



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

Université Echahid Hamma Lakhdar El-oued

كلية علوم الطبيعة والحياة

Faculté de Nature et Sciences de la Vie

قسم البيولوجيا

Département de biologie.

Mémoire de Master

En vue de l'obtenir un diplôme de Master Académique en Sciences Biologique

Spécialité : Biodiversité Et Environnement

THEME

Evaluation hydrochimique par l'indice de qualité des eaux souterraines et le SIG : cas de l'aquifère du Complexe Terminal d'El-Oued (sud-est Algérien)

Présentée par : **Aya ALLAL**

Devant le jury:

Présidente:	Soumaya MERABET	Univ. Eloued
Promotrice:	Aziza HAMMADI	Univ. Eloued
Examineur:	Abd Elhak DJOUDI	Univ. Eloued

Année universitaire :2024/2025



Remerciements

Louange à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé le succès dans cette présentation. Cette recherche nous a permis de progresser et d'élever notre statut parmi nous pays .

remercions Dieu pour ce succès.

*J'adresse mes sincères remerciements et ma gratitude à mon honorable encadrante **Hammadi Aziza**, enseignante à la Faculté des Sciences de la nature et de la Vie de l'Université Hamma Lakhdar El-Oued. Merci pour votre patience, vos conseils et votre confiance en mes capacités. Vos encouragements ont eu un impact énorme sur cette réalisation. Vous avez mon plus grand respect et ma gratitude.*

Aux distingués membres du comité de discussion, Dr. Soumiya MERABET et Dr Abdelhak JOUDI J'exprime ma profonde gratitude et mon appréciation pour votre aimable acceptation de discuter de ce travail, ainsi que pour les commentaires précis et les précieux conseils que vous avez fournis et qui ont contribué à enrichir son contenu. Vous avez mes sincères remerciements et mon grand respect.

C'est avec fierté et gratitude que j'adresse mes remerciements et ma gratitude à ma chère famille, qui a toujours été une source de soutien et de force dans ma vie.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre gratitude à la Direction Algérienne de l'Eau pour son soutien continu et sa coopération fructueuse, qui ont joué un rôle majeur dans le succès de notre travail et la réalisation de nos objectifs. Nous apprécions grandement vos efforts pour améliorer les services d'eau et préserver les ressources en eau.

J'adresse mes plus profonds remerciements et ma gratitude à tous mes chers professeurs qui ont été mes compagnons depuis l'école primaire jusqu'à l'université. Que Dieu vous récompense et bénisse vos efforts et les place dans la balance de vos bonnes actions.

Toutes mes salutations à mes collègues de la deuxième promotion du Master Biodiversité et Environnement pour l'année 2025.

Aya allal





Dédicace

À ceux dont les prières ont été la clé de ma réussite, à mon pilier dans chaque étape de ma vie... À ma mère et à mon père, j'offre le fruit de mes efforts et de ma réussite, en signe de reconnaissance et d'amour éternel. en priant Dieu de prolonger vos vies, de vous bénir, et de vous accorder santé et sérénité durables.

À mes sœurs Anaïs, Sabrina et à mon frère Yahia, merci pour l'amour... et les bagarres aussi ! Vous êtes ma famille unique.

À mon grand-père et ma grand-mère, je vous souhaite une longue vie pleine de santé et de bonheur. Votre sagesse et votre tendresse sont un trésor précieux dans ma vie.

À mon grand-père Amar, que Dieu lui fasse miséricorde. Son souvenir restera gravé à jamais dans mon cœur.

À mes tantes Farida et Kahina, Mounia, merci pour votre affection et votre soutien constant. Votre gentillesse a toujours été pour moi une grande source de réconfort.

À mon oncle Kamal, Nouredine, Farid, Hakim et Fares et tous mes autres oncles, merci pour tout l'amour que vous m'avez donné depuis mon enfance. Votre affection a toujours compté beaucoup pour moi.

À mon oncle Abdelkrim et à Mohamed, je vous aime et je vous souhaite bonheur et sérénité dans votre vie.

À mes amies Rayan, Aya et Sana, merci pour votre présence, votre soutien et les moments précieux partagés ensemble. Votre amitié est un véritable trésor dans ma vie.

À toute la famille Allal et Saïb

Aya

Résumé

Pour caractériser les propriétés hydrochimiques et évaluer la qualité spatiale, les diagrammes de Piper, Stabler et Richards ont été utilisés, ainsi que l'indice de qualité des eaux souterraines (GQI) et les systèmes d'information géographique (SIG), et la cartographie des zones les plus touchées.

Notre étude s'est concentrée sur l'évaluation hydrochimique des eaux souterraines dans une zone composée de trois aquifères : superficielle, le complexe terminal (CT) et aquifère continental

intercalaire. Cette zone est caractérisée par un environnement géologique riche en minéraux évaporitiques, ce qui influence significativement la qualité et la composition des eaux souterraines. Cette évaluation nous a permis d'identifier des profils chimiques dominés par les composants évaporitiques.

Mots clés : Évaluation hydrochimique, Systèmes d'information géographique (SIG), Indice de qualité de l'eau (IGQ), Aquifère du complexe terminal, Minéraux évaporitiques, Qualité des eaux souterraines.

Abstract

To characterize hydrochemical properties and assess spatial quality, Piper, Stabler and Richards diagrams were used, as well as the Groundwater Quality Index (GQI) and Geographic Information Systems (GIS), and mapping of the most affected areas.

Our study focused on the hydrochemical assessment of groundwater in an area composed of three aquifers: the superficial, the terminal complex (TC), and the continental intercalary aquifer. This area is characterized by a geological environment rich in evaporite minerals, which significantly influences groundwater quality and composition. This assessment allowed us to identify chemical profiles dominated by evaporite components.

Keywords: Hydrochemical Assessment, Geographic, Information Systems (GIS), Water Quality Index (WQI), Terminal Complex Aquifer, Evaporitic Minerals, Groundwater Quality.

ملخص

لتحديد خصائص الهيدروكيميائية وتقييم الجودة المكانية، تم استخدام مخططات بايبر وستابلر وريتشاردز، إلى جانب مؤشر جودة المياه الجوفية (GQI) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS)، ورسم خرائط المناطق الأكثر تضررا .

ركزت دراستنا على التقييم الهيدروكيميائي للمياه الجوفية في منطقة تتكوّن من ثلاث طبقات: الطبقة السطحية، المعقدة الطرفية (TC)، والطبقة القارية البيئية. تتميز هذه المنطقة ببيئة جيولوجية غنية بالمعادن المتبخرة، مما يؤثر بشكل كبير على جودة وتركيب المياه الجوفية. وقد سمح لنا هذا التقييم بتحديد المظاهر الكيميائية التي تهيمن عليها مكونات التبخر.

الكلمات الرئيسية: التقييم الهيدروكيميائي، نظم المعلومات الجغرافية (SIG)، مؤشر جودة المياه (IGQ)، طبقة المياه الجوفية المعقدة، المعادن المتبخرة، جودة المياه الجوفية.

Liste des abréviations

A	
ADE	L'Algérienne Des Eaux
ANRH	L'agence Nationale Des Ressources Hydriques
APHA	American Public Health Association
C	
CI	Continental Intercalaire
CT	Complexe Terminal
D	
DRE	Direction Des Ressources En Eau
DHW	Downs Hoel Water
E	
EPA	Environmental Protection Agency.
EDTA	Ethylenediaminetetraacetic Acid
I	
IQE	Indice de qualité de l'eau
INM	Institut National De La Meteorologie
M	
MRE	Ministère des Ressources en Eau.
O	
ONM	Office National de la Météorologie
OSS	L'Observatoire du Sahara et du Sahel
P	
PSEAU	Programme Solidarité Eau
S	
SAR	Rapport d'adsorption de Sodium
U	
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
W	
WHO	World Health Organization

Liste des figures

N°	Les chapitres	Page
Chapire I : Caractéristiques naturelles et environnementales de la zone d'étude		
01	Carte de situation géographique de la zone d'étude	7
02	Plan Géologique de Grand Erg Oriental	13
03	La colonne litho stratigraphique du forage F1	15
05	Coupe géologique N°01	21
06	Coupe géologique N°02	22
07	Coupe géologique N°03	22
08	Coupe géologique N°04	23
09	Coupe hydrogéologique à travers le Sahara El-Oued.	24
Chapitre II : Matériel et méthodes		
01	Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau	32
02	Titration du calcium (Ca ⁺²)	34
03	Dosage du chlorure (Cl)	36
04	Matériel utilisé et virage de couleur lors de la titration du TAC	38
Chapitre III : Résultats et discussion		
01	Histogramme de pH dans des forages de CT	43
02	Histogramme de TDS dans des forages de CT	46
03	Histogramme de la conductivité électrique (CE) dans des forage de CT	47
04	Histogramme de la concentration en calcium dans des forages de CT	48
05	Histogramme de la concentration en Magnésium dans des forages de CT	49
06	Histogramme de la concentration en Sodium dans des forages de CT	50
07	Histogramme de la concentration en Potassium dans des forages de CT	51
08	Histogramme de la concentration en Chlorure dans des forages de CT	52

09	Histogramme de la concentration en Sulfates dans des forages de CT	53
10	Histogramme de la concentration en Bicarbonates dans des forages de CT	54
11	Histogramme de la concentration en Nitrate dans des forages de CT	56
12	Projection des résultats des analyses chimiques des échantillons des eaux souterraines sur le diagramme de Piper	58
13	Représentations graphiques de classification de faciès chimique selon Stabler	62
14	Diagramme de Richards des eaux souterraines	66
15	Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité de l'eau	43

Liste des tableaux

N°	Titre	Page
I.1	Les compositions lithologiques de la région d'étude	18
I.2	Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued	25
II.1	évaluation de la qualité des eaux d'irrigation	40
III.1	Poids des paramètres utilisés dans le calcul de l'indice IQE	60
III.2	IQE et état de la qualité de l'eau correspondant	64

Sommaire	Page
Remerciements	II
Dédicace	III
Résumé	IV
Abstract	V
ملخص	VI
Liste des abréviations	VII
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XII
Introduction générale	1
Chapitre I: Caractéristique naturelles et environnementales de la zone d'étude	
I.1. la situation géographique	6
1.2. Situation Economique	8
I.3. végétation	8
I.4. Topographie et Géomorphologie	9
I.5. Climatologie	10
I.5.1. Le climat général de la wilaya d'El-Oued (2020-2024)	10
I.5.2. Température	11
I.5.3. Précipitations	11
I.5.4. Humidité relative	11

I.5.5. Evaporation	11
I.5.6.. vents	12
I.5.7. Durée d'ensoleillement	12
I.6. Contexte géologique	12
I.6.1. La Plate-forme Saharienne	13
I.6.2. Stratigraphie régionale	14
I.6.3. Géomorphologie de sous sol	18
I.6.4. analyse des logs des forages	21
I.7. Réseau hydrographique	23
I.7.1. Les accumulations d'eau temporaires :	24
I.8. Hydrogéologie	24
I.8.1. Nappe phréatique	25
I.8.2. L'aquifère du Complexe Terminal (CT)	26
I.8.3. L'aquifère du Continental Intercalaire (CI)	27
Chapitre II: Matériels et méthodes	
II.1. But de l'étude hydrochimique	30
II.2. Conditions et mode d'échantillonnage	30
II.3. Prélèvement	30
II.4. Arc Gis	31
II.5. Méthode d'analyses	33
II.6. Analyses physico-chimiques	33

II.6.1. Paramètre chimique	33
II.7. Méthodologie de calcul de l'indice de qualité de l'eau	38
Chapitre III: Résultats et discussion	
III.1. Caractéristiques physico-chimiques et analyses statistiques des eaux du Complexe Terminal	43
III.1.1. Le Potentiel d'hydrogène pH	43
III.1.2. Total des solides dissous TDS	44
III.1.3. La conductivité électrique	45
III.1.4. Calcium	46
III.1.5. Magnésium	47
III.1.6. Sodium	48
III.1.7. Potassium	49
III.1.8. Chlorure	50
III.1.9. Sulfates	51
III.1.10. Bicarbonates	52
III.1.11. Nitrate	53
III.2. Identification des faciès chimiques	54
III.2.1. Diagramme de piper	54
III.2.2. Diagramme de Stabler	57
III.3. Aptitude des eaux à l'irrigation	59
III.4. Indice de qualité de l'eau (IQE)	62

III.4.1. Classification de l'indice de qualité de l'eau	63
Conclusion générale	67
Référence bibliographique	71

The background of the page is a high-speed photograph of water splashing, creating a dynamic and refreshing visual. The water is captured in various stages of movement, with droplets and streams of water in shades of light blue and white against a white background. The splashes are most prominent at the top and bottom edges, framing the central text.

Introduction générale

L'eau est une ressource vitale pour la vie, essentielle à la production alimentaire, à la santé et à la durabilité. Dans les régions arides, les eaux souterraines deviennent cruciales en tant que principale source d'eau potable et d'irrigation, jouant un rôle clé dans le développement social et économique (**Messa, 2016 ; Régier, 2019 ; Belghoul & Kebb, 2020**).

Des rapports publiés par des organisations internationales, telles que l'Organisation mondiale de la santé (**OMS**), l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (**UNESCO**) et l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (**FAO**), Plus de deux milliards de personnes n'ont pas accès à l'eau potable et quatre milliards sont confrontés chaque année à une pénurie d'eau. La pollution et la surexploitation des ressources en eau exacerbent ces défis.

L'Algérie est confrontée à la rareté de l'eau et à la dégradation de sa qualité, en particulier dans ses régions désertiques, qui représentent plus de 87 % de son territoire (**PSEAU, 2013**). Le pays dépend fortement des eaux souterraines provenant de grands aquifères comme le Continental Intercalaire et le Terminal Complex pour répondre à ses besoins (**FAO, 2022**). Cependant, avec l'exploitation accrue de ces ressources depuis 1970, des problèmes tels que la baisse du niveau des eaux souterraines et l'augmentation de la salinité sont apparus, en particulier dans des zones comme Adrar et El-Oued (**Boualam, 2016 ; MRE, 2021 ; Ouarekh, 2022**).

Province d'El-Oued, située au sud-est de l'Algérie, est l'une des régions désertiques entièrement tributaires des eaux souterraines en raison de son climat aride et de ses faibles précipitations. La région d'El-Oued abrite trois niveaux d'eaux souterraines : l'aquifère superficiel, le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI). La croissance démographique et l'expansion agricole ont entraîné une exploitation excessive et incontrôlée de ces ressources, entraînant une baisse de la qualité de l'eau et une remontée des nappes phréatiques, peu profondes. Cette situation a nécessité l'exploitation de sources d'eaux souterraines plus profondes, dans un contexte de surconsommation manifeste, notamment dans le secteur agricole, soulignant l'urgence d'une gestion durable de ces ressources vitales (**Derradji & Khechana, 2014**).

Cette recherche vise à évaluer la détérioration de la qualité des eaux du Complexe Terminal et à identifier les facteurs naturels et anthropiques responsable de cette dégradation.

Sur cette base, la recherche aborde les questions suivantes :

- ✚ Quels paramètres physiques et chimiques affectent le plus significativement la qualité de l'eau ?
- ✚ Quelle est l'adéquation actuelle des eaux souterraines aux divers usages dans la zone d'étude ?
- ✚ Et quels sont les principaux facteurs à l'origine de la dégradation de la qualité des eaux souterraines dans la région ?
- ✚ Comment le SIG peut-il aider à identifier les zones polluées ?

Pour répondre à ces questions, l'objectif de cette étude est d'évaluer la qualité des eaux du Complexe Terminal à l'aide d'outils hydrochimiques et statistiques. Cela implique de mener une campagne d'échantillonnage sur le terrain et des analyses en laboratoire, d'interpréter les données à l'aide de diagrammes classiques tels que (Piper) et (Stabler) et de modéliser l'indice de qualité de l'eau (IQE) pour cartographier l'état général de la qualité de l'eau dans la zone d'étude. Sur le plan méthodologique, la recherche combine des analyses physiques et chimiques en laboratoire avec le traitement de données spatiales via (SIG) et l'utilisation d'outils statistiques pour examiner les relations entre les paramètres de qualité de l'eau. L'indice de qualité de l'eau (WQI) a été utilisé pour évaluer la qualité de l'eau, et des systèmes d'information géographique (SIG) ont été utilisés pour analyser la répartition spatiale de la dégradation de l'eau et identifier les zones touchées.

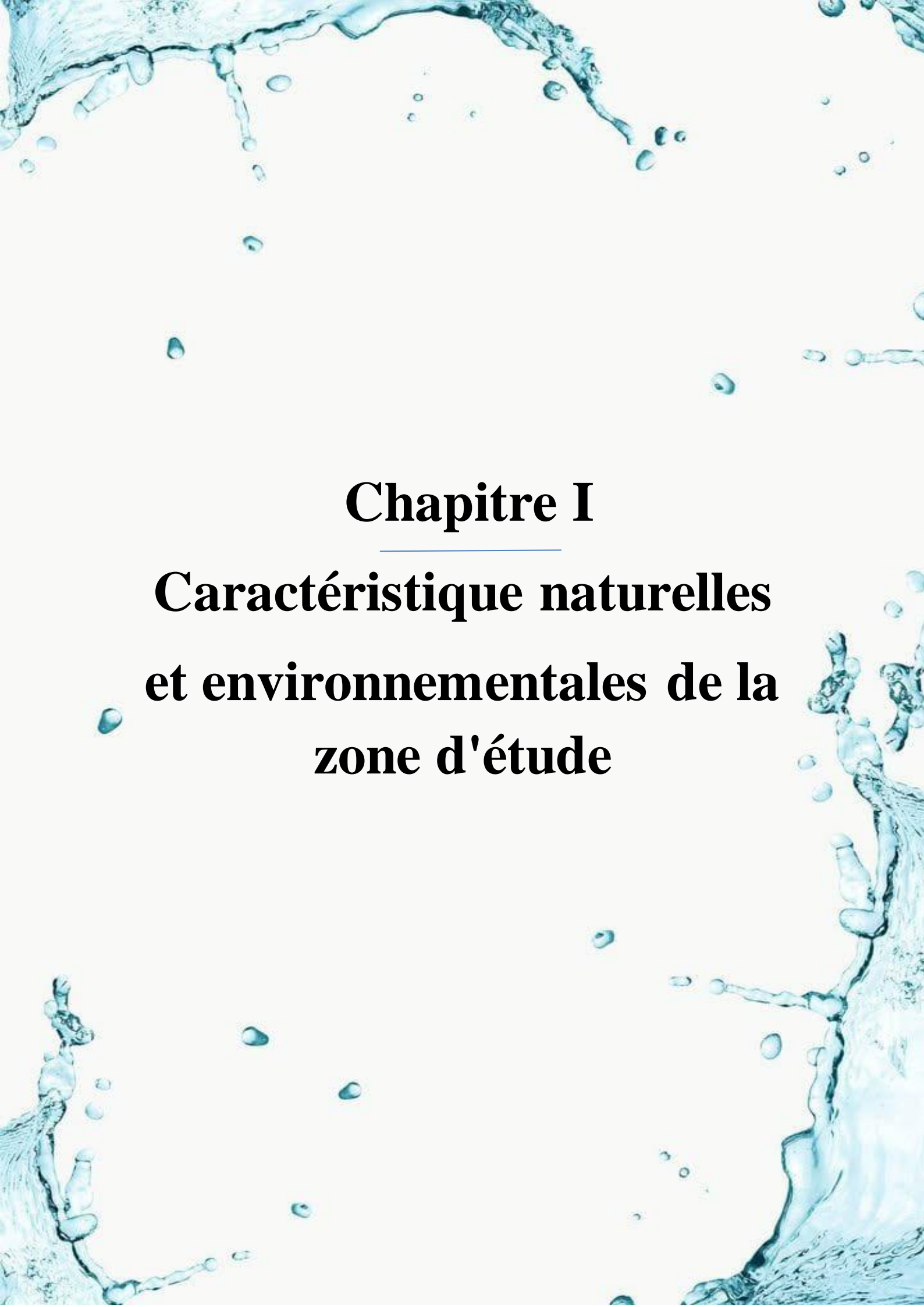
Ce travail fournit une base de données fiable sur la qualité des eaux souterraines dans la région et contribue à une compréhension plus approfondie des processus d'influence, soutenant ainsi la gestion durable des ressources en eau, la protection de l'environnement et la prise de décision efficace en matière de planification de l'eau.

Dans le but de traiter de manière approfondie la problématique de recherche, ce mémoire est organisé en trois chapitres principaux :

Le premier chapitre : Caractéristiques naturelles et environnementales de la zone d'étude Ce chapitre fournit un détail des caractéristiques géographiques, climatiques, géologiques et hydrogéologiques de la région d'El-Oued.

Le deuxième chapitre : matériels et méthodes décrit les différentes techniques analytiques utilisées.

Le troisième chapitre : est consacré à l'analyse des résultats, à leur discussion et à leur comparaison avec des études antérieures.

The background of the slide is a high-speed photograph of water splashing, creating a dynamic and refreshing visual. The water is captured in various stages of movement, with droplets and streams of water scattered across the frame. The color is a clear, bright blue, and the lighting highlights the texture and movement of the liquid.

Chapitre I

Caractéristique naturelles et environnementales de la zone d'étude

I.1. la situation géographique

La wilaya d'El-Oued (Fig. 01) est située au sud-est de l'Algérie, dans la région saharienne, et a été érigée en wilaya en 1984. Elle couvre une superficie de 37 652 km², (Zine, et al., 2022). Elle se trouve à environ 650 km au sud-est d'Alger et 350 km à l'ouest de Gabès (Tunisie), avec une population de 750 840 habitants (estimation fin 2013) répartie à travers 30 communes regroupées dans 12 daïras.(Mimmi & Kaoudja, 2021).

