



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE
POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie des Procédés

Mémoire fin d'études

MASTER 2

Domaine : Science et Technologie

Filière : Génie des Procédés

Spécialité : Génie des Procédés de l'Environnement

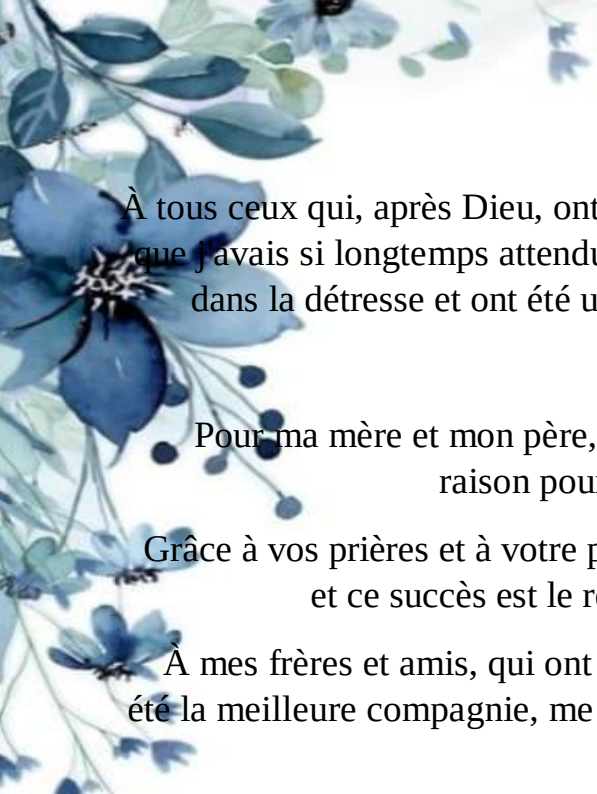
Présenté par :

Bensacia Ahllam et Debbakh Samira

Évaluation de la qualité des eaux souterraines et leur vulnérabilité à la pollution minérale dans le bassin aride de Touggourt: implications pour une utilisation durable de l'eau

Ben Abdessalem Soulef	M.C.B(UKM Ouargla)	Présidente
HadjiWarda	M.C.B (UKM Ouargla)	Examinatrice
CHAOUKI Mourad	Professeur(UKM Ouargla)	promoteur

Année universitaire :2025/2026



Dédicace

À tous ceux qui, après Dieu, ont été reconnus pour m'avoir fait atteindre ce moment que j'avais si longtemps attendu, et qui m'ont soutenu dans la faiblesse, m'ont aidé dans la détresse et ont été une lumière qui m'a accompagné à chaque pas...

Pour ma mère et mon père, vous êtes le début à partir duquel je suis parti et la raison pour laquelle j'en suis aujourd'hui.

Grâce à vos prières et à votre patience, j'ai appris à continuer malgré les difficultés, et ce succès est le résultat de vos dons et de vos sacrifices.

À mes frères et amis, qui ont partagé avec moi les détails de ce voyage, et ils ont été la meilleure compagnie, me soulageant de ses épreuves et rendant ses moments plus beaux...

À tous ceux qui m'ont appris une lettre, contribué à bâtir ma carrière scientifique et laissé un impact positif sur ma vie, vous avez mes sincères remerciements et appréciations.

Je vous dédie cette remise de diplômes, fruit d'années d'efforts et de persévérance, en espérant auprès de Dieu que ce sera le début d'un chemin plus large et d'un avenir meilleur, si Dieu le veut.

AHLLAM BENSACI





Dédicace

Je dédie à Dieu, par amour, gratitude et reconnaissance, pour le début comme pour la fin de ce parcours, qui fut rempli de défis et de difficultés, mais que j'ai surmontés avec patience, détermination et confiance en Dieu.



Je dédie cette réussite à moi-même, en reconnaissance de ma force, de ma patience et de ma persévérance malgré toutes les épreuves.

À mon cher père, mon soutien et mon modèle, merci pour ton encouragement et ton soutien permanents. Que Dieu te protège pour nous.

À ma chère mère, **رحمها الله** qui attendait ce jour avec impatience. Ton souvenir et tes prières continuent de me donner la force, et cette réussite est le fruit de ton amour et de tous les sacrifices pour moi.

J'adresse également toute ma reconnaissance et mon affection à mes chers frères et sœurs, ainsi qu'à toutes les personnes qui m'ont soutenue et accompagnée.

Je prie Dieu de me guider et de faire que ce que j'ai appris me soit bénéfique.

Debbakh Samir





Remercier

Je remercie Dieu Tout-Puissant de m'avoir accordé la patience, le courage et la force nécessaires pour surmonter les différentes difficultés rencontrées tout au long de mon parcours universitaire.

J'adresse mes sincères remerciements et ma profonde reconnaissance à mon encadreur, le professeur chaouki Mourad, pour sa précieuse supervision, ses conseils avisés ainsi que son suivi continu durant la réalisation de ce travail.

Je tiens également à remercier Algérienne des Eaux, notamment Lamnour Ben Aouar et Awatef Belkhal, pour leur coopération, leur disponibilité et les facilités accordées dans l'élaboration de cette étude.

Mes remerciements vont également à Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, représentée par Saleh Benguega, pour son soutien ainsi que pour les informations et données mises à ma disposition.

Je ne peux manquer d'exprimer ma profonde gratitude à ma chère famille, en particulier à mes parents, qui ont toujours été mon véritable soutien grâce à leurs prières, leurs encouragements et leurs sacrifices.

J'adresse enfin mes remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail et à l'aboutissement de ce mémoire.



ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة المياه الجوفية ومدى تعرضها للتلوث المعدني في الحوض الجاف لمنطقة تقرت، من خلال دراسة الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمياه الجوفية. وقد تم أخذ 10 عينات من مناطق مختلفة داخل منطقة الدراسة، حيث شملت التحاليل قياس الأس الهيدروجيني، الناقلية الكهربائية، وبعض الأيونات الرئيسية مثل الكالسيوم، المغنيسيوم، الصوديوم، الكلوريدات، الكبريتات والنترات.

أظهرت النتائج وجود تباين مكاني في خصائص المياه الجوفية وارتفاع درجة التمدن في بعض المناطق نتيجة الظروف المناخية الصحراوية وتأثير الأنشطة البشرية، خاصة النشاط الزراعي والاستغلال المفرط للمياه الجوفية. كما سمحت الدراسة الهيدروكيميائية، باستعمال مخططات Piper و Schoeller و Stabler، بتحديد الوجوه الكيميائية السائدة للمياه وفهم تطورها المكاني.

وقد بين مؤشر التلوث المعدني (IPM) وجود مناطق بدرجات متفاوتة من التلوث المعدني، حيث سجلت بعض المناطق مستويات مرتفعة من التمدن قد تؤثر على صلاحية المياه للاستعمالات المختلفة. كما أظهرت النتائج أن أعلى قيم مؤشر التلوث المعدني سُجلت بالقرب من النقاط لمقارين 1 وزاوية العابدية ومركز ADE، في حين سُجلت أدنى القيم عند عين الصحراء سيدي مهدي، مما يعكس تفاوتاً واضحاً في درجة التلوث المعدني داخل منطقة الدراسة. لذلك توصي الدراسة بضرورة المراقبة الدورية لنوعية المياه وترشيد استغلال الموارد المائية لضمان استدامتها مستقبلاً.

الكلمات المفتاحية

تقرت , المياه الجوفية، جودة المياه، التلوث المعدني، الخصائص الفيزيائية والكيميائية، مؤشر التلوث المعدني

Abstract :

This study aims to evaluate groundwater quality and its vulnerability to mineral pollution in the arid basin of Touggourt through the investigation of the physicochemical characteristics of groundwater. 10 water samples were collected from different areas within the study region. The analyses included the measurement of pH, electrical conductivity, and major ions such as calcium, magnesium, sodium, chlorides, sulfates, and nitrates.

The obtained results showed spatial variations in groundwater characteristics and an increase in mineralization levels in certain areas due to Saharan climatic conditions and the impact of human activities, particularly agriculture and the overexploitation of groundwater resources. The hydrogeochemical study, based on Piper, Schoeller, and Stabler diagrams, helped identify the dominant chemical facies and understand their spatial evolution.

The Mineral Pollution Index (IPM) revealed the presence of areas with different levels of mineral pollution, with some zones showing high mineralization levels that may affect water suitability for various uses. The results also indicated that the highest IPM values were recorded near points Megarine1, Zaouia El Abidia, and ADE Center, whereas the lowest values were observed at points Ain Sahara and Sidi Mehdi, reflecting significant spatial variation in the degree of mineral pollution across the study area. Therefore, regular monitoring of water quality and rational management of water resources are recommended to ensure their long-term sustainability.

Keywords :

Touggourt, groundwater, water quality, mineral pollution, physicochemical characteristics, Mineral Pollution Index .

Résumé :

Cette étude vise à évaluer la qualité des eaux souterraines et leur vulnérabilité à la pollution minérale dans le bassin aride de Touggourt, à travers l'étude des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines. 10 échantillons d'eau ont été prélevés dans différentes zones de la région d'étude. Les analyses ont porté sur le pH, la conductivité électrique ainsi que certains ions majeurs tels que le calcium, le magnésium, le sodium, les chlorures, les sulfates et les nitrates.

Les résultats obtenus ont montré une variation spatiale des caractéristiques des eaux souterraines ainsi qu'une augmentation du degré de minéralisation dans certaines zones, en raison des conditions climatiques sahariennes et de l'impact des activités humaines, notamment l'agriculture et la surexploitation des eaux souterraines. L'étude hydrogéochimique, réalisée à l'aide des diagrammes de Piper, Schoeller et Stabler, a permis d'identifier les faciès chimiques dominants et de comprendre leur évolution spatiale.

L'indice de pollution minérale (IPM) a révélé l'existence de zones présentant différents degrés de pollution minérale, certaines enregistrant des niveaux élevés de minéralisation susceptibles d'affecter l'aptitude des eaux à différents usages. Les résultats ont également montré que les valeurs les plus élevées de l'IPM ont été enregistrées à proximité des points Megarine1, Zaouia El Abidia et Center ADE, tandis que les valeurs les plus faibles ont été observées aux points Ain Sahara et Sidi Mehdi, traduisant ainsi une variation spatiale importante du niveau de pollution minérale dans la région d'étude. Par conséquent, un suivi régulier de la qualité des eaux et une gestion rationnelle des ressources hydriques sont recommandés afin d'assurer leur durabilité à long terme.

Mots-clé

Touggourt, eaux souterraines, qualité des eaux, pollution minérale, caractéristiques physico-chimiques, indice de pollution minérale (IPM).

Liste des tableaux:

Partie I : Synthèse Bibliographique	Page
Tableau 1: Les subdivisions administratives et locales de la région de Touggourt	05
Tableau2: Données climatiques de la région de Touggourt	08
Partie II: Partie pratique	
Tableau 1:les forages d'étude	28
Tableau 2: Les normes algériennes et OMS de l'eau potable	
Tableau 3: classement de l'indice de pollution (IPM)	37
	50

Liste des Figures:

PARTIE I :Synthèse Bibliographique		Page
Chapitre I :Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de la région deTouggourt		
Figure I.1	Situation géographique de la région de Touggourt	06
Figure I.2	Variation mensuelle moyenne de la température	09
Figure I.3	Variation mensuelle moyenne d'insolation	09
Figure I.4	Variation mensuelle moyenne de la précipitation	10
Figure I.5	Variation mensuelle moyenne du vent	10
Figure I.6	Variation mensuelle moyenne d'évaporation	11
Figure I.7	Coup hydrogéologique de SASS	12
Chapitre II : Généralités sur la pollution de l'eau		
Figure II. 1	Molécule de l'eau	15
Figure II .2	Les eaux souterraines	16
Figure II .3	Le cycle de l'eau	17
Figure II .4	Les états de l'eau	18
Figure II .5	l'eau dans le corps humain	20
Figure II .6	Pollution domestique	22
Figure II .7	Pollution industrielle	23
Figure II .8	La pollution agricole	24
Partie II : Partie pratique		
Chapitre III : résultats et analyse		
Figure III. 1	Carte d'inventaire des points d'eau	28
Figure III. 2	Thermometer	29
Figure III .3	pH- mètre	29
Figure III .4	Conducti-mètre	30
Figure III .5	Spectrophotomètre UV-VIS	33
Figure III .6	Variation du PH au niveau du bassin de Touggourt	37
Figure III .7	Variation de la conductivité au niveau du bassin de Touggourt	38
Figure III 8	Variation du calcium au niveau du bassin de Touggourt	38
Figure III .9	Variation du Magnésium au niveau du bassin de Touggourt	39
Figure III .10	Variation du Sodium au niveau du bassin de Touggourt	40
Figure III .11	Variation du Potassium au niveau du bassin de Touggourt	40
Figure III .12	Variation du Chlorure au niveau du bassin de Touggourt	41
Figure III .13	Variation du Sulfate au niveau du bassin de Touggourt	41
Figure III .14	Variation du Nitrate au niveau du bassin de Touggourt	42
Figure III .15	Variation du Bicarbonate au niveau du bassin de Touggourt	43
Figure III.16	Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Touggourt	44
Figure III .17	Diagramme de Schoeller des eaux souterraines de la région de Touggourt	45
Figure III .18	Diagramme de Stabler des eaux souterraines de la région de Touggourt	46
Figure III.19	Variation spatiale deCalcium	47
Figure III.20	Variation spatiale deMagnésium	47
Figure III.21	Variation spatiale de Sodium	48

Figure III.22	Variation spatiale de potassium	48
Figure III.23	Variation spatiale de Nitrate	48
Figure III.24	Variation spatiale de chlorure	48
Figure III.25	Variation spatiale de sulfate	49
Figure III.26	Variation spatiale de Bicarbonate	49
Figure III.27	Variation spatiale L'indice de pollution minérale	50
Figure III.28	Classification des degrés de pollution minérale des eaux souterraines selon l'indice IPM	51

Liste des abréviations et symboles

abréviations	Nom
O.N.M	Office National de Météorologie
CI	Continental Intercalaire
CT	Complexe Terminal
S.A.S.S	Système Aquifère du Sahara Septentrional
pH	potentiel d'Hydrogène
CE	Conductivité Electrique
UTM	Universel Transverse Mercator
A.N.R.H	l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques
O.M.S	Organisation Mondiale de la Santé
IPM	Indice de Pollution Minérale
AEP	Alimentation En Eau potable
BI	Balance Ionique
TA	Titre Alcalimétrique
TAC	Titre Alcalimétrique Complet
EDTA	Ethylène diaminetetaactic Acide

Sommaire

Titre	Page
Dédicace	
Remercier	
Résumé	
Liste des tableaux	
Liste des Figures	
Liste des abréviations et symboles	
INTRODUCTION	01
PARTIE I : Synthèse Bibliographique	
Chapitre I : Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de la région deTouggourt	
I.1.Situation géographique et limites administratives	05
I.2.Géologie de la région	06
I.3.Géomorphologie et unités géomorphologie	07
I.3.1.Unités géomorphologie	07
I.4.Les climatologie et paramètres météorologiques	07
I.4.1.la température	08
I.4.2.Insolation	09
I.4.3.Pluviométrie	09
I.4.4.Le vent	10
I.4.5.Evaporation	10
I.5.Hydrogéologique de Touggourt	11
I.5.1.Continental Intercalaire (CI)	11
I.5.2.Complexe Terminal (CT)	11
I.5.3.La nappe phréatique	12
I.6.Réseau hydrographique	12
Chapitre II : Généralités sur la pollution de l'eau	
II.1.Définition de l'eau	15
II.2.Distribution d'eau dans la nature et au sol	15
II.3.Molécule de l'eau	15
II .4.Ressources hydriques	16
II .4.1.Les eaux souterraines	16
II.4.2.Eaux de surface	17
II.5.Le cycle de l'eau	17
II.5.1.Principales étapes du cycle naturel de l'eau	18
II.6. Les états de l'eau	18
II.7.Importance vitale pour les organismes vivants	19
II.7.1.Maintenir l'équilibre hydrique	19
II.7.2.Hydratation des tissus et des organes	19
II.7.3.Transport des nutriments et des sels	19
II.7.4.Améliorer les fonctions du système digestif	19
II.7.5.Régulation de la température corporelle	19

II.7.6.	Soutenir les fonctions du système nerveux	20
II.8.	Définition de la pollution des eaux	20
II.9.	Les types de la pollution des eaux	21
II.9.1.	La pollution ponctuelle (localisée)	21
II.9.2.	La pollution diffuse	21
II.10.	Source de la pollution	21
II.10.1.	Pollution naturelle	21
II .10.2.	Pollution anthropique	22
II.10.3.	Pollution domestique	22
II.10.4.	Pollution industrielle	22
II.10.5.	La pollution agricole	23
II.11.	Principaux polluants	24
II.11.1.	Matières en suspensions	24
II.11.2.	Sels minéraux	24
II.11.3.	Matières organiques	24
Partie II:Partie pratique		
Chapitre III : résultats et Discussions		
III .1.	Echantillonnage	27
III .2.	Méthodes d'échantillonnage	27
III.3.	Les points de prélèvements	28
III.4.	Analyses physiques et chimiques	28
III.4.1.	Analyses physiques	28
III.4.1.1.	Mesure de la température	28
III.4.1.2.	Mesure PH	29
III.4.1.3.	Mesure Conductivité	30
III.4.2.	Analyse chimique	30
III.4.2.1.	Dosage du Mg^{2+} et du Ca^{2+} par complexométrie	30
III.4.2.2.	Dosage des chlorures (Cl^{-})	32
III.4.2.3.	Dosage des nitrates (NO_3^{-})	33
III.4.2.4.	Détermination des bicarbonates (HCO_3^{-})	35
III .5.	Résultats des analyses de l'eau	36
III.5.1.	Variations des paramètres physico-chimiques	37
III.5.1.1.	Potentiel d'Hydrogéné (pH)	37
III.5.1.2.	Conductivité électrique	38

III.5.1.3.Calcium (Ca^{+2})	38
III.5.1.4.Magnesium (Mg^{+2})	39
III.5.1.5.Sodium (Na^{+})	40
III.5.1.6.Potassium (K^{+})	40
III.5.1.7.Chlorure (Cl^{-})	41
III.5.1.8.Sulfate (SO_4^{2-})	41
III.5.1.9.Nitrate (NO_3)	42
III.5.1.10.Bicarbonate (HCO_3)	42
III.6.Faciès chimique des eaux	43
III.6.1.Classification de piper	43
III.6.2.Classification de Schoeller	44
III.6.3.Classification de Stabler	45
III .7.Etude de la vulnérabilité à la pollution chimique	46
III .7.1.La pollution minérale	47
III.7.1.1.Evolution spatiale de la répartition de certains polluants métalliques	47
III.8.L'indice de pollution minérale	49
Conclusion	52

INTRODUCTION

L'eau est essentielle à la vie sur Terre. Elle existe sous diverses formes au sein d'un cycle continu qui maintient sa quantité totale grâce aux transformations entre ses différents états. Malgré la dépendance humaine aux eaux de surface et souterraines, plus de 97 % de l'eau terrestre se trouve dans les océans, qui recouvrent environ 71 % de la surface de la Terre. Cette eau est impropre à la consommation directe, tandis que les ressources en eau douce demeurent limitées et insuffisantes pour répondre à la demande croissante engendrée par la croissance démographique et le développement des activités humaines. [1]

Le système hydrique possède une capacité naturelle d'auto-épuration grâce à des processus physico-chimiques tels que la sédimentation, la décomposition et la dilution. Cependant, l'efficacité de ces mécanismes diminue face à l'augmentation constante de la pollution due aux activités humaines, ce qui entraîne une détérioration progressive de la qualité des ressources en eau, notamment celles destinées à la consommation humaine. [2]

Localement, la wilaya de Tougourt est une région désertique au climat aride, où l'eau représente une ressource rare et stratégique dont dépendent divers secteurs, en particulier l'agriculture, l'industrie et l'approvisionnement de la population. La Wilaya tire principalement son approvisionnement en eau des nappes phréatiques stockées dans trois systèmes principaux : la nappe superficielle, la nappe continentale interstratifiée et la nappe terminale. [3] Ce système hydrique est soumis à des influences hydrogéologiques et à une pression anthropique croissante, entraînant des déséquilibres dans la composition chimique de l'eau et une dégradation de sa qualité, avec l'apparition d'indicateurs de salinisation et de pollution minérale. Il est donc nécessaire d'évaluer précisément son état actuel et sa stabilité. Cette étude vise par conséquent à analyser les propriétés physico-chimiques des eaux souterraines de la région, à identifier les variations spatiales de leur composition et à mettre en évidence les indicateurs de pollution et de dégradation de la qualité. Ces travaux contribueront à évaluer l'état environnemental de l'eau et à proposer les bases d'une gestion durable.

