

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVEALABLES ET
DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Département des Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master en Géologie

Option :
Hydrogéologie

THEME

***CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA QUALITE DES
NAPPES DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA
SEPTENTRIONAL (SASS) A OUARGLA***

Soutenu publiquement par :

MESSELEM Aya

Le 28/05/2025

Devant le jury :

Président : BOUSSAADA Nawel	MCA	Univ. Ouargla
Encadrant : HADJ-SAID Samia	Pr	Univ. Ouargla
Examineur : REMITA Abderraouf	MAA	Univ. Ouargla

Année Universitaire : 2024/2025



Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire, avec une profonde reconnaissance, à tous ceux qui me sont chers et qui ont accompagné mon parcours de près ou de loin.

À mon père, véritable pilier de ma vie. Les mots ne sauraient exprimer toute ma gratitude pour tes innombrables sacrifices et ton engagement sans faille envers mon éducation. Tu as toujours été mon repère, mon guide, et bien plus encore.

À ma mère, source infinie d'amour et de tendresse. Ton affection inconditionnelle m'a toujours porté et donné la force d'avancer. Tu es, et resteras, le cœur de notre foyer.

À ma sœur et à mes frères, mes soutiens constants et mes confidents. Votre présence a été un véritable réconfort dans chaque étape de ce chemin.

À mon amie Regagda Khadra, compagne fidèle du chemin et de l'adversité. Merci pour ton soutien, ta patience et ta présence précieuse tout au long de ce parcours.





REMERCIEMENTS

Un très grand merci à Allah, toujours présent à mes côtés, pour avoir éclairé mon chemin, m'avoir soutenu dans les moments de doute, et m'avoir accordé la force, le courage et la patience nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

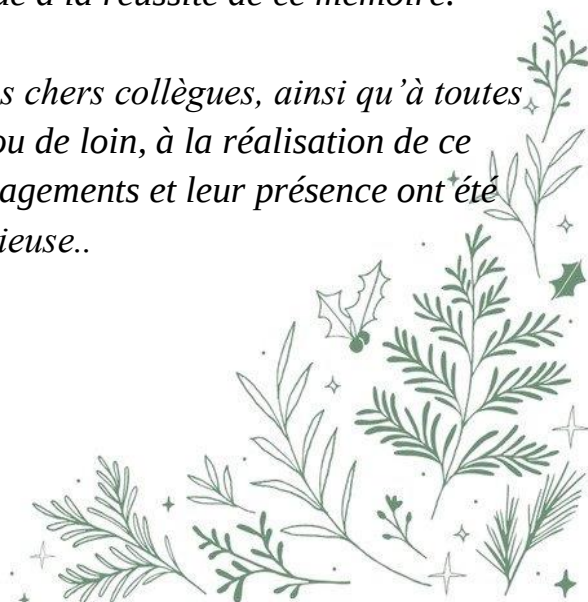
*Je tiens à adresser mes remerciements les plus sincères à Madame le Professeur **HADJ-SAID Samia**, mon encadrante, pour son accompagnement précieux, sa disponibilité, ses conseils avisés et sa bienveillance tout au long de ce mémoire.*

*Un merci spécial à **Ben Hamida Seliman** pour son soutien constant, ses conseils éclairés et le dévouement de son temps précieux pour nous superviser avec sérieux et générosité.*

*Mes remerciements particuliers vont également au Professeur **Bousalsal** et à Monsieur **Menad Houari** pour leurs avis pertinents, leur accompagnement et l'aide qu'ils m'ont apportée tout au long de ce travail.*

Je remercie chaleureusement toute l'équipe de l'ADE d'Ouargla ainsi que celle de l'ABHS, pour leur accueil, leur collaboration et les données mises à disposition, qui ont grandement contribué à la réussite de ce mémoire.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude à mes chers collègues, ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire. Leur soutien moral, leurs encouragements et leur présence ont été d'une aide précieuse..



Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude de la qualité des eaux souterraines du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) dans la région de Ouargla, au sud-est de l'Algérie. Ce vaste aquifère fossile, partagé entre plusieurs pays sahariens, constitue une ressource vitale mais fragile, soumise à une forte pression due à la croissance démographique, l'agriculture intensive et le changement climatique.

L'analyse repose sur des données physico-chimiques collectées entre 2015 et 2024, concernant les nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT). Grâce à des outils de modélisation géologique et d'analyse hydrochimique, cette étude met en lumière une forte minéralisation des eaux du CI, souvent non conformes aux normes, tandis que les eaux du CT présentent une qualité plus variable, affectée par la salinisation et la pollution ponctuelle.

Ces résultats soulignent l'urgence d'une gestion durable et intégrée des ressources en eau, afin de préserver cette richesse essentielle dans un environnement saharien particulièrement vulnérable.

Mots clés : SASS, Ouargla, qualité des nappes, , Hydrochimie, Zone aride

Abstract:

This thesis focuses on the study of groundwater quality in the Northern Sahara Aquifer System (NWSAS) in the Ouargla region, located in southeastern Algeria. This vast fossil aquifer, shared by several countries, represents a vital but fragile resource, subject to increasing pressure due to population growth, intensive agriculture, and climate change.

The analysis is based on physicochemical data collected between 2015 and 2024, covering the Continental Intercalaire (CI) and the Terminal Complex (TC) aquifers. Using geological modeling tools and hydrochemical analysis, this study highlights a high level of mineralization in the waters of the CI, often non-compliant with standards, while the show more variable quality, affected by salinization and localized pollution.

These results underscore the urgency of sustainable and integrated water resource management to preserve this essential wealth in a particularly vulnerable Saharan environment.

Keywords: NWSAS, Ouargla, quality, groundwater, hydrochemistry, Arid Zone

الملخص:

يتناول هذا البحث دراسة جودة المياه الجوفية لنظام المياه الجوفية للصحراء الشمالية في منطقة ورقلة، الواقعة في الجنوب الشرقي للجزائر. يُعد هذا الحوض الجوفي الأحفوري الواسع، المشترك بين عدة دول ، مورداً حيوياً لكنه هش، ويتعرض لضغوط كبيرة بسبب النمو السكاني، والزراعة المكثفة، وتغير المناخ.

تعتمد الدراسة على بيانات فيزيائية وكيميائية تم جمعها بين عامي 2015 و2024، تخص طبقات المياه الجوفية للقاري المتداخل (CI) والمركب النهائي (CT). ومن خلال أدوات النمذجة الجيولوجية والتحليل الهيدروكيميائي، تسلط الدراسة الضوء على معدلات تمعدن مرتفعة في مياه المتداخل (CI) والتي غالباً ما لا تتوافق مع معايير المنظمة العالمية للصحة، بينما تتميز مياه المركب النهائي (CT) بجودة أكثر تبايناً متأثرة بالملوحة والتلوث.

تؤكد هذه النتائج على ضرورة الإدارة المستدامة والمتكاملة للموارد المائية، من أجل الحفاظ على هذا المورد الأساسي في بيئة صحراوية هشة

الكلمات المفتاحية: الحوض الجوفي، ورقلة، جودة المياه الجوفية ، الهيدروكيمياء، منطقة جافة

Sommaire

Introduction générale :	1
Chapitre I : Contexte géographique et climatique de Ouargla	3
1. <i>Situation géographique de la région d'étude :</i>	4
2. <i>Réseau hydrographique :</i>	5
3. <i>Topographie et structure géomorphologique :</i>	6
4. <i>Régime climatique :</i>	8
5. <i>Conclusion :</i>	14
Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique de Ouargla	15
1. <i>Introduction :</i>	16
2. <i>Structure géologique de la cuvette d'Ouargla :</i>	16
3. <i>La litho-stratigraphie de la cuvette d'Ouargla :</i>	17
1. <i>Contexte hydrogéologique régional :</i>	21
2. <i>Conclusion :</i>	25
Chapitre III : Hydrochimie du SASS à Ouargla	27
1. <i>Introduction :</i>	28
2. <i>Matériel et méthodes d'analyse :</i>	28
3. <i>Programmes informatiques :</i>	33
4. <i>Conclusion:</i>	Error! Bookmark not defined.
<i>Etude hydrochimie</i>	Error! Bookmark not defined.
1. <i>Introduction :</i>	Error! Bookmark not defined.
2. <i>Caractéristiques hydrochimies des eaux souterraines :</i>	33
1. Paramètres physiques :	Error! Bookmark not defined.
2. <i>Paramètres chimiques de CT :</i>	Error! Bookmark not defined.
3. <i>Paramètres chimiques de CI :</i>	42
3. <i>Faciès chimiques des eaux du SASS :</i>	47
4. <i>Conclusion :</i>	54
Conclusion et recommandations	55
Références bibliographiques	57

Liste des Figure

Chapitre I : Contexte géographique et climatique de Ouargla

Figure I. 2 : situation géographique d'Ouargla(Carte géographique d'Ouargla – d-maps.com).....	4
Figure I. 3: : Les oueds de la dorsale du M'Zab (Ballais, 2010).....	6
Figure I. 4: Coupe géomorphologique schématique de la cuvette de Ouargla (Cornet 1967)	8
Figure I. 5: Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ouargla période (2004-2024) (Terraclimate).....	9
Figure I. 6: : Températures moyennes annuelles dans la région de Ouargla période (2004-2023) (Terraclimate).....	10
Figure I. 7: Températures maximale moyenne annuelles dans la région de Ouargla.....	10
Figure I. 8:Températures minimales moyennes annuelles dans la région de Ouargla période (2004 à 2024) (Terra Climat).	11
Figure I. 9: L'évapotranspiration potentielle selon la méthode de Thornthwaite dans la région de	12
Figure I. 10: Evolution annuelle du rayonnement solaire descendant (Downward Shortwave Radiation)dans la région de Ouargla période (2004 à 2024) (Terra Climat,).....	14

Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique de Ouargla

Figure II. 1 : Carte géologique de Ouargla (Cornet.1964) modifiée par (ZEDDOURI .A 2010 ; SATOUEH.A et al 2021.).....	16
Figure II. 2: Carte de localisation des forages dans la zone études	17
Figure II. 3: Modèle 3D représentant la lithologie	18
Figure II. 4: Coupe géologique suivant le profil AA'	19
Figure II. 5: Coupe géologique suivant le profil BB'	21
Figure II. 6: Récapitulatif des différentes nappes aquifères de la basse Vallée de l'Oued M'ya (ANRH al. 2004).....	22
Figure II. 7: Carte des ressources en eau souterraines (CI et CT),	24
Figure II. 8: Carte piézométrique de la nappe phréatique (Hammad N, Bouselsal B , Boussaada ,Satouh A, Lakhdari A (Article :Application of Water Quality Index to Assess the Potability of the Phreatic Aquifer in Ouargla (Algeria) 2023).....	25

Chapitre III : Hydrochimie du SASS à Ouargla

Figure III. 1 Carte de localisations des forages de prélèvement.....	29
Figure III. 2: Multi paramètres HANNA.....	29
Figure III. 3: Méthode de titrage du magnésium Mg^{2+}	31
Figure III. 4: : Le spectrophotomètre à flamme, de marque JENWAY	32
Figure III. 5: Titrions DMS 716 de marque Metrohm.....	32
Figure III. 6: Variation de la conductivité électrique des eaux du complexe terminale à Ouargla dans les trois années 2015,2017 et 2024.....	34
Figure III. 7: Variation de conductivité électrique des eaux du continentale intercalaire	35

Figure III. 8: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en calcium (Ca^{2+}) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015-2017-2024).....	36
Figure III. 9: Histogramme variation spatio-temporelle des concentrations en magnésium Mg^{2+} dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024).....	37
Figure III. 10: : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Sodium (Na^{+}) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024)	38
Figure III. 11: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en potassium (K^{+}) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024)	39
Figure III. 12: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Chlorures (Cl^{-})dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024).....	39
Figure III. 13: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024)	40
Figure III. 14: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Bicarbonates (HCO_3^{-}) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024)	41
Figure III. 15: : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Nitrate NO_3^{-} dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015,2017et2024).....	42
Figure III. 16: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en calcium (Ca^{2+}) dans le CI dans l' année 2024	42
Figure III. 17: : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Le magnésium (Mg^{2+}) dans le CI de l' année 2024.....	43
Figure III. 18: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Sodium (Na^{+}) dans le CI de l' année 2024.....	44
Figure III. 19: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Potassium (K^{+}) dans le CI de l' année 2024	44
Figure III. 20 : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Chlorures (Cl^{-}) dans le CI de l' année 2024	45
Figure III. 21: : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Sulfates (SO_4^{2-}) dans le CI de l' année 2024	46
Figure III. 22: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Bicarbonates (HCO_3^{-}) dans le CI de l' année 2024	46
Figure III. 23: Faciès chimiques des eaux du sénonien et de la nappe phréatique de la zone étude campagne 2015.....	47
Figure III. 24: Faciès chimiques des eaux du sénonien et de la nappe phréatique de la zone étude campagne 2017.....	48
Figure III. 25: Faciès chimiques des eaux du sénonien de la zone étude campagne 2024	48
Figure III. 26: Faciès chimiques des eaux du CI de la zone étude campagne 2024	49
Figure III. 27: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF des nappes du sénonien.....	50
Figure III. 28: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF des nappes du sénonien.....	51
Figure III. 29: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF des nappes du sénonien.....	52
Figure III. 30: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF de la nappes du CI	53

Liste des abréviations

ADE : Algérienne Des Eaux

AEP : Eau potable

CI : Continentale Intercalaire

CT : Complexe Terminale

NA : Norme Algérienne

SASS : Sahara Septentrional Aquifères System

Introduction générale :

La région de Ouargla se situe dans le Sahara algérien, une vaste étendue désertique connue pour sa richesse en hydrocarbures et en ressources en eau souterraine. Le Sahara algérien, l'un des plus grands déserts au monde, renferme dans son sous-sol une immense réserve d'eau connue sous le nom du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). Cette réserve, estimée à environ 31 000 milliards de mètres cubes (Fehdi, C., Achour, S., & Hani, A. (2013)). Le SASS est l'un des plus grands systèmes aquifères du monde, s'étendant sous plusieurs pays du Sahara, dont l'Algérie, la Libye et la Tunisie. Ce système d'aquifères est principalement constituée d'eaux fossiles, accumulées sur des milliers d'années, qui sont aujourd'hui exploitées pour l'agriculture, l'industrie et l'approvisionnement en eau potable. La zone de Ouargla, Renferme ce système d'aquifères , utilise cette ressource souterraine pour répondre aux besoins en eau, malgré l'épuisement progressif et la dégradation de la qualité de l'eau.

Le problème de la gestion des nappes phréatiques dans le SASS se pose avec acuité, notamment à Ouargla, où la croissance démographique, l'urbanisation et les activités agricoles intensives exercent une pression croissante sur les ressources en eau souterraine. La qualité de l'eau est menacée par la salinisation, la pollution due aux activités humaines (agriculture, industrie) et les impacts du changement climatique. L'étude de la qualité de l'eau de ces nappes devient alors indispensable pour assurer une gestion durable de cette ressource précieuse (Bouzidi, A., & Djebbar, Y. (2016)).

L'objectif de l'étude est l'analyse de l'état actuel des nappes du SASS et de leur qualité dans la région de Ouargla. En vue de comprendre comment les divers facteurs géologiques, géographiques et anthropiques influencent leur qualité dans cette région aride. De même Il est important de savoir si ces ressources sont suffisantes pour répondre aux besoins futurs des habitants, tout en étant protégées contre les risques de contamination.

Des pratiques de gestion durable de l'eau, incluant des techniques de conservation et de traitement des eaux, pourraient permettre de préserver la qualité des nappes du SASS dans la région.

Par conséquent, l'objectif de cette étude est d'apporter une contribution à la compréhension des aspects géochimiques des eaux dans le région de Ouargla. Pour répondre à ces enjeux, ce mémoire est structuré autour des chapitres suivants :

❖ **Chapitre I : Contexte géographique et climatique de Ouargla**

Ce chapitre présente une vue d'ensemble de la région de Ouargla : ses caractéristiques géographiques et climatiques spécifiques au Sahara algérien.

❖ **Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique de Ouargla**

Ce chapitre décrit la géologie locale et le fonctionnement du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), mettant en évidence les formations aquifères importantes.

❖ **Chapitre III : Hydrochimie du SASS à Ouargla**

Dans ce chapitre, les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés et interprétés.

Enfin, Conclusion et recommandations

Une synthèse des principaux résultats est présentée, accompagnée de recommandations pratiques pour la gestion durable des nappes à Ouargla.

Chapitre I : Contexte géographique et climatique de Ouargla

Dans ce chapitre, on va présenter la zone d'étude, en donnant ses principales composantes géographique, climatique, hydrographiques, topographiques et géomorphologique.

1. Situation géographique de la région d'étude :

La ville de Ouargla se situe dans une dépression (cuvette), au Sud-est de l'Algérie, elle inclut les agglomérations de Ouargla, N'Goussa, Rouissat, Ain El Beida et Sidi Khouiled. Cette dépression ou cuvette s'étend entre les coordonnées (UTM, Clarke 1880) :

— $X = 710\ 000$; $Y = 3\ 530\ 000$

— $X = 730\ 000$; $Y = 3\ 600\ 000$

Elle présente une superficie totale de 154400 km² qui s'étale sur un périmètre total de 2062 Km (Fig.I.

1) orientée Sud-ouest / Nord-est et limitée :

- Au Nord, par les wilayas de Djelfa, Biskra, Touggourt et El Oued.
- A l'Ouest, par Ghardaïa.
- A l'Est, par la Tunisie.
- Au Sud, par Illizi et Tamanrasset.

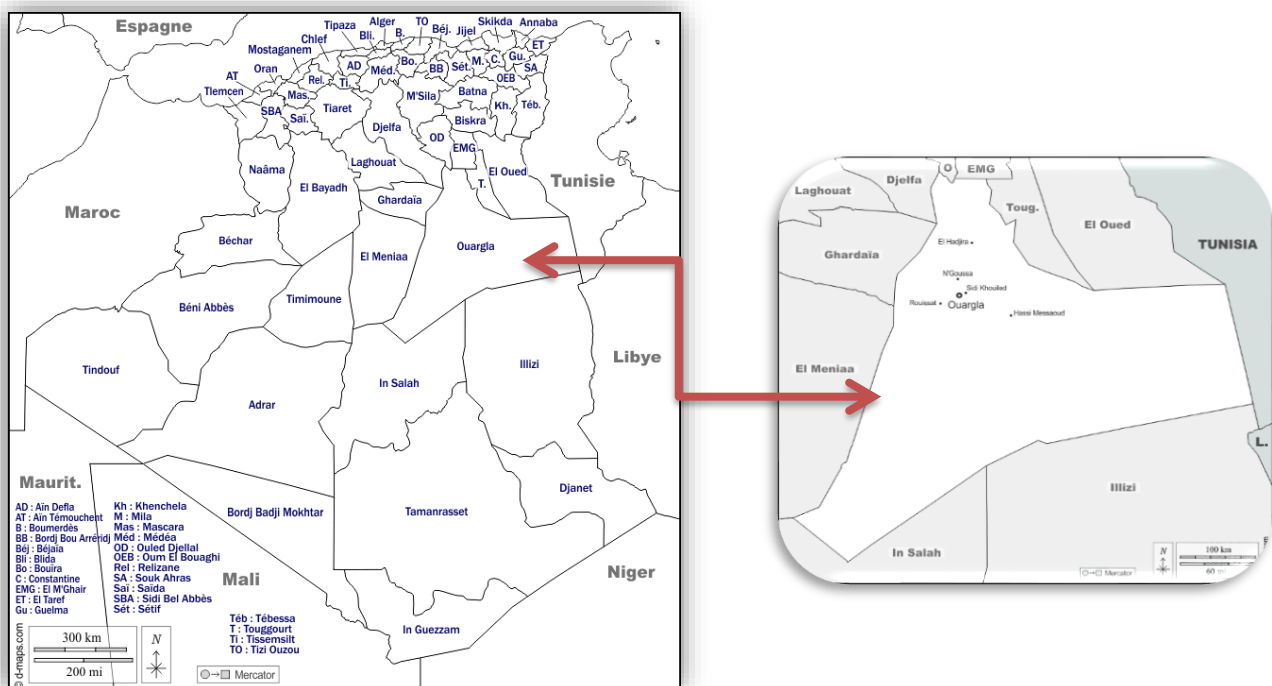


Figure I. 1 : situation géographique d'Ouargla (d-maps.com).

