



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued

Département de Biologie cellulaire et moléculaire

Mémoire présenté en vue de l'obtention du
diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Science biologique

Spécialité : Biodiversité et environnement

Thème:

***Dynamique spatio-temporelle de la qualité des eaux dans
l'aquifère du Continental Intercalaire de la région d'El Oued***

Présenté par les étudiantes :

- **becher amira**
- **Merad basma**

Devant le jury composé de :

Promotrice : Dr Aziza Hammadi

Université Echahid Hamma Lakhdar à El Oued

Co-Promotrice : Dr Khechekhouche El Amine

Université Echahid Hamma Lakhdar à El Oued

Président : Dr DJOUDI Abdelhak

Université Echahid Hamma Lakhdar à El Oued

Examineur : Dr SERRAI Aicha

Université Echahid Hamma Lakhdar à El Oued

Soutenu le : 2025/2026





شكر و عرفان

ننقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير إلى أعضاء لجنة المناقشة الكرام لتفضلهم بقراءة ومناقشة هذه المذكرة.

كما أتوجه بخالص الامتنان إلى أستاذتي المشرفة على دعمها المستمر، وتوجيهاتها القيّمة، وتشجيعها لي طوال فترة إعداد هذا العمل



الاهداء

" يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ آمَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ " من قال انا لها "نالها "

وانا لها ان أبت رغماً عنها أتيت بها لم تكن الرحلة قصيرة ولا ينبغي لها ان تكون ما سلكنا البدايات الا بتيسيره
وما بلغنا النهايات إلا بتوفيقه وما حققنا الغايات إلا بفضلته فالحمد لله الذي وفقنا لتثمين هذه الخطوه في مسيرتي
الدراسية

وبكل حب اهدي ثمرة نجاحي وتخرجي

لنفسي اولاً ثم الي كل من سعى معي لإتمام هذه المسيرة دمتم لي سنداً لا عمر

إلى الداعمة الاولى بحياتي شكري وامتناني التي جعل الله الجنة تحت اقدامها وسهلت لي الشدائد بدعائها

سر قوتي ونجاحي ووهج حياتي

(امي الغالية)

إلي الذي زين اسمي بأجمل الالقاب من دعمني بلا حدود واعطاني بلا مقابل الي من علمني ان الدنيا كفاح
وسلاحها العلم والمعرفة الي من غرس في روحي مكارم الاخلاق داعمي الأول في مسيرتي وسندي وقوتي بعد
الله

(والدي الغالي)

إلى من شددت عضدي بهم من كانوا ولزالوا سنداً لي في الحياة قرة عيني

(أخوتي و اخواتي)

إلى من افاضني بمشاعره ونصائحه المخلصة كنت خير سند بكلماتك وتشجيعك الدائم لي

(خطيبي)

إلى من تحلت بلاخاء و الوفاء صديقة الروح و المواقف (نجوى)

اخيراً لكل من كان عوناً وسنداً في هذا الطريق ممتناً لكم جميعاً وما كنت لأصل لو لا فضلكم بعد الله تعالى

واخر دعواهم ان الحمد لله رب العالمين

اميرة بشر

الاهداء

"وَأَخِرْ دَعْوَاهُمْ أَنْ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ"

الحمد لله الذي نظن به خيراً فيكرمنا بأفضل مما ظننا به

ما سلكنا البدايات إلا بتسيره . ومابلغنا النهايات إلا بتوفيقه . وما حققنا أسمى الغايات إلا بفضلته . الحمد لله وشكراً
وامتناناً على البدء والختام

اهدي تخرجي إلى نفسي الطموحة..

اهدي تخرجي إلى تلك الانسنة العظيمة. الي جعل الجنة تحت قدمها . صاحبه أحن روح وأجمل قلب الداعمة الأولى
والأبدية لي ...أمي الغالية...

إلى العزيز الذي حملت اسمه فخراً . إلى النور الذي أنار دربي وبكل الاعتزاز أنا لهذا الرجل ابنة إلى من كلله بالهيبة
والوقار داعمي الأول في مسيرتي وسندي ...أبي الغالي...

إلى من له بصمة خيرة في حياتي الذي كان سنداً وداعماً لي أحن من الروح إلى الروح سندي وشريكي في الحياة
...زوجي الغالي السعيد

وإلى الشمعة التي أنارت لي الطريق وانتظرت هذه اللحظة كثيراً لتفخر بي كما أفرح بها

وبوجودها ...قرة عيني اختي سناء ابنتها وتين...

إلى صديقاتي وإلى من رافقني في مسيرتي الجامعية وفي كل لحظة من هذه المذكرة أنا اليوم أكملت وأتممت مسيرتي
بفضله تعالى

من قال أنا لها *نالها*

وأنا لها وإن أبت رغماً عنها أتيت بها

مراد بسمه

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية التابعة للخزان القاري البيني في منطقة وادي سوف، جنوب شرق الجزائر، وذلك من خلال تحليل مجموعة من المعايير الهيدروكيميائية الأساسية. تكتسي هذه الموارد المائية أهمية استراتيجية في الوسط الصحراوي، نظرا لندرة التساقطات، وارتفاع معدلات التبخر، والاعتماد الكبير على المياه الجوفية في تلبية الحاجات المنزلية والفلاحية.

اعتمدت الدراسة على قياس وتحليل عدة مؤشرات، منها الأس الهيدروجيني، الناقلية الكهربائية، المواد الصلبة الذائبة الكلية، إضافة إلى الأيونات الرئيسية مثل الكالسيوم، المغنيسيوم، الصوديوم، البوتاسيوم، الكلوريدات، الكبريتات والبيكربونات. أظهرت النتائج أن المياه المدروسة تتميز بأس هيدروجيني قريب من التعادل، حيث تراوحت قيمه بين 7.06 و7.42، مما يدل على استقرار نسبي في التوازن الحمضي القاعدي. غير أن قيم الناقلية الكهربائية والمواد الصلبة الذائبة الكلية كانت مرتفعة، مما يعكس درجة تمعدن قوية.

كما بينت النتائج سيادة أيونات الكلوريدات والكبريتات والكالسيوم والصوديوم، وهو ما يشير إلى أن التركيب الكيميائي لهذه المياه يخضع أساسا لتأثير التفاعلات بين الماء والصخور، خاصة ذوبان التكوينات التبخرية والكربوناتية مثل الجبس، الأنهيدريت، الهاليت، الكلس والدولوميت. وقد سمح تصنيف السحنات الكيميائية بتحديد سحنة مائية يغلب عليها الطابع الكلوريدي-الكبريتي، مع سيادة كلسية وصودية.

تؤكد هذه الدراسة أن مياه الخزان القاري البيني في منطقة وادي سوف ذات تمعدن طبيعي مرتفع، مما يستدعي متابعة دورية لجودتها وترشيد استغلالها، خاصة في ظل الظروف المناخية الصحراوية والضغط المتزايد على الموارد المائية الجوفية.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، الخزان القاري البيني، وادي سوف، التحليل الفيزيائي-الكيميائي، التمدن، السحنة الهيدروكيميائية.

Résumé en français

Cette étude vise à évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines du Continental Intercalaire dans la région de l'Oued Souf, au Sud-Est de l'Algérie, à travers l'analyse de plusieurs paramètres hydrochimiques majeurs. Dans ce contexte saharien marqué par la rareté des précipitations, l'intensité de l'évaporation et la forte dépendance aux ressources souterraines, l'évaluation de la qualité de l'eau constitue un enjeu scientifique, environnemental et socio-économique important.

L'approche adoptée repose sur la détermination du pH, de la conductivité électrique, des solides dissous totaux, ainsi que des principaux ions majeurs, notamment Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- . Les résultats obtenus montrent que les eaux analysées présentent un pH proche de la neutralité, compris entre 7,06 et 7,42, traduisant une stabilité relative de l'équilibre acido-basique. En revanche, les valeurs élevées de la conductivité électrique et des TDS indiquent une forte minéralisation globale des eaux étudiées.

L'analyse ionique révèle la dominance des chlorures, des sulfates, du calcium et du sodium. Cette composition met en évidence l'influence des interactions eau-roche, notamment la dissolution des formations évaporitiques et carbonatées telles que le gypse, l'anhydrite, la halite, les calcaires et les dolomies. La classification hydrochimique permet ainsi d'identifier un faciès chloruré-sulfaté, à dominance calcique et sodique.

En conclusion, les eaux du Continental Intercalaire dans la région de l'Oued Souf présentent une minéralisation naturelle importante, principalement contrôlée par la lithologie de l'aquifère et le long temps de résidence des eaux. Ces résultats soulignent la nécessité d'un suivi régulier de la qualité des eaux et d'une gestion rationnelle de cette ressource stratégique dans un environnement saharien fragile.

Mots-clés : eaux souterraines, Continental Intercalaire, Oued Souf, analyse physico-chimique, minéralisation, faciès hydrochimique.

Abstract in English

This study aims to evaluate the physicochemical quality of groundwater from the Continental Intercalaire aquifer in the Oued Souf region, located in southeastern Algeria, through the analysis of several major hydrochemical parameters. In this Saharan context, characterized by scarce rainfall, intense evaporation, and strong dependence on groundwater resources, water quality assessment represents an important scientific, environmental, and socio-economic issue.

The adopted approach is based on the determination of pH, electrical conductivity, total dissolved solids, as well as the main major ions, namely Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , and HCO_3^- . The obtained results show that the analyzed waters have a pH close to neutrality, ranging from 7.06 to 7.42, reflecting a relative stability of the acid-base balance. However, the high values of electrical conductivity and TDS indicate a strong overall mineralization of the studied waters.

The ionic analysis reveals the dominance of chlorides, sulfates, calcium, and sodium. This composition highlights the influence of water-rock interactions, particularly the dissolution of evaporitic and carbonate formations such as gypsum, anhydrite, halite, limestone, and dolomite. The hydrochemical classification therefore makes it possible to identify a chloride-sulfate facies with calcium and sodium dominance.

In conclusion, the waters of the Continental Intercalaire aquifer in the Oued Souf region show significant natural mineralization, mainly controlled by the lithology of the aquifer and the long residence time of the waters. These results underline the need for regular monitoring of water quality and the rational management of this strategic resource in a fragile Saharan environment.

Keywords: groundwater, Continental Intercalaire, Oued Souf, physicochemical analysis, mineralization, hydrochemical facies.

Table des matières

N°	Intitulé	Page
1	Remerciements	3
2	Dédicace 1	4
3	Dédicace 2	5
4	Résumé	6
6	Table des matières	9
7	Index des figures	10
8	Index des tableaux	11
9	Introduction générale	13
10	CHAPITRE I : CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE	16
11	I.1. Introduction	17
12	I.2. Contexte géographique	17
13	I.3. Végétation et utilisation des terres	20
14	I.4. Topographie et géomorphologie	21
15	I.5. Réseau hydrographique	22
16	I.6. Géologie	22
17	I.7. Hydrogéologie	25
18	I.7.1. Nappe phréatique	25
19	I.7.2. Aquifère du Complexe Terminal	26
20	I.7.2.1. Nappe des sables	27
21	I.7.2.2. Nappe des calcaires	27
22	I.7.2.3. Piézométrie du CT dans la région du Souf	28
23	I.7.3. Aquifère du Continental Intercalaire	29

24	I.8. Conclusion	32
25	CHAPITRE II : MATÉRIEL ET MÉTHODES	33
26	II.1. Introduction	34
27	II.2. Présentation de la zone d'étude	35
28	II.3. Objectifs de l'étude hydrochimique	35
29	II.4. Matériel et stratégie d'échantillonnage	36
30	II.5. Conservation et transport des échantillons	36
31	II.6. Méthodes analytiques des paramètres physico-chimiques	37
32	II.6.1. Mesure du pH	38
33	II.6.2. Conductivité électrique et solides dissous totaux	38
34	II.6.3. Dosage du calcium	39
35	II.6.4. Détermination du magnésium	40
36	II.6.5. Préparation des étalons de sodium et de potassium	41
37	II.6.6. Dosage des chlorures	42
38	II.6.7. Dosage des sulfates	42
39	II.6.8. Détermination de l'alcalinité et des bicarbonates	43
41	II.7. Contrôle qualité et traitement des données	45
42	II.8. Conclusion	46
43	CHAPITRE III : RÉSULTATS ET DISCUSSION	48
44	III.1. Introduction	49
45	III.2. Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques mesurés	50
46	III.2.1. Potentiel d'hydrogène (pH)	51
47	III.2.2. Conductivité électrique (CE)	51
48	III.2.3. Total des solides dissous (TDS)	52

49	III.2.4. Calcium (Ca^{2+})	53
50	III.2.5. Magnésium (Mg^{2+})	54
51	III.2.6. Sodium (Na^+)	55
52	III.2.7. Potassium (K^+)	56
53	III.2.8. Chlorures (Cl^-)	57
54	III.2.9. Sulfates (SO_4^{2-})	58
55	III.2.10. Bicarbonates (HCO_3^-)	59
56	III.3. Classification des faciès chimiques	60
57	III.4. Conclusion	63
58	Conclusion générale	65
59	Références bibliographiques	68

Liste des tableaux

N° du tableau	Intitulé du tableau	Page
Tableau I.1	Superficie, population et répartition de la densité dans la zone d'étude	19
Tableau II.1	Caractéristiques générales du site d'étude	35
Tableau II.2	Matériel utilisé pour le prélèvement et la conservation des échantillons	36
Tableau II.3	Synthèse du protocole de prélèvement et de conservation	37
Tableau II.4	Paramètres étudiés et intérêt hydrobiologique	37
Tableau II.5	Préparation des solutions étalons	41
Tableau II.6	Réactifs et conditions analytiques pour les sulfates	42
Tableau II.7	Récapitulatif des méthodes analytiques appliquées	44
Tableau II.8	Mesures de contrôle qualité recommandées	45
Tableau III.01	Synthèse statistique des paramètres physico-chimiques des eaux du Continental Intercalaire en 2026	50

Liste des figures

N° de la figure	Intitulé de la figure	Page
Figure I.1	Situation géographique de la zone d'étude	19
Figure I.2	Topographie de la zone d'étude	21
Figure I.3	Carte géologique du Grand Erg Oriental	23
Figure I.4	Journal stratigraphique d'un forage albien	24
Figure I.5	Limites du bassin du Système Aquifère du Sahara Septentrional	25
Figure I.6	Carte piézométrique de la commune d'El Oued en mars 2008 et mars 2016	26
Figure I.7	Zones de recharge du Complexe Terminal	29
Figure I.8	Coupe hydrogéologique synthétique des aquifères CI et CT	30
Figure I.9	Limites et piézométrie du Continental Intercalaire	31
Figure II.3	Dispositif de titrage complexométrique pour la détermination du calcium	39
Figure II.4	Réactifs utilisés pour le dosage du calcium : NaOH et indicateur HSN	40
Figure II.5	Échantillons préparés après réaction lors des dosages complexométriques	41
Figure II.6	Matériel et réactifs utilisés pour la détermination du TAC	43
Figure II.7	Préparation de la gamme et des réactifs pour le dosage des nitrates	44
Figure III.01	Évolution du pH dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	51

Figure III.02	Évolution de la conductivité électrique CE dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	52
Figure III.03	Évolution des solides dissous totaux TDS dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	53
Figure III.04	Évolution des teneurs en calcium Ca^{2+} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	54
Figure III.05	Évolution des teneurs en magnésium Mg^{2+} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	55
Figure III.06	Évolution des teneurs en sodium Na^{+} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	56
Figure III.07	Évolution des teneurs en potassium K^{+} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	57
Figure III.08	Évolution des teneurs en chlorures Cl^{-} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	58
Figure III.09	Évolution des teneurs en sulfates SO_4^{2-} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	59
Figure III.10	Évolution des teneurs en bicarbonates HCO_3^{-} dans les forages du Continental Intercalaire entre 2019 et 2026	60
Figure III.11	Représentation graphique de la classification des faciès chimiques par le diagramme de Stabler	62

Liste des abréviations

Abréviation	Signification	Page de première apparition
A.D.E.	Algérienne des Eaux	36
ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydrauliques	24
BG	Bureau d'études / organisme technique mentionné avec HPO	30
Ca ²⁺	Ion calcium	35
CE	Conductivité électrique	50
CI	Continental Intercalaire	26
Cl ⁻	Ion chlorure	35
CT	Complexe Terminal	28
DPSB	Direction de la Programmation et du Suivi Budgétaire	17
DSA	Direction des Services Agricoles	20
EDTA	Acide éthylènediaminetétraacétique	39
HCO ₃ ⁻	Ion bicarbonate	35
HPO	Organisme ou source technique relatif aux données de forage profond	30
HSN	Indicateur utilisé pour le dosage du calcium	39
K ⁺	Ion potassium	35
Mg ²⁺	Ion magnésium	35
Na ⁺	Ion sodium	35
NO ₃ ⁻	Ion nitrate	35
OMS	Organisation Mondiale de la Santé	50

ONM	Office National de la Météorologie	22
OSS	Observatoire du Sahara et du Sahel	25
pH	Potentiel hydrogène	34
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional	25
SO ₄ ²⁻	Ion sulfate	35
TAC	Titre Alcalimétrique Complet	43
TDS	Total Dissolved Solids / solides dissous totaux	35
TH	Titre Hydrotimétrique / dureté totale	40
UV/Visible	Spectrophotométrie ultraviolet-visible	45

Introduction générale

Introduction générale

Les eaux souterraines représentent une ressource stratégique dans les régions sahariennes, où les précipitations sont faibles, irrégulières et rapidement soumises à l'évaporation. Dans ces milieux arides, l'eau souterraine constitue souvent la principale source d'approvisionnement pour les besoins domestiques, agricoles et socio-économiques. Cette importance devient encore plus marquée dans la région d'El Oued, située au Sud-Est de l'Algérie, où le développement urbain, l'extension agricole et les conditions climatiques sévères accentuent la pression exercée sur les ressources hydriques.

