'en 2022. Les résultats ont montré que les teneurs en Na^+ comprises entre 88 et 112 mg/L avec une moyenne de 104,2 mg/L en 2022 (Figure IV.24). Les concentrations les plus élevées sont observées au niveau des forages (HB1 et HB3). Les teneurs en Na^+ de tous les échantillons d'eau ne dépassent pas la norme algérienne (200 mg/l) pour l'eau potable.

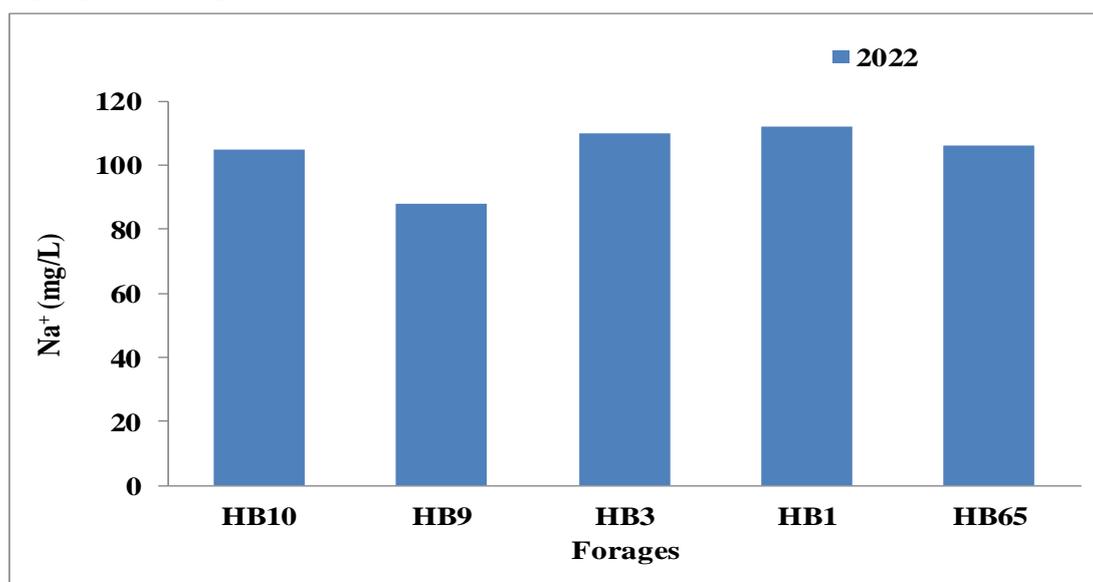


Figure IV.24: Variation des concentrations de Na^+ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Le Potassium (K^+) :

Les teneurs en potassium n'ont été mesurées qu'en 2022. Les valeurs de Potassium (K^+) fluctuent entre 1 et 12 mg/L avec une moyenne de 7.20 en 2022 (Figure IV.25), et ne dépassent pas la norme algérienne et celle de l'OMS pour l'eau potable (12 mg/L). Les teneurs maximales en K^+ ont été enregistrées au niveau des forages (HB3, HB9 et HB10).

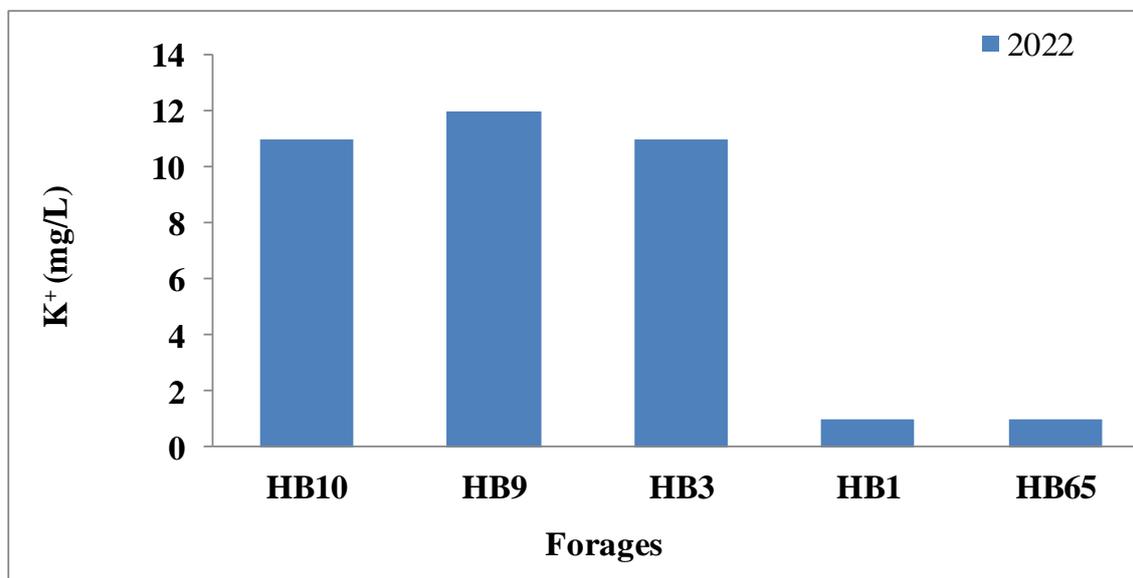


Figure IV.25: Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Les anions

Les chlorures (Cl^-)

Les concentrations en chlorures (Cl^-) oscillent entre 355 mg/L et 750 mg/L (moyenne : 556,47 mg/L) et entre 262,23 et 347,41 mg/L (moyenne : 321,87 mg/L) respectivement en 2013 et 2022 (Figure IV.26). Les valeurs les plus élevées sont mesurées au niveau des forages (HB1, HB2, HB3), dépassant la norme algérienne (500 mg/L). Cependant, tous les échantillons présentent des concentrations supérieures à la norme de potabilité des eaux fixée par l'OMS (250 mg/L).

Les sulfates (SO_4^{2-})

Les teneurs en SO_4^{2-} sont comprises entre 280 et 375 mg/L (moyenne : 310,83 mg/L) en 2013, et oscillent entre 380 à 580 mg/L (moyenne : 504 mg/L) en 2022 (Figure IV.27). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau des forages (HB1, HB3, HB9, HB65) dépassant la norme algérienne (400 mg/L) en 2022. Cependant, les teneurs en SO_4^{2-} dépassent largement la norme fixée par l'OMS de 250 mg/L pour l'eau potable pour la totalité des points d'eau.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

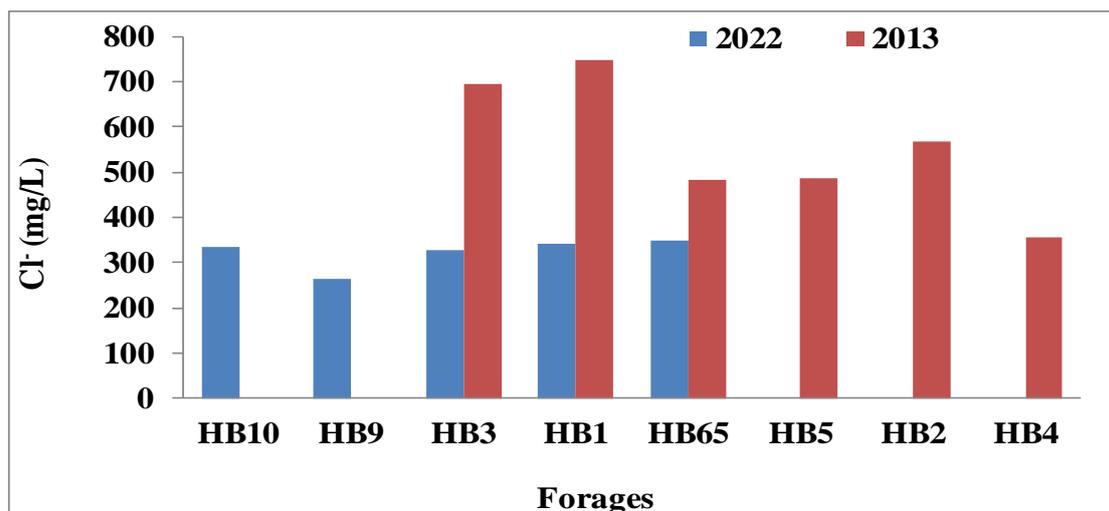


Figure IV.26: Variation des concentrations de Cl⁻ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

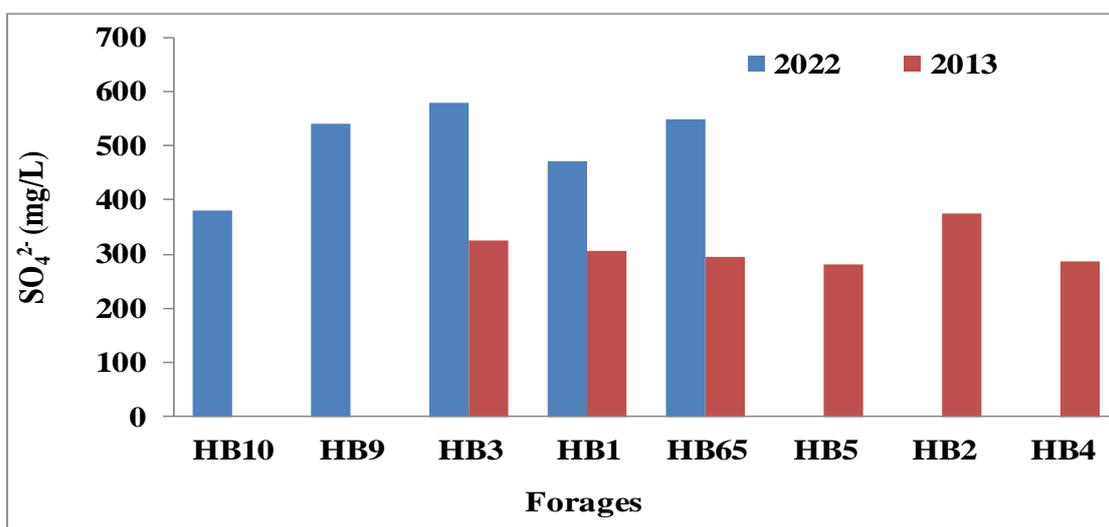


Figure IV.27: Variation des concentrations de SO₄²⁻ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Les bicarbonates (HCO₃⁻)

Les concentrations en bicarbonate varient de 222 mg/L à 263,5 mg/L (moyenne : 241,33 mg/L) en 2013, et varient entre 183 à 213,5 mg/L (moyenne : 201,53 mg/L) en 2022 (Figure IV.28).

IV.2.2.5 Paramètres de pollution

Les nitrates (NO₃⁻)

Les teneurs en nitrate varient de 3,57 à 9,03 mg/L avec une moyenne de 6,1 mg/L, et de 0 à 23,37 mg/L avec une moyenne de 7,03 mg/L respectivement en 2013 et 2022. Elles sont inférieures au niveau admissible recommandé par la norme Algérienne et l'OMS (50 mg/L) pour l'eau potable. La teneur maximale est enregistrée au forage HB65.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

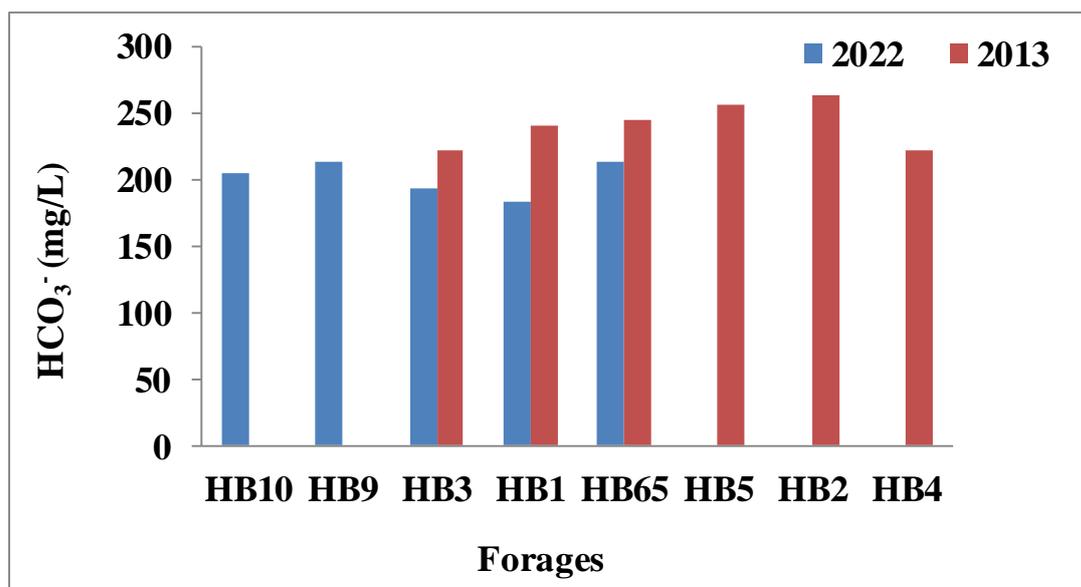


Figure IV.28: Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

Nitrites (NO_2^-)

Les teneurs en NO_2^- varient entre 0,01 et 0,04 mg/L avec une moyenne de 0,03 mg/L en 2022. Elles sont inférieures la norme de potabilité fixée par l'OMS (1 mg/L) et Algérienne (0,2 mg/L) (Figure IV.29).

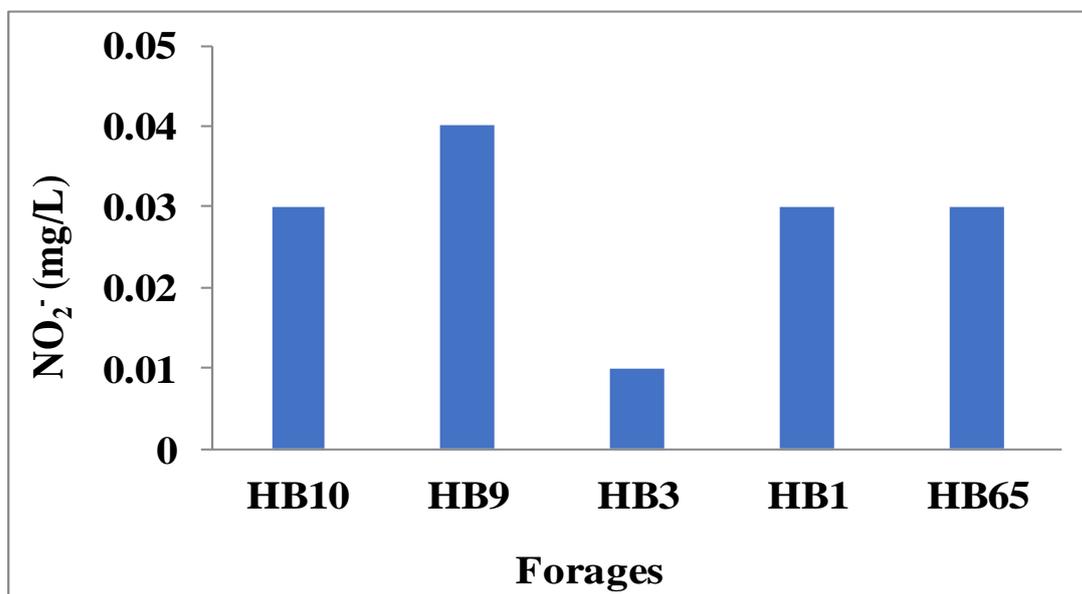


Figure IV.29: Variation des concentrations de NO_2^- des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Ammonium (NH_4^+)

Les teneurs en NH_4^+ sont comprises entre 0,01 et 0,13 mg/L avec une moyenne de 0,1 mg/L en 2013, et entre 0,1 et 0,2 mg/L avec une moyenne de 0,14 mg/L en 2022 (Figure IV.30). La totalité des points d'eau ont des teneurs inférieures à la norme de potabilité de l'OMS et de l'Algérie (0,5 mg/L).

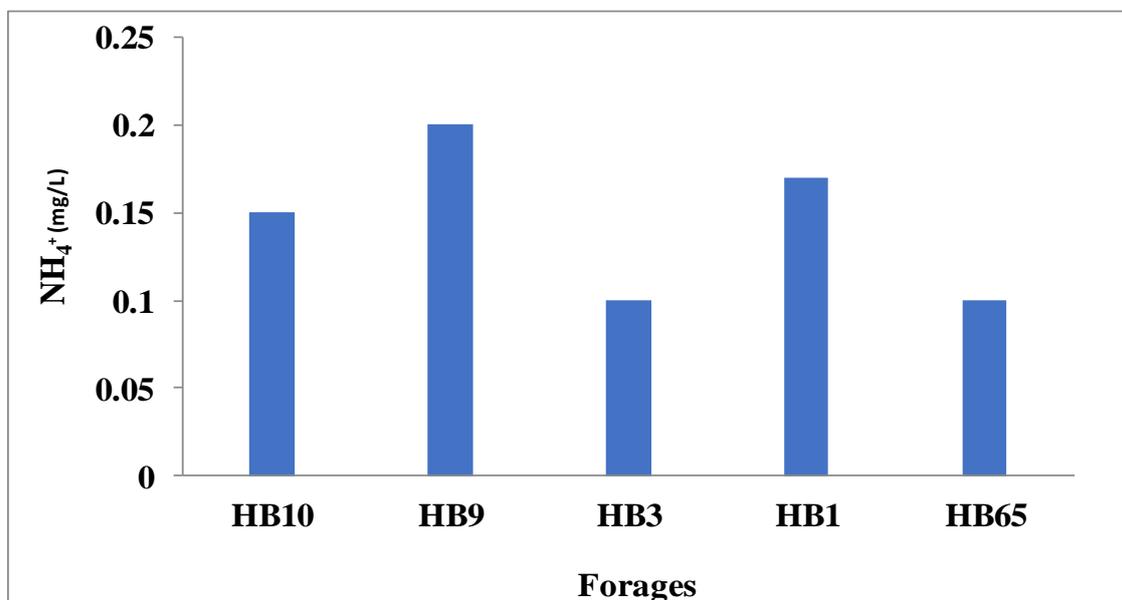


Figure IV.30: Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

IV.3. Représentation graphique des faciès chimiques

Les faciès hydrochimique sont fréquemment utilisés en hydrogéologie pour décrire la composition chimique des eaux naturelles (Touhari, 2015). On les détermine par le calcul des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l), et en tenant compte de la classification des ions (formule ionique) (Djabri, 1996). Pour déterminer les faciès hydrochimique de l'eau souterraine, la représentation graphique des résultats d'analyse est un outil important qui permet de caractériser, classer et comparer les eaux souterraines. Les données hydrochimique ont été traitées par le diagramme Piper (Piper, 1944), la classification de Stabler, le diagramme de Schoeller-Berkaloff et le diagramme de Stiff avec l'utilisation du logiciel Diagrammes développée par l'université d'Avignon (Simler, 2009).

IV.3.1 Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper est une composante graphique qui permet de visualiser, de manière relative les concentrations en éléments majeurs (Hachaichi, 2016). La représentation des résultats des analyses chimiques des eaux de la nappe albien (Ain Oussera) et turonien (Hassi Bahbah) sur le diagramme de Piper (Figure IV.31 ; Figure IV.32) fait apparaître que la totalité

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

des points d'eau sont caractérisés par la dominance d'un faciès chlorurée et/ou sulfatée et/ou calcique et/ou magnésienne. Les eaux chlorurée et sulfatée calcique et magnésienne ont une dureté permanente (Ben moussa et al, 2019). Ce type d'eau résulte probablement de la dissolution des minéraux évaporitiques et carbonatés (Amor et Ben Messaoud, 2023).

On constate que la quasi-totalité des points d'eau de Ain Oussera se dans la zone de non dominance d'aucun cation. En revanche, pour le triangle des anions, on constate une évolution vers le pôle chloruré. Par ailleurs concernant le triangle de cation des eaux de Hassi Bahbah, la quasi-totalité des points se situent dans la zone de non dominance d'aucun cation, néanmoins on observe une évolution vers le pôle calcique d'un seul point d'eau. Concernant le triangle des anions, il apparait que la totalité des points d'eau se trouve également dans la zone de non dominance d'aucun anion, à l'exception d'un seul point qui évolue vers le pôle

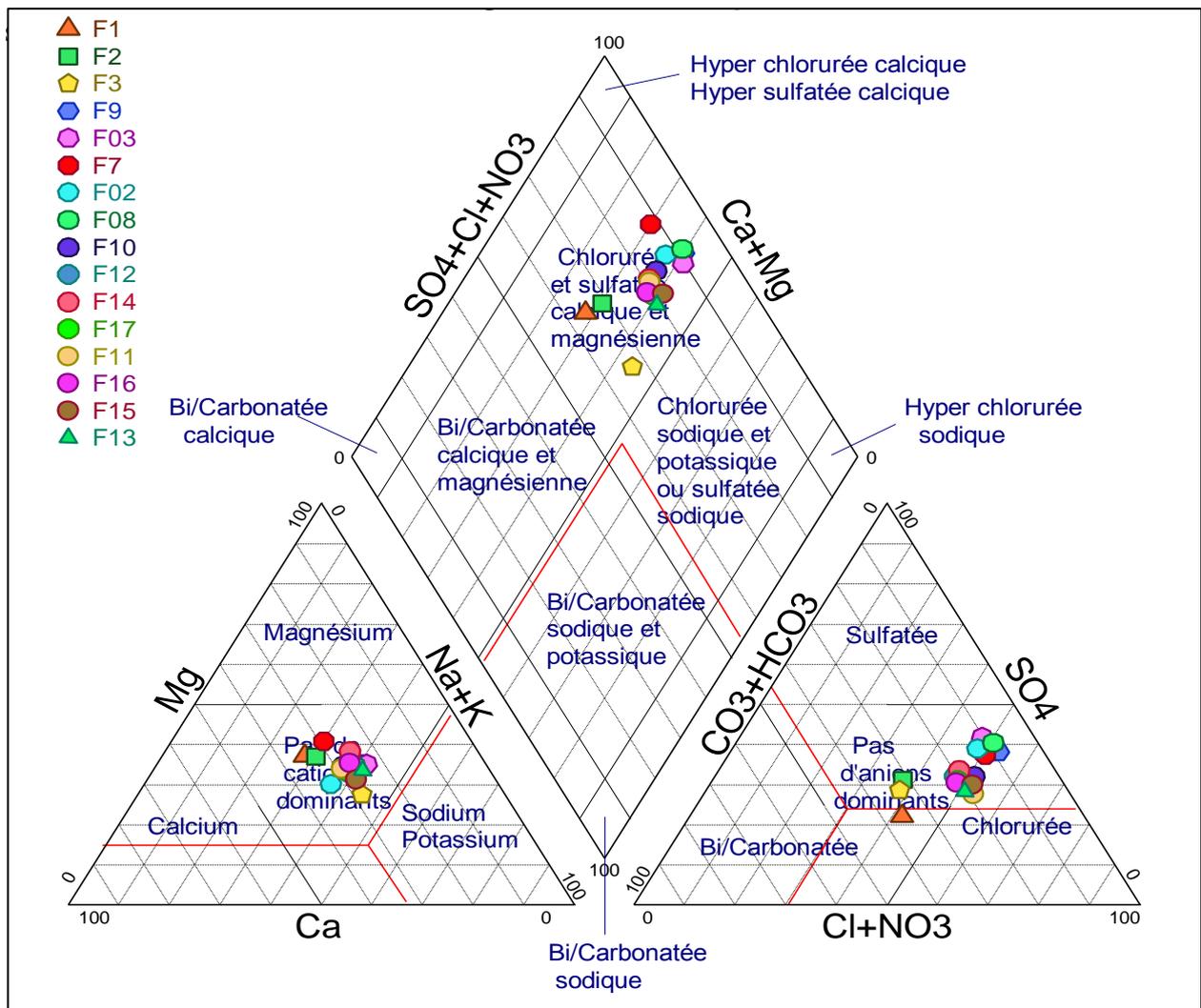


Figure IV.31 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Ain Oussera (Mars 2023)

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

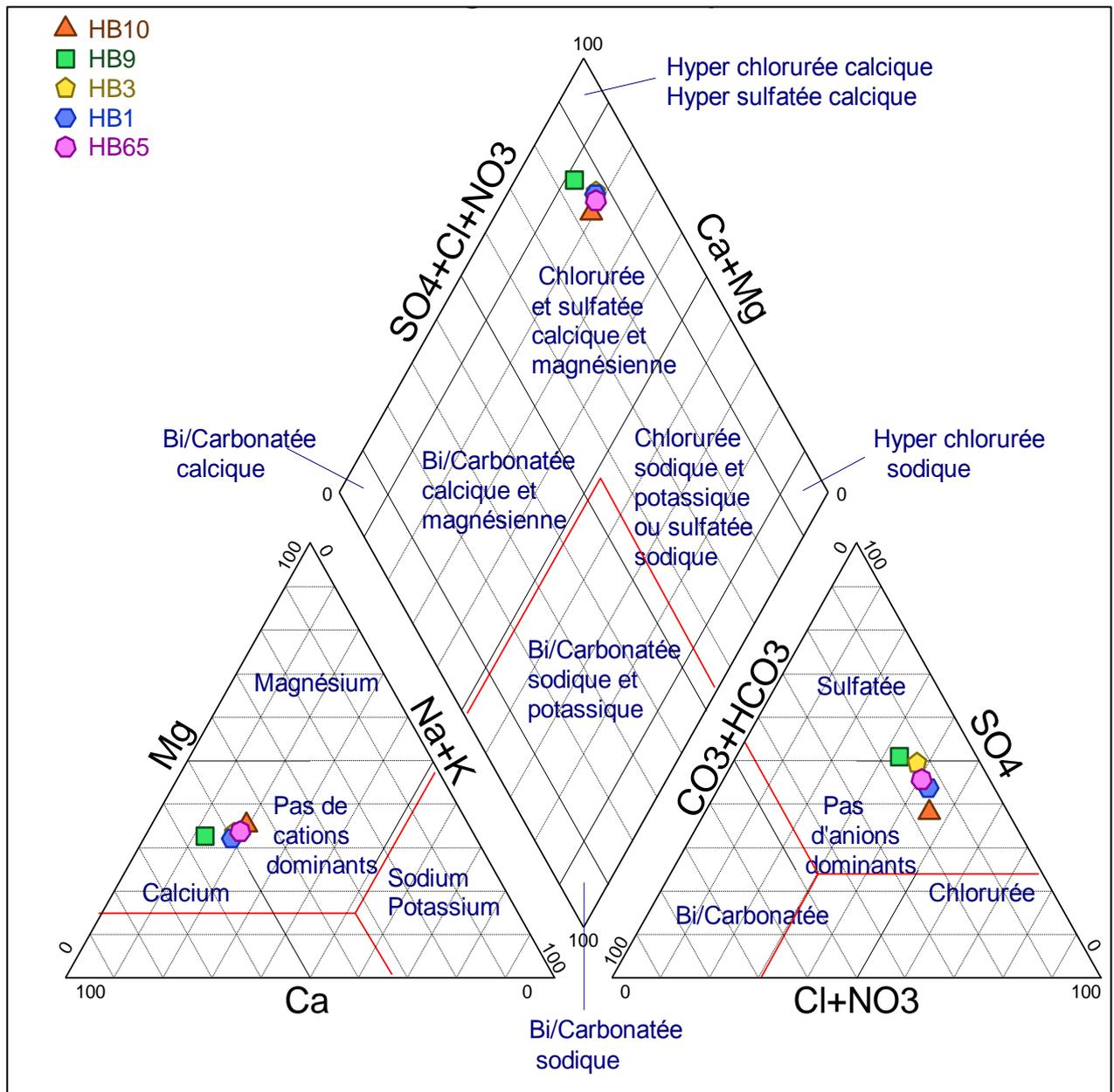


Figure IV. 32 :Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Hassi Bahbah

(Septembre 2022)

IV.3.2 Diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoëller- Berkaloff permet la représentation la composition chimique en éléments majeurs de chaque point. Les eaux ayant la même parenté chimique auront la même allure. La concentration de chaque élément chimique est représentée par une ligne verticale en échelle logarithmique. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée (Gouaidia, 2008 ; Ben Hamouda, 2008 ; Aouidane, 2017).

La représentation des éléments majeur des eaux de la nappe de Ain Oussera dans le diagramme Schoëller-Berkaloff révèle la dominance de types de faciès chimique (Figure

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.33), Chloruré sodique et Chloruré magnésienne. Par ailleurs, la quasi-totalité des eaux de forages de Hassi bahbah sont caractérisé par la dominance d'un faciès chimique sulfaté calcique (Figure IV.34). La dominance de ces faciès chimiques des eaux pourrait s'expliquer par la dissolution des minéraux évaporitiques (Aouidane, 2017).

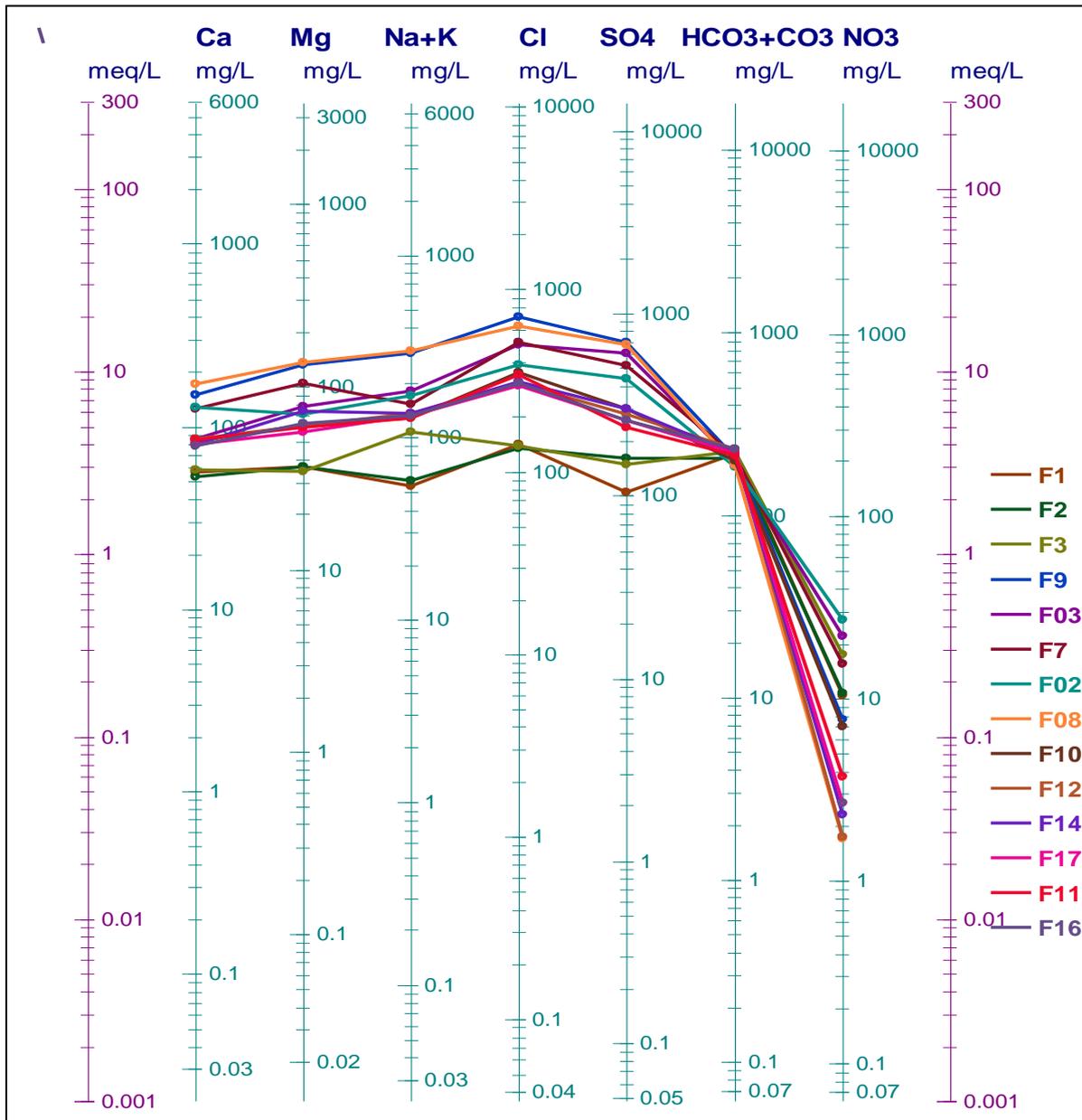


Figure IV.33 :Diagramme de Schöeller-Berkaloff pour les eaux souterraines de Ain Oussera (Mars 2023).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

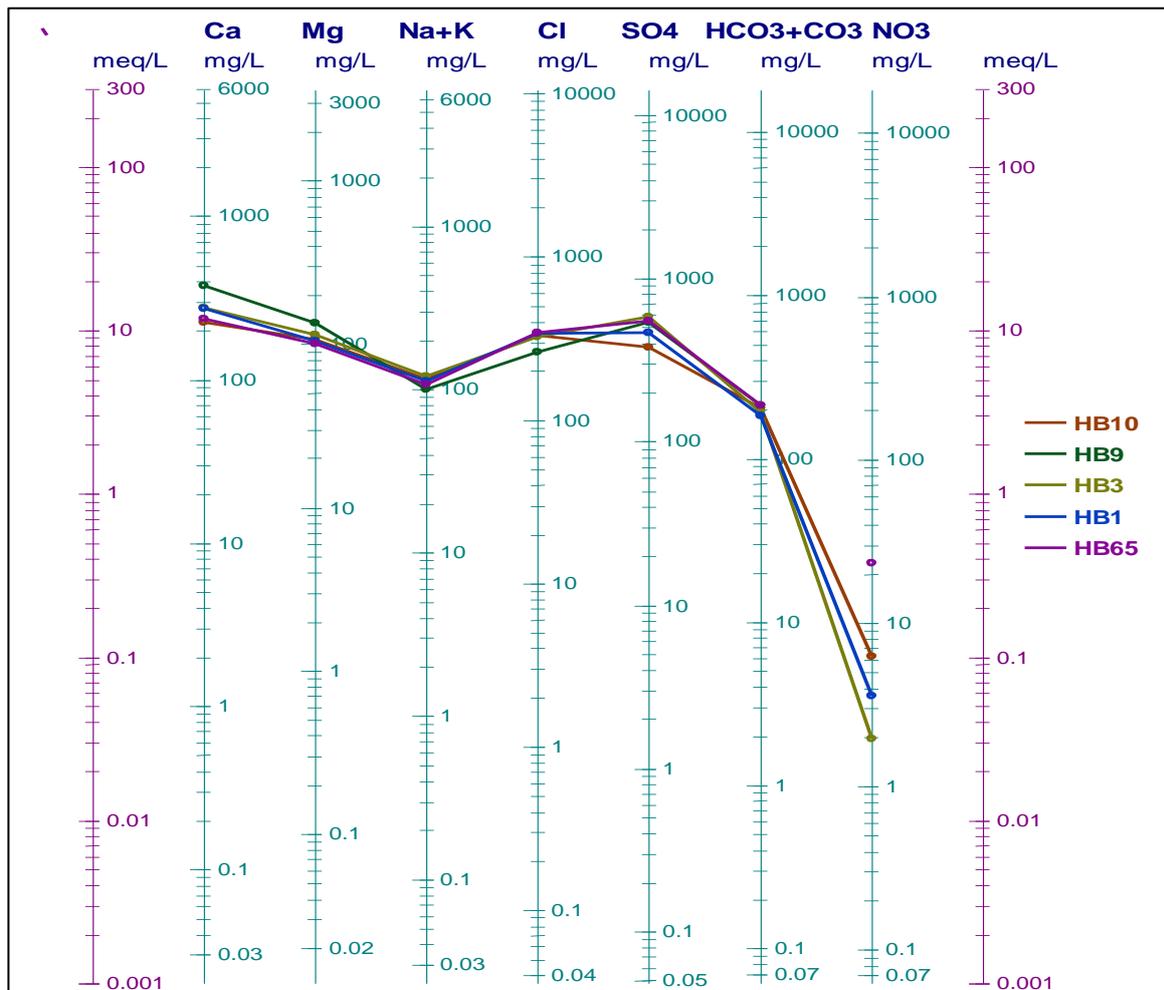
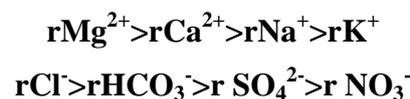


Figure IV.34 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff pour les eaux souterraines de Hassi Bahbah (Septembre 2022).

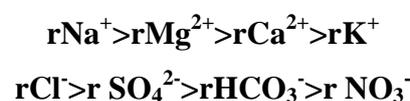
IV.3.3 Diagramme de Stabler

L'application de la méthode de Stabler permet de classer des eaux de la nappe de Ain Oussera en deux groupes :

Le groupe 1 rassemble les forages F1, F2, F7 et F14, est représenté 25% (Tableau IV.6). Ce groupe est caractérisé par un faciès chloruré magnésien, avec la dominance d'un ordre d'abondance des ions :

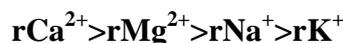


Le groupe 2 englobe les forages F3, F9, F03, F02, F08, F10, F12, F13, F11, F16, F15, F17, représentant 75% (Figure IV.35). Le faciès chimique de ces forages est chloruré sodique, avec un ordre d'abondance des ions



CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Concernant les eaux des forages de Hassi Bahbah la classification de Stabler met en évidence deux groupes : Le groupe 1 est composé des forages HB1, HB3, HB9, HB65 représentent 80%. Il est caractérisé par un faciès chimique sulfaté calcique (Tableau IV.5), avec un ordre d'abondance des ions :



Le groupe 2 a faciès chloruré calcique, représenté par le forage HB10 (Figure IV.36), caractérisé par un ordre d'abondance des ions :

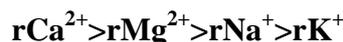


Tableau IV.5 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER (Hassi Bahbah, Septembre 2022).

Forages	r% cations	r% anions	Faciès chimiques
HB10	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré calcique
HB9	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Sulfaté calcique
HB3	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Sulfaté calcique
HB1	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Sulfaté calcique
HB65	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+ > K^+$	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Sulfaté calcique

Tableau IV.6: Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER (Ain Oussera, Mars 2023).