2. Réseau hydrographique :

L'hydrographie de la cuvette de Ouargla se caractérise par son endoréisme (Dubief, 1953). Différents bassins versants (M'zab, Mya, N'sa) forment le réseau hydrographique qui aboutit à sebkhet Safioune au Nord de la cuvette de Ouargla. Le ruissellement est en fait non significatif, (Hamdi-Aïssa, 2001).

a. Oued N'sa et Oued M'zab : Dynamique et Fonctionnement Hydrologique

Contrairement à l'Oued Mya, considéré comme un cours d'eau fossile, les Oueds N'sa et M'zab restent fonctionnels et peuvent connaître une ou deux crues par an. Cependant, ces crues n'atteignent la cuvette de Ouargla que lorsqu'elles sont particulièrement importantes. Ces deux oueds drainent les versants des piémonts sud-est de l'Atlas Saharien, au niveau de la dorsale mozabite, avec un écoulement orienté d'ouest vers l'est-sud-est, jusqu'à la sebkha Safioune.

Les alluvions déposées par l'Oued N'sa forment une barrière naturelle qui ferme la vallée au nord de la sebkha Safioune, empêchant ainsi l'écoulement des eaux vers l'aval. Toutefois, cette barrière a été partiellement rompue dans sa partie est, permettant aux eaux du lac de s'échapper vers le nord-est en direction de Touggourt et du Chott Melrhir. Les crues de l'Oued M'zab atteignent la sebkha Safioune environ deux fois par siècle, tandis que celles de l'Oued N'sa sont plus fréquentes (Dubief (1953)).

b. Oued Mya : Morphologie et Dynamique Fossile

L'Oued Mya draine le versant nord-est du plateau de Tademaït. Son bassin, d'une superficie de 19 800 km², adopte la forme d'une vaste gouttière inclinée faiblement (0,1 à 0,2 %) vers le nord-est, avec une altitude décroissante de 800 m au sud. Le cours fossile de l'Oued Mya inférieur est marqué par la présence de vastes sebkhas s'étendant jusqu'à Ouargla, située à environ 200 km du point extrême atteint par les dernières crues enregistrées. Plus au nord de Ouargla, la vallée devient indiscernable.

Selon Dubief (1953), l'Oued Mya quaternaire aurait probablement atteint le Chott Melrhir actuel, portant sa longueur totale à environ 900 km. Cependant, avec la fin de la dernière grande période pluviale, le lac qu'il alimentait s'est retiré. Dès lors, l'Oued Mya n'a coulé que de manière épisodique, de sebkha en sebkha, sans grande vigueur. Son cours s'est retrouvé fragmenté par les reliefs situés en aval de la sebkha Safioune, où un lac temporaire se formait lors de chaque épisode pluvieux.

À l'heure actuelle, les grandes crues de l'Oued Mya s'arrêtent à environ 200 km en amont de Ouargla, témoignant de la perte progressive de son activité hydraulique

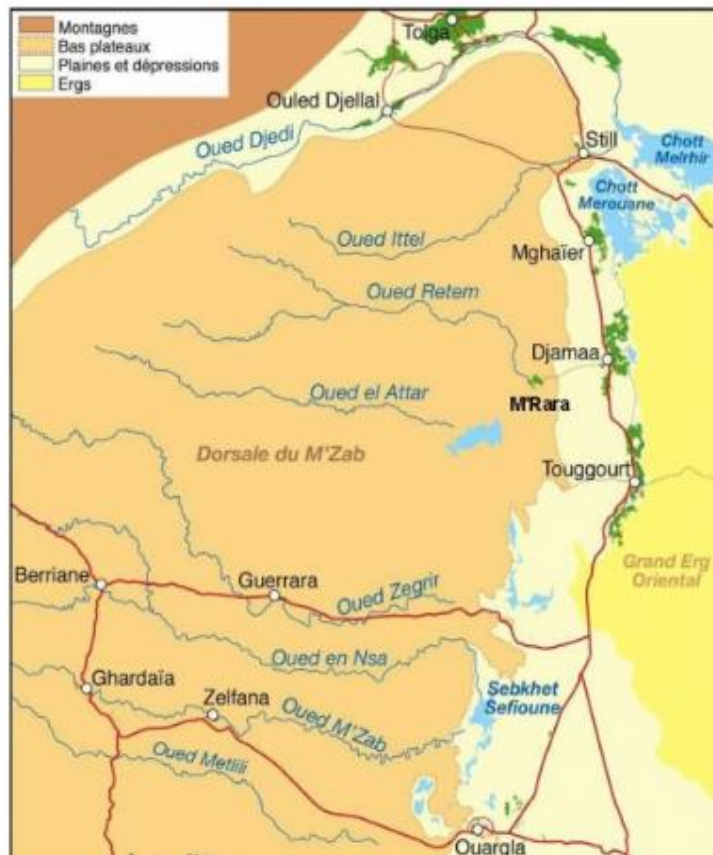


Figure I. 2 : Les oueds de la dorsale du M'Zab (Ballais, 2010)

3. Topographie et structure géomorphologique :

La région étudiée présente une géomorphologie variée, caractérisée par plusieurs unités distinctes, qui témoignent des processus géologiques et climatiques ayant façonné le paysage. Ces unités sont décrites ci-dessous (Cornet, 1967) :

a. La Hamada :

La hamada, également appelée plateau rocheux, est une formation continentale détritique se manifestant sous forme de vastes dalles rocheuses. Ce plateau présente une altitude moyenne de 200 m et s'incline progressivement d'Ouest en Est. L'érosion intense a sculpté ce paysage, ne laissant subsister que des buttes témoins connues sous le nom de goure.

b. Les Glacis :

Les glacis se développent principalement sur les versants occidentaux de la cuvette, où ils s'organisent en quatre niveaux altimétriques décroissants allant de 200 m à 140 m, orientés d'Ouest en Est. Les niveaux situés à 180 m et 160 m d'altitude se distinguent par des affleurements du substrat gréseux

datant du Mio-Pliocène. Vers l'Est, la cuvette se transforme en un vaste glacis alluvial composé de sable grossier à environ 150 m d'altitude.

c. Sebkha :

La sebkha est une dépression naturelle alimentée par les eaux de ruissellement provenant de terrains salés. Durant la saison sèche, elle se dessèche complètement, laissant apparaître une couche saline constituée majoritairement de chlorure de sodium, avec la présence fréquente de gypse et d'autres évaporites.

d. Chott :

Le chott, généralement plus étendu que la sebkha, constitue une dépression où s'accumulent les eaux de drainage. Pendant la saison sèche, il peut être partiellement ou totalement asséché, laissant un substrat souvent composé de sédiments évaporitiques.

e. Grand Erg Oriental :

Le Grand Erg Oriental est caractérisé par des dunes de sable pouvant atteindre jusqu'à 200 m de hauteur. Il occupe près des deux tiers de la superficie de la région étudiée, formant un paysage désertique typique.

f. La Vallée :

La région comprend la vallée fossile d'Oued Mya, un ancien réseau hydrographique témoignant d'une activité fluviale passée.

g. Les Plaines :

Les plaines sont limitées en superficie et se situent principalement à l'extrémité occidentale de la région. Elles s'étendent dans une direction Nord-Sud et représentent une composante secondaire du

paysage régional.

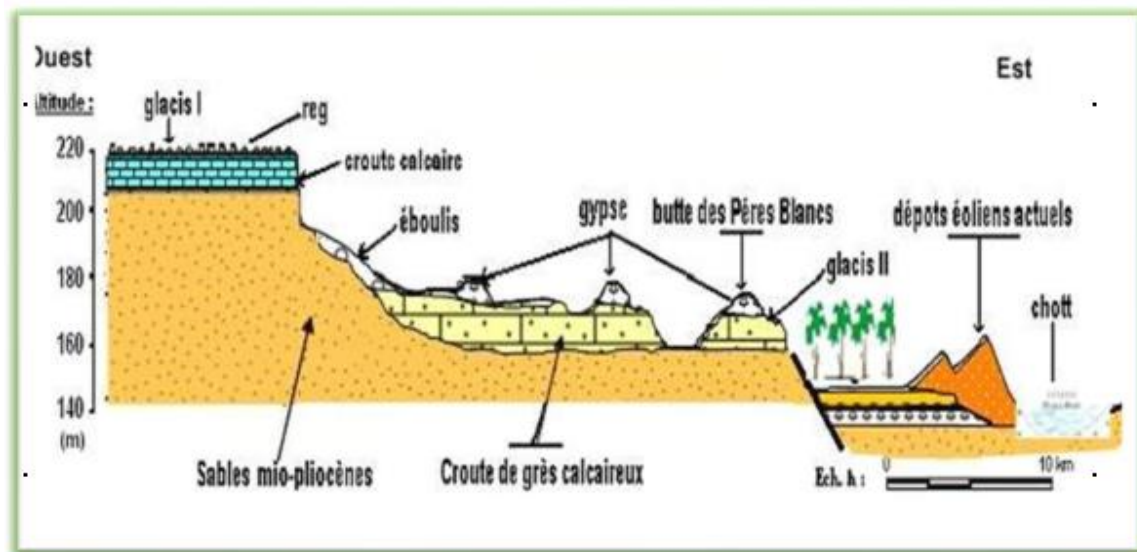


Figure I. 3: Coupe géomorphologique schématisée de la cuvette de Ouargla (Cornet 1967)

Cette analyse met en évidence la diversité géomorphologique de la région, façonnée par une combinaison de facteurs climatiques, hydrologiques et géologiques, témoins d'une évolution géologique complexe.

4. Régime climatique :

Le climat saharien est principalement influencé par sa position géographique au niveau du tropique et par des vents chauds et secs (OZENDA, 1991). Ces conditions engendrent des précipitations rares et irrégulières, une luminosité intense due à un ensoleillement quasi permanent, une forte évaporation liée aux températures élevées et un rayonnement solaire intense, ainsi que de grands écarts thermiques entre le jour et la nuit. Ces éléments définissent le caractère aride et extrême du climat saharien.

a. Les précipitations :

Les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme de pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes (DUBIEF, 1953). L'analyse des moyennes mensuelles de pluie, fait ressortir un maximum en mars avec un minimum en juillet et août. Toutefois, Il faut noter que ces valeurs mensuelles peuvent fortement varier d'une année à l'autre (DUBIEF, 1953 ; THIERRIOT et MATARI, 1998 ; MEDDI, M. & MEDDI, H. 1998).

L'histogramme représente la variabilité des précipitations annuelles à Ouargla entre 2004 et 2024.

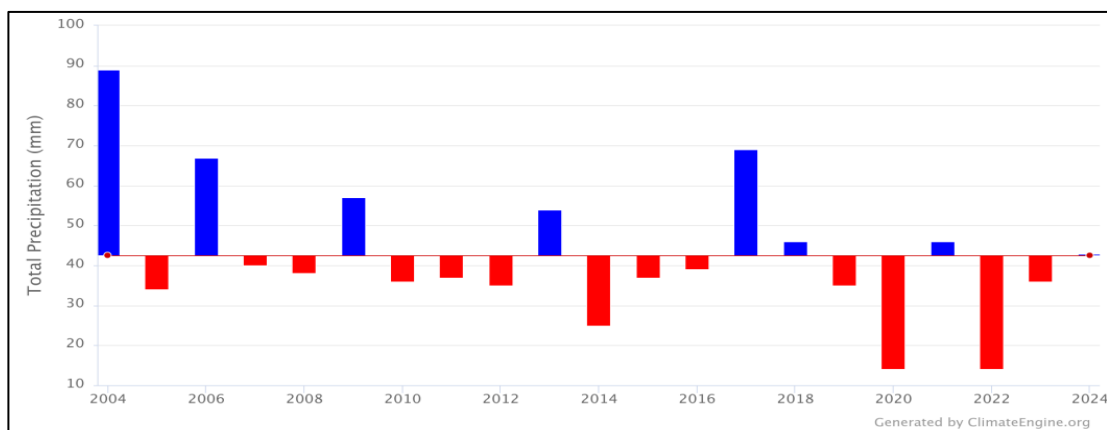


Figure I. 4: Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ouargla période (2004-2024) (Terraclimate)

L'année la plus humide est 2004 avec environ 88 mm et 2006 avec 66 mm, bien au-dessus de la moyenne annuelle (environ 42 mm). À l'inverse, certaines années se distinguent par une très faible pluviométrie : 2020 et 2022 enregistrent chacune environ 14 mm, tandis que 2014 a reçu seulement 24 mm. Ces valeurs traduisent une alternance marquée entre des années relativement humides (barres bleues) et des années très sèches (barres rouges), soulignant la forte variabilité interannuelle des précipitations et le climat aride caractéristique de la région (Terraclimate).

b. La température :

La température constitue un facteur clé du climat saharien de la région. Les données enregistrées par les stations météorologiques montrent une division nette de l'année en deux saisons : une saison chaude et une saison froide. Bien que les températures hivernales soient fraîches, elles restent toujours positives, tandis que les températures estivales atteignent des niveaux très élevés. Ces variations saisonnières entraînent une évapotranspiration potentielle particulièrement élevée, reflétant l'aridité du climat (HADJKOUIDER, 2019).

L'analyse des données de température moyenne annuelle enregistrées à Ouargla entre 2004 et 2024 met en évidence une tendance haussière significative, particulièrement observable à partir de l'année 2016 (fig.I.5).

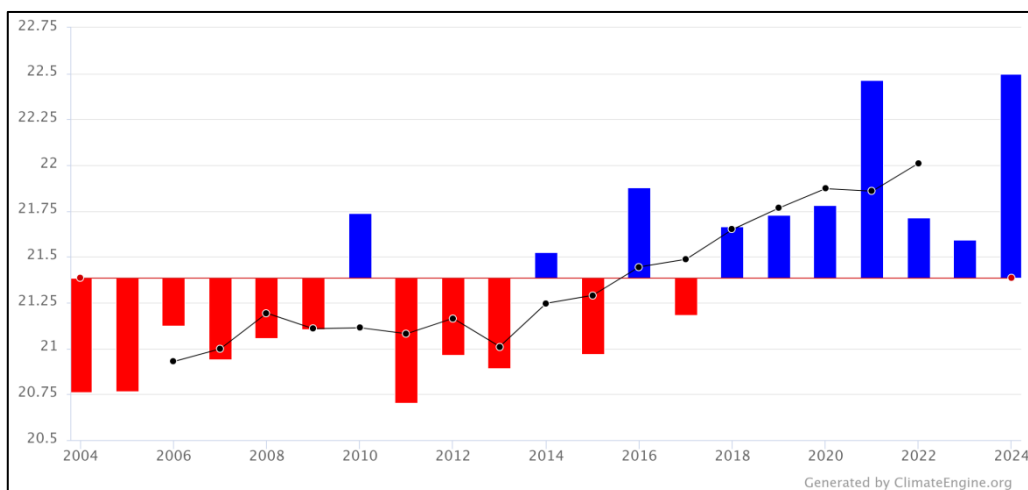


Figure I. 5: : Températures moyennes annuelles dans la région de Ouargla période (2004-2023) (Terraclimate)

Durant la période 2004–2014, les températures demeurent majoritairement inférieures à la moyenne de référence, comme l’indiquent les écarts négatifs. À partir de 2016, on observe une inversion progressive de cette tendance, avec des températures qui deviennent systématiquement supérieures à la moyenne de référence. Cette évolution s’intensifie au cours des années 2018 à 2024, atteignant un maximum en 2024, où la température moyenne annuelle dépasse 22 °C, tandis que le minimum a été enregistré en 2011 avec environ 20,7 °C. Ces résultats traduisent un réchauffement progressif du climat dans la région.

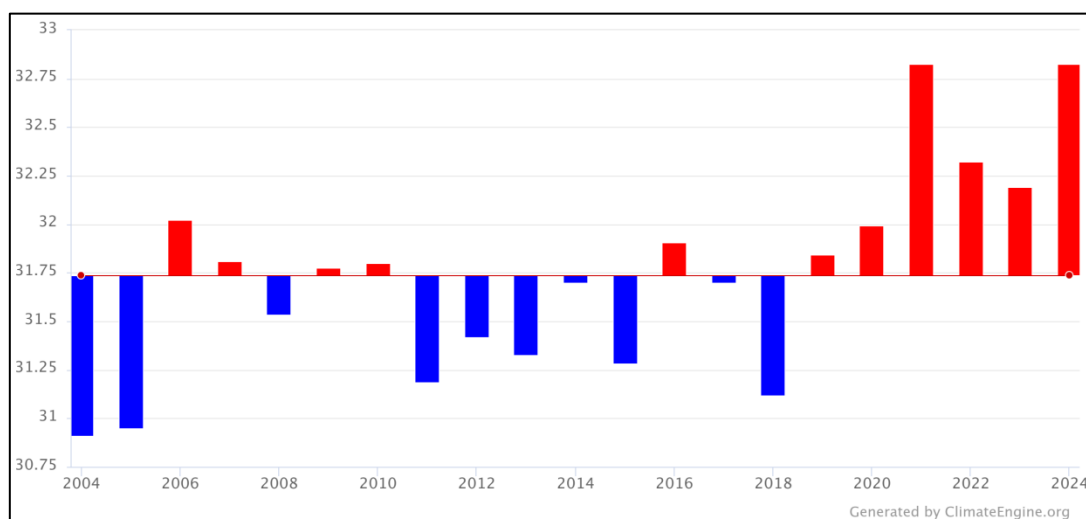


Figure I. 6: Températures maximale moyenne annuelles dans la région de Ouargla période (2004 à 2024) (Terra Climat).

L’évolution des températures maximales moyennes annuelles durant la période d’étude présente une relative stabilité entre 2004 et 2017, avec des valeurs majoritairement inférieures à la moyenne de référence, Une rupture thermique est cependant observée à partir de 2018, marquant le début d’une

augmentation progressive des températures maximales. Cette tendance est marquée entre 2021 et 2024, avec des moyennes annuelles atteignant, voire dépassant, les 33 °C en 2023 et 2024, constituant ainsi les valeurs maximales observées, contre une valeur minimale de 30,9 °C enregistrée en 2005. Cette augmentation traduit une intensification de la fréquence et de la sévérité des épisodes de chaleur extrême, ce qui constitue un indicateur significatif du réchauffement climatique à l'échelle locale.

Les températures minimales moyennes annuelles présentent une tendance comparable. La période 2004–2017 est caractérisée par des températures souvent inférieures à la moyenne de référence, traduisant une certaine stabilité thermique.

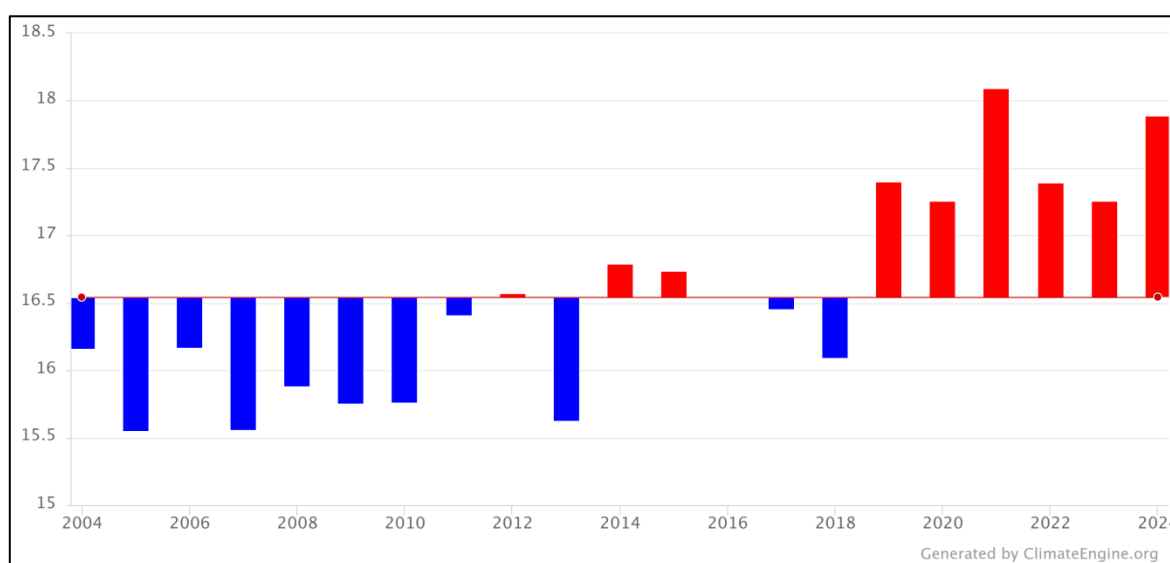


Figure I. 7:Températures minimales moyennes annuelles dans la région de Ouargla période (2004 à 2024) (Terra Climat).