- Suite au nouveau découpage administratif, publié dans le Journal Officiel n°78 du 18 décembre 2019, un arrêté présidentiel signé par le Président de la République, Abdelmadjid Tebboune, a redéfini ses limites territoriales :

- Au nord : les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa.
À l'est : la frontière tunisienne.
À l'ouest : les wilayas de El Meghaire et Touggourt.
Au sud : la wilaya de Ouargla.
- Localisation géographique et coordonnées :

La wilaya d'El-Oued est située aux coordonnées suivantes :

- ◆ **Longitude** : 7° Est .
- ◆ **Latitude** : 33,5° Nord,(Zine, 2022).

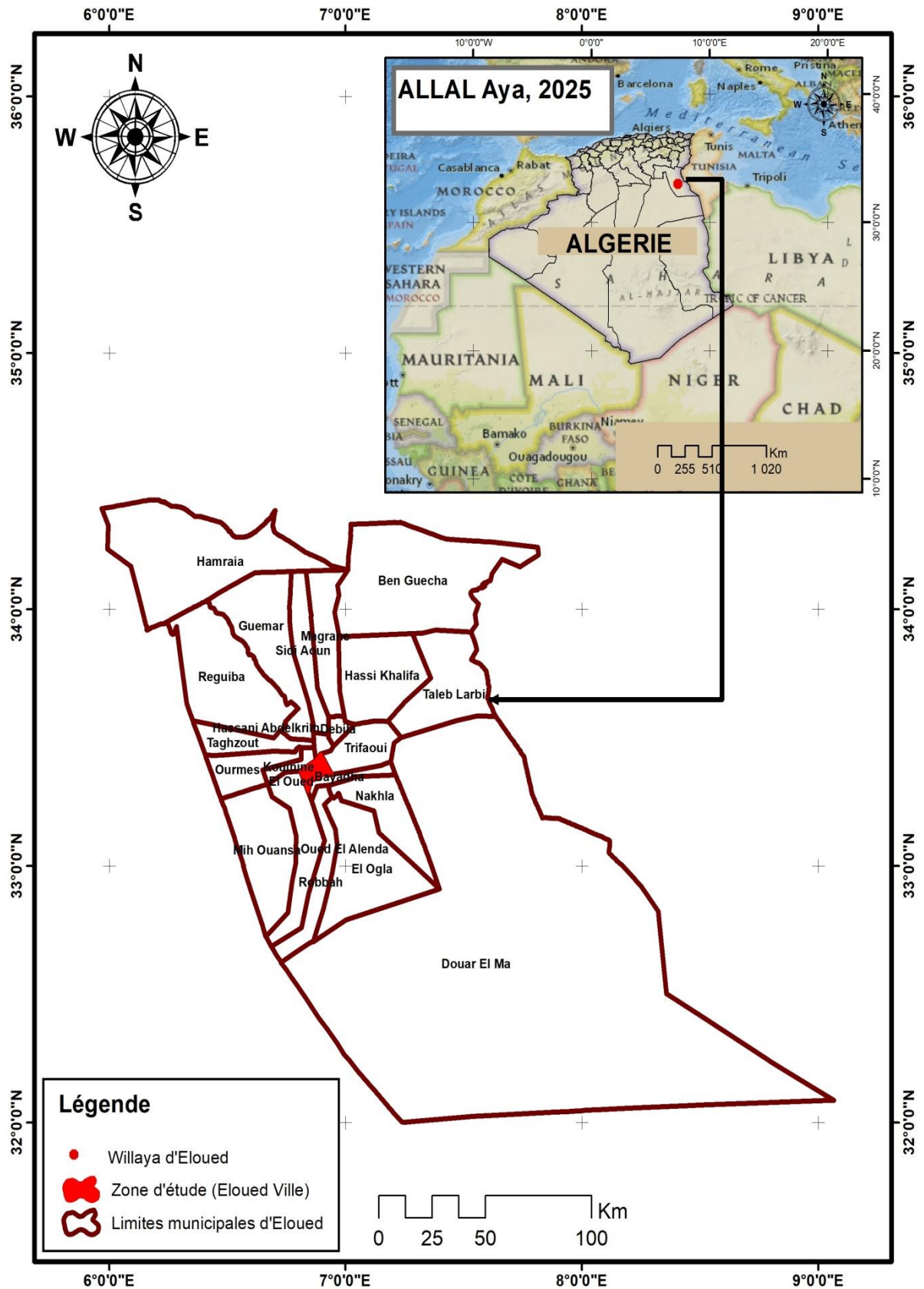


Figure I.01 : situation géographique de la région d'El-Oued.

1.2. Situation Economique

L'agriculture dans la région d'El-Oued se caractérise par une forte dépendance à la culture du palmier-dattier. On compte actuellement environ 2,5 millions de palmiers, dont seulement 183 000 sont productifs.

Production et exportation des dattes : L'exportation de 40 000 tonnes de dattes par an depuis El-Oued soutient l'économie, l'emploi et les recettes de devises (**Betta & Ghania, 2020**).

Le secteur agricole d'El-Oued est un pilier du développement, ayant enregistré une croissance significative aux niveaux local et national (**Saifi, 2021**).

Les activités agricoles se déroulent dans les dépressions entre dunes de sable appelées *ghout*. L'agriculture se distingue par la culture du tabac, des arachides, des légumes et de la pomme de terre.

Sur le plan industriel, la wilaya d'El-Oued est connue pour les activités suivantes : le textile, les cosmétiques, l'industrie agro-alimentaire, la production de sel de table à partir des *chotts* et des *sabkhats*, ainsi que la fabrication de matériaux de construction, entre autres. L'élevage concerne principalement les moutons, les chèvres et les chameaux, répartis de manière spécifique (**Betta & Ghania, 2020**).

1.3. végétation

La végétation des zones arides, notamment celle du Sahara, est très clairsemée, présentant généralement un aspect dénudé et désolé. Les arbres sont aussi rares que dispersés, et les graminées n'apparaissent que pendant une très brève période de l'année, lorsque les conditions deviennent favorables (**UNESCO, 1960**).

Au Sahara, comme ailleurs, la végétation est l'indicateur le plus fiable du climat (**Berdjough & Mebarki, 2022**).

La flore de la zone d'étude englobe une gamme d'espèces très diversifiée (**Ozenda, 2003**) ; (**Benyoucef, 2010**). Deux types de palmeraies se distinguent : les palmeraies traditionnelles et les palmeraies modernes (**Boulifa & Charf, 2019**).

Selon (**Boulifa & Charf, 2019**) et (**Berdjough & Mebarki, 2022**). La végétation de la zone d'étude présente une biodiversité notable, avec 74 espèces végétales appartenant à 24 familles botaniques différentes. Parmi les familles les plus riches en espèces figurent les Poaceae, qui comptent 19 espèces telles que *Bromus rubens* et *Hordeum murinum*.

Cette diversité floristique est étroitement liée au type de et aux conditions climatiques de la région. Dans les formations dunaires (Erg), *Stipagrostis pungens* domine, accompagnée d'une végétation arbustive clairsemée comme *Ephedra alata*, *Retama* et *Genista saharae*. En revanche, les zones rocheuses et argileuses (Regs et substrats pierreux ou argileux), présentent la couverture végétale est moins dense, avec des espèces adaptées comme *Cornulaca monacantha* (*Chenopodiaceae*) et *Zygophyllum album* (*Zygophyllaceae*).

De plus, les sols salins accueillent des espèces spécialisées telles que les *Chenopodiaceae* vivaces et *Zygophyllum album*, tandis que les formations de *Tamarix* se développent de manière plus significative là où l'humidité est plus élevée. Les recherches montrent que la flore des sols salins est pauvre en diversité et principalement dominée par des espèces halophytes.

Globalement, cette richesse floristique illustre l'adaptation des plantes aux conditions extrêmes du milieu désertique, où les facteurs climatiques et édaphique (liés au sol) jouent un rôle déterminant dans la structure et la répartition de la végétation dans la zone d'étude.

I.4. Topographie et Géomorphologie

Sur le plan topographique, la ville d'El-Oued se caractérise par une faible pente, ce qui entraîne des problèmes de drainage, notamment au sein de l'agglomération. Cette région sableuse présente une altitude moyenne de 80 mètres, avec une diminution significative du sud vers le nord, atteignant environ 25 mètres sous le niveau de la mer dans la zone du Chott, qui occupe le fond du vaste bassin du Bas Sahara (**Atik Nacer & Djarallah, 2017**).

- Le point culminant est situé à une altitude de 125 mètres dans la commune de Bayadha (Soualah).

- tandis que le point le plus bas se trouve à 29 mètres dans la commune de Réguiba (Ghomri et al., 2018 ; Betta & Ghania, 2020).

Le relief de la zone d'étude est très complexe, dominé par des chaînes de dunes de sable élevées, particulièrement dans la partie sud-ouest, où les hauteurs peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres. Ces dunes reposent sur une formation géologique quaternaire composée de plusieurs dizaines de mètres de sable éolien fin, compact, homogène et structurellement uniforme.

Ces formations dunaires sont entrecoupées de nombreuses excavations artificielles, appelées localement « Ghouts », creusées par l'homme pour l'exploitation des eaux souterraines. Il existe également des dépressions naturelles entre les dunes, appelées « Houds », formant des micro-environnements influençant les usages agropastoraux de la région.

Dans la partie sud de la région d'El-Oued, on peut observer des dunes vastes et bien définies, appelées localement « Ghroudes », qui peuvent dépasser les 200 mètres de hauteur. Ces formations imposantes confèrent au paysage un caractère géomorphologique unique, justifiant une analyse approfondie en relation avec les dynamiques environnementales et écologiques locales.

I.5. Climatologie

La région d'El-Oued se caractérise par son climat désertique, avec des étés chauds et secs où les températures peuvent parfois atteindre jusqu'à 54 °C, et des hivers froids et secs où les températures peuvent parfois descendre jusqu'à 3 °C (دحه, واخرون, 2022).

I.5.1. Le climat général de la wilaya d'El-Oued (2020-2024)

Sur le plan topographique, la ville d'El-Oued, située au sud-est de l'Algérie, connaît un climat désertique aride caractérisé par des étés extrêmement chauds et des hivers relativement froids. Ce régime climatique est également marqué par des précipitations rares et irrégulières, des taux d'évaporation particulièrement élevés et la fréquence fréquente de vents chauds et secs (ONM, 2006).

Ces conditions environnementales ont un impact direct sur les ressources naturelles, notamment les ressources en eau, ainsi que sur la dynamique économique et sociale de la région. Les données climatiques les plus récentes (2020-2024) indiquent une aggravation de ces tendances, avec des températures estivales dépassant régulièrement les 45 °C, des périodes de sécheresse prolongées et des précipitations annuelles moyennes inférieures à 90 mm. L'évaporation annuelle, quant à elle, a dépassé 2 100 mm entre mai et septembre (**Direction generale de la meteorologie, 2024**).

I.5.2. Température

La température annuelle moyenne dans la région varie entre 5 °C et 40 °C. Les températures les plus élevées sont enregistrées pendant les mois de juillet et août, où elles peuvent dépasser 45 °C. En hiver, notamment en janvier, les températures baissent considérablement, tombant parfois en dessous de 6 °C (**Weather Spark, S.D.**).

I.5.3. Précipitations

La wilaya d'El-Oued reçoit des précipitations très faibles et irrégulières. La moyenne mensuelle ne dépasse généralement pas 8 mm, avec un pic en janvier (environ 9 mm) et un minimum en juin (1 mm). Ces faibles niveaux de précipitations sont typiques du climat désertique aride de la région (**بن اسماعين, 2022**).

I.5.4. Humidité relative

Le taux d'humidité relative à El Oued est généralement faible, ce qui accentue la sécheresse du climat.

Il varie entre 20 % et 50 %, avec des valeurs plus basses en été, notamment en juillet et août, où il peut descendre en dessous de 25 % (**Weather Spark, S.D.**).

I.5.5. Evaporation

En raison des températures élevées et de la faible humidité, le taux d'évaporation est très important.

Selon des estimations climatiques régionales, l'évaporation annuelle potentielle dépasse souvent 2 000 mm/an, ce qui excède largement la pluviométrie reçue (INM, 2021).

I.5.6.. vents

Les vents soufflent plus fortement entre mars et juillet, atteignant une vitesse moyenne de 17 km/h en juin.

Durant la période de novembre à mars, leur intensité diminue, avec une moyenne d'environ 12,6 km/h en novembre (Weather Spark, S.D.).

I.5.7. Durée d'ensoleillement

La région bénéficie d'un ensoleillement très élevé. La durée moyenne annuelle d'ensoleillement est estimée à plus de 3 400 heures par an, avec un maximum en été (jusqu'à 11 h de soleil par jour) (ONM, 2023 ; Weather Spark, S.D.).

I.6. Contexte géologique

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, une vaste dépression topographique couvrant environ 780,000 km². Ce bassin est caractérisé par un creux structural en forme de synclinal asymétrique. La séquence sédimentaire comprend des formations marines paléozoïques à la base, suivies par des formations continentales des périodes Secondaire et Tertiaire, qui peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres d'épaisseur, notamment dans les régions de Ouargla, Touggourt et El-Oued, ainsi qu'en marge des monts Aurès. Le Quaternaire est représenté principalement par des sables dunaires, dont l'épaisseur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres. Ce dépôt quaternaire recouvre en grande partie la région, sauf dans certaines zones comme le nord de la région d'El-Oued, où des couches sableuses du Pliocène affleurent. Seule la série supérieure, allant du Crétacé au Quaternaire, a un intérêt hydrogéologie, comportant trois grands systèmes aquifères principaux : la nappe du Continental Intercalaire, la nappe du Complexe Terminal et la nappe phréatique (Zidane & Soufi, 2018 ; Betta & Ghania, 2020 ; Kheleil & Bourougaa, 2020).

I.6.1. La Plate-forme Saharienne

La plate-forme saharienne algérienne constitue une partie stable de l'ancienne masse continentale africaine. Il est caractérisé par un socle cristallin rigide remontant au Précambrien, recouvert de dépôts sédimentaires du phanérozoïque. Ces derniers résultent d'alternances de phases de transgressions et régressions marines, traduisant une dynamique sédimentaire étroitement liée aux variations paléoenvironnementales et paléoclimatiques (Zabala, 2010 ; Fabre et al., 2015).

Des structures tectoniques majeures, telles que les failles et des fractures, définissent de vastes bassins sédimentaires, notamment les bassins d'Illizi, de Timimoun et d'Ahnet. Ces bassins présentent souvent des séquences lithostratigraphie incomplète, résultat de taux de sédimentation variables et d'événements tectoniques successifs (Boudjema, 1987 ; Hetu et al., 2017).

Cette configuration géologique joue un rôle clé dans la formation des grands aquifères, notamment le système aquifère profond du Continental Intercalaire, qui constitue une ressource en eau pour les zones arides. Par ailleurs, ce contexte géologique offre des conditions favorables au développement de communautés biologiques adaptées aux sols sableux et aux minéraux de surface, notamment au sein des dépressions fermées entre les dunes (Aït Kaci, 2019 ; OSS, 2020).

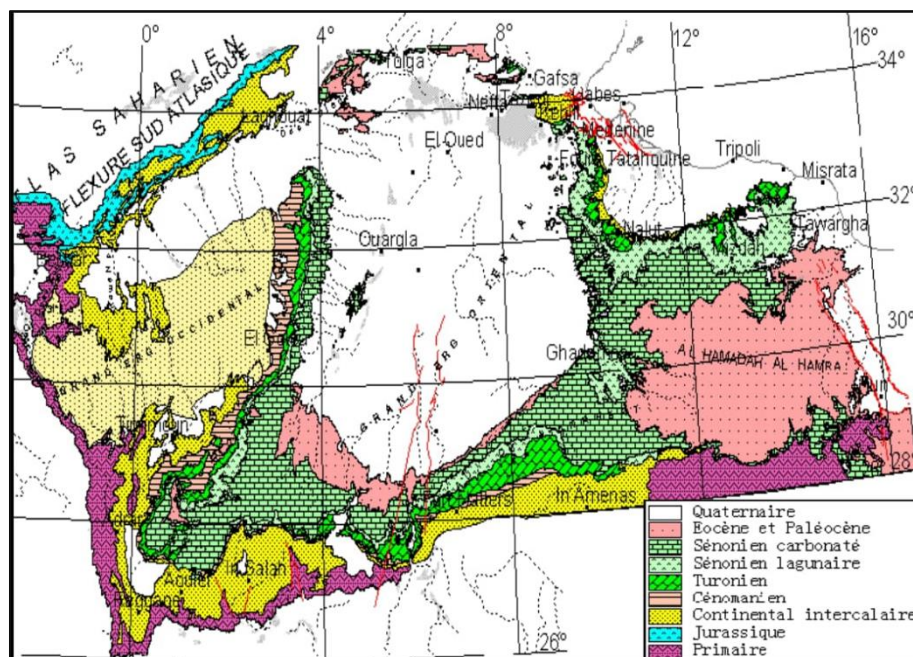


Figure.I.02 : Plan Géologique de Grand Erg Oriental, (BABA SY.M, 2005).

I.6.2. Stratigraphie régionale

Le Quaternaire dans la région de d'El-Oued représente une formation géologique continentale résultant du retrait complet de la mer. Il est principalement composé de dunes sableuses récentes constituées d'un mélange siliceux beige à blanchâtre, de granulométrie allant de fin à moyens. Ces dépôts éoliens, proviennent principalement des processus d'érosion de la région du Hoggar, formant la limite accidentale du Grand Erg Oriental. Dans la partie nord de la région, ces dunes recouvrent progressivement les anciens chotts. Cet horizon représente un niveau hydrogéologique clé, car il héberge l'aquifère phréatique peu profond (eaux souterraines libres), d'une épaisseur moyenne estimée à environ 60 mètres, sur la base des colonnes stratigraphiques de plusieurs forages réalisés dans la zone. Dans ce contexte, plusieurs coupes géologiques ont été analysées pour établir des corrélations lithologiques entre les couches souterraines, délimiter l'étendue géographique et l'épaisseur réelle exploitable de cet aquifère, qui constitue une base fondamentale pour comprendre la dynamique des eaux souterraines et assurer leur gestion durable dans un environnement désertique fragile.

Selon (**Cornet, 1964 ; Bel, 1968**) et les coupes transversales des forages réalisés dans la région, les profondeurs des strates géologiques varient considérablement d'un secteur à l'autre. À partir des diagraphies du forage d'Albien réalisées par l'**ANRH (1993)** dans la région d'El-Oued, plusieurs unités lithologiques ont été identifiées, allant des formations les plus anciennes aux plus récentes, permettant une compréhension plus approfondie de la structure géologique régionale.

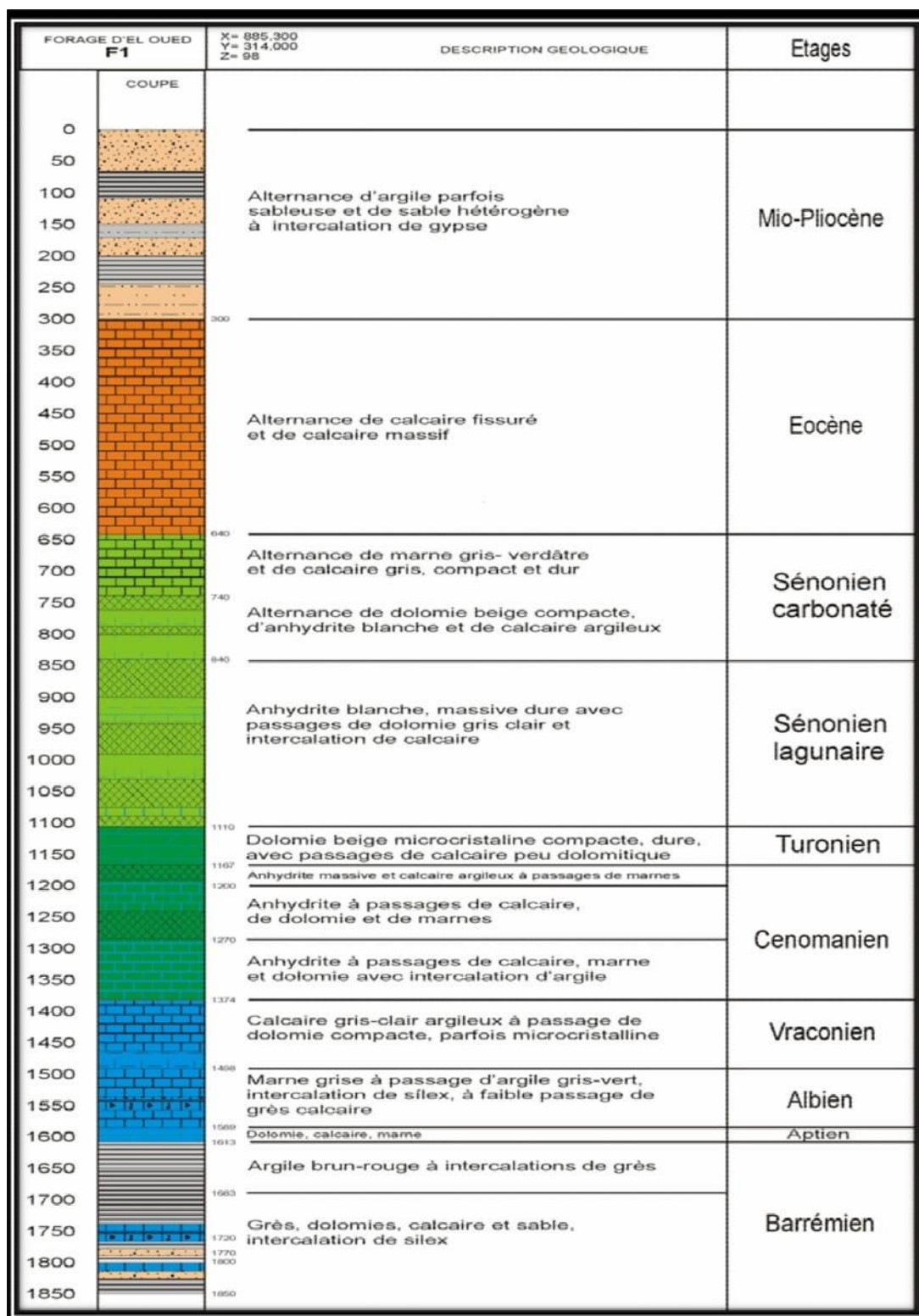


Figure.I.03 : La colonne litho stratigraphique du forage F1, (ANRH, 1993).