Forage	r% cations	r% anions	Faciès chimiques
F1	$Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$	Chloruré magnésien
F2	$Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$	Chloruré magnésien
F3	$Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+} > K^+$	$rCl^- > rHCO_3^- > rSO_4^{2-} > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F9	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F03	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F7	$Mg^{2+} > Ca^{2+} > Na^+ > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré magnésien
F02	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F08	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F10	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F12	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F14	$Mg^{2+} > Na^+ > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré magnésien
F17	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F11	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F16	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F15	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique
F13	$Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$	$rCl^- > rSO_4^{2-} > rHCO_3^- > rNO_3^-$	Chloruré sodique

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

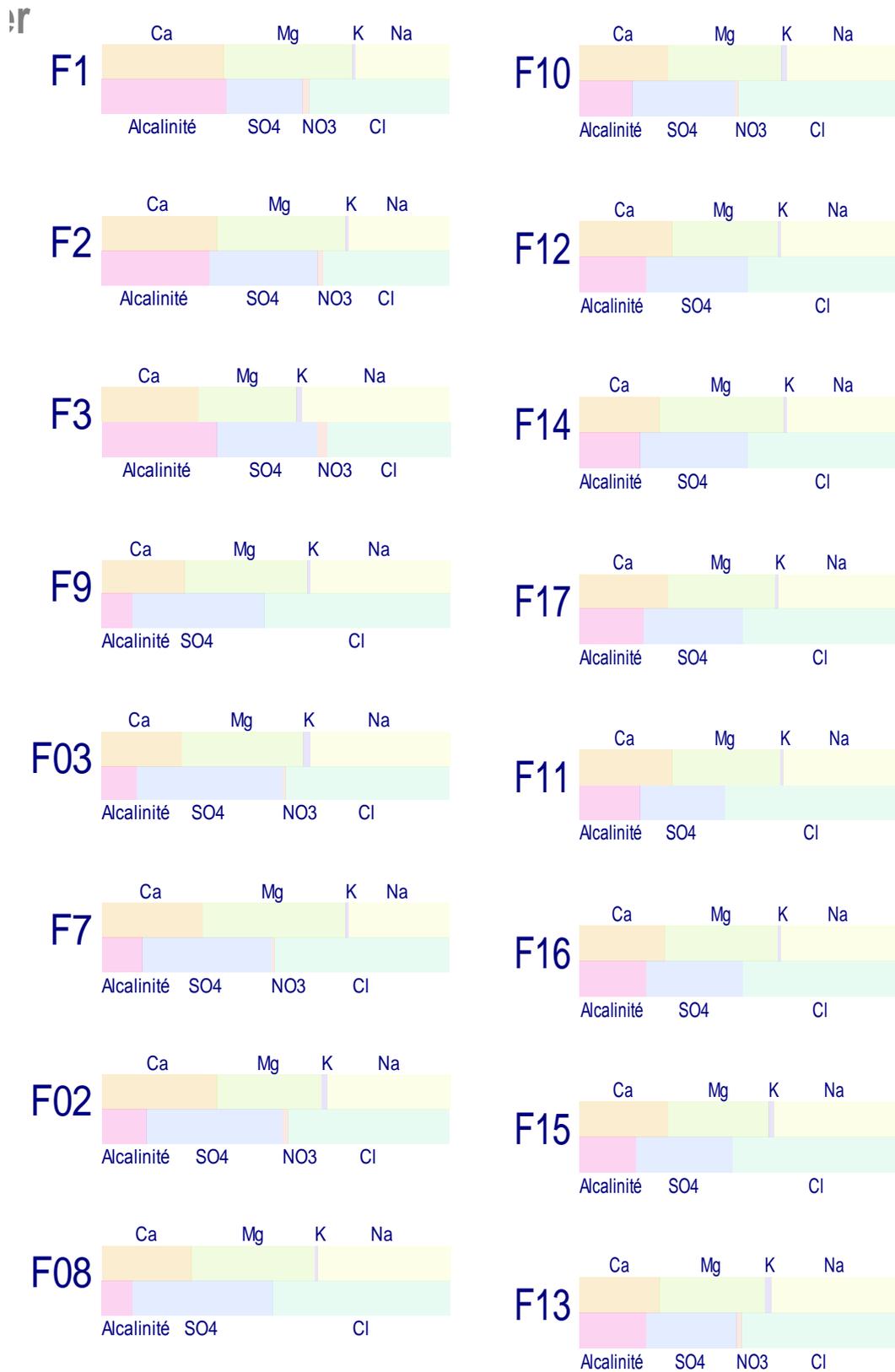


Figure IV.35 : Classification des eaux selon le diagramme de Stabler (Ain Oussera, Mars 2023).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

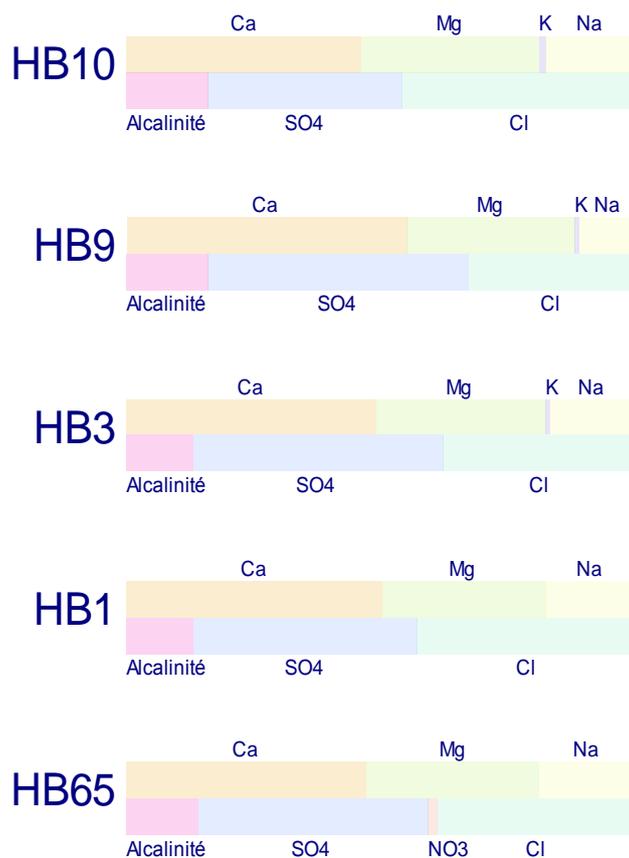


Figure IV.36 : Classification des eaux selon le diagramme de Stabler (Hassi Bahbah, Septembre 2022)

IV.3.4 Diagramme de Stiff

La représentation de Stiff consiste à construire, pour chaque échantillon, un diagramme sous forme de polygone qui prend une forme géométrique selon la teneur des éléments chimiques considérés (Amor et Ben Messaoud, 2023).

La représentation des concentrations des éléments majeurs (nappe de Ain Oussera) sur le diagramme de Stiff a permis de mettre en évidence l'existence de deux groupes (Figure IV.37) :

Le groupe 1 est composé des forages F17, F11, F16, F15, F13, F10, F12, F08, F3, F03, F02, F08, F9 caractérisé par un faciès chimique Chloruré sodique. Le groupe 2 rassemble les forages F1, F2, F7, F14, représenté par un faciès chimique Chloruré magnésien.

Concernant les eaux des forages de Hassi Bahbah l'utilisation de diagramme de Stiff a permis de distinguer deux :

Le groupe 1 à faciès Sulfaté calcique, représenté par les forages HB9, HB65, HB3, HB1.

Le groupe 2 composé de forage HB10, caractérisé par un faciès chloruré calcique.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

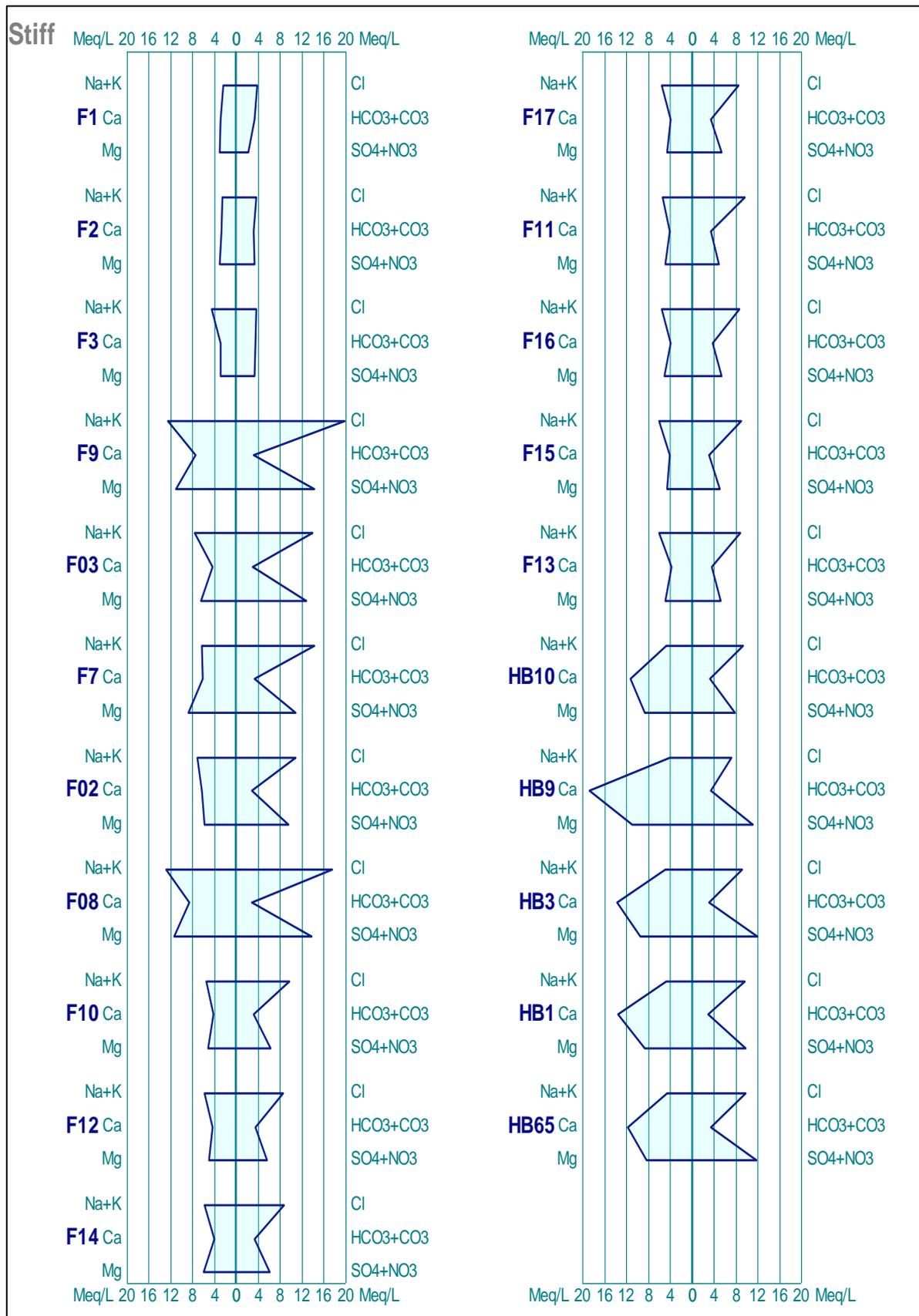


Figure IV.37 : Classification des eaux selon le diagramme de Stiff (Ain Oussera, Mars 2023 et Hassi Bahbah, Septembre 2022)

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.4 Mécanismes d'acquisitions de la minéralisation des eaux

IV.4.1 Corrélations éléments/résidu sec (TDS)

Des corrélations établies entre la concentration de chaque élément majeur et le résidu sec (TDS) des eaux souterraines sont utilisées pour mettre en évidence les différents mécanismes qui contribuent à la salinisation des eaux souterraines (Kamel et al, 2006) (Figure IV.38). Pour la quasi-totalité points d'eau, la variabilité de minéralisation totale est principalement liée au calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}), avec des coefficients de détermination de $R^2=0,90$ pour le calcium, $R^2=0,93$ pour le magnésium, $R^2=0,83$ pour le sodium, $R^2=0,97$ pour les chlorures, et $R^2= 0,91$ pour les sulfates. La présence d'une corrélation positive entre ces ions et la minéralisation totale traduit la participation de ces éléments à l'acquisition de la charge saline (Ben Alaya et al, 2014). Le potassium (K^+) et les bicarbonates viennent en deuxième position, avec des R^2 de 0,48 pour le potassium (K^+) et de 0,21 pour les bicarbonates (HCO_3^-). Enfin, une très faible corrélation a été observée entre les teneurs en nitrates (NO_3^-) et le TDS, avec un $R^2=0,0006$, ce qui indique une faible contribution de ces éléments dans la minéralisation des eaux.

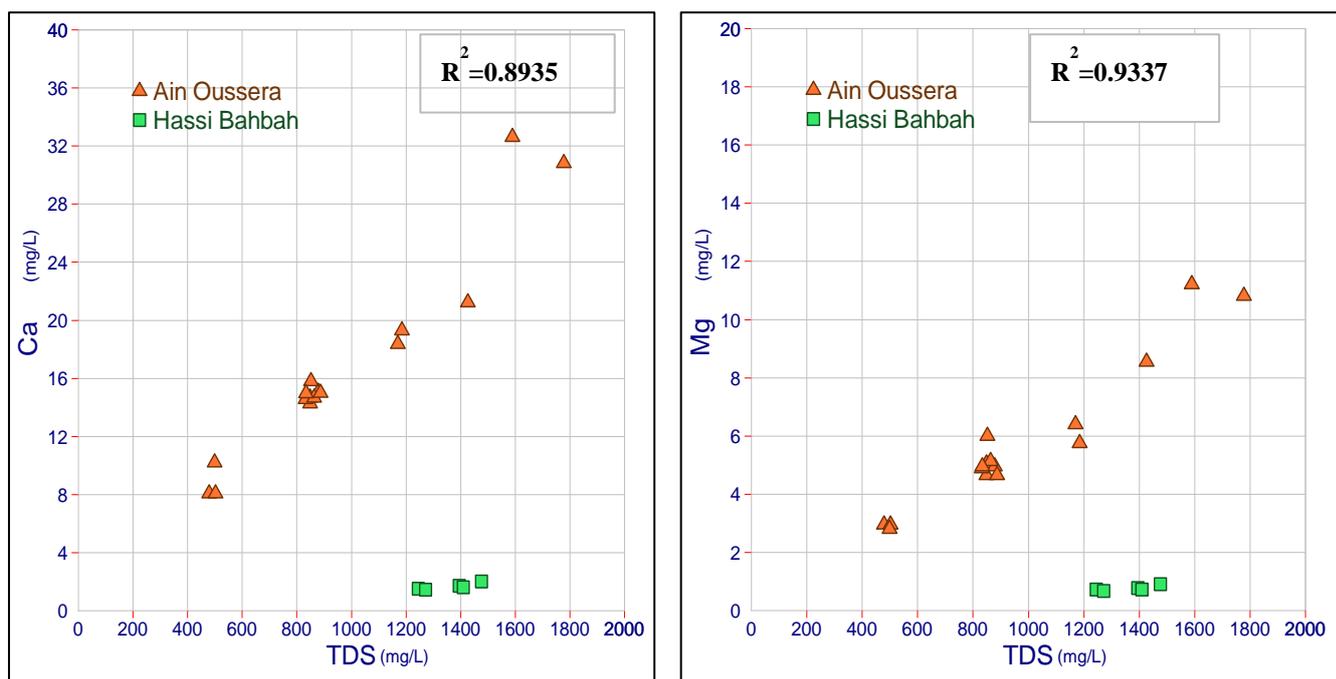
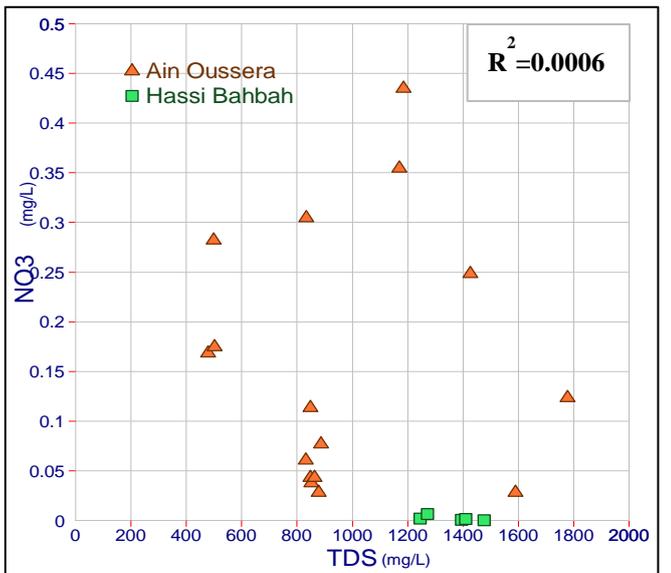
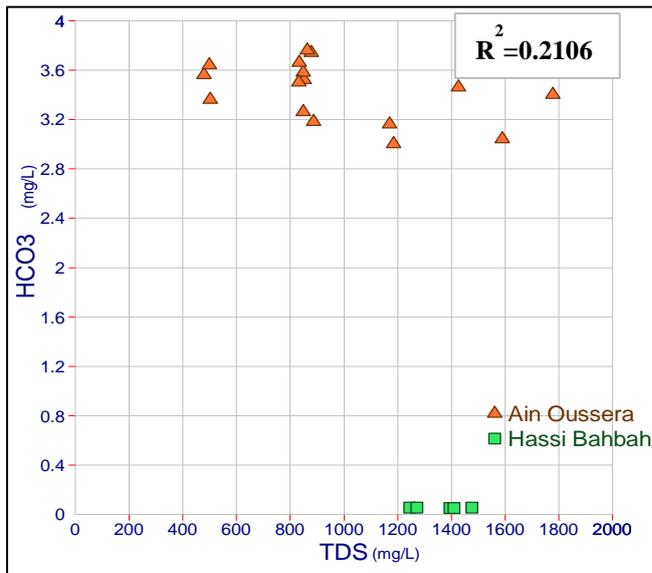
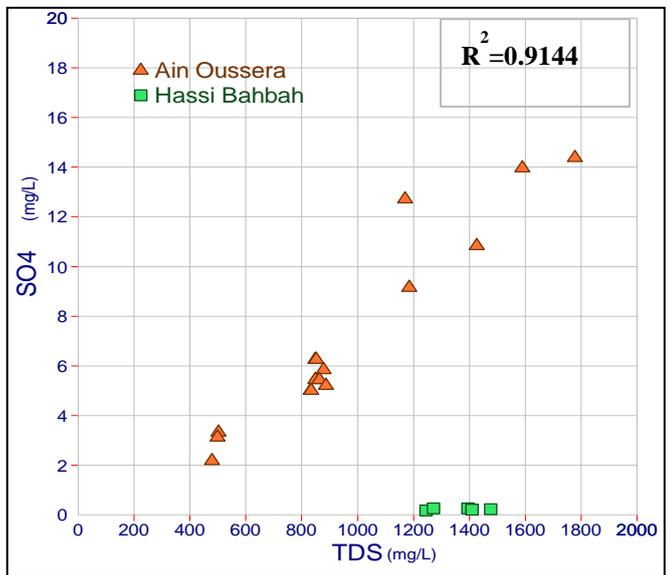
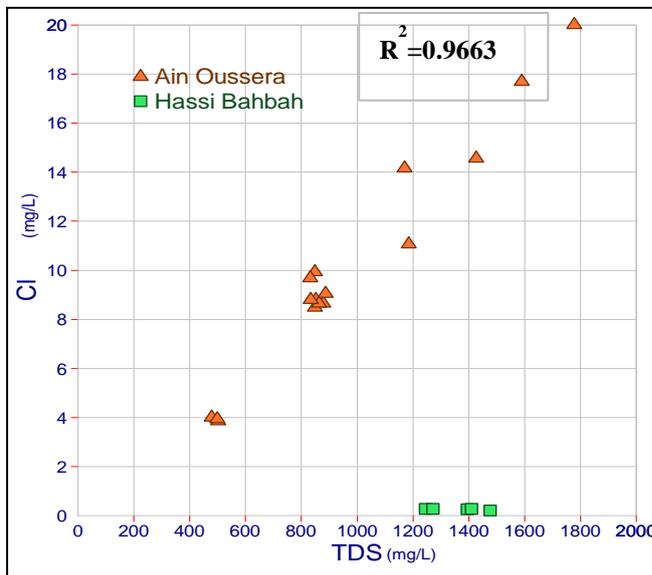
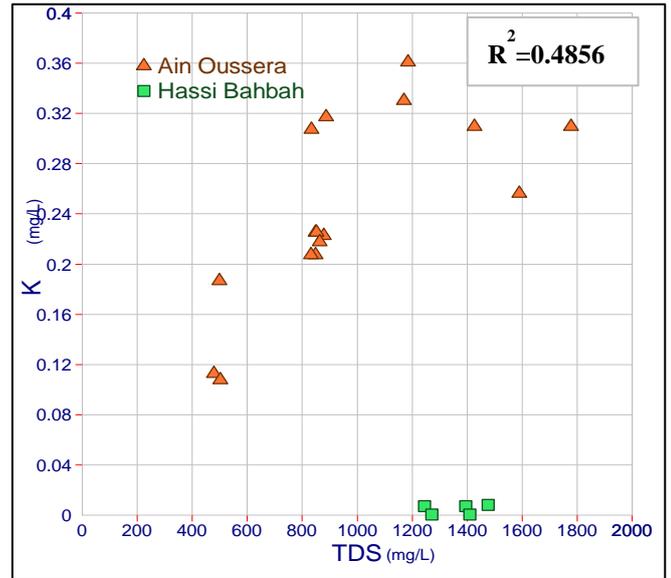
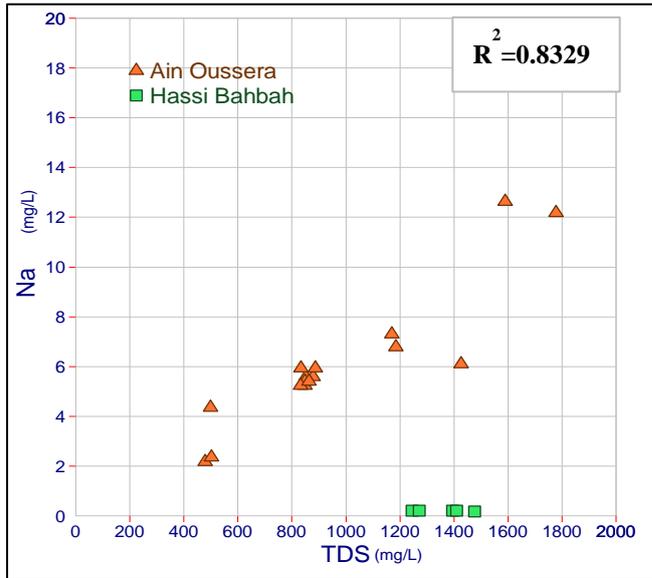


Figure IV.38: Variation des concentrations des éléments majeurs en fonction de la avec la minéralisation totale des eaux TDS.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION



CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.4.2 Corrélations entre éléments majeurs :

Le couple $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$:

Ces deux éléments chimiques dans les eaux naturelles sont souvent liés à la dissolution de l'halite (NaCl) (Hachaichi, 2017). L'évolution de Na^+ est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites (Kraiem, 2015 ; Bouselsal, 2016 ; Hachaichi, 2017). Le diagramme $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ montre que la quasi-totalité des points d'eau de la nappe albien de Ain Oussera et la nappe turonien de Hassi Bahbah sont situées au-dessous de la droite d'équilibre pente 1 (droite de la dissolution de l'halite) (Figure IV.39), indiquant un déficit en sodium (Na^+). Il est à signaler que ce déficit peut être attribué aux mécanismes d'échange de bases entre l'eau et la roche de l'aquifère (interaction eau-roche), selon l'équation suivante (Jones et al, 1997 ; Najib et el 2016 ; Abid et al, 2009):

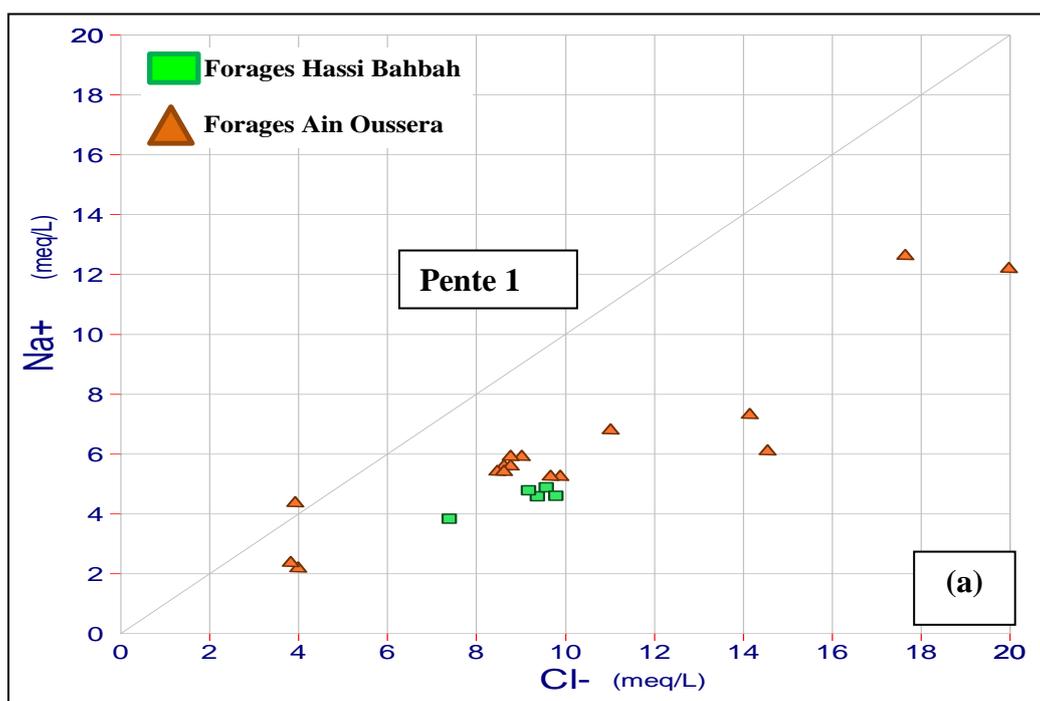


Figure IV.39: Rapport $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$.

Le couple $\text{Ca}^{2+} / \text{SO}_4^{2-}$:

Les résultats obtenus (Figure IV.40) montrent que la majorité des points analytiques sont situés au-dessous ou proche de la droite de pente 1 (dissolution du gypse). En revanche, pour les eaux souterraines de Hassi Bahbah, la quasi-totalité des points analytiques présentent un excès en Ca^{2+} par rapport à SO_4^{2-} . Cet enrichissement en Ca^{2+} accompagné d'un déficit en Na^+ indique la participation de ces deux ions dans les échanges cationiques (Bekkoussa et al, 2013). Il est à noter que l'origine des sulfates est probablement liée à la dissolution de gypse

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

(CaSO₄·2H₂O) ou de l'anhydrite (CaSO₄) avec toutefois la présence d'autres phénomènes qui sont à l'origine de cet excès et/ou déficit en Ca²⁺ (Dhaoui, 2010). Les eaux se chargent au cours de leurs trajets par dissolution du gypse ou de l'anhydrite (Hachaichi, 2016). Du fait de la valeur élevée de la constante d'équilibre, (log K_s = - 4.85), la solubilité du gypse est plus rapide :

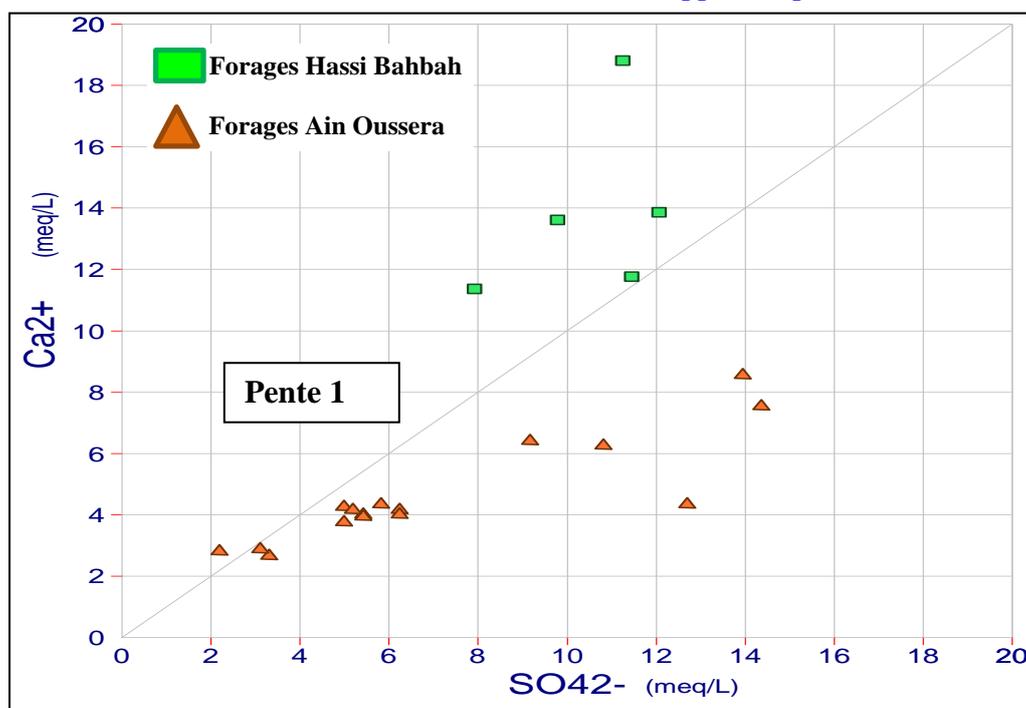
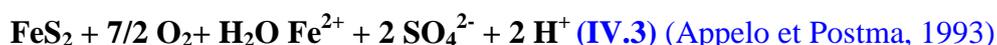


Figure IV.40: Rapport Ca²⁺ /SO₄²⁻.

Le couple Mg²⁺ / SO₄²⁻ :

La Figure IV.41 illustre l'étroite corrélation entre SO₄²⁻ et Mg²⁺ (R² = 0,85). En effet, la quasi-totalité des points d'eau se situent autour de la droite de pente 1, ce qui s'explique par la dissolution du sulfate de magnésium (MgSO₄) (Korchi et Magri, 2016). Cependant, pour les points d'eau restants, se positionnent au-dessous de la droite de mise en solution du sulfate de magnésium (MgSO₄) traduisent un déficit en Mg²⁺, ceci est peut-être attribué à une à une précipitation de dolomite et/ou à un échange de base (Ca/Na) et (Mg/Na) sur les minéraux argileux, dont l'intervention est suggérée par une relative variation des teneurs de Na⁺ par rapport à Cl⁻ (Ben alaya et al, 2014). Le sulfate (SO₄²⁻) est en excès par rapport au magnésium, indiquant une autre origine du sulfate, telle que le gypse, l'anhydrite, et/ou le phénomène d'oxydation de la pyrite (FeS₂) (Korchi et Magri, 2016) (réaction IV.2).



CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

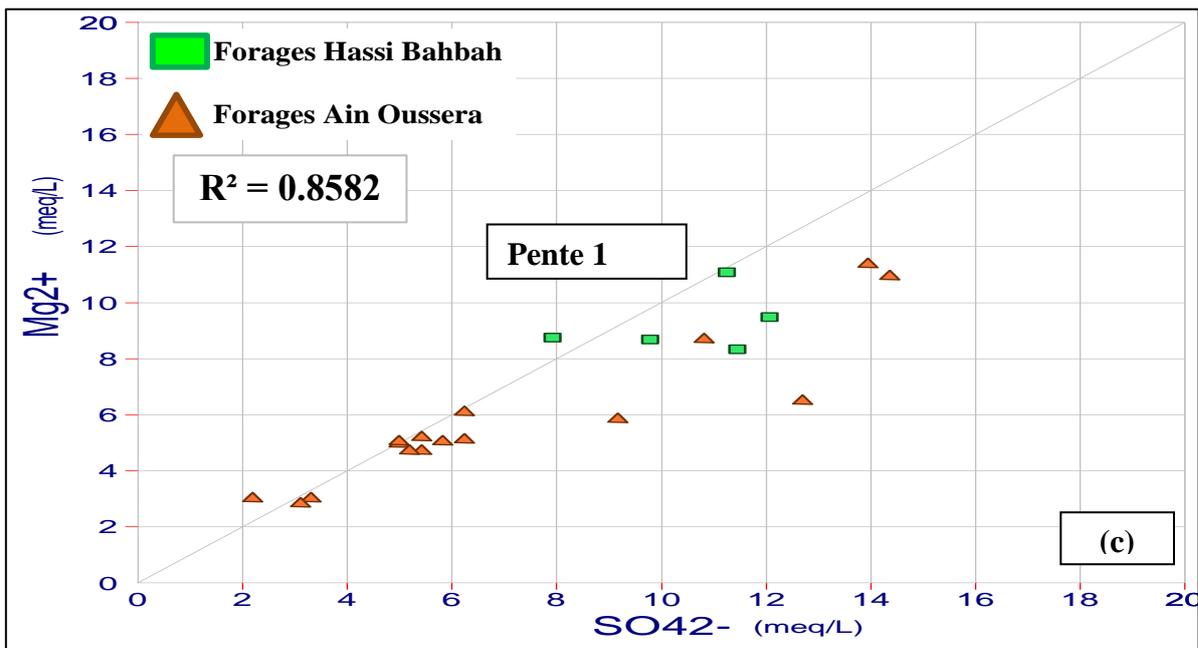


Figure IV.41: Rapport Mg^{2+}/SO_4^{2-} .

Le couple Ca^{2+} / HCO_3^- :

La représentation de Ca^{2+} en fonction de HCO_3^- (Figure IV.42) montre que tous les points se positionnent au-dessus de la droite de pente 1 (droite de précipitation/dissolution des carbonates), indiquant un excès des ions Ca^{2+} par rapport au HCO_3^- , expliquant la dissolution de gypse avec un effet d'échange des bases (Ben alaya et al, 2014 ; Aouidane, 2017).

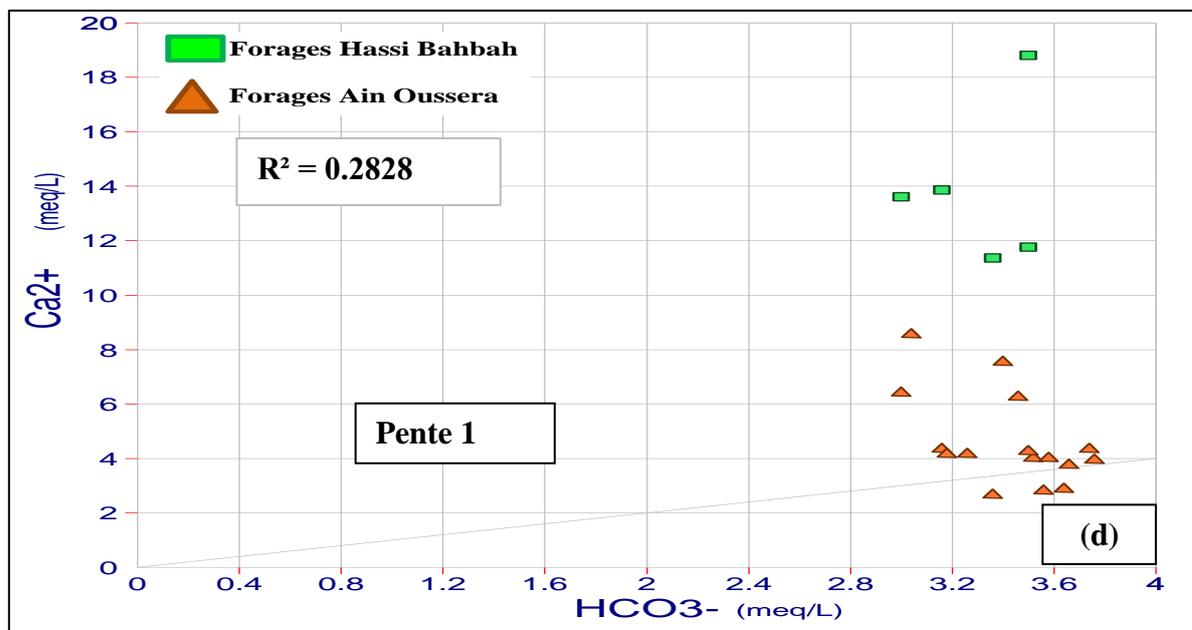


Figure IV.42: Rapport Ca^{2+}/HCO_3^- .

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Diagramme de $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- :

La Figure IV.43 montre que la majorité des points se positionnent au-dessus de la droite de la dissolution des carbonates (calcite (CaCO_3), dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$). Ces résultats traduisent des eaux plus riches en $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ qu'en HCO_3^- (Maizi, 2014). L'excès de calcium et de magnésium s'explique par la dissolution des minéraux évaporitiques (gypse et l'anhydrite) combinés avec le phénomène d'échange des bases (Kraiem, 2015).

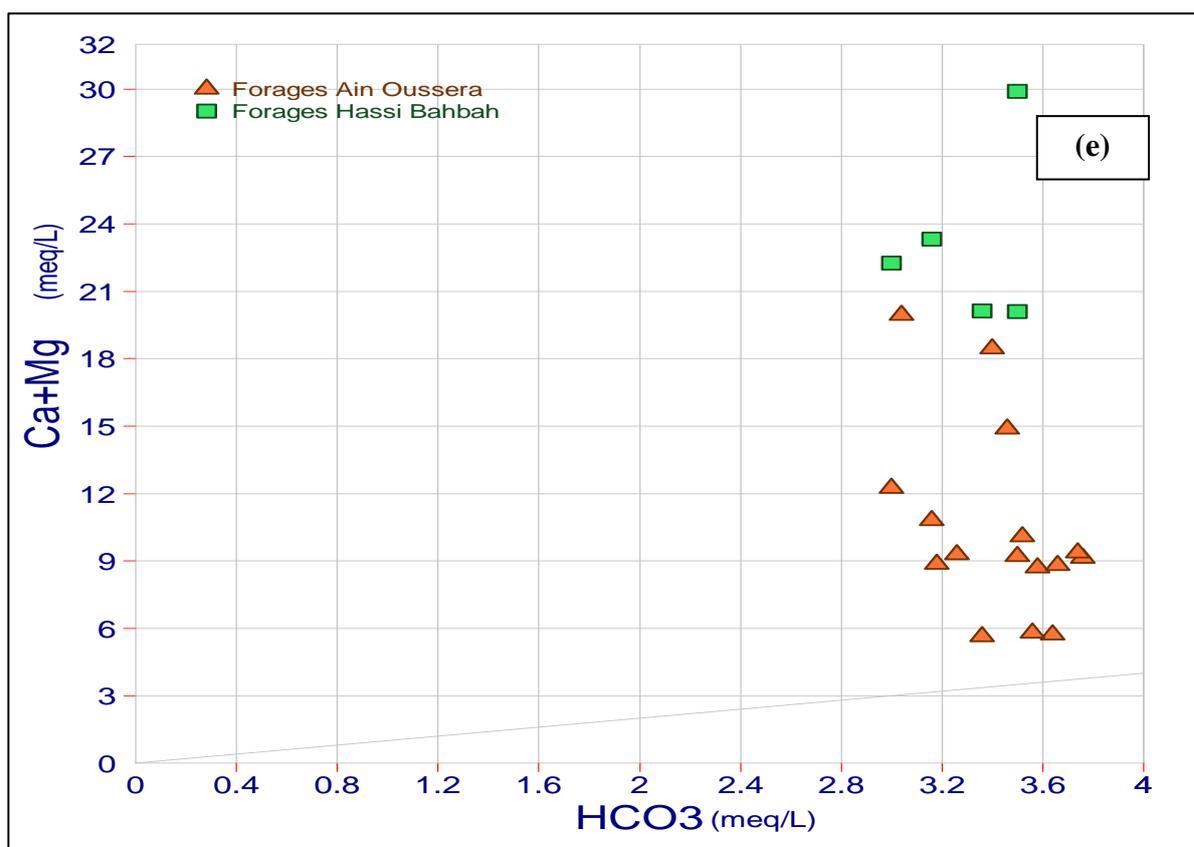


Figure IV.43: Rapport $\text{Ca}^{2+}\text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^-$.