Pour atteindre les objectifs de cette étude, le travail est divisé en deux parties principales :

❖ **Partie I : Synthèse Bibliographique**

- ✓ Chapitre 1 : Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de la région de Tougourt

INTRODUCTION

✓ Chapitre 2 : Généralités sur la pollution de l'eau

❖ **Partie II: Partie pratique**

✓ Chapitre 3 : Présentation, discussion et interprétation des résultats

❖ **Conclusion:** Une conclusion générale résumant les principaux résultats.

Partie I

Synthèse Bibliographique

**Chapitre I : Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de
la région deTouggourt**

I .1.Situation géographique et limites administratives :

La région de Touggourt fait partie de la vallée de l'Oued Righi qui occupe la partie nord-ouest du Grand Erg Oriental et se localise à une altitude moyenne de 68 m et entre les latitudes de 32° 53' et 34° 10' N et les longitudes de 5° 47' et 6° 10' E. Elle se situe au nord-est du Sahara algérien, à 160 km au nord-est d'Ouargla et la zone pétrolière de Hassi Messaoud et à environ 600 km au sud-est de la capitale d'Alger. Touggourt, se divise administrativement en 03 grands daïras, à savoir Touggourt, Mégarine et Témacine qui dépendent de la wilaya d'Ouargla. Le fond de cette localité est une longue dépression de 150 km de long et 20 km de large qui est traversée par le canal de l'Oued Righ. Ce dernier, joue un rôle très important car il assure l'évacuation des eaux du drainage des palmeraies et celles qui proviennent des zones urbaines périphériques de ce cours d'eau [4]

Elle a une superficie de 219 km² et une population de 143 270 habitants, selon les statistiques de 2008. Elle est limitée par les daïras suivantes :

1. Au Nord Djamaa.
2. Au Sud Hassi Messaoud.
3. A l'Est Taïbet.
4. A l'Ouest El-Hedjira [5]

La cuvette de Touggourt est repérée par les coordonnées suivantes :

- X : 33.0996078
- Y : 6.0785104 [6]

Tableau 1: Les subdivisions administratives et locales de la région de Touggourt[7]

Nom de dira	Nom de commue
Touggourt	Touggourt, Nezla ,Zaoui El Abidia, Tebsesbest
Tibet	Tibet, M'naggueur, Benacer
Temacine	Temacine, Belidat Amor
El Megarine	El Megarine, Sidi Slimane
El Hedjira	El Hedjira, El Alia

Chapitre I : Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de la région deTouggourt

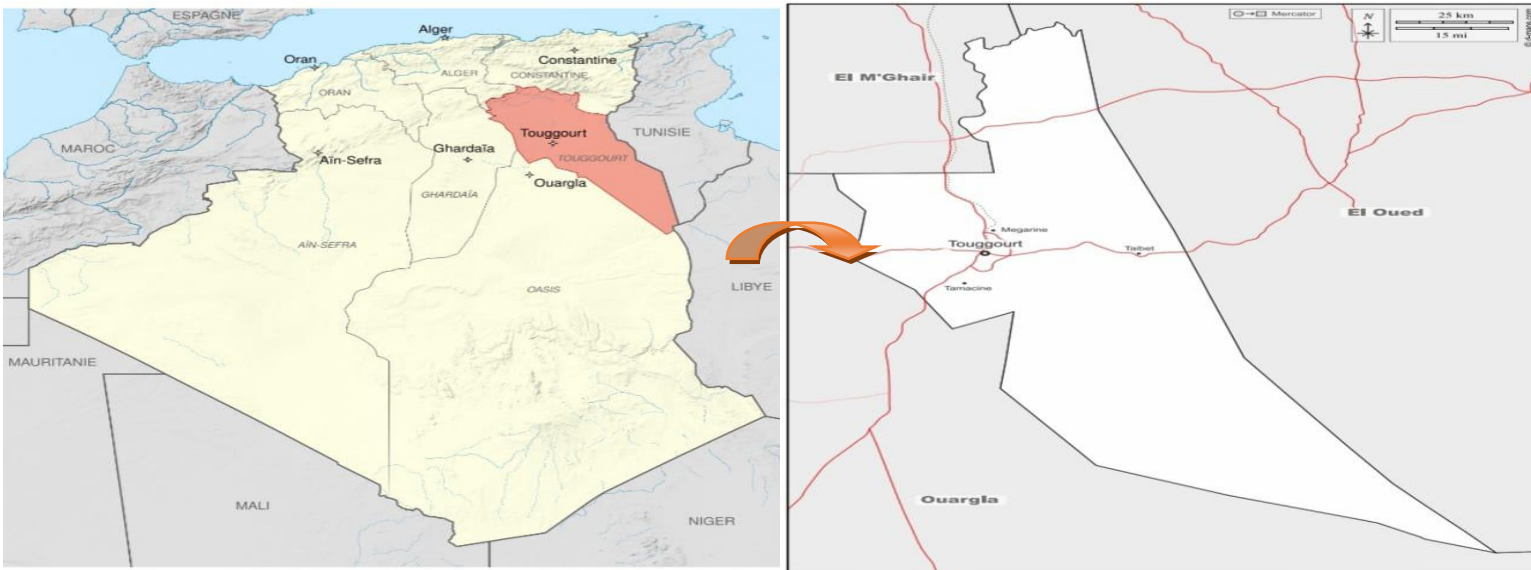


Figure I.1: situation géographique de la région de Touggourt [8]

I .2.Géologie de la région:

Du point de vue géologique, la région de l'Oued Righ appartient à la plateforme saharienne, elle s'étend sur des ensembles géologiquement différents totalement aplatis au début de l'Ere secondaire ; elle se comporte actuellement comme une vaste dalle rigide et stable. Qui est limité :

- Au Nord, par l'accident Sud Atlasique ; et les premiers contreforts des monts des Aurès;
- Au Sud, par la falaise méridional du TINHERT;
- l'est par les affleurements crétacés du DAHAR;
- A l'Ouest par la dorsale du Mzab.

C'est donc entre la bordure septentrionale du Hoggar et la bordure méridionale de l'Atlas saharien que se situe le grand bassin sédimentaire du Bas-Sahara. Avec plus de 600 km de diamètre il couvre $720\,000\text{Km}^2$ de superficie. Il s'étend des pieds de l'Aurès au nord jusqu'au Tassilis au sud. Une grande partie du bassin est recouverte par le grand Erg oriental, soit 125000Km^2 . La région de Touggourt que nous étudions fait partie de cet ensemble. Les formations géologiques de la région de Touggourt sont en majeure partie d'âge Quaternaire résultant de l'érosion continentale du miocène, Ces derniers largement représentés à l'Ouest de l'axe routier de Touggourt – Biskra [9]

I.3 .Geomorphologie et unités geomorphologie:

Cette région a une morphologie homogène, connue sous le nom du Bas Sahara, à cause de sa basse altitude notamment dans la zone du chott au Nord où les altitudes sont inférieures au niveau de la mer. Elle est également caractérisée par une succession de dunes de sable, de marais, d'el-Raq, et Erg. Il s'étend sur la majeure partie et sur quelques plaines constituées de sable et de limon. [10]

I.3.1. Unites geomorphologie :

Sur le plan géomorphologique, le Sahara possède plusieurs paysages caractéristiques. Les oueds descendant des reliefs se perdent souvent dans des dépressions, s'ennoyent dans les ergs ou terminent leur course en mer. On peut aussi distinguer des plateaux sur lesquels s'érigent des reliefs.

- a) **Les Hamadas:** Ce sont des plateaux rocheux à topographie très monotone, souvent plate à perte de vue.
- b) **Les Regs:** Ce sont des plaines de graviers et de fragments rocheux. Au Sahara, ils occupent des surfaces démesurées.
- c) **Les accumulations sableuses:** Le sable est un élément essentiel du paysage saharien. Cependant, les dunes sont loin de recouvrir la totalité du Sahara, mais se localisent généralement dans de vastes régions ensablées appelées les ergs, les dunes peuvent avoir des formes différentes en fonction de la direction dominante du vent.
- d) **Les Sebkhha et les Chott:** Ce sont des dépressions qui se forment 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. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand épisode pluvial contemporain à la glaciation de Würm. [11]

I .4.Les climatologie et paramètres météorologiques :

L'étude climatologique permet de ressortir les caractéristiques climatiques de la région en se basant sur les données mesurées depuis la station météorologiques de Touggourt, ces données sont représentatives du climat de la région, nous analyserons les composantessuivantes : la température, l'évaporation et les précipitations, la vitesse des vont,Durée d'insolation [12]d'après le tableau suivant:

Tableau2: Données climatiques de la région de Touggourt en 2025[13]

Mois						Vent		Evaporation(mm)
	Températures (°C)			Insolation(hour)	Pluviométrie	max		
	Max	min	Moy	Hour	%	(mm)	(Km/h)	
Janvier	25,5	1,5	13,5	250	79	0,6	54	6,4
Février	23,9	2,9	13,4	211	69	0	158,4	8,2
Mars	32,8	8,0	20,4	271	73	0,2	75,6	8,2
Avril	36,8	9,4	23,1	308	80	0,1	75,6	8,6
Mai	40,1	13,9	27	288	68	9,0	79,2	11,3
Juin	44,7	20,3	32,5	364	86	2,0	57,6	11,4
Juillet	48,2	23,5	35,85	353	82	0,4	68,4	12,2
Aout	46,4	21,5	33,95	312	76	0	75,6	13,2
September	44,1	14,7	29,4	287	78	0,8	82,8	14,7
Octobre	36,1	14,7	25,4	284	82	0	43,2	12,4
November	30,0	2,2	16,1	259	83	0	54,0	8,4
December	21,1	2,3	11,7	142	46	12,0	86,4	10,4

I. 4-1.la température :

La figure 2 montre l'évolution de la température moyenne dans la zone d'étude, où l'on remarque que la température moyenne la plus basse est enregistrée pendant le mois le plus froid (décembre) avec une valeur d'environ 11,7C°, tandis que la température moyenne atteint sa valeur maximale pendant le mois le plus chaud (juillet) lorsqu'elle atteint 48,2C°.

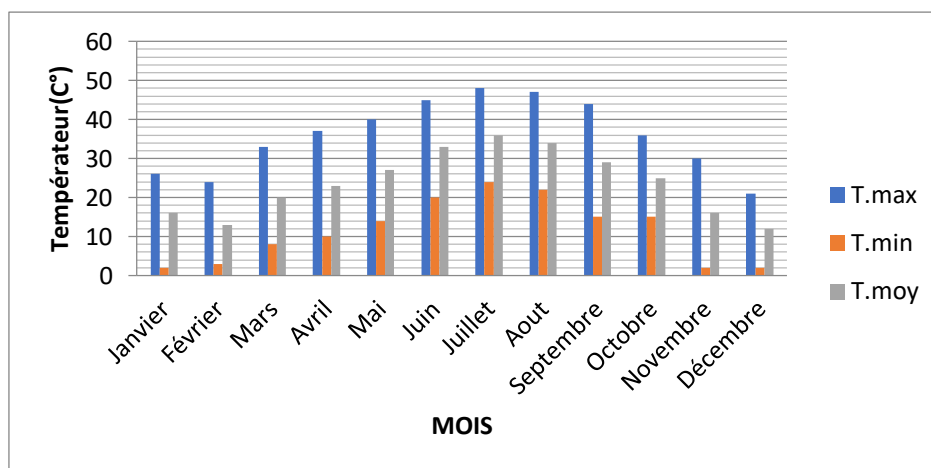


Figure I.2 :Variation mensuelle moyenne de la tempurature (ONM2025)

I .4-2. Insolation:

La figure 3 montre la variation de d'insolation au cours de l'année, avec une valeur maximale de 86 % pendant 364 heures en juin et une valeur minimale de 46 % pendant 142 heures en décembre, tandis que la plupart des mois se situent entre 250 heures et un pourcentage de 70 à 80 %.

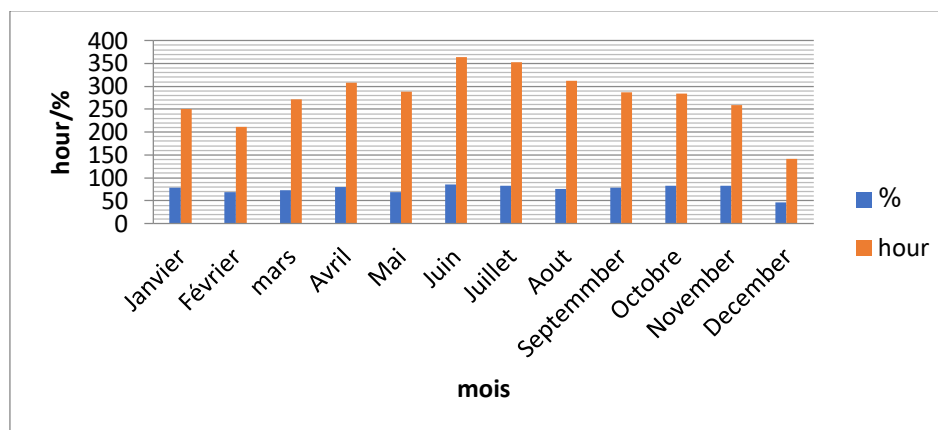


Figure I.3: variation mensuelle moyenne d'insolation(ONM2025)

I .4-3 .Pluviométrie:

Les précipitations dans la région de Touggourt sont très faibles et irrégulières, variant de 12 mm en décembre à 0,1 mm en avril, et pouvant être nulles durant certains mois tels que (février, août, octobre et novembre).

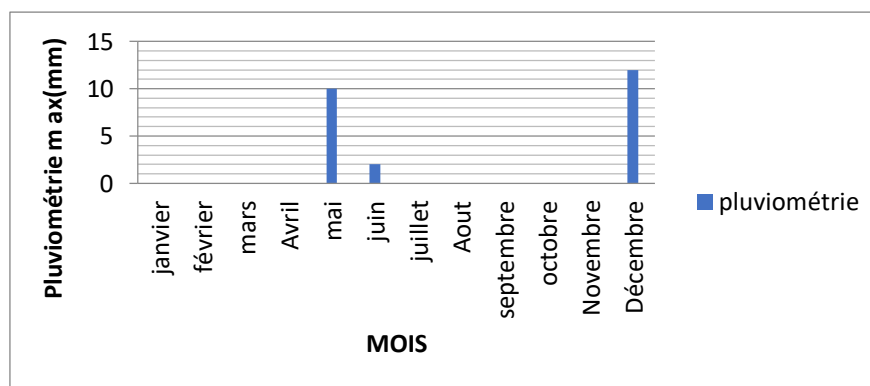


Figure I.4: Variation mensuelle moyenne de la précipitation(ONM2025)

I .4-4.Le vent:

Les vents dans la région d'étude sont relativement fréquents durant la plupart des mois de l'année. La vitesse la plus élevée est enregistrée au mois de février, atteignant environ 158,4 km/h. Des vitesses relativement élevées sont également observées aux mois de décembre et septembre, avec environ 86,4 km/h. En revanche, la vitesse du vent diminue au mois d'octobre, pour atteindre environ 43,2 km/h.

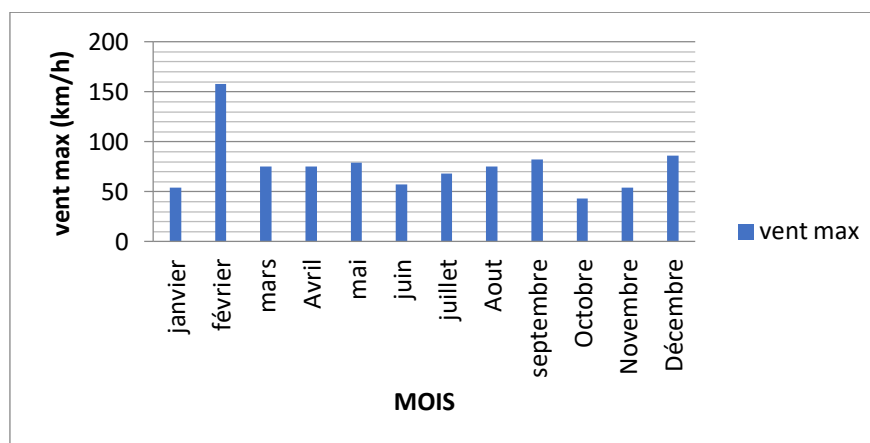


Figure I.5: variation mensuelle moyenne du vent(ONM2025)

I .4-5. Evaporation :

Les taux d'évaporation dans la zone d'étude varient entre 6,4 mm en janvier et 14,7 mm en septembre, leurs valeurs les plus élevées étant enregistrées pendant les mois d'été.