La région du Souf appartient au système aquifère du Sahara septentrional, caractérisé par la superposition de plusieurs unités hydrogéologiques, notamment la nappe phréatique superficielle, le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Ce dernier constitue un réservoir profond d'importance régionale, exploité par des forages profonds et considéré comme une ressource stratégique en raison de son volume, de sa continuité spatiale et de son rôle potentiel dans la sécurisation de l'approvisionnement en eau. Cependant, la profondeur de cet aquifère, le temps de résidence élevé de ses eaux et les interactions prolongées avec les formations géologiques traversées peuvent entraîner une minéralisation importante.

La qualité physico-chimique des eaux souterraines dépend de plusieurs facteurs naturels et anthropiques. Elle est principalement contrôlée par la nature lithologique des formations aquifères, les processus de dissolution des minéraux, les échanges ioniques, le temps de contact eau-roche, l'évaporation, ainsi que les conditions hydrodynamiques régionales. Dans les aquifères profonds sahariens, la dissolution des formations évaporitiques, carbonatées et parfois silicatées peut conduire à l'enrichissement des eaux en calcium, sodium, magnésium, chlorures, sulfates et bicarbonates.

L'évaluation de la qualité des eaux du Continental Intercalaire présente donc un intérêt scientifique et environnemental majeur. Elle permet non seulement de caractériser leur état hydrochimique actuel, mais aussi de comprendre les mécanismes responsables de leur minéralisation. Cette analyse constitue également une base utile pour apprécier l'aptitude de ces eaux aux différents usages et pour orienter les stratégies de gestion durable des ressources hydriques dans un contexte saharien marqué par la rareté de l'eau.

Dans ce cadre, le présent travail porte sur l'étude physico-chimique et hydrochimique des eaux souterraines du Continental Intercalaire dans la région d'El Oued. Il vise à déterminer les principaux paramètres de qualité, à savoir le pH, la conductivité électrique, les solides dissous totaux et les ions majeurs : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- . L'étude s'intéresse également à la comparaison des résultats entre 2019 et 2026 afin de mettre en évidence l'évolution temporelle de la minéralisation.

La problématique principale de cette recherche peut être formulée comme suit : quelle est la qualité physico-chimique des eaux du Continental Intercalaire dans la région d'El Oued, et quels sont les processus géochimiques responsables de leur minéralisation ? À partir de cette problématique, l'étude cherche à vérifier si la composition chimique des eaux est principalement contrôlée par les interactions eau-roche, notamment la dissolution des

formations évaporitiques et carbonatées, ou si d'autres facteurs peuvent contribuer à l'évolution hydrochimique observée.

Pour répondre à cette problématique, le mémoire est structuré en trois chapitres complémentaires. Le premier chapitre présente le contexte physique, géologique et hydrogéologique de la zone d'étude. Le deuxième chapitre expose le matériel utilisé, les méthodes de prélèvement, les conditions de conservation des échantillons et les techniques analytiques adoptées. Le troisième chapitre est consacré à la présentation, l'interprétation et la discussion des résultats physico-chimiques, ainsi qu'à la classification des faciès chimiques des eaux étudiées.

Ainsi, cette étude s'inscrit dans une approche hydrochimique appliquée à la compréhension du fonctionnement d'un aquifère profond saharien. Elle vise à fournir des éléments scientifiques permettant de mieux caractériser les eaux du Continental Intercalaire, d'identifier les processus dominants de leur minéralisation et de contribuer à une gestion plus rationnelle et durable des ressources en eau souterraine dans la région d'El Oued.

CHAPITRE I

CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Région de l'Oued Souf - Sud-Est de l'Algérie

I.1. Introduction

Les eaux souterraines constituent la principale ressource en eau stratégique dans les régions sahariennes, où les apports pluviométriques sont rares, irréguliers et s'évaporent rapidement. Dans la région de l'Oued Souf, la compréhension du contexte physique, du cadre géologique, et de la géométrie de l'aquifère est essentielle pour interpréter la présence et le comportement des eaux souterraines. Ce chapitre présente une description scientifique structurée de la zone d'étude, articulée autour des thèmes suivants : contexte géographique, végétation et occupation des sols, topographie et géomorphologie, réseau hydrographique, géologie, hydrogéologie.

I.2. Contexte géographique

La wilaya de l'Oued Souf est située dans le Sahara algérien, au sud-est du pays, à environ 500 km d'Alger et à environ 350 km à l'ouest de Gabès, en Tunisie. Elle est une wilaya administrative depuis 1984 et couvre une superficie d'environ 4 458 600 hectares. Sa position géographique lui confère un caractère frontalier stratégique : elle est bordée au nord par Biskra, Khenchela et Tébessa, au sud par le prolongement du Grand Erg Oriental, à l'est par la frontière algéro-tunisienne et à l'ouest par la vallée de l'Oued Righ (DPSB, 2019).

La zone étudiée comprend 18 communes : El Oued, Bayadha, Robbah, Kouinine, Guemar, Taghzout, Hassani Abdelkrim, Debila, Sidi Aoun, Magrane, Hassi Khelifa, Reguiba, Mihouensa, Oued Alenda, Ogla, Nakhla, Ourmes et Trifaoui. La superficie totale est d'environ 11 738 km². La zone d'étude est délimitée au sud par les dunes du Grand Erg Oriental, à l'est par le secteur frontalier de Taleb Larbi et du Douar El Maa, et à l'ouest par la ligne de palmeraies de l'Oued Righ.

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

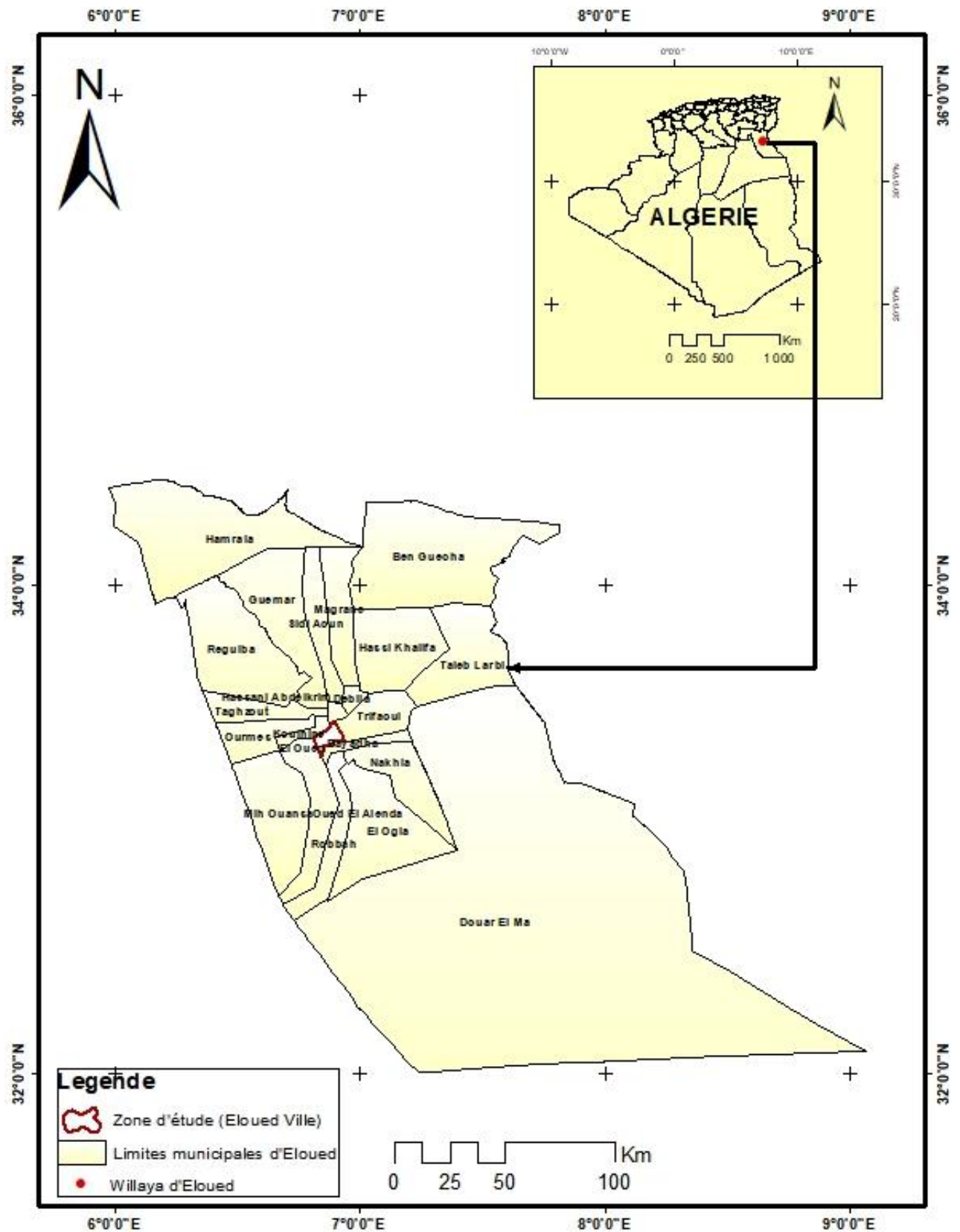


Figure I.1. Situation géographique de la zone d'étude.

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

D'un point de vue démographique, la région du Souf compte environ 643 120 habitants selon le recensement de 2019. El Oued, chef-lieu de la province, est le principal centre urbain, avec 185 615 habitants et une densité d'environ 2 411 habitants/km². Hassani Abdelkrim présente une forte densité de population, d'environ 552 habitants/km², tandis qu'El Ogla est la commune la moins densément peuplée, avec près de 6 habitants/km². Le taux de croissance démographique régional est estimé à 3,4 % (DPSB, 2019).

Tableau I.1. Superficie, population et répartition de la densité dans la zone d'étude. (DPSB, 2019).

Non.	Commune	Population	Superficie (km ²)	Densité (inh./km ²)
1	El Oued	185 615	77	2 410,58
2	Kouinine	14 395	116	86,72
3	Reguiba	58 610	1 966	29,81
4	Guémar	57 220	1 264	45,27
5	Taghzout	18 560	539	34,43
6	Ourmes	7 540	443	17,02
7	Débila	33 960	78	435,38
8	Hassani Abdelkrim	32 030	58	552,24
9	Hassi Khalifa	43 255	1 112	38,90
10	Trifaoui	11 375	474	24,00
11	Magrane	32 115	618	51,97
12	Sidi Aoun	15 950	480	33,23
13	Robbah	29 685	499	59,49
14	Nakhla	18 040	700	25,77
15	El Ogla	8 620	1 352	6,38

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

16	Bayadha	43 720	139	314,53
17	Oued El Alenda	8 545	712	12h00
18	Mih Ouensa	23 885	1 111	21,50
Total	Zone d'étude	643 120	11 738	-

I.3. Végétation et utilisation des terres

Dans la région du Souf, la végétation naturelle reste limitée et discontinue en raison de l'aridité climatique, de la mobilité des dunes, des croûtes gypseuses et de la profondeur variable de la nappe phréatique. Elle est principalement constituée d'espèces xérophytes adaptées au manque d'eau, à la salinité et aux fortes températures, avec une présence plus marquée dans les dépressions et les zones interdunaires où l'humidité est relativement plus accessible (Hamdi Aissa, 2001).

La végétation cultivée est dominée par le palmier dattier, élément central du paysage agricole soufi, notamment à travers le système traditionnel des ghouts. Ces dépressions artificielles permettent aux racines des palmiers d'atteindre directement la nappe phréatique peu profonde, constituant ainsi une forme d'adaptation ancienne aux contraintes hydrologiques sahariennes (Cote, 1998 ; DSA, 2019).

L'agriculture locale a connu une forte évolution, avec près de 3,9 millions de palmiers dattiers et une production annuelle importante. Depuis les années 2000, l'extension de l'élevage, de la pomme de terre et du maraîchage a renforcé le rôle économique de l'agriculture, tout en augmentant considérablement la pression sur les ressources en eau souterraine (DSA, 2019).

Entre 2010 et 2020, les surfaces agricoles irriguées ont presque doublé, tandis que l'urbanisation s'est développée autour d'El Oued et le long des principaux axes routiers. Cette expansion agricole et urbaine a provoqué une intensification des prélèvements d'eau et a contribué à la perturbation du système hydrogéologique superficiel (DSA, 2020).

Ainsi, la transformation de l'utilisation des terres dans le Souf a eu des effets directs sur les ghouts, notamment à travers la remontée de la nappe phréatique et l'engorgement des sols. Dans certains secteurs, plus de 1 000 ghouts ont été inondés, entraînant la disparition de nombreux palmiers dattiers par asphyxie racinaire (Bouelsal et al., 2015 ; DSA, 2020).

I.4. Topographie et géomorphologie

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La région de l'Oued Souf appartient au Grand Erg Oriental et au Bas-Sahara. Elle forme une vaste dépression orientée globalement du sud au nord, avec des altitudes décroissantes d'environ 125 m près d'Essoualah à environ 29 m près de Reguiba (Figure I.2). L'altitude moyenne est proche de 80 m, et les zones de chotts du nord peuvent atteindre des altitudes inférieures au niveau de la mer (Hamdi Aissa, 2001 ; Ouarekh, 2022).

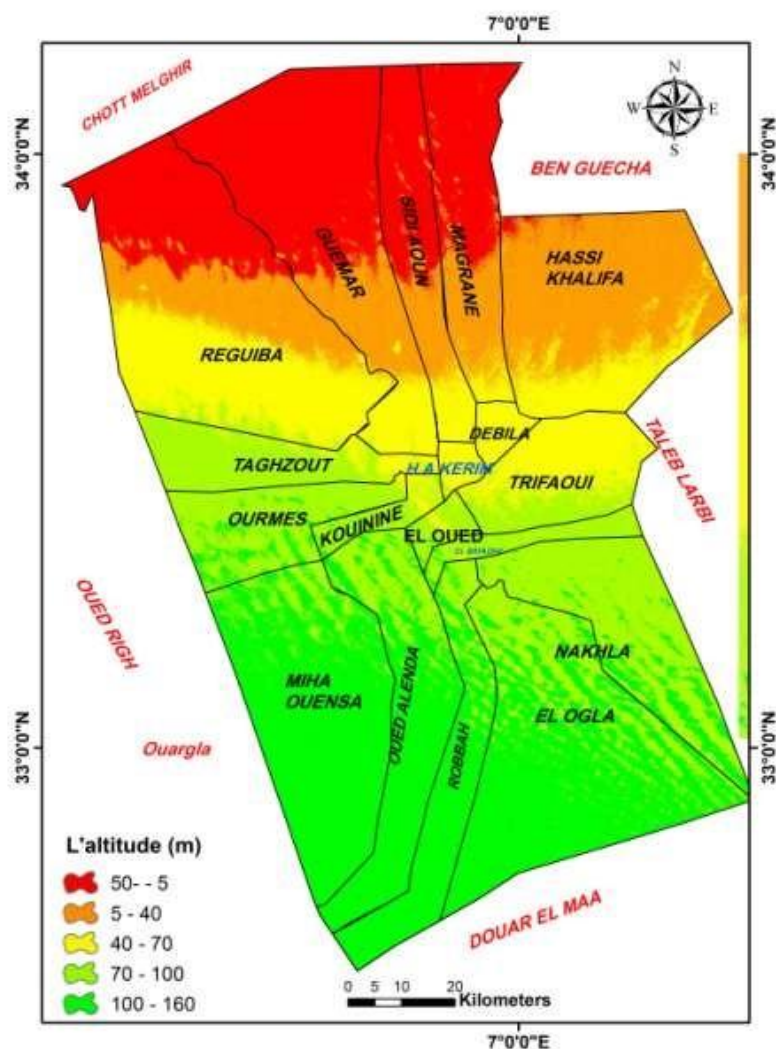


Figure I.2. Topographie de la zone d'étude. (Ouarekh , 2022).