Diagramme $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$:

Le diagramme $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ (Figure IV.44) montre que la plupart des points analytiques se positionnent au-dessus ou près de la droite de pente 1 (dissolution des minéraux évaporitiques et carbonatés). Cela suggère que ces ions résultent de la dissolution de la calcite, de la dolomie et du gypse (Cerling et al, 1989 ; Datta et al., 1996 ; Fisher et Mulican, 1997 ; Rajmohan et al., 2004 ; Touhari, 2015 ; Amor et Ben Messaoud, 2023). Si l'échange ionique inverse est le processus dominant, les points se déplaceront vers la gauche

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

en raison d'un excès de $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ par rapport au $(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$. L'échange ionique tend à déplacer les points vers la droite due à un excès de $(SO_4^{2-} + HCO_3^-)$ (Cerling et al., 1989 ; Fisher et Mulican, 1997 ; Amor et Ben messaoud, 2023)

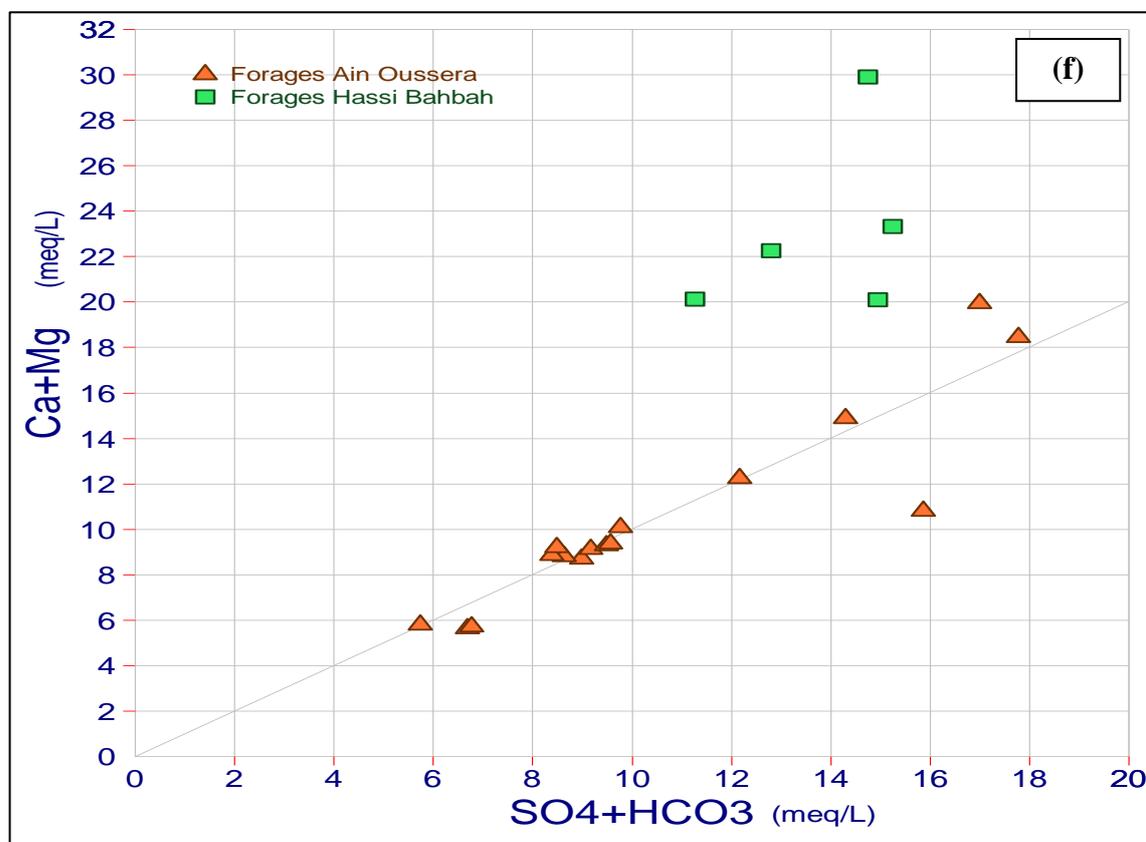


Figure IV.44: Rapport $Ca^{2+}Mg^{2+}/SO_4^{2-} HCO_3^-$.

Diagramme Mg^{2+} vs Ca^{2+} :

Le diagramme (Figure IV.45) permet de classer les points d'eau en trois groupes distincts. Le premier group, ou les points se situent proche de la droite de la pente 1 indique ainsi que le calcium et le magnésium ont une origine commune qui serait la dissolution des calcaires dolomitiques (Bekkoussa et al, 2013). Le deuxième groupe, ou les points se positionnent au-dessus de la droite de pente 1, indiquant un excès des ions Mg^{2+} par rapport au Ca^{2+} , expliquent la dissolution de sulfate de magnésium ($MgSO_4$). Le troisième groupe est celle des points au-dessous de la ligne de pente 1 indique un excès en Ca^{2+} par rapport au Mg^{2+} , pourrait être expliqué par dissolution de calcite, de gypse combiné avec d'autres processus géochimiques telles que les échanges de bases (Dhaoui, 2010 ; Maizi, 2014).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

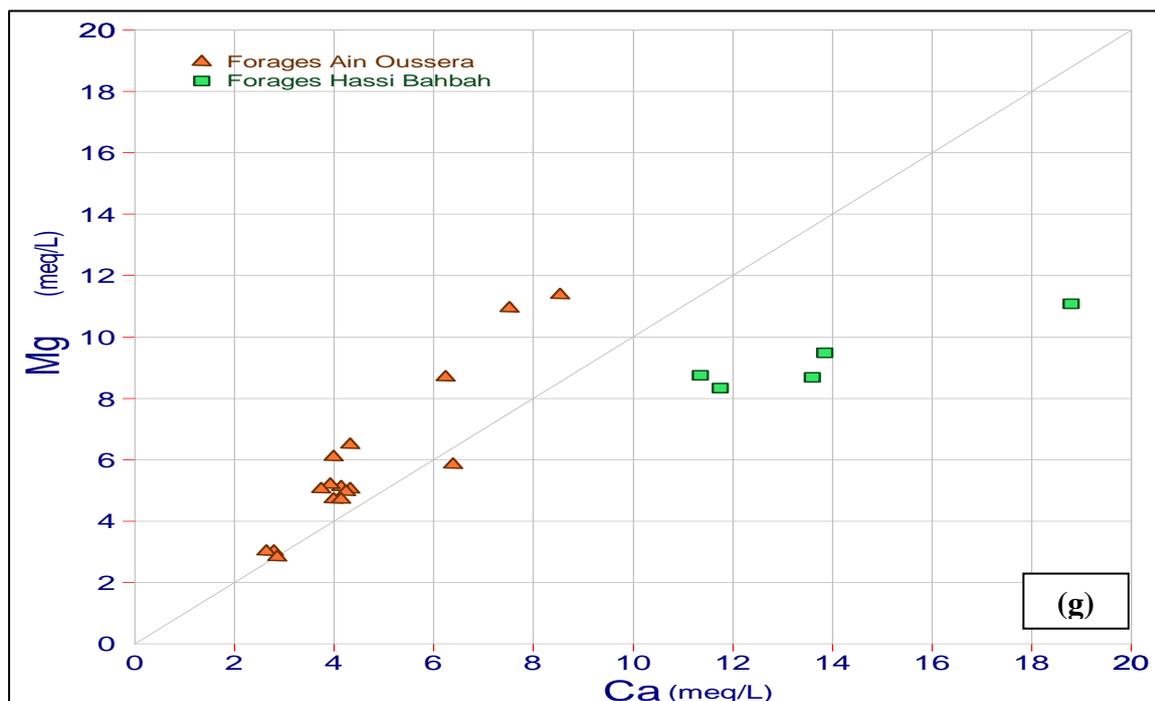


Figure IV.45: Rapport Ca^{2+}/Mg^{2+} .

IV.5. Mise en évidence des échanges de base

IV.5.1 La relation $[(Na^+ + K^+) - Cl^-] vs [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})]$

D'autres diagrammes ont été utilisés par différents auteurs pour déterminer les processus géochimiques les plus dominants dans les eaux souterraines. Parmi lesquels, l'étude de la relation entre $[(Na^+ + K^+) - Cl^-] vs [(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (SO_4^{2-} + HCO_3^-)]$ (Figure IV.46) qui donne une vision plus claire sur les processus d'échange cationiques (Garcia et al, 2001 ; Kraiem,2015 ; Farid et al, 2015 ; Aouidane,2017). Ces échanges se manifestent par une pente de -1, visible par la position des échantillons. En l'absence des échanges de bases, tous les points représentatifs des échantillons devraient se situer près du point d'origine (McLean et al., 2000 ; Abid, 2010 ; Amor et Ben Messaoud, 2023). Ces échanges se manifestent par une pente de -1, visible par la position des échantillons. En l'absence de ces réactions, tous les points représentatifs des échantillons devraient se situer près du point d'origine (McLean et al., 2000 ; Abid, 2010 ; Amor et Ben Messaoud, 2023). D'une façon générale, l'alignement des points sur une droite de pente -1 indique la contribution de l'échange de base à l'évolution de la chimie des eaux (Hadj Ammar, 2016 ; Yidana et al., 2008).

Les équations représentatives de phénomène d'échange cationique sont les suivantes (Hadj Ammar, 2016) :



Avec : X présente un site d'échange au niveau des minéraux argileux.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

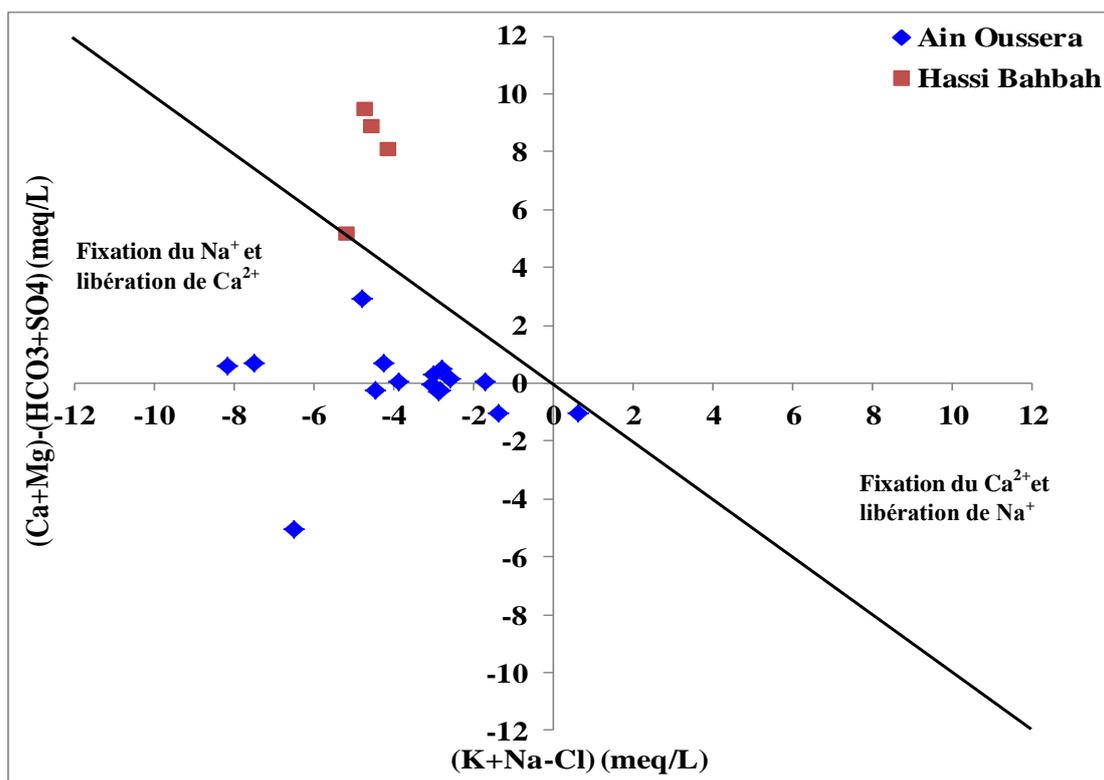


Figure IV.46 : Corrélation $(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-)$ en fonction de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ pour les eaux.

IV.5.2 Indice d'échange de base (I.E.B)

L'indice d'échange de base (i.e.b) ou indice d'équilibre chloro alcalin, établi par (Schoeller, 1977), définit l'échange qui existe entre l'eau et les terrains encaissants. Il est énoncé par la formule suivante (Zerdane, 2013 ; Maizi, 2014) :

$$\text{I.E.B} = \frac{r\text{Cl} - r(\text{Na} + \text{k})}{r\text{Cl}} \quad (\text{IV.9})$$

Les concentrations exprimées en en meq/l

Selon Schoeller :

Si $\text{i.e.b} > 0$: Le Na^+ de l'eau est échangé contre le Ca^{2+} et Mg^{2+} de la formation.

Si $\text{i.e.b} < 0$: Le Ca^{2+} et Mg^{2+} sont échangés contre le Na^+ de la formation.

Si $\text{i.e.b} = 0$: Il n'y a pas d'échange ionique entre la roche et l'eau (état d'équilibre)

La quasi-totalité des échantillons ont un indice positif (Figure IV.47). Cette dominance des valeurs positives reflète le remplacement du sodium (Na^+) dans l'eau souterraine par le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}) des terrains traversés (Zerdane, 2013 ; Maizi, 2014 ; Touhari, 2015 ; Korchi et magri, 2016 ; Merzougui, 2020 ; Amor et Ben Messaoud, 2023 ; Arif et Meriouma, 2023).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

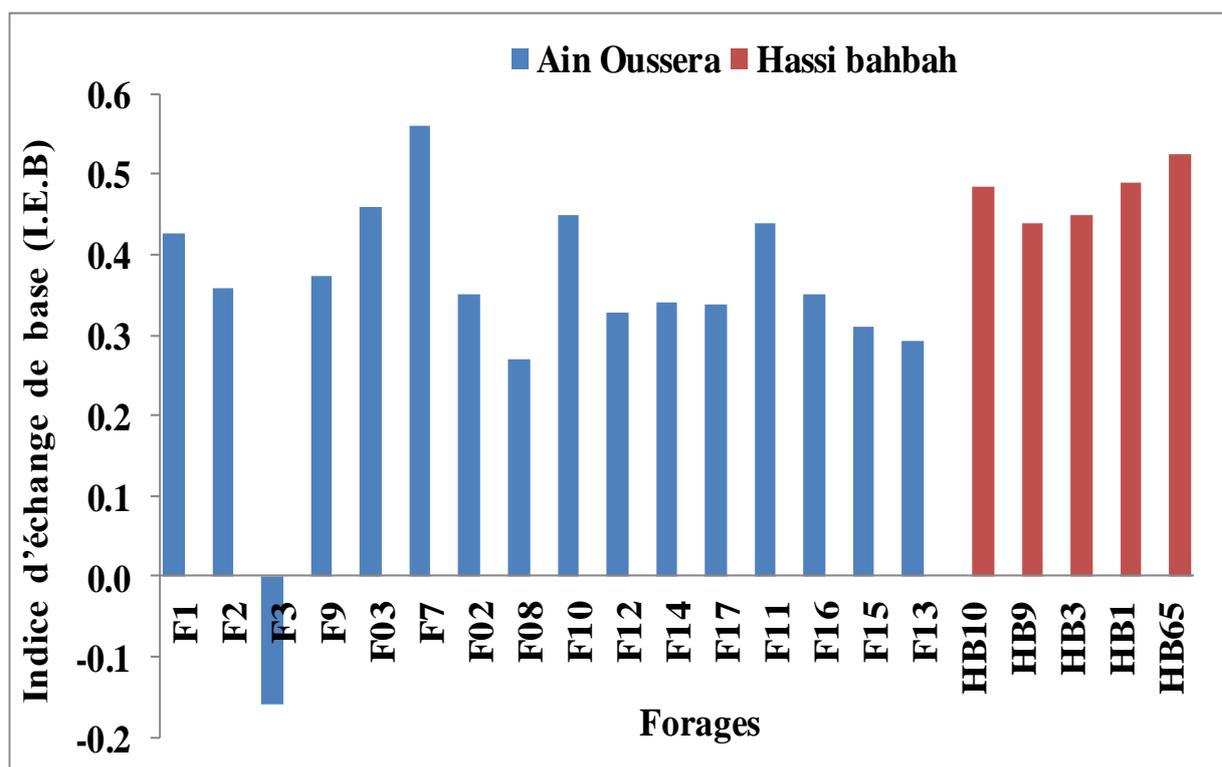


Figure IV.47: Variation d'indice d'échange de base des eaux souterraines de Ain Oussera et Hassi Bahbah

IV.6 Indice de saturation des eaux

Afin de mieux comprendre les mécanismes de dissolution/précipitation des minéraux (interaction eau-roche) on utilise l'indice de saturation (IS) des eaux vis-à-vis des minéraux. L'utilisation de ces indices est utile pour déterminer l'influence de l'environnement géologique dans lequel percolent les eaux et si les éléments chimiques présents dans le milieu sont en formes dissoute ou précipitée (Hadj Ammar, 2016).

Le IS est calculé en utilisant l'équation $IS = \log (PAI/Ks)$ (IV.10) (Drever, 1997 ; Najib et al, 2016) où PAI est le produit d'activité ionique et Ks le produit de solubilité du minéral.

Si $IS < 0$, l'eau est en état de sous saturation (dissolution du minéral),

Si le $IS = 0$, l'eau est à l'équilibre avec le minéral,

Et si $IS > 0$, l'eau est en état de sursaturation (précipitation du minéral).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.6.1 Les minéraux évaporitiques

Les indices de saturation (IS) vis-à-vis de l'halite (Plummer et al. 1976), pour l'ensemble des échantillons varient de -6.73 à -5.35 avec une moyenne de -6.03 (Figure V.48a), ce qui illustre une sous saturation, ce qui reflète la dissolution du NaCl ($R^2=0,98$). La Figure V.48.b montre une forte corrélation ($R^2=0,98$) entre IS gypse et $Ca^{2+} + SO_4^{2-}$, ce qui peut indiquer la dissolution de ce minéral. Cet indice de saturation varie pour l'ensemble des échantillons analysés de -1.74 à -0.61 avec une moyenne de -1.12. Les eaux souterraines de la zone d'étude sont sous saturées vis-à-vis du gypse ce qui tend à renforcer l'hypothèse de la dissolution de ce minéral (Yermani et Zouari 2003, Kamel et al. 2006 ; Bekkousa et al, 2013 ; Ben moussa et al, 2019). Il est à signaler que la variation des indices de saturations des minéraux évaporitiques présente des relations paraboliques avec les éléments ($Na^+ + Cl^-$) et ($Ca^{2+} + SO_4^{2-}$), ce qui sont respectivement la halite et le gypse et/ou l'anhydrite, traduisant un état de dissolution de ces minéraux.

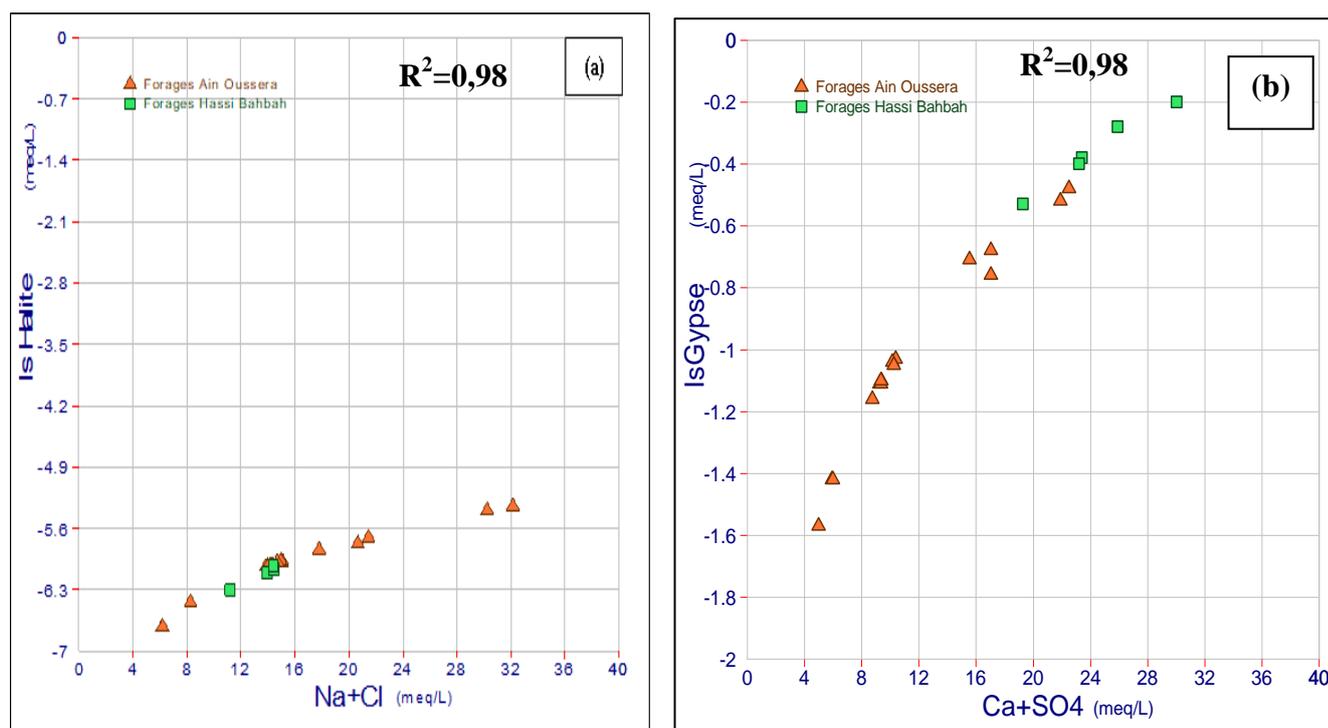


Figure IV.48 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis des minéraux évaporitiques (a : vis-à-vis de l'halite ; b :vis-à-vis de gypse)

IV.6.2 Les minéraux carbonatés

Les indices de saturation (IS) vis-à-vis de Calcite pour l'ensemble des échantillons varient de -0.41 à 0.14 avec une moyenne de -0.09, tandis que pour la dolomite les valeurs de ces indices oscillent entre -1.01 et 0.34 avec une moyenne de -0.08 (Figure. IV.49.b).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'absence de corrélations entre les indices de saturation des eaux vis-à-vis de la calcite en fonction de $\text{Ca}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ (Figure. IV.49.a) et de la dolomite en fonction de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{HCO}_3^-$ (Figure. V.49.b) infirme la dissolution de ces minéraux carbonatés, malgré l'état de sous-saturation observé. La sursaturation des eaux en calcite est confirmée par l'excès en Ca^{2+} et Mg^{2+} d'après les diagrammes binaires (Ca^{2+} vs HCO_3^- , $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}$ vs $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$, Ca^{2+} vs SO_4^{2-}) (Najib et al., 2016).

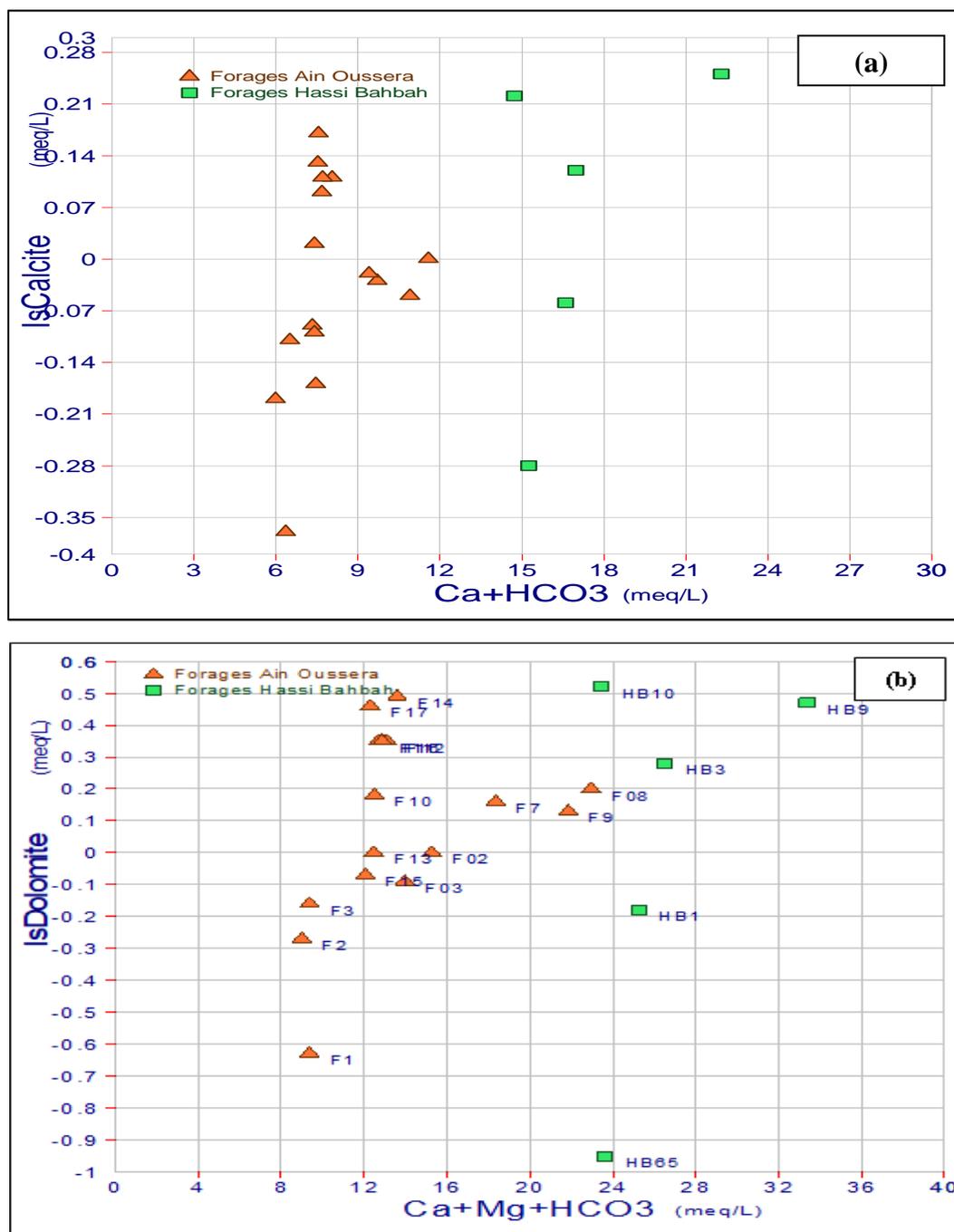


Figure IV.49 : Indices de saturation des eaux souterraines vis-à-vis des minéraux carbonatés(a : vis-à-vis de la calcite ; b :vis-à-vis de dolomite).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.7 Étude Statistique

IV.7.1. Analyse statistique des données chimiques.

IV.7.1.1. Statistique descriptive

La nappe de l'albien d'Ain Oussera :

Les paramètres statistiques des données hydrochimiques sont récapitulés dans le [Tableau IV.1](#). Les analyses physico-chimiques de l'année 2013 montrent que le pH varie de 7,58 à 7,89 avec une moyenne de 7,72 et un écart type de 0,1. Les valeurs de la conductivité électrique varient de 1624 à 3300 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de 2170,44 $\mu\text{S/cm}$ et un écart type de l'ordre de 571,27 $\mu\text{S/cm}$. La minéralisation totale (TDS) montre une variation importante, avec un minimum de 794 mg/l et un maximum de 1666 mg/l pour une moyenne égale à 1071,89 mg/l, est un écart type de 296,89 mg/l. Les concentrations en ions suivent la séquence suivante : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ (mg/l) pour les anions, $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{NH}_4^+$ (mg/l) pour les cations.

Les teneurs en Ca^{2+} varient de 80 à 160 mg/l avec une moyenne de 107,02 mg/l et un écart type de 27,35 mg/l. Les valeurs de concentration de Mg^{2+} oscillent entre 57,34 à 129,27 mg/l avec une moyenne de 80,08 mg/l et un écart type de 24,88 mg/l. Les teneurs en NH_4^+ oscillent entre 0,08 et 0,18 mg/l, avec une moyenne de 0,1 mg/l et un écart type de 0,03 mg/l. Les concentrations en Cl^- varient de 433,10 à 795,20 mg/l, avec une moyenne de 564,84 mg/l et un écart type de l'ordre de 115,09 mg/l. Les teneurs en SO_4^{2-} varient entre 180 et 520 mg/l avec une moyenne de 328,89 mg/l et un écart type de 101,02 mg/l. Les valeurs de concentration de HCO_3^- oscillent entre 183 et 219,60 mg/l avec une moyenne de 201,02 mg/l et un écart type de 12,43 mg/l. Les valeurs de concentration de NO_3^- oscillent entre 0,59 à 28,15 mg/l avec une moyenne de 8,58 mg/l et un écart type de 9 mg/l. Il est à signaler que le coefficient de variation (CV%) des nitrates dépasse 50% indiquant l'hétérogénéité de la variabilité de ce paramètre.

Par ailleurs, le [Tableau IV.2](#) présente les paramètres statistiques des analyses physico-chimiques de l'année 2023. Le pH des eaux varie de 7,1 à 7,55 avec une moyenne de 7,34 et un écart type de 0,13. Les valeurs de la conductivité électrique varient de 961 à 3554 $\mu\text{S/cm}$ avec une moyenne de 1936,38 $\mu\text{S/cm}$ et un écart type de l'ordre de 751,16 $\mu\text{S/cm}$. La minéralisation totale (TDS) montre une variation importante, avec un minimum de 480 mg/l et un maximum de 1777 mg/l pour une moyenne égale à 967,94 mg/l, est un écart type de 375,71 mg/l. Les concentrations en ions suivent la séquence suivante : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ (mg/l) pour les anions, $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ (mg/l) pour les cations. Les valeurs de concentration de Na^+ oscillent entre 50 et 290 mg/l avec une moyenne de 140,88 mg/l et un écart type de 64,22 mg/l. Les teneurs en Ca^{2+} varient de 52,8 à 171,2 mg/l avec une moyenne

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

de 92.4 mg/l et un écart type de 33.76 mg/l. Les valeurs de concentration de Mg^{2+} oscillent entre 34.02 à 136.08mg/l avec une moyenne de 69.61 mg/l et un écart type de 30.29 mg/l. Les teneurs en K^+ oscillent entre 4.2 et 14.1 mg/l, avec une moyenne de 9.53 mg/l et un écart type de 2.91 mg/l. Les concentrations en Cl^- varient de 136.12 à 709 mg/l, avec une moyenne de 357.17 mg/l et un écart type de l'ordre de 163.46 mg/l. Les teneurs en SO_4^{2-} varient entre 105 et 690 mg/l avec une moyenne de 342.19 mg/l et un écart type de 185.84 mg/l. Les valeurs de concentration de HCO_3^- oscillent entre 183 et 229.36 mg/l avec une moyenne de 209mg/l et un écart type de 14.62 mg/l. Les valeurs de concentration de NO_3^- oscillent entre 1.73 à 26.92mg/l avec une moyenne de 9.76 mg/l et un écart type de 8.07 mg/l. Il est à noter que le coefficient de variation (CV%) des nitrates et des sulfates dépasse 50% indiquant l'hétérogénéité de la variabilité de ces paramètres.

La nappe de Turonien de Hassi Bahbah :

Les paramètres statistiques des analyses physico-chimiques des eaux pour l'année 2013 sont présentés dans le [Tableau IV.3](#). Le pH des eaux varie de 7.76 à 8.01 avec une moyenne de 7.81 et un écart type de 0.14. Les valeurs de la conductivité électrique varient de 1847 à 2840 $\mu S/cm$ avec une moyenne de 2442,83 $\mu S/cm$ et un écart type de l'ordre de 367,89 $\mu S/cm$. Les valeurs de TDS s'échelonnent de 901 à 1416 mg/l avec une valeur moyenne de 1208.67 mg/l et un écart type égale à 188.34 mg/l. Les concentrations en ions suivent la séquence suivante : $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^- > NO_3^-$ (mg/l) pour les anions, $Ca^{2+} > Mg^{2+} > NH_4^+$ (mg/l) pour les cations. Les teneurs en Ca^{2+} varient de 212.8 à 300 mg/l avec une moyenne de 250.2 mg/l et un écart type de 37.1 mg/l. Les valeurs de concentration de Mg^{2+} oscillent entre 97.2 à 133.6mg/l avec une moyenne de 109.57 mg/l et un écart type de 13.46 mg/l. Les teneurs en NH_4^+ oscillent entre 0,01 et 0.13 mg/l, avec une moyenne de 0.1 mg/l et un écart type de 0.04 mg/l. Les concentrations en Cl^- varient de 355 à 750 mg/l, avec une moyenne de 556.47 mg/l et un écart type de l'ordre de 146.62 mg/l. Les teneurs en SO_4^{2-} varient entre 280 et 375 mg/l avec une moyenne de 310.83 mg/l et un écart type de 35.27 mg/l. Les valeurs de concentration de HCO_3^- oscillent entre 222 et 263.5 mg/l avec une moyenne de 241.33mg/l et un écart type de 17.14 mg/l. Les valeurs de concentration de NO_3^- oscillent entre 3.57 à 9.03mg/l avec une moyenne de 6.1 mg/l et un écart type de 2.26 mg/l.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Par contre le [Tableau IV.4](#) présente les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines de Hassi Bahbah pour l'année 2022. Le pH des eaux varie de 7.1 à 7,55 avec une moyenne de 7,34 et un écart type de 0.13. La minéralisation total (TDS) montre une variation importante, avec un minimum de 480 mg/l et un maximum de 1777 mg/l pour une moyenne égale à 967.94 mg/l, est un écart type de 375.71 mg/l. Les concentrations en ions suivent la séquence suivante: $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^- > \text{NO}_2^-$ (mg/l) pour les anions, $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+$ (mg/l) pour les cations. Les valeurs de concentration de Ca^{2+} oscillent entre 227.2 et 376 mg/l avec une moyenne de 277.44mg/l et un écart type de 59.27 mg/l. Les teneurs en Mg^{2+} varient de 100 à 132.86 mg/l avec une moyenne de 111.12 mg/l et un écart type de 13.15 mg/l. Les valeurs de concentration de Na^+ oscillent entre 88 à 112mg/l avec une moyenne de 104.2 mg/l et un écart type de 9.5 mg/l. Les teneurs en K^+ oscillent entre 1 et 12 mg/l, avec une moyenne de 7.2 mg/l et un écart type de 5.67 mg/l. Les teneurs en NH_4^+ varient de 0.1 à 0.2 mg/l avec une moyenne de 0.14 mg/l et un écart type de 0.04 mg/l. Les teneurs en SO_4^{2-} varient entre 380 et 580 mg/l avec une moyenne de 504 mg/l et un écart type de 80.19 mg/l. Les concentrations en Cl^- varient de 262.23 à 347.41 mg/l, avec une moyenne de 321.87 mg/l et un écart type de l'ordre de 34.27 mg/l. Les teneurs en HCO_3^- varient entre 183 et 213.5 mg/l avec une moyenne de 201.53 mg/l et un écart type de 13.38 mg/l. Les valeurs de concentration de NO_3^- oscillent entre 0 et 23.37 mg/l avec une moyenne de 7.03 mg/l et un écart type de 9.41 mg/l. Les valeurs de concentration de NO_2^- oscillent entre 0.01 à 0.04mg/l avec une moyenne de 0.03 mg/l et un écart type de 0.01 mg/l.

IV.7.1.2. Matrice de corrélation

Les coefficients de corrélation des différents paramètres physico-chimiques permettent de mesurer la relation entre deux variables. La matrice de corrélation de Pearson représentée sur le [Tableau IV.7](#) permet de trouver la relation entre deux ou plusieurs des variables. Les variables montrent un coefficient de corrélation $r > 0,7$ sont considéré être fortement corrélé tandis que celles avec un coefficient r compris entre 0.5 et 0.7, et $r < 0,5$ montre des corrélations modérées et faibles respectivement ([Adams et al, 2001](#) ; [Bekkoussa, 2020](#)).

D'après la matrice de corrélation des différents paramètres, nous remarquons plusieurs corrélations significatives existe entre les différents ions. Une forte corrélation ($r > 0,7$) a été observée entre Cl^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ et la minéralisation total (TDS) et la conductivité électrique (CE), qui s'indique l'origine évaporitique (NaCl , CaSO_4 , ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$), MgSO_4) de ces éléments dans les eaux souterraines ([Ben alaya et al, 2014](#) ; [Bekkoussa et al, 2013](#)). On outre, c'est forte corrélation indique la contribution directe de ces éléments dans la salinité des

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

eaux souterraines (Ghodbane, 2018). Des corrélations modérées sont mises en évidence entre la conductivité électrique, la minéralisation total TDS et le potassium avec un coefficient de corrélation de 0,7.

- Le chlorure est bien corrélé au sulfates ($r=0.96$).
- Le calcium est bien corrélé au chlorure et au sulfate avec des coefficients de corrélation de 0,96 et 0,88 respectivement.
- Le magnésium est bien corrélé au sulfate ($r=0.93$), chlorure ($r=0.96$) et au calcium ($r=0.94$), ce qui témoigne d'une même origine liée à la nature géologique de l'aquifère et au phénomène d'échange de bases (Hchaichi, 2016 ; Touhari, 2015).
- Le sodium est bien corrélé au sulfate ($r=0.89$), chlorure ($r=0.92$), calcium ($r=0.91$) et au magnésium ($r=0.93$). Ceci laisse penser que ces éléments peuvent avoir une origine commune (Kraiem, 2015).