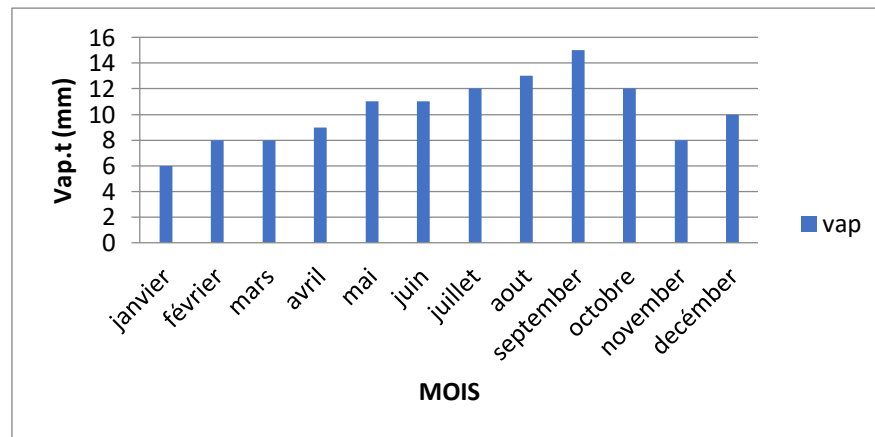


Figure I.6: Variation mensuelle moyenne de évaporation(ONM2025)

I .5. Hydrogéologique de touggourt :

I .5.1.Continental Intercalaire (CI):

C'est un aquifère de 1500 m et plus de profondeur; composé de sables gréseux ou argileux qui s'étend sur plus de 600 000 Km², son épaisseur peut atteindre 1000 m au Nord Ouest du Sahara. Il se situe entre 700 et 2000 m de profondeur. Du point de vue lithologique, le continental intercalaire est formé par une succession de couches de sables, de grès, de grès argileux et d'argile. La qualité de l'eau du Continental Intercalaire est bonne (la minéralisation totale est généralement < 3,5 g/l). L'eau d'Albien est relativement peu minéralisée de conductivité électrique de 3 m mhos/cm, mais dont la température est supérieure à 50 °C quand elle jaillit, ce qui pose des problèmes de refroidissement préalable à l'irrigation. Cette eau provoque des dépôts abondants de carbonate de calcium qui rendent sa distribution délicate [9]

I .5.2.Complexe Terminal (CT):

Le Complexe Terminal contient plus d'une nappe (Moi -pliocène, sénonien carbonates et l'Eocène) d'extension considérable de 350 000 Km², une puissance moyenne de 50 à 100 m et une profondeur variant entre 200 et 500 m. Il est composé de trois aquifères principaux, on distingue de haut en bas la nappe des sables, la nappe des sables et grès et la nappe des calcaires. On distingue trois aquifères principaux :

- La première nappe : dans les sables et argiles du pliocène, qui est en fait un réseau de petites nappes en communication ;
- La deuxième nappe : dans les sables grossiers à graviers du Miocène supérieurs ;
- La troisième nappe : dans les calcaires fissurés et karstiques de l'Eocène inférieur.

Chapitre I : Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de la région deTouggourt

Historiquement, ces trois nappes étaient artésiennes sur l'ensemble de la région de l'Oued Righ ; cette région est caractérisée par la présence de la nappe sénonienne carbonaté et le Turonien; mais l'exploitation croissante de ces nappes a conduit à l'utilisation de pompages visant à assurer des débits réguliers pour l'irrigation [9]

I .5.3.La nappe phréatique:

C'est une nappe libre dont la profondeur varie entre 0 et 60 m. Elle affleure sur le sol en plusieurs endroits de la vallée ; la lithologie dominante est constituée de sables ou sables argileux avec gypse. Son eau est généralement très salée et excessivement chargée dans les zones mal drainées ; le résidu sec dépasse 13g/l ; l'alimentation de cette nappe provient essentiellement de l'excédent d'eau d'irrigation et avec un très faible pourcentage des précipitations, elle est rarement exploitée dans l'Oued Righ, sauf dans les zones hors vallée où on l'utilise comme par exemple, Berkadjia (El-Meghaier) et Taibet pour l'irrigation des petits périmètres éloignés de la palmeraie [9]

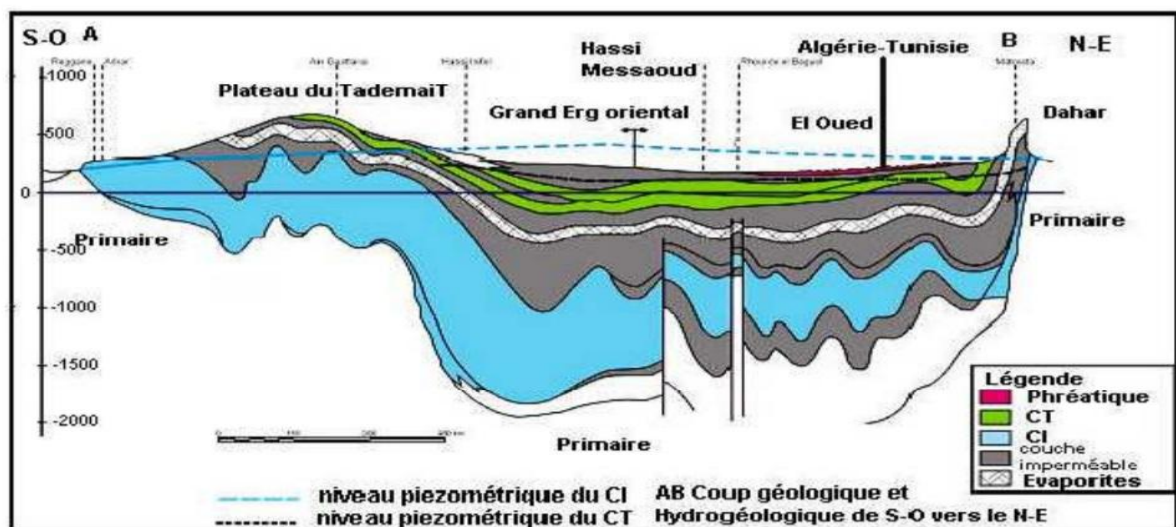


Figure I.7:coup hydrogéologique de SASS [14]

I .6.Réseau hydrographique:

L'hydrographie du Sahara septentrional, initialement basée sur les travaux des chercheurs fondateurs, est reconsidérée par des recherches universitaires récentes qui montrent que les oueds mythiques Igharghar (au sud du Grand Erg Oriental), M'ya (au niveau de Ouargla) et Rhir n'existent pas. Parmi les oueds réels fonctionnels, on commence à mieux connaître ceux qui descendent de l'Atlas saharien avec leurs barrages, et beaucoup moins bien ceux de la dorsale du M'zab. Des oueds réels fossiles viennent d'être découverts dans le Souf, à l'amont du Grand Erg Oriental. Les

Chapitre I : Etude de cadre naturelles, géologique et hydrologique de la région deTouggourt

seules vraies rivières, pérennes, tel le grand drain, sont celles alimentées par les eaux de colature des oasis et des réseaux pluviaux des villes.

En effet, dans le Sahara septentrional, 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 dés organisation du réseau hydrographique et la dispersion de l'eau La basse vallée de Oued M'ya (Ouargla) et le canal de l'Oued Rhir (Touggourt, Djamaa, et M'ghaïer) et l'oueds Ittel (stil)où appartiennent les localités de notre zone d'étude, sont drainés par différents et plusieurs oueds, qui déposent leurs apports en eaux et en minéraux dans les chotts Melrhir et Merouane.

▪ Oued Rhir :

La dépression topographique de l'oued Rhir paraît bien trop immense 15 à 30 km de large (Busson, 1972) pour être constituée par une vallée, même celle d'un très grand cours d'eau.

▪ Les oueds de la dorsale du M'zab :

Des oueds drainent le versant des piedmonts Sud-Est de l'Atlas saharien à l'Est de la dorsale du M'Zab, encore parfois fonctionnel, constitué de vallées orientées ouest-est qui se jettent dans deux vastes collecteurs, l'oued M'ya au sud et l'oued Rhir au nord jalonnés par une série de dépressions qui empêchent maintenant tout écoulement Continu [15]

ChapitreII:Généralités sur la pollution de l'eau

II.1. Définition de l'eau :

L'eau, très présente sur notre terre et indispensable à la survie de tout être vivant, animal ou végétal, n'est pas un liquide banal. Elle a des propriétés physiques originales qui résultent de la composition de sa molécule et de la façon dont ces molécules se lient entre elles. On peut la trouver sous trois formes : liquide, solide ou gazeuse. Dans ce chapitre, on essaye de donner des informations sur l'eau, l'importance de l'eau et la pollution des eaux. [16]

II.2. Distribution d'eau dans la nature et au sol :

L'eau est l'une des ressources la plus abondante sur la Terre, mais il faut signaler également que seulement moins de 1% de cette ressource sont utilisables de façon fiable pour les besoins humains. L'eau se présente en majeure partie à l'état liquide mais elle est présente aussi à l'état solide et à l'état vapeur. Donc l'eau douce disponible est une forme rare de l'eau, car 99% de la masse totale de l'eau est soit salée (97% de l'eau est contenu dans les océans), soit à l'état solide (2% dans les calottes glaciaires et les glaciers). La majeure partie de l'eau restante (1%) est souterraine, une proportion infime étant présente dans les lacs, l'humidité du sol, les cours d'eau et les systèmes biologiques. [5]

II.3. Molécule de l'eau :

La molécule de formule H_2O contient deux atomes d'hydrogène et un seul atome d'oxygène, c'est-à-dire forment des doublets d'électrons liants (ce sont des liaisons covalentes non liantes).

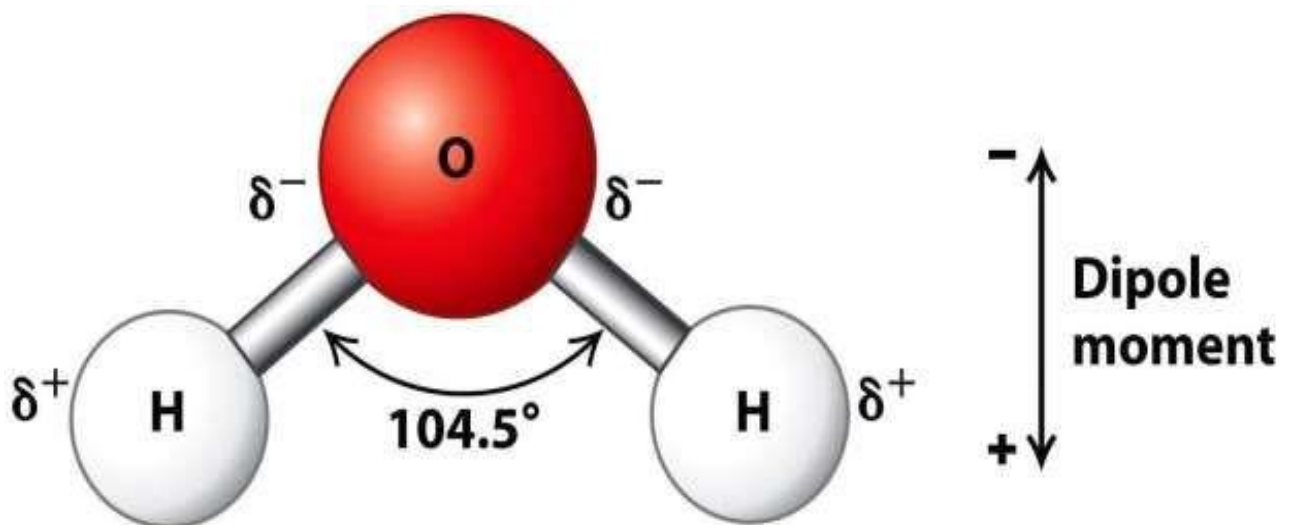


Figure II.1 : Molécule de l'eau [17]

II .4. Ressources hydriques

II .4.1. Les eaux souterraines :

Les eaux souterraines sont la principale source d'eau douce de l'humanité. Les eaux souterraines représentent 30% de l'eau douce de la planète. Le reste constitue les calottes polaires (69%) ainsi que les fleuves et les lacs (1%). L'eau souterraine provient essentiellement de l'infiltration de l'eau de pluie, qui atteint les nappes aquifères en traversant les couches souterraines.

La nature géologique du terrain a une influence déterminante sur la composition chimique de l'eau souterraine. Elles ont leur origine dans les eaux superficielles qui filtrent à travers les différentes couches de la terre et passent à la nappe aquifère, ce système de filtration naturelle permet que l'eau soit purifiée.

Les eaux souterraines sont toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol, dans la zone de saturation et en contact direct avec le sol ou le sous-sol et se caractérise par une turbidité faible ou leurs eaux bénéficient de filtration naturelle importante.

Comme elle se caractérise par une contamination bactérienne faible, car elle est habituellement à l'abri des sources de pollution. Par conséquent la dureté est élevée, et les eaux souterraines peuvent être en contact avec des formations rocheuses contenant des métaux bivalents comme le calcium ou magnésium. En plus, dans les eaux souterraines, le fer et le magnésium présentent une concentration élevée.



Figure II.2 : Les eaux souterraines[1]

II.4.2. Eaux de surface :

Par opposition aux eaux souterraines les eaux de surface sont des eaux qui sont stockées à la surface des continents, elles proviennent soit par des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit par les eaux de ruissellement (fleuves, rivières, barrages, mares, marigots).

Elles sont caractérisées par une surface de contact eau-atmosphère toujours en mouvement et une vitesse de circulation appréciable. Sa température varie en fonction du climat et des saisons, et Ces matière en suspension sont variables selon la pluviométrie, la nature et le relief des terres à son voisinage. Sa composition en sels minéraux est variable selon le terrain, de la pluviométrie et des rejets. Une eau de surface est ordinairement riche en oxygène et pauvre en dioxyde de carbone. Les eaux de surface sont constituées par les eaux de mer, des rivières, des fleuves des étangs, des lacs, des barrages, des réservoirs et des glaciers. Il s'agit d'une masse d'eau bien individualisée, immobile ou en mouvement, solide ou liquide.[18]

II.5. Le cycle de l'eau :

Le cycle de l'eau dans la nature est un processus continu et infini de recyclage de l'eau entre la surface de la terre (océans, lac, rivières, sols) et l'atmosphère.

Sous l'effet de l'énergie solaire, l'eau s'évapore, se condense en nuages, précipite (pluie, neige), puis ruisselle ou s'infiltre avant de retourner aux océans. [19]

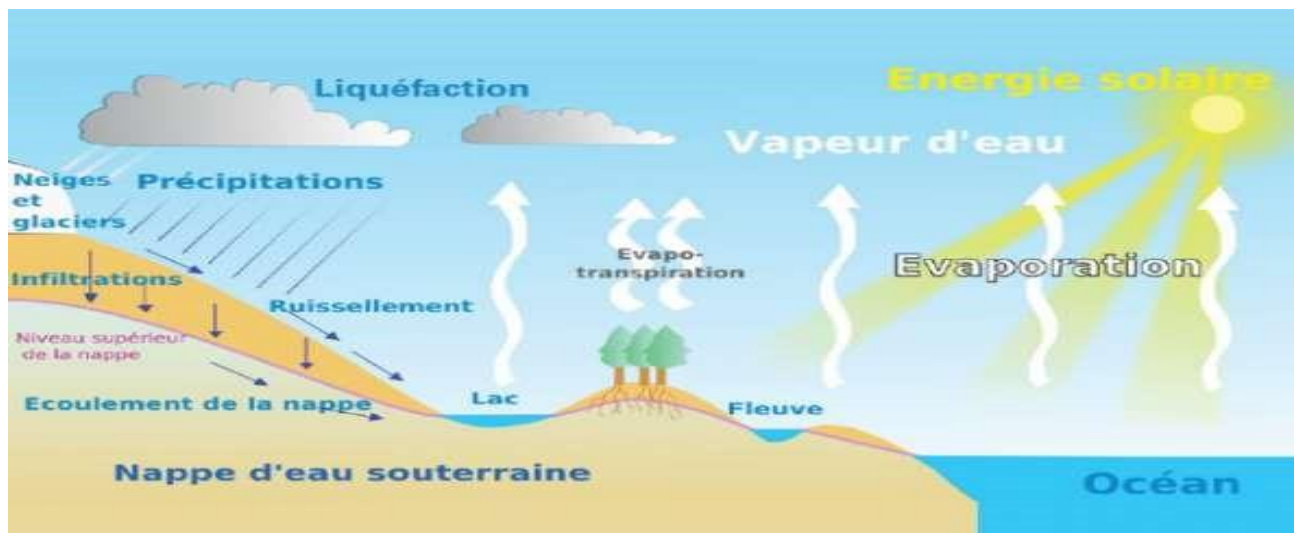


Figure II.3 : Le cycle de l'eau [20]

II.5.1. Principales étapes du cycle naturel de l'eau :

-**L'évaporation** : sous l'effet de la chaleur du soleil, l'eau des rivières, des lacs, des océans ou même des plantes, s'évapore. Elle devient une vapeur invisible qui s'élève dans l'atmosphère

-**La condensation** : lorsque la vapeur d'eau monte dans des zones plus fraîches de l'atmosphère, elle se condense en minuscules gouttelettes qui forment les nuages.

-**Les précipitations** : les gouttelettes se regroupent, s'alourdissent et tombent sous forme de pluie, de neige ou de grêle, ramenant l'eau au sol pour nourrir les rivières, les sols et la végétation.

-**Le ruissellement** : une partie de l'eau tombée au sol s'écoule à la surface des terres, formant des ruisseaux, des rivières et d'autres cours d'eau qui rejoignent les lacs et les océans. Ce processus alimente également les nappes souterraines lorsque l'eau s'infiltre dans le sol. C'est...un retour à la source. [21]

II.6. Les états de l'eau : Sur la terre, en fonction de la température et de la pression, l'eau se trouve à l'état solide, liquide ou gazeux.

-**à l'état solide** : les molécules d'eau occupent un ensemble de positions régulièrement distribuées dans l'espace et figées, formant un corps indéformable.

-**à l'état liquide** : les molécules d'eau sont mobiles et proches les unes des autres. Elles forment un milieu qui n'a pas de forme propre et qui peut s'écouler. C'est le cas d'une goutte d'eau.

-**à l'état gazeux** : les molécules d'eau sont éloignées les unes des autres, et très mobiles. Il en résulte qu'un gaz a la propriété de s'écouler et d'occuper tout l'espace disponibles. [22]



Figure II.4 : Les états de l'eau [23]

II.7. Importance vitale pour les organismes vivants :

L'eau est un élément essentiel pour tous les organismes vivants et revêt une grande importance pour le maintien de la vie et de la santé des organismes vivants. Voici quelques -unes des principales importances de l'eau :[5]

II.7.1. Maintenir l'équilibre hydrique :

L'eau a une multitude de rôles dans notre corps, elle permet le maintien d'une bonne température corporelle, le transport des déchets, des nutriments, mais elle assure aussi, bien sûr une bonne hydratation et l'équilibre hydrique est ainsi essentiel pour garantir le bon fonctionnement de tous ces mécanismes.[5]

II.7.2. Hydratation des tissus et des organes :

L'eau représente en moyenne la moitié ou les deux tiers du poids corporel. Le tissu adipeux contient une moindre proportion d'eau que le tissu maigre ; les femmes ayant tendance à avoir plus de graisse, la proportion d'eau chez les femmes est généralement inférieure (52 à 55%) à celle des hommes (60%).[24]

II.7.3. Transport des nutriments et des sels :

L'eau joue de nombreux rôles dans le corps humain. Elle sert de matériau de construction, de solvant et de milieu réactionnel et de réactif de vecteur pour les nutriments et les déchets. Elle intervient dans la thermorégulation et elle agit comme lubrifiant et amortisseur[25]

II.7.4. Améliorer les fonctions du système digestif :

L'eau permet aux aliments de devenir plus faciles à mâcher, à former le fameux "bol alimentaire" et à descendre en douceur dans l'œsophage. Ce processus, anodin en apparence, est essentiel pour une digestion harmonieuse. Sans une salive bien hydratée, on avale de travers, On digère mal et la mécanique s'enraye.[26]

II.7.5. Régulation de la température corporelle :

L'eau contribue activement à l'ajustement de votre chaleur corporelle. Lors d'un effort ou par forte chaleur, l'évaporation de la sueur aide à évacuer l'excès de chaleur. Le sang, riche en eau, transporte cette chaleur des organes vers la peau, où elle est libérée. Vos vaisseaux sanguins se

dilatatent pour faciliter cette dissipation, ou se contractent pour la limiter lorsqu'il fait froid. Si l'apport hydrique est insuffisant, ces mécanismes perdent en efficacité.[27]

II.7.6. Soutenir les fonctions du système nerveux :

L'eau est essentielle au bon fonctionnement de nos voies neuronales. Le cerveau est composé d'environ 75% d'eau, et la déshydratation peut affecter son efficacité. Lorsque nous ne buvons pas assez d'eau, les neurones du cerveau ont du mal à communiquer efficacement, ce qui entraîne un ralentissement des fonctions cognitives et une altération de la mémoire.

