

**UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA –  
FACULTE DES HYDROCARBURES DES ENERGIES  
RENOUVABLE ET SCIENCES DE LA TERRE ET DE  
L’UNIVERS**

**Département des Sciences de la Terre et de l’Univers**



**MEMOIRE DE FIN D’ETUDE**

**En vue de l’obtention du diplôme de Master en Géologie**

**Spécialité : Hydrogéologie**

**THEME :**

***Géochimie des eaux de la  
nappe superficielle de la  
région d’Ouargla.***

*Présenté par*

***GOUDJIL Nour el imene .***

Soutenu publiquement le 29/06/2024

**Devant le jury :**

Président :	Mr	KECHICHED Rabeh	professeur	Univ. Ouargla
Encadrant :	Mr	NEZLI .Imed Eddine	professeur	Univ. Ouargla
Examineur :	Mr	BELKSIR M . Saleh	professeur	Univ. Ouargla

**Année Universitaire : 2023/2024**

## Dédicaces

*Ce modeste mémoire, je le dédie avec une profonde reconnaissance  
à tous ceux qui me sont chers.*

*À mon père **Abdelkader**, pilier inébranlable de ma vie. Les mots ne  
suffisent pas pour exprimer ma gratitude envers tes innombrables  
sacrifices pour mon éducation. Tu as été mon guide et bien plus  
encore.*

*À ma mère **Hafida**, source intarissable d'amour et de tendresse.  
Ton amour inconditionnel a été ma plus grande force, et tu es le  
cœur battant de notre famille.*

*À ma sœur **Rawda** et mes frères **Riyad**, **Souhaib** et **Abdelbari**, mes  
confidents et mes soutiens indéfectibles. Vous êtes ma boussole et  
mon courage.*

*À ma chère fille **Razane**, rayon de soleil de ma vie. Tu es mon  
trésor et ma source d'inspiration quotidienne.*

*À ma grand-mère **Bahia**, pour ton soutien sans faille qui m'a porté  
tout au long de ce parcours. Ta présence bienveillante a illuminé  
mon chemin.*

*À mon grand-père **Abdesslam**, fondation solide de mes ambitions.  
Ma gratitude envers toi est infinie.*

*À toute ma grande famille, mes amis fidèles, et à tous ceux qui  
m'ont soutenu, ne serait-ce que par un mot d'encouragement.  
Votre présence dans ma vie est inestimable.*

## REMERCIEMENTS

*Un très grand Merci à Allah qui est toujours présent avec moi et d'avoir éclairé mon chemin, de m'avoir soutenu dans mes trébuchements et de m'avoir donné la force, le courage et la patience pour accomplir ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude envers monsieur le doyen de la faculté des hydrocarbures des énergies renouvelables et sciences de la terre et de l'univers le Professeur **DOBBI Abdelmadjid** pour son soutien inestimable tout au long de ces années, ainsi que pour son engagement à m'aider à mener à bien mon travail.*

*Je tiens à remercier le Professeur **NEZZI Imad Eddine** l'encadreur pour son encadrement*

*Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à l'équipe de l'ANRH et de L'ABHS*

*Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers mes chers collègues et tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de cette mémoire.*

## الملخص:

تتميز المياه الجوفية للطبقة المائية السطحية في منطقة ورقلة بدرجة ملوحة مرتفعة جداً، تتجاوز المعايير المسموح بها للاستخدامات المنزلية والزراعية. وقد تكون هذه الملوحة الشديدة ناتجة عن عوامل طبيعية أو مرتبطة بالأنشطة البشرية.

تهدف دراستنا إلى تحديد الخصائص الجيوكيميائية لمياه الطبقة السطحية، بغية فهم العوامل المسببة لاكتساب هذه الملوحة المرتفعة.

أظهرت نتائج تحليل البيانات أن الخصائص الجيوكيميائية لمياه الطبقة السطحية في ورقلة ترتبط بالخصائص الجيولوجية للمنطقة (الصخور والتكوينات الجيولوجية) والعوامل المناخية السائدة (هطول الأمطار، درجات الحرارة، التبخر).

الكلمات المفتاحية : جيوكيمياء، الطبقة السطحية، ورقلة، الملوحة.

## Résumé

Les eaux de la nappe superficielle de la région de Ouargla sont souvent caractérisées une salinité excessive au-dessus des normes de potabilité et d'irrigation.

Cette salinité des eaux est supposée liée à la conjugaison des phénomènes naturels et anthropiques.

Notre étude est basée sur l'évolution géochimique des eaux de la nappe, en vue de comprendre les processus et les mécanismes d'acquisition cette salinité.

L'interprétation des données a révélé que le chimique de ces eaux est, résultant d'une forte minéralisation influencée par la lithologie (faciès) de la nappe et les facteurs climatiques (faibles précipitations, températures élevées de l'air, et forte évaporation).

**Mots-Clés :** Géochimie, nappe superficielle ; Ouargla; la salinité .

## **ABSTRACT :**

The surface water of the Ouargla region is often characterized by excessive salinity above the standards of potability and irrigation.

This salinity of water is supposed to be linked to the conjugation of natural and anthropic phenomena.

Our study is based on the geochemical evolution of the waters of the aquifer, in order to understand the processes and mechanisms of this salinity acquisition.

The interpretation of the data revealed that the chemical of these waters is, resulting from a strong mineralization influenced by lithology (facies) of the layer and climatic factors.

**Keywords:** Geochemistry, superficial aquifer; Ouargla; salinity.

## Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude. ....	3
Figure 2 Coupe géomorphologique schématique de la cuvette de Ouargla Cornet1967.....	5
Figure 3 corrélation des moyennes mensuelles de insolation et l'évaporation (O.N.M., 2005) .....	7
Figure 4 corrélation des moyennes mensuelles d'humidité de la précipitation et l'évaporation (O.N.M., 2005) .....	8
Figure 5 Le réseau hydrographique de la vallée de Ouargla .....	10
Figure 6 Coupe géologique (NW-SE) à travers les différents ensembles géologiques de l'Algérie (Boote et al., 1998; Hadj-Kouider. 2019).....	13
Figure 7 Carte géologique de Ouargla (Cornet.1964) modifiée par( ZEDDOURI .A 2010 ; SATOUH.A et al 2021.) .....	14
Figure 8 Logs stratigraphiques des forages à travers la cuvette de Ouargla ANRH, 2004 ). .....	15
Figure 9 :Coupe géologique de la cuvette de Ouargla établie selon les logs stratigraphiques (HOUARI, 2012) .....	17
Figure 10 :Carte des ressources en eau souterraines (CI et CT), extrait de recueil des communications, 2002 .....	20
Figure 11 : Carte piézométrique de la nappe phréatique (SATOUH et al.. 2021) .....	22
Figure 12 :Carte localisation des points d'eau .....	26
Figure 13 :plan de travail.....	27
Figure 14 :un multi-paramètre.....	28
Figure 15 :Les béciers dans le bain-marie .....	29
Figure 16: Titrions DMS 716 de marque Metrohm.....	29
Figure 17:méthode titrage .....	30
Figure 18:les sulfates précipités .....	30
Figure 19 : Le spectrophotomètre à flamme, de marque JENWAY.....	31
Figure 20 : Histogramme des pH de la nappe phréatique dans la région de Ouargla. ....	34
Figure 21: carte isovaleurs de la conductivité .....	35
Figure 22: Carte iso-valeurs des chlorures.....	37
Figure 23 : Carte iso-valeurs des Sulfates.....	38
Figure 24: Carte isoveleurs de répartition des carbonates. ....	40
Figure 25 : Carte isovaleurs de magnésium .....	41
Figure 26: Carte isovaleurs de calcium .....	43
Figure 27: Cartes isovaleurs de répartition de potassium et de sodium(GOUDJIL 2024) .....	44
Figure 28: Diagramme de Stabler .....	46
Figure 29: Diagramme de piper .....	47
Figure 30: Diagramme de Riverside .....	48
Figure 31:La relation Chlorures-sodium dans les eaux en (méq/l).....	51
Figure 32 :La relation sulfates-Calcium dans les eaux en (méq/l).....	52
Figure 33: La relation conductivité- (SO4/Cl) dans les eaux. ....	53

<b>Figure 34: rapport ionique <math>r_{Ca^{2+}}/r_{Mg^{2+}}</math> .....</b>	<b>57</b>
<b>Figure 35: Rapports ionique <math>r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl}</math>.....</b>	<b>58</b>
<b>Figure 36 : Rapports ionique de <math>r_{(Na^++K^+)}/r_{Cl^-}</math> dans les eaux de la nappe phreatique.....</b>	<b>59</b>
<b>Figure 37: Indice de saturation des minéraux.....</b>	<b>59</b>

## Liste des tableaux

<b>Tableau 1 Pluviométrie totale mensuelle de la région de Ouargla (ANRH 2024) .</b>	<b>6</b>
<b>Tableau 2 : Récapitulatif des différentes nappes aquifères de la basse Vallée de l'Oued M'ya (ANRH al. 2004) .....</b>	<b>17</b>
<b>Tableau 3 :Coordonnées géographiques des points d'eau. ....</b>	<b>25</b>
<b>Tableau 4: classification d'eau d'irrigation selon SAR Richards (1954).....</b>	<b>49</b>
<b>Tableau 5 : L'indice d'échange de base dans les eaux de la nappe phréatique ...</b>	<b>54</b>
<b>Tableau 6: des rapports caractéristiques.....</b>	<b>57</b>

## **Liste des abréviations :**

**A.N.R.H** : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

**C.T** : Complexe Terminal.

**C.I** : Continental Intercalaire.

**CE** : Conductivité électrique.

**PH** : potentiel en hydrogène.

**S.A.S.S** : Système Aquifère du Sahara Septentrional.

**OMS** : Organisation Mondiale de la Santé.

**TDS** : solide dissous total.

**SAR** : Le Sodium Adsorption Ratio.

## Sommaire

Dédicaces .....	II
REMERCIEMENTS .....	III
المخلص:.....	IV
Liste des figures .....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des abréviations :.....	VIII
Sommaire .....	IX
Chapitre I : Cadre physique de la région d'étude .....	1
Introduction générale : .....	2
I.1 Généralités sur la zone d'étude.....	3
I.2-Topographie et géomorphologie : .....	4
I.3 Contexte climatologique.....	5
I.4 L'hydrologie : .....	8
I.3.1 Oued M'ya: .....	9
I.3.2 Oued N'sa et Oued M'Zab : .....	10
Conclusion partielle .....	11
Chapitre II : Etude géologique et Hydrogéologique. ....	13
Introduction :.....	12
II.2. Evolution tectonique : .....	12
II.4 La litho-stratigraphie de la cuvette d'Ouargla .....	15
II.4 Contexte hydrogéologique : .....	18
II.4.1 Contexte hydrogéologique régional : .....	18
II.4.2 Continental Intercalaire "Albien":.....	18
II.4. 3 Complexe Terminal :.....	19
II.4.4 Spatio-temporelle piézométrique de l'aquifère du CT .....	19
II.4.5 La nappe superficielle ou phréatique : .....	20
II.4.6 Modes d'alimentation des nappes phréatiques .....	21
II.4.7 Remonté des eaux phréatiques .....	21
II.4.8 Méthodes d'étude des nappes phréatiques.....	21
Conclusion : .....	23
Chapitre III : Matériel et méthodes .....	24
III.1 Échantillonnage.....	25

III.2 Prélèvement et conservation des échantillons.....	26
III.3 Méthodes d'analyses physico-chimiques :.....	28
III.3.1 PH et conductivité :.....	28
III.3.2 Eléments majeurs :.....	28
Chapitre IV : Résultats Et Interprétations .....	32
IV.1 : Introduction : .....	33
IV.2 : La répartition spatiale des éléments physico-chimiques .....	33
IV.2.1 : Paramètres physiques .....	33
IV.2.1.1 : Le PH.....	33
IV.2.1.2 : La conductivité électrique .....	34
IV.2.2 : Les éléments majeurs : .....	35
IV.2.2.1 : Les chlorures (Cl) .....	35
IV.2.2.2 : Les sulfates (SO <sub>4</sub> ) .....	37
IV.2.2.3 : Les bicarbonates (HCO <sub>3</sub> ) .....	38
IV.2.2.5 : Le magnésium (Mg) .....	40
IV.2.2.4 : Le calcium (Ca) .....	41
IV.2.2.6 : Le sodium et le potassium (Na, K) .....	43
IV.3. Classification des faciès géochimique des eaux .....	45
IV.3.1. Classification de Stabler : .....	45
IV.3.2. Représentation graphique des faciès hydrochimiques (diagramme de piper) :.....	46
IV.5.3 : Aptitude des eaux a l'irrigation .....	47
Tableau 4 : classification d'eau d'irrigation selon SAR Richards (1954) .....	خطأ!
الإشارة المرجعية غير معرفة.	
IV.4 : Etude des relations inter-éléments .....	50
IV.4.1. Relation Cl et Na : .....	50
IV.4.2 Origine de la minéralisation des eaux de l'aquifère superficiel .....	50
IV.4.3 : Relation SO <sub>4</sub> - Ca : .....	51
IV.4. Relation (SO /Cl -Conductivité) .....	52
IV.5 : Origine du chimisme des eaux : .....	53
IV.5.1 : Indice d'échange de base :.....	53
IV.5.2 : Rapports caractéristiques.....	55
IV.5.2.1 Rapports rCa <sup>2+</sup> /rMg <sup>2+</sup> :.....	57
IV.5.2.2 Rapports rSO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /rCl <sup>-</sup> :.....	58
IV.5.2.3 Rapports r(Na <sup>+</sup> +K <sup>+</sup> )/rCl <sup>-</sup> :.....	58

IV.5.2.4 L'indice de saturation : .....	59
Conclusion : .....	61
Références bibliographiques .....	62

# **Chapitre I : Cadre physique de la région d'étude**

## Introduction générale :

### Introduction

Depuis longtemps, les habitants de la cuvette d'Ouargla s'appuient sur les eaux de l'aquifère superficiel pour leur approvisionnement en eau potable et l'irrigation des palmeraies. Cet aquifère, exploité via des puits traditionnels, fournit des quantités d'eau adéquates pour une population qui ne compte que quelques milliers de résidents.

Toutefois, avec l'augmentation significative de la population, les besoins en eau de la région ont également crû, nécessitant ainsi l'utilisation des vastes réserves des aquifères profonds, tels que l'aquifère du complexe terminal et l'aquifère continental intercalaire. Depuis les années quatre-vingt, de grands volumes d'eau sont extraits de ces aquifères profonds, contribuant à l'alimentation supplémentaire de l'aquifère superficiel, en complément des faibles précipitations de la région. L'absence de décharge naturelle a, au fil des ans, provoqué la remontée du niveau piézométrique jusqu'à la surface du sol (Hammed et al. 2023). Ce phénomène a causé de sérieux dommages environnementaux, tels que la dégradation des oasis et la détérioration de la qualité des eaux de l'aquifère superficiel. Ce problème a affecté les aquifères superficiels de plusieurs régions du bas Sahara (la cuvette d'Ouargla, la vallée d'Oued Souf et la vallée d'Oued Righ), entraînant d'importantes pertes économiques pour la réhabilitation des zones dégradées.

Cette étude vise à évaluer la qualité de l'eau destinée à l'usage domestique et agricole ainsi que les caractéristiques hydrogéochimiques de l'aquifère superficiel d'Ouargla. L'étude est basée sur le plan du travail suivant:

**Chapitre I: Cadre physique de la région d'étude:** Ce chapitre présente la situation géographique, la géomorphologie et le contexte climatique de la zone d'étude.

**Chapitre II: Etude géologique et hydrogéologique :** Ce chapitre présente une synthèse des données géologiques et hydrogéologique de la cuvette d'Ouargla.

**Chapitre III: Matériels et méthodes:** Ce chapitre détaille la méthode d'échantillonnage et d'analyse des eaux de l'aquifère superficiel.

**Chapitre IV: Résultats et Interprétations:** Ce chapitre est consacré à l'étude des paramètres physicochimiques des eaux, la qualité des eaux pour la consommation et l'irrigation, et l'origine de minéralisation des eaux de l'aquifère superficiel.

Ce travail se termine par une conclusion générale faisant sortir les résultats de l'étude.

## I.1 Généralités sur la zone d'étude

La wilaya d'Ouargla est située au sud-est d'Algérie, à 850 km de la capitale Alger (Figure.1). Elle est entourée par Tamanrasset et Illizi au Sud, par les wilayas d'El Oued et Touggourt au Nord, Ghardaïa à l'ouest et par la Tunisie à l'Est. La cuvette d'Ouargla fait partie du grand bassin versant Sahara Septentrional, elle est située dans le lit d'Oued M'ya (Bas- Sahara, Algérie) (Kharroubi et al. 2022 ; Kharroubi et al. 2023). La région investiguée est une dépression alluvionnaire occupe une superficie de 25 289 km<sup>2</sup>.

Elle est composée par un nouveau concept administratif dominant six communes suivantes N'Goussa, Rouissat, Ain El Beida, Sidi Khouiled, Hassi Ben Abedallah et la ville d'Ouargla, ses coordonnées géographiques sont :

- ✓ X= 710000/ 730000;
- ✓ Y= 3530000/3600000
- ✓ Z= 164 mètres.

En (UTM, Clarke. 1880);

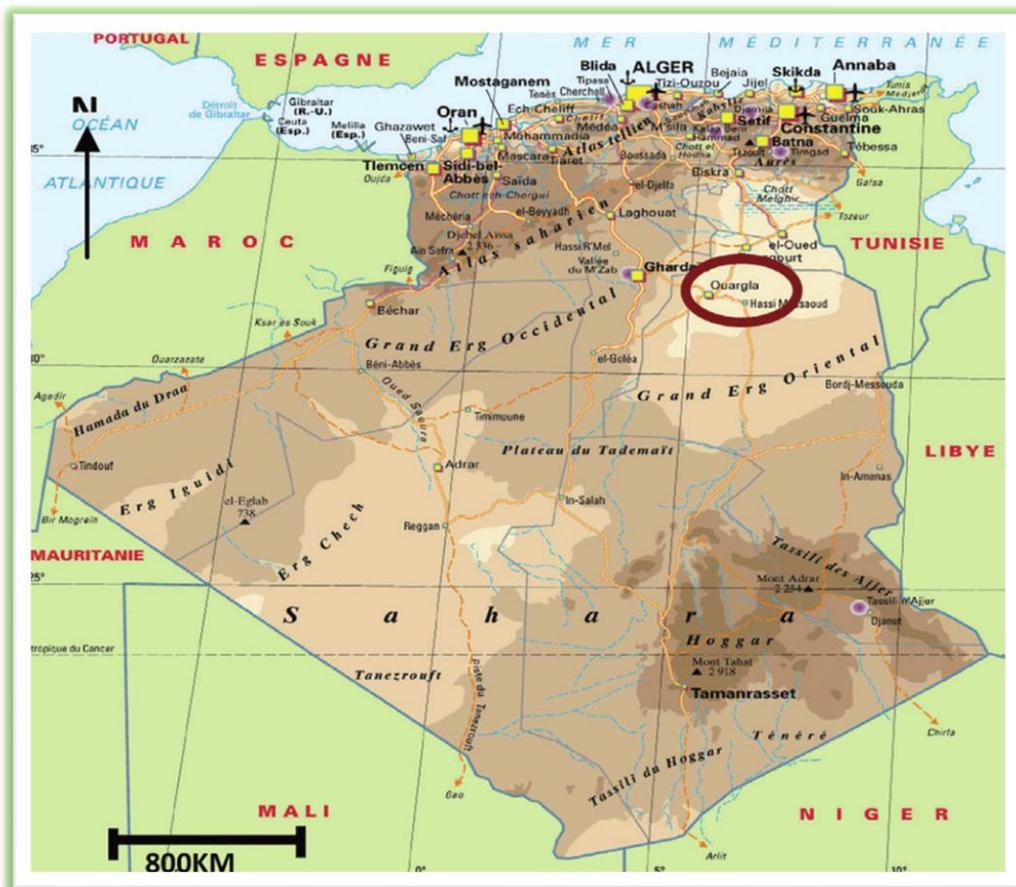


Figure 1: Situation géographique de la zone d'étude.