I.6.2.1. Formations de l'ère Secondaire

Les formations géologiques de l'ère secondaire de la région d'Oued Souf sont constituées d'une série de couches sédimentaires jouant un rôle crucial dans le système des eaux souterraines. Elles débutent par les formations du Barrémien, de l'Aptien et de l'Albien, riches en sable, argile et dolomie, formant la base de l'aquifère continental intercalaire. Viennent ensuite les couches du Vraconien et du Cénomaniens, qui agissent comme des unités de confinement limitant les échanges d'eau entre les aquifères. La formation du Turonien constitue la base du Complexe Terminal et se caractérise par son épaisseur considérable et sa diversité lithologique. Le Sénonien, en particulier ses sous-unités lagunaires et carbonatées, contient des dépôts carbonatés évaporitiques et fracturés tels que la dolomie, le calcaire marneux et le calcaire fissuré, renforçant la porosité secondaire et le potentiel aquifère. Ces couches évoluent souvent progressivement vers des formations éocènes, reflétant la continuité paléoenvironnementale. Ensemble, ces formations définissent l'étendue, la profondeur et la capacité de stockage de l'aquifère dans la région (zaiz, 2015).

I.6.2.2. Formation de l'ère tertiaire

- **L'Éocène :**

Il est composé de sable et d'argiles ; on y rencontre occasionnellement du gypse et du gravier. Dans cette région, l'Éocène est carbonaté à sa base, tandis que sa partie supérieure est caractérisée par des argiles de type lagunaire. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres.

- **Le Miopliocène :**

Il recouvre en discordance, indifféremment, les formations du Paléozoïque ou du Crétacé inférieur, du Turonien, du Cénomaniens et de l'Éocène. Il appartient à l'unité communément appelée Complexe Terminal (CT). La plupart des coupes de forage recoupant cet horizon montrent que le Miocène-Pliocène (Miopliocène) est composé d'un empilement de couches sableuses et sablo-argileuses alternées, avec des intercalations de gypse et des bancs de grès. Sur l'ensemble du Sahara oriental, Bel et Demargne subdivisent cet horizon en quatre niveaux distincts :

- Niveau argileux :

Elle est mince et se rencontre uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Éocène lagunaire, les argiles de la base du Miocène-Pliocène forment une barrière de faible perméabilité entre les aquifères carbonatés du Sénonien-Éocène et l'aquifère sableux du Pontien.

- Niveau grès-sableux :

Il s'agit de la couche la plus significative d'un point de vue hydrogéologique. Son épaisseur reste relativement constante dans tout le Sahara oriental. À sa base, des graviers sont parfois présents, tandis que le sommet s'enrichit progressivement en argiles. Ce niveau correspond à l'horizon aquifère principal

- Niveau argileux :

Son intérêt hydrogéologique est limité. Cependant, ce niveau contient des lentilles sableuses qui pourraient former une quatrième couche (sableuse) du Miocène-Pliocène.

- Niveau sableux :

Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. D'un point de vue hydrogéologique, ces couches sableuses revêtent une importance capitale, car elles correspondent, pour l'essentiel, à l'aquifère sableux du Complexe Terminal.

I.6.2.3. Formation du quaternaire

Elles se présentent sous forme des dunes de sable dont le dépôt se poursuit sans doute. Encore de nos jours. Les terrains quaternaires représentent la couverture superficielle qui se Localise surtout au niveau des dépressions et couvrent la plus grande extension au niveau du bas Sahara, ils sont formés d'un matériel alluvial et éolien d'où on trouve la formation des alluvions Sableuses et argileuses.

Tableau.I.01 : Les compositions lithologiques de la région d'étude,(DRE,2015).

Ere		Système			Lithologie	Epaisseur Moy en(m)
Cénozoïque	Quaternaire	Supérieur			Sables	54
		Inférieur			Argiles	150-260
	Tertiaire	Néogène (Moi-pliocène)	Pliocène	Plaisancien	Sables	150 – 200
				Tabianien	Argiles gypseuses	
			Miocène	Pontien	Sables grossiers; Gravier.	
				Paléogène	Oligocène	
		Moyenne				
		Eocène	Inférieure			
		Paléocène	Vitrollien		Calcaire fissuré	
	Secondaire (Mésozoïque)	Crétacé	Supérieur	Sénonien	Carbonaté	Calcaire fissuré
Lagunaire					Evaporites, argiles	≈ 150
Moyenne			Turonien		Dolomie, passage de calcaire peu Dolomitique	≈ 650
			Cénomaniens		Argiles, marne	≈ 560
inférieure			Vraconien		Calcaire argileux dolomie	250 - 300
			Albien		Sables, Grés	100 – 200
			Aptien		Dolomie, calcaire, marne	≤ 30
			Barrémien		Grés, dolomie, calcaire, sable, silex	200 – 230
			Néocomien		Argiles sableuses, Sables	

I.6.3. Géomorphologie de sous sol

Le sous-sol de la région présente des contrastes géologiques saisissants. Au sud, d'El-Oued à El Olga (environ 6 km puis 24 km plus loin), on constate une absence totale de "Tefza" (un type de roche gypsifère-calcaire), tandis que la roche "Louss" ou gypse se raréfie progressivement à mesure qu'on se dirige vers le sud vers le "Reg" ou plateau crétacé, une zone exposée et sans sable.

Du nord d'El-Oued à Ghamra, le Louss apparaît comme une masse rocheuse plus ou moins compacte et profonde sous les villages, tandis qu'à l'ouest, la Tefza domine le terrain sur une distance d'environ 25 km, de Tiksebt à Hobba, avec une épaisseur variant de quelques centimètres à 3 ou 4 mètres.

Ce schéma géologique se distingue clairement lorsqu'on analyse les flancs ouest et est des agglomérations s'étendant d'El-Oued à Hobba selon un axe sud-nord : Tiksebt, Kouinine, Taghzout, Guemar, Ghamra et Hobba. Sur environ 25 km, les terrains calcaires se situent à gauche (ouest), tandis que le gypse n'apparaît que sous forme de parcelles isolées. En revanche, le gypse devient abondant au nord-est des villages, où aucune trace de Tefza n'est observée.

Dans cette zone nord-est, la formation de gypse s'étend selon une bande de 2 à 4 km de largeur orientée du nord au nord-est. À l'est de cette bande, le sous-sol est pratiquement dépourvu de formations significatives, à l'exception de quelques amas de gypse et de sols ressemblant à de petites « roses du désert », appelées localement « Tercha ». Cette zone est caractérisée par des terrains "Sebkha" (salins), suivis vers l'est par une étroite bande d'eau douce, puis par une "Sahane" calcaire qui se termine près de Béhiema, où réapparaît le Louss accompagné d'eaux saumâtres, s'étendant sur 3 à 4 km à l'est et au sud-est de Zgoum.

Au nord de ces villages, Tefza redevient dominante, sauf dans les zones de l'est et du nord-est, notamment à Hassi Khalifa (située à 36 km à l'est d'El-Oued), où le gypse réapparaît sous une forme compacte et profonde. Il est important de noter que le Louss et la Tercha résultent de processus géologiques, fondamentalement différents (Zaiz, 2015).

- **Le Louss :**

Structure géologique composée de cristaux de gypse entrelacés, disposés en couches lamellaires. Il se présente généralement sous forme de couches continues, extrêmement compactes et résistantes, souvent mélangées à du sable. On le trouve également sous forme de lits ou de colonnes de gypse isolés, apparemment formés autour d'anciens systèmes racinaires. En raison de sa dureté, le Louss est difficile à extraire ou à pénétrer. Dans les zones agricoles, certains agriculteurs bien financés utilisent des charges de dynamite pour fragmenter ces dépôts et défricher les terres.

Cette roche est très appréciée en construction en raison de sa résistance et de son imperméabilité. Géographiquement, la formation du Louss est principalement située entre les routes El-Oued-Ghamra et El-Oued-Magrane, ainsi qu'à l'est de Zgoum.

- **La tercha :**

Connue localement sous le nom de « Tercha », cette formation géologique est constituée d'agrégats de grains de gypse et de sable, agglomérés en différentes formes et tailles. Ces conglomérats sont constitués de fins cristaux, leur donnant un aspect semblable à celui du grès. Ils se présentent sous la forme de dalles continues ou de lits extrêmement durs enrichis de cristaux de fer. Ce type de concrétion est principalement observé à l'ouest de la route Béhima – Sidi Aoun.

Morphologiquement, Tercha peut apparaître sous forme de roses du désert isolées ou groupées, ou sous forme de cristaux poreux, arrondis et aplatis de la taille d'une phalange. Cette dernière forme se rencontre souvent dans les terrains salins, aussi bien en surface qu'en profondeur. Lorsqu'il est friable, le Tercha peut être cuit en plâtre ayant des propriétés similaires au plâtre parisien : blancheur, prise rapide, texture fine et bonne résistance mécanique.

Dans les horizons souterrains traversés par les eaux de ruissellement, les grains de Tercha ont tendance à s'agglomérer autour des racines des palmiers ou parmi les dépôts résiduels. Deux bandes sédimentaires d'origine et de composition lithologique distinctes bordent les principaux centres habités de la région d'El-Oued. Ces contrastes influencent fortement la qualité et la nature de l'aquifère. À l'est, on observe particulièrement une alternance de couches calcaires et gypseuses.

La présence abondante de Tercha en surface est un indicateur important de la richesse en gypse du substrat. De plus, ces formations présentent une organisation particulière, marquée par des niveaux de Tafza diffus et compacts et par la relative discontinuité des affleurements de gypse.

Une analyse stratigraphique du sol permet de distinguer plusieurs horizons géologiques spécifiques, localement désignés comme suit :

- **Salsala ou Smida :**

Plaques continues ou lits extrêmement durs, composés de cristaux riches en fer semblables à ceux du Louss, mais avec une texture plus fine et plus dense.

- **Tefza :**

Egalement appelé « pierre à plâtre », c'est un grès blanc, relativement dur traditionnellement utilisé pour produire du plâtre après cuisson. Ce matériel se trouve principalement à l'ouest de la route El-Oued – Ghamra, et à l'est de Débila et Magrane.

Les termes Tercha, Louss, Salsala, Smida et Tefza sont des noms locaux couramment utilisés pour décrire les différentes couches géologiques de la région.

I.6.4. analyse des logs des forages

I.6.4.1. Les coupes géologiques dans la région d'Oued - Souf

I.6.4.1.1. Coupe N°1

Selon (kechichda, boudoukha, 2018) Orientée du sud-est au nord-ouest entre El Ogla et Sahan-Merdoum, cette coupe montre le Mio-Pliocène (sables et argiles, ~309 m) et l'Éocène (argile sableuse, gypse, sable grossier, calcaire). L'épaisseur de l'aquifère superficiel varie entre 30 et 100 m.

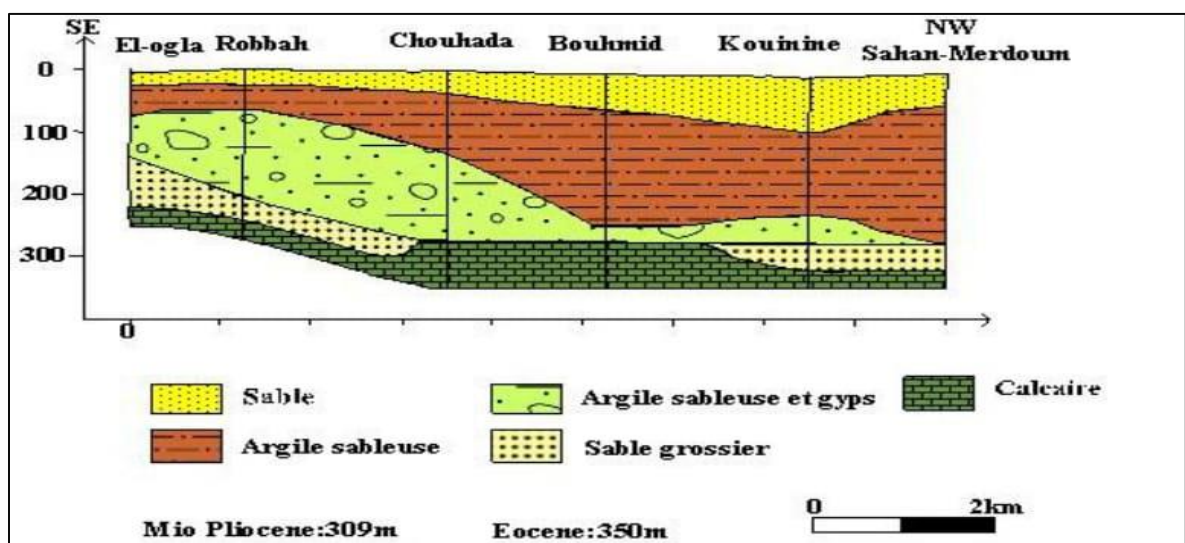
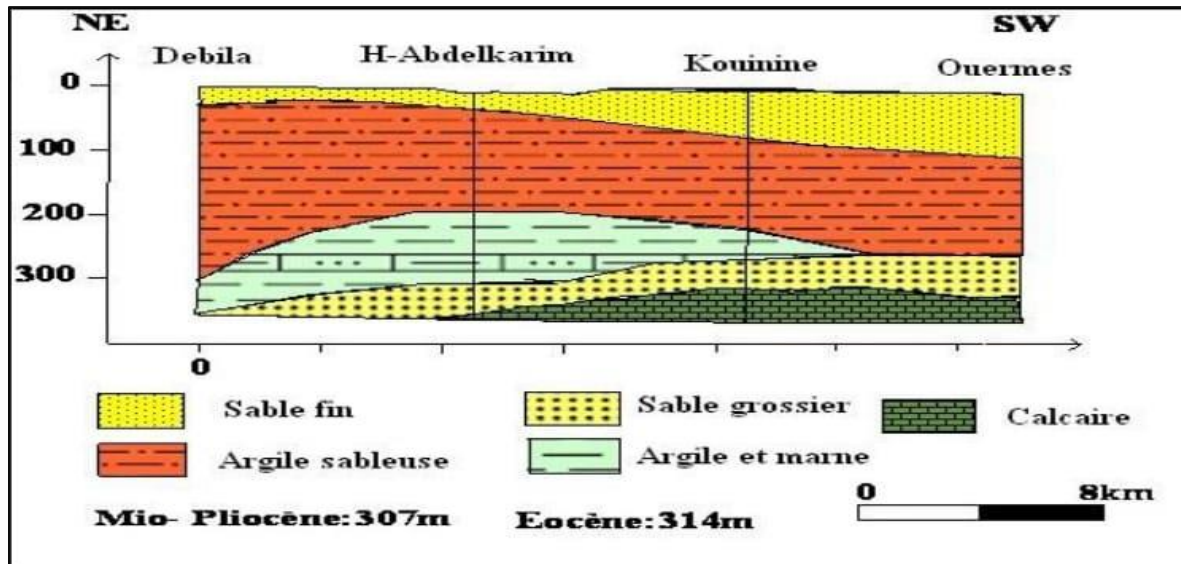


Figure.I.04 : Coupe géologique N°01, (ANRH, 1989).

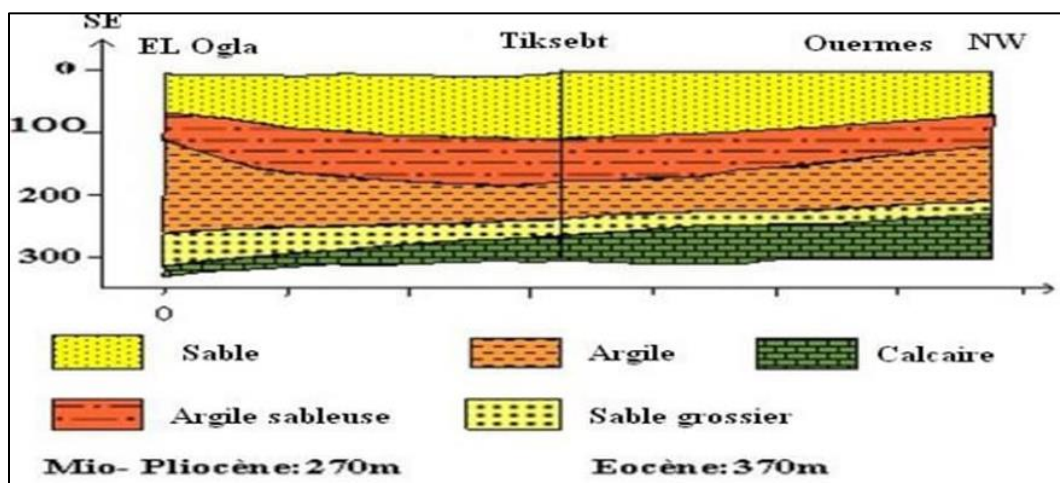
I.6.4.1.2. Coupe N°02

Orientée sud-est/nord-ouest, elle révèle un Mio-Pliocène composé de sables, d'argile sableuse et d'argile, et un Éocène formé de sables grossiers et de calcaire. L'aquifère libre présente une épaisseur comprise entre 60 et 105 m.



I.6.4.1.3. Coupe N°03

La coupe géologique, orientée du nord-est au sud-ouest, met en évidence que la formation du Miopliocène, composée de sable, d'argile sableuse et d'argile, a une épaisseur variable allant de 30 à 110 mètres. La formation de l'Éocène est constituée d'argile, de marne, de sable grossier et de calcaire.



I.6.4.1.4. Coupe N°04

Orientée du sud vers le nord, elle indique un Mio-Pliocène constitué de sables et d'argiles, tandis que l'Éocène contient du sable grossier. Le calcaire est présent uniquement dans la partie nord.

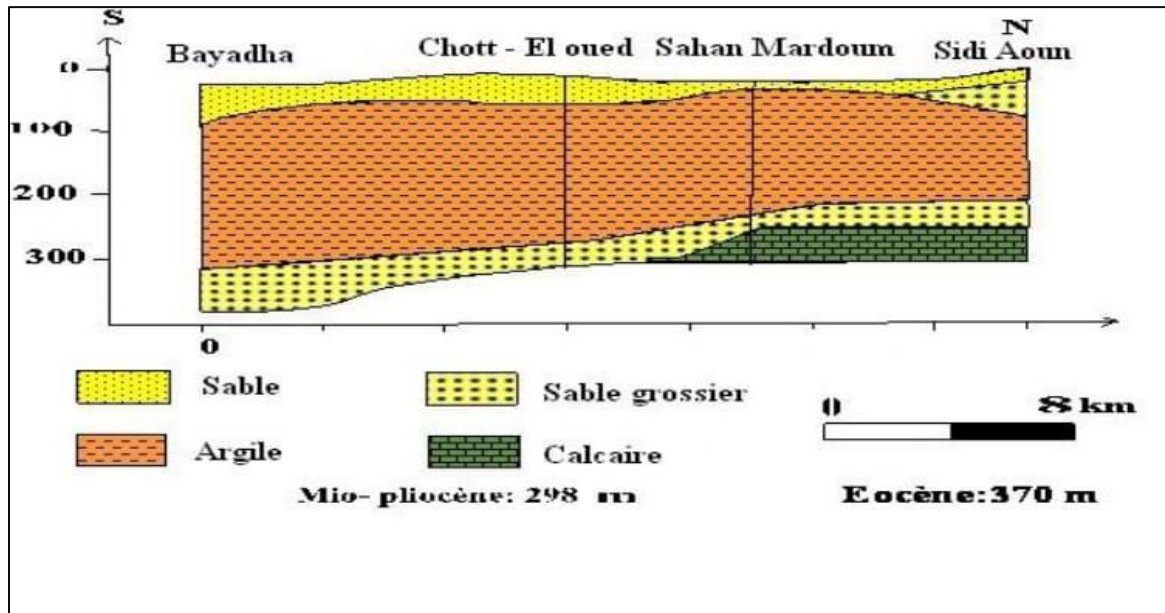


Figure.I.07 : Coupe géologique N°04, (ANRH,1989).

I.7. Réseau hydrographique

La région de Oued Souf souffre d'une absence de réseaux hydrographiques de surface permanents en raison de son climat désertique aride. Par conséquent, le système hydrologique de cette région repose principalement sur les eaux souterraines et les ressources en eau provenant des oueds fossiles, des rivières anciennes qui étaient autrefois actives mais qui sont aujourd'hui asséchées (Vallat, 2008).

○ Ressources en eau de surface :

Bien qu'il n'y ait pas de rivières permanentes, les oueds fossiles constituent des traces d'écoulements passés. Ces oueds peuvent transporter de l'eau pendant les périodes de pluie abondantes, mais cette ressource est temporaire. Ainsi, la gestion des eaux souterraines est essentielle pour subvenir aux besoins en eau de la région (Kadri & Troin, 2018).

I.7.1. Les accumulations d'eau temporaires :

Dans certaines zones basses, l'eau de pluie peut se rassembler pour former des étangs ou des marais temporaires. Ce phénomène est souvent accentué par les forages profonds qui, depuis les années 1970, ont conduit à une remontée du niveau de la nappe phréatique. Ainsi, les réseaux hydrographiques de Wadi Souf ne se limitent pas aux cours d'eau de surface, mais incluent également les ressources terrestres et souterraines qui composent le système hydrique de la région. La gestion durable de ces ressources est cruciale pour répondre aux besoins des populations locales et soutenir l'activité agricole tout en évitant les problèmes environnementaux liés à l'exploitation excessive des eaux souterraines. Dans certaines zones basses, des flaques d'eau sont observées en raison du phénomène de montée des eaux souterraines, ce qui conduit à la formation de marécages ou de flaques d'eau temporaires. Ce phénomène a été constaté dans des zones telles que Sidi Mastour et Tou, ainsi que dans les zones entourant le marché Libya. Ces masses d'eau sont attribuées aux énormes réserves d'eau souterraine de la vallée, ce qui a causé des problèmes. Environnementaux, tels que les inondations.

