

UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences Biologiques



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme de
Master Académique

Domaine : Sciences de la Nature et de la Vie

Filière : Ecologie et Environnement

Spécialité : Ecologie Végétale et Environnement

Présenté par : ARIF Rania Dallah et MERIOUMA Aroua

Thème

**Évaluation spatio-temporelle de la qualité des eaux
souterraines dans la région de Ouargla**

Soutenu publiquement le :
19/06/2023

Devant le jury :

Mr HAMDY AISSA Belhadj	Pr.	Présidente	U.K.M. Ouargla
M ^{me} SLIMANI Rabia	M.C.A.	Promoteur	U.K.M. Ouargla
M ^{elle} CHARIKH Messaouda	M.C.B.	Co-promoteur	U.K.M. Ouargla
M ^{me} LAMRANI Cherifa	M.A.A.	Examinatrice	U.K.M. Ouargla

Année universitaire : 2022/2023

Remerciement

Avant tout je donne mes grands remerciements a ALLAH Tout Puissant de m avoir fourni de patience et courage pour achever ce travail.

Je tiens a exprimer mes sincères remerciements a mon Promoteur Mme Slimani Rabia et Co-promoteur Melle CHARIKH Messaouda .

Nos remerciements, s'adressent aussi, aux membres de jury composé De HAMDI AISSA Belhadj et LAMRANI Cherifa pour leur volonté d'examiner notre travail.

Je remercie également l'équipe de l'ANRH et de l'ADE pour leur aide et nous durant ce travail.

Mes chaleureux remerciements s adressent aussi a ma petite famille mes amis et a tous ceux qui contribué de prés ou loin a la réalisation de ce projet de fin d indication et qui m ont emporté leurs aides ne serait ce que par un simple mot d encouragement.



Dédicace

"Avant tout, je rends grâce à Dieu pour m'avoir permis d'atteindre cet accomplissement".

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots justes, tous les mots ne sauraient exprimer ma gratitude, mon amour, mon respect et ma reconnaissance. C'est pourquoi je dédie humblement ce modeste travail à:

A mon père, qui m'a encouragé et qui est ma source de force pour aller jusqu'au bout. Cet homme m'a toujours soutenu et a cru en moi. Je ne saurais jamais le remercier assez pour tout ce qu'il a fait pour moi.

A celle qui m'a donné la vie, ma élevée, mais surtout, ma aimé. Il n'y a pas assez de mots pour décrire à quel point tu es importante pour moi.

Je t'aime, maman.

A mon cher frère Fouad, qui m'a aidé et a été à mes côtés tout au long de ce travail, je lui suis très reconnaissant. Et à mes frères et sœurs : Nesrin, Asma, Bachir, Ritaj, Louay, Rawnaq.

Comme je le dédie à mon amie Aroua, avec qui nous avons traversé des moments difficiles, et j'ai partagé les meilleurs moments de ma vie d'étude. et ma sœur selsabil, la moitié de mon âme, qui est toujours proche de moi, me soutient et m'a énormément aidé ans mon parcours.

ARIF Rania Dallal





Dédicace

*La gratitude fait partie de l'amour,
Si nous apprécions et aimons les gens, nous devons les remercier
pour ce qu'ils nous ont donné. Je dédie ce travail à :
Mon Père, par qui je suis ici. (Abderrahmane)
Mille miséricorde sur ton âme pure que tu as dépensée pour
m'enseigner, Tu es la raison d'arriver à mon but
pour toi. Toi qui m'as donné naissance, soutenu et appris des
leçons de vie. Toi qui a éclairé mon chemin.. Ma précieuse reine, la
prunelle de mes yeux, ma mère (Moufidà) A la famille de
Meriouma et Khelil, chacun en son nom A mon frère,
que ma mère n'a pas mis au monde (Moustafa)
et ses deux enfants, (Roeya, Ouail, Djassem)
A ma tante qui était ma soeur (Faiza Khelil)
À la compagnie de l'amour et du souffle
dans les moments de désespoir.. Hadil.. Ines.. Salssebil
À ceux qui ont lutté avec moi pour préparer cette note.
mon amie (Arif Rania Dallal) et son père qui nous ont soutenus
(Arif Said)
À tous ceux qui ont donné un mot d'encouragement ..
à la promotion 2023 des diplômés en écologie et environnement.*

MERIOUMA Aroua



LISTE DES ABREVIATIONS

- **ADE** : Algérienne Des Eaux
- **ANRH** : Agence Nationale des Ressources Hydriques
- **CE** : Conductivité Electrique
- **F** : Forage
- **FNS** : Fondation Nationale de la Santé
- **I.E.B** : Indice d'échange de Base
- **IQE** : Indice de Qualité d'Eau
- **ISO** : L'Organisation Internationale de Normalisation.
- **OMS** : Organisation Mondiale de la Santé
- **ONM** : Office National de la Météorologie
- **SAR** : Sodium Adsorption Ratio
- **TDS** : Total Dissolved Solids
- **UAE** : Union Française des Professionnels du Traitement de l'Eau

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1 : Évaluation de la qualité de l'eau de IQE.....	12
Tableau I.2 : Classification des eaux d'irrigation selon le SAR.....	13

Chapitre VI

Tableau VI.1 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER.....	48
Tableau VI.2 : Les résultats de Indice de SAR.....	51
Tableau VI.3: Normes de l'eau potable selon (l'O.M.S).....	54
Tableau VI.4 : les moyennes des paramètres étudiés.....	57
Tableau VI.5: ANOVA pour la variation temporelle des paramètres étudiés.....	59
Tableau VI.6 : Tests simultanés de Tukey pour les différences de moyennes de (NO ₃ ⁻).....	59

Liste des Figure

Chapitre III

Figure II.1: Localisation géographique de la région de Ouargla.....	15
Figure II.2 : Températures moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022	16
Figure II.3 : Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022.....	17
Figure II.4 : Humidité relative moyenne annuelle dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022.....	17
Figure II.5 : Vitesse moyenne annuelle du vent dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022.....	18
Figure II.6 : Durée moyenne mensuelle d'insolation dans la région de Ouargla pour une décennale de 2013 à 2022.....	18
Figure II.7 : Evaporation moyenne mensuelle dans la région de Ouargla pour une décennale de 2013 à 2022.....	19
Figure II.8: Modèle du bilan hydrologique schématique des apports-exhaures à Ouargla....	20

Chapitre III

Figure III.1 : Carte de localisation des points d'échantillonnage.....	23
--	----

Chapitre VI

Figure VI.1 : Variation de la température des eaux souterraines de la région de Ouargla....	29
Figure VI.2 : Variation de conductivité électrique de CE des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	30
Figure VI.3 : Variation de Potentiel d'hydrogène pH des eaux souterraines région de Ouargla.....	30
Figure VI.4: Variation de Turbidité en NTU des eaux souterraines région de Ouargla.....	31
Figure VI.5 : Variation des concentrations de Ca^{+2} des eaux souterraines en mg/l région de Ouargla.....	32
Figure VI.6 : Variation des concentrations de Mg^{+2} des eaux souterraines en mg/l région de Ouargla.....	33
Figure VI.7 : Variation des concentrations de TH des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	34
Figure VI.8 : Variation des concentrations de Na^{+} des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	35

Figure VI.9 : Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	36
Figure VI.10 : Variation des concentrations de Cl^- des eaux souterraines de la région de Ouargla	37
Figure VI.11 : Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	38
Figure VI.12 :Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	39
Figure VI.13 : Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	40
Figure VI.14: Variation des concentrations de NO_2^- des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	41
Figure VI.15: Variation des concentrations de NO_3^- des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	42
Figure VI.16 : Variation des concentrations de PO_4^{3-} des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	43
Figure VI.17 : Variation des concentrations de Fe^{+2} des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	44
Figure VI.18 : Diagramme de Piper des eaux souterrains de la région de Ouargla.....	46
Figure VI.19: classification des eaux souterraines de la région de Ouargla selon diagramme de stabler.....	47
Figure VI.20 : Variation d'indice d'échange de base des eaux souterraines de Ouargla.....	50
Figure VI.21 : classification des eaux souterraines de la région de Ouargla selon Richards.	52
Figure VI.22 : Carte de distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau des eaux souterraines de la région de Ouargla.....	56

Table des matières

LISTE DES ABREVIATIONS

Liste des tableaux

Liste des Figure

Introduction.....1

Chapitre I Les eaux souterraines

I.1. Notion d'aquifère.....5

I.2. Classification des nappes aquifères.....5

I.2.1. Classification en fonction de la perméabilité.....6

I.2.1.1. Aquifères à nappe libre.....6

I.2.1.2. Aquifères à nappe captive.....6

I.2.1.3. Aquifères à nappe semi-captive.....6

I.2.2. Classification en fonction de la porosité.....6

I.2.2.1. Aquifères poreux.....6

I.2.2.2. Aquifères fissurés.....6

I.2.3. Classification en fonction de la nature géologique.....6

I.2.3.1. Aquifères alluviaux.....6

I.2.3.2. Aquifères karstiques.....6

I.2.3.3. Aquifères volcaniques.....6

I.2.3.4. Aquifères de socle.....6

I.3. Importance des eaux souterraine en régions arides.....7

I.4. Caractéristiques hydrochimies des eaux souterraines.....9

I.4.1. Les paramètres physiques.....9

I.4.1.1. Température.....9

I.4.1.2. Conductivité électrique.....9

I.4.1.3. Salinité.....9

I.4.1.4. Le potentiel hydrogène pH.....9

I.4.2. Les paramètres chimiques.....10

I.4.2.1. Calcium Ca^{+2}10

I.4.2.2. Magnésium Mg^{+2}10

I.4.2.3. Sodium Na^{+2}10

I.4.2.4. Potassium k^{+}10

I.4.2.5. Chlorures Cl^{-}10

I.4.2.6.Sulfate SO_4^{-2}	11
I.4.2.7.Bicarbonate HCO_3^{-}	11
I.4.2.8.Dureté totale TH.....	11
I.4.2.9.Titre alcalin complet TAC.....	11
I.5. Indices de qualité des eaux.....	11
I.5.1.Indice de qualité de l'eau (IQE).....	11
I.5.2.Rapport d'adsorption du sodium (SAR).....	13

Chapitre II Description de la région d'étude

II.1.Situation géographique.....	15
II.2. Cadre physique.....	15
II.3.Cadre climatique.....	16
II.3.1.Température.....	16
II.3.2.Précipitations.....	17
II.3.3.Humidité relative.....	17
II.3.4.Le vent.....	18
II.3.5.Durée d'insolation.....	18
II.3.6.L'évaporation.....	19
II.4.Contexte hydrogéologique.....	19
II.4.1.Nappe du Continental Intercalaire (CI).....	20
II.4.2.Nappe du Complexe Terminal (CT).....	20
II.4.3.Nappe phréatique.....	21

Chapitre III Matériel et Méthodes

III.1. Choix de site d'échantillonnage.....	23
III.2.Techniques d'échantillonnage.....	23
III.3. Méthodes et techniques d'analyses.....	24
III.3.1. Mesures in situ.....	24
III.3.2.Analyses en laboratoire.....	24
III .3.2.1.Analyses des paramètres physiques.....	24
III .3.2.1.1.Mesure de turbidité.....	24
III .3.2.1.2.Détermination du résidu sec.....	24
III .3.2.2.Analyse des paramètres de pollution.....	24
III .3.2.2.1.Détermination de l'ammonium NH_4^+	24
III .3.2.2.2.Dosage des nitrites NO_2^-	25
III .3.2.2.3.Dosage des nitrates NO_3^-	25
III .3.2.2.4.Détermination des ortho-phosphates PO_4^{-3}	25

III .3.2.3.Minéralisation globale	25
III .3.2.3.1.Dosage du calcium Ca^{+2} et du magnésium Mg^{+2}	25
III .3.2.3.2.Dureté totale TH.....	25
III .3.2.3.3.Dosage du sodium Na^{+} et du potassium K^{+}	25
III .3.2.3.4.Chlorures Cl^{-}	26
III .3.2.3.5.Sulfate SO_4^{-2}	26
III .3.2.3.6.Titre alcalin complet TAC et bicarbonate HCO_3^{-}	26
III .3.2.3.7.Fer Fe^{2+}	26
III.4. Méthodes statistiques.....	26
Chapitre VI Résultats et discussion	
VI.1. Caractéristiques hydrochimies des eaux souterraines.....	28
VI.1.1. Paramètres physiques.....	28
VI.1.1.1. Température.....	28
VI.1.1.2. Conductivité électrique.....	29
VI.1.1.3. Potentiel d'hydrogène pH.....	30
VI.1.1.4. Turbidité.....	31
VI.1.2. Paramètres chimiques.....	31
VI.1.2.1. Calcium Ca^{+2}	31
VI.1.2.2.Magnésium Mg^{+2}	32
VI.1.2.3.Dureté totale TH.....	33
VI.1.2.4. Sodium Na^{+}	34
VI.1.2.5. potassium K^{+}	35
VI.1.2.6.Chlorures Cl^{-}	36
VI.1.2.7. Sulfate SO_4^{-2}	37
VI.1.2.8. Bicarbonate HCO_3^{-}	38
VI.1.3. Paramètres de pollution.....	39
VI.1.3.1. Ammonium NH_4^{+}	39
VI.1.3.2. Nitrite NO_2^{-}	40
VI.1.3.3. Nitrate NO_3^{-}	41
VI.1.3.4. Phosphore PO_4^{-2}	42
VI.1.3.4. Fer Fe^{2+}	43
VI.2. Caractérisation géochimique des eaux souterraines.....	45
VI.2.1. Représentation graphique des faciès chimiques.....	45
VI.2.1.1.Diagramme de Piper.....	45
VI.2.1.2.Formule caractéristique de STABLER.....	46

VI.2.1.3.Indice d'échange de Base (I.E.B).....	49
VI.3. Sodium adsorption ratio (SAR).....	50
VI.4. Les indices de qualité de l'eau (IQE).....	53
VI.5.Evolution temporelle de la qualité des eaux souterraines.....	56
Conclusion.....	62
Référence bibliographique.....	65
Annexes.....	76
Résumé	

Introduction

Introduction

L'eau est un élément fondamental pour la vie sur notre planète, indispensable tant pour les êtres humains que pour les animaux et les plantes. Par conséquent, l'humanité a cherché à exploiter et à maîtriser cette ressource vitale (Ziani, 2017).

Les ressources en eau proviennent des 45 000 km³ d'eau douce qui s'écoulent chaque année sur Terre, mais seulement 10 000 à 12 000 km³ sont considérés comme utilisables. Une partie de cette eau s'écoule dans des régions inhabitables, une autre partie s'écoule trop rapidement pour être stockée (lors des crues), et une certaine quantité d'eau doit continuer à circuler dans les écosystèmes naturels et les nappes souterraines (Ben abderrahmane, 2022).

De nombreux pays sont confrontés à des limitations en termes de disponibilité et d'accessibilité des eaux de surface. Par conséquent, les eaux souterraines sont de plus en plus considérées comme la source d'eau douce la plus fiable pour divers secteurs (Vrba et Van der gun, 2004 ; Llamas et Martinez Santos, 2005 ; Hammani et al., 2009). Les eaux souterraines représentent le plus grand stock accessible d'eau non gelée sur la planète (Chevalking et al., 2008). Elles répondent à plus de 75 % des demandes en eau dans des pays tels que la Russie, la Jamaïque, l'Arabie saoudite, la Libye (Vrba et van der Gun, 2004), et jusqu'à 100 % au Danemark (FlindtJørgensen et al., 2016). Globalement, on estime que 75 à 90 % de la population mondiale utilise de l'eau souterraine pour diverses applications industrielles, domestiques et agricoles (Bouterraa , 2018).

Les eaux souterraines sont une excellente source d'eau douce et sont généralement de bonne qualité. Toutefois, leur exploitation comporte des avantages économiques considérables. Afin de préserver ces avantages, il est nécessaire de mettre en place des mesures durables pour protéger la qualité de cette ressource (Gueroui, 2015). L'accessibilité aux ressources en eau est l'un des principaux obstacles au progrès économique, notamment en raison de la rareté des ressources en eau. C'est pourquoi les eaux souterraines sont souvent la seule source d'approvisionnement en eau pour divers usages. La composition chimique de l'eau naturelle varie considérablement en fonction de la nature géologique du sol et des substances réactives rencontrées lors de son écoulement. Ainsi, la composition quantitative et qualitative des eaux souterraines, en termes de matières en suspension et dissoutes, minérales ou organiques, détermine leur qualité (Jain et al., 2005). Cependant, cette qualité peut être altérée lorsque des substances externes entrent en contact avec l'aquifère, notamment des substances indésirables

ou toxiques qui rendent les eaux souterraines impropres à la consommation et dangereuses pour divers usages, notamment l'eau potable dans les régions arides.

L'évaluation et le suivi de la qualité des eaux souterraines sont des opérations essentielles pour une gestion optimale de ces ressources (Egbueri, 2020 ; Kawo et Karuppattan, 2018 ; Li et al., 2018). La croissance démographique continue, liée directement à une demande croissante en eau propre (Dossantos et al., 2017), incite les chercheurs à développer de nouveaux modèles de prévision de la qualité de l'eau (Uddin et al., 2021). Le premier indice de qualité de l'eau a été développé par Horton pour résumer plusieurs paramètres de l'eau en un seul chiffre reflétant la qualité globale de l'eau (Horton, 1965). Depuis lors, plusieurs indices ont été élaborés (Hossain et Patra, 2020 ; Mukate et al., 2019). Le choix des paramètres pertinents dans le calcul de l'indice de qualité de l'eau est crucial pour obtenir un résultat représentatif (Abbasi et Abbasi, 2012).

Dans les pays en développement et dans les régions arides, le rôle des eaux souterraines est d'autant plus crucial qu'elles constituent souvent la seule source d'eau potable, ce qui les rend vitales pour le développement de ces pays (Bouchahm et Achour, 2005). L'augmentation des besoins en eau dans les oasis du Sahara algérien a conduit à une exploitation de plus en plus intensive des nappes d'eau souterraines. Cette exploitation intensive est perçue comme inévitable par les décideurs pour le développement des régions sahariennes (Idder, 2007).

La cuvette de Ouargla, située dans le bas Sahara Oriental et faisant partie de la plateforme saharienne, est devenue une région d'importance majeure pour les activités industrielles et agricoles, grâce à ses ressources souterraines. Cependant, malgré une exploitation croissante de ces ressources, des lacunes persistent quant à la connaissance des réserves, du fonctionnement, des caractéristiques hydrauliques, du taux de renouvellement, et d'autres aspects des nappes du Complexe Terminal (Ben cheikh et Mansouri, 2019).

Face à ce constat, nous nous posons la problématique suivante : Quels sont les indicateurs permettant de déterminer la qualité des eaux souterraines pour leurs différents usages ?

Dans ce contexte, notre travail a pour objectifs de :

- ✓ Déterminer la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'état de Ouargla et les classer selon leurs différents usages, notamment domestiques, agricoles et industriels.

- ✓ Étudier l'évolution spatio-temporelle de la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans l'état de Ouargla en utilisant les données des années précédentes.

En réalisant ces objectifs, nous espérons contribuer à une meilleure compréhension de la qualité des eaux souterraines dans la région de Ouargla, ainsi qu'à une gestion plus efficace et durable de cette ressource vitale.

Le présent travail est organisé en quatre chapitres :

- Le premier chapitre présente des généralités sur les eaux souterraines, leurs origines et leur importance dans les régions arides et l'évolution qualitative de l'eau, les caractéristiques et propriétés des eaux, ainsi que le classement de l'aptitude de l'eau pour différents usages (domestiques, agricoles et industriels).
- Le deuxième chapitre est consacré à la description de la région d'étude, incluant le cadre physique et climatique, ainsi que le contexte géologique et hydrogéologique.
- Le troisième chapitre détaille le matériel et la méthodologie utilisés, notamment le choix des sites expérimentaux, les méthodes d'analyse et d'analyse statistique. troisième
- Le quatrième chapitre présente les résultats et les discussions des analyses effectuées.

Chapitre I

Les eaux souterraines

La qualité de l'eau constitue un enjeu environnemental primordial pour le secteur de l'eau potable, le secteur agricole ainsi que celui industriel. Elle est également importante pour tous les usages agricoles. Les sources d'eau peuvent être de mauvaise qualité en raison de problèmes d'origine naturelle ou de contamination, ou les deux. Il est souvent nécessaire d'améliorer la qualité d'une source d'eau avant de s'en servir (Berregui , 2013).

Les eaux souterraines constituent 20 % des réserves d'eaux soit environ 1000 millions de m³, leur origine est due l'accumulation des infiltrations dans le sol qui varient en fonction de sa porosité et de sa structure géologique. Elles sont généralement, d'excellente qualité physico-chimique et bactériologique, elles se réunissent en nappes (Peter et Meena , 2010). Dans ce chapitre nous présentons les principales définitions en relation avec les eaux souterraines.

I.1. Notion d'aquifère

Un aquifère est une formation géologique souterraine qui peut stocker et transmettre de l'eau souterraine (Petit, 1996). Il s'agit d'une couche de roche poreuse ou perméable, ou d'un ensemble de couches, qui contient de l'eau souterraine en quantité significative et qui peut être exploitée pour des usages tels que l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable ou l'industrie (Fouche, 2016). L'aquifère est souvent rechargé par les précipitations qui s'infiltrent dans le sol, et l'eau peut s'écouler vers les sources d'eau de surface telles que les rivières et les lacs (Chkir, 2014). Il est homogène quand il a une perméabilité d'interstices (sables, graviers); la vitesse de percolation y est lente. Il est hétérogène avec une perméabilité de fissures (granite, calcaire karstique); la vitesse de percolation est plus rapide (Castany, 1979).

L'eau souterraine est stockée dans les espaces entre les grains de la roche poreuse, ou dans les fissures et les fractures de la roche perméable pour former des nappes, qui occupent tout ou partie de l'aquifère (Chkir, 2014).

I.2. Classification des nappes aquifères

Solen (Castany , 1982), Les aquifères peuvent être classés en fonction de leur perméabilité, de leur porosité et de leur nature géologique. Voici quelques de classifications courantes :

I.2.1. Classification en fonction de la perméabilité :

I.2.1.1. Aquifères à nappe libre : ce sont les aquifères où l'eau peut circuler librement à travers les pores et les fissures de la roche ou du sol. Ils sont alimentés directement par l'infiltration des eaux de ruissellement. Les eaux de ces nappes ne sont pas maintenues sous pression par un toit moins perméable que la formation qui la contient .

I.2.1.2. Aquifères à nappe captive : l'eau est piégée sous une couche imperméable ou confinée entre deux couches imperméables. Elle n'est pas alimentée directement par le sol. Elle se situe à des grandes profondeurs et par conséquent est peu sensible aux pollutions.

I.2.1.3. Aquifères à nappe semi-captive: ce sont des aquifères dont le toit ou/et le substratum est constitué par une formation semi-perméable. Celle-ci permet des échanges d'eau avec les aquifères situés au-dessus ou en-dessous, appelés drainance .

I.2.2. Classification en fonction de la porosité :

I.2.2.1. Aquifères poreux : la roche ou le sol contient de nombreux pores qui peuvent être remplis d'eau.

I.2.2.2. Aquifères fissurés : la roche ou le sol contient des fissures qui peuvent être remplies d'eau .

I.2.3. Classification en fonction de la nature géologique :

I.2.3.1. Aquifères alluviaux : formés dans des dépôts de sédiments meubles tels que les alluvions fluviales ou les sables de plage.

I.2.3.2. Aquifères karstiques : formés dans des roches calcaires qui peuvent être dissoutes par l'eau, créant des systèmes de grottes et de cavernes.

I.2.3.3. Aquifères volcaniques : formés dans des roches volcaniques poreuses telles que les basaltes et les tufs.

I.2.3.4. Aquifères de socle : formés dans des roches dures et cristallines telles que le granite, le schiste ou le gneiss .