## **I.2-Topographie et géomorphologie :**

S'il y a une région du globe, où les formes de relief sont particulièrement nettes et visibles, c'est bien le Sahara et si les processus morphogénétiques (vent, eau...etc.) à l'œuvre dans ce milieu sont caractéristiques, rien n'est étonnant à ce que les formes qui en résultent le soient aussi. (Chehema, 2011)

Les principaux types de paysage saharien sont : Les Hamadas, les collines gréseuses, les dépressions MONOD, (1992)

(G.Busson, 1969) admit que le relief de Ouargla est constitué de roches sédimentaires et des alluvions et colluvions issus de ces dernières.

### **• Les plateaux ou hamadas :**

A l'ouest de Ouargla, la vallée de Oued Mya est bordée par le plateau de la Hamada Pliocène de 200 à 250m d'altitude à faible pendage dans la direction Est. Sa fin est marquée par la dépression ovale de la sebkha Mellala (30 Km de long, de 6 à 10 11 Km de large, 80 à 90 m de profondeur). Fortement érodée, elle nous offre un beau paysage de buttes témoins (Goures).

### **• Les glacis:**

Le versant Ouest de la cuvette, présente quatre niveaux étagés de glacis. Le plus ancien est marqué par une couverture très caractéristique formée d'une croûte gypso-calcaire, épaisse de 1,5 m; son altitude s'abaisse de 225m à l'Ouest, à 200m à l'Est. Le deuxième glacis, à une altitude de 180m, est caractérisé par l'affleurement du substrat gréseux de Mio-Pliocène. Le troisième à 160m d'altitude est souvent recouvert de sable et de graviers gréseux plus ou moins encroutés de gypse. Ce dernier a été fortement démantelé par le dernier glacis qui est à 140m d'altitude sur lequel sont installées quelques palmerais de Bamendil (Hamid Aissa, 2009).

### **• Les Sebkhha et les Chott :**

Lorsque les eaux s'évaporent sous l'effet de la chaleur, des plaques de sels divers se déposent en surface formant suivant l'origine de leurs eaux (phréatiques ou superficielles) les chotts et les sebkhas (MONOD, (1992).

Ils sont installés dans les plus basses altitudes, ils sont constitués de sols gypseux en surface et forment des grandes zones d'épandage de matériel alluvial, sableux le plus souvent (Dutil, 1971). Les grands chotts se trouvent dans le Sahara septentrional, particulièrement dans le Bas-Sahara, où ils s'allongent dans de larges vallées fossiles.

- **Dunes:**

Ce sont de dépôts actuels constitués des sables éoliens d'origine gréseuse issus de la Hamada moi-pliocène. Ils occupent les talwegs, les bordures des sebkhas et les versants rocheux

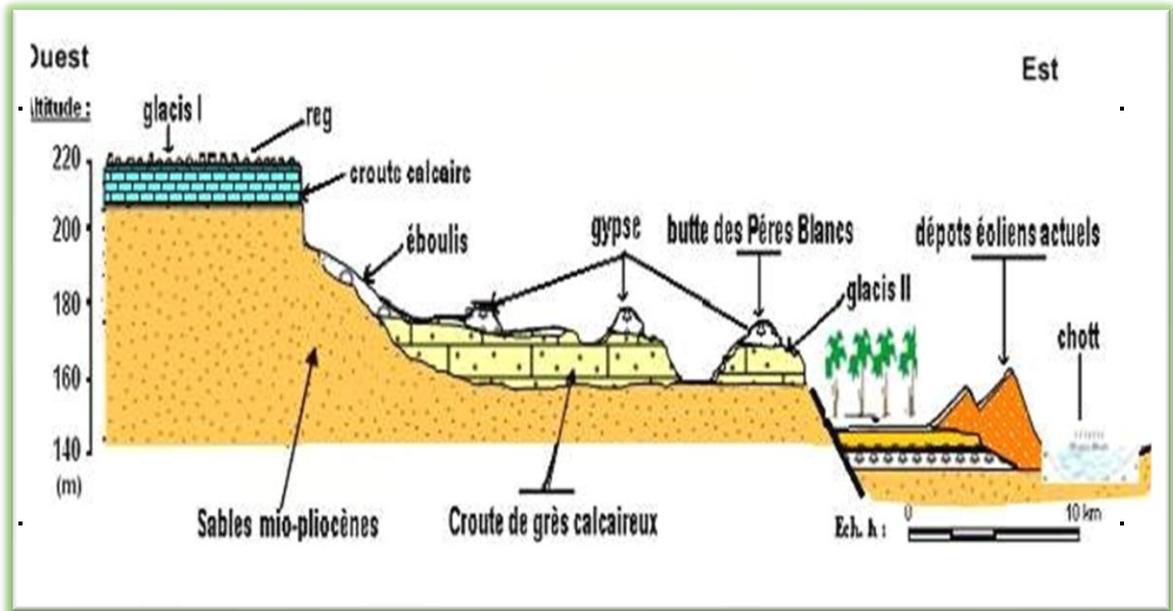


Figure 2 Coupe géomorphologique schématique de la cuvette de Ouargla Cornet1967

### I.3 Contexte climatologique

Les données pluviométriques, de la température, de l'humidité, de l'évaporation, etc.....) ont été observées par l'Office National de la Météorologie (O.N.M.)

Les caractères du climat saharien sont dus tout d'abord à la situation en latitude, au niveau du tropique, ce qui entraîne de fortes températures, et au régime des vents qui se traduit par des courants chauds et secs (OZENDA, 1991).

Le climat saharien est caractérisé notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations, une luminosité intense, une forte évaporation et de grands écarts de température

#### a) Les précipitations :

Les précipitations ont pratiquement toujours lieu sous forme de pluies. Ces dernières sont caractérisées par leur faible importance quantitative et les pluies torrentielles sont rares. Elles sont liées aux perturbations soudano-sahariennes ou sahariennes .DUBIEF (1953).

L'analyse des moyennes mensuelles de pluie, fait ressortir un maximum en mars avec un minimum en juillet et août. Toutefois, Il faut noter que ces valeurs mensuelles peuvent

fortement varier d'une année à l'autre (DUBIEF, 1953 ; THIERRIOT et MATARI, 1998 ; MEDDI, M. & MEDDI, H. 1998).

	sept	oct	nov	dec	janv	fev	mars	avril	mai	juin	juil	aout	annuel
<b>2010-2011</b>	0.4	4.1	0	0	0	0.1	7.3	3.8	0.1	0	0	0	15.8
<b>2011-2012</b>	1.3	6.6	0	0	12	4.7	0.4	4	0	0	0	0	29
<b>2012-2013</b>	0.6	0.1	0	0	1.5	0	0	11.1	0	0	0	0	13.3
<b>2013-2014</b>	0	0	0.7	24.9	0	0.2	0	0	10.8	1.6	0	0	38.2
<b>2014-2015</b>	0	0	10	2.5	1.6	12	0.5	0	0	0	0	0	26.6
<b>2015-2016</b>	0.4	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1.4
<b>2016-2017</b>	0.3	0	0	6.2	0	0	18.8	0.7	0	0.5	0	0	26.5
<b>2017-2018</b>	6.2	15	2	3	0.8	7	0	0	0	0	0	0.5	34.5
<b>2018-2019</b>	26.4	0	0	0	0	0	18.4	2.4	3.4	0	0	0	50.6
<b>2019-2020</b>	0	0	0	0	0	0	2.6	4.2	3.1	0	0	0	9.9
<b>2020-2021</b>	3.2	0	0	0	0.7	0	0	0	9.7	0	0	0	13.6
<b>2021-2022</b>	0	0.5	28	0	0	0	0	1.5	0.3	0	0	0	30.3
<b>2022-2023</b>	0	0	0	0	1.1	1.6	0	0	0.3	0	0	6.3	9.3
<b>2023-2024</b>	0	0	0	1.5	0	0	0.5	66	2				

**Tableau 1 Pluviométrie totale mensuelle de la région de Ouargla (ANRH 2024)**

## b) La température

La température La température est l'un des facteurs qui caractérisé le climat de la région. Les résultats enregistrés au niveau des stations montrent bien que l'année est devisée en deux

périodes ou saisons, l'une chaude et l'autre froide. Les températures sont toujours positives, très fraîches en hiver et très élevées en été, ce qui se traduit par une forte évapotranspiration potentielle. (HADJKOUDER 2019).

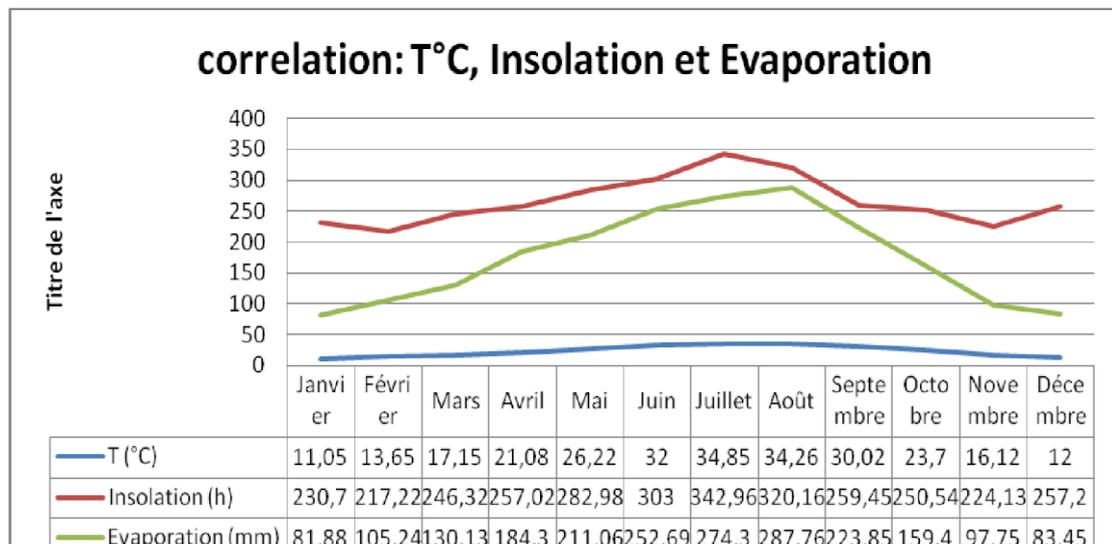
### c) L'évaporation :

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

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

Cette perte d'eau, peut avoir comme origine :

- ° L'évaporation de masses d'eau libre ou de celle contenues dans le sol : évaporation physique.
- ° L'évaporation par les végétaux (qui peut être considérée comme secondaire dans les régions sahariennes) : évaporation physiologique.



**Figure 3** corrélation des moyennes mensuelles de insolation et l'évaporation (O.N.M., 2005)

### d) L'humidité

L'humidité relative au Sahara est faible, souvent inférieure à 20% (MONOD,

1992) même dans les montagnes, ce n'est qu'exceptionnellement que l'on observe des valeurs plus fortes, tandis qu'au Sahara septentrional elle est généralement comprise entre 20 et 30% pendant l'été et s'élève à 50 et 60% parfois davantage en janvier (OZENDA, 1991 ; LE HOUEROU, 1995)

### e) L'insolation :

A cause de la faible nébulosité de l'atmosphère, la quantité de lumière solaire est relativement forte, ce qui à un effet desséchant en augmentant la température (OZENDA, 1991).

Les durées d'insolation sont évidemment très importantes au Sahara et varient assez notablement d'une année à l'autre et même suivant les périodes de l'année envisagées (Dubief, 1963). La durée moyenne d'insolation est d'environ 235,07 heures, avec un maximum de 337,61 heures en juillet et un minimum de 210,33 heures en janvier.

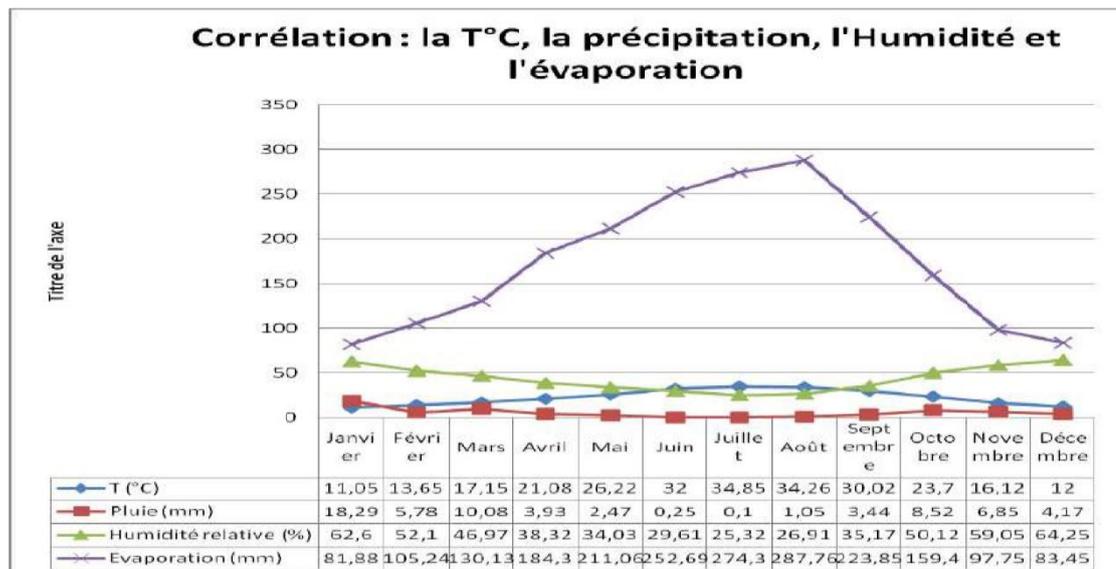


Figure 4 corrélation des moyennes mensuelles d'humidité de la précipitation et l'évaporation (O.N.M., 2005)

### f) Vents

On voit que les vents sont fréquents durant toute l'année. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période allant d'avril jusqu'au juillet, avec un maximum de 5,10 m/s durant le mois de juin.

### I.4 L'hydrologie :

Dans ce désert typique qu'est le Sahara, les précipitations sont non seulement rares, mais toujours très irrégulières. Par suite les conditions de l'écoulement y sont particulières (l'absence d'un écoulement permanent dans les talwegs, la désorganisation du réseau hydrographique et la dispersion de l'eau en "mares," "gueltas" ou "redirs"). (CAPOT-REY, 1952 ; ESTIENNE et GODARD, 1970).

Les Oueds sahariens n'ont pas un régime de crues régulier mais plutôt de caractère accidentel, quand les pluies s'abattent, les Oueds coulent quelques jours et débordent. Ce phénomène se

produit jusqu'à trois fois par an aux limites Nord du Sahara, beaucoup plus rarement au centre (GARDI, 1973)

Le réseau hydrographique de notre région d'étude est constitué de : -au Nord - Ouest l'Oued N'sa qui est principal affluent, et ne coulant que pendant la saison des pluies et aboutissant dans le sebkhat Safioune; à l'Est l'Oued M'Zab, son amont hydrographique prend naissance dans le chebka de M'Zab, par une mosaïque de petits affluents, et aboutissant dans le sebkhat Safioune (HADJKOUIDER-M ,2019).

### **I.3: Réseaux hydrographiques de la région d'Ouargla :**

L'hydrographie de la cuvette d'Ouargla se caractérise par son endoréisme (Dubief, 1953).

D'après G. Aumassip (1972) les vallées aboutissent à des dépressions dont les limites paraissent toujours en relation avec un réseau très dense de fractures.

Hamdi-Aïssa, 2001) déclara que les différents bassins versants (M'ya, M'zab, N'sa) forment le réseau hydrographique qui abouti à sebkhat Safioune au Nord de Ouargla. Le ruissellement est en fait in-significatif.

#### **I.3.1 Oued M'ya:**

L'Oued M'ya est un cours d'eau intermittent qui draine le versant nord-est du plateau de Tademait. Son vaste bassin versant en forme de gouttière s'étend sur près de 20 000 km<sup>2</sup>. Ce bassin présente une légère inclinaison descendante (0,1 à 0,2%) du sud, à une altitude d'environ 800 m, vers le nord-est. Au nord de Ouargla, la vallée de l'Oued M'ya n'est plus clairement identifiable. Cependant, si l'on considère que durant le Quaternaire, l'Oued se jetait dans le chott Melrhir actuel, sa longueur totale devait atteindre environ 900 km d'après Dubief (1953).

Ainsi, l'Oued M'ya constitue un immense système hydrologique fossile dans cette région aride, drainant autrefois les eaux d'un vaste bassin endoréique vers les dépressions du chott Melrhir au nord-est de Ouargla. Dubief (1953).

Avec la fin de la dernière grande période pluviale, le lac s'est retiré, l'Oued M'ya n'a pas pu qu'épisodiquement de couler de sebkha en sebkha sans beaucoup de vigueur, son cours étant complètement coupé par les reliefs situés à l'aval de sebkha Safioune où un lac se formait à nouveau à chaque période un peu pluvieuse. Actuellement, les grandes crues de l'Oued M'ya s'arrêtent à 200km à l'amont d'Ouargla.(HADJKOUIDER 2019)

### I.3.2 Oued N'sa et Oued M'Zab :

Contrairement à l'Oued M'ya considéré comme fossile, les Oueds N'sa et M'Zab sont des cours d'eau fonctionnels intermittents dans la région.