La déshydratation augmente le taux de cortisol, l'hormone du stress ce qui peut aggraver les sentiments de stress et d'anxiété. Rester hydraté aide à maintenir le cortisol sous contrôle, réduisant ainsi le stress.[28]



Figure II.5 : l'eau dans le corps humain [29]

II.8. Définition de la pollution des eaux :

La pollution comme étant toute modification défavorable des propriétés physiques, chimiques ou biologiques, ou tout rejet de substances liquides, gazeuses ou solides dans l'eau de façon à créer une nuisance ou à rendre cette eau dangereuse d'utilisée. La pollution de l'eau est due essentiellement aux activités humaines ainsi qu'aux phénomènes naturels. Elle a des effets multiples qui touchent aussi bien la santé publique que les organismes aquatiques, ainsi que la flore et la faune terrestre. L'ensemble des éléments perturbateurs parviennent au milieu naturel de deux façons différentes : par rejets bien localisés (villes et industries) à l'extrémité d'un réseau d'égout ou par des rejets diffus (lessivage des sols agricoles, des aires d'infiltration dans les élevages, décharges, ...). L'introduction

dans le sous-sol provoque une pollution des eaux souterraines qui est caractérisée par une propagation lente et durable (une nappe est contaminée pour plusieurs dizaines d'années) et une grande difficulté de résorption ou de traitement.[30]

II.9. Les types de la pollution des eaux :

II.9.1. La pollution ponctuelle(localisée) :

Une pollution ponctuelle de l'eau provient d'un site unique, par exemple un point de rejet d'un effluent, Du point de vue réglementaire, on entend par pollution ponctuelle d'une nappe d'eau souterraine ou d'un cours d'eau, toute pollution dont l'origine peut être localisée géographiquement de façon précise.

II.9.2. La pollution diffuse :

Est due à de multiples rejets de polluants dans le temps et l'espace. Elle est peu visible et les origines peuvent être difficilement identifiables. Cependant son effet sur l'environnement n'est pas anodin. Les pratiques agricoles et non agricoles peuvent être à l'origine de pollutions diffuses par entraînement de produits polluants dans les eaux qui percolent vers les eaux souterraines ou ruissellent en direction des cours d'eau.[31]

II.10. Source de la pollution :

On peut classer donc les différentes sources de pollution en trois grandes catégories : la pollution domestique et urbaine, pollution agricole et pollution industrielle. Les sources naturelles peuvent également contaminer le milieu aquatique dans certains cas. Cependant, les pollutions accidentelles peuvent aussi altérer la qualité des eaux. Les rejets des activités domestiques, urbaines, agricoles et industrielles constituent la principale source de pollution des eaux de surface et souterraine. Le vecteur de transport et de dissémination idéale de ces rejets est l'eau [32]

II.10.1. Pollution naturelle :

Les eaux souterraines contiennent quelques impuretés, même si elles ne sont pas affectées par les activités humaines. Les types et les concentrations d'impuretés naturelles dépendent de la nature du matériel géologique par lequel les eaux souterraines se déplacent, et de la qualité de l'eau de recharge. Les eaux souterraines se déplaçant à travers les roches et les sols sédimentaires, peuvent absorber un éventail de composés tels que le magnésium, le calcium, et les chlorures. Certaines

couches aquifères ont des concentrations naturelles élevées en constituants dissous tels que l'arsenic, le bore, et le sélénium. L'effet de ces sources normales de contamination sur la qualité d'eaux souterraines dépend du type du contaminant et de ses concentrations.[16]

II .10.2. Pollution anthropique :

La pollution des eaux est causée par différentes sources et est étroitement liée aux activités humaines : pollution domestique, industrielle et agricole. Ces trois principales sources de pollution contribuent à l'infiltration de polluants dans l'eau et l'environnement.[5]

II.10.3. Pollution domestique :

Ce sont essentiellement les eaux pluviales, les résidus de traitement de la pollution domestique, ainsi que les résidus de traitement des ordures ménagères. Elle est caractérisée par :

- Une teneur importante de matières minérales en suspension.
- La présence de nombreux détritiques solides.
- Des fortes concentrations en toxiques et hydrocarbures, résidus d'échappements des véhicules, résidus de corrosion des équipements métalliques [33]

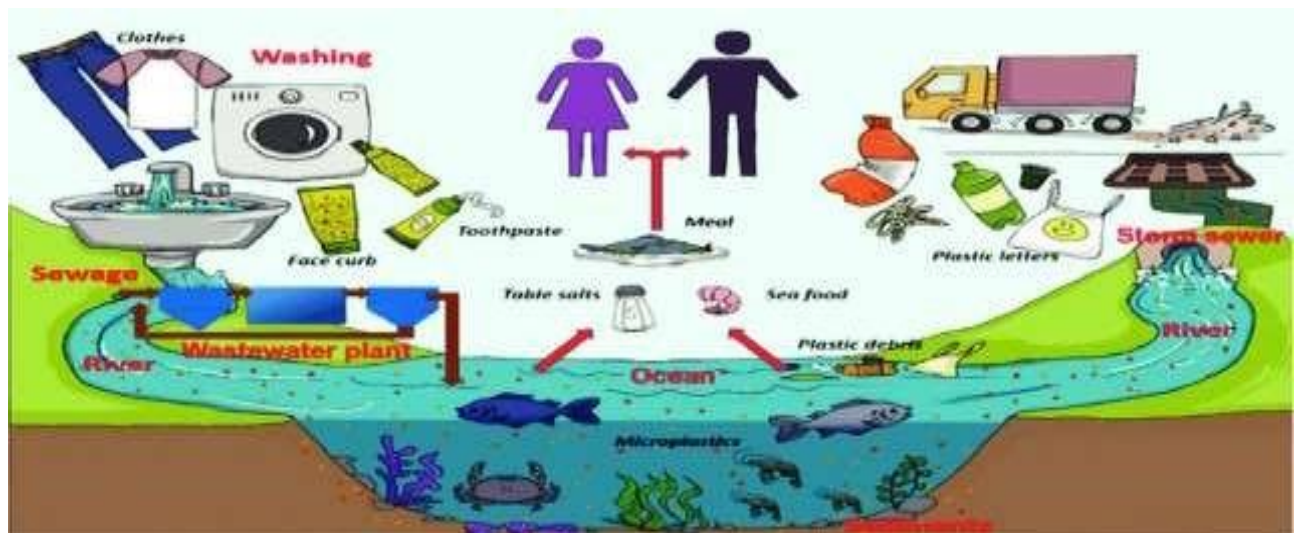


Figure II.6 : Pollution domestique [34]

II.10.4. Pollution industrielle :

L'eau est grandement utilisée par les industries que ce soit dans des procédés de fabrication, pour échauffer ou refroidir des installations ou encore pour des opérations de lavage. La pollution générée par ces rejets varie beaucoup en fonction du type d'activité industrielle. La pollution peut être de

type particulière, dissoute ou thermique, contenir des matières organiques, des produits toxiques, des solvants, des métaux lourds, des hydrocarbures ou des micropolluants...

Cette pollution industrielle se caractérise aussi par des variations de flux notamment en termes de quantité en fonction des pics d'activité dans une journée ou même au cours d'une année.

Selon la quantité de pollution rejetée, un traitement est nécessaire avant tout rejet dans le milieu naturel. Il peut être interne (sur le site industriel), externe (station d'épuration de la commune) ou combiné, c'est-à-dire qu'un traitement préalable des effluents est effectué par l'industrie avant le rejet dans le réseau d'assainissement collectif.[35]



Figure II.7 : Pollution industrielle [36]

II.10.5. La pollution agricole :

La concentration des élevages peut entraîner un excédent de déjections animales par rapport à la capacité d'absorption des terres agricoles ; ces déjections, sous l'effet du ruissellement de l'eau et de l'infiltration dans le sous-sol, enrichissent les cours d'eau et les nappes souterraines en dérivés azotés et constituent aussi une source de pollution bactériologique. Les engrais chimiques (nitrates et phosphates), employés en agriculture, altèrent la qualité des cours d'eau et des nappes souterraines vers lesquels ils sont entraînés.

Les herbicides, insecticides et autres produits phytosanitaires utilisés par les agriculteurs s'accumulent dans les sols et les nappes phréatiques et polluent les cours d'eau.[37]

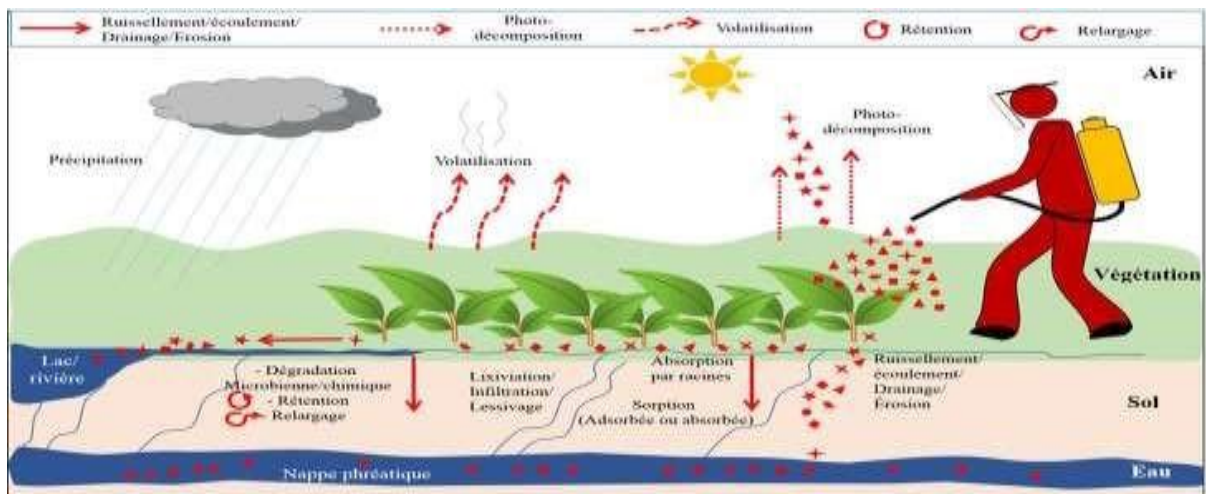


Figure II.8 : La pollution agricole [38]

II.11. Principaux polluants :

II.11.1. Matières en suspensions :

Les matières en suspension sont des particules très fines en suspension dans l'eau. On les trouve sous forme naturelle dans les fleuves et rivières et elles troublent de l'érosion et du lessivage du sol par temps de pluie, surtout quand les précipitations sont intenses, et en situation de crue. Elles se forment également quand les sédiments du fleuve se détachent du lit. Les matières en suspension sont constituées de minéraux et de substances organiques. La composition et l'origine des matières en suspension varient en fonction des précipitations saisonnières.

II.11.2. Sels minéraux :

Présents naturellement dans l'eau en faible quantité, les sels minéraux (chlorures ou sulfates de calcium, de magnésium, de sodium ou de potassium) peuvent voir leur concentration s'élever à la suite de rejets industriels. Cela peut nuire à la biologie aquatique.[16]

II.11.3. Matières organiques :

Les Matières organiques, également connues sous le nom de matières compostables. Sont des substances qui se dégradent par les micro-organismes. Différents types de déchets organiques font partie de cette vaste catégorie, dont :

- **Les résidus verts** : feuilles mortes, gazon et autres résidus de jardinage.
- **les résidus alimentaires** : restes de table, résidus de préparation de repas ou autres résidus alimentaires générés par les ménages ainsi que par les institutions et les commerces comme les

restaurants et les détaillants en alimentation.

-les boues d'épuration des eaux usées, ou bio solides municipaux, provenant des usines d'épuration des eaux usées et des fosses septiques.

-les boues et résidus générés par les activités industrielles des secteurs des pâtes et papiers.[5]

Partie II
Partie pratique

III .1.Echantillonnage :

Le prélèvement d'un échantillon d'eau est une opération délicate à laquelle le plus grand soin doit être apporté, il conditionne les résultats analytiques et l'interprétation qui en sera donnée. L'échantillon doit être homogène, représentatif et obtenu sans modifier les caractéristiques physico-chimiques de l'eau, il convient que le préleveur est une connaissance précise des conditions du prélèvement et de son importance pour la qualité des résultats analytique . [39]

Afin d'avoir des analyses représentatives et fiables, la méthode d'échantillonnage exige une réflexion préalable et une précaution attentive de prélèvement, ainsi nous avons essayé de répondre aux critères suivants :

- Types des échantillons prélevés (eaux souterraines, eaux de surface ...).
- Lieux d'échantillonnage (piézomètres, chott, sebkha, drains...).
- Périodes d'échantillonnage .
- analysés sur terrain.
- Paramètres analysés au laboratoire [40]

III .2.Méthodes d'échantillonnage:

- Après avoir choisi les points de prélèvement, il est nécessaire d'ouvrir le robinet suffisamment pour renouveler l'eau contenue dans le tuyau jusqu'à ce qu'elle soit représentative de la portion de l'aquifère que l'on souhaite échantillonner.
- Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des flacons propres, préalablement rincés à l'eau distillée puis avec l'eau à analyser. On mesure la température, le pH et la conductivité électrique (CE) au moment du prélèvement. Après avoir rempli les flacons, ceux-ci doivent être hermétiquement fermés sans laisser de bulles d'air à l'intérieur.
- Les flacons doivent être clairement identifiés à l'aide d'étiquettes indiquant le numéro de l'échantillon.
- Les échantillons sont transportés dans une glacière vers le laboratoire et conservés au réfrigérateur à une température d'environ 4 °C afin d'éviter toute modification des propriétés de l'échantillon [41]

III.3.Les points de prélèvements:

Les échantillons ont été collectés à partir de points d'eau constitués de forages situés dans la cuvette de Touggourt, couvrant un total de 10 puits.

Tableau 1:les forages d'étude [42]

Symbole	Nom	X_UTM	Y_UTM	Z
P1	El Moustakbal1	223088	3668510	80
P2	El Moustakbal2	223133	3668293	80
P3	Zaouia El Adidia	227958	3669175	66
P4	El Magarine1	227734	3676027	67
P5	El Magarine2	229512	3676533	57.6
P6	Ain Sahara	224191	3663707	83
P7	Agence ADE	225556	3665851	77
P8	Sidi Mehadi	229263	3660043	85
P9	Temacine	221928	3656918	77
P10	Sidi Slimane	228457	3687046	53

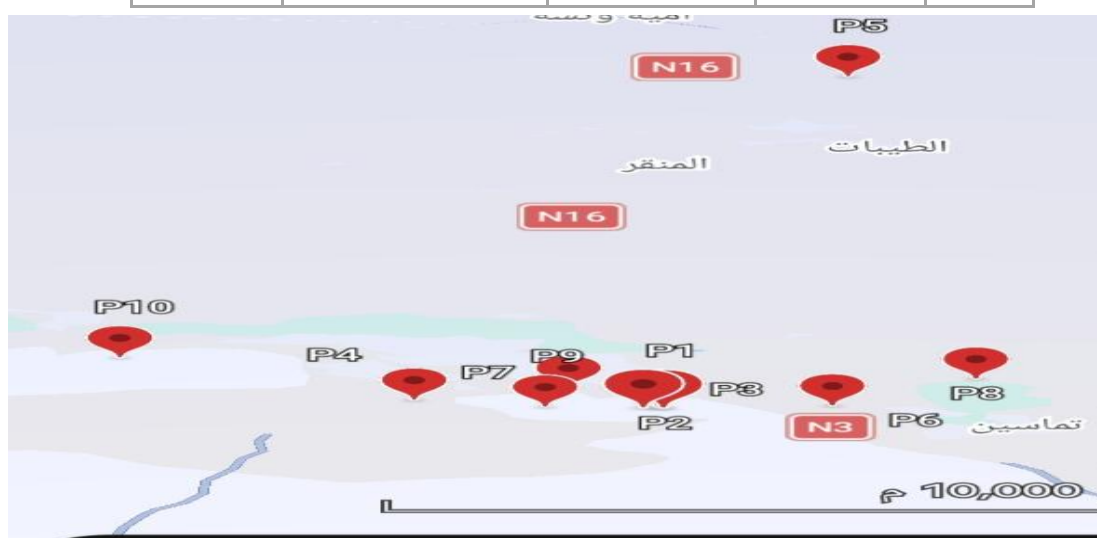


Figure III.1:Carte d'inventaire des points d'eau

III.4.Analyses physiques et chimiques:

III.4.1.Analyses physiques:

III.4.1.1.Mesure de la température:

Le test de la température de l'eau vise à identifier les variations indiquant une pollution par les eaux industrielles, ainsi qu'à évaluer la solubilité de l'oxygène et les modifications subies par les organismes vivants dans l'eau en raison de températures basses ou élevées. Il est également essentiel

de prendre en compte la température de l'eau au moment du prélèvement de l'échantillon afin d'obtenir des résultats précis pour les analyses de laboratoire avancées réalisées sur la même eau[5]
On mesure la température de l'eau à l'aide d'un thermomètre



Figure III.2: Thermomètre[43]

III.4.1.2.Mesure pH:

Le pH mesure la concentration en ions H^+ de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14. La valeur 7 correspond à la neutralité. Le domaine entre 0 et 7 constitue le milieu acide, et entre 7 et 14 le milieu est basique. Le pH renseigne sur l'origine de l'eau. Par exemple, les eaux de surface ont un pH compris entre 7 et 8[44]



Figure III 3: pH mètre [45]

Mode opératoire:

1. Allumer le pH Mètre.
2. Prendre dans un petit bêcher, la solution tampon pH = 4
3. Touche sur Read attendre quelque temps pour lire
4. Rincer l'électrode avec de l'eau distillée
5. Tremper l'électrode de pH dans la solution tampon pH = 7
6. Laisser stabiliser un moment jusqu'à affichage du standard 2.
7. Ré étalonné de la même manière avec solution tampon de pH =9.
8. Prendre environ ≈ 100 ml d'eau à analyser.

9. Rincer l'électrode dans l'échantillon on lit le pH avec une simple touche sur READ [16]

III.4.1.3.Mesure Conductivité:

Elle renseigne sur la capacité de l'eau à conduire le courant électrique. On se sert d'un appareil appelé conductimètre. La mesure de la conductivité renseigne sur la teneur en matières dissoutes dans l'eau sous forme d'ions chargés électriquement. La température de l'eau influence la conductivité qui sera d'autant plus importante que la température est élevée[44]



Figure III .4: Conductimètre [46]

Mode opératoire:

1. Rincer le conductimètre avec de l'eau distillée pour garantir la précision des mesures.
2. Prélever l'échantillon d'eau à analyser (environ 100 ml).
3. Immerger la sonde de l'appareil dans l'échantillon et attendre la stabilisation de la lecture.
4. Enregistrer la valeur de la conductivité électrique et de la température directement sur l'écran de l'appareil.