I.3. Importance des eaux souterraine en régions arides

Les eaux souterraines sont très importantes dans les régions arides et semi-arides. En l'absence de rivières et de lacs permanents, les aquifères souterrains sont les seules ressources en eau disponibles et accessibles. Ils sont indispensables pour approvisionner les populations et maintenir une activité agricole (Margat, 1990). Elles contribuent au débit de base des oueds et soutiennent les écosystèmes. En l'absence de pluie, le débit des rivières est maintenu par la décharge des aquifères. Cela permet le maintien de zones humides et de biodiversité même en saison sèche (Proeres, 2000).

Ces eaux atténuent les effets des sécheresses et des pénuries d'eau. Grâce aux eaux souterraines stockées naturellement dans les aquifères, les régions arides et semi-arides disposent de réserves qui leur permettent de passer les périodes de sécheresse (Furry, 1997). Elles stabilisent le microclimat. L'eau souterraine qui s'écoule lentement vers les rivières et qui s'évapore à la surface du sol participe à la régulation du microclimat à l'échelle locale et régionale. Son rôle est important pour atténuer les amplitudes thermiques et limiter l'aridité. Elles sont une ressource durable si elles sont gérées correctement. Contrairement aux eaux de surface, les aquifères se rechargent lentement et constituent une réserve pérenne, à condition de ne pas les surexploiter. Une gestion intégrée des ressources en eau de surface et souterraine est nécessaire pour optimiser l'utilisation de cette ressource précieuse dans les régions sèches (Tuinhof et *al.*, 2010).

Devant le développement agricole et industriel d'une part, et la croissance démographique d'autre part, les besoins en eau au Sahara algérien ont augmenté d'une manière très rapide. Ce développement rapide a entraîné des problèmes énormes ces dernières années, relatifs principalement à la remontée et l'évacuation des eaux des nappes phréatiques, aux eaux d'assainissement, et à l'abaissement de l'cartésianisme des nappes profondes (Bellaoeur, 2008)

La qualité des eaux souterraines est principalement mesurée par la concentration des propriétés physiques et chimiques de l'eau, ce qui constitue un outil efficace permettant d'aider le gestionnaire à déterminer l'utilisation de cette eau, que ce soit pour la consommation humaine et / ou animal, l'agriculture, l'industrie, etc... (Belkendil, 2021).

I.4.Caractérisation hydrochimies des eaux souterraines

I.4.1. Les paramètres physiques

I.4.1.1.Température

La température de l'eau est un facteur important dans la production biologique. Ce ci vient du fait qu'elle affecte les propriétés physiques et chimiques de celle-ci ; en particulier sa densité, sa viscosité, la solubilité de ses gaz (notamment celle de l'oxygène) et la vitesse des réactions chimiques et biochimiques (Ben aakame, 2015).

I.4.1.2.Conductivité électrique

La conductivité électrique est un indicateur important pour l'évaluation de la qualité de l'eau parce qu'elle est directement influencée par la composition des sels minéraux dissouts dans les eaux souterraines (Aldahaan *et al.*, 2016).

La conductivité est fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissouts dans l'eau (Rodier, 1984). Une conductivité élevée une quantité de sels dissouts très importante (Rodier, 1996). Elle donne une idée sur la minéralisation d'une eau et elle est à ce titre un bon marqueur de l'Origine d'une eau (Hceflcd, 2006).

I.4.1.3.Salinité

La salinité est la concentration totale de tous les sels dissouts dans l'eau (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{-2} et les HCO_3^-). Ces électrolytes forment des particules ioniques en se dissolvant, chacune avec une charge positive et négative. En tant que telle, la salinité contribue fortement à la conductivité (Yalçinkaya *et al.*, 2016).

La salinité peut se mesurer de deux manières, soit par les totales des sels dissouts (TDS) exprimées en mg/l ou, plus couramment, par la conductivité électrique exprimée en milli siemens/centimètre (ms/cm) (Couture, 2006).

I.4.1.4.Le potentiel hydrogène pH

Le pH d'une eau représente son acidité ou alcalinité ; à $\text{pH} = 7$ une eau est dite neutre, à pH inférieur à 7 une eau est dite acide et à pH supérieur à 7, elle est dite basique. D'est cependant l'un des paramètres parmi les plus important de la qualité de l'eau, il est lié à la nature des terrains traverses, il varie habituellement entre 7.2 et 7.6. C'est à l'intérieure

de ces deux valeurs que se situe généralement le pH des eaux distribuées aux collectivités (Rodier, 2009).

I.4.2. Les paramètres chimiques

Les éléments chimiques présents dans les eaux souterraines proviennent des précipitations, des processus organiques qui se produisent dans le sol et de la dégradation des minéraux dans la roche à travers laquelle les eaux souterraines s'écoulent. Certains de ces constituants sont présents en quantités significatives, tandis que d'autres sont d'une importance mineure ou sont présents sous forme de traces (Kouadri, 2022).

I.4.2.1. Calcium Ca^{+2}

Le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables et sa teneur varie essentiellement suivant la nature géologique des terrains traversés par ces eaux (terrains calcaires ou gypseux) (Nouayti et *al.*, 2015).

I.4.2.2. Magnésium Mg^{+2}

La majorité des eaux souterraines contiennent généralement une petite quantité de magnésium, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (Nouayti et *al.*, 2015).

I.4.2.3. Sodium Na^{+2}

Le sodium est un élément constant de l'eau, toute fois les concentrations peuvent être extrêmement variables. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium, le sel peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, des retombées d'origine marine, et de la venue d'eaux salées dans les nappes aquifères (Belghiti et *al.*, 2013).

I.4.2.4. Potassium k^{+}

Le potassium est généralement l'élément le moins abondant dans les eaux après le sodium, le calcium et le magnésium (Bouderka et *al.*, 2016). Le potassium peut être ajouté aux eaux souterraines par l'utilisation d'engrais et la dégradation des produits animaux ou des déchets (Kolahchi et *al.*, 2007).

I.4.2.5. Chlorures Cl^{-}

Les chlorures sont des anions inorganiques importants contenus en concentrations variables dans les eaux naturelles, généralement sous forme de sel de sodium (NaCl) et de potassium (KCl). Ils sont souvent utilisés comme un indice de pollution (Bouderka et *al.*, 2016).

I.4.2.6.Sulfate SO_4^{2-}

Les origines naturelles des sulfates sont l'eau de pluie et la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse (CaSO_4), mais également de la pyrite (FeS) et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite). (Ghazali et al., 2013).

I.4.2.7.Bicarbonate HCO_3^-

Les sources possibles de bicarbonate comprennent la présence de matière organique dans l'aquifère qui est oxydée pour produire du dioxyde de carbone, ce qui favorise la dissolution des minéraux (Khashoggi et al., 2013). Le carbone fossile de la calcite et de la dolomite dans l'aquifère fournirait la moitié des ions bicarbonate. Cette altération enrichit les eaux souterraines en ions calcium, magnésium et bicarbonate. Les ions bicarbonate peuvent résulter de l'altération des minéraux silicatés (Gastmans et al., 2010).

I.4.2.8.Dureté totale TH

La TH est essentiellement la somme des concentrations de calcium et de magnésium dans l'eau, exprimée en ppm de CaCO_3 . Elle indique la teneur globale en sels de calcium et magnésium qui sont responsables de la dureté de l'eau dans la plupart des eaux naturelles. Généralement le calcium contribue au TH dans la proportion de 70 à 90% (Berne et Cordonnier, 1991).

I.4.2.9.Titre alcalin complet TAC

Le titre alcalimétrique complet (TAC) correspond à la teneur d'une eau en alcalis (hydroxydes), en carbonates et en bicarbonates (ou hydrogénocarbonates) alcalins et alcalino-terreux. Le TAC d'une eau permet de connaître sa concentration en bicarbonates (HCO_3^-) en carbonates (CO_3^{2-}) et en bases fortes, autrement dit son alcalinité (UAE, 2013).

I.5. Indices de qualité des eaux**I.5.1.Indice de qualité de l'eau IQE**

L'indice de qualité de l'eau IQE est considéré comme la méthode la plus efficace pour mesurer la qualité de l'eau. Un certain nombre de paramètres de qualité de l'eau sont inclus dans une équation mathématique pour évaluer la qualité de l'eau, en déterminant la pertinence de l'eau pour la consommation (Akter et al., 2016). Cet indice a été utilisé pour la première fois pour mettre en évidence les changements physico-chimiques susceptibles de se produire au cours de l'année et leur impact sur la qualité de l'eau d'alimentation (House et al., 1987 ; House, 1990).

L'IQE est facile et simple à utiliser ; ça dépend de la pesée des paramètres de l'eau, chacun selon leur importance, laissent l'utilisateur choisit les paramètres de qualité de l'eau incorporés dans processus (Iticescu et *al.*, 2019).

Le IQE est calculé en utilisant l'équation suivante (Zotou et *al.*, 2019) :

$$IQE = \frac{\sum QiWi}{\sum Wi}$$

- **Qi** : L'échelle d'évaluation de la qualité pour chaque paramètre
- **Wi** : Le poids unitaire relative pour chaque paramètre de qualité de l'eau

La note finale de IQE est une échelle ascendante allant de 0 à 100 (les scores les plus élevés indiquent une pollution plus élevée). La qualité de la masse d'eau est également classée en cinq catégories : « Excellente », « Bonne », « Médiocre », « Très mauvaise et impropre à la consommation » (Tableau I.1) (Tyagi et *al.*, 2013).

Tableau I.1 : Évaluation de la qualité de l'eau de IQE (Tyagi et *al.*, 2013).

Classe de IQE	Type d'eau	Usage possible
0 – 25	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
>25 – 50	Bonne qualité Eau	Eau potable, Irrigation et industrie
>51 – 75	Mauvaise qualité Eau	qualité Irrigation et industrie
>76 – 100	Très mauvaise qualité Eau	Irrigation
> 100	Eau non potable	Traitement approprié requis avant utilisation

I.5.2. Rapport d'adsorption du sodium (SAR) :

Le SAR exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Il mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium. C'est un indice qui mesure le danger que représente l'existence d'une teneur donnée en sodium dans l'eau (Belksier et al., 2014). Elle se calcule par la formule suivante :

$$S.A.R = \frac{r[Na^+]}{\sqrt{\frac{r[Ca^{+2}] + r[Mg^{+2}]}{2}}}$$

Avec:

- (r): Concentration des ions en meq/L
- Na^+ : Sodium
- Ca^{+2} : Calcium
- Mg^{+2} : Magnesium

Le S.A.R. permet d'évaluer le risque d'alcalinisation du sol par l'eau d'irrigation, selon le risque croissant, les eaux sont classées en quatre classes de S1 à S4 (Tableau I.2). Tous les ions sont exprimés en méq/l.

Tableau I.2 : Classification des eaux d'irrigation selon le SAR (Belksier et al., 2014).

Classe	SAR	Interprétation
S1	0 < SAR < 10 Taux bas de sodium	Eau utilisée avec peu de danger d'alcalinisation des sols.
S2	10 < SAR < 18 Taux moyen de sodium	Eau utilisée avec un danger appréciable d'alcalinisation.
S3	18 < SAR < 26 Taux élevé de sodium	Eau pouvant provoquer un danger d'alcalinisation.
S4	SAR > 26 Taux très élevé de Sodium	Eau présentant un danger d'alcalinisation très fort.

Chapitre II

Description de la région d'étude

II.1. Situation géographique

La région d'étude se situe dans le désert nord-est de l'Algérie "Bas-Sahara" près de la ville de Ouargla, à une latitude $31^{\circ} 56'$ à $32^{\circ} 10'$ N et une longitude $5^{\circ} 15'$ à $5^{\circ} 27'$ E, avec une altitude moyenne de 134 m (figure III .1), Couvrant une superficie de 163230 Km² (Idder , 2020). Elle est limitée au Nord par les wilayas de Djelfa, et Ouled Djellal et El Meghaier, à l'Est par la Tunisie et El Oued, à l'Ouest par les wilayas de Ghardaïa et El Menia et au Sud par les wilayas de Ain Salah et Illizi.

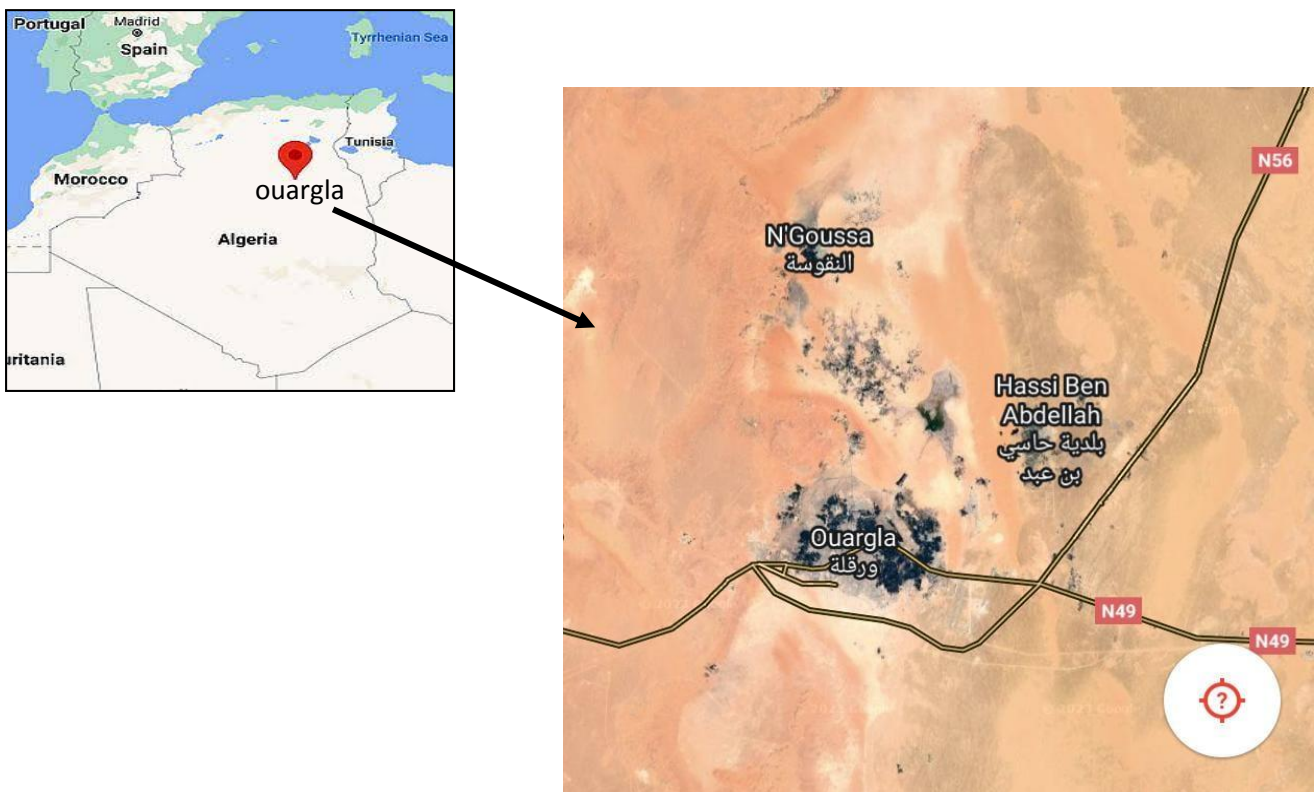


Figure II.1: Localisation géographique de la région de Ouargla [1,2]

II.2. Cadre physique

Les facteurs géomorphologiques interfèrent le plus souvent de manière coordonnée en agissant sur les modes d'écoulement. Ils permettent de faire des analyses quantitatives et des comparaisons des différentes unités hydrologiques (Khemgani , 2020). Dans la région, on trouve plusieurs unités géomorphologiques différentes :

- A l'ouest, le plateau de la Hamada Pliocène (plateau des Ganntra) est marqué par une falaise qui domine la vallée à une altitude d'environ 220 m, en confluence avec oued Mzab et oued N'sa. .

- A l'est, le plateau est très démantelé, dont les limites ne sont pas nettes, avec une altitude ne dépassant pas 160 m, les rebords de ce plateau disparaissent sous les sables (Erg Touil, Erg Boukhezna et Erg Arifdji).

- Au sud, les ruines de Sedrata sont ensevelies sous le massif dunaire qui recouvre et prend la vallée en diagonale du nord-ouest au sud-est à la Gara Krim.

- Au nord, Zabret Bouaroua (Hassi el Khefif), constitue la limite supérieure de Sebket Sefioune (direction SSO-NNE) qui constitue un élément déterminant dans le paysage morphologique de la cuvette (Slimani, 2016).

II.3.Cadre climatique

Le climat de la région de Ouargla est saharien, chaud et sec en été et froid en hiver. La région se caractérise par des précipitations rares et irrégulières, par des températures et évaporations très élevées, avec un faible taux d'humidité relative de l'air (Toutain, 1979 et Ozenda, 1991). La présente caractérisation est faite à partir d'une synthèse climatique de données de l'Office National de Météorologie (O.N.M) pour 10 ans de 2013 à 2022 pour Ouargla.

II.3.1.Température

La région de Ouargla se caractérise par un climat très froid en Hiver, et trop chaud en été, selon la (figure II.2) le mois le plus chaud est celui de Juillet, dont la valeur moyenne des maximales de température annuelle est de 44.1 C° pour les années (2013-2022), alors que la valeur moyenne des températures minimales dans la même période est de 4.7 C° au mois de Janvier. (O.N.M, 2022).

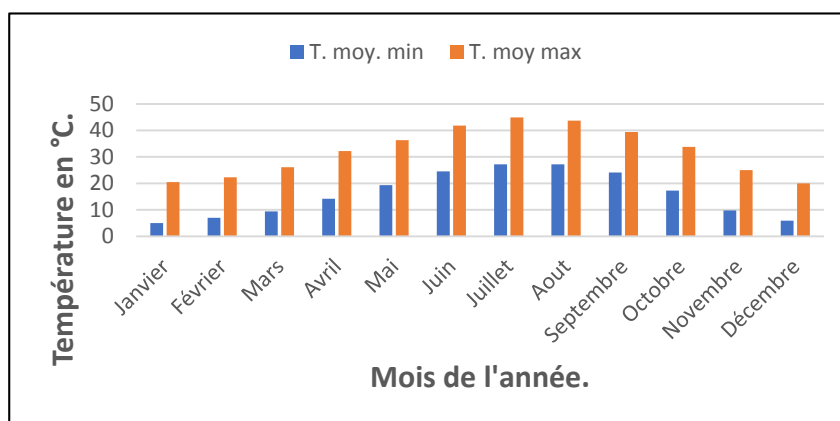


Figure II.2 : Températures moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022 (O.N.M, 2022).

II.3.2.Précipitations

La région de Ouargla se caractérise par un climat sec dont la pluviométrie est très rare. D'après la (figure II.3), la valeur maximale des précipitations moyennes annuelles est de 8,5

mm au mois de Janvier comme étant le mois le plus pluvieux, et elle est de l'ordre de 0,4 mm au mois de Juillet comme étant le mois le plus sec (O.N.M, 2022).

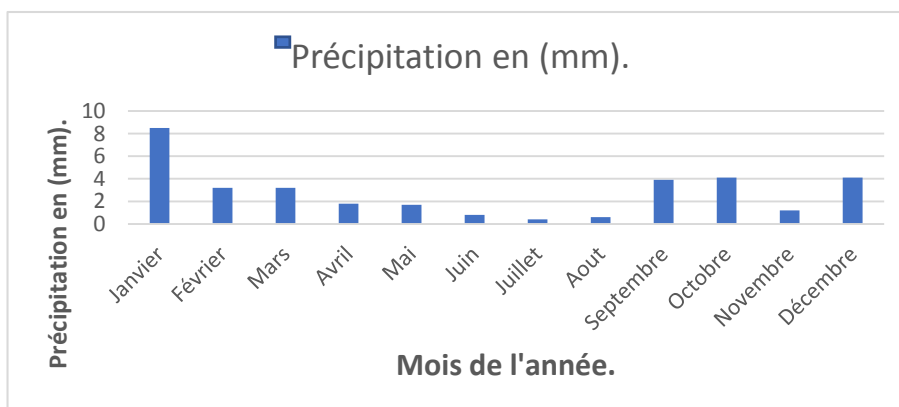


Figure II.3 : Précipitations moyennes annuelles dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022 (O.N.M, 2022).

II.3.3.Humidité relative

La (figure II.4) présente les valeurs d'humidité relative moyenne annuelle enregistrée au niveau de la station de Ouargla. L'humidité relative moyenne des valeurs mensuelles maximales sur une décennale commençant de 2013, est de l'ordre de 83 % au mois de Décembre comme étant le mois le plus humide, alors que celle minimale est enregistrée au mois de Juillet comme étant le mois le plus sec avec 13% (O.N.M, 2022) .

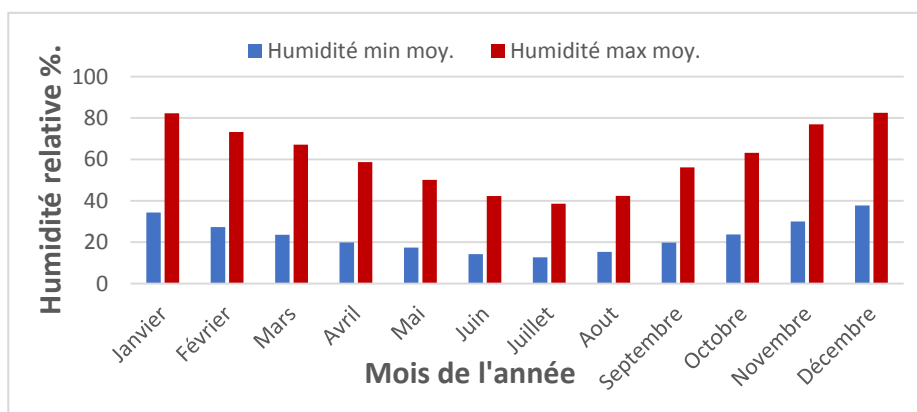


Figure II.4 : Humidité relative moyenne annuelle dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022 (O.N.M, 2022).

II.3.4.Le vent

Dans la région de Ouargla, les vents soufflent suivant différentes directions. Nous enregistrons d'après la (figure II.5) que la valeur moyenne mensuelle des maximales de la

vitesse du vent est de l'ordre de 78 km/h au mois d'Avril, alors que celle minimale de la vitesse du vent est de l'ordre de 43 km/h mois de Novembre et Décembre (O.N.M, 2022).

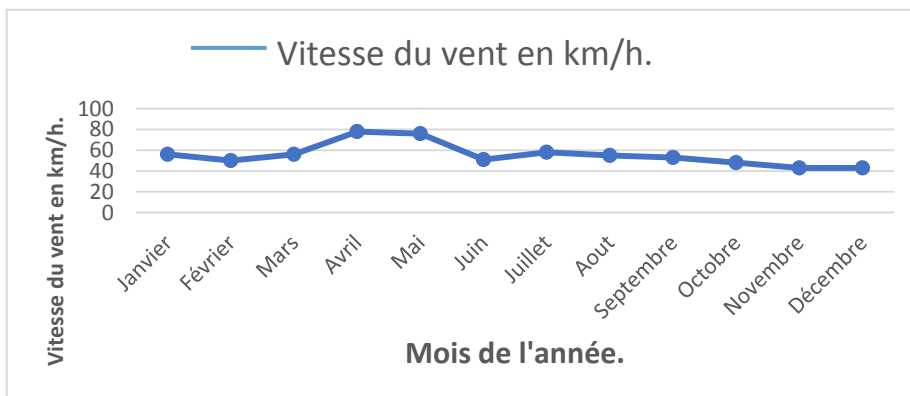


Figure II.5 : Vitesse moyenne annuelle du vent dans la région de Ouargla pour une décennale à partir de 2013 à 2022 (O.N.M, 2022).