Tableau IV.7 : Matrice de corrélation des paramètres physico-chimiques

	T	pH	CE	TDS	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	Na ⁺	K ⁺
T	1											
pH	-0.90	1										
CE	0.28	-0.36	1									
TDS	0.27	-0.36	1.00	1								
NO ₃	0.63	-0.46	0.02	0.02	1							
SO ₄	0.34	-0.38	0.96	0.96	0.13	1						
Cl ⁻	0.22	-0.31	0.98	0.98	-0.02	0.96	1					
Ca	0.28	-0.37	0.95	0.95	-0.02	0.88	0.90	1				
Mg	0.23	-0.34	0.97	0.97	-0.12	0.93	0.96	0.94	1			
HCO ₃	-0.41	0.38	-0.46	-0.46	-0.31	-0.55	-0.46	-0.53	-0.40	1		
Na	0.18	-0.28	0.91	0.91	-0.10	0.89	0.92	0.91	0.93	-0.44	1	
K	0.17	-0.19	0.70	0.70	0.42	0.67	0.68	0.60	0.55	-0.46	0.60	1

Des corrélations moins significatives sont mises en évidence entre les ions (SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺ et Mg²⁺) et le potassium avec des coefficients de corrélations de l'ordre de 0.67 ; 0.68 ; 0.60 ; 0.55, respectivement. Les ions HCO₃⁻ et NO₃⁻ sont faiblement corrélé avec la conductivité électrique avec des coefficients de corrélation de l'ordre de -0,46 et 0,02, indiquant le non contribution de ces deux éléments à la minéralisation des eaux souterraine de la zone d'étude.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats montrent que l'essentiel de la minéralisation provient des minéraux évaporitiques liées à l'halite, au gypse et/ou l'anhydrite comme suggère les bonnes relations positivement existant entre la minéralisation totale TDS et les éléments majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^-) des eaux souterraines de la zone d'étude.

IV.7.1.3. Analyse en composantes principales « ACP »

L'analyse en composantes principales des données physico-chimiques réalisée à partir de 12 des variables centrées réduites (T, pH, TDS, CE et les ions majeurs : Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^-) à l'aide du logiciel STATISTICA (Statsoft, 2010).

Le critère de Kaiser (Kaiser, 1960) a été appliqué afin de déterminer le nombre total de facteurs significatifs. Selon ce critère, seulement les facteurs ayant une valeur propre supérieure ou égale à 1 seront acceptés comme sources possibles de variance dans les données (Ghodbane, 2018). D'après ce critère, deux plans factoriels ont été retenus (F1 et F2) avec 82.91% de la variance cumulée pour des données des analyses des paramètres physico-chimique (Tableau. IV.8 et Figure IV.50).

Tableau. IV.8: valeurs propres des composantes principales.

	Valeur propre	% Total	Cumulative	Cumulative
1	7.68	63.98	7.68	63.98
2	2.27	18.93	9.95	82.91

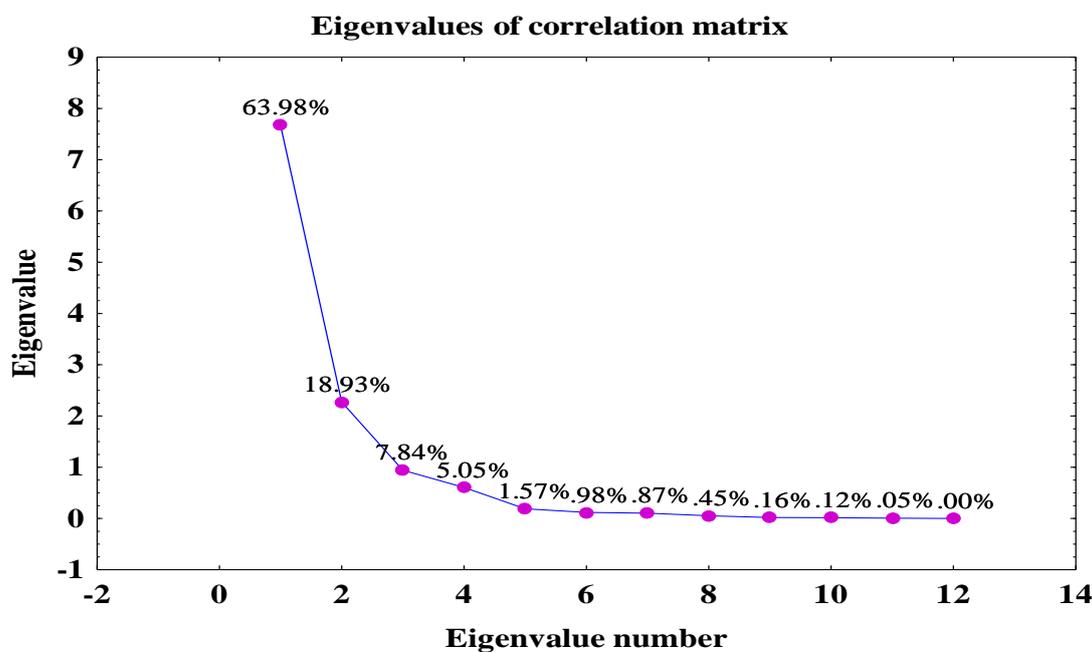


Figure IV.50 : Valeurs propres de la matrice de corrélation.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.7.1.3.1 Projection des variables sur les plans factoriels

La Figure IV.51 montre la projection des variables sur le plan (1x2). L'espace des variables du plan factoriel F1-F2 exprime 82,91% de la variance totale.

Le premier axe F1 représente 63.98% de la variance totale, il est déterminé par la majeure partie des éléments chimiques (Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-}) est représenté donc un axe de minéralisation évaporitiques et salifère. Les éléments qui définissent ce facteur proviennent d'une longue durée de mise en solution suite au contact « eau-roche » (Hchaichi, 2016) (Tableau. IV.9). L'ensemble de corrélation significative entre les paramètres chimiques témoigne de l'influence des formations évaporitiques sur le chimisme des eaux souterraines. On note une très bonne corrélation entre l'axe F1 et CE (-0,98), le TDS (-0,98), les sulfates (-0,97), les chlorures (-0,97), le magnésium (-0,95), le calcium (-0,95) et le sodium (-0,92). Dans une moindre mesure le potassium (0,72). La proximité de la conductivité électrique, TDS, Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} témoigne une forte corrélation entre ces différentes variables et donc d'une même origine, probablement la dissolution des formations évaporitiques (CaSO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, MgSO_4 et NaCl) (Hallouche, 2017 ; Hchaichi, 2016).

L'axe F2 explique 18.93% de la variance totale, il est déterminé par les variables négativement par la température et les éléments indicateurs de la pollution d'origine anthropique à s'avoir les nitrates (NO_3^-) liée aux engrais chimiques de type NPK utilisés en agricultures. Cet axe reflète le résultat des processus anthropiques lié à l'utilisation intensive des engrais chimiques en agriculture (Amadou et al, 2014).

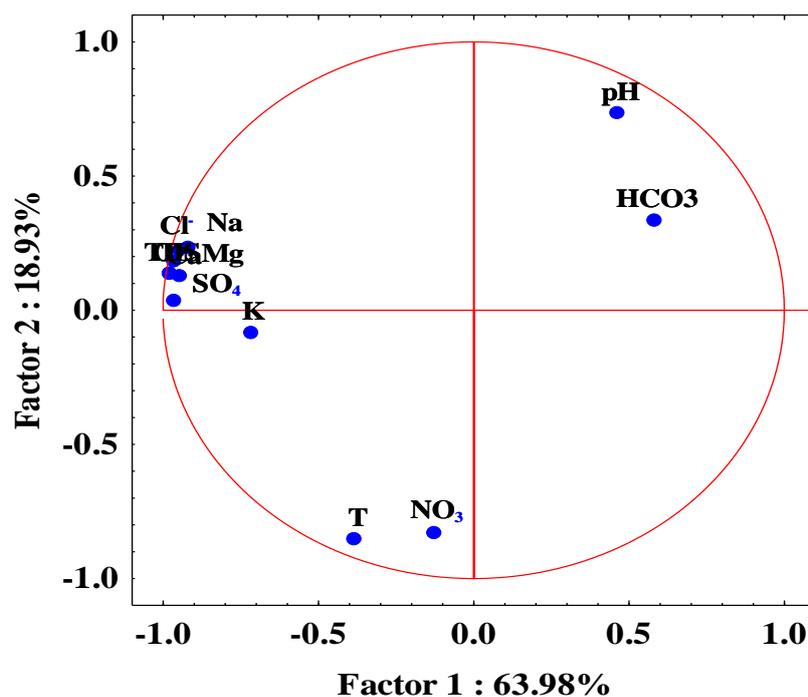


Figure IV.51 : Projection des variables sur le plan factoriel F1-F2.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau. IV.9 : Corrélation des éléments chimiques par apport aux facteurs F1 et F2.

	Factor 1	Factor 2
T	-0.39	<u>-0.85</u>
pH	0.46	<u>0.74</u>
CE	<u>-0.98</u>	0.14
TDS	<u>-0.98</u>	0.14
NO₃⁻	-0.13	<u>-0.83</u>
SO₄²⁻	<u>-0.97</u>	0.04
Cl⁻	<u>-0.97</u>	0.18
Ca²⁺	<u>-0.95</u>	0.13
Mg²⁺	<u>-0.95</u>	0.22
HCO₃⁻	0.58	0.34
Na⁺	<u>-0.92</u>	0.23
K⁺	<u>-0.72</u>	-0.08

IV.7.1.3.2 Projection des individus sur les plans factoriels

La représentation graphique dans l'espace factoriel des unités statistiques (Figure IV.52) montre la répartition des points d'eau en fonction des différents facteurs F1-F2. L'analyse de ce graphe a montré trois principaux regroupements des points d'eau :

Groupe 1 : situé du côté négatif de l'axe F1 et constitué par les points d'eaux : F02, F03, F7, F08, F9 correspond à 31.25 % des points d'eau. Ce groupe est caractérisé par des eaux à minéralisation élevés ($1171 < \text{TDS} < 1777$ mg/l), avec une conductivité électrique moyenne de $2860,6 \mu\text{S/cm}$ (Tableau. IV10). Il est à signaler que ce groupe se caractérise par des concentrations élevées de ces éléments (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-}), avec deux types de facies, chloruré sodique (Na-Cl) et chloruré magnésien (Mg-Cl) (Figure V.53 ; V.54).

Groupe 2 : situé positivement par rapport à l'axe F1, il est constitué par les points d'eau : F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17 et concerne 50% des points d'eau. Les eaux de ce groupe sont caractérisées par une minéralisation modérée ($832 < \text{TDS} < 888$ mg/l), avec une conductivité électrique moyenne de $1714 \mu\text{S/cm}$.

Groupe 3 : Il inclut trois points d'eau (F1, F2, F3) et représente 18.75 % des échantillons d'eau. Ce groupe englobe les eaux les moins minéralisées ($480 < \text{TDS} < 503$ mg/l), avec une

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

conductivité électrique moyenne de 989 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les eaux de ce groupe correspondent au faciès chloruré sodique (Na-Cl) et chloruré magnésien (Mg-Cl). Ils sont caractérisés par des tenures faibles en Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ par rapport aux deux groupes précédents. Ces eaux sont les plus diluées traduisant un temps d'interaction eau-roche faible (Hchaichi, 2016).

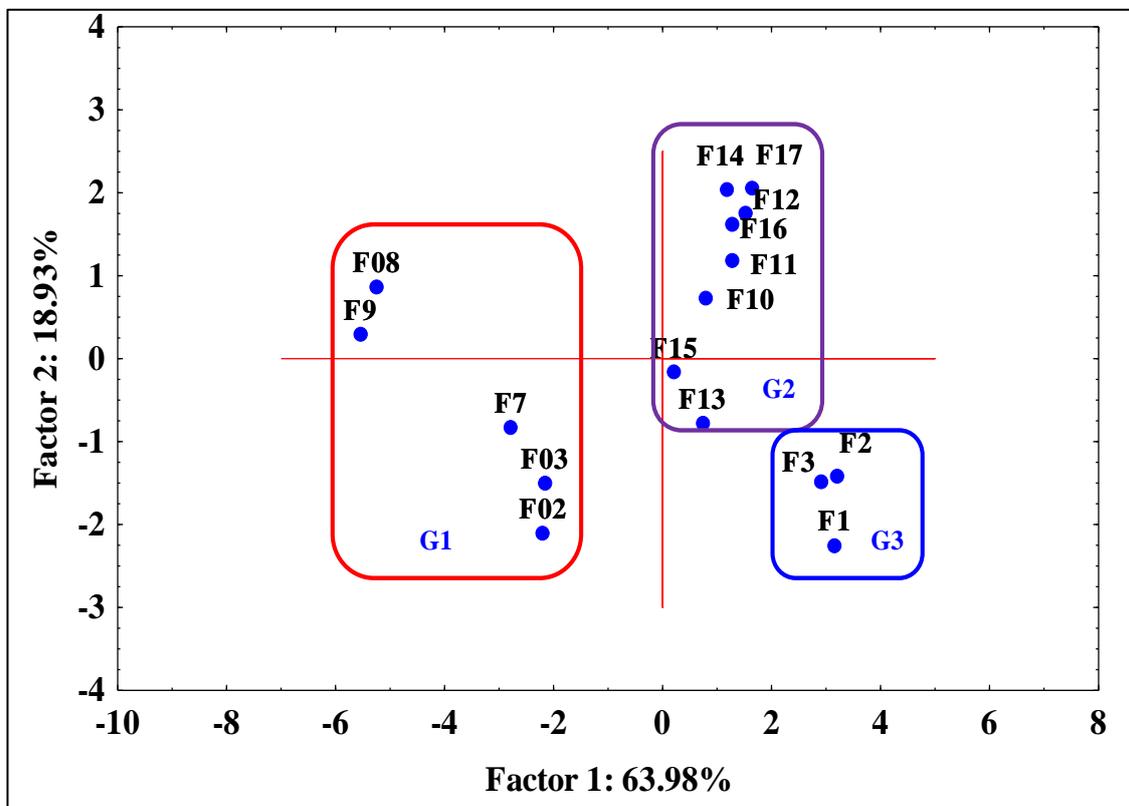


Figure IV.52 : Projection des individus sur le plan factoriel F1-F2.

Tableau. IV.10 : Valeurs moyennes des paramètres physico-chimiques pour les principaux groupes sélectionnés.

	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	TDS (mg/L)	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
Groupe 1	7.24	2860,6	1430,2	206,8	12,2	132,08	103,8	586	549,08	195,92	14,734
Groupe 2	7,5	1714,0	856,8	127,0	9,4	81,4	61,1	266,3	319,1	215,0	5,5

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.7.1.4. Classification Ascendante Hiérarchique

Afin de distinguer des eaux souterraines soumises à des processus chimiques semblables, une classification ascendante hiérarchique (CAH) a été réalisée. Cette technique permet d'identifier des groupements des différentes eaux analysées et de les représenter sous forme d'un dendrogramme (Hadj Ammar, 2016 ; Ben Alaya et al, 2014). Dans cette technique nous utilisons la méthode de liaison de Ward (1963) avec la distance euclidienne sur un nombre d'échantillon égale à 16 (nappe d'Ain Oussera) et 12 variables (pH, CE, TDS, TH, et les huit éléments majeurs).

Les dendrogrammes des variables (Figure IV.53) permet de distinguer trois clusters ; le premier cluster (C1) est formé des variables K^+ et NO_3^- , le deuxième cluster (C2) composé de variables TDS, CE, SO_4^{2-} , Mg^{2+} , Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} et le derniers cluster (C3) correspondant pH et HCO_3^- . Le premier cluster (C1) traduit l'apport anthropique lié à l'activité agricole dans l'acquisitions de la minéralisation, alors que le deuxième cluster (C2) reflète la contribution des processus de dissolution / précipitation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonaté et évaporitiques a la salinisation des eaux souterraines et le cluster (C3) traduit l'influence des conditions des équilibres acido-basique sur la chimie des eaux souterraines essentiellement l'évolution des bicarbonates (Kraiem, 2015). En fit plus les milieux est basique, plus la solubilité de CO_2 est importante produisant du HCO_3^- instable donnant a lors tours du CO_3^{2-} . Ces derniers vont s'associer avec le calcium pour précipiter des carbonates (Kraiem, 2015 ; Hchaichi, 2016).

Les dendrogrammes des individus: Le dendrogramme (Figure IV.54) indique que statistiquement trois clusters hydrochimique différents peuvent être distingués.

Cluster 1 :Ce groupe comprend cinq points d'eau (F03, F08, F9, F7, F02) (31,25%) qui caractérisent les eaux à minéralisation élevée avec une moyenne de 1422,2 mg/l et une conductivité électrique moyenne de 2860,6 $\mu S/cm$ (Tableau. IV.10). Le cation dominant des eaux de ce cluster est Na^+ tandis que SO_4^{2-} et Cl^- sont les anions dominants. Par conséquent ce cluster correspond au faciès chloruré sodique (Na-Cl) (Figures IV.55 et IV.56). Une exception est faite pour l'échantillon F7 qui présente un faciès chloruré magnésien (Mg-Cl). Les eaux de ce cluster sont caractérisées par des concentrations très élevés en Na^+ (moyenne : 206,8 mg/L), Cl^- (moyenne : 549,05 mg/L), SO_4^{2-} (moyenne : 586 mg/L) et TH (moyenne : 758,4 mg/L). Ces eaux montrent bien l'influence des processus d'interaction eau-roche et temps de résidence sur l'augmentation de la minéralisation de ces eaux (Hchaichi, 2016).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Cluster 2 : ce cluster renferme la majorité des eaux échantillonnées à partir des forages (F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17) soit 50% des échantillons prélevés. Il caractérise des eaux moyennement minéralisées (TDS moyenne : 856,75 mg/L), avec une conductivité électrique moyenne de 1430,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le Na^+ est le cation dominant tandis que Cl^- et SO_4^{2-} sont les anions dominants, par conséquent ce cluster correspond au faciès chloruré sodique (Na-Cl) (Figures IV.55 et IV.56), sauf l'eau de forages (F14) présente un faciès chloruré magnésien (Mg-Cl). Les échantillons de ce cluster ont des concentrations élevées en Cl^- (moyenne : 319,07 mg/L), SO_4^{2-} (moyenne : 266,25 mg/L), Na^+ (moyenne : 127 mg/L) et TH (moyenne : 455 mg/L CaCO_3).

Cluster 3: il est composé de trois forages (F1, F2, F3) et représente 18,75% de la totalité des points d'eau. Ce cluster qui caractérise les eaux faiblement minéralisées (TDS : moyenne de 494 mg/l), avec une conductivité électrique moyenne de 989 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Le cation dominant est Na^+ tandis que HCO_3^- , Cl^- et SO_4^{2-} sont les anions dominants. Le principale faciès hydrochimique de ce cluster est chloruré magnésien (Mg-Cl) (Figures IV.55 et IV.56), sauf l'échantillon F3 présente un faciès chloruré sodique (Na-Cl). Les eaux de ces clusters sont caractérisées par des concentrations en Na^+ (moyenne : 68 mg/L), HCO_3^- (moyenne : 214,7 mg/L), Cl^- (moyenne : 138,96 mg/L), SO_4^{2-} (moyenne : 138,33 mg/L). Ces eaux sont le plus diluées traduisant un temps d'interaction eau-roche faible (Hadj Ammar,2016).

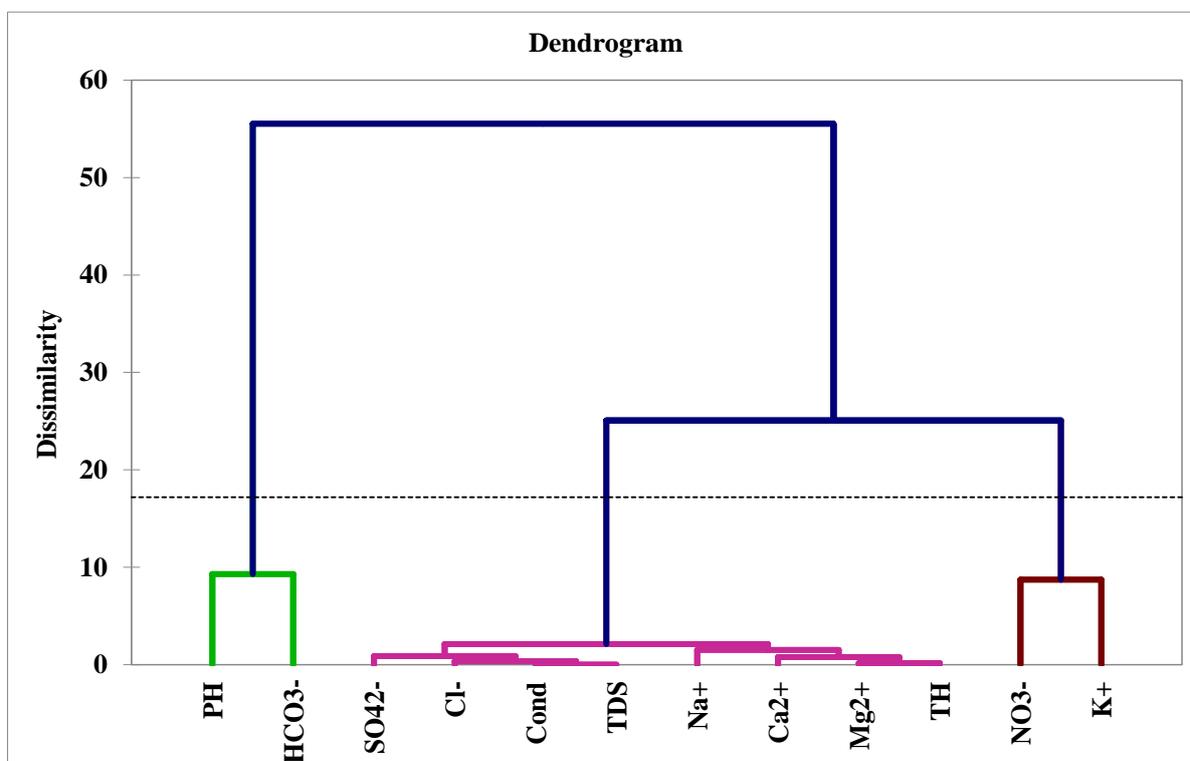


Figure IV.53 : Dendrogrammes des variables de la composition chimique des eaux des forages de la région d'Ain Oussera

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

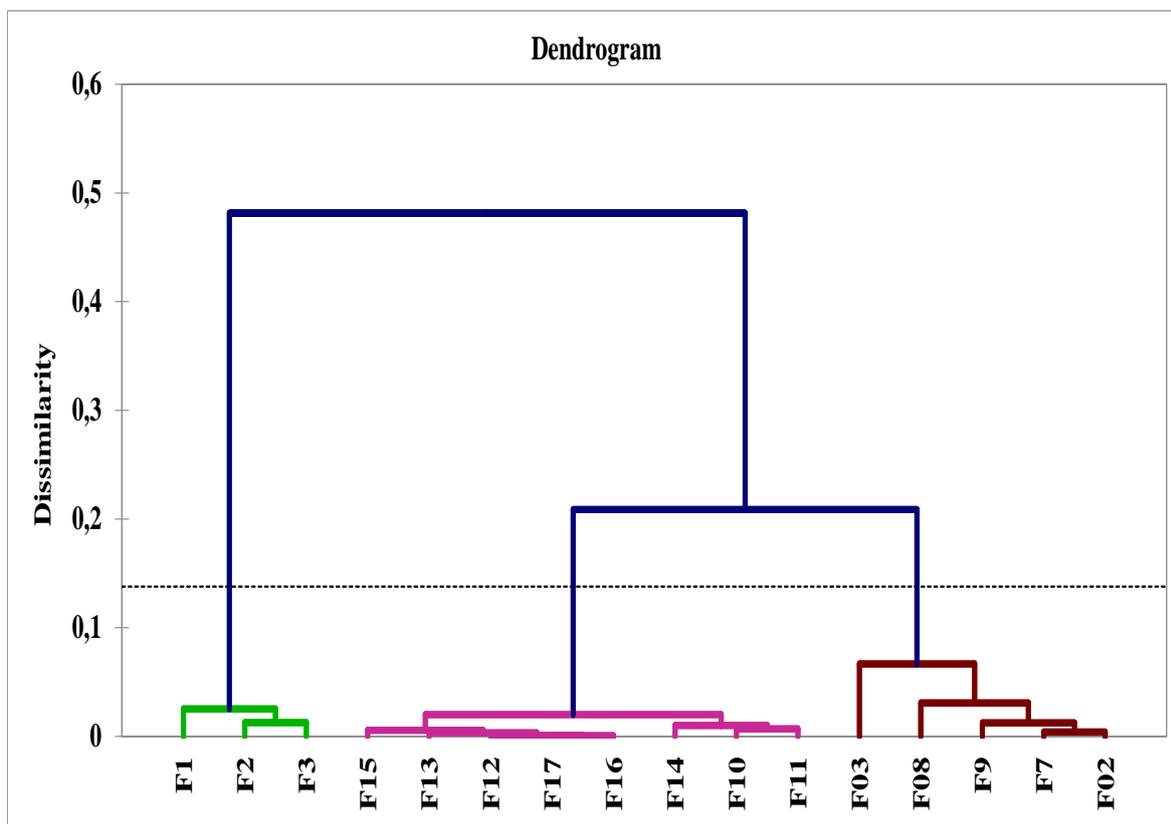


Figure IV.54 : Dendrogrammes des individus de la composition chimique des eaux des forages de la région d'Ain Oussera

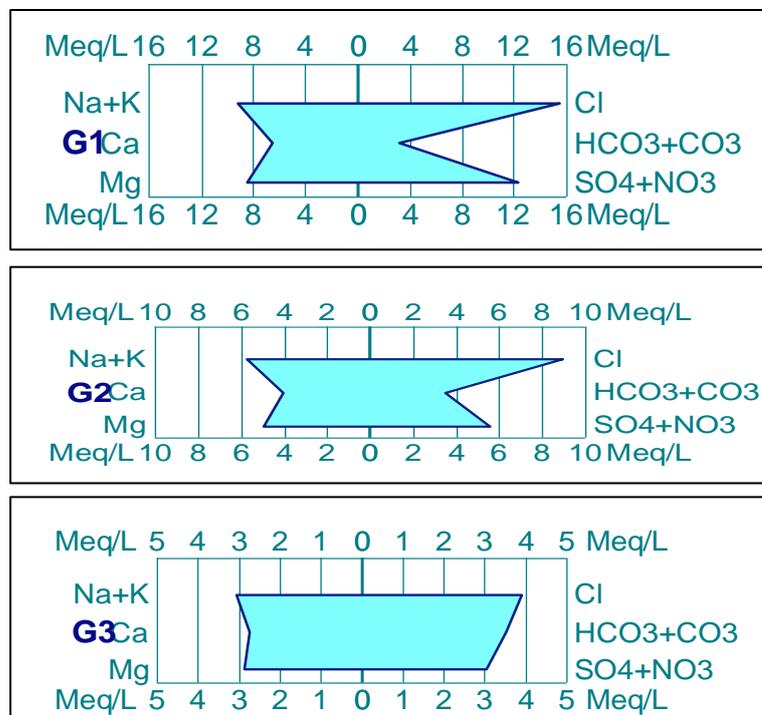


Figure IV.55 : Représentation des groupes d'échantillons sur le diagramme de Stiff.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

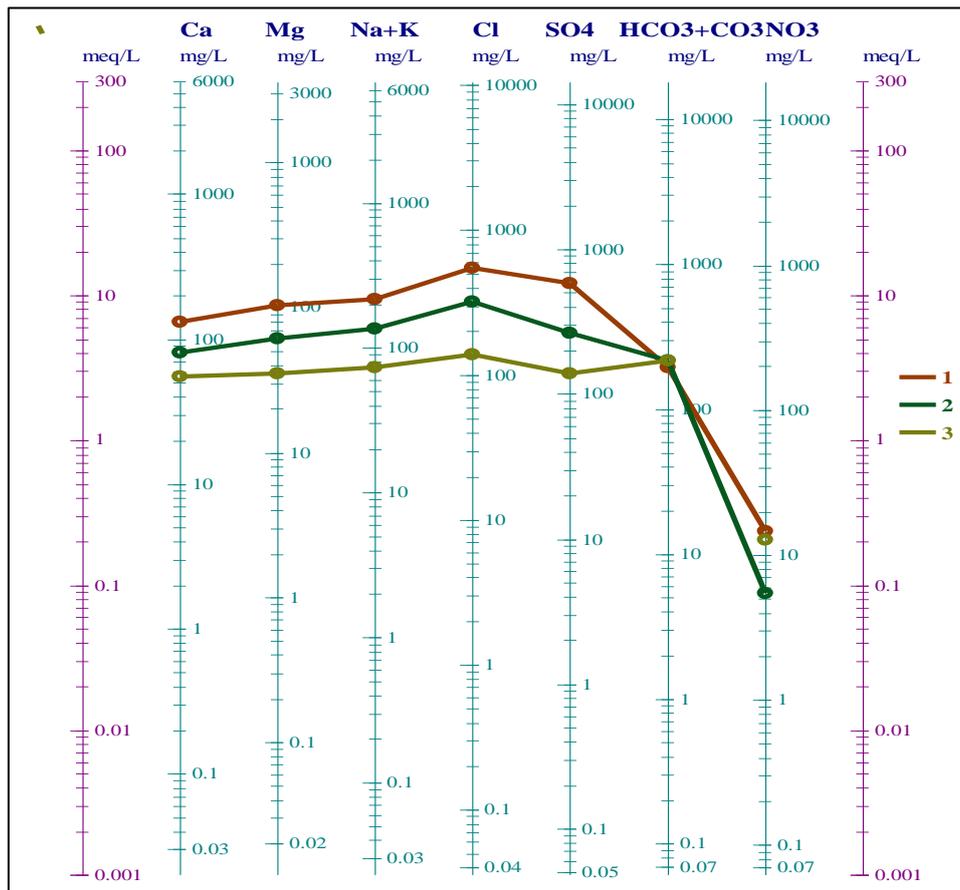


Figure IV.56 :Représentation des groupes d'échantillons sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff.

IV.8. Étude de la qualité des eaux

Dans cette étude, la qualité des eaux souterraine de la nappe albienne (Ain Oussera) et turonienne (Hassi Bahbah) a été évaluée par la méthode de l'IQE arithmétique et l'IQE arithmétique pondéré. En effet, 11 paramètres importants dans l'étude de la qualité des eaux (pH, CE, TH, TDS, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-) ont été sélectionnés pour calculer l'indice de qualité de l'eau IQE.

IV.8.1 Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Normes Algérienne

La nappe de l'Albien d'Ain Oussera :

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'IQE variaient de 20,43 à 28,39 avec une moyenne de 23,97 et un écart type de 3,16 pour l'année 2013 (Tableau IV.11). On constate qu'environ 66,7 % (F4, F10, F12, F6, F3 et F9) des points d'eau appartiennent à la catégorie excellent qualité ($0 < \text{IQE} \leq 25$), avec un indice variant de 20,43 et 24,35. Par ailleurs, 33,3 % des échantillons (F2, F7, F8) présentant une eau de bonne qualité, avec un indice IQE variant de 26,94 à 28,39 ($25 < \text{IQE} \leq 50$) (Figure IV.57) (Brown et al, 1972). Les valeurs de l'IQE oscillaient entre 19,97 et 59,83, avec une moyenne de 44,21 et un écart type de 10,58 pour

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

l'année 2023. Les résultats montrent que 12,5 % des points d'eau (F1 et F2) appartiennent à la catégorie excellent, avec un indice IQE variant entre 19,97 et 24,96. Par ailleurs, 50 % des échantillons prélevés (F08, F10, F12, F14, F17, F11, F16) sont de bonne qualité, avec un indice IQE variant de 41,26 à 47,82 et 37,5 % des points d'eau appartenant à la catégorie mauvaise qualité ($50 < IQE \leq 75$) (Brown et al, 1972).

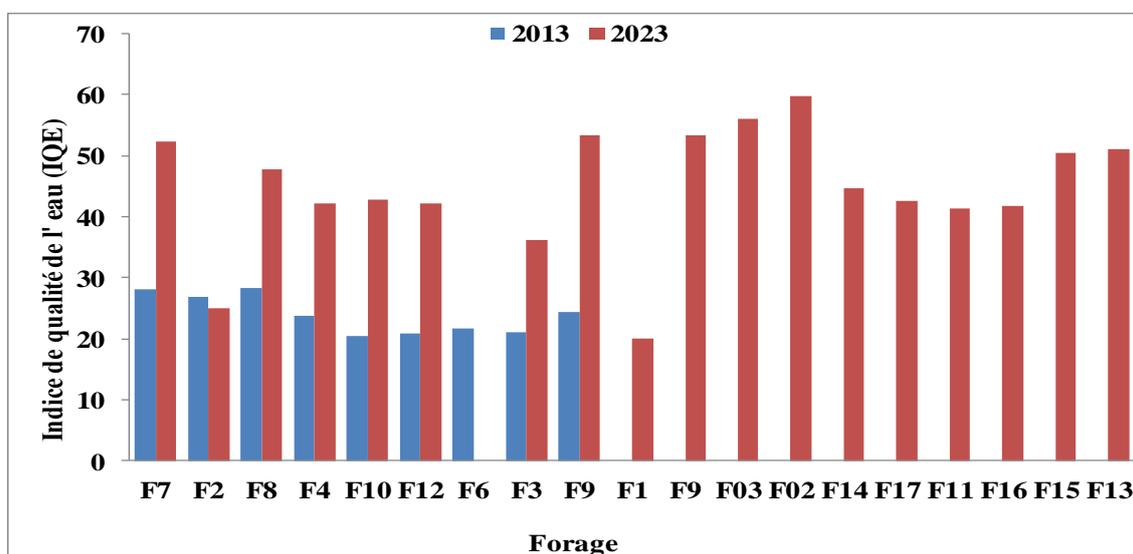


Figure IV.57 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages de Ain Oussera (Normes Algérienne).

Tableau IV.11 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme Algerienne (Ain Oussera).

IQE (NA)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation %
2013	20.43	28.39	23.97	9.96	3.16	13.16
2023	19.97	59.83	44.21	111.85	10.58	23.92

Hassi Bahbah :

Les valeurs de l'IQE des points d'eaux de Hassi Bahbah variaient entre 25,06 et 32,90, avec une moyenne de 28,45 et un écart type de 3,38 pour l'année 2013 (Tableau IV.12). Il est à noter que la totalité de qualité des eaux de forages (HB5, HB2, HB3, HB4, HB1) sont de bonne qualité (Figure IV.58).

Par ailleurs les valeurs de l'IQE oscillaient entre 12.73 et 44.77, avec une moyenne de 32.13 et un écart type de 15.71 pour l'année 2022. Les résultats montrent que 40 % des points d'eau (HB1 et HB65) appartenaient à la catégorie excellente et 60 % des eaux de forages (HB3, HB9, HB10) sont de bonne qualité

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

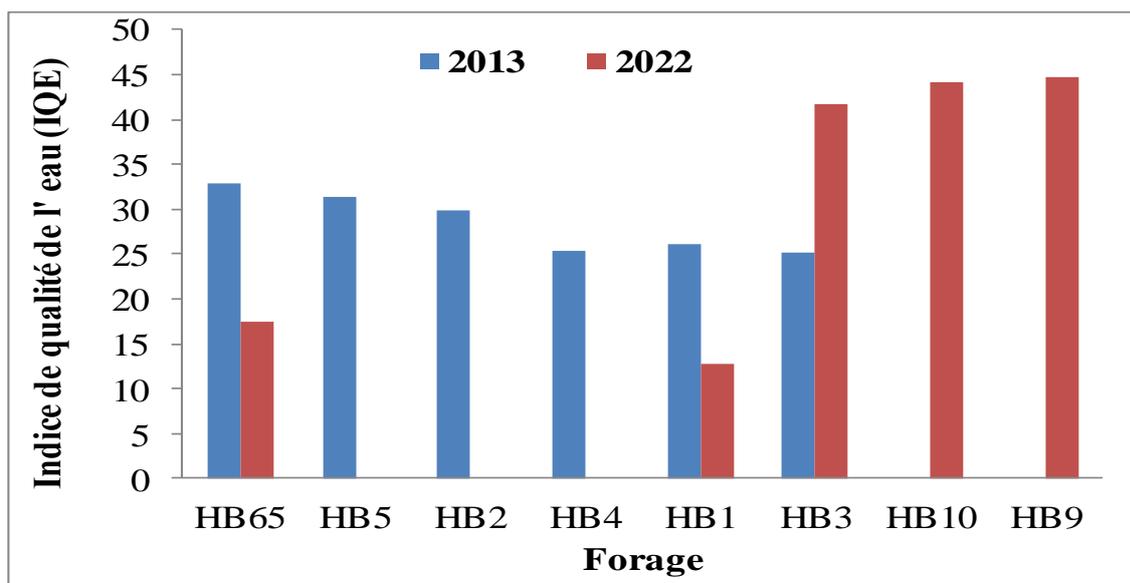


Figure IV.58 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages de Hassi Bahbah (Normes Algérienne).

Tableau IV.12 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme Algerienne (Hassi Bahbah).

IQE (NA)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	25.06	32.90	28.45	11.43	3.38	11.89
2023	12.73	44.77	32.13	246.80	15.71	48.89

IV.8.2 Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Normes OMS

Ain Oussera :

Les résultats montrent que les valeurs de l'IQE varient de 29,33 à 47,35 pour l'année 2013 et de 26,96 à 85,22 pour 2023 (Tableau IV.13). Les échantillons prélevés en aout 2013 indiquent que la totalité des eaux sont de bonne qualité (Figure IV.59). Cette class renferme les échantillons d'eau prélevé dans les forages (F7, F2, F8, F4, F10, F12, F6, F3 et F9). Les échantillons d'eau prélevés en mars 2023 indiquent que 18,75% sont de bonne qualité. Cette classe concerne les eaux des forages (F1, F2 et F3). Par ailleurs, 68,75% des échantillons d'eau sont de mauvaise qualité. Cette classe regroupe des eaux de forages (F03, F7, F02, F10, F12, F14, F17, F11, F16, F15 et F13). En outre les échantillons prélevés de forage F08 et F9 (12,5%) sont de très mauvaise qualité.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

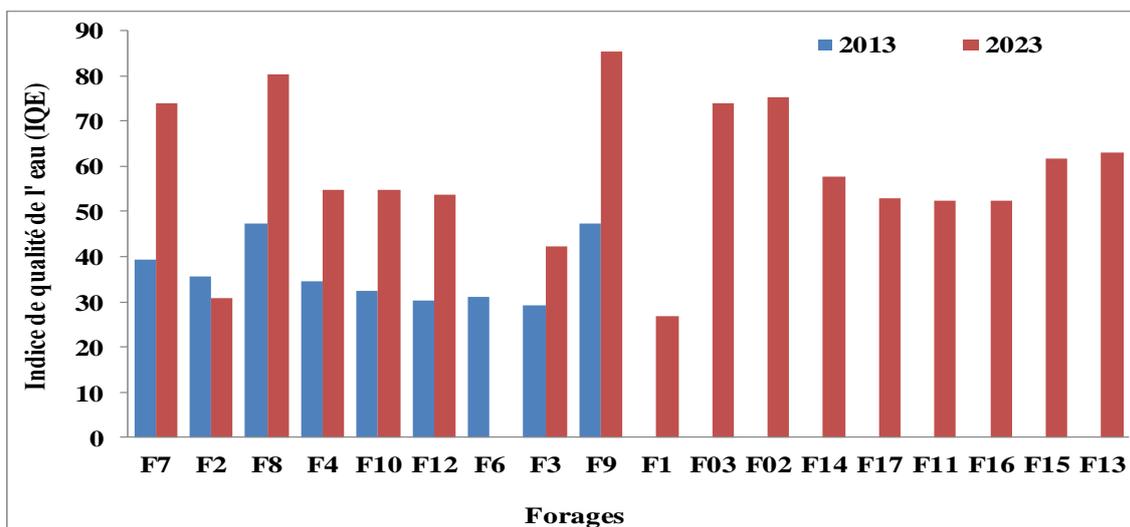


Figure IV.59 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages d'Ain Oussera (Norme OMS).