III.4.2.Analyses chimique :

III.4.2.1.Dosage du Mg^{2+} et du Ca^{2+} par complexométrie:

La méthode de complexométrie repose sur l'utilisation du sel disodique de l'acide éthylène diamine tétraacétique (EDTA), appelé également complexon ou versénate. Ce composé est capable de former des complexes stables avec plusieurs cations métalliques. Son efficacité dépend fortement du pH du milieu. Dans ce travail, l'EDTA est utilisé pour la détermination des concentrations en Ca^{2+} et Mg^{2+} présentes dans les échantillons analysés.

❖ Préparation de la solution d'EDTA

On dissout 40 g d'EDTA dans de l'eau distillée. Ensuite, on ajoute 5 g de NaOH afin de faciliter la dissolution. Le mélange est agité soigneusement, puis le volume est complété à 1 litre avec de l'eau distillée.

❖ Préparation de la solution tampon (pH = 10) pour $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

La solution tampon est obtenue en mélangeant des volumes égaux de deux solutions (A et B) afin de maintenir un pH constant proche de 10, favorable au dosage des ions calcium et magnésium

▪ Solution (A)

La solution A est préparée en dissolvant 67 g de chlorure d'ammonium (NH_4Cl) dans de l'eau distillée. On ajoute ensuite 400 mL d'ammoniaque à 28 % (ou 448 mL si la concentration est de 25 %), puis on complète le volume final à 1 litre avec de l'eau distillée.

▪ Solution (B)

La solution B est préparée en dissolvant 1,5 kg de sel de Seignette (tartrate double de sodium et de potassium, Na^+/K^+) dans de l'eau distillée. Le mélange est chauffé afin de favoriser la dissolution complète, puis le volume final est ajusté avec de l'eau distillée.

▪ Solution de soude (NaOH)

On dissout 40 g de soude dans un litre d'eau distillée, en agitant jusqu'à obtention d'une solution homogène.

▪ Solution étalon de calcium

La solution étalon est préparée en dissolvant 1 g de carbonate de calcium (CaCO_3). On ajoute ensuite de l'acide chlorhydrique dilué jusqu'à dissolution complète, puis on complète le volume à 1 litre. La concentration obtenue est de 20 méq/L.

❖ Méthode de mesure

1. Remplir la burette avec la solution d'EDTA.
2. Préparer trois erlenmeyers de 50 mL comme suit :
 - Premier erlenmeyer : 10 mL de solution étalon.
 - Deuxième erlenmeyer : 10 mL d'eau analysée + 2 mL de solution tampon + une pincée de noir Eriochrome. Le virage de couleur s'effectue du mauve au bleu.
 - Troisième erlenmeyer : 10 mL d'eau analysée + 2 mL de solution de soude + une pincée de murexide. Le virage de couleur s'effectue du rose au mauve.

3. Réaliser ensuite le dosage des trois solutions avec l'EDTA.

Les concentrations des éléments recherchés sont déterminées à partir des relations suivantes :

$$CMg/Ca \text{ (mé/l)} = (CEDTA * VEDTA \text{ consommé}) / VPE$$

$$CCa \text{ (mé/l)} = (CEDTA * VEDTA \text{ consommé}) / VP$$

$$CMg \text{ (mé/l)} = CMg/Ca - CCa$$

VPE : Le volume de prise d'essai (volume initial de bécher)

III.4.2.2. Dosage des chlorures (Cl⁻):

Les ions chlorure, en présence de thiocyanate mercurique et d'alun ferrique en milieu nitrique acide, forment un complexe coloré orange. Ce complexe peut être dosé par colorimétrie à une longueur d'onde de 470 nm. Avant le dosage, il est nécessaire de diluer les échantillons d'eau en fonction de leurs valeurs de conductivité afin d'assurer une mesure correcte et fiable.

❖ Méthode de travail

▪ Solution de thiocyanate saturée

On prépare la solution en dissolvant 2 g de Hg(SCN)₂ dans 2 litres d'eau distillée, sous agitation jusqu'à dissolution complète.

▪ Solution d'alun ferrique

La solution est obtenue en dissolvant 67 g de sulfate ferrique hydraté (Fe₂(SO₄)₃), puis en ajoutant 43 mL d'acide nitrique concentré. Le volume final est ensuite ajusté à 1 litre avec de l'eau distillée.

▪ Solution mère de chlorures

Une solution mère de chlorures est préparée à une concentration de 10 000 mg/L.

▪ Préparation des solutions étalons

Les solutions étalons sont obtenues par dilution de la solution mère dans des fioles jaugées de 1 litre, selon les volumes suivants : 100, 80, 65, 50, 35, 20, 10 et 5 mL. On obtient ainsi une gamme étalon correspondant aux concentrations suivantes : 1000, 800, 650, 500, 350, 200, 100 et 50 mg de Cl⁻/L.

❖ Préparation de l'échantillon d'eau analysée

Dans un erlenmeyer de 50 mL, introduire 5 mL d'eau à analyser. Ajouter ensuite 15 mL de solution de thiocyanate mercurique diluée au 1/3, puis agiter. Ajouter ensuite 15 mL de solution d'alun

ferrique diluée au 1/6 et homogénéiser soigneusement le mélange afin d'obtenir une coloration orange uniforme. Laisser reposer la solution pendant environ 30 minutes avant la mesure.

❖ Méthode de mesure (Spectrophotomètre DR/2500)

1. Tracer la courbe d'étalonnage à une longueur d'onde de $\lambda = 470$ nm en utilisant les solutions étalons de chlorures.
2. Mesurer l'absorbance de l'échantillon d'eau analysé, puis déterminer la concentration en chlorures (mg/L) par extrapolation à partir de la courbe d'étalonnage.



Figure III.5: Spectrophotomètre UV-VIS [47]

III.4.2.3. Dosage des nitrates (NO_3^-):

Les nitrates sont d'abord réduits en nitrites par une solution d'hydrazine en milieu alcalin, en présence de sulfate de cuivre qui joue le rôle de catalyseur.

Les nitrites formés sont ensuite dosés par colorimétrie, après diazotation avec l'acide sulfanilique et couplage avec l' α -naphtylamine. L'intensité de la coloration obtenue est mesurée à une longueur d'onde de 520 nm

❖ Réactifs

- ✚ Solutions de réserve
- ✚ Solution de soude (NaOH) : 1 M, soit 40 g/L.
- ✚ Solution de sulfate de cuivre : 2,6 g/L de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, additionnée de 40 mL/L d'acide sulfurique 1N.
- ✚ Solution d'acide sulfanilique (conserver en flacon brun) :
 - Acide sulfanilique ($\text{C}_6\text{H}_7\text{NO}_3\text{S}$) : 6 g
 - Acide chlorhydrique concentré : 200 mL
 - Eau distillée q.s.p.

✚ Solution d' α -naphtylamine (conserver en flacon brun) :

- α -naphtylamine : 6 g
- Acide chlorhydrique : 40 mL
- Eau distillée q.s.p. 1 L

Procédure de préparation : dissoudre la poudre dans l'eau distillée sous agitation, ajouter quelques millilitres d'acide chlorhydrique, compléter la dissolution par un léger chauffage, puis ajouter le reste de l'acide. Compléter ensuite à 1 litre avec de l'eau bidistillée, filtrer la solution.

✚ Solution d'EDTA (5 g/L) : utilisée pour complexer le fer et les métaux lourds susceptibles de provoquer des interférences.

✚ Solution d'acétate de sodium : 272 g/L de $\text{CH}_3\text{COONa} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$.

✚ Solution étalon de nitrate de potassium (1 g/L) :

Dissoudre 1,631 g de KNO_3 préalablement séché au dessiccateur, puis compléter à 1 litre avec de l'eau bidistillée.

❖ Mode de travail:

A) Mélange réducteur: Préparer le mélange réducteur en mélangeant :

25 mL de solution de sulfate de cuivre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)

25 mL de solution d'hydrazine ($\text{H}_2\text{N}-\text{NH}_2$)

B) Mélange colorant (conserver en flacon brun)

- Acétone : 10 mL
- Solution d'acide sulfanilique : 20 mL
- Solution d'acétate : 20 mL
- Solution d' α -naphtylamine : 20 mL
- Eau distillée q.s.p. 1 litre

L' α -naphtylamine doit être ajoutée en dernier, après dilution complète du mélange, afin d'éviter la formation d'un précipité blanc laiteux.

C) Solution de soude 0,05 M

La solution de soude 0,05 M est obtenue par dilution de la solution mère 1 M, soit un facteur de dilution de 20.

On prélève 50 mL de solution de soude 1 M et on complète à 1 litre avec de l'eau distillée.

❖ Préparation de l'échantillon analysé

Prélever 0,5 mL de l'échantillon d'eau et ajouter 2,5 mL de solution de soude. Agiter soigneusement, puis laisser reposer pendant une heure.

Ajouter ensuite 20 mL de solution colorante et 24,5 mL d'eau distillée. Laisser reposer environ 15 minutes avant d'effectuer la mesure. La mesure est réalisée à l'aide d'un spectrophotomètre DR/2500, permettant de tracer la courbe d'étalonnage et de déterminer la concentration en nitrates (mg/L) par extrapolation des valeurs mesurées sur la courbe

III.4.2.4. Détermination des bicarbonates (HCO_3^-):

L'alcalinité d'une eau correspond principalement à la présence de bicarbonates, carbonates et hydroxydes.

❖ Principe:

La méthode consiste à déterminer les volumes successifs d'un acide fort dilué nécessaires pour neutraliser l'échantillon d'eau à deux points de pH : 8,3 et 4,3.

La première neutralisation permet de calculer le titre alcalimétrique (TA). La seconde permet de déterminer le titre alcalimétrique complet (TAC).

❖ Réactifs

-  Solution d'acide sulfurique (H_2SO_4) N/50
-  Préparée en diluant 0,5 mL d'acide sulfurique dans 1000 mL d'eau distillée.
-  Solution de NaOH N/50
-  Préparée en dissolvant 0,8 g de NaOH dans 1000 mL d'eau distillée.
-  Indicateur méthyl orange Préparé en dissolvant 0,5 g dans 100 mL d'eau distillée.

❖ Mode opératoire

-Préparer trois fioles jaugées. Le volume de prise d'essai est de 100 mL.

-Blanc : 100 mL d'eau distillée.

-Témoin (titre) : 90 mL d'eau distillée + 10 mL de solution de NaOH.

-Échantillon : 25 mL d'eau à analyser, complétés à 100 mL avec de l'eau distillée.

-Les trois solutions sont ensuite titrées avec la solution d' H_2SO_4 jusqu'au virage de couleur rouge brique.

❖ Expression des résultats:

$$\text{TAC} = [\text{V}_a - \text{V}_b] \cdot \text{T} \cdot \text{D en } (^\circ\text{f})$$

V_a : volume de H_2SO_4 pour titrer l'eau à analyser

V_b : volume de H_2SO_4 pour titrer blanc

T : (10/ volume de H_2SO_4 pour titrer le titre)

D : facteur de dilution

$1^\circ\text{f} = 10 \text{ mg/l de CaCO}_3$

La concentration de: $\text{HCO}_3^- = \text{TAC} \cdot 12.2 \text{ [48]}$

III .5.Résultats des analyses de l'eau :

Des analyses physico-chimiques des eaux souterraines du bassin de Touggourt ont été réalisées au laboratoire de l'Algérienne des Eaux. L'étude a porté sur la mesure de paramètres généraux tels que la température, le pH, la conductivité électrique et la matière sèche, ainsi que sur l'analyse des

anions (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-}) et des cations (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ , K^+). Les résultats ont été présentés sous forme graphique afin d'en faciliter l'interprétation.

La précision des résultats a été vérifiée par le calcul du bilan ionique (BI), indicateur clé de la fiabilité des analyses chimiques de l'eau, selon les relations établies.

Les normes sanitaires internationales et nationales ont également été utilisées pour comparer la qualité de l'eau potable étudiée.

$$\text{BI} = \left| \frac{\sum r(\text{cation}) - \sum r(\text{anion})}{\sum r(\text{cation}) + \sum r(\text{anion})} \right| \times 100 \leq 6$$

Tableau 2: Les normes algériennes et OMS de l'eau potable[48]

Paramètres	Unité	OMS	Normes Algériennes
Ph	-	6.5à9.5	6.5à8.5
Temperature	C°	-	25
Conductivité	μS/cm	-	2800 à 20C°
Calcium	mg/l	200	200 à 110C°
Magnésium	mg/l	150	150
Chlorures	mg/l	250	200à500
Sulfatrs	mg/l	400	400
Sodium	mg/l	200	200
Nitrates	mg/l	50	50
Bicarbonates	-	-	-
Potassium	mg/l	10	12

III.5.1.Variations des paramètres physico-chimiques:

III.5.1.1.Potential d'Hydrogène (pH):

Les valeurs du pH varient entre 7,1 et 8,3, restant dans les limites autorisées, ce qui indique un caractère légèrement alcalin des eaux souterraines. L'augmentation du pH au niveau du point P7 coïncide avec une forte minéralisation, reflétant son lien avec les formations géologiques. De manière générale, ces valeurs restent stables et contribuent au maintien de l'équilibre chimique des eaux

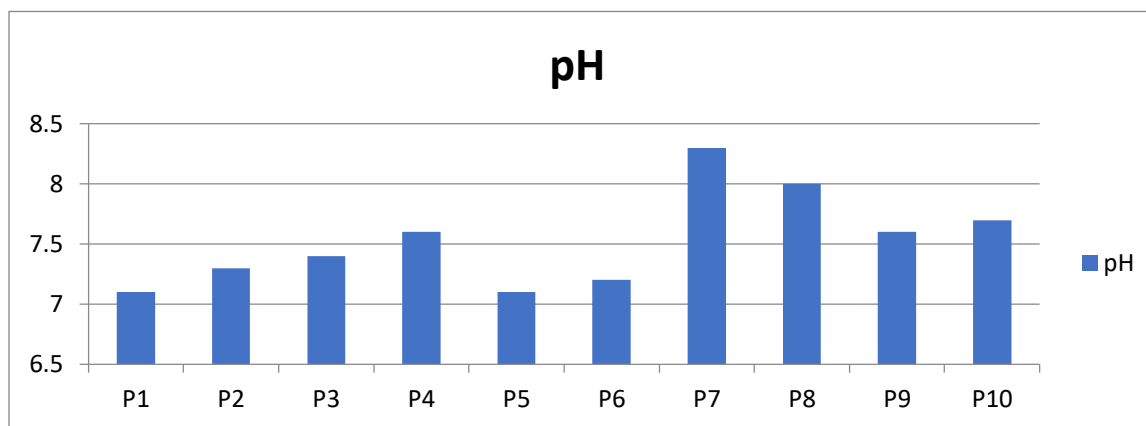


Figure III.6 : Variation du pH au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.2. Conductivité électrique :

Les résultats montrent une conductivité électrique élevée, variant entre 2,69 et 11,33 ms/cm, dépassant les normes autorisées, ce qui indique une forte salinité des eaux souterraines. Cette situation est liée à l'augmentation des sels dissous provenant de l'interaction avec les formations salines et gypseuses, notamment dans certains points, et s'accompagne d'une hausse des principaux ions, ce qui réduit la potabilité de l'eau sans traitement préalable.

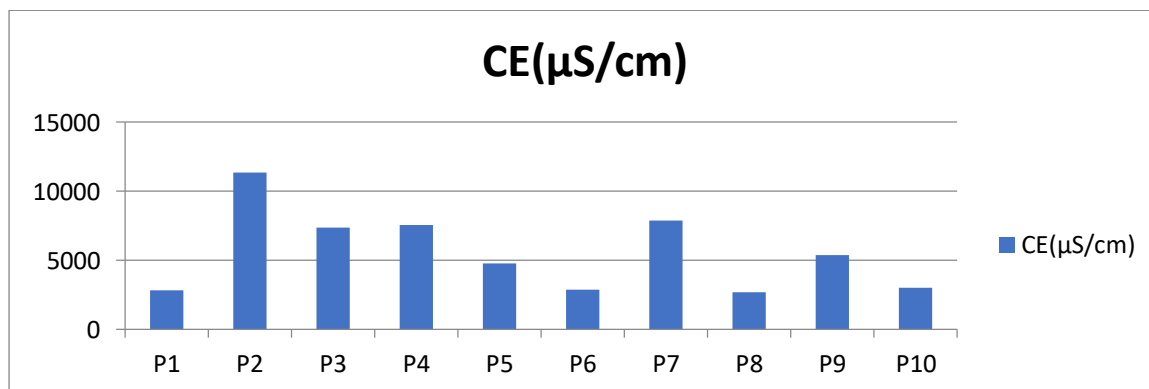


Figure III.7: Variation du conductivité au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.3. Calcium (Ca^{+2}):

Le calcium est l'un des éléments dominants des eaux souterraines de la région et contribue principalement à leur dureté. Il se présente généralement sous forme de bicarbonates, ainsi qu'en proportions moindres sous forme de sulfates et de chlorures. Les résultats des analyses montrent que sa concentration varie entre 8,01 méq/l (P6) et 18,03 méq/l (P7). Cette variation s'explique par la nature des formations géologiques, notamment la dissolution des roches carbonatées (CaCO_3) et gypseuses (CaSO_4), ce qui entraîne la libération des ions calcium et l'augmentation de la minéralisation des eaux.

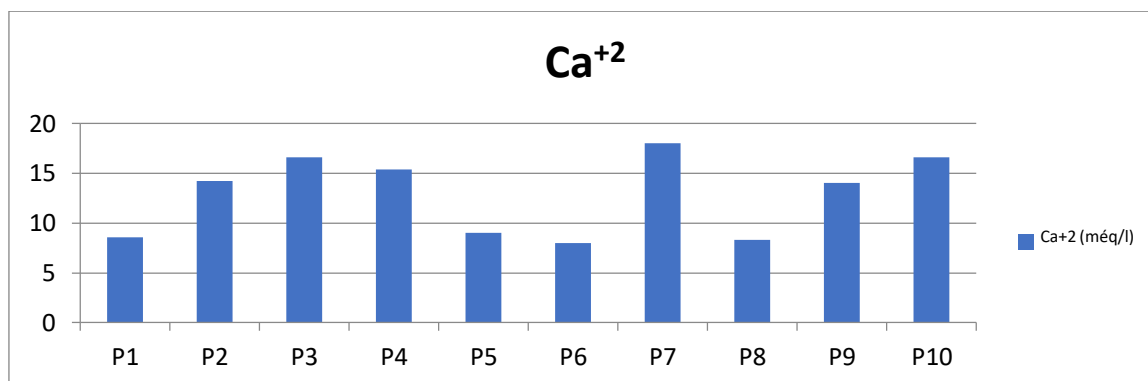


Figure III.8: Variation du calcium au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.4. Magnésium (Mg^{+2}):

Le magnésium est un élément important des eaux souterraines, avec des concentrations variant entre 3,95 méq/l (P8) et 19,39 méq/l (P7). Sa présence est principalement liée à la dissolution des roches carbonatées riches en magnésium, telles que la dolomite, ainsi qu'aux formations salines et évaporitiques contenant du sulfate de magnésium ($MgSO_4$). On observe une augmentation de ses concentrations dans certains points (P7, P3, P10 et P4), en association avec le calcium et les bicarbonates, ce qui indique les mêmes processus géologiques de dissolution des roches. Cela contribue à la minéralisation et à la dureté des eaux.