À partir de 2018, une élévation progressive est observée atteignant un maximum en 2021 où la température minimale moyenne annuelle excède 18,1 °C, représentant la valeur maximale de la série. Par ailleurs, la valeur minimale a été observée en 2005 avec environ 15,5 °C.

c. L'évaporation et l'évapotranspiration :

C'est un phénomène physique qui augmente avec la température, la sécheresse de l'air et l'agitation de cet air (Ozend a, 1991).

Le Sahara apparaît comme la région du monde qui possède l'évaporation la plus élevée. DUBIEF, (1950).

- _ L'évaporation de masses d'eau libre ou de celle contenues dans le sol : évaporation physique.

- L'évaporation par les végétaux (qui peut être considérée comme secondaire dans les régions sahariennes) : évaporation physiologique.

La figure I. 8 représente l'évolution annuelle de l'évapotranspiration potentielle estimée par la méthode de Thornthwaite à Ouargla, de 2004 à 2023. Globalement, on observe une tendance haussière marquée, en particulier à partir de 2017, traduisant une augmentation notable de la demande évaporative de l'atmosphère.

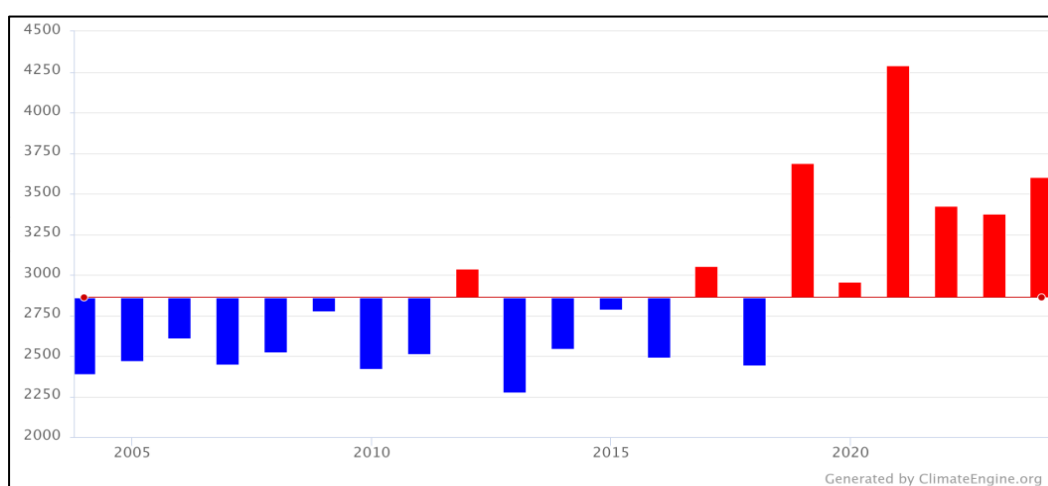


Figure I. 8: L'évapotranspiration potentielle selon la méthode de Thornthwaite dans la région de Ouargla période (2004 à 2024) (Terra Climat)

Durant la période 2004–2016, la majorité des années sont déficitaires, avec des valeurs globalement inférieures à la moyenne de référence (environ 2820 mm). La valeur minimale a été observée en 2013, avec environ 2250mm. Par ailleurs, à partir de 2017, on observe un changement vers des excédents évaporatifs significatifs, culminant en 2021, année durant laquelle l'évapotranspiration potentielle a atteint sa valeur maximale d'environ 4275 mm.

Cette hausse pourrait être associée à une augmentation des températures moyennes, à une intensification de l'ensoleillement ou à une réduction de l'humidité relative, autant de facteurs influençant directement la capacité de l'atmosphère à extraire l'eau des surfaces. Ces résultats suggèrent une pression croissante sur les ressources en eau dans la région.

d. L'humidité :

L'humidité relative dans le Sahara est extrêmement faible, se maintenant souvent en dessous de 20 % (MONOD, 1992). Même dans les zones montagneuses, des valeurs élevées d'humidité sont rarement observées. Dans la partie septentrionale du Sahara, elle varie généralement entre 20 % et 30 % en été, tandis qu'en hiver, notamment en janvier, elle peut atteindre 50 % à 60 % voire davantage (OZENDA, 1991 ; LE HOUÉROU, 1995). Ces variations témoignent de l'aridité dominante et des conditions climatiques extrêmes de la région.

e. L'insolation :

En raison de la faible nébulosité de l'atmosphère, le Sahara reçoit une quantité importante de lumière solaire, contribuant à une augmentation des températures et à un effet desséchant marqué (OZENDA, 1991). Les durées d'insolation y sont exceptionnellement élevées, bien qu'elles varient d'une année à l'autre et selon les saisons (Dubief, 1963).

La figure I. 9, présente l'évolution annuelle du rayonnement solaire descendant (Downward Shortwave Radiation) à Ouargla, mesurée en W/m^2 , sur la période de 2004 à 2023. Il met en évidence des fluctuations modérées autour de la moyenne de référence estimée à $227,3 \text{ W/m}^2$.

La valeur maximale a été observée en 2023, atteignant environ $230,2 \text{ W/m}^2$, tandis que la valeur minimale a été enregistrée en 2018, avec environ $224,0 \text{ W/m}^2$. Une légère tendance haussière est visible à partir de 2018, traduisant une augmentation progressive de l'ensoleillement moyen, notamment sur la période 2020–2023.

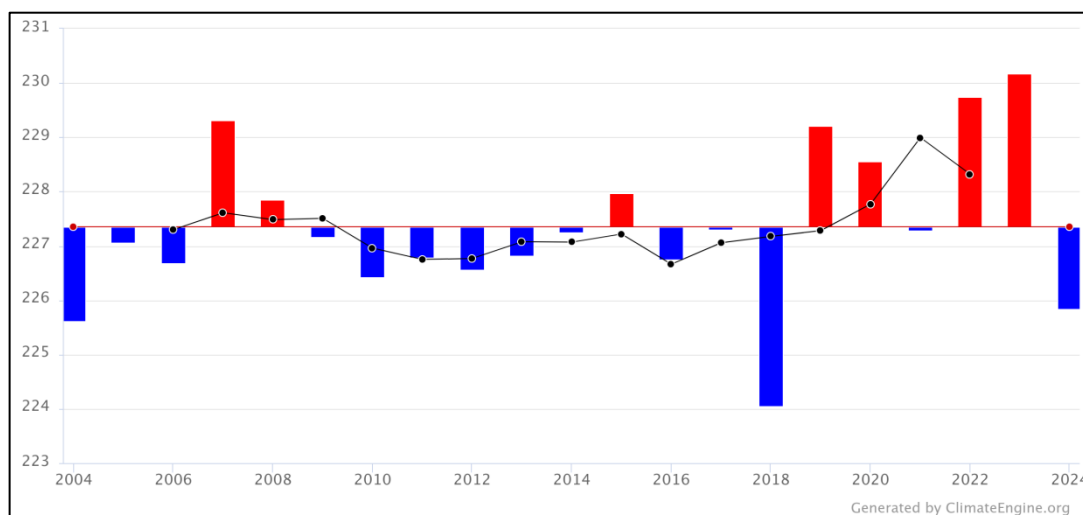


Figure I. 9: Evolution annuelle du rayonnement solaire descendant dans la région de Ouargla période (2004 à 2024) (Terra Climat,)

Cette intensification du rayonnement solaire peut avoir des implications importantes sur l'évapotranspiration potentielle, la température de surface et la demande hydrique dans cette région aride.

5. Conclusion :

La cuvette d'Ouargla, une vaste dépression naturelle de près de 25 000 km², est située dans le Bas-Sahara algérien. Elle présente une structure synclinale dissymétrique typique. Le centre de cette cuvette est marqué par la présence de palmeraies et de zones agricoles végétalisées, tandis que 70 % de sa superficie est dominée par des dunes de sable et des étendues désertiques.

La région se caractérise par un climat hyper-aride, où les précipitations sont extrêmement faibles et irrégulières. Avec une température moyenne annuelle de 23,6 °C et un taux d'évapotranspiration très élevé, les pluies ne contribuent pratiquement pas à la recharge de la nappes phréatiques.

L'étude des données climatiques de la période 2004-2024 pour la région de Ouargla l'augmentation des températures moyennes et la variabilité des précipitations, Les années 2021, 2022 et 2024 montre une élévation des températures et une diminution des précipitations, éléments pouvant ainsi affecter la recharge de la nappe phréatique et accroître les risques de sécheresse et de pollution des eaux souterraines. Cet aperçu climatique montre les défis auxquels la région fait face en termes de gestion de l'eau

Ainsi, cette cuvette aride, entourée par les vastes étendues d'ergs, constitue un paysage contrasté, où quelques oasis cultivées émergent au milieu d'un environnement minéral et dunaire, typique des régions désertiques du Sahara oriental algérien.

Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique de Ouargla

1. Introduction :

L'hydrogéologie s'appuie fortement sur la géologie, pour obtenir des informations importantes concernant l'étendue, la profondeur et les propriétés des aquifères. Elle offre aussi la possibilité de décrire et de réaliser une cartographie des formations rocheuses existantes dans une zone, tout en fournissant une connaissance détaillée de la structure géologique à l'échelle locale et régionale. Ces informations reposent essentiellement sur l'analyse des cartes géologiques et des coupes lithostratigraphiques.

2. Structure géologique de la cuvette d'Ouargla :

La cuvette d'Ouargla se caractérise par des affleurements géologiques tabulaires composés de formations datant du Quaternaire, du Miocène, du Pliocène et du Sénonien. Elle est localisée au sein des formations continentales du Mio-Pliocène, où l'on observe une alternance de sables siliceux et de grès fins à stratifications entrecroisées. Ces dépôts sont ponctués de nodules calcaires et entrecoupés par des niveaux de calcaire ou de gypse.

Les formations du Sénonien, présentes dans la région, contribuent à la constitution d'une structure carbonatée calcaire au nord-ouest de la zone d'étude. La cuvette d'Ouargla présente une pente inclinée d'environ -40 mètres en direction du Chott Melghigh, selon un axe sud-ouest/nord-est (Kharroubi, 2024).

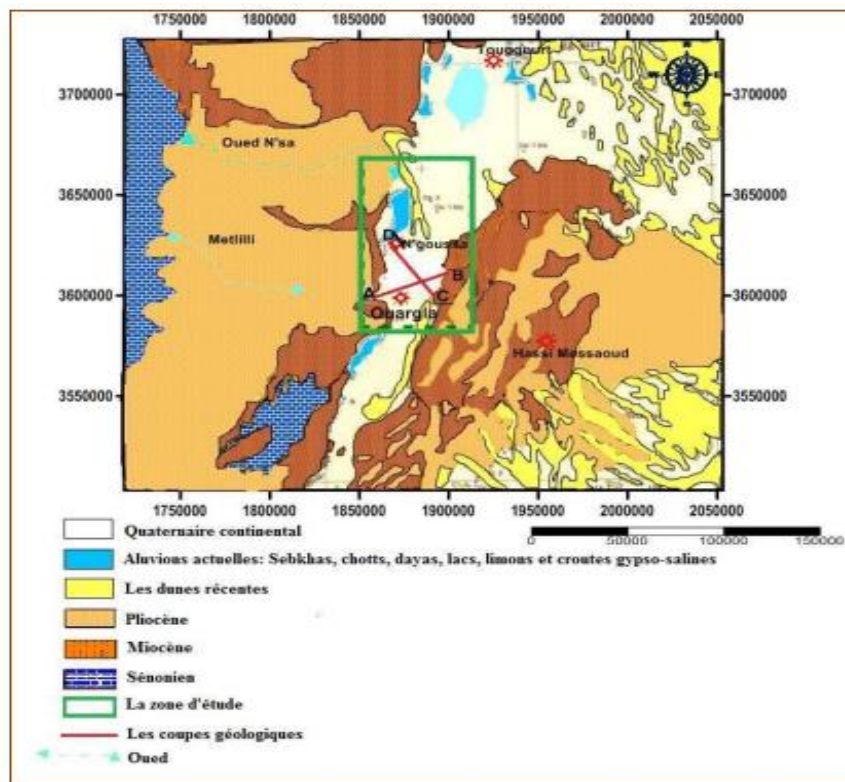


Figure II. 1 : Carte géologique de Ouargla (Cornet.1964) modifiée par (ZEDDOURI.A 2010 ; SATOUH.A et al 2021.)

3. La litho-Stratigraphie de la cuvette d'Ouargla :

La description litho-stratigraphique repose sur l'examen et l'analyse des logs de forages profonds, ce qui permet de déduire et de définir la lithologie et la stratigraphie de la région d'étude.

Afin de caractériser la géométrie et la disposition des différentes unités lithostratigraphiques constituant cet aquifère, une analyse détaillée a été menée à partir de dix logs de forage répartis sur la zone d'étude (fig. II. 2). Ces données permettent de reconstituer la succession des formations géologiques, leur épaisseur, leur nature lithologique ainsi que leur structure. L'interprétation de ces données est appuyée par une modélisation géologique réalisée à l'aide du logiciel RockWorks17, offrant ainsi une meilleure visualisation de la géométrie de l'aquifère dans la région d'Ouargla.

Le logiciel RockWorks permet d'établir des logs et des coupes géologiques en introduisant les données des forages : la profondeur totale du forage, son altitude (Z), le toit et le mur de chaque couche, sa nature lithologique en prenant en considération les figurés conventionnels de chaque formation géologique (calcaire, marne, argile, sable...etc.), la stratigraphie si nous travaillons sur plusieurs étages (Albien, Cénomanién, Turonien...etc.).

Le logiciel Rock Works permet d'établir des corrélations entre plusieurs logs stratigraphiques et obtenir ensuite des coupes géologiques.



Figure II. 2: Carte de localisation des forages dans la zone études

Le modèle en 3D réalisé à partir des 10 logs de forages : Abattoire (F1), Bamendil (F2), BeniThour (F3), Said Otba (F4), Mekhadma (F5), Ain El Beida (F6), EL Hadeb(F7), N'Goussa (F8), Hai-Enasr (F9) et Hassi Ben Abdallah(F10) montre la lithologie des forages étudiés, mettant en évidence la nature et la succession des formations géologiques traversées. Il permet d'identifier les principales unités lithostratigraphiques, ainsi que leur répartition verticale et horizontale. Cette représentation constitue un outil essentiel pour l'interprétation des caractéristiques géologiques locales, notamment en ce qui concerne la composition et la structure des formations, dans le but de mieux comprendre le contexte hydrogéologique de la zone.

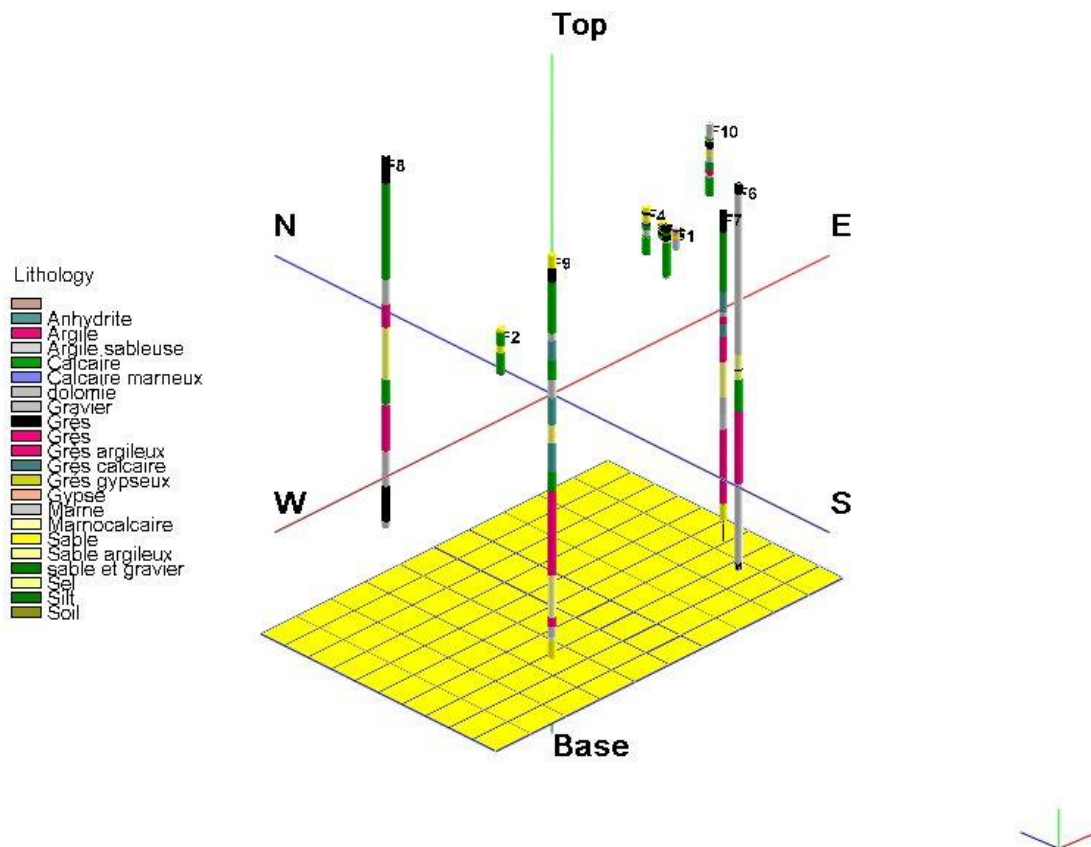


Figure II. 3: Modèle 3D représentant la lithologie

Deux coupes géologiques ont été réalisées :

La première suivant un profil AA' d'orientation SO-NE à partir des logs de forages :

Abattoire (F1), Bamendil (F2), BeniThour (F3), Said Otba (F4), et Hassi Ben Abdallah(F10).

La deuxième suivant un profil BB' d'orientation NO-SE à partir des logs de forages :

Ain El Beida (F6), EL Hadeb(F7), N'Goussa(F8), Hai-Enasr (F9) et Hassi Ben Abdallah(F10).

La coupe AA' (figure II. 4) montre une succession de couches qui sont de bas en haut caractéristiques du Complexe Terminal, lequel est formé essentiellement des formations sénonienne, éocène, et mio-pliocène.

- 1. Le Sénonien :** Cette formation est bien représentée dans les forages F1, F2 et F4. Elle se compose principalement de calcaires dolomitiques, calcaires marneux, gypse, dolomie et niveaux argileux, traduisant un environnement de dépôt lagunaire à marin. Son épaisseur varie entre 41,5 m (F1) et 113 m (F4). Cette unité joue un rôle double dans l'hydrogéologie du Complexe Terminal : certaines zones sont perméables (carbonatées), d'autres, notamment les niveaux évaporitiques (gypse, anhydrite), sont imperméables et jouent un rôle de barrière.
- 2. Le Mio-Pliocène :** Cette série recouvre le Sénonien dans tous les forages du complexe terminal. Elle est constituée d'une alternance de sables, grès, argiles, marnes et parfois de calcaires. Cette formation atteint une épaisseur de 40,5 m dans le forage F1, 92 m dans le F2, 64 m dans le F3, 68 m dans le F4, 53 m et 120 m dans le F10. Sa grande hétérogénéité lithologique reflète des conditions de dépôt continentales à fluviolacustres. Elle forme la principale zone d'exploitation des eaux peu profondes du Complexe Terminal.
- 3. Le Quaternaire :** Cette couche superficielle repose sur les formations mio-pliocènes et agit comme couverture partielle de l'aquifère.

