

**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 Hydraulique et de Génie Civil**

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de  
Master, Filière: Académique**

**Spécialité : Forage hydraulique**

**Thème**

**Etude Hydrogéochimique d'une nappe d'eau dans  
la Région d'El Oued Souf**

**Présenté par :**

- ❖ **MIMMI Yacine**
- ❖ **KAOUDDJA Messaoud**

**Soumis au jury composé de :**

<b>Mr.MAHI Rachid</b>	<b>U.K.M Ouargla</b>	<b>Président</b>
<b>Mme.BELMAABDI Amel (MAA)</b>	<b>U.K.M Ouargla</b>	<b>Examineur</b>
<b>Mr. KAMARCHOU Abasse (MCA)</b>	<b>U.K.M Ouargla</b>	<b>Encadreur</b>
<b>Mr.SEGGAI Sofiane</b>	<b>U.K.M Ouargla</b>	<b>Co-Encadreur</b>

***Année Universitaire: 2020 / 2021***

## ملخص:

المياه الجوفية هي مصدر رئيسي لتلبية احتياجات الإنسان الزراعية والصناعية هذه المصادر جزء من حوض كبير من نظام المياه الجوفية في شمال الصحراء ويشمل ثالث دول الجزائر تونس ليبيا التي تغطي مساحة مليون كيلو متر مربع.

منطقة واد سوف تعد جزء من النظام المائي لمنطقة الصحراء الشمالية الشرقية و يتكون هذا الأخير من ثلاث خزانات مائية : الخزان المائي للمتداخل القاري و الخزان المائي للمركب النهائي و الخزان المائي الحر خلال الثلاثون سنة الأخيرة عانت منطقة الوادي من ظاهرة صعود مياه الطبقة المائية الحرة و كانت النتائج المترتبة على ذلك كارثية سواء على الإنسان أو المحيط، حيث أدت إلى تلوث مياه الطبقة المائية الحرة و تدهور البيئة المعيشية للسكان و التغيير التدريجي لشغل الأراضي في المنطقة.

في هذا العمل أجرينا دراسة هيدروجيولوجية و هيدروكيميائية تتعلق بالآبار المستغلة من أجل الحفاظ على معرفة جيدة بالموارد المائية لمنطقة الدراسة

## Résumé :

Les eaux souterraines sont des sources principales pour la satisfaction du besoin humain agricole et industriel. ces sources fait partie du grand bassin (SASS) Système Aquifère du Sahara Septentrional englobe trois pays Algérie Tunisie Lybie qui couvre une surface d'un million km carrée

La région de oued souf partie du réseau hydrographique de la région du désert du Nord-Est et fera partie de trois réservoirs d'eau : le réservoir d'eau du chevauchement continental ; le réservoir d'eau du complexe ; et le réservoir d'eau libre Au cours des 30 dernières années, la région d'El-Oued a connu une remontée des eaux de la nappe libre. Les conséquences de ce phénomène sont néfastes pour l'homme et l'environnement. On note, la pollution de la nappe libre, détérioration du cadre de vie des habitants et changement progressif de l'occupation des sols.

Dans ce travail 'est basée sur l'étude hydrochimique et hydrogéologique concernant les forages exploités à fin de maintenir une bonne connaissance sur les eaux souterraines de la région d'étude

## Mots clés:

CI= Continental Intercalaire, SASS = Système aquifère du Sahara Septentrional

IQE = Indice de Qualité de l'Eau WQI= Water Quality Index

## Abstract :

Groundwater is a major source for the satisfaction of human agricultural and industrial needs, these sources are part of the large basin (SASS) Aquifer System of the Northern Sahara encompasses three countries : Algeria, Tunisia and Libya which covers an area of one million square km.

The oued region is part of the river system of the North-East Desert Region and will be part of three water reservoirs: the Continental Overlay Water Reservoir; the Complex Water Reservoir; and the Open Water Reservoir Over the past 30 years, the El-Oued region has experienced a rise in the waters of the free water table. The consequences of this phenomenon are harmful to man and the environment. We note the pollution of the free water table, deterioration of the living environment of the inhabitants and progressive change of the land use.

In this work "is based on the hydrochemical and hydrogeological survey of boreholes operated to maintain a good knowledge of the groundwater in the study area .

## Key words :

CI= Continental Intercalaire ASNS = Aquifer System of the Northern Sahara

WQI= Water Quality Index IQE = Indice de Qualité de l'Eau

# Dédicace

Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance :

A toute ma famille qui ma toujours souhaité la réussite.

A tous mes cousins sans exception.

A tous mes amis de la promotion 2 ème année Master Forage Hydrauliques

2021/2020 sans exception.

A tous mes collègues administratif

de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques ANRH.