I.8. Hydrogéologie

Du point de vue hydrogéologique, la région d'El Oued est représentée par deux systèmes aquifères, à savoir : le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Ces deux systèmes sont surmontés par une nappe libre appelée nappe.

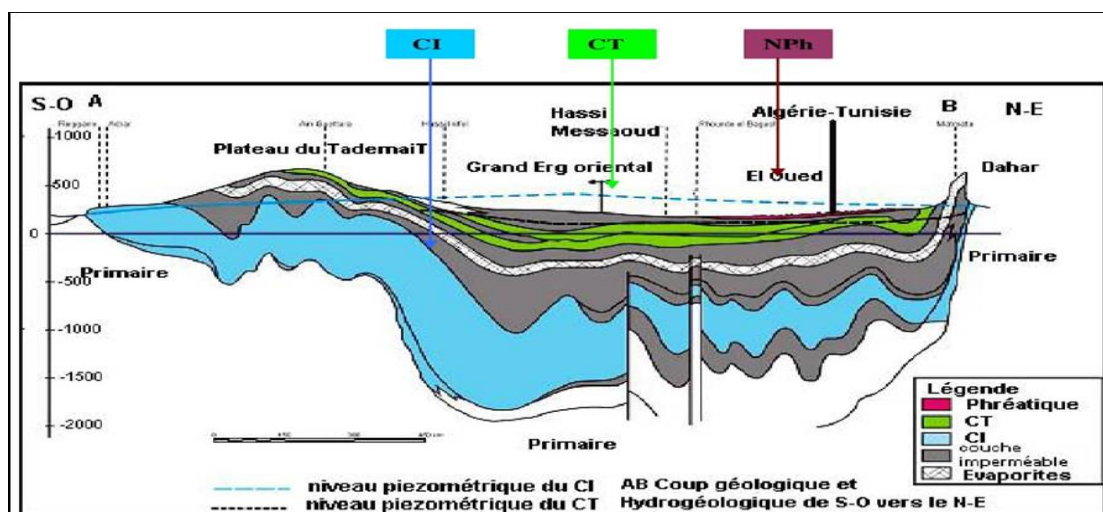


Figure.I.08 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara El-Oued, (d'après UNESCO, 1972).

Comme dans la plupart des régions du Sahara septentrional, la superposition des couches aquifères dans la zone suit une séquence géologique spécifique de haut en bas. En se référant au tableau (I-02), qui résume cette stratification, on peut observer la stratification précise des systèmes d'eaux souterraines, contribuant à une meilleure compréhension de leur répartition et de leurs caractéristiques hydrogéologiques.

Tableau.I.02 : Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued, (d'après DHw, 2005) (ADE).

Nature hydrogéologique		Nature lithologique	Étage		Ère
Niveau perméable	Nappe Phréatique	Sables	Quaternaire		
Niveau Imperméable		Argiles			
1 nappe des sables	Complexe Terminale	Sables	Pliocène		Tertiaire
Semi –perméable		Argiles gypseuses			
2 nappes des sables		Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	
Niveau imperméable		Argiles lagunaires, marnes	Moyen	Éocène	
Nappe des calcaires (perméables)		Calcaire fissuré	Inférieur		
Semi-perméable			Évaporites, argiles	Sénonien lagunaire	
Niveau imperméable	Argiles, marne	Cénomaniens			
Niveau perméable	Sables et Grés	Albien			
Semi-perméable	Calcaire, marne	Aptien			
Niveau perméable	Calcaire, sable	Barrémien			
Nappe Continental Intercalaire					

I.8.1. Nappe phréatique

La nappe phréatique présente dans toute la région d'El-Oued correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire ; elle se localise à des profondeurs variant entre 10 et 60 mètres.

Vue sur son importance, cette nappe représente la source principale en eau des palmeraies; elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui selon les enquêtes sont en nombre de 21 000.

La circulation des eaux dans cette nappe est relativement rapide sur toute la région d'El-Oued(Betta & Ghania, 2020).

repose sur un substratum argilo-gypseux datant du Pontien supérieur. La zone non saturée qui sépare la surface de cette nappe du sol ne dépasse pas une profondeur moyenne de 40 mètres de sable non aquifère.

L'alimentation de la nappe phréatique dans la zone d'étude est assurée par l'infiltration des eaux de forages profonds (CT et CI) et par les rares et faibles précipitations typiquement sahariennes.

L'aquifère quaternaire d'El-Oued présente une épaisseur moyenne de 40 m. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au Nord-ouest de la région de Foulia et se situe à moins de 10 m de profondeur à l'extrémité Nord-est de la région d'étude. Cette nappe a engendré un problème néfaste pour l'environnement dans certaines zones de la vallée (Zair, 2018).

I.8.2. L'aquifère du Complexe Terminal (CT)

Le terme "Complexe Terminal" désigne un ensemble de nappes aquifères situées dans des formations géologiques variées, allant du Sénonien supérieur à dominante (carbonaté) jusqu'aux dépôts(détritique) du Moi-Pliocène. Selon Cornet (1964), ce complexe comprend trois nappes principales : les deux premières correspondent respectivement aux nappes sableuses d'âge Miocène (Pontien) et Pliocène, tandis que la troisième est issue de l'Éocène inférieur.

I.8.2.1. Nappes des sables :

Au sein de ces niveaux sableux, vient s'engendrer deux nappes captives, dont la première correspond à la formation supérieure du Complexe Terminal appelée communément réservoir du « Sub-Souf ». Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal mène progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud artésienne, dans la région d'étude elle se trouve à 280 mètres de profondeur.

L'existence d'une deuxième nappe de sables d'âge pontien. Au-dessus des bancs supérieurs de la nappe des calcaires et en contact avec les marnes de l'éocène inférieur et des graviers siliceux constituant donc une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du pontien du sud Tunisien, la profondeur de cette nappe varie entre 400 et 450 mètres, quant à l'épaisseur utile de cette nappe elle est de 50 mètres environ. L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-ouest vers le Nord-est, autrement dit vers la zone des Chotts (Melghir et Merouane). Dans les zones à fortes exploitations telles que la ville d'EL Oued, l'extraction des eaux se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Larbi et Douar EL Maa, la nappe est artésienne : c'est le cas de la nappe de Pontien (**Mimmi & Kaoudja, 2021**).

I.8.2.2. Les nappes de calcaires :

Le Complexe Terminal d'El-Oude possède une lithologie plus complexe. Les forages captant cette nappe nous montrent l'existence de deux niveaux durs servants de repère pour la classification des eaux souterraines. Du Sud au Nord nous observons qu'il est purement calcaire, quelque fois il est formé par des Calcaires gypseux et correspond ainsi au niveau inférieur. Dans l'ensemble ces deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses en passant par des argiles (rouge). Les forages profonds captant cette nappe (**Kheleil & Bourougaa, 2020**).

nous montrent que sa profondeur varie entre 350 et 700 mètre (**Mimmi & Kaoudja, 2021**).

I.8.3. L'aquifère du Continental Intercalaire (CI)

Le terme "CI", correspond ainsi aux formations continentales du crétacé inférieur, et qui correspond à deux cycles sédimentaires : La régression marine suivit d'une transgression du crétacé supérieur, Il occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base Trias et le sommet de l'Albien (**Zidane & Soufi, 2018**).

Le trait manquant du réservoir aquifère du Continental Intercalaire est son volume considérable dû à la son extension (surplus de 600000 km²) et à son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Bien que l'intérêt majeur de ce système aquifère et qu'il est constitué par de grandes quantités d'eau qui ont été stockées au cours des périodes pluvieuses du quaternaire et peuvent être maintenant exploitées; il

reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisée par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoires.

Elle est exploitée par trois forages artésiens. La commune d'El-Oued exploite cet aquifère par deux forages artésiens pour l'AEP d'un débit cumulé de 340 l/s et une température avoisinant les 70°C.

A background image of water splashing, with various droplets and streams of water in shades of light blue and white, creating a dynamic and fresh visual effect.

Chapitre II

Matériels et méthodes

II.1. But de l'étude hydrochimique

L'étude hydro chimique a pour but de :

- ◆ Déterminer les faciès chimiques des eaux.
- ◆ Déterminer l'origine des éléments majeurs présents dans l'eau.

II.2. Conditions et mode d'échantillonnage

Les échantillons d'eau sont collectés selon des protocoles spécifiques, tenant compte des caractéristiques géologiques et environnementales locales. On utilise des bouteilles en **polyéthylène** ou en verre, préalablement nettoyées à l'eau distillée et laissées à sécher. Pour les échantillons destinés à l'analyse minérale, les flacons sont rincés à l'**acide nitrique**. Les prélèvements sont effectués dans des puits ou des sources d'eau souterraine, en rinçant les bouteilles avec de l'eau provenant de la même source afin d'éviter toute contamination.

Après prélèvement, les échantillons sont transportés dans des conteneurs réfrigérés et conservés à 4 °C jusqu'à leur analyse dans des laboratoires accrédités, tels que celui de l'**Agence Nationale des Ressources en Eau (ANRH) d'El-Oued**. Ce protocole garantit la fiabilité des analyses et protège les échantillons contre toute contamination susceptible d'altérer les résultats des tests physiques et chimiques.

II.3. Prélèvement

Les prélèvements ont été effectués selon une répartition et une fréquence différente d'un site à l'autre, dépendant du type des formations géologiques, des implantations agricoles et de la disponibilité des ouvrages.

Au total, vingt (20) échantillons d'eaux souterraines de l'aquifère du Complexe Terminal (CT) dans la région d'El-Oued ont été collectés au cours du mois de mars 2025.

Les échantillons ont été collectés à l'aide de bouteilles en polyéthylène propres de 1 500 ml, préalablement rincés avec l'eau du puits elle-même pour éviter toute contamination, puis laissées sécher avant d'être remplies avec l'eau à analyser.

Après prélèvement, les échantillons ont été transportés directement au laboratoire dans des conteneurs réfrigérés, et conservés à une température de 4 °C jusqu'à la réalisation d'analyses physico-chimiques, conformément aux recommandations de (Rodier ,2009).

II.4. Arc Gis

Dans le cadre de cette étude, les Systèmes d'Information Géographique (SIG) ont été utilisés comme outil clé pour l'analyse spatiale des données sur la qualité des eaux souterraines dans la région d'El-Oued. Cette approche souligne l'importance d'outils d'analyse spatiale avancés, basés sur des principes scientifiques de résolution de problèmes, comme le soulignent (Longley & al. 2015), qui ont noté que l'utilisation efficace des SIG nécessite une solide compréhension scientifique de la technologie. Parmi les outils utilisés, ArcGIS, développé par Esri, a servi de plateforme principale pour la collecte, la gestion, l'analyse et la visualisation des données géoréférencées. Ce logiciel a permis la production de cartes numériques précises et a facilité l'analyse de la distribution spatiale de divers paramètres physico-chimiques, tels que la salinité et l'indice de qualité de l'eau (IQE). Il a également été utilisé pour cartographier l'emplacement des puits et des points d'échantillonnage, offrant ainsi un aperçu complet de l'état hydrogéologique de la zone d'étude et facilitant la prise de décisions éclairées en matière de gestion des ressources en eau.

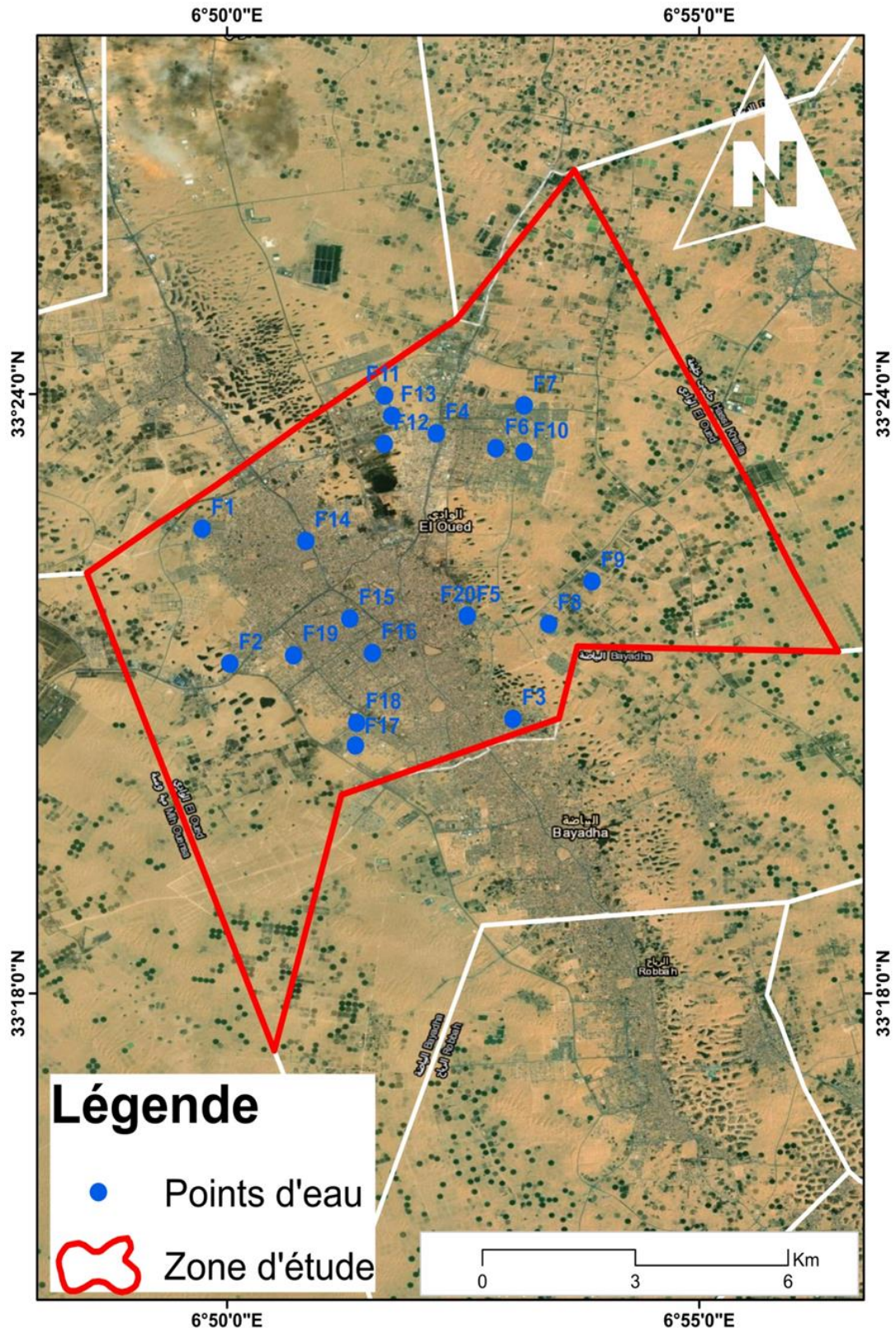


Figure II.01 : Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau.

II.5. Méthode d'analyses

Les paramètres sélectionnés sont ceux qui reflètent au mieux la qualité de l'eau, notamment en ce qui concerne leur impact sur la santé humaine, telle que le pH, la température, la conductivité électrique et les principaux éléments minéraux.

Les analyses physico-chimiques ont été effectuées au laboratoire de l'Algérienne des Eaux (A.D.E.) de la wilaya d'El-Oued, en utilisant des méthodes rigoureuses garantissant la fiabilité et la précision des résultats .

II.6. Analyses physico-chimiques

II.6.1. Paramètre chimique

II.6.1.1. PH

Le potentiel hydrogène (pH) est l'un des indicateurs fondamentaux pour l'évaluation de la qualité de l'eau. Il exprime la concentration des ions hydrogène $[H^+]$ dans le milieu aqueux, ce qui permet de déterminer si l'eau est acide, basique ou neutre. Il est généralement mesuré à l'aide d'appareils multi-paramètres tels que le HACH SL1000 (APHA, 2017).

Les études montrent que l'équilibre acido-basique a un impact direct sur la stabilité des micro-organismes et les réactions chimiques dans l'eau (WHO, 2022).

L'échelle du pH varie de 0 à 14, avec une valeur de 7 indiquant un milieu neutre (EPA, 2023).

II.6.1.2. Conductivité électrique (CE) et solides dissous totaux (T.D.S.)

La majorité des substances dissoutes dans l'eau se présentent sous forme d'ions chargés électriquement. Par conséquent, la mesure de la conductivité électrique constitue un indicateur indirect mais efficace pour évaluer la concentration en sel dissous dans l'eau, La conductivité est exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu S/cm$) et est généralement mesurée à l'aide d'un appareil multi-paramètre tel que le HACH SL1000.

Les solides dissous totaux (Total Dissolve Solide – T.D.S.) d'un échantillon d'eau peuvent être estimés à partir de la valeur mesurée de la conductivité, selon une relation empirique couramment utilisée dans les analyses hydrologiques :

$$(T.D.S. (mg/L) \approx K \times \text{Conductivité } (\mu S/cm))$$

Où **K** est un facteur de conversion qui varie généralement entre 0.5 et 0.7 selon la composition ionique de l'eau.

II.6.1.3. Calcium (Ca^{+2})

La titration du calcium dans l'eau est un procédé chimique utilisé pour déterminer la concentration de calcium dans un échantillon d'eau. L'une des méthodes les plus courantes pour effectuer cette titration est l'utilisation de l'EDTA, un complexe qui réagit avec les ions calcium pour former un complexe stable. Voici les étapes de la titration du calcium dans l'eau .

❖ Mode opératoire :

- Prendre de 50 ml d'eau d'échantillon ;
- Ajoute 02 ml NaOH 2mol/l + 0.2 g HSN ;
- Ajouter progressivement la solution d'EDTA de concentration connue à l'échantillon jusqu'à la complexation complète des ions calcium ;
- La couleur de l'échantillon devient bleue lorsque la réaction avec les ions calcium est complète.



Figure.II.02 : Titration du calcium (Ca^{+2}) .

II.6.1.4. Mesure de magnésium (Mg^{2+})

Le dosage du magnésium dissous dans l'eau est réalisé de manière indirecte, à partir des valeurs de la dureté totale (TH) et de la concentration en calcium (Ca^{2+}). La dureté totale exprimée en mmol/L correspond à la somme des concentrations en ions calcium et magnésium. Ainsi, la concentration en magnésium peut être obtenue par soustraction de la concentration en calcium de la dureté totale, puis convertie en mg/L à l'aide de la masse molaire du magnésium.

- Expression mathématique :

$$[\text{La Concentration de magnésium } Mg^{2+}] \text{ (mg/L)} = ([C. TH])(\text{mmol/L}) - [Ca^{2+}](\text{mmol/L}) \times 24.305$$

- ✓ [TH] : dureté totale (en mmol/L).
- ✓ $[Ca^{2+}]$: concentration en calcium (en mmol/L).
- ✓ 24,305 g/mol : masse molaire du magnésium.

❖ **Mode opératoire :**

Après avoir déterminé la dureté totale (TH) et la concentration en calcium (Ca^{2+}), la concentration en magnésium est calculée à l'aide de l'expression ci-dessus.

II.6.1.5. Préparation des étalons les solutions étalons de sodium (Na^+) et de potassium (K^+)

ont été préparées comme suit :

- **solution Mère de Sodium (Na^+) à 1 g/L de concentration :**

2,54 mg de chlorure de sodium (NaCl) ont été dissous dans 1 000 ml d'eau distillée pour obtenir une solution mère avec une concentration de 1 000 mg/L (1 g/L) de sodium.

- **Sous-solution de Sodium (Na^+) à une concentration de 10 mg/L :**

Celui-ci a été préparé en prélevant un volume approprié de la solution mère (1 000 mg/L) et en le diluant dans 100 ml d'eau distillée pour atteindre la concentration souhaitée de 10 mg/L.

- **Sous-solution de Potassium (K^+) à la concentration de 10 mg/L :**

1 mL de la solution mère de chlorure de potassium (KCl) à une concentration de 1 g/L a été prélevé et dilué dans 100 mL d'eau distillée pour obtenir une solution de potassium à 10 mg/L.

II.6.1.6 Titrage du chlorure(Cl^-)

❖ **Mode opératoire :**

- Prendre 100 ml d'eau de l'échantillon ;
- Ajouter 01 ml (K_2CrO_4) ;
- Effectuer le titrage avec une solution de nitrate d'argent ($AgNO_3$) à 0,02 mol/L jusqu'au virage rouge brique ;



Figure.II.03 : Dosage du chlorure (Cl^-) .

II.6.1.7. Titrage du sulfate(SO_4^{2-})

- **Détermination des sulfates dans les eaux (SO_4^{2-}) :**

La méthode MEAC-LAB 07 a été adoptée pour la détermination des sulfates dans les échantillons d'eau. Elle repose sur une analyse spectrophotométrique après précipitation des ions sulfates sous forme de sulfate de baryum ($BaSO_4$), selon la réaction suivante :

❖ **Réactifs utilisés :**

- Solution stabilisante : contenant HCl, éthanol, NaCl et glycérol;
- Solution de chlorure de baryum $BaCl_2$ (0,01N);
- Solution mère de sulfate (1 g/L), préparée à partir de Na_2SO_4 ;

❖ Matériel utilisé :

- Spectrophotomètre UV/Visible.
- Verrerie de laboratoire classique.
- Agitateur magnétique.

❖ Procédure analytique :

- Les échantillons troubles ou colorés sont filtrés sur membrane de 0,45 μm .
- Une gamme étalon est préparée avec des concentrations de 0 à 70 mg/L de SO_4^{2-} .
- Les réactifs sont ajoutés successivement, puis les absorbances sont mesurées à 420 nm.
- Les concentrations sont déterminées à partir de la courbe d'étalonnage et l'absorbance mesurée.