Ils peuvent connaître une à deux crues par an lorsque les précipitations sont suffisantes. Cependant, leurs eaux n'atteignent la cuvette d'Ouargla que lors des crues les plus importantes. Ces oueds drainent les eaux du versant sud-est de l'Atlas Saharien, coulant d'ouest en est jusqu'à la sebkhia de Safiounne.

Les alluvions de l'Oued N'sa obstruent la vallée au nord de la sebkhia de Safiounne, empêchant l'écoulement plus en aval. Les sebkhias (dépressions salées) se sont formées durant une période humide antérieure, probablement lors du dernier grand épisode pluvial contemporain de la glaciation de Würm.

Ainsi, malgré leur caractère intermittent, ces oueds jouent un rôle clé dans le drainage des eaux de ruissellement issues des reliefs atlasiques vers les zones endoréiques de la région d'Ouargla.

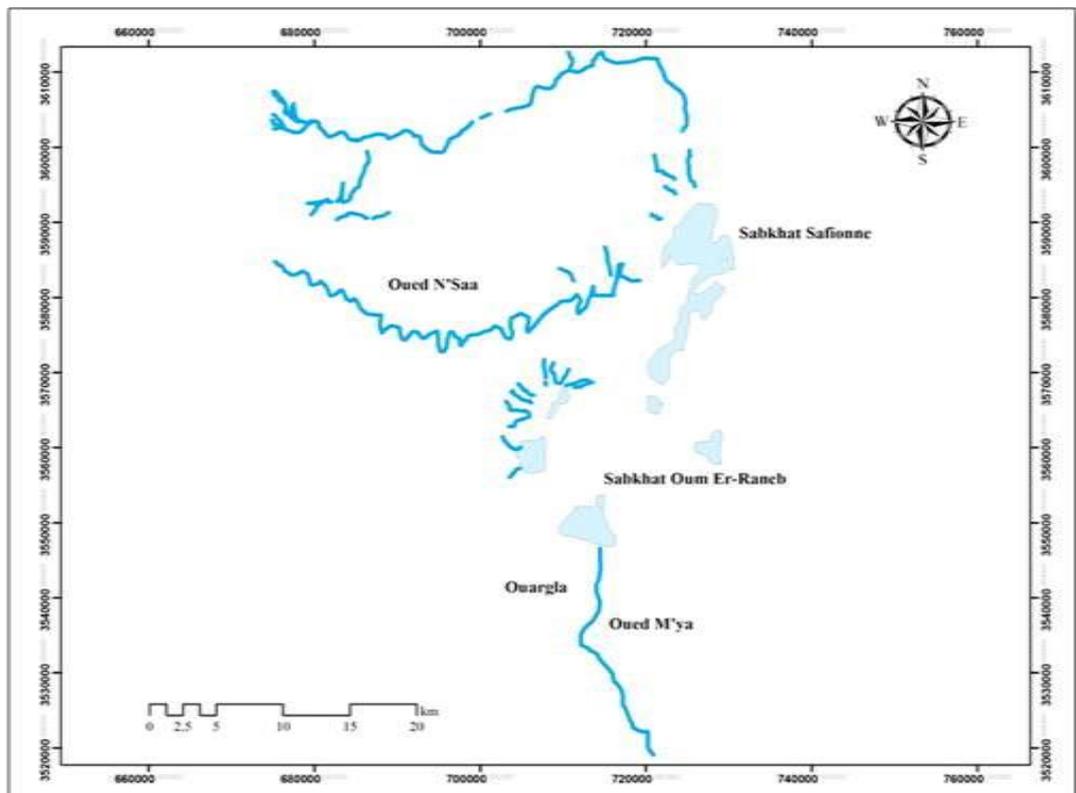


Figure 5 Le réseau hydrographique de la vallée de Ouargla .

## **Conclusion partielle**

La cuvette d'Ouargla est une vaste dépression naturelle d'environ 25 000 km<sup>2</sup> située dans le Bas Sahara algérien. Elle présente une forme synclinale dissymétrique caractéristique.

Au centre de cette cuvette se trouvent des palmeraies et zones agricoles végétalisées. Cependant, près de 70% de sa superficie est occupée par des dunes de sable et des étendues désertiques.

La région est marquée par un climat hyper-aride avec des précipitations très faibles et irrégulières. La température moyenne annuelle de 23,6°C souligne le caractère extrêmement chaud et sec. Avec un taux d'évapotranspiration élevé, il n'y a pratiquement aucune recharge des nappes par les pluies.

Cette cuvette aride entourée de vastes ergs constitue donc un environnement contrasté, où seules quelques oasis cultivées ponctuent un paysage largement minéral et dunaire typique des régions désertiques du Sahara oriental algérien.

## **Chapitre II : Etude géologique et Hydrogéologique.**

**Introduction :**

L'étude géologique constitue le fondement de l'hydrogéologie, car elle permet de déterminer l'extension et la profondeur des aquifères, ainsi que de décrire les formations rocheuses présentes dans une zone donnée. Cela aide à comprendre la structure géologique locale et régionale grâce à l'interprétation des cartes et des coupes litho-stratigraphiques.

D'un point de vue tectonique, l'Algérie se divise en deux domaines distincts, séparés par une ligne de failles majeures issue de l'accident sud-atlasique. Au nord, on trouve les formations alpines issues de l'orogénèse tertiaire. Au sud s'étend une vaste plate-forme saharienne relativement stable et peu déformée.

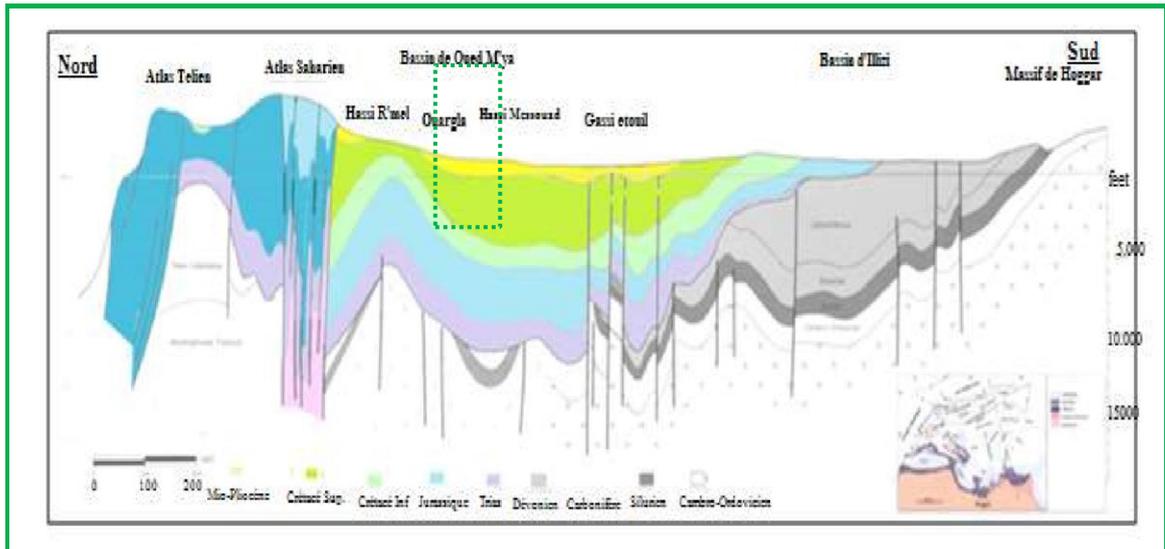
Cette dichotomie structurale entre le nord plissé et le sud tabulaire a une influence déterminante sur la géologie, l'hydrogéologie et les ressources en eau souterraine du pays. L'analyse détaillée des formations géologiques est donc primordiale pour appréhender les aquifères et leur fonctionnement hydraulique.

**II.2. Evolution tectonique :**

D'après (Rouvillois.1975), la cuvette d'Ouargla apparaît comme une asymétrie nette et continue.

La phase autrichienne est bien visible dans la région de Gassi-Touil car elle est inhabituelle à l'étendue du niveau désertique (Kerdjadj et al., 1995) Figure 6.

la coupe géostructurale montre que les failles qui mettent en évidence les strates régionales de du nord-ouest au sud-est, et est attribué la cuvette d'Ouargla aux failles du Hoggar (hercynien) s'étendant du Cambrien au Sénonien inférieur, à travers ces failles. Les failles créent des communications entre les aquifères profondes (OSS.2003).



**Figure 6 Coupe géologique (NW-SE) à travers les différents ensembles géologiques de l'Algérie (Boote et al., 1998; Hadj-Kouider. 2019).**

### **II.3 La structure géologique de la cuvette d'Ouargla**

Les affleurements géologiques d'Ouargla représentent un terrain tabulaire des formations géologiques d'âge Quaternaire, Miocène, Pliocène et Sénonien. La cuvette est située dans les formations continentales du Mio-Pliocène, dans lesquels des sables siliceux, de grès fins à stratifications entrecroisées, alternent avec des nodules de calcaire, entrecoupés de niveaux de calcaire ou de gypse, ainsi qu'au Sénonien, forment une structure calcaire carbonatée au nord-ouest de la région de recherche la cuvette de Ouargla s'incline en pente de (-40) vers chott Melghigh par l'axe SW-NE (KHARROUBI.M 2024) .

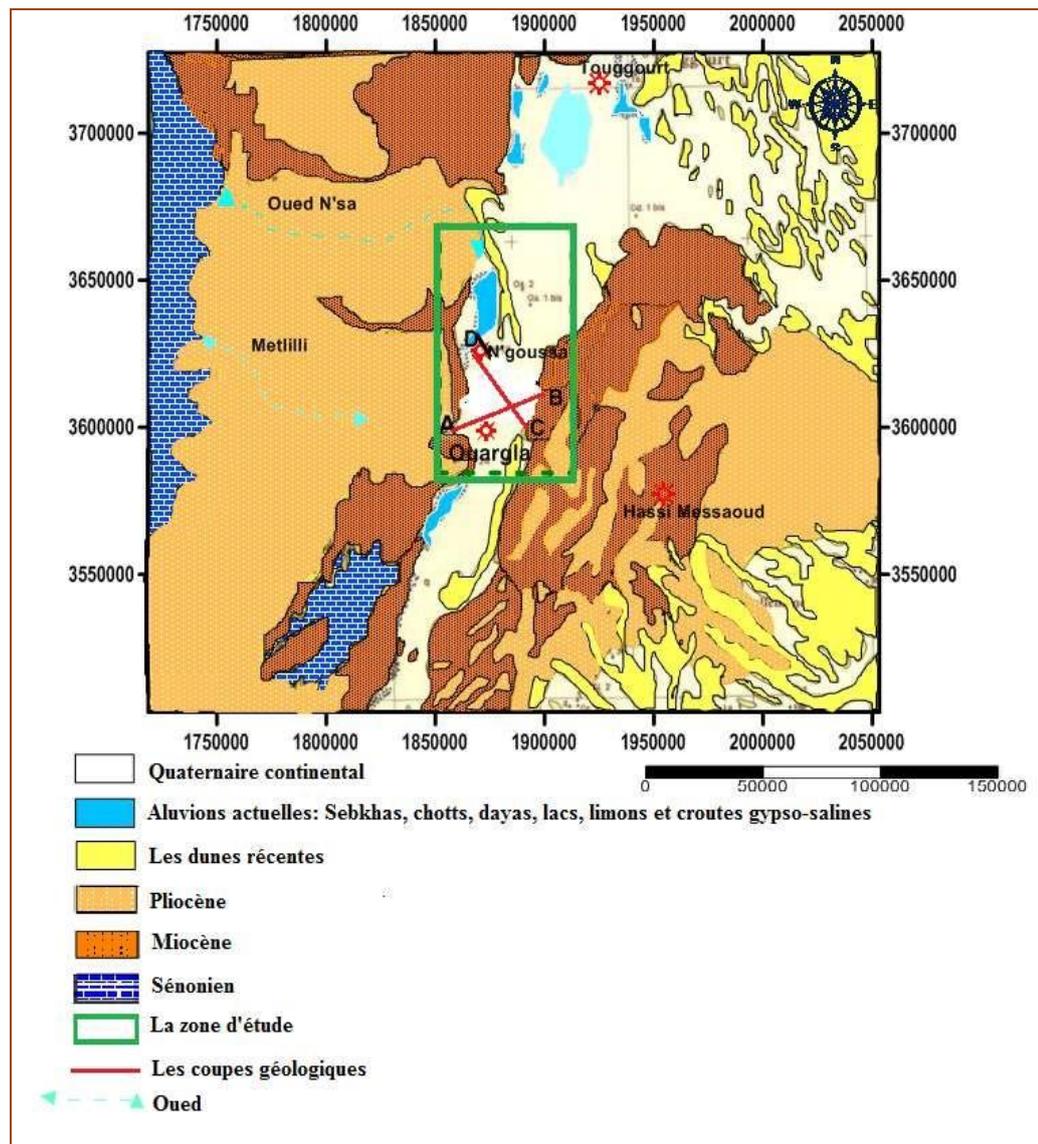


Figure 7 Carte géologique de Ouargla (Cornet.1964) modifiée par( ZEDDOURI .A 2010 ; SATOUH.A et al 2021.)

### II.4 La litho-stratigraphie de la cuvette d'Ouargla

La description litho-stratigraphique dépend sur le traitement et l'analyse des logs des forages hydraulique profonds ce qui nous permet de déduire et caractériser la lithologie et la stratigraphie de la cuvette d'Ouargla comme dans la figure 08 suivante (Boussaada at al. 2023 ; Kharroubi et al. 2024):

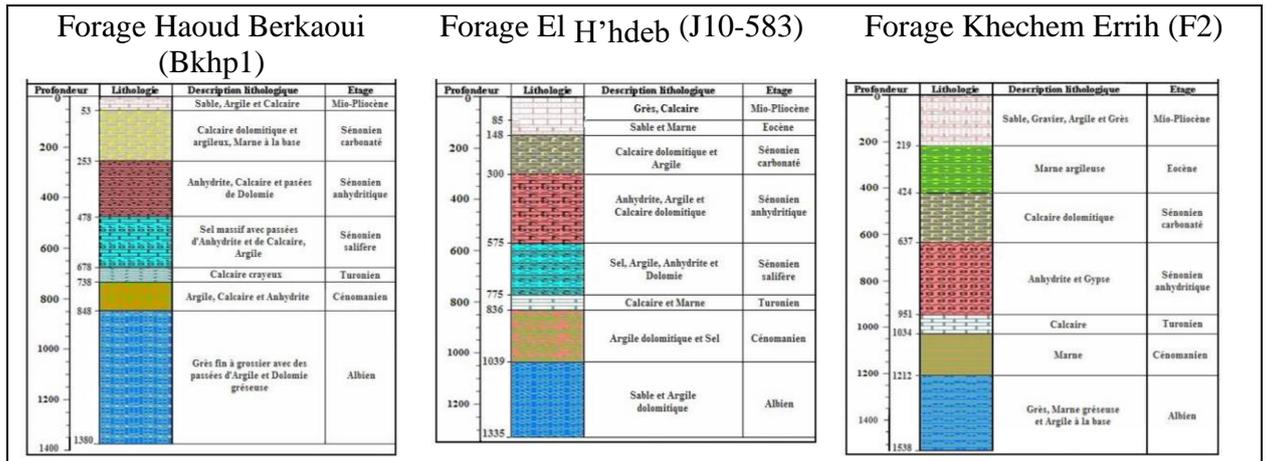


Figure 8 Logs stratigraphiques des forages à travers la cuvette de Ouargla ANRH, 2004 ).

Dans la cuvette d'Ouargla on trouve ;

- **Le Barrémien:** il est formé de calcaire, dolomie, argile et grès à une profondeur de 1400 m. Son épaisseur varie de 250 m à 400 m (base du Continental Intercalaire).
- **L’Aptien:** Il se compose d'une formation contenant de dolomite, de marnes dolomitiques de différentes couleurs et du grès, dont l'épaisseur varie de 19 à 46 m. C'est une couche imperméable entre le Barrémien et l'Albien.
- **L’Albien:** C'est un complexe de grès, de sables et de marnes. Il correspond à l'horizon aquifère et son épaisseur varie de 273 à 450 m, ce qui correspond à la série lithologique supérieure de l'horizon du Continental Intercalaire.
- **Le Vraconien:** Il caractérise par un épisode de calcaires dolomitiques parfois argileux entre les marnes de Cénomannien (base du Complexe Terminal) et les sables de Albien (sommet du Continental Intercalaire). Les épaisseurs y sont de 50 à 100 m.
- **Le Cénomannien:** C'est un banc contenant une alternance des argiles plastiques marneuses. Il est une formation importante couvrant l'aquifère Albien (de 180 à 300 m d'épaisseur).

- **Le Turonien:** La barre Turonienne est constituée de calcaires beiges poreux et de calcaires dolomitiques gris à blancs ayant une épaisseur de l'ordre de 50 à 98 m et recouvre la série imperméable du Cénomaniens.
- **Le Sénonien :** Il est subdivisé par deux formations principales de bas en haut :
  - ✓ Le Sénonien lagunaire (40-350 m d'épaisseur) est composé par des bancs du sel massif, d'anhydrite et de dolomie avec présence d'argile et gypse agissant comme une barrière imperméable.
  - ✓ Le Sénonien carbonaté d'une épaisseur allant de 150 à 200 m, qui est une formation perméable composée de calcaires gréseux, calcaires dolomitiques et marnes relativement dures avec présence d'anhydrite et un faible pourcentage d'argile.
- **Le Sénono-Eocène :** Les carbonates forment une unité litho-stratigraphique unique, principalement composée de calcaire, avec une épaisseur variant de 140 à 250 mètres. Les fissures secondaires présentes dans cette formation lui confèrent des caractéristiques hydrogéologiques intéressantes.
- **Le Mio-Pliocène,** qui repose de manière hétérogène sur Sénono-eocène, caractérisé par une formation puissante très hétérogène contenant des grès, sables et des argiles avec présence de calcaire
- **Le Quaternaire :** Dans la stratigraphie de la région, on identifie le Quaternaire comme une couche géologique. À la base du Quaternaire, on trouve un niveau composé d'argile et de grès qui repose sur une croûte ancienne. Ce niveau joue un rôle de couverture pour l'aquifère du Mio-Pliocène à Ouargla. La couche supérieure du Quaternaire est principalement constituée de sables éoliens, parfois mêlés de gypse, ainsi que de matériaux résultant du remodelage des formations géologiques du Mio-Pliocène.