II.3.5. Durée d'insolation

D'après la (figure II.6), la région de Ouargla reçoit en générale une intensité lumineuse très importante, notamment les mois les plus chauds soient les mois de Juillet et Août. La durée d'insolation maximale mensuelle sur les dix ans (2013_2022) est de l'ordre de 335,19 heures, relative au mois d'Août, et la durée minimale correspond au mois de Décembre avec une durée mensuelle de 229,56 heures au cours de la même période, soit une différence de 105.63 heures d'insolation entre ces deux mois (O.N.M, 2022).

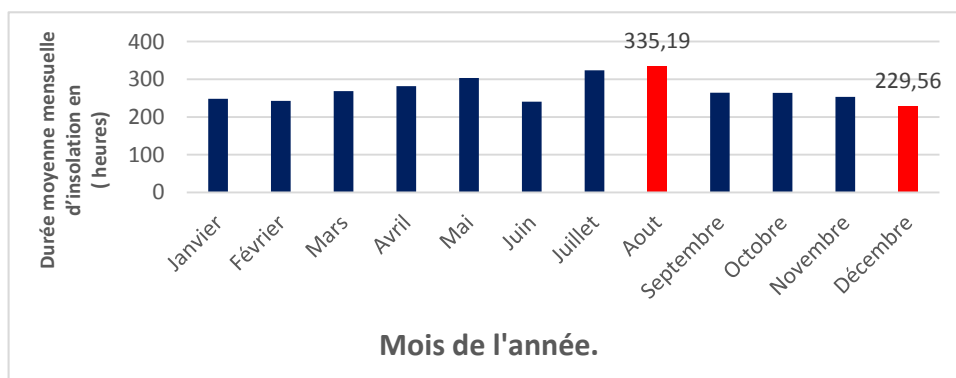


Figure II.6 : Durée moyenne mensuelle d'insolation dans la région de Ouargla pour une décennale de 2013 à 2022 (O.N.M, 2022).

II.3.6.L'évaporation

L'évaporation dans la vallée de Ouargla est très élevée, nous constatons d'après le (figure II.7) que la valeur maximale d'évaporation est de 429,75 mm au mois de Juillet, et la valeur minimale est de l'ordre de 86,26 mm au mois de Décembre (O.N.M, 2022).

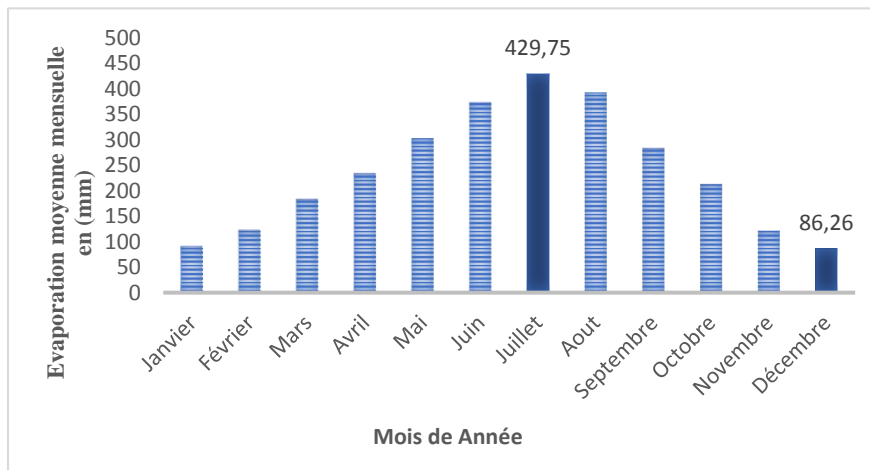


Figure II.7 : Evaporation moyenne mensuelle dans la région de Ouargla pour une décennale de 2013 à 2022 (O.N.M, 2022).

II.4.Contexte hydrogéologique

A Ouargla, les formations géologiques contiennent deux grands ensembles de formations aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses. De la base du Crétacé supérieur, l'ensemble inférieur est appelé "Continental Intercalaire (CI)", et l'ensemble supérieur est appelé "Complexe Terminal (CT)". Une troisième formation, d'importance plus modeste, s'ajoute aux deux précédentes "la nappe Phréatique" (Slimani, 2016) (figure II.9).

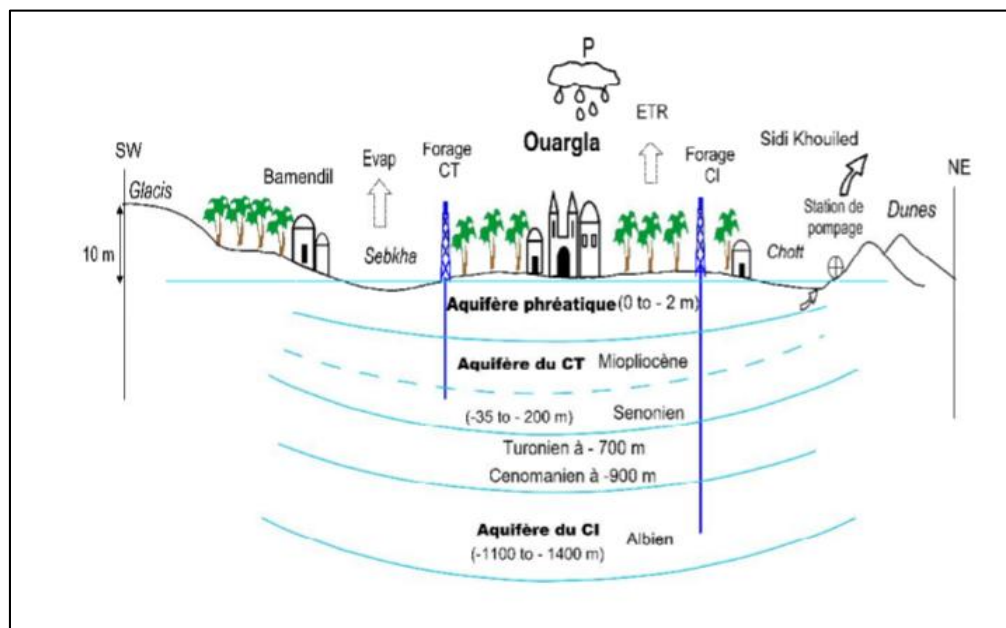


Figure II.8 : Modèle du bilan hydrologique schématique des apports-exhaures à Ouargla (Slimani, 2016).

II.4.1. Nappe du Continental Intercalaire (CI)

La nappe du Continental Intercalaire est contenue dans des formations sablo- gréseuses et argilo-sableuses. Elle est comprise entre le Trias et le Crétacé inférieur, et porte souvent, de manière restrictive, le nom de nappe de l'Albien en référence à son étage supérieur (Cornet et Gouscov 1952; Cornet, 1961 ; UNESCO, 1972; Slimani, 2016) ,C'est un énorme réservoir qui est alimenté par l'infiltration des eaux dans l'Atlas saharien et suralimenté par les eaux circulant sous la hamada sud-oranienne et sous l'Erg Occidental (Cornet, 1964; Castany, 1982).

Cet aquifère a une très forte charge; à l'altitude de Ouargla, la pression en tête des forages est de l'ordre de 30 kg/cm^2 et les débits les plus importants sont obtenus par artésianisme (Slimani, 2016).

II.4.2. Nappe du Complexe Terminal (CT)

Le Complexe Terminal (CT) regroupe plusieurs formations litho-stratigraphiques dans lesquelles se trouvent des formations aquifères contenues dans les horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire. Sur le territoire algérien, il existe deux formations aquifères distinctes dans ce Complexe Terminal (Cornet, 1964; Nesson, 1978; Castany, 1982; Slimani, 2016).

La première est contenue dans les sables du Miopliocène, tandis que la seconde se trouve dans le Sénonien supérieur et l'Eocène inférieur (Sénonien pour Ouargla principalement).

Les nappes du Complexe Terminal sont essentiellement alimentées par les eaux de ruissellement qui proviennent des reliefs de la périphérie du bassin (UNISCO, 1972; Guendouz et al., 2003; OSS, 2003), ainsi que par les infiltrations qui s'effectuent à travers l'Erg Oriental (Bel et Dermagne, 1969; Nesson, 1978; BRL-BNEDER, 1999 *in* Slimani, 2016).

II.4.3.Nappe phréatique

La nappe phréatique est contenue dans les formations Quaternaires composées essentiellement d'alluvions de la vallée de l'oued Mya. Elle couvre pratiquement toute la cuvette de Ouargla. Les sables de surface du Quaternaire renferment la nappe qui est constituée de sable fin à moyen argileux, rarement grossier au sud de Ouargla, et plus on se dirige vers le nord (N'goussa et Sebkhet Safioune) les sables sont riches en gypse, qui devient dominant à Sebkhet Safioune.

Sa frange capillaire affleure souvent sur la surface du sol sous forme de petits chotts qu'on retrouve de part et d'autre dans la ville de Ouargla (Bernard et Gardel, 2003; Hamdi-Aïssa, 2001 ; Slimani, 2016).

Chapitre III

Matériel et Méthodes

III.1. Choix de site d'échantillonnage

La sélection des emplacements d'échantillonnage constitue la première étape de la mise en place d'un programme d'échantillonnage. Ce choix repose sur l'importance de l'utilisation de ces eaux souterraines, dont la qualité est inconnue, ainsi que sur les caractéristiques environnementales de chaque site, afin de déterminer la qualité des eaux souterraines dans la région de Ouargla par le biais d'analyses physico-chimiques. Ce processus a été réalisé en mars 2023 avec la société du groupe algérien des eaux (ADE) de la région de Ouargla. Au total, 23 forages répartis dans la ville de Ouargla ont été sélectionnés, et leurs coordonnées ont été déterminées à l'aide d'un GPS.

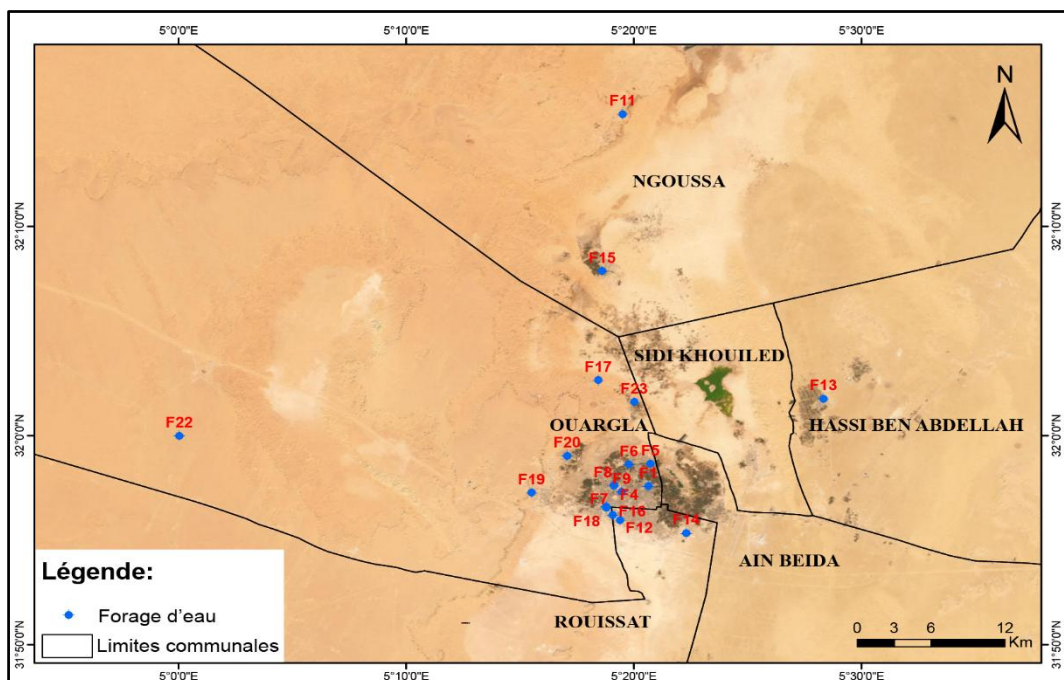


Figure III.1 : Carte de localisation des points d'échantillonnage.

III.2. Techniques d'échantillonnage

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate qui nécessite une grande attention. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans altérer les caractéristiques physico-chimiques de l'eau (tels que les gaz dissous ou les matières en suspension). Le choix du matériel de prélèvement revêt une importance particulière (Rodier et *al.*, 2009). L'objectif du prélèvement d'échantillons est d'obtenir un échantillon aussi représentatif que possible de l'eau à analyser, sans contamination ni altération. Des précautions

doivent être prises à trois niveaux : le matériel de prélèvement, la technique de prélèvement et le transfert et la conservation des échantillons (Rodier et Rejsek , 2002).

III.3. Méthodes et techniques d'analyses

III.3.1. Mesures in situ

Les mesures effectuées sur le terrain concernent les paramètres physiques en raison de leurs variations rapides dans le temps. Celles-ci sont réalisées à l'aide d'un multi-paramètre (Multi 3620IDS). Les paramètres mesurés sont la température, la salinité, la conductivité électrique, le pH et les solides dissous totaux (TDS).

III.3.2. Analyses en laboratoire

Les analyses physico-chimiques des échantillons d'eau ont été réalisées dans les laboratoires d'Algérien des eaux (ADE).

III .3.2.1. Analyses des paramètres physiques

III .3.2.1.1. Mesure de turbidité

La turbidité est mesurée à l'aide d'un turbidimètre HACH 2100N (voir annexe.I) . Après le remplissage de la cuve, la mesure est effectuée rapidement en veillant à éliminer toute bulle d'air avant la mesure. La mesure est directement obtenue en unités de néphélogéométrie turbidité (NTU) (Rodier, NF T90-033, Norme NA 746).

III.3.2.1.2. Détermination du résidu sec

La détermination du résidu sec permet d'estimer la teneur en matières dissoutes. Le bécher est lavé avec de l'acide (solution diluée de HCl ou H₂SO₄), puis un volume d'eau brute (100 ml) est prélevé et introduit dans le bécher. Le bécher est ensuite placé dans une étuve à 105 °C pendant 24 heures (Rodier, Afnor norme française. NFT90-029).

III.3.2.2. Analyse des paramètres de pollution

III.3.2.2.1. Détermination de l'ammonium (NH₄⁺)

La quantité d'azote ammoniacal (NH₄⁺) est déterminée par la méthode spectrométrique. d'adsorption moléculaire à l'aide d'un spectrophotomètre DR 6000 UV-visible (voir annexe.I), (ISO 7150, 1984).

L'ammonium réagit avec deux réactifs pour produire une coloration verte. Les résultats sont directement obtenus en mg/l (ISO 7150, 1984).

III .3.2.2.2.Dosage des nitrites (NO_2^-)

Les nitrites (NO_2^-) sont dosés par la méthode spectrométrique d'adsorption moléculaire. Les nitrites réagissent avec un réactif mixte, ce qui entraîne une coloration rose. Les résultats sont directement obtenus en mg/l (ISO 6777, 1984).

III .3.2.2.3.Dosage des nitrates (NO_3^-)

Les nitrates (NO_3^-) sont dosés par la méthode spectrométrique. En présence de salicylate de sodium, les nitrates réagissent pour former du paranitrosalicylate de sodium, qui prend une couleur jaune (Rodier et *al.*, 2009).

III.3.2.2.4.Détermination des ortho-phosphates (PO_4^{3-})

Les orthophosphates (PO_4^{3-}) sont dosés par la méthode spectrométrique. Une solution acide contenant des ions de molybdate d'antimoine est utilisée pour former un complexe d'antimoyl-phosphomolybdate, qui est ensuite réduit par de l'acide ascorbique pour former un nouveau complexe de molybdate (fortement coloré en bleu) (ISO 6878/1, 1994).

III.3.2.3.Minéralisation globale

III .3.2.3.1.Dosage du calcium (Ca^{+2}) et du magnésium (Mg^{+2})

Le principe est le titrage des ions calcium avec une solution aqueuse d'EDTA, avec l'utilisation de murexide comme indicateur. Lors du titrage, l'EDTA réagit avec les ions calcium, ce qui provoque un changement de couleur du rose au violet (ISO 6058, 1989).

III.3.2.3.2.Dureté totale (TH)

La dureté totale est déterminée par complexométrie des ions calcium et magnésium avec une solution d'EDTA à pH 10. L'indicateur utilisé est le noir érhème T, qui donne une coloration rose en présence des ions calcium et magnésium lors du titrage avec l'EDTA. La solution vire au bleu (ISO 6058, 1989).

III .3.2.3.3.Dosage du sodium (Na^+) et du potassium (K^+)

La photométrie de flamme est utilisée pour analyser rapidement et de manière sensible les ions sodium et potassium sous forme de sels. L'analyse est réalisée à partir de leurs solutions à l'aide

de l'appareil SHERWOOD 410 (voir annexe.I). Les résultats sont directement donnés en mg/l (ISO 9964-3,1993).

III.3.2.3.4.Chlorures (Cl⁻)

Le dosage des chlorures est effectué par titrage avec de l'argent nitrate (AgNO₃) en utilisant du dichromate de potassium (K₂CrO₄) comme indicateur. Les ions chlorure réagissent avec les ions argent pour former du chlorure d'argent (AgCl) insoluble, qui réagit ensuite avec le dichromate de potassium pour former du chromate d'argent (Ag₂CrO₄) de couleur brun rouge. On effectue le titrage avec de l'argent nitrate (AgNO₃) jusqu'au virage de la solution du jaune au rouge brique (ISO 9297, 1989).

III.3.2.3.5.Sulfate (SO₄⁻²)

Le dosage des sulfates est réalisé par spectrométrie selon la méthode (ISO 9280, 1990). Les ions sulfate sont précipités avec du chlorure de baryum, et les résultats sont obtenus en mg/l.

SO₄-2 (mg/l) = Valeur lue x facteur de dilution (Ladjel, 2009).

III.3.2.3.6.Titre alcalin complet (TAC) et bicarbonate (HCO₃⁻)

Le dosage des bicarbonates (HCO₃⁻), carbonates (CO₃⁻²) et hydroxydes est effectué par la méthode de titrimétrie avec un acide fort (H₂SO₄), en utilisant 3 gouttes de méthyle comme indicateur coloré (ISO 9963-1,1994).

III .3.2.3.7.Fer (Fe⁺²)

Le dosage du fer est réalisé par spectrométrie en présence de solution tompo, de phénanthroline et de chlorhydrate d'aldroxyamine(ISO 6332,1988)

III.4. Méthodes statistiques

Afin d'évaluer l'évolution temporelle de la qualité des eaux souterraines de Ouargla, nous avons réalisé une analyse de variance (ANOVA) pour vérifier si les moyennes des groupes proviennent d'une même population. L'ANOVA a été suivie du test de Tukey, appliqué à un niveau de probabilité de $p = 0,05$ pour tester les différences significatives entre les moyennes.

Le logiciel IBM SPSS Statistics 25 a été utilisé pour exécuter les analyses statistiques.

Chapitre VI

Résultats et discussion

La composition chimique d'une eau joue un rôle essentiel dans la détermination de sa qualité et de sa pertinence pour différents usages tels que l'alimentation en eau potable, l'irrigation ou l'industrie. L'hydrochimie, qui étudie les caractéristiques physiques et chimiques de l'eau, permet d'évaluer sa qualité chimique et de visualiser, à l'aide de cartes, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous.

Dans le cadre de cette étude, nous avons analysé la qualité des eaux souterraines de 23 forages situés dans notre zone d'étude. L'objectif était de suivre l'évolution de la qualité de ces eaux et d'identifier d'éventuelles variations spatiales dans les concentrations en éléments chimiques dissous.

VI.1. Caractéristiques hydrochimies des eaux souterraines

VI.1.1. Paramètres physiques

VI 1.1.1. Température

La température de l'eau souterraine joue un rôle crucial dans la régulation de sa composition chimique. Elle est influencée par plusieurs facteurs tels que la géologie de la région et la profondeur du niveau d'eau (Boudoukha *et al.*, 2012). Des mesures ont été réalisées afin d'évaluer la température de l'eau souterraine dans la zone d'étude.

Les résultats obtenus révèlent que les eaux souterraines présentent une température moyenne de 20,6°C. Les mesures les plus basses ont été enregistrées au niveau des forages F16, situés à l'abatoire (la zones industrielle ,soukra), avec une température minimale de 23 °C. En revanche, le forage F14 à el h'deb n° 02(rouissat) a enregistré la température maximale de 43,6 °C (Figure VI.1). Parmi les forages analysés, certains respectent les normes de potabilité en termes de température de l'eau. Ces températures sont supérieures aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage de température de 22 à 25 °C. Cependant, elles se situent en dessous des normes établies pour l'irrigation, à l'exception du forage 14 qui enregistre une valeur maximale dépassant la norme. Il convient de noter que ce forage est localisé au niveau de la nappe albienne, où l'eau se caractérise par sa température élevée.

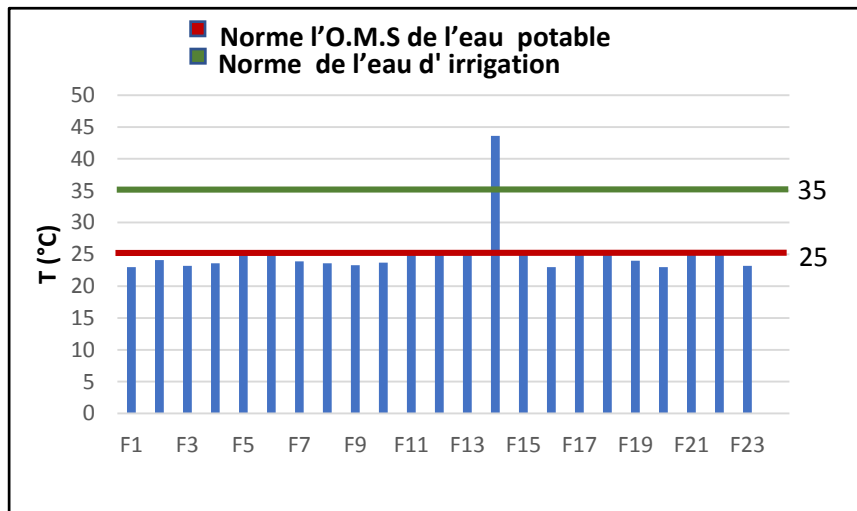


Figure VI.1 : Variation de la température des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.1.2. Conductivité électrique

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

Les résultats révèlent que les eaux souterraines présentent une conductivité électrique moyenne de 2710 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées au niveau des forages F6, situés à Said otba n°01, avec une valeur minimale de 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tandis qu'une valeur maximale de 4960 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a été enregistrée au forage F8, situé à matmora (Tazgrarte) (Figure VI.2). Parmi les forages examinés, la majorité ne respecte pas les normes de potabilité en termes de conductivité électrique de l'eau. Ces résultats dépassent les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage de conductivité électrique de 1500 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De plus, la majorité des forages ne respectent pas non plus les normes d'irrigation, qui préconisent une plage de 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

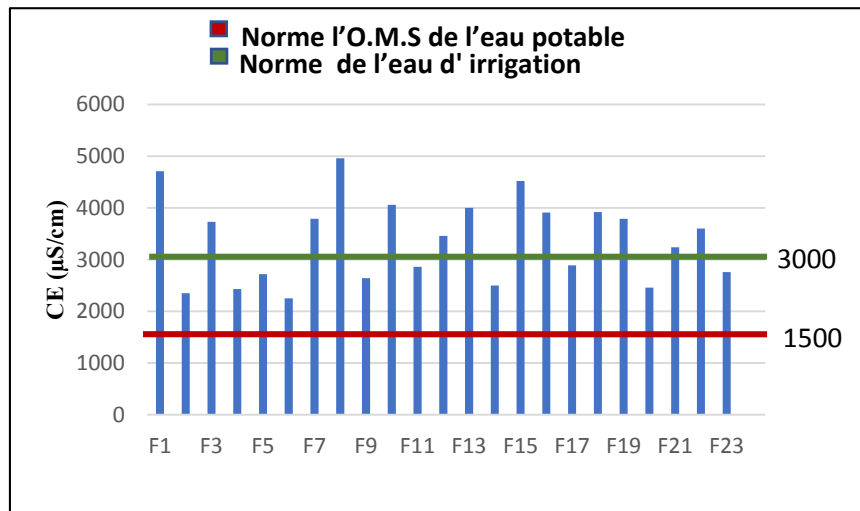


Figure VI.2 : Variation de conductivité électrique de CE des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.1.3. Potentiel d’hydrogène pH

Le pH mesure la concentration en ions H⁺ dans l'eau et indique son degré d'acidité ou d'alcalinité. C'est un paramètre important car les micro-organismes utilisés dans les systèmes de dépollution ne peuvent fonctionner correctement que dans une plage de pH comprise entre 6 et 8 (Benabderrahmane ,2021).