Tableau IV.13 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme OMS (Ain Oussera).

IQE (OMS)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	29.33	47.35	36.38	48.17	6.94	19.08
2023	26.94	85.22	58.34	260.37	16.14	27.66

Hassi Bahbah :

Les valeurs de l'IQE variaient entre 42.04 et 51.36 avec une moyenne de 45.61 et un écart type 3.73 pour l'année 2013 (Tableau IV.14). Les résultats ont montré qu'environ 83,3 % des points d'eau (HB1, HB3, HB4, HB5 et HB65) appartiennent à la catégorie qualité bonne et 16,7 % des échantillons d'eau (HB2) sont de mauvaise qualité (Figure IV.60).

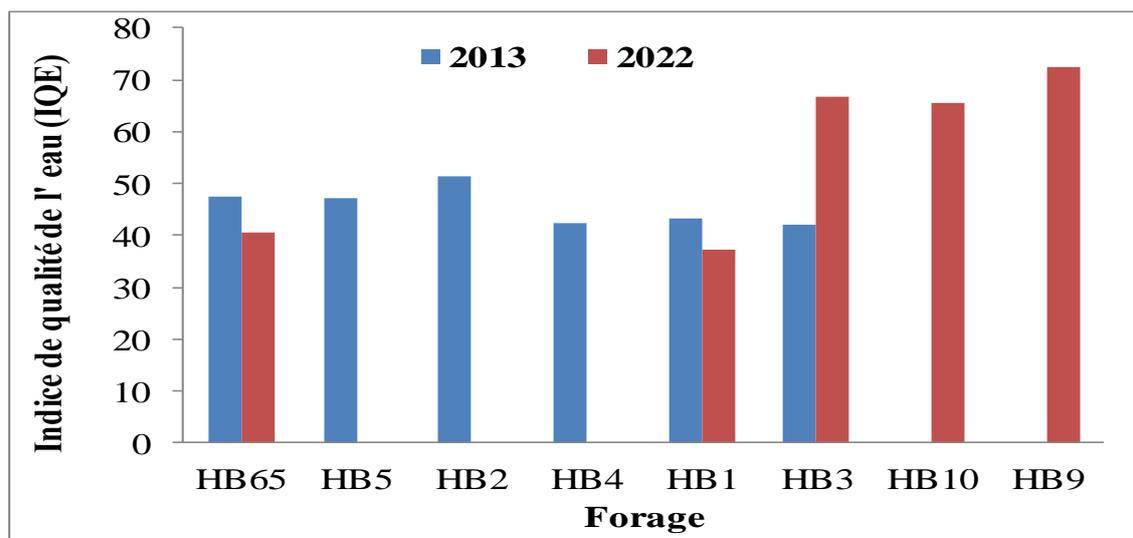


Figure IV.60 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) des forages de Hassi Bahbah (Norme OMS).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.14 : Indice de qualité de l'eau (IQE arithmétique) / Norme OMS (Hassi Bahbah).

IQE (OMS)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	42.04	51.36	45.61	13.90	3.73	8.17
2023	37.17	72.39	56.45	266.59	16.33	28.93

Les valeurs de l'IQE oscillaient entre 37.17 et 72.39, avec une moyenne de 56.45 et un écart type de 16.33 pour l'année 2022. En outre, les échantillons d'eau souterraines prélevés appartiennent des forages HB1 et HB65 sont de bonne qualité. En revanche, les échantillons d'eau des forages (HB3, HB10, HB9) sont de mauvaise qualité.

IV.8.3 Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes Algérienne

Ain Oussera :

Après avoir calculé l'indice IQE pondéré, les résultats montrent que les valeurs de cet indice varient de 44,28 à 89,18 avec une moyenne de 61,34 et un écart type de 15,62 pour l'année 2013 (Tableau IV.15), révélant l'existence de deux classes de qualité d'eau. La classe excellente englobe 22,2% des points d'eau (F3 et F12), 77,8% des échantillons d'eau (F7, F8, F4, F10, F6, F3, F9) sont de bonne qualité (Figure IV.61).

En outre les résultats de calcul de l'IQE pour le mois de mars 2023 révèlent l'existence de trois classes de qualité d'eau. 18,75% des échantillons d'eau (F1, F2 et F3) sont classés dans la catégorie excellent qualité (IQE \leq 50), 75% des échantillons d'eau sont de bonne qualité (50 < IQE \leq 100).

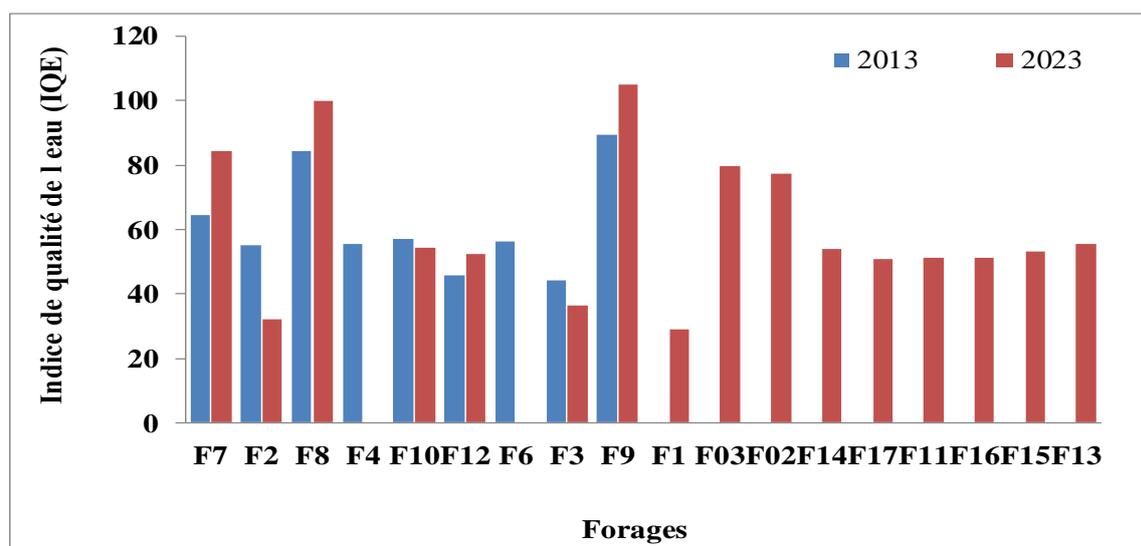


Figure IV.61 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Ain Oussera (Normes Algérienne).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.15 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes Algérienne (Ain Oussera).

IQE (NA)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	44.28	89.18	61.34	244.03	15.62	25.47
2023	29.04	104.95	60.40	508.57	22.55	37.33

Hassi Bahbah

Les valeurs de l'IQE obtenues dans cette étude varient de 72,75 et 89,79 et de 78,14 à 97,97 en 2013 et 2023 respectivement (Tableau IV.16 ; Figure IV.62). L'indice de qualité de l'eau IQE indique que la totalité des eaux de forages (HB1, HB2, HB3, HB4, HB5 et HB65) sont de bonne qualité en 2013. Les échantillons d'eau prélevés en 2022 indiquent que les eaux de forages sont de bonne qualité.

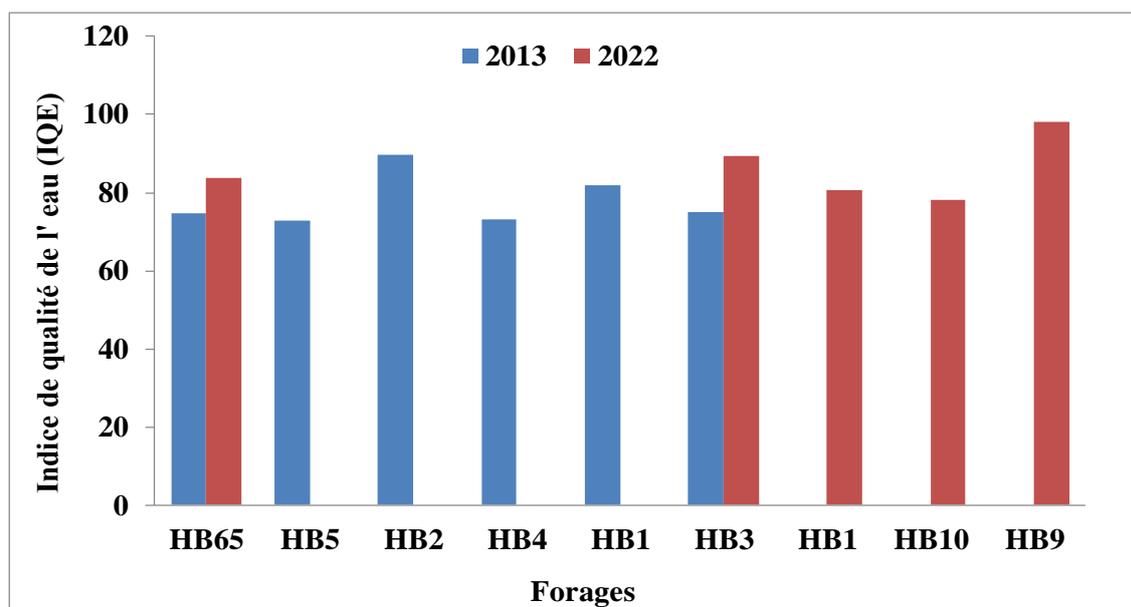


Figure IV.62 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Hassi Bahbah (Norme Algérienne).

Tableau IV.16 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes Algérienne (Hassi Bahbah).

IQE (NA)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	72.75	89.79	77.88	45.05	6.71	8.62
2023	78.14	97.97	85.98	62.51	7.91	9.20

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

IV.8.4 Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes OMS

Ain Oussera :

Les résultats montrent que l'IQE varie de 72,53 à 147,39 et de 44.16 à 166.96 en 2013 et 2023 respectivement ; révélant l'existence de deux classes de qualité d'eau (Tableau IV.17 ; Figure IV.63). 66,7% des échantillons sont de bonne qualité caractérisent les eaux prélevées à partir des forages en mois d'aout 2013. Cette catégorie d'eau regroupe les forages (F2, F3, F10, F12, F6 et F4). Par ailleurs, Les échantillons d'eau des forages (F9, F7, F08) appartiennent à la qualité médiocre représente 33,3% des eaux étudiées.

En outre les valeurs de l'indice IQE obtenus en 2023 montrent que les eaux d'excellente qualité représentent 12,5% des eaux étudiées (F1 et F2), 56,3% sont de bonne qualité (F3, F10, F12, F14, F17, F11, F16, F15, F13) et le reste des échantillons d'eau (F02, F03, F7, F08, F9), soit 31,3% des forages appartiennent à la catégorie qualité médiocre. Il est à noter que les valeurs élevées de l'indice IQE sont surtout dues à la dureté ou titre hydrométrique (TH), conductivité électrique (CE) de ces eaux et de leurs fortes concentrations en chlorure (Cl).

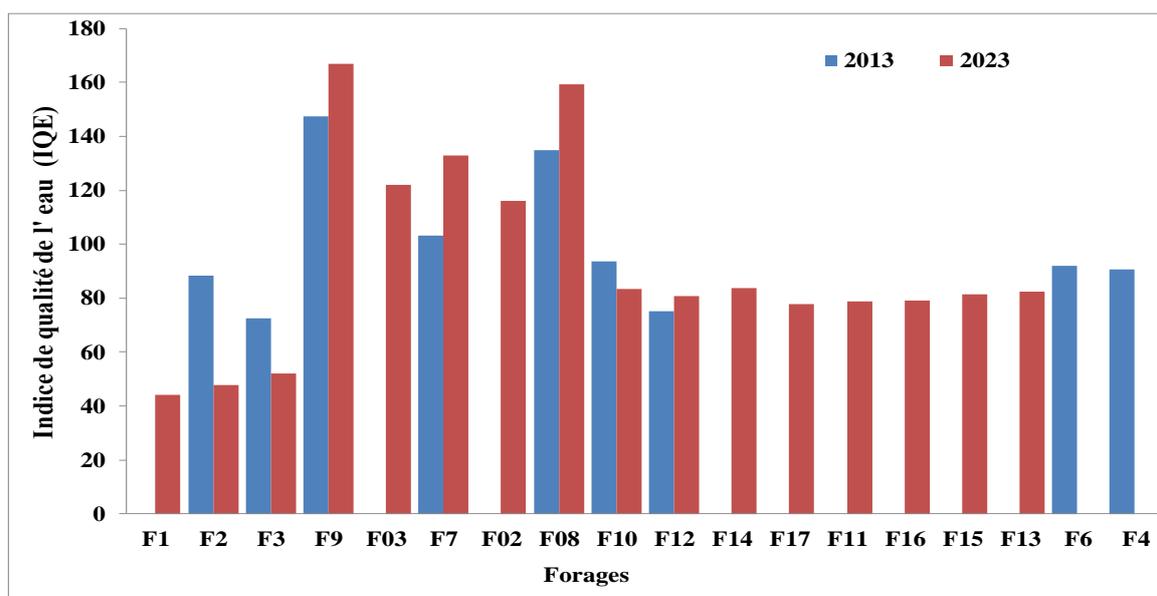


Figure IV.63: Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Hassi Bahbah (Normes OMS).

Tableau IV.17 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes OMS (Ain Oussera).

IQE (NA)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	72.53	147.39	99.76	646.52	25.43	25.49
2023	44.16	166.96	93.07	1341.64	36.63	39.36

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Hassi Bahbah :

Les résultats montrent que l'IQE varie de 116,13 à 145,11 et de 122,99 à 155,33 en 2013 et 2022 respectivement (Tableau IV.18 ; Figure IV.64). Ces résultats montrent que la totalité des échantillons d'eau prélevés des forages en 2013 et 2022 appartiennent à la catégorie médiocre. Il est à signaler que les fortes valeurs de l'IQE sont principalement liées à des valeurs élevées de la dureté ou titre hydrométrique (TH), conductivité électrique (CE), les sulfates (SO_4^{2-}) et les chlorures (Cl^-).

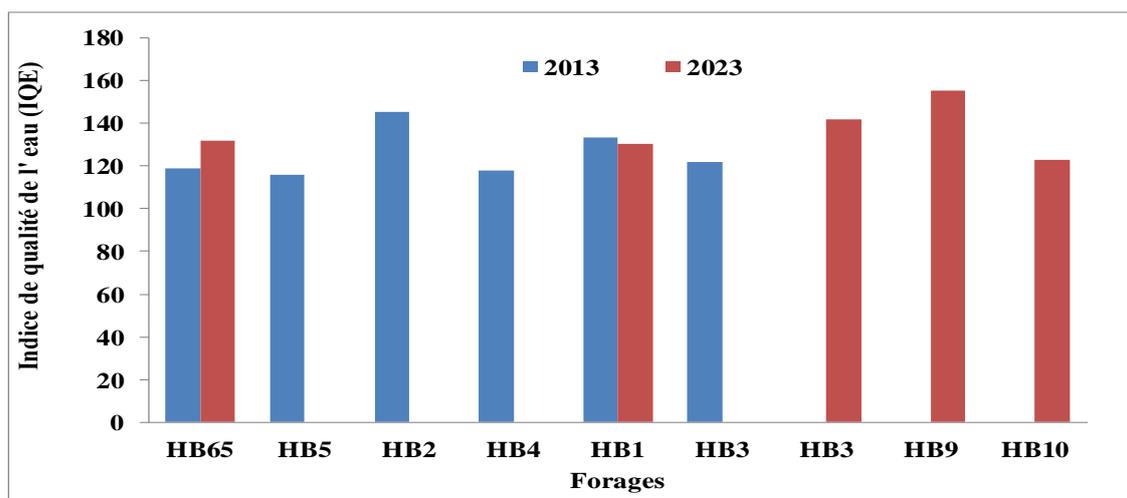


Figure IV.64 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) des forages de Hassi Bahbah (Normes OMS).

Tableau IV.18 : Indice de qualité de l'eau (IQE pondéré) / Normes OMS (Hassi Bahbah).

IQE (NA)	Minimum	Maximum	Moyenne	Variance	Ecart type	Coef de variation (%)
2013	116.13	145.11	125.43	130.29	11.41	9.10
2023	122.99	155.33	136.49	157.02	12.53	9.18

IV.8.5 Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice IQE

Le Tableau IV.19 montre la corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice arithmétique pondéré selon les normes de l'OMS. La conductivité électrique, TDS, SO_4^{2-} , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , TH, Na^+ , K^+ sont fortement corrélés ($0,71 < r < 0,97$) au l'IQE indiquant l'impact de ces paramètres sur la qualité de l'eau. Les bicarbonates et le pH ont une corrélation inverse avec l'IQE. Ceci s'explique par le fait que la recharge provenant de carbonates marqués par une concentration proportionnelle élevée en HCO_3^- et par le pH basique est de bonne qualité, ce qui influence positivement la qualité de l'aquifère étudié (Bekkoussa, 2020). Par ailleurs, on constate des corrélations modérées ($0,6 < r < 0,66$) entre l'IQE et ces paramètres (Ca^{2+} , Mg^{2+} , TH, Na^+) selon les normes algérienne.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Tableau IV.19. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice IQE arithmétique pondéré 2023.

Variables	pH	CE	TDS	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	TH	Na ⁺	K ⁺
IQE (NA) corrélacion	0.02	0.73	0.73	0.32	0.71	0.72	0.64	0.60	-0.43	0.63	0.66	0.97
IQE (OMS) Corrélacion	-0.22	0.93	0.93	0.18	0.90	0.92	0.86	0.86	-0.50	0.87	0.87	0.89

En ce qui concerne l'IQE pondéré calculé selon les normes OMS et algérienne, les résultats consignés dans le [Tableau IV.20](#) montrent des fortes corrélations entre L'IQE et la conductivité électrique, TDS, SO₄²⁻, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, TH, Na⁺, K⁺ avec un coefficient de corrélation variant entre 0,71 et 0,99. Ces résultats montrent l'impact de ces paramètres sur la qualité de l'eau. Les bicarbonates et le pH ont une corrélation inverse avec l'IQE ([Tableau IV.20](#)).

Tableau IV.20. Corrélation entre les paramètres physico-chimiques et l'indice IQE pondéré 2023.

Variables	pH	CE	TDS	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	TH	Na ⁺	K ⁺
IQE (NA) corrélacion	-0.37	0.99	0.99	0.12	0.98	0.98	0.94	0.95	-0.52	0.96	0.92	0.73
IQE (OMS) corrélacion	-0.37	0.99	0.99	0.08	0.98	0.98	0.94	0.97	-0.51	0.97	0.93	0.71

IV.9. Aptitude des eaux à l'irrigation

IV.9.1 Classification des eaux par la méthode de Riverside

Après avoir reporté tous les points d'eau d'Ain Oussera sur le diagramme de RICHARDS ([Figure IV.65](#)), selon la conductivité électrique et la valeur de SAR, les classes suivantes sont mises en évidence :

Nappe de l'Albien d'Ain Oussera

C3S1 : eau de qualité moyenne à médiocre à utiliser avec précaution, nécessite un drainage avec des doses de lessivages et/ou apport de gypse ([Richards, 1954](#) ; [Hassane Saley, 2018](#)). Cette catégorie représente 68,75% des eaux. Les eaux appartenant à cette classe sont : **F1, F2, F3, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17**.

C4S1 : eau de qualité médiocre à mauvaise à utiliser avec précaution pour les sols lourds et les plants sensibles, l'emploi pour les sols légers et bien drainés nécessite une dose de lessivage et/ou apport de gypse ([Richards, 1954](#) ; [Gouaidia, 2008](#)). Cette catégorie représente environ 18,75% des eaux. Les points d'eau appartenant à cette classe sont **F02, F03 et F7**.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

C4S2 : eau de qualité très mauvaise utilisée que pour des sols léger et bien drainé et pour les plants résistance aux sels avec nésite de doses de lessivages et/ou apport de gypse (Richards, 1954 ; Hassane Saley, 2018). Cette catégorie représente environ 12,5% des eaux. Les points d'eau appartenant à cette class sont : **F08** et **F9**.

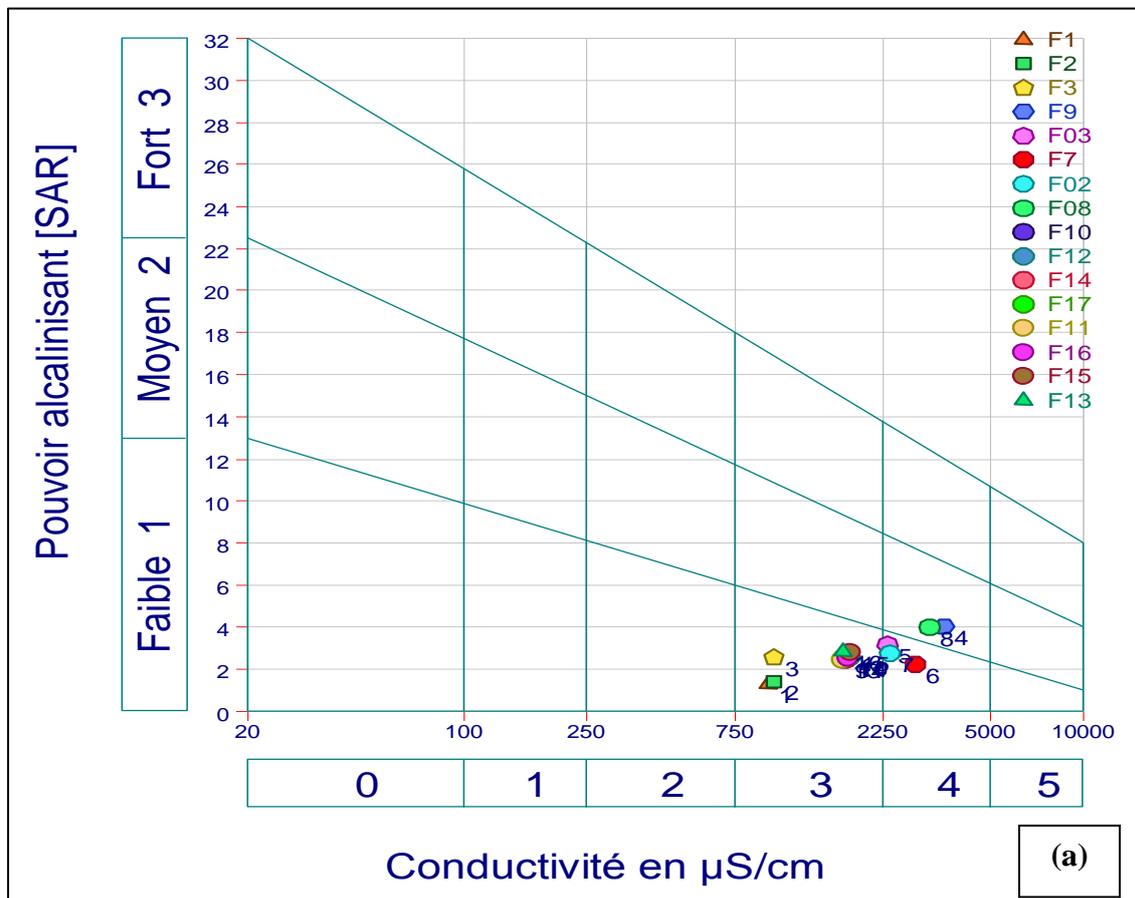


Figure IV.65 : Classification des points d'eau selon le diagramme de Riverside (Ain Oussera).

Nappe de turonien de Hassi Bahbah :

Le report des points d'eau échantillonné sur le diagramme de Richards (Figure IV.66) fait apparaitre que la totalité des eaux des forages appartenant à la classe **C4S1**, indiquant des eaux de mauvaise qualité, fortement minéralisées, qui ne peuvent convenir qu'à des espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés (Richards, 1954 ; Touhari, 2015).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

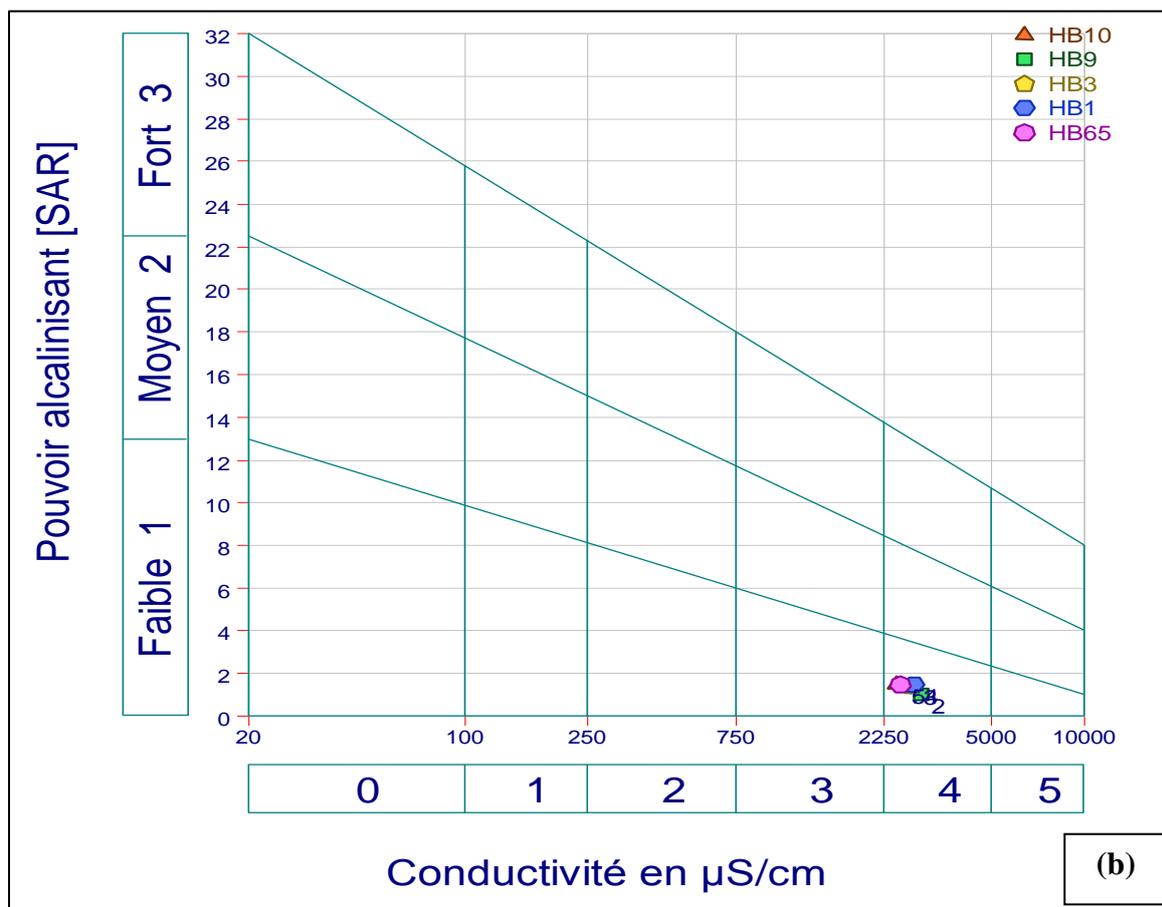


Figure IV.66 :Classification des points d'eau selon le diagramme de Riverside (Hassi Bahbah).

IV.9.2 Classification des eaux par la méthode de Wilcox

Nappe de l'Albien d'Ain Oussera

La représentation de sodium en fonction de la conductivité électrique sur le diagramme de Wilcox (Wilcox, 1955) (Figure IV.67.a) montre que 68,75% des points d'eau (F1, F2, F3, F10, F12, F14, F11, F16, F15, F13, F17) sont de bonne qualité, 18,75% de qualité médiocre (F03, F02, F7) et 12,5% de mauvaise qualité pour l'irrigation (F08, F9).

Nappe de turonien de Hassi Bahbah :

La totalité des échantillons d'eau souterraines de la région de Hassi Bahbah (HB1, HB 3, HB9, HB10 et HB65) sont classés comme médiocres pour l'irrigation.

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

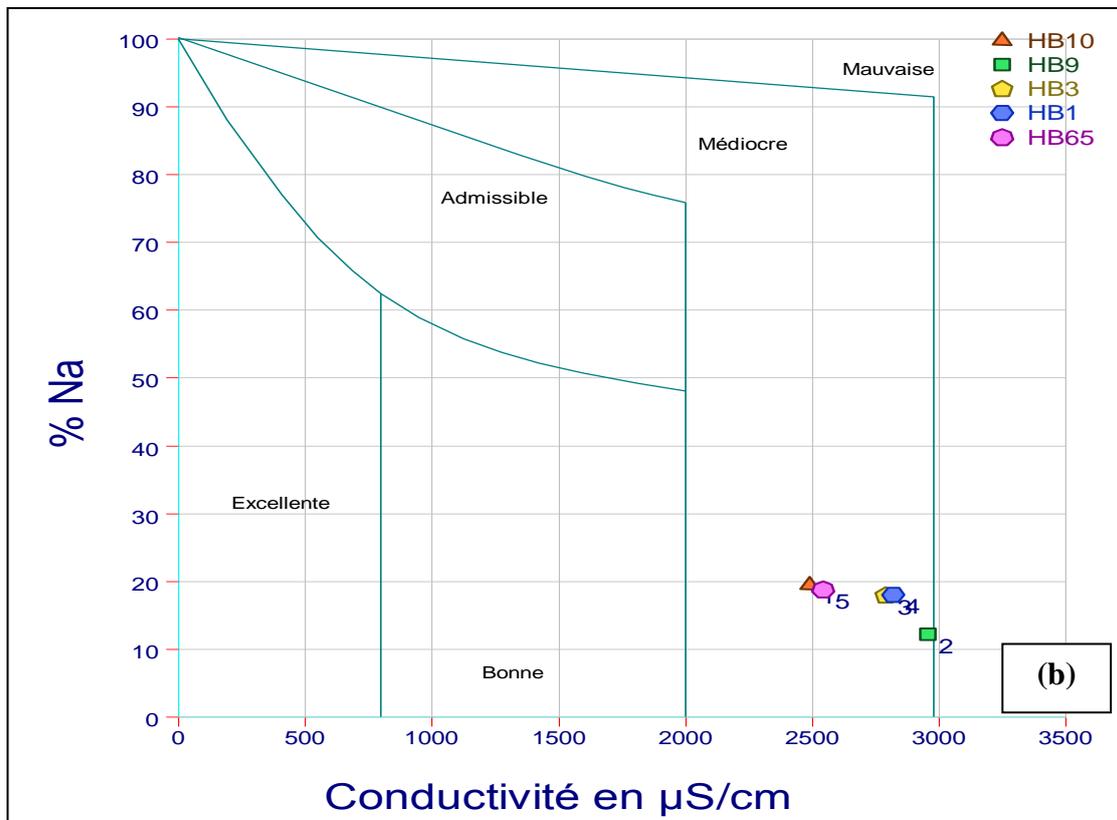
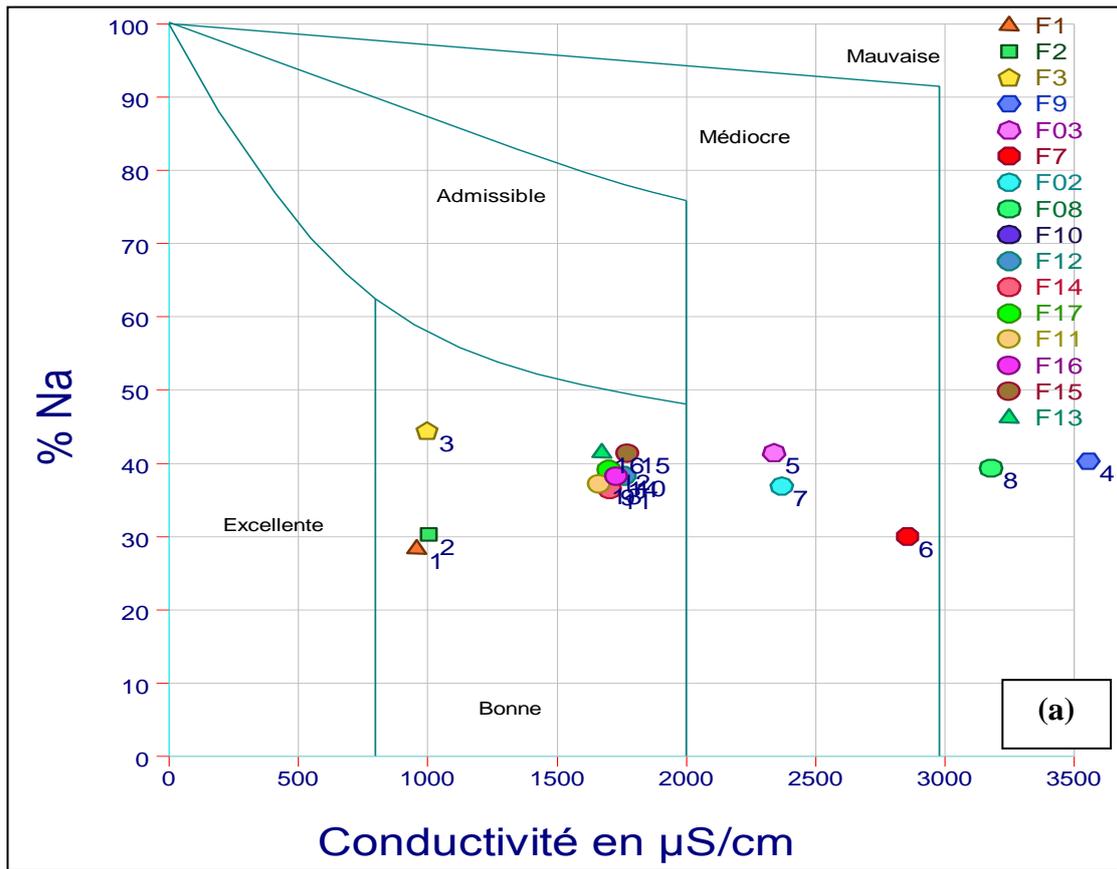


Figure IV.67 :Classification des eaux selon le diagramme de Wilcox
(a : Ain Oussera ; b : Hassi bahbah).

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

III.2. Paramètres bactériologiques :

Les analyses microbiologiques de l'eau permettent de fournir des informations sur la qualité sanitaire de l'eau c'est à dire l'absence du risque d'ingestion des micro-organismes qui causent des maladies, provenant généralement d'une contamination par des matières fécales humaines ou d'autres animaux à sang chaud. Ces micro-organismes pathogènes incluent les Germes totaux, les Coliformes totaux, les Coliformes fécaux, les Streptocoques fécaux et les Clostridium sulfito-réducteurs. Selon (Rodier et al., 2009) la difficulté d'interprétation liée à la présence des coliformes totaux est que si effectivement un certain nombre de ces bactéries mise en évidence sont indicatrices d'une pollution fécale, certaines sont d'origine environnementale. Les coliformes totaux sont d'origine animale et humaine, leur présence dans l'eau indique une contamination récente par des matières fécales (Rodier et al., 2009). La présence des streptocoques fécaux doit s'accompagner de la présence de coliformes fécaux pour être certain d'une contamination fécale d'une eau d'alimentation.

Les analyses bactériologiques réalisées par le laboratoire de l'ADE ont confirmé la qualité microbiologique de l'eau en révélant l'absence totale des germes indicateurs (Tableaux IV.21 et IV.21). Cela permet de conclure que les eaux étudiées présentent une bonne qualité bactériologique et qu'elles ne sont pas contaminées.

Tableau IV.21. Résultats des analyses microbiologiques des eaux (Ain Oussera)

Les paramètres	2013	2023	NA
Germes Totaux	Abs	Abs	10 ml
Coliformes totaux	Abs	Abs	0/100 ml
Coliformes fécaux	Abs	Abs	0/100 ml
salmonella	Abs	Abs	0/100 ml
Streptocoque fécaux	Abs	Abs	0/100 ml

Tableau IV.22. Résultats des analyses microbiologiques des eaux (Hassi Bahbah)

Les paramètres	2013	2022	NA
Germes Totaux	Abs	Abs	10 ml
Coliformes totaux	Abs	Abs	0/100 ml
Coliformes fécaux	Abs	Abs	0/100 ml
salmonella	Abs	Abs	0/100 ml
Streptocoque fécaux	Abs	Abs	0/100 ml

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Conclusion

Une approche intégrée de techniques hydrogéochimiques et statistiques a été utilisée dans ce chapitre pour mieux comprendre la contribution des processus hydrogéochimiques et anthropiques dans le contrôle de la minéralisation des eaux souterraines.

La détermination graphique des faciès à partir des diagrammes de Piper et de Schoeller-Berkalof, Stabler et Stiff a permis de distinguer plusieurs types de faciès hydrochimiques, dont les plus dominants sont : sulfaté calcique caractérisant les eaux de la nappe de Hassi Bahbah, suivant la séquence $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$ et $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$ et le chloruré sodique rencontré dans les eaux de la nappe de Ain Oussera, suivant la séquence $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+$ et $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$. D'autres types de faciès intermédiaires sont à signaler, tels que : chloruré calcique et chloruré magnésien.

L'étude des corrélations établies entre les concentrations des principaux éléments majeurs (Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ et Ca^{2+}) et la minéralisation totale (TDS) des eaux a permis d'identifier l'origine de la minéralisation des eaux souterraines de la zone d'étude.

L'étude des indices de saturation de certains minéraux a révélé que les eaux souterraines sont sous saturées vis-à-vis de des minéraux évaporitiques (gypse et la halite). Les phénomènes d'échanges de base et le processus de précipitation des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) sont généralement à l'origine de la grande variabilité des concentrations des cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} et Na^+) dans les eaux souterraines.

L'application des méthodes statistiques multivariées ACP et CHA nous a permis de classer les échantillons en trois groupes, en allant des eaux les moins minéralisées aux plus minéralisées. En outre, Les résultats obtenus par l'ACP indiquent que les processus de minéralisation évaporitique et salifère jouent le rôle le plus important dans l'évolution du chimisme des eaux souterraines de la plaine.

Le calcul de l'indice de qualité des eaux souterraines suivants les normes OMS et Algérienne, a permis de classer la qualité de l'eau en quatre catégories : excellente, bonne, médiocre et mauvaise. Il est à noter que 93.75% des échantillons analysés (Albien/Ain Oussera) en 2023 appartiennent aux catégories excellentes et bonne qualité pour la consommation d'après l'indice de qualité de l'eau (IQE) pondéré selon les normes Algérienne. En outre, l'indice IQE pondéré montre que la totalité des échantillons analysés (Turonien/Hassi Bahbah) en 2022 sont de bonne qualité pour la consommation selon les normes Algérienne.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

Conclusion générale

La présente étude a été basée sur une combinaison des outils hydrogéochimiques, statistiques et l'indice de la qualité de l'eau (IQE) pour la caractérisation qualitative des ressources en eaux souterraines de la zone d'étude. Dans cette étude, on s'est intéressé aux aquifères : l'Albien de Ain Oussera et Turonien de Hassi Bahbah.