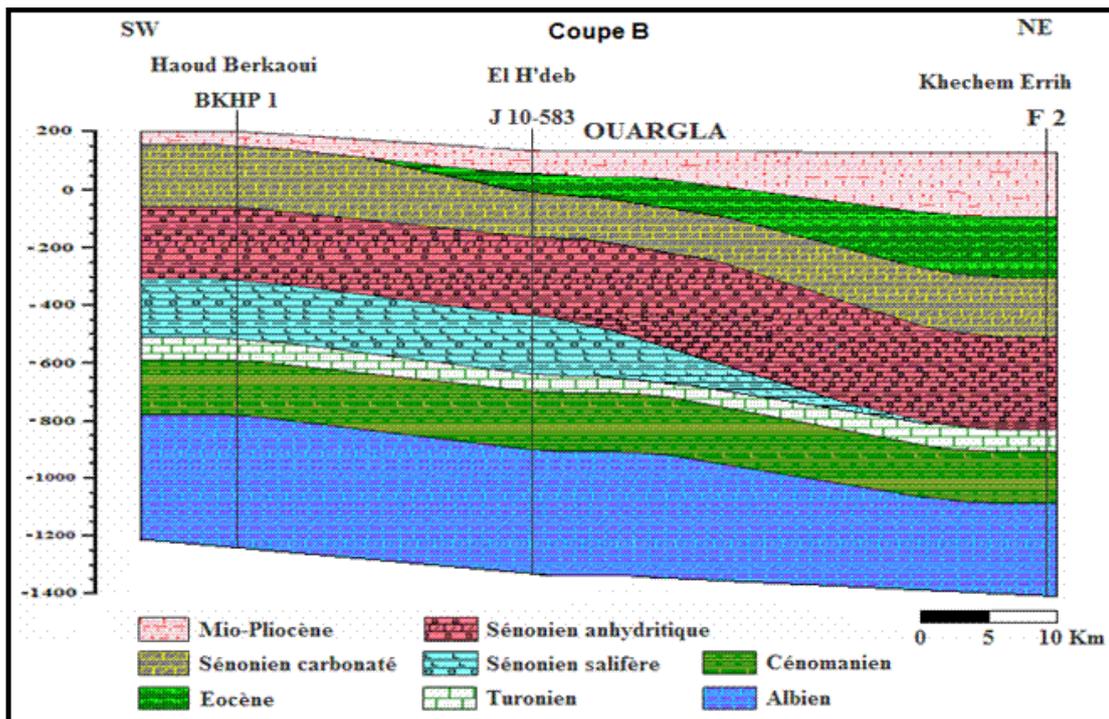


Figure 9 : Coupe géologique de la cuvette de Ouargla établie selon les logs stratigraphiques (HOUARI, 2012)

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

Tableau 2 : Récapitulatif des différentes nappes aquifères de la basse Vallée de l'Oued M'ya (ANRH al. 2004)

**II.4 Contexte hydrogéologique :****II.4.1 Contexte hydrogéologique régional :**

Dans le bassin saharien du nord de l'Afrique, on trouve d'importants systèmes aquifères favorables à la circulation et au stockage des eaux souterraines. Il s'agit principalement du Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), qui comprend les grandes nappes du Continental Intercalaire (CI) et du Complexe Terminal (CT).

Ce vaste réservoir aquifère s'étend sur environ 1 million de km<sup>2</sup> en Algérie, Tunisie et Libye. Ses réserves en eau souterraine renouvelables sont estimées à 31 milliards de m<sup>3</sup>.

Le SASS constitue donc un patrimoine hydrique considérable pour les pays du Sahara septentrional, malgré sa lente recharge et les risques de surexploitation. Une gestion durable et concertée de cette ressource est cruciale pour ces régions arides.

A Ouargla, comme dans la plupart des oasis du Sahara, les seules ressources hydriques disponibles sont d'origine souterraine. Les formations géologiques de la région de Ouargla contiennent deux grands ensembles de formations aquifères séparés par d'épaisses séries évaporitiques ou argileuses : de la base du crétacé supérieur l'ensemble inférieur appelé le Continental Intercalaire (CI) ou "Albien", et l'ensemble supérieur appelée le Complexe Terminal (CT). Une troisième formation, d'importance plus modeste, s'ajoute aux deux précédentes : la nappe phréatique (Cornet, 1961).

**II.4.2 Continental Intercalaire "Albien":**

Le Continental Intercalaire, (CI) ou "Albien", qui s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional sur une superficie de 600 000 km<sup>2</sup>. Elle s'étend sur le long du bassin sédimentaire du Sahara septentrional figure 10 il est continu du Nord au Sud depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili et le Hoggar, d'Ouest en Est depuis la vallée de la Saoura jusqu'au désert libyen. Au Nord-est de la dorsale du M'Zab, le toit de l'aquifère, constitué d'argiles et d'évaporites du Cénomaniens, est continu sur tout le bassin (UNESCO, 1972).

D'après DUBOST (1992), La nappe du continental intercalaire « Albien » est en réalité installée dans les couches détritiques de l'Albien et du Barrémien souvent séparées par les bancs calcaires aptiens. Son toit se situe au-delà de 1500 m de profondeur et dépasse dans d'autres zones les 2600 m. Cet aquifère est contenu dans les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses accumulées dans des niveaux d'âges variables selon les endroits, et compris entre le Trias et le Crétacé inférieur. Il porte souvent, de manière restrictive, le nom de la nappe Albien

en référence à son étage supérieur, car les premiers jaillissements d'eau obtenus en provenance de cet aquifère ont été attribués aux grès de l'Albien. A Ouargla, l'aquifère est situé entre 1000 et 1500 m de profondeur en moyenne (IDDER, 2020), avec une épaisseur utile près de 640 mètres, et constituée de grès fins, gris, à ciment argileux, parfois dolomitiques, avec intercalation de marnes dolomitiques et argiles sableuses. La nappe est jaillissante et exploitée par des forages destinés à l'A.E.P.

### **II.4. 3 Complexe Terminal :**

Dans le bassin oriental, la nappe s'étale sur près de 350 000 Km<sup>2</sup>, et limitée à l'Ouest par la dorsale du M'zab, au nord par l'accident majeur de l'Atlas saharien, à l'est par le Dahar, au sud par la ligne passant au nord de l'axe de In Salah-Zarzaïtine sous l'Erg Oriental. Elle présente un intérêt majeur comme formation aquifère indépendante ; car la communication des eaux de ladite nappe entre le bassin oriental et le bassin occidental paraît peu importante (UNESCO, 1972)

### **II.4.4 Spatio-temporelle piézométrique de l'aquifère du CT**

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

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

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



**Figure 10 : Carte des ressources en eau souterraines (CI et CT), extrait de recueil des communications, 2002**

#### II.4.5 La nappe superficielle ou phréatique :

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

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

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

La présente étude traite des eaux libres du chott de Ain El Beida qui sont en relation directe avec la nappe phréatique. Le bilan hydrique est un des éléments clé de raisonnement pour la compréhension du cycle géochimique de ces eaux. C'est pour cela qu'on va présenter la synthèse des résultats des études récentes du bilan hydrique de cette nappe.

### **II.4.6 Modes d'alimentation des nappes phréatiques**

Les régions à sols salés se rencontrent le plus souvent sous climats arides ou semi- arides dont les précipitations sont nettement inférieures à l'évaporation ou à l'évapotranspiration et pour que les réserves phréatiques puissent se créer, il est nécessaire qu'interviennent d'autres modes d'alimentation en eau. D'après GAUCHER et al. (1974), ces modes sont :

- Le rassemblement et l'accumulation des eaux de ruissellements dans les formes de reliefs en cuvette, où elles s'infiltrent vers les nappes.
- Les infiltrations qui se produisent dans le lit des cours d'eau principaux ou permanents.
- Les inondations qui recouvrent partiellement ou entièrement les zones basses lors des périodes de fortes précipitations.
- Dans les zones où l'irrigation est pratiquée, il faut tenir compte des arrosages excessifs.

### **II.4.7 Remonté des eaux phréatiques**

La remontée des eaux phréatiques est un problème qui résulte du déséquilibre entre le volume d'eau apporté et celui évacué dans le milieu (SAIS, 2006).

La remontée capillaire est un phénomène qui reste limité dans l'espace ; elle dépend beaucoup de la perméabilité des sols et par conséquent de leur granulométrie et de leur structure. Ainsi, parmi les facteurs les plus importants qui sont à l'origine de la saturation et salinisation des sols par la remontée capillaire, on trouve l'aridité du climat à laquelle s'ajoutent la géomorphologie, la topographie et l'hydrologie du terrain, les caractéristiques physico-chimique du sol (structure, texture...etc.), les techniques d'aménagement des sols et des eaux (HAROUNA, 2001 in ABBANI et ABDE-LALI, 2005).

### **II.4.8 Méthodes d'étude des nappes phréatiques**

D'après (l'A.N.R.H. 2000 in BENMOUAFKEKI, 2011), trois sortes de renseignements sont utiles dans l'étude des nappes en vue de l'amélioration des sols salés :

- La profondeur de l'eau par rapport au sol, qui permet de préciser les fluctuations des niveaux des nappes phréatiques.
- La piézométrie de la nappe, qui donne le sens d'écoulement des eaux.
- Les données des variations chimiques de l'eau.

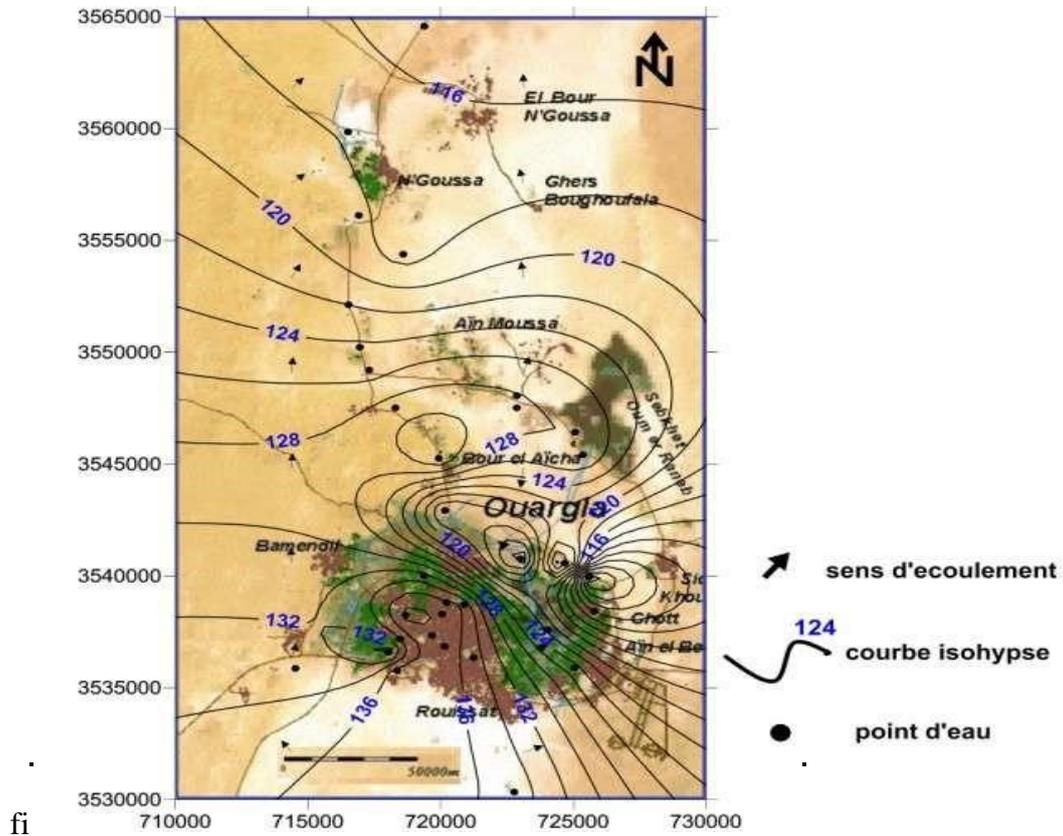


Figure 11 : Carte piézométrique de la nappe phréatique (SATOUH et al.. 2021)

La figure 11 représente une carte piézométrique de la nappe phréatique ce qui montre le sens de l'écoulement de la nappe est de direction SO vers le NE, La nappe s'écoule du point le plus haut (136 m) situé sous la ville d'Ouargla vers les différents Chotts avec un gradient hydrauliques ne dépassant pas 2 ‰.

**Conclusion :**

La cuvette d'Ouargla, située dans le Bas-Sahara sur la plateforme saharienne du sud-est algérien, présente une structure géologique complexe typique des bassins sédimentaires sahariens. Une analyse géologique et hydrogéologique de cette zone met en évidence la présence de trois principaux aquifères : le Continental Intercalaire (CI), le Complexe Terminal (CT) et l'aquifère superficiel qui contient la nappe phréatique.

La nappe phréatique de Ouargla fait partie de l'aquifère superficiel, le plus proche de la surface parmi les trois aquifères principaux de la région elle est probablement peu profonde.

# **Chapitre III : Matériel et méthodes**

**III.1 Échantillonnage**

Cette étude a été menée lors d'une campagne de prélèvement réalisée en mai 2024, ciblant les puits et quelque piézomètre de la nappe phréatique.

Pour choisir et sélectionner les sites de prélèvement d'eau, nous avons pris en compte la facilité d'accès, la disponibilité restreinte de puits dans la nappe, ainsi que la distribution géographique équilibrée des points d'eau pour couvrir l'ensemble de la zone étudiée.

Les piézomètres et les forages doivent être localisés sur le plan du site étudié. Pour cela, un GPS a été utilisé afin de prendre les coordonnées géographiques (longitude et latitude) de tous les points d'eau concernés par notre étude.

Les prélèvements d'échantillons d'eau dans cette étude sont réalisés à partir des forages et des piézomètres dans la nappe phréatique.

Voici les points d'eau et ses coordonnées :

POINTS DE MESURE	Locale	Coordonnées		Remarques
		X Utm	Y Dcm	
<b>P006</b>	Ngoussa	719365	3564579	Piézomètre
<b>P057</b>	Ain moussa	717297	3549250	Piézomètre
<b>P064</b>	Bour el haicha	720162	3542942	Piézomètre
<b>PL10</b>	DSA Sidi AEK	719690	3537362	Piézomètre
<b>PL21</b>	ENTv	721212	3536381	Piézomètre
<b>PL31</b>	Maison de culture	720058	3538295	Piézomètre
<b>PL32</b>	paramedicale	720114	3538785	Piézomètre
<b>PLX5</b>	Parc khemgami MKhadma	718009	3536595	Puits

**Tableau 3 : Coordonnées géographiques des points d'eau.**

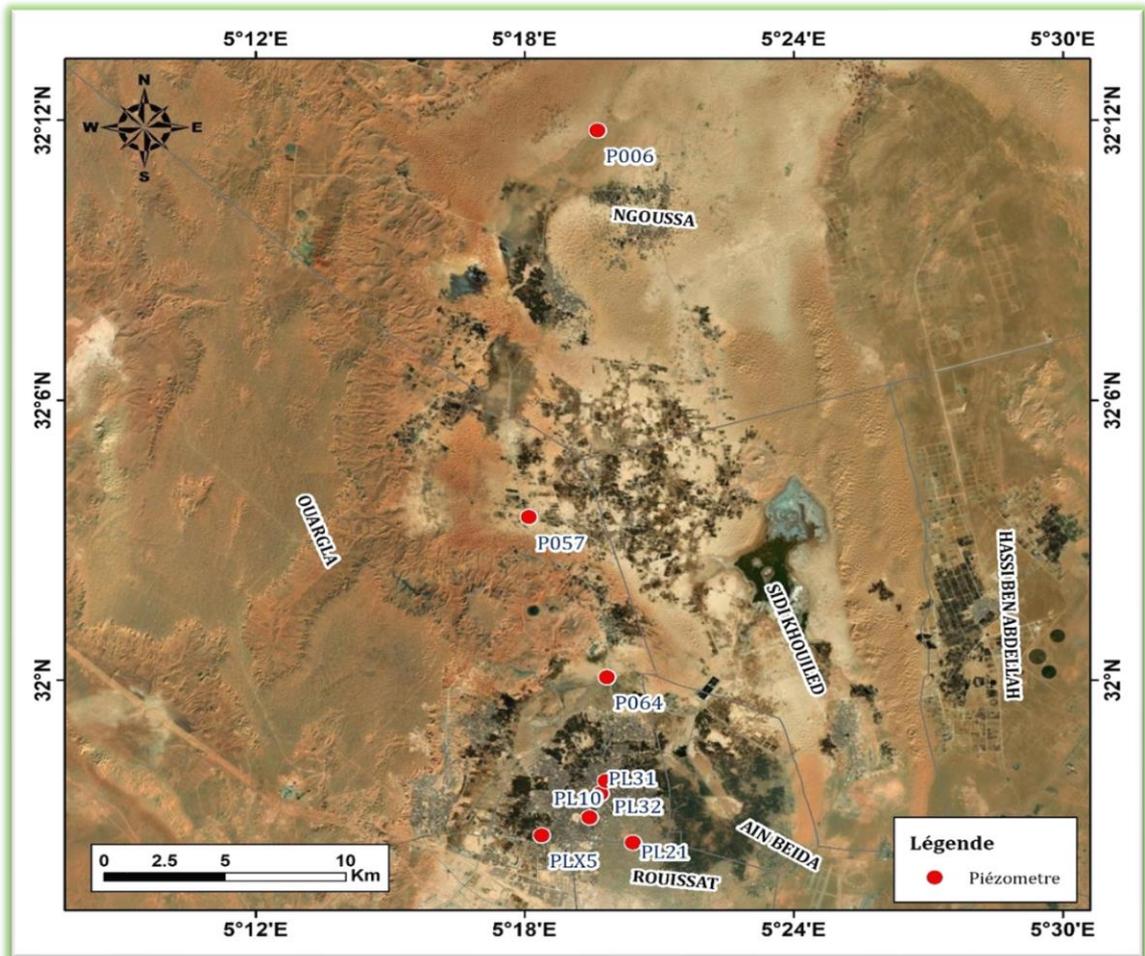


Figure 12 : Carte localisation des points d'eau

### III.2 Prélèvement et conservation des échantillons

Après le choix et l'échantillonnage on doit effectuer les mesures suivantes sur terrain ;

Le niveau statique a été mesuré à l'aide d'une sonde sonore.

On prend les échantillons à l'aide d'un échantillonneur.

On verse nos échantillons dans des bouteilles en plastique préalablement rincée à l'eau distillée.

Les paramètres physico-chimiques (pH, conductivité, température) ont été mesurés sur le terrain immédiatement après l'échantillonnage. Ces paramètres indiquent une perturbation de la qualité des eaux souterraines qu'ont été relevés sur place et on peut les considérer comme témoins.

