



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Kasdi Merbah Ouargla

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de



C:.....

R:.....

**Master, Filière: Hydraulique**

**Spécialité : Traitement, Epuration et Gestion des eaux.**

**Thème**

**ETUDE HYDROCHIMIQUE DE QUALITE DES  
EAUX MIO-PLIOCEN DE LA WILLAYA DE  
TOUGGOURT**

**Présenté par :**

**AHMED FOUAD Tidjani**

**NAJOUA Serraoui**

**Soumis au jury composé de : 11/05/2022**

**GHERAIRI YAMINA**

**BAOUIA KAIS**

**ABASSE KAMARCHOU**

**Président**

**Examineur**

**Encadreur**

***Année Universitaire: 2021 /2022***

## **Remerciement**

*«Nous remercions dieu tout puissant de nous avoir donné le courage, la force et*

*La volonté pour achever ce modeste travail.Nos sincères*

*Remerciements à notre encadreur, de mémoire monsieur*

*ABASSE Kamarchou*

*Professeur à l'Université de Kasdi Merbah Ouargla, pour sa patience, son*

*Soutien et ses encouragements continuels qui ont permis*

*L'aboutissement de ces efforts en dépit des difficultés que nous avons  
rencontrées dans*

*Ce travail. Nous tenons également à remercier tous ceux qui m'ont*

*Apporté leur aide de près ou de loin et nous a aidé à développer notre projet*

*Fin des études.»*

*nous remercions vont également à monsieur Dr. **BAOUIA** pour ces  
remarques scientifiques intéressantes, pour tout son soutien, son aide, ses  
orientations et sa gentillesse à tout moment.*

*À **KHELIFA Marouane** pour leur support à nous*

**Merci à tous**

*Dédicace*



*Nous dédions cet humble acte à nos chers parents pour  
leurs encouragements constants*

*A nos chers frères*

*A nos chères soeurs*

*pour toute notre famille*

*à tous nos amis*

*Merci*

*Ahmed Fouad Tidjani*

*Najoua Serraoui*



## الملخص:

هذا العمل مخصص لاستخدام طريقة (IQE) لحساب مؤشر جودة المياه الجوفية (لتقييم الجودة الفيزيائية والكيميائية لعشرة آبار في Mio-Pliocene بولاية تڤرت).

أجريت هذه الدراسة من خلال الاستبطان لنتائج التحليلات الفيزيائية والكيميائية لعينات المياه باستخدام رسم الخرائط مع Surfer والرسوم البيانية الكيميائية (باير، شولر، ستيف، ستابلر) باستخدام برنامج (DIAGRAMMES) وتطبيق التحليلات باستخدام طريقة مؤشر جودة المياه الجوفية IQE.

كلمات مفتاحية: ميوبوليسين، هيدروكيميا، مؤشر جودة المياه، تڤرت

## **RESUMÉ :**

Ce travail est consacré à l'utilisation de la méthode (IQE) calcule de l'indice de qualité des eaux souterraines (pour évaluer la qualité physico-chimique de 10 forages a Mio-Pliocène dans la willaya de Touggourt.

Cette étude a été réalisée par l'inspection des résultats des analyses physico-chimique des échantillons d'eau en utilisant la cartographie avec Surfer et les diagrammes chimiques (piper, Schoëller, Stiff, Stabler ) à l'aide de logiciel (DIAGRAMMES) et l'application des analyses par la méthode d'indice de qualité d'eau souterraine IQE.

Mots clés : Mio-Pliocène, hydrochimie, indice de qualité de l'eau, Touggourt

## **ABSTRACT :**

This work is devoted to the use of the method (IQE) calculates the quality index of groundwater (to assess the physico-chemical quality of 10 boreholes in Mio-Pliocene in the wilaya of Touggourt.

This study was carried out by the introspection of the results of the physico-chemical analyzes of the water samples using the cartography with Surfer and the chemical diagrams (piper, Schoëller, Stiff, Stabler) using software (DIAGRAMMES) and application of analyzes using the WQI groundwater quality index method.

Key words: Mio-Pliocène, hydrochemistry, water quality index, Touggourt

<b>Titre</b>	<b>Page</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I Description géographique et climatologique</b>	
I.1 Introduction	2
I.2.Situation géographique	3
I.3 Synthèse climatique sur la région	3
I.3.1 Précipitations	3
I.3.2 Température	4
I.3.3 Evaporation	4
I.3.4- les vents	5
I.3.5- l'humidité	6
I.3.6- Durée d'insolation	7
I.4- Conclusion	9
<b>Chapitre II Contexte géologique et hydrogéologique</b>	
II.1- Introduction	10
II.2.1- Géologie de la plateforme saharienne	10
II.2.2-Géologie de la cuvette du bas Sahara	10
II.2.3-Géologie locale	11
II.2.4- Structure géologique du bassin oriental	12
II.2.5- Les Affleurements	13
II.2.6- Litho stratigraphie	13
II.2.7-Tectonique de la région de Touggourt	17
II.2.8- Paléogéographie	17
II. 3. La nappe du Continental Intercalaire	18
II. 3. 1. 1. Contexte géologique et hydrogéologique	19
II. 3. 1. 2. Alimentation et zones d'exutoires	22
II. 3. 2. La nappe du Complexe Terminal	23
II. 3.3 La nappe phréatique	23
II.4- Conclusion	23
<b>III HYDROCHIMIE</b>	
III.1- Introduction	24
III.2- Outil informatique	24
III.2.1- Surfer 15	24
III.2.2- Diagrammes	25
III.3.ETUDE HYDROCHIMIE	27
III.4.L'échantillonnages	27
III.5. Analyses des eaux	27
III.5.1 Les paramètre physico-chimiques	28
III.5.1.1. La Conductivité électrique (CE) en ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	29
III.5.1.2. Potentiel Hydrogène (PH)	29
III.5.1.3. Résidu Sec	30
III.5.1.4.Dureté Total (TH)	30
III.5.1.5.la minéralisation	31
III.5.2.Les paramètres chimiques	32
III.5.2.1.Balance Ionique(BI)	32
III.5.2.3.Les éléments majeurs	32
a) Le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	34

b) Le Magnésium ( $Mg^{2+}$ )	34
c) Le Sodium ( $Na^+$ )	35
d) Le Potassium ( $K^+$ )	36
e) Les Chlorures ( $Cl^-$ )	37
f) Les Bicarbonates ( $HCO_3^-$ )	37
g) Les Sulfates ( $SO_4^-$ )	38
III.5.3. Représentation graphique	39
A. Digramme de PIPER	39
B. Diagramme de Schöeller Berkaloff	40
C. Diagramme de STABLER	41
III.6. Etude statistique des données Hydrochimique	43
III.6.1. Statistique descriptive	43
III.6.2. Origines du chimisme	44
III.6.3. Les relations chimiques entre les éléments	45
6.3.1 Sodium-Chlorure (Na-Cl)	45
6.3.2 Sulfate-Calcium ( $SO_4$ -Ca)	46
6.3.3 Calcium–Dureté (Ca-TH)	46
III 7. Eau d'Irrigation	47
III 7.1. Diagramme Wilcox Log	48
III.7.2. Diagramme Wilcox	50
III.7.3. Diagramme de Riverside	52
III.8. Conclusion	53
<b>Chapitre IV Indice de Qualité de l'Eau</b>	
IV- Water Quality Index (WQI)	54
IV-1. Introduction	54
IV.2. Calcul de l'Indice de qualité de l'eau (IQE)	55
IV.3. Statistique descriptive	57
IV.4. Résultats du calcul de l'indice IQE et évaluation de la qualité des eaux	60
IV.5. Application numérique	61
IV.6. Discussion	62
<b>Conclusion générale</b>	
<b>Références Bibliographiques</b>	
	64



## Liste de Figures :

Titre	Page
Figure 01 : Situation géographique de la zone d'étude.	2
Figure 02 : variation annuelle des précipitations sur 21 ans (2000-2021)	3
Figure 3 : Évolution des températures annuelles sur 21 ans (2000-2021)	4
Figure 04 : Histogramme de l'évaporation mensuelle moyenne (2000-2014)	5
Figure 05 : Histogramme de Vitesse moyenne mensuelle (2008-2019)	6
Figure 06 : Histogramme d'Humidité relative moyenne mensuelle (2000-2014).	7
Figure 07 : Histogramme Durée d'insolation moyenne mensuelle (2000-2014).	8
Figure 08 : Carte géologique du bassin du Sahara Septentrional	10
Figure 09: Carte géologique de la région de Touggourt (Melouah, O., & Zeddouri, A. 2017)	11
Figure 10 : Coupe géo structurale transversale régionale (WEC, 2007)	12
Figure 11 : Coupe géologique de la région de Touggourt (HAOUARI, 2012)	14
Figure 12 : Log stratigraphique synthétique de la région de Touggourt (KHADRAOUI, BOUNGAB, 2014)	15
Figure 13 : Carte montrant les nappes aquifères du Sahara Algérien ; Le Continental Intercalaire. Le Complexe Terminal (in KOUZMINE Y.2007).	18
Figure 14 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972).	20
Figure 15: Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrionale (UNESCO, 1972).	20
Figure 16 : Carte piézométrique de référence du "CI" (OSS, 2003).	22
Figure 17 : Coupe hydrogéologique de SASS (UNESCO, 1972).	23
Figure 18 : Interface de logiciel Surfer15	24
Figure 19 : Interface de logiciel Diagrammes	25
Figure 20 : Carte satellitaire de champ captant région Touggourt	28
Figure 21 : Carte de la Conductivité électrique des Forages région Touggourt	29
Figure 22 : Carte de Résidu Sec des Forages de la région Touggourt.	30
Figure 23 : Carte de la dureté de l'eau des forages dans la région Touggourt	31
Figure 24 : Carte de Calcium (Ca <sup>2+</sup> )	34
Figure 25 : Carte de Magnésium(Mg <sup>2+</sup> )	35
Figure 26 : Carte de Sodium (Na <sup>+</sup> )	36
Figure 27 : Carte de Potassium (K <sup>+</sup> )	36
Figure 28 : Carte de Chlorure (Cl <sup>-</sup> )	37
Figure 29 : Carte de Bicarbonates (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	38
Figure 30 : Carte de Sulfates (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	39
Figure 31 : Diagramme de Piper du Forages de région Touggourt	40
Figure 32 : Digramme de Schöeller du Forges région Touggourt	41
Figure 33 : Diagramme de Stabler des forages Région Touggourt	43
Figure 34 : Relation Na-Cl.	45
Figure 35: Relation SO <sub>4</sub> -Ca	46
Figure 36: Relation Ca- TH	46
Figure 37 : Diagramme Wilcox Log	49
Figure 38 : Diagramme de Wilcox	51
Figure 39 : Diagramme de REVERSIDE	52
Figure 40 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Salinité	57
Figure 41 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre CE	57
Figure 42 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Ca <sup>2+</sup>	58
Figure 43 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Mg <sup>2+</sup>	58
Figure 44 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Na <sup>+</sup>	58

Figure 45 : Diagramme en boîte moustaches de paramètre K+	59
Figure 46 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Cl-	59
Figure 47 : Diagramme en boîte moustaches de paramètre SO42-	59
Figure 48 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètres HCO3-	59



## Liste de Tableaux

Titre	Pages
Tableau 01:Evaporation moyenne mensuelle (2000-2014).	5
Tableau 02: :Les vitesses du vent moyennes mensuelles (2008-2019).	5
Tableau 03: Humidité relative moyenne mensuelle (2000-2014).	6
Tableau 04 : Durée d'insolation moyenne mensuelle (2000-2014).	7
Tableau.05 : Analyses physico-chimiques des forages Touggourt (ANRH).	28
Tableau 6 : La relation entre la conductivité et la minéralisation.	32
Tableau 7 : Résultats d'analyses physico-chimiques de $\Sigma\text{Ca}(+)$ et $\Sigma\text{An}(-)$ en (méq/l).	33
Tableau 8 : Balance Ionique.	33
Tableau 9 : Faciès chimique des eaux de Forges de région Touggourt.	42
Tableau 10 : Statistiques descriptives (Données quantitatives).	44
Tableau 11 : Matrice de corrélation entre les variables.	44
Tableau 12 : Classification de la qualité de l'eau d'irrigation.	48
Tableau 13 : Classification des eaux d'irrigation de Wilcox (méthode Richards).	48
Tableau 14 : Classification des forages selon l'irrigation.	49
Tableau 15 : Résultats du SAR de forages.	50
Tableau 16 : Pourcentage de Sodium Na+ des forages.	51
Tableau 17 : Classification de la qualité des eaux souterraines selon l'IQES (Brown et al. 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Aher et al. 2016).	56
Tableau 18 : Analyses physico-chimiques des forages Touggourt (ANRH).	56
Tableau 19 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques.	57
Tableau 20 : Poids des paramètres physico-chimiques au norme Algérienne.	60
Tableau 21 : Résultats de l'IQE de forage (A3).	61
Tableau 22 : Valeurs de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) et classe de qualité des eaux .	62
Tableau 23 : Répartition des forages selon IQE .	62

### **Liste des unités**

**m** : mètre.

**km<sup>2</sup>**: Kilomètre carré

**mm** : millimètre

**mg/l** : milligramme par litre..

**méq/l** : milliéquivalent par litre.

**µs/cm** : micro siemens par centimètre

°C : Degré Celsius.

°F : Degré français.

## **Liste des abréviations**

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

**A.E.P** : Alimentation en eau potable ;

**CI** : Continental Intercalaire

**CT** : Complexe Terminal

**°F**: degré française.

**SAR**: Sodium Absorption Ratio

**CE**: Conductivité électrique

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

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

**TAC** : Titre Alcalimétrique Complet ;

**TH** : Titre Hydrotimétrique ;

**PH** : Potentiel d'Hydrogène

**RS** : Résidu sec

**WQI** : Water Quality Index

**IQE** : Indice de Qualité de l'Eau

**Wi** : poids relatif

**K** : constante de proportionnalité

**n** : nombre de paramètres

**Si** : valeur maximale de norme standard Algérienne des eaux souterraines

Paramètre en mg/l sauf pour la conductivité électrique, Titre hydrométrique, PH

**Qi** : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre

**Ci** : la concentration de chaque paramètre en mg/l

---

---

**INTRODUCTION**

**GENERAL**

---

---

# INRODUCTION GENERAL

---

## **Introduction générale :**

L'eau est un élément naturel d'une importance primordiale, indispensable à toute forme de vie, l'eau est une richesse nécessaire à toutes activités humaines, c'est un facteur de production déterminant dans le développement durable, elle devient de plus en plus au centre des intérêts stratégiques, il est donc nécessaire d'avoir une meilleure connaissance sur les ressources en eaux existantes ainsi que sur leur qualité. L'eau en tant que liquide est considérée comme un solvant universel [1].

La wilaya Touggourte fait partie de la région de l'oued Righ est L'une les plus grandes Oasis du Sahara Algérien suivi d'une activité humaine Importante qui couvre les domaines (Agriculture, Industrie, Urbanisation ...), Des nombreux forages ont été réalisés, des réserves d'eaux souterraine considérable emmagasinées dans les deux aquifères sont :

Ces eaux se trouvent sous forme de nappes aquifères contenant dans des horizons géologiques de différentes profondeurs et épaisseurs, on distingue le Continental Intercalaire dit (CI) et le Complexe Terminal dit (CT). Ces deux systèmes aquifères renferment plusieurs nappes d'eaux superposées l'une sur l'autre.

L'objectif de cette mémoire c'est :

- L'étude hydrogéologique et hydrochimique des eaux souterraines concernant Les Forages de champ captant CI destiné pour AEP ;
- La qualité physico-chimique de l'eau exploitée ;
- Détermination de l'Indice de Qualité de l'Eau(IQE).

Afin de mener à bien ce travail, nous avons adopté une structure de mémoire contenant les cinq chapitres suivants :

**Chapitre I :** Description géographique et climatologique.

**Chapitre II :** Traite les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.

**Chapitre III :** Matériel et méthodes.

**Chapitre IV :** évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de champ Captant de la région.

**Chapitre V :** s'articule sur la classification des eaux de champ captant selon L'indice de la qualité de l'eau (IQE)... (Résultats et discussions).

---

---

# Chapitre I

## Description géographique et climatologique

---

---

## I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous proposons de présenter les principales données qui concernent physique de notre région d'étude situation géographique, climat.

## I.2.Situation géographique :

- Les longitudes  $6^{\circ} 03'50''$  à l'Est ;
- Les latitudes  $33^{\circ} 06'30''$  au Nord.
- Altitude 85 mètres

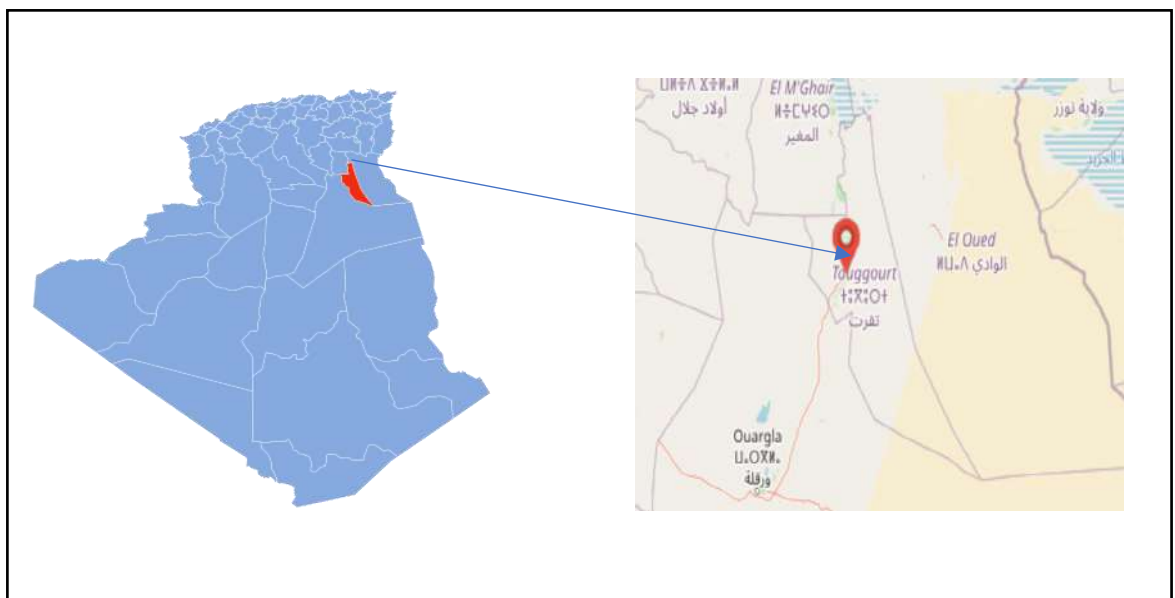
Elle couvre une superficie de 17428 km<sup>2</sup>.

Population en 2021 est de 269695 habitants[50].

Densité de peuplement est de 14 habitants/km<sup>2</sup>.

Elle est limitée au :

- Au nord par la willaya d'El M'Ghair ;
- À l'est par la willaya d'El Oued ;
- À l'ouest par la willaya de Ouargla ;
- Et au sud par la willaya de Ouargla .



**Figure 01** : Situation géographique de la zone d'étude.



### I.3 Synthèse climatique sur la région :

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 composantes suivantes : la température, l'évaporation et les précipitations, la vitesse des vent, l'humidité, Durée d'insolation[2].

#### I.3.1 Précipitations :

La région de Touggourt subit l'influence d'un gradient pluviométrique décroissant du nord vers le sud, la précipitation mensuelle est très faible contrairement à la température, les précipitations sont irrégulièrement réparties dans le temps que dans l'espace[2].

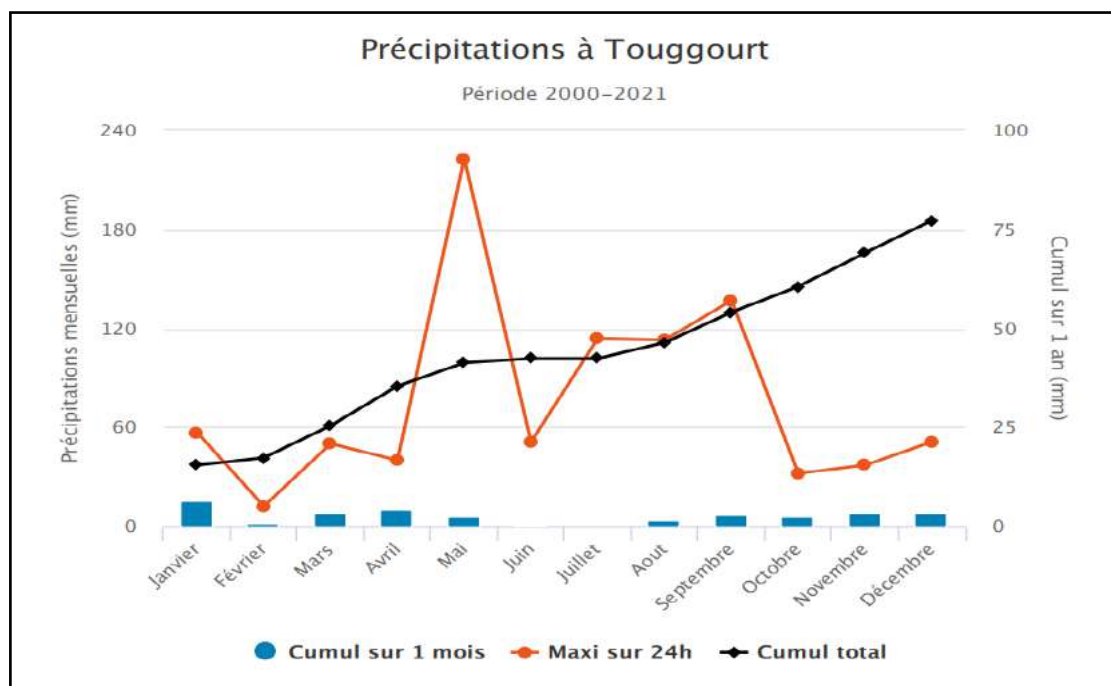


Figure 02 : variation annuelle des précipitations sur 21ans (2000-2021)

(Source: Infoclimat.fr 2000 à 2021).

D'après graphique des précipitations, on note que mois la plus pluvieuse est moins Janvier avec un cumul de précipitation de 59.8 mm et Les Mois la plus sèche est les mois Juin et Juillet avec une précipitation presque nul. On remarque donc que la pluviométrie dans notre région d'étude est caractérisée par une grande irrégularité.

### I.3.2 Température :

La région de Touggourt est caractérisée par un climat saharien aride, La température est un paramètre très important, et sont généralement très élevées[2]. Les valeurs maximales son enregistrées aux mois de juillet (49.8c°) et aout (48.5c°) et les valeurs minimales son enregistrées aux mois décembre (11.9c°) et janvier (10.60c°).

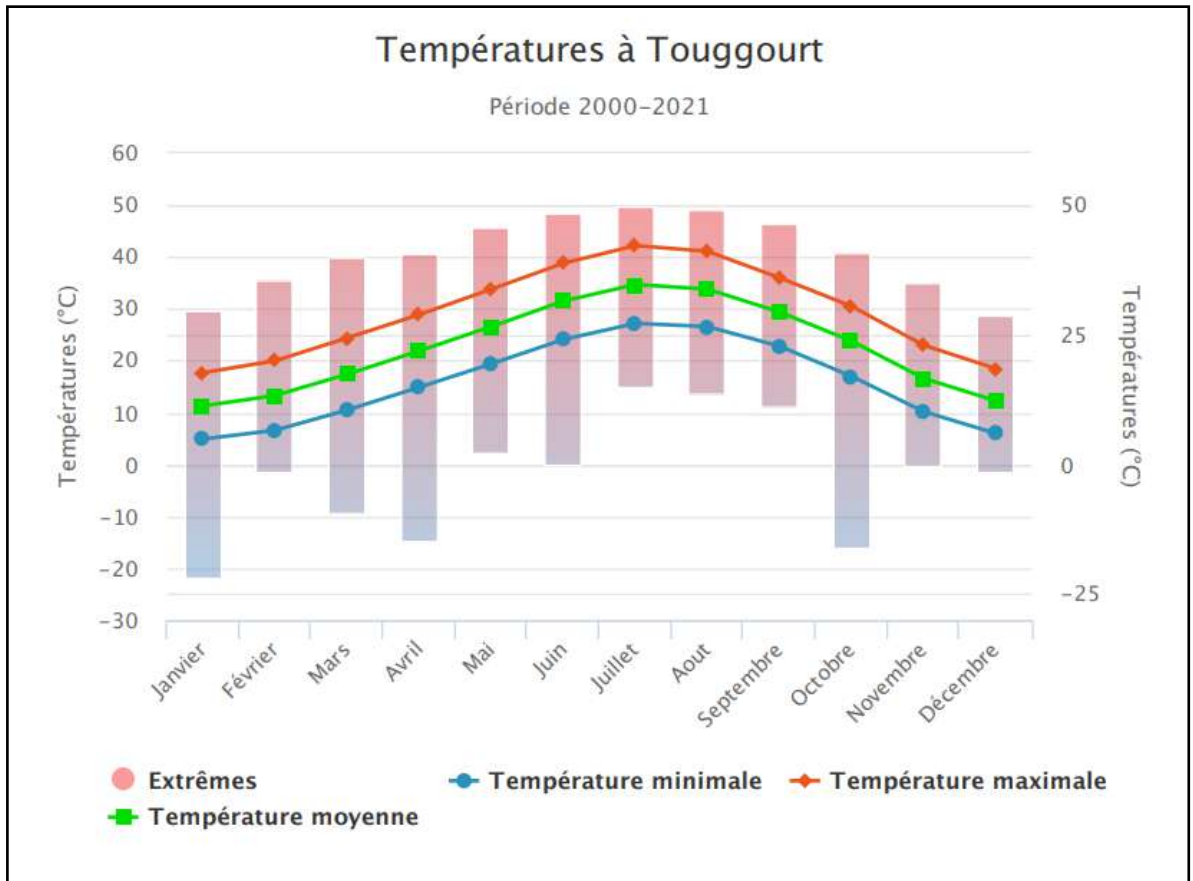


Figure 3 : Évolution des températures annuelles sur 21 ans (2000-2021)

(Source: Infoclimat.fr 2000 à 2021).

### I.3.3 Evaporation :

L'évaporation consiste la transformation de l'eau en vapeur d'eau par des processus physique en fonction de plusieurs facteurs variables selon le lieu et le temps tel que la température, les précipitations, l'état du sol et la végétation.

**Tableau 01:**Evaporation moyenne mensuelle (2000-2014)[3].

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
E(mm)	314.2	235.3	133.3	96.5	97.5	123.6	213.6	273.0	342.7	413.1	476.4	435.7

On observe de ce tableau on distingue de parties de taux d'évaporation :

Evaporation importante : Aux périodes sèches, à partir du mois d'avril jusqu'au mois d'octobre avec une valeur maximale égale à 476.40 (mm) au mois de juillet. Evaporation modérée : Aux périodes froides, du mois de novembre jusqu'au mois de mars. La valeur minimale est égale à 96.50 (mm) au mois de décembre.