Les résultats des analyses révèlent que les eaux souterraines de la région présentent un pH moyen de 7,45. Les valeurs les plus basses ont été enregistrées au niveau des forages F8, situés à matmoara (tazgrarte), avec un pH de 7,21. En revanche, le forage F15 à messaadia (el-Bour) a enregistré un pH de 7,83 (Figure VI.3). Ces résultats de potentiel d'hydrogène sont inférieurs aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables (plage de pH de 6 à 8,5) et pour les eaux d'irrigation, qui recommandent une plage de pH de 6,5 à 8,5.

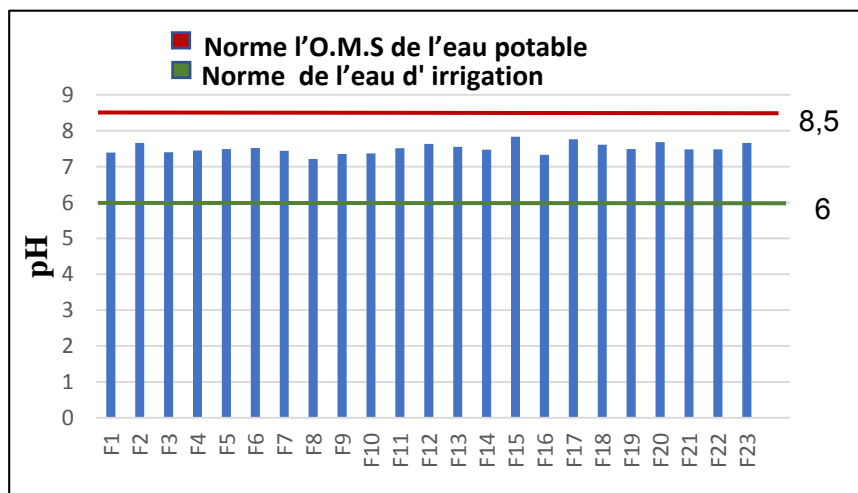


Figure VI.3 : Variation de Potentiel d’hydrogène pH des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.1.4. Turbidité

La présence de matières solides en suspension dans l'eau entraîne une diminution de sa transparence, ce que l'on appelle la turbidité (F.N.S ,2013).

Les résultats de l'analyse de la turbidité révèlent que les eaux souterraines présentent une valeur moyenne de turbidité de 1,25 NTU. Les forages F4, situés à ain hadji, ont enregistré les valeurs les plus basses avec une turbidité minimale de 0,8088 NTU, tandis que le forage F23 à bour el haicha a affiché une valeur maximale de 3,21 NTU (Figure VI.4). Il est important de souligner que ces mesures de turbidité sont inférieures aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour l'eau potable, qui préconisent une plage de turbidité inférieure à 5 NTU. Cela indique que les eaux souterraines analysées dans la région de Ouargla présentent une bonne clarté et sont conformes aux normes de qualité en ce qui concerne la turbidité.

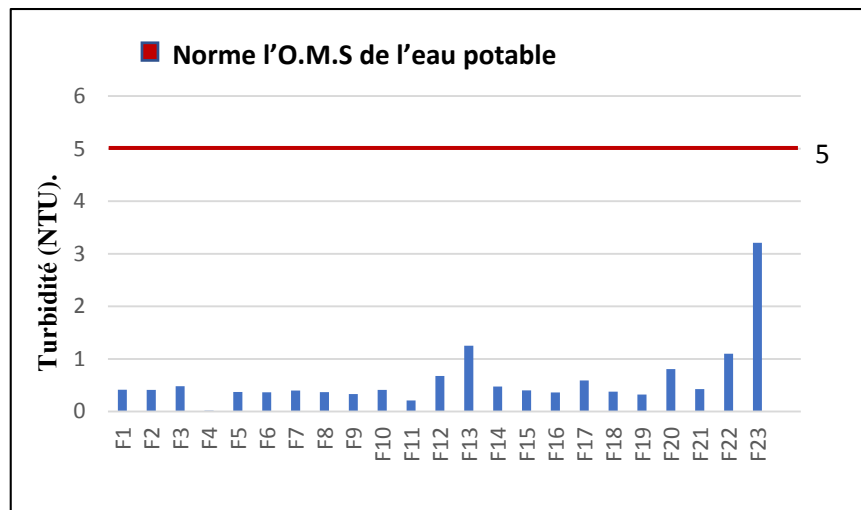


Figure VI.4: Variation de Turbidité en NTU des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.2. Paramètres chimiques

VI.1.2.1. Calcium (Ca^{+2})

Le calcium est un élément chimique naturellement présent dans les eaux souterraines. Il joue un rôle essentiel dans la vie et est souvent associé à la dureté de l'eau. Le calcium peut se dissoudre à partir de roches et de minéraux tels que le calcaire, la dolomite et le gypse, qui se trouvent fréquemment dans les aquifères souterrains. Lorsque l'eau souterraine contient du calcium, elle est considérée comme dure, ce qui signifie qu'elle présente une concentration élevée de minéraux dissous (Thierrin ,2006).

Les résultats de l'analyse indiquent que les eaux souterraines présentent une concentration moyenne en calcium de 160,32 mg/l. Les forages F6, situés à said otba n°01, ont enregistré les valeurs les plus basses avec une concentration minimale de 128,24 mg/l. En revanche, les

forages F1 et F8 à ifri n°03 et matmoara (tazgrarte), ont enregistré la concentration maximale de Ca^{+2} de 300,6 mg/l (Figure VI.5). La plupart des résultats des forages d'eaux souterraines dépassent les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui préconisent une plage de concentration de calcium Ca^{+2} de 75 à 200 mg/l. En revanche, tous les forages se situent en dessous des normes d'irrigation, qui recommandent une plage de concentration de calcium de 400 mg/l. Cela indique que les eaux souterraines de la région de Ouargla sont généralement adaptées à un usage potable, mais peuvent présenter une dureté élevée pour certains usages spécifiques tels que l'irrigation.

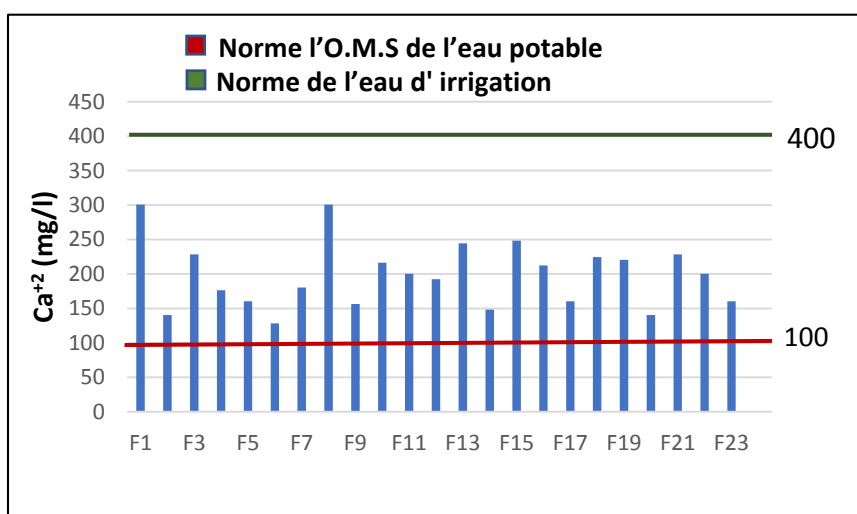


Figure VI.5 : Variation des concentrations de Ca^{+2} des eaux souterraines en mg/l de la région de Ouargla.

VI.1.2.2. Magnésium (Mg^{+2})

Le magnésium est l'un des éléments les plus répandus dans la nature. La plupart de ses sels sont très solubles dans l'eau, ce qui fait du magnésium un élément important contribuant à la dureté de l'eau. Il est présent sous forme de carbonates et d'hydrogencarbonates (Rodier et al., 2009).

Les résultats de l'analyse de la concentration de magnésium dans les eaux souterraines montrent une concentration moyenne de 85,06 mg/l au niveau des forages F2, situés à gharbouz n° 01. Le forage F8 à matmoara (tazgrarte), a enregistré la concentration maximale de 157,98 mg/l, tandis que le forage F6 à said otba n°01 présente la concentration minimale de 68,05 mg/l (Figure VI.6). Les concentrations de magnésium observées dépassent les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage de concentration de magnésium Mg^{+2} de 30 à 150 mg/l, à l'exception du forage F8 qui dépasse la norme de l'OMS avec une valeur de 157,98 mg/l à said otba n°02. En revanche, tous les

forages dépassent la norme d'irrigation qui recommande une plage de concentration de magnésium de 60,75 mg/l. Cela indique que les eaux souterraines de la région de Ouargla sont généralement riches en magnésium, ce qui peut avoir des implications sur leur utilisation potentielle pour l'eau potable et l'irrigation.

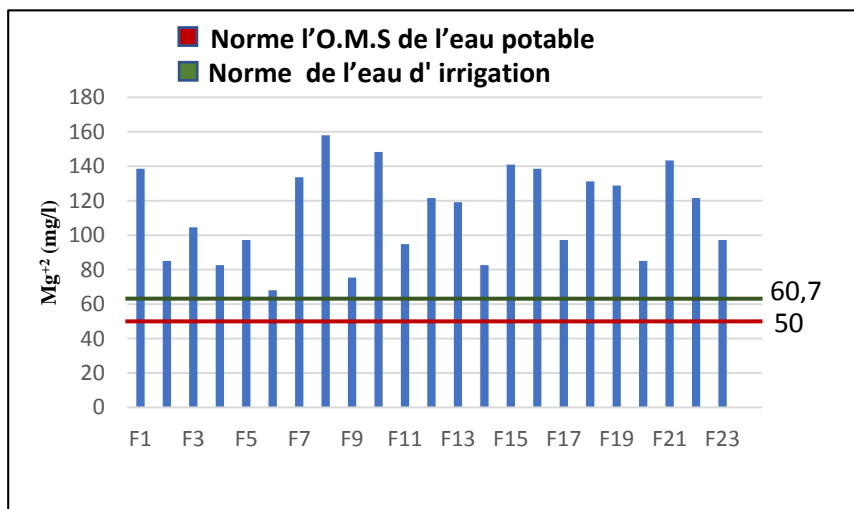


Figure VI.6 : Variation des concentrations de Mg^{+2} des eaux souterraines en mg/l de la région de Ouargla.

VI.1.2.3. Dureté totale (TH)

La dureté totale de l'eau souterraine est une mesure de la quantité de minéraux dissous dans l'eau, principalement des sels de calcium et de magnésium. La présence de ces minéraux dissous peut avoir un impact sur la qualité de l'eau et sa capacité à être utilisée à différentes fins, telles que la consommation humaine, l'irrigation, l'agriculture et l'industrie (U.A.E ,2013).

Les résultats des analyses indiquent que les eaux souterraines présentent une dureté totale moyenne de 800 mg/l . Les mesures les plus faibles ont été enregistrées aux forages F6, situés à said otba n°01, avec une concentration minimale de 600 mg/l. En revanche, le forage F8 à matmoara (tazgrarte), a enregistré la concentration maximale de dureté totale avec 1400 mg/l (Figure VI.7). Ces concentrations sont supérieures aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage de dureté totale de l'eau de 300 mg/l. De plus, elles dépassent également la norme d'irrigation qui recommande une plage de 40 mg/l pour tous les forages.

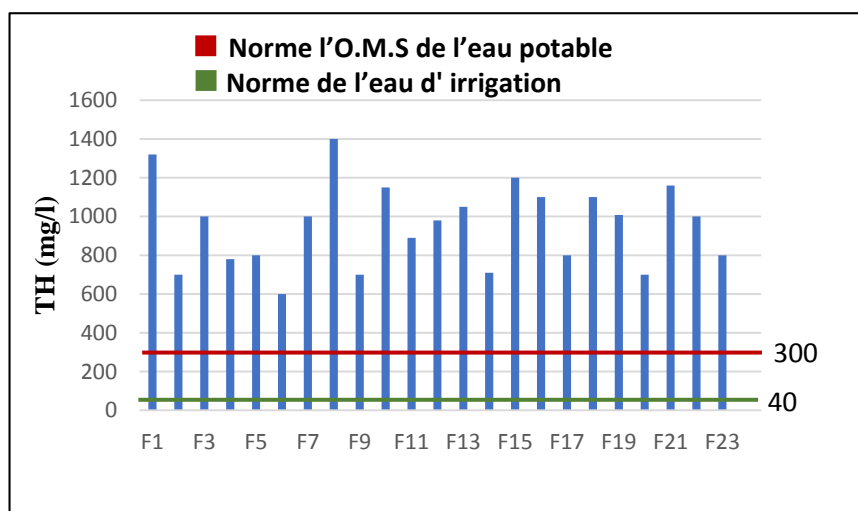


Figure VI.7 : Variation des concentrations de TH des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.2.4. Sodium (Na^+)

La présence de sodium dans l'eau souterraine peut avoir des conséquences sur la qualité et l'utilisation de l'eau. Des niveaux élevés de sodium peuvent rendre l'eau inappropriée pour l'irrigation des cultures, car ils peuvent entraîner une accumulation de sel dans le sol, ce qui peut nuire à la croissance des plantes. De plus, le sodium peut altérer le goût de l'eau potable et peut être associé à une augmentation de la pression artérielle chez certaines personnes qui le consomment régulièrement (Ncibi et Gaaloul , 2016).

Les résultats des analyses révèlent que les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de sodium (Na^+) de 275 mg/l. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées aux forages F2 et F4, situés à gharbouz n° 01 et ain hadji , avec une concentration minimale de 200 mg/l. En revanche, le forage F8 à matmoara (tazgrarte), a enregistré la concentration maximale de sodium de 475 mg/l (Figure VI.8). La plupart des résultats de sodium dépassent les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage de concentration de sodium de 200 mg/l. En revanche, ils sont inférieurs aux normes d'irrigation qui recommandent une plage de concentration de sodium de 920 mg/l.

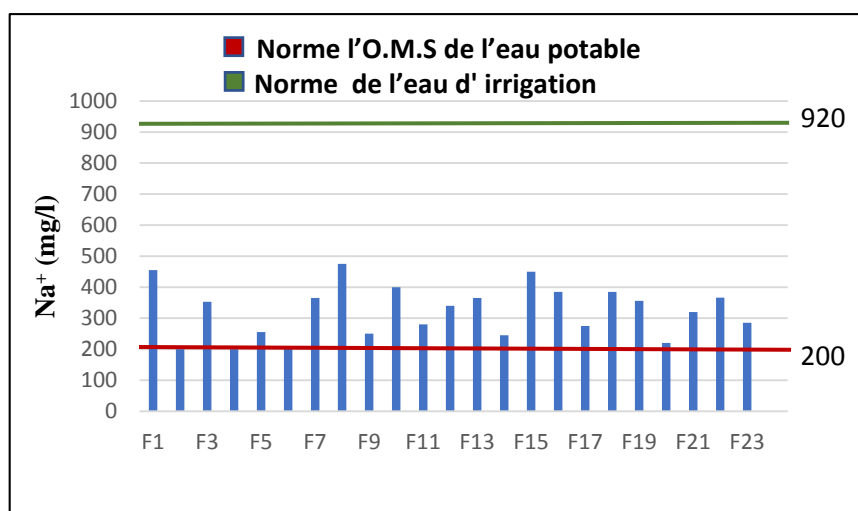


Figure VI.8 : Variation des concentrations de Na^+ des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.2.5. potassium (K^+)

Le potassium est principalement présent dans les eaux souterraines grâce à l'altération des roches silicatées, des argiles potassiques et à la dissolution des engrais chimiques (Mebarkia , 2011).

Les résultats des analyses révèlent que les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de potassium de 18 mg/l au niveau du forage 18 à el h'eb n° 02 (rouissat). Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées aux forages F2, situés à gharbouz n° 01, avec une concentration minimale de 14 mg/l. En revanche, le forage F8 à matmoara (tazgrarte), a enregistré une concentration maximale de potassium de 24 mg/l (Figure VI.9). Parmi les forages examinés, certains respectent les normes de potabilité, qui préconisent une plage de concentration de potassium de 20 mg/l. En revanche, ils sont inférieurs aux normes d'irrigation qui recommandent une plage de concentration de potassium de 2 mg/l.

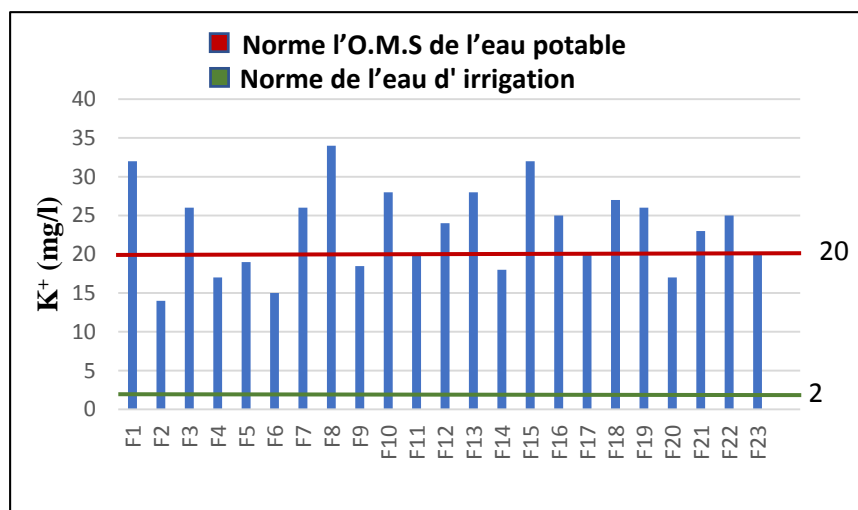


Figure VI.9 : Variation des concentrations de K^+ des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.2.6. Chlorures (Cl^-)

Les chlorures se trouvent largement répandus dans la nature, principalement sous forme de sels de sodium ($NaCl$) et de potassium (KCl). Ils sont naturellement présents dans les eaux souterraines en raison de l'altération et du lessivage des roches et des sols sédimentaires, ainsi que de la dissolution des dépôts de sel. En raison de leur occurrence et de leur utilisation courante, les chlorures sont souvent utilisés comme indicateur de pollution (Nechad et al ,2014).

Les résultats des analyses révèlent que les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de chlorures (Cl^-) de 741.65 mg/l. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées aux forages F14, situés à el h'eb (rouissat) n° 02, avec une concentration minimale de 418.08 mg/l. En revanche, le forage F8 à matmoara (tazgrarte), a enregistré une concentration maximale de 1061.57 mg/l (Figure VI.10). Ces concentrations dépassent les recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage de concentration de 250 mg/l. En revanche, elles se situent en dessous des normes d'irrigation qui recommandent une plage de concentration de chlorures de 1065 mg/l.

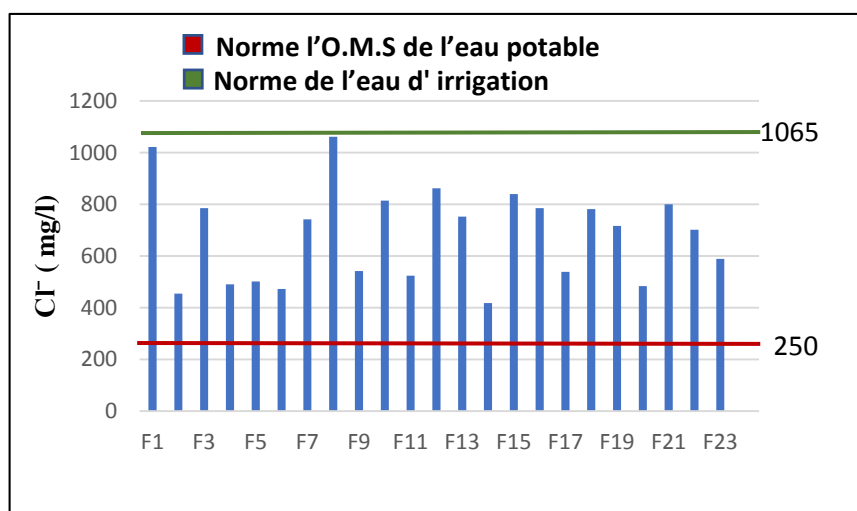


Figure VI.10 : Variation des concentrations de Cl^- des eaux souterraines de la région de Ouargla .

VI.1.2.7. Sulfate (SO_4^{2-})

Le soufre a la capacité de se combiner avec l'oxygène pour former l'ion sulfate, qui se trouve naturellement dans certains minéraux tels que le gypse et la baryte. Lorsqu'il est présent dans les eaux souterraines, il peut entraîner la dissolution du gypse (Brière, 2000).

Les résultats des analyses révèlent que les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de SO_4^{2-} de 540 mg/l. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées aux forages F6, situés à said otba n°01, avec une concentration minimale de 321 mg/l. En revanche, le forage F8 à matmoara (tazgrarte), a enregistré une concentration maximale de 850 mg/l (Figure VI.11). Parmi les forages examinés, tous dépassent les normes de potabilité en termes de concentration de sulfate dans l'eau, qui recommandent une plage de de 250 mg/l. En revanche, elles se situent en dessous des normes d'irrigation qui recommandent une plage de 400 mg/l. Ces résultats soulignent l'importance de surveiller et de réguler les niveaux de sulfate dans les eaux souterraines afin de garantir leur qualité pour différents usages.

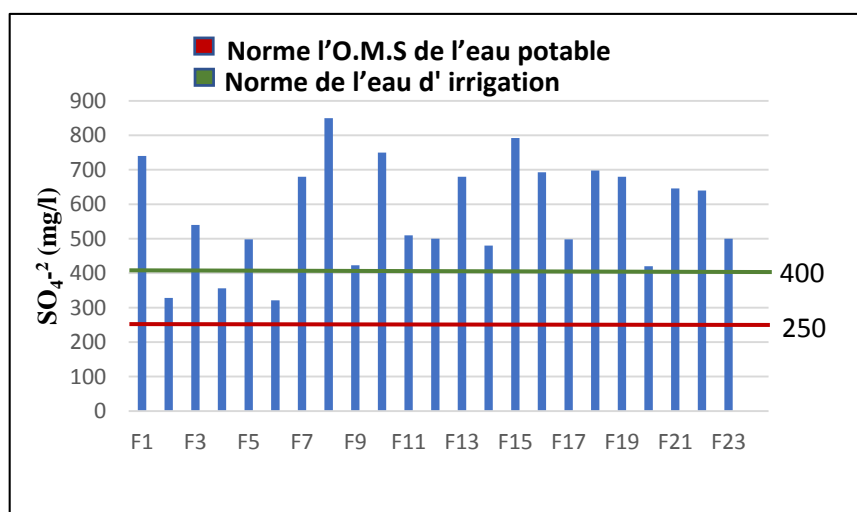


Figure VI.11 : Variation des concentrations de SO_4^{2-} des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.2.8. Bicarbonate (HCO_3^-)

La présence de bicarbonates dans l'eau est le résultat de la dissolution de formations carbonatées telles que la cipoline et le calcaire, provoquée par l'eau contenant du dioxyde de carbone (CO_2) issu de la minéralisation de la matière organique (Mebarkia, 2011).

D'après les résultats obtenus, les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de bicarbonates (HCO_3^-) de 102.48 mg/l. Les valeurs les plus faibles ont été enregistrées aux forages F20 situés à bamendil n° 01, avec une concentration minimale de 73.6 mg/l. En revanche, le forage F7 à ain errahma a enregistré une concentration maximale de 175.68 mg/l (Figure VI.12). Il convient de noter que ces résultats se situent en deçà des recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui préconisent une plage de concentration de bicarbonates de 200 mg/l. Cependant, ils respectent les normes d'irrigation qui recommandent une plage de concentration de bicarbonates de 610 mg/l pour tous les forages.