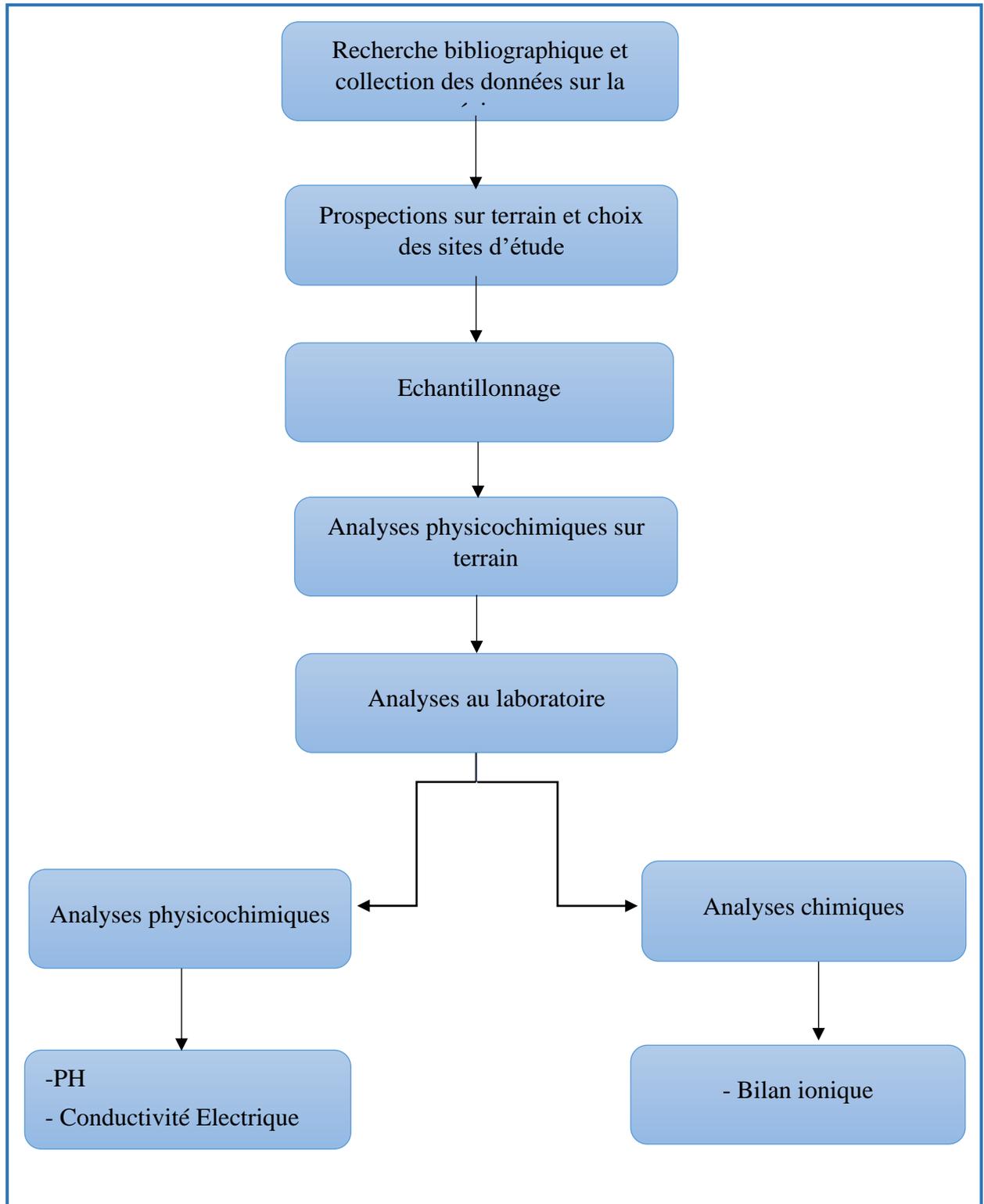


Figure 13 :plan de travail.

### III.3 Méthodes d'analyses physico-chimiques :

#### III.3.1 PH et conductivité :

Cette analyse est faite à l'aide d'un appareil de mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau dont le pH, la conductivité et la température qui s'appelle un multi-paramètre.



Figure 14 :un multi-paramètre.

Dans le laboratoire on effectue les analyses suivantes :

#### III.3.2 Eléments majeurs :

##### a) Les Bicarbonates ( $\text{HCO}_3$ ) :

Principe : méthode titrage

Les carbonates n'existent qu'à  $\text{pH} > 8.3$ , et les bicarbonates trouvent si  $4.4 < \text{pH} < 8.3$  il est facile de savoir au cours d'un dosage acidimétrique, lors d'une attaque acide, les carbonates se décomposent.



Figure 15 :Les béchers dans le bain-marie

### B) Les Chlorures(Cl) :

La lecture se fait directement sur le potentiomètre.

Appareil utilisé :

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



Figure 16: Titrions DMS 716 de marque Metrohm

### C) Le Magnésium (Mg) :

Principe : méthode titrage

Après avoir versé Volume par ml de la solution d'EDTA jusqu'à ce qu'elle vire du rouge vin au bleu.

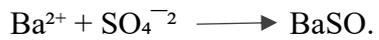


**Figure 17:méthode titrage .**

#### **D) Les Sulfates (SO<sub>4</sub>)**

Principe :

La méthode gravimétrique présentée est basée sur le principe de faire précipiter les sulfates sous forme de sulfate de baryum par le chlorure de baryum.



**Figure 18: les sulfates précipités**

**E) Sodium (Na) Potassium (k) et Calcium (CA)**

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



**Figure 19 : Le spectrophotomètre à flamme, de marque JENWAY**

# **Chapitre IV : Résultats Et Interprétations**

## IV.1 : Introduction :

Ce chapitre propose une analyse approfondie des caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère superficiel d'Ouargla, articulée autour de plusieurs objectifs principaux :

- ✚ Examiner les propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine de cet aquifère.
- ✚ Evaluer son adéquation pour la consommation humaine.
- ✚ Déterminer sa convenance pour l'irrigation agricole.
- ✚ Identifier les processus hydrochimiques qui modulent sa composition ionique. Cette analyse s'appuie sur l'interprétation des données collectées à partir de 44 échantillons d'eau prélevés dans des puits exploitant cet aquifère superficiel.

## IV.2 : La répartition spatiale des éléments physico-chimiques

### IV.2.1 : Paramètres physiques

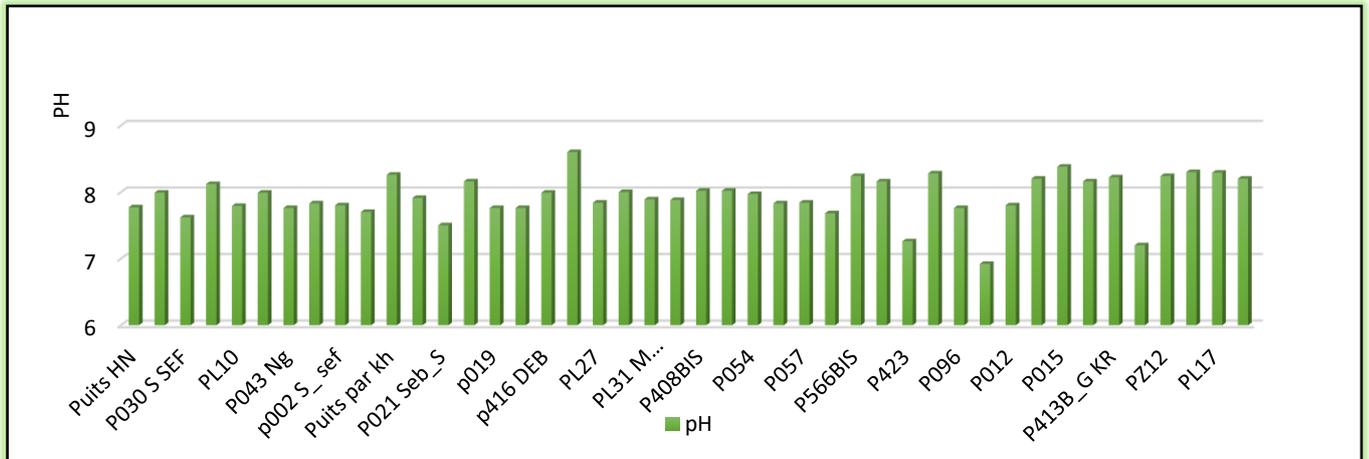
#### IV.2.1.1 : Le PH

Le pH représente la concentration en ions hydrogène et permet de mesurer le degré d'acidité ou de basicité d'une eau. Sa valeur varie en fonction de la force ionique. Un pH égal à 7 indique un milieu neutre, tandis qu'un pH inférieur à 7 caractérise un milieu acide et un pH supérieur à 7 un milieu basique.

•Milieu acide  $pH < 7$  ,Milieu neutre  $pH = 7$ . Milieu basique  $pH > 7$ .

Dans la région étudiée, les valeurs de pH sont relativement homogènes, se situant dans une plage comprise entre 7 et 8,6. Cependant, on constate que dans la majorité des piézomètres et les puits captant la nappe phréatique les eaux présentent une légère alcalinité, avec un pH légèrement supérieur à 7 et d'autres présentent une alcalinité extrême avec un PH plus de 8.7.

Ainsi, bien que les eaux de cette zone affichent des pH globalement on peut dire qu'elle est proches de la neutralité, celles issues de la nappe phréatique tendent à être basiques, probablement en raison de leur composition chimique spécifique.



**Figure 20 : Histogramme des pH de la nappe phréatique dans la région de Ouargla.**

#### IV.2.1.2 : La conductivité électrique

La conductivité électrique constitue un paramètre important en hydrogéologie, car sa mesure est à la fois précise et rapide. Ses variations sont liées à la nature et à la concentration des sels dissous dans l'eau.

Dans le cas de la nappe phréatique de la région étudiée, les valeurs de conductivité électrique s'échelonnent sur une large plage.

Les valeurs les plus élevées sont enregistrées au niveau de la sebkha de Sefioune et dans la région près de Bour Elhaicha, Sidi khouiled et Oumerraneb généralement là où il existe des sebkhas la conductivité atteint des valeurs maximales entre 151790 et 169600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , reflétant la forte teneur en sels dissous dans ces plans d'eau.

Ainsi, ces valeurs de conductivités mesurées sont un témoignage de la diversité des faciès chimiques présents dans les eaux souterraines et de surface de cette région, avec des degrés de minéralisation très variables selon les points d'échantillonnage.

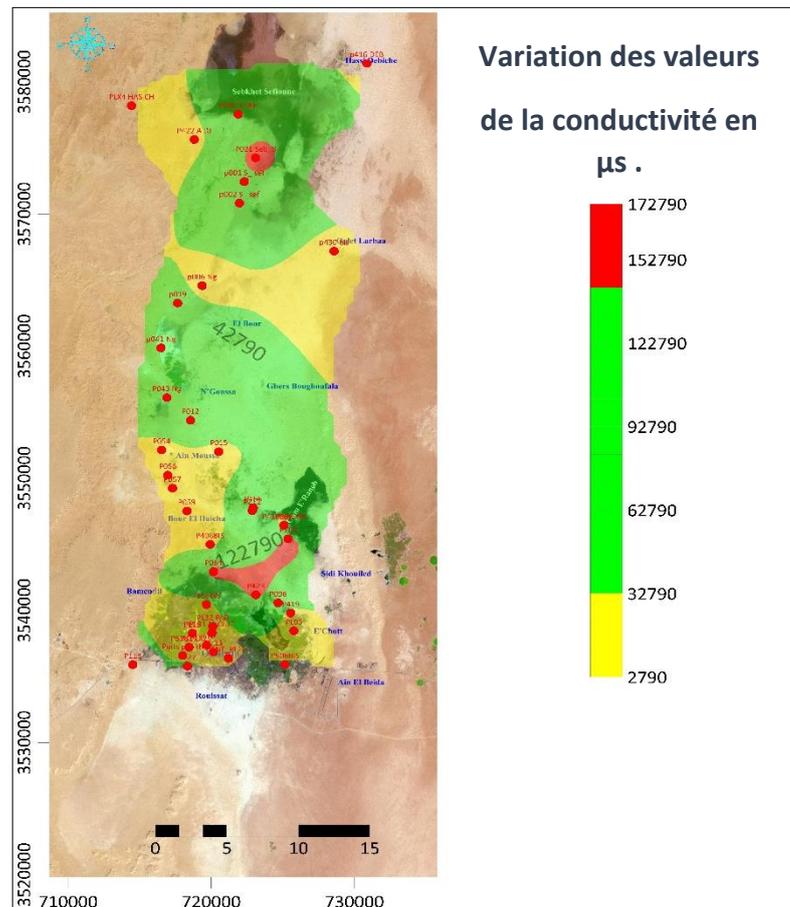


Figure 21: carte isovaleurs de la conductivité (par GOUDJIL.N).

#### IV.2.2 : Les éléments majeurs :

La composition chimique des eaux souterraines est influencée par la nature des roches traversées au cours de leur circulation dans les formations aquifères, ainsi que par le temps de résidence qui leur permet de s'enrichir en sels minéraux dissous.

##### IV.2.2.1 : Les chlorures (Cl)

Les chlorures sont toujours présents dans les eaux naturelles, mais à des concentrations très variables. Leur présence dans l'eau peut provenir de deux sources principales :

- La dissolution de sels naturels par le lessivage des terrains gypseux, marneux ou argileux.
- L'évapotranspiration intense dans les régions où le niveau piézométrique est proche de la surface du sol, ce qui caractérise la nappe étudiée.

L'évaporation élevée favorise la concentration des chlorures et des autres sels dissous dans les eaux souterraines. Ainsi, la teneur en chlorures reflète à la fois la lithologie traversée et les conditions climatiques locales, en particulier le taux d'évapotranspiration.

Dans la figure 17 suivante on voit que les eaux de la nappe phréatique ont très importantes teneurs en chlorures.

On observe qu'il y a distribution hétérogène des concentrations des chlorures qui varient considérablement au niveau de la cuvette de Ouargla allant de 9 méq/l jusqu'à 3603 méq/l et une tendance générale d'augmentation des concentrations du sud vers le nord.

On voit qu'il existe une zone de forte concentration de 2809 à 3609 méq/l qui est présentée par la teinte bleue foncée se trouve principalement dans la partie nord de la cuvette dans les alentours de près de Bour elhaicha, Oumerraneb, Ngoussa et sebkhet Sefioune.

Aussi deux zones de pics de concentration sont visiblement au NW et NE

De plus on voit une zone de faibles concentrations de Cl celle de la zone autour de Ain Baida et Rouissat présentées par la teinte claire qui se situent au sud de la cuvette.



Cependant, les activités anthropiques comme les rejets industriels peuvent aussi contribuer à augmenter la concentration en ces ions dans le milieu aquatique.

Dans la figure suivante on observe que les concentrations de sulfates varient considérablement allant de 14 à 1814 méq/l. On voit qu'il existe une zone de forte concentration qui est clairement visible au sud de la cuvette autour Rouissat qui présente les teneurs les plus élevées en dépassant 1824 méq les valeurs diminuent progressivement vers le nord de la cuvette ou on observe des concentrations plus basses dans la partie nord (teinte jaune claire) Sans oublier la courbe isovaleurs à 114 méq qui indique une zone de transition.

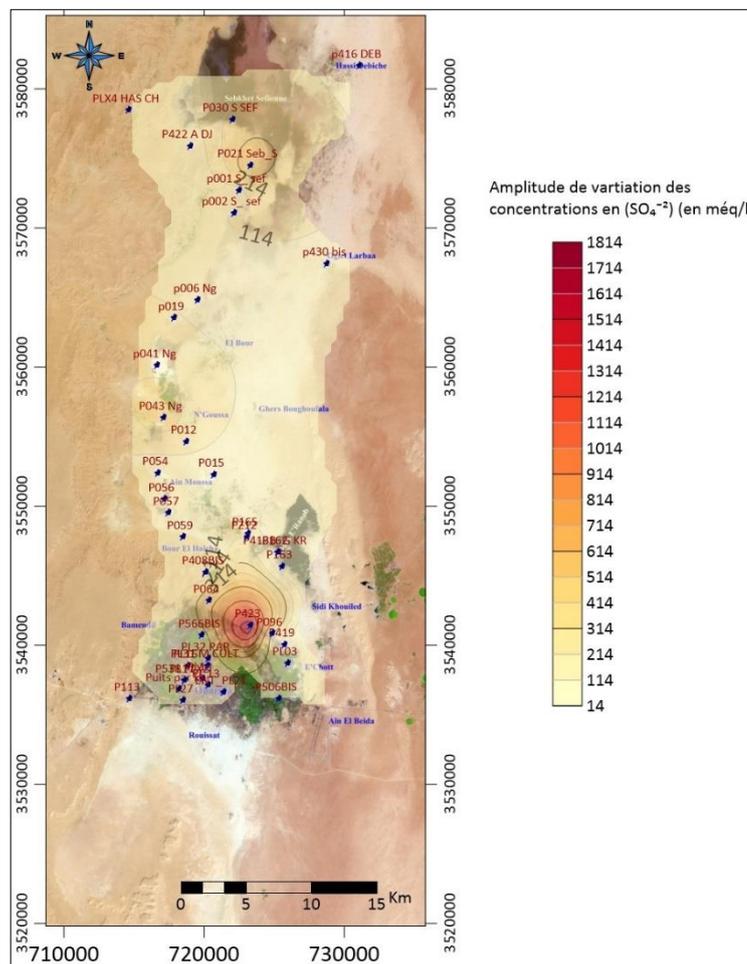


Figure 23 : Carte iso-valeurs des Sulfates (par GOUDJIL.N).

### IV.2.2.3 : Les bicarbonates (HCO<sub>3</sub>)

La présence des ions bicarbonates dans les eaux naturelles résulte de la dissolution des roches carbonatées. Leur concentration dépend de plusieurs facteurs :

- La teneur en dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) dissous, qui contrôle l'équilibre des réactions avec les carbonates.
- La température de l'eau, qui influence la solubilité des espèces carbonatées.
- Le pH de l'eau, qui détermine la forme prédominante des espèces carbonatées en solution.
- La nature lithologique des terrains traversés, en particulier la présence de roches riches en carbonates comme les calcaires et les dolomies.

Aussi, les teneurs en bicarbonates reflètent à la fois les conditions physico-chimiques du milieu aquatique (température, pH, teneur en CO<sub>2</sub>) et la lithologie des formations géologiques au contact desquelles circulent les eaux souterraines et de surface.

Dans la figure 19 qui représente une carte isovaleurs des teneurs en carbonates variant de 0.5 à 9 méq/l on remarque qu'il y a une distribution hétérogène des carbonates au niveau de la cuvette et la majorité des zones présentent des concentrations moyennes (teinte verte) entre 2 et 3 méq/l

Mais, des fortes valeurs de HCO<sub>3</sub> sont localisées dans la partie sud de la cuvette autour de Rouissat et d'autres zones isolées aussi représentées par la teinte orange.