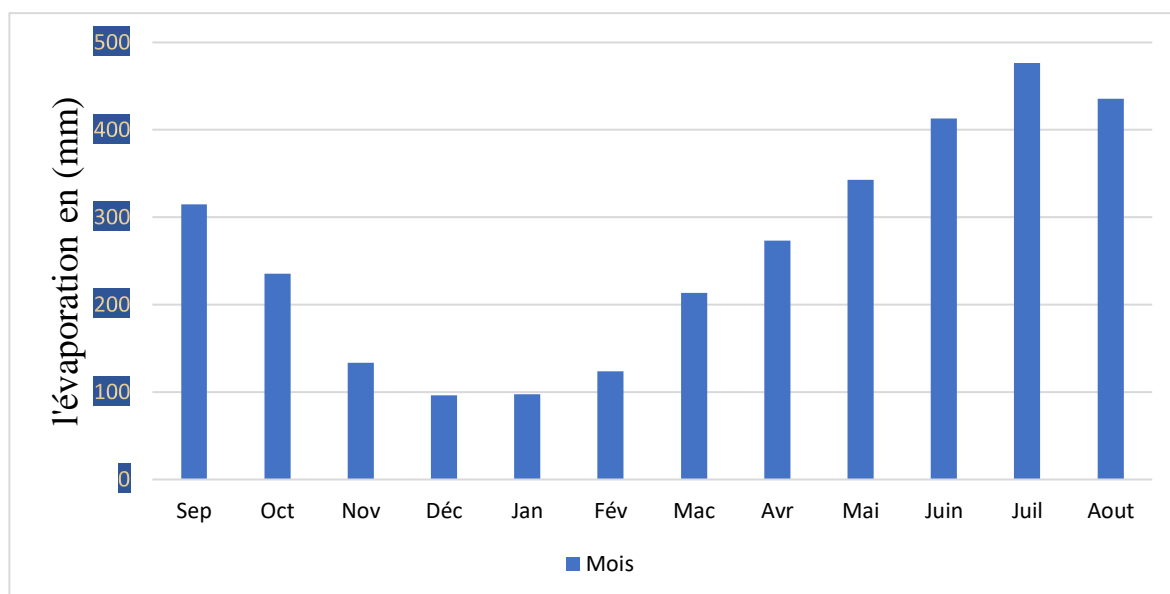


Figure 04 : Histogramme de l'évaporation mensuelle moyenne (2000-2014)

### I.3.4- les vents :

**Tableau 02 :** Les vitesses du vent moyennes mensuelles, interannuelles Période (2008-2019) [51].

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
Le vent (m/s)	2.97	2.79	2.76	2.54	2.73	2.89	3.44	4.12	4.18	3.81	3.4	3.04

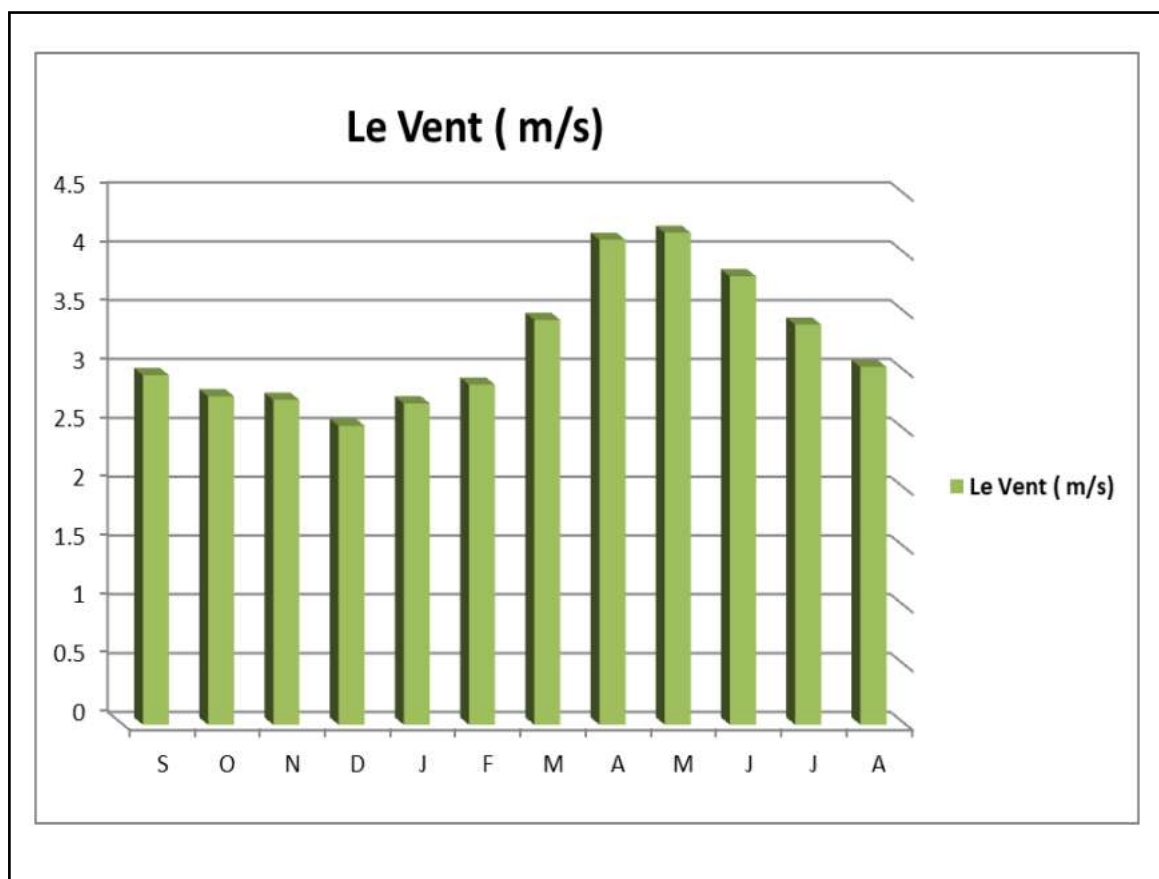


Figure 05 : Histogramme de Vitesse moyenne mensuelle interannuelle du vent (m/s)

D'après le tableau 02, le maximum de vent est enregistré au mois de Mai avec une vitesse de 4.18 m/s et le minimum en Décembre d'est 2.54 m/s .Ces vents soufflent suivant des directions différentes.

### I.3.5- l'humidité :

Les valeurs de l'humidité relative de la région d'étude sont relativement homogènes. Les moyennes mensuelles varient entre 25% et 60%, sachant que la moyenne annuelle est de l'ordre de 45%. Juillet est le mois le plus sec est d'ordre 25% et Décembre, Janvier est le mois le plus humide est d'ordre 60%.

**Tableau 03:** Humidité relative moyenne mensuelle (2000-2014).[3]

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mas	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
H(%)	37.5	42.9	55.4	60.2	60.6	51.2	45.1	38.5	34.6	29.2	25.9	29.8

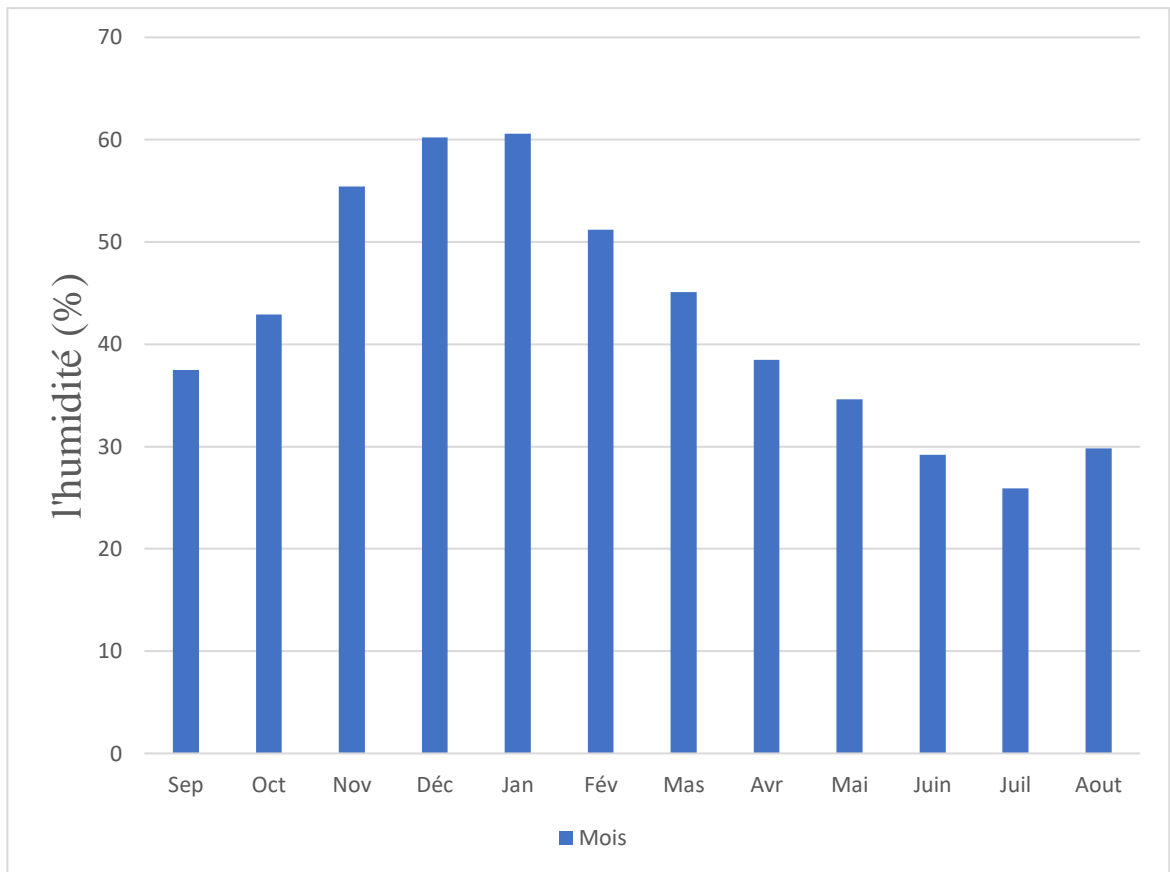


Figure 06 : Histogramme d'Humidité relative moyenne mensuelle (2000-2014).

### I.3.6- Durée d'insolation :

La région de Touggourt reçoit un ensoleillement relativement important, le maximum est atteint en Aout avec une durée moyenne de 331 heures, le minimum est enregistré en décembre avec une durée moyenne de 213 heures.

**Tableau 04** : Durée d'insolation moyenne mensuelle (2000-2014)[3].

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mas	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
D.Inso(h)	270	262	243	213	246	247	265	284	299	275	328	331

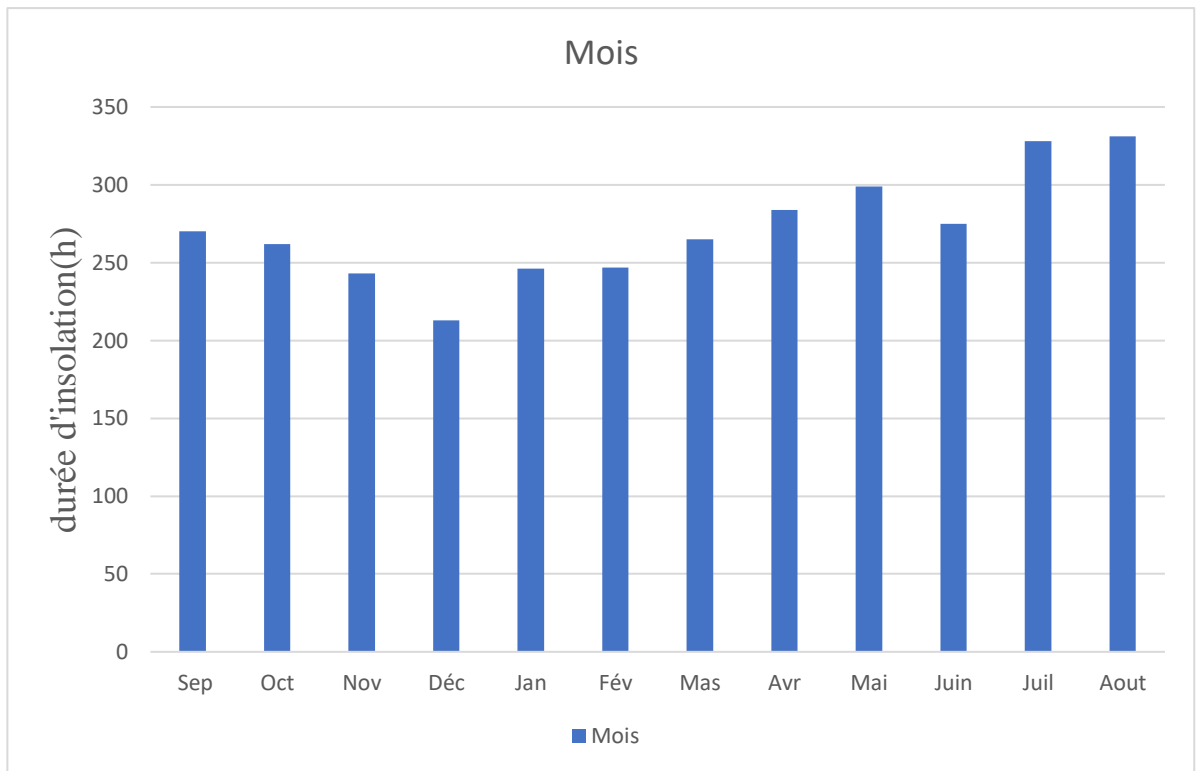


Figure 07 : Histogramme Durée d'insolation moyenne mensuelle (2000-2014).

#### **I.4- Conclusion :**

Touggourt fait partie du Bas Sahara, et il se caractérise par un climat désertique très sec, les précipitations annuelles sont faibles et très irrégulières, et la température est plus élevée en été, ce qui est bien inférieur à l'évaporation annuelle.

---

---

# Chapitre II Contexte géologique et hydrogéologique

---

---



**II.1- Introduction :**

Les nappes aquifères du Sahara Algérien ; Le Continental Intercalaire, Le Complexe Terminal (UNESCO, 1972). L'aquifère CI ou albien est très volumineux il s'étend sur une superficie de 600000 km<sup>2</sup>, son eau coule à même le sol dans la partie sud à Tinhert et Tadmait et plonge à plus de 1000 m de profondeur dans l'erg oriental : Oued Righ et Oued Souf. L'eau du CI dont la température à la sortie des forages artésiens avoisine les 60 °C est impropre à l'irrigation directe (Dubost, 1986). Le résidu sec est moins de 3 g/l, le SAR est compris entre 4 et 7,1 et le faciès chimique est de type sulfato-chlororé. Le CT de moindre importance s'étend sur près de 350000 km<sup>2</sup> et englobe un ensemble de nappe constitué dans les formations du miocène, éocène et du sénonien.[5]

**II.2.1- Géologie de la plateforme saharienne:**

Les plateaux Saharienne algérienne est séparée au nord par une accédant sud atlasique, cet accédant désigné par un passage des affleurements de calcaires blancs sub- verticaux, il étendue à partir de Agadir (Maroc) jusqu'à Gabès (tunes). La géologie du Sahara septentrional est caractérisée par : -Le bouclier précambrien, formé de roches éruptives et métamorphiques plissés et aplanis par l'érosion. -Le Phanérozoïque, correspond à des couches de plusieurs milliers de mètres de sédiments, plus ou moins plissées, allant du Cambrien jusqu'au Quaternaire formant un grand bassin sédimentaire dissymétrique.[6]

**II.2.2-Géologie de la cuvette du bas Sahara :**

La région du Bas-Sahara se présente comme une vaste cuvette limitée à l'Ouest par la dorsale du Mزاب, au Sud par les hamadas du Tadmait et de Tinhert et à l'Est par les plateaux du Dahar tunisien. Ses bordures, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe SSO-NNE des Oueds M'ya et Righ. Le Bas Sahara se présente ainsi comme une cuvette synclinale dont les terrains, depuis le Cambrien jusqu'au Tertiaire sont dissimulés en grande partie par le grand erg oriental. Cependant, quelques affleurements sont observés sur les bordures. Nous distinguons de bas en haut, trois ensembles : -Les terrains paléozoïques affleurent au Sud, entre les plateaux du Tadmait et Tinhert et le massif du Hoggar, -Les terrains du Mésozoïque et Cénozoïque, constituent l'essentiel des affleurements

des bordures du Bas Sahara. -Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaires, occupent le centre de la cuvette. [6]

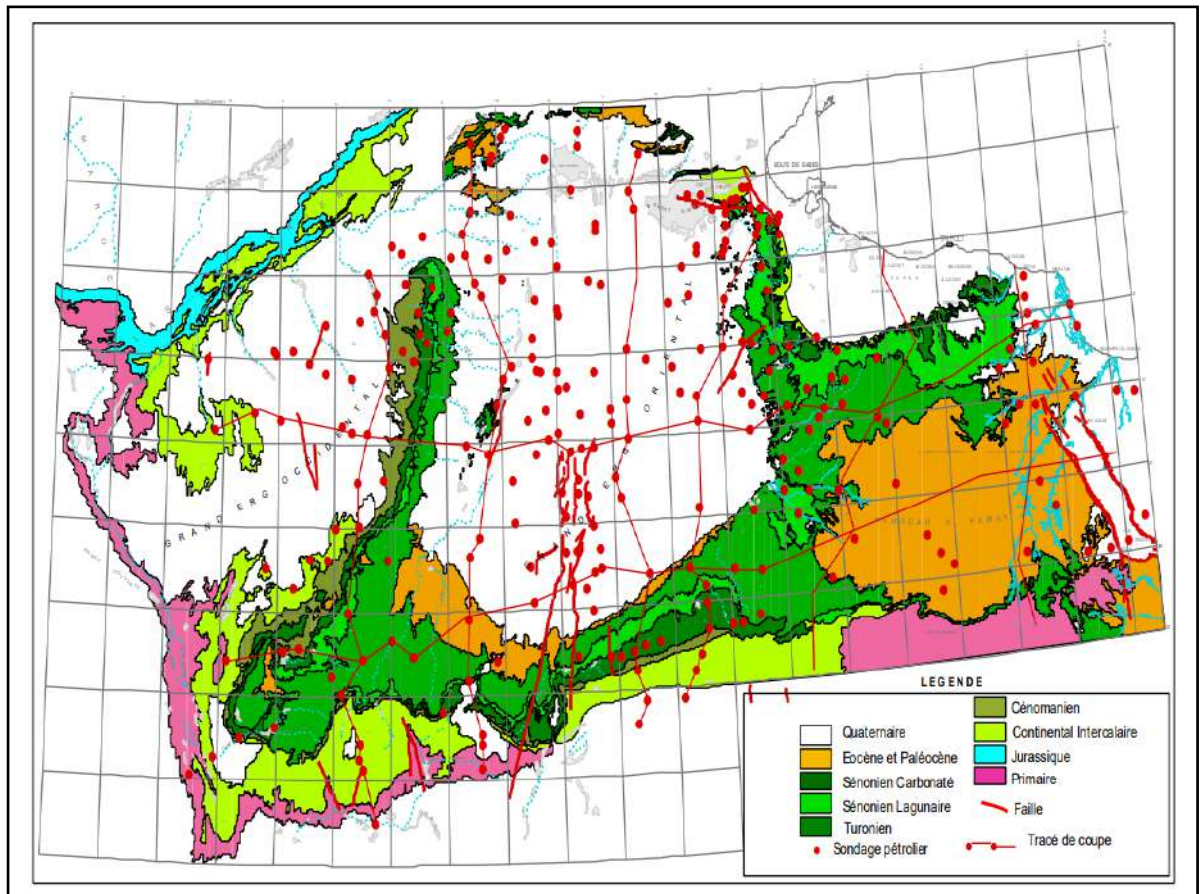


Figure 08 : Carte géologique du bassin du Sahara Septentrional

(SYSTÈME AQUIFÈRE DU SAHARA SEPTENTRIONAL 2003).

### II.2.3-Géologie locale :

Situation de la région TOUGGURET dans la plateforme saharienne qui limité au nord par l'accident sud atlasique, et les premiers contreforts des monts des Aurès, au sud par la falaise méridionale du Tinhert, et les affleurements crétacés du Dahar à l'Est, et la dorsale du Mzab à l'Ouest.

La carte géologique de Touggourt met en évidence l'affleurement des formations quaternaires, il s'agit des dunes récentes à Meggarine, Sidi Slimane, erg es Sayah...

Le Quaternaire continental à Merdjadja et les alluvions actuelles à Temacine, Zaouia. [6]

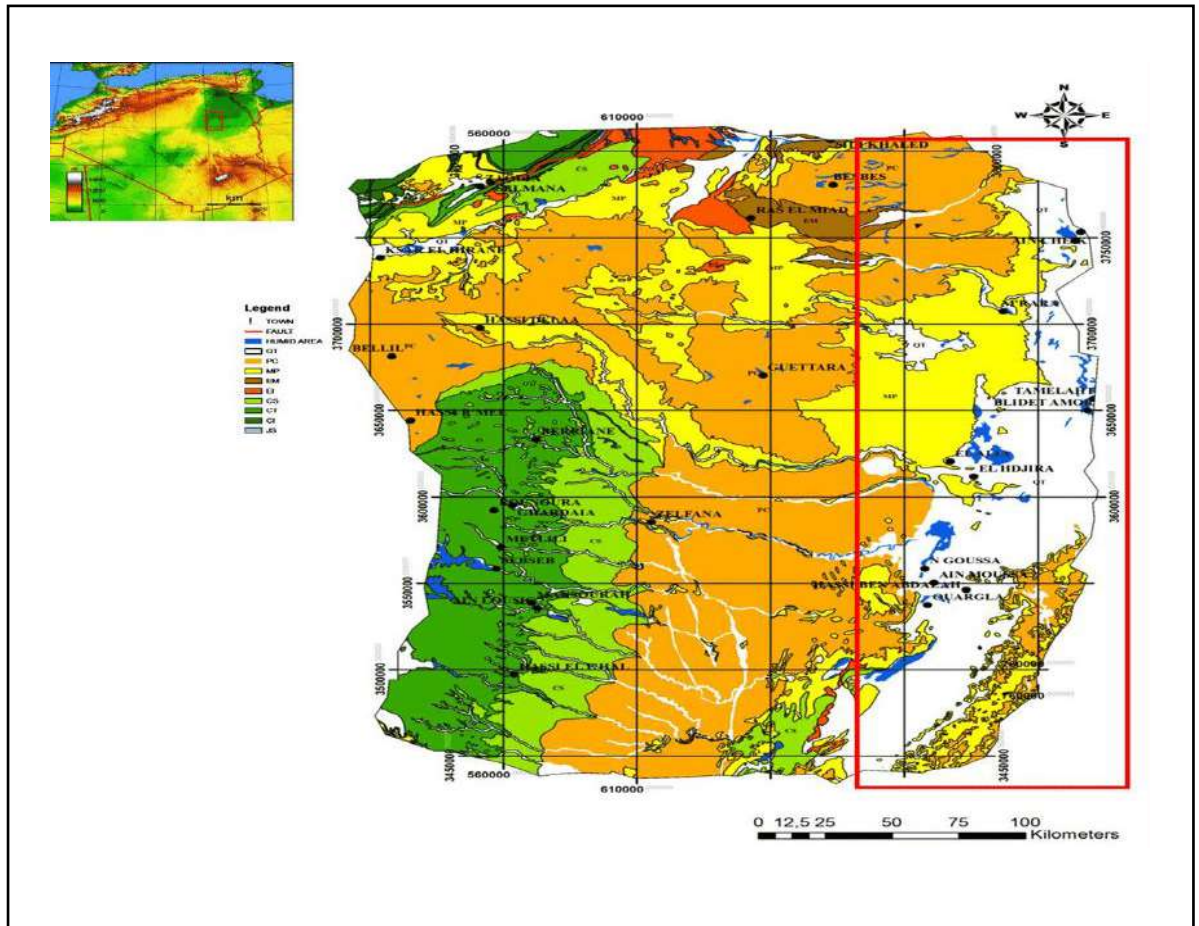


Figure 09: Carte géologique de la région de Touggourt (Melouah, O., & Zeddouri, A. 2017)

#### II.2.4- Structure géologique du bassin oriental :

Le bassin oriental du Sahara, à couverture sédimentaire, d'âge paléozoïque au Récent, est nettement mieux connu que sa contrepartie occidentale, grâce aux recherches pétrolières. Il est limité à l'Ouest par la dorsale du M'zab et au Sud par les plateaux du Tadmaït et du Tinrhert, se plonge vers l'est en Tunisie et en Libye. Il comporte à la base des sédiments Paléozoïques plissés, et pénéplaines par l'orogénèse hercynienne, surmontés en discordance par des sédiments variés (marins et continentaux) du Secondaire et du Tertiaire sur une épaisseur de 2000 mètres environ. Le bassin oriental se présente également comme un vaste synclinal, ouvert vers le Nord. Dans sa moitié Sud, ce synclinal est traversé par un grand axe anticlinal Nord-Sud; siège de plusieurs gisements pétroliers. C'est le haut-fond d'Amguid-El Biod. Cet axe n'est plus apparent dans les formations du Mio-Pliocène ; il y a même inversion de relief puisque l'axe de l'actuel synclinal Mio-Pliocène se superpose à l'ancien haut-fond.

Dans le bassin du Sahara septentrional, une seconde zone haute a existé, du Cénomanién au Mio-Pliocène, entre Hassi-Messaoud et la frontière tunisienne. Cette structure est orientée Est-Ouest ; elle sépare la fosse des chotts au nord, du reste du bassin. Il semble que cet axe joue un rôle important dans l'hydrogéologie de cette région. [8]

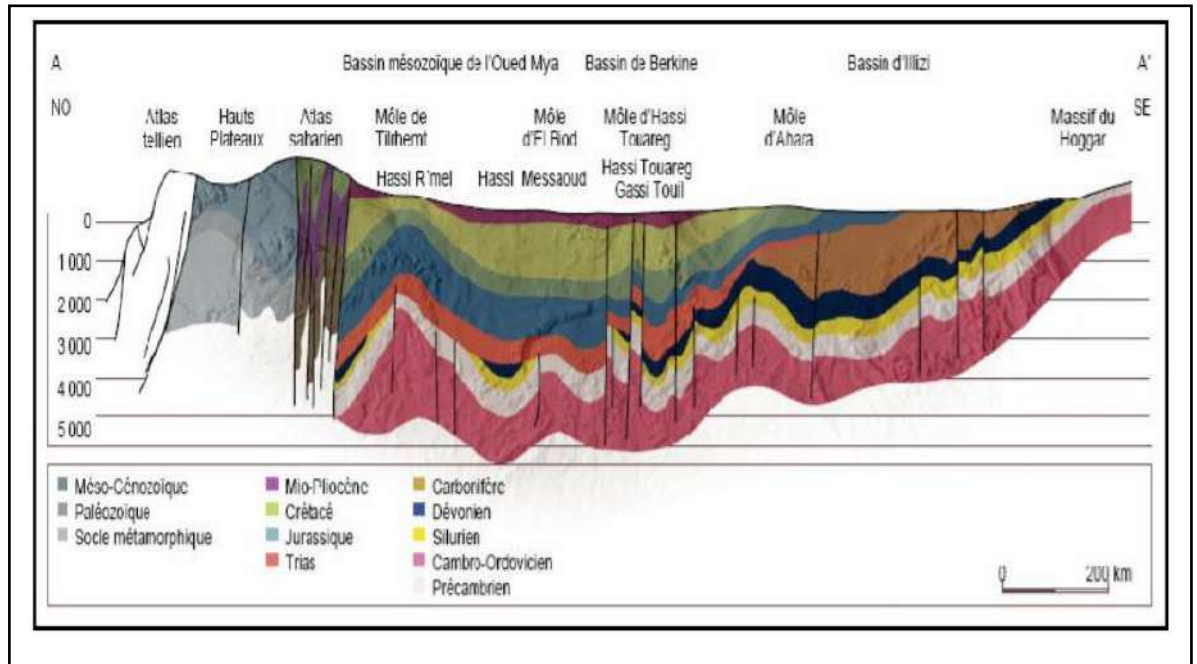


Figure 10 : Coupe géo structurale transversale régionale (WEC, 2007)

### II.2.5- Les Affleurements :

Les affleurements dans notre région d'étude sont de l'âge quaternaire, et sont essentiellement des sables, à la base de couches d'argiles et d'évaporites semi-perméables qui le séparent du Pliocène supérieur, l'épaisseur du quaternaire varie entre 39m a 67m. ), Cette formation quaternaire contient une nappe phréatique alimentée principalement par l'infiltration des eaux précipitation, des Oueds.[10]

### II.2.6- Litho stratigraphie :

#### a) L'Albien :

Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomanién. On remarque que le changement de régime sédimentaire et l'arrivée en masse des sédiments détritiques s'est produit entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien, [11].