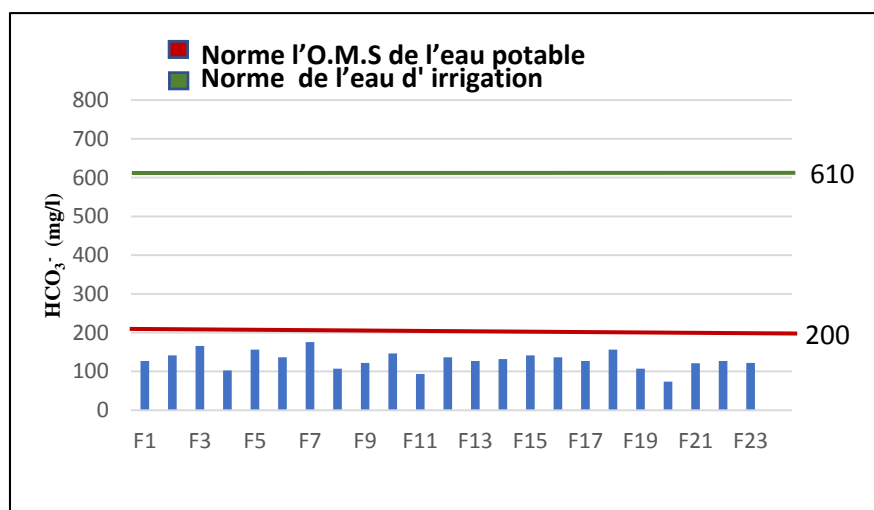


Figure VI.12 : Variation des concentrations de HCO_3^- des eaux souterraines de la région de Ouargla .

VI.1.3. Paramètres de pollution

VI.1.3.1. Ammonium (NH_4^+)

Les ions ammonium sont le premier résidu minéral issu de la dégradation de la matière organique azotée du sol par le processus d'ammonification. Ils proviennent notamment des effluents d'élevage lors de leur dégradation. Les ions ammonium sont un indicateur de la pollution des eaux par des rejets organiques d'origine agricole, domestique et industrielle, ayant des effets sur l'environnement et la santé des populations (Romuald Brice, 2014).

Selon les résultats, les eaux souterraines présentent une concentration moyenne d'ammonium de 0,2 mg/l. Les mesures les plus faibles ont été enregistrées au forage F21 situé à k'ser chott(ain baida), avec une valeur minimale de 0,008 mg/l. En revanche, le forage F14 à el'hdeb (rouissat) n° 02 a enregistré une valeur maximale de 0,22 mg/l (Figure VI.13). Ces concentrations d'ammonium sont inférieures aux recommandations de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) pour les eaux potables, qui recommandent une plage d'ammonium de 0,5 mg/l.

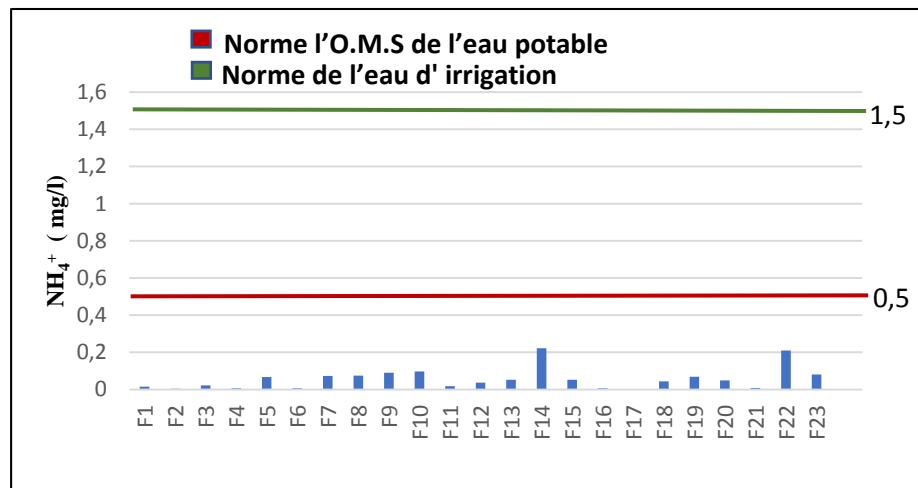


Figure VI.13 : Variation des concentrations de NH_4^+ des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.3.2. Nitrite (NO_2^-)

Les ions nitrites (NO_2^-) sont un stade intermédiaire entre l'ammonium (NH_4^+) et les ions nitrates (NO_3^-). Les bactéries nitrifiantes (nitrosomonas) transforment l'ammonium en nitrites lors de la nitrification, processus qui nécessite une consommation d'oxygène importante. Les nitrites proviennent également de la réduction bactérienne des nitrates, appelée dénitrification. Les nitrites sont toxiques pour les organismes aquatiques, même à de très faibles concentrations, et leur toxicité augmente avec la température (Rodier, 2005).

Selon les résultats, les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de nitrite de 0,5 mg/l. Les mesures les plus basses ont été enregistrées au forage F1 situé à ifri n°03, avec une concentration minimale de 0,01 mg/l. En revanche, le forage F3 à bahmid a enregistré une concentration maximale de 0,018 mg/l (Figure VI.14). Ces concentrations sont inférieures aux recommandations de l'OMS pour les eaux potables, qui recommandent une plage de nitrite de 1 mg/l. En revanche, elles sont conformes aux normes d'irrigation qui recommandent une plage de 0,5 mg/l.

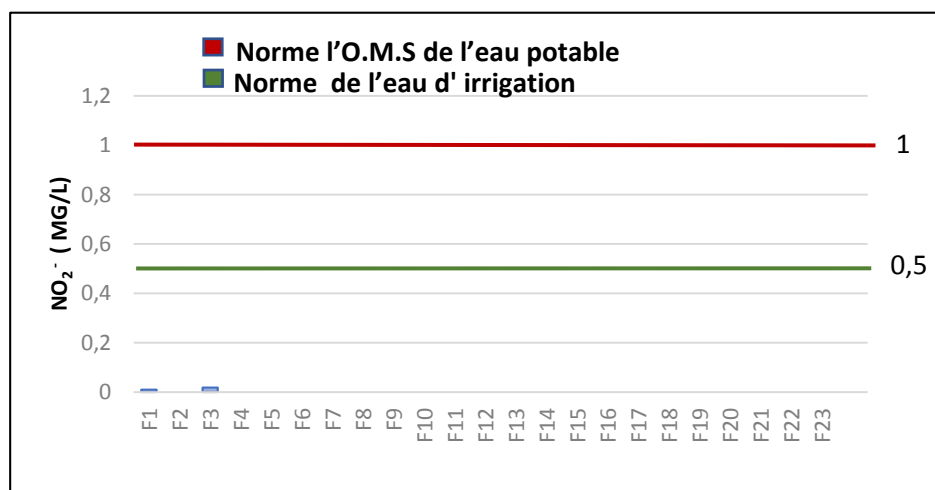


Figure VI.14: Variation des concentrations de NO₂⁻ des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.3.3. Nitrate (NO₃⁻)

Les nitrates proviennent de la fixation de l'azote atmosphérique et de la décomposition de la matière organique par des micro-organismes. Ils constituent la forme azotée la plus courante dans les eaux naturelles et représentent la composante principale de l'azote inorganique (N-inorganique) ou minéral (N-minéral), qui est majoritairement inclus dans l'azote global (NGL) ou l'azote total (NT), en plus de l'azote organique (N-organique) (Rodier et *al.*, 2009).

Selon les résultats, les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de nitrate de 25 mg/l. Les mesures les plus basses ont été enregistrées au forage F14 à el h'deb n° 02 (rouissat), avec une concentration minimale de 4,64 mg/l. En revanche, le forage F20 à bamendil n° 01 a enregistré une concentration maximale de 28,92 mg/l (Figure VI.15). Ces concentrations sont inférieures aux recommandations de l'OMS pour les eaux potables, qui recommandent une plage de nitrate de 50 mg/l. Cependant, elles dépassent les normes d'irrigation qui recommandent une plage de nitrate de 10 mg/l.

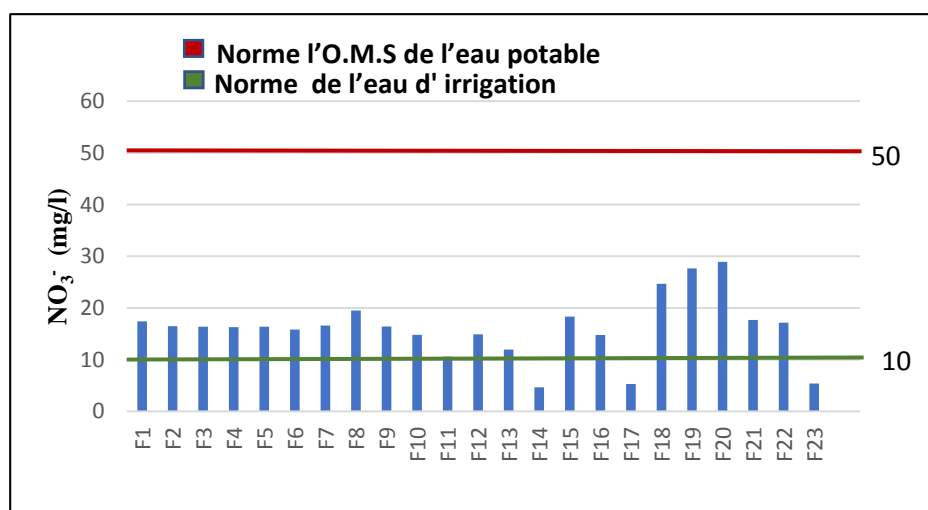


Figure VI.15: Variation des concentrations de NO₃⁻ des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.3.4. Phosphore (PO₄³⁻)

Le phosphore est un élément nutritif essentiel au fonctionnement normal de nombreux organismes dans les écosystèmes. Cependant, un excès de phosphate dans les systèmes aquatiques peut entraîner l'eutrophisation, favorisant la croissance d'algues nuisibles et réduisant la quantité d'oxygène dissous dans l'eau, ce qui nuit à la qualité de l'eau et à l'équilibre écologique global (Rashid et *al.*, 2017).

Selon les résultats, les eaux souterraines présentent une concentration faible de phosphate pour tous les forages, à l'exception du forage F10 qui enregistre une concentration de phosphate de 0,005 mg/l. Elles sont inférieures aux recommandations de l'OMS pour les eaux potables, qui recommandent une plage de phosphate de 5 mg/l (Figure VI.16). Elles sont également inférieures aux normes d'irrigation qui recommandent une plage de phosphate de 2 mg/l.

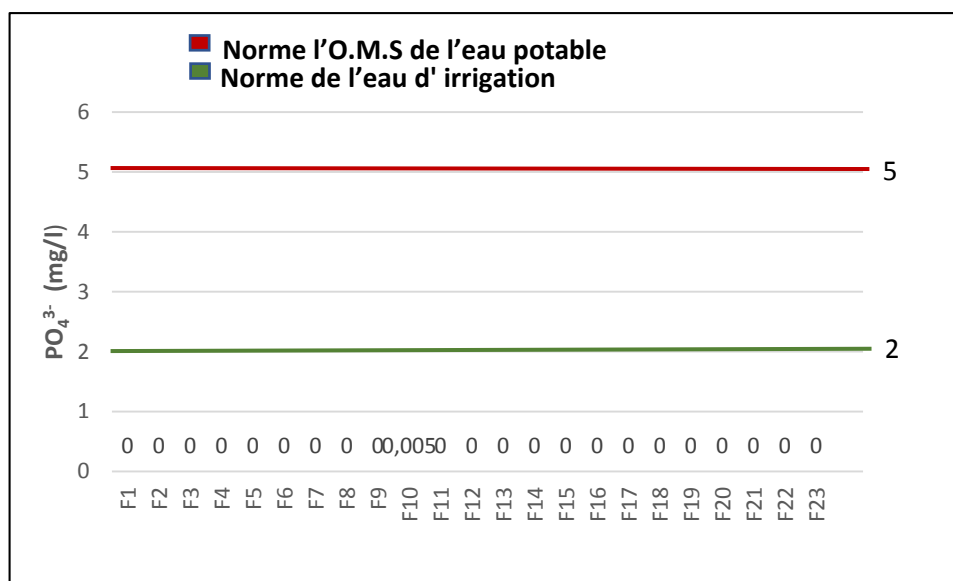


Figure VI.16 : Variation des concentrations de PO_4^{3-} des eaux souterraines de la région de Ouargla.

VI.1.3.4. Fer (Fe^{2+})

Le fer présent dans l'eau souterraine peut se trouver sous différentes formes, mais la plus courante est le fer dissous sous forme de fer ferreux (Fe^{2+}). Sa présence peut entraîner des problèmes de goût, d'odeur et de couleur, ainsi que des problèmes de corrosion des canalisations et des équipements. Par conséquent, il est souvent nécessaire de traiter l'eau souterraine afin d'éliminer le fer avant de la consommer (Palos et *al*, 2015).

Selon les résultats, les eaux souterraines présentent une concentration moyenne de fer de 0,48 mg/l. Les mesures les plus faibles ont été enregistrées aux forages F20, situés à bamndil n° 1, avec une concentration minimale de 0,04 mg/l. En revanche, le forage F18 à mkhadma n° 1 a enregistré une concentration maximale de 0,59 mg/l (Figure VI.17). Tous les forages examinés respectent les normes de potabilité en termes de concentration de fer dans l'eau, qui recommandent une plage de fer de 1 mg/l. En revanche, elles se situent en dessous des normes d'irrigation qui recommandent une plage de fer de 5 mg/l.

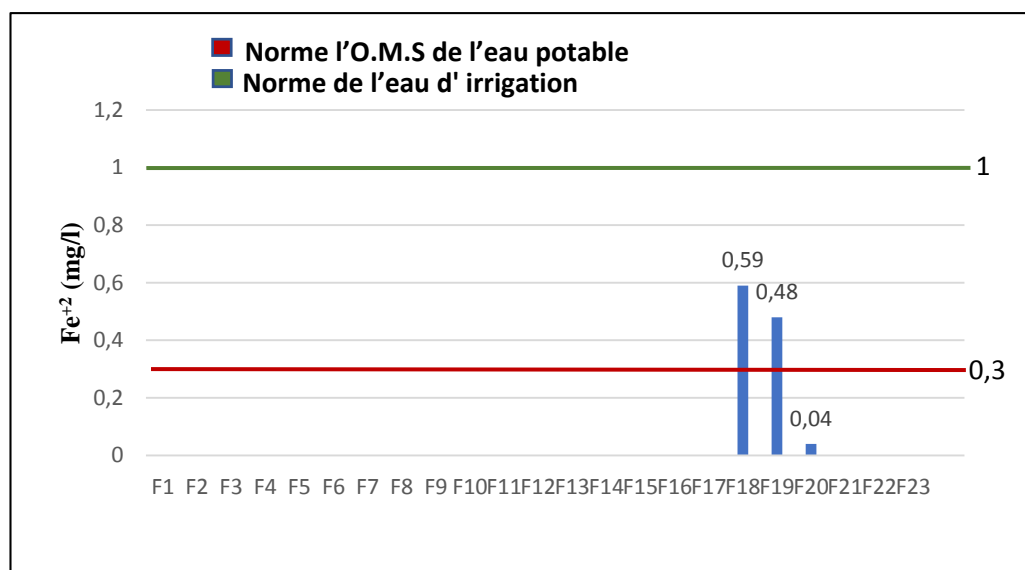


Figure VI.17 : Variation des concentrations de Fe^{2+} des eaux souterraines de la région de Ouargla.

Discussion des résultats

Les paramètres physico-chimiques tels que la température, le pH, la conductivité électrique, la salinité, la dureté totale, les chlorures, les sulfates, les bicarbonates et le fer dans les eaux souterraines de la région de Ouargla se situent généralement dans les plages acceptables pour les eaux potables. Cependant, la concentration en bicarbonates est légèrement inférieure à la recommandation pour l'irrigation.

En ce qui concerne les paramètres de pollution, les concentrations en ammonium, nitrites, nitrates et phosphates dans les eaux souterraines sont également inférieures aux limites recommandées pour les eaux potables. Cependant, il est important de surveiller les niveaux de nitrates, car des concentrations élevées peuvent être préjudiciables à la santé humaine.

Les concentrations en métaux lourds dans les eaux souterraines sont négligeables, ce qui suggère une faible contamination d'origine industrielle ou minière.

Les résultats des analyses des paramètres physico-chimiques et de pollution des eaux souterraines de la région de Ouargla indiquent globalement une bonne qualité de l'eau, conforme aux normes pour les usages potables et agricoles. Cependant, il est recommandé de continuer à surveiller régulièrement les niveaux de nitrates et de prendre des mesures préventives pour prévenir toute augmentation indésirable de ces niveaux.

selon les résultats des travaux antérieurs (Boucheham et Achour ,2005) ,(Kahoul et al.,2005), (Berregui ,2013) , et (Chaouki ,2016) ont tenté, par les analyses hydrochimiques (Na^+ , Ca^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2}) et les analyses de paramètres de pollution (NO_3^- , NO_2 , P, NH_4^+) qui caractérisée la nappe souterraines. Ces études analysé aussi les faciès chimiques des eaux , et créé des cartes des différentes paramètres étudiées , ils conclue que la qualité des eaux souterraines de la région de Ouargla est varie entre moyenne à bonne en générale .En plus, de certaines forages de mauvaise qualité à raison de la formation géologique des roches et les teneurs élevée de paramètres de pollution et les différentes paramètres chimiques .

Comparativement, avec les travaux antérieurs et notre étude sur la qualité des eaux souterraines , nous avons conclue que cette qualité en évaluation spatio- temporelle dans le temps , comme la qualité est devenue entre excellente et bonne .

la raison de l'excellente qualité des eaux est due à l'équilibre de leurs compositions , qui respectent les recommandation des normes d' (OMS) et des normes d'irrigation .D'autre part, la mauvaise qualité de certaines forage est due à la pollution naturel des roches et les différentes activités humaines.

VI.2. Caractéristique géochimique des eaux souterraines

VI.2.1. Représentation graphique des faciès chimiques

Dans le but de bien identifier les faciès hydro-chimiques et d'avoir la qualité des eaux de souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours au diagramme de Piper et Stabler .

VI.2.1.1. Diagramme de Piper

Le Diagramme de Piper est l'une des représentations les plus classiques pour comparer les compositions chimiques des eaux naturelles. Il permet une représentation des cations et anions sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives de chacun des ions majeurs par rapport au total des ions (Lucia et al , 2001). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces triangles permet de préciser en premier lieu la dominance cationique et anionique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon. Cette position permet de préciser le faciès de l'eau naturelle concernée (Belkabi ,2010).

Selon le diagramme de Piper, la distribution des points d'eau analysés d'après leurs compositions chimiques dans la ville de Ouargla montre que (Figure VI.18): Le faciès chimique des eaux analysé est chlorurée sodique pour les échantillons analysé .

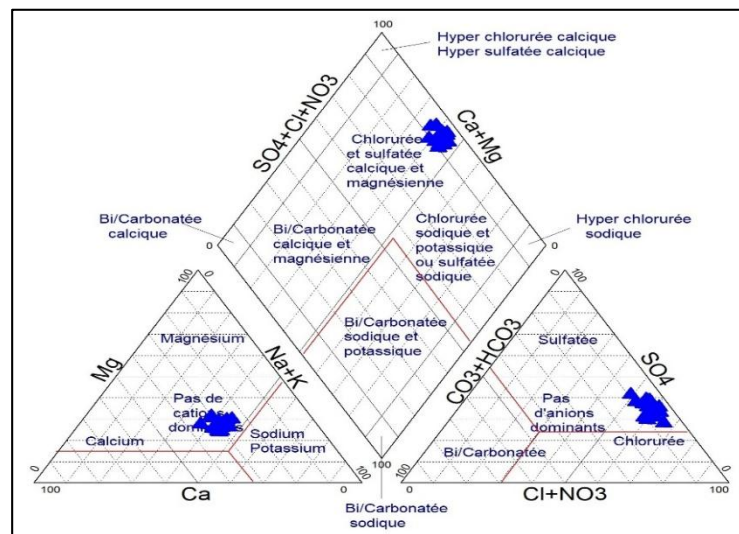


Figure VI.18 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Ouargla.

V.2.1.2. Formule caractéristique de STABLER

La formule caractéristique selon " STABLER " consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale (Belkabir ,2010).

. La formule est la suivante :

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

Avec

- **r** : la quantité en réaction de l'ion considéré en (még/l) ;
- **c** : la concentration totale ;

On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant (Figure V.19). Les résultats obtenus permettent de distinguer les faciès qui figurent dans le tableau (Tableau VI.1). L'examen de ce tableau montre que les eaux souterraines de de 23 forages prélevés (2023) de la région de ouargla sont des eaux de faciès :

- chlorurées sodique : Cette famille représente respectivement pour la majorité des forages.

- chlorurées sodique : pour le forage F4, à Ain hadji.

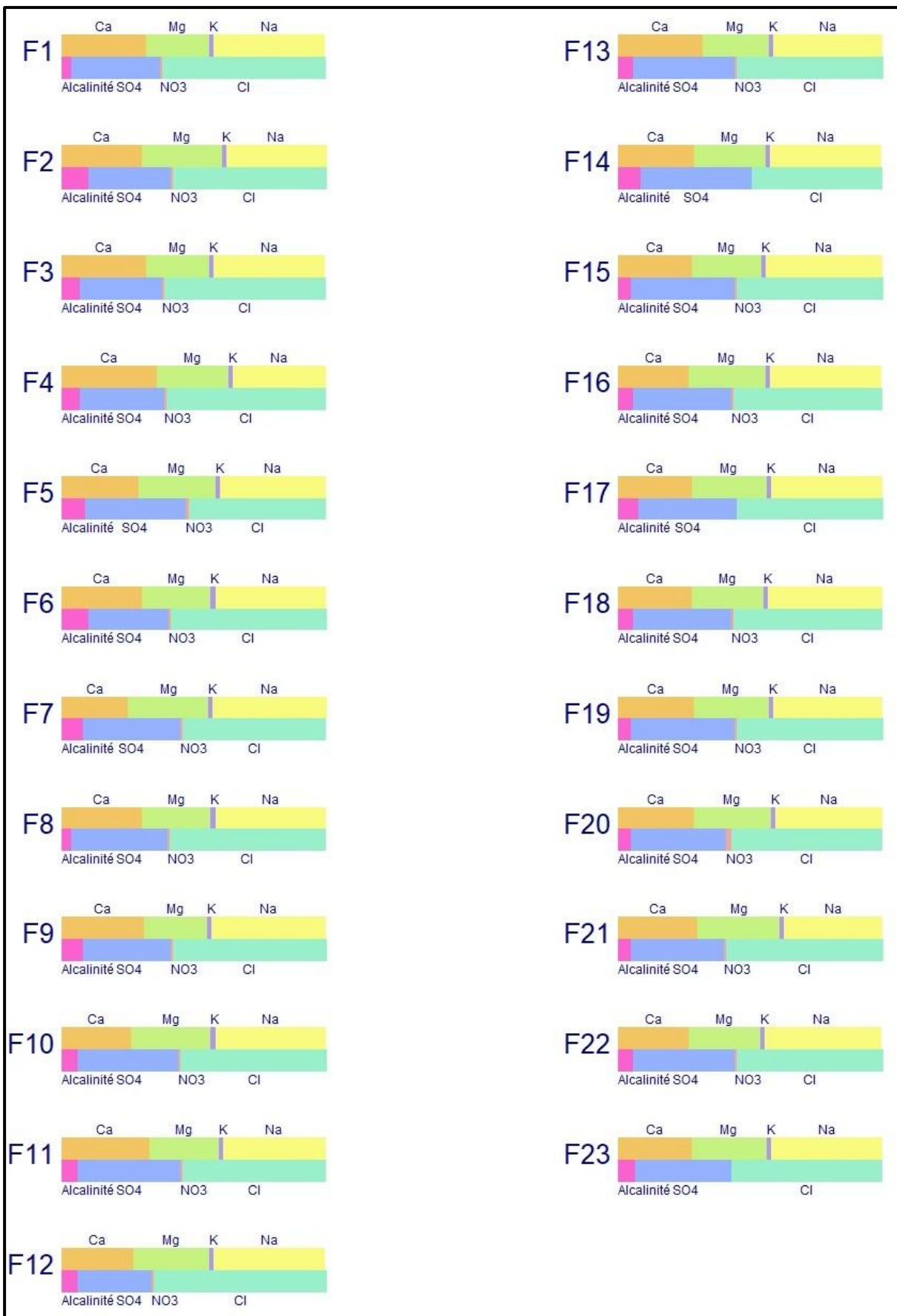


Figure VI.19: classification des eaux souterraines de la région de Ouargla selon le diagramme de stabler.