Figure II. 4: Coupe géologique suivant le profil AA'

1. **Le Barrémien :** Située à la base de la coupe, cette formation n'apparaît que dans le forage F9 à partir de 1490 m de profondeur. Elle est constituée de calcaires dolomitiques, d'argiles et de grès. Elle représente la base du Continental Intercalaire, avec une épaisseur comprise entre 60 et 100 m. Cette unité possède des caractéristiques géomécaniques importantes mais reste peu perméable.
2. **L'Aptien :** Reconnue dans les forages F8 et F9, l'Aptien est caractérisé par la présence de dolomies, de marnes dolomitiques colorées et de grès. Il forme une couche imperméable, intercalée entre les formations perméables de l'Albien et du Barrémien. Son épaisseur varie de 20 à 46 m, agissant comme couche de confinement dans le réservoir profond.

3. **L'Albien** : Formation aquifère majeure du Continental Intercalaire, l'Albien est largement développé dans les forages profonds (F6 à F9). Il se compose essentiellement de grès, de sables grossiers, de marnes intercalées, et présente une épaisseur comprise entre 270 et 450 m. Il constitue l'un des réservoirs les plus productifs de la région.
4. **Le Cénomanién** : Ce niveau repose directement sur l'Albien et est constitué d'une alternance d'argiles plastiques, de marnes et de formations calcaires. Son épaisseur se situe entre 180 et 300 m. En raison de sa faible perméabilité, il joue un rôle de couche de couverture pour l'aquifère albien, contribuant ainsi à sa protection contre les pollutions verticales.
5. **Le Turonien** : La barre turonienne, bien développée dans les forages F6 à F9, est formée de calcaires beiges poreux et de calcaires dolomitiques gris à blancs. Elle présente une épaisseur de 50 à 100 m et repose sur les formations marneuses du Cénomanién. Elle constitue une transition carbonatée vers les dépôts plus évaporitiques du Sénonien.
6. **Le Sénonien** : Très bien représenté dans tous les forages, le Sénonien se divise en deux faciès principaux :
 - **Sénonien lagunaire** : succession de bancs de sel, de gypse, d'argile, d'anhydrite et de dolomie, formant une série imperméable. Elle est observée à partir de 300 m (F6, F8, F9) avec une épaisseur pouvant dépasser 300 m.
 - **Sénonien carbonaté** : présent entre 560 et 710 m dans le forage F6, cette unité est composée de calcaires dolomitiques, calcaires gréseux, marnes dures, parfois avec de l'anhydrite. Elle présente une perméabilité modérée à élevée.
7. **L'Éocène** : Cette formation, identifiée dans les forages F6 et F7, repose sur le Sénonien. Elle est principalement composée de calcaires marneux, parfois fissurés, avec une épaisseur variant de 70 à 527 m. Sa porosité secondaire confère à cette formation un rôle aquifère local, particulièrement dans les zones fracturées.
8. **Le Mio-Pliocène** : Présent dans la quasi-totalité des forages superficiels (F1 à F5, F8 et F10) et les forages profonds (F6 et F7), le Mio-Pliocène constitue la couche sédimentaire dominante des 100 premiers mètres. Il est caractérisé par une hétérogénéité lithologique importante : sables, grès, argiles, conglomérats et calcaires. Cette diversité traduit des conditions de dépôt continentales à fluviales. Cette unité est modérément à bien perméable, contribuant activement à l'alimentation de l'aquifère supérieur.

9. Le Quaternaire : Il est composé de sables éoliens, d'argiles et de grès. Il surmonte les formations plus anciennes du Mio-Pliocène, avec une épaisseur ne dépassant pas 10 m. Cette couverture récente joue un rôle de protection naturelle des aquifères sous-jacents.

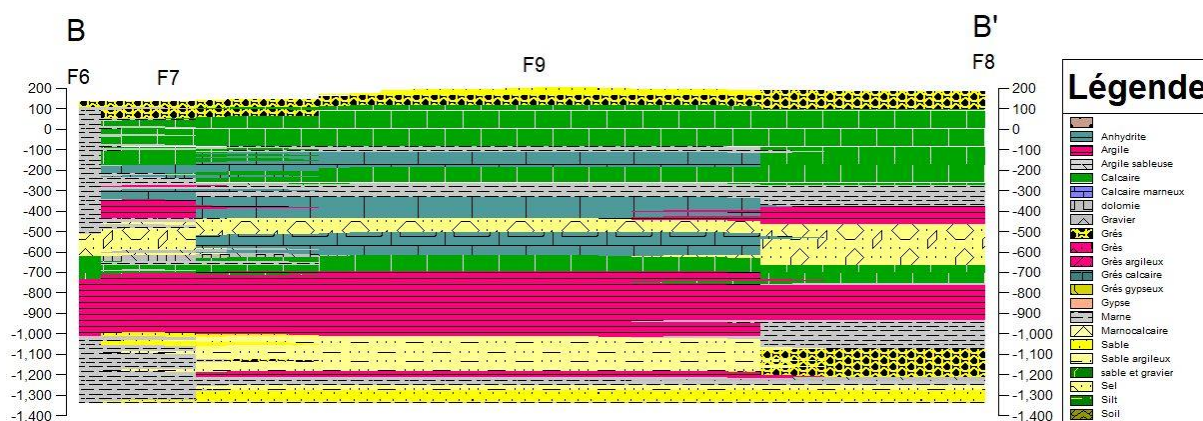


Figure II. 5: Coupe géologique suivant le profil BB'

1. Contexte hydrogéologique régional :

Dans le bassin saharien du nord de l'Afrique, de vastes systèmes aquifères favorisent la circulation et le stockage des eaux souterraines, parmi lesquels le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). Ce dernier englobe principalement deux grandes nappes : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

S'étendant sur environ 1 million de km² à travers l'Algérie, la Tunisie et la Libye, le SASS constitue un réservoir aquifère majeur, avec des réserves renouvelables estimées à 31 milliards de m³. Bien que cette ressource hydrique représente un patrimoine inestimable pour les pays sahariens, sa lente recharge naturelle et les risques de surexploitation soulignent l'urgence d'une gestion durable et concertée, essentielle pour préserver cette richesse dans un environnement aride (Cornet, 1961).

Dans la région de Ouargla, comme dans la majorité des oasis du Sahara, les ressources hydriques disponibles sont principalement des eaux souterraines. Les formations géologiques locales renferment deux principaux ensembles aquifères séparés par des séries épaisses d'évaporites ou d'argiles :

- L'ensemble inférieur, correspondant au Continental Intercalaire (CI) ou "Albien," qui se situe à la base du Crétacé supérieur.
- L'ensemble supérieur, désigné comme le Complexe Terminal (CT).

À ces deux grandes formations s'ajoute une troisième nappe d'importance plus modeste : la nappe phréatique, identifiée par Cornet (1961). Ces aquifères constituent la principale source d'eau pour les activités agricoles et domestiques dans cette région saharienne.

Chronostratigraphie	Unités hydrogéologiques		Prof	Lithostratigraphie	Lithologie
Quaternaire	Nappe phréatique		20m	Mio-Pliocène	
Tertiaire	Nappe du Complexe Terminal	Nappe des sables			
		Impermeable	120m	Eocène évaporitique	
		Nappe des calcaires (Sénono-Eocène)	520m	Eocène carbonaté	
		Impermeable	700m	Sénonien lagunaire	
		Nappe du turonien		Turonien	
Secondaire	Crétacé	Impermeable		Cénomaniens	
				Vraconien	
		Nappe du Continental Intercalaire	1100m	Albien	
		Nappe de l'Albien	2000m	Aptien Barrémien	

Figure II. 6: Récapitulatif des différentes nappes aquifères de la basse Vallée de l'Oued M'ya (ANRH, 2004)

a. Le Continental Intercalaire (CI) ou "Albien" :

Le Continental Intercalaire (CI), également appelé "Albien," constitue l'un des principaux aquifères du Système Aquifère du Sahara Septentrional. S'étendant sur une superficie de 600 000 km², il couvre l'ensemble du bassin sédimentaire saharien, depuis l'Atlas Saharien au nord jusqu'au Tassili et au Hoggar au sud, et de la vallée de la Saoura à l'ouest jusqu'au désert libyen à l'est (UNESCO, 1972).

Le toit de l'aquifère est constitué d'argiles et d'évaporites du Cénomaniens, formant une couverture continue à travers le bassin. La nappe du CI repose dans des couches détritiques de l'Albien et du Barrémien, séparées par des bancs calcaires aptiens. Ces formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses s'étendent sur des niveaux d'âges variables, allant du Trias au Crétacé inférieur (Dubost, 1992),

Le toit de cet aquifère est à une profondeur moyenne de 1500 m, mais peut atteindre jusqu'à 2600 m dans certaines régions. À Ouargla, l'aquifère est situé entre 1000 et 1500 m de profondeur (Idder, 2020), avec une épaisseur utile d'environ 640 m. Cette épaisseur est composée de grès fins, gris, à ciment argileux, parfois dolomitiques, avec des intercalations de marnes dolomitiques et d'argiles sableuses.

Le CI est un aquifère jaillissant, exploité principalement pour l'approvisionnement en eau potable (A.E.P.). Ce réservoir, bien que profond, constitue une ressource hydrique cruciale pour les régions sahariennes, comme Ouargla.

b. Le Complexe Terminal (CT) :

Dans le bassin oriental, le Complexe Terminal (CT) s'étend sur une superficie d'environ 350 000 km². Ses limites géographiques incluent :

À l'ouest la dorsale du M'zab, au nord l'accident majeur de l'Atlas Saharien, à l'est le Dahar et au sud une ligne passant au nord de l'axe In Salah-Zarzaitine, sous l'Erg Oriental (UNESCO, 1972).

Le CT constitue une formation aquifère indépendante d'intérêt majeur. La communication entre les eaux du Complexe Terminal des bassins oriental et occidental semble être limitée. Ce phénomène témoigne d'une relative compartimentation hydrogéologique (UNESCO, 1972).

Dans la région d'Ouargla, les nappes du Complexe Terminal sont de plus en plus sollicitées. L'accroissement de l'exploitation et la baisse des niveaux piézométriques dans les nappes du CT deviennent un problème persistant et sans solution. En Algérie, sur l'ensemble du Bas-Sahara algérien, la diminution de niveau piézométrique de la nappe du Complexe Terminal dans la région de Ouargla oscille entre 30 et 50m (OSS. 2003).

Les études géologiques et hydrogéologiques menées dans le réservoir du Complexe Terminal (CT) dans la zone d'étude révèlent la coexistence de deux nappes principales : la nappe profonde Senono-Éocène carbonatée, composée de formations carbonatées, et la nappe du Mio-Pliocène, caractérisée par des formations de sable fin à grossier, du gypse et du grès. (Kharroubi M 2024)

L'épaisseur des couches aquifères du Complexe Terminal présente une grande variabilité, allant de 11 à 63 mètres pour la nappe Mio-Pliocène et de 24 à 121 mètres pour la nappe du Sénonien. La profondeur de l'aquifère du Complexe Terminal se situe généralement entre 100 et 200 mètres (Kharroubi M 2024) .

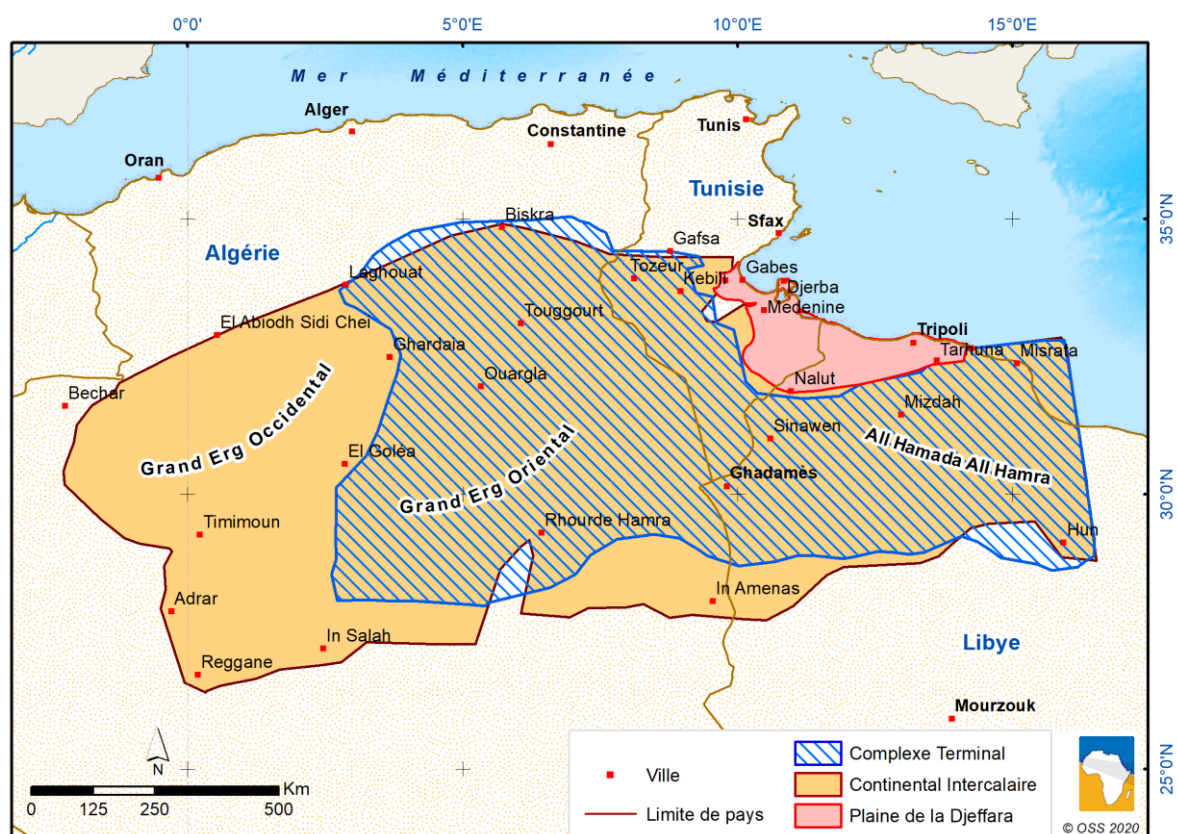


Figure II. 7: Carte des ressources en eau souterraines (CI et CT),

c. La nappe superficielle ou phréatique :

Omniprésente à l'échelle de la région, son épaisseur varie de 1 m à 8 m. son substratum est un niveau imperméable étanche occupant tout le fond de la vallée d'Ouargla. Sa frange capillaire surgie souvent à la surface du sol sous forme de chotts. Elle est relativement profonde au niveau des hautes altitudes (Ergs), et moins profonde à proximité des palmeraies irriguées. Le sens de l'écoulement principal des eaux de la nappe phréatique suit celui de la nappe du Complexe Terminal, c'est à dire du Sud vers le Nord (Nezli, 2008).

Les eaux de rejets urbains et agricoles (palmeraies) maintiennent des niveaux piézométriques très élevées par rapport à la topographie, se traduisant par une remontée de la nappe en surface (Lelièvre, 1969 ; Idder, 1998 ; BG, 2004 ; Nezli, 2004 ; Nezli, 2007).

La lithologie des formations qui la constituent est connue grâce aux sondages (piézomètres), de 6 m à 10 m de profondeurs, qui la traversent. Au Sud de Ouargla la nappe est constituée de sable fin à moyen, rarement grossier, argileux. Vers le Nord, N'Goussa et Sebkhet Safioune, les sables sont riches en gypse et deviennent dominants à Sebkhet Safioune. La continuité lithologique entre les sables mio-pliocènes et quaternaires suggère que les deux formations constituent pratiquement le même aquifère (Nezli, 2008).

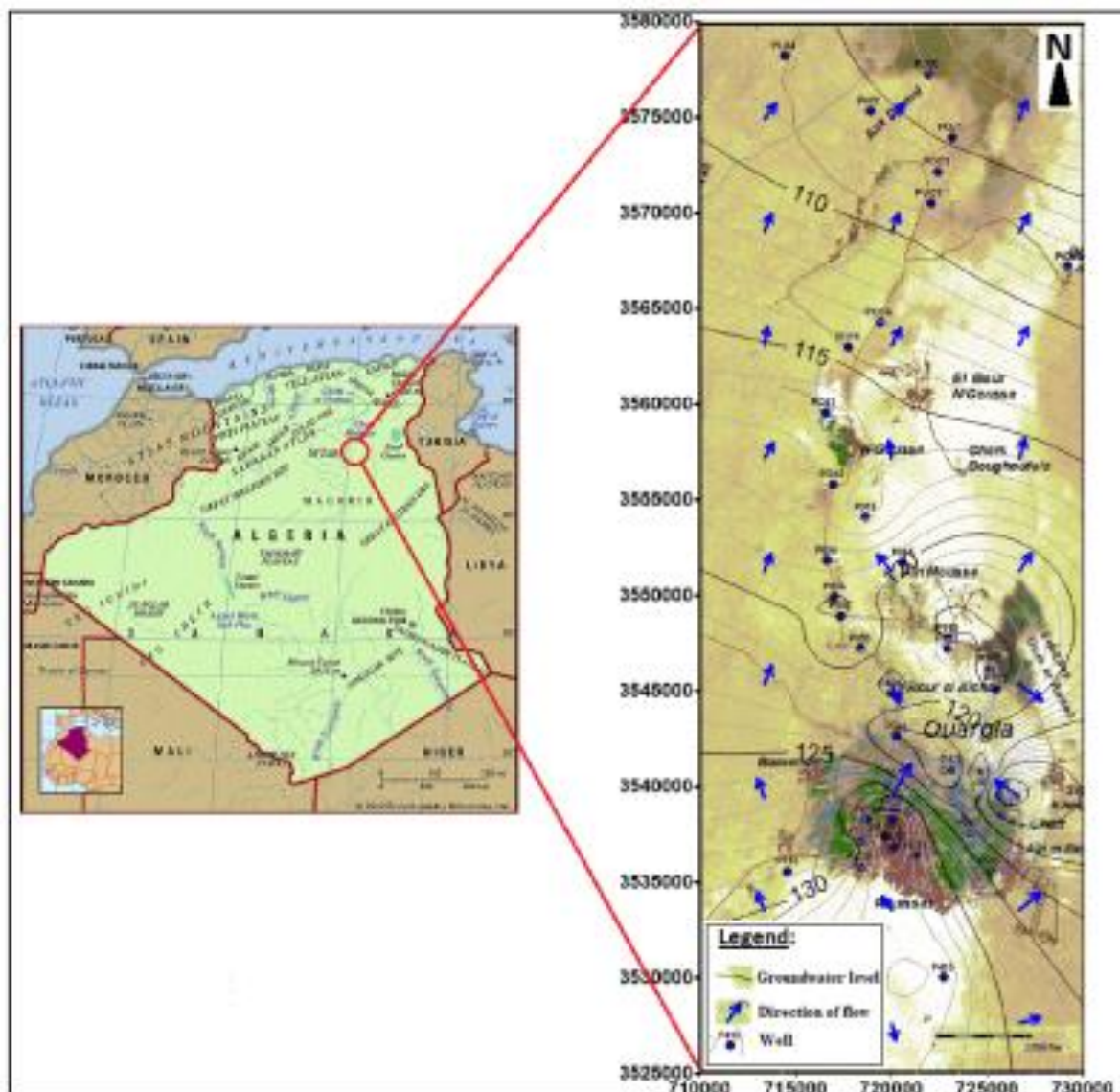


Figure II. 8: Carte piézométrique de la nappe phréatique (Hammad Net al 2023)

La figure représente une carte piézométrique de la nappe phréatique ce qui montre le sens de l'écoulement de la nappe est de direction SO vers le NE, La nappe s'écoule du point le plus haut (136 m) situé sous la ville d'Ouargla vers les différents Chotts avec un gradient hydrauliques ne dépassant pas 2 ‰.