Sur le plan hydrogéologique, la région de Ain Oussera est formée par un remplissage mio-plio-quadernaire, et des formations du crétacé supérieur et inférieur. Dans la Crétacé inférieur il y a les formations d'âge Barrémo-Albo-Aptien qui formé généralement par des grés et des argiles. Alors que les terrains du Crétacé supérieur sont essentiellement gréseux renferment plusieurs horizons aquifères dont le plus important est l'Albien. L'Albien s'avère l'aquifère le plus important du point de vue quantité et qualité de ces eaux où la plus part des forages d'exploitation captent cet horizon. C'est une nappe libre à grand extension et une épaisseur moyenne de l'ordre de 150 m. L'aquifère Turonien de Hassi Bahbah est constitué essentiellement de calcaires massifs fossilifères fissurés et de niveaux plus marneux dans la partie médiane. La fissuration du calcaire donne au Turonien les caractéristiques d'un bon aquifère. Le Turonien affleure localement dans la partie centrale du bassin des Zahrez, notamment à proximité de la commune d'Hassi Bahbah ainsi qu'en limite nord et sud de la zone d'étude.

Le diagramme de Piper montre un faciès de type chloruré sulfaté calcique et magnésien (mixte Ca-Mg-Cl-SO₄). En outre, la représentation des concentrations en éléments majeurs des eaux de la région sur les digrammes de Schöeller Berkloff, Stabler et Stiff a permis de mettre en évidence deux types de faciès hydrogéochimique, l'un de type sulfaté calcique (Ca-SO₄) principalement pour les eaux de la nappe de Hassi Bahbah, l'autre faciès est de type et chloruré sodique (Na-Cl) caractérise les eaux de de la nappe de Ain Oussera. D'autres types de faciès intermédiaires sont à signaler, tels que : chloruré calcique (Ca-Cl) et chloruré magnésien (Mg-Cl).

L'application des outils hydrogéochimiques dans la caractérisation des eaux souterraines a permis d'apporter d'importants éléments sur le chimisme des eaux souterraines et permis l'identification des principaux processus responsables de leur minéralisation. Les principales réactions responsables de cette minéralisation sont : la dissolution des minéraux évaporitiques, essentiellement le gypse et l'halite, associés aussi à la précipitation de la calcite et la dolomite et au phénomène d'échange de base avec les minéraux argileux. Ceci est d'ailleurs en parfait accord avec l'état de sous-saturation des eaux vis-à-vis de ces minéraux

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

pour la majorité des points échantillonnés. En outre, les processus d'origine anthropique sont liés principalement aux activités agricoles.

L'application des méthodes statistiques (ACP et CAH), pour les eaux souterraines nous a permis d'identifier trois groupes d'eaux qui diffèrent par leurs teneurs en éléments dissous et dont la salinité croît dans l'ordre $G3 < G2 < G1$. La forte hétérogénéité chimique est due à la complexité des processus qui contrôlent la géochimie de ces eaux. De plus, l'ACP (cercle des variables) permet d'identifier les mécanismes principaux qui interviennent dans la minéralisation de l'eau souterraine.

La comparaison des analyses physico-chimique des eaux avec les normes OMS et Algérienne, montre que la majorité des eaux souterraines de la région de Ain Oussera sont potable à la consommation humaine (selon les normes OMS, et Algérienne). Par ailleurs, l'évaluation de la qualité de l'eau montre que les eaux souterraines de Hassi Bahbah sont fortement minéralisées et très dures, avec des concentrations en éléments majeurs souvent dépassant les normes de potabilité de l'eau destinée à la consommation humaine recommandées par l'OMS et l'Algérie.

L'indice de la qualité de l'eau (IQE) a été calculé afin d'évaluer la qualité globale des eaux. L'utilisation de l'Indice de Qualité de l'Eau (modèle : IQE arithmétique) permet de classer la qualité de l'eau de Ain Oussera en trois catégories : excellent, bonne et mauvaise (selon les normes Algérienne), et bonne, mauvaise et très mauvaise qualité (selon les normes OMS). Les eaux de l'aquifère de Hassi Bahbah sont classés comme eau de «excellente» et «bonne» qualité (selon les normes Algérienne), et «bonne» à «mauvaise» (selon les normes OMS).

Les valeurs de l'indice de Ain Oussera qualité de l'eau (modèle : IQE pondéré) permettent de classer ces eaux en trois catégories : excellent et bonne (selon les normes Algérienne), et excellente, bonne et médiocre (selon les normes OMS). Les eaux de l'aquifère de Hassi Bahbah sont classés comme eau de «bonne» qualité (selon les normes Algérienne), et «bonne» à «médiocre» (selon les normes OMS). De plus, les analyses bactériologiques réalisées par le laboratoire de l'ADE ont confirmé la qualité microbiologique de l'eau en révélant l'absence de bactéries.

La combinaison du SAR avec la CE dans le diagramme USSL (Richards) indique l'appartenance des points d'eaux de l'aquifère de Ain Oussera aux classes C3S1 (68,75%), C4S1 (18,75%) et C4S2 (12,5%), traduisant ainsi un risque de salinité élevé à très élevé et un risque de sodicité faible à moyen. Par ailleurs, les points d'eaux échantillonnés à Hassi Bahbah regroupés, en général dans la classe C4S1 présentent un risque de salinité très élevé et

CHAPITRE IV : RÉSULTATS ET DISCUSSION

un risque de sodicité faible. Le diagramme de Wilcox indique que les eaux souterraines de Ain Oussera appartiennent aux classes bonne (68,75%), médiocre (18,75%) et mauvaise (12,5%) qualité pour l'irrigation. Par ailleurs, tous les points d'eaux échantillonnés à Hassi Bahbah sont de qualité médiocre pour l'irrigation

Recommandations et Perspectives

À la lumière des résultats obtenus et les conclusions tirées, plusieurs recommandations perspectives et peuvent être émises pour la protection des ressources en eau souterraine de la zone d'étude.

- ✓ Un suivi permanent de la qualité des eaux souterraines est indispensable ;
- ✓ Pour protéger ces ressources en eau contre la pollution, il est recommandé d'élaborer la carte de la vulnérabilité des eaux à la pollution pour les nouveaux projets d'aménagement. L'emploi du Système d'Information Géographique (SIG) permettra de produire des modèles pouvant fournir la base pour développer un ensemble de zones où les eaux souterraines sont vulnérables à la pollution ;
- ✓ Concernant l'agriculture, il est recommandé de limiter l'utilisation excessive des engrais chimiques dans les sols à forte perméabilité, afin de limiter l'infiltration des éléments chimiques vers la nappe ;
- ✓ La mise en place des périmètres de protection réglementaires autour des ouvrages de captage des eaux souterraines.
- ✓ Réaliser de nouvelles stations d'épuration appropriées aux agglomérations afin de supprimer les rejets en milieu naturel.

RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques :

- A.N.R.H. (1983)**, Rapport d' étude hydrogéologique de la nappe d' Ain Oussera. N° 83. DHYG.011. 48p. A. N. R. H. Alger.
- Abbasi.T et Abassi.S.A (2012)**, Water quality indices, Elsevier, ISBN : 978-0-444-54304-2, 375p.
- Abid K (2010)** Identification et caractérisation hydrogéologique et géochimique de la nappe du turonien dans le sud tunisien et sa relation avec les aquifères adjacents Université de Sfax, École Nationale d'Ingénieurs de Sfax ; 179 p.
- Abid. K, Trabelsi.R, Zouari.K&Abidi. B (2009)**, Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire (sud tunisien) / Hydrogeochemical characterization of the Continental Intercalaire aquifer (southern Tunisia), Hydrological Sciences Journal, 54 :3, 526-537, DOI : 10.1623/hysj.54.3.526.
- Abreha A.G. (2014)**, Hydrogeochemical and water quality investigation on irrigation and drinking water supplies in the Mekelle Region. Northern Ethiopia. *M.sc.Thesis. Univ. Twente*. 91p.
- Adams, S., Titus, R., Pietersen, K., Tredoux, G. & Harris, C., (2001)**, Hydrochemical characteristics of aquifers near Sutherland in the Western Karoo, South Africa. *Journal of Hydrology* 241 (2001) : 91–103.
- Aissaoui.A et Fara.L (2023)**, Application des indices de qualité de l'eau et l'approche statistique à l'évaluation qualitative des eaux usées épurées de la station d'épuration de la wilaya de Djelfa, Mémoire de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 128p.
- Al Yousif.M, Chabuk.A (2023)**, Assessment Water Quality Indices of Surface Water for Drinking and Irrigation Applications – A Comparison Review, *Journal of Ecological Engineering*, 24(5), p40–55, <https://doi.org/10.12911/22998993/161194>.
- Al-Shujairi S.O.H. (2016)**, Reliability of water resources quality monitoring program data. *College of Engineering Journal (NUCEJ)* 19 (2) : 246-254.
- Amadou.H, Laouali.M.S et Manzola.A (2014)**, Analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de trois aquifères de la région de Tillabery : application des méthodes d'analyses statistiques multivariées, *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680, n°20, p25-41.
- Amor.B et Ben messaoud.C (2023)**, Classification qualitative de quelques eaux minérales et eaux de sources embouteillées de l'Algérie, thèse de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 95p.
- Aouidane.L (2017)**, Origines de la salinisation des eaux et des sols d'une zone à climat semi-aride : Cas de Remila (W. Khenchela), thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, 215p.
- Appelo, C.A.J. Postma, D (1996)**, Geochemistry, Groundwater and Pollution. London :Balkema, 536p. ISBN 04 1536 421 3.
- Appelo.C et Postma.D(1993)**, Geochemistry, Groundwater and pollution. Rotterdam: A.A Balkema.
- Arif.R.D et Meriouma.A (2023)**, Évaluation spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines dans la région de Ouargla, Mémoire de master, Université Kasdimerbah – Ouargla, 96p.
- Awachat.A.RetSalkar.V.D (2017)**, Ground Water Quality Assessment through WQIs, *International Journal of Engineering Research and Technology*. Vol 10, No 1, p318-322.
- Ayad.A (1983)**, Etude hydrogéologique de la nappe d' Ain Oussera. N° 83. DHYG.011. 48p. A. N. R. H. Alger.
- Azlaoui.M (2018)**. La gestion intégrée des ressources en eau de la wilaya de Djelfa (Cas de la plaine d'Ain Oussera), Thèse de Doctorat, Université Kasdi-Merbah – Ouargla, 175p.
- Azlaoui.M, E.Nezli I., A.Foufou, N. Haied (2017)**. Hydrodynamic Modeling of the Albian Aquifer of the Plain of Ain Oussera (Semi-Arid Area, Algeria). *Energy Procedia*, 119, p242–255.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Azlaoui.M, Zeddouri.A, Haied.N, Nezi.I, Foufou.A(2021).** Assessment and Mapping of Groundwater Quality for Irrigation and Drinking in a Semi-Arid Area in Algeria, *Journal of Ecological Engineering*, 22(8), p19–32, <https://doi.org/10.12911/22998993/140369>.
- Bechtel (1977).** Rapport d'étude de l'aérodrome d'Ain Oussera. A.N.R.H, Alger.
- Bekkoussa.B, Jourde.H, Batiot-Guilhe.C, Meddi .M, Khaldi.A&Azzaz .H (2013),** Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriiss, Nord-Ouest algérien, *Hydrological Sciences Journal*, 58 :5, 1111-1127, DOI : 10.1080/02626667.2013.800639.
- Bekkoussa.S.M (2020),** Approche Hydrogéologique et Hydrochimique des Echanges entre Aquifères Profonds et Superficiels du Bassin d'Oued Fekan, Thèse de Doctorat, Université Mustapha Stambouli-Mascara, 198p.
- Belkacem. H et Mendi. I (2020),** Contribution à l'étude qualitative de quelques sources dans la région de Ghazaouet et de Nedroma (Nord-Ouest Algérien), Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 73p.
- Belmiloud, N (2017)** Modélisation par SIG du potentiel de contamination par les nitrates dans la plaine du Moyen Cheliff Occidental
- Ben Alaya.M, Zemni.T, Mamou.A&Zargouni.F (2014),** Acquisition de salinité et qualité des eaux d'une nappe profonde en Tunisie : approche statistique et géochimique, *Hydrological Sciences Journal*, 59 :2, 395-419, DOI : 10.1080/02626667.2013.870663.
- Ben Hamouda, M. F (2008),** Approche hydrogéochimique et isotopique des systèmes aquifères côtiers du cap bon : Cas des nappes de la côte orientale et d'El Haouaria. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique de Tunisie. 257p.
- Ben moussa.A, Mzali.H, Bel HajSalem.S (2019),** apports des outils hydrogéochimiques a l'évolution de la qualité et l'aptitude des eaux souterraines a l'irrigation : Cas de la nappe phréatique de la base valle de Medjerda , Tunisie nord-oriental . La houille blanche 5-6 : 35-44.
- Benaissa.C, Bouhmedi.B, Rossi.A, El Hammoudani.Y et Dimane.F (2022),** Assessment of Water Quality Using Water Quality Index (WQI): Case Study of Bakoya Aquifer, Al Hoceima, Northern Morocco, *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 23(4), p31–44. <https://doi.org/10.12912/27197050/149495>.
- Bendjedou.M (2015).** Valorisation et gestion des ressources en eau en zone semi-aride a aride : cas de la plaine de Ain Oussera (Hautes plaines algéroises, Algérie), Mémoire de magister, Université d'Oran 2, 129p.
- Benferdia.A et Korichi.M.A (2020),** évaluation de la qualité des eaux souterrains par outil SIG cas de la partie aval du bassin versant d'oued Djendjen Jijel 2020, Mémoire de master, Université KasdiMerbah – Ouargla, 73p.
- Benrahou.I (2023),** Analyse comparative des modèles d'indice de la qualité des eaux de surface (cas du barrage de Keddara), Mémoire de Master, Université AboubakrBelkaïd– Tlemcen, 87p.
- Bonnefoy C., Guillet F., Leyral G., Vern-Bourdais E (2002).** Microbiologie et qualité dans les industries agroalimentaire, science des aliments. Edition Doin, paris, France. 105p.
- Bouabdallah (2015).** Analyses physico-chimiques de l'eau potable au niveau de la wilaya de Djelfa (Ville de Ain Oussera), Mémoire de master, Université Ziane Achour - Djelfa, 80p.
- Bourjila, A (2023).** Modélisation hydrochimique de l'intrusion marine dans l'aquifère côtier de Ghiss-Nekor et caractérisation des zones potentielles en eaux souterraines dans les bassins versants de Ghiss et Nekor (Maroc) à l'aide des méthodes géospatiales. Thèse de Doctorat Université Abdelmalek Essaâdi (Tétouan, Maroc), 182p

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bouselsal.B (2016)**, Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie), thèse de Doctorat, Université Badji Mokhtar – Annaba, 204p.
- Bouteldjaoui (2020)**, Hydrogéologie, modélisation et gestion des ressources hydriques en zone semi-aride (Cas de la région de Djelfa), thèse de Doctorat, École Nationale Polytechnique, 237p.
- Bouteldjaoui.F, Kettab.A, Bessenasse.M, Oualkacha.L (2017)**. Apport de l'analyse statistique multivariée de l'hydrogéochimie et de la géostatistique à l'étude des eaux souterraines : cas de la plaine d'Ain Oussera Algérie, Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement No2, p29-32.
- Brown R. M, McClelland N. I, Deininger R. A and Tozer R. G (1970)**, "A Water Quality Index: Do We Dare?" Water Sewage Works, Vol. 117, No. 10, 1970, pp. 339-343.
- Brown, R.M., McClelland, N.J., Deininger, R.A. and O'Connor, M.F. (1972)** A Water Quality Index—Crossing the Psychological Barrier. Proceedings of the International Conference on Water Pollution Research, Jerusalem, 18-24 June 1972, 787-797.
- Canadian Council of Ministers of the Environment (2005)**, Comparaison entre l'indice de la qualité général de l'eau du Québec IQBP et l'indice de qualité des eaux de CCME pour la protection de la vie aquatique 2005, 17p.
- Caratini.C (1970)**. Etude géologique de la région de Chellala–Reibell. Publ. Serv. Carte géol. Algérie, Alger, No 40, vol 2, 311p.
- Castany G. (1963)** – prospection et exploitation des eaux souterraines, Édition. Dunod, paris, p711
- Castany, G. (1963)**. Traité pratique des eaux souterraines. 2 ème édition. Paris : Dunod, 641p.
- Cavallo J-D., Antoniotti G., Baffoy N., Hajjar J., Horn C., Mounier M., Salomon V (2002)** Surveillances microbiologique de l'environnement dans les établissements de santé Air, eaux et surfaces. Direction générale de la santé. Direction de l'hospitalisation et de l'organisation des soins. Comité technique national des infections nosocomiales, France .77p.
- Cerling TE, Pederson BL, Damm KLV (1989)**, Sodium-Calcium ion exchange in the weathering of shales: implications for global weathering budgets. Geology 17: pp 552–554.
- Chatterjee.C et Raziuddin.M (2020)**, Determination of water quality index (wqi) of a degraded river in asansol industrial area, burdwan, west bengal", nature, environment and pollution technology, Vol1(No2), p181–189.
- Chevalier p (2002)** Entérocoques et streptocoques fécaux. Fiche synthèses sur l'eau potable et la santé humaine. Groupe scientifique sur l'eau, Institut national de santé publique du Québec, 5p.
- Chevalier, P. (2003)** Coliformes totaux. Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine. Groupe scientifique sur l'eau, Institut national de santé publique du Québec, p4
- Chidiac.S, El Najjar.P, Ouaini.N, El Rayess.Y et El azzid.D (2023)**, Comprehensive review of water quality indices (WQIs) : history, models, attempts and perspectives, Rev Environ SciBiotechnol (22) 2023, p349–395. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09650-7>.
- Cloutier V, Lefebvre R, Therrien R, Savard MM (2008)** Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. J Hydrol 353:294–313. <https://doi.org/10.1016/j.jhydr ol.2008.02.015>
- Dakoure, D (2003)** Etude hydrogéologique et géochimique de la bordure sud-est du bassin sédimentaire de Taoudeni (Burkina-Faso – Mali) – Essai de modélisation. Thèse Doctorat, Université. Paris 6, 255pp.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Datta PS, Tyagi SK. (1996)**, Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: chemical weathering processes and groundwater regime. *J Geol Soc India* 47: pp 179–188.
- Davis, J.C. (1986)**. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc., New York.
- Debabza. M (2005)** : Analyse microbiologique des eaux des plages de la ville d'Annaba Evaluation de la résistance aux antibiotiques des microorganismes pathogènes, Mémoire de Magister en Microbiologie appliquée, Université Badji-Mokhtar, Annaba, Algérie.
- Debieche. T.H (2002)** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse. Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat : Sciences de la Terre : Franche Comté, France : Université de Franche comté, 199 p.
- Delarras C (2003)** Surveillance sanitaire et microbiologique des eaux : réglementation-Prélèvement - Analyse, Edition médicales internationales, Lavoisier, Paris, 269p.
- Dhaoui.Z (2010)**, Contribution des traceurs géochimiques (2H, 1 8O, U) pour la compréhension du fonctionnement hydrodynamique de la nappe du Continental Intercalaire dans le Sud tunisien, thèse de Master, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax – Tunis, 106p.
- Djabri L., (1996)**, Pollution des eaux de la vallée de la Seybouse - régions Guelma - Bouchegouf - Annaba, ses origines géologiques, industrielles, agricoles et urbaines. Thèse de docteur d'état. Univ. Annaba. 247p.
- Desjardins, R. (1990)** Le traitement des eaux. 2ème Ed revue et enrichie. Canada. ISBN: 978-2-553-00643-2. Pp 08-47-71-111.
- Drever, J.I. (1997)**, *Geochemistry of natural waters*. 2nded. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Durand (1982)**. *Les sols irrigables*. Edfc. P.u.f. Paris, p340.
- El Yaouti, F., et al. (2008)**. Salinization processes in the unconfined aquifer of Bou-Areg (NE Morocco): A geostatistical, geochemical, and tomographic study. *Applied. Geochemistry*, 24 (1), 16–31.
- Farid I., Zouari K., Rigane A., Beji R (2015)**, Origin of the groundwatersalinity and geochemical processes in detrital and carbonate aquifers: Case of Chougafiya basin (Central Tunisia). *Journal of Hydrology* 530 (2015).Pp 508–532.
- Fisher RS, Mulican WF. (1997)**, Hydrochemical evolution of sodium-sulfate and sodiumchloride groundwater beneath the Northern Chihuahuan desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeol J* 10: pp 455-474.
- FUNASA. (2013)**. Fondation Nationale de la Santé. Manuel pratique d'analyse de l'eau. Brésil. – 4e édition 4. Brasilia, 150 p. <http://www.funasa.gov.br>
- Gaagai, Aissam (2017)**. Etude de l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Babar (Sud-Est Algérien) et l'impact de la rupture de la digue sur l'environnement. Thèse de Doctorat, Université de Batna 2.
- Gapon.E. N. (1933)**. Theory of exchange adsorption in soils. *J. Gec Chem.(URSS)*, 19: 114-158p.
- Garcia M.G., De Hidalgo M., Blesa M.A. (2001)**, Geochemistry of groundwater in the alluvial plain of Tucuman province Argentina. *Journal of Hydrology*, 9, 597–610.
- Ghibeche I (2011)** Contribution à la régionalisation stochastique des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines dans le cadre d'un SIG-Application a la région de Djelfa Mémoire de Magister. École Nationale Supérieure Agronomiques. Alger, 101 p.
- Ghodbane.M (2018)**, Estimation des potentialités des eaux souterraines et estimation de la pollution par les nitrates : Cas de la région de Chemora-Est algérien, Thèse de Doctorat, Université Mostefa Benboulaïd –Batna 2, 192p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Gleeson C., Gray N (1997)** The coliform index and waterborne disease: problems of microbial drinking water assessment, E & FN Spoon, London.
- Gouaidia.L (2008)**, Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana Nord-est Algérien, thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar-Annaba, 199p.
- Guechi.H et Leulmi.A (2015)**. Les eaux superficielles caractérisation physico-chimiques et aptitude (Lac réservoir du barrage mexas nord-est algérien) 2015, Mémoire de master, Université Badji Mokhtar – Annaba, 107p.
- Güler, C., Thyne, G.D., Mccray, J.E., Turner, A.K. (2002)**. Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data. *Hydrogeology Journal* 10, 455-474.
- Gutierrez. A (2003)**. Modélisation stochastique des régimes pluviométriques à l'échelle régionale pour la prévision des crues au nord-Mexique Thèse de Doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble, 174 p.
- Hachaichi.Z (2016)**, Quantification de la recharge naturelle et artificielle d'un système aquifère soumis à des contraintes climatiques et anthropiques en zone semi –aride (bassin de Foussana) Tunisie centrale, thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université D'Avignon, 261p.
- Hadef. S (2023)**. Caractérisation physico-chimique des eaux du barrage de Guenitraet ses affluents (Skikda, Nord Est Algérien), These de Doctorat, Université Mohamed Seddik Benyahia – Jijel, 124p.
- Hadj Ammar.F (2016)**, Caractérisation des eaux de l'Aquifère du Complexe Terminal : Approche multi-isotopiques (234U/238U, 36Cl, 14C, $\delta^{18}O$, δ^2H), thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, Université Aix Marseille, 219p.
- Hallouche.B (2017)**, Bassin versant de la haute Mekerra (NW Algérie) : Hydrologie, Géochimie et Pollution, thèse de doctorat, Université Aboubaker Belkaid- Tlemcen, 326p.
- HassaneSaley.A (2018)**, Évaluation des ressources en eau de l'aquifère du Continental Intercalaire/Hamadien de la région de Tahoua (bassin des Iullemeden, Niger) : impacts climatiques et anthropiques, Thèse de doctorat, Université Paris Sud / Université Abdou Moumouni, 296p.
- Hem J.D. (1985)**. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. 3rd Edition. US Geological Survey Water-Supply Paper 2254. Univ. Virginia. Charlottesville. 263 p.
- Horton.R.K (1965)**. An index-Number system for rating water quality, *Journal of water pollution control federation* Vol.37, p300-306.
- Hounslow A.W. (1995)**. Water Quality Data: Analysis and Interpretation. CRC Press LLC. Lewis Publishers. Boca Raton. [https:// doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.066](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.03.066).
- Jones, G., et al (1997)**, Dolomitization of carbonate platforms by saline ground water: Coupled numerical modeling of thermal and reflux circulation mechanisms. In *Proceedings of Geofluids II Conference*, Chippenham, UK: Antony Rowe Ltd., pp. 378–381.
- JORA. (2011)**. « journal officiel de la république algérienne ». N °18. P7-9.
- Kaiser H. F., (1960)**. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement*, 20, 141-151
- Kaka E.A., Akiti T.T., Nartey V.K., Bam E.K.P., Adomako D. (2011)**. Hydrochemistry and evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in the southeastern Volta River basin: Manyakrobo area. *Ghana. Elixir Agriculture* 39, 4793-4807.
- Kamel.S, Dassi.L & Zouari.K (2006)**, Approche hydrogéologique et hydrochimique des échanges hydrodynamiques entre aquifères profond et superficiel du bassin du Djérid, Tunisie, *Hydrological Sciences Journal*, 51 :4, 713-730, DOI : 10.1623/hysj.51.4.713.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Katz B.G., Collins J.J. (1998).** Evaluation of chemical data from selected sites in the Surface Water Ambient Monitoring Program (SWAMP) in Florida. Open-File Report 98-559. U.S Geological Survey. 51p.
- Kerai.Y (2017).** Evaluation qualitative des eaux souterraines de la plaine de Sidi Bel Abbès : approche hydrogéochimique. Mémoire de Master. ; Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 109p.
- Kermanshahi K Y., Tabaraki R, Karimi H, Nikorazm M, Abbasi S (2010).** Classification of Iranian bottled waters as indicated by manufacturer's labellings, Food Chemistry, 120 1218 1223.
- Kloppmann W., Bourhane A., Asfirane F (2011).** Méthodologie de diagnostic de l'origine de la salinité des masses d'eau, emploi des outils géochimiques isotopiques et géophysiques. Rapport BRGM/RP-60026-FR, 37p.
- Korchi.K et Magri.A.Y (2016),** Étude piézométrique et hydrochimique des eaux souterraines de la plaine d'Ain Oussera Approche statistique, géostatistique et géochimique, thèse de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 122p.
- Kraiem.Z (2015),** les nappes phréatiques du chott Djérid (Sud-Ouest tunisien) : Caractérisation, mécanisme de minéralisation et étude de vaporisation, thèse de Doctorat, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax, 269p.
- Lakhrif.H et Hedidi.F (2020).** Etude de la qualité des eaux de Timiaouine par l'utilisation de GIS et WQI, Mémoire de master, Université Ahmed Draïa – Adrar, 90p.
- Larbi.S (1983).** Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de Ain Oussera, Mémoire d'ingénieur d'état, USTHB, 58p.
- Maizi.D (2014),** Etude hydrologique et hydrogéologique du bassin versant du Chott Ech Chergui Hautes plaines- Ouest Algérie, thèse de Doctorat, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 261p.
- Maoui.A, Kherici.N, Derradji.F (2009).** Hydrochemistry of an Albian sandstone aquifer in a semi-arid region, Ainoussera, Algeria, Environ Earth Sci, p123-135, DOI 10.1007/s12665-009-0207-1
- Maoui.A, Kherouf.M, Kachi.S, Nouar.T (2011).** Variographic analysis of chemical and piezometric data, Arab J Geosci Vol 6, p1307-1324, DOI 10.1007/s12517-011-0422-4.
- Mclean W., Jankowski J., Lavitt N (2000).** Groundwater quality and sustainability in an alluvial aquifer, Australia. In : Sililo O. et al. (eds) Groundwater, past achievement and future challenges. AABalkema, Rotterdam, pp 567-573
- Mebrouk.N (1994).** Contribution to hydrogeological study of the Ain Oussera Plain (High plains), Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Oran Es Senia, Algeria. 296p.
- Mebrouk.N, Blavoux.B, Issaadi.A, Marc.V (2007).** Geochemical and isotopic characterisation of high-mg groundwaters in an endorheic basin Ain Oussera, Algeria, Journal of environmental hydrology, No 26 Vol 15, p1-20.
- Medina-Gomez, J. and et Herrera-Silveira, A., (2003).** Estuarine spatial characterization of water quality in a karstic coastal lagoon without anthropogenic disturbance: A multivariate approach. Coastal Shelf Science, 58, 455–465.
- Merzougui.F.Z (2020),** Etude hydrogéologique, hydrochimique et microbiologique des eaux souterraines dans le synclinal du Crétacé inférieur de la région de Béni Ounif (Le revers méridional de l'Atlas Saharien occidental, Algérie), thèse de doctorat, Université de Tahri Mohamed – Béchar, 183p.
- Najib S (2014).** Étude de l'évolution de la salinisation de l'aquifère de la Chaouia côtière (Azemmour BirJdid, Maroc) : climatologie, hydrogéologie, hydrochimie et tomographie électrique. Hydrologie. Thèse de Doctorat Université. Chouaib Doukkali, Maroc, 258p.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Najib.S, Mehdi.K, Riss.J, Fadili.A, Pulido-Bosch.A&Guessir.H (2016)**, Salinisation de l'aquifère libre de la Chaouïa côtière (AzemmourTnineChtouka), Maroc, Hydrological Sciences Journal, DOI : 10.1080/02626667.2016.1162906.
- Ni Made.H.S, Ni Wayan.R (2019)**. Assessment of Water Quality Index of Beratan Lake Using NSF WQI Indicator, Warmadewa Medical Journal, Vol.4 No.2, p39-43.<http://dx.doi.org/10.22225/wmj.4.2.1317.39-43>.
- Nouradine, H. (2023)** Évaluation des ressources en eau dans les aquifères de socle dans la région du Guéra (Tchad) : combinaison d'approches géologiques, hydrogéologiques, géophysiques, géochimiques et d'apprentissage automatique. Université de Sorbonne, 311 p.
- Nour.H et Daoudi.E (2020)**. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines de la nappe Albiennaise de Ain Oussera (Djelfa), Mémoire de master, Université Djilali Bounaama de - Khemis Miliana, 95p.
- OMS, Organisation Mondiale de la Santé. (2008)**. Guidelines for Drinking Water Quality, 3rd ed. Vol 1. Incorporating the first and Second Addenda, WHO, Geneva: ISBN 978 92 4 154761 1.
- OMS. (2011)**. Normes internationales applicables à l'eau de boisson, Genève.
- Ouanouki B. (2012)**. Modélisation de la demande en eau dans une région aride. Cas de la Wilaya de Djelfa. Revue « Nature & Technologie ». N° 06/Janvier, 93-105.
- Ouanouki B. (2014)**. Demande en eau et Impact de la réutilisation des eaux usées traitées et des boues en agriculture et dans les techniques forestières. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. École Nationale Supérieure Agronomique, 255
- Piper AM, 1944**.A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. Trans amGeophys union 25:914-923.
- Plummer, L.N., Truesdell, A.H., et Jones, B.F.(1976)**; WATEQF, a Fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. US Geological Survey Water Resources Investigation Report 76-13. <Http://pubs.usgs.gov/wri/1976/0013/report.pdf> [Accessed June 2006].
- Rabiet, M. (2006)**. Contamination de la ressource en eau par les eaux usées dans un bassin versant méditerranéen : Apport des éléments majeurs, traces et terres rares. Thèse de Doctorat.Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, 368 p.
- Rajmohan N., Elango L. (2004)**, Identification and evolution of hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India.EnvironGeol 46: pp 47–61
- Rahal.O (2021)** Étude du fonctionnement hydrogéologique et hydrogéochimique d'une ressource en eau en zone semi-aride. Cas de l'aquifère de F'kirina, wilaya d'Oum El Bouaghi Nord-Est Algérien. Thèse de Doctorat LMD 3ème cycle. Université de Larbi Tebessi Tébessa, 173p.
- Ramakrishnaiah.C.R.,Sadashivaiah C., and ranganna.G., (2009)**.Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in TumkurTaluk, Karnataka State,India. E-Journal of Chemistry, 6(2), pp. 523-530.
- Randriamahefa.H, Randriamboavonjy.J.C, Rejo.R et Andriambintsoa.R.T (2020)**.Water quality index (WQI) Calculation for the evaluation of phisico-chemical quality of rainwater collected in reservoirs full of sand (RFS), International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education Vol-6 No-6, p1050-1061.
- Restrepo.A, Diaz.Y.J.RetBarraza.H.C.O (2022)**.Water quality indices (WQI) and contamination indices (WPI) a bibliographic review, Tecnura, 27(77), p1-50. <https://doi.org/10.14483/22487638.20052>.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Ribeiro, L. And Macedo, M.E. (1995).** Application of multivariate statistics, trend and cluster analysis to groundwater quality in the Tejo and Sado aquifer. In: Groundwater quality: Remediation and Protection. Proceedings of the Prague Conference, May 1995. IAHS Publ. N° 225, pp.39-47.
- Richards, L.A., 1954.** Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Washington, DC: US Department of Agriculture, Handbook no. 60p.
- Rodier, J. (1996).** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. Paris : 8e édition, Dunod.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N et coll. (2009).** L'Analyse de l'eau. Paris: Dunod, 1526 p. ISBN 978-2-10-054179-9.
- Sawyer G.N, McCarty D.L (1967)** Chemistry of sanitary engineers, 2nd edn. McGraw Hill, New York.
- Schoeller H. (1977),** Geochemistry of groundwater. In: Brown RH et al (eds) Groundwater studies- an international guide for research and practice. UNESCO, Paris, pp 1-18.
- Scholler.H (1956).** Géochimie des eaux souterraines : Application aux eaux de gisement de pétrole. Paris : Société Technip, 213 p.
- Schott, Pp., Van Der Wal, J. (1992).** Human impact of regional groundwater composition through intervention in natural flow patterns and changes in land use. Journal of Hydrology 134, 297 – 313.
- Sellali.M (2019).** Mesure et suivi de l'extension urbaine de la ville de Hassi Bahbah à l'aide de l'imagerie optique. Mémoire de master, Université de Ziane-Achour Djelfa. 109p.
- Simler R (2009).** Diagrammes software. <http://www.lha.univ-avignon.fr/LHALogiciels.htm>
- Soro.G, Soro.T.D, Fossou.N.M.R, Adjiri O.D et Soro.N (2019).** Application des méthodes statistiques multivariées à l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région des lacs (centre de la Côte d'Ivoire), Int. J. Biol. Chem. Sci. 13(3) : 1870-1889 <https://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v13i3.54>
- Sourogou.R.M., Hountondji.F.C.C, Zakari.S, Akossou.A.Y (2021).** Water Quality in Batran, Karakoudarou, Nawari and Tissarou dam reservoirs in the departement of Alibori in the Northern Benin, Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n°48, pp. 29-47.
- Statsoft(2010)** Statistica prise en main, manuel d'utilisation de Statistica. Copyright©Statsoft 2010. 330 p. <http://www.statsoft.fr/pdf/STATISTICA-prise-en-main.pdf>
- Steinhorst, R.K., Williams, R.E. (1985).** Discrimination of groundwater sources using analysis, MANOVA, Canonical analysis and discriminant analysis. Water Resources Research 21, 1149 – 1156
- Stiff H.A (1951).** The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. J. Petrol. Technol. 3 (10) 15 –3. <https://doi.org/10.2118/951376-G>.
- Talhaoui.A, El Hmaidi.A, Jaddi.H et Ousmana.H (2020).** Calcul De L'indice De Qualité De L'eau (IQE) Pour L'évaluation De La Qualité Physico-Chimique Des Eaux Superficielles De L'Oued Moulouya (NE, Maroc), European Scientific Journal, Vol.16, No.2, p64-85.
- Templ, M., Filzmoser, P., and et Reimann, C. (2008).** Cluster analysis applied to regional geochemical data : problems and possibilities. Applied Geochemistry, 23, 2198–2213.
- Tirkey.P, Bhattacharya.T, Chakraborty.S (2015).** Water Quality Indices – Important tools for water quality assessment: A review, International Journal of Advances in Chemistry (IJAC) Vol.1, No.1 2015, p15-29, DOI: 10.5121/ijac.2015.1102
- Todd D.K. (1980).** Groundwater Hydrology (2nd edn). Wiley. New York. 552pp.
- Touhari.F (2015),** Etude de la Qualité des Eaux de la vallée du Haut Cheliff, thèse de doctorat, école nationale supérieure d'hydraulique, 186p.
- Tyagi.S, Sharma.B, Singh.P et Dobhal.R (2013).** Water quality assessment in terms of water quality index, American journal of water resources, Vol1 No3, p34-38, DOI :10.12691/ajwr-1-3-3.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Uddin.G, Nash.S, Olbert.A.I (2021).** A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality, Ecological indicators Vol.122, (2021), p1-21, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107218>.
- Varol, S. and Davraz, A. (2015).**Evaluation of the groundwater quality with WQI (Water Quality Index) and multivariate analysis: a case study of the Tefenni plain (Burdur/Turkey), Environ Earth Sci73 : 1725. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3531-z>.
- Venugopal, T., Giridharan, L., and etJayaparkasch, M. (2008).**Groundwater quality assessment using chemometric analysis in the Adyar River, South India. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 55, 180–190.
- Ward, J (1963)** Hierarchical grouping to optimize an objective function. American journal of Statistic Association.69: 236-244.
- Wilcox L.V. (1955)** - Classification and use of the irrigation waters.U.S. Department of Agriculture Circular, 969, Washington, District of Columbia, 19 p.
- Yebdri.L (2023).**Etude de la vulnérabilité des eaux du bassin versant de la Tafna (Algérie, nord-occidentale). Thèse de Doctorat ; Université Abou BekrBelkaid-Tlemcen, 229p.
- Yermani, M. et Zouari, K., (2003).** Approche géochimique du fonctionnement de la nappe profonde de Gafsa Nord (Tunisie centrale). Hydrological Sciences Journal, 48 (1), 95–108. Doi/pdf/10.1623/hysj.48.1.95.43482.
- Yidana S., Ophori D., Yakubo B., (2008).** Hydrochemical evaluation of the Voltaian system.TheAfram Plains area, Ghana. J Environ Manag88 :pp 697–707.
- Yidana, S.M., Ophori, D., and etBanoeng-Yakubob, B (2008),** A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data—the Ankobra Basin, Ghana. Journal of Environmental Management, 86, 80–87.
- Zerdan.D (2013),** étude hydrologique de la région de Bouira, thèse de Magister, Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene, 182p.
- Zereg.S (2019).** Impacts de l’irrigation sur la qualité des eaux souterraines des régions semi arides. Casde la région de Tébessa. Thèse de Doctorat en Sciences. UniversitéBatna 2 – Mostefa Ben Boulaïd,167p.
- Zhang.L (2019).** Big Data, Knowledge Mapping for Sustainable Development A Water Quality Index Case Study, Emerging Science Journal Vol.3, No.4, p249-254,<http://dx.doi.org/10.28991/esj-2019-01187>.
- Zmaiche.S, Hamaidi-cherghi.F etDemiai.A (2017).**Pollution of the quaternary aquifer of Mitidja (Algeria) by nitrates: Origins and impacts of the quality of water for human consumption, J FundamAppl Sci. 2018, 10(1), 113-131p.