**b) Le Vraconien :**

Le Vraconien est le terme de passage entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomaniens argilo-carbonaté (base du Complexe Terminal). Il est représenté d'une alternance irrégulière de niveaux argileux dolomitiques, d'argiles sableuses. Il est difficile de reconnaître en forage, le Vraconien a souvent été interprété comme de l'Albien ou du Cénomaniens.

**c) Le Cénomaniens :**

Le Cénomaniens est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'anhydrite. Le passage du Vraconien au Cénomaniens est net : un faciès sableux franc, rapporté à l'Albien, est suivi par des argiles et des évaporites, rapportées au Cénomaniens. Dans d'autres forages, le passage est moins tranché : il existe un niveau de transition, rapporté au Vraconien. Il semble raisonnable, dans ce cas, de choisir comme limite supérieure du Vraconien l'apparition des évaporites et dolomies du Cénomaniens. La limite supérieure du Cénomaniens correspond à l'apparition des bancs calcaires ou dolomitiques massifs du Turonien ; elle est toujours nette.

**d) Le Turonien :**

Le Turonien consiste en une épaisse barre de calcaire et de dolomie, qui tranche nettement avec les évaporites et les argiles du Cénomaniens au-dessous et du Sénonien au-dessus. Il est, parmi toutes celles du bassin oriental du Sahara algérien, la formation sédimentaire la mieux caractérisée. D'une épaisseur allant de 25 à 70m environ, dans la région d'étude, le Turonien consiste en une épaisse barre de calcaire et de dolomie, qui tranche nettement avec les évaporites et les argiles du Cénomaniens au-dessous et du Sénonien au-dessus.

**e) Le Sénonien :**

Il s'individualise en deux faciès :

-Le Sénonien inférieur (Sénonien salifère et anhydritique) à sédimentation lagunaire caractérisée par des formations argileuses et salifères à anhydrite, il est très peu perméable, [12].

-Le Sénonien supérieur (Sénonien carbonaté) se présente par des formations carbonatées perméables.

**f) L'Eocène :**

On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique, à la base: L'Eocène carbonaté est formé essentiellement par des dolomies et des calcaires

dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argile et même d'anhydrite et de sel. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500 m, l'épaisseur maximum se situant dans la zone du bas Sahara. Au sommet, l'Eocène évaporitique est formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts, [13].

**g) Le Mio-Plio-Quaternaire :**

Le Tertiaire continental du Sahara peut être relativement épais (150 m). Il se présente sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse. Dans le bas Sahara, la sédimentation lacustre se présente sous forme de séries sableuses et argileuses connues sous le nom du Continental Terminal (Mio-Pliocène) dont l'épaisseur peut atteindre dans la région des Chotts algéro-tunisiens quelques centaines de mètres. On y identifie, dans la région d'Oued Righ, deux niveaux aquifères au sein des sables qui sont séparés par une couche argileuse au milieu (première et deuxième nappe d'Oued Righ). L'ensemble est surmonté par le Plio-Quaternaire argilo-sableux et gypseux qui résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes et des chotts, [12].

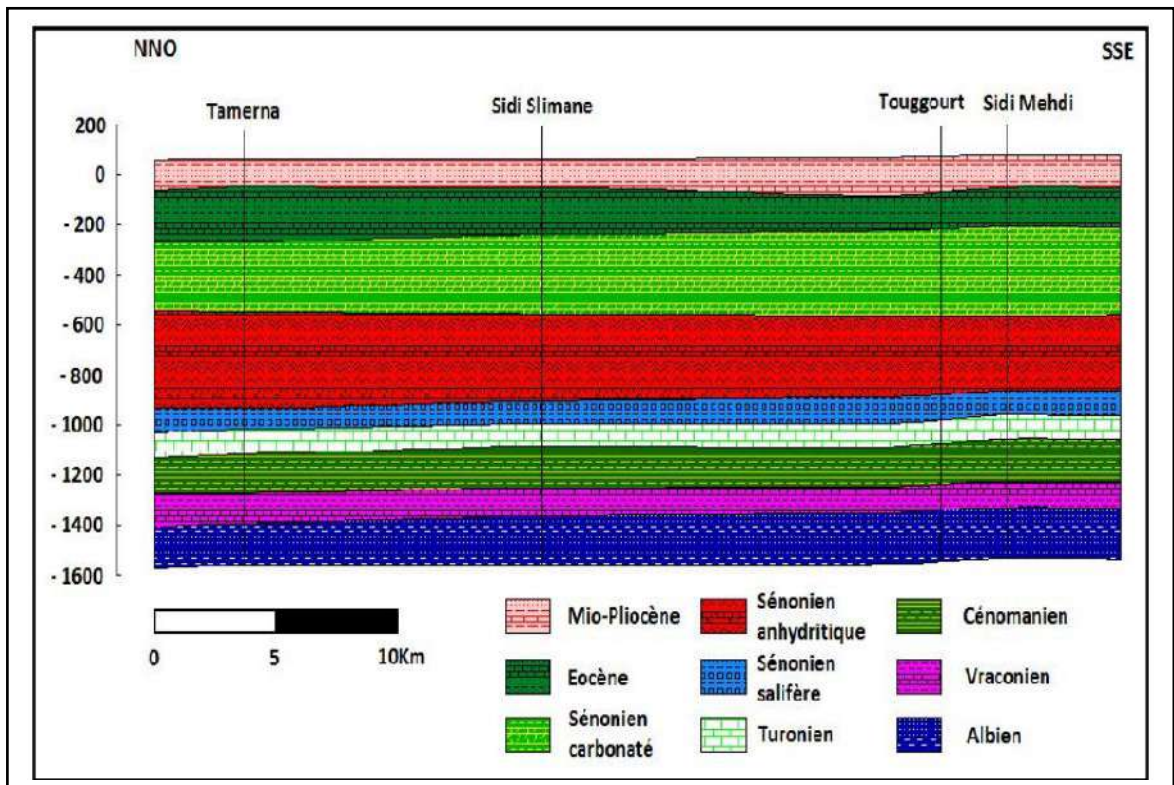


Figure 11 : Coupe géologique de la région de Touggourt (HAOUARI, 2012)

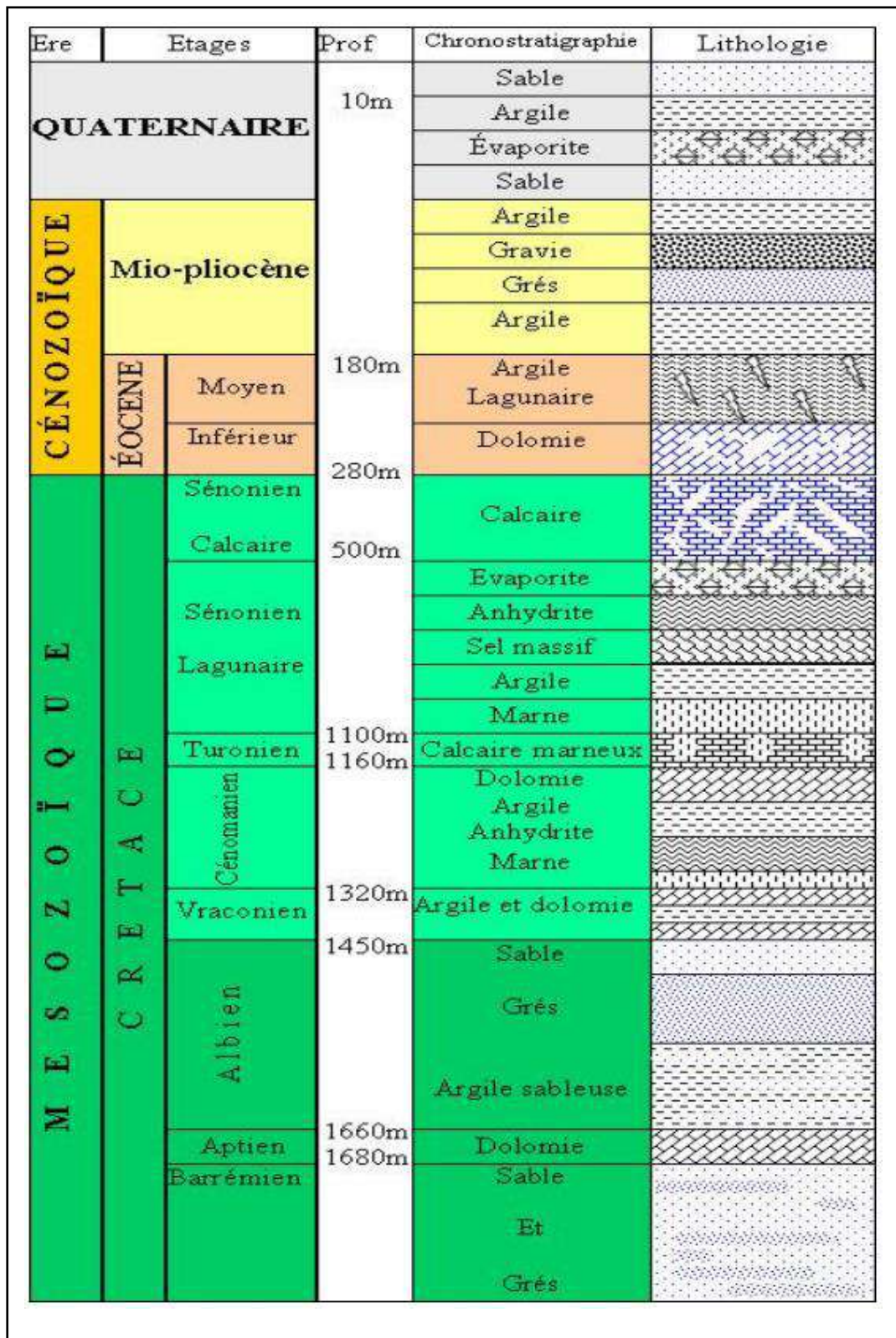


Figure 12 : Log stratigraphique synthétique de la région de Touggourt (KHADRAOUI, BOUNGAB, 2014)



---

**II.2.7- Tectonique de la région de Touggourt :**

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis de nouveaux mouvements post triasique. L'orogénèse atlasique est à l'origine de l'apparition des déformations à grand rayon, Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis de nouveaux mouvements post triasique. L'orogénèse atlasique est à l'origine de l'apparition des déformations à grand rayon, Chapitre II Contexte Géologique 18 les calcaires du M'Zab sont transformées en dorsale, ceux de Tadmaït en cuvette, au Sud l'axe d'Amguid -el-Biod s'effondré pour faire place à un axe synclinal méridien qui se poursuit jusqu'à l'Aurès (BEL et DEMARGNE., 1966). Et enfin la phase Plio-Quaternaire dont les mouvements s'insèrent avec les précédents dans la phase Alpine, d'où l'apparition des cassures de direction Est Ouest accentuant la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie Sud "Sillon sud Aurésien". Ces fractures régissent directement l'écoulement des eaux souterraines d'où la formation des chotts tels que Chott Melghir et Chott Mérouane.[14]

**II.2.8- Paléogéographie :**

Des transgressions marines de courte durée se sont produites dans la région au Mésozoïque et au Tertiaire, et n'ont pas atteint le Miocène. Pour Savornin (1934), la formation du Mio-pliocène continental semble avoir débuté au moment de la régression marine vindobonienne. L'essentiel des sédiments détritiques accumulés à la fin du Miocène est représenté par des sables éoliens et fluviatiles et par des argiles continentales. Du Paléocène à l'Éocène, des conditions équatoriales ont régné sur le Sahara méridional (Milot.1964) et des conditions tropicales au nord du Sahara (Faure 1962). Louvet et Magnier (1971), une mer épicontinentale s'est étendue à l'Éocène inférieur sur le nord du Sahara. Après l'Oligocène, cette mer se retire progressivement. L'abaissement des niveaux statiques des Oueds majeurs est probablement lié au rétrécissement de la mer à la fin du Miocène, laissant apparaître un climat aride (Jaeger, 1975), [15]

---

### II. 3. La nappe du Continental Intercalaire :

Le terme Continental Intercalaire est d'origine géologique, il désigne les formations continentales qui se sont déposées entre le cycle marin du Paléozoïque, clôt par l'orogénèse hercynienne qui a rejeté la mer hors de la plate-forme saharienne, et la grande transgression marine du Cénomanién. Il est situé dans l'un des plus vastes et plus aride désert du monde qui est partagée entre trois pays maghrébins : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. (Fig.14 )

Avec près de 800 000 km<sup>2</sup> de superficie, le Continental Intercalaire est l'un des aquifères les plus étendu de la planète dont l'une de ces particularités, est de constituer une ressource en eau souterraine fossile puisqu'il est très peu alimenté avec les conditions climatiques actuelles. Le Continental Intercalaire est un réservoir à eau plus au moins douce, il se remplit dans sa majorité pendant les périodes pluvieuses du quaternaire.[4].Ces eaux sont caractérisées par :

- Une température qui dépasse les 50°C sauf les hauts endroits où l'aquifère est proche de la surface du sol ;
- La minéralisation de l'eau oscille entre 1 et 2 g/l de résidu sec ;
- L'alimentation se fait par ruissellement à la périphérie du réservoir tout en long et à l'extrémité des Oueds qui descendent des montagnes de l'Atlas Saharien, de Dahra Tunisien, du plateau de Tadmait et Tinhert, et des pluies exceptionnelles ;
- L'écoulement des eaux de cette nappe, se fait dans la partie occidentale du Nord vers le Sud et dans la partie orientale de l'Ouest vers l'Est et du sud vers le Nord.

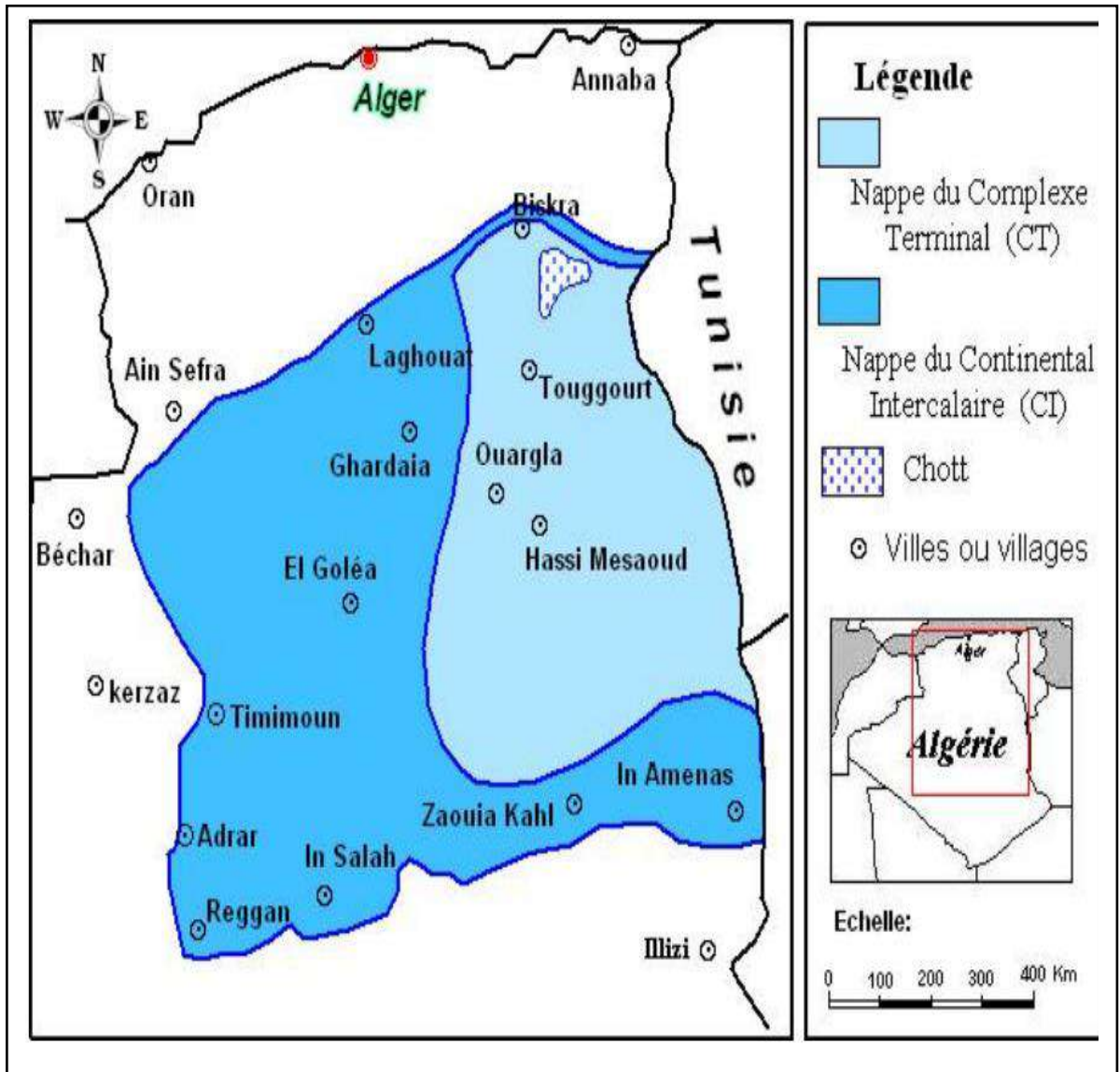


Figure 13 : Carte montrant les nappes aquifères du Sahara Algérien ; Le Continental Intercalaire. Le Complexe Terminal (in BENOUAER Y ; BOUGUERRA A 2016).

### II. 3. 1. 1. Contexte géologique et hydrogéologique :

Les deux cycles marins du Paléozoïque et du Crétacé Supérieur constituent respectivement les limites inférieures et supérieures d'un épisode sédimentaire d'origine continental dénommé Continental Intercalaire. Sous l'angle hydrogéologique, le CI se définit comme une nappe contenue, d'Ouest en Est, entre un mur formé par les horizons imperméables Paléozoïques à Néocomiens et un toit correspondant à la basse argileuse Cénomaniens qui représente celui de l'Albien.[6]

Le Continental Intercalaire est constitué par de dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux avec intercalation d'argile et d'argile sableuse du Crétacé Inférieur(Fig.09)

---

➤ **Substratum :**

Formations sableuses, argileuses ou argilo-carbonatées par région et âge. Ils sont de plus en plus modernes du sud au nord. Au sud et au sud-ouest, ce sont des terres primaires (carbonates) et même certaines régions du Dévonien. Au nord, on trouve les fondations du Trias, de l'Elias, du Jurassique supérieur, et même localement du Néocomien.

➤ **Couverture :**

Sur la majeure partie là où il existe la couverture Cénomaniennne argilo-évaporitique constitue la limite supérieure. La nappe se trouve ainsi captive en charge sauf sur les bordures et sur le bassin Occidental. C'est cette charge importante qui permet les fuites par remontée ascendante au centre par les grandes failles du champ d'Amguid el Abiod. La profondeur de ce toit, varie d'une région à une autre. Dans le secteur de l'axe de direction Nord-Sud (Oued Righ. Ouargla), le toit de ce réservoir se rencontre à plus de 1500 mètres de profondeur par rapport au sol. Sous le grand Erg Occidental le Continental Intercalaire n'est plus protégé par les terrains peu perméables du Crétacé Supérieure qui ont été érodés, il est en contact avec les formations du Mio-pliocène.(Fig.15)

➤ **Puissance du réservoir :**

L'épaisseur utile de ce réservoir a été déterminée par plusieurs centaines d'opérations de forage pétrolier et de nombreuses expéditions géophysiques qui ont traversé tous les terrains secondaires. Cette épaisseur correspond à la somme des couches perméables (grès et sables limoneux) dont la fraction sableuse est supérieure à 50 %. La plus grande épaisseur se situe à l'est du ravin où elle varie entre 750 m et 1000 m. La zone de Touggourt est légèrement moins bonne avec des valeurs inférieures à 350 mètres.

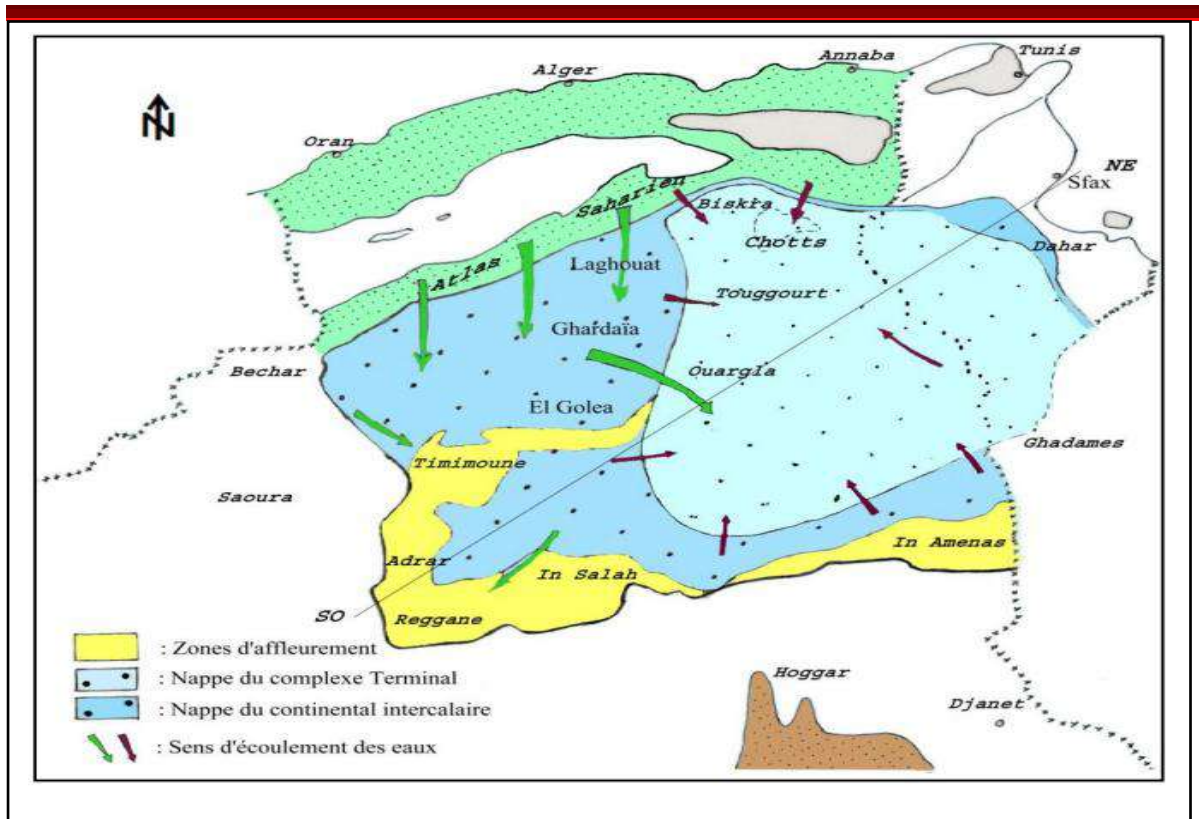


Figure 14 : Carte hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972).

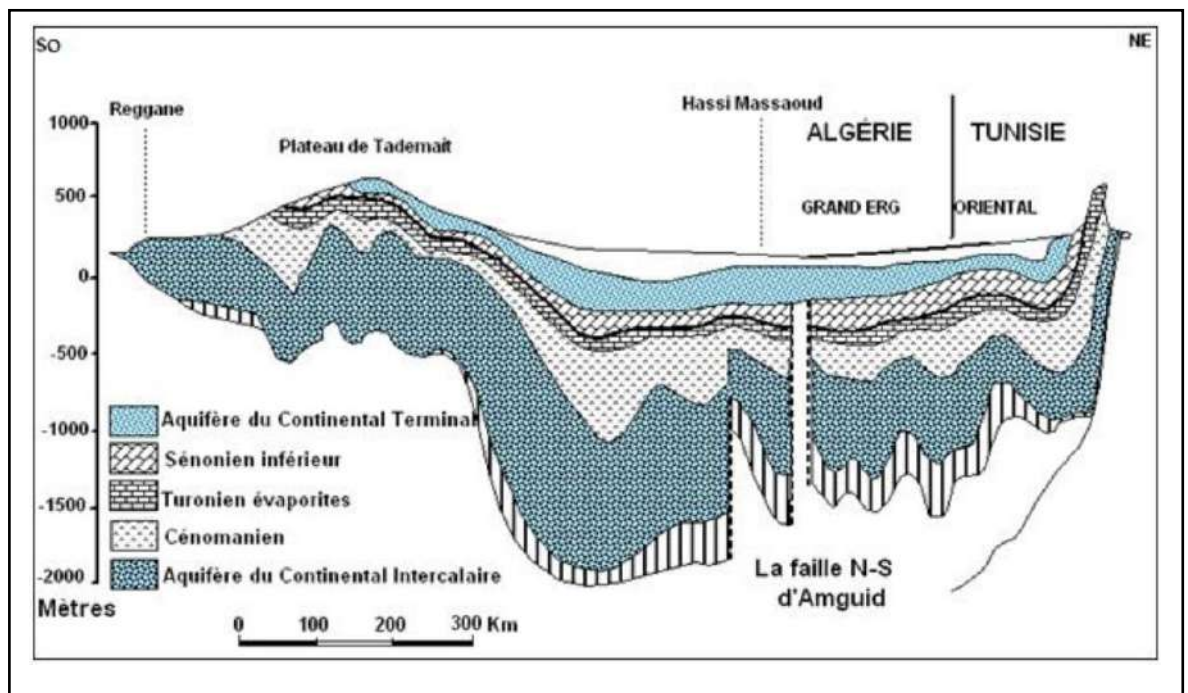


Figure 15: Coupe hydrogéologique synthétique de Sahara septentrionale (UNESCO, 1972).

---

**II. 3. 1. 2. Alimentation et zones d'exutoires :****a) Alimentation :**

L'origine des eaux emmagasinées dans le grand aquifère "Albien" provient de l'infiltration durant les périodes pluvieuses du Quaternaire. Les ressources de cet aquifère du Continental Intercalaire (CI) sont fossiles (non renouvelables), surtout qu'elles sont très faiblement alimentées, provenant essentiellement de :

- L'infiltration directe des piémonts de l'Atlas Saharien et du massif du Dahar (Tunisie), ainsi que des bordures Ouest de la zone du Touat, Gourara (Adrar) et du Sud de Tidikelt (In Salah). (Fig. 16)
- L'apport à partir des affleurements de la zone Sud-Est de Tinhert (Nord d'Illizi).

**b) Exutoires :**

Les principaux exutoires naturels sont :

- Au Sud-Ouest : les bordures occidentales du Tademaït constituent une zone d'exutoire importante, c'est le Saoura et Foggara (dépression de la sebkha du Timimoune. Adrar) ;
- Au Nord-Est : c'est le Golf de Gabes, et se fait par des remontées verticales par faille dans la zone du Chott Fedjej ;
- Fuite à travers le toit de l'aquifère, une partie par la dorsale d'Amguid el Abiod et une autre partie à travers les Chotts.