2. Conclusion :

La cuvette d'Ouargla, située dans le Bas-Sahara sur la plateforme saharienne du sud-est algérien, présente une structure géologique complexe typique des bassins sédimentaires sahariens. L'analyse

géologique et hydrogéologique de cette région met en évidence trois principaux aquifères : le Continental Intercalaire (CI), le Complexe Terminal (CT) et l'aquifère superficiel.

La nappe phréatique, appartenant à l'aquifère superficiel, constitue le système aquifère le plus proche de la surface parmi les trois présents dans la région. Elle est caractérisée par une faible profondeur et représente une ressource essentielle pour l'agriculture et l'irrigation, particulièrement dans les zones cultivées des oasis de Ouargla.

Ces caractéristiques hydrogéologiques confirment l'importance stratégique de ces nappes dans un contexte climatique hyper-aride, nécessitant une gestion efficace pour préserver leur durabilité.

Chapitre III : Hydrochimie du SASS à Ouargla

1. Introduction :

Les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines sont nombreuses, et la composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, ainsi que le choix de son usage (alimentation en eau potable, irrigation, industrie, etc.). Ce chimisme naturel dépend principalement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjour.

Le chimisme est principalement régi par les équilibres calcocarboniques (Ca^{2+} , HCO_3^-) auxquels s'associent d'autres ions (Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , NO_3^-). Les concentrations de ces ions naturels sont conditionnées par divers facteurs tels que la nature géologique des formations traversées par les eaux, les paramètres climatiques, l'activité anthropique, les échanges entre aquifères et les eaux de surface.

L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines et les faciès chimiques du SASS dans la région d'Ouargla.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la démarche suivie au cours de notre travail commençant par la localisation des forages dont on dispose, des données d'analyses physicochimiques des eaux obtenus auprès de l'ADE. Des logiciels ont été utilisés pour les graphiques, la cartographie des paramètres physicochimiques et l'interprétation des résultats obtenus.

2. Matériel et méthodes d'analyse :

Dans le cadre de cette étude, des résultats d'analyses d'échantillons de la nappe du complexe terminal et du continentale intercalaire ont été accueillis auprès de l'Algérienne des Eaux (ADE), couvrant une période allant de 2015 à 2017, ainsi qu'une mise à jour plus récente en 2024. Ces prélèvements ont été réalisés à travers différents points répartis dans la zone d'étude, de manière à représenter de façon homogène les conditions hydrochimiques locales.

La carte ci-dessous représente l'emplacement géographique de chacun des huit forages analysés, ce qui permet de mieux interpréter la variabilité spatiale des paramètres physico-chimiques observés.



Figure III. 1 Carte de localisations des forages de prélèvement

Les analyses des paramètres physiques et les éléments chimiques ont été faits par l'ADE de Ouargla.

a. Paramètres physiques

Le pH, la température, et la conductivité sont mesurés in situ au moyen d'appareillage de terrain avec une valise multi paramètres HANNA qui contient des sondes sélectives (pH mètre, conductivimètre).



Figure III. 2: Multi paramètres HANNA

2.1.1 Potentiel d'Hydrogène (pH) :

Le pH est la mesure de la concentration en protons (ion hydrogène ou H^+) dans une solution donnée.

Pour les eaux souterraines, le pH varie entre 7 et 8.5 et ne dépassent pas la norme (6.5 à 8.8).

2.1.2 Température (T) :

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. 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.

2.1.3 Conductivité électrique (CE) :

Elle est liée à la présence des espèces ioniques en solution, elle est proportionnelle au degré de minéralisation et varie en fonction de la température.

La variation de la minéralisation de l'eau est régie par plusieurs facteurs:

- Évaporation importante liée à l'approximation de la surface.
- Temps de séjour et échange eaux-encaissant.
- Sens générale d'écoulement de la nappe.
- Échanges avec nappes adjacentes.

Le lessivage des sols entraîne naturellement la dissolution d'un certain nombre de sel (bicarbonates, chlorures, sulfates, sodium....etc.) et provoque un accroissement de la conductivité.

b. Paramètres chimiques :

2.2. Ions majeurs

2.2.1 Calcium (Ca^{2+}) et Bicarbonates (HCO_3^-) :

L'apport atmosphérique en ces deux ions étant négligeable, leur teneur dans les eaux carbonatées a toujours une origine interne au système. Leur abondance relative est fonction de l'état du système calcocarbonique. On peut retenir parmi les différents facteurs qui contrôlent la teneur en Ca^{2+} et HCO_3^- :

- L'agressivité de l'eau qui entre dans le système, régie par sa teneur en CO_2 dissous et son pH (c'est elle qui détermine le potentiel de cette eau à dissoudre);
- Le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère. En effet, la dissolution étant contrôlée par la cinétique des réactions chimiques, un certain temps est nécessaire à sa réalisation.

Toutefois, même si la réaction chimique n'est pas terminée, la dissolution des carbonates commence dès le contact de l'eau avec la roche.

Pour obtenir la valeur des bicarbonates, on utilise la méthode de titrage. Les carbonates n'existent qu'à $\text{pH} > 8.3$, et les bicarbonates se trouvent si : $4.4 < \text{pH} < 8.3$. Il est facile de savoir au cours d'un dosage acidimétrique, lors d'une attaque acide, les carbonates se décomposent.

2.2.2 Magnésiums (Mg^{2+}) :

Les apports de magnésium par la pluie sont négligeables. La présence de Mg témoigne de la dissolution de dolomies, de calcaires ou éventuellement de marnes dolomitiques. L'acquisition de cet élément est lente (la cinétique de dissolution est longue, supérieure à celle des calcaires). Le magnésium est donc un bon indicateur d'eaux à temps de séjour prolongé dans l'aquifère.

Le principe d'analyse le magnésium est la méthode de titrage, après avoir versé un volume par ml de la solution d'EDTA jusqu'à ce qu'elle vire du rouge vin au bleu.



Figure III. 3: Méthode de titrage du magnésium Mg^{2+}

2.2.3 Potassium (K^+) et Sodium (Na^+) :

Ces ions sont généralement présents à de faibles teneurs dans les eaux, ils ne sont pas conservatifs. Leur origine est également principalement externe au système (apport atmosphérique).

Toutefois, ils peuvent aussi provenir soit de l'altération des minéraux silicatés dans l'aquifère. Soit d'échanges de cations avec les minéraux argileux ou des substances organiques.

Le dosage a été fait à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme. Le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) sont examinés à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme de précision de la marque IC9223 JENWAY, avec une précision inférieure à 0,2 parties par million (ppm), comme illustré dans la figure ci-dessous. Les réactifs utilisés consistent en des solutions étalons de chaque élément.



Figure III. 4: : Le spectrophotomètre à flamme, de marque JENWAY

2.2.4 Chlorures (Cl⁻) :

Ce sont des éléments conservatifs; leur origine est en générale exclusivement météorique. Les apports internes en Cl⁻ ont des origines facilement identifiables en fonction de la situation ou de la géologie des systèmes étudiés (Dépôts évaporitiques; Pollution anthropique: salage des routes, épandages, eaux usées...; Proximité d'une bordure littorale).

La lecture de concentration en chlorures est faite directement sur le potentiomètre.

Appareil utilisé :

- Titrions DMS 716 de marque Metrohm II,
- Une électrode combinée de type argent massif.



Figure III. 5: Titrions DMS 716 de marque Metrohm

2.2.5 Sulfates (SO_4^{2-}) :

La présence des ions de sulfate dans l'eau est liée essentiellement à la dissolution des formations gypseuses. Il y a des origines diverses :

- Origine interne au système : par oxydation des minéraux sulfurés présents dans les calcaires (pyrite) ou par dissolution de gypse ou d'anhydrite dans les terrains traversés.
- Origine biologique : la dégradation de la matière organique dans le sol qui produit des teneurs faibles en sulfates.

La méthode gravimétrique présentée est basée sur le principe de faire précipiter les sulfates sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum ($\text{Ba}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{BaSO}_4$).

3. Programmes informatiques :

L'interprétation des résultats des analyses physicochimiques a été réalisée par l'emploi des logiciels RockWorks 16 et Diagramme

1. **RockWorks16 :** Ce logiciel nous a servi de tracer les cartes de localisation des forages des prélèvements de la nappe.
2. **Diagramme:** Le logiciel Diagramme est un outil utilisé pour la représentation graphique des analyses chimiques des eaux souterraines ou de surface. Il permet de transformer les données analytiques en diagrammes structurés et interprétables, facilitant ainsi l'identification du faciès chimique de l'eau. Ce type de représentation graphique contribue à une meilleure compréhension des caractéristiques hydrochimiques des échantillons analysés.

3.Caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines :

3.1. Paramètres physico-chimiques :

L'étude physico-chimique a été réalisée à partir des données fournies par l'ADE. Les échantillons analysés ont été sélectionnés au sein de formations géologiques appartenant au Sénonien et Miocène, dans le but de caractériser la qualité des eaux souterraines et d'identifier les processus de minéralisation en jeu.

a) Potentiel d'hydrogène (pH) :

Pour les eaux souterraines de CT, le pH varie entre 7.50 et 8.13 et ne dépassent pas la norme d'OMS (6.5 à 8.8). Pour les eaux souterraines de CI, le pH varie entre 6 et 7.50.

b) Température (T) :

Il est difficile de savoir jusqu'à quelle profondeur les eaux peuvent s'enfoncer sous terre et de ce fait quelle pourrait être la température maximale. L'augmentation de pression permet à l'eau de circuler sous forme liquide à des températures supérieures à 100 °C.

Elle joue un rôle important dans l'augmentation de l'activité chimique, bactérienne et de l'évaporation des eaux. 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, la température augmente progressivement avec un gradient de 3 °C pour 100 m.

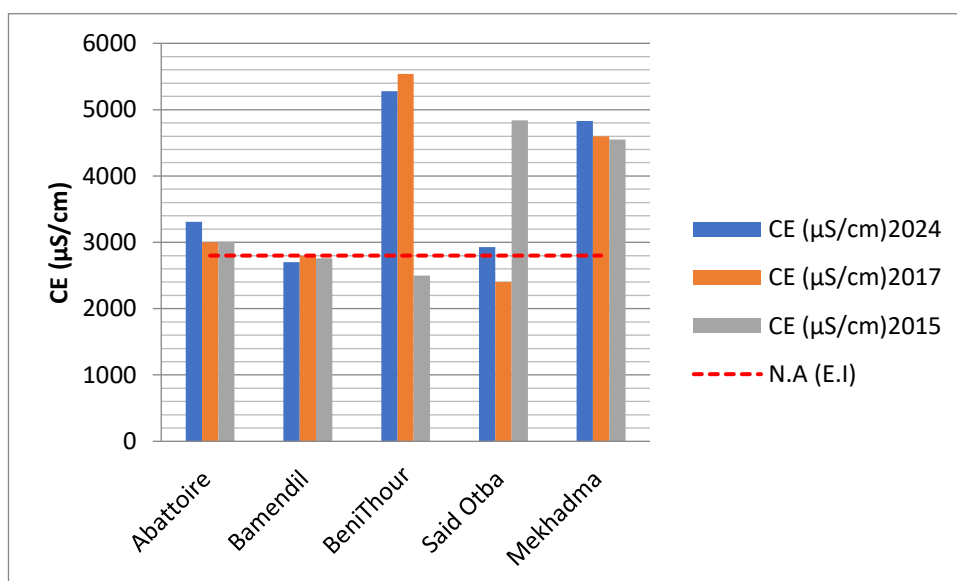
La température de l'eau du CT varie entre 25 et 35°C. L'eau du CI est caractérisée généralement par une température élevée qui varie entre 50 et 55°C.

c) Conductivité électrique (CE):

La conductivité électrique fait référence à la capacité d'une eau à conduire un courant électrique. Elle est déterminée par la concentration en substances dissoutes, la charge ionique, la capacité d'ionisation, la mobilité et la température de l'eau. Ainsi, la conductivité électrique permet d'évaluer le degré de minéralisation de l'eau. (Abdaoui et al.,2014 ; Nouayti et al.,2015).

La mesure de la conductivité électrique (CE) des eaux souterraines du Sénonien dans cinq points de prélèvement (fig. III. 6) montre des valeurs globalement supérieures à la norme recommandée par l'OMS (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées à BeniThour, atteignant plus de 5500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ en 2017, traduisant une minéralisation très marquée. Seul le point de Bamendil présente une CE relativement stable et conforme aux normes, indiquant une minéralisation modérée.

La tendance générale observée entre les années 2015, 2017 et 2024 montre une stabilité ou une légère augmentation des teneurs en sels dissous dans certains forages, notamment à Abattoire et Said Otba. Ces résultats reflètent une influence notable des conditions géologiques locales, combinées à une



surexploitation des ressources, conduisant à une augmentation de la concentration des éléments dissous. La qualité chimique de l'eau dans plusieurs zones demeure inappropriée à une utilisation directe pour l'alimentation en eau potable, sans traitement préalable de déminéralisation.

La conductivité électrique mesurée dans les eaux souterraines du CI varie de 2390 à 3000 $\mu\text{S/cm}$, révélant des niveaux de minéralisation variables selon les sites. Deux échantillons des forages d'El Hadeb 1 (3 000 $\mu\text{S/cm}$) et F El Hadeb 2 (2 900 $\mu\text{S/cm}$), dépassent la norme algérienne de potabilité fixée à 2 800 $\mu\text{S/cm}$, traduisant une charge ionique élevée. L'échantillon El-Khefdji atteint la limite maximale tolérée. À l'inverse, les forages d'Ain Elbaida et d'El Hadeb 3 présentent une conductivité électrique inférieure à la norme, indiquant une minéralisation modérée.

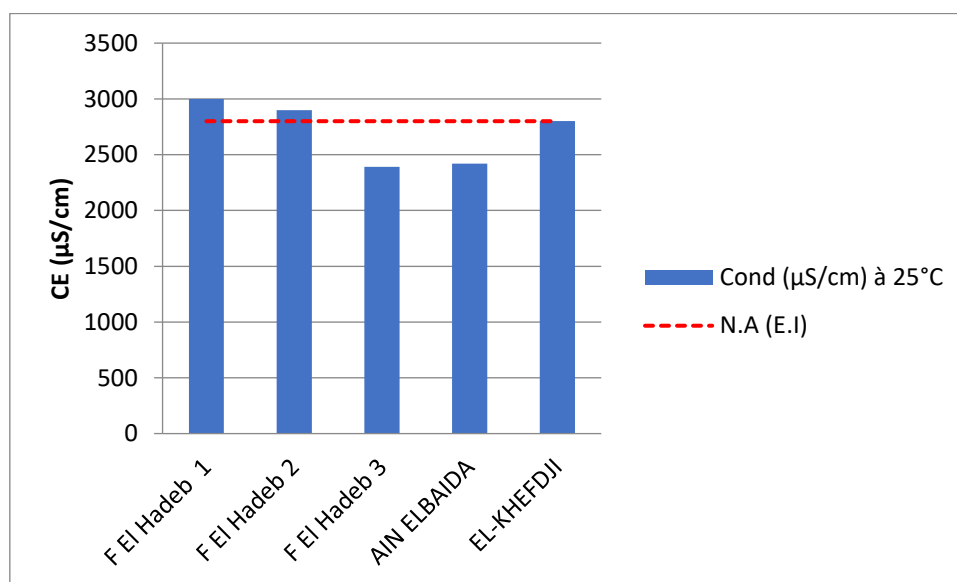


Figure III. 7: Variation de conductivité électrique des eaux du continentale intercalaire à Ouargla année 2024

d) Les cations majeurs :

a. Calcium Ca^{+2} :

L'analyse des concentrations en calcium (Ca^{2+}) dans les eaux souterraines entre 2015 et 2024 révèle une forte corrélation avec la géologie du Sénonien. Les forages comme Abattoire, Bamendil et Said Otba, avec des concentrations inférieures à la norme de 200 mg/L, indiquent une faible minéralisation, probablement en raison de formations géologiques moins riches en carbonates. En revanche, les forages de Beni Thour (312,6 mg/L en 2017) et Mekhadma (260,52 mg/L en 2015), avec des teneurs dépassant la norme, montrant l'influence des formations calcaires et dolomitiques du Sénonien, favorisant la

dissolution du calcium. Enfin, les piézomètres P030 à Sebkhath Sefioune et P043 à Ngoussa, avec des valeurs extrêmes 525 mg/L et 512,5 mg/L, indique un phénomène d'évaporation ou de salinisation intensifié par les caractéristiques géochimiques de la nappe phréatique.

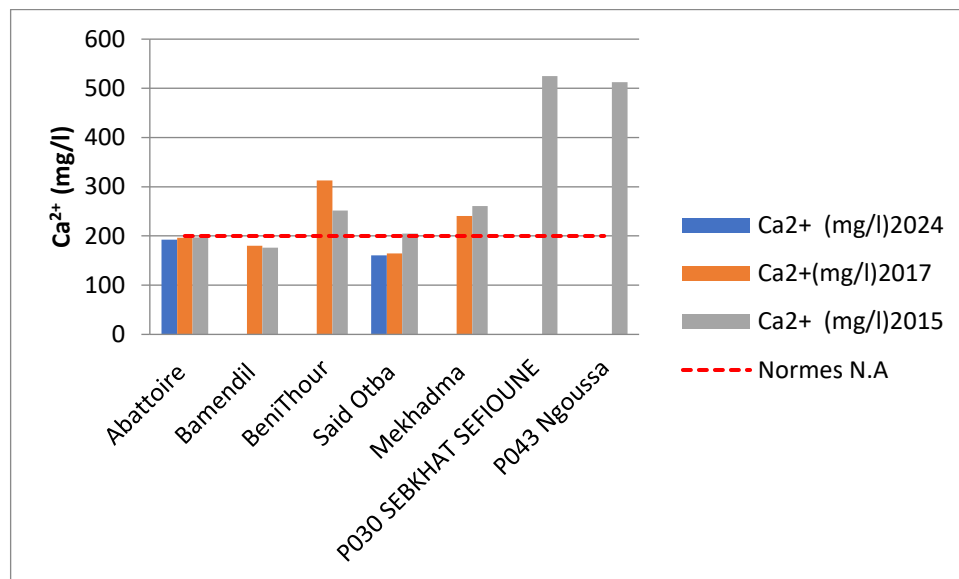
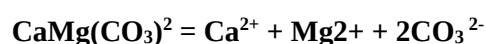


Figure III. 8: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en calcium (Ca²⁺) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015-2017-2024)

b. Le magnésium Mg²⁺ :

Cet élément provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium en l'occurrence ; la dolomite selon la relation suivante :



L'analyse des concentrations en magnésium (Mg²⁺) dans les eaux souterraines entre 2015 et 2024 met en évidence une variabilité marquée, en lien avec les caractéristiques géochimiques des formations sénoniennes. Les forages telles qu'Abattoire, Bamendil et Said Otba présentent des concentrations inférieures à la norme de potabilité de 150 mg/L, avec des valeurs respectives allant de 70,48 mg/L à 114,23 mg/L, traduisant une minéralisation modérée. Cette faible teneur pourrait s'expliquer par la présence de formations géologiques moins riches en dolomies ou en roches contenant du magnésium. En revanche, les forages de Beni Thour (192 mg/L en 2015) et Mekhadma (162,84 mg/L en 2024) affichent des dépassements notables par rapport à la norme, indiquant une interaction accrue avec des horizons dolomitiques du Sénonien, favorisant la libération du magnésium par altération ou dissolution. Enfin, les piézomètres à Sebkhath Sefioune (174,92 mg/L en 2015) et à Ngoussa (193,08 mg/L en 2015) présentent les valeurs les plus élevées, indiquant un processus de concentration lié à l'évaporation, à la

stagnation prolongée des eaux ou à l'influence de couches salines profondes caractéristiques des zones basses ou semi-fermées du bassin.