Du point de vue géomorphologique, on distingue trois unités principales : l'Erg, le Sahane et les sebkhas. L'Erg correspond à un vaste champ de dunes composé de dunes de sable bien développées pouvant localement atteindre près de 200 m de hauteur. Il occupe la majeure partie de la surface régionale et se compose d'épaisses accumulations de sable éolien reposant sur un substratum argileux pliocène relativement imperméable (Hamdi Aissa, 2001).

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

Le terme « Sahane » désigne des zones plates ou légèrement déprimées, parfois pierreuses, entourées de dunes et souvent associées à des croûtes de gypse. Les sebkhas sont des dépressions salines de faible altitude où la nappe phréatique affleure. La remontée capillaire et l'évaporation intense favorisent l'accumulation de sel, entraînant la formation de sols sodiques et fortement salins (Hamdi Aissa, 2001).

I.5. Réseau hydrographique

Le réseau hydrographique du Souf est typique des environnements hyperarides du Sahara. Il est dépourvu de cours d'eau permanents et le ruissellement n'est épisodique que lors de rares épisodes orageux. En raison de la faiblesse des précipitations et de l'intensité de l'évaporation, les eaux de surface ne constituent pas un réseau de drainage continu. Au contraire, les écoulements de courte durée se dispersent rapidement, s'infiltrant dans les formations sableuses ou sont dirigés vers des dépressions fermées (Dubief, 1963 ; ONM, 2018).

À l'échelle régionale, les eaux de ruissellement temporaires tendent à converger vers les basses terres du nord et du nord-est, notamment les chotts et les sebkhas. Ces dépressions constituent des zones d'évacuation naturelles pour les eaux de surface et les eaux souterraines peu profondes. Leur salinité résulte des effets combinés de l'évaporation, de la remontée capillaire et des sels dissous transportés par les eaux intermittentes.

La recharge récente de la nappe phréatique superficielle est principalement liée à la réinfiltration des eaux de retour d'irrigation, des eaux usées urbaines et des rejets domestiques. Par conséquent, le fonctionnement hydrologique actuel de l'aquifère superficiel est fortement influencé par les apports d'eau anthropiques plutôt que par les précipitations naturelles (Bouelsal, 2016 ; Khelfaoui et al., 2021).

I.6. Géologie

La zone d'étude appartient au bassin du Sahara septentrional, plus précisément à sa partie orientale. Elle se situe sur la plate-forme saharienne, constituée d'un socle précambrien recouvert d'une épaisse couverture sédimentaire de dépôts paléozoïques, mésozoïques et cénozoïques. Cette succession sédimentaire peut dépasser 3 000 m d'épaisseur et comprend les principaux réservoirs hydrogéologiques du Sahara (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972 ; Fabre, 1976).

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

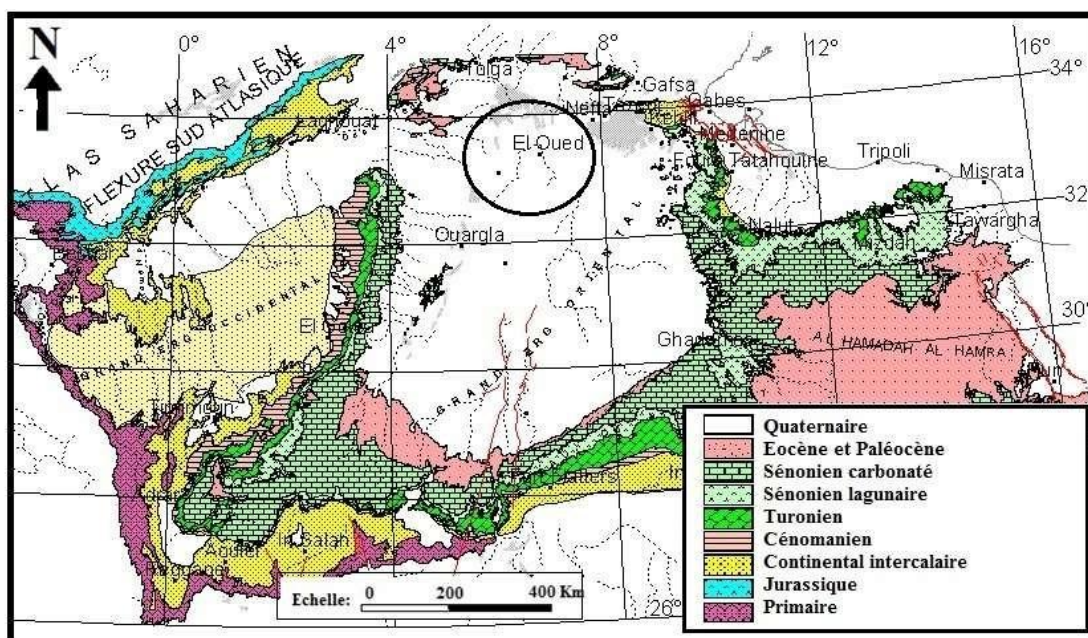


Figure I.3. Carte géologique du Grand Erg Oriental (Baba Sy.M, 2005).

En surface, la carte géologique locale révèle la prédominance des formations quaternaires et mio-pliocènes. Les dépôts quaternaires sont principalement sableux et associés aux formations dunaires du Grand Erg Oriental. Le Mio-Pliocène est constitué de dépôts continentaux sableux, argileux, sablo-argileux et localement gypseux, qui représentent une part importante du système aquifère du Complexe Terminal (Bel et Demargne, 1966 ; Baba Sy, 2005).

La série mésozoïque comprend les formations du Barrémien, de l'Aptien, de l'Albien, du Vraconien, du Cénomanién, du Turonien et du Sénonien. Le Barrémien et l'Albien sont dominés par des faciès gréseux et sableux et constituent les principaux niveaux réservoirs de l'Intercalaire continental. L'Aptien, le Cénomanién et le Vraconien contiennent des formations dolomitiques, marneuses et argileuses qui peuvent localement jouer le rôle d'horizons semi-perméables ou imperméables (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972).

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

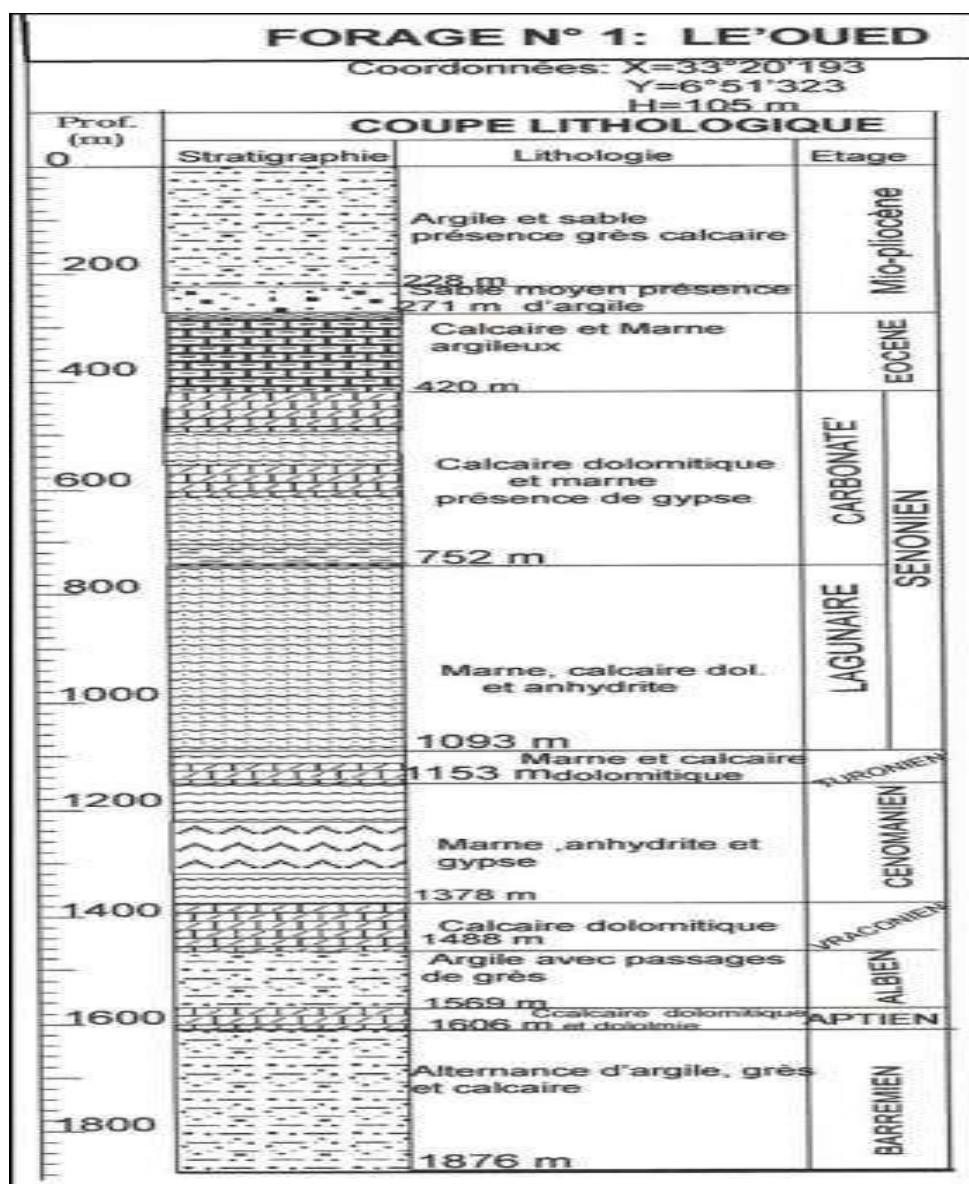


Figure I.4. Journal stratigraphique d'un forage albien (ANRH).

Les formations sénoniennes et éocènes sont principalement carbonatées et évaporitiques. Les calcaires et dolomies sénoniens-éocènes sont fréquemment fracturés et peuvent constituer une unité aquifère, tandis que les niveaux évaporitiques et argileux contribuent à la forte minéralisation des eaux souterraines. Ces caractéristiques lithologiques expliquent les signatures hydrochimiques observées dans la région, notamment l'influence de la dissolution des évaporites (Fabre, 1976).

Le Mio-Pliocène est l'unité hydrogéologique la plus importante du Complexe Terminal dans la zone d'étude. Il repose en discordance sur des formations plus anciennes et se caractérise par une alternance hétérogène de sables, de grès, d'argiles, d'intercalations de gypse et, localement,

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

de niveaux graveleux. Cette hétérogénéité détermine le stockage, la transmissivité et la continuité hydraulique de l'aquifère (Bel et Demargne, 1966).

I.7. Hydrogéologie

La région du Souf fait partie du système aquifère du Sahara septentrional, qui s'étend sur environ 780 000 km² à travers l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Ce système comprend deux grands aquifères profonds, l'aquifère continental intercalaire et le complexe terminal, recouverts par un aquifère phréatique superficiel. Ces aquifères sont localement séparés par des couches semi-perméables ou imperméables, mais des interactions hydrauliques et géochimiques peuvent se produire à l'échelle régionale (OSS, 2003 ; UNESCO, 1972).

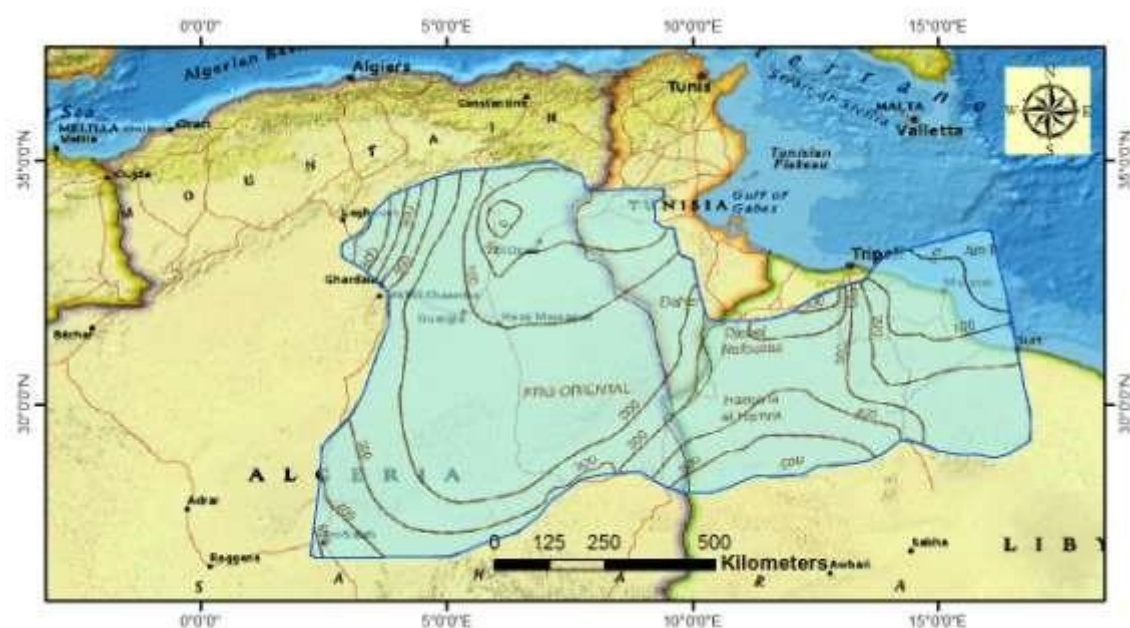


Figure I.5. Limites du Bassin de système Aquifère du Sahara Septentrional SASS (OSS,2003)

I.7.1. Nappe phréatique

La nappe phréatique superficielle se trouve dans des sables fins contenant des cristaux de gypse et des lentilles sablo-argileuses, correspondant à des formations continentales récentes. Elle se rencontre généralement à des profondeurs comprises entre 10 et 60 m, la profondeur ayant tendance à augmenter du sud au nord. Historiquement, cette nappe alimentait des puits traditionnels et des palmeraies, mais elle est actuellement affectée par la salinisation et la remontée de la nappe phréatique dans plusieurs secteurs (Bouelsal, 2016 ; Ouarekh, 2022).

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La circulation des eaux souterraines dans cet aquifère est relativement rapide dans les zones sableuses, mais elle est localement perturbée par des lentilles d'argile qui réduisent la perméabilité. L'aquifère est principalement alimenté par les excédents d'eau d'irrigation, les rejets industriels et domestiques, et l'infiltration des eaux usées. Cette recharge anthropique explique la formation de buttes piézométriques et la remontée du niveau de la nappe phréatique dans les zones urbaines et périurbaines (Cote, 1998 ; Bouselsal et al., 2015).

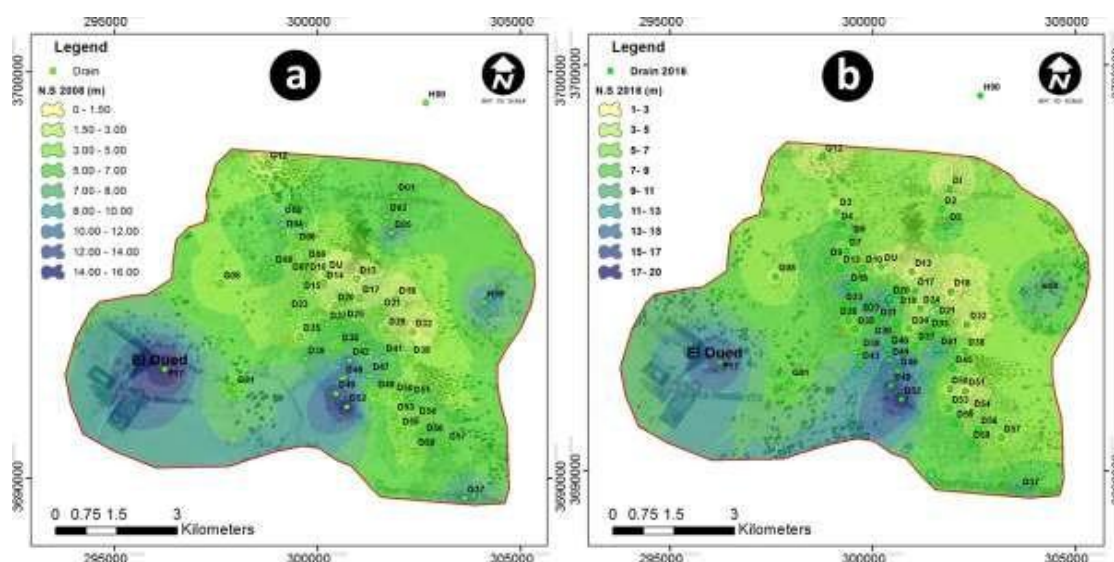


Figure 1.6. Carte piézométrique de la commune d'El oued en Mars 2008 (a), Mars 2016 (b) . (Ouarekh, 2022).