II.6.1.8. Bicarbonate (HCO_3^-) à partir de TAC

Le TAC (Titre Alcalimétrique Complet) est un paramètre essentiel pour déterminer l'alcalinité d'une eau, principalement due aux ions bicarbonates (HCO_3^-). Il est mesuré par titration d'un échantillon d'eau avec un acide fort, tel que l' H_2SO_4 , jusqu'à un pH de 4,5, point auquel les bicarbonates sont totalement neutralisés (**Rodier et al., 2009**).

Mesure de titre alcalimétrique complète (TAC) :**❖ Mode opératoire :**

- Prendre 100 ml échantillon ;
- Ajoute 03 gouttes méthyle orange ;
- Réalise la titration avec H_2SO_4 N/50 jusqu'au virage au jaune orangé ;



Figure.II.04 : Matériel utilisé et virage de couleur lors de la titration du TAC.

II.6.1.9. Titrage de nitrate NO_3^-

❖ Réactif :

- Solution de Salicylate de Sodium ;
- Solution d'hydroxyde de Sodium ;
- Solution de tartrate double de sodium et de potassium ;
- Acide sulfurique (H_2SO_4) concentré ;
- Solution mère de nitrate à 1000 mg/l .

❖ Mode opératoire :

- Prendre 1 ml d'échantillon d'eau ;
- Ajouter 2 ml de la réactif A (LCK339) ;
- Homogénéiser soigneusement le mélange ;
- Laisser réagir pendant 1 minute à température ambiante ;
- Effectuer la lecture de l'absorbance à l'aide du spectrophotomètre (HACH).

II.7. Méthodologie de calcul de l'indice de qualité de l'eau

La méthodologie employée pour le calcul de l'IQE dans cette étude repose sur l'approche classique proposée par **Horton (1965)**, devenue depuis l'un des modèles fondamentaux de l'évaluation de la qualité environnementale. Cette méthode comporte plusieurs étapes clés, notamment la détermination des notes de qualité pour chaque paramètre, l'attribution de pondérations relatives et le calcul d'une moyenne pondérée pour obtenir l'indice global.

Afin d'évaluer l'aptitude globale de l'eau de l'aquifère du Complexe Terminal d'Eloued à la consommation humaine, une approche multi-étapes basée sur l'indice de qualité de l'eau (IQE) est appliquée. Cette méthode implique l'intégration de plusieurs paramètres clés de la qualité de l'eau par des calculs pondérés et standardisés.

➤ **Étape 1** : Attribution et normalisation des pondérations

Dans la première étape, 11 paramètres physico-chimiques sont pris en compte : pH, conductivité électrique (CE), matières solides dissoutes totales (TDS), chlorure (Cl⁻), nitrate (NO₃⁻), sulfate (SO₄²⁻), bicarbonate (HCO₃⁻), calcium (Ca²⁺), magnésium (Mg²⁺), potassium (K⁺) et sodium (Na⁺). À chacun de ces paramètres est attribuée une pondération (w_i) reflétant son impact relatif sur la santé humaine et la qualité de l'eau.

Afin de garantir la comparabilité, les pondérations brutes sont normalisées de manière à ce que leur somme soit égale à un. Ceci est obtenu à l'aide de la formule :

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i}$$

Cette étape de normalisation garantit que l'influence de chaque paramètre est proportionnelle aux autres.

Cette formulation garantit que les paramètres ayant une importance environnementale et sanitaire plus élevée exercent une influence proportionnellement plus grande sur la valeur finale de l'indice de qualité de l'eau. Par exemple, des paramètres tels que les nitrates et les fluorures, qui présentent des risques directs pour la santé humaine, se voient souvent attribuer une pondération plus élevée que des variables moins critiques.

➤ **Étape 2** : Calcul de l'indice de qualité

Dans la deuxième phase, un indice de qualité (q_i) est déterminé pour chaque paramètre. Ce score quantifie la proximité de la concentration mesurée (C_i) d'un paramètre donné avec sa limite maximale admissible fixée par l'Organisation mondiale de la santé (S_i). L'indice de qualité est calculé selon la formule suivante :

$$q_i = \left(\frac{C_i}{S_i} \times 100 \right)$$

Une valeur de q_i inférieure indique une meilleure qualité de l'eau, tandis qu'une valeur nettement supérieure à 100 suggère une contamination ou un risque pour la santé.

➤ **Étape 3** : Calcul du sous-indice et de l'indice de qualité de l'eau (IQE)

La troisième étape consiste à calculer le sous-indice (IQE) de chaque paramètre en multipliant sa pondération normalisée (W_i) par la note de qualité correspondante (q_i) :

$$SI_i = W_i \times q_i$$

Enfin, l'indice global de qualité de l'eau (IQE) est déterminé en additionnant les sous-indices de chaque paramètre (i) :

$$IQE = \sum SI_i$$

L'IQE fournit une valeur numérique unique qui reflète l'effet cumulé de tous les paramètres inclus sur la qualité de l'eau. En fonction de la valeur IQE finale, l'eau peut être classée en classes de qualité (par exemple, excellente, bonne, mauvaise, etc.) à des fins de prise de décision et de gestion

Tableau.II.01 : Poids des paramètres utilisés dans le calcul de l'indice IQE.

Paramètres	Poids (w_i)	N. OMS 2011 (SI)	Poids relatif (W_i)
Ph	4	8.5	0,11429
CE	4	2500	0,11429
TDS	5	500	0,14286
Ca ²⁺	2	75	0,05714
Mg ²⁺	1	50	0,02857
Na ⁺	2	200	0,05714
K ⁺	2	12	0,05714
Cl ⁻	3	250	0,08571
HCO ₃ ⁻	3	240	0,08571
SO ₄ ²⁻	4	250	0,11429
NO ₃ ⁻	5	50	0,14286
Total	35		1,00000

The background of the page is a high-speed photograph of water splashing, creating a dynamic and refreshing visual. The water is captured in various stages of movement, with droplets and streams of varying sizes and directions. The color is a clear, bright blue, and the lighting highlights the texture and movement of the liquid. The text is centered on a white background that is partially obscured by the water splash.

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1. Caractéristiques physico-chimiques et analyses statistiques des eaux du Complexe Terminal

Les résultats de divers paramètres hydrochimiques pour les échantillons d'eaux du Complexe Terminal sont résumés statistiquement pour évaluer la qualité de l'eau dans la région. Ces analyses comprennent le calcul des valeurs moyennes (Moy), minimales (Min) et maximales (Max) pour les différentes variables, fournissant un aperçu complet des caractéristiques physiques et chimiques des eaux souterraines de la zone.

III.1.1. Le Potentiel d'hydrogène pH

Le pH d'un échantillon d'eau est une mesure de l'acidité ou la basicité d'une eau, il est exprimé sur une échelle allant de 1 à 14:

- Milieu neutre $\text{pH}=7$.
- Milieu acide $\text{pH}<7$.
- Milieu basique $\text{pH}>7$.

Les valeurs de pH mesurées (figure.01) paraissent proches de la neutralité à légèrement alcalines de (7,34) comme minimum et un pH de (7,88) comme maximum. Avec une moyenne (7,58).

Cette valeur ne dépasse pas les normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS), Le pH de la plupart des eaux naturelles oscille entre (6,5) et (8,5).

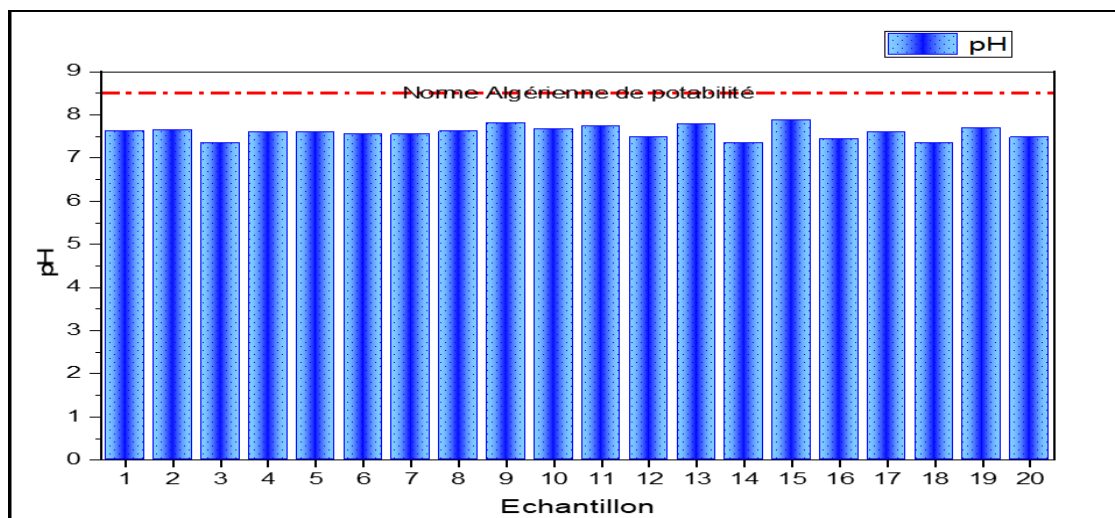


Figure. III.01 : Histogramme de pH dans des forages de CT.

III.1.2. Total des solides dissous TDS

L'eau est un excellent solvant qui dissout les minéraux des roches qu'elle traverse, entraînant une augmentation des concentrations de solides totaux dissous (TDS). Le TDS comprend divers sels et minéraux dissous, et ses niveaux sont influencés par plusieurs facteurs. Le TDS peut être estimé à l'aide de la conductivité électrique, ce qui en fait un indicateur clé de la qualité des eaux souterraines. Le TDS est donné par la formule suivante:

$$TDS (mg/L) = \frac{(A-B) \times 10^6}{V}$$

Où :

A=Poids final du bécher et du résidu.

B= poids initial du bécher.

V= Volume de l'échantillon prélevé.

Les valeurs de TDS mesurées (figure.02). Les valeurs mesurées de matières dissoutes totales (TDS) variaient d'un minimum de (2 393 mg/L) à un maximum de (2 963 mg/L), avec une moyenne de (2 695 mg/L). Ces valeurs dépassent clairement la limite maximale autorisée fixée par les normes algériennes sur l'eau potable (2000 mg/L).

Cette concentration, élevée de TDS, est attribuée à plusieurs facteurs naturels et anthropiques, notamment à la nature des formations géologiques traversées par les eaux souterraines, qui contribuent à la dissolution des minéraux et des roches.

De plus, les activités humaines telles que l'expansion agricole et l'utilisation d'engrais, ainsi que les facteurs climatiques tels que les faibles précipitations et les températures élevées, contribuent à l'augmentation de la concentration de sels dans les eaux souterraines.

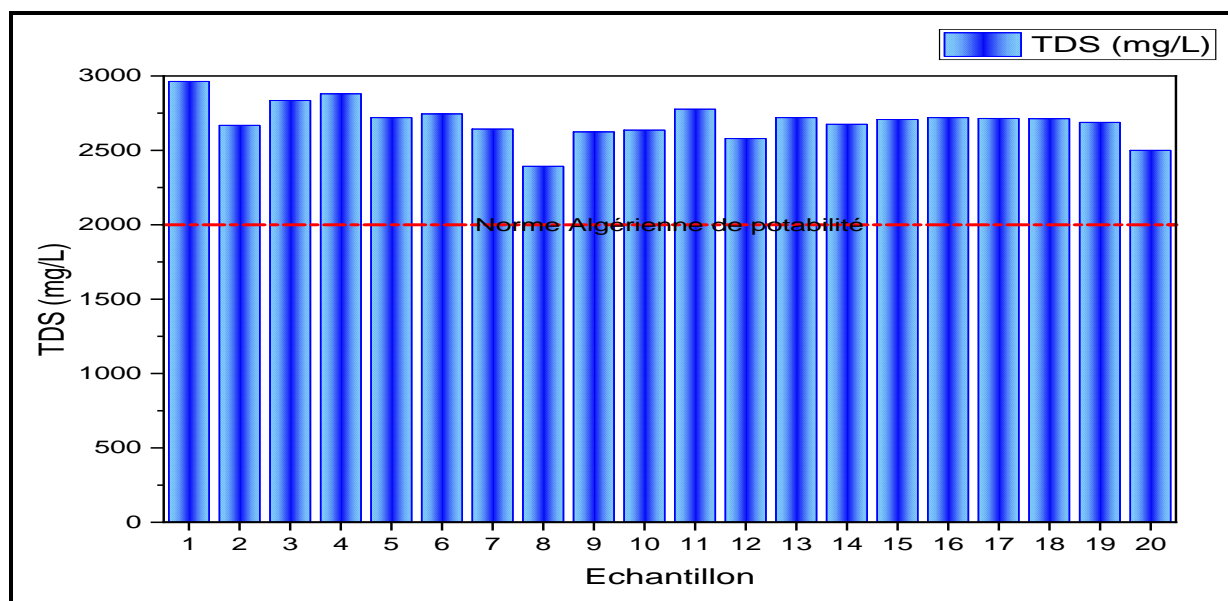


Figure.III.02 : Histogramme de TDS dans des forages de CT.

III.1.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique est une mesure de la capacité de l'eau à conduire le courant électrique et est directement liée à la concentration d'ions dissous dans l'eau. Plus la concentration de ces ions est élevée, plus la conductivité est élevée (بن سعيد, 2020).

Elle est exprimée en microsiemens par centimètre ($\mu\text{S}/\text{cm}$) et est couramment utilisée comme méthode rapide et indirecte pour estimer le total des matières dissoutes (TDS) dans l'eau. Il est considéré comme l'un des indicateurs physiques les plus importants pour évaluer la qualité de l'eau.

Les valeurs de conductivité des échantillons d'eau étudiés restent supérieures aux normes pour l'eau potable fixées par la réglementation algérienne ($\sigma < 2800 \mu\text{S}/\text{cm}$).

Les eaux de la nappe CT présentent des valeurs de conductivité (figure 03) variant entre (3740) et (4630) $\mu\text{S}/\text{cm}$ et moyenne de (4206) $\mu\text{S}/\text{cm}$, les eaux ont une forte conductivité, donc un degré de minéralisation élevé.

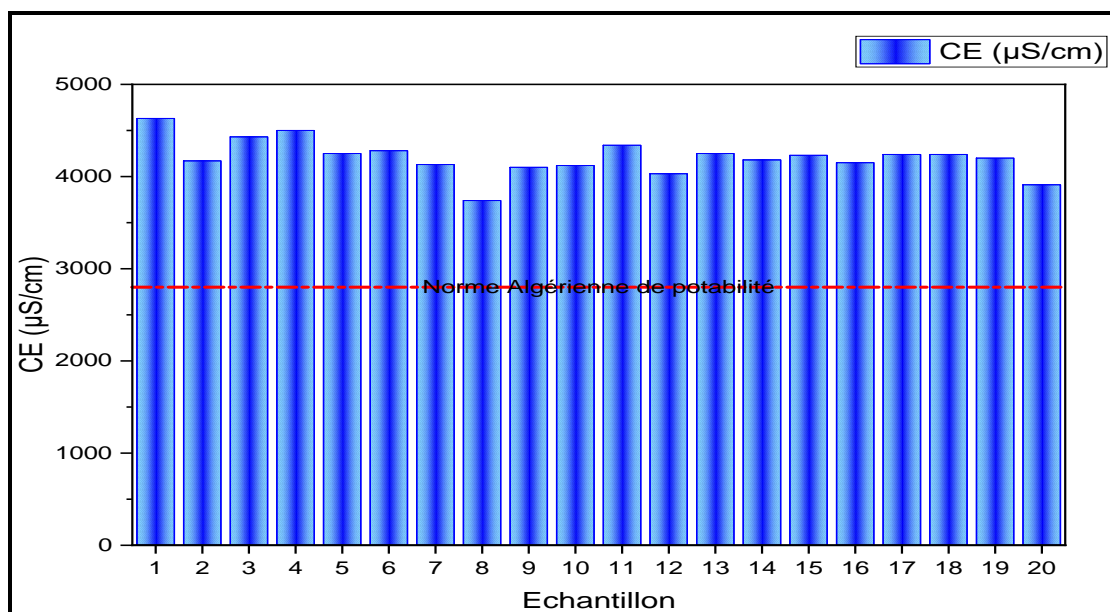


Figure.III.03 : Histogramme de la conductivité électrique (CE) dans des forages de CT.

III.1.4. Calcium

Le calcium est un élément chimique essentiel et un composant majeur de la plupart des types de roches, en particulier les roches sédimentaires telles que le calcaire, la dolomite et le gypse. Il est considéré comme l'un des ions les plus courants dans les eaux souterraines, résultant de la dissolution de ces roches due à l'infiltration de l'eau.

La concentration en calcium dans les échantillons étudiés (figure 04) varie de (200,4 mg/L) au minimum à (320,04 mg/L) au maximum, avec une moyenne de (266,704 mg/L).

Ces résultats montrent que tous les échantillons dépassent la limite maximale fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé et la norme algérienne, qui est de (200 mg/L).

Par conséquent, la concentration élevée en calcium peut être largement attribuée à la dissolution des minéraux des roches, ce qui la classe parmi les eaux ayant une dureté élevée.

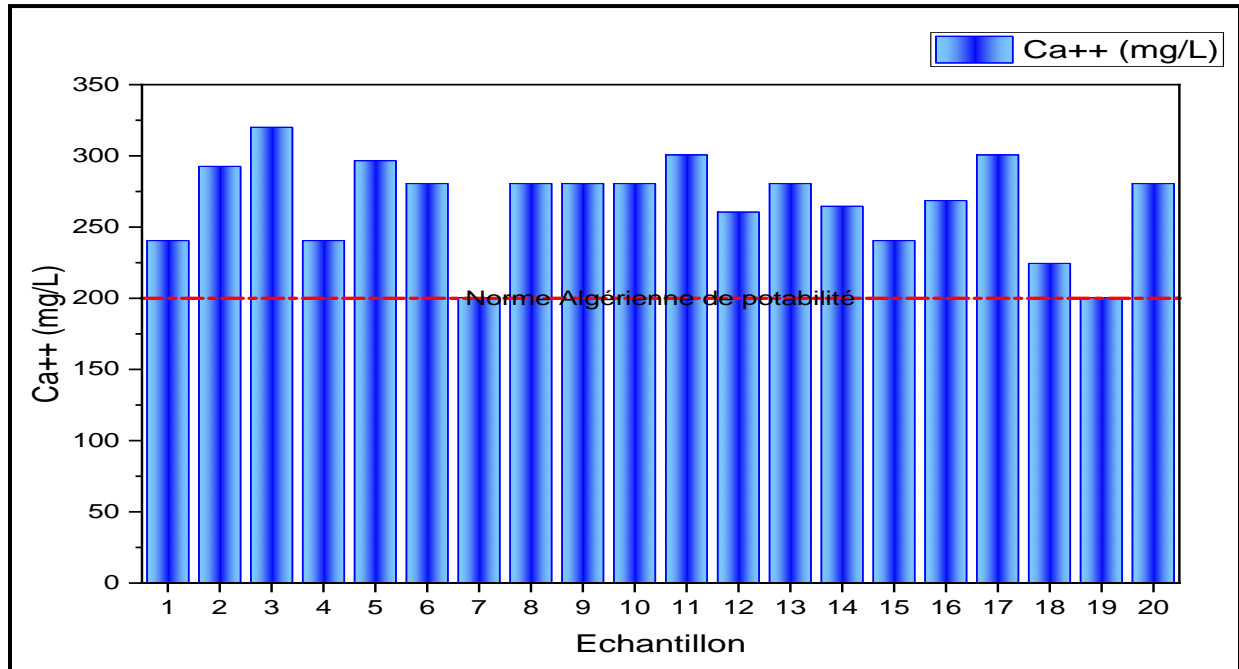


Figure. III.04 : Histogramme de la concentration en calcium dans des forages de CT.

III.1.5. Magnésium

Les principales sources de magnésium dans les roches sédimentaires sont la dissolution des roches magnésiennes, du gypse et des minéraux ferromagnésiens, en particulier la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et des sulfates de magnésium, selon la relation suivante :



Les valeurs de concentration de magnésium enregistrées dans cette étude sont présentées à la (figure 05). La valeur minimale était de (29,166 mg/L), tandis que la valeur maximale atteignait (160,413 mg/L), avec une moyenne de (101,90 mg/L). Cette dernière dépasse la ligne directrice de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) de (50 mg/L), et dépasse également la limite maximale autorisée fixée par les normes algériennes, qui est de (150 mg/L), certains échantillons dépassent les normes pour l'eau potable en raison de niveaux élevés de magnésium, provenant

principalement de la dissolution des roches évaporitiques, avec une contribution possible des eaux usées agricoles. Le magnésium est un indicateur clé de la minéralisation des eaux souterraines.