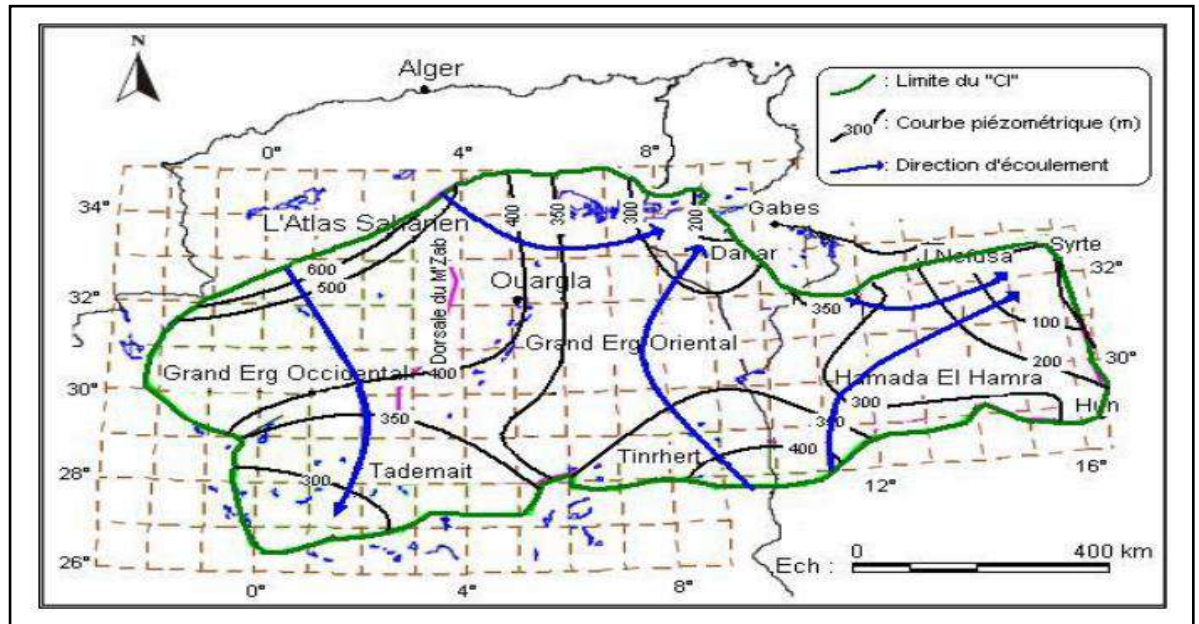


Figure 16 : Carte piézométrique de référence du "CI" (OSS, 2003).

### II. 3. 2. La nappe du Complexe Terminal :

La nappe du Complexe Terminal (CT) se localise dans le Sahara Occidental et s'étend sur une superficie de 350000 Km<sup>2</sup> avec une profondeur qui varie entre 100 et 500 m. Le Complexe Terminal englobe toutes les formations les plus récentes au-dessus du Cénomanién Inférieur argilo-évaporitique, ou Tertiaire et le Quaternaire. (Fig.13 )

- a. La première nappe : dans les sables et argiles du pliocène, qui est en fait un réseau de petites nappes en communication.
- b. La deuxième nappe : dans les sables grossiers à graviers du Miocène supérieurs.

Dans les calcaires fissurés et karstiques de l'Eocène inférieur. 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 du sénonien carbonaté et le Turonien; mais l'exploitation croissante de ces nappes a conduit à l'utilisation de pompes visant à assurer des débits réguliers pour l'irrigation.[2]

### II. 3.3 La nappe phréatique :

Cet aquifère est constitué par des sables plus ou moins fins et Argile gypseuse. Son substratum est formé d'argile formant en même temps le toit de la première nappe du (CT).

Son épaisseur moyenne est de 7 à 60 m. elle est caractérisée par :

- des eaux de fortes salinités ; les analyses des eaux de cette nappe montrent qu'elles sont très salées.

- la conductivité électrique est de l'ordre de 10 à 36 mS/cm dans la majorité des cas.

Cette nappe n'est plus exploitée en raison de la forte salinité des eaux.[2]

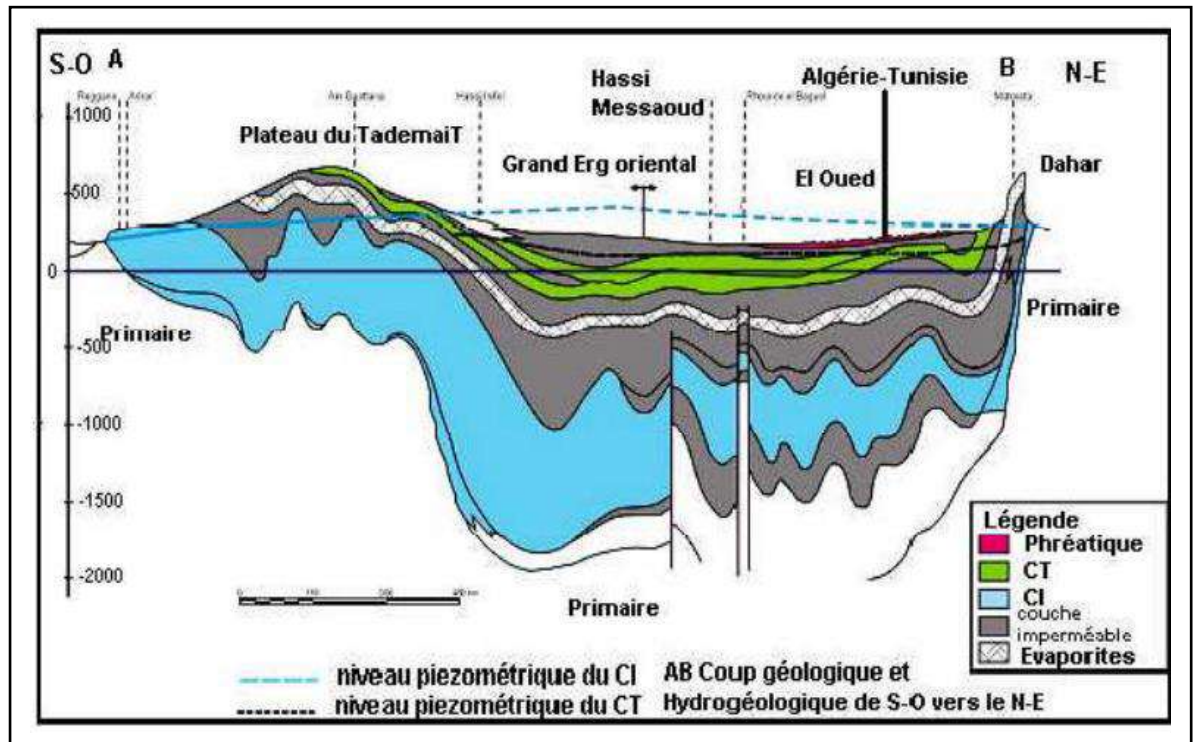


Figure 17 : Coupe hydrogéologique de SASS (UNESCO, 1972).

#### II.4- Conclusion :

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) regroupe deux énormes réservoirs d'eaux souterraines ; le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

La recharge actuelle de cette nappe est négligeable lorsque les conditions climatiques dans les points recharges ont faible (précipitations).



---

---

Chapitre III

**HYDROCHIMIE**

---

---

### III.1- Introduction :

La méthode de travail dans notre projet consiste à dessiner des cartes de contour et à analyser les données à des coupes géologiques de l'aquifère du Mio-Pliocène de la région de Touggourt, à l'aide de programmes informatiques spécialisés, afin d'extraire le plus d'informations possible sur la Qualité de l'Eau.

### III.2- Outil informatique :

#### III.2.1- Surfer 15 :

C'est avec ce logiciel qu'on a pu réaliser les cartes d'emplacements des échantillons et celles de l'évolution des paramètres étudiés. Après avoir introduit les données en un fichier Excel, on choisit la méthode d'interpolation convenable ; le Krigeage. Après la sélection de la méthode, on obtient des cartes de courbes de niveau (courbes d'isovaleurs) liant les points ayant les mêmes valeurs.

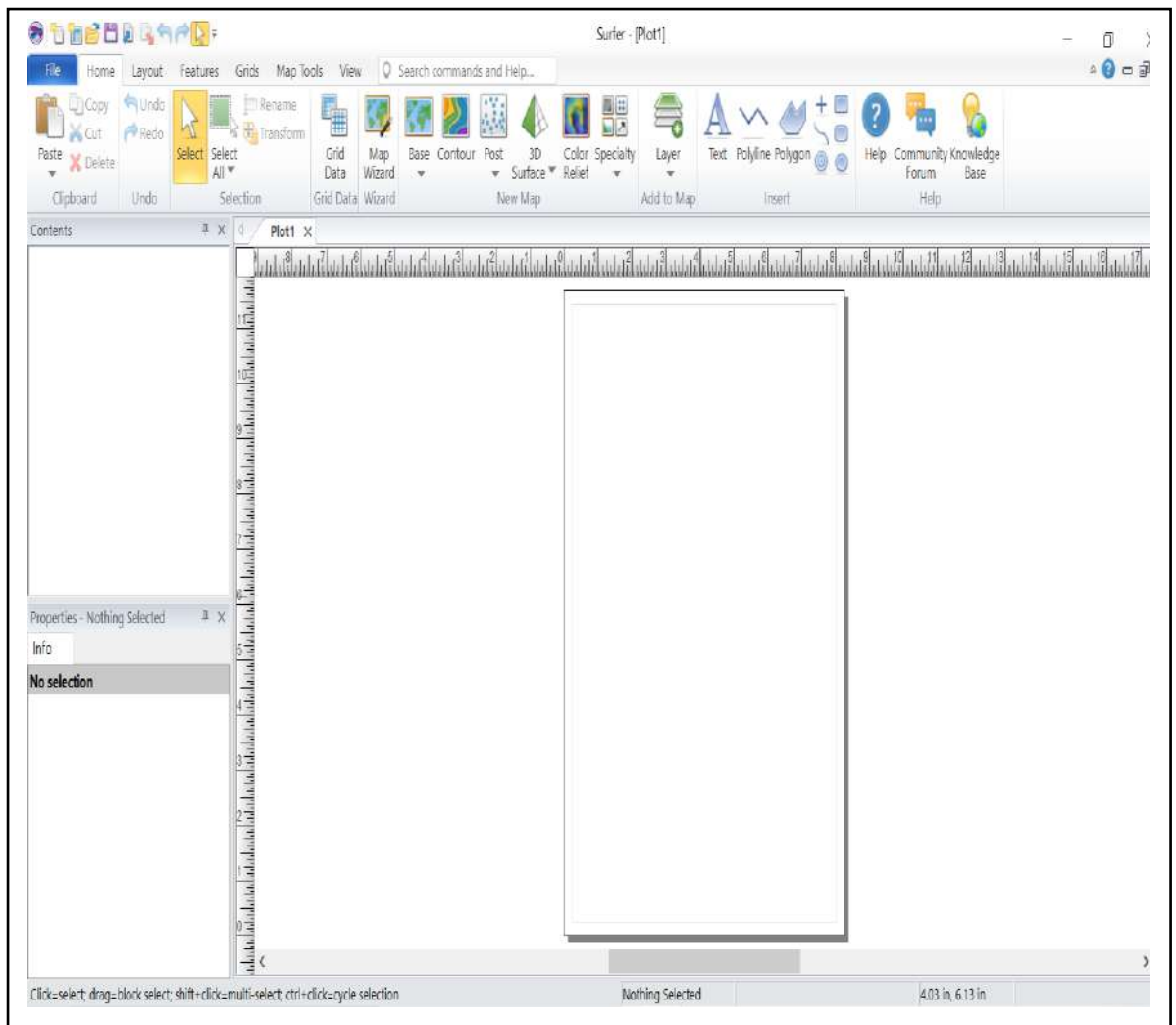


Figure 18 : Interface de logiciel Surfer15

### III.2.2- Diagrammes :

#### a) Présentation de logiciel diagrammes :

Dans le but de bien identifier les faciès hydro chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil inévitable. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours aux diagrammes de Piper et Schoeller Berkaloff. La réalisation de ces diagrammes a été faite en utilisant le logiciel Diagrammes[47].

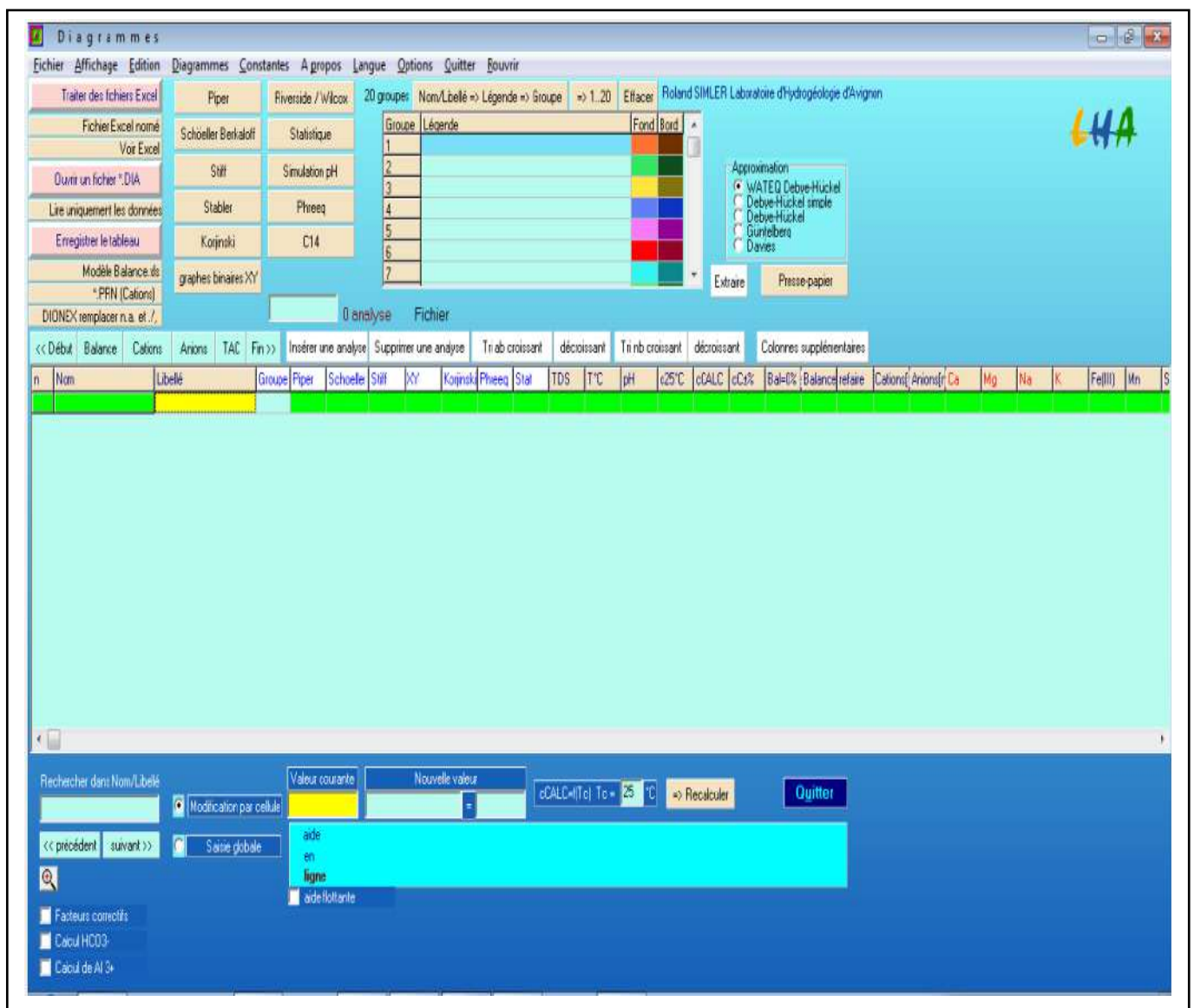


Figure 19 : Interface de logiciel Diagrammes

**b) Le diagramme de Piper :**

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau concernée l'échantillon considéré (BOUADJELA, 2013)[48].

Le diagramme de Piper permet également :

- La projection de plusieurs échantillons en même temps ;
- Pour suivre leurs évolutions dans le temps et dans l'espace ;
- Pour les comparer ;
- Pour avoir une idée sur la notion de mélange ;
- De suivre les propriétés physico-chimiques au cours de leur évolution spatiotemporelle ;
- D'illustrer l'évolution chimique d'une eau dans un aquifère ainsi que les mélanges d'eaux de minéralisations différentes.

**c) Le diagramme vertical (Schoëller Berkloff) :**

Le diagramme de Schoëller-Berkloff est une représentation graphique semi-logarithmique sur laquelle les différents ions sont représentés sur l'axe des abscisses et la teneur réelle en mg/l sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites.

**d) Diagramme de Stabler :**

Les concentrations des anions et de cation sont reportées sur deux barres ou colonnes distinctes de même longueur (1 pour cation et 1 pour anions) par ordre décroissante de haut en bas, ou de droite à gauche.

### III.3. ETUDE HYDROCHIMIE :

L'hydrochimie étudie les processus chimiques qui affectent la distribution et la circulation des composés chimiques des eaux.

L'hydrochimie rencontre de nombreuses applications telles : l'origine d'une eau et de sa qualité, et le suivi de la qualité de l'eau (le respect des normes).[16]

L'étude hydrochimique des eaux souterraines à la région Touggourt nous Permet de comprendre l'évolution du chimisme des eaux de la Mio-Pliocène Et les phénomènes qui se produisant dans le système aquifère, par les Différents échanges possibles entre l'eau et la roche.

Les analyse hydrochimique été faite à fin de savoir la différente classification Des eaux souterraine selon l'alimentation en eau potable et de comparer les différents

Résultat aux normes de potabilité OMS l'objectif de l'étude hydrochimique de savoir:

- les paramètres d'influence sur l'évolution chimique des eaux.
- l'origine des éléments chimiques des eaux de la région d'étude
- les principaux faciès chimiques des eaux
- Relation enter lithologie de l'aquifère et les faciès chimiques.

### III.4. L'échantillonnages :

Des prélèvements ont été effectués par ANRH pour 10 puits.

### III.5. Analyses des eaux : (voir le Tableau 5).

Les analyses chimiques effectuées aux échantillons concernant :

- les paramètres physico-chimiques :

Potentiel d'Hydrogène (PH) la Conductivité Électrique (CE), Résidu du Sec

Titre Hydrométrique (TH) et la Minéralisation

- les paramètres chimiques :

Les éléments majeurs

Cations:  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,

Anions:  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ .

**III.5.1. Les paramètres physico-chimiques :**

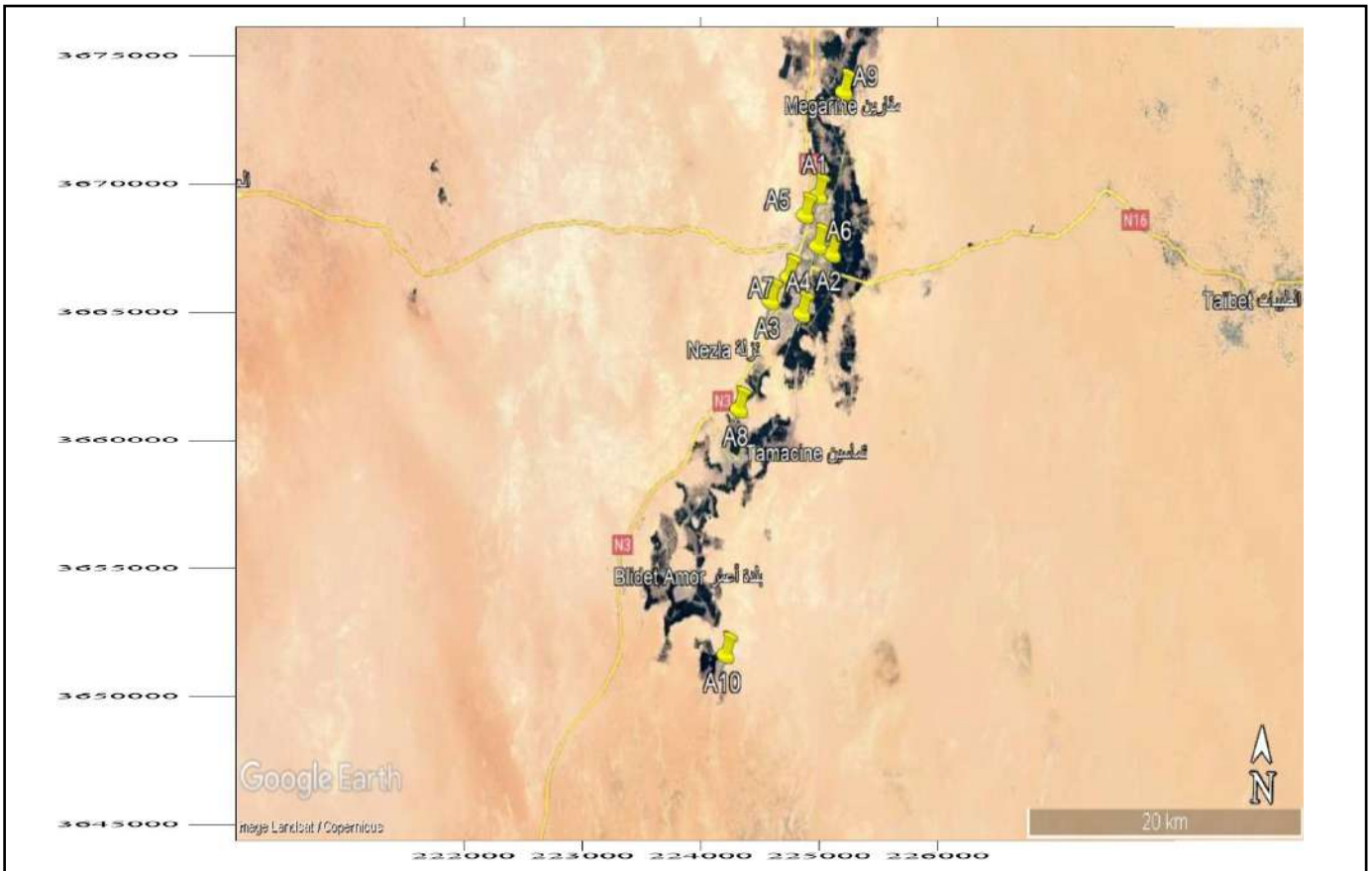


Figure 20 : Carte satellitaire de champ captant région Touggourt

**Tableau.05 :** Analyses physico-chimiques des forages Touggourt (ANRH).

Nom	CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Rés.se ( $\text{mg}/\text{l}$ )	pH	T ( $^{\circ}\text{C}$ )	TH ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{Ca}^{2+}$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{Mg}^{2+}$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{Na}^+$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{K}^+$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{Cl}^-$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{SO}_4^{2-}$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	$\text{HCO}_3^-$ ( $\text{mg}/\text{l}$ )	TAC ( $\text{mg}/\text{l}$ )	Tubité NTU	TDS ( $\text{mg}/\text{l}$ )
A1	3120		7,5		1600	462,77	200,6	450	35	850,64	940	168,69	-		
A2	7000		7,22		2000	521,04	170,1	700	40	1725,73	690	190,76	156,36	1,97	3500
A3	15560		7,34		3750	821,64	413,1	1600	50	3635,54	2280	221,81	181,81	2,09	7780
A4	5030		6,91		1540	501	70,47	400	20	836,17	1080	107,52	88,13	0,771	2515
A5	5520		7,32		1830	440,88	177,39	300	20	814,36	1204	155,27	127,27	0,648	2760
A6	6730	5200	7,22		1750	480,96	133,65	700	30	1319,7	1100	153,01	108,47		3365
A7	5710	4690	7		1930	448,88	199,26	500	30	1076,12	1100	153,01	125,42		2870
A8	4870		7,48	22	1800	380,76	206,55	400	39	1133,16	720	174,65	143,15	0,401	2435
A9	3290		7,61	18	1060	236,47	114,21	400	52	723,31	580	143,31	117,89	6,45	1645
A10	4000	3796	7,47	27,3	1150	240,48	133,65	400	48	872	570	164,37	134,73	0,505	2000
OMS	2800	2000	6,5-8,5			75-200	150	200	20	200-500	200-400	250			
NA	2800	2000	6,5-8,5			200	150	200	20	500	400				

### III.5.1.1. La Conductivité électrique (CE) en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) :

La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique. La conductivité électrique traduit le degré de minéralisation globale, elle nous renseigne sur le taux de salinité.[17] L'analyse des données de la conductivité montre que les eaux de la région de Touggourt ont une conductivité élevée qui dépasse parfois les normes de potabilité, elles sont supérieures à  $2800 \mu\text{S}/\text{cm}$  la valeur maximale c'est  $15560 \mu\text{S}/\text{cm}$  et la valeur minimale c'est  $3120 \mu\text{S}/\text{cm}$ .

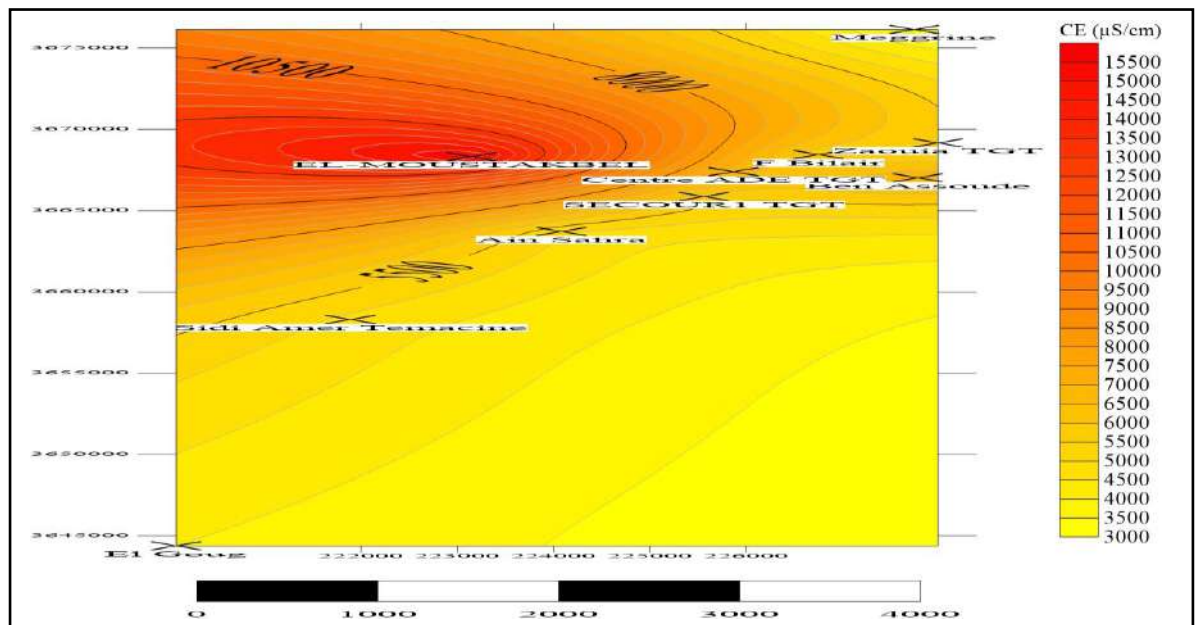


Figure 21 : Carte de la Conductivité électrique des Forages région Touggourt

### III.5.1.2. Potentiel Hydrogène (PH):

Le PH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions  $\text{H}^+$  de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14,7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau (aptitude à dissoudre le calcaire). Les valeurs du potentiel Hydrogène se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles (Chapman et al., 1996),[18]. Les valeurs de PH varient dans la zone d'étude de 6,91 à 7,61 et il est dans le critère de potabilité de (6,5 à 8,5).



### III.5.1.3. Résidu Sec :

Le résidu sec à 180° est la quantité des sels en grammes après évaporation de 1 litre d'eau minérale à 180°C. Il permet de définir:

- l'eau riche en minéraux (résidu sec > 1500 mg/l),
- l'eau à contenu moyen en minéraux (résidu sec entre 500 mg/l et 1500 mg/l),
- l'eau à faible contenu en minéraux (résidu sec entre 50mg/l et 500 mg/l),
- et l'eau à très faible contenu en minéraux (résidu sec < 50 mg/l).[20]

Dans ce cas prise à une température 105°C., et les résultats ont montré que les valeurs du résidu sec autour de la zone de récupération variaient entre 3796 (mg/l) et 5200 (mg/l). Là où il y a des valeurs inacceptables pour la norme OMS 2000 (mg/l).