I.7.2. Aquifère du complexe terminal

Le système aquifère du Complexe Terminal est moins étendu que celui du CI, le terrain du Complexe Terminal couvrant environ 350 000 km² en Algérie et en Tunisie couvrant essentiellement la majeure partie du bassin oriental et l'ensemble du Sahara septentrional, de Saoura à l'Ouest au Graben de Hon (et même jusqu'au Golfe de Syrte) à l'Est, de l'accident Sud-Atlasique au Nord, au flanc nord des plateaux de Tademaït et du Tihert en Algérie, du Gargaf (Nord du Fezzan) en Libye. Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes, englobant les assises perméables du calcaire Sénonien et du Mio-Pliocène. Il s'agit de formations continentales sableuses et sablo-argileuses avec des intercalations de gypse et de passées de grès qui reposent en discordance sur les formations calcaires érodées de l'Eocène inférieur.

Il est possible de distinguer trois aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables, dont les deux premières correspondent respectivement aux

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

sables d'âge Miocène (Pontien) et Pliocène, tandis que la dernière correspond à l'Eocène inférieur.

I.7.2.1. Nappe des Sables

Dans ces niveaux de sable viennent se générer deux nappes de type captif, dont le premier moins profond correspond à la formation supérieure du complexe terminal communément appelée réservoir du "Sub-Souf".

Outre la nappe phréatique, Cette nappe est constituée de sables fins à moyens, de sables argileux et de grès, d'âge Mio-Pliocène, et son toit est constitué d'argiles et d'évaporites, émerge progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud au Rustine. Il s'agit d'une nappe captive et était autrefois très exploitée avec des débits faibles à moyens, Dans la zone d'étude, elle a une profondeur moyenne de 280 mètres .

Il faut également mentionner l'existence d'une deuxième nappe contenue dans les sables d'âge pontien. Cette couche est séparée de la précédente (première nappe des sables) par une formation d'argiles-gypseuse imperméable formant son toit, son substratum est constitué d'argiles et d'argiles-sableuses, la profondeur de cette couche varie entre 400 et 450 mètres, l'épaisseur utile de cette couche est d'environ 50 mètres. L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-ouest vers le Nord-est, c'est-à-dire vers la zone des Chotts Algéro- Tunisiens. Dans les zones de fortes exploitations comme la ville d'El Oued, l'extraction de l'eau se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Larbi et Douar EL Maa, la nappe est artésienne : c'est le cas de la nappe de Pontien.

I.7.2.2. Nappe des calcaires

Est un ensemble calcaire-dolomitique à dolomitique, avec la présence de quelques couches d'argiles, de marnes et de gypses, situé dans les calcaires fissurés du Sénonien carbonaté et de l'Eocène inférieur ; essentiellement carbonaté et très peu exploité, les forages captant cette nappe nous montrent l'existence de deux niveaux servant de référence pour la classification des eaux souterraines. Du Sud au Nord, on observe l'existence d'un premier niveau calcaire mieux individualisé, tantôt purement calcaire, tantôt formé de calcaires gypseux. Il correspond au niveau inférieur.

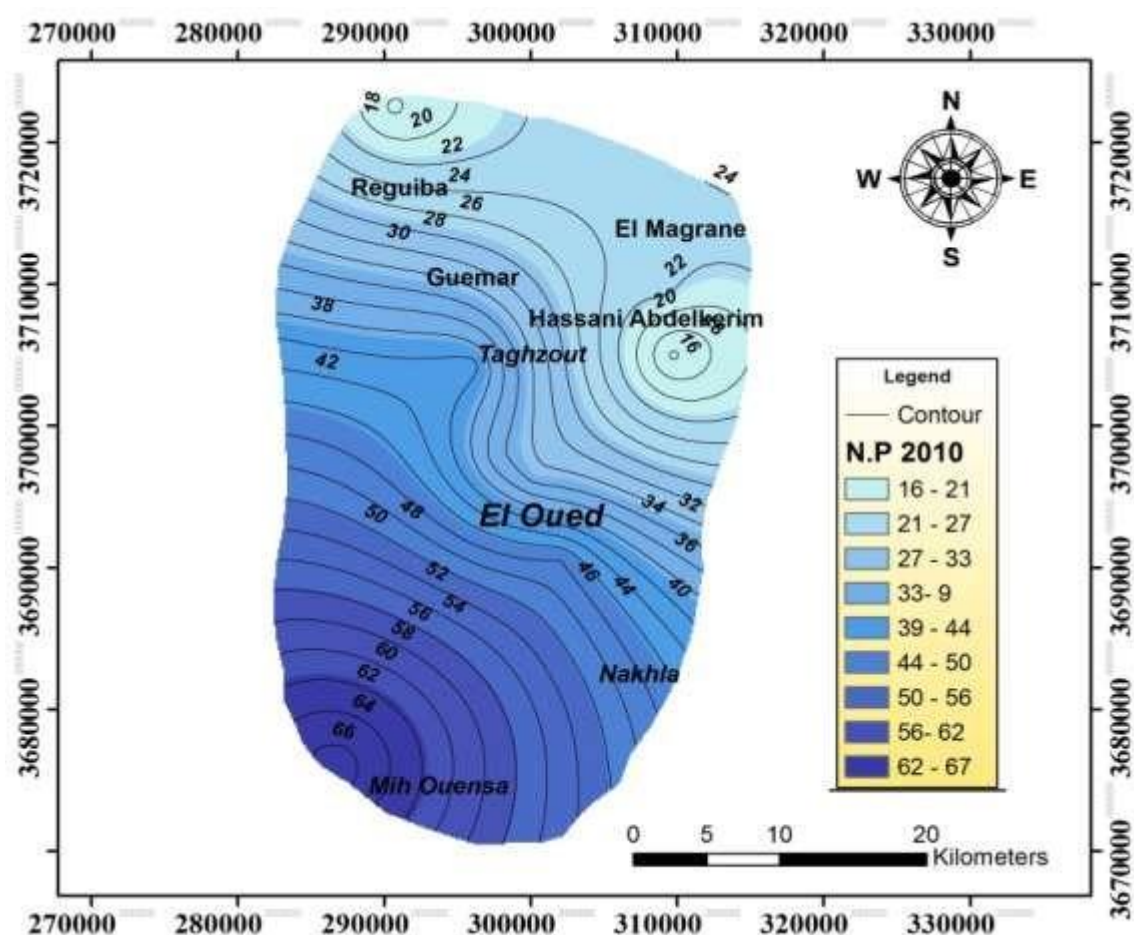
Le niveau supérieur, principalement représenté par des calcaires siliceux, est considéré comme une zone de transition entre la nappe des calcaires et celle des sables. Dans l'ensemble, ces

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses avec des couches d'argile rouge. Le Sénonien lagunaire forme son substratum et les argiles lagunaires et marnes de l'Eocène moyen forment le toit imperméable de cette nappe

I.7.2.3. Piézométrie du CT dans la région de Souf

La carte piézométrique d'avril 2010 montre que la partie haute de la nappe se trouve à Robbah avec une côte de 67,55 m et Mih Ouensa avec une côte de 67.4 m, alors que la partie basse se trouve au nord de Hassani Abdelkrim avec une côte de 16 m et au nord de Reguiba avec une côte de 18 m. Le sens d'écoulement des eaux sont orienté du sud-ouest au nord-est (Ouarekh et al. 2021).



La recharge du complexe terminal est principalement régionale et se produit dans des zones d'affleurement éloignées le long de l'Atlas saharien et d'autres marges élevées du bassin. Dans

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

la région du Sud, la recharge locale directe est très limitée en raison des conditions climatiques hyperarides. Par conséquent, l'augmentation des prélèvements entraîne une baisse progressive des niveaux piézométriques, soulignant le caractère fossile ou faiblement renouvelable de cette ressource en eau souterraine (OSS, 2003 ; Baba Sy, 2005).

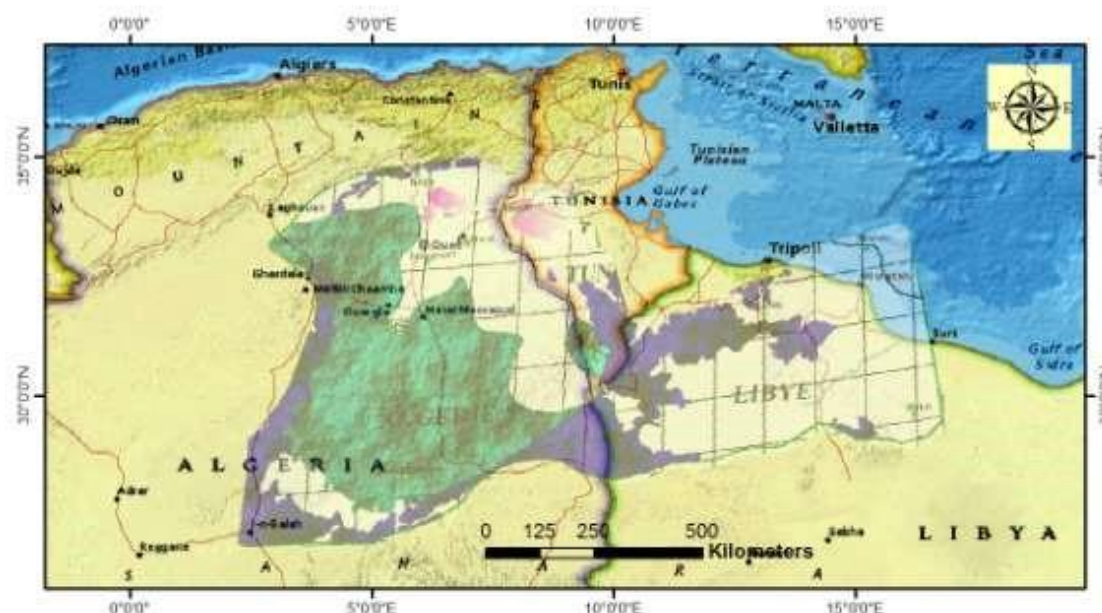


Figure I.7. Zones de recharge du complexe terminal (Baba SY,2005).

I.7.3. Aquifère Continental Intercalaire

Le Continental Intercalaire est un vaste réservoir de grès sableux du Crétacé inférieur, composé principalement de dépôts continentaux intercalés entre deux épisodes sédimentaires marins. Sa profondeur peut localement atteindre 2 000 m, pour une épaisseur généralement comprise entre 200 et 400 m. Il s'étend sur plus de 600 000 km² et renferme d'importants volumes d'eau souterraine (Savornin, 1945 ; UNESCO, 1972 ; OSS, 2003).

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

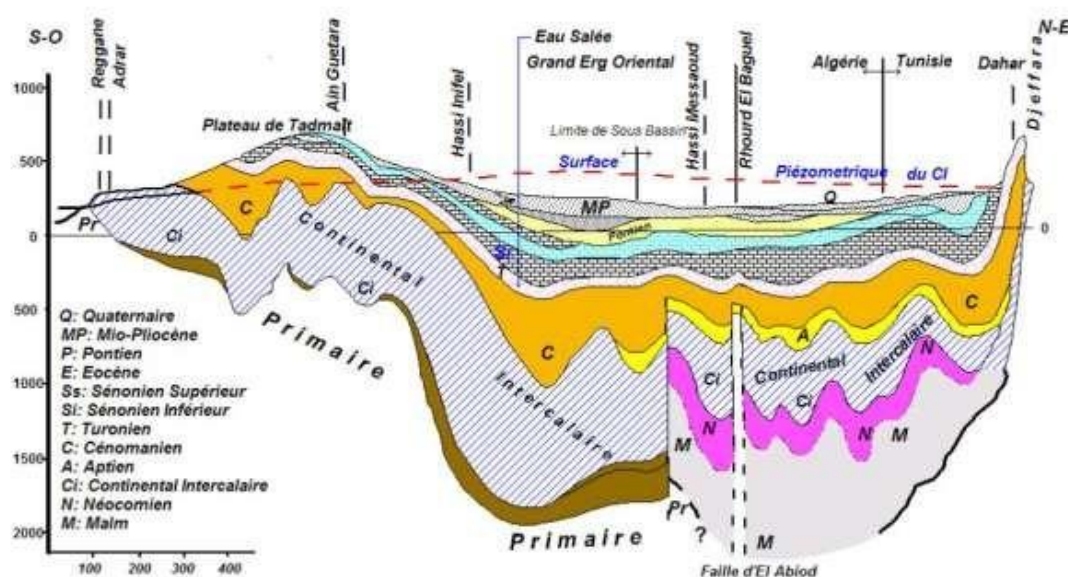


Figure I.8. Coupe hydrogéologique synthétique des aquifères CI et CT (UNESCO, 1972).

Dans la région du Sud, l'aquifère continental intercalaire est exploité par des forages profonds, d'une profondeur variant entre 1 800 et 2 100 m environ. Artésien par endroits, il présente des températures d'eau élevées, pouvant atteindre 60 °C, et des pressions importantes en tête de puits. Son exploitation demeure plus limitée que celle du complexe terminal en raison de sa profondeur et du coût de forage, mais il constitue une réserve stratégique pour l'approvisionnement futur en eau (HPO et BG, 2004 ; Ouarekh, 2022).

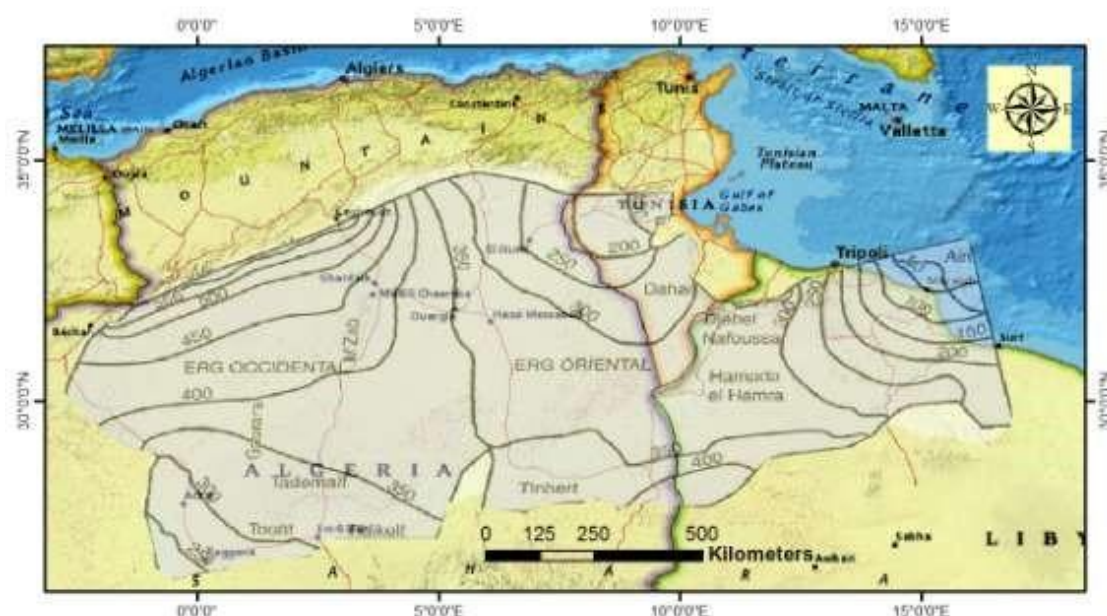


Figure I.9. Limites et piézométrie de Continental Intercalaire (Baba SY et al, 2006).

CHAPITRE I CONTEXTE PHYSIQUE, GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE DE LA ZONE D'ÉTUDE

La piézométrie de Continental Intercalaire indique une convergence des flux d'eaux souterraines vers l'est et le nord-est, notamment en direction du golfe de Gabès. Les principales zones de recharge se situent le long de l'Atlas saharien, de la crête du Mzab et des affleurements méridionaux. Le temps de résidence des eaux souterraines est très long, ce qui justifie une gestion rigoureuse des prélèvements (Baba Sy et al., 2006 ; OSS, 2015).

I.8. Conclusion

La région de l'Oued Souf présente un environnement naturel fortement marqué par l'aridité saharienne, la prédominance des formations dunaires du Grand Erg Oriental et la présence de dépressions salines jouant le rôle de zones de décharge naturelles. Sa position géographique, sa croissance démographique et son développement agricole rapide en font une zone stratégique où les ressources en eau souterraine jouent un rôle central dans les activités socio-économiques.

L'analyse géologique et hydrogéologique révèle la superposition de trois systèmes aquifères : la nappe phréatique superficielle, fortement influencée par les eaux de retour d'irrigation et les apports urbains ; le Complexe Terminal, principal aquifère exploité pour les besoins domestiques et agricoles ; et l'aquifère du continental intercalaire profonde, constituant une réserve régionale stratégique.

CHAPITRE II

MATÉRIEL ET

MÉTHODES

II.1. Introduction

La qualité des eaux souterraines constitue un indicateur majeur de l'état écologique et sanitaire des hydrosystèmes. Dans les régions arides et semi-arides, où la pression sur les ressources hydriques est élevée, l'évaluation hydrochimique permet de caractériser l'aptitude de l'eau aux usages domestiques, agricoles et, plus largement, environnementaux.