D'autres zones de faible concentration sont présentées par la teinte verte claire à gris situées dans la partie nord et sur les bords de la cuvette.

De plus les lignes isovaleurs montrent une progression de concentration vers le centre sud de la cuvette.

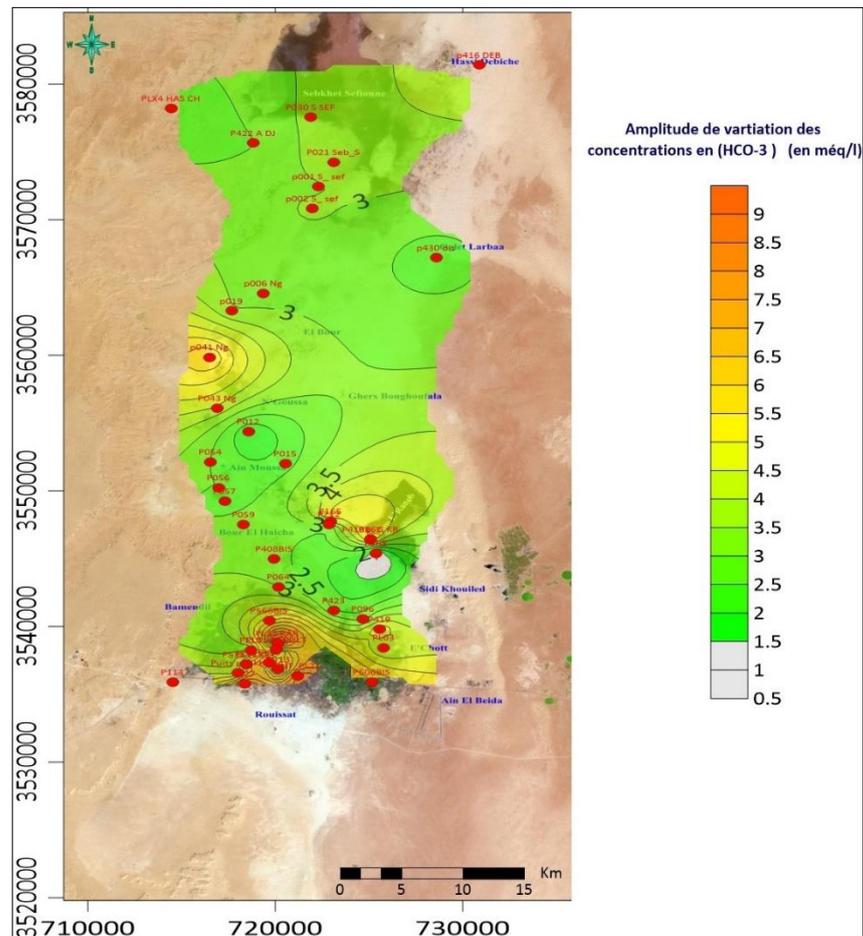


Figure 24: Carte isovaleurs de répartition des carbonates (par GOUDJIL.N).

#### IV.2.2.5 : Le magnésium (Mg)

Dans les formations sédimentaires, la présence de magnésium dans les eaux provient principalement de deux sources :

1. La mise en solution des dolomies et des calcaires dolomitiques. Les dolomies sont des roches carbonatées composées de dolomite ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ), qui libèrent des ions magnésium lors de leur dissolution.
2. La dissolution des sels sulfatés magnésiens tels que l'epsomite ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) et la kiesérite ( $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Ces minéraux évaporitiques, lorsqu'ils sont présents, peuvent s'altérer et relarguer des ions magnésium dans les eaux souterraines.

De plus les concentrations en magnésium mesurées dans les eaux reflètent l'interaction avec les lithologies riches en carbonates et/ou en évaporites magnésiennes rencontrées par les

écoulements souterrains et de surface. La teneur en  $Mg^{2+}$  renseigne donc sur la nature des formations géologiques traversées.

Cette carte représente les teneurs en magnésium qui varient de 8 à 750 méq/l au niveau de la cuvette de Ouargla ; la distribution de magnésium n'est pas uniforme, avec des zones de fortes concentrations très localisées au région entre Ngoussa et Ain moussa celle de la teinte bleu foncé est clairement visible dans la partie centrale de la cuvette avec des valeurs dépassant 700 méq/l .

Ainsi de concentration plus basse montrées avec la teinte claire sont observées principalement sur les bords de la cuvette et dans la partie nord.

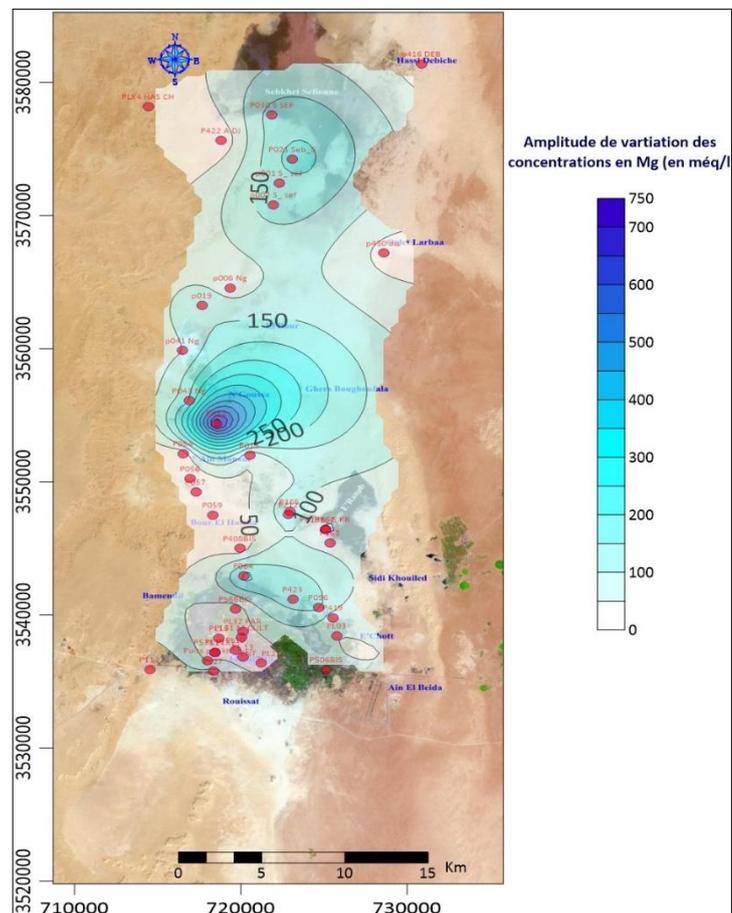


Figure 25 : Carte isovaleurs de magnésium (par GOUDJIL.N)

#### IV.2.2.4 : Le calcium (Ca)

Le calcium est un élément contribuant à la dureté totale de l'eau. Sa présence dans les eaux naturelles résulte principalement de deux processus :

1. La dissolution des formations carbonatées lors de l'infiltration des eaux. Cette dissolution est favorisée par la présence de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) selon la réaction :  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + 2 \text{HCO}_3^-$  Le CO<sub>2</sub> provient de l'atmosphère et de l'activité bactérienne générant ce gaz.
2. La dissolution du gypse (sulfate de calcium hydraté CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) selon la réaction :  $\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$

Ainsi, les ions calcium sont libérés dans l'eau par l'altération des roches carbonatées calcaires sous l'action du CO<sub>2</sub>, mais aussi par la dissolution des formations gypseuses. Les teneurs en calcium renseignent donc sur l'interaction des eaux avec ces lithologies riches en carbonates et évaporites calciques.

D'après la carte suivante ;les teneurs en calcium varient de 8 à 1008 méq/l et on peut distinguer deux zones de différentes concentrations de Ca<sup>2+</sup>.

1) une zone de forte concentration :

On observe 3 zones principales de forte concentration celles colorées avec une teinte orange à rouge sont clairement visible :

- a) Au nord de la cuvette au niveau de sebkhet Sefioune.
- b) Au centre de la cuvette autour de Ngoussa et Ain moussa.
- c) Au sud près de Sidi khouiled et Oum erraneb.

2) une zone de faible concentration :

Les concentrations les plus basses sont présentées avec la teinte jaune claire, elles sont observées entre les zones de fortes concentrations de Ca<sup>2+</sup> et sur les bords de la carte.



Les figures suivantes représentent la répartition spatiale des teneurs en Potassium  $K^+$  (à gauche) et la deuxième celle de répartition spatiale des teneurs en sodium  $Na^+$  (à droite) : D'après les cartes d'isoteneurs de  $(Na^+)(K^+)$ , on constate que la majorité de la zone présente des concentrations faibles à modérées (teintes claires)

Par contre deux zones de forte concentration (bleu foncé) sont visibles, une au nord et une au sud. On observe une augmentation des concentrations en sodium et potassium du centre vers les extrémités nord et sud de la cuvette.

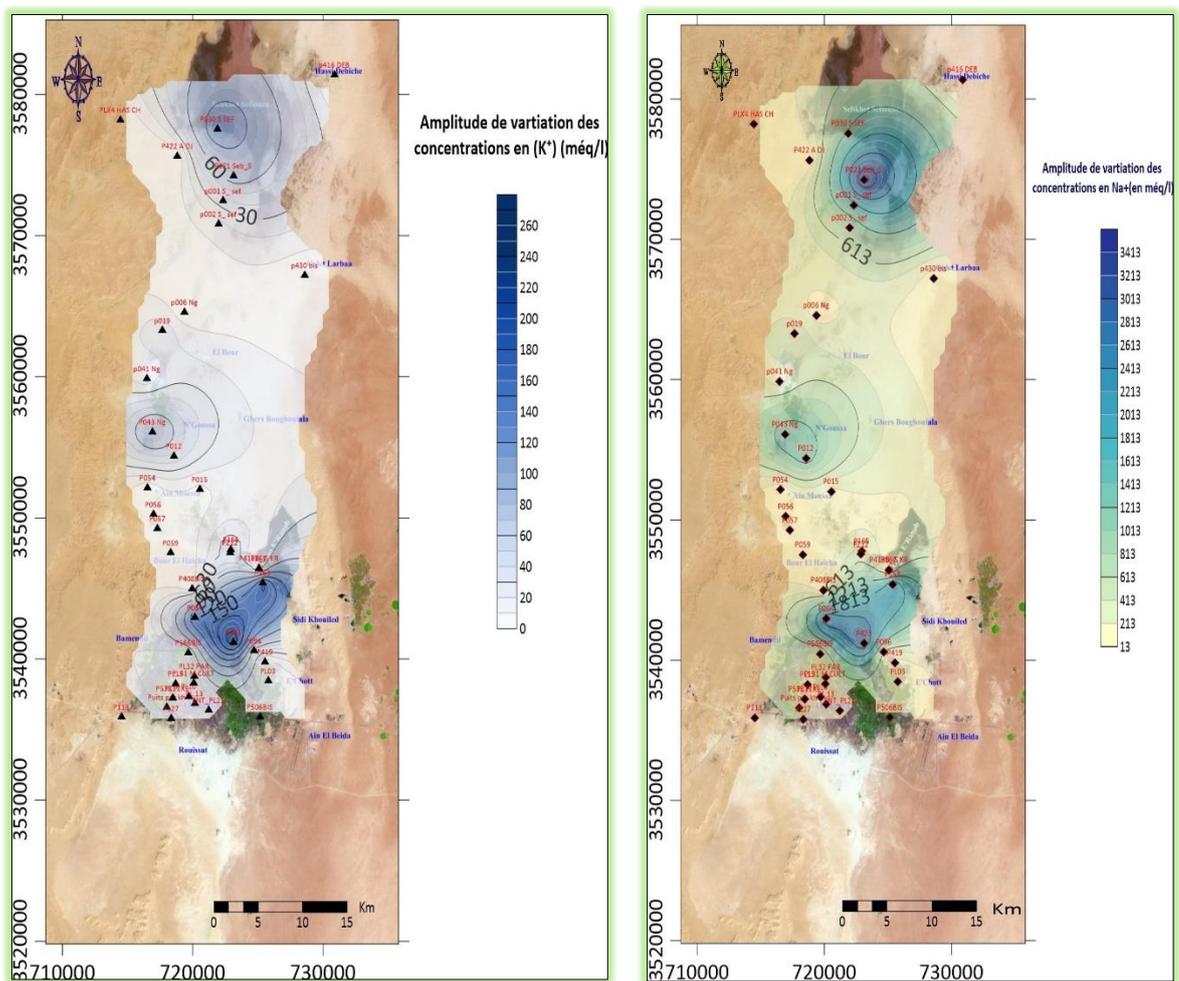


Figure 27: Cartes isovaleurs de répartition de potassium et de sodium(GOUDJIL 2024)

### IV.3. Classification des faciès géochimique des eaux

#### IV.3.1. Classification de Stabler :

La classification de Stabler utilise une formule ionique caractéristique qui exprime les quantités en réaction en pourcentage par rapport à la concentration totale (50% anions, 50% cations).

La formule est :  $r\% = (r * 100) / c$

Où :

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

Cette formule permet de calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale des anions ou des cations. Les ions sont ensuite classés par ordre décroissant de ces pourcentages pour obtenir la formule ionique caractéristique du faciès de l'eau.

Cette classification basée sur la composition ionique relative permet de caractériser les différents types d'eaux (bicarbonatées, sulfatées, chlorurées, etc.) et de les comparer.

Puis on classe de gauche à droite par ordre décroissant, les quantités en réaction en pourcent des anions et des cations pour obtenir des formules caractéristiques.

La classification de Stabler dans la Figure 21 nous montre qu'il y a

- ✚ *une dominance ionique* de sodium(Na) et les chlorures (Cl) dans la plus part des échantillons c'est-à-dire la dominance de faciès chloruré sodique ce qu'il suggère la dissolution de l'halite ou un autre évaporitiques riches en Na et Cl.
- ✚ *Variabilité des sulfates* (SO<sub>4</sub>) allant de faible a des teneurs considérables, cela peut indiquer que la source de sulfates est possiblement liées à la dissolution de gypse ou d'anhydrite dans certaines zones.
- ✚ *Des teneurs moindres des Ca et Mg* varient selon les échantillons, leurs présence est liée a la dissolution de calcaire, dolomie ou l'échange ionique avec les argiles.

- ✚ *L'alcalinité HCO<sub>3</sub> (bicarbonates)* est aussi présente mais avec des faibles proportions que on peut l'interpréter par une influence limitée des roches carbonatées.
- ✚ *Présences de Potassium (K)* en faibles quantités dans la plupart des échantillons Probablement issu de l'altération de minéraux silicatés ou d'argiles.

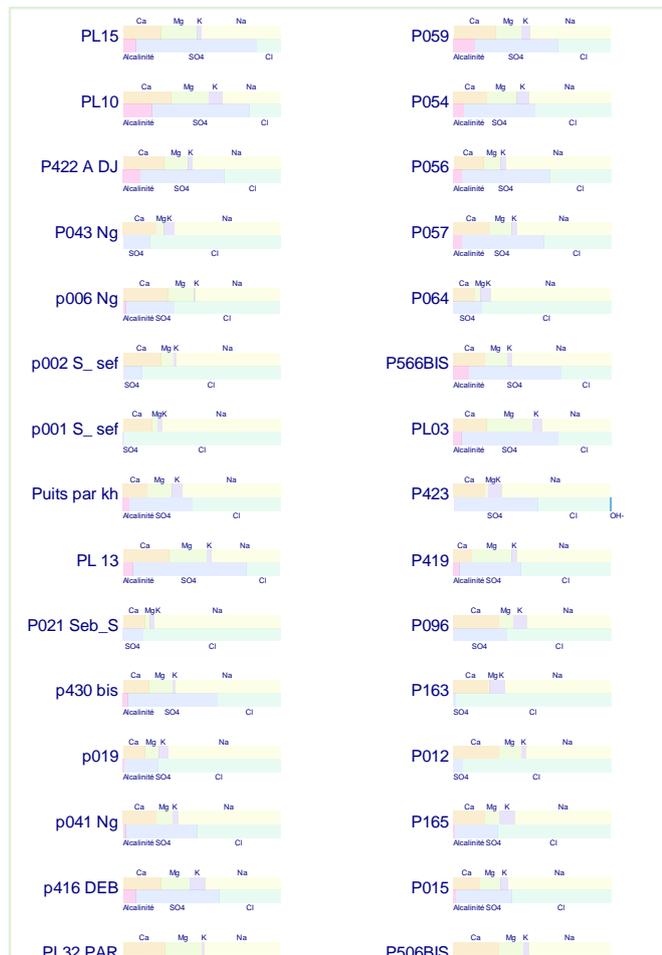


Figure 28: Diagramme de Stabler

### IV.3.2. Représentation graphique des faciès hydrochimiques (diagramme de piper) :

#### 4.1. Faciès chimiques et salinité

Les données hydrochimiques des eaux souterraines de l'aquifère phréatique permettent de déterminer les types d'eau, on rapportant ces données chimiques sur le diagramme de Piper (Piper, 1944) (Fig. 29). Le diagramme permet de classer les eaux souterraines dans la région d'étude en trois types d'eau :

- 1) Ca-Cl représente 20.45 %,

2) Ca-Mg-Cl représente 13.63 %

3) Na-Cl représente 65.92 %.

Cette classification montre la dominance des faciès évaporitiques et souligne les processus hydrogéochimiques qui contrôlent la forte conductivité des eaux de la nappe superficielle de la cuvette d'Ouargla, oscille entre de 2790 uS/cm à 169600  $\mu$ S/cm.