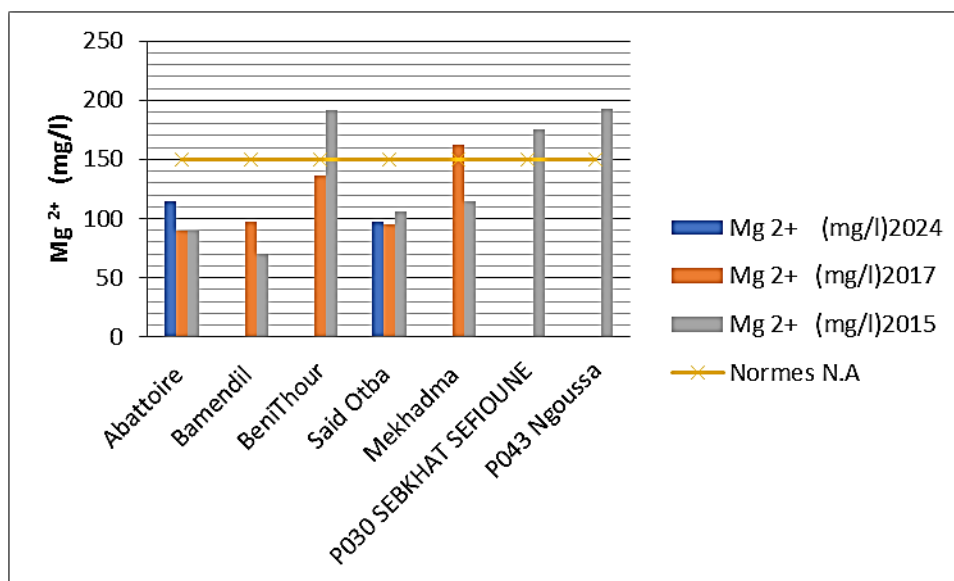
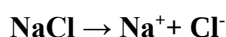


Figure III. 9: Histogramme variation spatio-temporelle des concentrations en magnésium Mg^{2+} dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

c. **Potassium (K^+) et Sodium (Na^+) :**

Ils peuvent provenir soit de l'altération des minéraux silicatés dans l'aquifère. Soit d'échanges de cations avec les minéraux argileux ou des substances organiques, et au lessivage des terrains évaporitiques. La dissolution des minéraux salifères se fait par la relation suivante :



L'analyse des concentrations en sodium (Na^+) dans les eaux souterraines entre 2015 et 2024 montre une salinité marquée dans l'ensemble des forages, avec des valeurs largement supérieures à la norme de potabilité de 200 mg/L. Les forages telles que le forage Abattoire et le forage Bamendil présentent des dépassements légers, traduisant une minéralisation croissante qui serait liée à une altération progressive des roches salifères du Sénonien ou à une contribution anthropique. Les forages de Beni Thour et Mekhadma montrent des valeurs nettement plus élevées, indiquant une interaction intense avec des formations géologiques riches en évaporites, notamment en halite. Ces teneurs confirment une dissolution active du sodium liée à la géochimie du Sénonien. Les piézomètres P030 à Sebkhath Sefioune (1271,74 mg/L en 2015) et P043 à Ngoussa (1478,26 mg/L en 2015) présentent les plus fortes concentrations, traduisant un phénomène d'accumulation salifère accentué par une évaporation intense et une stagnation prolongée dans les zones dépressionnaires.

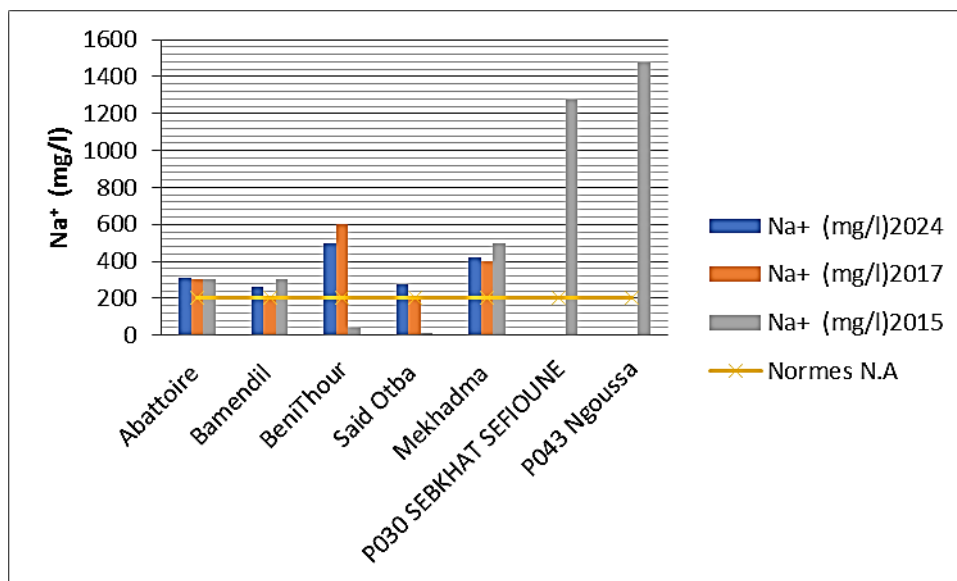


Figure III. 10: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Sodium (Na^+) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

L'analyse des concentrations en potassium (K^+) dans les eaux souterraines entre 2015 et 2024 montre des écarts significatifs entre les stations, en lien avec la géologie sénonienne et les apports externes. Les forages telles que le forage Abattoire et le forage Bamendil affichent des valeurs proches ou légèrement supérieures à la norme de 20 mg/L, suggérant une contribution modérée des roches potassiques ou une influence limitée des activités anthropiques. En revanche, les stations de Beni Thour et Said Otba présentent des pics anormalement élevés par rapport à la norme, traduisant probablement un apport ponctuel lié à la lixiviation d'engrais, à la décomposition de matières organiques ou à des apports anthropiques directs. Le forage de Mekhadma, avec des valeurs stables autour de 27 mg/L (en 2015 et 2024) et 23 mg/L (en 2017), montre une minéralisation modérée mais persistante. Enfin, les piézomètres de Sebkhath Sefioune (114,74 mg/L en 2015) et Ngoussa (83,33 mg/L en 2015) présentent des concentrations très élevées.

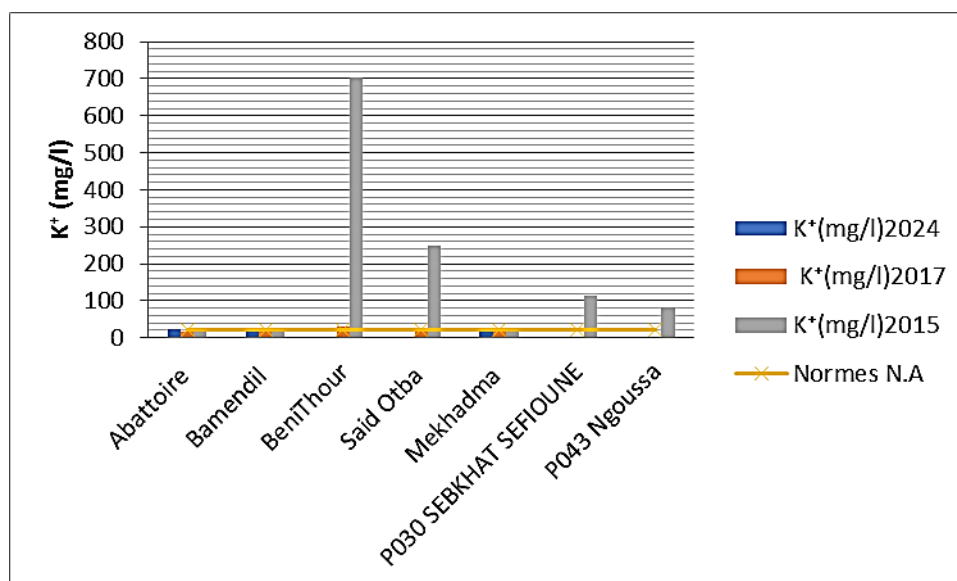


Figure III. 11: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en potassium (K^+) dans le CT et la nappe phréatique au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

e) Les anions majeurs :

a. Chlorures (Cl^-) :

Les chlorures sont des ions (Cl^-) présents naturellement dans l'eau, et peuvent provenir de diverses sources, notamment les océans, les précipitations, les roches et les sols, ainsi que des activités humaines. L'analyse des concentrations en chlorures (Cl^-) entre 2015 et 2024 montre une salinité élevée des eaux souterraines, en lien direct avec la géologie. Les forages Abattoire (629,42 mg/L en 2017), Bamendil (579,86 mg/L en 2015) et Said Otba (606,52 mg/L en 2024) présentent un faible dépassement de la norme de 500 mg/L, traduisant une minéralisation progressive. Par contre, à Beni Thour (1325 mg/L en 2015) et à Mekhadma (1119,74 mg/L en 2015) les analyses montrent des concentrations très élevées, indiquant une forte influence des formations évaporitiques. Les concentrations les plus extrêmes sont observées dans la nappe phréatique à Sebkhath Sefioune (1830,99 mg/L) et à Ngoussa (1788,73 mg/L), reflétant une accumulation massive de sels liée à l'évaporation intense, caractéristique des zones basses et fermées où les chlorures s'accumulent sous l'effet d'un drainage limité et d'un climat aride.

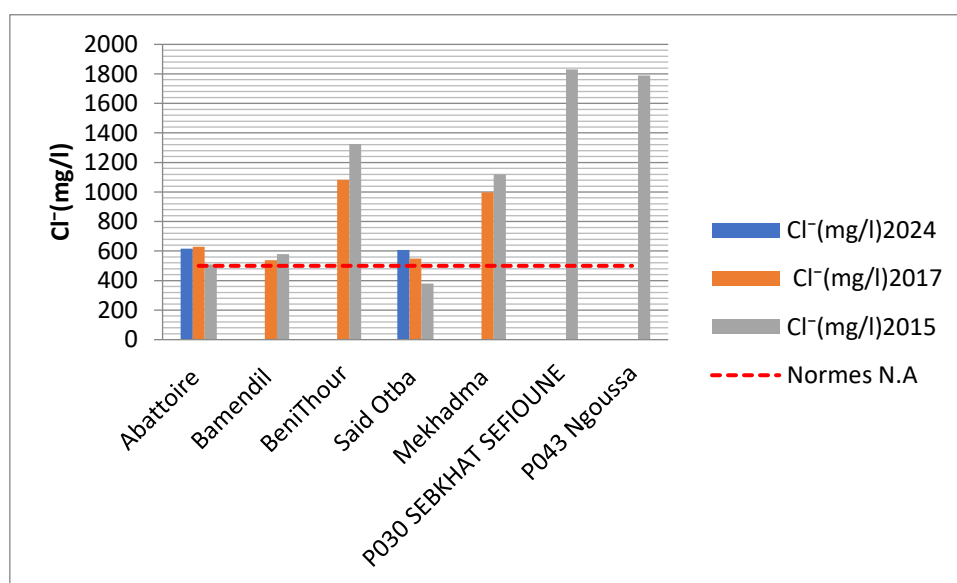


Figure III. 12: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Chlorures (Cl^-) dans le CT et la nappe phréatique au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

b. Sulfates (SO_4^{2-}) :

La présence des ions de sulfate dans l'eau est liée essentiellement à la dissolution des formations gypseuses.

Ils peuvent provenir de l'oxydation des minéraux sulfurés présent dans les calcaires (pyrite) ou par dissolution de gypse ou d'anhydrite dans les terrains traversés. La dégradation de la matière organique produit des teneurs faibles en sulfates.

Les teneurs en sulfates (SO_4^{2-}) dépassent largement la norme de 400 mg/L dans plusieurs forages, montrant une minéralisation forte liée à la nature géologique des formations. Les concentrations les plus élevées sont observées à Beni Thour (1200 mg/L), Said Otba (881,25 mg/L) et Mekhadma (780 mg/L), en lien avec la présence de gypse et d'anhydrite. Abattoire et Bamendil montrent des valeurs modérées, oscillant autour de la norme. À l'inverse, pour la nappe phréatique à Sebkhath Sefioune (244,79 mg/L) et à Ngoussa (265,63 mg/L), les sulfates présentent des concentrations plus faibles, indiquant une moindre influence des roches sulfatées. Ces résultats confirment localement l'influence de la lithologie et de l'évaporation.

Pour la nappe du CI, les concentrations en SO_4^{2-} varient entre 232 mg/L et 744 mg/L, avec une moyenne de 430 mg/L. Plusieurs échantillons des forages : El Hadeb 1, 2 et 3, ainsi que celui d'El-Khefdji dépassent la norme de 400 mg/L, ce qui indique une minéralisation élevée en sulfates. Ces fortes concentrations, aurait une origine géologique (présence de formations évaporitiques riches en gypse) ou une activité humaine. Cette concentration élevée nécessite une vigilance particulière, car une forte teneur en sulfates peut affecter la potabilité de l'eau.

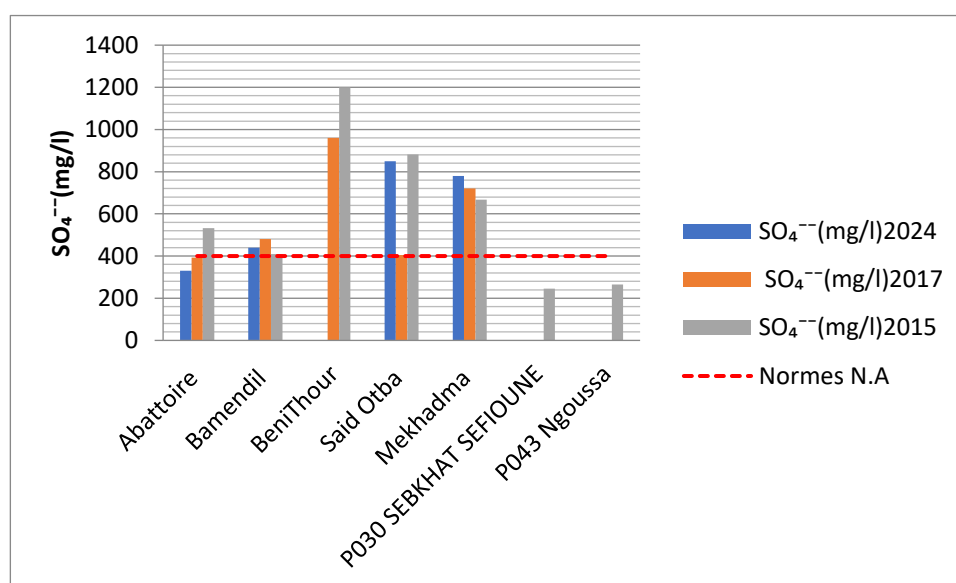


Figure III. 13: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

c. Bicarbonates (HCO_3^-) :

La dissolution des formations carbonatées par l'eau chargée en gaz carbonique, est le principe d'origine des bicarbonates dans les eaux souterraines, l'équation de dissolution est donnée comme suit :



Les teneurs en HCO_3^- sont très élevées à Beni Thour (1200 mg/L) et Mekhadma (372,6 mg/L), indiquant une forte dissolution des carbonates. En revanche, Sebkhat Sefioune (244,79 mg/L) et Ngoussa (265,63mg/L) montrent des concentrations extrêmement faibles, indiquant un appauvrissement marqué.

Les concentrations en HCO_3^- de la nappe du CI varient de 126,06 mg/L à 200,33 mg/L, avec une moyenne de 167,35 mg/L. Ces valeurs sont inférieures à la norme de 250 mg/L, indiquant que la teneur en bicarbonates est faible à moyenne et répond ainsi aux normes de potabilité.

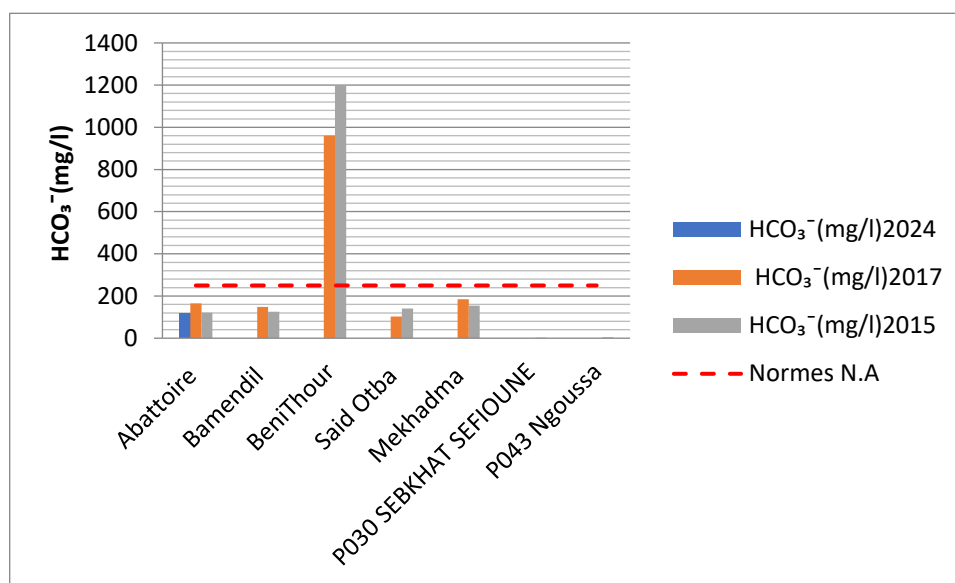


Figure III. 14: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Bicarbonates (HCO_3^-) dans le CT et nappe phréatique au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

Nitrate NO_3^- :

Les concentrations en NO_3^- sont dans l'ensemble inférieures à la norme (50 mg/L). Les plus fortes teneurs sont observées à Said Otba (47 mg/L) et à Bamendil (46,5 mg/L).

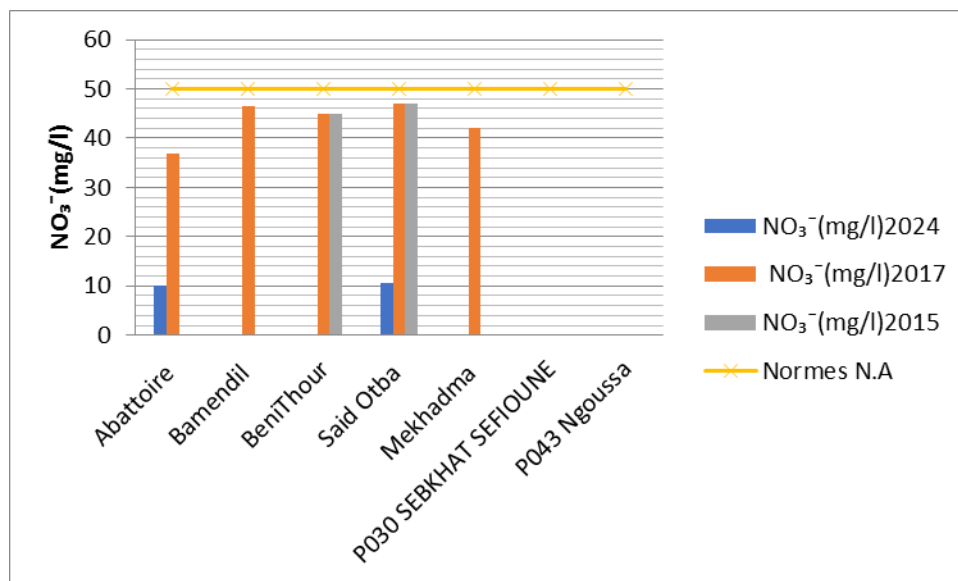


Figure III. 15: : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Nitrate NO_3^- dans le CT au cours des trois années (2015, 2017 et 2024)

3.2. Paramètres chimiques de CI :

I. Les cations majeurs :

a. Calcium Ca^{+2} :

Les concentrations en calcium dans les échantillons analysés varient entre 160,31 mg/L (El-Khefdji) et 196,39 mg/L (F El Hadeb 2). Toutes les valeurs observées demeurent inférieures à la limite maximale recommandée par les normes algériennes de potabilité, soit 200 mg/L.