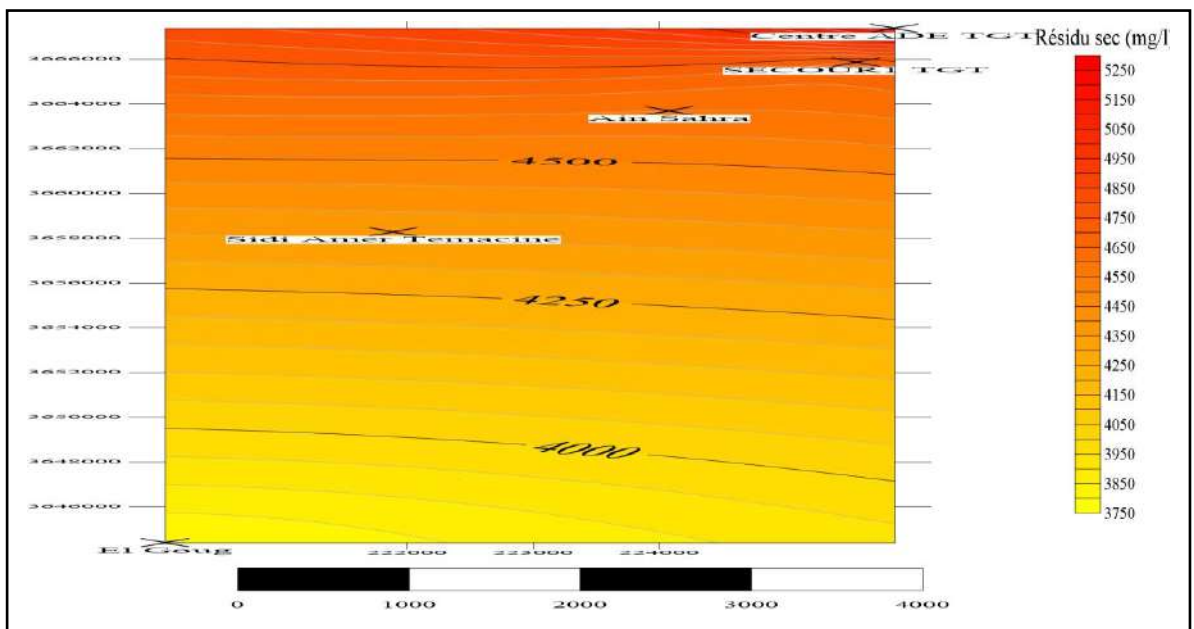


Figure 22 : Carte de Résidu Sec des Forages de la région Touggourt.

### III.5.1.4. Dureté Total (TH) :

La dureté totale représente la teneur de l'eau en sels de métaux alcalino-terreux (sels de calcium, magnésium, strontium et baryum). Etant donné que le strontium et le baryum sont souvent présents dans l'eau sous forme de traces, la dureté totale se réduit à sa concentration en ions calcium et magnésium, exprimés en millimoles ou en milligrammes par litre (mmol/l ou mg.L-1) ou en degré français (°F). Le titre hydrotimétrique (TH) ou dureté [totale] de l'eau

(Ca + Mg), est l'indicateur de la minéralisation de l'eau. Elle est surtout due aux ions calcium et magnésium.[19]

La dureté des eaux de la région d'étude se situe entre 1060 (mg/l) et 3750 (mg/l), ces teneurs indiquent que les eaux très dures sont supérieures à 500 (mg/l).

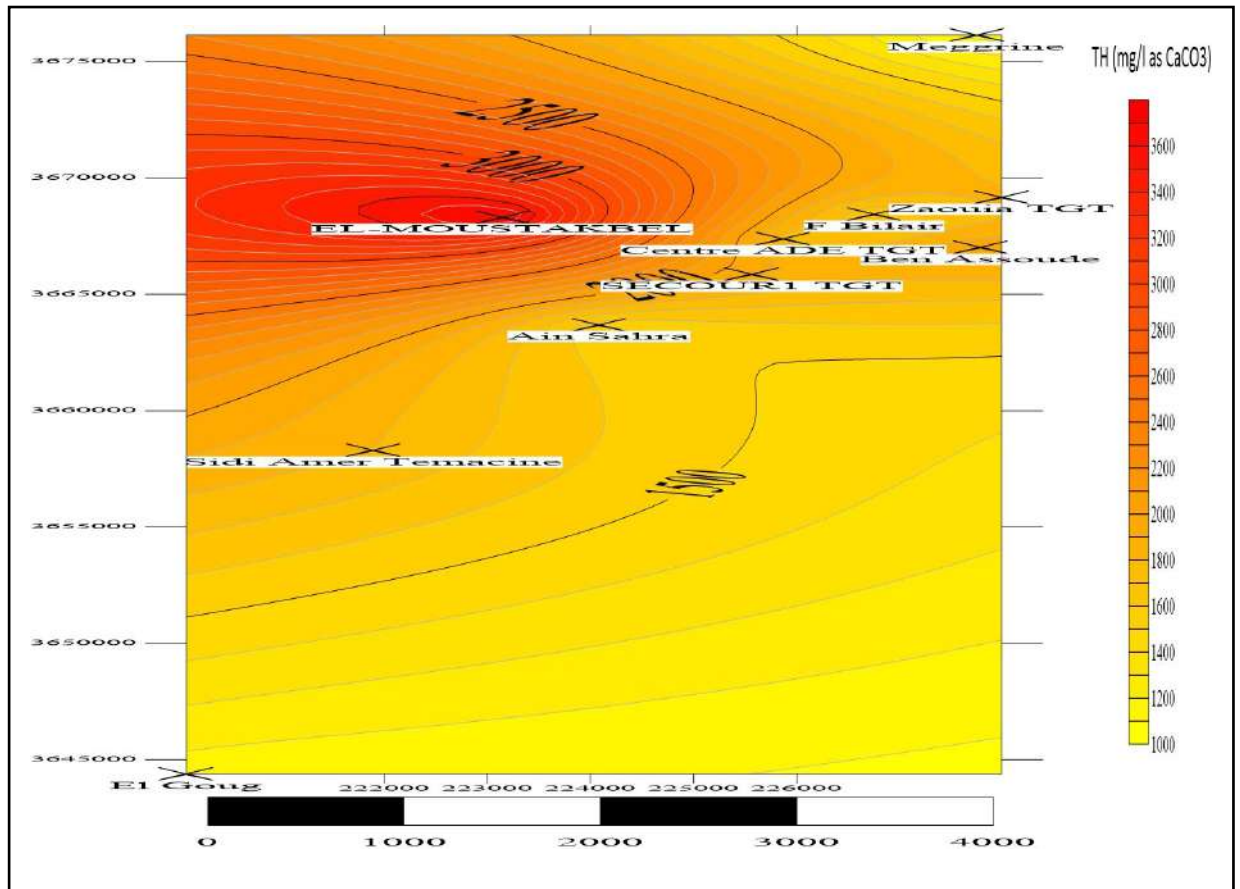


Figure 23 : Carte de la dureté de l'eau des forages dans la région Touggourt

### III.5.1.5. la minéralisation :

La minéralisation de l'eau se produit par des phénomènes d'interaction eau-roche passant par différents processus physico-chimiques de mélanges entre différents types d'eau, la composition chimique des eaux naturelles est le résultat combiné de la composition chimique des précipitations qui atteignent le sol et des réactions avec les minéraux présents dans l'encaissant.

Elle dépend des charges de matière organique endogène et exogène, génératrice de sels après décomposition et minéralisation et également avec le phénomène d'évaporation qui concentre ces sels dans l'eau, elle varie aussi suivant le substrat géologique traversé (Belghiti et al, 2013).[21]

La relation entre la conductivité et la minéralisation exprimée au tableau suivant[5] :

**Tableau 6** : La relation entre la conductivité et la minéralisation.

Conductivité ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Minéralisation (mg/L)
CE < 100	Très faible
100 < CE < 200	Faible
200 < CE < 333	Moyenne
333 < CE < 666	Moyenne accen
666 < CE < 1000	Important
CE >1000	Elevée

### III.5.2. Les paramètres chimiques :

#### III.5.2.1. Balance Ionique (BI) :

La méthode de la balance ionique nous permet de vérifier la fiabilité des analyses chimiques de l'eau par la vérification de la charge électrique des cations et anions majeur, cette méthode est une étape nécessaire avant toute interprétation des résultats. En effet, l'eau naturelle est composée de plusieurs ions chargés électriquement, à savoir des cations (chargés positivement) et des anions (chargés négativement), cependant sa charge électrique total est neutre, ceci n'est possible que si, la somme des charges positives égale à la somme des charges négatives ; c'est le principe de la balance ionique (Brouyère, 2020)[49].

Le calcul de la balance ionique se fond sur l'équation suivante :

$$BI = \frac{\sum \text{Cations} - \sum \text{Anions}}{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}} \times 100$$

Quoi que, théoriquement la balance ionique doit être égale à 0, mais c'est rarement obtenu, cette différence dans la balance ionique est due à d'éventuelles erreurs d'analyse ou à la présence d'ion mal connu, cependant, la valeur de la balance ionique ne doit pas dépasser les 2% à 5%. D'une manière générale, les résultats des analyses sont considérés de la manière suivante (BRGM, 2007)[49] :

- $-1\% < BI < 1\%$  : fiabilité des résultats d'analyses excellente.
- $-5\% < BI < 5\%$  : fiabilité des résultats d'analyses acceptable.
- $-10\% < BI < 10\%$  : fiabilité des résultats d'analyses médiocre.
- $BI < -10\%$  ou  $BI > 10\%$  : mauvaise fiabilité des résultats d'analyses.

**Tableau 7 :** Résultats d'analyses physico-chimiques de  $\Sigma\text{Ca}(+)$  et  $\Sigma\text{An}(-)$  en (méq/l).

Forage	$\Sigma\text{Ca}(+)$	$\Sigma\text{An}(-)$
A1	60,06	46,33
A2	71,46	66,17
A3	145,87	153,65
A4	48,71	47,83
A5	50,15	50,58
A6	66,21	62,63
A7	61,31	55,76
A8	54,39	49,81
A9	39,92	34,82
A10	41,62	39,15

**Tableau 8 :** Balance Ionique.

Forage	$\Sigma\text{Ca}(+)$	$\Sigma\text{An}(-)$	$\Sigma\text{Cations} - \Sigma\text{Anions}$	$\Sigma\text{Cations} + \Sigma\text{Anions}$	BI %	Résultats
A1	60,06	46,33	13,73	106,39	12,90	Mauvaise
A2	71,46	66,17	5,29	137,63	3,84	Acceptable
A3	145,87	153,65	-7,78	299,52	-2,59	Acceptable
A4	48,71	47,83	0,88	96,54	0,91	Excellente
A5	50,15	50,58	-0,43	100,73	-0,42	Excellente
A6	66,21	62,63	3,58	128,84	2,77	Acceptable
A7	61,31	55,76	5,55	117,07	4,74	Acceptable
A8	54,39	49,81	4,58	104,2	4,39	Acceptable
A9	39,92	34,82	5,1	74,74	6,82	Médiocre
A10	41,62	39,15	2,47	80,77	3,05	Acceptable

### III.5.2.2. Les éléments majeurs :

#### a) Le Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) :

Le calcium est un élément principal de la dureté de l'eau, c'est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates  $\text{CaCO}_3$ . [22]

La présence d'ions calcium dans l'eau indique la dissolution des formations de carbonate, calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), dolomite  $[(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3]$  ou la dissolution des formations d'évaporites, gypse  $[\text{CaSO}_4, 2(\text{H}_2\text{O})]$  et anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ) Les résultats des analyses montrent que tous les échantillons ont les teneurs les plus élevées à 200 mg/L.

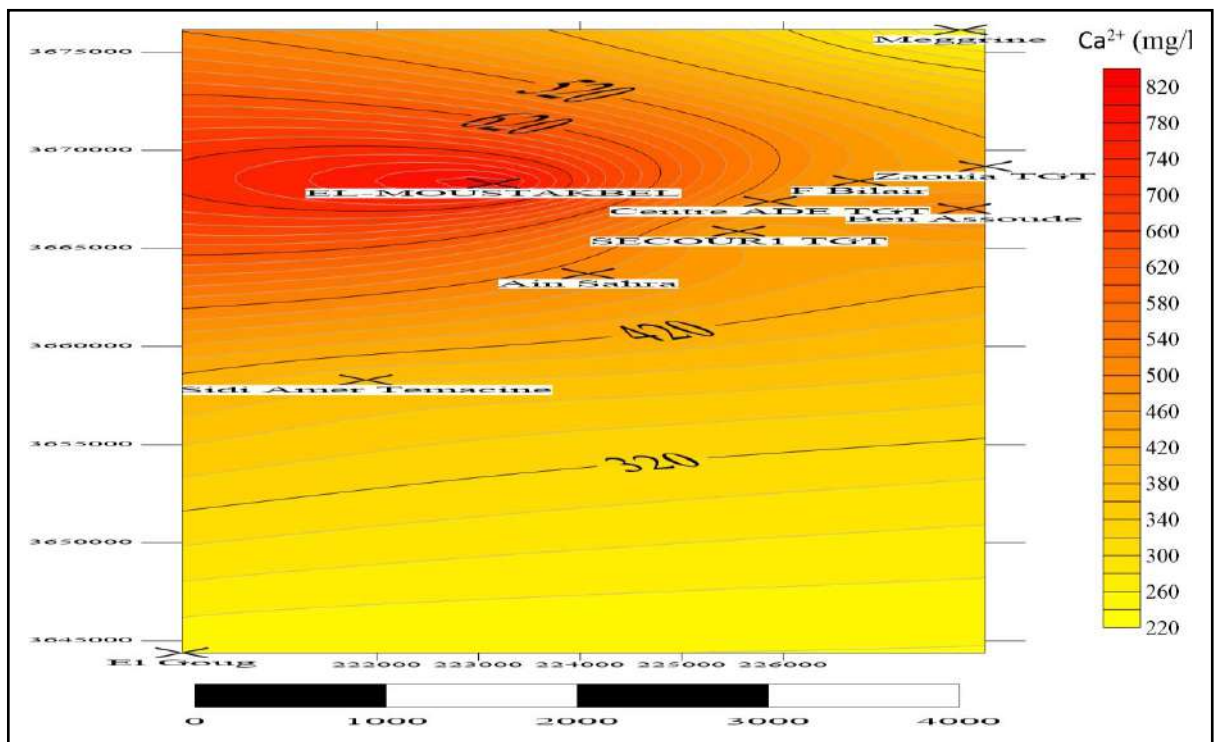


Figure 24 : Carte de Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )

#### b) Le Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) :

C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, il provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitiques et minéraux ferromagnésiens (magnésite et dolomite). La variation des concentrations du magnésium est presque similaire à celle du calcium (Gaagai, 2009). [23]

Le magnésium est un élément très abondant, se présente dans les roches évaporitiques (sel de Mg), la carnallite ( $\text{KMgCl}_3, 6\text{H}_2\text{O}$ ), la kiesérite ( $\text{MgSO}_4, \text{H}_2\text{O}$ ), et carbonatés, la dolomie  $[(\text{Ca}, \text{Mg})\text{CO}_3]$ , les valeurs de magnésium dans la région varient de (70,47 à 413) mg/l.

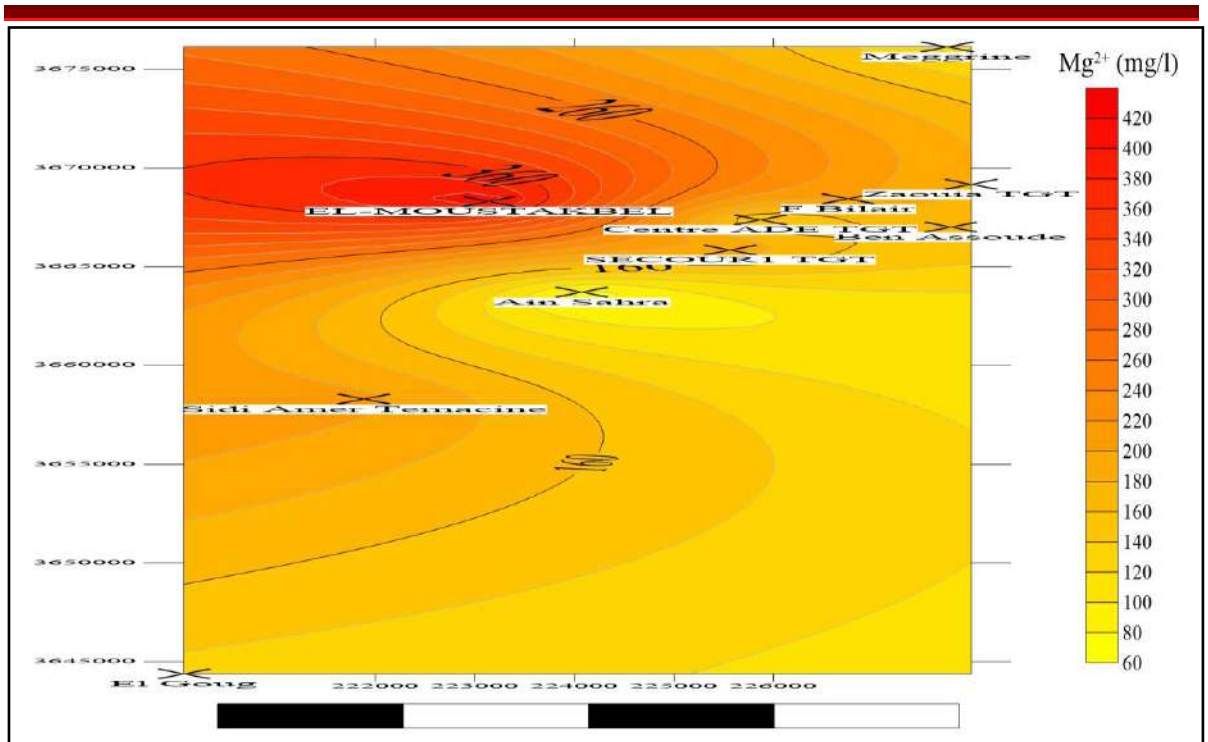


Figure 25 : Carte de Magnésium( $Mg^{2+}$ )

**c) Le Sodium ( $Na^+$ ) :**

Le sodium est élément, très abondant dans la nature, et provient aussi du lessivage ou de la percolation de terrains salés. Il joue un rôle important en irrigation à cause du fait de son action sur la perméabilité des sols.[24]

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations Salifères très solubles tel que l'halite ( $Na-Cl$ ), les teneurs dans la région sont très Élevées et indiquent que les eaux Touggourt sont contenues dans des formations Salifères qui dépassent largement les 200 mg/l, la valeur le plus élevées Supérieures à 1500 mg/l.



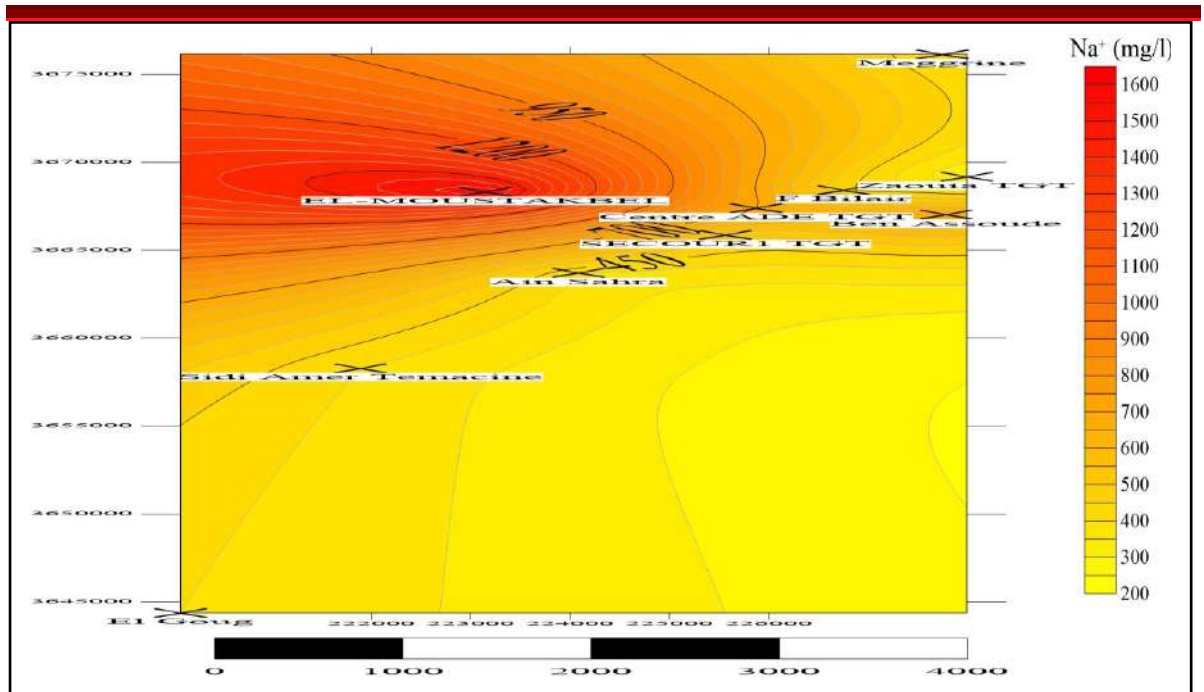


Figure 26 : Carte de Sodium (Na<sup>+</sup>)

**d) . Le Potassium (K<sup>+</sup>) :**

Le potassium: Cet élément contribue peu à la minéralisation de l'eau puisque le degré de corrélation avec la conductivité est 0.001.[25]

Les fortes teneurs en potassium peuvent être observées dans les eaux ayant traversées des formations Évaporitiques Riches en Sylvie (KCl), et carnallite, les valeurs enregistrées sont entre 20 et 52 mg/l.

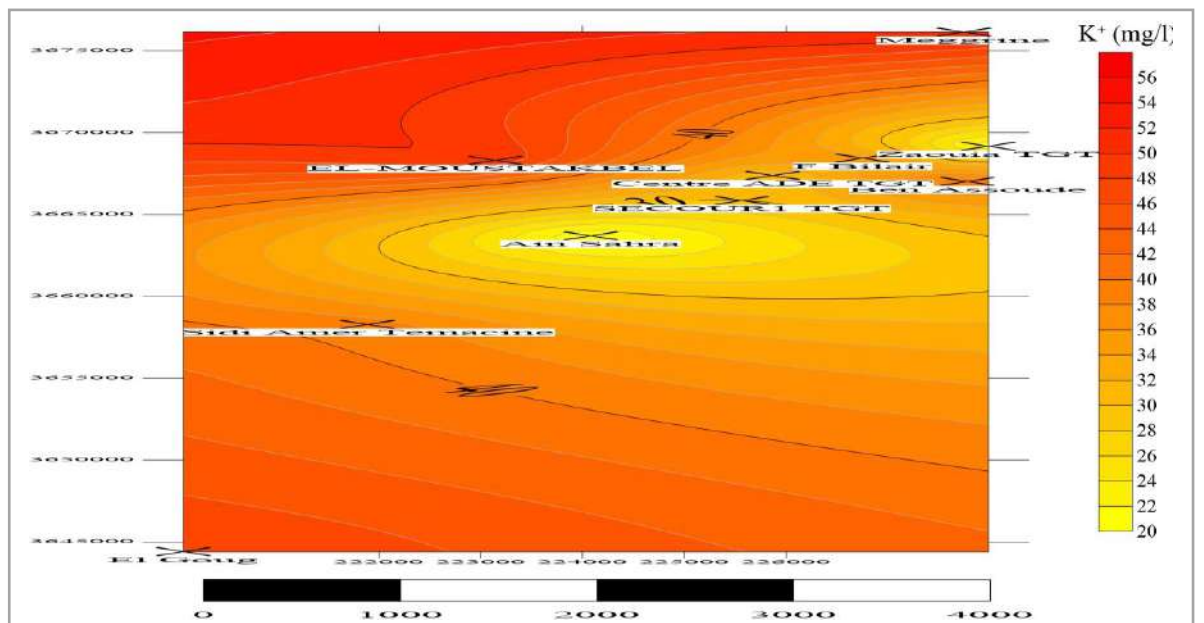


Figure 27 : Carte de Potassium (K<sup>+</sup>)



### e) Les Chlorures (Cl<sup>-</sup>) :

Ils sont toujours présents dans les eaux naturelles dans des proportions très variables, et leur présence dans les eaux souterraines est causée par la dissolution des sels naturels par dissolution des sulfates (KCl) et de l'halite (NaCl).[26]

Les niveaux de chlorure sont très élevés dans la zone de Touggourt dépassant 3500 mg/L.

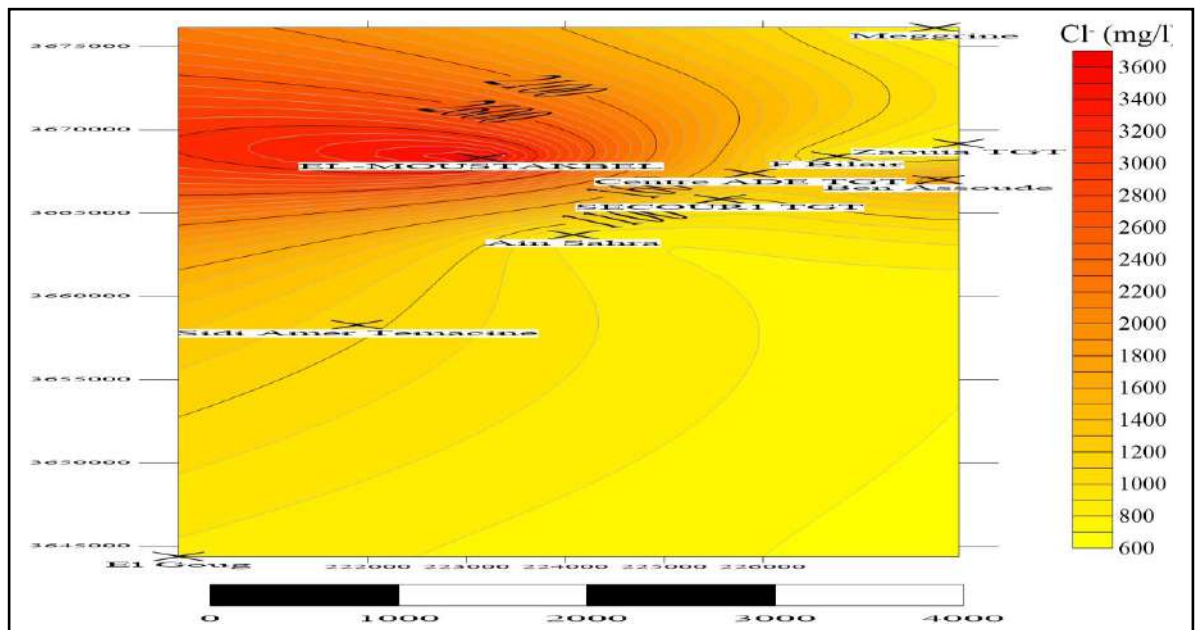


Figure 28 : Carte de Chlorure (Cl<sup>-</sup>)

### f) Les Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :

La teneur en bicarbonates dans les eaux souterraines dépend surtout de la présence des minéraux carbonatés dans le sol et l'aquifère, ainsi que la teneur en CO<sub>2</sub> de l'air et du sol dans le bassin d'alimentation (Matthess., G ,1994).[27]

Les ions bicarbonates se forment à partir de la dissolution des minéraux carbonatés par des eaux chargées en gaz carbonique lors de son l'infiltration dans le sous-sol. Les teneurs en bicarbonates dans les eaux de la région Touggourt varient de 107 à 220 mg/l.