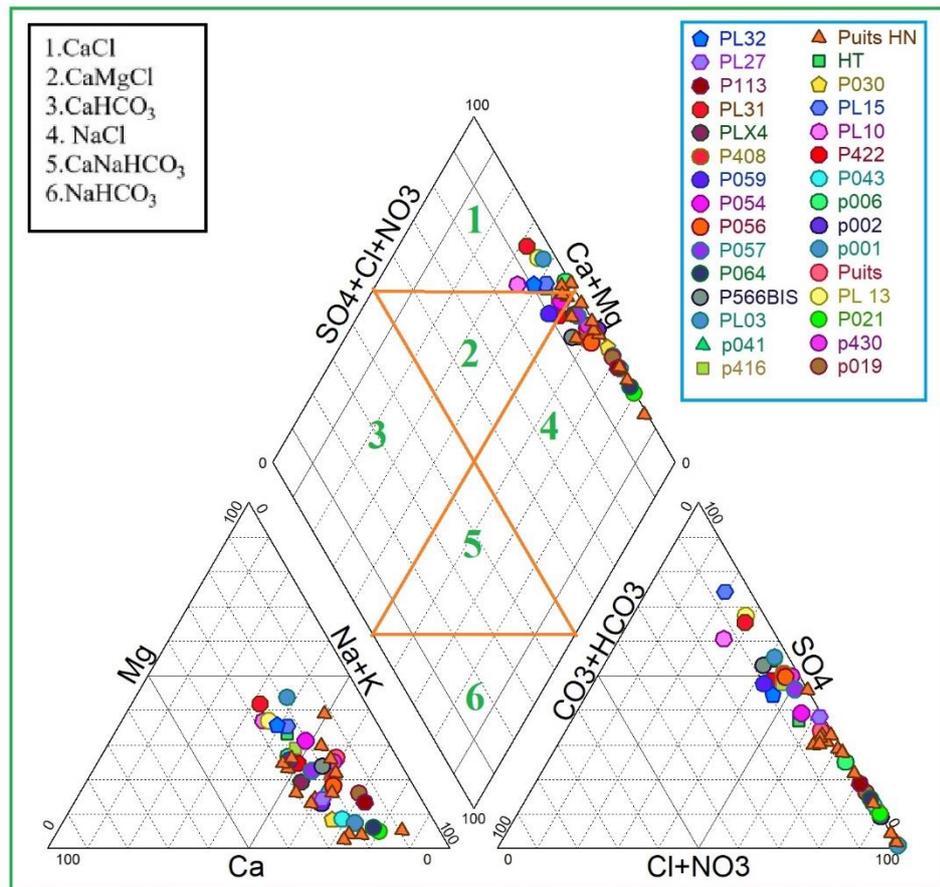
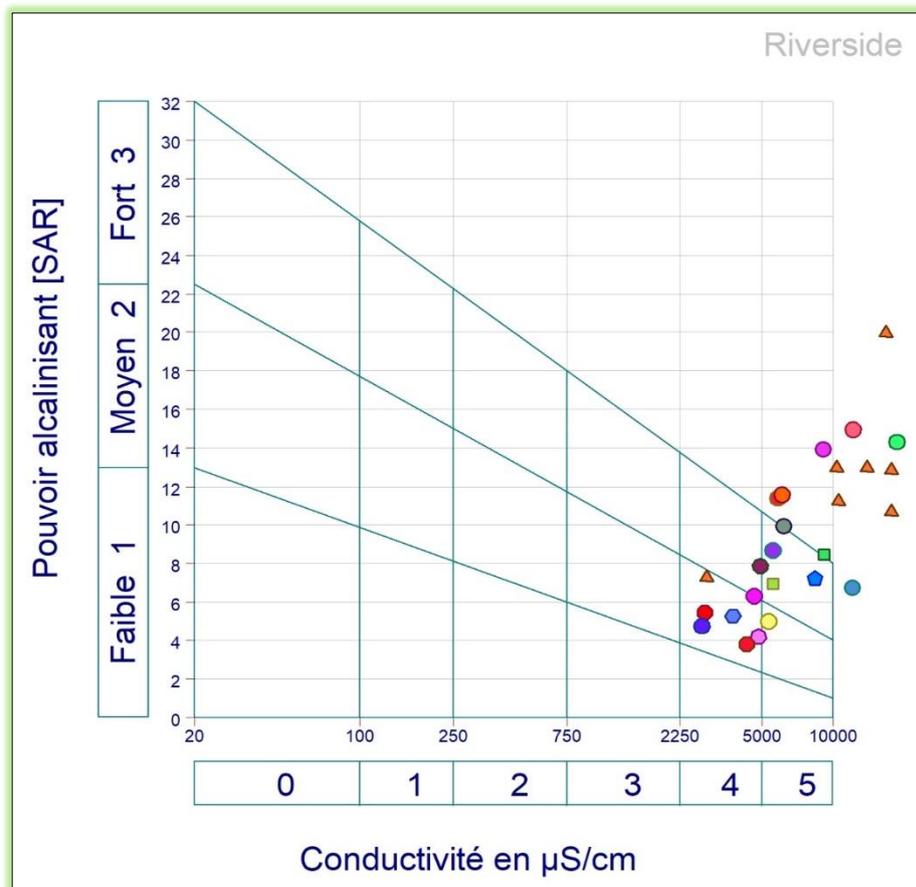


Figure 29: Diagramme de piper .

### IV.5.3 : Aptitude des eaux à l'irrigation

La qualité de l'eau d'irrigation est étroitement liée à sa salinité, principalement mesurée en termes de concentration de solides dissous totaux (TDS) et de conductivité électrique (EC). Les niveaux élevés de TDS et de CE dans l'eau d'irrigation peuvent avoir des répercussions néfastes sur la croissance des plantes. En fonction des types de sels présents dans l'eau, on peut estimer le TDS en mg/L ou ppm en multipliant la CE (uS/cm) par 0,64. Les sels contenus dans l'eau peuvent altérer la structure du sol, la perméabilité et l'aération, ce qui a un impact indirect sur

la croissance des plantes. Lorsque la concentration de solides dissous dans la zone racinaire augmente, les racines des plantes rencontrent des difficultés pour absorber l'eau et les nutriments, ce qui peut entraîner un ralentissement de la croissance, une faible production, une décoloration et même des brûlures de feuilles. La conductivité électrique (EC) de l'eau dans la région d'étude montre une grande variation, allant de 2790  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 169600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Selon la classification de Wilcox (1955), les eaux souterraines de la région sont classées comme impropre à l'irrigation du sol.



**Figure 30: Diagramme de Riverside**

Le Sodium Adsorption Ratio (SAR), introduit par Richards en 1954, est un paramètre essentiel pour évaluer la propension des ions sodium ( $\text{Na}^+$ ) à se lier au sol. Son calcul repose sur une équation spécifique suivante :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}}{\sqrt{\frac{\text{Ca} + \text{Mg}}{2}}}$$

Lorsque l'eau d'irrigation présente un SAR élevé, elle peut entraîner une accumulation accrue d'ions  $\text{Na}^+$  dans le sol, ce qui a pour effet de réduire le taux d'infiltration de l'eau en raison de la dispersion des particules du sol. De plus, des niveaux excessifs de SAR peuvent conduire à la formation de croûtes dans le sol et à une mauvaise aération. En fin de compte, un contenu élevé en sodium (SAR élevé) peut favoriser la formation de sols alcalins. Le SAR de l'eau d'irrigation joue un rôle crucial en tant qu'indicateur de la tendance des ions sodium à participer aux réactions d'échange d'ions. Lorsque l'eau souterraine contient un excès de sodium et est utilisée pour l'irrigation, les ions sodium peuvent être adsorbés aux sites d'échange d'ions dans la matrice du sol, libérant ainsi du calcium (Ca) et du magnésium (Mg). Cette réaction peut provoquer la dispersion des particules du sol et entraîner une diminution de la capacité d'infiltration du sol.

Les valeurs de SAR dans la région d'étude varient entre 3.81 et 166.41. Selon les classifications, les valeurs de SAR entre 0 et 10 sont considérées comme "excellentes", celles entre 10 et 18 sont qualifiées de "bonnes", celles entre 18 et 26 sont classées comme "douteuses", et celles supérieures à 26 sont considérées comme "non adaptées".

Dans cette étude, toutes les données montrent que les échantillons de la région d'étude se situent entre les classes "excellente" (3.81 %) mais la majorité des échantillons sont considérée comme " non adaptées " (166.41%) en termes de qualité d'irrigation.

<b>Richards (1954): classified the irrigation water based on SAR</b>			
	<b>SAR</b>	<b>Water quality</b>	<b>suitability for irrigation</b>
S1	<10	Excellent for irrigation	suitable for all type of crops and all soils except for those crops, which are sensitive to sodium
S2	10-18	Good for irrigation	suitable for coarse textured or organic soil with good permeability
S3	18-26	Doubtful for irrigation	harmful for almost all type of soil, requires good drainage, high leaching gypsum addition
S4	>26	Unsuitable for irrigation	unsuitable for irrigation

**Tableau 4: classification d'eau d'irrigation selon SAR Richards (1954)**

Les valeurs du SAR et de la conductivité électrique sont tracées sur le diagramme du Richard (1954). Selon le diagramme de la figure 30, les échantillons d'eau souterraine de la zone d'étude peuvent être classés en deux catégories distinctes :

**\*C4-S4 et C4-S3** - indiquant des risques de salinité élevée et d'alcalinité très élevée. Ces types d'eau ne sont pas recommandés à des fins d'irrigation avant des pratiques de traitement et de gestion adéquates.

**\*C4-S2** indiquant les risques de salinité élevée et d'alcalinité moyenne.

#### **IV.4 : Etude des relations inter-éléments**

L'étude des rapports caractéristiques entre différents éléments chimiques dans les eaux souterraines est effectivement un moyen courant pour déterminer leur origine géologique

##### **IV.4.1. Relation Cl et Na :**

##### **IV.4.2 Origine de la minéralisation des eaux de l'aquifère superficiel**

La principale origine du chlorure dans l'eau découle de la dissolution du chlorure de sodium, présent dans l'halite ou l'eau de mer. Le sodium peut également avoir d'autres provenances, comme la dissolution de l'albite-plagioclase ou l'altération des roches silicatées. Le rapport de  $Na^+/Cl^-$ , devrait être égal à 1 si la dissolution des halites est le processus géochimique prédominant dans l'aquifère  $NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$ .

Un rapport  $Na^+/Cl^-$  supérieur à 1 permet de suggérer que le sodium provient d'autres processus, tels que l'altération des silicates (Jamshidzadeh 2021). Néanmoins, comme illustré dans la figure 31, la plupart des points de données se regroupent le long de la ligne de dissolution de l'halite (1:1), indiquant ainsi que la source principale de sodium est la dissolution de l'halite.  $NaCl \rightarrow Na^+ + Cl^-$ .

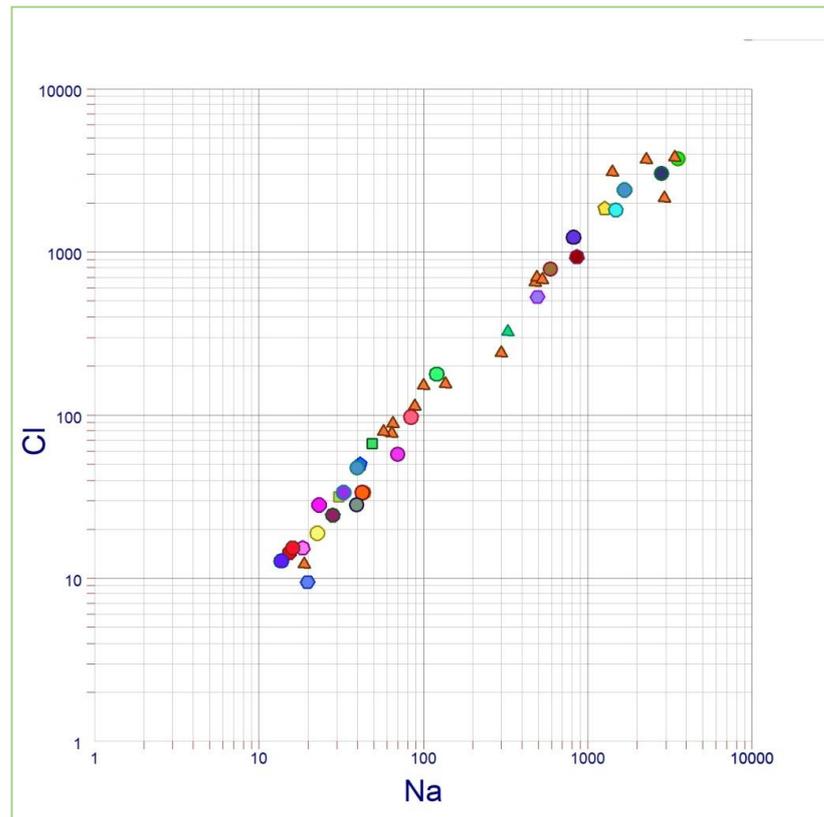
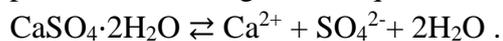


Figure 31: La relation Chlorures-sodium dans les eaux en (méq/l)

#### IV.4.3 : Relation $\text{SO}_4$ - Ca :

Le diagramme de variation du calcium par rapport au sulfate, généré à partir de l'analyse des échantillons, révèle le rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$  égale presque à 1 (Figure 32). On constate que la source la plus possible de sulfate et de calcium dans les eaux souterraines de l'aquifère de étudié est le gypse, comme suggérée  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{SO}_4^{2-} + 2\text{H}_2\text{O}$ . Il est important de noter que ce déséquilibre en calcium peut résulter de divers facteurs. Parmi ceux-ci, on peut citer le processus d'échange cationique.



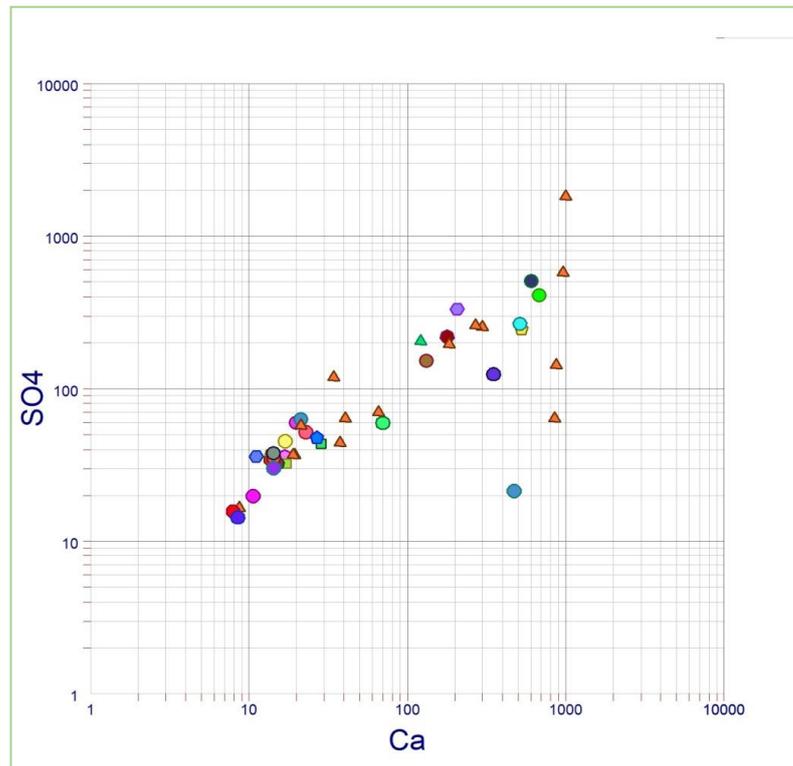


Figure 32 :La relation sulfates-Calcium dans les eaux en (még/l)

#### IV.4. Relation (SO /Cl -Conductivité) : $r=0.54$

Ce graphique représente la relation entre la conductivité en  $\mu\text{s}$  et le rapport ( $\text{SO}_4^- / \text{Cl}^-$ ) avec une ligne de tendance qui décroît progressivement, plus la conductivité s'augmente, plus

le ratio  $\text{SO}_4/\text{Cl}$  tend à diminuer (Relation inverse) due à précipitation des sulfates (gyps) qui sont moins soluble que les chlorures (halite).

La corrélation négative montre que la minéralisation exprimée par la conductivité est conduite par ( $\text{SO}_4^- / \text{Cl}^-$ ) les chlorures par rapport aux sulfates.



Point d'eau	I.E.B	Point d'eau	I.E.B
P030 SEBKHET SEFIOUNE	0.24	P096	0.19
PL15	-1.17	P163	0.33
PL10	-0.38	P012	0.53
P422 AINE DJEMEL	-0.11	P165	0.23
P043 Ngoussa	0.13	P015	0.08
p006 ngoussa	0.32	P506BIS	0.30
p002 ebkhat sefioune	0.31	P413BIS G KRIMA	0.24
p001 sebkhat sefioune	0.29	P162	0.04
puits parc khemgani	0.09	PZ12	0.17
PL 13	-0.25	ENTVPL21	0.13
P021 Sebkat s	0.03	PL17	0.25
p430 bis	-0.23	P538 PLX2	-0.30
p019	0.20	P059	-0.15
p041 n'goussa	-0.04	P054	0.11
p416 DEBBICHE	-0.08	P056	-0.31
PL32 PARAMEDICAL	0.15	P057	0.00
PL27	0.03	P064	0.01
P113	0.05	P566BIS	-0.43
PL31 M CULTURE	-0.10	PL03	0.08
PLX4 HASSI CHEGA	-0.21	P423	-0.47
P408BIS	-0.33	P419	0.20

**Tableau 5 : L'indice d'échange de base dans les eaux de la nappe phréatique**

### IV.5.2 : Rapports caractéristiques

L'étude des variations de certains rapports entre les concentrations des ions majeurs dans l'eau permet d'obtenir des informations précieuses :

1. Retracer l'évolution de la composition chimique de l'eau au cours de son écoulement souterrain et de ses interactions avec l'environnement géologique.
2. Identifier les zones de recharge et les cheminements empruntés par les eaux souterraines.
3. Les trois principaux rapports ioniques étudiés sont :
  1.  $r_{Ca^{2+}/Mg^{2+}}$  : Rapport des concentrations en calcium et magnésium
  2.  $r_{SO_4^{2-}/Cl^-}$  : Rapport des concentrations en sulfates et chlorures
  3.  $r_{(Na^+ + K^+)/Cl^-}$  : Rapport de la somme des concentrations en sodium et potassium sur celle des chlorures

$r$  : représente la concentration en milliéquivalents par litre pour chaque ion.

L'analyse de ces rapports caractéristiques permet de suivre l'évolution de la chimie de l'eau lors de son trajet souterrain et de ses interactions avec les formations géologiques.