La composition physico-chimique d'une eau souterraine résulte principalement de l'interaction entre l'eau infiltrée et les formations géologiques traversées. Elle dépend également du temps de résidence dans l'aquifère, des conditions climatiques, des échanges ioniques, de l'évaporation, ainsi que des apports anthropiques liés aux activités agricoles ou urbaines.

Dans une approche académique à orientation biologique et environnementale, les paramètres tels que le pH, la conductivité électrique, les solides dissous totaux et les principaux ions minéraux sont considérés comme des facteurs influençant non seulement la potabilité de l'eau, mais aussi l'équilibre des communautés microbiennes, la biodisponibilité des éléments chimiques et la stabilité des processus biogéochimiques.

Le présent chapitre décrit donc la zone étudiée, le protocole de prélèvement, le matériel utilisé, les conditions de conservation des échantillons et les méthodes analytiques adoptées pour déterminer la qualité physico-chimique des eaux souterraines étudiées.

II.2. Présentation de la zone d'étude

La zone d'étude est localisée dans la région d'El Oued, au Sud-Est algérien. Elle appartient à un contexte saharien caractérisé par un climat aride, de faibles précipitations et une forte évaporation. Ces conditions favorisent la concentration des sels dissous dans les eaux souterraines et rendent nécessaire une analyse détaillée de leur minéralisation.

Tableau II.1. Caractéristiques générales du site d'étude.

Élément	Description scientifique
Région	El Oued, Sud-Est algérien
Type de ressource	Eaux souterraines prélevées au niveau de puits/points d'eau
Contexte climatique	Milieu aride marqué par une évaporation importante
Intérêt biologique et environnemental	Influence possible de la minéralisation sur les équilibres microbiens, les usages agricoles et la qualité sanitaire de l'eau
Objectif spatial	Comparer les variations hydrochimiques entre les points d'échantillonnage

II.3. Objectifs de l'étude hydrochimique

L'étude hydrochimique vise à établir une description fiable de la qualité des eaux souterraines de la zone étudiée. Elle repose sur l'analyse de paramètres indicateurs de la minéralisation, de l'équilibre acido-basique et de la présence des principaux éléments majeurs dissous.

déterminer les faciès chimiques dominants des eaux étudiées ;

identifier les concentrations des principaux ions majeurs : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- et NO_3^- ;

évaluer la minéralisation globale à travers la conductivité électrique et les TDS ;

mettre en relation les résultats analytiques avec le contexte géologique, hydrologique et environnemental ;

fournir une base méthodologique solide pour l'interprétation des résultats hydrochimiques.

II.4. Matériel et stratégie d'échantillonnage

La stratégie d'échantillonnage a été conçue afin d'obtenir des échantillons représentatifs de la variabilité spatiale des eaux souterraines. Les prélèvements ont été réalisés au niveau de

différents points d'eau, en tenant compte de la disponibilité des ouvrages hydrauliques, de la proximité des activités agricoles et de la diversité géologique locale.

Tableau II.2. Matériel utilisé pour le prélèvement et la conservation des échantillons.

Catégorie	Matériel	Rôle méthodologique
Prélèvement	Bouteilles en polyéthylène propres de 1 500 mL	Collecte de l'eau destinée aux analyses physico-chimiques
Préparation	Eau distillée et rinçage avec l'eau du point échantillonné	Réduction du risque de contamination externe
Conditionnement	Glacière ou conteneur réfrigéré	Maintien des échantillons à basse température pendant le transport
Conservation	Température proche de 4 °C	Limitation des modifications chimiques avant analyse
Identification	Étiquettes de terrain et fiche de prélèvement	Traçabilité du site, de la date et des conditions de prélèvement

Avant chaque prélèvement, le flacon a été rincé avec l'eau du point concerné. Cette étape est importante pour stabiliser le récipient au contact de la matrice analysée et éviter la dilution ou la contamination par des résidus éventuels. Le remplissage a été effectué en limitant l'agitation excessive afin de réduire les échanges gazeux avec l'atmosphère.

Les échantillons ont ensuite été acheminés rapidement vers le laboratoire de l'Algérienne des Eaux (A.D.E.) de la wilaya d'El Oued, où les analyses ont été effectuées selon des méthodes classiques adaptées à l'étude des eaux naturelles.

II.5. Conservation et transport des échantillons

La conservation des échantillons constitue une étape critique en analyse hydrochimique, car certains paramètres peuvent évoluer après le prélèvement sous l'effet de l'activité biologique, des réactions d'oxydoréduction, de la précipitation de minéraux ou des échanges avec l'air. Pour cette raison, les échantillons ont été maintenus dans des conditions réfrigérées jusqu'à l'analyse.

Tableau II.3. Synthèse du protocole de prélèvement et de conservation.

Étape	Procédure appliquée	Justification scientifique
-------	---------------------	----------------------------

Préparation des flacons	Lavage, rinçage à l'eau distillée puis rinçage avec l'eau à prélever	Limiter la contamination et améliorer la représentativité
Collecte	Prélèvement direct dans des bouteilles en polyéthylène de 1 500 mL	Obtenir un volume suffisant pour les différents dosages
Étiquetage	Codage du point d'eau, date et paramètres de terrain	Garantir la traçabilité analytique
Transport	Acheminement en conteneur réfrigéré	Réduire l'activité biologique et les transformations chimiques
Stockage	Conservation à environ 4 °C jusqu'aux analyses	Préserver au mieux les caractéristiques initiales

II.6. Méthodes analytiques des paramètres physico-chimiques

Les analyses portent sur les paramètres les plus représentatifs de la qualité des eaux souterraines : pH, conductivité électrique, solides dissous totaux et éléments majeurs. Ces paramètres permettent d'évaluer la minéralisation, l'alcalinité, la dureté et la présence d'anions susceptibles d'avoir un intérêt environnemental ou sanitaire.

Tableau II.4. Paramètres étudiés et intérêt hydrobiologique.

Paramètre	Unité	Intérêt scientifique
pH	Sans unité	Indique le caractère acide, neutre ou basique et influence les réactions biochimiques
Conductivité électrique	µS/cm	Estime la charge ionique globale et la minéralisation de l'eau
TDS	mg/L	Exprime la quantité totale de sels dissous
Ca ²⁺ et Mg ²⁺	mg/L	Déterminent la dureté et renseignent sur la dissolution des carbonates/éaporites
Na ⁺ et K ⁺	mg/L	Indiquent les échanges ioniques et certains apports lithologiques ou anthropiques
Cl ⁻	mg/L	Traceur de salinité et d'apports évaporitiques ou anthropiques
SO ₄ ²⁻	mg/L	Marqueur possible de la dissolution du gypse ou d'autres minéraux sulfatés

HCO ₃ ⁻	mg/L	Reflète l'alcalinité et les équilibres carbonate-bicarbonate
-------------------------------	------	--

II.6.1. Mesure du pH

Le potentiel hydrogène renseigne sur l'équilibre acido-basique du milieu aqueux. La mesure est effectuée à l'aide d'un pH-mètre préalablement étalonné avec des solutions tampons. Le pH intervient dans la solubilité des minéraux, la forme chimique des espèces dissoutes et la stabilité des organismes microbiens présents dans l'eau.

II.6.2. Conductivité électrique et solides dissous totaux

La conductivité électrique exprime la capacité de l'eau à conduire le courant électrique, propriété directement liée à la présence d'ions dissous. Les TDS sont estimés à partir de la conductivité selon la relation empirique : $TDS (mg/L) = K \times \text{Conductivité } (\mu S/cm)$, où K varie généralement entre 0,5 et 0,7 selon la composition ionique de l'eau.

II.6.3. Dosage du calcium

Le calcium dissous est déterminé par titrage complexométrique à l'EDTA. Un volume de 50 mL d'échantillon est traité par addition de NaOH et d'indicateur HSN, puis titré avec une solution d'EDTA de concentration connue. Le virage vers la couleur bleue indique la complexation totale des ions Ca²⁺.



Figure II.3. Dispositif de titrage complexométrique pour la détermination du calcium.



Figure II.4. Réactifs utilisés pour le dosage du calcium : NaOH et indicateur HSN.

II.6.4. Détermination du magnésium

La concentration en magnésium est déterminée indirectement à partir de la dureté totale et de la concentration en calcium. La dureté totale correspond à la somme des teneurs en Ca^{2+} et Mg^{2+} . La concentration en Mg^{2+} est calculée en soustrayant la concentration molaire du calcium de la dureté totale, puis en appliquant la masse molaire du magnésium.

Expression utilisée : $[\text{Mg}^{2+}] \text{ (mg/L)} = ([\text{TH}] \text{ (mmol/L)} - [\text{Ca}^{2+}] \text{ (mmol/L)}) \times 24,305$.



Figure II.5. Échantillons préparés après réaction lors des dosages complexométriques.

II.6.5. Préparation des étalons de sodium et de potassium

Les solutions étalons de Na^+ et K^+ permettent l'étalonnage des appareils ou la construction de courbes de calibration. Une solution mère de sodium à 1 g/L est préparée par dissolution de 2,54 g de NaCl dans 1 000 mL d'eau distillée. Des solutions filles à 10 mg/L sont ensuite préparées par dilution contrôlée. Pour le potassium, une solution fille de 10 mg/L est obtenue à partir d'une solution mère de KCl à 1 g/L.

Tableau II.5. Préparation des solutions étalons.

Ion	Solution mère	Préparation de la solution fille	Concentration finale
Na^+	NaCl, 1 000 mg/L	Dilution d'un volume approprié dans 100 mL d'eau distillée	10 mg/L
K^+	KCl, 1 000 mg/L	Dilution de 1 mL dans 100 mL d'eau distillée	10 mg/L

II.6.6. Dosage des chlorures

Les ions chlorures sont dosés par titrage argentimétrique selon le principe de précipitation avec le nitrate d'argent AgNO_3 en présence de chromate de potassium K_2CrO_4 . Un volume de 100 mL d'échantillon est prélevé, puis 1 mL d'indicateur est ajouté. Le titrage est poursuivi jusqu'à l'apparition d'un virage rouge brique, correspondant au point final de la réaction.

II.6.7. Dosage des sulfates

La détermination des sulfates SO_4^{2-} est réalisée par méthode spectrophotométrique après précipitation sous forme de sulfate de baryum BaSO_4 . Les échantillons troubles sont filtrés sur membrane de 0,45 μm . Une gamme étalon de 0 à 70 mg/L est préparée, puis les absorbances sont mesurées à 420 nm. Les concentrations sont obtenues à partir de la courbe d'étalonnage.

Tableau II.6. Réactifs et conditions analytiques pour les sulfates.

Éléments méthodologique	Description
Principe	Précipitation des sulfates en BaSO_4 puis mesure spectrophotométrique
Réactifs	Solution stabilisante, BaCl_2 0,01 N, solution mère de sulfate préparée à partir de Na_2SO_4
Prétraitement	Filtration des échantillons troubles ou colorés sur membrane 0,45 μm
Longueur d'onde	420 nm
Gamme d'étalonnage	0 à 70 mg/L de SO_4^{2-}

II.6.8. Détermination de l'alcalinité et des bicarbonates

Le titre alcalimétrique complet (TAC) exprime l'alcalinité totale de l'eau, principalement liée à la présence des ions bicarbonates HCO_3^- . Le dosage est réalisé par titration avec une solution d'acide sulfurique H_2SO_4 N/50 jusqu'au virage de l'indicateur coloré, généralement autour du pH 4,5. Cette étape permet d'évaluer la capacité tampon de l'eau.

CHAPITRE II MATÉRIEL ET MÉTHODES

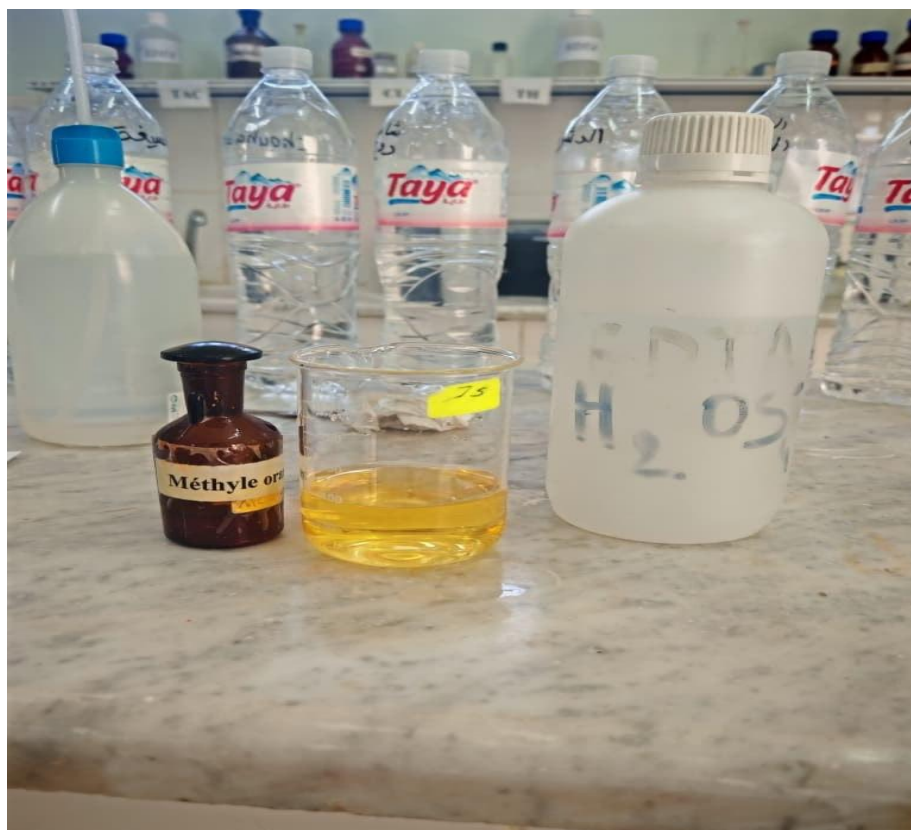


Figure II.6. Matériel et réactifs utilisés pour la détermination du TAC.



Figure II.7. Préparation de la gamme et des réactifs pour le dosage des nitrates.

Tableau II.7. Récapitulatif des méthodes analytiques appliquées.

Paramètre	Méthode/principe	Matériel principal	Résultat exprimé
pH	Mesure électrométrique après étalonnage	pH-mètre	Unité pH
Conductivité	Mesure électrométrique	Conductimètre/multiparamètre	μS/cm
TDS	Estimation à partir de la conductivité	Calculempirique	mg/L
Ca ²⁺	Titration complexométrique à l'EDTA	Burette, erlenmeyer, indicateur	mg/L
Mg ²⁺	Calcul à partir de TH et Ca ²⁺	Résultats de titrage	mg/L
Cl ⁻	Titration avec AgNO ₃ en présence de K ₂ CrO ₄	Burette et verrerie	mg/L
SO ₄ ²⁻	Spectrophotométrie après précipitation au BaCl ₂	Spectrophotomètre UV/Visible	mg/L
HCO ₃ ⁻	Titration du TAC par H ₂ SO ₄	Burette et indicateur	mg/L

II.7. Contrôle qualité et traitement des données

Afin de garantir la fiabilité des résultats, les analyses doivent être accompagnées d'un contrôle qualité comprenant l'étalonnage des appareils, l'utilisation de solutions témoins, la vérification de la propreté de la verrerie et la répétition des mesures lorsque cela est nécessaire. Les valeurs obtenues sont ensuite organisées sous forme de tableaux afin de faciliter l'interprétation hydrochimique.

Tableau II.8. Mesures de contrôle qualité recommandées.

Contrôle	Application	Importance scientifique
Étalonnage	pH-mètre, conductimètre et spectrophotomètre avant analyse	Réduit les erreurs instrumentales
Blanc analytique	Eau distillée soumise aux mêmes étapes que les échantillons	Détecte les contaminations liées aux réactifs
Répétabilité	Réalisation de mesures répétées pour certains échantillons	Évalue la précision des résultats

CHAPITRE II MATÉRIEL ET MÉTHODES

Courbed'étalonnage	Gamme étalon pour les analyses spectrophotométriques	Assure la validité de la quantification
Traçabilité	Codage des échantillons et fiche de terrain	Évite les confusions entre les points de prélèvement

II.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté l'ensemble de la démarche méthodologique adoptée pour l'étude hydrochimique des eaux souterraines de la région d'El Oued. La méthodologie repose sur une sélection spatiale des points de prélèvement, une collecte soignée des échantillons, une conservation à basse température et l'application de méthodes analytiques adaptées à la détermination des paramètres physico-chimiques majeurs.

L'organisation des analyses autour du pH, de la conductivité, des TDS, de la dureté, des ions majeurs et des nitrates permet d'obtenir une base scientifique solide pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Ces paramètres renseignent sur la minéralisation, l'alcalinité, les interactions eau-roche et les éventuels apports d'origine anthropique.

Les résultats issus de cette démarche serviront de support à l'interprétation des processus géochimiques et environnementaux responsables de l'évolution de la qualité des eaux souterraines dans la zone étudiée.