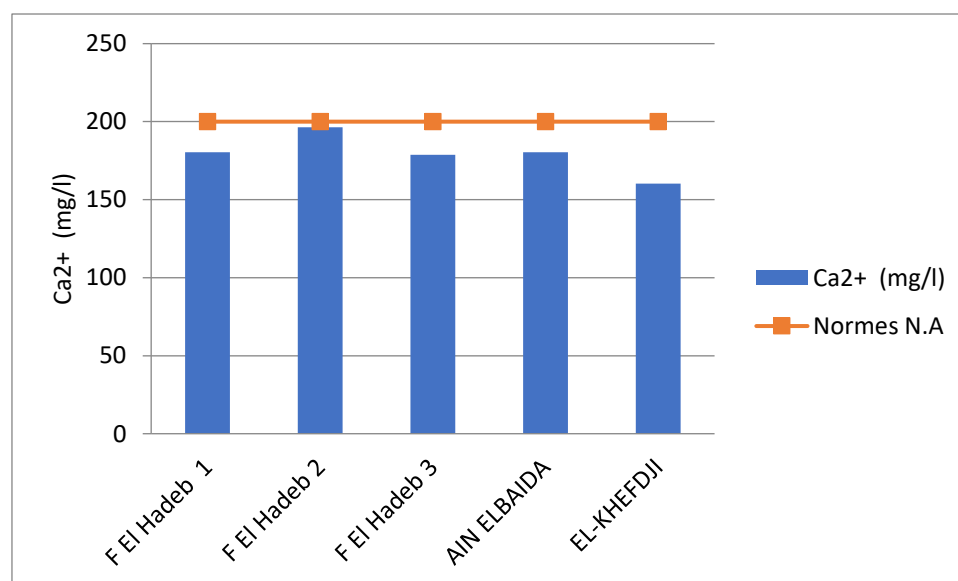


Figure III. 16: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en calcium (Ca^{2+}) dans le CI dans l'année 2024

Ces résultats indiquent que l'ensemble des forages respecte la norme en vigueur, suggérant une minéralisation calcique modérée, compatible avec une utilisation pour la consommation humaine.

b. Le magnésium Mg^{2+} :

Les teneurs en magnésium oscillent entre 63,19 mg/L (Aïn El Baïda) et 109,35 mg/L (El-Khefdji), ce qui reste largement inférieur à la norme de potabilité fixée à 150 mg/L.

Tous les forages présentent des concentrations en magnésium conformes aux normes, ce qui témoigne d'une dureté raisonnable et d'une absence d'impact sanitaire direct associé à cet élément.

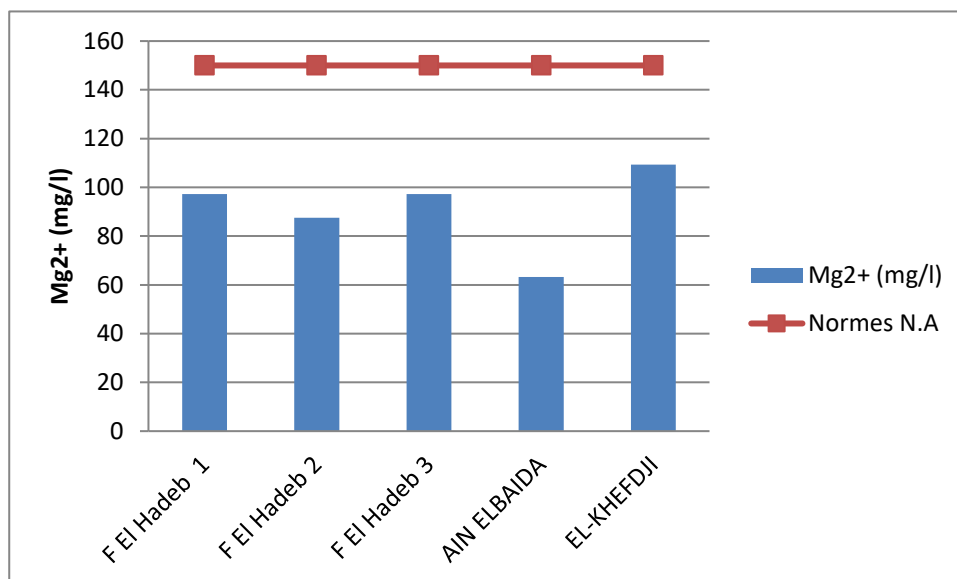


Figure III. 17: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en magnésium (Mg^{2+}) dans le CI de l'année 2024

c. Potassium (K^+) et Sodium (Na^+) :

Les teneurs en sodium varient de 150 mg/L (F El Hadeb 3) à 300 mg/L (Aïn El Baïda et El-Khefdji). Trois forages (F El Hadeb 1 et 2, ainsi que F El Hadeb 3) respectent la norme (≤ 200 mg/L), tandis que Aïn El Baïda et El-Khefdji présentent des valeurs nettement supérieures.

La non-conformité observée à Aïn El Baïda et El-Khefdji indique une minéralisation sodique excessive.

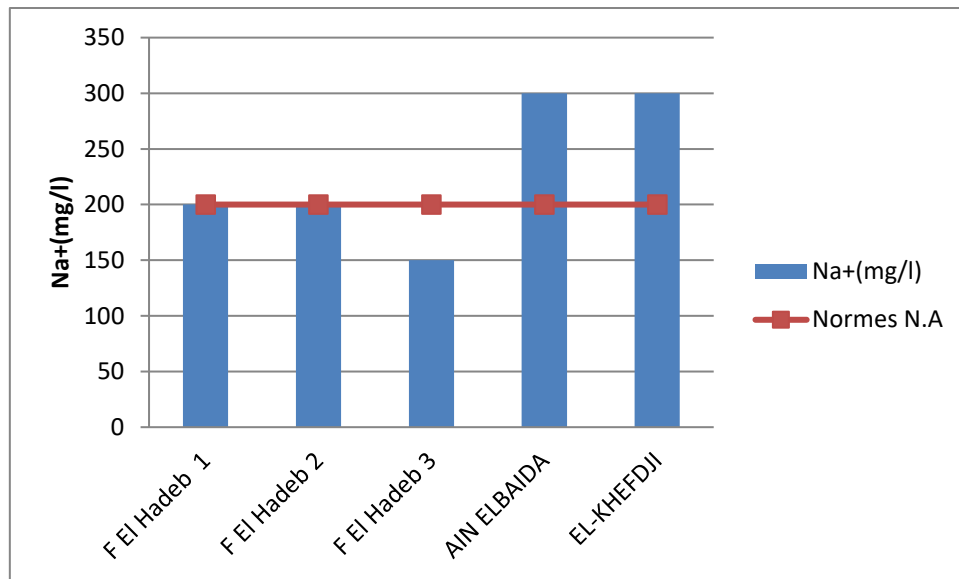


Figure III. 18: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Sodium (Na^+) dans le CI de l'année 2024

Les concentrations en potassium s'échelonnent entre 18 mg/L (Aïn El Baïda) et 35 mg/L (F El Hadeb 3). À l'exception d'Aïn El Baïda, tous les échantillons dépassent la norme de 20 mg/L, La majorité des forages montre une teneur élevée en K^+ .

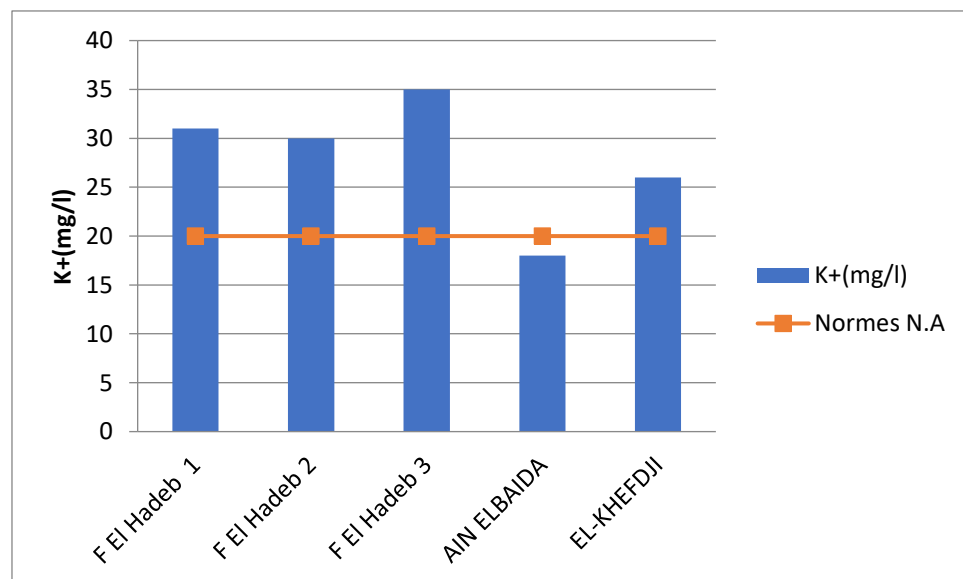


Figure III. 19: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Potassium (K^+) dans le CI de l'année 2024

II. Les anions majeurs

a. Chlorures (Cl^-) :

Les concentrations en ions chlorure varient de 399,9 mg/L (F El Hadeb 3) à 830,28 mg/L (Aïn El Baïda). Seul le forage F El Hadeb 3 répond à la norme de 500 mg/L, alors que tous les autres dépassent ce seuil.

Ces fortes concentrations, en particulier à Aïn El Baïda et El-Khefdji, traduisent une salinisation avancée du milieu aquifère, affectant la potabilité de l'eau et pouvant entraîner un goût désagréable

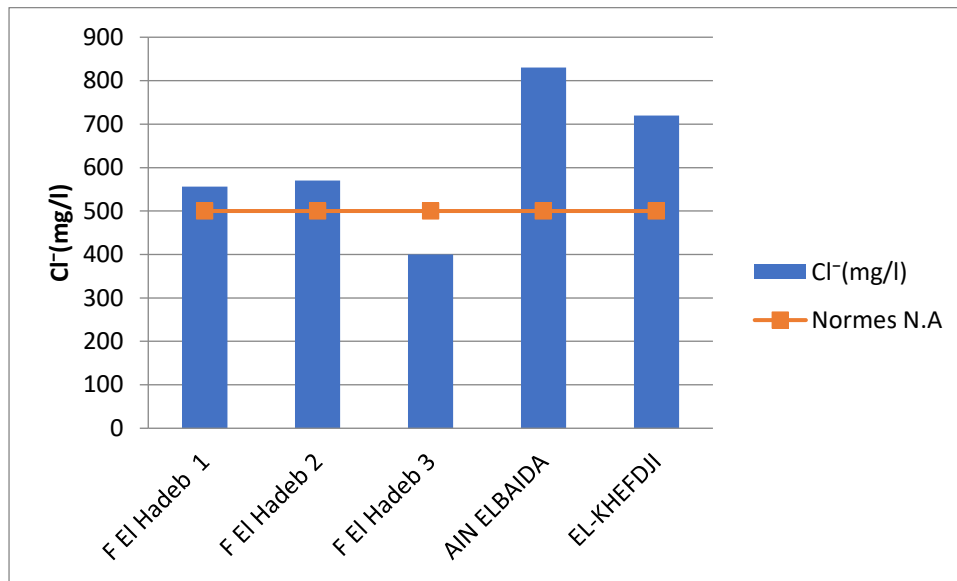


Figure III. 20 : Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Chlorures (Cl^-) dans le CI de l'année 2024

b. Sulfates (SO_4^{2-}) :

Les concentrations en sulfates s'étendent de 232 mg/L (Aïn El Baïda) à 744 mg/L (El-Khefdji). Les forages F El Hadeb 1, 2, 3 ainsi que El-Khefdji dépassent la norme de 400 mg/L, contrairement à Aïn El Baïda, qui demeure conforme.

Les résultats des analyses dans quatre forages montrent une minéralisation sulfatée élevée, probablement liée à la dissolution de gypse ou d'anhydrite. Cela peut engendrer des effets laxatifs en cas de consommation prolongée.

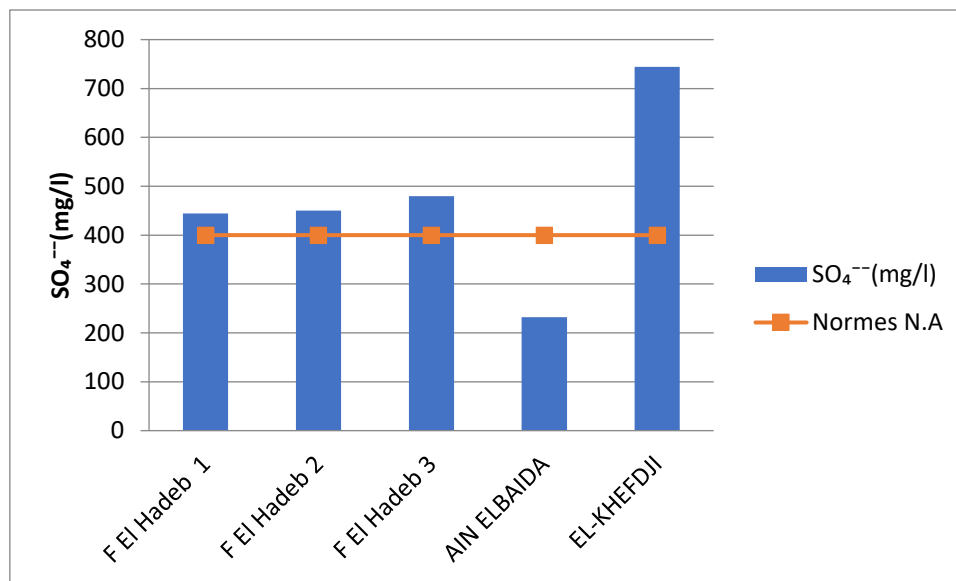


Figure III. 21: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Sulfates (SO_4^{2-}) dans le CI de l'année 2024

d. Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les teneurs en bicarbonates sont comprises entre 126,06 mg/L (Aïn El Baïda) et 200,33 mg/L (El-Khefdji), avec l'ensemble des valeurs inférieures à la norme de 250 mg/L.

Tous les échantillons répondent à la norme pour cet ion. Les teneurs observées reflètent une minéralisation bicarbonatée modérée, indiquant une bonne stabilité du pH et une interaction naturelle modérée avec les roches carbonatées.

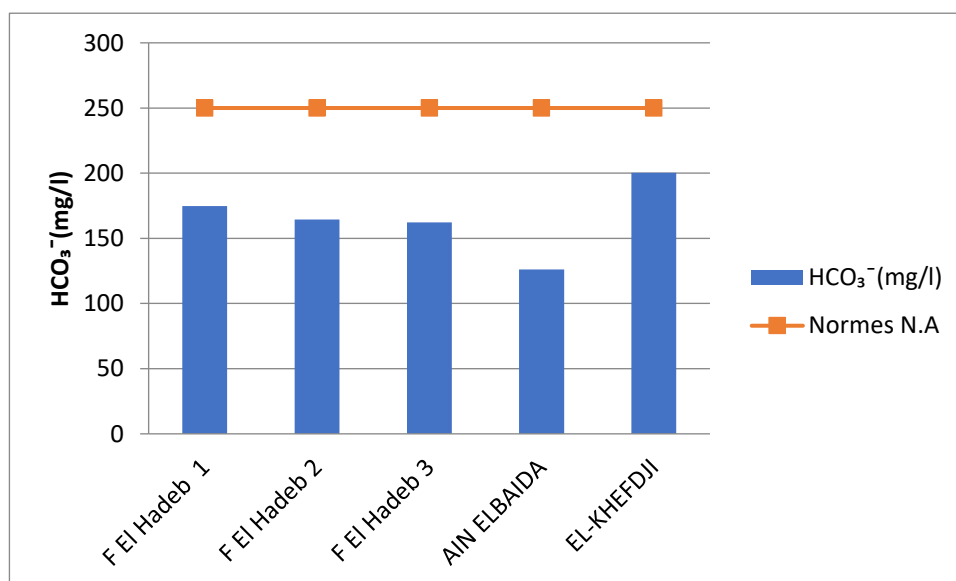


Figure III. 22: Histogramme de variation spatio-temporelle des concentrations en Bicarbonates (HCO_3^-) dans le CI de l'année 2024

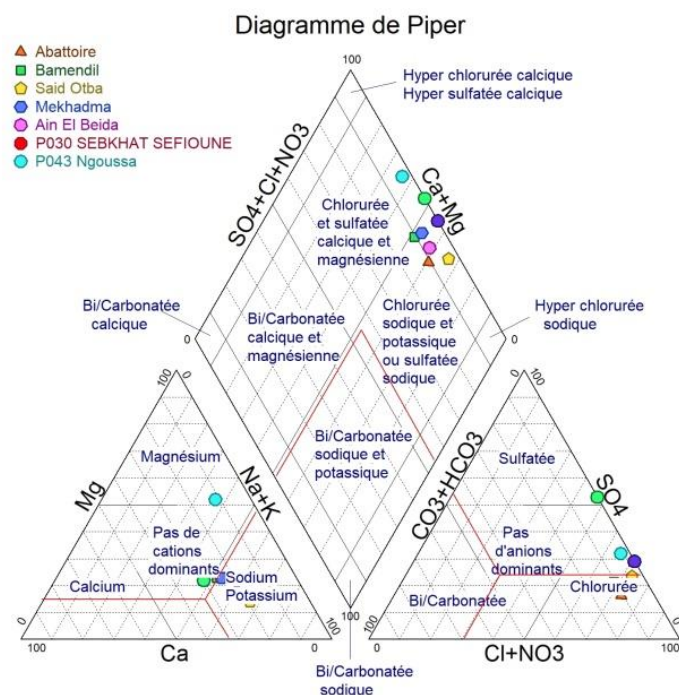


Figure III. 24: Faciès chimiques des eaux du sénonien et de la nappe phréatique de la zone étude campagne 2017

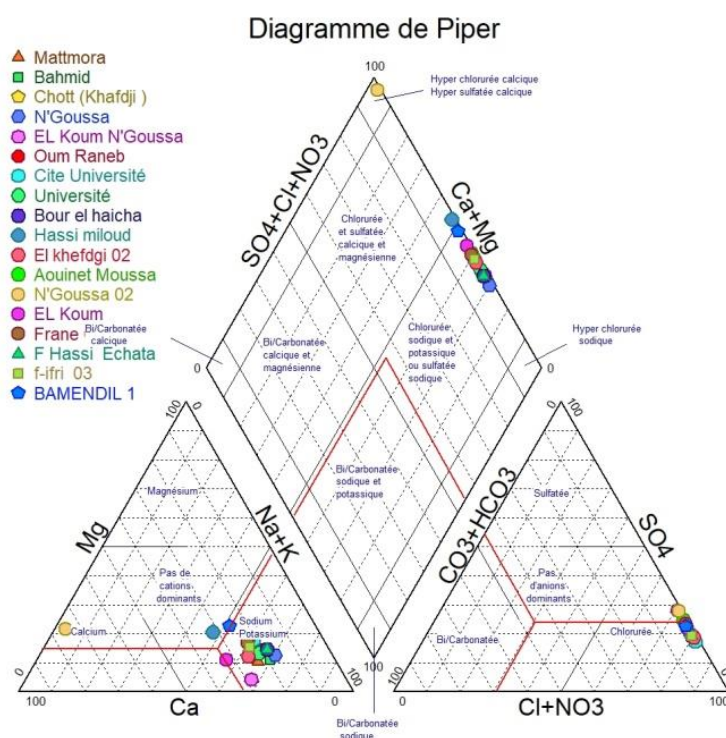


Figure III. 25: Faciès chimiques des eaux du sénonien de la zone étude campagne 2024

L'observation du diagramme de Piper (FigIII. 26), montre que le faciès chimique dominant est sulfaté sodique pour les cinq échantillon d'eau étudiés de continentale intercalaire albien.