Les valeurs numériques de ces trois rapports, calculées pour les eaux de la région de Ouargla, sont regroupées dans le Tableau suivant :

Point d'eau	$r_{Ca^{2+}/Mg^{2+}}$	$r_{SO_4^{2-}/Cl^-}$	$r_{(Na^+ + K^+)/Cl^-}$
puits hassi nagga	1.82291667	1.375968992	1.62069819
hotel transat	0.71623037	0.653947368	0.76196585
P030 SEBKHAT SEFIOUNE	3.00142925	0.13369391	0.75723287
PL15	0.63601715	3.808302239	2.17244713
PL10	0.75140187	2.36255787	1.37659792
P422 AINE DJEMEL	1.01372756	1.107178218	1.11072442
P043 Ngoussa	2.65429435	0.148499016	0.87301723
p006 ngoussa	0.99431818	0.337508267	0.68240962

p002 ebkhat sefioune	1.93014706	0.102011494	0.68776445
p001 sebkhat sefioune	2.69886364	0.008918505	0.71409732
puits parc khemgani	0.56597938	0.535929952	0.91398462
PL 13	0.70636833	2.400886194	1.24887061
P021 Sebkhata s	3.05442429	0.109256629	0.97159978
p430 bis	0.65111232	1.037220528	1.23041956
p019	0.90649943	0.193224474	0.8015248
p041 n'goussa	1.25641026	0.633469203	1.04381804
p416 DEBBICHE	0.80859375	1.018981481	1.08175399
PL32 PARAMEDICAL	0.6893617	0.958333333	0.84762542
PL27	1.69636737	0.626180556	0.96793237
P113	1.06358209	0.233552632	0.94896983
PL31 M CULTURE	0.61913696	2.263946759	1.09718145
PLX4 HASSI CHEGA	1.4296875	1.340253623	1.21385876
P408BIS	0.9375	1.10812991	1.32760718
P059	1.0625	1.130740741	1.15277158
P054	0.64687976	0.698166667	0.89496014
P056	1.09475032	1.058326319	1.31461493
P057	1.02071006	0.902690095	1.00353404
P064	2.69625825	0.167615849	0.98611728
P566BIS	0.83496094	1.33125	1.4273612
PL03	0.42396694	1.335665423	0.91732109
P423	5.63909774	0.846628289	1.47208458
P419	0.2946921	0.509899068	0.80175817
P096	1.86239007	0.389672939	0.80629398
P163	10.2	0.017351763	0.6692059
P012	1.22093023	0.046223958	0.47175028
P165	1.30295858	0.280145202	0.7714593

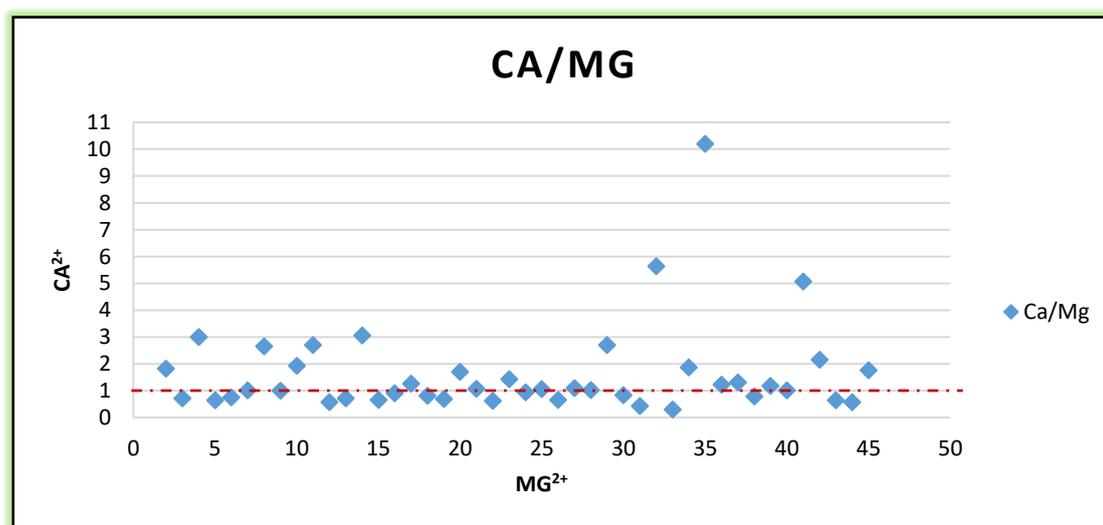
P015	0.78644501	0.411880682	0.91835158
P506BIS	1.17060213	0.466559579	0.69502756
P413BIS G KRIMA	1.0078125	0.498925265	0.76114146
P162	5.07023705	0.150655864	0.96393369
PZ12	2.15287049	0.387216405	0.83388024
ENTVPL21	0.63483451	0.474140152	0.86806081
PL17	0.57246196	0.465673363	0.75429726
P538 PLX2	1.76170213	0.492017544	1.29991003

Tableau 6: des rapports caractéristiques.

#### IV.5.2.1 Rapports $rCa^{2+}/rMg^{2+}$ :

D'après le graphique ci-dessous on remarque que la majorité des points d'eau, où  $rCa^{2+}/rMg^{2+} < 1$  et proche de 1, montrent la prédominance du magnésium. Cela est lié à la dissolution de calcite et dolomite ( $CaMg(CO_3)_2$ ).

Certain points celles ont des valeurs de  $rCa^{2+}/rMg^{2+} > 1$  ce qui suggère une prédominance de calcium  $Ca^{2+}$  qui précipite à cause de l'évaporation intense.

Figure 34: rapport ionique  $rCa^{2+}/rMg^{2+}$

### IV.5.2.2 Rapports $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$ :

Le plus part des points ont des valeurs de  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^- < 1$  ce qu'il indique que le  $\text{Cl}^-$  est prédomine.

On justifie cette dominance par le lessivage des terrains salifères et les chlorures sont caractérisés par une forte solubilité par rapport aux sulfates.

Certain points ont des valeurs de  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^- > 1$  ce qui suggère une prédominance des sulfates cela implique la prédominance des sulfates liée au lessivage des terrains gypseux.

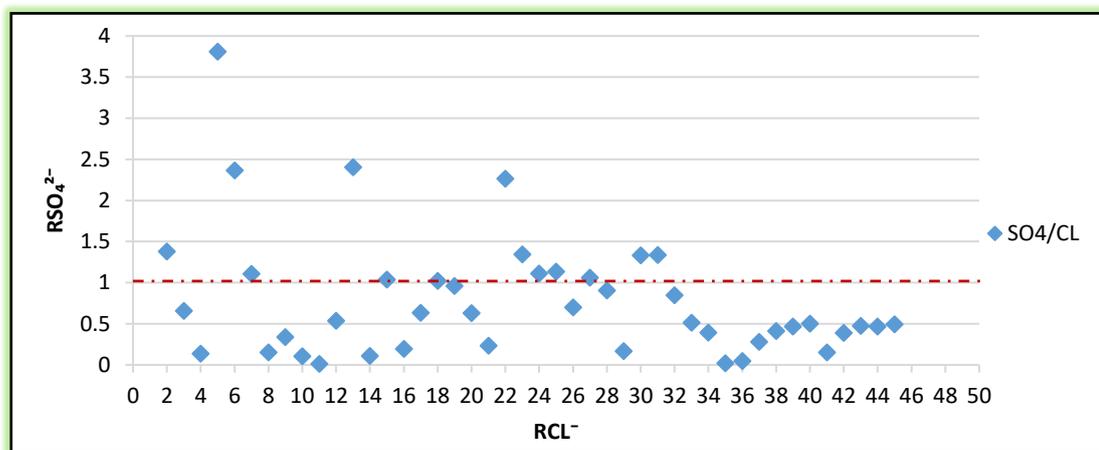


Figure 35: Rapports ionique  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$

### IV.5.2.3 Rapports $r(\text{Na}^++\text{K}^+)/r\text{Cl}^-$ :

Points d'eau avec  $r(\text{Na}^++\text{K}^+)/r\text{Cl}^- < 1$  indiquent une prédominance des ions chlorure ( $\text{Cl}^-$ ) Cette prédominance peut être attribuée à :

- La présence de terrains salifères riches en chlorures.
- L'influence des argiles qui peuvent libérer des chlorures.

Points d'eau avec  $r(\text{Na}^++\text{K}^+)/r\text{Cl}^- > 1$ , montrent une prédominance du sodium et du potassium par rapport aux chlorures. Cette prédominance est principalement liée à :

- Le lessivage des terrains salifères, en particulier ceux contenant du chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ).
- Ce processus libère plus de sodium dans l'eau que de chlorures, augmentant ainsi le ratio  $r(\text{Na}^++\text{K}^+)/r\text{Cl}^-$ .

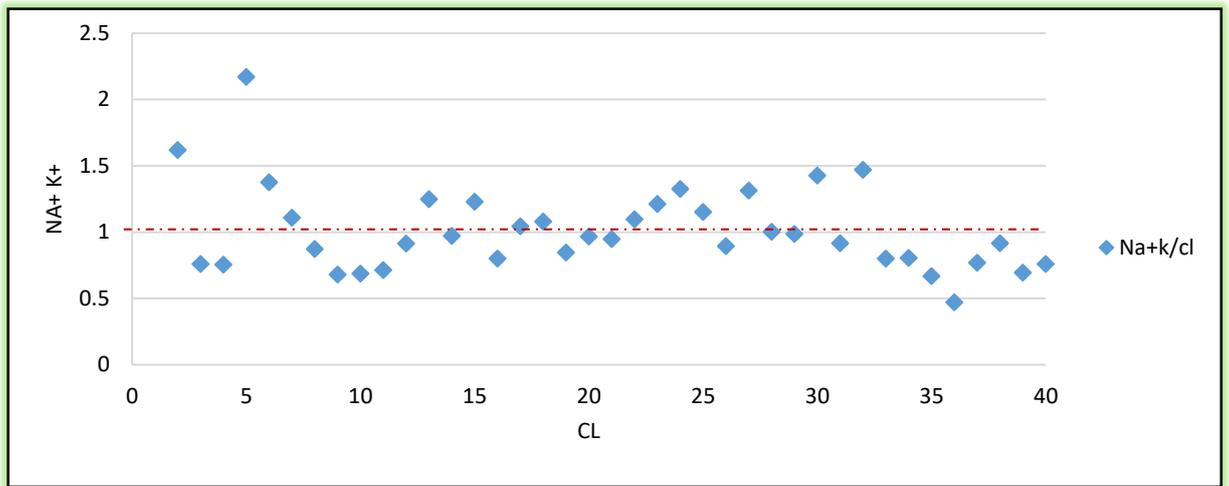


Figure 36 : Rapports ionique de  $r(\text{na}^+ + \text{k}^+)/\text{rcl}$  dans les eaux de la nappe phriatique.

#### IV.5.2.4 L'indice de saturation :

Les résultats des indices de saturation obtenus à l'aide du logiciel PHREEQC sont regroupés sur la figure 37. Cependant, les eaux souterraines sont saturées par rapport à la calcite, l'aragonite et la dolomite. Les minéraux sulfatés montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés (dans de saturation)

L'anhydrite présente un indice de la saturation varie entre -1 et +2.17.

Le gypse enregistre un indice de la saturation varie de -0,78 à +2,26 (45.23% d'échantillons sont en état de saturation).

Enfin l'halite donne l'indice de la saturation varie de -5,51 à -0,24 (donc il est sous-saturé).

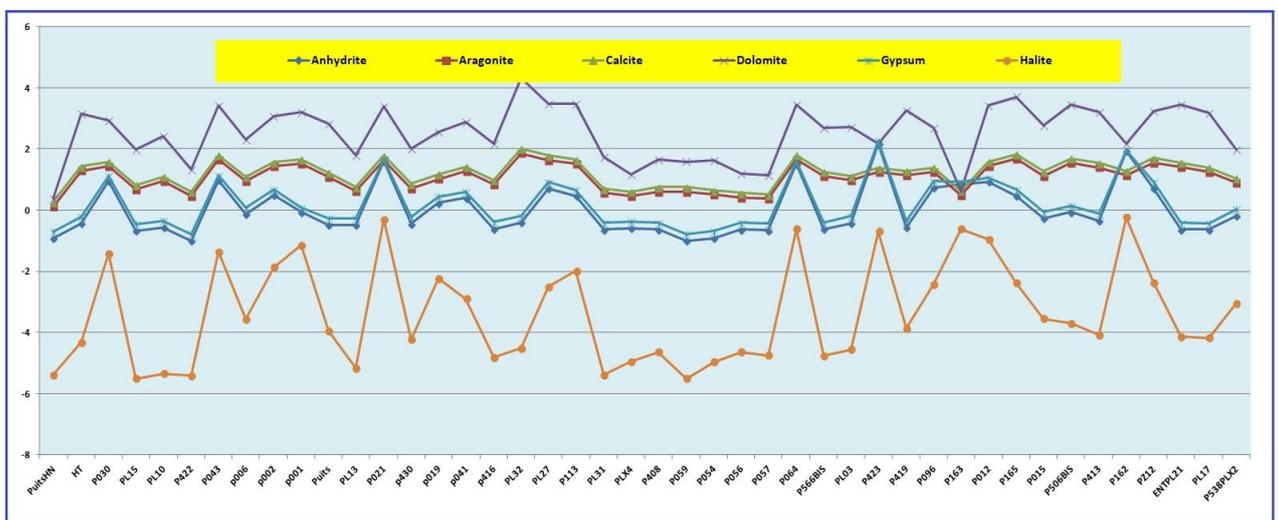


Figure 37: Indice de saturation des minéraux.

# Conclusion

**Conclusion :**

Les eaux souterraines de la région de Ouargla présentent une minéralisation importante, caractérisée par une conductivité électrique très élevée. Cette salinité résulte de la dissolution des formations géologiques et d'une évaporation intense. Les paramètres analysés comprennent le pH, la conductivité électrique (EC), UI, et les ions  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  et  $\text{HCO}_3^-$ . L'évaluation de la potabilité a été réalisée selon les normes de l'Organisation mondiale de la santé (WHO, 2017). Les résultats indiquent que les eaux sont non potables car elles sont fortement minéralisées, très dures, et les concentrations des éléments majeurs dépassent souvent les normes recommandées par l'OMS, nécessitant ainsi un traitement avant utilisation.

En ce qui concerne la qualité de l'eau pour l'irrigation, selon les normes de Riverside (1954), les eaux de l'aquifère superficiel d'Ouargla présentent des valeurs de SAR excellente à non adaptées et mauvaise. L'étude hydrochimique, incluant le diagramme de Piper et les diagrammes binaires entre les éléments majeurs, ainsi que les calculs des indices de saturation des principaux minéraux et l'indice d'échange de base, a permis de classer les échantillons d'eau en deux groupes principaux : Ca-Mg-SO<sub>4</sub>-Cl et Na-Cl. Les processus géochimiques identifiés dans l'aquifère incluent principalement la dissolution de la halite et du gypse, les échanges de base entre l'eau et les minéraux argileux, ainsi que les apports anthropiques

### Références bibliographiques

- ANRH OUARGLA** Agence Nationale des Ressources Hydrauliques Ouargla.
- Castany G (1982)** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition: DUNOD, Paris. 233p.
- Cornet A (1964)** Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géog. Phys. et Géol. Dyn., vol. VI, fasc. 1,5: 72.
- Cornet, A. & Gouscov, N.** 1952. Les eaux de Crétacé inférieur continental dans la Sahara algérien (nappe dite "Albien"). In: "La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie". 19<sup>ème</sup>. Congrès géologique international. T. II, 30p.
- Cornet, A.** 1961. Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger, 108p.
- Dubief (1953)** Le climat du Sahara. Mém. Hors série. Ins. Rech. Sahara, 275 p
- GUENDOOUZ. A.** (1985). Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara nord-est septentrional, Algérie. Thèse Univ. Paris-Sud, Orsay, France
- Guendouz A (1985)** Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est septentrional, Algérie. Thèse Doct. 3ème cycle, Univ. Paris XI, 243 p.
- Guendouz A, Moulla A S, Edmunds W M, Shand P, Poole J, Zouari K, Mamou A (1997)** Palaeoclimatic contained in groundwaters of the Grand Erg Oriental, N.Africa. In: Isotope Techniques in the Study of Past and Current Environmental Changes in the Hydrosphere and Atmosphere. IAEA, Vienna, pp. 555–571.
- Hadj-Kouider M (2019)** Géochimie et minéralogie des formations et des eaux de la nappe superficielle d'Ouargla. Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla
- Hammad N, Bouselsal B, Boussaada N, Satouh A, Lakhdari AS (2023)** Application of Water Quality Index to Assess the Potability of the Phreatic Aquifer in Ouargla (Algeria). Ecological Engineering and Environmental Technology 2023, 24(5), 36–45. <https://doi.org/10.12912/27197050/163122>
- HAMDI-AÏSSA, B. & GIRARD, M. C.** 2000. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes, pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages. Sécheresse 3: 179-188.
- HAMDI-AÏSSA, B.** 2001. Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord Sahara (cuvette de Ouargla). Thèse Doct. Paris-Grignon, 307 p.
- Idder, T.** 1998. La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et technique de remédiations proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse Doct., Université d'Angers, 284p

## Références bibliographiques

---

- Kerdjidj MK, Trichet J & Benrabah B (1995)** Les variations paléogéo-thermiques dans la dorsale d'Amguid - El - Biod - Hassi Messaoud (Régions de Gassi Touil et de Rhourde-Nouss, Sahara central, Algérie). Volume 6, n° 2, (1995) – 237
- KHARROUBI M 2024** : Etude hydrogéochimique et gestion de l'aquifère de Complexe Terminal de la cuvette d'Ouargla (SE Algérie Université Kasdi Merbah –OUARGLA
- Lelievre RF (1969)** Assainissement de la cuvette d'Ouargla. Ministère des travaux publique et la construction. Rapport Géohydraulique n°02, p18
- NEZLI, IE., 2009** Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée del'Oued M'ya (Ouargla). Thèse de Doctorat. Univ. Kasdi Merbah-Ouargla, 148p
- NEZLI, I.E. 2004.** Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de lanappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla), Mémoire de Magistère, univ, Annaba,
- OMS (2011)** Directives de qualité pour l'eau de boisson, 4e édition. Organisation
- OSS (Observatoire Sahara et Sahel) (2003)** Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.
- Paul Ozenda** : Flore du Sahara, 2<sup>e</sup> éd (revue et complétée).- 622 p., 176 + 60 fig. au trait, 16 pl. ph. h. t., 1 carte h.t., Editions du Centre national de la recherche scient(ifique. paris, 1977
- Piper A M (1944)** Graphical interpretation of water analysis, Transactions of the American Geophysical Union. 25:914 -923.
- UNESCO (1972)** Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. (7 vols. et annexes). UNESCO, Paris, France.
- MONOD, T. 1992.** Du désert. Sécheresse 3(1): 7-24.
- Richards LA (1954)** Diagnosis and improvement of saline alkali soils. Washington, DC: US Department of Agriculture, Handbook no. 60.
- Satouh, A., Bouselsal, A., Chellat, S., Benaabidate, L. 2021.** Determination of Groundwater Vulnerability Using the DRASTIC Method in Ouargla Shallow Aquifer (Algerian Sahara). Journal of Ecological Engineering 2021, 22(6), 1–8. <https://doi.org/10.12911/22998993/137680>.
- Schoeller, H. (1965).** Qualitative evaluation of groundwater resources. Methods and Techniques of Groundwater Investigations and Development; UNESCO: Paris, France, Volume 5483.

## Références bibliographiques

---

**Wilcox L.V. 1955.** The quality of water for irrigation use. US Dept. of Agric. Tech Bull. 1962, Washington, DC.

**World Health Organization. (2017).** Guidelines for drinking-water quality: first addendum to the fourth edition.