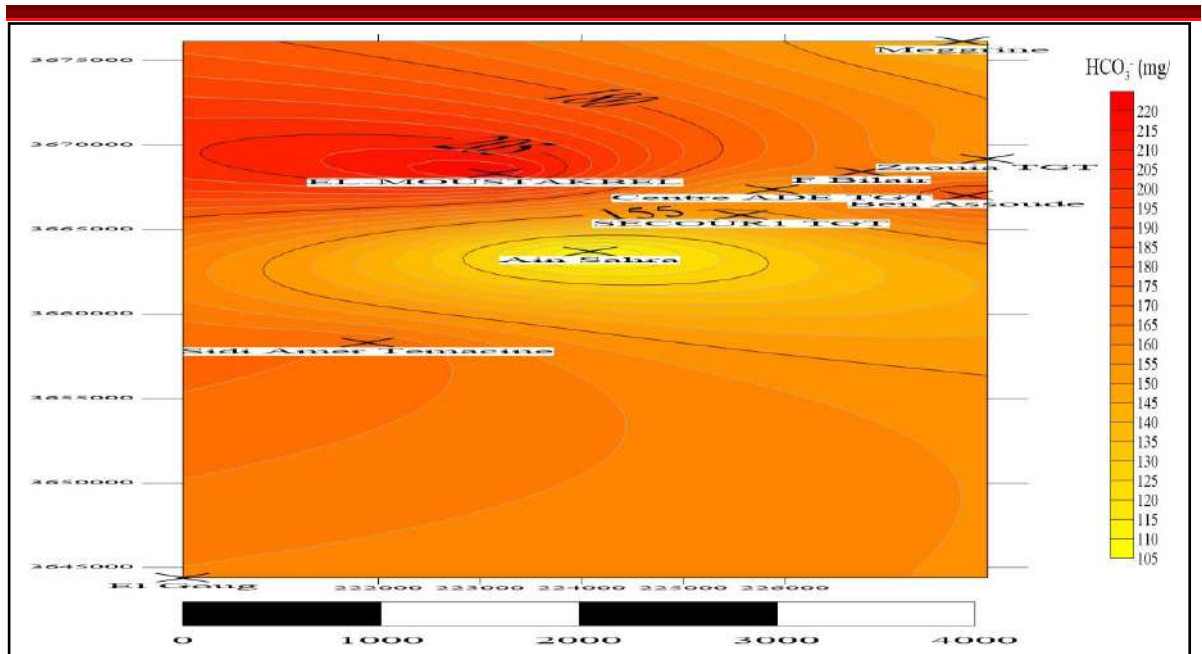


Figure 29 : Carte de Bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )

**g) Les Sulfates ( $\text{SO}_4^-$ ) :**

Les sulfates contenus dans l'eau souterraines résultent de :

- La dissolution du gypse ( $\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).
- L'utilisation des engrais chimiques.
- Le lessivage des terrains argileux et marneux.[28]

La présence de sulfates est généralement associée à la lixiviation de formations vaporisées, telles que le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2 (\text{H}_2\text{O})$ ) et l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), et peut également provenir de l'oxydation de la pyrite ( $\text{FeS}_2$ ).L'eau de la zone varie de 580 mg/litre à 2280 mg/litre, où l'on constate que ses concentrations sont très élevées.

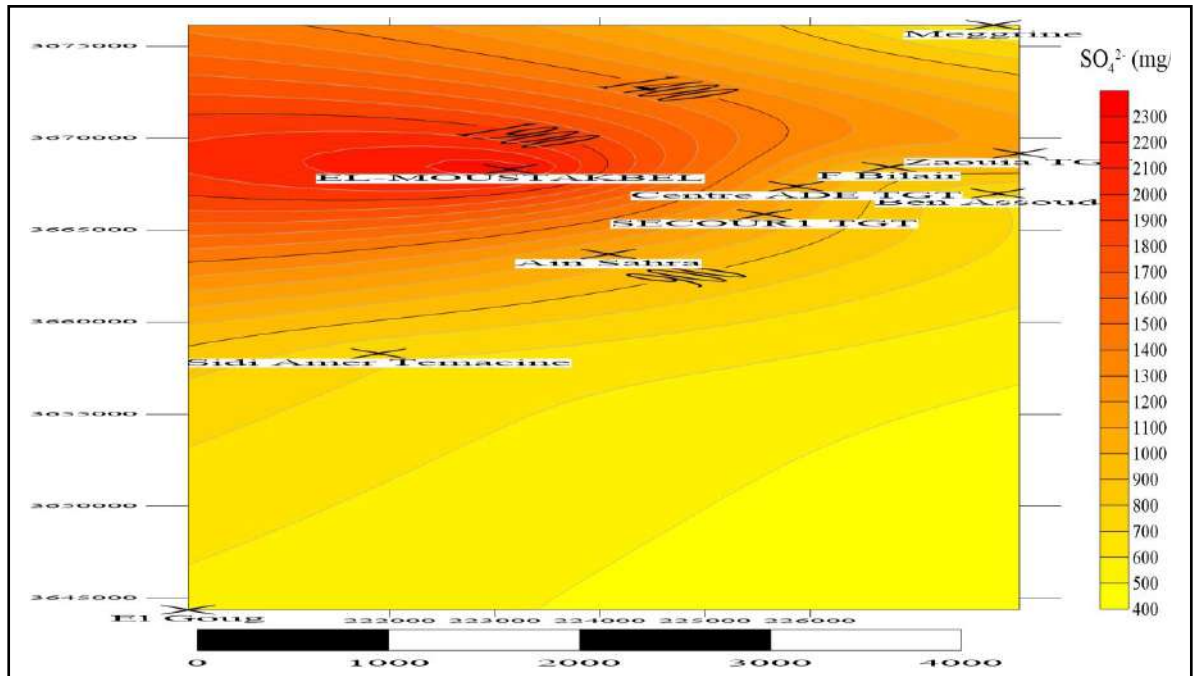


Figure 30 : Carte de Sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )

### III.5.3. Représentation graphique :

Le principal outil utilisé pour les représentations graphiques des analyses Chimiques est le logiciel DIAGRAMMES crée par Roland SIMLER du Laboratoire D'Avignon. C'est un logiciel d'hydrochimie en distribution libre facilitant L'exploitation d'analyse d'eau. Parmi ces diagrammes qui nous permis de déduire les Interprétations sont.[29] :

- A. Diagramme de Piper,
- B. Diagramme semi-logarithmique de Schöeller-Berkaloff,
- C. Diagramme Stabler
- D. Diagramme Riverside/Wilcox

#### A. Diagramme de PIPER :

Le diagramme de Piper est un diagramme ternaire qui met en évidence les associations dominantes d'ions et les filiations qui existent entre les eaux. Il permet de regrouper les eaux en fonction de leurs ressemblances en termes de proportions de cations ou d'anions. Le diagramme de Piper permet d'établir le faciès chimique des eaux souterraines. Il est composé de deux triangles représentant respectivement la répartition des anions et celle des cations, et d'un losange supérieur représentant la

répartition synthétique des ions majeurs. Ce dernier est subdivisé en quatre losanges matérialisant un type d'eau.[30]

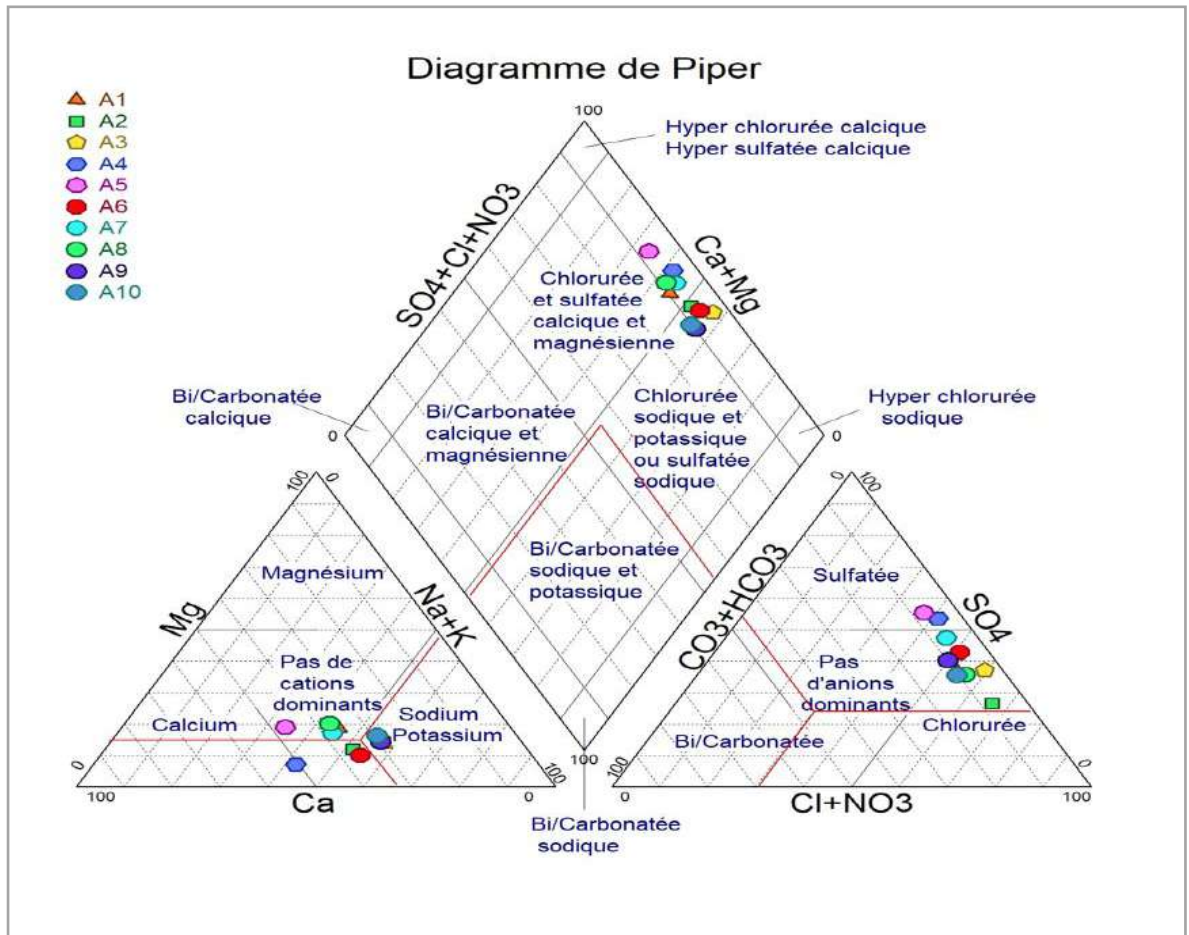


Figure 31 : Diagramme de Piper du Forages de région Touggourt

Pas de cation dominant le reste éléments localisé dans le triangle de sodium potassium (Na + K); domination des chlorures et sulfates dans le triangle des anions sur les bicarbonates( $\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$ ).

### B. Diagramme de Schöeller Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet de représenter le faciès chimique de plusieurs eaux. Chaque échantillon est représenté par une ligne brisée. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence.[31][32]

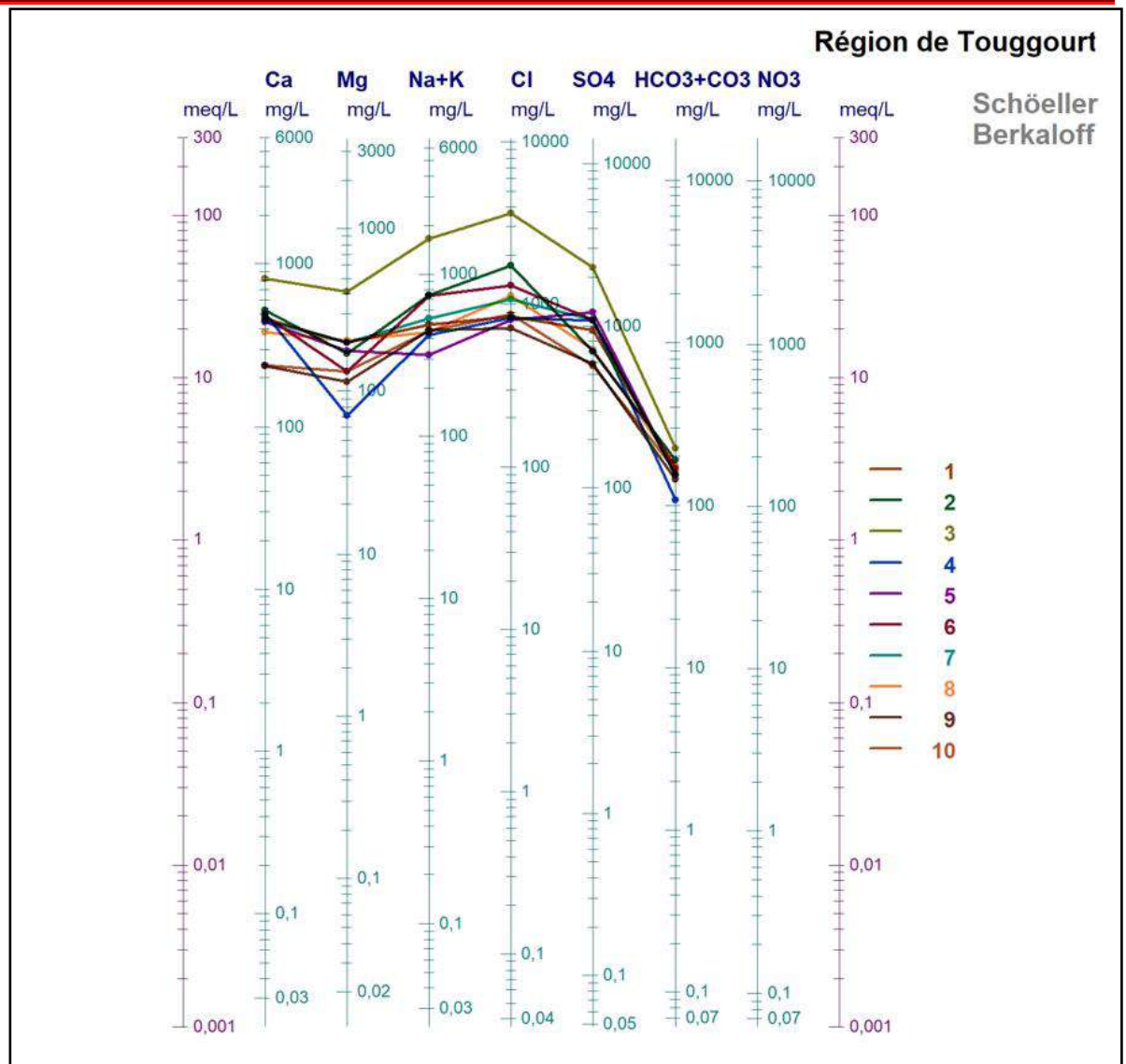
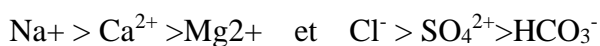


Figure 32 : Digramme de Schöeller du Forges région Touggourt

A travers ces représentations, les eaux de la nappe présentent un faciès chloruré sodique et potassique .

Selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff , les ions dominants sont les chlorures pour les anions et le sodium et le potassium pour les cations. Les concentrations s'ordonnent comme suit :



### C. Diagramme de STABLER :

Diagramme de Stabler est très utile pour l'étude des équilibres carbonatés. Il permet de représenter très rapidement l'alcalinité, l'alcalinité résiduelle calcite et les alcalinités résiduelles généralisées. On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant.[33] ; Pour cela les concentrations en (meq/L) des anions et des cations sont reportés sur deux barres ou colonnes distinctes de même longueur les

concentrations étant reportées en %. La détermination des différents titres est alors visuelle.[34]

Pour déterminer les formules ioniques des échantillons analysés et permettent

**Tableau 9** : Faciès chimique des eaux de Forges de région Touggourt.

Forages	Cations	Anions	Faciès chimique des eaux
A1	r(Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée calcique
A2	r(Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée sodique
A3	r(Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée calcique
A4	r(Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >Cl <sup>-</sup> > HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Sulfaté calcique
A5	r(Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée calcique
A6	r(Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée sodique
A7	r(Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée sodique
A8	r(Ca <sup>2+</sup> >Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée calcique
A9	r(Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée sodique
A10	r(Na <sup>+</sup> > Mg <sup>2+</sup> >Ca <sup>2+</sup> >K <sup>+</sup> )	r(Cl <sup>-</sup> >SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> >HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> >NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Chlorurée sodique

Le tableau montre que les eaux des Forages :

- Chlorurée calcique avec (40%) soit 4 échantillons.
- Chlorurée sodique avec (50%) soit 5 échantillons.
- Sulfaté calcique avec (10%) soit 1 échantillons.



La représentation graphique de classification de faciès chimique selon le Diagramme de Stabler :

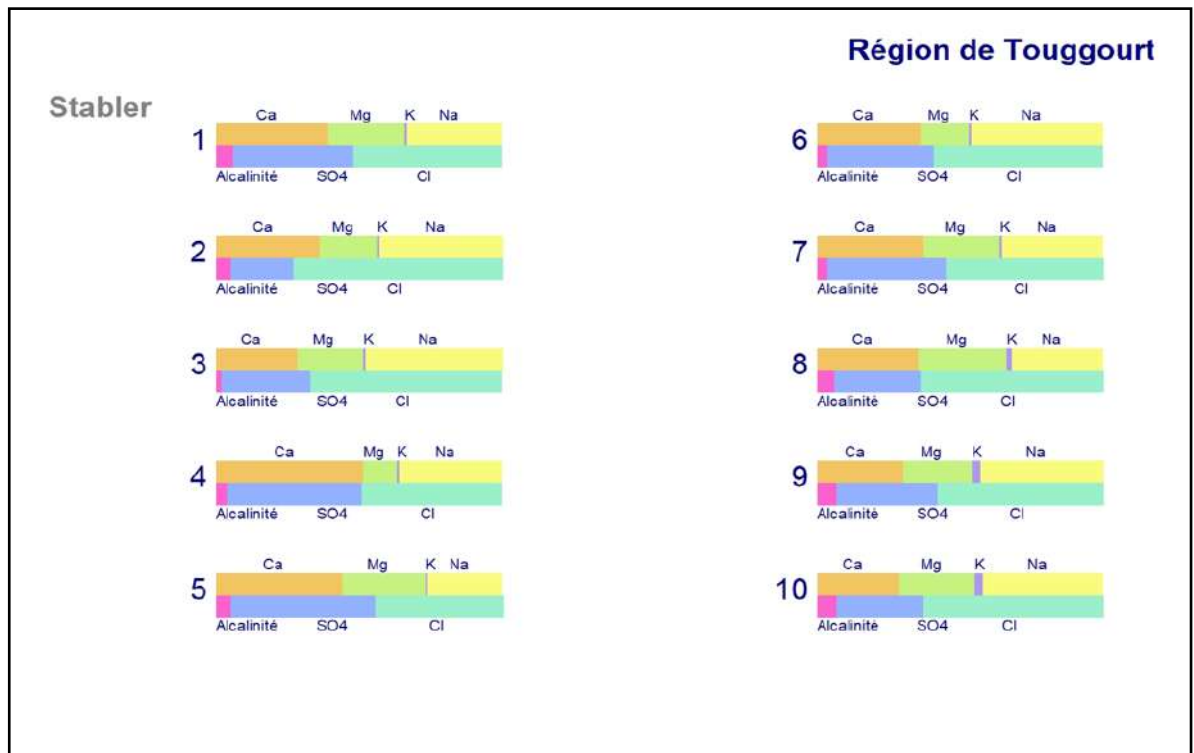


Figure 33 : Diagramme de Stabler des forages Région Touggourt

### III.6. Etude statistique des données Hydrochimique :

#### III.6.1. Statistique descriptive :

Les caractéristiques statistiques descriptives des variables physico-chimiques utilisées concernent les valeurs minimales et maximales, la moyenne et l'écart-type [35] ; et le coefficient de variation).

#### Le minimum et le maximum :

Ils représentent la plus grande et la plus petite valeur de l'échantillon.

#### La moyenne arithmétique :

La moyenne arithmétique d'une série quantitative est définie par la somme des valeurs observées, divisée par l'effectif total.

#### L'écart-type :

L'écart-type observé correspond à la racine carrée de la variance observée.



### Le coefficient de variation (CV) :

Le coefficient de variation est le rapport entre l'écart -type et la moyenne.

Les paramètres statistiques des variables physico-chimiques et chimiques des eaux souterraines de région Touggourt sont reportés dans le (Tableau 7) :

**Tableau 10** : Statistiques descriptives (Données quantitatives).

Variable	Unité	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV(%)
CE	(us/cm)	3290	15560	6329	3430,21	54
PH		6,91	7,61	7,31	0,22	3
TH	mg/l	1060	3750	1841,00	739,65	40
Ca <sup>2+</sup>	mg/l	236,47	821,64	453,49	163,69	36
Mg <sup>2+</sup>	mg/l	70,47	413,1	181,90	92,21	51
Na <sup>+</sup>	mg/l	300	1600	585,00	380,10	65
K <sup>+</sup>	mg/l	20	52	36,40	11,57	32
Cl <sup>-</sup>	mg/l	723,31	3635,54	1298,67	874,51	67
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/l	107,52	221,81	163,24	30,04	18
SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/l	570	2280	1026,40	498,76	49

### III.6.2. Origines du chimisme :

Les résultats de tableau ci-dessous montre que la majorité des éléments sont bien corrélés entre eux, voire mieux avec la conductivité selon la Matrice de corrélation entre les éléments physicochimiques Voir le (Tableau 11) :

**Tableau 11** : Matrice de corrélation entre les variables.

	PH	Cond ( $\mu$ S/cm)	Ca <sup>+2</sup> (mg/l)	Mg <sup>+2</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)	TH (mg/l)
PH	1									
Cond ( $\mu$ S/cm)	-0,11	1								
Ca <sup>+2</sup> (mg/l)	-0,38	<b>0,92</b>	1							
Mg <sup>+2</sup> (mg/l)	0,17	<b>0,88</b>	<b>0,74</b>	1						
Na <sup>+</sup> (mg/l)	-0,05	<b>0,97</b>	<b>0,84</b>	<b>0,83</b>	1					
K <sup>+</sup> (mg/l)	<b>0,67</b>	0,24	-0,09	0,38	<b>0,41</b>	1				
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	-0,04	<b>0,97</b>	<b>0,85</b>	<b>0,87</b>	<b>0,98</b>	<b>0,40</b>	1			
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)	-0,25	<b>0,91</b>	<b>0,89</b>	<b>0,79</b>	<b>0,83</b>	-0,04	<b>0,82</b>	1		
HCO <sub>3</sub> <sup>-2</sup> (mg/l)	0,37	<b>0,73</b>	<b>0,54</b>	<b>0,86</b>	<b>0,73</b>	<b>0,57</b>	<b>0,79</b>	<b>0,46</b>	1	
TH (mg/l)	-0,17	<b>0,97</b>	<b>0,93</b>	<b>0,91</b>	<b>0,91</b>	0,15	<b>0,95</b>	<b>0,91</b>	<b>0,73</b>	1

L'analyse du tableau révèle des corrélations faibles et négatives, faibles, fortes et positives entre certaines variables.

Ainsi, la CE présente de très fortes corrélations avec  $\text{Ca}^{2+}$ (0,92),  $\text{Mg}^{2+}$  (0,88),  $\text{Na}^+$ (0,97),  $\text{Cl}^-$  (0,97),  $\text{SO}_4$ (0,91), et une corrélation moyenne avec  $\text{HCO}_3$  (0,73).

Il existe de fortes corrélations entre Turbidité et  $\text{Ca}^{2+}$ (0,93),  $\text{Mg}^{2+}$ (0,91),  $\text{Na}^+$ (0,91),  $\text{Cl}^-$ (0,95),  $\text{SO}_4$ (0,91), et une corrélation moyenne avec  $\text{HCO}_3$  (0,73).

Ces deux derniers paramètres (CE et TH) sont fortement corrélés (0,97).

Les corrélations sont également importantes entre  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ (0,74),  $\text{Na}^+$ (0,84),  $\text{Cl}^-$ (0,85),  $\text{SO}_4^{2-}$ (0,89) mais moyennement corrélés avec  $\text{HCO}_3^-$ (0,54).

Quant au  $\text{Mg}^{2+}$ , il présente les mêmes corrélations avec  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Na}^+$  (0,83),  $\text{Cl}^-$ (0,87),  $\text{SO}_4^{2-}$ (0,79),  $\text{HCO}_3^-$  (0,86).

Quant au  $\text{Na}^+$  est :  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  (0,98),  $\text{SO}_4^{2-}$ (0,73),  $\text{HCO}_3^-$ (0,73).

Ces deux paramètres sont moyennement corrélés au pH  $\text{Ca}^{2+}$ (0,38), le  $\text{HCO}_3^-$ (0,37).

### III.6.3. Les relations chimiques entre les éléments :

#### 6.3.1 Sodium-Chlorure (Na-Cl):

L'examen de cette relation montre une évolution proportionnelle entre le sodium et les chlorures ce qui indique une origine commune, probablement l'halite (Na-Cl), et qui confirme la domination du faciès chlorurée sodique. Le coefficient de corrélation est **de 0,97**

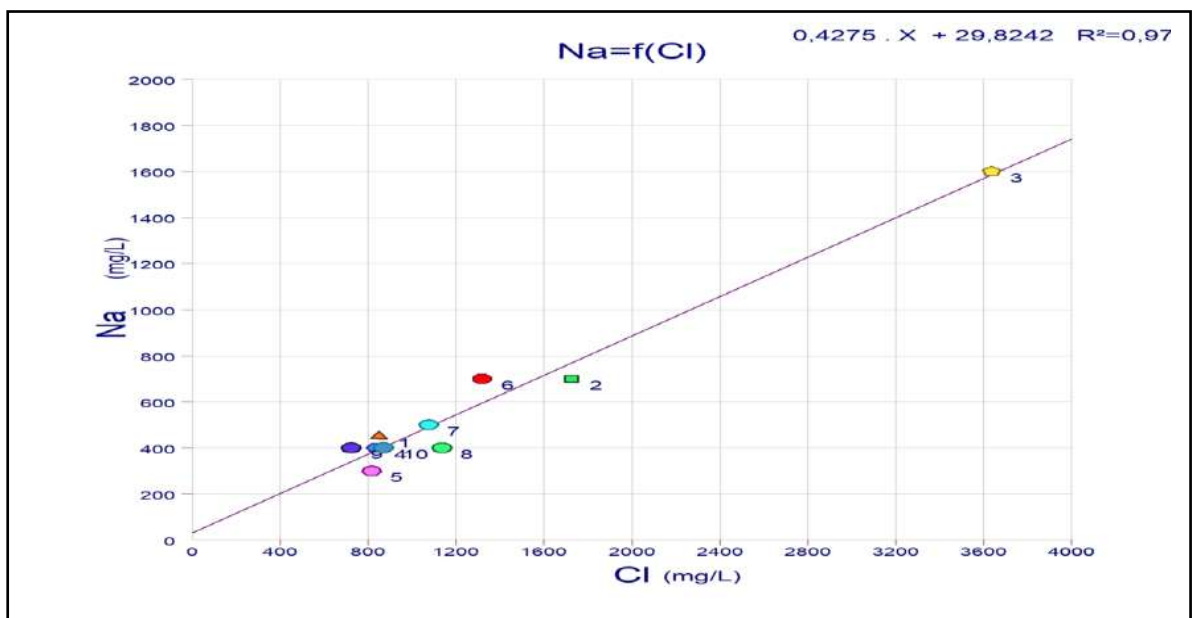


Figure 34 : Relation Na-Cl.

**III.6.3.2 Sulfate-Calcium (SO4-Ca):**

Les sulfates ont une relation proportionnelle avec le Calcium, donc ils ont des origines communes, soit du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) soit de l’anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ), avec Un excès pour les sulfates, d’où l’échange de base du calcium des formations Argileuses, le coefficient de corrélation régression linéaire de **0,80**.