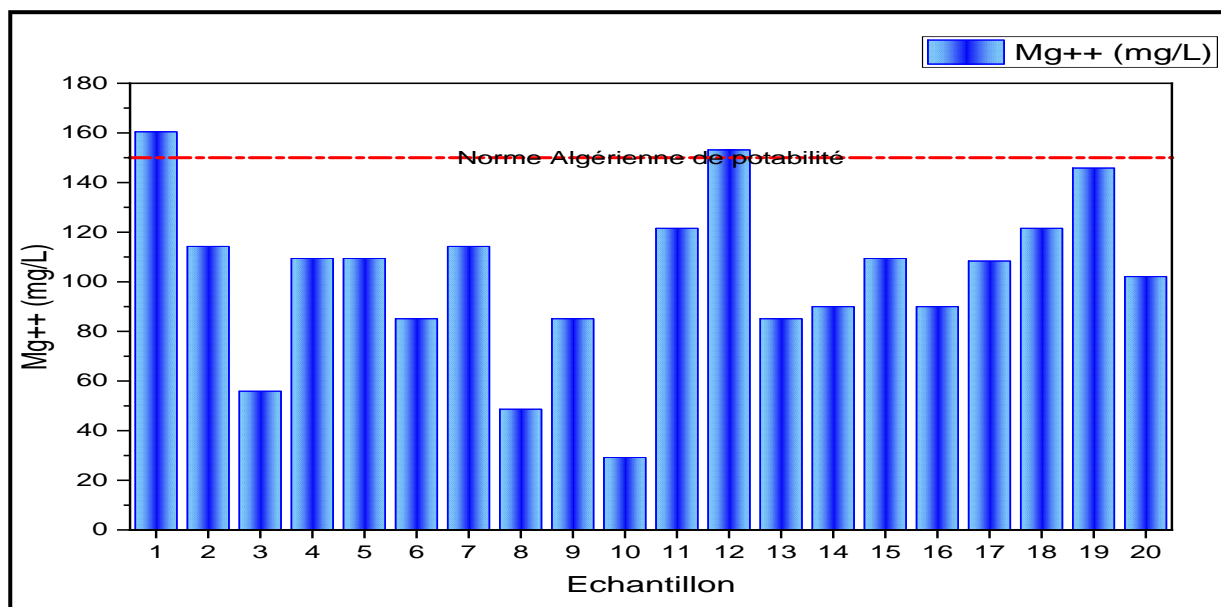


Figure. III.05 : Histogramme de la concentration en Magnésium dans des forages de CT.

III.1.6. Sodium

Le sodium est un cation alcalin présent dans les eaux souterraines, principalement sous forme d'ions issus de la dissolution des halites. Sa haute solubilité lui permet de se déplacer facilement dans l'eau, et des niveaux élevés peuvent affecter la qualité de l'eau.

L'analyse de la concentration en sodium dans les échantillons étudiés (figure 06) révèle que toutes les valeurs dépassent la limite admissible fixée à la fois par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), et par les normes algériennes, qui est de (200 mg/L). La concentration minimale enregistrée était de (320 mg/L), tandis que la concentration maximale atteignait (560 mg/L), et la concentration moyenne était de (460 mg/L). Il provient aussi des réactions d'échange de bases de certains minéraux argileux ou par l'association de sodium avec les chlorures et les sulfates ce qui rend l'eau.

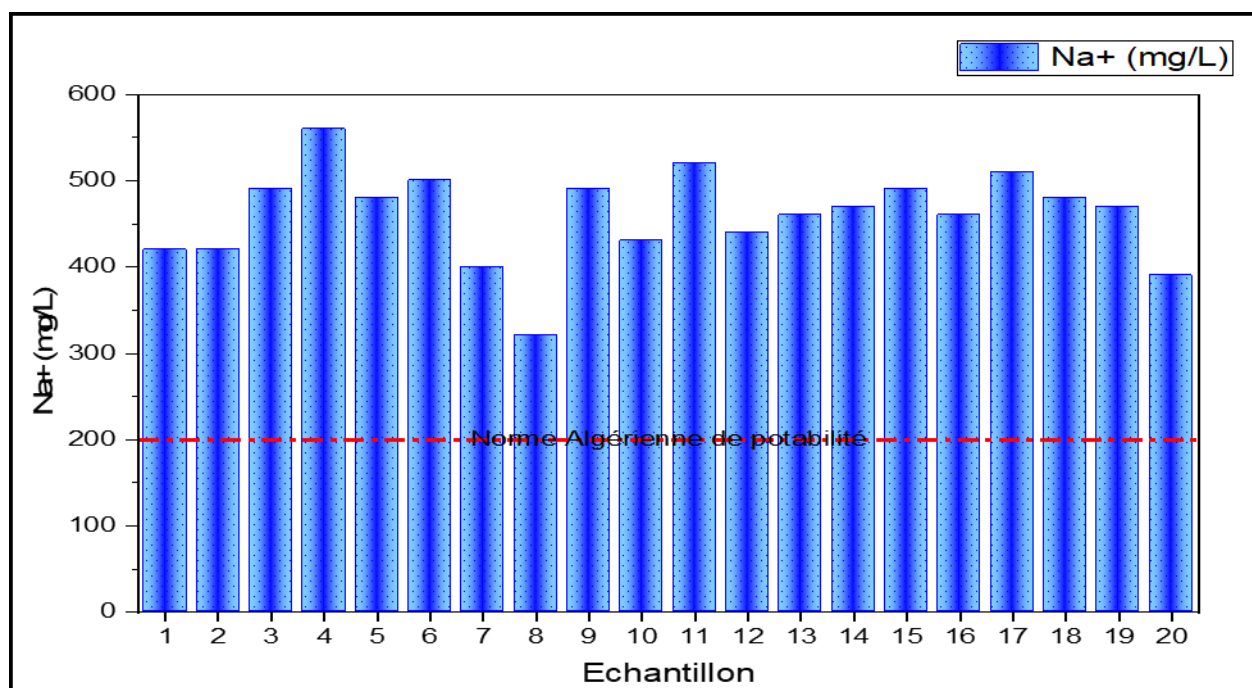


Figure. III.06 : Histogramme de la concentration en Sodium dans des forages de CT.

III.1.7. Potassium

Le potassium (K^+) est un élément alcalin naturellement présent dans la croûte terrestre. Sa présence dans les eaux souterraines est liée à la dissolution de certains minéraux naturels ou roches évaporites, ou encore à l'utilisation d'engrais agricoles (بن عودة, 2018).

Sur la base des résultats de l'analyse chimique de l'eau de forages, les concentrations de potassium (K^+) se situent entre (28 mg/L) au minimum et (45 mg/L) au maximum, avec une moyenne de (36,6 mg/L). Ces valeurs dépassent nettement les limites admissibles fixées par les normes algériennes sur l'eau potable (20 mg/L) (voir figure 07), ainsi que les directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011), qui fixent le maximum à (12 mg/L).

Cette augmentation significative des concentrations de potassium indique l'influence de facteurs géologiques et naturels, ainsi que des activités humaines.

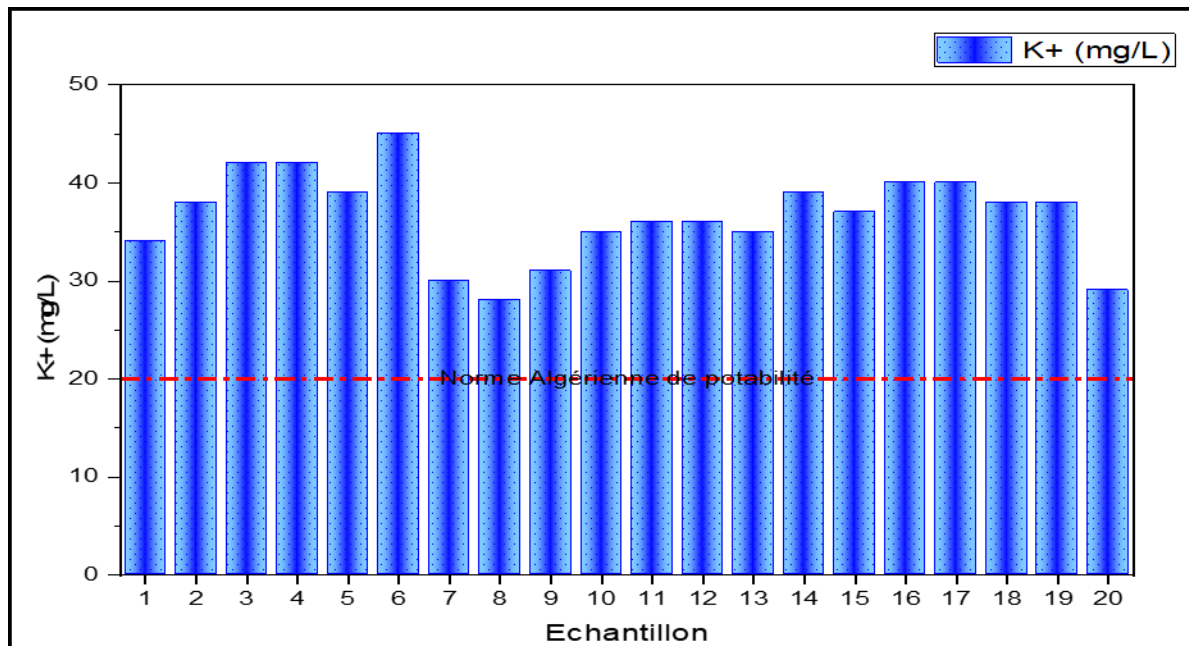


Figure.III.07 : Histogramme de la concentration en Potassium dans des forages de CT.

III.1.8. Chlorure

Le chlorure est un composant majeur des eaux naturelles, caractérisé par sa grande mobilité dans le sol et les eaux souterraines.

Il contribue significativement à la salinisation des sols en raison de sa forte solubilité (**Boukteb et al., 2021**).

Ses principales sources sont l'altération des roches, notamment celles déposées en milieu marin, ce qui explique les fortes concentrations observées dans les zones influencées par des formations géologiques anciennes (**Boukhadra, 2023**).

L'évolution du chimisme de chlorure dans les eaux du Complexe Terminal (figure 08) marquée par des concentrations importantes de chlorure est de (560, 14 mg/L) à (985, 59 mg/L). Ces valeurs dépassent nettement les limites admissibles fixées par les normes algériennes sur l'eau potable (600 mg/L), ainsi que les directives de l'Organisation mondiale de la santé (OMS 2011) 250 mg/L résultant par des sources naturelles est la dissolution de l'halite ou des sources anthropiques.

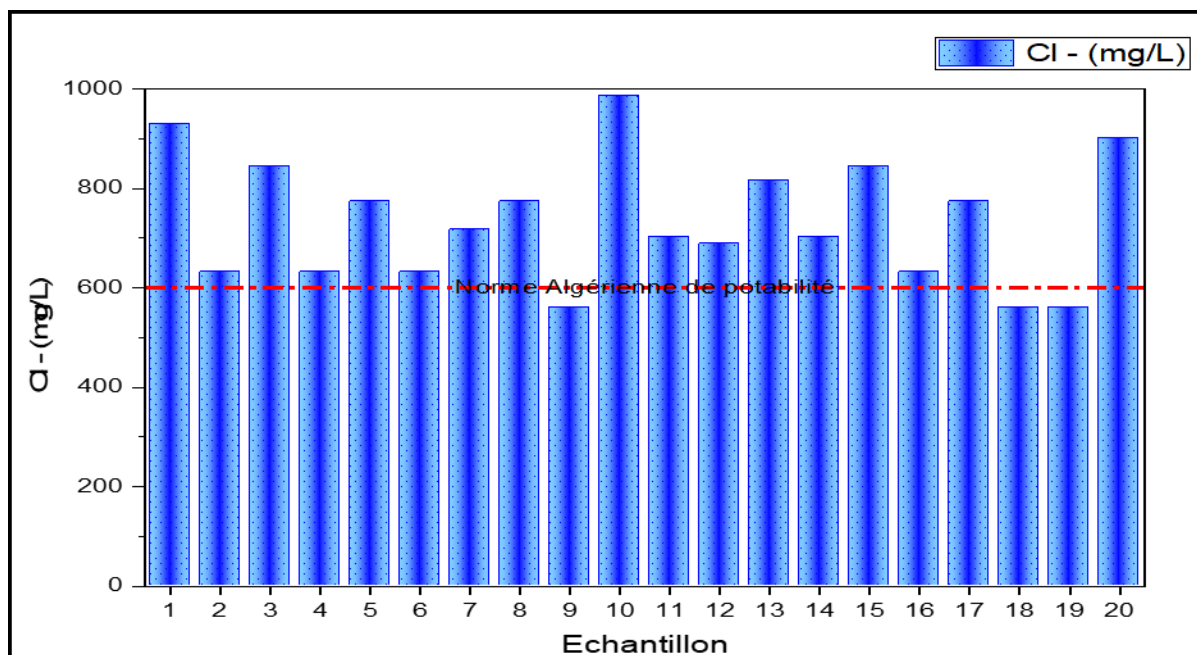


Figure.III.08 : Histogramme de la concentration en Chlorure dans des forages de CT.

III.1.9. Sulfates

Le sulfate est un anion naturel que l'on trouve couramment dans tous les types d'eaux naturelles. Sa principale source dans les roches sédimentaires est la dissolution des formations de gypse, d'anhydrite et d'évaporite marine.



Les niveaux de sulfate dans les eaux souterraines (figure 09) varient de (625,145) à (985,241) mg/L, et la concentration moyenne est de (842,86 mg/L). Ces valeurs dépassent les normes de l'OMS (250) et de l'Algérie (400), principalement en raison de sources naturelles telles que les formations de gypse, avec d'éventuelles contributions du lessivage des sols agricoles.

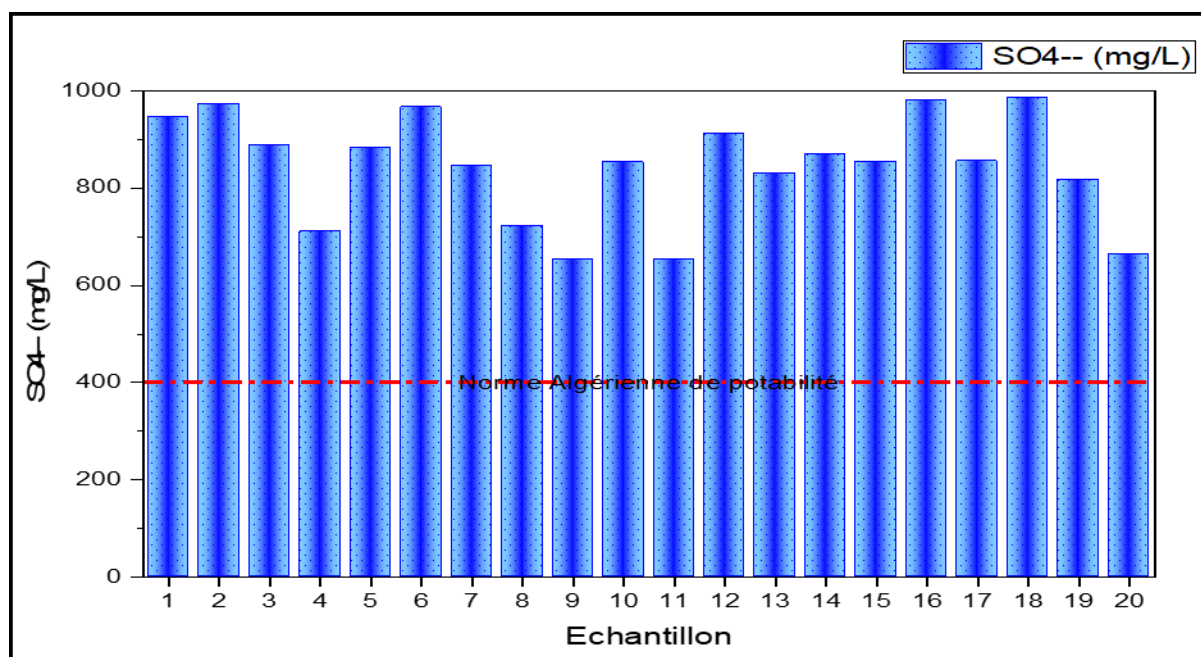


Figure. III.09 : Histogramme de la concentration en Sulfates dans des forages de CT.

III.1.10. Bicarbonates

Le dioxyde de carbone dissous dans l'eau de pluie est considéré comme la principale source d'ions bicarbonate et carbonate dans les eaux souterraines, car il réagit avec les roches carbonatées pour former ces ions. L'efficacité de cette réaction augmente dans le sol en raison de l'activité biologique (**Karanth, 1987**).

Les résultats de l'analyse des concentrations de bicarbonate (figure 10) dans les eaux souterraines montrent des valeurs allant d'un minimum de (100,01 mg/L) à un maximum de (170,8 mg/L), avec une moyenne de (129,25 mg/L). Ces valeurs sont considérées comme faibles à modérées par rapport aux normes fixées par l'Organisation Mondiale de la Santé (240 mg/L), et à la norme algérienne (300 mg/L). Cela indique une bonne qualité chimique de l'eau et une interaction modérée avec les roches carbonatées, sans aucun signe de pollution ou d'influence industrielle.

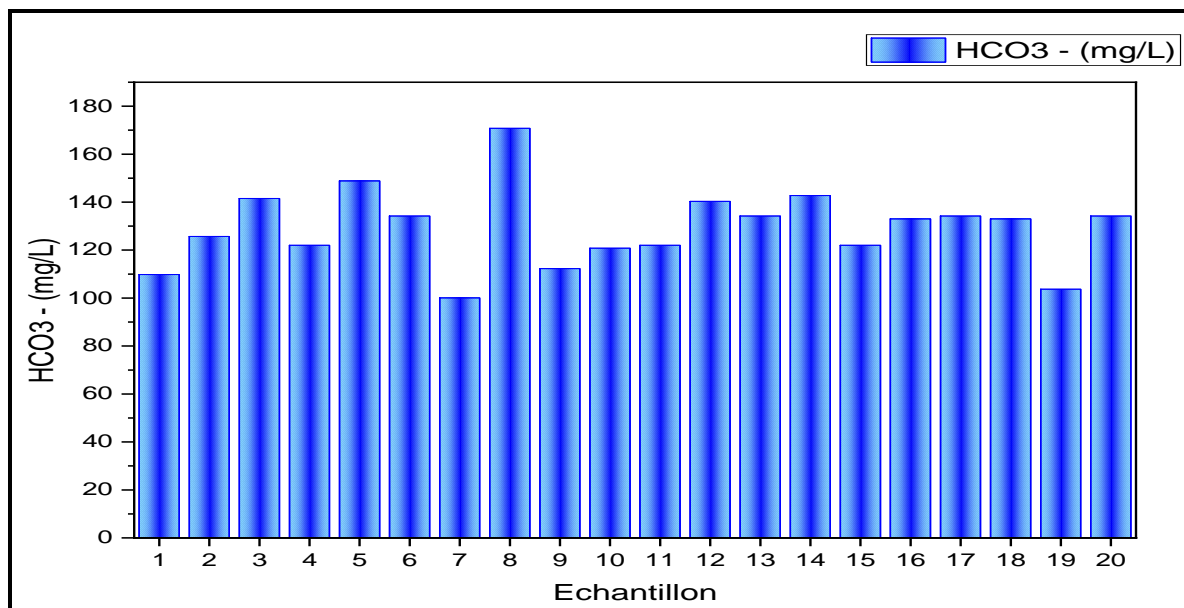


Figure.III.10 :Histogramme de la concentration en Bicarbonates dans des forages de CT.

III.1.11. Nitrate

Les nitrates représentent la forme d'azote la plus oxydée et la forme d'azote la plus soluble dans les environnements aqueux.

Les résultats des analyses des Nitrates (figure 11) ont montrés que les eaux de cette région présentent une concentration en Nitrates de (15, 11mg/L) comme minimum et de (31, 63 mg/L) comme maximum et une moyenne de (22, 50 mg/L).

De faibles concentrations de nitrates ont été enregistrées, restant inférieures à la limite maximale admissible de 50 mg/L fixée par (OMS) et les normes algériennes. Cette réduction est attribuée à la faible activité agricole et à l'efficacité des couches de confinement géologiques pour protéger les eaux souterraines de la contamination de surface.

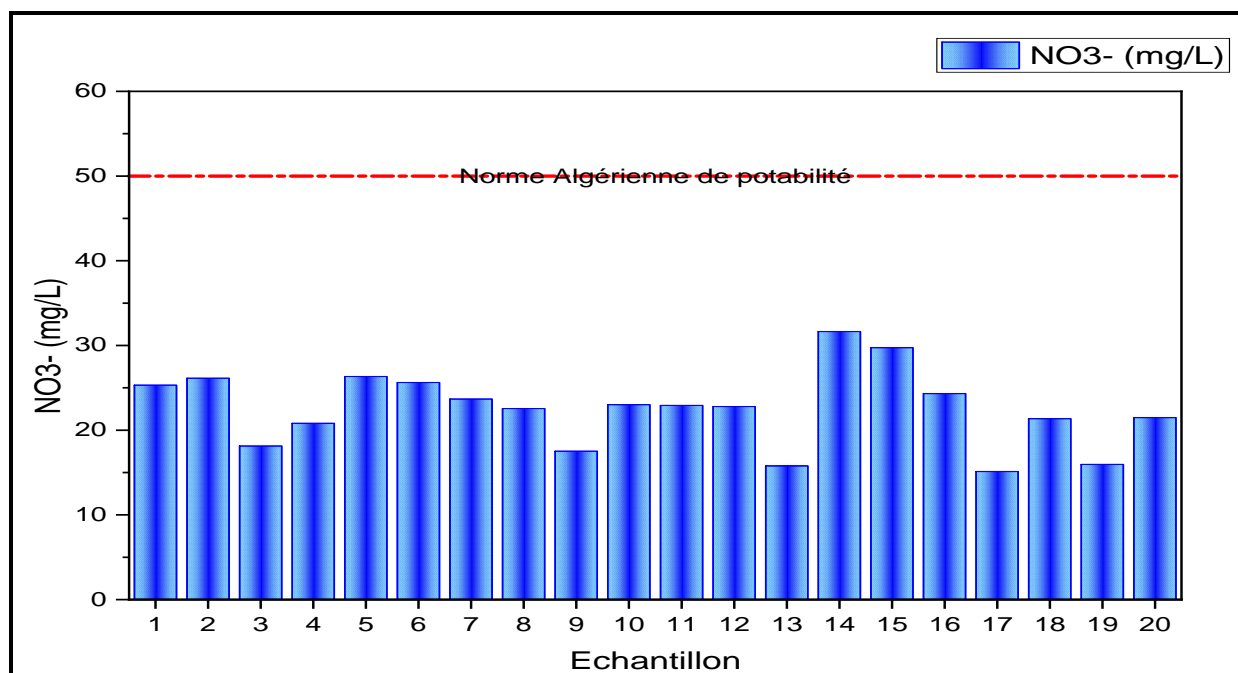


Figure. III.11 : Histogramme du Nitrate dans des forages de CT.