CHAPITRE III : Résultats et discussion

III.1. Introduction

Ce chapitre propose une lecture hydrochimique des eaux souterraines du Continental Intercalaire à partir des paramètres physico-chimiques et des ions majeurs mesurés en 2019 et en 2026. L'objectif n'est pas seulement de décrire les concentrations, mais d'interpréter leur signification géochimique, environnementale et humaine dans un contexte saharien marqué par l'aridité, la rareté de la recharge et le temps de résidence prolongé des eaux profondes.

L'analyse comparative dans les trois forages étudiés. Elle permet de suivre l'évolution temporelle de la minéralisation, d'identifier les ions qui contrôlent la signature chimique des eaux et d'apprécier les changements susceptibles d'influencer les usages domestiques, agricoles ou écologiques de la ressource.

Compte tenu du nombre limité de forages disponibles dans la zone d'étude, l'évaluation a été réalisée à partir de trois points d'eau représentatifs du Continental Intercalaire : le forage 19 Mars, le forage Route Touggourt et le forage Chouhada. Cette approche permet une comparaison temporelle entre 2019 et 2026, tout en tenant compte du caractère profond et régional de l'aquifère.

III.2. Caractéristiques statistiques des paramètres physico-chimiques mesurés

III.2.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

En 2026, le pH varie de 7,14 à 7,42, avec une moyenne de 7,24, contre une moyenne de 7,15 en 2019. L'écart moyen n'est que de +0,09 unité pH, ce qui traduit une évolution très limitée de l'équilibre acido-basique. Les eaux demeurent donc neutres à légèrement alcalines, sans variation brutale susceptible d'indiquer une modification chimique rapide du milieu aquifère.

Cette stabilité est cohérente avec le rôle tampon du système carbonate-bicarbonate, généralement actif dans les aquifères carbonatés profonds. Les travaux Les articles scientifiques consacrés aux nappes sahariennes décrivent également des eaux à pH voisin de la neutralité malgré une minéralisation élevée (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz et al., 2003). La thèse de Guendouz (1985) signale la même tendance dans les eaux profondes du Sahara septentrional. Ainsi, le pH reste un paramètre de stabilité chimique, mais il ne constitue pas l'indicateur principal de la salinité observée.

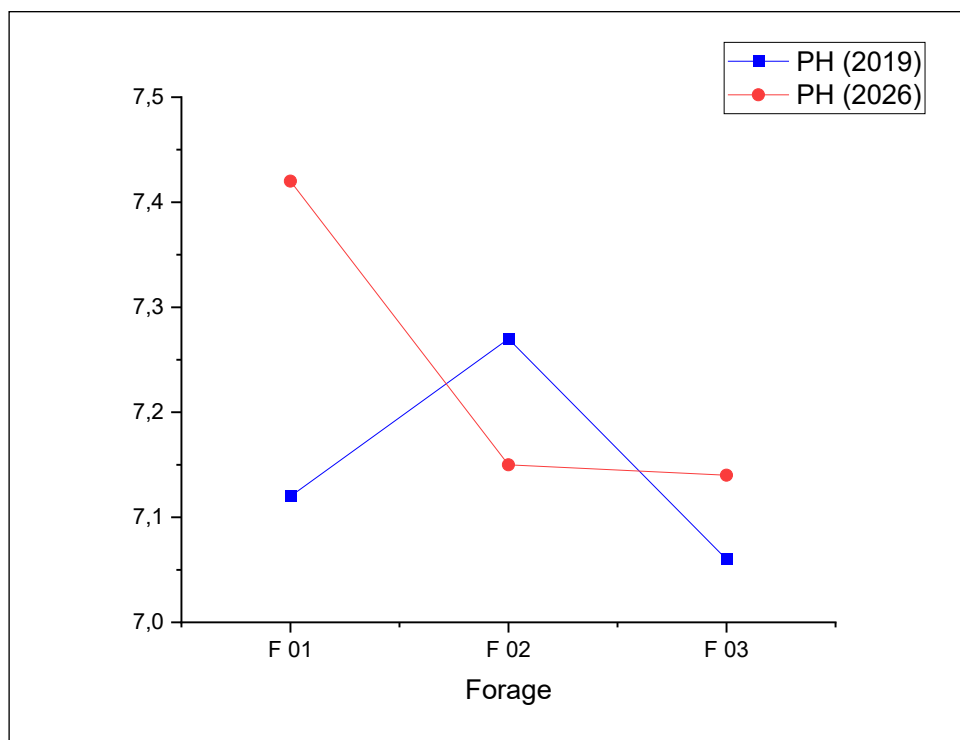


Figure III.01 : Évolution du pH dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.2. Conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique enregistrée en 2026 est comprise entre 2800 et 3980 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une moyenne de 3203,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En 2019, la moyenne était de 2763,30 $\mu\text{S}/\text{cm}$; l'augmentation moyenne atteint donc +440,03 $\mu\text{S}/\text{cm}$, soit environ +15,92 %. Ce changement indique un renforcement de la charge ionique dissoute entre les deux années, même si toutes les valeurs de 2019 étaient déjà caractéristiques d'eaux fortement minéralisées.

Les valeurs dépassent largement la valeur indicative de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ retenue dans ce travail d'après les recommandations de l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017) pour apprécier la qualité des eaux destinées à la consommation. Cette minéralisation élevée rejoint les résultats rapportés dans Les travaux les articles d'Edmunds et al. (2003) et de Guendouz et al. (2003), où la conductivité des eaux sahariennes est généralement contrôlée par le long temps de résidence et par la dissolution de niveaux évaporitiques et carbonatés. D'un point de vue écologique et humain, cette tendance justifie un suivi régulier de la salinité, notamment pour les usages agricoles sensibles à l'accumulation des sels.

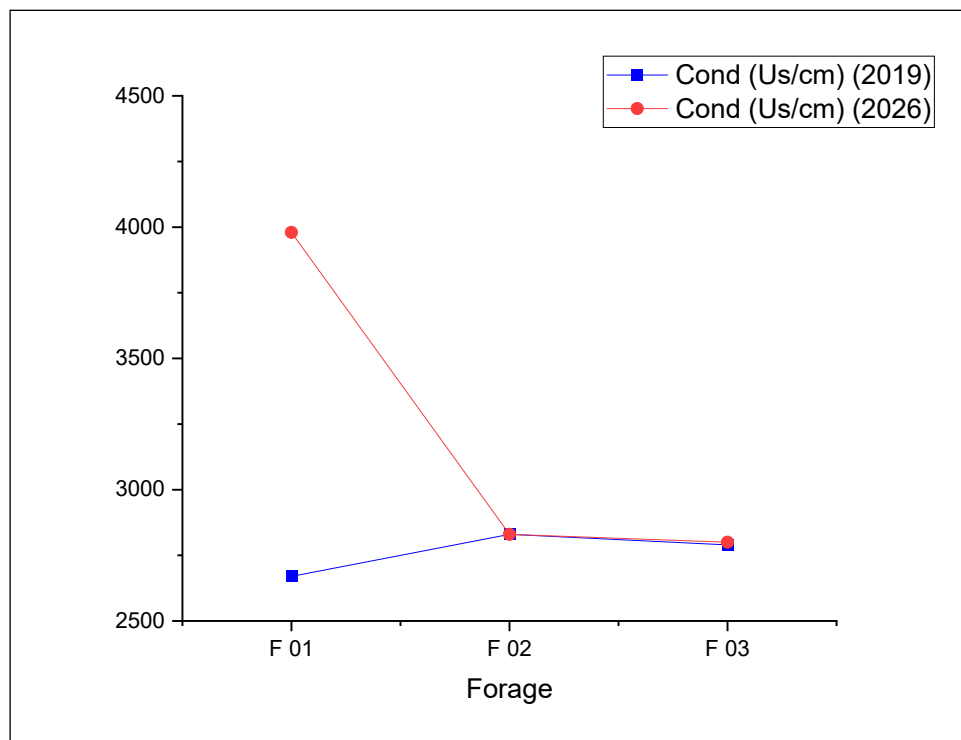


Figure III.02 : Évolution de la conductivité électrique CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.3. Total des solides dissous (TDS)

Les solides dissous totaux montrent en 2026 des valeurs comprises entre 1792 et 2547 mg/L, avec une moyenne de 2050,00 mg/L. La moyenne de 2019 était de 1768,70 mg/L ; l'augmentation est donc de +281,30 mg/L, correspondant à environ +15,90 %. Cette progression est presque parallèle à celle de la conductivité électrique, ce qui confirme que les deux paramètres expriment la même dynamique de concentration en sels dissous.

Le dépassement du seuil indicatif de 1000 mg/L retenu d'après l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017) confirme le caractère fortement minéralisé des eaux étudiées. Les TDS élevés s'expliquent par la mise en solution progressive de minéraux évaporitiques, tels que la halite, le gypse et l'anhydrite, ainsi que par la contribution des formations carbonatées. Cette interprétation concorde avec Les travaux les articles hydrogéochimiques sur les eaux profondes sahariennes et avec les observations de thèse relatives aux nappes du Sahara septentrional, où l'ancienneté de l'eau et la faible recharge favorisent l'accumulation des ions majeurs (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz, 1985).

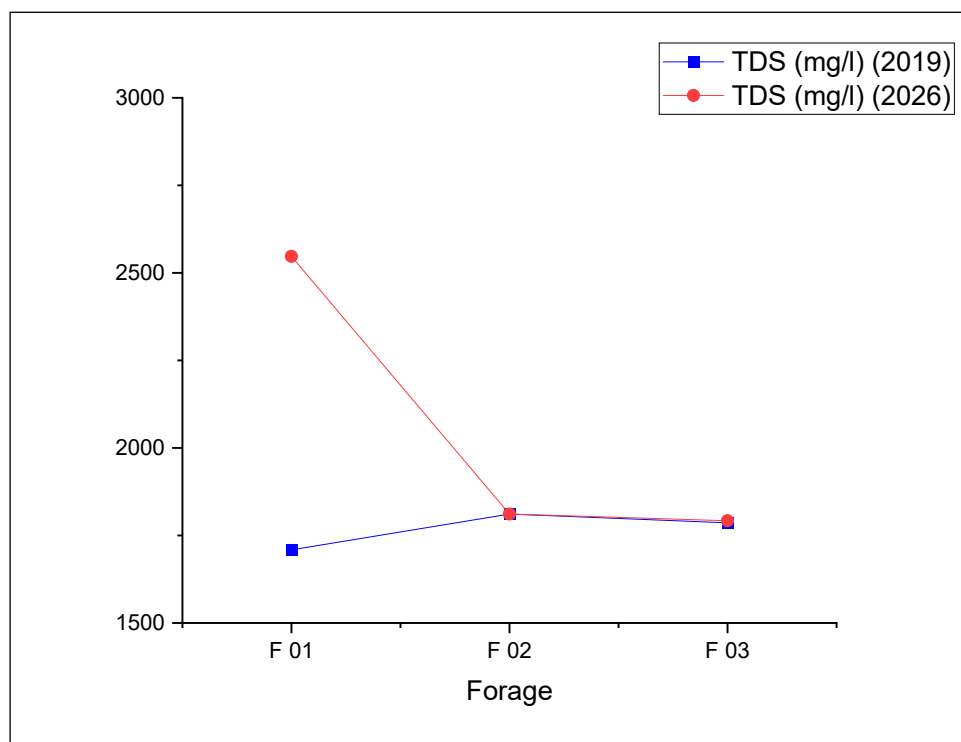


Figure III.03 : Évolution des solides dissous totaux TDS (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.4. Calcium (Ca^{2+})

Les teneurs en calcium mesurées en 2026 varient entre 204,41 et 280,56 mg/L, avec une moyenne de 240,48 mg/L. Par rapport à 2019, où la moyenne était de 224,40 mg/L, l'augmentation est modérée, soit +16,08 mg/L et environ +7,17 %. Les valeurs restent néanmoins supérieures à la valeur indicative de 200 mg/L indiquée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017), ce qui confirme la dureté marquée des eaux du Continental Intercalaire dans la zone étudiée.

Le calcium peut provenir à la fois de la dissolution des calcaires et des dolomies, mais aussi de la dissolution du gypse ou de l'anhydrite, en association avec les sulfates. Cette double origine est signalée dans Les travaux les articles d'Edmunds et al. (2003) et de Guendouz et al. (2003), qui relient les faciès calciques des eaux sahariennes aux formations carbonatées et évaporitiques traversées par les eaux profondes. L'évolution entre 2019 et 2026 suggère donc un enrichissement progressif plutôt qu'une rupture chimique brutale.

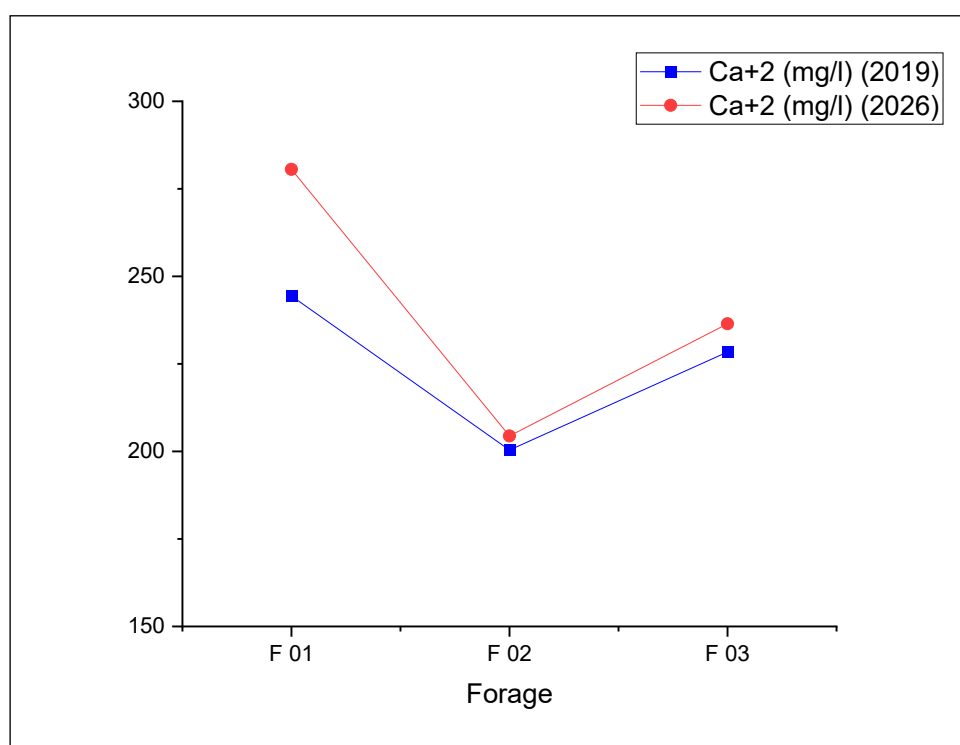


Figure III.04 : Évolution des teneurs en calcium Ca^{2+} (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.6. Sodium (Na^+)

Les concentrations en sodium en 2026 s'étendent de 220 à 381 mg/L, avec une moyenne de 274,33 mg/L. La moyenne de 2019 était de 163,30 mg/L ; l'augmentation moyenne est donc de +111,03 mg/L, soit environ +68,00 %. Contrairement à 2019, toutes les valeurs de 2026 dépassent le seuil indicatif de 200 mg/L mentionné par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017), ce qui met en évidence un enrichissement sodique net.

Le sodium est classiquement lié à la dissolution de la halite et aux échanges cationiques entre l'eau et les matrices argileuses, où Ca^{2+} et Mg^{2+} peuvent être retenus au profit de la libération de Na^+ . Cette interprétation rejoint Les travaux les articles consacrés aux nappes profondes sahariennes, qui associent souvent les faciès sodiques à l'évolution prolongée des eaux dans des formations évaporitiques (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz et al., 2003). Du point de vue des usages, cette augmentation peut devenir importante pour l'irrigation, car l'excès de sodium favorise la sodisation des sols.