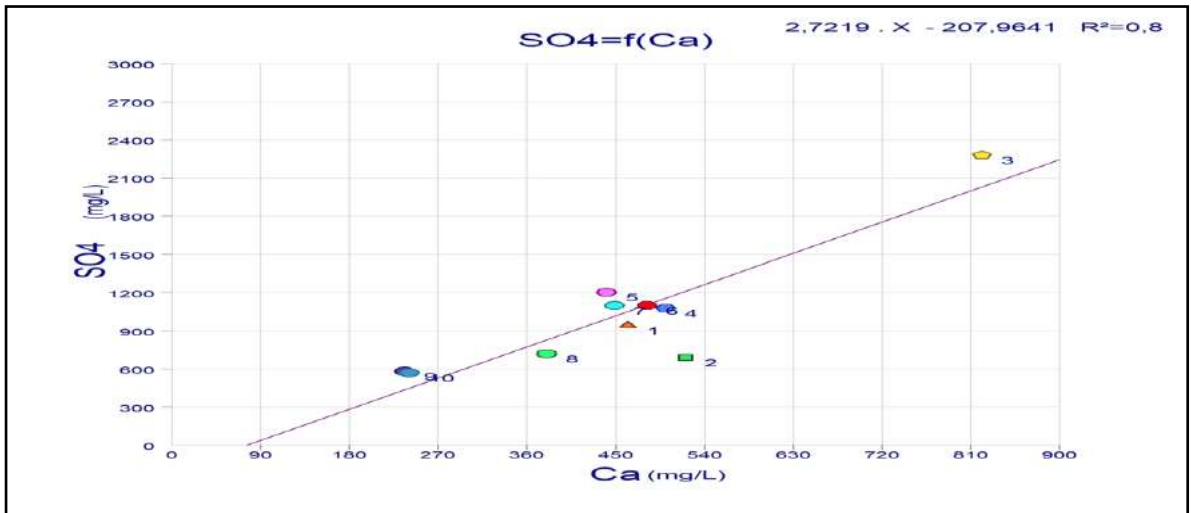


Figure 35: Relation SO4-Ca

**III.6.3.3 Calcium–Dureté (Ca-TH):**

La relation est bien visible entre la dureté et le calcium, Avec un coefficient de corrélation de la régression linéaire de 0,88 qui confirme le Classement de diagramme de Piper où les eaux sont classés d’une dureté élevée et une salinité très élevée.

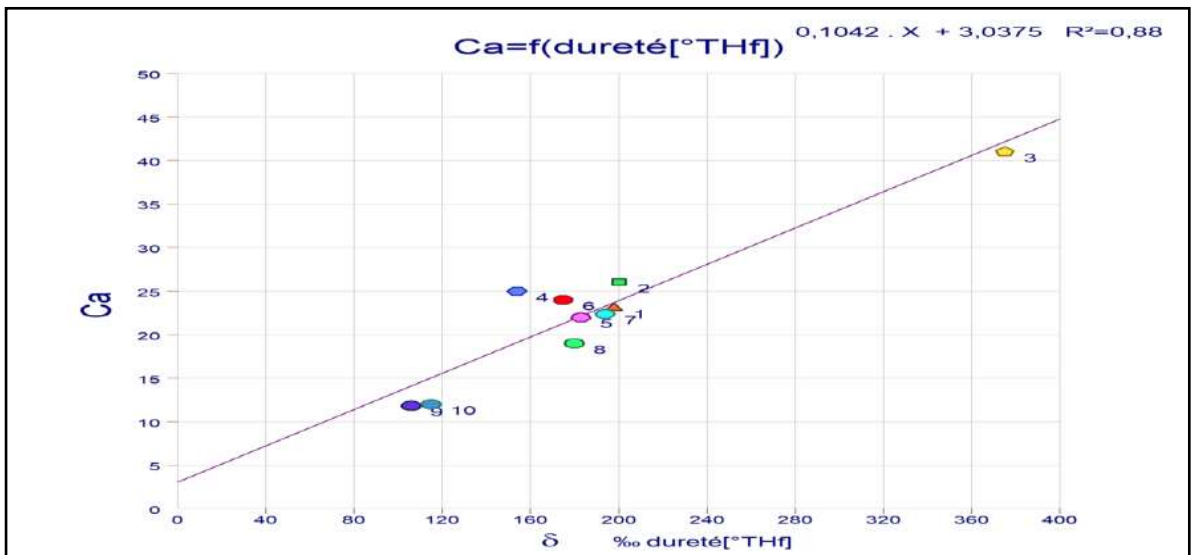


Figure 36: Relation Ca- TH

### III.7. Eau d'Irrigation :

L'étude chimique de l'eau d'irrigation est nécessaire pour mettre en évidence le danger que représentent certains éléments chimiques, pour les plantes qui ne tolèrent pas bien les sols saturés en sodium, il est nécessaire de connaître l'évolution chimique de l'eau et ses propriétés. Ce qui a un impact sur différentes cultures.

Avant d'aborder la qualité de l'eau destinée à l'irrigation nous essayons de définir cette dernière qui n'est autre qu'un apport artificiel d'eau à des plantes cultivées qui a pour but de compenser l'insuffisance des précipitations naturelles et de permettre le développement harmonieux de ces plantes (Marcel Nazoer ; 2002)[36].

La classification des eaux d'irrigation selon le pourcentage du sodium Absorbé (%Na) par les eaux en fonction de la conductivité électrique dans l'eau.

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et une destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium (R. S. AYERS et D. W. WESTCOT, 1988).

Dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile de satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable, « Sodium Absorption Ratio » (S.A.R). Pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé. Le SAR est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau[37] (Voir la Méthode de Richards).

**La Méthode de Richards 1954 :** (Laboratoire de Salinité du Département de L'Agriculture aux USA), le SAR (Sodium Adsorption Ratio), défini Par la Formule ci-dessous :

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

Le S.A.R est un indice qui mesure le danger de la salinité et le risque

D'alcalinisation des sols Où  $rNa^+$ ,  $rCa^{++}$  et  $rMg^{++}$  sont les quantités en réaction

(Na<sup>+</sup>, Ca<sup>++</sup>, Mg<sup>++</sup>) sont exprimées en méq/l.

**Tableau 12 :** Classification de la qualité de l'eau d'irrigation.

Classe	SAR (meq/l)	Taux de sodium	Qualité de l'eau
S1	< 10	Faible	Excellente
S2	10 – 18	Moyen	Bonne
S3	18 – 26	Elevé	Douteuse
S4	> 26	Très élevé	Inappropriée

Source [38].

**Tableau 13 :** Classification des eaux d'irrigation de Wilcox (méthode Richards).

N°	Qualité	Classe	Utilisation
1	Excellente	C1-S1 C1-S2	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	Bonne	C2-S1 C2-S2	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
3	Admissible	C2-S3 C3-S1 C3-S2	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés.
4	Médiocre	C3-S3 C4-S1 C4-S2	En général, Eau fortement minéralisée, utilisée uniquement pour des plantes très résistantes aux sels dont le sol présente une bonne perméabilité.
5	Mauvaise	C3-S4 C4-S3 C4-S4	Eau ne convenant pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisé sous certaines conditions, soit plantes très résistantes aux sels dont le sol et une bonne perméabilité.

Source[39]

### III.7.1. Diagramme Wilcox Log :

Ce diagramme est essentiellement utilisé pour évaluer le risque de salinisation des sols. Il utilise pour cela la conductivité électrique (CE) ou la charge totale dissoute, toutes deux relatives à la salinité de l'eau, et l'indice d'adsorption du sodium (SAR en anglais) aussi appelé (pouvoir alcalisant) qui est une mesure du risque de la sodisation du sol du fait de l'irrigation. Le diagramme est découpé en quatre classes de salinité (axe des abscisses) et quatre classes de risques de sodisation (axe des ordonnées)[41].

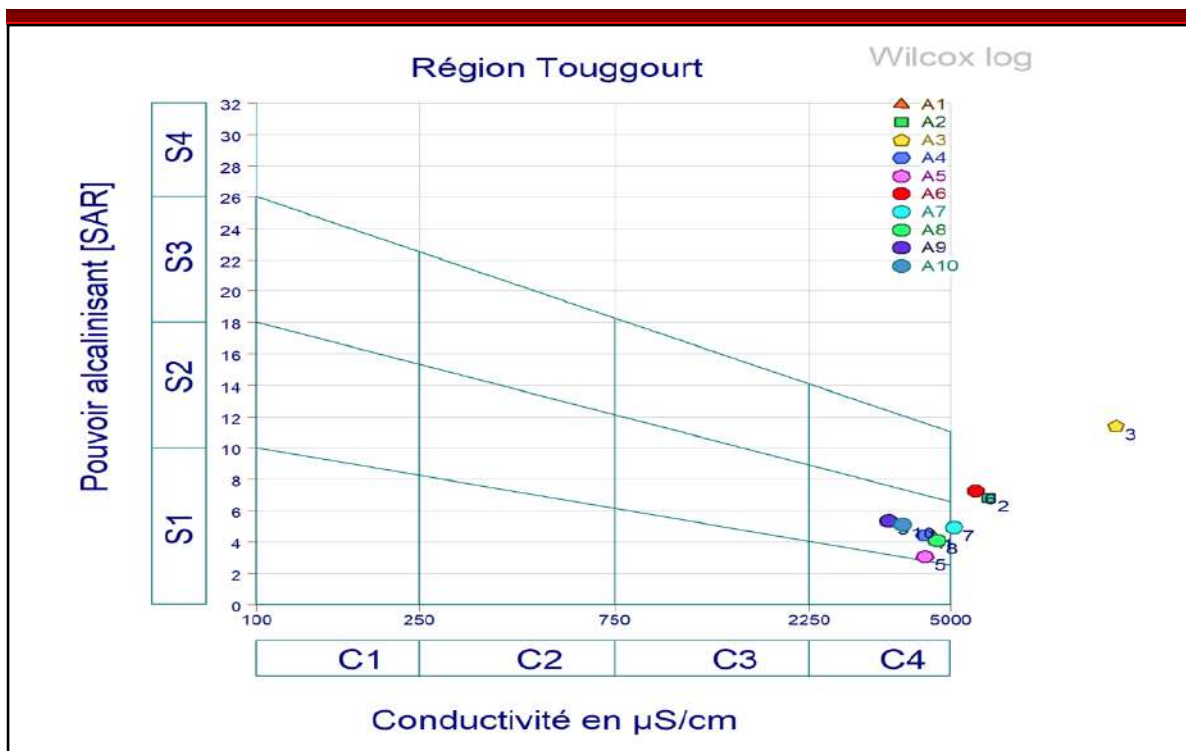


Figure 37 : Diagramme Wilcox Log

**Tableau 14** : Classification des forages selon l'irrigation.

Forages	Classe	Qualité de l'eau
F1	C4-S2	Médiocre
F2	C4-S3	Mauvaise
F3	S4-C4	Mauvaise
F4	C4-S2	Médiocre
F5	C4-S2	Médiocre
F6	C4-S3	Mauvaise
F7	C4-S2	Médiocre
F8	C4-S2	Médiocre
F9	C4-S2	Médiocre
F10	C4-S2	Médiocre

- Les classes C4-S2:caractérisent par eaux médiocres fortement Minéralisées, susceptibles de convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes aux sels et sur des sols bien drainés et lessivés avec un risque de salinité.

- Les classes C4-S3 et C4-S4 : caractérisent par eaux de mauvaise qualité ne convenant pas à l'irrigation à cause de la salinité élevée mais pouvant être utilisé sous certaines conditions, soit plantes très résistantes aux sels ou sol à une bonne perméabilité.

**Tableau 15** : Résultats du SAR de forages

Forages	S.A.R
A1	4,4
A2	6,9
A3	11,8
A4	4,6
A5	3,1
A6	7,4
A7	4,9
A8	4,2
A9	5,6
A10	5

### III.7.2. Diagramme Wilcox :

Le développement des plantes dans les sols saturés en sodium il est nécessaire de savoir la Classification des eaux de la région selon le diagramme de « Wilcox », fondée sur la conductivité électrique et le pourcentage du sodium soluble dans l'eau. Ce diagramme (Wilcox, 1955) est un outil pratique de classification de l'eau d'irrigation en différentes catégories selon son aptitude à l'irrigation[40].

Le pourcentage du sodium peut être défini comme suit :

$$\text{Na}^+(\%) = \frac{\text{Na}^+}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + \text{Na}^+ + \text{K}^+} \times 100$$

Les éléments ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) sont exprimés en méq/l.



**Tableau 16** : Pourcentage de Sodium Na+ des forages.

Forages	Na+(%)
A1	34,1
A2	43,6
A3	49,2
A4	34
A5	28,1
A6	48,4
A7	38,3
A8	33,9
A9	48,4
A10	44,8

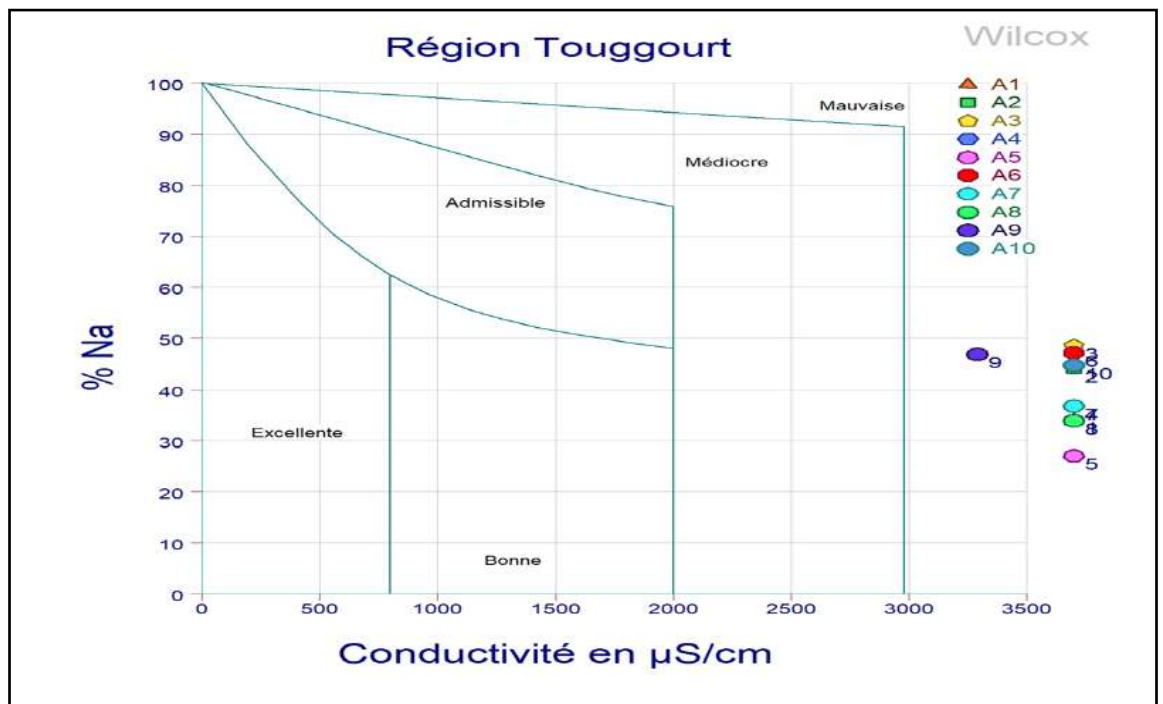


Figure 38 : Diagramme de Wilcox

### III.7.3. Diagramme de Riverside :

Le diagramme de Riverside (1954) a été utilisé pour évaluer le risque de salinisation et de sodisation des sols.

Pour prédire l'évolution de la composition chimique d'une solution, le concept d'alcalinité résiduelle est utilisé. Le concept d'alcalinité résiduelle a été généralisé à la précipitation successive de plusieurs minéraux (Van Beek et al., 1973 in Barbiero et Valles, 1992). L'alcalinité résiduelle est calculée en soustrayant à l'alcalinité les équivalents de cations et en additionnant les équivalents d'anions qui sont impliqués dans les précipitations. Elle est le plus souvent considérée par rapport à la précipitation de calcite et de sépiolite, et correspond alors à la définition du concept de Résiduel sodium carbonates (RSC) utilisé suite aux travaux de Eaton (1950) et de Richards (1954) (Marlet et Job, 2006)[42].

Le sodium est un élément des bases alcalines et alcalino-terreuses, joue un rôle Important dans le maintien de la perméabilité des sols pour l'irrigation.

Pour déterminer ce risque, REVERSIDE a créé une classification qui considère le rapport du sodium absorbé par la minéralisation totale.

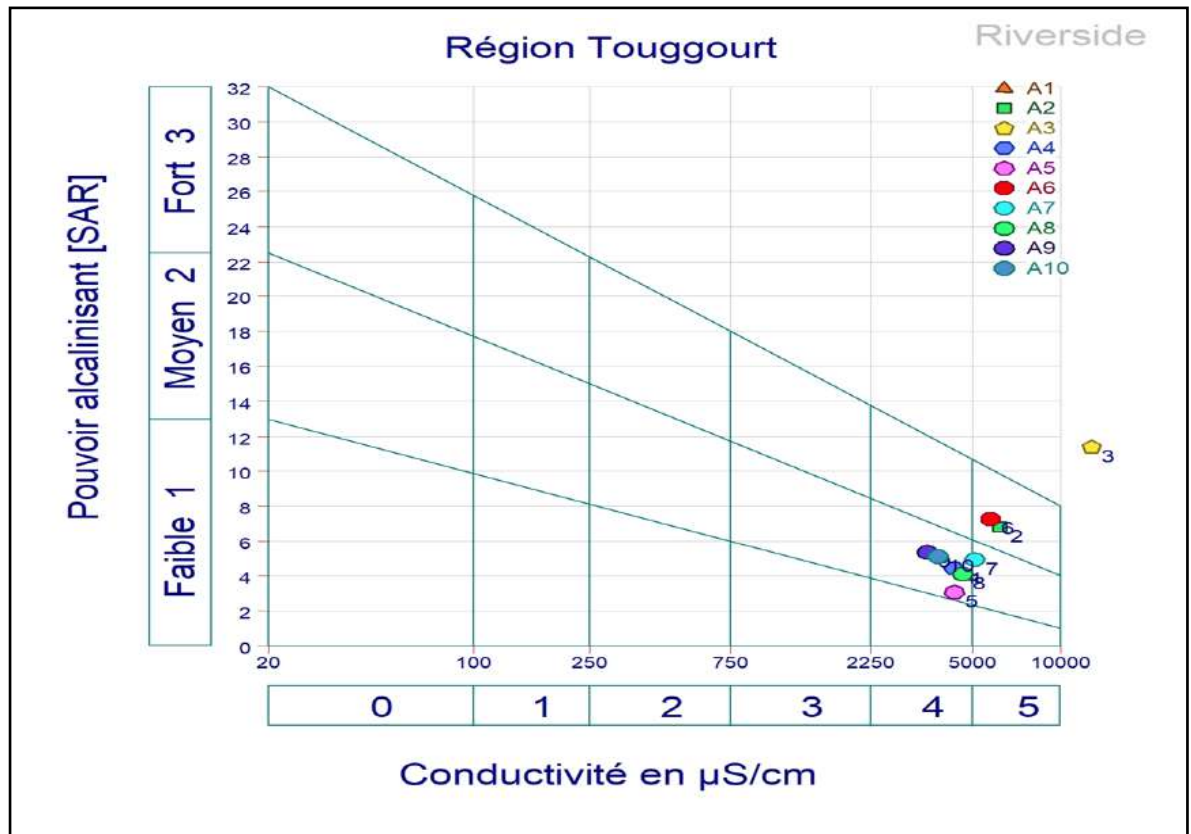


Figure 39 : Diagramme de REVERSIDE

---

**III.8. Conclusion :**

L'étude hydrochimique des eaux de Mio-Ploicien de la Région Touggourt nous permet de mettre en évidence que ces eaux sont caractérisées Par la dominance du faciès chlorurée sodique, et de forte Minéralisation d'après la Comparaison des éléments physico-chimiques  $\text{SO}_4^{2-}$  dépassent Les normes Algérienne (NA) (Tableau 05).

La Conductivité électrique, résidu sec,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , ne dépassent pas la norme.

D'après les analyses de SAR et Wilcox on remarque que les eaux de la Mio-PLiocien de la Région Touggourt sont médiocre à l'irrigation.

Les résultats obtenus par différents calculs et méthodes montrent qu'une mauvaise qualité de l'eau est associée à une partie de La Mio-ploicien.

---

---

# Chapitre IV

## Indice de Qualité de l'Eau

---

---

---

**IV-Indice de Qualité de l'Eau (IQE) (FR):****IV-1. Introduction :**

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une technique de classification de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationale respectives. En d'autres termes, l'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (par exemple, excellent, bon, mauvais...etc.), en générant un score qui décrit l'état qualitative de l'eau en vue d'un usage domestique. Cette méthode a été initialement proposée par Horton (1965) et Brown et al. (1970). Au cours des dernières années, plusieurs études ont eu recours à ce concept pour estimer la qualité de l'eau souterraine en utilisant différentes méthodes de calculations. Par conséquent, l'IQE a été appliqué dans cette étude pour estimer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme des eaux souterraines.[43]

Cette méthode a été proposée par Horton (1965) et Brown et al. (1970). Pour calculer cet indice, Horton (1965) a proposé la première formule de tous les Paramètres nécessaires à la détermination de la qualité des eaux souterraines et qui Reflète l'influence composite de différents paramètres importants pour l'évaluation Et la gestion de la qualité de l'eau.

Cet indice a été utilisé pour la première fois pour mettre en évidence les changements physico-chimiques susceptibles de se produire au cours de l'année et Leur impact sur la qualité de l'eau d'alimentation.

L'indice de qualité de l'eau (IQE) est une expression numérique utilisée pour Évaluer la qualité globale de l'eau à partir d'une grande quantité de données et il est facilement compris par les gestionnaires et décideurs.

Dans cette étude, l'IQE est basé sur plusieurs paramètres physico-chimiques (CE,TH,PH,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) sont utilisé pour évaluer La qualité Globale des eaux souterraines Sur 10 forages à la Région Touggourt.

## IV.2. Calcul de l'Indice de qualité de l'eau (IQE) :

Qualité de l'eau IQE cet indice est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les Normes internationales et les normes Algérienne dans le cadre de cette étude L'IQE résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes Simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.). Dans cette étude L'indice IQE est appliqué pour estimer l'influence des facteurs naturels et Anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme des eaux Souterraines, Cet indice est calculé en suivant la méthode de l'indice arithmétique Pondéré (Brown et al, 1970 ; Brown et al, 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002; Yidana , 2010). L'IQE a important dans l'évaluation de la qualité des eaux souterraines. Il a été utilisé par de nombreux chercheurs pour l'adéquation des eaux souterraines. Cependant, l'IQE a été développé par de nombreuses organisations et institutions internationales à travers le monde telles que : National Sanitation Foundation Water Quality Index (NSFWQI), Weight Arithmetic Water Quality Index (WAWQI), Conseil canadien des ministres de l'environnement Water Quality Index (CCMEWQI) , Indice de qualité de l'eau de l'Oregon (OWQI) (Kumar Sharma I.P et al., 2016) . De nombreux chercheurs ont utilisé la méthode Weight Arithmetic Water Quality Index (WAWQI) pour calculer les paramètres de qualité de l'eau (Olayiwola Oni., 2016; KUMAR.A et al., 2014).[44]

Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif ( $W_i$ ), Spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée selon la

Formule suivante[45] :

$$W_i = K/S_i \quad (1)$$

$W_i$  : poids relatif

$K$  : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de

L'équation suivante :

$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (\frac{1}{S_i})} \quad (2)$$

$S_i$  : valeur maximale de norme standard Algérienne des eaux souterraines de chaque

Paramètre en mg/l sauf pour la conductivité électrique, Titre hydrométrique, PH.

$Q_i$  : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre est donnée par la formule

Suivante :

$$Q_i = \left(\frac{C_i}{S_i}\right) * 100 \quad (3)$$

**C<sub>i</sub>** : la concentration de chaque Paramètre en mg/l

**IQE** : indice de la qualité de l'eau est calculé par l'équation suivante :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n [(Q_i * W_i)]}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité De l'eau IQE voir le (Tableau 17).

**Tableau 17** : Classification de la qualité des eaux souterraines selon l'IQES (Brown et al. 1972 ; Chatterji et Raziuddin, 2002 ; Aher et al. 2016).

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

**Source:** BROWN et al. [1972],[46]

**Tableau 18** : Analyses physico-chimiques des forages Touggourt (ANRH).

Nom	CE ( $\mu\text{s}/\text{cm}$ )	Rés.se (mg/l)	pH	T (C°)	TH (mg/l)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	Na <sup>+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	TAC (mg/l)	Tubité NTU	TDS (mg/l)
A1	3120		7,5		1600	462,77	200,6	450	35	850,64	940	168,69	-		
A2	7000		7,22		2000	521,04	170,1	700	40	1725,73	690	190,76	156,36	1,97	3500
A3	15560		7,34		3750	821,64	413,1	1600	50	3635,54	2280	221,81	181,81	2,09	7780
A4	5030		6,91		1540	501	70,47	400	20	836,17	1080	107,52	88,13	0,771	2515
A5	5520		7,32		1830	440,88	177,39	300	20	814,36	1204	155,27	127,27	0,648	2760
A6	6730	5200	7,22		1750	480,96	133,65	700	30	1319,7	1100	153,01	108,47		3365
A7	5710	4690	7		1930	448,88	199,26	500	30	1076,12	1100	153,01	125,42		2870
A8	4870		7,48	22	1800	380,76	206,55	400	39	1133,16	720	174,65	143,15	0,401	2435
A9	3290		7,61	18	1060	236,47	114,21	400	52	723,31	580	143,31	117,89	6,45	1645
A10	4000	3796	7,47	27,3	1150	240,48	133,65	400	48	872	570	164,37	134,73	0,505	2000
OMS	2800	2000	6,5-8,5			75-200	150	200	20	200-500	200-400	250			
NA	2800	2000	6,5-8,5			200	150	200	20	500	400				



### IV.3. Statistique descriptive :

Les caractéristiques statistiques descriptives des variables physicochimiques utilisées dans cette étude concernent.