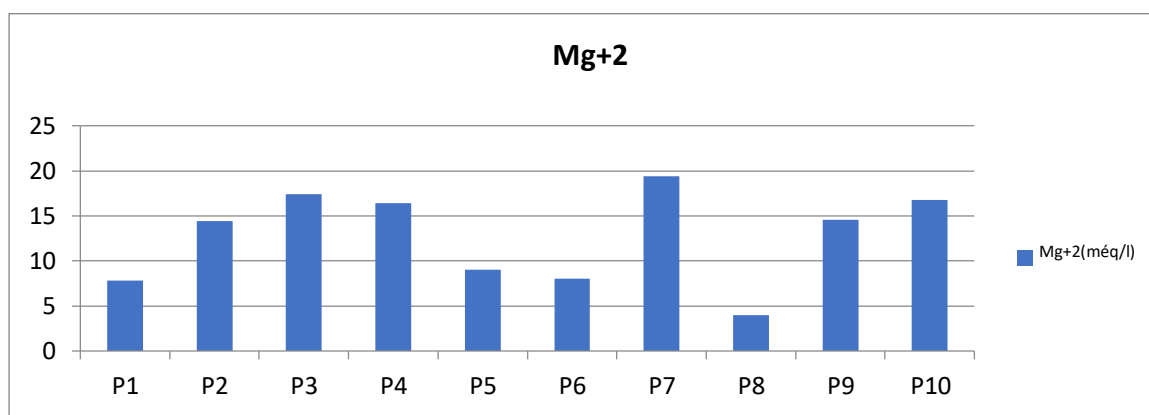


Figure III.9: Variation du Magnésium au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.5. Sodium (Na^{+}):

Le sodium est le cation dominant, avec des concentrations variant entre 12,48 méq/l (P6) et 33,18 méq/l (P7). Sa présence est principalement liée à la lixiviation des formations riches en chlorure de sodium ainsi qu'à l'altération de certains minéraux et silicates. L'augmentation observée dans les points P7, P4 et P10 reflète sa contribution importante à la salinité des eaux et l'influence des formations évaporitiques, ce qui en fait un indicateur clé de l'évolution hydrochimique.

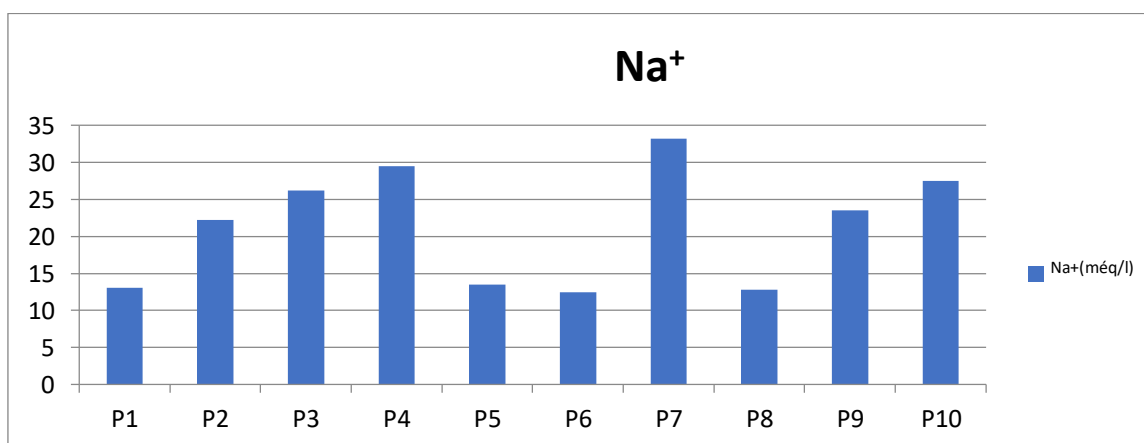


Figure III.10: Variation du Sodium au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.6. Potassium (K^+):

Les concentrations en potassium varient entre 0,51 méq/l (P6) et 1,4 méq/l (P7). Sa présence est liée à deux sources principales : une source naturelle due à l'altération des formations argileuses, et une source anthropique associée à l'utilisation d'engrais chimiques (NPK). Une augmentation est observée dans certains points tels que P7 et P4, ce qui reflète l'influence de l'irrigation ou du lessivage des sols. Bien que ses concentrations restent faibles par rapport aux autres cations, le potassium demeure un indicateur de l'impact des activités humaines sur la qualité des eaux.

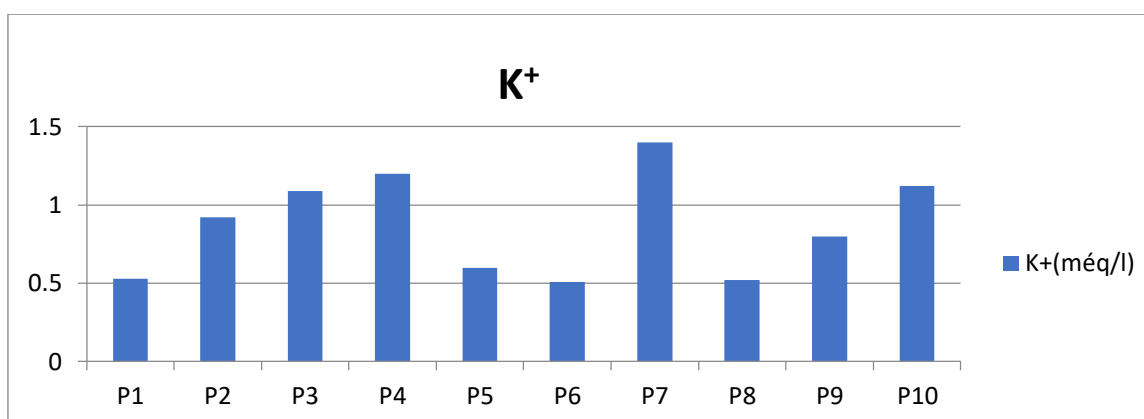


Figure III.11 : Variation du Potassium au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.7. Chlorure (Cl^-):

Le chlorure est lié à la dissolution des formations salines et aux eaux usées, ce qui entraîne une dégradation de la qualité des eaux souterraines. Ses concentrations varient entre 16,4 méq/l (P1) et 48,8 méq/l (P7), avec une salinité élevée dans la plupart des points. L'augmentation observée aux

points P7 et P4 résulte de l'effet combiné des facteurs naturels et anthropiques, ce qui accroît la conductivité électrique des eaux.

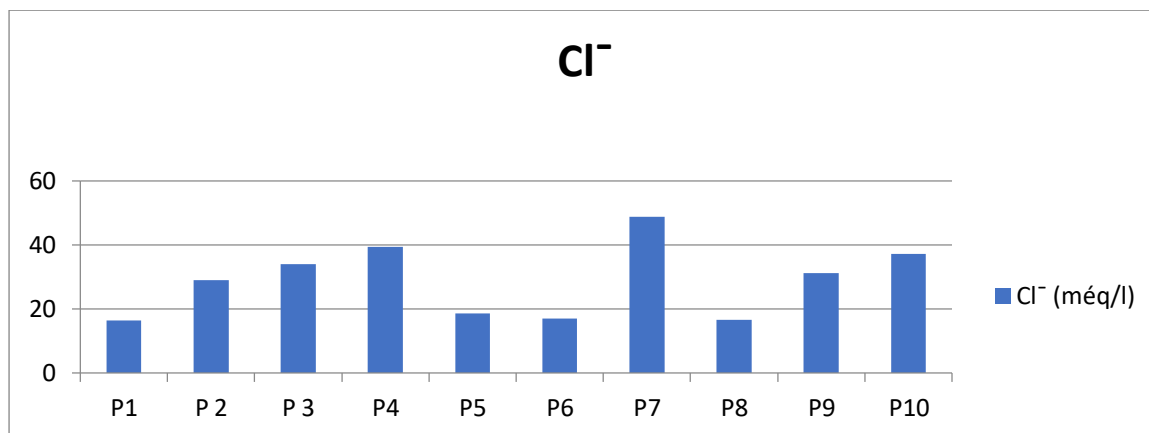


Figure III.12 : Variation du Chlorure au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.8.Sulfate (SO_4^{2-}):

Les sulfates présents dans les eaux souterraines proviennent principalement de la dissolution des formations gypseuses, avec une possible influence des activités agricoles. Leurs concentrations varient entre 10,41 mg/l et 26,04 mg/l, avec un dépassement des normes dans la plupart des points. L'augmentation des sulfates est associée à celle du calcium dans certaines stations, ce qui confirme le rôle des formations gypseuses et salines dans l'augmentation de la salinité et la dégradation de la qualité des eaux.

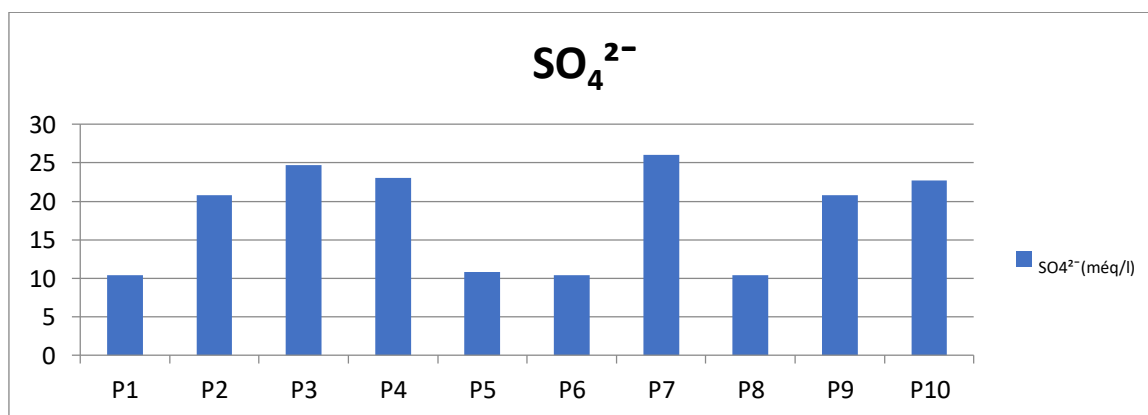


Figure III.13: Variation du Sulfate au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.9.Nitrate (NO_3^-):

Les analyses montrent que les concentrations en nitrates dans tous les points étudiés restent inférieures à la limite autorisée (50 mg/l selon l'OMS et les normes algériennes), avec des valeurs

comprises entre 0,06 méq/l (P5) et 0,63 méq/l (P4). Bien que ces concentrations soient faibles, la présence des nitrates dans certains points comme P4 et P3 est principalement liée aux activités agricoles et à l'utilisation d'engrais azotés. Cette variation reflète l'infiltration des eaux d'irrigation, ce qui nécessite une surveillance afin d'éviter toute accumulation future, notamment dans les zones agricoles actives.

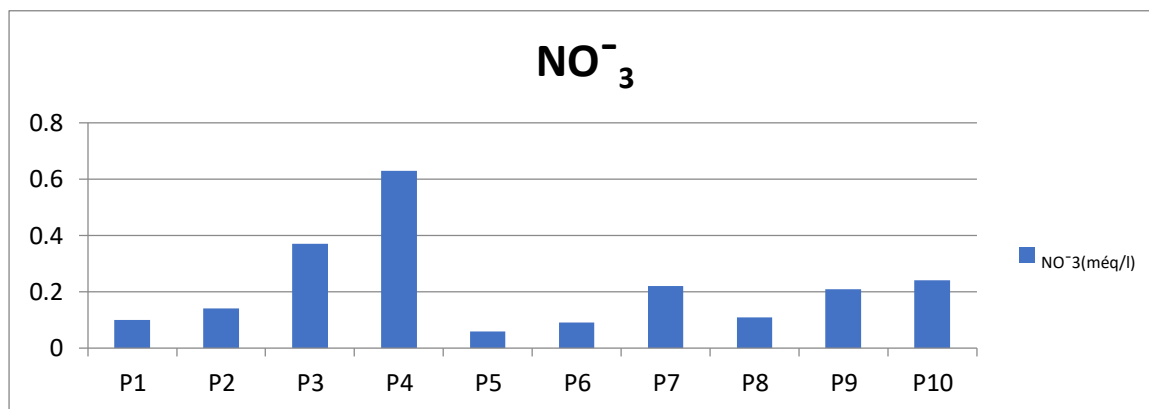


Figure III.14 : Variation du Nitrate au niveau du bassin de Touggourt

III.5.1.10. Bicarbonate (HCO_3^-):

Les bicarbonates présents dans les eaux de la zone d'étude proviennent des mêmes sources que celles du calcium et du magnésium déjà mentionnés. Ils résultent principalement de la dissolution des formations carbonatées sous l'action des eaux saturées en dioxyde de carbone (CO_2). Les résultats des analyses montrent que les concentrations en bicarbonates varient entre une valeur minimale de 1,62 méq/l (P6) et une valeur maximale de 2,89 méq/l (P10). Cette variation s'explique par la répartition des formations calcaires et dolomitiques dans le bassin. L'élévation de la concentration au niveau du point (P10) traduit une interaction intense entre les eaux souterraines et le milieu rocheux carbonaté, ce qui augmente l'alcalinité des eaux et confirme le rôle du CO_2 dissous dans l'accélération de la dissolution des roches, en accord avec les caractéristiques hydrochimiques du bassin de Touggourt.

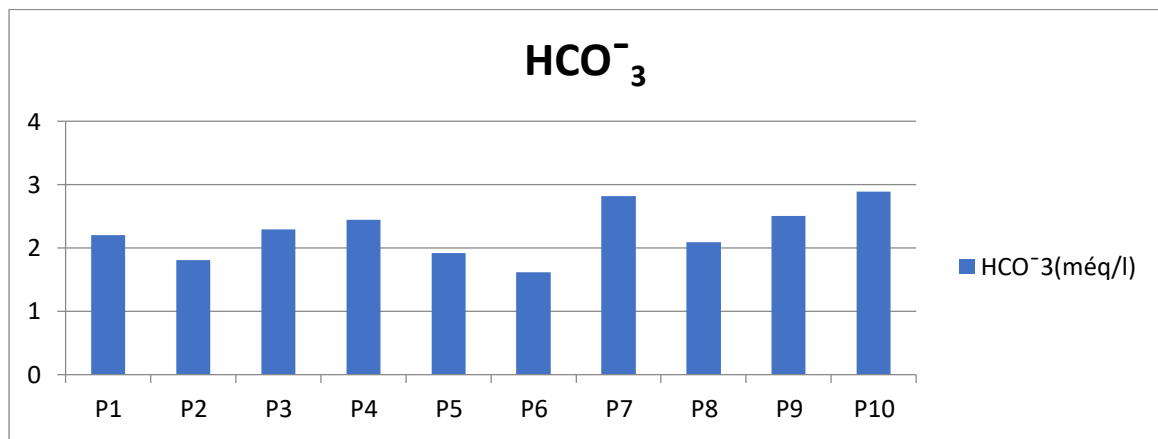


Figure III.15: Variation du Bicarbonate au niveau du bassin de Touggourt

III.6. Faciès chimique des eaux:

III.6.1. Classification de piper:

Cette méthode est couramment employée en hydrologie, hydrogéologie et géochimie pour caractériser et classer les faciès chimiques des eaux. Elle repose sur l'analyse des concentrations en cations et anions majeurs présents dans l'eau. Le diagramme de Piper, une représentation triangulaire, permet de catégoriser les eaux selon leurs propriétés chimiques dominantes, comme les eaux bicarbonatées, sulfatées ou chlorurées. Ce modèle facilite ainsi l'étude des processus géochimiques affectant la composition des eaux et aide à évaluer leur qualité ainsi que leur potabilité. [49]

Les résultats du diagramme de Piper pour les échantillons (P1 à P10) montrent une homogénéité hydrochimique nette, avec une concentration de tous les points dans la partie supérieure du losange, ce qui classe ces eaux dans le faciès chloruré-sulfaté calcique et magnésien. Le triangle des cations indique la dominance du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+}), avec une faible contribution du sodium et du potassium, tandis que le triangle des anions montre une prédominance des sulfates (SO_4^{2-}) et des chlorures (Cl^-) et une absence quasi totale des bicarbonates. Cette répartition traduit des eaux dures et salines, principalement contrôlées par la dissolution des roches évaporitiques telles que le gypse et l'anhydrite, reflétant ainsi un environnement géologique riche en sels et non carbonat.

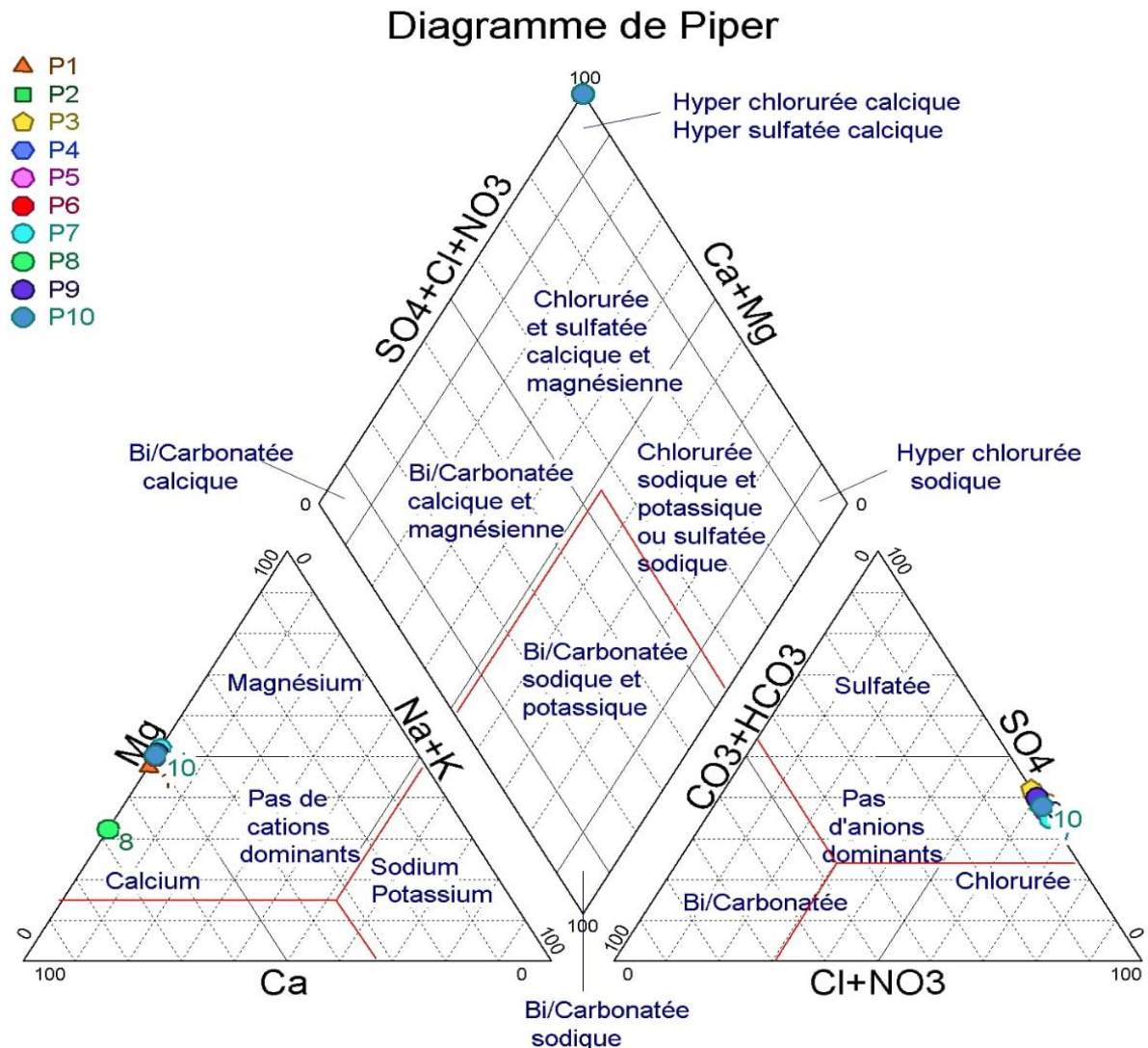


Figure III.16: Diagramme de Piper des eaux souterraines de la région de Touggourt.