ANNEXES

ANNEXE 1

Forages d'AEP exploitent les nappes :

Albienne (Ain Oussera) et Turonienne (Hassi Bahbah)

Tableau 1.1 :Forages d'AEP exploitent les nappes : albienne d'Ain Oussera
et turonienne de HassiBahbah (Source :ANRH, Djelfa)

Communes	Nom du Forage	Coordonnées Lambert		Nappe sollicité	Profondeur (m)	Debit (l/s)
		X (Km)	Y(Km)			
HassiBahbah	HB1	529,800	201,200	Turonien	200	19
	HB2	531,700	196,250	Turonien	400	25
	HB3	529,900	201,400	Turonien	230	22
	HB4	529,800	200,650	Turonien	200	22
	HB65	529,960	198,280	Turonien	394,6	18
	F2	518,000	238,750	Albien	200	45
Ain oussara	F3	518,550	239,100	Albien	200	30
	F4	517,350	238,000	Albien	200	30
	F6	519,000	238,500	Albien	200	10
	F7	518,700	238,250	Albien	200	20
	F8	517,800	238,250	Albien	200	30
	F9	519,400	238,200	Albien	200	40
	F10	516,825	237,930	Albien	200	30
	F11	513,750	236,850	Albien	200	18
	F12	516,500	237,600	Albien	205	35

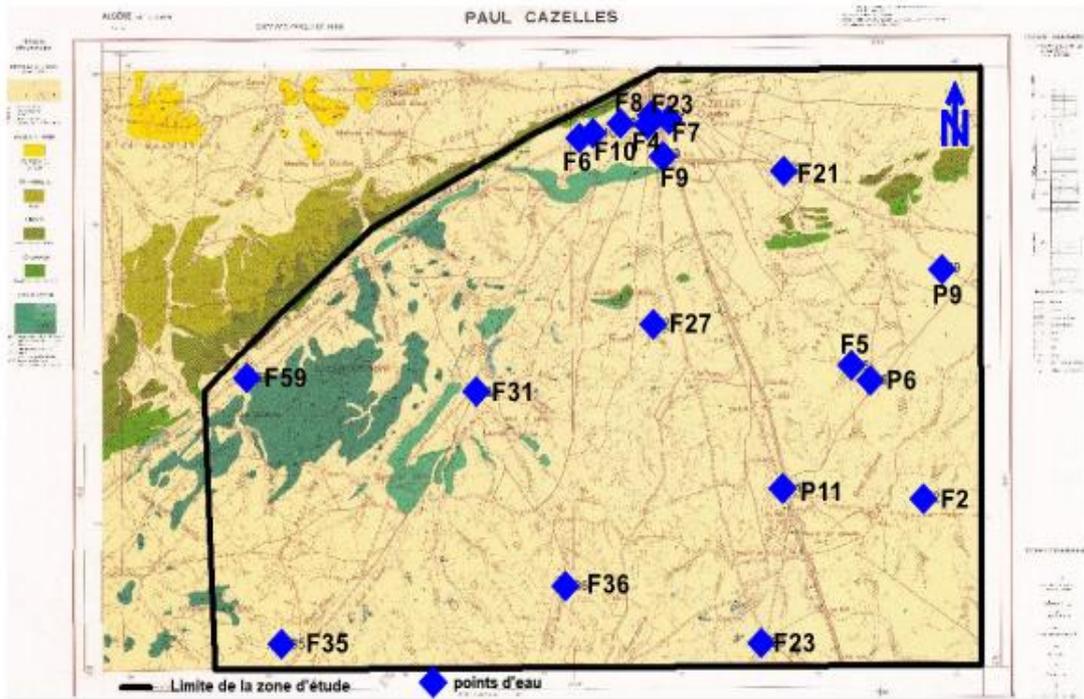


Figure 1.1 : Positionnement des forages et traces des coupes hydrogéologiques (Ain Oussera) (Nour et Daoudi, 2021)

ANNEXE 2

**Log litho-stratigraphique des forages :Ain Oussera
etHassiBahbah**

Sondage : HassiBahbah	N°: 162 G07
Carte : Guelt es Stel	Longitude : 0g 756
Echelle : 1/5000	Latitude : 38g 952

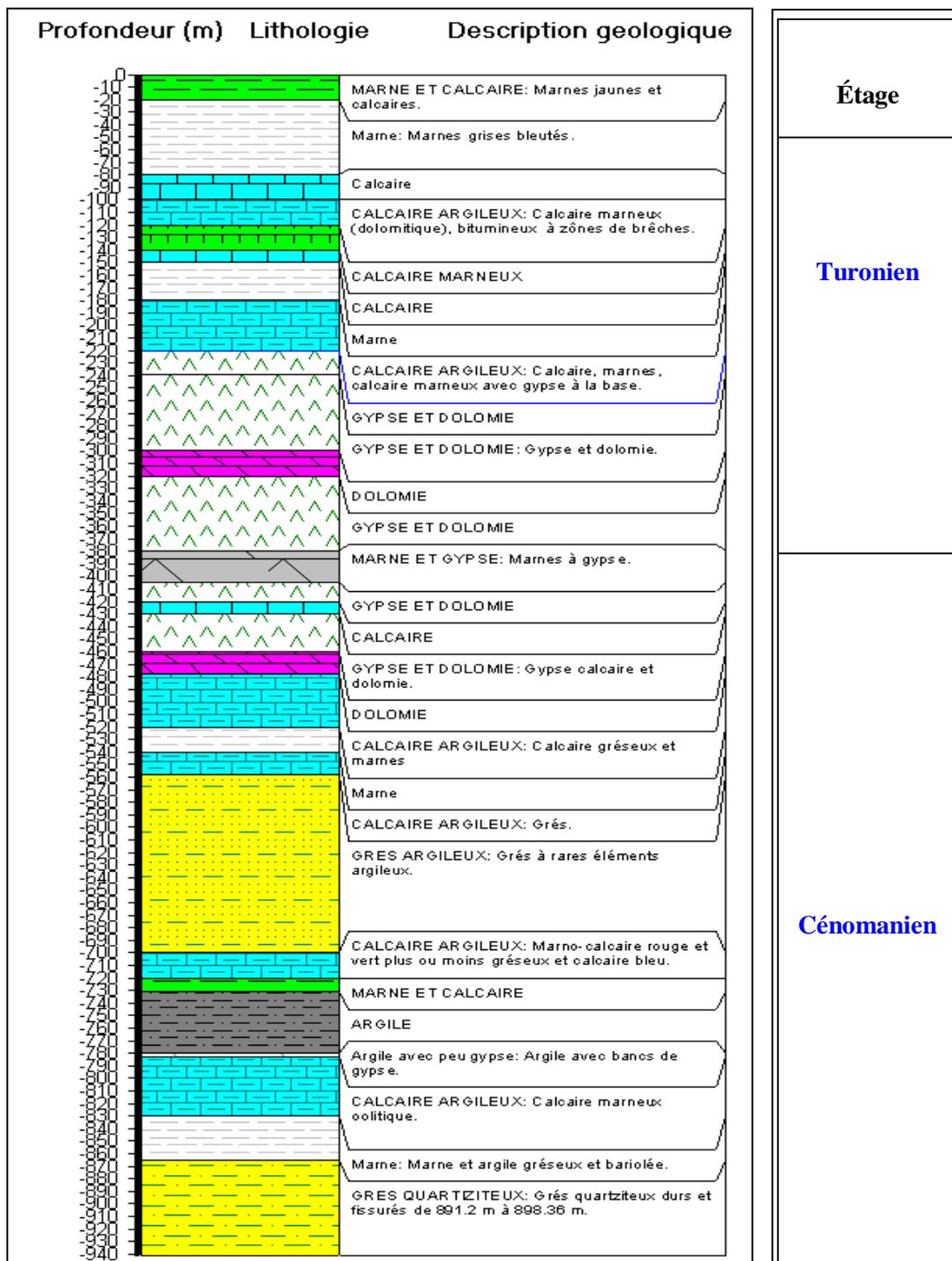


Figure 2.1 : Coupe lithostratigraphique du sondage N°:162 G07

(HassiBahbah) (Source :ANRH, Djelfa)

Sondage : HassiBahbah	N°: 542 G07ou 65
Carte : HassiBahbah	Longitude : X(Lamb)=529.560
Echelle : 1/2000	Latitude : Y (Lamb)=198.280

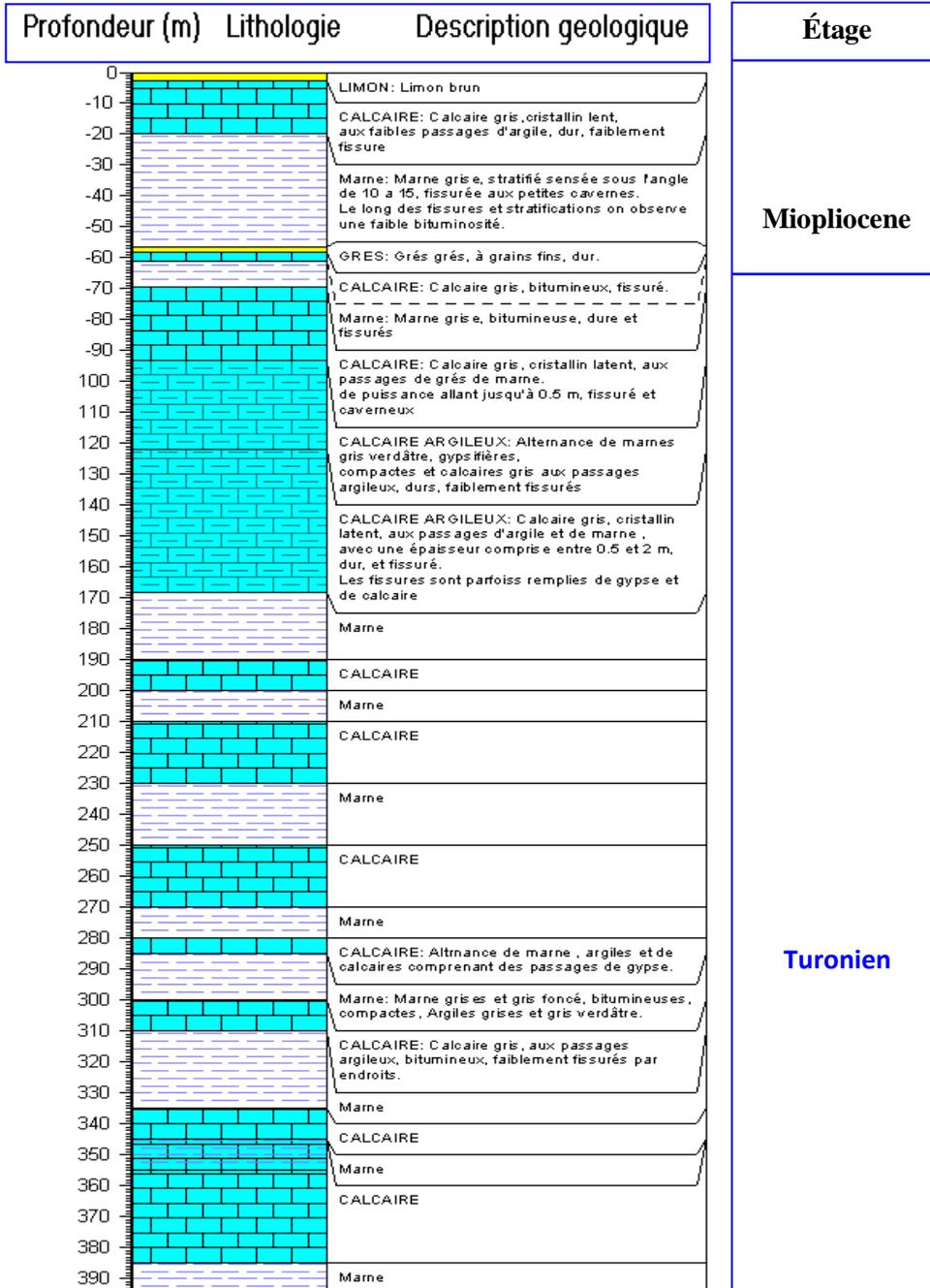
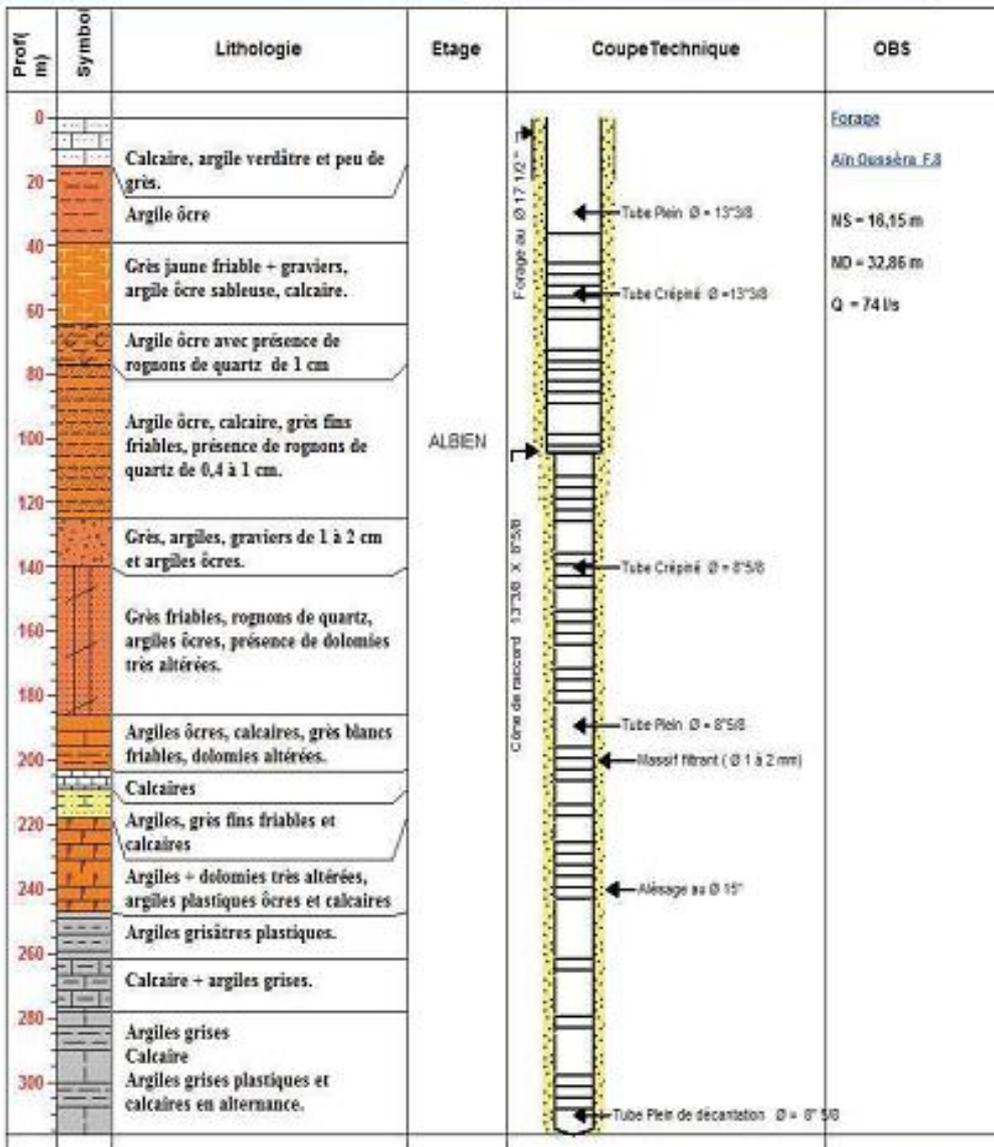


Figure 2.2 : Coupe lithostratigraphique du sondage N°:542 G07 ou 65 (HassiBahbah) (Source :ANRH, Djelfa)

Nom Forage : Ain-Ousséra_F.8 Carte N°: 192
 Wilaya Djelfa X : 542570
 Commune: Birine Z:
 Lieu dit: Prof (m): 316
 Client: Aquifère: Albien



Date début travaux : 01/02/1987 Entreprise de réalisation : Maître d'œuvre: ANRH
 Date fin travaux : 04/05/1987 Maître d'ouvrage: Suivi technique ANRH

Figure 2.3 : Coupe lithostratigraphique du forage F8 (Plaine d'Ain Ousséra) (Source :ANRH, Djelfa)

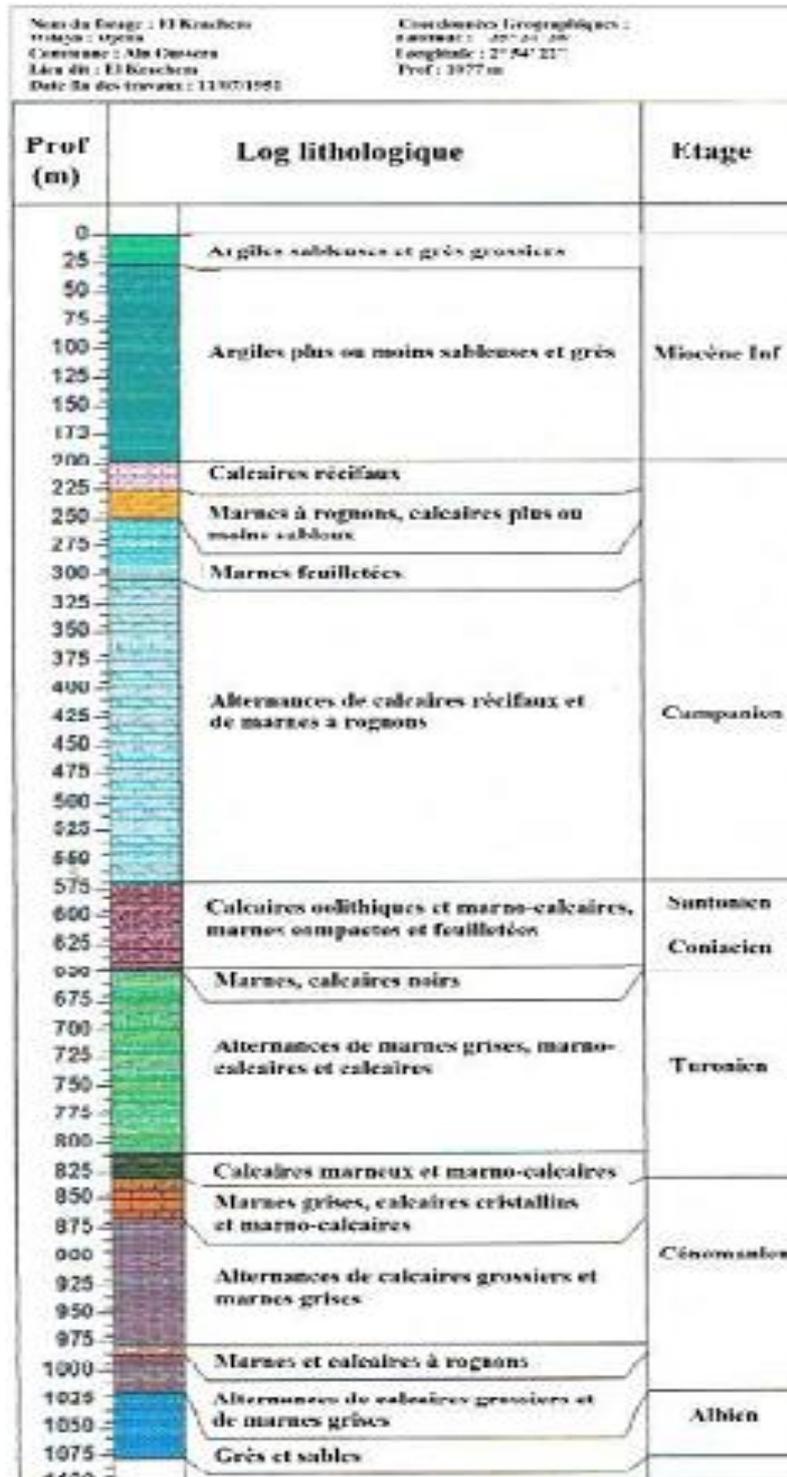


Figure 2.4 : Coupe lithostratigraphique du forage El Krachem
 (Plaine d'Ain Oussera) (Source : ANRH, Djelfa)

ANNEXE 4

Méthodes d'analyse des paramètres physico-chimiques

4 Les méthodes d'analyses physico-chimiques :

4.1 Mesure de pH :

Principe :

Le pH se définit comme le logarithme négatif de l'activité de l'ion hydrogène.
 $\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$

Il est mesuré à l'aide d'une électrode de verre, dont le potentiel varie en fonction de la concentration des ions hydrogènes suivant l'équation de Nernst. Ce potentiel est mesuré par rapport à une électrode de référence à l'aide d'un potentiomètre à haute impédance communément appelé pH-mètre (MELCCCDP, 2023).

Réactifs :

Tampon pH = 7.07

Tampon pH = 4.01

Appareil : pH Mètre

Electrode : Electrode de pH en verre

Mode opératoire :

a) Etalonnage de l'appareil :

- Rincez l'électrode avec de l'eau distillée. Séchez-la doucement avec un linge non abrasif.
- Déposez l'électrode dans une solution tampon dont le pH est de 7,00. Attendez que le pH-mètre se stabilise, puis ajustez-le jusqu'à ce qu'il affiche 7,00.
- La ligne d'immersion de l'électrode devrait être dans la solution tampon lors de la mesure du pH.
- Retirez le pH-mètre de la solution et rincez-le avec de l'eau distillée. Séchez-le doucement avec un linge non abrasif.
- Déposez l'électrode dans une solution tampon dont le pH est de 4,00. Attendez que le pH-mètre se stabilise, puis ajustez-le jusqu'à ce qu'il affiche 4,00. Retirez le pH-mètre de la solution et rincez-le avec de l'eau distillée. Séchez-le doucement avec un linge non abrasif.
- Remettez l'électrode dans la solution tampon dont le pH est de 7,00. Si le pH-mètre n'affiche pas 7,00, recommencez l'étalonnage.

b) Dosage de l'échantillon :

Après étalonnage, on procède au dosage de notre échantillon comme suit :

- Prendre environ ≈ 100 ml d'eau à analyser.
- Le Mettre dans un agitateur avec une faible agitation.
- Tremper l'électrode dans le bêcher.
- Laisser stabiliser un moment avec une faible vitesse d'agitation.
- Puis noter le pH (Figure 4.1)

4.2 Mesure de la conductivité :

Principe :

La conductivité d'une solution est la mesure de la capacité des ions à transporter le courant électrique. Ce passage du courant électrique s'effectue par la migration des ions dans un champ électrique produit par un courant alternatif. Un courant alternatif est utilisé pour atténuer la perturbation causée par la polarisation des électrodes résultant du passage d'un courant électrique. En appliquant une force électromotrice constante entre les électrodes, la variation de l'intensité de courant est inversement proportionnelle à la résistance de la solution.

La conductivité d'une solution est définie comme l'inverse de la résistance d'un volume de 1,0 cm³ de solution. Sa mesure s'effectue par l'utilisation d'une cellule de conductivité couplée à un conductimètre, et la conductivité s'exprime en µS/cm (CEAEQ, 2015). La mesure de la conductance électrique par conductimètre d'une colonne d'eau se fait en utilisant deux électrodes de platine ou couvertes de noir de platine, en parallèles (Arioua et al, 2023).

- **R** est la résistance de la colonne d'eau en ohms.
- **S** sa section en cm² et **l** sa longueur en cm.
- Solution étalon de conductivité connue **P**

$\frac{1}{S}$ est appelé constante de l'élément de mesure.

$$P = R \frac{S}{l}$$

La conductivité électrique en S / cm est :

$$V = \frac{1}{P} = \frac{1}{R} \cdot \frac{1}{S}$$

Mode opératoire :

a) Étalonnage de l'appareil : (Toledo, 2022)

- Assurez-vous d'avoir une solution étalon de conductivité connue à portée de main.
- Assurez-vous que le conductimètre est propre et en bon état de fonctionnement.
- Plongez l'électrode du conductimètre dans la solution étalon.
- Initiez le processus de calibration en appuyant sur la touche dédiée. Attendez que l'appareil atteigne automatiquement le point final de la calibration.
- Vérifiez que la valeur affichée correspond à la conductivité de la solution étalon.
- Terminez le processus de calibration, soit automatiquement, soit en appuyant sur une touche spécifique.
- Répétez si nécessaire avec d'autres solutions étalons pour valider la précision sur toute la gamme de mesure.

b) Mesure de conductivité :

- Remplir un bécher avec une quantité d'eau suffisante pour l'immersion de l'électrode de la conductivité ;
- Mettre l'électrode dans le bécher, puis appuyer sur la touche « Read », la valeur de la conductivité
- s'affiche sur l'écran de l'appareil avec une unité de micro Siemens par centimètre (µS/cm) ou bien milli siemens par centimètre (Figure 4.1).

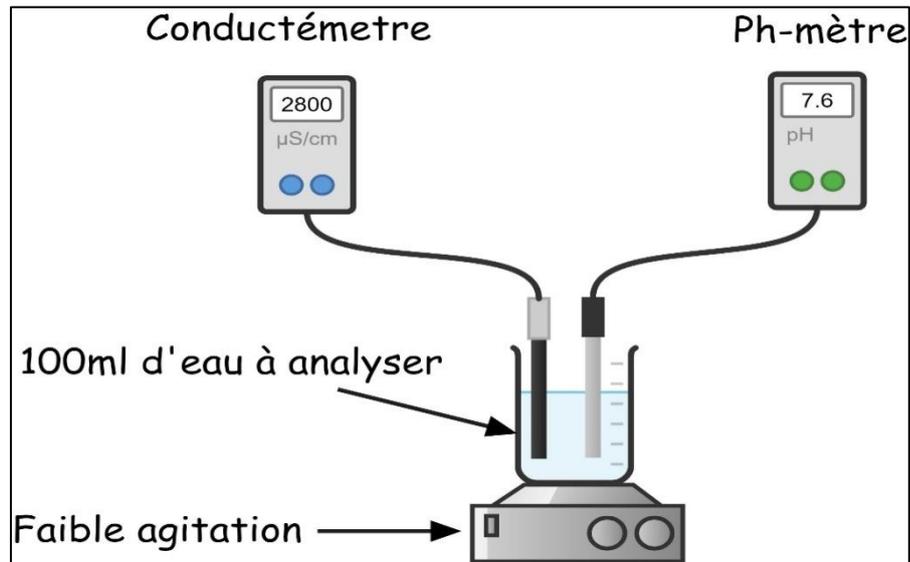


Figure 4.1 : Mesure de pH et conductivité.

4.3 Dosage de Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) :

Principe :

Les alcalinoterreux présents dans l'eau sont amenés à former un complexe du type chélate par le sel disodique de l'acide éthylènediaminetétracétique à pH 10. La disparition des dernières traces d'éléments libres à doser est décelée par le virage d'un indicateur spécifique, le noir ériochrome. En milieu convenablement tamponné pour empêcher la précipitation du magnésium, la méthode permet de doser la somme des ions calcium et magnésium (Rodier et al, 2009).

Réactifs : (Amara et Guebla, 2018)

Solution d'E.D.T.AN/50 ($\text{C}_{10}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{Na}_2\text{O}_8\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : (0,02N ou 0,01M)

EDTA 3,725 g. après déshydratation à 80°C pendant 2 h. H_2O
distillée 1000ml.

Solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 2 N :

NaOH (pastilles) 80 g.
 H_2O distillée 1000ml

Solution d'hydroxyde d'ammonium (NH_4OH) pH = 10,1 :

Chlorure d'ammonium67.5 g.
 NH_4OH (25%)570 ml
 HCl concentré PH = 10.1
 H_2O distillée 1000 ml.
Noir eriochrome T.

Solution étalon de référence(CaCO_3)=0.01mol/l

Sécher un échantillon de carbonate de calcium pur pendant 2heures à 150°C.En introduire 1 g dans une fiole conique de 500ml et humidifier avec de l'eau.Ajouter goutte à goutte de l'acide chlorhydrique à 4mol/l jusqu'à ce que tout le carbonatesoit dissous.Éviter un excès d'acide.Ajouter 200ml d'eau et porter à ébullition quelques minutes afin d'éliminer le dioxyde decarbonate.Refroirid et ajouter quelques gouttes de l'indicateur au rouge de méthyle. Ajouter unesolution ammoniacale à 3mol/l jusqu'à ce que la solution devienne orange.Transvaser la

solution dans une fiole jaugée de 1000ml et compléter au volume avec de l'eau distillée 1 ml de la solution contient 0.4008 mg (0.01 mmol/l) de calcium.

Mode opératoire : (Azlaoui et Zenati, 2018)

(V1) Ca^{2+} :- Prendre 50 ml d'eau à analyser.

- Ajouter 2 ml de NaOH à 2 N.

- Ajouter du Murexide.

- Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage violet (Figure 4.2).

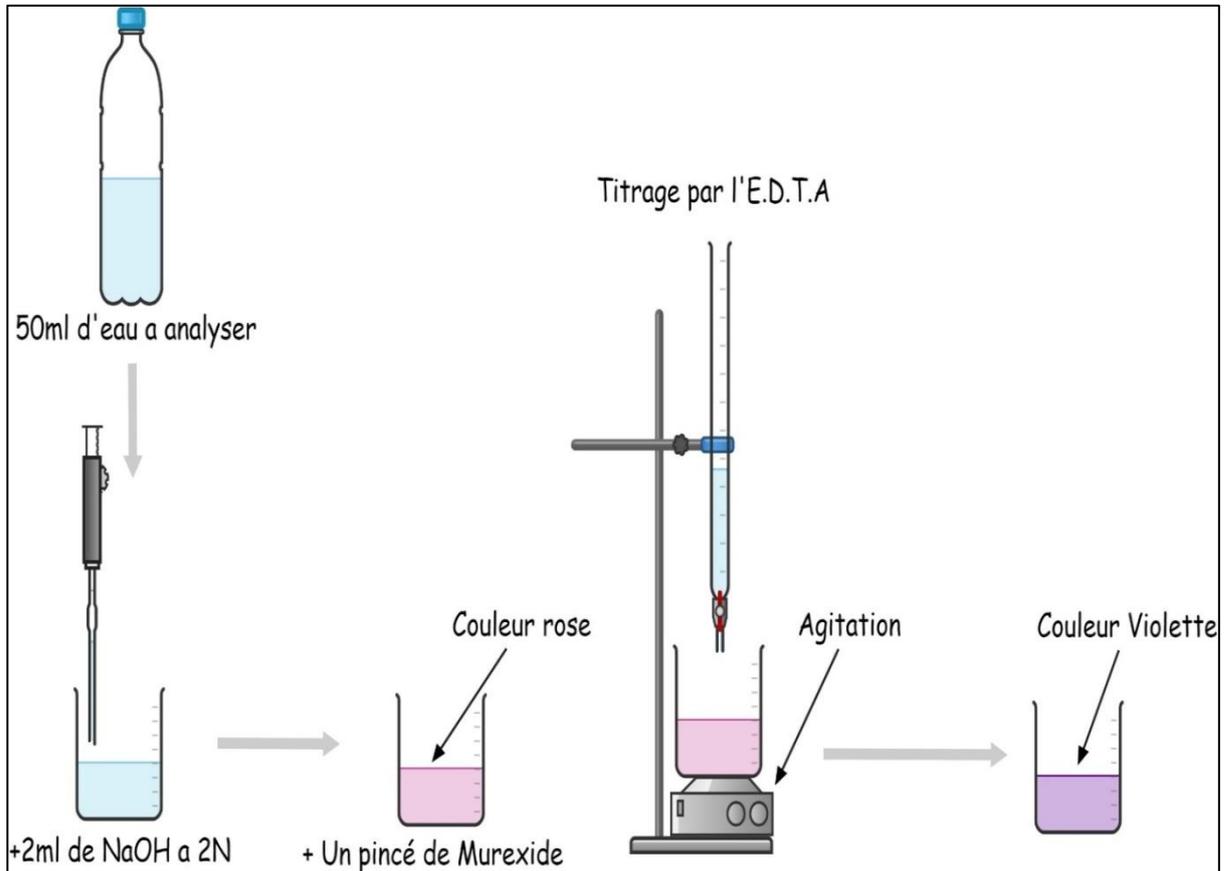


Figure 4.2 : Dosage de Calcium (Ca^{2+}).

La détermination de la concentration en mg/L de calcium peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{V1 \times \text{CEDTA} \times F \times \text{M}_{\text{Ca}^{2+}}}{\text{P.E}} \times 1000$$

D'où :

V1 : Volume d'EDTA nécessaire pour une concentration donnée.

CEDTA : Concentration molaire d'EDTA (0,01 M/l).

$\text{M}_{\text{Ca}^{2+}}$: Masse molaire du calcium en g.

F : Facteur

P.E : Prise d'essai (volume de l'échantillon nécessaire pour ce dosage)

$$\text{Ca}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{V1 \times 0.01 \times F \times 40}{50} \times 1000$$

Donc : $\text{Ca}^{2+} = V1 \times F \times 8$

(V2) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$:- Prendre 50 ml d'eau à analyser.

- Ajouter 2 ml de NH_4OH (10,1).

- Ajouter noir eriochrome.
- Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage bleu(Figure 4.3).

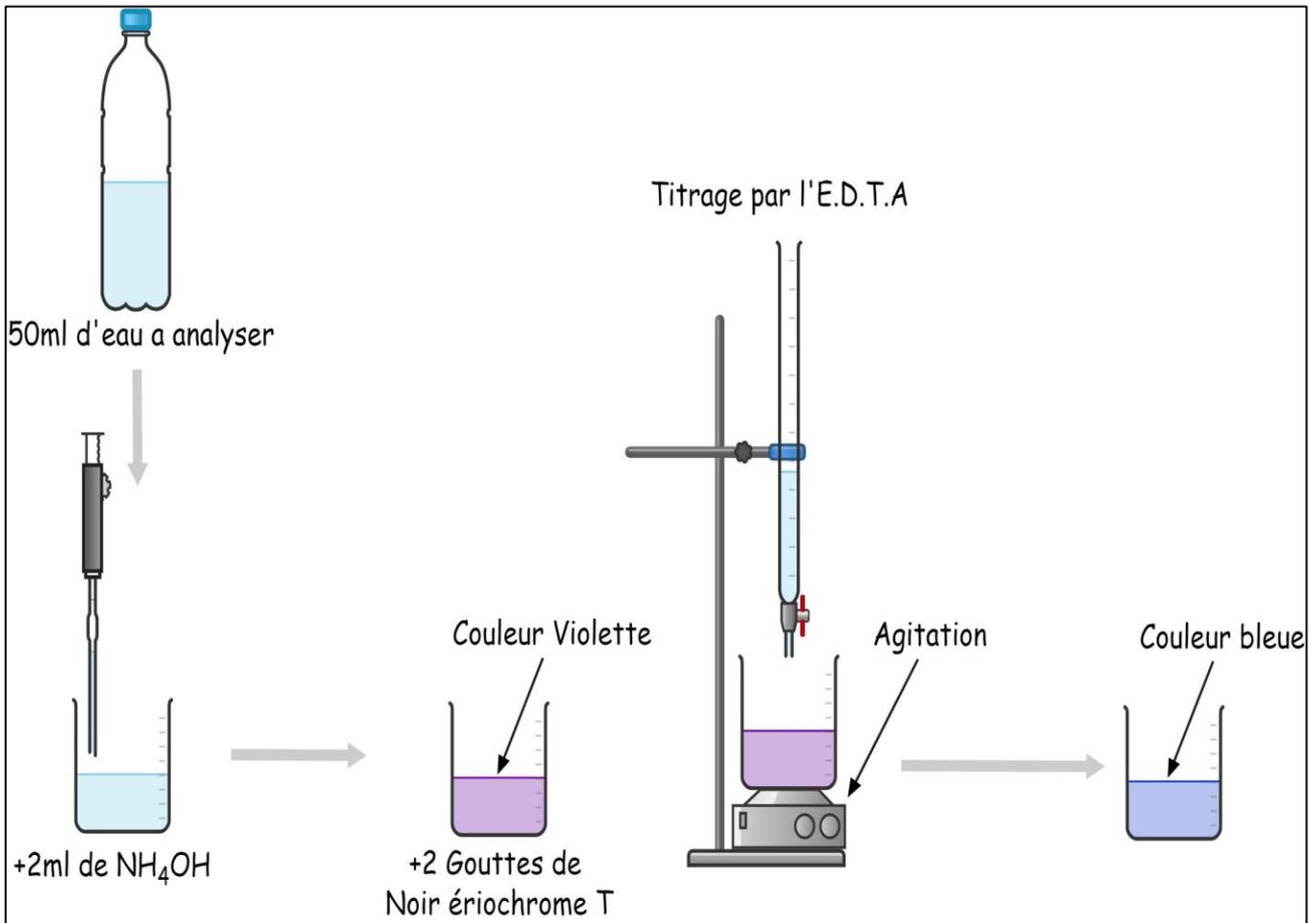


Figure 4.3 : Dosage de Magnésium (Mg^{2+})

La détermination de la concentration en mg/L de magnésium peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$\text{Mg}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{(\text{V2}-\text{V1}) \times \text{CEDTA} \times \text{F} \times \text{MMg}^{2+}}{\text{P.E}} \times 1000$$

D'où :

V2 : Le volume total d'EDTA utilisé lors de la titration.

CEDTA : Concentration molaire d'EDTA (0,01 M/L).

MMg²⁺ : Masse molaire du magnésium en g.