**Tableau 19** : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques.

	CE	Salinité	PH	TH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Statistique	(us/cm)	g/l		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Minimum	3290,00	1,60	6,91	1060,00	236,47	70,47	300,00	20,00	723,31	570,00	107,52
Maximum	15560,00	7,70	7,61	3750,00	821,64	413,10	1600,00	52,00	3635,54	2280,00	221,81
1er Quartile	4910,00	2,43	7,22	1555,00	395,79	133,65	400,00	30,00	839,79	697,50	153,01
Médiane	5550,00	2,75	7,33	1775,00	455,83	173,75	425,00	37,00	974,06	1010,00	159,82
3ème Quartile	6475,00	3,28	7,48	1905,00	495,99	200,27	650,00	46,00	1273,07	1100,00	173,16
Moyenne	6329,00	3,17	7,31	1841,00	453,49	181,90	585,00	36,40	1298,67	1026,40	163,24
Variance (n-1)	11766321,11	2,88	0,05	547076,67	26792,91	8502,93	144472,22	133,82	764776,19	248760,71	902,63
Ecart-type (n-1)	3430,21	1,70	0,22	739,65	163,69	92,21	380,10	11,57	874,51	498,76	30,04

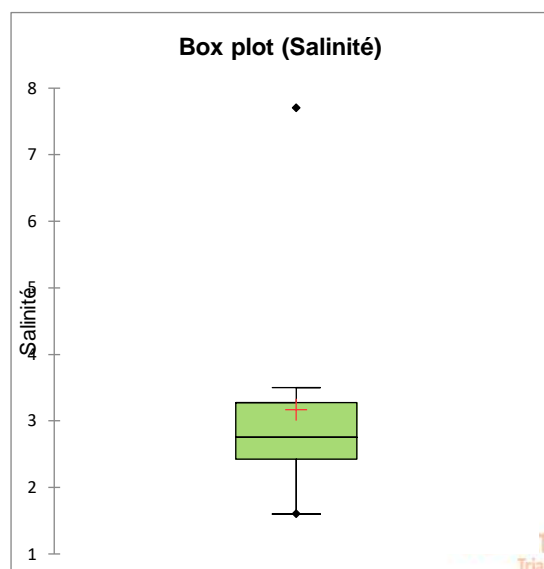


Figure 40 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Salinité

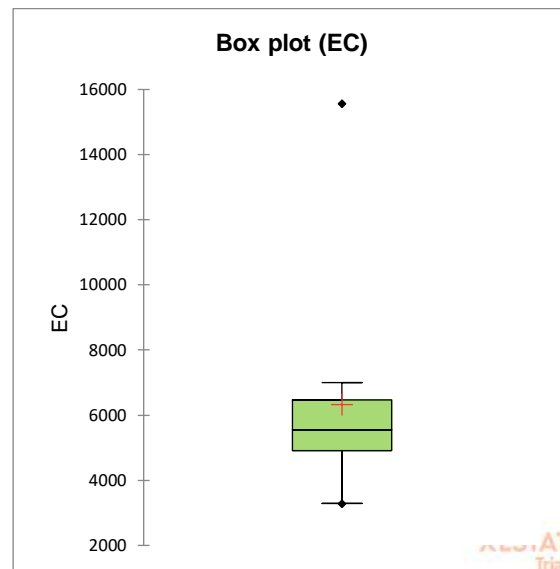


Figure 41 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre CE

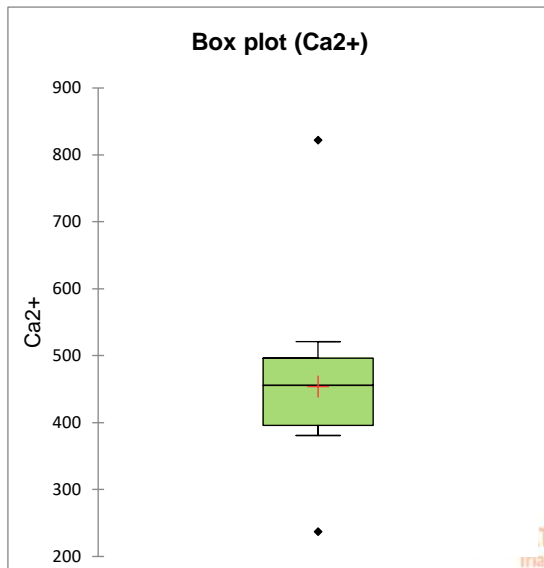


Figure 42 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Ca<sup>2+</sup>

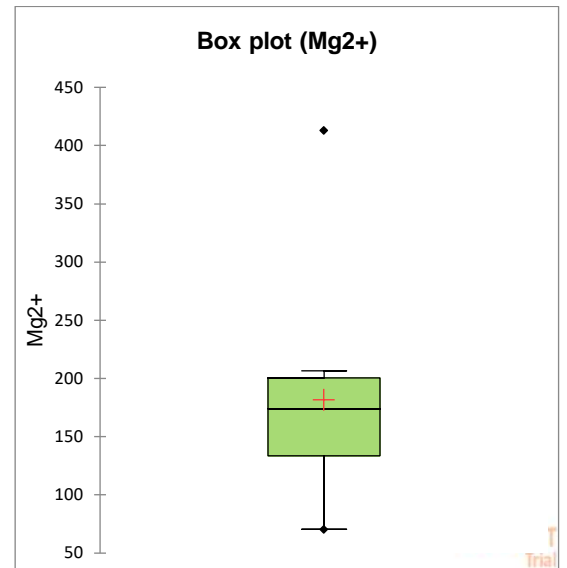


Figure 43 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Mg<sup>2+</sup>

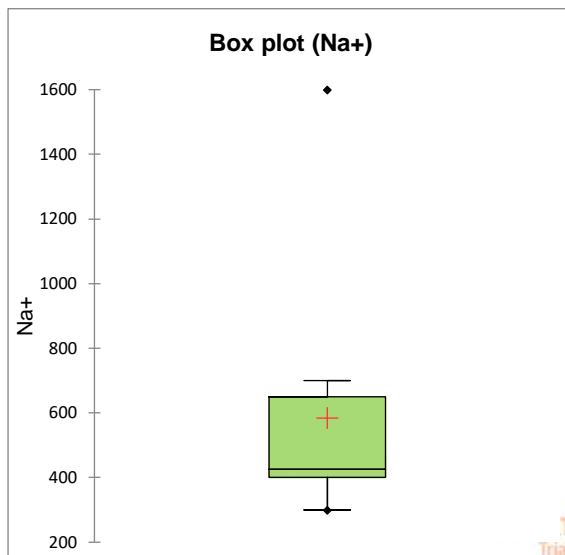


Figure 44 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Na<sup>+</sup>

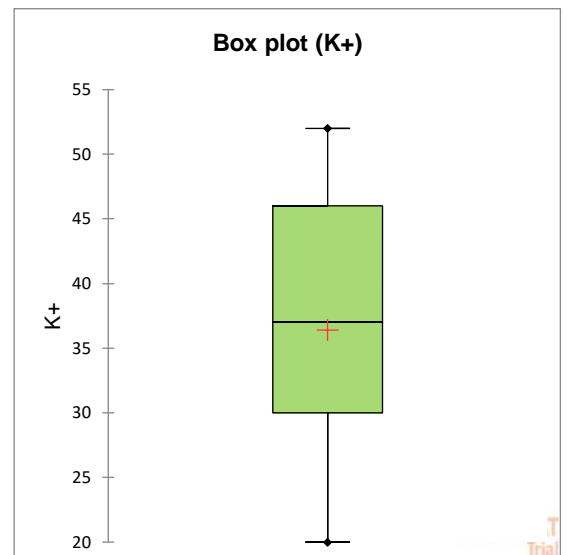


Figure 45 : Diagramme en boîte moustaches de paramètre K<sup>+</sup>

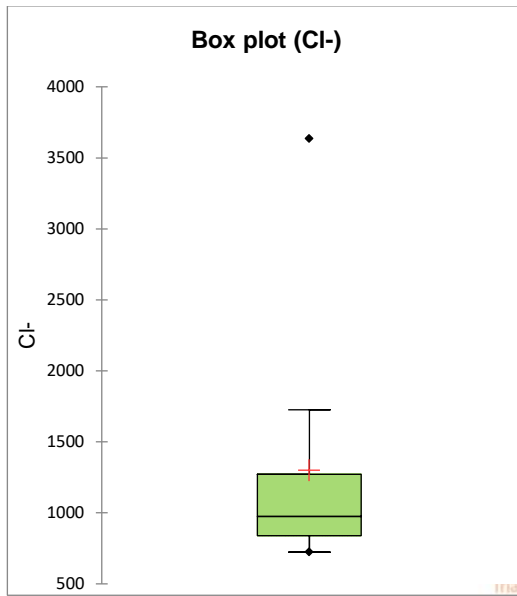


Figure 46 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Cl<sup>-</sup>

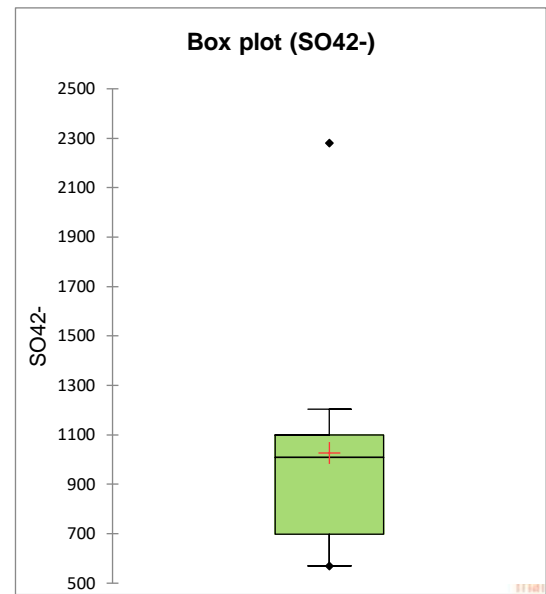


Figure 47 : Diagramme en boîte moustaches de paramètre SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

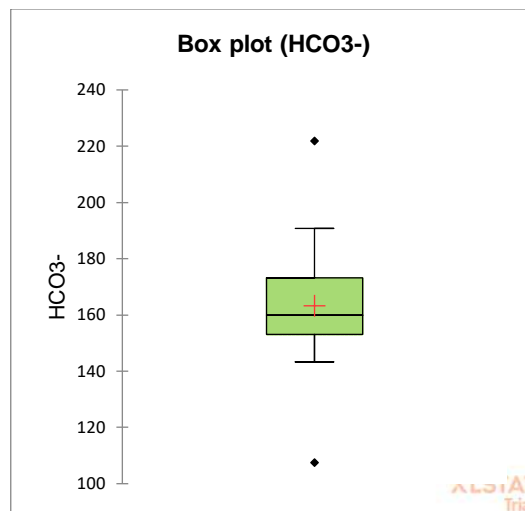


Figure 48 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètres HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>

#### IV.4. Résultats du calcul de l'indice IQE et évaluation de la qualité des eaux :

Le poids relatif ( $W_i$ ) de chaque paramètre physico-chimique et la constante de Proportionnalité( $k$ ) sont calculés en premier lieu en utilisant les valeurs maximales de Norme standard Algérienne

**Tableau 20** : Poids des paramètres physico-chimiques au norme Algérienne.

Paramètres Physico-chimiques	Unité	Norme	Si (Valeur Max	1/Si	K	Wi (poids relative)
		Algérienne	standard, Algérie)			Wi = K/Si
CE	( $\mu\text{s/cm}$ )	2800	2800	0.000357143	4.288700422	0.001531679
PH		6.5-8.5	8.5	0.117647059	4.288700422	0.50455299
TH	$^{\circ}\text{F}$	50	50	0.02	4.288700422	0.085774000
$\text{Ca}^{2+}$	(mg/l)	200	200	0.005	4.288700422	0.021443502
$\text{Mg}^{2+}$	(mg/l)	150	150	0.006666667	4.288700422	0.028591336
$\text{Na}^{+}$	(mg/l)	200	200	0.005	4.288700422	0.021443502
$\text{K}^{+}$	(mg/l)	20	20	0.05	4.288700422	0.21443502
$\text{Cl}^{-}$	(mg/l)	500	500	0.002	4.288700422	0.008577401
$\text{SO}_4^{2-}$	(mg/l)	400	400	0.0025	4.288700422	0.010721751
$\text{HCO}_3^{-}$	(mg/l)	250	250	0.004	4.288700422	0.017154802
$\text{NO}_3^{-}$	(mg/l)	50	50	0.02	4.288700422	0.085774008
SOMME				$\Sigma = 0.233170868$		$\Sigma (W_i) = 1$

K : constante de proportionnalité

On a K: 
$$K = \frac{1}{\sum_{i=1}^n (1/S_i)^n}$$

Alors :  $K = 1/ 0.233170868$

**K = 4.288700422**

#### IV.5. Application numérique :

Exemple pour calculer Indice de Qualité de l'eau souterrain (IQE) pour Forage(3) :

**Tableau 21** : Résultats de l'IQE de forage (A3) :

Paramètres Physico-chim	K	Ci (mg/l)	Si	Qi=(Ci/Si)×10	Wi (Poids relative)	Qi×Wi
CE	4.288700416	/	2800	0	0.001531679	0
PH	4.288700416	/	8.5	0	0.50455299	0
TH	4.288700416	/	50	0	0.085774008	0
Ca <sup>2+</sup>	4.288700416	821,64	200	410,82	0.021443502	8,8094194
Mg <sup>2+</sup>	4.288700416	413,1	150	82,62	0.028591336	2,362
Na <sup>+</sup>	4.288700416	1600	200	800	0.021443502	17,1548016
K <sup>+</sup>	4.288700416	50	20	250	0.214435021	5,3608755
Cl <sup>-</sup>	4.288700416	3635,54	500	727,108	0.008577401	6.2366968
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	4.288700416	2280	400	570	0.010721751	6,111398
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.288700416	221,81	250	88,724	0.017154802	1,5220426
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	4.288700416	0	50	0	0.085774008	0

$$\sum(W_i) = 1$$

$$\sum(Q_i \times W_i) = 47,53$$

Indice de la Qualité de l'Eau Souterrain (IQES)

Pour le forage A3 :

$$IQE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \cdot W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} = 47,53/1$$

La même application des résidus des Forages pour évaluer l'indice de qualité de l'eau souterraines pour chaque forage.

**Tableau 22** : Valeurs de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) et classe de qualité des eaux :

Forages	IQE	Type d'eau	Usage possible
A1	56,27	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
A2	81,97	Très mauvaise qualité	Irrigation
A3	47,53	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
A4	85,91	Très mauvaise qualité	Irrigation
A5	38,40	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
A6	71,09	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
A7	51,98	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
A8	59,19	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
A9	68,53	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie
A10	65,03	Mauvaise qualité	Irrigation et industrie

**Tableau 23** : Répartition des forages selon IQE :

Type d'eau selon l'IQE	Nombre des forages par type d'eau	Pourcentages des forages selon l'IQE
Eau potable, Irrigation et industrie	2	20%
Irrigation et industrie	6	60%
Irrigation	2	20%

#### IV.6. Discussion :

Les résultats obtenus au cours de l'étude selon l'indice de qualité des eaux souterraines pour l'aquifère Mio-pliocène à travers les résultats ont donné de bons Forages (A3 ;A5 ) à usage humain et industriel et à l'irrigation.

Les eaux de mauvaise qualité ne sont pas potables concernant les forages :A1; A6; A7; A8;A9;A10.sont valable à l'usage D'Irrigation et Industrie.

Les eaux très mauvaise qualité concernant les forages : A2, A4 sont valable Uniquement pour l'irrigation.

L'étude a porté sur la mesure de la qualité globale des eaux souterraine de Région Touggourt.

---

Avec l'importance de l'indice de qualité de l'eau, cette étude disposait d'un outil important pour donner les meilleurs résultats et évaluer la qualité de l'eau.

À travers l'indice IQE nous montre qu'une différenciation importante entre les forages qui Ne sont pas de même qualité.



---

---

# Conclusion générale

---

---

## CONCLUSION GENERALE

---

### Conclusion générale

La région de Touggourt, est située dans le nord-est du Sahara Algérien. Sur un plan climatique aride, caractérisée par une température importante, un apport des pluies et humidité faibles et des vents fréquents. Ces conditions influent directement sur l'évaporation des eaux.

Pour le cadre Géologique, La région est caractérisée par deux unités structurales (CI), (CT) ; le socle précambrien composé de roches éruptives et métamorphiques, surmonté par des milliers de mètres de couches sédimentaires allant du Cambrien jusqu'au Quaternaire.

Pour créer des Diagrammes et des cartes de contour, nous avons utilisé des programmes informatiques ( Diagrammes ; Surfer 15).

En hydrochimie les analyses physico-chimiques sont traitées selon les diagrammes Hydrochimiques qui nous permis de bien définir les faciès chimiques sur l'ensemble de la zone d'étude

D'après les résultats de la plupart des fouilles, qui se caractérisent par le contrôle des faciès, il ressort que la nappe phréatique est riche en chlorure de sodium, ce qui traduit l'existence de relations entre éléments chimiques.

Le problème de qualité des eaux a la région est forte salinité.

Les résultats dans la zone d'étude ont montré que l'eau est appropriée pour un grand pourcentage d'utilisation agricole et industrielle, et un petit pourcentage pour l'eau potable, ainsi que l'eau qui doit être traitée avant utilisation.

L'eau de la région de Touggourt est caractérisée par une grande dureté, ce qui la rend dure et nécessite un traitement et un dessalement

La qualité des eaux souterraines a été évaluée par l'indice de qualité de l'eau pour connaître les différences entre les forages.

Afin d'assurer pleinement la consommation humaine de l'eau, l'aspect biologique doit être pris en compte pour s'assurer que l'eau est exempte de bactéries nocives et pathogènes.

---

---

# Références Bibliographiques

---

---

## Références Bibliographiques

---

### Références Bibliographiques

- [1] Melle HADEF Djihad , Melle HASNI Malika(2014) ;Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de l'Oued de Boutane région de Khemis-Miliana
- [2] Etude géochimique de l'aquifère du Mio-Pliocène dans la région de l'oued Righ (Touggourt) ; BABAOUSMAIL Houcine 2015/2016
- [3] MCA, Présidente Melle SALHI N. Utilisation de quelques extraits végétaux dans la lutte contre la cochenille blanche du palmier dattier *Parlatoria blanchardi* Targ.(Homoptera, Diaspididae) dans la région de Ouargla. 2017. Thèse de doctorat. UNIVERSITE KASDI-MERBAH OUARGLA.
- [4] BOUTERID, Chahrazed et HAFID, Feyrouz. Apports des données lithostratigraphique à la modélisation géologique 3D dans la vallée d'Oued Righ. 2021.
- [5] Mihoub, A., Helimi, S., Mokhtari, S., & Halitim, A. (2016). Appréciation d'une méthode pour l'estimation des besoins en eau d'une culture cultivée dans un milieu salin (cas du palmier dattier). *Revue Agriculture*. Numéro spé, 189-197.
- [6] HADRAOUI.A BOUNEGAB.B., 2014, Reconnaissance géologique de l'aquifère du mio-pliocène de la région de Touggourt, Mémoire d'ingénieur d'état En géologie Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [7] Melouah, O., & Zeddouri, A. (2017). Contribution of Gravimetry to the hydrogeological recognition of the area of Wadi Righ–Ouargla. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 9(1), 74-88.
- [8] HOUARI I., 2012, contribution a l'étude de l'évolution géochimique des eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara septentrional, Mémoire de Magister En géologie Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [9] Boualem, B. O. U. S. E. L. S. A. L., & Salah, B. M. Qualité des eaux de l'aquifère de complexe terminal de Sahara Septentrional: Cas de la région de Taibet (SE Algérie).
- [10] SAYAH LEMBAREK M., 2008, Etude hydraulique du canal Oued Righ. Mémoire de Magister en géologie Université KasdiMerbah Ouargla.
- [11] FABRE J. (1976) : Introduction à la géologie du Sahara Algérien. SNED, Alger Algérie,

## Références Bibliographiques

---

- [12] BUSSON G. 1972 : Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Paris.
- [13] BEL F. & CUCHE D. (1969) : Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie.
- [14] LATRECHE B., 2015, contribution à l'étude hydrochimique des eaux des lacs de la vallée d'oued righ, Mémoire de Master Hydraulique Université KasdiMerbah Ouargla.
- [15] CHELLAT S. 2014 : Cadre Sédimentologique et Paléoenvironnemental des Formations moi-pliocènes de la région de Guerrara (Ghardaïa, Algérie), Mémoire de Doctorat en Sciences en Géologie université Constantine 1
- [16] L'OBTENTION DU DIPLOME, MEMOIRE Pour. DIAGNOSTIQUE DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERRAINES SOUMISES A LA DECHARGE D'ANDRALANITRA. 2015. Thèse de doctorat. UNIVERSITE D'ANTANANARIVO.
- [17] N'DIAYE, ABDOULAYE DEMBA, SALEM, K. Mint Mohamed, et al. Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique de l'eau de la rive droite du fleuve Sénégal. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 2013, no 12.
- [18] GHAZALI, D. et ZAID, A. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Région de Meknès-Maroc). LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 2013, no 12.
- [19] TFEILA, M. M., MOSA KO, Souabi S., ABOULHASSAN, M. A., et al. Suivi de la qualité physicochimique de l'eau du fleuve Sénégal: Cas du captage du Beni Nadji alimentant en eau potable les wilayas de Nouakchott. Journal of Materials and Environmental Science, 2016, vol. 7, no 1, p. 148-160.
- [20] HOUSSAINI, T. SQALLI et BENZAKOUR, K. LES EAUX EN BOUTEILLE AU MAROC: CHOIX DU NÉPHROLOGUE. Maroc Médical, 2010, vol. 32, no 3.
- [21] SAIDA, AZLAOUI et NAIMA, ZENATI. Evaluation de la qualité physicochimique et microbiologique de l'eau consommée au site de l'université Ziane Achour de Djelfa. 2019.

## Références Bibliographiques

---

Thèse de doctorat. Université Ziane Achour-Djelfa: Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.

[22] MASTER, VUE D.'OBTENTION DU DIPLÔME et CHIMIE, E. N. CONTRÔLE QUALITE ET ETUDES HYDROCHIMIQUES DES EAUX DE FORAGE DANS LA COMMUNE SAROBARATRA, DISTRICT DE TSARATANANA.

[23] BALI, Karima, BENHEDHOUD, Faiza, et RIHIA, Djamel Encadreur. Etude hydrochimique des eaux souterraines de la région de Azzaba–W. Skikda–NE Algérien. 2019. Thèse de doctorat. Université de Jijel.

[24] BOULARES, SALMA, ZAOUI, SARRA, et al. ETUDE HYDROCHIMIQUE ET L'IMPACT DE LA SALINITE SUR LES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE NORD-EST DE BOUSSAADA-WILAYA DE M'SILA. 2021. Thèse de doctorat. university of M'sila.

[25] LEMKADEME, A. Ait, MICHELOT, J. L., BENKADDOUR, A., et al. Origine de la salinité des eaux superficielles et profondes de la région de Marrakech: approche hydrochimique et isotopique. Preface/Préface, 2012, p. 27.

[26] MEDIANI, Rachida, BEKRAOUI, Imaane, SLIMANI, Said, et al. Evaluation de la qualité des eaux des puits à usage agricole dans la région d'adrar. 2020. Thèse de doctorat. universite Ahmed Draia-ADRAR.

[27] MIHOUB, Redouane et CHABOUR, Nabil. Essais d'interprétation des anomalies hydrogéothermales de la région de Ghardaia, Algérie. Thèse de doctorat. جامعة الإخوة منتوري قسنطينة.

[28] BOULARES, SALMA, ZAOUI, SARRA, et al. ETUDE HYDROCHIMIQUE ET L'IMPACT DE LA SALINITE SUR LES EAUX SOUTERRAINES DE LA ZONE NORD-EST DE BOUSSAADA-WILAYA DE M'SILA. 2021. Thèse de doctorat. university of M'sila.

[29] BENGUEGA Mohammed Salah.(2020) : Contribution à l'étude Hydrochimique et Hydrogéologique des eaux souterraines à la région d'In-Salah Wilaya de Tamanrasset

Evaluation qualitative par l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE)(Méthode de Horton), Mémoire de Master Ressources Hydriques

## Références Bibliographiques

---

- [30] MANGOUA, Oi Mangoua Jules. Assessment of vulnerability to groundwater pollution in the department of Tiassalé (South of Côte d'Ivoire). Environmental and Water Sciences, public Health and Territorial Intelligence Journal, 2018, vol. 2, no 2, p. 46-54.
- [31] BOUCHEMAL, Fattoum et ACHOUR, Samia. Qualité physico-chimique et paramètres de pollution des eaux souterraines de la région de Biskra. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 2015, no 22, p. 197-212.
- [32] NOUAYTI, Nordine, KHATTACH, Driss, et HILALI, Mohamed. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines des nappes du Jurassique du haut bassin de Ziz (Haut Atlas central, Maroc)[Assessment of physico-chemical quality of groundwater of the Jurassic aquifers in high basin of Ziz (Central High Atlas, Morocco)]. Journal of Materials and Environmental Science, 2015, vol. 6, no 4, p. 1068-1081.
- [33] HADDAD, H. et GHOUALEM, H. CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DES EAUX DU BASSIN HYDROGRAPHIQUE COTIER ALGEROIS. LARHYSS Journal P-ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, 2014, no 18.
- [34] BELLAKEHAL, Asma et BOUDJELLAL, Khadîdja. LA QUALITE DE L'EAU DANS UNE ZONE ARIDE, CAS: EAU SOUTERRAINE DE LA NAPPE ALBIENNE DE LA REGION DE SEBSEB (WILAYA DE GHARDAIA). 2020. Thèse de doctorat. Université Ghardaia.
- [35] TALHAOUI, Abdelghani, EL HMAIDI, A., JADDI, H., et al. Calcul de L'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) pour l'évaluation de la qualité physico-chimique des eaux superficielles de L'Oued Moulouya (NE, Maroc). European Scientific Journal ESJ, 2020, vol. 16, no 2.
- [36] شوية, يحيى, رواحنة, et al. Contribution à l'étude de la qualité des eaux d'irrigation des nappes souterraines: phréatique et CT dans le périmètre agricole de DEBILA. 2019.
- [37] BAGRA, Ben, BOUSSADIA, Iman, et al. ETUDE HYDROCHIMIQUE ET EVALUATION DE LA SALINITE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE CHEMORA-W DE BATNA. 2020. Thèse de doctorat. Univ M'sila.
- [38] ABDELKADER, Merouche. Cours de qualité des eaux en Agriculture. 2019.



## Références Bibliographiques

---

- [39] SARAH, LAIDI et MERIÈM, SAADI. Etude géochimique de la qualité des eaux d'irrigation utilisées dans la ferme pilote LAABACHI El HAMADIA Bordj Bou Arreridj. 2021. Thèse de doctorat.
- [40] EL HOUDA, Boukhellou Nour et FAIROUZ, Moussaoui. Evaluation de la qualité des eaux des barrages de Boughzoul et Ladrat pour l'irrigation. 2019.
- [41] KRIMA Kaouther, 2019 Évaluation de la salinité des eaux souterraines utilisées en irrigation cas (la cuvette de Ouargla), Mémoire de MASTER en RESSOURCES HYDRIQUES Université KasdiMerbah Ouargla.
- [42] BRADAÏ, A., DOUAOUI, Abdelkader, et MARLET, Serge. Qualité des eaux souterraines utilisées en irrigation et risques de dégradation des sols dans la plaine du Bas-Cheliff, Algérie. In : Economies d'eau en systèmes irrigués au Maghreb. Cirad, 2008. p. 7 p.
- [43] ZAMICHE, S., HAMAIDI-CHERGUI, F., et DEMIAI, A. Pollution of the quaternary aquifer of Mitidja (Algeria) by nitrates: origins and impacts on the quality of water for human consumption. Journal of Fundamental and Applied Sciences, 2018, vol. 10, no 1, p. 113-131.
- [44] EWALID, Salam Hussein et ABED, Salwan Ali. Water quality index for Al-Gharraf river, southern Iraq. The Egyptian Journal of Aquatic Research, 2017, vol. 43, no 2, p. 117-122.
- [45] HAINGOTSEHENO, Randriamahefa, CHRYSOSTOME, Randriamboavonjy Jean, ROBERT, Rejo, et al. WATER QUALITY INDEX (WQI) CALCULATION FOR THE EVALUATION OF PHYSICO-CHEMICAL QUALITY OF RAINWATER COLLECTED IN RESERVOIRS FULL OF SAND (RFS).
- [46] BOUSLAH, Soraya, LAKHDAR, Deimili, et LARBI, Houichi. Water quality index assessment of Koudiat Medouar Reservoir, northeast Algeria using weighted arithmetic index method. Journal of water and land development, 2017.
- [47] MAHAMANE, A. Ayouba et GUEL, B. Caractérisations physico-chimiques des eaux souterraines de la localité de Yamtenga (Burkina Faso). International Journal of Biological and Chemical Sciences, 2015, vol. 9, no 1, p. 517-533.
- [48] MANSOUR Dalila, 2021. Evaluation de la qualité physico-chimique des eaux souterraines du bassin versant sahel par la méthode IQES, Mémoire de Master en RESSOURCES HYDRAULIQUES UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJE-BOUIRA.

## Références Bibliographiques

---

[49] MIMOUNI, Yassine, et al. Evaluations de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de surface de trois sous bassins de Tensift. 2020.

[50] JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 66

[51] DEBBA, Naouel, GUERMIT, Ahlem, et CHETTI, Fatima Zohra. Impact de l'enfouissement des déchets solides urbains sur l'environnement Centre d'enfouissement technique de Nezla (Touggourt). 2021.

### Sites web :

(utc.city) تقرت, الجزائر خريطة — الوقت الحالي، والمنطقة الزمنية، المطارات القريبة، سكان

A- <https://dz.utc.city/1565392>

### Climatologie de l'année 2021 à Touggourt - Infoclimat

B- <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2021/touggourt/details/60555.html>