III.6.2. Classification de Schoeller:

Le diagramme de Schoeller permet entre autres de reconnaître simplement le faciès d'une eau souterraine, en utilisant les concentrations des éléments majeurs et en les reportant sur un graphique en colonnes à échelles logarithmiques. [50]

Le diagramme de Schöller Berkloff montre que les échantillons (1 à 10) présentent un même origine hydrochimique avec des variations de salinité. Les cations sont dominés par Na+K, tandis que les anions sont dominés par Cl^- puis SO_4^{2-} , avec une faible présence des bicarbonates et des nitrates. Les eaux sont classées comme chlorurées-sodiques à sulfatées-sodiques et se divisent en eaux à salinité élevée et d'autres à salinité moyenne. Ce caractère est lié à la dissolution des sels et à

une forte évaporation, ce qui indique des eaux fortement salines associées à des milieux évaporitiques ou des aquifères profonds.

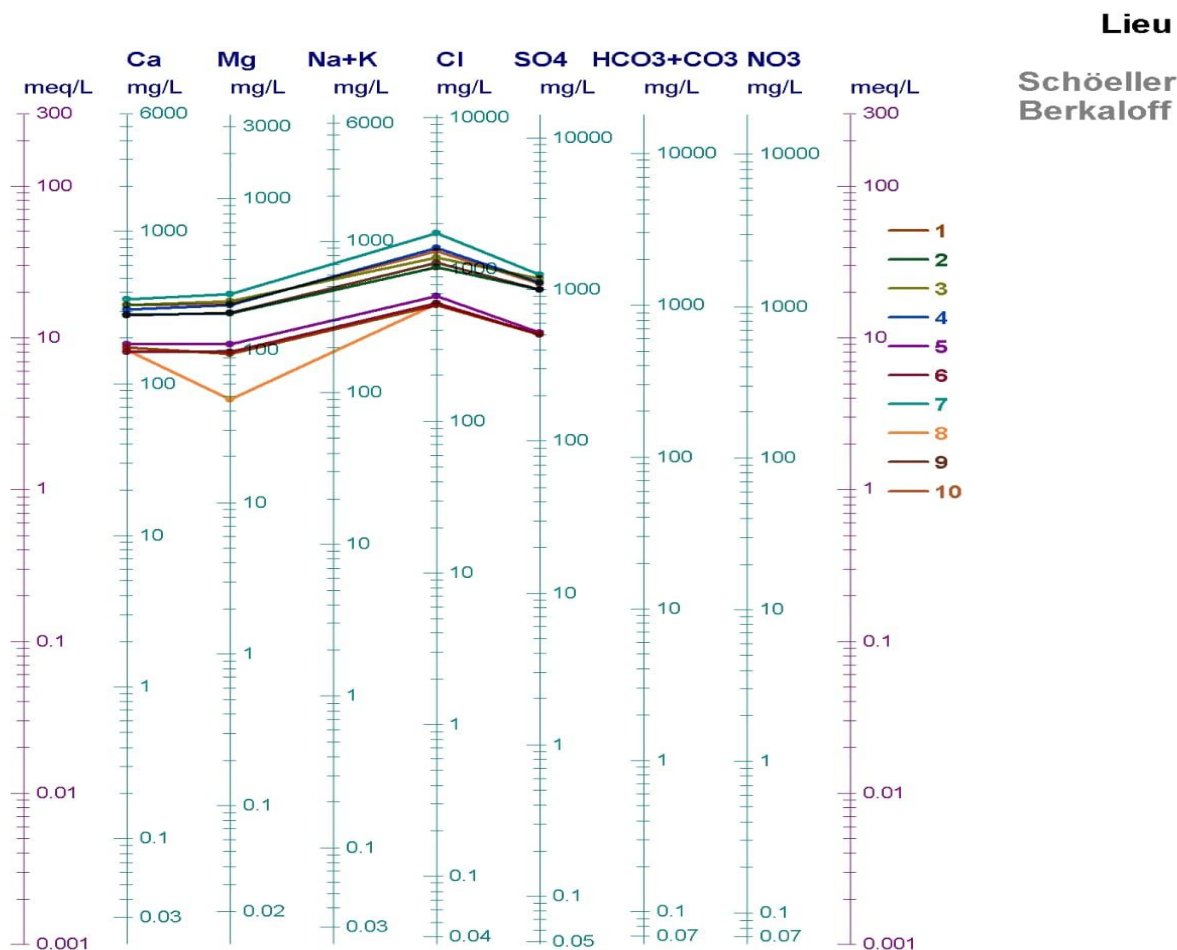


Figure III.17: Diagramme de Schoeller des eaux souterraines de la région de Touggourt.

III.6.3. Classification de Stabler: Il sert à évaluer rapidement les différents titres caractéristiques d'une eau, notamment le titre d'alcalinité, le titre en sels d'acides forts ainsi que le titre d'hydrotimétrie.[51]

Le diagramme de Stabler montre que les échantillons (1 à 10) sont très homogènes, indiquant une unité hydrochimique unique. Les cations présentent un équilibre entre Ca^{2+} et Mg^{2+} , avec une légère dominance parfois du magnésium, tandis que les anions sont clairement dominés par Cl^- par rapport à SO_4^{2-} . Ainsi, les eaux sont classées comme chlorurées-sulfatées calco-magnésiennes, avec une dureté permanente due à l'association du calcium et du magnésium avec les chlorures et les sulfates. Ce faciès s'explique par l'influence des formations évaporitiques (sels) et l'interaction avec les

couches géologiques, confirmant que toutes les échantillons appartiennent au même système aquifère.



Figure III.18: Diagramme de Stabler des eaux souterraines de la région de Touggourt.

III .7.Etude de la vulnérabilité à la pollution chimique :

Plusieurs paramètres interviennent dans le transfert vertical de la pollution à partir de la surface du sol, notamment l'alimentation de la nappe (à partir des précipitations, cours d'eau, infiltration des eaux d'irrigation...), nature et épaisseur du sol, caractéristiques (lithologie, perméabilité..) de la zone non saturée, profondeur de l'eau par rapport au sol. Horizontalement la filtration se poursuit dans le milieu poreux de la nappe; le polluant est dilué dans la masse d'eau. [41]

III .7.1.La pollution minérale:

Le logiciel SURFER 16 a été utilisé pour créer des cartes spatiales permettant une interprétation rapide et systématique de la distribution et de l'évolution de la concentration de ces éléments dans le bassin d'étude (bassin de Touggourt).

III .7.1.1Evolution spatiale de la répartition de certains polluants métalliques:

- Las concentrations sont en (méq/l)

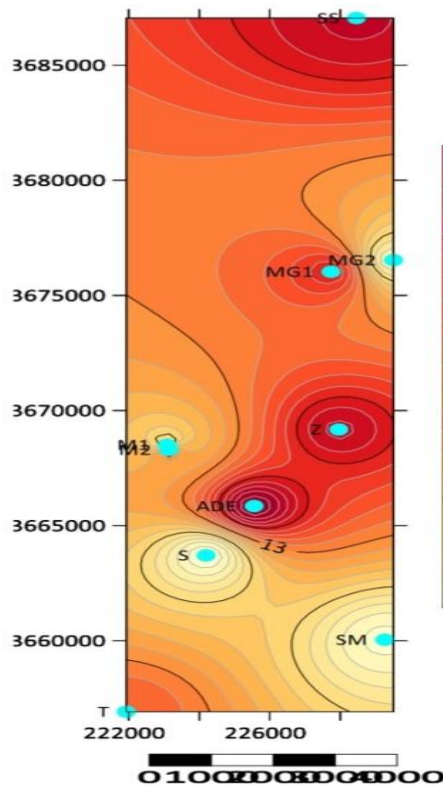


Figure III.19:Variation spatiale deCalcium

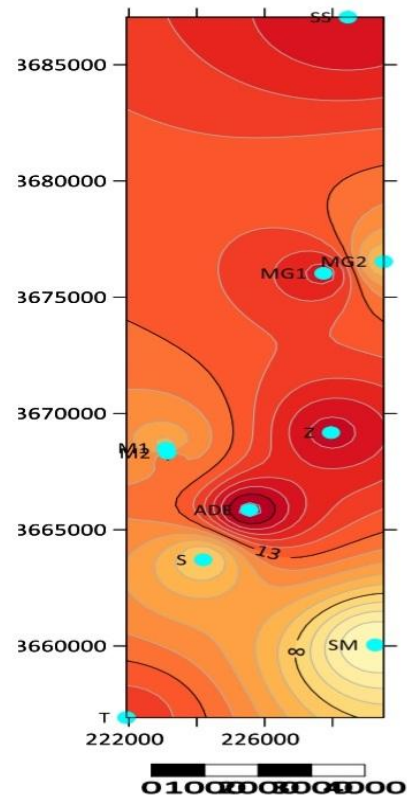


Figure III.20:Variation spatiale deMagnésium

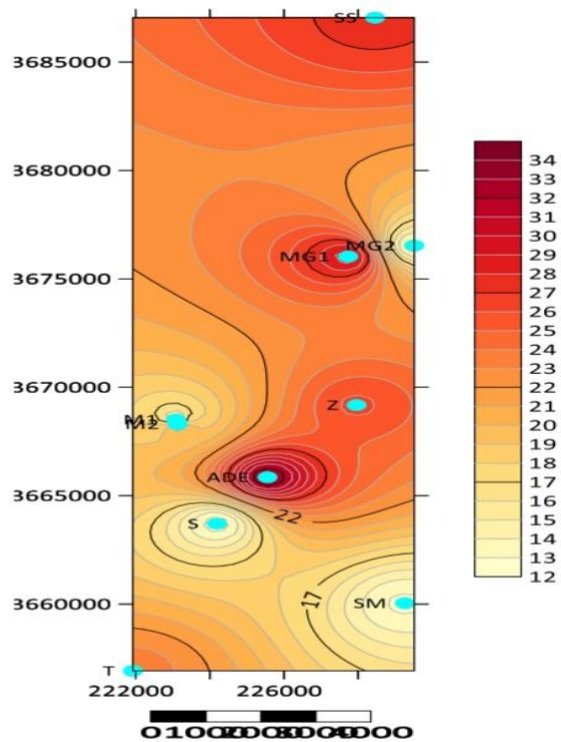


Figure III.21: Variation spatiale de Sodium

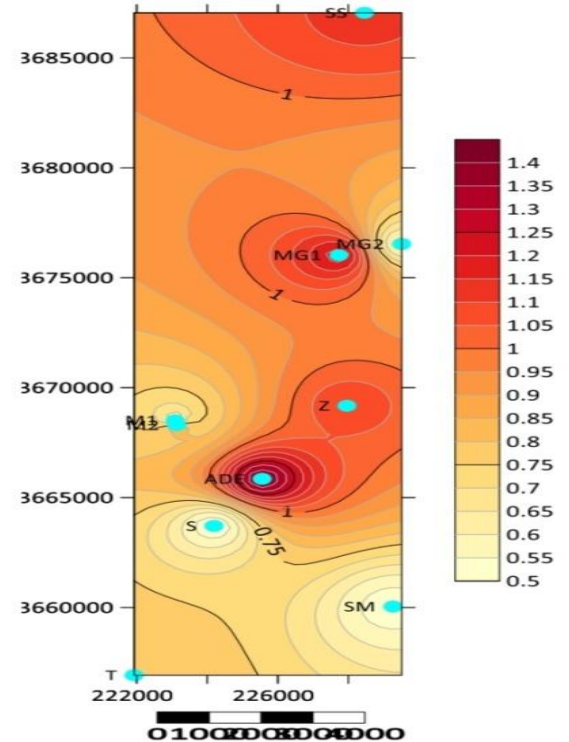


Figure III.22: Variation spatiale de potassium

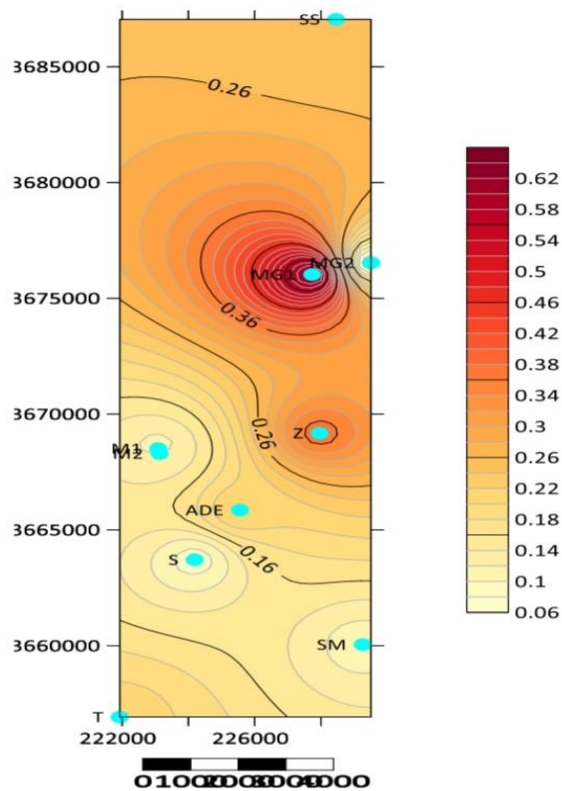


Figure III.23: Variation spatiale de Nitrate

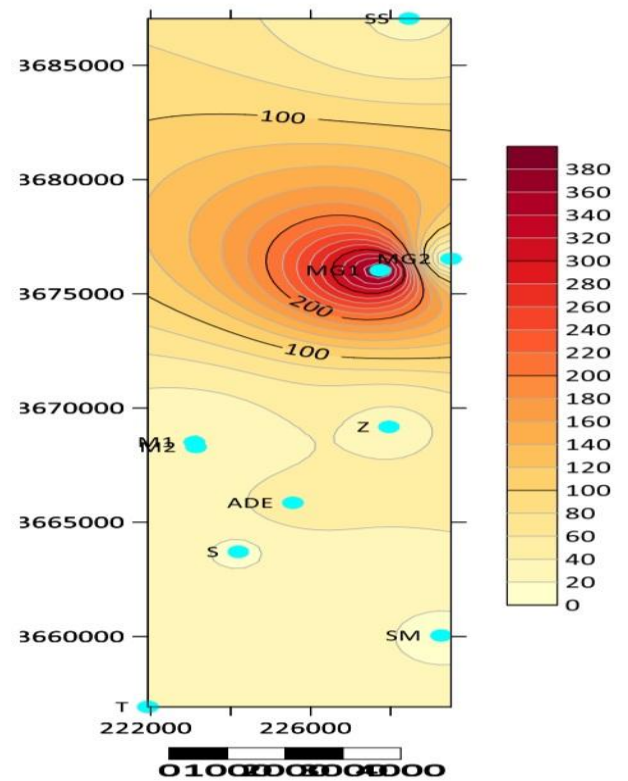


Figure III.24: Variation spatiale de chlorure

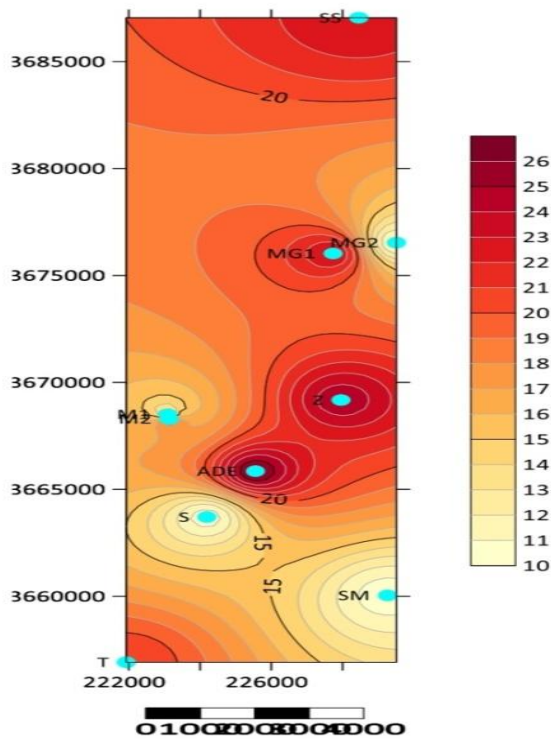


Figure III.25: Variation spatiale de sulfate

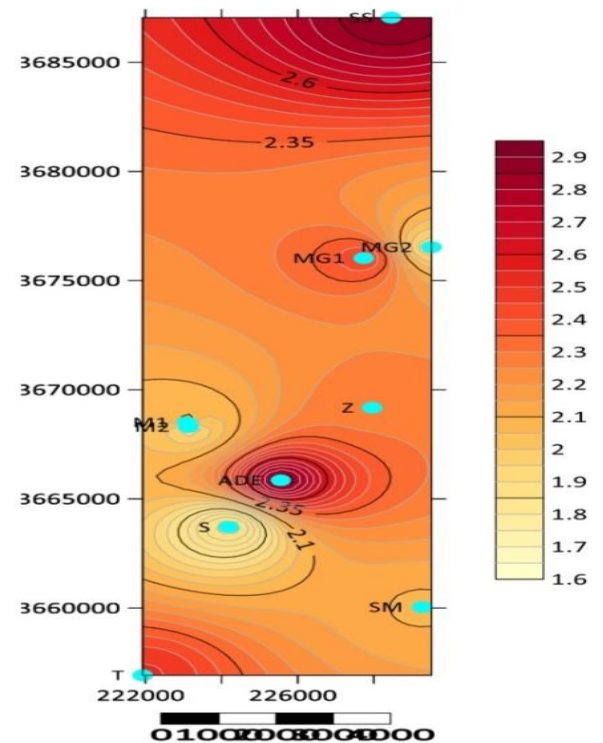


Figure III.26: Variation spatiale de Bicarbonate

III.8.L'indice de pollution minérale:

Le traitement des données repose sur la valeur de l'indice de pollution minérale (IPM), où les paramètres minéraux sont classés en quatre niveaux de qualité selon les valeurs calculées de cet indice (Tableau 3). Afin d'évaluer le degré de contamination des eaux souterraines par la pollution minérale, chaque élément chimique (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- et HCO_3^-) est analysé individuellement pour chaque point de prélèvement. La somme de ces niveaux constitue un indice représentant le degré de contamination minérale.[52]