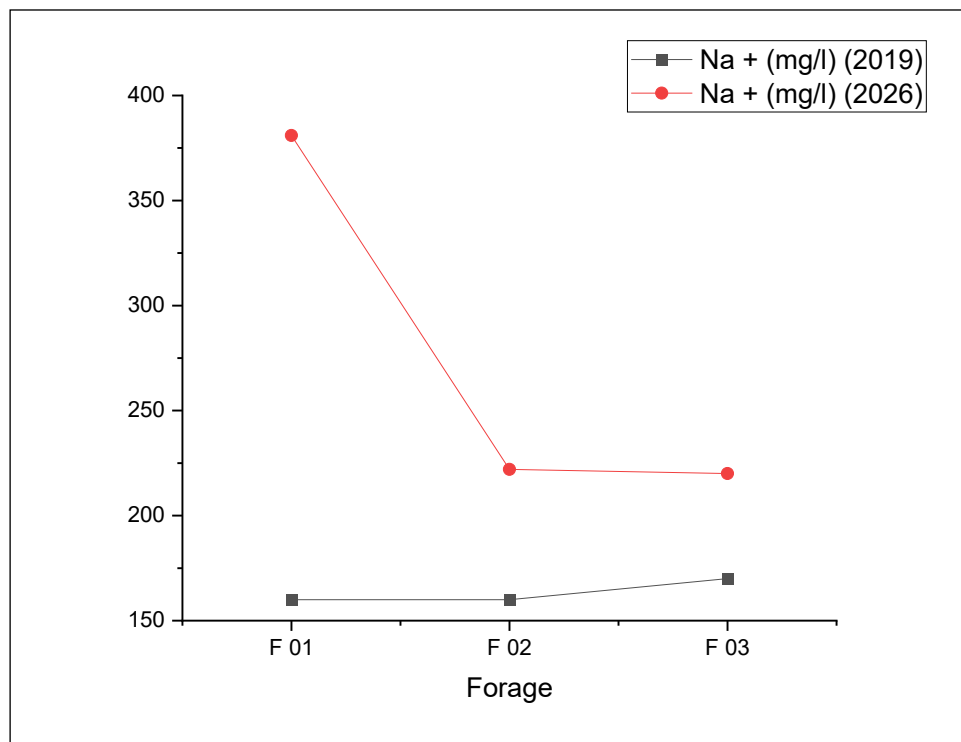


Figure III.06 : Évolution des teneurs en sodium Na^+ (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.5. Magnésium (Mg^{2+})

Le magnésium présente en 2026 des concentrations comprises entre 106,94 et 162,84 mg/L, avec une moyenne de 133,68 mg/L. En 2019, la moyenne était de 68,00 mg/L ; l'augmentation atteint ainsi +65,68 mg/L, soit environ +96,59 %. Il s'agit de l'une des évolutions les plus marquées parmi les cations étudiés, avec une valeur maximale dépassant la limite supérieure de 150 mg/L retenue dans ce travail d'après l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017).

CHAPITRE III : Résultats et discussion

Cette hausse peut traduire une interaction plus importante avec des formations dolomitiques ou carbonatées magnésiennes, ainsi qu'une contribution possible des échanges ioniques au contact des niveaux argileux. Dans les aquifères profonds, la présence simultanée de Ca^{2+} et de Mg^{2+} est généralement associée à une dureté totale élevée et à une évolution hydrochimique contrôlée par la lithologie. Les travaux Les articles scientifiques et les travaux de thèse sur le Sahara septentrional décrivent cette association comme un marqueur de l'interaction eau-roche prolongée (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz, 1985).

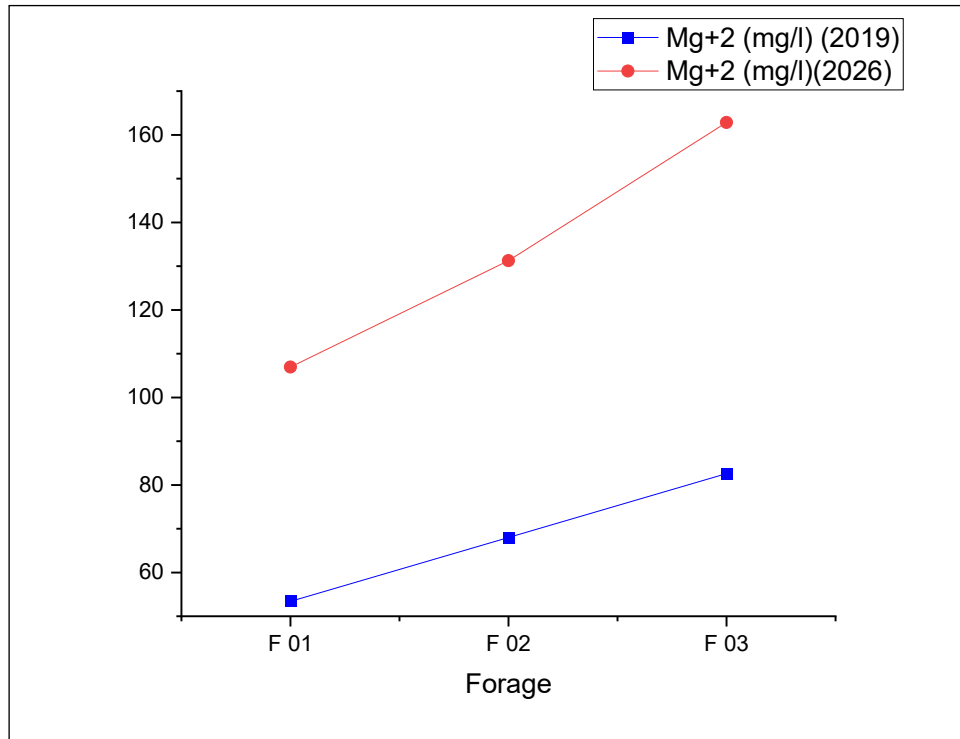


Figure III.05 : Évolution des teneurs en magnésium Mg^{2+} (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.7. Potassium (K^+)

En 2026, le potassium varie entre 25 et 42 mg/L, avec une moyenne de 34,67 mg/L. En 2019, la moyenne était de 21,30 mg/L ; l'augmentation est donc de +13,37 mg/L, soit environ +62,77 %. Même si le potassium reste moins abondant que le sodium, ses concentrations dépassent la référence indicative de 12 mg/L retenue dans ce travail selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017) dans l'ensemble des forages.

Dans les eaux souterraines, le potassium est généralement moins mobile que le sodium, car il peut être adsorbé ou fixé par les minéraux argileux. Les teneurs observées peuvent donc indiquer une libération progressive à partir des feldspaths potassiques, des micas ou de certains niveaux argileux, en relation avec l'altération des silicates. Cette lecture reste cohérente avec les mécanismes d'interaction eau-roche discutés dans les travaux universitaires sur les nappes sahariennes, tout en montrant que les éléments minoritaires participent à l'évolution globale de la minéralisation (Guendouz, 1985 ; Guendouz et al., 2003).

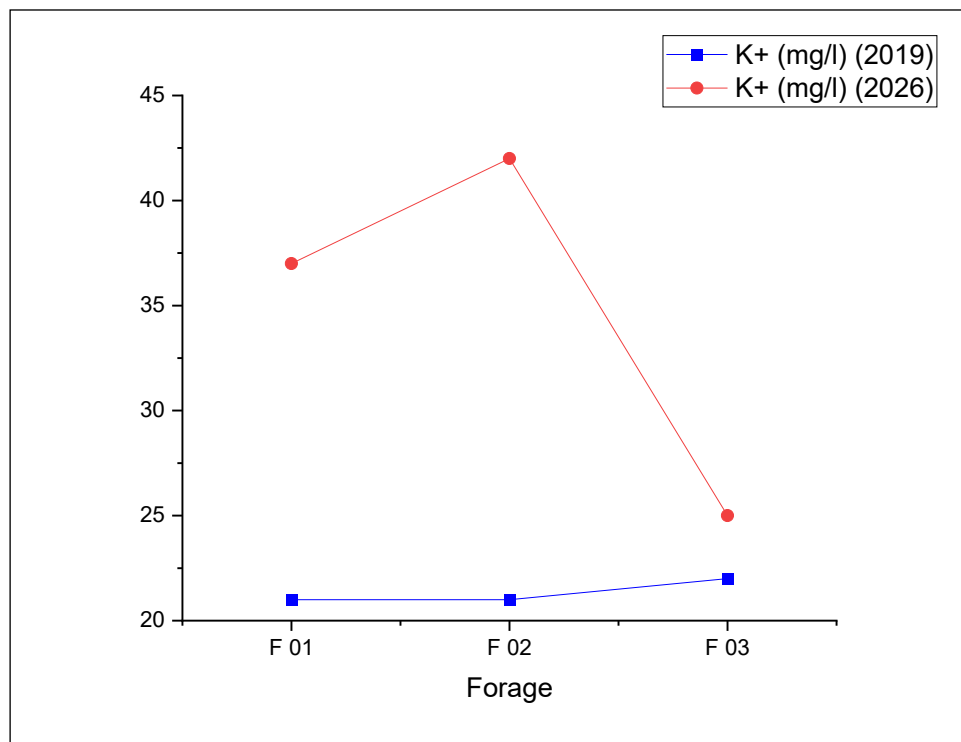


Figure III.07 : Évolution des teneurs en potassium K^+ (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.8. Chlorures (Cl⁻)

Les chlorures enregistrent en 2026 des teneurs très élevées, comprises entre 701,97 et 843,78 mg/L, avec une moyenne de 763,42 mg/L. En 2019, la moyenne était de 462,70 mg/L ; l'augmentation est donc de +300,72 mg/L, soit environ +64,99 %. Les valeurs de 2026 dépassent toutes la limite supérieure de 500 mg/L retenue selon l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017), ce qui confirme le rôle majeur des chlorures dans la salinité des eaux étudiées.

Les chlorures sont des ions conservatifs : ils réagissent peu avec les minéraux et constituent donc de bons traceurs de l'évolution saline. Leur enrichissement est généralement attribué à la dissolution de la halite, à la concentration progressive des eaux anciennes et, dans certains contextes, à des mélanges avec des eaux plus minéralisées. Les travaux Les articles d'Edmunds et al. (2003) et de Guendouz et al. (2003) signalent fréquemment cette dominance chlorurée dans les eaux profondes évoluées du domaine saharien. L'augmentation observée entre 2019 et 2026 représente ainsi un indicateur central du renforcement de la salinité.

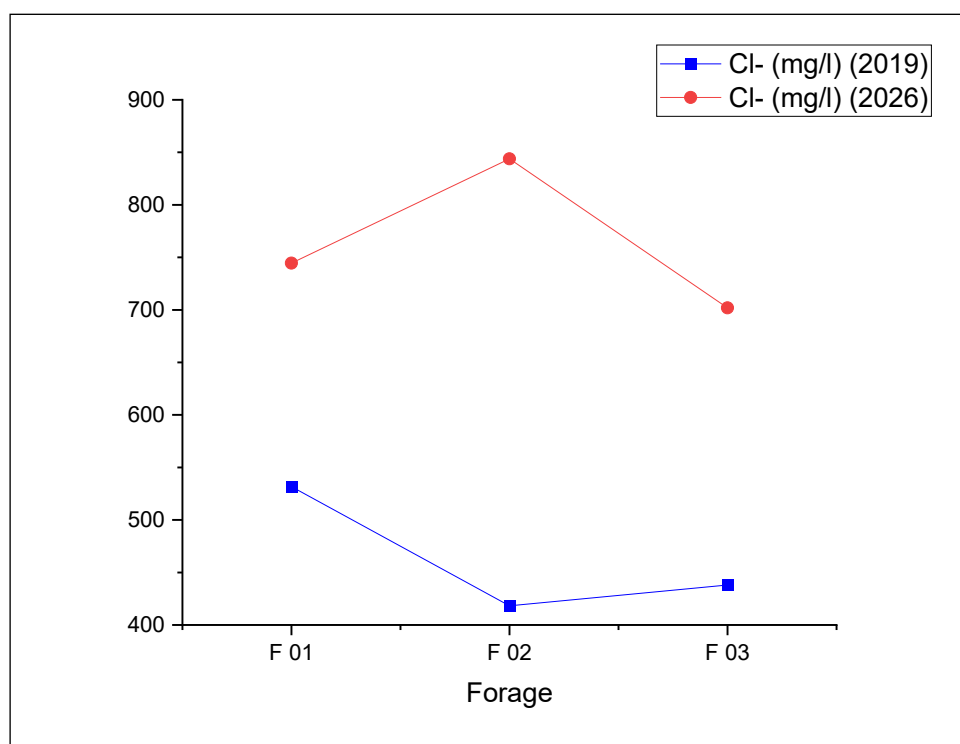


Figure III.08 : Évolution des teneurs en chlorures Cl⁻ (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.9. Sulfates (SO_4^{2-})

Les sulfates varient en 2026 de 541,21 à 730,24 mg/L, avec une moyenne de 604,49 mg/L. En 2019, la moyenne était de 511,70 mg/L ; la hausse moyenne atteint +92,79 mg/L, soit environ +18,13 %. Toutes les valeurs dépassent la référence de 400 mg/L indiquée par l'Organisation mondiale de la Santé (OMS, 2017), ce qui confirme l'importance des ions sulfatés dans la composition chimique des eaux du Continental Intercalaire.

La présence de fortes teneurs en SO_4^{2-} est compatible avec la dissolution du gypse et de l'anhydrite, deux minéraux évaporitiques largement impliqués dans la minéralisation des eaux sahariennes. L'association entre sulfates, calcium et magnésium renforce l'hypothèse d'une contribution évaporitique et carbonatée. Les résultats rejoignent les interprétations proposées dans Les travaux les articles scientifiques et les thèses portant sur les eaux profondes du Sahara septentrional, où les sulfates sont considérés comme un marqueur important de l'interaction entre les eaux profondes et les séries géologiques évaporitiques (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz, 1985).

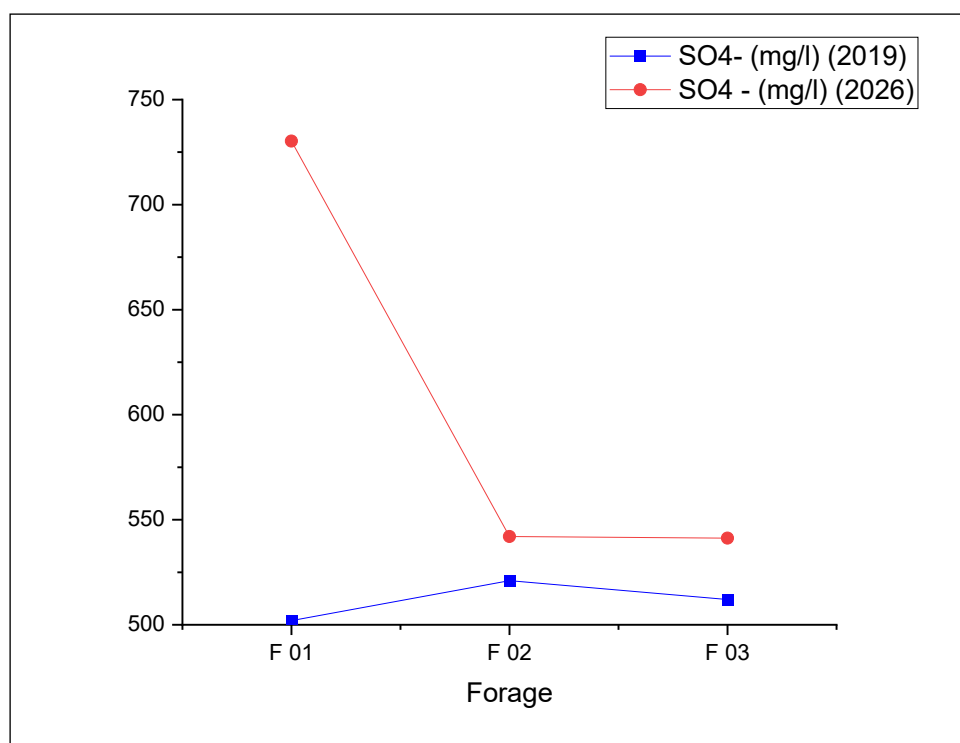


Figure III.09 : Évolution des teneurs en sulfates SO_4^{2-} (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.2.10. Bicarbonates (HCO_3^-)

Les bicarbonates présentent des concentrations comprises entre 126,8 et 195,2 mg/L, avec une moyenne de 153,68 mg/L. Aucune valeur guide OMS directe n'est fixée pour ce paramètre dans le tableau. Ces valeurs indiquent une alcalinité modérée et une capacité tampon suffisante pour maintenir le pH dans un domaine neutre à légèrement alcalin.

Contrairement aux chlorures et aux sulfates, les bicarbonates ne dominent pas la composition anionique. Leur présence est principalement liée à la dissolution des carbonates et aux équilibres $\text{CO}_2\text{-HCO}_3^-$ dans l'aquifère. Ainsi, ils participent à la stabilité du pH, mais ne contrôlent pas la signature saline principale des eaux étudiées.