III.2. Identification des faciès chimiques

III.2.1. Diagramme de piper

Afin de déterminer avec précision le faciès hydrochimique et d'évaluer les aspects qualitatifs des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses chimiques est considérée comme un outil essentiel. Dans ce contexte, le diagramme de Piper (**Piper, 1944**) a été utilisé comme méthode efficace pour classer les eaux souterraines en traçant les principaux cations et anions sur deux triangles distincts, qui affichent les proportions relatives de chaque ion par rapport au contenu ionique total. Ces deux triangles sont ensuite reliés par un champ central en forme de losange, où la projection des lignes sécantes de chaque triangle fournit une classification chimique globale. Ce diagramme est particulièrement utile pour observer l'évolution du faciès de l'eau avec une minéralisation croissante, comparer différents groupes d'échantillons et identifier les types d'ions dominants.

Les données d'analyse chimique des échantillons d'eau du Complexe Terminal collectés dans la zone d'étude ont été tracées sur le diagramme trilineaire de Piper pour caractériser le faciès hydrochimique dominant. Les résultats (figure 12) ont révélé deux types d'eau dominants : le faciès chloruré sodique ($\text{Na}^+\text{-Cl}^-$) comme type prédominant, et le faciès sulfaté sodique ($\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$). Cela indique un faciès mixte

$\text{Na}^+ - \text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$, reflétant l'influence de formations géologiques évaporitiques telles que l'halite et le gypse, en plus des processus d'échange d'ions se produisant au sein du système aquifère.

Ces résultats concordent globalement avec ceux rapportés par **Zidane & Soufi (2018)**, qui a identifié différents faciès hydrochimiques dans son étude du même système d'eau souterraine. Selon ses résultats, le faciès sulfate de sodium représentait 36,84 %, suivi du chlorure de sodium (26,31 %), du chlorure de calcium (21,05 %) et du sulfate de calcium (15,80 %). Cette distribution met en évidence la dominance des ions Na^+ , SO_4^{2-} et Cl^- . La similarité de la composition hydrochimique entre les deux études renforce le rôle important de la géologie locale, en particulier des formations évaporitiques, dans la qualité des eaux souterraines dans la région d'Eloued.

Les origines possibles de cette composition chimique sont souvent liées à des processus bien connus :

1. Dissolution des roches évaporitiques

Halite (NaCl) → libère Na^+ et Cl^- dans l'eau.

Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) → libère du Ca^{2+} et du SO_4^{2-} , mais parfois le Ca^{2+} est échangé avec du Na^+ , des teneurs élevées en chlorure et en sulfate, le sodium dominant après l'échange d'ions.

2. Échange ionique

Échange $\text{Ca}^{2+} \leftrightarrow \text{Na}^+$ dans l'aquifère :

Les eaux initialement riches en Ca^{2+} deviennent riches en Na^+ par absorption du calcium sur les argiles (smectites, illites), on parle alors d'échange d'ions indirect.

3. Intrusion marine ancienne.

L'aquifère a été envahi par des eaux marines fossiles liés à une forte présence naturelle de Na^+ et de Cl^- .

4. Evaporation intense

Dans les régions arides, l'évaporation de l'eau augmente les concentrations d'ions dissous (Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-}), typique des zones désertiques (le sud de l'Algérie, le Sahara).

5. Pollution anthropique (possible)

Rejet d'eaux usées, d'irrigation ou d'engrais riches en chlorures et en sulfates.

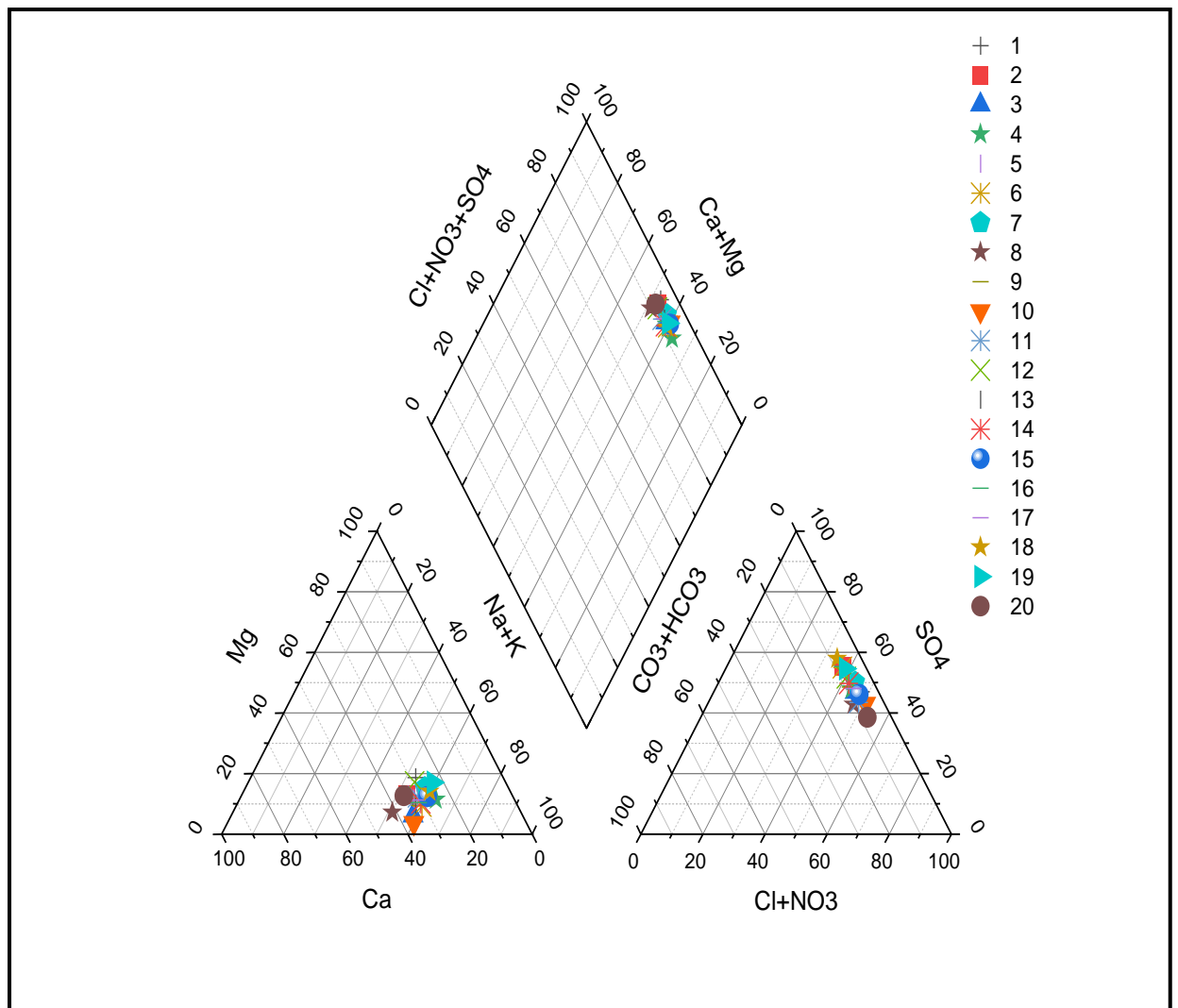


Figure.III.12:Projection des résultats des analyses chimiques des échantillons des eaux du Complexe Terminal sur le diagramme de Piper.

III.2.2. Diagramme de Stabler

Cette classification est exprimée par une formule caractéristique (formule ionique), elle consiste à calculer les quantités en réaction en pourcent par rapport à la concentration totale (50% anions, 50% cations).

$$r \% = r * 100 / c$$

Dont :

- r % : quantité en réaction en pourcent de l'élément.
- r : la quantité en réaction de l'ion considéré en méq/l.
- c : la concentration totale.

Puis on classe de gauche à droite par ordre décroissant, les quantités en réaction en pourcent des anions et des cations pour obtenir des formules caractéristiques. Cette dernière permet d'une part de définir la relation entre le chimisme des eaux et la lithologie de l'aquifère et d'autre part de regrouper les eaux de même origine, L'analyse du diagramme de Stabler (figure 13) des 20 échantillons d'eau du Complexe Terminal révèle la présence de deux faciès chimiques dominants. La majorité des échantillons (75 %) est caractérisée par un faciès chlorure de sodium (Na-Cl). En revanche, 25 % des échantillons présentent un faciès sulfate de sodium (Na-SO₄), suggérant que la chimie de l'eau dans ces échantillons est influencée par la dissolution de minéraux évaporitiques.

La prédominance du faciès Na-Cl implique que la salinisation est un processus important dans l'aquifère étudié, potentiellement lié à l'évolution géochimique naturelle ou aux activités humaines. La présence du faciès Na-SO₄, bien que moins fréquente, indique une variabilité spatiale des processus géochimiques contrôlant la composition des eaux souterraines.

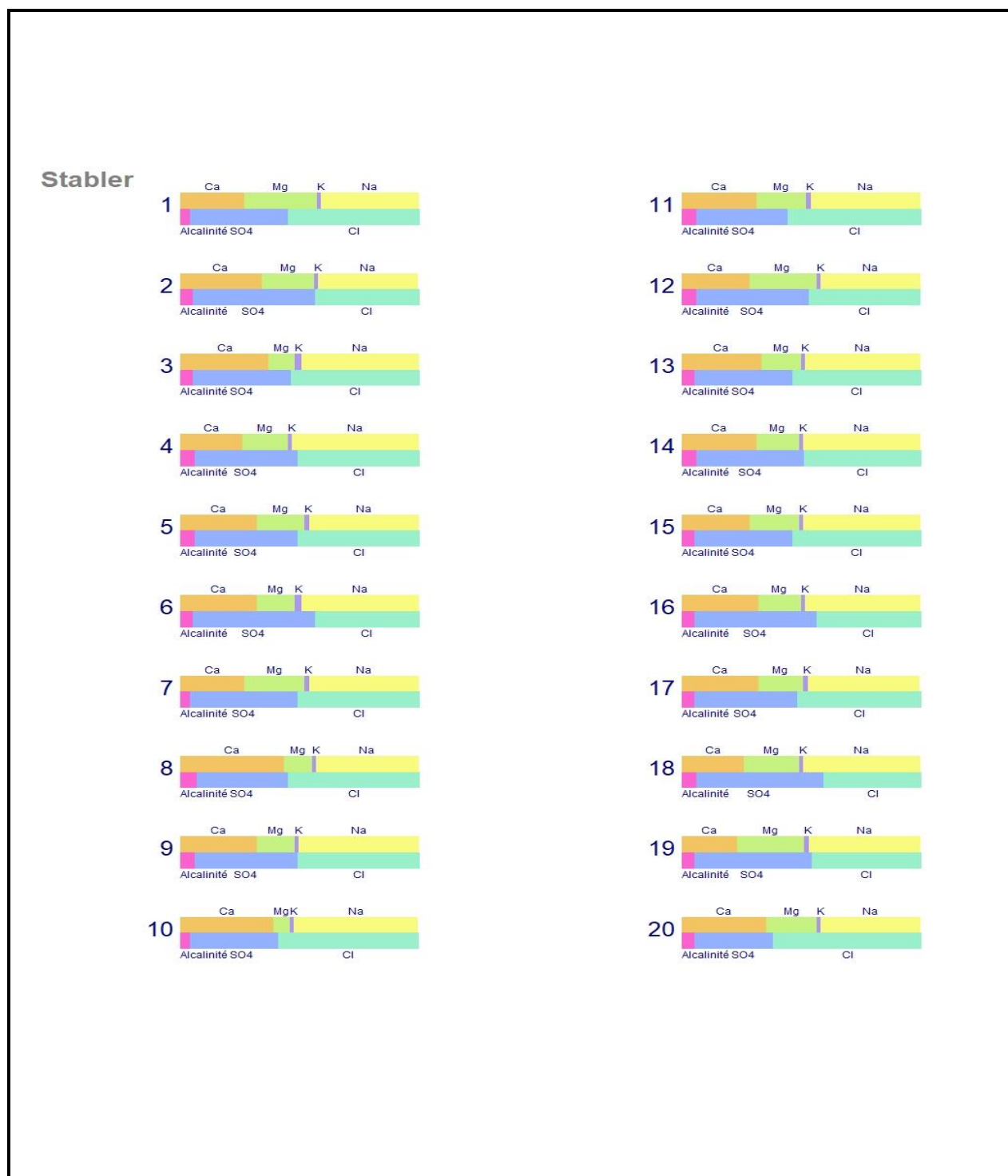


Figure.III.13 : Diagramme de classification des faciès chimiques selon Stabler.

III.3. Aptitude des eaux à l'irrigation

Le sodium (Na^+) est considéré comme un indicateur clé pour évaluer l'adéquation de l'eau à l'irrigation, en raison de son impact significatif sur la structure et la perméabilité du sol. Dans l'eau d'irrigation avec des concentrations élevées de sodium, les ions Na^+ ont tendance à s'adsorber sur les particules d'argile, déplaçant les ions essentiels de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) du complexe d'échange du sol. Ce processus d'échange de cations conduit à la dispersion des agrégats du sol, au colmatage des pores du sol et à une réduction ultérieure de l'infiltration et de la perméabilité de l'eau.

Les résultats de la teneur en sodium (salinité) et de la conductivité électrique sont des facteurs clés pour évaluer la qualité des eaux souterraines à des fins d'irrigation. La conductivité électrique (CE) est considérée comme un indicateur important pour la classification de cette eau. Pour déterminer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation, on utilise la classification de Richards, basée sur les valeurs de conductivité électrique (EC) et le taux d'adsorption de sodium (SAR) pour identifier les catégories (tableau 01) qui indiquent le risque d'alcalinité dans l'évaluation de la qualité de l'eau, comme indiqué dans la classification de Richards (**Richards 1954**).

Tableau.III.01 : évaluation de la qualité des eaux d'irrigation

Degré	Qualité	Classe	Interprétation
1	Excellente	C1-S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1	En général eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation des plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à forte capacité d'échange d'ions (sols argileux)
3	Admissible	C3-S1 C3-S2	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à faibles perméabilité.
4	Médiocre	C4-S1 C4-S2 C3-S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage.

En général, le taux d'adsorption (SAR) est utilisé pour mesurer la concentration de sodium par rapport aux concentrations de calcium et de magnésium, il s'agit d'une mesure du risque alcalin / sodium pour les plantes. L'équation ci-dessous est utilisée pour le représenter :

$$SAR = \frac{rNa^+}{\sqrt{(rCa^{2+} + rMg^{2+})/2}}$$

Où :

SAR : Taux d'adsorption de sodium

$r Na^+$, $r Ca^{2+}$ et $r Mg^{2+}$: Concentration des ions en meq /l.

Le taux d'adsorption de sodium (SAR), qui est basé sur les concentrations de sodium (Na^+), de calcium (Ca^{2+}) et de magnésium (Mg^{2+}) exprimées en meq/L, est un indicateur clé pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation. Selon le diagramme de Richards (Figure 14), les résultats de cette étude montrent que la majorité des échantillons d'eau appartiennent aux classes SAR (S 2 et S3) et à la classe de conductivité électrique C4. Cela indique une salinité élevée et des niveaux de sodium élevés, ce qui peut entraîner une dégradation de la structure du sol et une perméabilité réduite, affectant finalement la productivité des cultures, en particulier pour les espèces sensibles au sodium.

Néanmoins, cette eau peut être utilisée dans des conditions spécifiques, en particulier dans les sols sableux ou riches en gypse agricole, ainsi que dans les cultures tolérantes au sel, à condition que des pratiques de gestion agricole appropriées soient mises en œuvre pour atténuer les effets négatifs. (**Hammadi et al. 2022**).

Par rapport aux conclusions de **Zidane & soufi (2018)**, une nette cohérence est observée dans la classification de la qualité des eaux souterraines, car la plupart des échantillons des deux études relèvent de la catégorie C4 S2 et C4 S3 selon le diagramme de Richards. Cette catégorie reflète une salinité très élevée avec un risque de sodium faible à modéré, confirmant la fiabilité des résultats de la présente étude et soulignant la nécessité d'une gestion prudente de l'eau pour garantir une productivité durable des sols et des cultures.

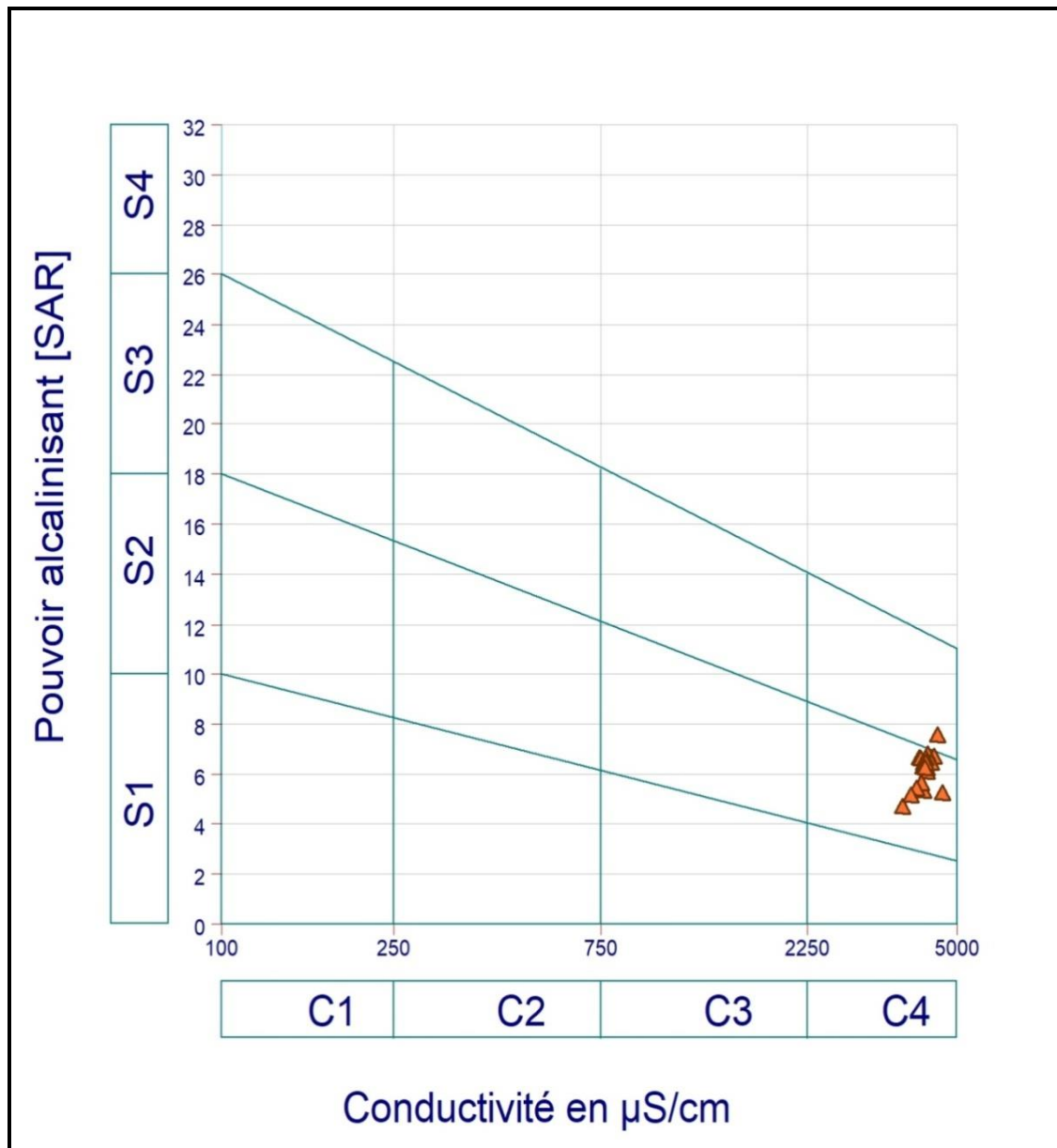


Figure.III.14 :Diagramme de Richards des eaux souterraines.

III.4. Indice de qualité de l'eau (IQE)

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est un outil efficace pour transformer des données complexes et multidimensionnelles sur la qualité de l'eau en une valeur numérique unique et facilement interprétable. Cet indice est particulièrement précieux pour communiquer des évaluations scientifiques aux décideurs politiques et au grand public, permettant ainsi une prise de décision éclairée en matière de gestion des ressources en eau et de protection de l'environnement.

Introduit par Horton en 1965, l'IQE fournit une représentation cumulative de divers paramètres physiques, chimiques et parfois biologiques de la qualité de l'eau. Il résume l'impact collectif de ces paramètres sur la santé globale et l'utilisabilité d'une masse d'eau. Au fil du temps, le concept d'IQE a été adapté et affiné par diverses institutions et chercheurs afin de s'adapter à différents contextes géographiques et hydrologiques.

Les IQE peuvent généralement être classés en deux grands types :

- 1- Les indices physico-chimiques, dérivés de mesures de variables telles que le pH, la conductivité électrique (CE), les solides dissous totaux (TDS), les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-), les nutriments (nitrate, phosphate) et d'autres constituants chimiques. Ces paramètres reflètent le comportement géochimique des eaux souterraines et l'influence des facteurs naturels et anthropiques.
- 2- Les indices biologiques, basés sur la présence, la diversité et l'abondance d'organismes aquatiques tels que le phytoplancton ou les bactéries, fournissent une évaluation indirecte de la qualité de l'eau par la réponse biologique et sont souvent utilisés dans les études écologiques.

L'application de l'indice de qualité de l'eau (IQE) dans cette étude est spécifiquement axée sur la dimension hydrochimique, en utilisant des échantillons d'eau analysés en laboratoire pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines à divers usages. Cette évaluation permet une compréhension globale de l'intégrité chimique des eaux souterraines et favorise l'élaboration de stratégies de gestion de l'eau à l'échelle régionale.