F : Facteur

P.E : Prise d'essai (volume de l'échantillon nécessaire pour ce dosage)

$$\text{Mg}^{2+} \text{ (mg/L)} = \frac{(\text{V2}-\text{V1}) \times 0.01 \times \text{F} \times 24.3}{50} \times 1000$$

Donc : $\text{Mg}^{2+} = (\text{V2} - \text{V1}) \times \text{F} \times 4.86$

4.4 Dosage de Sodium (Na^+) et Potassium (K^+) :

Principe :

Lorsqu'une solution est pulvérisée dans une flamme, l'eau ou le solvant s'évapore ; les sels et leurs produits de décomposition sont dissociés à l'état d'atomes ou de radicaux. Ceux-ci sont excités par l'énergie thermique de la flamme ; leur retour à l'état fondamental s'accompagne

de l'émission d'une radiation de fréquence caractéristique de l'élément mis en solution et dont l'intensité est fonction de sa concentration. (Rodier et al, 2009)

Mode opératoire

- Allumer et étalonner le photomètre à flamme (JENWAY).
- Remplacer la cuvette d'eau distillée par une cuvette contenant une solution étalon de sodium (Na^+) ou de potassium (K^+) à une concentration de 10 mg/L.
- Ajuster la lecture à 10 mg/L.
- Retirer la cuvette contenant la solution étalon et la remplacer par une cuvette d'eau distillée pour vérifier si l'écran affiche zéro.
- Remplacer la cuvette d'eau distillée par une cuvette contenant une solution étalon de sodium ou de potassium à 10 mg/L et vérifier si l'écran affiche la valeur de 10.
- Faire passer les échantillons et lire une fois que la valeur affichée sur l'écran se stabilise (Figure 4.4).

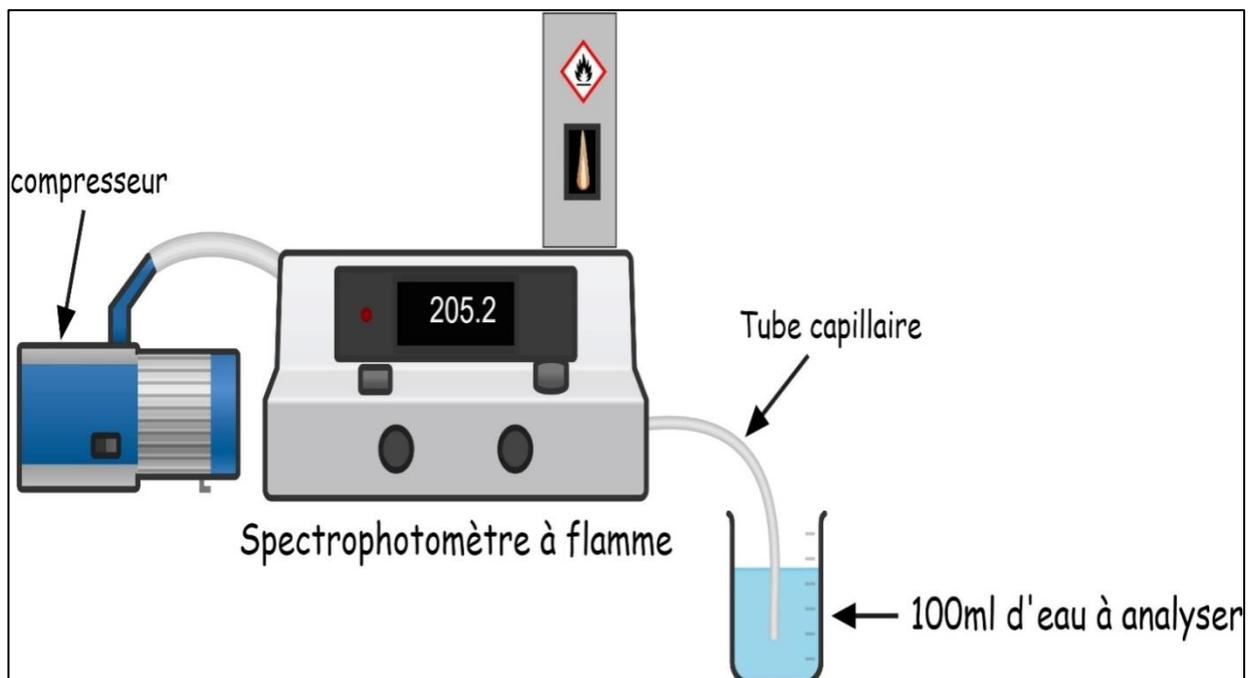


Figure 4.4 : Dosage de Sodium (Na^+) et Potassium (K^+)

4.5 Dosage de chlorures (Cl^-) :

Principe :

Le dosage de chlorure dans l'eau repose sur le principe de précipitation. Dans la méthode de Mohr, on utilise une solution standard d'argent (Ag^+) pour précipiter les ions chlorure (Cl^-) présents dans l'échantillon d'eau sous forme de chlorure d'argent (AgCl). Le point final du dosage est déterminé par l'apparition d'un précipité de chlorure d'argent, indiquant que tout le chlorure a réagi avec l'argent.

Réactifs :

Nitrate d'argent, AgNO_3 (0,01N).

Chromate de potassium K_2CrO_4 ($10^{\circ}/^{\circ}$)

Mode opératoire : Introduire 5mL d'échantillon dans un erlenmeyer ; Ajouter 2 gouttes de dichromate de potassium K_2CrO_4 (10%) comme indicateur coloré. Titrer avec le nitrate d'argent $AgNO_3$ (0,01N) jusqu'à l'apparition d'une coloration brunâtre (Figure 4.5).

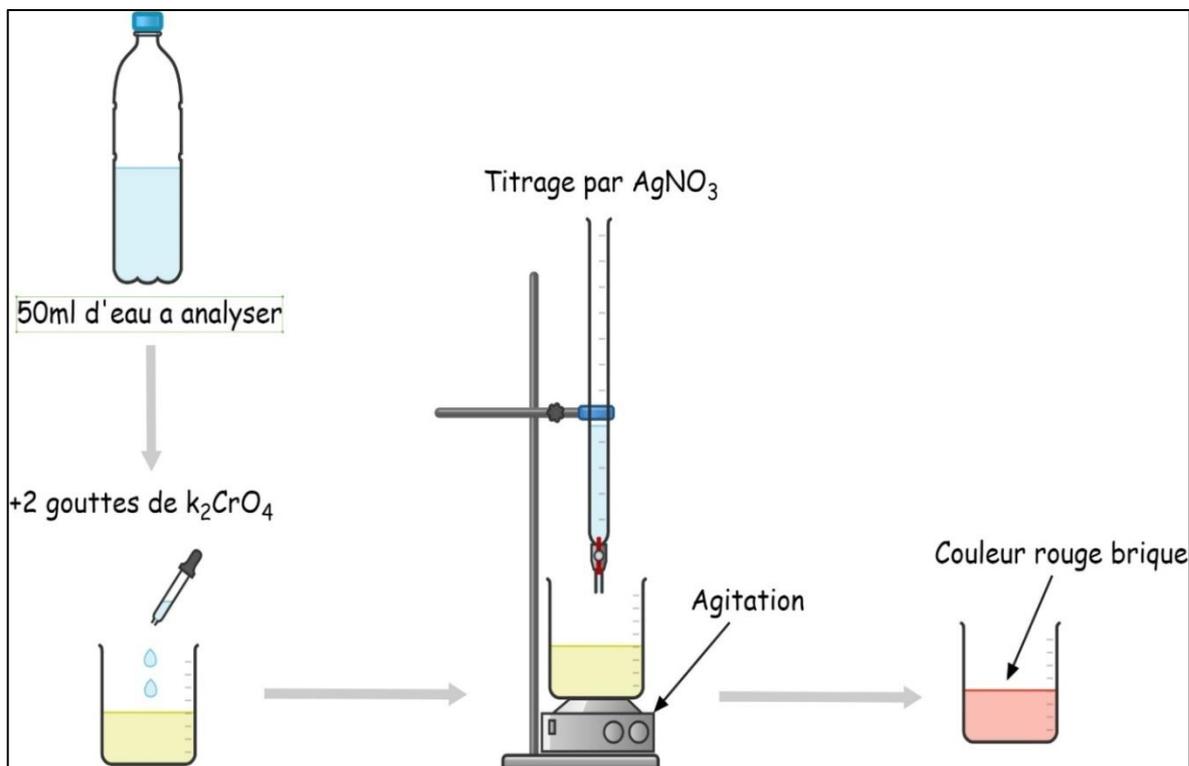


Figure 4.5 : Dosage de chlorures (Cl^-).

Expression des résultats :

$$Cl = \frac{V(AgNO_3) \cdot N(AgNO_3) \cdot MCl \cdot 1000}{Pe}$$

Où :

$V(AgNO_3)$: Chute de la burette (ml).

$N(AgNO_3)$: Normalité de $AgNO_3$ ($N=0.01$).

MCl : Masse équivalente de Cl^- (mg/l).

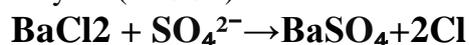
F : Facteur de correction ($F=0.83$).

Pe : Volume de la prise d'essai (mL).

4.6 Dosage des sulfates (SO_4^{2-})

Principe :

Pour doser les sulfates dans une solution, une méthode courante est l'utilisation d'une solution de chlorure de baryum ($BaCl_2$) pour précipiter les ions sulfate sous forme de sulfate de baryum ($BaSO_4$).



Réactifs :

Solution stabilisante, (100mL d'eau distillé + 60ml HCl pur + 200mL éthanol + 150g chlorure de sodium + 100mL de glycérol + 1000ml d'eau distillé q.s.p).

Solution de chlorure de baryum, (15g de chlorure de baryum+ 0.5ml de HCl pur + 100mL eau distillé).

Mode opératoire :

- Prendre 20 ml d'eau à analyser puis compléter à 100mL d'eau distillée ;
- Ajouter 5mL de la solution stabilisante ;
- Ajouter 2mL de chlorure de baryum ;
- Agiter énergiquement pendant 1 mn ;
- Lire sue le spectrophotomètre, l'absorbance à la longueur d'onde $\lambda=420$ nm.(Figure n°6).

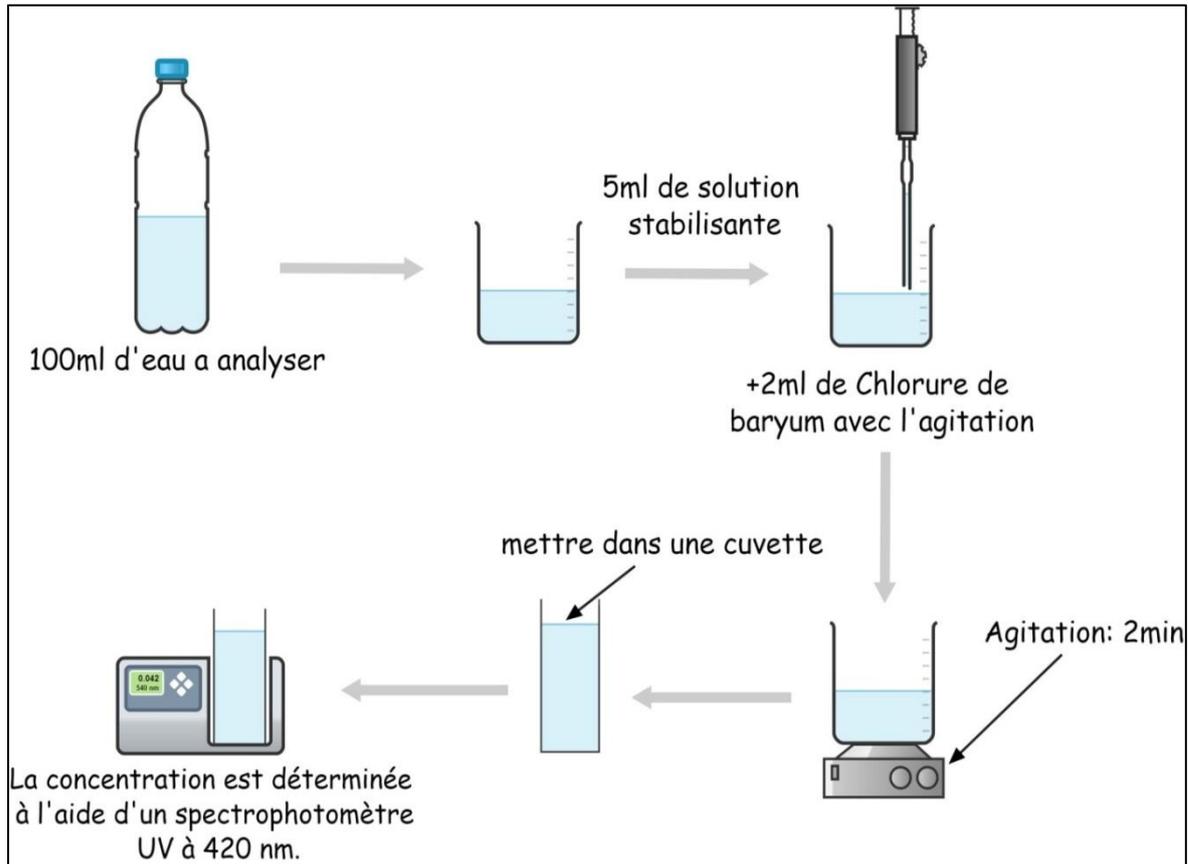


Figure4. 6 : Dosage des sulfates (SO_4^{2-})

4.7 Dosage des nitrates(NO_3^-)

Principe :

La méthode au salicylate de sodium pour le dosage des nitrates repose sur la formation d'un complexe coloré jaune, appelé paranitrosylate de sodium, lorsque les nitrates réagissent avec le salicylate de sodium dans un milieu basique. Cette réaction constitue la base d'un dosage colorimétrique des nitrates dans l'eau. En mesurant l'absorbance de la solution à une longueur d'onde spécifique, généralement autour de 410 nm, on peut déterminer la concentration de nitrates dans l'échantillon.

Réactifs : (Rodier et al, 2009)

- Solution de salicylate de sodium à 10 g/L à renouveler toutes les 24 heures.
- Acide sulfurique concentré ($d = 1,84$).
- Solution d'hydroxyde de sodium :

hydroxyde de sodium 200 g.
 sel disodique de l'acide éthylène diamine tétracétique 50 g.
 eau déionisée*q.s.p.* 1 L.

Dissoudre avec précaution l'hydroxyde de sodium dans 800 mL d'eau déionisée ; ajouter le sel sodique EDTA. Après dissolution et refroidissement, transvaser la solution dans une fiole jaugée, ajuster le volume à 1 litre. Conserver cette solution dans un flacon de polyéthylène.

– Solution d'azoture de sodium :

azoture de sodium 50 mg
 eau déionisée*q.s.p.* 100 mL

– Solution mère étalon d'azote nitrique à 100 mg/L :

nitrate de potassium anhydre 722 mg
 eau déionisée*q.s.p.* 1 000 mL

À renouveler tous les deux mois.

– Solution fille étalon d'azote nitrique à 5 mg/L.

Amener 50 mL de la solution mère à 1 000 mL avec de l'eau déionisée.

Établissement de la courbe d'étalonnage :

Dans une série de capsules de 60 ml, on introduit successivement :

Numéro des capsules	T	1	2	3	4
Solution étalon d'azote nitrique (5 mg/l) en ml.		0	1	2	5
Eau permutée en ml.	10	9	8	5	0
Correspondance en mg/l d'azote nitrique.	0	0.5	1	2.5	5
Solution d'azoture de sodium en ml.	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Acide acétique en ml.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2

Mode opératoire : (Amara et Guebla, 2018)

- Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser.
- Ajouter 2 à 3 gouttes de NaOH à 30 %.
- Ajouter 1 ml de salicylate de sodium.
- Evaporer à sec au bain marie ou à l'étuve 75 - 88° C.
 (ne pas surcharger ni surchauffer très longtemps) laisser refroidir.
- Reprendre le résidu avec 2 ml de H₂SO₄ laisser reposer 10 mn.
- Ajouter 15 ml d'eau distillée.
- Ajouter 15 ml de tartrate double de sodium et de potassium puis passer au spectro au 415nm (Figure n°7).

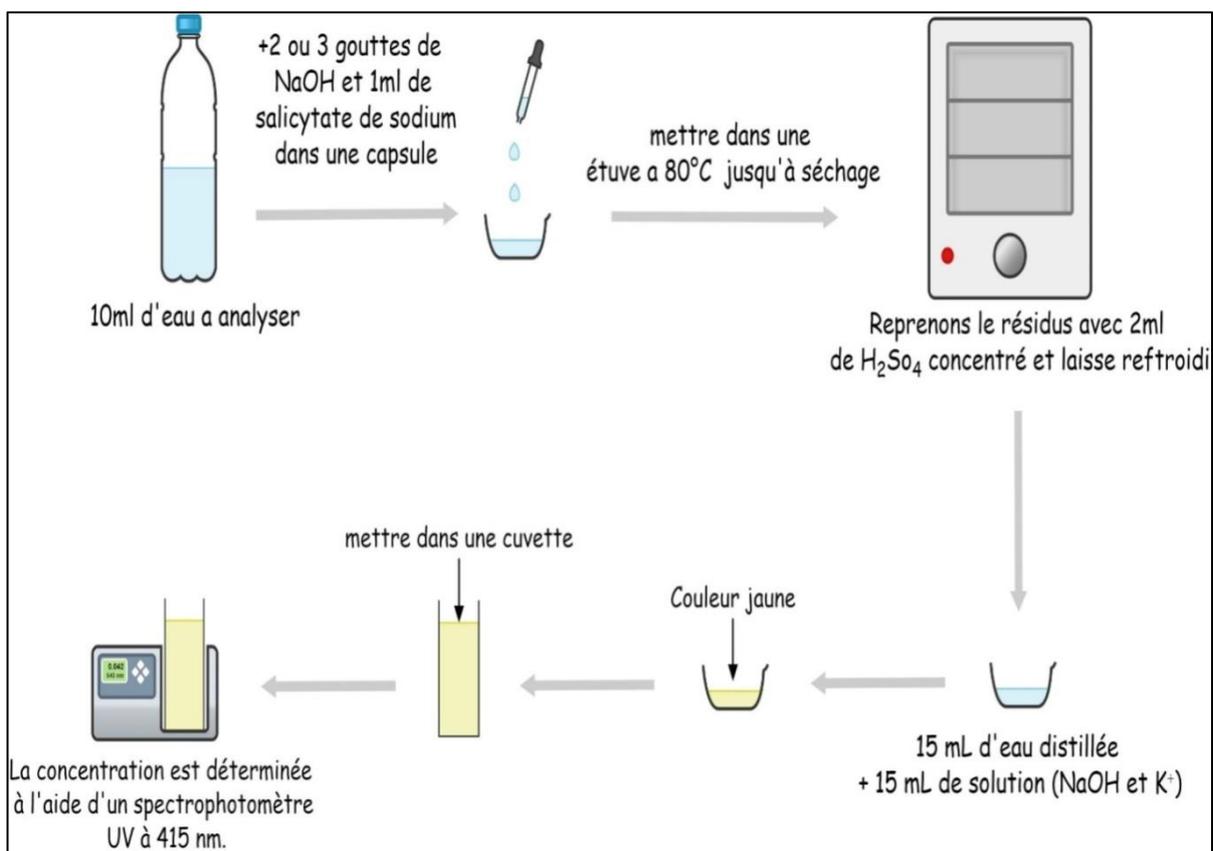


Figure 4.7 : Dosage des nitrates (NO₃⁻)

Expression des résultats : Pour une prise d'essai de 10 mL, la courbe donne directement la teneur en azote nitrique exprimée en milligrammes par litre d'eau. Pour obtenir la teneur en nitrate (NO₃), multiplier ce résultat par 4,43 (Rodier et al, 2009)

4.8 Dosage des nitrites (NO₂⁻) :

Principe :

La diazotation de l' amino-4-benzènesulfonamide par les nitrites en milieu acide et sa copulation avec le dichlorure de *N*-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane donne un complexe coloré pourpre susceptible d'un dosage spectrométrique. (Rodier et al, 2009)

Réactifs :

- Acide orthophosphorique (*d* = 1,70).
- Réactif de diazotation :

Amino-4-benzènesulfonamide	40 g.
Dichlorure de <i>N</i> -(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane	2g.
Acide orthophosphorique (<i>d</i> = 1,7)	100 mL.
Eau déionisée <i>q.s.p.</i>	1 000 mL.

Mélanger dans un bécher 800 mL d'eau déionisée et 100 mL d'acide phosphorique, ajouter l' amino-4-benzènesulfonamide puis après dissolution, ajouter le dichlorure de *N*-(naphtyl-1) diamino-1,2 éthane. Agiter jusqu'à complète dissolution. Transvaser la solution dans une fiole jaugée de 1 000 mL, ajuster le volume avec de l'eau déionisée, mélangé. Conservée au réfrigérateur, cette solution est stable un mois

- Solution mère étalon d'azote nitreux (NO₂) à 100 mg/L :
nitrite de sodium 492,8 mg

eau déionisée *q.s.p.* 1 000 mL

Conservée en flacon de verre inactinique, cette solution est stable un mois.

– Solution fille étalon d'azote nitreux (NO₂) à 1 mg/L :

Diluer au 1/100 la solution précédente avec de l'eau déionisée.

Établissement de la courbe d'étalonnage :

Introduire dans une série de fioles jaugées de 50 mL :

Numéro des fioles	T	I	II	III	IV	V
Solution fille étalon à 1 mg/L (mL)	0	1	2.5	5	7.5	10
Eau déionisée (mL) Correspondance en milli grammes par litre d'azote	50	49	47.5	45	42.2	40
Nitreux (NO ₂)	0	0.02	0.05	0.1	0.15	0.2
Réactif de diazotation (mL)	1	1	1	1	1	1

Effectuer les lectures au spectromètre à la longueur d'onde de 543 nm. Construire la courbe d'étalonnage.

Mode opératoire :

Introduire 50 mL d'eau à analyser dans une fiole jaugée puis poursuivre le dosage comme pour la courbe d'étalonnage. Tenir compte de la valeur lue pour le témoin. Se reporter à la courbe d'étalonnage (Figure n°8).

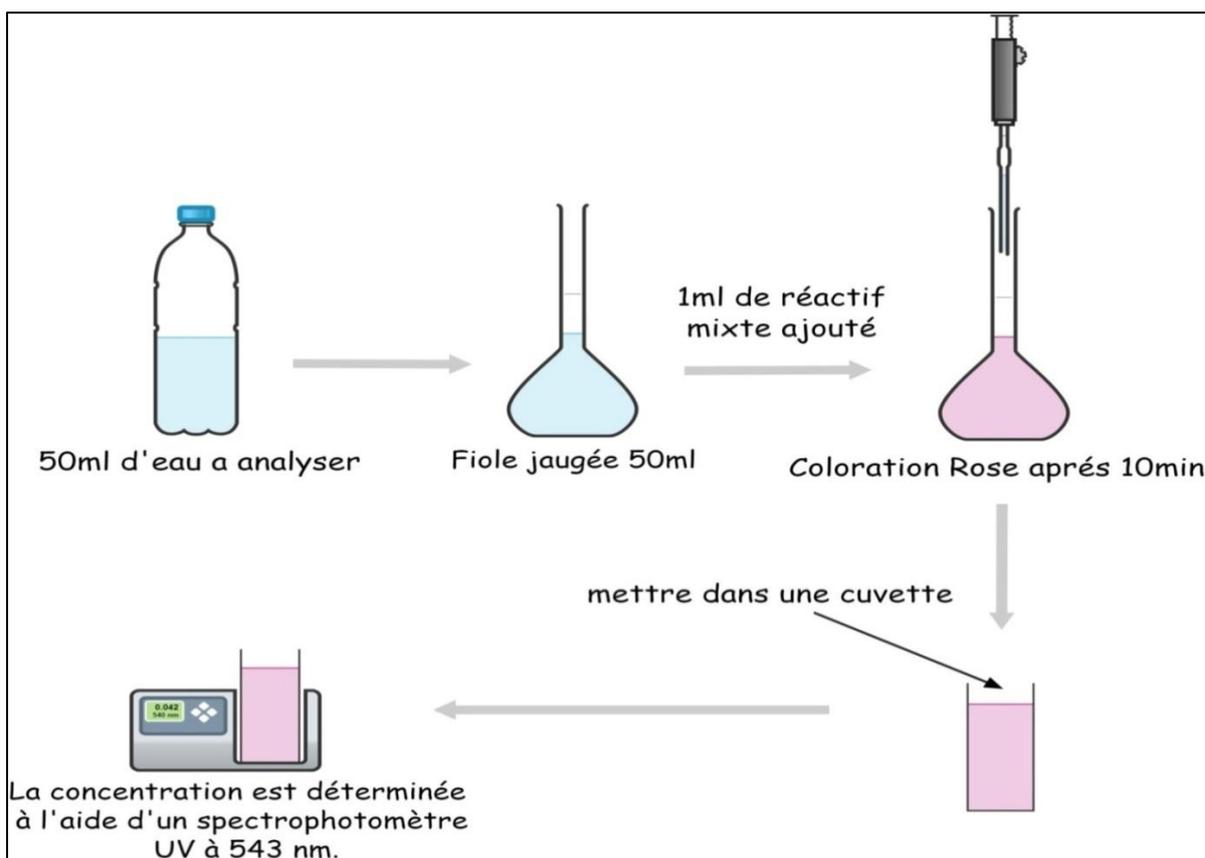


Figure °4.8 : Dosage des nitrites (NO₂⁻)

Expression des résultats :

Pour une prise d'essai de 50 mL, la courbe donne directement la teneur en azote nitreux (NO₂), exprimée en milligrammes par litre d'eau. (Rodier et al, 2009)

IV.4.9 Dosage de l'ammonium (NH₄⁺)

Principe :

Mesure spectrométrique du composé bleu formé par réaction de l'ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite en présence de nitroprussiate de sodium

Réactif :

Réactif I

- Acide dichloroisocyanurique 2 g.
- Hydroxyde de sodium (NaOH) 32 g.
- H₂O distillée q.s.p 1000 ml.

Réactif II (coloré)

- Tricarbonate de sodium.....130 g
- Salicylate de sodium.....130 g.
- Nitroprussiate de sodium0.97 g.
- H₂O distillée.....q.s.p 1000 ml

Mode opératoire :

- Prendre 40 ml d'eau à analyser
 - Ajouter 4 ml du réactif I
 - Ajouter 4 ml du réactif II et ajuster à 50 ml avec H₂O distillée et attendre 1h. 30
- L'apparition de la coloration verdâtre indique la présence de : NH₄⁺ Effectuer la lecture à 655 nm (Figure n°9).

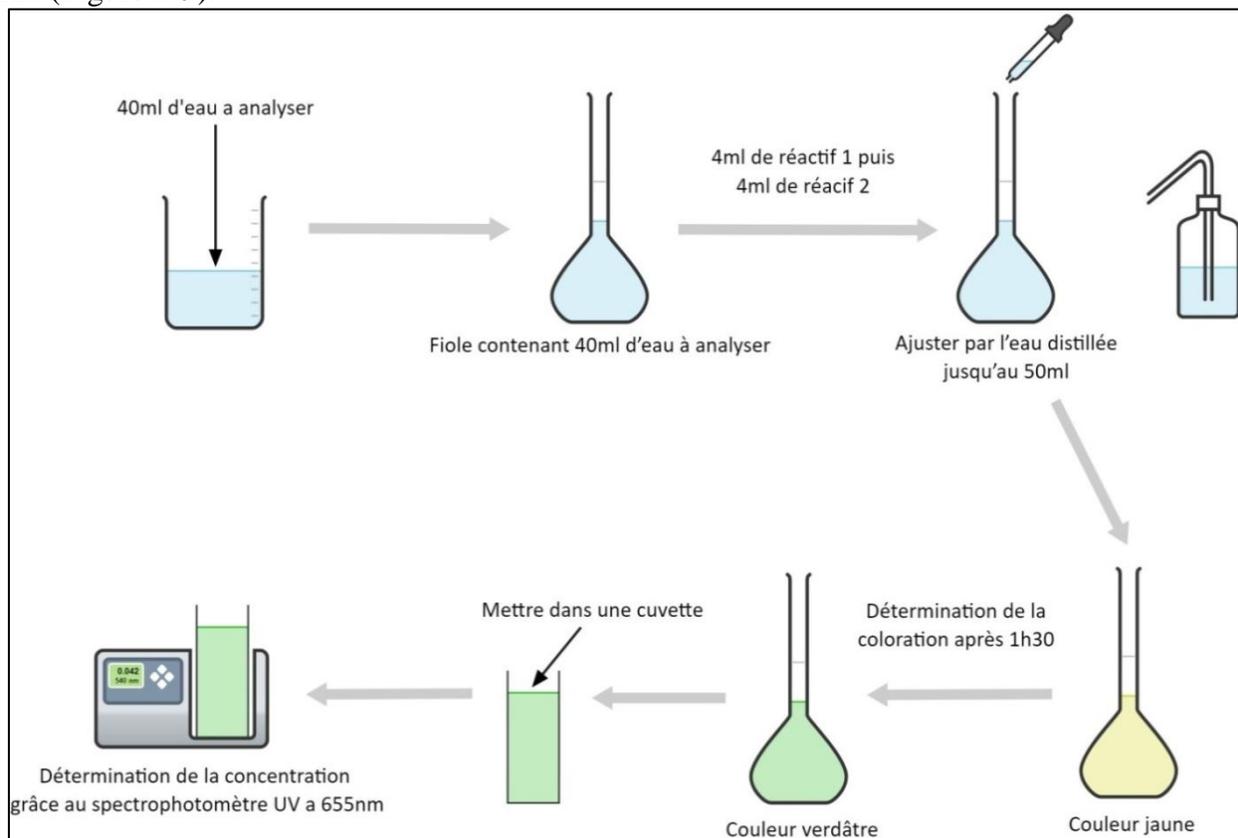


Figure °4.9 : Dosage de l'ammonium (NH₄⁺)

Expression des résultats :

Le résultat est donné directement en mg/l

4.10 Dosage des phosphate (PO₄³⁻)

Principe

En milieu acide et en présence de molybdate d'ammonium, les orthophosphates donnent un complexe phosphomolybdique qui, réduit par l'acide ascorbique, développe une coloration bleue susceptible d'un dosage spectrométrique. (Rodier et al, 2009)

Réactifs :

Réactif Mixte :

A : Heptamolybdate d'ammonium 13 g.
Eau distillée 100 ml.

B : Tartrate d'antimoine 0.35 g.
Eau distillée 100 ml.

C : Acide sulfurique pur 150 ml
Eau distillée 150 ml.

(A + B) + C 500 ml d'eau distillée.

Acide ascorbique à 10 % :

Acide ascorbique.....10g.
Eau distillée100ml.

Solution mère à 50 mg/l PO₄³⁻

Solution fille à 2 mg/l PO₄³⁻

Courbe d'étalonnage : (Amara et Guebla, 2018)

N° Fiole	0	1	2	3	4	5
fille à 25 mg/l P	0	0.3 ml	0.6	1.2	2.4	4.8
40 ml eau distillée	40	40 ml	40	40	40	40
[c] P	0.0	0.015	0.03	0.06	0.120	0.240
[c] en PO ₄ ³⁻	0.0	0.0459	0.0918	0.1836	0.3672	0.7340
Acide ascorbique (ml)	1	1	1	1	1	1
Réactif mélangé (ml)	2	2	2	2	2	2
Attendre 10 mn.						

Mode opératoire : (Arioua et al, 2022)

- 40 ml d'eau à analyser.
- 1 ml acide ascorbique
- 2 ml du réactif mixte.
- Attendre 10 mn le développement de la couleur bleue.
- Effectuer la lecture à une longueur d'onde de 880nm (Figure n°10).

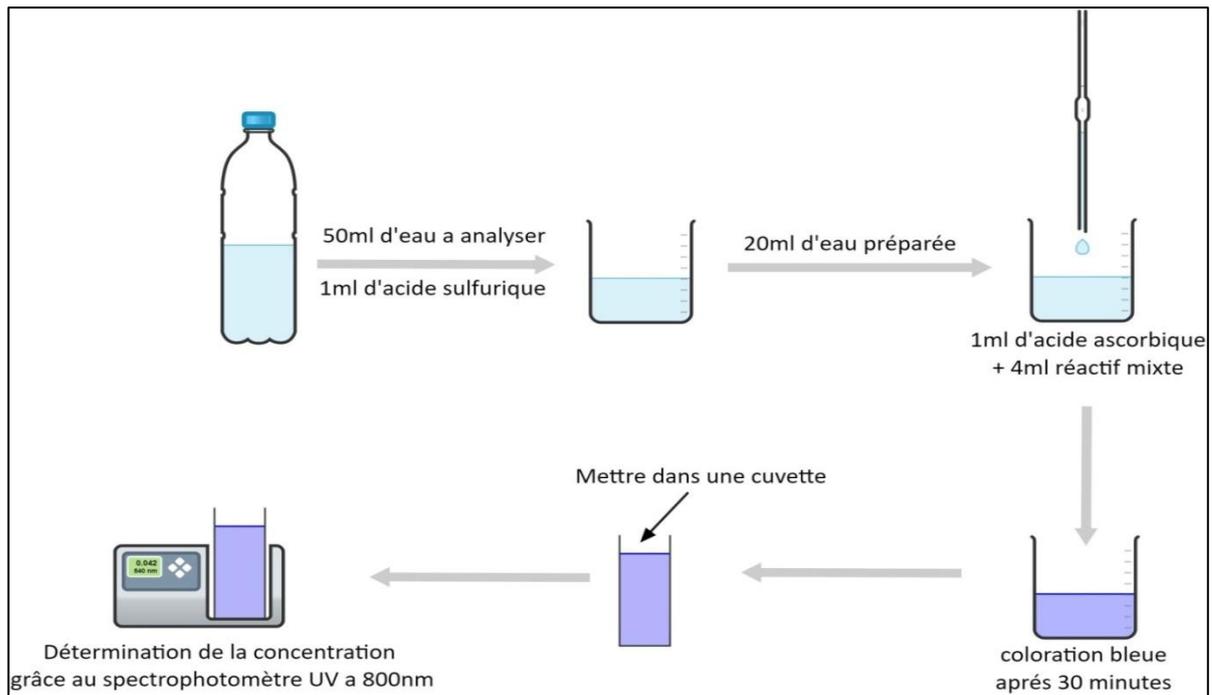


Figure4.10 : Dosage des phosphate (PO_4^{3-})

Expression des résultats :

Le résultat est donné directement en mg/l.

Référence bibliographique :

Amara et Guebla(2018) Evaluation des qualités physicochimique et microbiologique de l'eau de la ville d'Ain-Maâbed, Mémoire de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 100p.

Arioua et al (2022) Étude de la qualité d'eau potable dans la Région du Hodna. Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, 60p.

Azlaoui et Zenati (2018) Evaluation de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau consommée au site de l'université Ziane Achour de Djelfa, Mémoire de Master, Université Ziane Achour – Djelfa, 84p.

CEAEQ (2015) Centre d'expertise en analyse environnemental du Québec- Canada, Méthode d'analyse Ma.115-cond.1.1 Détermination de la conductivité méthode électrométrique, 9p.

MELCCDP (2023) Ministère de l'environnement de la lutte contre les changements climatiques de la faune et des parcs-Québec, Méthode d'analyse Ma.100-pH1.1, détermination du pH, ISBN 978-2-550-93917-7,11p.

Rodier et al (2009) l'analyse de l'eau, 9^e éd. Dunod paris. 1579p.ISBN 978-2-10-054179-9.

Toledo (2022) Mettler Toledo, Guide des mesures de conductivité (Théorie et pratique sur la conductivité), 64p.

ANNEXE 5

**Les normes Algérienne de la qualité
physico-chimiques de l'eau potable**

ANNEXE
Paramètres de qualité de l'eau de consommation humaine
Tableau 1 : paramètres avec valeurs limites

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS LIMITES
Paramètres chimiques	Aluminium	mg/l	0,2
	Ammonium	mg/l	0,5
	Baryum	mg/l	0,7
	Bore	mg/l	- Eaux conventionnelles : 1 - Eaux déssalées ou déminéralisées : 1,3
	Fluorures	mg/l	1,5
	Nitrates	mg/l	50
	Nitrites	mg/l	0,2
	Oxydabilité	mg/l O ₂	5
	Acrylamide	µg/l	0,5
	Antimoine	µg/l	20
	Argent	µg/l	100
	Arsenic	µg/l	10
	Cadmium	µg/l	3
	Chrome total	µg/l	50
	Cuivre	mg/l	2
	Cyanures	µg/l	70
	Mercure	µg/l	6
	Nickel	µg/l	70
	Plomb	µg/l	10
	Sélénium	µg/l	10
	Zinc	mg/l	5
	Hydrocarbures polycycliques aromatiques (H.P.A) totaux	µg/l	0,2
Fluoranthène, benzo (3,4) fluoranthène, benzo (11,12) fluoranthène, benzo (3,4) pyrène, benzo (1,12) pérylène, indéno (1,2,3-cd) pyrène, benzo (3,4) pyrène	µg/l	0,01	
Benzène	µg/l	10	
Toluène	µg/l	700	
Ethylbenzène	µg/l	300	

Tableau 2

Paramètres avec valeurs indicatives

GROUPE DE PARAMETRES	PARAMETRES	UNITES	VALEURS INDICATIVES
Paramètres Organoleptiques	couleur	mg/l platine	15
	Turbidité	NTU	5
	Odeur à 25 °C	Taux dilution	4
	Saveur à 25 °C	Taux dilution	4
Paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux	Alcalinité	mg/l CaCO ₃	65 pour les eaux déssalées ou déminéralisées (valeur minimale)
	Calcium	mg/l	200
	Chlorure	mg/l	500
	Concentration en ions hydrogène	Unité pH	≥ 6,5 et ≤ 9
	Conductivité à 20 °C	µS/cm	2800
	Dureté (TH)	mg/l en CaCO ₃	500
	Fer total	mg/l	0,3
	Manganèse	µg/l	50
	Phosphore	mg/l	5
	Potassium	mg/l	12
	Sodium	mg/l	200
	Sulfates	mg/l	400
	Température	°C	25

Décret exécutif n° 14-97 du 2 Jomada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 portant dissolution de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun.

Le Premier Ministre,

Sur le rapport du ministre des ressources en eau,

Vu la Constitution, notamment ses articles 85-3° et 125 (alinéa 2),

Vu le décret présidentiel n° 13-312 du 5 Dhou El Kaâda 1434 correspondant au 11 septembre 2013 portant nomination des membres du Gouvernement ;

Vu le décret exécutif n° 94-294 du 19 Rabie Ethani 1415 correspondant au 25 septembre 1994 relatif aux modalités de dissolution et de liquidation des entreprises publiques non autonomes et des établissements publics à caractère industriel et commercial ;

Vu le décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun ;

Après approbation du Président de la République ;

Décrète :

Article 1er. — L'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun, créée par les dispositions du décret exécutif n° 07-337 du 19 Chaoual 1428 correspondant au 31 octobre 2007 portant création de l'agence de gestion du système hydraulique de Beni Haroun est dissoute.

Art. 2. — La dissolution de l'agence prévue à l'article 1er ci-dessus, donne lieu à l'établissement d'un inventaire quantitatif, qualitatif et estimatif dressé conformément aux lois et règlements en vigueur par une commission dont les membres sont désignés conjointement par le ministre des finances et le ministre chargé des ressources en eau.

Art. 3. — Le présent décret sera publié au *Journal Officiel* de la République algérienne démocratique et populaire.

Fait à Alger le 2 Jomada El Oula 1435 Correspondant au 4 mars 2014.

Abdelmalek SELLAL.