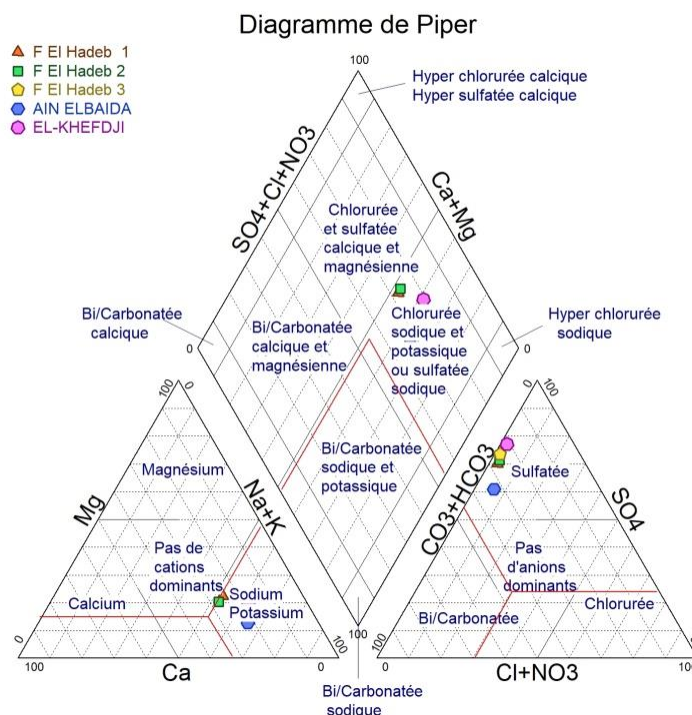
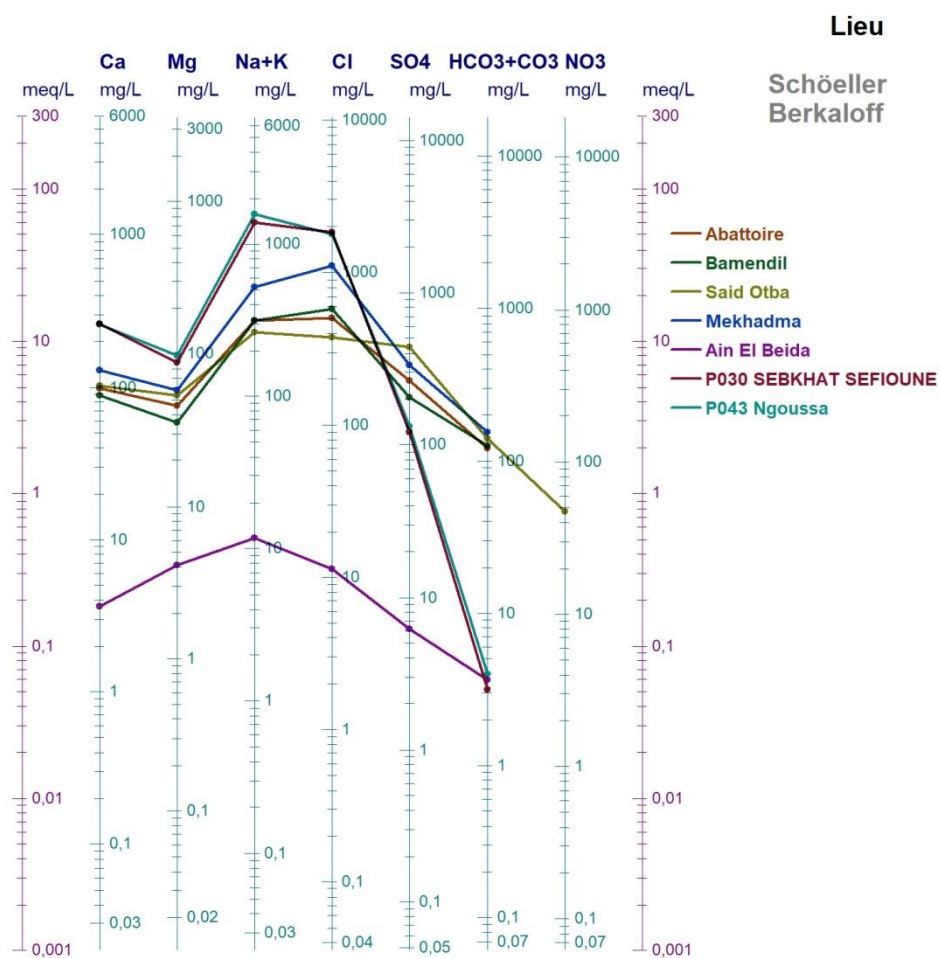


Figure III. 26: Faciès chimiques des eaux du CI de la zone étude campagne 2024

e. Diagramme de SCHOELLER et BERKALOFF :

Ce diagramme à échelle logarithmique, permet de distinguer par simple lecture des échelles, les concentrations des ions dominants et donc de déduire rapidement les différentes familles chimiques, le report des teneurs sur le diagramme, permet de distinguer les faciès chimiques .

L'interprétation comparative des diagrammes de Schoeller pour les années 2015, 2017 et 2024 révèle une stabilité hydrochimique des échantillons d'eau souterraine dans la région étudiée. Les courbes des profils ioniques montrent peu de variations significatives dans le temps, témoignant d'un système géochimique relativement stable.



**Figure III. 27: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF des nappes du sénonien
et phréatique campagne 2015**

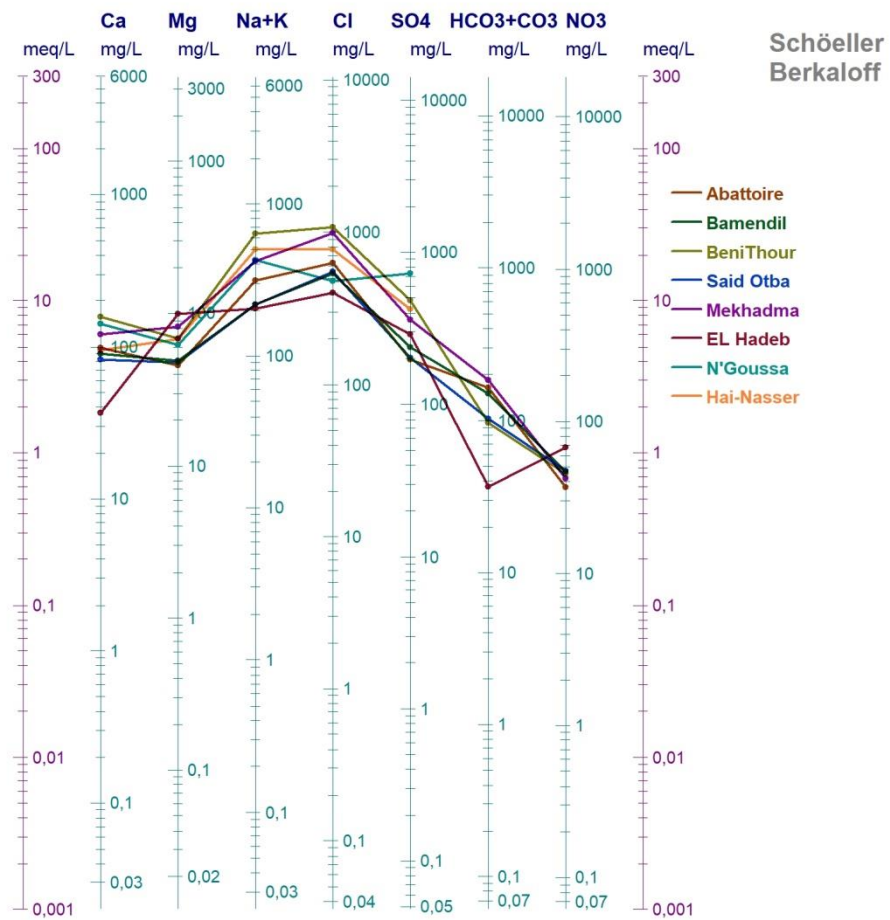
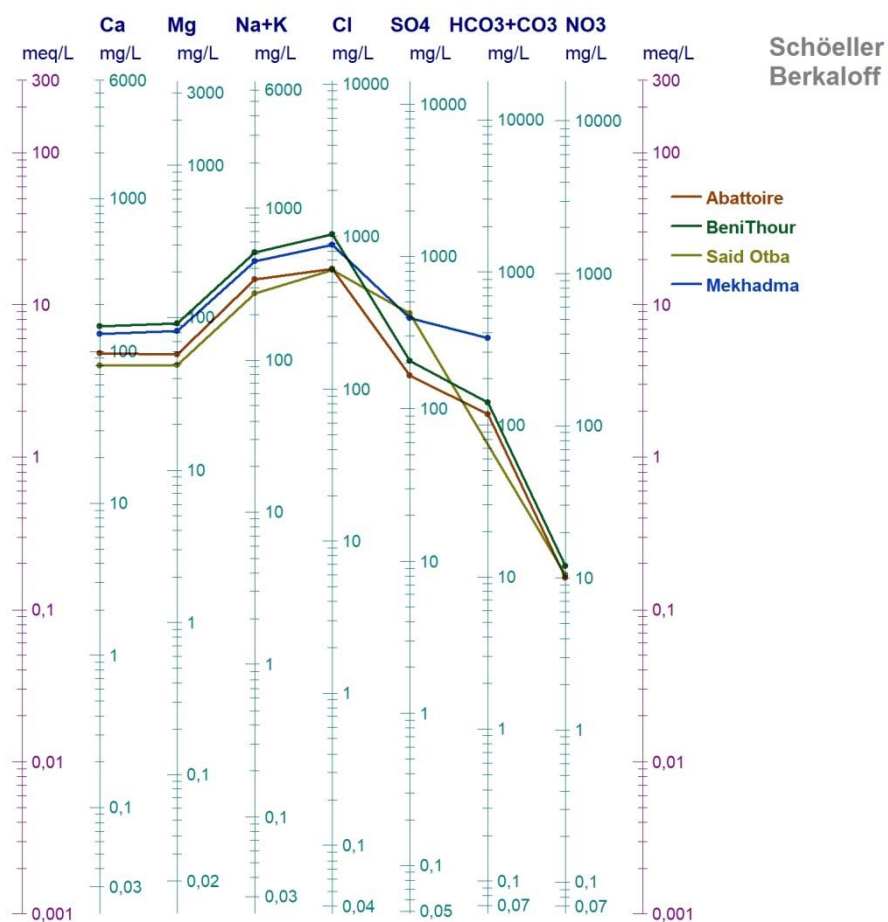
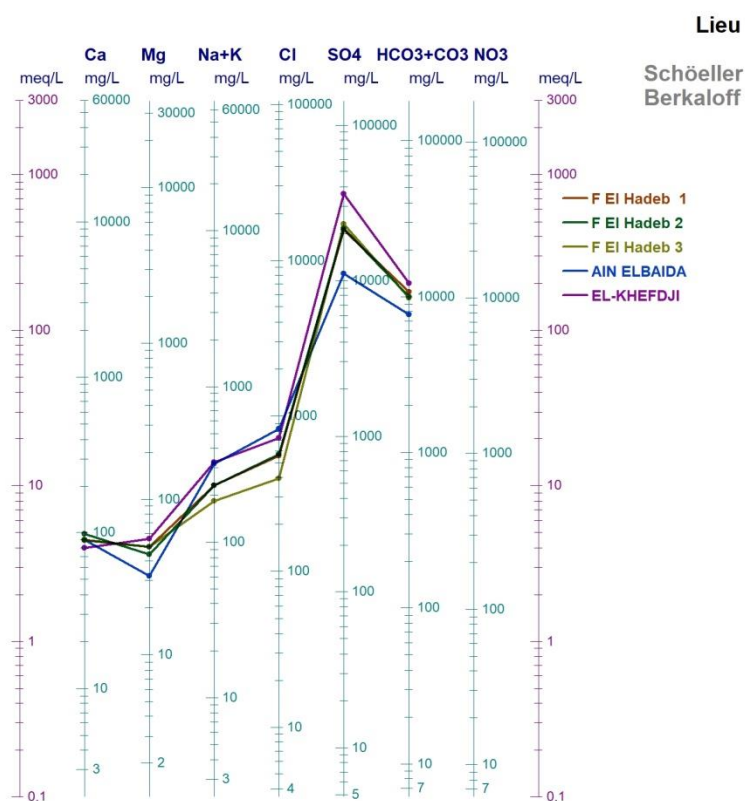


Figure III. 28: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF des nappes du sénonien
campagne 2017



**Figure III. 29: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF des nappes du sénonien
campagne 2024**

L'analyse des trois diagrammes de Schoeller réalisés pour les années 2015, 2017 et 2024 montre une stabilité temporelle des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines étudiées. Dans l'ensemble des cas, les profils ioniques traduisent un faciès chimique de type chloruré sodique, marqué par la dominance des ions chlorure (Cl^-) et sodium (Na^+).



**Figure III. 30: Diagramme de SCHOELLER BARKALOFF de la nappes du CI
campagne 2024**

L'analyse des cinq diagrammes de Piper et Schoeller réalisés pour les points F El Hadeb 1, F El Hadeb 2, F El Hadeb 3, Ain El Baïda et El-Khefdji a 2024 montre une stabilité spatiale des caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines du Continental Intercalaire. Dans l'ensemble des cas, les profils ioniques traduisent un faciès chimique de type sulfaté sodique,

11. Conclusion :

L'analyse physico-chimique des eaux du Continental Intercalaire (CI) révèle une forte minéralisation, accompagnée de températures élevées (50–55 °C) et d'une conductivité souvent supérieure aux normes de potabilité. Le faciès chimique, majoritairement sulfaté-sodique, témoigne d'un long temps de séjour des eaux, d'une faible recharge et d'interactions intenses avec les formations évaporitiques profondes. Ce faciès, observé de manière homogène dans tous les échantillons, illustre l'influence prépondérante du substrat géologique albien sur la composition ionique.

En revanche, les eaux du Complexe Terminal (CT), plus superficielles, présentent généralement un faciès moins évolué, dominé par les compositions chloruré-calciques ou bicarbonatées mixtes, ce qui traduit une recharge plus récente et une interaction géologique plus limitée.

La nappe phréatique, quant à elle, se distingue par une grande variabilité spatiale de sa composition physico-chimique, avec une minéralisation modérée à élever selon les secteurs étudiés. Son faciès, essentiellement chloruré-calcique ou sulfaté-calcique, reflète à la fois l'influence naturelle du milieu et les impacts anthropiques. Dans ce contexte saharien, le climat aride, caractérisé par de faibles précipitations et une évaporation intense, favorise la remontée capillaire des eaux et la concentration progressive des sels en surface, provoquant ainsi un phénomène de salinisation. Ce processus est par ailleurs accentué par l'irrigation avec des eaux souvent chargées en sels, ce qui contribue à la dégradation qualitative de la ressource.

L'ensemble des résultats met en lumière une évolution géochimique différenciée entre ces trois niveaux aquifères du système SASS, soulignant l'importance d'une gestion adaptée, fondée sur les dynamiques propres à chaque nappe, pour assurer la durabilité des ressources en eau.

Conclusion et recommandations

Au terme de ce travail consacré à l'étude de la qualité des nappes du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) dans la région de Ouargla, il apparaît clairement que cette ressource en eau, bien que précieuse et stratégique pour le développement de cette zone aride, est soumise à de fortes pressions tant naturelles qu'anthropiques.

L'analyse des données physico-chimiques des nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT), collectées entre 2015, 2017 et 2024 a permis de mettre en évidence une variabilité spatiale et temporelle significative de la qualité des eaux souterraines. Les résultats obtenus montrent que les eaux du CI présentent un degré de minéralisation élevé, souvent au-delà des normes fixées par l'OMS, notamment en sodium, chlorures et sulfates, témoignant d'une forte interaction avec les formations évaporitiques profondes. Cette eau est fossile, peu renouvelable.

Les eaux du CT, bien que présentant une meilleure qualité relative dans certaines zones, révèlent néanmoins une tendance à la dégradation progressive, en raison d'une surexploitation croissante, d'un temps de séjour variable et de phénomènes de salinisation accentués par l'aridité du climat régional. L'influence des facteurs géologiques, tels que la nature des formations sénoniennes et mio-pliocènes, combinée à l'évaporation intense et aux remontées capillaires, constitue un facteur clé dans la détérioration progressive de la qualité des eaux.

Cette situation est d'autant plus préoccupante que le climat actuel, caractérisé par une hausse continue des températures, une baisse de l'humidité spécifique et une évapotranspiration accrue, limite considérablement les possibilités de recharge naturelle des nappes. Les observations récentes entre 2021 et 2024 confirment cette tendance, avec une accentuation des conditions de sécheresse et un accroissement du stress hydrique.

Sur le plan méthodologique, l'utilisation d'outils numériques comme RockWorks pour la modélisation litho-stratigraphique, Diagramme pour l'interprétation des analyses chimiques a permis d'enrichir l'analyse et de produire des représentations visuelles précises de la situation hydrogéologique à Ouargla.

Ainsi, cette étude a mis en lumière les vulnérabilités des nappes du SASS dans cette région. Elle souligne l'urgence de mettre en œuvre des stratégies intégrées de gestion durable de l'eau, incluant :

- Le suivi régulier de la qualité des eaux par des campagnes d'analyses systématiques ;
- La réduction des usages non maîtrisés, notamment agricoles et urbains ;
- L'introduction de technologies de traitement adaptées (deminéralisation, recharge artificielle) ;
- Et enfin, la sensibilisation des usagers à la préservation de cette ressource non renouvelable.

Références bibliographiques

- [1]. ADE (Algérienne Des Eaux). *Fiches d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT)*. Données internes, 2015–2024.
- [2]. ABH Ouargla (Agence de Bassin Hydrographique). *Fiches techniques et cartes hydrogéologiques de la région de Ouargla*. Données internes.
- [3]. ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques). *Logs stratigraphiques, forages et cartes hydrogéologiques de la région d'Ouargla*. Rapport technique, 2004.
- [4]. Boussaada, N., Bouselsal, B., Benhamida, S. A., Hammad, N. et Kharroubi, M. (2023). « Geochemistry and Water Quality Assessment of Continental Intercalary Aquifer in Ouargla Region (Sahara, Algeria) ». *Journal of Ecological Engineering*. <https://doi.org/10.12911/22998993/156832>
- [5]. Bouzidi, A. et Djebbar, Y. (2016). *État de la qualité des eaux souterraines dans la région de Ouargla*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [6]. Cornet, A. (1961). *Étude hydrogéologique du Sahara septentrional*. Rapport technique, UNESCO.
- [7]. Cornet, A. (1964). *Carte géologique de la région de Ouargla*. ANRH. Modifiée par Zeddouri, A. (2010) et Satouh, A. et al. (2021).
- [8]. Dubost, J. (1992). *Hydrogeological Characteristics of the Continental Intercalary Aquifer (CI)*. Rapport technique.
- [9]. Fehdi, C., Achour, S. et Hani, A. (2013). « Ressources en eau fossile dans le SASS : Estimation et gestion durable ». *Revue scientifique de l'eau et de l'environnement*, n°27, pp. 15–24.
- [10]. Goudjil, N. E. (2024). *Géochimie des eaux de la nappe superficielle de la région de Ouargla*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [11]. Hadjkouider, M. (2019). *Géochimie et minéralogie des formations et des eaux de la nappe superficielle à Ouargla*. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [12]. Hammad, N., Bouselsal, B., Boussaada, N., Satouh, A. et Lakhdari, A. (2023). « Application of Water Quality Index to Assess the Potability of the Phreatic Aquifer in Ouargla (Algeria) ». *Article scientifique*.
- [13]. Kharroubi, M., Bouselsal, B. et Hadj Said, S. (2024). *Contribution à l'étude hydrogéologique de l'aquifère du Complexe Terminal de la cuvette de Ouargla*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [14]. Khouldi, F. (2016). *Aspects quantitatifs et qualitatifs de la nappe du Continental Intercalaire (CI) de la région de Ouargla*. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [15]. Nezli, I. (2008). *Caractéristiques lithologiques et piézométriques de la nappe phréatique dans la région de Ouargla*. Données internes, Université de Ouargla.
- [16]. Satouh, A., Zeddouri, A. et al. (2021). *Modélisation géologique et corrélation des profils stratigraphiques à Ouargla*. Rapport académique, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [17]. UNESCO. (1972). *Hydrogeological Map of the Northern Sahara Aquifer System (SASS)*. Paris : Division of Water Sciences, UNESCO.
- [18]. Zeddouri, A. (2010). *Modélisation géologique de la cuvette de Ouargla*. Université de Ouargla, Département des Sciences de la Terre.

Sites internet:

- ClimateEngine / TerraClimate. <https://www.climateengine.org>
- D-Maps – Carte géographique de Ouargla. <https://d-maps.com>