Tableau VI.1 : Faciès chimiques des eaux selon la méthode de STABLER.

N° forage	Formules caractéristiques		Faciès chimiques
	r % Anions	r % Cations	
F1	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F2	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F3	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F4	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Ca^{+2} > Na^{+} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées calcique
F5	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F6	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F7	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F8	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F9	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F10	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F11	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F12	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F13	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F14	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F15	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F16	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F17	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F18	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F19	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F20	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F21	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F22	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-} > NO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.
F23	$Cl^{-} > SO4^{-2} > HCO3^{-}$	$Na^{+} > Ca^{+2} > Mg^{+2} > K^{+}$	chlorurées sodique.

VI.2.1.3. Indice d'échange de Base (I.E.B)

L'indice d'échange de base est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants. L'eau au cours de son séjour souterraine entre en relation avec différentes substances ayant la propriété d'échanger les ions contre ceux contenues dans les eaux. Parmi ces substances nous avons les minéraux, l'hydroxyde ferrique, les substances organiques (Belksier et al ,2016).

D'après Schoeller (1943), l'indice d'échange de base est exprimé par la formule suivante :

$$\text{i. e. b} = \frac{rCl^- - r(Na^+ + k^+)}{rCl^-}$$

Avec :

- **r** : Concentration des ions en mg/l.
- **Cl⁻**: Chlorures.
- **Na⁺** : Sodium.
- **K⁺** : Potassium.

- Si (i e b) est négatif >0 => les eaux échangent des ions de Na⁺ +K⁺ contre les ions de Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ du terrain encaissant.
- Si (i e b) est nul = 0 donc il y a un équilibre entre les compositions chimique de l'eau et l'encaissant.
- Si (i e b) est positif l'encaissant libère les ions de Na⁺ +K⁺ et fixe les ions de Ca⁺⁺ et Mg⁺⁺ de l'eau.

Pour la région de Ouargla les eaux ont un indice d'échange de base positif dans la majorité des puits, indiquant un échange de Na⁺,K⁺ de l'eau contre Ca⁺² et Mg⁺² de l'encaissant .

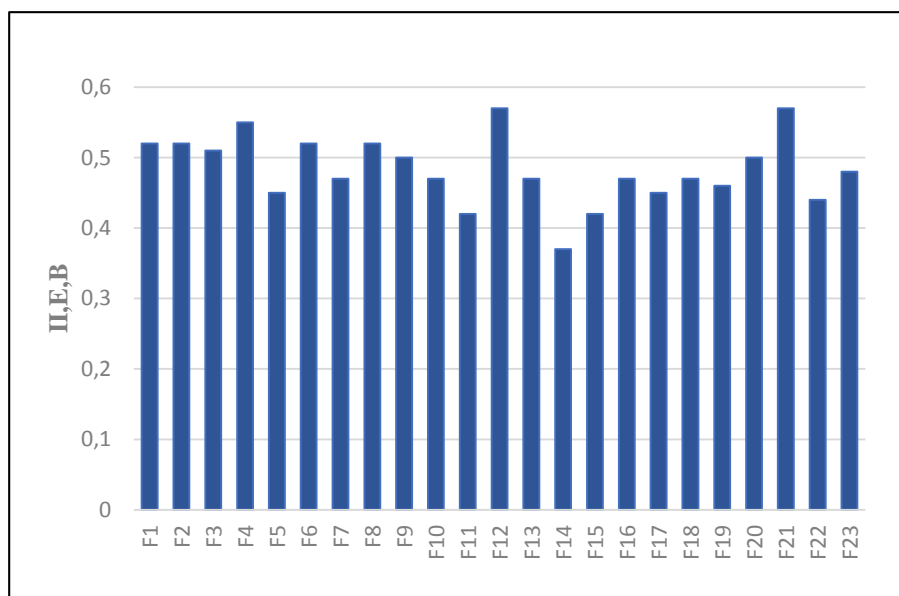


Figure VI.20 : Variation d'indice d'échange de base des eaux souterraines de Ouargla.

VI.3. Sodium adsorption ratio (SAR)

La salinité peut entraîner des effets nocifs conséquents en raison de la fixation de certains sels par les colloïdes du sol tel que le sodium qui exerce alors une action néfaste sur la végétation de façon indirecte et en dégradant les propriétés physiques des sols qui deviennent compacts et asphyxiants pour les plantes (Todd , 1980).

Lorsque la concentration en ions Na^+ à l'état soluble dans le sol est importante, ces ions remplacent fréquemment le Ca^{+2} sur le complexe absorbant. Cet effet peut être provoqué lors d'un contact entre une eau chargée en sels et un sol (Schoeller , 1962).

Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium adsorbé (Sodium Adsorption Ratio SAR) , ainsi, le SAR, sera calculé par la formule suivante (Belksier et al .,2014) :

$$S.A.R = \frac{r\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{r\text{Ca}^{+2} + r\text{Mg}^{+2}}{2}}}$$

Avec:

- (r): Concentration des ions
- Na^+ : Sodium
- Ca^{+2} : Calcium
- Mg^{+2} : Magnésium
- où les concentrations sont exprimées en méq/l.

Afin d'évaluer la qualité de l'eau d'irrigation dans les différentes stations échantillonnées, nous avons utilisé l'indice de SAR. Les valeurs calculées de SAR varient de 3.1149 à 5.6506. L'altération minérale de l'indice de SAR présente un seul classe d'aptitude de l'eau à l'usage d'irrigation (Tableau VI.2) :

- 100% des eaux analysées appartiennent à la classe de très bonne qualité. Les résultats de SAR sont inférieurs à 5. L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.

Tableau VI.2 : Les résultats de Indice de SAR:

Nom	S.A.R	Classe	Indication
F1	5,4473	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F2	3,2881	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F3	4,8556	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F4	3,1149	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F5	3,9216	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F6	3,7292	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F7	5,0212	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F8	5,5218	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F9	4,1100	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F10	5,1306	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F11	4,0825	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F12	4,7242	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F13	4,7873	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F14	3,9996	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F15	5,6506	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F16	5,0495	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.

F17	4,2292	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F18	5,0495	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F19	4,7120	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F20	3,6170	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F21	4,0867	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F22	5,0343	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.
F23	4,3830	Très Bonne	L'eau peut servir à l'irrigation des plantes très sensibles .ou peu de danger d'alcalinisation des sols.

Pour une même conductivité électrique, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique pour apprécier la qualité d'une eau. Le report des résultats sur le diagramme de Richards permet de classer les différents types d'eau d'irrigation et d'indiquer les diverses utilisations selon la tolérance des cultures (Durand , 1983).

D'après la figure (Figure VI.21), nous avons pu signaler la présence de deux classes suivantes :

- Eaux faibles (C3S1) : les eaux faisant partie de cette classe sont faiblement chargées en sels. pour l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés et à haute perméabilité.
- Eaux médiocres (C4S2): les eaux faisant partie de cette classe sont fortement chargées en sels. Elles sont susceptibles de convenir à l'irrigation des plantes tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés

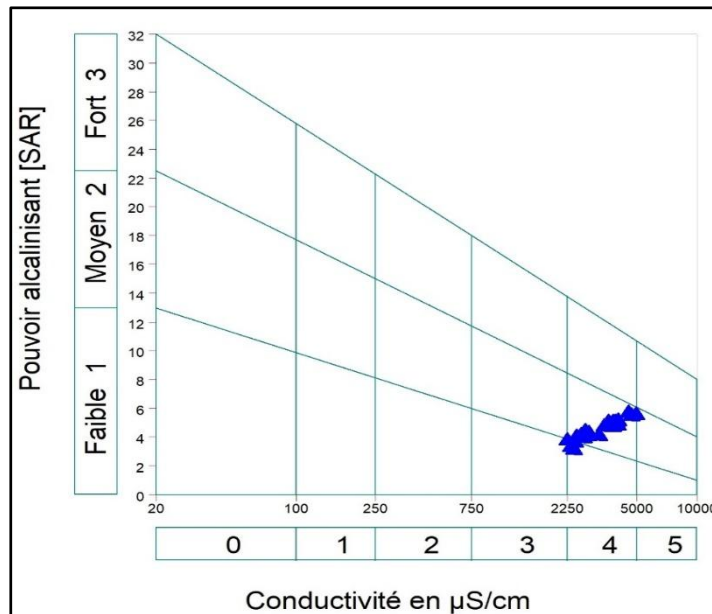


Figure VI.21 : classification des eaux souterraines de la région de Ouargla selon Richards.

VI.4. Les indices de qualité de l'eau (IQE)

L'évaluation de la qualité de l'eau souterraine est essentielle pour garantir la santé humaine et la protection de l'environnement. L'indice de qualité de l'eau souterraine est un outil qui permet d'évaluer la qualité de l'eau souterraine en fonction de plusieurs paramètres. Cet indice permet aux autorités de surveiller la qualité de l'eau souterraine au fil du temps et de prendre les mesures nécessaires pour protéger les sources d'eau potable et l'environnement (Abbasi et al., 2012).

L'indice de qualité de l'eau, nous pouvons obtenir un nombre qui exprime la qualité globale de l'eau, en fonction de plusieurs paramètres de qualité, Pour déterminer la potabilité des eaux souterraines, l'indice de qualité de l'eau a été calculé à l'aide de la formule suivante :

$$IQE = \frac{\sum QiWi}{\sum Wi}$$

L'échelle d'évaluation de la qualité (Qi) pour chaque paramètre est calculée à l'aide de cette expression :

$$Qi = 100 * \left[\frac{Vi - V0}{Si - V0} \right]$$

Où, V_i est la concentration estimée du $i^{\text{ème}}$ paramètre dans l'eau analysée

V_o est la valeur idéale de ce paramètre dans l'eau pure $V_o = 0$ (sauf $\text{pH} = 7,0$ et $\text{OD} = 14,6$ mg/L)

S_i est la valeur standard recommandée du $i^{\text{ème}}$ paramètre

Le poids unitaire W_i pour chaque paramètre de qualité de l'eau est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$W_i = \frac{K}{S_i}$$

Où, K = constante de proportionnalité et peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sum\left(\frac{1}{S_i}\right)}$$

En utilisant les normes de qualité de l'eau recommandées par l'O.M.S comme illustré dans le tableau :

Pour calculer l'indice de qualité de l'eau, nous avons utilisé les paramètres chimiques des 23 forages d'eau de la zone d'étude. Les paramètres utilisés comprennent le pH, la conductivité électrique (CE), la température (T°), les solides totaux dissous (TDS), la turbidité, les concentrations de calcium (Ca^{+2}), magnésium (Mg^{+2}), sodium (Na^+), potassium (K^+), ammonium (NH_4^+), phosphore (PO_4^{-2}), chlorures (Cl^-), bicarbonate (HCO_3^-), nitrate (NO_3^-), sulfates (SO_4^{-2}), fer (Fe^{+2}) et la dureté totale (TH).

La première étape pour déterminer l'indice de qualité des eaux souterraines (IQE) consiste à calculer le facteur de pondération de chaque paramètre analysé. L'indice d'évaluation (q_i) est calculé en fonction des valeurs d'analyse obtenues en laboratoire pour chaque paramètre. Une fois les valeurs de pondération (W_i) et d'évaluation (q_i) déterminées, l'indice de qualité des eaux souterraines peut être calculé. Les valeurs de l'IQE calculées sont ensuite classées en cinq

catégories pour déterminer l'état de la qualité de l'eau : Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise (Gummadi , 2014 ., Sharma ., 2014, Shaif et al ., 2017)..

Tableau VI.3: Normes de l'eau potable selon (l'O.M.S).

Paramètres	Unités	la norme standard
Ph	-	8,5
CE	µs/cm	1500
TDS	mg/l	500
Température (T°)	°C	25
Dureté totale (TH)	mg/l	300
Magnésium (Mg^{+2})	mg/l	50
Calcium (Ca^{+2})	mg/l	100
Turbidité	NTU	5
Ammonium (NH_4^-)	mg/l	0,5
Phosphore (PO_4^{-2})	mg/l	5
Chlorures (Cl^-)	mg/l	250
Nitrate (NO_3^-)	mg/l	50
Potassium (K^+)	mg/l	20
Sodium (Na^+)	mg/l	200
Sulfates (SO_4^{-2})	mg/l	250
Bicarbonate (HCO_3)	mg/l	200
Fer (Fe^{+2})	mg/l	0,3

La carte de distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau pour la région d'étude révèle une variation des valeurs de l'indice de qualité de l'eau, s'échelonnant entre 3,40 et 119,47.

Parmi les 23 forages analysés, tous les échantillons indiquent une qualité soit "très bonne" soit "mauvaise". La majorité des forages présentant une excellente qualité se trouvent au niveau du forage F6, situé dans la partie nord de la zone d'étude à Said otba. En revanche, un faible pourcentage de forages, notamment le forage F18 à Mekhadma, présente une qualité très médiocre (figure VI.22).

La contamination de la nappe souterraine peut engendrer de nombreuses maladies chez la population qui utilise ces eaux comme source d'eau potable. Dans la région de Ouargla, la majorité des eaux souterraines affichent une bonne à excellente qualité, avec une petite proportion nécessitant un certain degré de traitement. Il est donc primordial de les protéger contre les risques de contamination.

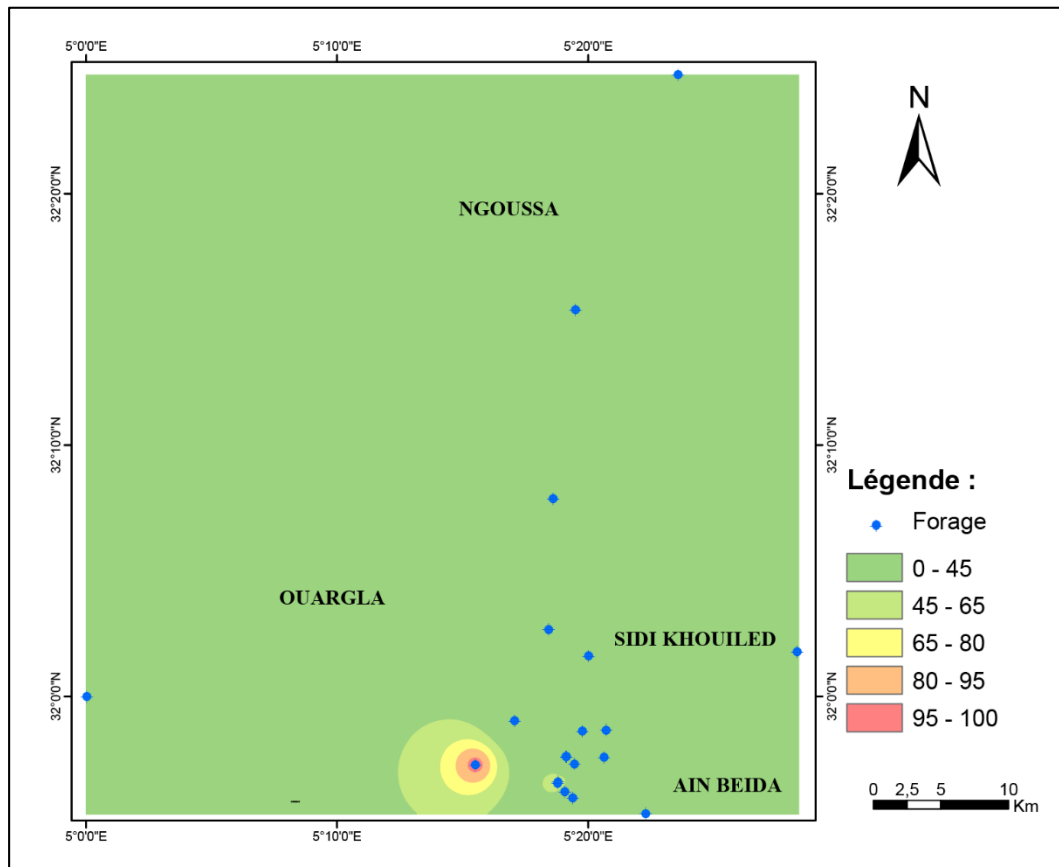


Figure VI.22 : Carte de distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau des eaux souterraines de la région de Ouargla

VI.5. Evolution temporelle de la qualité des eaux souterraines

La qualité des eaux souterraines a évolué au fil du temps en raison des activités humaines telles que l'agriculture intensive, l'industrialisation croissante et l'utilisation répandue de produits chimiques. Ces facteurs ont eu un impact significatif sur la qualité de cette ressource essentielle. Afin de comprendre les changements dans la qualité des eaux souterraines et de prendre des mesures appropriées pour la protéger et la gérer de manière durable, il est nécessaire

de collecter des données cohérentes sur une période prolongée, de réaliser une analyse comparative, d'utiliser des outils statistiques et d'identifier les facteurs influents.

Pour étudier l'évolution temporelle de la qualité des eaux souterraines à Ouargla, nous avons utilisé des données des années 1998, 2007, 2017, 2021 et 2023. Les paramètres pris en compte comprennent le pH ainsi que les concentrations des anions et cations suivants : Na^+ , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- , K^+ et Mg^{+2} (Tableau VI.4).

Tableau VI.4 : les moyennes des paramètres étudiés.

Année	pH	Na^+ [meq/L]	Cl^- [meq/L]	Ca^{+2} [meq/L]	SO_4^- [meq/L]	HCO_3^- [meq/L]	NO_3^- [meq/L]	K^+ [meq/L]	Mg^{+2} [meq/L]
1998	8,13	26,28	34,28	7,4	22,91	1,56	0,48	0,8	23,68
2007	7,75	18,03	19,85	12,66	21,09	1,03	0,64	0,5	11,5
2017	7,88	9,07	27,22	6,74	20,05	1,32	0,46	0,6	20,34
2021	7,41	14,9	19,56	11,1	14,98	2,42	0,17	0,5	7,96
2023	7,49	14,06	19,22	9,91	11,97	2,12	0,26	0,6	9,28

Les résultats de l'analyse des données ont révélé des variations dans les niveaux des paramètres de qualité des eaux souterraines à Ouargla au fil du temps. Voici un aperçu de ces variations :

- pH : Nous avons observé une légère diminution du pH entre 1998 (pH= 8,13) et 2021 (pH= 7,41), suivie d'une légère augmentation en 2023 (pH = 7,49). Ces variations indiquent une fluctuation de l'acidité de l'eau au fil des ans.
- Chlorure (Cl^-) : La concentration en chlorure a diminué de 34,28 meq/L en 1998 à 19,22 meq/L en 2023, suggérant une possible réduction de la salinité de l'eau souterraine pendant cette période.
- Bicarbonate (HCO_3^-) : Les niveaux de bicarbonate sont restés relativement stables autour de 2 meq/L tout au long de la période étudiée (1998-2023), indiquant une certaine constance dans la quantité de bicarbonate dissous dans l'eau.
- Sodium (Na^+) : La concentration en sodium est passée de 26,28 meq/L en 1998 à 14,06 meq/L en 2023, suggérant une possible diminution de la présence de sodium dans l'eau souterraine.
- Potassium (K^+) et Magnésium (Mg^{+2}) : Les niveaux de potassium et de magnésium sont restés constants au cours de la période étudiée, avec des valeurs de 0,5-0,6 meq/L pour le potassium et 7,96-9,28 meq/L pour le magnésium.

- Pour les nitrates (NO_3^-), nous avons observé une diminution notable de leur concentration au fil du temps. En 1998, la concentration de NO_3^- était de 0,48 meq/L, mais elle est descendue à 0,26 meq/L en 2023.
- La concentration de calcium (Ca^{+2}) était de 7,4 milliéquivalents par litre (meq/L) en 1998. Elle a augmenté pour atteindre 10,7 meq/L en 2023.

Pour déterminer si les variations observées sont statistiquement significatives, nous avons effectué une analyse de variance « ANOVA ». C'est une méthode statistique puissante utilisée pour comparer les moyennes de plusieurs groupes et déterminer s'il existe des différences significatives entre eux. Elle permet d'analyser la variabilité entre les groupes ainsi que la variabilité au sein des groupes, fournissant ainsi des informations clés sur les relations entre les variables étudiées. L'objectif est de déterminer si les différences observées sont dues à la variation aléatoire ou si elles sont statistiquement significatives. Le seuil de signification utilisé est généralement de 0,05. Les valeurs de Sig (p-value) supérieures à ce seuil indiquent que les différences observées ne sont pas statistiquement significatives, tandis que les valeurs inférieures au seuil indiquent que les différences observées sont statistiquement significatives.

Dans notre analyse ANOVA des données (voir Tableau), les résultats sont les suivants pour chaque paramètre étudié :

- pH : La valeur de F est de 1,866 et la valeur de Sig. est de 0,254. Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre pH, car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.
- Na^+ : La valeur de F est de 0,817 et la valeur de Sig. est de 0,565. Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre Na, car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.
- Cl^- : La valeur de F est de 0,166 et la valeur de Sig. est de 0,947. Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre Cl, car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.
- Ca^{+2} : La valeur de F est de 2,301 et la valeur de Sig. est de 0,193. Selon ces résultats, il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre Ca, car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.
- SO_4^{-2} : La valeur de F est de 3,051 et la valeur de Sig. est de 0,126. Ces résultats indiquent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre SO_4 , car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.

- HCO_3^{-2} : La valeur de F est de 0,852 et la valeur de Sig. est de 0,549. Selon ces résultats, il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre HCO_3 , car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.
- NO_3^- : La valeur de F est de 11,103 et la valeur de Sig. est de 0,011. Ces résultats indiquent qu'il y a des différences significatives entre les groupes pour le paramètre NO_3 , car la valeur de Sig. est inférieure à 0,05.
- K^+ : La valeur de F est de 0,194 et la valeur de Sig. est de 0,932. Ces résultats montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre K, car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.
- Mg^{+2} : La valeur de F est de 0,483 et la valeur de Sig. est de 0,750. Selon ces résultats, il n'y a pas de différences significatives entre les groupes pour le paramètre Mg, car la valeur de Sig. est supérieure à 0,05.

Tableau VI.5: ANOVA pour la variation temporelle des paramètres étudiés

Paramètre	pH	Na^+	Cl^-	Ca^{+2}	SO_4^{-2}	HCO_3^-	NO_3^-	K^+	Mg^{+2}
F	1,866	0,817	0,166	2,301	3,051	0,852	11,103	0,194	0,483
Sig.	0,254	0,565	0,947	0,193	0,126	0,549	0,011	0,932	0,75

L'ANOVA indique qu'il y a des différences significatives dans les concentrations de nitrate (NO_3^-) entre les groupes étudiés (les années), avec une valeur de Sig. inférieure à 0,05. Cependant, l'ANOVA ne spécifie pas quels groupes diffèrent significativement les uns des autres. Pour cela, nous utilisons un test de post-hoc, en particulier le test de Tukey.