III.4.1. Classification de l'indice de qualité de l'eau

La valeur IQE calculée fournit une évaluation intégrée de la qualité de l'eau et permet de classer la masse d'eau en catégories qualitatives. Ces catégories sont associées à des utilisations recommandées et à des risques potentiels pour la santé. Le système de classification, adapté des normes établies, est présenté ci-dessous (tableau 02) :

Tableau.III.02 : IQE et état de la qualité de l'eau correspondant

Classe de l'IQE	État de la qualité de l'eau	Utilisation recommandée	Nombre d'échantillon	Pourcentage d'échantillon (%)
< 50	Excellente	Convient à la consommation humaine, à l'agriculture et à l'industrie.	0	0%
51 – 100	Bonne	Convient aux usages domestiques, à l'irrigation et à l'industrie	0	0%
101 – 200	Médiocre	Généralement adaptée à l'irrigation et à l'industrie.	0	0%
201 – 300	Très Médiocre	Utilisation restreinte pour l'irrigation ; risques pour la santé en cas de consommation sans traitement.	20	100%
> 301	Inadaptée (Non potable)	Irréprochable ; traitement avancé requis.	0	0%

Ce système de classification est essentiel pour les planificateurs environnementaux, les autorités responsables de l'eau et les collectivités locales afin de prioriser les interventions de traitement de l'eau, d'élaborer des stratégies d'utilisation durable et de sensibiliser le public aux enjeux de la qualité de l'eau.

L'indice de qualité de l'eau (IQE) permettant d'évaluer la potabilité des eaux souterraines captées dans l'aquifère du Complexe Terminal (CT). Selon les résultats obtenus en Mars 2025, les valeurs de l'IQE se situaient entre 214,39 et 257,95, ce qui classe clairement la qualité des eaux souterraines dans la catégorie « très mauvaise » selon les échelles de classification standard de l'IQE.

Ces valeurs élevées sont nettement supérieures aux limites acceptables pour l'eau potable, ce qui indique une grave dégradation de la qualité de l'eau dans la zone d'étude. Ces valeurs élevées de l'IQE sont principalement attribuées à des

concentrations élevées de solides dissous totaux (TDS), d'ions majeurs tels que le sodium (Na^+), le chlorure (Cl^-), le sulfate (SO_4^{2-}), le calcium (Ca^{2+}) et le magnésium (Mg^{2+}), qui contribuent collectivement à la mauvaise qualité globale de l'eau.

La répartition spatiale de l'indice de qualité de l'eau de l'aquifère du Complexe Terminal (illustrée à la figure 15) met en évidence de nettes disparités spatiales au sein de la région étudiée :

- ◆ Les zones Ouest et centre-Sud, notamment autour des puits F1 et F3, présentent les valeurs d'indice de qualité de l'eau les plus élevées, ce qui les classe dans la catégorie « très mauvaise ». Ces zones sont touchées et présentent une dégradation hydrochimique intense, probablement influencée par la salinisation naturelle, ou des pressions anthropiques telles que l'agriculture ou l'urbanisation.
- ◆ En revanche, la partie Est de la zone d'étude présente des valeurs d'indice de qualité de l'eau relativement plus faibles que la partie Ouest, bien que toujours impropres à la consommation directe. Ces zones pourraient refléter un stress hydrochimique moindre.
- ◆ Le centre urbain de la zone d'étude se situe également dans cette catégorie de qualité la plus dégradée, ce qui souligne l'urgence de traiter l'eau ou de trouver des solutions alternatives d'approvisionnement en eau pour les usages domestiques.

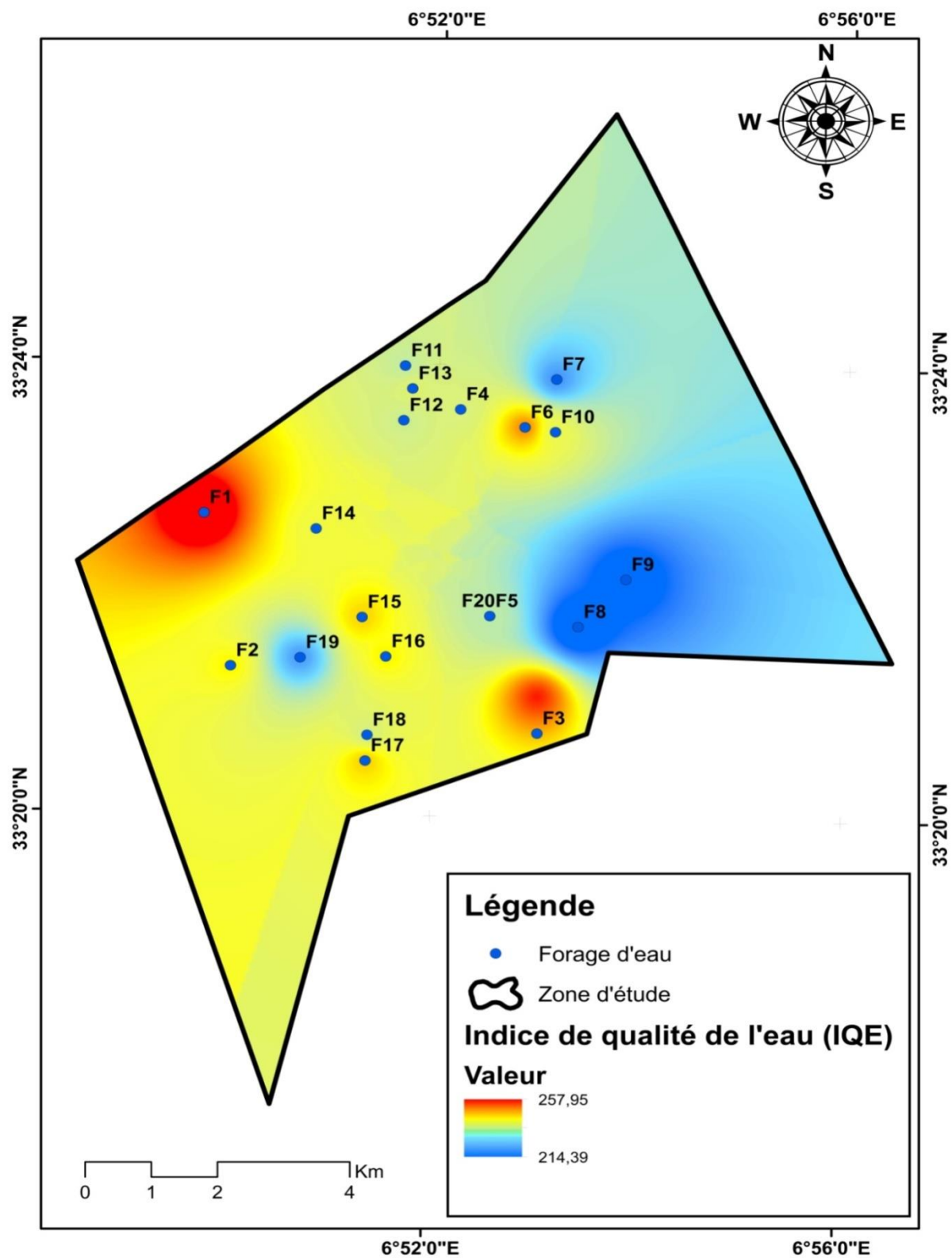


Figure.III.15 : Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité de l'eau.

The background of the slide is a high-speed photograph of water splashing, creating a dynamic pattern of blue and white droplets and streams against a white background. The water appears to be moving from the top and bottom edges towards the center, creating a sense of motion and freshness.

Conclusion générale

Au terme de cette étude, la région d'El-Oued (Oued Souf) apparaît comme l'une des zones désertiques algériennes confrontées à des défis environnementaux complexes, au premier rang desquels la détérioration de la qualité des eaux souterraines due à une combinaison de facteurs naturels et humains. La forte dépendance à de ces ressources en eau pour l'agriculture et la consommation quotidienne, en l'absence d'une réglementation efficace, a conduit à une augmentation des niveaux de salinité et à une dégradation des propriétés chimiques de l'eau, posant une menace directe pour le développement durable de la région.

Cette dégradation s'est reflétée dans les concentrations élevées d'ions majeurs, avec des valeurs moyennes de calcium (Ca^{2+}) à 266,7 mg/L, magnésium (Mg^{2+}) à 101,9 mg/L, sodium (Na^+) à 460 mg/L, potassium (K^+) à 36,6 mg/L, chlorure (Cl^-) à 732,45 mg/L, sulfate (SO_4^{2-}) à 842,86 mg/L, bicarbonate (HCO_3^-) à 129,25 mg/L et nitrate (NO_3^-) à 22,5 mg/L. La plupart de ces niveaux dépassent les normes nationales et celles de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'eau potable, rendant les eaux souterraines impropres à la consommation directe sans traitement préalable.

Grâce à l'application de multiples analyses hydrochimiques, notamment l'utilisation de l'indice de qualité de l'eau (WQI), des systèmes d'information géographique (SIG) et de méthodes graphiques telles que les diagrammes de Richards, Stabler et Piper, une évaluation complète et précise de la qualité des eaux souterraines dans la région d'El Oued (sud-est de l'Algérie) a été réalisée. Selon les diagrammes de Piper et Stabler, les analyses indiquent une dominance des faciès évaporitiques, principalement représentés par le chlorure de sodium et le sulfate de sodium, soulignant le rôle important de la dissolution des minéraux évaporitiques, en particulier l'halite et le gypse. Les résultats ont révélé une détérioration significative de la qualité de l'eau, provoquée par une combinaison de facteurs, notamment la surexploitation des aquifères, des pratiques agricoles non réglementées et des interactions géochimiques naturelles.

Dans ce contexte, l'indice de qualité de l'eau (IQE) s'est avéré être un outil scientifique efficace pour faciliter la surveillance spatiale et temporelle des conditions des aquifères, identifier les points chauds de pollution et évaluer les risques potentiels. Combinés aux techniques SIG, les résultats du IQE ont permis la production de cartes spatiales détaillées mettant en évidence les zones les plus touchées, fournissant ainsi des informations géographiques essentielles pour guider les interventions et soutenir des stratégies d'assainissement et de gestion plus efficaces. Selon l'analyse de l'indice de qualité de l'eau en Mars 2025 une dégradation préoccupante de la qualité des eaux souterraines a été détectée dans l'aquifère du complexe terminal. Tous des échantillons appartiennent à la classe de qualité très mauvaise, ce qui indique que ces eaux sont impropres à la consommation humaine sans un traitement préalable.

Forte de ces constats, cette étude souligne la nécessité d'adopter une approche scientifique intégrée de la gestion des ressources en eau dans la région d'El Oued. Cette approche devrait inclure une surveillance régulière des eaux souterraines, des pratiques d'irrigation efficaces, une sensibilisation accrue de la population à l'environnement et la promotion de technologies de traitement de l'eau appropriées au niveau local. En outre, les résultats de cette étude servent de base scientifique pour de futures recherches explorant des dimensions socio-environnementales plus larges, afin de parvenir à une sécurité hydrique durable aux niveaux local et régional.

The background of the page is a light blue and white water splash pattern. It features various droplets and splashes of water, with some larger, more complex shapes at the top and bottom edges, and smaller, simpler droplets scattered throughout the central white area.

Référence

Bibliographie

Référence bibliographique

1. **Aït Kaci, A. (2019).***Analyse des aquifères profonds en zone saharienne: cas du Continental Intercalaire.* Mémoire de Magister, (Université de Ouargla).
2. **American Public Health Association (APHA). (2017).** *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.).
3. **ANRH, (1993) .** *coupe lithologique du forage F1direction régionale*Ouargla.algerie.
4. **ANRH, (2005):** *inventaire des forage d'eau de la wilaya d'El oued la direction régionale.*
5. **Atik Nacer, F. & Djarallah, S. (2017).***Contribution D'un Sig À La Gestion des ressources En eaux souterraines: Cas De La Vallée de Oued Souf.* Mémoire de Master, Université Hamma Lakhdar – El-oued .
6. **Bel, F., & Cuche, D. (1970).** *Etude des nappes du Complexe Terminal du bas Sahara.*Données géologiques et hydrogéologiques pour la construction du modèle mathématique. DHW., Ouargla.
7. **Belghoul, A., & Kab, B. (2020).***Caractérisation physico-chimique des eaux souterraines de la région d'Oued Souf (Sud-Est Algérien)* (Mémoire de master, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – Mila).
8. **Benyoucef, M. L. (2010).***Inventaire des micromammifères de la région de Still (Oued Souf) (Mémoire de fin d'études, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie).*
9. **Berdjough, I., & Mebarki, B. (2022).***Contribution à l'étude des plantes spontanées de la région d'El-Oued: Cas de la zone de Tayaibet et Bennasser* (Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, Algérie).
10. **Betta, B., & Ghania, F. (2020).***Caractérisation des paramètres hydrogéologiques pour identifier l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la commune d'El-Oued* (Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued, Algérie).
11. **Boualem, R. (2016).***Gestion durable des nappes profondes dans le Sahara septentrional.* Cahiers de géographie du Québec, 60(169), 73–92.
12. **Boudjema, A. (1987).***Évolution structurale du bassin pétrolier triasique du Sahara nord oriental (Algérie)* [Thèse de doctorat, Université Paris XI-Orsay].

13. **Boukhadra, H. (2023).***Qualité des eaux souterraines de la nappe alluvionnaire de Guelma* (Mémoire de Master, Université 8 Mai 1945 Guelma, Algérie).
14. **Boukteb, B., Boutaleb, K., & Chennaf, D. Z. (2021).***Contribution à l'étude de l'effet des sulfates et les chlorures sur la teneur du carbone organique du sol* (Mémoire de Master, Université Ibn Khaldoun - Tiaret, Algérie).
15. **Boulifa, M., & Charf, K. (2019).***Contribution à l'étude de la répartition spatiale de la végétation spontanée dans la partie occidentale de la région d'El-Oued: Cas de S'Till et Hamraia* (Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued, Algérie).
16. **Cornet, A. (1964).***Introduction à l'hydrogéologie saharienne.* Géog. Phys. et Géol.Dyn, vol. VI, fasc1, 5- 72.
17. **dre (2015).***rapport technique sur l'étude hydrogéologique de la nappe phréatique dans la région d'El- oued.* direction des ressources en eau, wilaya d'el oued.
18. **Ghomri, A., Riguet, F., & Khechana, S. (2018).***Contribution to the experimental study of the hydraulic jump in trapezoidal channel with positive slope.* Journal of Fundamental and Applied Sciences, 10(1), 191-200.
19. **Hammadi, A., Brinis, N., & Djidel, M. (2022).** *Hydrogeochemical behavior associated with a diverse etiology of high salinity in phreatic water along Oued Righ valley in Algerian Sahara.* Arabian Journal of Geosciences, 15(12), 1168.
20. **Horton, R. K. (1965).** An index number system for rating water quality. J Water Pollut Control Fed, 37(3), 300-306.
21. **Institut National de la Météorologie (INM). (2021).***Rapport sur le climat saharien algérien.* Alger.
22. **Kadri, S. R., & Chaouche, S. (2018).***La remontée des eaux dans la région du Souf : une menace sur un écosystème oasien* [Groundwater rise in the Souf region: a threat to an oasis ecosystem]. les Cahiers d'EMAM, (30).
23. **Karanth, K. R. (1987).** Ground water assessment, development, and management. (No Title).
24. **Kechiched, R., & Boudoukha, A. (2018).***Hydrogeological study of the aquifer system of the northern Sahara in the Algero-Tunisian border: A case study of Oued Souf region.* ResearchGate.

25. **Khechana, S., & Derradji, E. F. (2014).** Qualité des eaux destinées à la consommation humaine et à l'utilisation agricole : Cas des eaux souterraines d'Oued-Souf, SE algérien. *Revue des Sciences et Technologies, Synthèse*, 28, 58–68.
26. **Kheleil, A., & Bourougaa, M. (2020).** *Évaluation de la vulnérabilité des eaux souterraines par l'application de la méthode d'indice DRASTIC dans le milieu agricole : Cas des communes Debila et Hassani Abdelkerim* (Mémoire de Master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued, Algérie).
27. **Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015).** *Geographic information science and systems*. John Wiley & Sons.
28. **Meissa, B. (2016).** *L'eau et l'espace agraire dans l'Oued Souf : cas de l'ancienne palmeraie* (Mémoire de magistère, Université Kasdi Merbah Ouargla).
29. **Miloudi, A. (2019).** *Mécanismes et remèdes de la remontée des eaux dans la région d'Oued Souf – impact sur l'environnement de la région* (Thèse de Doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie).
30. **Mimmi, Y., & Kaoudja, M. (2021).** *Etude Hydrogéochimique d'une nappe d'eau dans la Région d'El-Oued Souf* [Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah Ouargla].
31. **Ministère des Ressources en Eau. (2021).** *Rapport annuel sur l'état des ressources en eau en Algérie*. Alger: MRE.
32. **OMS (2011).** Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4e édition. Organisation mondiale de la santé, Genève.
33. **OSS (Observatoire du Sahara et du Sahel), (2020).** *Rapport sur les ressources en dans le système aquifère du Sahara septentrional*.
34. **Ouarekh, M. (2022).** *Caractérisation hydrogéologique et géochimique, et gestion de l'aquifère de Mio-Pliocène de la vallée du Souf (SE Algérie)* [Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah – Ouargla].
35. **Ozenda, P. (2003).** *Phytogéographie du Sahara : végétation et bioclimats*. CNRS Éditions, Paris, 622 p. ISBN : 9782271057005.
36. **Piper, A.M. (1944).** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*, v.25(6), pp.914–928.
37. **Richards, L. A. (Ed.). (1954).** *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils* (No. 60). US Government Printing Office.

- 38. Riguet, N. E.-H. (2019).** *Contribution à l'étude de qualité physico-chimique et microbiologique des eaux de sources (Guedila, Manbaa et El-Kantara); cas d'étude la région de Biskra (Mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra).*
- 39. Rodier, J., Legube, B., & Merlet, N. (2009).** *L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer (9e éd.).* Dunod.
- 40. Vallat, J.-P. (2008).** *Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara.* Physio-Géo.
- 41. Zabala, M. (2010).** *La plateforme saharienne: cadre géodynamique et ressources.* Revue des Sciences de la Terre, 45(2), 115-130.
- 42. Zaiz, I. (2015).** *Étude qualitative des eaux de la nappe du complexe terminal dans la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien)* [Mémoire de magister, Université Kasdi Merbah Ouargla].
- 43. Zidane, M. L., & Soufi, M. (2018).** *Étude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère de Complexe Terminale (CT) de El-Oued (SE Algérie)* (Mémoire de fin d'étude, Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie).
- 44. Zine, H., Djeouadi, N., & Messai Ahmed Yakoub. (2022).** *Détermination de la qualité des eaux souterraines de la vallée d'El-Oued (SE, Algérien), utilisation de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI)* (Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued).

Référence électronique

45. APS. (2022, 22 mai). *Météo : des températures au-dessus des moyennes saisonnières*. Agence Presse Service. <https://www.aps.dz/societe/140059-meteo-des-temperatures-au-dessus-des-moyennes-saisonnieres>.
46. APS. (30 mai ,2023). *Climat : des phénomènes extrêmes de plus en plus fréquents prévus à l'avenir*. <https://www.aps.dz/sante-science-technologie/156354-climat-des-phenomenes-extremes-de-plus-en-plus-frequents-sont-prevus-a-l-avenir>
47. Climate-Data. (n.d.). *Climate: El Oued*. Retrieved May 12, 2025, from <https://en.climate-data.org/africa/algeria/el-oued/el-oued-3233/>
48. Fabre, J., et al. (2015). *Géologie de l'Afrique: de l'Archéen au Quaternaire*. Éditions BRGM. <https://www.brgm.fr/fr/livres-cartes-geologiques-brgm-editions>.
49. FAO. (2022). *Aquastat - Algérie: ressources en eau*. Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture. <https://www.fao.org/aquastat>.
50. ONM. (2006). *Données climatiques annuelles de la région d'El Oued*. Office National de la Météorologie. <https://www.meteo.dz>.
51. ONM. (2023). *Données climatiques annuelles de la région d'El Oued*. Office National de la Météorologie. Disponible sur : <https://www.meteo.dz>.
52. U.S. Environmental Protection Agency. (2023). *What is pH?* Retrieved from <https://www.epa.gov/goldkingmine/what-ph>.
53. UNESCO. (2023). *Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2023: Partage de l'eau*. Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000384655>.
54. Weather Spark. (n.d.). *Average Weather in El Oued, Algeria Year Round*. Retrieved May 12, 2025, from <https://weatherspark.com/y/53031/Average-Weather-in-El-Oued-Algeria-Year-Round>
55. Weather Spark. (s.d.). *Météo moyenne à El Oued tout au long de l'année*. <https://fr.weatherspark.com/y/53031/Météo-moyenne-à-El-Oued-Algérie>.
56. World Health Organization (WHO). (2022). *Impact of pH on microorganisms and chemical reactions in water*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications>.

مراجع باللغة العربية

57. بن اسماعين، ل. (2022). تطور المناخ في الجزائر وآثاره. السفير العربي .
<https://assafirarabi.com/ar/47711/2022/09/27/>تطور المناخ في الجزائر وآثاره/
58. بن سعيد، ي. (2020). دراسة نوعية المياه الجوفية في منطقة سهب الشلول بولاية المسيلة. مذكرة ماجستير، جامعة محمد بوضياف – المسيلة.
59. بن عودة، نورة (2018). دراسة هيدروكيميائية للمياه الجوفية في منطقة وادي ريغ – ورقلة، مذكرة ماستر، جامعة قاصدي مرباح ورقلة، الجزائر.
60. دحه، ي، جواد، ع، عالية، ش، و قدوري، ف. (2022). التنوع النباتي في منطقة الوادي ومدى تأثيره على البيئة [مذكرة ماستر، جامعة الشهيد حمه لخضر – الوادي]. جامعة الشهيد حمه لخضر – الوادي.