Tableau 3: classement de l'indice de pollution (IPM)

Concentration en (még/l)	Classe1	Classe2	Classe3	Classe4	Classe5
Ca^{2+}	0–4,15	4,15–8,31	8,31–12,47	12,47–16,63	>16,63
Mg^{2+}	0–4,2	4,2–8,4	8,4–12,6	12,6–16,8	>16,8
Na^+	0–6,87	6,87–13,75	13,75–20,63	20,63–27,51	>27,51
K^+	0–0,28	0,28–0,56	0,56–0,84	0,84–1,12	>1,12
Cl^-	0–9,34	9,34–18,68	18,68–28,02	28,02–37,36	>37,36
SO_4^{2-}	0–5,67	5,67–11,35	11,35–17,02	17,02–22,7	>22,7
NO_3^-	0–0,06	0,06–0,12	0,12–0,18	0,18–0,24	>0,24
HCO_3^-	0–0,72	0,72–1,44	1,44–2,16	2,16–2,89	>2,89
IPM	16–20,4	20,4–24,8	24,8–29,2	29,2–33,6	33,6–38
Lapollution minérale	Très Faible	Faible	Moyenne	Forte	Très Fort

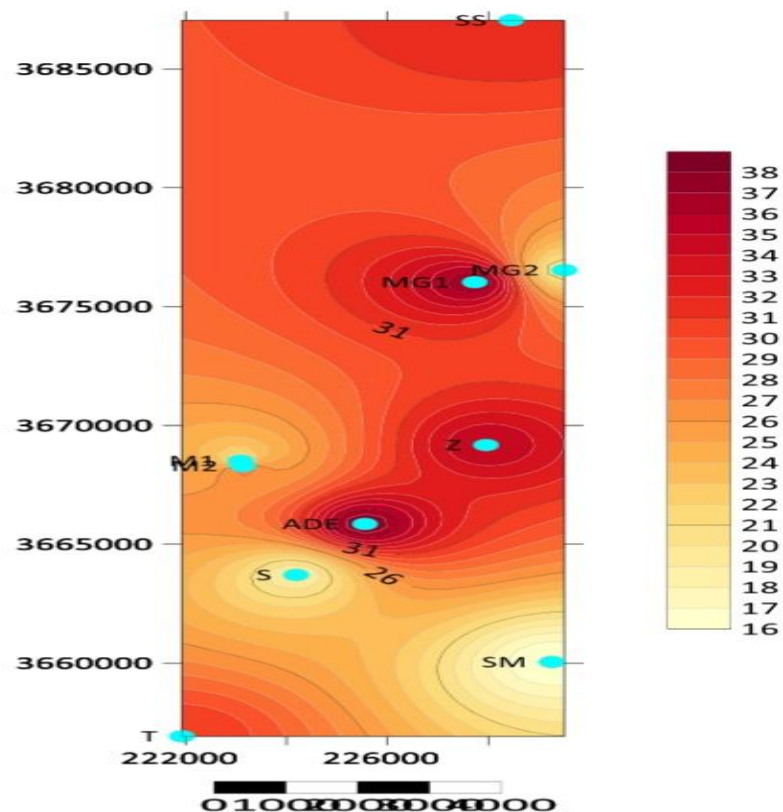


Figure III.27: Variation spatiale de l'indice de pollution minérale

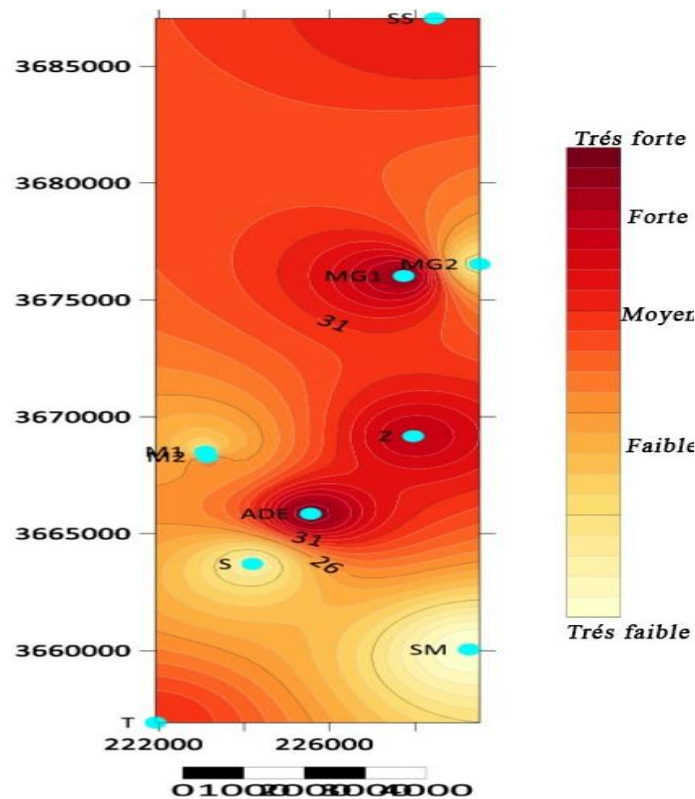


Figure III.28: Classification des degrés de pollution minérale des eaux souterraines selon l'indice IPM

D'après les deux figures, on peut remarquer que la région d'étude présente différents degrés de pollution minérale représentés par les valeurs de l'indice de pollution minérale (IPM).

- ✓ Les zones caractérisées par une très faible pollution minérale se localisent principalement au niveau des points S et SM, où les valeurs les plus faibles de l'IPM ont été enregistrées.
- ✓ Les zones à faible pollution minérale occupent une partie importante de la région d'étude, notamment à proximité des points M1 et M2.
- ✓ Les zones à pollution minérale moyenne apparaissent dans les parties centrales de la carte, traduisant une augmentation progressive de la minéralisation des eaux souterraines.
- ✓ En revanche, les zones à forte pollution minérale sont observées près des points MG1, Z et ADE, ainsi que dans certaines parties centrales et septentrionales de la région d'étude, où les valeurs de l'IPM atteignent environ **IPM=31**.
- ✓ Les zones à très forte pollution minérale se concentrent principalement dans les parties nord et centrale de la région d'étude, où les valeurs maximales de l'IPM atteignent **IPM_{max}=38**.
- ✓ indiquant ainsi un degré élevé de minéralisation des eaux souterraines dans ces secteurs. Ces zones représentent les régions les plus affectées par la pollution minérale en raison de l'augmentation importante des concentrations en sels et en éléments dissous dans les eaux souterraine

conclusion

En conclusion, cette étude a permis d'évaluer la qualité des eaux souterraines dans le bassin aride de Touggourt et d'étudier leur vulnérabilité à la pollution minérale, à travers un ensemble d'analyses physico-chimiques portant sur le pH, la conductivité électrique ainsi que certains ions majeurs tels que le calcium, le magnésium, le sodium, les chlorures, les sulfates et les nitrates.

Les résultats obtenus ont montré l'existence de variations spatiales des caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines, avec une augmentation du degré de minéralisation dans plusieurs zones de la région étudiée. Cette situation est liée principalement aux conditions climatiques sahariennes caractérisées par des températures élevées, une forte évaporation et une faible pluviométrie, ainsi qu'à l'impact des activités humaines, notamment l'activité agricole et la surexploitation des eaux souterraines.

L'étude hydrogéochimique, réalisée à l'aide des diagrammes de Piper, Schoeller et Stabler, a permis d'identifier les faciès chimiques dominants des eaux souterraines et de mieux comprendre l'évolution spatiale de leur composition chimique. De plus, l'indice de pollution minérale (IPM) a mis en évidence l'existence de zones présentant différents degrés de pollution minérale, les valeurs les plus élevées ayant été enregistrées dans certaines parties centrales et septentrionales de la région d'étude.

Les résultats ont également révélé que les zones situées à proximité des points Magarine1, Zaouia El Adidia et Agence ADE sont parmi les plus exposées à la pollution minérale, en raison des fortes concentrations en sels et en éléments dissous dans les eaux souterraines.

Au vu des résultats obtenus, il est recommandé d'éviter le forage de nouveaux puits dans les zones les plus touchées par la pollution minérale. Il est également nécessaire d'assurer un suivi régulier de la qualité des eaux souterraines et d'adopter des méthodes de gestion rationnelle et durable des ressources hydriques, afin de préserver cette ressource vitale et garantir sa disponibilité pour les générations futures.

Références

Références:

- [1]R. REZEG, " Étude hydrogéochimique de la pollution minérale des eaux souterraines du complexe terminal (CT) de la région d'Ouargla, Sud-Est algérien ", mémoire de master en Génie des procédés de l'environnement, Université KM Ouargla, 2020, p. 01
- [2]A. BERRAIS et I. BOUKHRIS, " Cartographie de la pollution chimique (minérale) des eaux souterraines du complexe terminal (CT) de la région d'Ouargla ", mémoire de master en Génie de l'environnement, Université KM Ouargla, 2016, p. 01
- [3] R. REGAGDA, " Étude géochimique des eaux de la nappe du complexe terminal dans la région de Touggourt (Sud-Est algérien) ", mémoire de master en Géologie, option Hydrogéologie, Université KM Ouargla, 2025, p. 01.
- [4].S.NEDJAA, "Impact de la gestion de la culture de courgette sur la diversité des insectes pollinisateurs dans la région de Touggourt ", mémoire de master en Phytoprotection et Environnement, université de KM Ouargla 2021, p. 05.
- [5]A. KRIMA et M. I. BARA, " Étude hydrochimique et de la vulnérabilité à la pollution chimique des eaux souterraines dans les zones arides région de Touggourt,Sud-Est algérien ", mémoire de master en Génie des Procédés de l'Environnement, Université KM Ouargla 2023, p.03,10,19,22,26
- [6]<https://www.gps-longitude-latitude.net/coordonnees-gps-de-touggourt> (en 01/2026)
- [7]A. KADRI et M. LEGOUGUI, " Suivi d'un forage d'AEP dans la région de Touggourt ", mémoire de master en Forage d'eau, Université KM Ouargla, 2023, p. 05.
- [8]<https://www.d-maps.com/index.php?lang=https://www.d-maps.com/index.php?lang>(en 01/2026)
- [9]Z. DJOUGHJI et A. SEMRA, "Contribution à l'étude du paléoenvironnement dans la région de Touggourt : Apport de la paléopédologie ",mémoire de master en Ecologie végétale et environnement, Université KM Ouargla, 2017, p. 07, 10, 11.
- [10]F. DJELLAKH et I. KACHI, "Etude morpho-analytique de quelques profils de sols dans la région de Touggourt ", mémoire de master en Protection de la Ressource Sol-Eau et Environnement, Université KM Ouargla, 2023, p. 08.
- [11]R. MELIANI, " Gestion des eaux usées dans la région de Touggourt ", mémoire de master en Hydrogéologie, Université KM Ouargla, 2019, p. 27.

Références

- [12] H. BABAOUSAIL, "Etude géochimique de l'aquifère du Mio-pliocène dans la région de l'Oued Righ (Touggourt)", mémoire de master en Hydrogéologie, Université KM Ouargla, 2016, P.03
- [13] www.Ogimet.com sur ONM (en 02/2026)
- [14] B. BOUSELSAL et N. KHERICI, "Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (SE Algérie)", article scientifique, Afrique Science, vol. 10, n°3, 2014, p. 163.
- [15] M. KHOUDRANE et B. MANSOURI, "Caractérisation géochimique des eaux de Complexe Terminal de la région de Touggourt", mémoire de master en Hydrogéologie, Université KM Ouargla, 2018, p. 09, 10.
- [16] M. DJOUAHI, "Étude de la Pollution Minérale et Organique des Eaux Souterraines du Complexe Terminal (CT) de la Cuvette d'Ouargla", mémoire de master académique, Université KM Ouargla, 2019, p. 18, 22, 29, 34.
- [17] B. KAMERON, "How the Warm, Wet Environments of Biology Feed Coherence, Rather than Destroy It", article scientifique, 28/10/2025.
- [18] B. NOUADRIA, "Contribution à l'Analyse Bactériologique de l'Eau Potable (L'eau de robinet)", mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, juin 2022, p. 4, 5.
- [19] <https://www.eau-seine-normandie.fr> (en 02/2026)
- [20] A. BOUCHRIT et H. HAKIMI, "Contribution à l'Étude de la Qualité Physico-Chimique de l'Eau de la Moyenne Seybouse", mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, juin 2016, p. 4.
- [21] <https://www.leaudile> (en 02/2026)
- [22] www.fondation-lamap.org (en 02/2026)
- [23] E. BLANQUET, "Les Changements d'États de l'Eau", Ministère de l'Éducation nationale et de la Jeunesse, mai 2023.
- [24] <https://www.msmanuals.com> (en 02/2026)
- [25] <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov> (en 02/2026)
- [26] <https://www.aquafontaine.fr> (en 03/2026)

Références

- [27] <https://www.hydratis.com> (en 03/2026)
- [28] <https://neurofit.app> (en 03/2026)
- [29] <http://share.google/AcazbOGEqDvERai7D>(en 03/2026)
- [30] M. CHAOUKI, "Évolution spatiotemporelle et la Vulnérabilité à la Pollution des Eaux Souterraines de la Région d'Ouargla", thèse de doctorat, Université KM Ouargla, 2016, p. 37.
- [31] <https://sage-val-dhuy-loiret.fr> (en 03/2026)
- [32] <https://fac.umc.edu.dz> (en 03/2026)
- [33] M. EZIANI et B. HACHACHE, "Contribution à l'Étude de la Qualité Physico-Chimique de l'Eau de la Moyenne Seybouse", mémoire de master, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2015, p. 18.
- [34] United States Environmental Protection Agency, "Microplastics Expert Workshop Report Trash Free Waters Dialogue Meeting Convened June 28-29, 2017" , 2017.
- [35] <https://www.eau-artoispicardie.fr>(en 04/2026)
- [36] www.actu-environnement.com (en 04/2026)
- [37] Z. ARAB, "Étude Processus de Traitement par Coagulation de la Station d'Aïn Zada", mémoire finale, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj, 2022, p. 4.
- [38] <https://fr.boell.org/fr/2023/02/21/sols-et-microorganismes-un> (en 04/2026)
- [39] K. BOUGUETIT et N. BENHAMIDA, " Etude de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines de la cuvette d'Ouargla (Cas de la nappe du Continental Intercalaire) ", mémoire de master en Analyse et Contrôle de Qualité, Université KM Ouargla, 2015, p. 25.
- [40] N. BENCHOULA, "Etude de l'évolution de la pollution minérale des eaux potables (AEP) de la région de Ouargla ", mémoire de master en Génie des procédés de l'environnement, Université KM Ouargla, 2018, p. 20.
- [41] M. DOKKAR et A. GHEDEIR, " Etude hydrochimique de la pollution organique et minérale des eaux souterraines du complexe terminale (CT) de la cuvette de Ouargla ", mémoire de master en Génie des procédés de l'environnement, Université KM Ouargla, 2019, p. 30 ,46
- [42] l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH)
- [43] <https://carewater.solutions/> (en 04/2026)

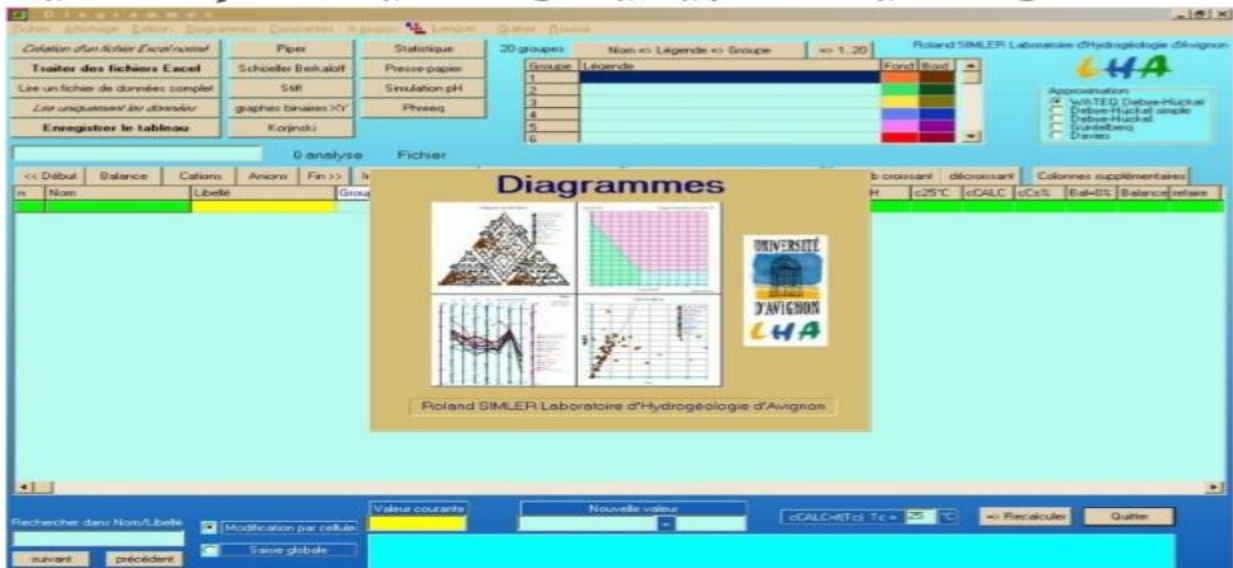
Références

- [44] F. ZEGGAI, " La contamination de l'eau par les métaux ", mémoire de master en Toxicologie industrielle et environnementale, Université de Tlemcen, 2020, p.37.
- [45] <https://fr.infitek.com/products/ph-metre-de-paillasse-ph-b400f/> (en 04/2026)
- [46]<https://www.e-laboratoria.pl/tlenomierz-laboratoryjny-inolab-oxi-7310-set-stirrox-g>(en 05/2026)
- [47]V. DOMINIQUE. " Etudes de données physico-chimiques des eaux du secteur Nord du Piton des Neiges Ile de La Réunion ". Master1 géosphère : Spécialité Transfert Sol Aquifère. 2009 p. 13.
- [48]M. BELALOU, " Étude de la qualité physico-chimique des eaux de consommation de la ville de Djamaa ", mémoire de master en Hydraulique urbaine, Université Mohamed Khider Biskra, 2020, p. 14.
- [49]B. NAMOUNE, " Évaluation de la qualité des eaux souterraines de la plaine de Chelghoum Laïd (wilaya de Mila) ", mémoire de master en Protection des écosystèmes, Centre universitaire Abdelhafid Boussouf de Mila, 2025, p. 62.
- [50]<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Hydrochimie-page-2.html> (05/2026)
- [51] B. MUHINDO MUSUBAO et G. SHUNGU LAMA, " Hydrogéochimie des sources salines de Bishusha / Nord-Kivu (RDC) ", International Journal of Innovation and Applied Studies, vol. 17, n° 1, 2016, p. 8.
- [52]N. HMIDI. et A. HAMZA., "Étude géochimique de la pollution organique et minérale des eaux souterraines du complexe terminal (CT) de la cuvette de Ouargla ", mémoire de master en Génie des procédés, spécialité Analyse et contrôle de qualité, Université KM Ouargla, 2017, p. 50

Annexes

❖ Les logiciels:

• Logiciel "Diagrammes" :



• Logiciel "Surfer 16" :