Le test de Tukey est couramment utilisé après une ANOVA pour effectuer des comparaisons multiples entre tous les groupes et identifier les paires de groupes qui présentent des différences significatives. Il permet de déterminer les différences significatives entre les groupes en calculant un intervalle de confiance pour la différence de moyennes entre chaque paire de groupes. Si l'intervalle de confiance exclut zéro, cela indique une différence significative entre les moyennes des deux groupes comparés. Cependant, il est important de noter que certaines différences moyennes peuvent présenter une tendance à la significativité ($p < 0,05$), mais les intervalles de confiance à 95 % peuvent inclure la valeur zéro, ce qui indique une incertitude quant à la signification réelle de ces différences (Tableau V.5).

Tableau VI.6 : Tests simultanés de Tukey pour les différences de moyennes de (NO_3^-).

		Sig.	Intervalle de confiance à 95 %
--	--	------	--------------------------------

		Différence moyenne (I-J)	Erreur standard		Borne inférieure	Borne supérieure
1998	2007	-0,08	0,13	0,97	-0,62	0,46
1998	2017	-0,22	0,13	0,56	-0,76	0,33
1998	2021	0,54	0,13	0,05	0,00	1,08
1998	2023	0,37	0,13	0,18	-0,18	0,91
2007	2017	-0,14	0,13	0,84	-0,68	0,41
2007	2021	0,62000*	0,13	0,03	0,08	1,16
2007	2023	0,45	0,13	0,10	-0,10	0,99
2017	2021	0,75500*	0,13	0,01	0,21	1,30
2017	2023	0,58000*	0,13	0,04	0,04	1,12
2021	2023	-0,18	0,13	0,70	-0,72	0,37

(*) La différence moyenne est significative au niveau 0,05.

Les résultats obtenus montrent que la plupart des différences moyennes entre les années étudiées, à savoir 1998, 2007, 2017 et 202, en ce qui concerne la teneur en nitrates, ne sont pas statistiquement significatives, avec une valeur de p supérieure à 0,05. Cela suggère que ces variations observées pourraient être attribuées à la variabilité aléatoire plutôt qu'à des différences véritablement significatives.

Cependant, des analyses révèlent des différences significatives pour certaines paires d'années. Par exemple, la différence moyenne de la teneur en NO_3^- entre les années 1998 et 2021 est de 0,54, avec une tendance à la significativité ($p = 0,05$). Toutefois, il convient de noter que l'intervalle de confiance à 95 % pour cette différence (-0,00 à 1,08) inclut la valeur zéro, ce qui indique une certaine incertitude quant à la signification réelle de cette différence.

De manière similaire, il a été observé une différence moyenne de 0,62 entre les années 2007 et 2021, avec une tendance à la significativité ($p = 0,08$). Cependant, l'intervalle de confiance à 95 % est de 0,04 à 1,16. De plus, entre les années 2017 et 2021, une moyenne de 0,75 a été observée avec une tendance à la significativité ($p = 0,21$). Une fois de plus, l'intervalle de confiance à 95 % est de 0,21 à 1,30. En outre, une différence moyenne de 0,58 a été observée entre les années 2017 et 2023, avec une tendance à la significativité ($p = 0,04$). Cependant, comme dans les autres cas, l'intervalle de confiance à 95 % est de 0,04 à 1,12. Cela indique qu'il est assez certain que la teneur en nitrates a augmenté, mais il subsiste une certaine incertitude quant à l'ampleur exacte de cette augmentation.

CONCLUSION

Conclusion générale :

La ville d'Ouargla est confrontée à un climat sec et à une faible précipitation, ce qui rend nécessaire le recours à des forages pour l'extraction de l'eau souterraine, qui est une source essentielle pour répondre aux besoins en eau dans la région. Cependant, il est crucial de comprendre la qualité de cette eau, car elle sera utilisée dans divers domaines tels que l'agriculture, l'industrie et l'eau potable.

L'objectif principal de cette étude était d'évaluer la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans la région d'Ouargla et d'analyser son évolution dans le temps et dans l'espace.

Les résultats de l'étude hydrochimique des eaux souterraines ont montré que l'eau est fortement minéralisée, avec une conductivité électrique élevée qui varie entre 2250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 4960 $\mu\text{S}/\text{cm}$, et un pH neutre à tendance alcaline. Les principaux éléments minéraux présentaient des concentrations élevées en cations (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+) et en anions (Cl^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , NO_3^-), révélant un taux de salinité important dans les eaux souterraines de la région. Le faciès chimique prédominant était le faciès chloruré sodique.

L'indice de sodicité (SAR) a été utilisé pour évaluer la qualité de l'eau pour l'irrigation des plantes. Les valeurs de SAR indiquent que les eaux souterraines échantillonnées sont de très bonne qualité et peuvent être utilisées pour l'irrigation de plantes sensibles sans risque d'alcalinisation des sols. Cependant, la méthode de Richards a révélé que la plupart des eaux souterraines de la région appartenaient à la classe Eaux faible (C3S1) ce qui indique une qualité faible chargées en sels. pour l'irrigation des cultures tolérantes au sel sur des sols bien drainés et à haute perméabilité. et C4S2, ce qui indique une qualité médiocre et une forte charge en sels. Ces eaux conviennent à l'irrigation des plantes tolérantes au sel sur des sols bien drainés et lessivés et

L'indice de qualité de l'eau (IQE) a permis de classer les échantillons en termes de qualité globale. La majorité des forages ont montré une excellente qualité d'eau, tandis qu'une faible proportion a montré une mauvaise qualité. Des variations spatiales ont été observées, avec des forages spécifiques présentant une excellente ou une très mauvaise qualité d'eau.

Les analyses statistiques, notamment le test ANOVA et le test de Tukey, ont été utilisées pour étudier l'évolution spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines dans la région. Les résultats ont montré des différences significatives dans les concentrations de nitrate entre les différentes années étudiées, tandis que les autres paramètres n'ont pas montré de différences

significatives. Cependant, les différences observées pour les nitrates peuvent être attribuées à la variabilité aléatoire plutôt qu'à des différences véritablement significatives.

Cette étude fournit des informations précieuses sur la qualité des eaux souterraines dans la région d'Ouargla. Ces résultats sont essentiels pour la gestion et l'utilisation durable des ressources en eau, en particulier dans les domaines de l'agriculture, de l'industrie et de l'eau potable.

REFERANCES
BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Abbasi, T., et Abbasi, S. A. ., 2012. Water quality indices. 1st ed., Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, p 384, Paperback ISBN: 9780444638366
- [2] Abboudi , A., Tabyaoui ,H., El Hamich, F.,2014. Étude de la qualité physico-chimique et contamination métallique des eaux de surface du bassin versant de guigou, Maroc. European scientific journal. Volume 10, Numéro 23,p3.
- [3] Akter , T., Jhohura ,F.T., Akter , F. et al., 2016. Water Quality Index for measuring drinking water quality in rural Bangladesh: a cross-sectional study. J Health Popul Nutr. Volume 35,p 4.
- [4] Aldahaan, S., Al-Ansari, N ., Knutsson, S.,2016. Influence of Groundwater Hypothetical Salts on Electrical Conductivity Total Dissolved Solids. Engineering, P 08.
- [5] Bel, F ., Dermagne, F., 1966. Etude géologique du Continental terminal. Dossier de la Direction de l'énergie et des Carburants (Ministère de l'Industrie et de l'Energie). Alger,p 22.
- [6] Belghiti , M.L., Chahlaoui ,A., Bengoumi, D., Elmouqtain ,R.,2013.Etude de la quantité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe plio-Quaternaire dans la région de Meknès (Maroc). Larrhyss jornal, n° 14 , p 21-36.
- [7] Belkabar,A.,2010. L'hydrochimie et qualité des eaux de surfaces et souterraines du Haouz (Maroc),p19.
- [8] Belkendil , A .,2021 .les ressources hydriques dans les zones arides , caractérisation ,dynamique et durabilité(cas du sud-ouest Algérien).Université Abou bekr Belkaid Tlemcen, p74.
- [9] Belksier , M.S., Chaab , S ., Abour , F .,2016.Qualité hydro chimique des eaux de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de sa vulnérabilité à la pollution .Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie ,p 53.
- [10] Belksier , M.S., Chaab , S., Abour , F., Zeddouri ,A., Bouselsal ,B., Kechiched, R., 2014. l'irrigation et le risque de pollution saline. Exemple des eaux de la nappe libre dans la région de Touggourt, International Journal for Environment & Global Climate Change, Volume 2, p9-21.
- [11] Belloueur, A .,2008 . étude hydrogéologique des eaux souterraines de la région de Ouargla soumise à la remontée des eaux de la nappe phréatique et perspectives de solutions palliatives (Sahara Nord Et Septentrional è- Algérie).Thèse.Université El- Hadj Lakhder Batna,p2.
- [12] Ben aakame , A .,2015. Caractéristiques hydrochimiques, toxicologiques et évaluation des risques sanitaires des eaux souterraines de la région de Sidi Kacem (Maroc).Thèse de doctorat. Univ Mohammed V, p223.

- [13] Ben abderrahmane, H., Baba Amer, Z., 2021. Water wells quality assessment using water quality index for the purposes of drinking of M'Zab wadi region. Journal of fundamental and applied sciences. Volume 13, Numéro 1, p19.
- [14] Ben abderrahmane, H., 2022. étude de la variation spatio-temporelle des paramètres de qualité des eaux de la nappe phréatique de la région d'oued m'zab. élimination des phosphates par les graines d'olive activé. Thèse. Université de Ghardaia, p2.
- [15] Benchikh, A., Mansouri, A., 2019. caractéristiques et évolution de la piézométrie de la nappe du Complexe Terminal de la cuvette de Ouargla. Mémoire de master académique. Université Kasdi Merbah-Ouargla. P1- 3.
- [16] Berregui, A., 2013. Les ressources en eaux et leurs conséquences sur l'environnement oasien: cas région de Ouargla. université kasdi merbah - Ouargla. Mémoire de fin d'étude.
- [17] Bonnard et Gardel., 2003. La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Estimation du rôle des palmeraies à la montée de la nappe dans la cuvette de Ouargla. Mission IV Autres investigations Volet agropédologie, p 26.
- [18] Bouchahm, N. et Achour, S., 2005. qualité des eaux souterraines des aquifères de la région orientale du Sahara septentrional Algérien. Université de biskra, Algérie. article scientifique, p20.
- [19] Bouderka, N., Souid, A. K., Lakhili, F., Lahrach, A., Benabdelhadi, M., 2016. Evaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines de la nappe du Gharb. V12 n°11, p509.
- [20] Boudoukha, A., Mouni, I.L., Belkhiri, I.L., 2012.. Geochemical evolution of groundwater in an alluvial aquifer: Case of El Eulma. aquifer, East Algeria. Journal of African Earth Sciences, p 66-67 - 46-55.
- [21] Bouteraa, O., Mebarki, A., Nouaceur, Z., Laignel, B., 2018. Hydrogéochimie, et variation spatio-temporelles de la qualité des eaux souterraines dans le bassin versant de boumerzoug -Nord Est Algérie, p32.
- [22] Brière, D., 2000. Distribution et collecte des eaux. Edition 2, Ecole polytechnique de Montorial, center. Germany-Berlin, p 3-19.
- [23] Brl-bneder., 1999. Etude du plan directeur générale de développement des régions sahariennes. Lot 1. Etude de base. Phase II A3. Monographies spécialisées des ressources naturelles. Ressources en eau, Vol. 3. Modélisation du Complexe Terminal, p 63.
- [24] Castany, G., 1982. Hydrogéologie, Principes et méthodes. Ed Dunod, p 238.

- [25] Chaouki, M ., Chaouch , N ., Brais, A ., Boukhris ,I ., 2016.Cartographie de degré de la pollution chimique des eaux du Complexe Terminal (CT) de la région de Ouargla (Algérie).Université Kasdi Merbah Ouargla. Article scientifique.p 15.
- [26] Chevalking , B., 2007 . Groundwater Management Paperback .article ,p31.
- [27] Chkir, N., 2014. Vulnérabilité des ressources en eaux des aquifères côtiers en zones semi-arides – Etude comparative entre les bassins d’Essaouira (Maroc) et de la Jeffara (Tunisie).University of Sfax.article scientifique ,p108.
- [28] Cornet, A., 1961. Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger,p 108.
- [29] Cornet, A., 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géog. Phys. Et Géol.Dyn., vol. VI, fasc. 1, p 5-72.
- [30] Couture , I ., 2006 . Principaux critères pour évaluer la qualité de l’eau en micro -irrigation. Conseillère en production maraîchère Ministère de l’Agriculture, des Pêcheries et de l’Alimentation Direction régionale de la Montérégie, secteur est Saint-Hyacinthe (Québec). p2-3 -5.
- [31] Daddi Bouhoun ,M., 1997. Contribution à l’étude de l’évolution de la salinité des sols et des eaux d’une région saharienne : cas du M’Zab. Thèse Magister, El-Harrach, I.N.A, p180.
- [32] Dos Santos, S., Adams, E. A., Neville, G., Wada, Y., de Sherbinin, A., Mullin Bernhardt, E., ., Adamo, S. B., 2017. Urban growth and water access in sub-Saharan Africa: Progress, challenges, and emerging research directions. Science of the Total Environment ,p607–608, 497–508.
- [33] Egbueri, J. C.,2020. Groundwater quality assessment using pollution index of groundwater (PIG), ecological risk index (ERI) and hierarchical cluster analysis (HCA): A case study. Groundwater for Sustainable Development ,p10.
- [34] Flindt Jørgensen Karen, G., Villholth ., Refsgaard,J.C .,2016 . Groundwater management and protection in Denmark: a review of pre-conditions, advances and challenges. article ,p861.
- [35] Fondation nationale de la santé., 2013.. Manuel pratique d'analyse de l'eau. 4 éd. Brésil: Funasa.
- [36] Fouché , O., 2016 . Aquifères, nappes et essais d'eau.article scientifique ,p724.
- [37] Furry. V ., 1997 . Les eaux souterraines en Picardie. Mém.DESS Environnement. Univ. Picardie,p22.
- [38] Gastmans ,C .,Goethals ,S ,D ., Casterle ,B.,2010. Nurses’ ethical reasoning and behaviour : à literature review. International Journal of Nursing Studies ,p47-635-650.

- [39] Ghazali, D., Zaid, A., 2013. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source de Ain Salama-Jerri (région de Meknès-Maroc). *Larrhyss journal*, p.25-36.
- [40] Guendouz, A., Moulla, A., Edmunds, W., Zouari, K., Shands, P., Mamou, A., 2003. Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the complex terminal aquifer in Algerian Sahara. *Hydrogeology Journal* 11, p 483-495.
- [41] Gueroui, Y., 2015. Caractérisation hydrochimique et Bactériologique des eaux souterraines de l'aquifère superficiel de la plaine de Tamlouka (nord-est Algérien). Thèse. Université 8 Mai 1945-Guelma, p1.
- [42] Gummadi, S., Thota, D., Varri, S.V., Vaddi, P., Rao, V., 2014. *International Current Pharmaceutical Journal* 1 (10). *Chemical Science Transactions* 3 (2), p 602-607.
- [43] Hamdi-Aïssa, B., 2001. Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse Doct., Inst. National Agronomique, Paris-Grignon, p 283.
- [44] Hammani, A., Debbarh, A., Kuper, M., 2011. Les ressources en eaux souterraines et leurs impacts sur la dynamisation de l'agriculture dans un périmètre de grande hydraulique irrigué par les eaux de surface (cas du périmètre irrigué de Tadla au Maroc), p8.
- [45] Hceflcd, G., 2006. Haut Commissariat Aux Eaux et Forêt et la Lutte Contre la Désertification. Etude sur la pisciculture au barrage Almassira ; CR dar CHAFAAI ; Cercle d'ELBROUGE ; Province de Settat, p201.
- [46] Horton, R.K., 1965. An index number system for rating water quality. *Journal of Water Pollution Control Federation*, p37.
- [47] Hossain, M. et Patra, P. K., 2020. Water pollution index – A new integrated approach to rank water quality. *Ecological Indicators*, p 117.
- [48] House, M. A., 1990. Water quality indices as indicators of ecosystem change. *Environmental Modeling & Assessment*, p 255–263.
- [49] House, M. A., Ellis, J. B., 1987. The development of water quality indices for operational management, *Water Science and Technology*, p 145-154.
- [50] Idder, T., 2007. Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation d'amélioration, p162.
- [51] Idder, M.A., 2020. approche géochimique à la production de la salure des sols nus en conditions arides. université kasdi merbah -Ouargla. thèse, p4.
- [52] ISO, 1994. Qualité de l'eau. Dosage du phosphore par méthode spectrométrique à l'aide du molybdate d'ammonium. NA 2364, ISO 6878/1. Ed. INAPI.

- [53] ISO 6058 ., 1989. qualité de l'eau dosage de la somme du calcium et magnésium méthode titrimétrique à, l'E D T A Na 752, ISO 6058 .Ed INAPI Edition et diffusion, Alger , p 5.
- [54] ISO 6777 .,1984. Qualité de l'eau .Dosage des nitrites . Méthode par spectrométrie d'absorption moléculaire.
- [55] ISO 9280 .,1990. Qualité de l'eau .Dosage des sulfates. Méthode spectrométrie au chlorure de baryum. Informations générales. État actuel Annulée.
- [56] ISO 9297 .,1989. Qualité de l'eau .Dosage des chlorures .Titration au nitrate d'argent avec du chromate comme indicateur (Méthode de Mohr).
- [57] ISO 9963-1.,1994. Qualité de l'eau .Détermination de l'alcalinité. Partie 1: Détermination de l'alcalinité totale et composite.
- [58] ISO 9964-3., 1993. Qualité de l'eau . Dosage du sodium et du potassium. Partie 3: Dosage du sodium et du potassium par spectrométrie d'émission de flamme.
- [59] ISO 6332 .,1988 . (fr) Qualité de l'eau,Dosage du fer ,Méthode spectrométrique à la phénanthroline-1,10 Water quality , Determination of iron ,Spectrometric method using 1,10-phenanthroline.
- [60] ISO7150-1 .,1984. Qualité de l'eau.Dosage de l'ammonium. Partie 1: Méthode spectrométrique manuelle. Le dernier examen de cette norme date de 2023. 61,00 CHF · ammonium.
- [61] Jain, N., Bhatia, A., Kaushik, R., Kumar, S., Joshi, H. C., Pathak, H., 2005. Impact of post methanation distillery effluent irrigation on groundwater quality. Environmental monitoring and assessment,p 110, 243- 255.
- [62] Kahoul, M ., Bassou ,L Koull, N .,2005 .Contrôle physico-chimique et bactériologique des eaux de consommation de la région de ouargla (ALGERIE) .Université de Annaba. Faculté des sciences. Université de Ouargla. Département d'agronomie. Article scientifique ,p67.
- [63] Kawo, N. S. et Karuppanan, S.,2018. Groundwater quality assessment using water quality index and GIS technique in Modjo River Basin, central Ethiopia. Journal of African Earth Sciences, p147- 300-311.
- [64] Khashogji , MS., El Maghraby, MMS.,2013 . Evaluation of groundwaterresources for drinking and agricultural purposes, Abar Al Mashi area, south Al Madinah Al Munawarah City, Saudi Arabia. Arab J Geosci ,p39.
- [65] Khemgani, A., 2020.Effets de la nappe alluviale de l'Oued Zegrir sur la qualité Des eaux et la salinisation des sols de l'oasis de Guerrara.Doctorat, universitékasdimerbah Ouargla.p7.
- [66] Kolahchi , Z.,et Jalali, M., 2007. Effect of water quality on the leaching of potassium from sandy soil. Journal of Arid Environments. P 68- 624.

- [67] Kouadri ,S .,2022.Etude hydro-chimique et modélisation de la qualité des eaux souterraines (cas de la Wilaya d'ILLIZI). Thèse. Université Kasdi Merbah-Ouargla ,p 23.
- [68] Kouzmine , Y., 2012.Le Sahara algérien. Intégration nationale et développement régional, L'Harmattan, Paris,.,MCDOUGALL James and SCHEELE Judith (Ed.), Saharan Frontiers. Space and Mobility in Northwest Africa, Indiana University Press, Bloomington, p 291 - 341.
- [69] Lelièvre, R.F., 1969. Assainissement de la cuvette de Ouargla. Ministère des Travaux Publique et de la construction, rapports Géohydraulique n° 2, p18 , n° 3, p 84.
- [70] Li, P., He, S., Yang, N., Xiang, G.,2018. Groundwater quality assessment for domestic and agricultural purposes in Yan'an City, northwest China: implications to sustainable groundwater quality management on the Loess Plateau. Environmental Earth Sciences, p77-1-16.
- [71] Llamas , M.R. et Martínez-Santos, P., 2005, Intensive Groundwater Use: Silent Revolution and Potential Source of Social Conflicts. American Society of Civil Engineers Journal of Water Resources Planning and Management, p131-337-341.
- [72] Lticescu , C., Georgescu, LP., Murariu, G., Topa, C., Timofti, M., Pintilie, V., Arseni , M., 2019.Qualité de l'eau du Bas-Danube quantifiée par l'IQE et l'analyse multivariée , p10.
- [73] Lucia, F., Mohamed, K., Kamel, Z., Ahmed, M. ., Gian M., 2001. Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie), Comptes Rendus Académie des Sciences Paris, Sciences de la Terre et des planètes, 332, p 665–671.
- [74] Margat.J ., 1990 . Les eaux souterraines dans le monde.article scientifique.p10.
- [75] Mebarkia , M ., 2011.Étude des caractéristiques physico-chimique des eux de la surface, cas de barrage d'Ain Zada wilaya de bordj Bou-aredj. (Nord-Est Algérien). Mémoire Ing., Univ.Baji Mokhtar-Annaba,p 109.
- [76] Mukatea,S., Wagha,V., Panaskara,D., Jacobs b,J.A ., Sawant,A ., 2019.Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water .articles.volume 101, p 348-354.
- [77] Ncibi, K., Gaaloul,N., et al., 2016. Contribution de l'analyse multivariée et des SIG pour la caractérisation hydrochimique de la nappe phréatique de la plaine de Sidi Bouzid (Tunisie centrale). International Journal of Innovation and Applied Studies 15(3),p 667.
- [78] Nechad,I.,FadiL,k.,Fadil,F.2014 . Physico-chemical quality of ainregra ganda in sidi bou ali Springs in the Séfrou (MOYENATLAS,MAROC).Larhyss Journal,p2.

- [79] Nesson, C., 1978. L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In: Recherche sur l'Algérie. Ed. CNRS, Paris, p 7-100.
- [80] Normes remplacées (1). NF T90-029. juin ., 1970. Norme Annulée. Essais des eaux - Détermination des résidus secs, du résidu calciné et du résidu sulfaté.
- [81] Nouayti, N., Khattach ,D., Hilal, M .,2015.Évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc). Journal of materials and environmental science. Volume 6, Numéro 4, p 6-33.
- [82] ONM , 2020. Bulletin climatologique de la station d'Ouargla. Service archives. Ouargla,Algérie.
- [83] OSS ., 2003. Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie ,p 275.Volume 4: Modèle Mathématique. Annexes. Tunis, Tunisie ,p 229.
- [84] Ozenda, P., 1991. Flore du Sahara, 3ème Edition. CNRS, Paris , p 662.
- [85] Palos1, M ., Del castillo busto1, M,E ., Hattchouel,J.M ., Pannier,F ., Fisticaro ,P ., Vaslin-reimann , S ., 2015. Développement d'une méthode primaire pour la détermination du fer total dans du sérum. Revue française de métrologie no 40, Volume ,4 ,p42.
- [86] Peter, H. G., Meena ,P., 2010. Peak water limits to freshwater withdrawal and use. Proceedings of the national academy of science.Volume 107, p 25.
- [87] Petit, V.,1996. avec la collaboration pour les synthèses régionales: Caous JY. (Nord-Pas-de-Calais), Czernichowski I. (Picardie), de La Quèrièrè P. (Haute- Normandie), Mäzene B. (Basse-Normandie), Talbo H. (Bretagne), Ehiermael G. (Poitou-Charentes), Sourisseau B. (Aquitaine), littoraux en France métropolitaine. Rapport BRGM R 39298,p120-36 .
- [88] Proeres , O., 2000.Les ressources en eaux souterraines du département de l'Aisne. Mém. DUESS "Eau et Environnement", D.E.P. univ. Picardie. Amiens.Atlas hydrogéologique du département de l'Oise. B.R.G.M,p7-8.
- [89] Rashid, M ., Price , N.T., Gracia Pinilla ,M. Á., O'Shea, K. E., 2017.Effective removal of phosphate from aqueous solution using humic acid coated magnetite nanoparticles.Water Research.Volume 123.p23.
- [90] Rodier ,J., Legube ,B., Meret,N.G., 2009.L'analyse de l'eau, eau naturelles, eaux résiduaires, eau de mère. 9 ème édition Dunod, paris, France ,p30.
- [91] Rodier ., 2005. Analyse de l'eau, 8ème édition.Dunod, Paris,p115.
- [92] Rodier .J., Bazin ,C., Broutin, J.P., Chambon, P., CHAMPSAUR, H.,1996. L'analyse de l'eau : eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer ; 8e édition. Paris: DUNOD , p138.
- [93] Rodier ,J .,Rejsek, F., 2002 : Analyse des eaux. Aspects réglementaire et techniques. Série science et techniques de l'environnement. Edition Scérén, Paris,p 358.