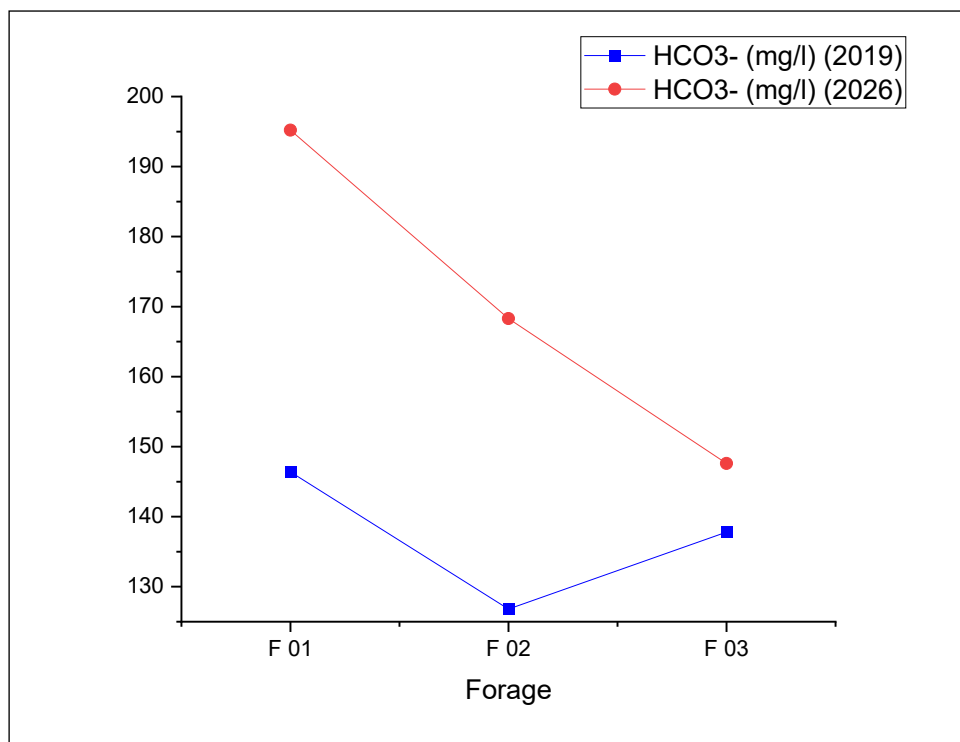


Figure III.10 : Évolution des teneurs en bicarbonates HCO_3^- (mg/L) dans les forages du Continental Intercalaire en 2019 et 2026.

III.3. Classification des faciès chimiques

L'analyse des ions majeurs met en évidence une signature hydrochimique dominée par les chlorures et les sulfates du côté anionique, ainsi que par le calcium, le magnésium et le sodium du côté cationique. La comparaison entre 2019 et 2026 montre que cette signature ne change pas fondamentalement de nature, mais qu'elle devient plus minéralisée, en particulier sous l'effet de l'augmentation des Cl^- , Na^+ , Mg^{2+} et SO_4^{2-} .

La représentation par le diagramme de Stabler permet de comparer les proportions relatives des cations et des anions indépendamment des concentrations absolues. Elle confirme un faciès principalement chloruré-sulfaté, à tendance calcique, sodique et magnésienne. Ce faciès correspond à des eaux évoluées, longuement en contact avec les formations profondes du bassin saharien.

Cette classification est cohérente avec Les travaux les articles scientifiques et les thèses consacrés au Système aquifère du Sahara septentrional, qui décrivent une minéralisation dominée par la dissolution des évaporites, l'interaction avec les formations carbonatées et les échanges cationiques (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz et al., 2003 ; Guendouz, 1985). L'absence d'un faciès bicarbonaté dominant confirme que les eaux étudiées ne correspondent pas à des eaux jeunes faiblement minéralisées, mais plutôt à des eaux profondes anciennes et chimiquement évoluées.

Ainsi, la comparaison temporelle 2019-2026 indique une intensification de la salinité sans modification majeure du mécanisme géochimique dominant : la minéralisation reste principalement gouvernée par les interactions eau-roche et par la faible dynamique de renouvellement de l'aquifère profond.

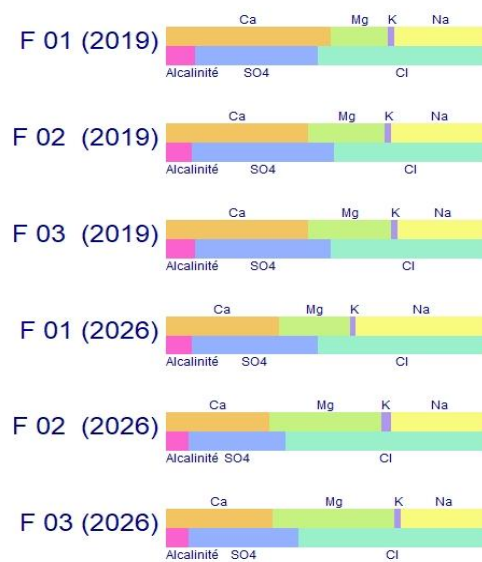


Figure III.11 : Représentation graphique de la classification des faciès chimiques par le diagramme de Stabler.

III.4. Conclusion

L'étude physico-chimique des eaux du Continental Intercalaire montre que le pH reste stable et légèrement alcalin, avec une moyenne qui passe de 7,15 en 2019 à 7,24 en 2026. Cette stabilité acido-basique contraste avec une augmentation nette de la minéralisation globale : la conductivité électrique moyenne passe de 2763,30 à 3203,33 $\mu\text{S/cm}$, tandis que les TDS moyens évoluent de 1768,70 à 2050,00 mg/L.

Les ions responsables de cette évolution sont principalement les chlorures, le sodium, le magnésium et les sulfates. Les chlorures augmentent de 462,70 à 763,42 mg/L, le sodium de 163,30 à 274,33 mg/L, le magnésium de 68,00 à 133,68 mg/L et les sulfates de 511,70 à 604,49 mg/L. Ces changements indiquent une progression de la salinité et de la dureté, avec des implications possibles pour les usages humains et agricoles de la ressource.

La comparaison avec Les travaux les articles scientifiques publiés et les travaux universitaires de type thèse sur le Sahara septentrional confirme que cette composition est compatible avec des eaux profondes, anciennes et fortement minéralisées, influencées par la dissolution des évaporites et des carbonates, l'altération de certains silicates et les échanges cationiques (Edmunds et al., 2003 ; Guendouz et al., 2003 ; Guendouz, 1985). Le faciès dominant peut être décrit comme chloruré-sulfaté, à tendance calcique, magnésienne et sodique.

En définitive, les résultats de 2026 ne traduisent pas une rupture géochimique, mais une intensification des concentrations ioniques déjà observées en 2019. Cette évolution nécessite la poursuite du suivi hydrochimique, l'intégration d'indicateurs complémentaires tels que les rapports ioniques, et une évaluation régulière de l'aptitude de ces eaux aux différents usages, notamment l'irrigation et l'alimentation domestique après traitement adapté.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail a porté sur l'étude physico-chimique et hydrochimique des eaux souterraines du Continental Intercalaire dans la région d'El Oued. L'objectif principal était de caractériser la qualité des eaux étudiées, d'identifier les paramètres responsables de leur minéralisation et de préciser les processus géochimiques qui contrôlent leur composition chimique.

L'analyse du contexte physique, géologique et hydrogéologique a montré que la région d'El Oued appartient à un environnement saharien aride, marqué par la rareté des précipitations, l'intensité de l'évaporation, la prédominance des formations dunaires et la présence de formations sédimentaires profondes. Cette configuration favorise une dépendance importante aux eaux souterraines, notamment celles du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire, qui constituent des ressources essentielles pour les besoins domestiques et agricoles.

Les résultats analytiques obtenus indiquent que les eaux du Continental Intercalaire présentent un pH relativement stable, compris entre 7,06 et 7,42, traduisant un caractère neutre à légèrement alcalin. Cette stabilité acido-basique est liée à la présence des bicarbonates et aux équilibres carbonate-bicarbonate dans l'aquifère. Toutefois, cette stabilité contraste avec une minéralisation élevée, mise en évidence par les valeurs importantes de la conductivité électrique et des solides dissous totaux.

La conductivité électrique moyenne, estimée à 2983,33 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ainsi que les TDS moyens, estimés à 1909,33 mg/L, montrent que les eaux étudiées sont fortement chargées en sels dissous. Ces valeurs traduisent une forte charge ionique globale et confirment l'influence du long temps de résidence des eaux dans l'aquifère profond. Elles indiquent également une interaction importante entre l'eau et les formations géologiques traversées.

Conclusion générale

L'étude des ions majeurs a montré une dominance des chlorures, des sulfates, du calcium et du sodium. Les chlorures présentent une moyenne de 613,04 mg/L, tandis que les sulfates atteignent une moyenne de 558,08 mg/L. Ces teneurs élevées traduisent principalement la dissolution des formations évaporitiques, notamment la halite, le gypse et l'anhydrite. Les concentrations élevées en calcium et en magnésium sont, quant à elles, liées à la dissolution des formations carbonatées et dolomitiques.

La classification hydrochimique a mis en évidence un faciès chloruré-sulfaté, à dominance calcique et sodique. Ce faciès reflète une eau évoluée, fortement minéralisée, ayant subi un contact prolongé avec les formations profondes du bassin saharien. Les eaux étudiées ne correspondent donc pas à un faciès bicarbonaté d'eaux faiblement minéralisées, mais plutôt à des eaux anciennes, dont la composition est principalement contrôlée par les processus naturels de dissolution minérale, d'altération lithologique et d'échanges cationiques.

La comparaison entre les résultats de 2019 et ceux de 2026 suggère une tendance à l'augmentation de plusieurs paramètres minéraux, notamment la conductivité électrique, les TDS, le magnésium, le sodium, les chlorures et les sulfates. Cette évolution indique la nécessité d'un suivi régulier de la qualité des eaux afin d'évaluer la progression de la salinité et de mieux comprendre les mécanismes responsables de l'évolution hydrochimique du Continental Intercalaire.

En conclusion, les eaux du Continental Intercalaire dans la région d'El Oued présentent une minéralisation naturelle importante, principalement contrôlée par la lithologie de l'aquifère et par le temps de résidence prolongé des eaux. Cette ressource demeure stratégique pour la région, mais sa qualité nécessite une surveillance continue et une gestion rationnelle, notamment dans un contexte marqué par l'aridité, l'augmentation des besoins en eau et la pression croissante sur les ressources souterraines.

Recommandations

À partir des résultats obtenus, il est recommandé de mettre en place un suivi périodique de la qualité physico-chimique des eaux du Continental Intercalaire. Ce suivi devrait porter sur les paramètres majeurs tels que le pH, la conductivité électrique, les TDS, les chlorures, les sulfates, le calcium, le magnésium, le sodium et les bicarbonates, afin de détecter toute évolution significative de la minéralisation.

Il est également recommandé d'élargir le réseau d'échantillonnage à un nombre plus important de forages, afin d'obtenir une représentation spatiale plus précise de la qualité des eaux. Cette extension permettrait de mieux comparer les secteurs les plus minéralisés avec ceux qui présentent des teneurs relativement faibles, et d'identifier les zones les plus sensibles à l'évolution hydrochimique.

Il serait utile d'intégrer des analyses complémentaires, notamment les nitrates, les éléments traces métalliques, les isotopes stables et les paramètres microbiologiques. Ces analyses permettraient de distinguer plus clairement les influences naturelles liées à la géologie de l'aquifère et les éventuelles influences anthropiques liées aux activités humaines.

Il est nécessaire de réaliser des cartes hydrochimiques et piézométriques actualisées afin de suivre la répartition spatiale de la minéralisation et le sens d'écoulement des eaux souterraines. Ces cartes constitueraient un outil important pour la gestion locale des forages et pour la planification des prélèvements.

Il est recommandé de comparer régulièrement les résultats obtenus avec les normes nationales et internationales relatives à la qualité des eaux, notamment celles de l'OMS. Cette comparaison permettrait d'évaluer l'aptitude des eaux aux usages domestiques, agricoles et environnementaux, tout en tenant compte du contexte saharien particulier.

Conclusion générale

Il convient aussi de rationaliser l'exploitation des eaux profondes, car le Continental Intercalaire constitue une ressource faiblement renouvelable. Une gestion excessive ou non contrôlée pourrait entraîner une baisse piézométrique progressive et modifier les équilibres hydrogéochimiques de l'aquifère.

Enfin, il est recommandé de poursuivre les recherches sur les interactions eau-roche dans le Continental Intercalaire, en intégrant des approches géochimiques plus avancées telles que les diagrammes de Piper, Schoeller-Berkaloff, Gibbs et les indices de saturation minérale. Ces outils permettraient d'approfondir l'interprétation des faciès chimiques et de mieux comprendre l'origine de la salinité dans les eaux étudiées.

Références

Références

1. Articles scientifiques

Bagnouls, F. et Gaussen, H. (1953). Saison sèche et indice xérothermique.

Bouselsal, B. et al. (2015). Étude de la remontée de la nappe phréatique dans la région d'El Oued.

Bouselsal, B. et al. (2022). Evaluation of groundwater quality in El-Oued region. *Groundwater for Sustainable Development*.

Bouselsal, B. et al. (2024). Evaluating water quality, mineralization mechanisms, and potential health risks of nitrate contamination in the Continental Intercalaire aquifer of Algeria. *Environmental Earth Sciences*.

De Martonne, E. (1926). Indice d'aridité et classification climatique.

Edmunds, W. M. et Wright, E. P. (1979). Groundwater recharge and palaeohydrology in the Sahara. *Geological Society of London*.

Edmunds, W. M., Guendouz, A. H., Mamou, A., Moulla, A., Shand, P. et Zouari, K. (2003). Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Applied Geochemistry*, 18(6), 805-822.

Emberger, L. (1955). Une classification biogéographique des climats.

Guendouz, A., Moulla, A. S., Edmunds, W. M., Zouari, K., Shand, P. et Mamou, A. (2003). Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal*, 11, 483-495.

Guiraud, R. et Bosworth, W. (1997). Phanerozoic geodynamic evolution of North Africa. *Journal of African Earth Sciences*.

Khelfaoui et al. (2021). Surveillance hydrogéologique de l'aquifère superficiel d'El Oued.

Kilian, C. (1931). Définition des formations terminales continentales.

Lakhdari, S. A. et al. (2025). Assessment of groundwater quality and hydrogeochemical properties in the Adrar Continental Intercalaire aquifer. *Applied Water Science*.

Ouarekh, M. et al. (2021). Données piézométriques et évolution du complexe terminal dans la région du Sud.

Références

Stewart, P. (1969). Adaptation du quotient pluviométrique d'Emberger pour l'Algérie.

Thornthwaite, C. W. (1948). Une approche vers une classification rationnelle du climat.

2. Ouvrages et études scientifiques

Bel, F. et Demargne, F. (1966). *Étude hydrogéologique du terminal continental saharien*.

Cornet, A. (1964). *Introduction à l'hydrogéologie saharienne*. Service Géologique de l'Algérie.

Cote, M. (1998). *Paysages et systèmes agricoles traditionnels du Sud*.

Dubief, J. (1963). *Le climat du Sahara*.

Fabre, J. (1976). *Introduction à la géologie du Sahara algérien*.

Hamdi Aissa, B. (2001). *Géomorphologie et environnements sahariens de la région du Sud*.

Mebarki, A. (2005). *Hydrogéologie du Sahara septentrional : fonctionnement et ressources*. Université d'Alger.

Savornin, J. (1945). *Le grand système hydraulique saharien*.

3. Thèses et mémoires universitaires

Bouselsal, B. (2016). *Investigations hydrogéologiques de l'aquifère superficiel de Souf*.

Bouselsal, B. (2021). *Qualité des eaux de l'aquifère du Continental Intercalaire CI d'Oued Righ*. Université de Ouargla, mémoire.

Guendouz, A. H. (1985). *Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara septentrional*. Thèse de doctorat.

Ouarekh, M. (2022). *Caractérisation hydrogéologique et géochimique et gestion de l'aquifère mio-pliocène de la vallée du Souf, sud-est de l'Algérie*.

4. Cartes, données géologiques et hydrogéologiques

Baba Sy, M. (2005). *Carte géologique et données hydrogéologiques du Grand Erg Oriental*.

Baba Sy, M. et al. (2006). *Limites et piézométrie de l'Intercalaire Continental*.

HPO et BG. (2004). *Données de forage profond dans la région d'El Oued*.

5. Rapports institutionnels et données administratives

Références

DPSB El Oued. (2019). *Données administratives, démographiques et de densité pour la wilaya d'El Oued*.

DSA El Oued. (2019 ; 2020). *Statistiques agricoles de la wilaya d'El Oued*.

Groupe SASS, OSS, UNESCO et FAO. (2008). *Gestion des ressources en eau du Système Aquifère du Sahara Septentrional*.

Observatoire du Sahara et du Sahel OSS. (2003). *Système aquifère du Sahara septentrional SASS : gestion commune d'un bassin transfrontière*. Rapport régional de contexte hydrogéologique.

Observatoire du Sahara et du Sahel OSS. (2015). *Système aquifère du Sahara septentrional : données hydrogéologiques et zones de recharge*.

Office National de la Météorologie ONM. (2018). *Données climatiques de la station météorologique d'El Oued-Guemar*.

Organisation mondiale de la Santé OMS. (2017). *Directives de qualité pour l'eau de boisson*, 4e édition intégrant le premier additif. Genève : Organisation mondiale de la Santé.

UNESCO. (1972). *Étude des ressources en eau du Sahara septentrional*.

UNESCO, Programme Hydrologique International. (2004). *North-Western Sahara Aquifer System NWSAS: Hydrogeological synthesis*. Paris : UNESCO.