- [94] Rodier, J., 1984. L'analyse de l'eau : Eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer. Edition Dunod Paris, p22.
- [95] Rodier, NF T90-033, Norme NA 746. II-4-5. Détermination de M E S : Si la turbidité supérieure à 5 NTU, dans ce cas on fait passer 100 ml d'eau sur un.
- [96] Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., et coll., 2009. L'analyse de l'eau contrôle et interprétation. 10^{ème} Edition DUONOP, Paris.
- [97] Romuald Brice, B. K., 2014. Élimination des ions ammonium de solutions aqueuses par la silice mésoporeuse (SBA-15) fonctionnalisée avec des groupements organiques acides. Thèse doctorat. Université Laval Québec Canada.
- [98] Roux, J.C., Margat, J., Pointet, T., Lachassagne, P., Wyns, R., Blavou, B., Livet, M., Bakalowicz, M., Collin, J.J., 2006. Aquifères et eaux souterraines. article scientifique, p22-23-40-51.
- [99] Schoeller, R., 1962. Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources. Masson, Paris, p 642.
- [100] Sharif, A.S. M., Bakar, M. A., Bhuyan, M.S., 2017. Assessment of Water Quality of the Lower Meghna River Estuary Using Multivariate Analyses and RPI. Intern. J Chem. Pharm. Technol. 2, p 57-73.
- [101] Sharma, P., Prabodha, K. M., Ajay, K., Yogendra, P.G., Kaushala, P.M., 2014. Changes in water quality index of Ganges river at different locations in Allahabad, p 67-76.
- [102] Slimani, R., 2016. Étude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnement d'un aquifère au climat aride méditerranéen : cas de la cuvette de Ouargla, Algérie. Thèse. Université kasdi merbah-Ouargla, p8-26-27.
- [103] Tabouche, N., Achour, S., 2004. Étude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional Algérien. p99.
- [104] Thierrin, J., 2006. Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse doctorat. Université de Neuchâtel, p22.
- [105] Todd, K., 1980. Groundwater hydrology. 2eme Edition, John Wiley & Sons, New York, p 510.
- [106] Toutain, G., 1979. Eléments d'agronomie saharienne, de la recherche au développement. Ed. INRA, Paris, p 276.
- [107] Tuinhof, A., Foster, S., Steenbergen, F van., Talbi, A., Wishart, M., 2011. Appropriate groundwater management for Sub-Saharan Africa—in face of demographic pressure and climatic variability, p 84.
- [108] Tyagi, S., Sharma, B., Singh, P., Dobhal, R., 2013. Water quality assessment in terms of water quality index. American Journal of Water Resources, 1(3), p 34-38.

- [109] UAE union française des professionnels du traitement de l'eau.,2013.Différences entre pH, TH et TAC.association professionnelle inscrite au repertoire sous le numero 17857 siege et bureaux 1. boulevard Malesherbes, 75008 Paris ,p13. www.cae.fr.
- [110] Uddin, M. G., Nash, S., Olbert, A. I., 2021 . A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. Ecological Indicators, p122.
- [111] UNESCO ., 1972 . Projet ERESS; Étude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, et rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris .
- [112] Vrba. J. et Van Jac der gun .,2004. The world's groundwater resources.Utrecht,p12.
- [113] Yalçinkaya, E .et Güler, C., 2006. The Effects of Electrolyte Concentration, IonSpecies and pH on the Zeta Potential and Electrokinetic Charge Density of Montmorillonite. Clay Minerals - CLAY MINER, p 41.
- [114] Zereg, S., 2019 . Impacts de l'irrigation sur la qualité des eaux souterraines des régions semi-arides. Cas de la région de Tébessa . Thèse. Université Batna2- Mostefa Ben Boulaid ,p27.
- [115] Ziani, D., 2017 .Quantification de la pollution Anthropique des eaux souterraines de Ain Djasser. Est Algérien. Thèse de doctorat. Université Ben Boulaid .p1.
- [116] Zotou, I., Tsihrintzis, VA, Gikas, GD .,2019. Performance de sept indices de qualité de l'eau (IQE) dans un fleuve méditerranéen Surveillance et évaluation environnementales,p 19-50.

Site web :

- [1] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.climatsetvoyages.com%2Fclimat%2Falgerie%2Fouargla&psig=AOvVaw1g8gLxCt1_1RD3OikXC8C9&ust=1686656932771000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCJjswYvbrP8CFQAAAAAdAAAAABAE
- [2] https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fgifex.com%2Ffr%2Ffichier%2Fquelles-sont-les-communes-de-la-wilaya-douargla%2F&psig=AOvVaw1g8gLxCt1_1RD3OikXC8C9&ust=1686656932771000&source=images&cd=vfe&ved=0CBEQjRxqFwoTCJjswYvbrP8CFQAAAAAdAAAAABAN

Annexes

ANNAX I

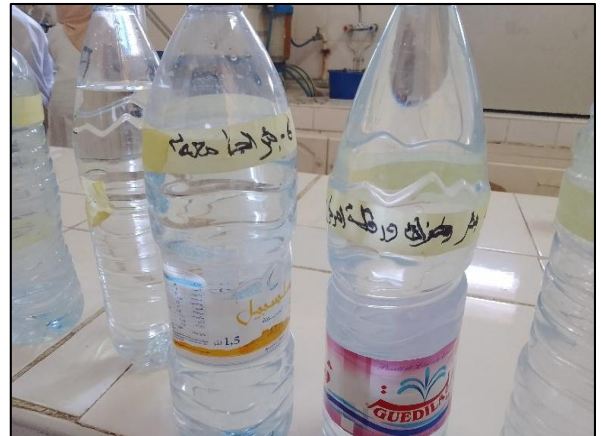


Photo 1 : échantillons d'eaux souterraines



Photo 2 : Mesure in situ



Photo 3:Multi paramatre (Marque Multi 3620IDS).



Photo 4: Photometrie de flamme



Photo 5 : Turbidimètre



Photo 6 : Spectrophotomètre

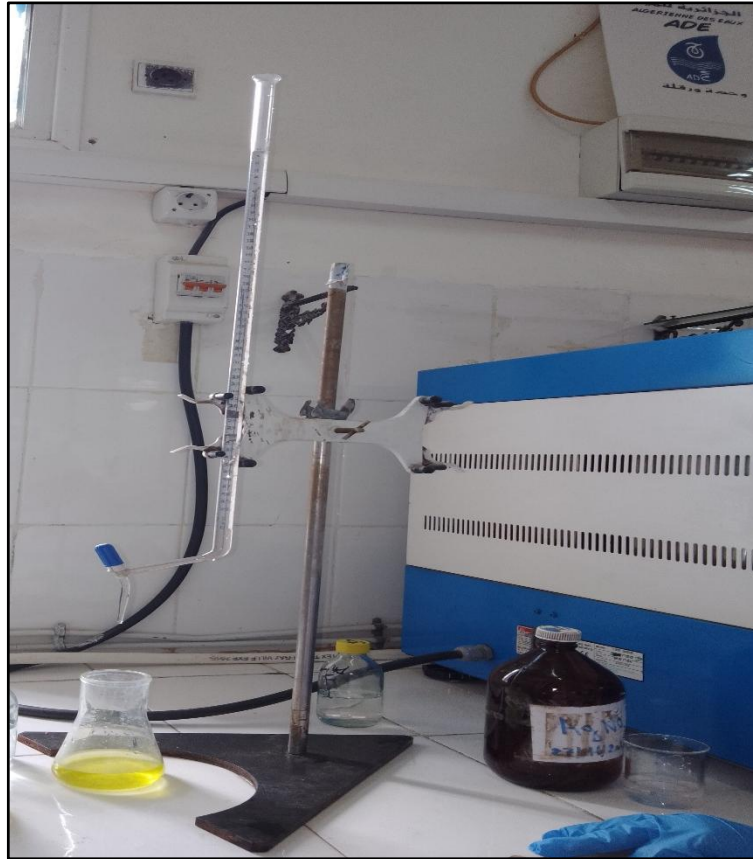


Photo 7 : Titrimétrie

ANNAX II

Tableau 1 : Les résultats d'analyse physico-chimique en [meq/L] des eaux souterraines

N °	Ca ⁺² [meq/L]	Mg ⁺² [meq/L]	Na ⁺ [meq/L]	K ⁺ [meq/L]	Fe ⁺² [meq/L]	NH ₄ ⁺ [meq/L]	HCO ₃ ⁻ [meq/L]	Cl ⁻ [meq/L]	SO ₄ ²⁻ [meq/L]	PO ₄ ²⁻ [meq/L]	NO ₃ ⁻ [meq/L]	NO ₂ [meq/L]
F1	15	11,399	19,791	0,81845	0	0,00083	2,0794	28,815	15,407	0	0,28062	0,00022
F2	7	6,9994	8,6995	0,35807	0	0,00022	2,3193	12,818	6,8292	0	0,26562	0
F3	11,4	8,5999	15,355	0,66499	0	0,00122	2,7192	22,15	11,243	0	0,26401	0,00039
F4	8,7999	6,7994	8,6995	0,4348	0	0,00039	1,6795	13,829	7,4122	0	0,26256	0
F5	8	8	11,092	0,48595	0	0,00371	2,5593	14,151	10,369	0	0,26401	0
F6	6,3997	5,5997	9,1345	0,38365	0	0,00039	2,2394	13,331	6,6835	0	0,25514	0
F7	8,997	10,999	15,877	0,66499	0	0,00405	2,8792	20,919	14,158	0	0,26772	0
F8	15	13	20,661	0,8696	0	0,00416	1,7595	29,943	17,698	0	0,31465	0
F9	7,7999	6,1995	10,874	0,47265	0	0,00499	1,9994	15,279	8,8072	0	0,2645	0
F10	10,8	12,2	17,399	0,71614	0	0,00538	2,3993	22,97	15,616	0,00016	0,23869	0
F11	10	7,7984	12,179	0,51153	0	0,001	1,5356	14,767	10,619	0	0,17095	0
F12	9,5998	9,9996	14,789	0,61384	0	0,00205	2,2394	24,303	10,41	0	0,24014	0
F13	12,198	9,7996	15,877	0,71614	0	0,00288	2,0794	21,227	14,158	0	0,19257	0
F14	7,3997	6,7994	10,657	0,46038	0	0,01231	2,1594	11,793	9,994	0	0,07483	0
F15	12,4	11,599	19,574	0,81845	0	0,00288	2,3193	23,688	16,49	0	0,29562	0
F16	10,6	11,399	16,747	0,63941	0	0,00039	2,2394	22,15	14,429	0	0,23821	0
F17	8	8	11,962	0,51153	0	0	2,0794	15,185	10,369	0	0,08548	0
F18	11,2	10,799	16,747	0,69057	0	0,00244	2,5593	22,047	14,533	0	0,39803	0
F19	11	10,599	15,485	0,66499	0	0,00383	1,7595	20,201	14,158	0	0,44593	0
F20	7	6,9994	9,5695	0,4348	0	0,00272	1,2062	13,638	8,7448	0	0,46641	0
F21	11,4	11,8	13,919	0,58826	0	0,00044	1,9834	22,56	13,45	0	0,2853	0
F22	10	9,9996	15,92	0,63941	0	0,01164	2,0794	19,791	13,325	0	0,27659	0
F23	8	8	12,397	0,51153	0	0,00449	1,9994	16,612	10,41	0	0,08709	0

Tableau 2 :Les résultats d'analyse physico-chimique en [mg/L] des eaux souterraines

N° des forages	Designation	Lieu dit	Longitude	Latitude	Température	CE	pH	Turbidité
F1	Ifri n°03	Ouargla	5,343775	31,959669	23	4710	7,39	0,414
F2	Gharbouz n° 01	Ouargla	5,318734	31,960247	24,1	2350	7,66	0,41
F3	Bahmid	Ouargla	5,318734	31,960247	23,2	3730	7,4	0,482
F4	Ain hadji	Ouargla	5,318734	31,960247	23,6	2430	7,45	0,014
F5	Said otba n°02	Ouargla	5,345265	31,977634	25,5	2720	7,49	0,371
F6	Said otba n°01	Ouargla	5,32945	31,977032	25,2	2250	7,52	0,366
F7	Ain errahma	Ouargla	5,318734	31,960247	23,9	3790	7,44	0,399
F8	Matmoara	Ouargla	5,318734	31,960247	23,6	4960	7,21	0,367
F9	Center ado	Mkhadema	5,324292	31,955268	23,3	2640	7,35	0,332
F10	L universite	Mkhadema	5,313133	31,943527	23,7	4060	7,37	0,41
F11	Elkoum	Ngoussa	5,324945	32,256323	25	2860	7,51	0,211
F12	Chikh ben djloull	Rouissat	5,32313	31,932817	25	3460	7,63	0,676
F13	Hassi ben abbdellah	Hassi ben abdellaah	5,472052	32,029518	25	4000	7,55	1,25
F14	El h'eb n° 02	Rouissat	5,371541	31,922521	43,6	2500	7,47	0,474
F15	Messaadia(el-bour)	N'goussa	5,310075	32,131053	25	4520	7,83	0,401
F16	L abatoire	Ouargla	719113,31	3535784,6	23	3910	7,33	0,361
F17	Hassi miloud n° 02	OGX	717843	3547683	25	2890	7,76	0,59
F18	Mekhadma n° 01	OGX	718640,41	3536413,9	25	3920	7,61	0,378
F19	Elkhafdjji 04	OGX	713451,78	3537639,1	24	3790	7,49	0,324
F20	Bamendil n° 01	OGX	715841,47	3540942,5	23	2460	7,68	0,808
F21	K'ser chott	Ain baida	725035,39	35886272	25	3240	7,48	0,425
F22	Oum r'aneb	Sidi khouiled	688972,64	3542183,5	25	3600	7,48	1,1
F23	Bour el haicha	OGX	5°20'1"	32°1'37"	23,2	2760	7,66	3,21

N° des forages	Designation	NH ₄ ⁻	NO ₂	PO ₄ ⁻²	Cl ⁻	Ca ⁺²	SO ₄ ⁻²	TH	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	Fe ⁺²	Na ⁺	Mg ⁺²	TAC	K ⁺
F1	Ifri n°03	0,015	0,01	0	1021,58	300,6	740	1320	126,88	17,4	0	455	138,53	104	32
F2	Gharbouz n° 01	0,004	0	0	454,44	140,28	328	700	141,52	16,47	0	200	85,06	116	14
F3	Bahmid	0,022	0,018	0	785,27	228,45	540	1000	165,92	16,37	0	353	104,51	136	26
F4	Ain hadji	0,007	0	0	490,27	176,35	356	780	102,48	16,28	0	200	82,63	84	17
F5	Said otba n°02	0,067	0	0	501,7	160,32	498	800	156,16	16,37	0	255	97,22	128	19
F6	Said otba n°01	0,007	0	0	472,62	128,25	321	600	136,64	15,82	0	210	68,05	112	15
F7	Ain errahma	0,073	0	0	741,65	180,3	680	1000	175,68	16,6	0	365	133,67	144	26
F8	Matmoara	0,075	0	0	1061,57	300,6	850	1400	107,36	19,51	0	475	157,98	88	34
F9	Center ado	0,09	0	0	541,69	156,31	423	700	122	16,4	0	250	75,34	100	18,48
F10	L universite	0,097	0	0,005	814,36	216,43	750	1150	146,4	14,8	0	400	148,26	120	28
F11	Elkoum	0,018	0	0	523,52	200,4	510	890	93,7	10,6	0	280	94,77	76,8	20
F12	Chikh ben djloull	0,037	0	0	861,62	192,38	500	980	136,64	14,89	0	340	121,52	112	24
F13	Hassi ben abbdellah	0,052	0	0	752,55	244,44	680	1050	126,88	11,94	0	365	119,09	104	28
F14	El h'eb n° 02	0,222	0	0	418,08	148,29	480	710	131,76	4,64	0	245	82,63	108	18
F15	Messaadia(el-bour)	0,052	0	0	839,81	248,49	792	1200	141,52	18,33	0	450	140,96	116	32
F16	L abatoire	0,007	0	0	785,27	212,42	693	1100	136,64	14,77	0	385	138,53	112	25
F17	Hassi miloud n° 02	0	0	0	538,34	160,32	498	800	126,88	5,3	0	275	97,22	104	20
F18	Mekhadma n° 01	0,044	0	0	781,64	224,44	698	1100	156,16	24,68	0,59	385	131,24	128	27
F19	Elkhafdji 04	0,069	0	0	716,2	220,44	680	1008	107,36	27,65	0,48	356	128,81	88	26
F20	Bamendil n° 01	0,049	0	0	483,52	140,28	420	700	73,6	28,92	0,04	220	85,06	60	17
F21	K'ser chott	0,008	0	0	799,81	228,46	646	1160	121,02	17,69	0	320	143,4	99,2	23
F22	Oum r'aneb	0,21	0	0	701,65	200,4	640	1000	126,88	17,15	0	366	121,52	104	25
F23	Bour el haicha	0,081	0	0	588,95	160,32	500	800	122	5,4	0	285	97,22	100	20

Tableau 3: Normes de l'O.M.S. pour l'eau potable et les normes des eaux d'irrigation.

Paramètre	Unités	Valeur maximales admissibles	
		Normes l'O.M.S. pour l'eau potable	Normes pour l'eau d'irrigation
Paramètre physique			
T	°C	25	35
CE	µs/cm	1500	3000
Ph	-	8.5	6-8.5
Turbidité	NTU	5	
TDS	mg/l	500	2000
Paramètre chimique			
Dureté totale (TH)	Degré français °F	300	30-40
Calcium (Ca^{+2})	mg/l	100	400
Magnésium (Mg^{+2})	mg/l	50	60.75
Sodium (Na^{+})	mg/l	200-400	920
Potassium (K^{+})	mg/l	20	2
Alcalinité ($CaCO_3$)	mg/l	200	-
Chlorures (Cl^{-})	mg/l	250	1065
Sulfates (SO_4^{-2})	mg/l	250	400
Fer (Fe)	Mg/l	0.3	-
Bicarbonate (HCO_3^{-})	mg/l	200	610
Nitrite (NO_2)	mg/l	1	0.5
Nitrate (NO_3^{-})	mg/l	50	10
Ammonium (NH_4^{-})	mg/l	0.5	-
Phosphore (PO_4^{-2})	mg/l	5	2

ANNAX III

Tableau 1 :Les résultats de l'indice de qualité de l'eaux

N° Forage	Designation	IQE	Classe	Usage possible
F1	Ifri n°03	6.530282308	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F2	Gharbouz n° 01	4.187383588	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F3	Bahmid	6.212566615	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F4	Ain hadji	4.019140363	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F5	Said otba n°02	8.050145937	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F6	Said otba n°01	3.404196065	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F7	Ain errahma	9.842190134	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F8	Matmoara	10.64533193	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F9	Center ado	9.758718034	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F10	L universite	11.69678821	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F11	Elkoum	5.347956478	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F12	Chikh ben djloull	7.652651222	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F13	Hassi ben abbdellah	9.235623435	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F14	El h'eb n° 02	19.43434363	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F15	Messaadia(el-bour)	9.546386301	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F16	L abatoire	5.233851565	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F17	Hassi miloud n° 02	4.626321781	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F18	Mekhadma n° 01	119.4749894	Ne convient pas à la consommation	Traitement approprié requis avant utilisation
F19	Elkhafdj 04	100.0984685	Ne convient pas à la consommation	Traitement approprié requis avant utilisation
F20	Bamendil n° 01	15.27139739	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F21	K'ser chott	5.534644038	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F22	Oum r'aneb	19.55722196	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie
F23	Bour el haicha	11.7273083	Excellente qualité de l'eau	Eau potable, irrigation et industrie

المخلص :

أجريت هذه الدراسة في إطار تقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية في منطقة ورقلة وتحليل تطورها المكاني والزمني.

اعتمدت الدراسة على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه من 23 بئراً موزعة في المنطقة. بعد تحديد السمات الجيوكيميائية ، تم استخدام مؤشر (SAR) ومؤشر الجودة (IQE) لتصنيف مياه هذه الآبار وفقاً لمعايير الاستخدامات المختلفة. تم إجراء ANOVA متبوعاً باختبار Tukey لمتابعة التطور الزمني لنوعية المياه الجوفية ، وأظهرت النتائج اختلافات معنوية في تركيزات النترات بين السنوات المدروسة ، بينما لم تظهر المعلمات الأخرى أي اختلافات معنوية. هذا يعني هذا الاختلاف العشوائي.

تظهر قيم مؤشرات الجودة أن مياه غالبية الآبار ذات جودة ممتازة بينما أظهرت نسبة صغيرة نوعية رديئة مقارنة بنتائج مؤشر جودة المياه (IQE) ، وجودة جيدة مقارنة بنتائج مؤشر SAR.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية ، مؤشرات الجودة ، التطور المكاني- الزمني ، ANOVA ، ورقلة.

Résumé :

Cette étude a été menée dans le cadre de l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans la région de Ouargla et d'analyser son évolution spatio-temporelle.

L'étude est basée sur les caractéristiques physicochimiques des eaux de 23 forages répartis dans la région. Après avoir précisé le faciès géochimique, l'indice (SAR) et l'indice de qualité (IQE) ont été utilisés pour classer les eaux de ces forages selon les normes pour les différents usages. L'ANOVA suivi par le test de Tukey a été réalisée pour suivre l'évolution temporelle de la qualité des eaux souterraines. Les résultats ont montré des différences significatives dans les concentrations de nitrate entre les années étudiées, tandis que les autres paramètres n'ont pas montré de différences significatives. C'est à dire cette variation est aléatoire.

Les valeurs des indices de qualité montrent que les eaux de la majorité des forages sont d'une qualité excellente tandis qu'une faible proportion a montré une mauvaise qualité par rapport aux résultats de l'indice de qualité de l'eau (IQE), et bon qualité par rapport aux résultats de l'indice de SAR.

Mots clé : eaux souterraines, indices de qualité, évolution spatio-temporelle, ANOVA, Ouargla.

Abstract:

This study was carried out to assess the physico-chemical quality of groundwater in the Ouargla region and to analyse its spatial and temporal evolution.

The study is based on the physico-chemical characteristics of water from 23 boreholes in the region. After specifying the geochemical facies, the water quality index (SAR) and the water quality index (WQI) were used to classify the water from these boreholes according to the standards for the different uses.

ANOVA followed by Tukey's test was performed to monitor temporal changes in groundwater quality. The results showed significant differences in nitrate concentrations between the years studied, while the other parameters showed no significant differences. In other words, this random variation.

The quality index values show that the water from the majority of boreholes is of excellent quality, while a small proportion showed poor quality in relation to the Water Quality Index (WQI) results, and good quality in relation to the SAR index results.

Keywords: groundwater, quality index, spatio-temporal evolution, ANOVA, Ouargla