## Table des matières

Titre	Page
<b>Introduction général</b> .....	1
<b>Chapitre I : Description géographique et climatologique</b>	
I. Description géographique .....	2
I.1.Situation géographique .....	2
1. I.1. Structure géomorphologique et géologique .....	3
1.1.1.1. Tercha .....	3
1.1.1.2. Louss .....	3
1.1.1.3. Salsala ou Smida .....	3
1.1.1.4. Tefza .....	3
I.2.Contexte climatologique .....	5
I.2.1Introduction .....	5
I.2.2. Température .....	5
I.2.3. Précipitation.....	6
I.2.4. Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN .....	7
I.2.5. Humidité .....	8
I.2.6.L'insolation .....	9
I.2.7.le vent.....	10
I.2.8. Evaporation.....	11
Conclusion .....	12
<b>Chapitre II : Contexte géologique et hydrogéologique</b>	
II.1.Contexte Géologique .....	13
II.1.1.Introduction .....	13
II.1.2.Géologie de la région d'étude .....	14
II.1.3. Le Secondaire .....	16
II.1.3.1. Le Barrémien .....	16
II.1.3.2. L'Aptien .....	16
II.1.3.3. L'Albien .....	16
II.1.3.4. Le Vraconien .....	16
II.1.3.5. Le Cénomaniens.....	17

II.1.3.6. Le Turonien .....	17
II.1.3.7. Le Sénonien .....	17
II.1.3.7. a. Sénonien lagunaire .....	17
II.1.3.7. b . Sénonien carbonaté .....	17
II.1.4. Le Tertiaire .....	18
II.1.4.1. L'Eocène .....	18
II.1.4.2. Le Miopliocène .....	18
II.1.5. Quaternaire .....	19
II.2. Contexte Hydrogéologique .....	20
II.2.1. Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » .....	20
II.2.2. Définition des nappes aquifères du SASS .....	21
II.2.2.1. Nappe libre .....	21
II.2.2.2. Nappe du complexe terminal (CT).....	22
II.2.2.2.1. Nappe des Sables.....	23
II.2.2.2.2. Nappe des Calcaires .....	24
II.2.2.3. Nappe du Continental Intercalaire (CI) .....	24
II.2.3. Etude piézométrique de la nappe du Complexe Terminal (CT) .....	26
II.2.3.1. Carte piézométrique Mars 2010.....	27
II.2.3.2. Carte piézométrique Mars 2017 .....	28
conclusion .....	30

### **Chapitre III: Hydrochimie**

III.1.Introduction .....	31
III.2.1. L'échantillonnages .....	32
III.2.2. Analyses des eaux .....	33
III.3.1. Les paramètres physico-chimiques .....	33
III.3.1.1. Résidu Sec .....	33
III.3.1.2. Potentiel Hydrogène (PH) .....	34
III.3.1.3. La conductivité électrique .....	35
III.3.1.4. la minéralisation .....	36
III.3.1. 5. Dureté Total (TH) en °F .....	36
III.3.2.Les paramètres chimiques .....	37

III.3.2.1. Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	37
III.3.2.2. Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	38
III.3.2.3. Sodium ( $\text{Na}^+$ )	39
III.3.2.4. Potassium ( $\text{K}^+$ )	40
III.3.2.5. Chlorure ( $\text{Cl}^-$ )	41
III.3.2.6. Sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	42
III.3.2.7. Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ )	43
III.3.2.8. Nitrate ( $\text{NO}_3^-$ )	44
III.3.2.9. Les Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )	44
III.3.2.10. L'Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ )	45
III.3.2.11. Balance Ionique(BI)	45
III.4. Caractéristiques chimiques des eaux	47
III.4.1. Représentation graphique des faciès hydro-chimiques	47
A. Digramme de PIPER	48
B .Diagramme de Schöeller Berkaloff	50
C. Diagramme de STABLER	52
III.4.Etude statistique des données Hydrochimiques	55
III.4.1.Statistique descriptive	55
III.4.2. Origines du chimisme	56
III.4.3.Les relations chimiques entre les éléments	57
3a. Sodium-Chlorure ( $\text{Na-Cl}$ ):	57
3b.Sulfate-Calcium ( $\text{So}_4\text{-Ca}$ )	59
3c. Sulfate- Sodium( $\text{So}_4\text{- Na}$ )	61
3d. Sulfate- Magnésium ( $\text{So}_4\text{-Mg}$ )	63
3e.Potassium-Chlorure ( $\text{K-Cl}$ )	65
3f. Calcium – Dureté ( $\text{Ca-TH}$ )	67
III.5. Eau d'Irrigation	69
III.5.1. Diagramme Wilcox Log	70
III.5.2. Diagramme Wilcox	74
III.5.3. Diagramme de Riverside	77
Conclusion	78

## **Chapitre IV : Indice de Qualité de l'Eau**

IV.1. Introduction. ....	79
IV.2. Calcul de l'Indice de qualité de l'eau (IQE) .....	79
IV.3. Statistique descriptive .....	82
IV.4. Résultats du calcul de l'indice IQE et évaluation de la qualité des eaux .....	89
a. Application numérique sur le F4 .....	90
b. discussion .....	92
Conclusion .....	93
<b>CONCLUSION GENERALE.</b> .....	94
<b>BIBLIOGRAPHIE.</b> .....	95

## **LISTE DES FIGURES**

---

Figure 1 : Situation géographique de la zone d'étude dans la wilaya d'El-Oued.	2
Figure 2 : Carte topographique de la zone d'étude à l'El-Oued.	4
Figure 3 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (T°C) d'El-Oued (1989-2017).	6
Figure 4: Histogramme précipitations moyennes mensuelles (mm) d'El-Oued (1989-2017).	7
Figure 5 : Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN d'El-Oued (1989-2017).	8
Figure 6: Variation mensuelles de l'humidité relative moyenne d'El-Oued (1989-2017).	9
Figure 7: Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017).	10
Figure 8: Histogramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (m/s). à Oued Souf. (1989-2017).	11
Figure 9 : Variation mensuelle de l'Evaporation moyenne d'El-Oued (1989-2017).	11
Figure 10: Coupe géostructural et ransversale régionale du Sahara(WEC,2007).	13
Figure 11: Carte géologique de la zone d'étude (extrait de la carte de nordouest Afrique 1976).	14
Figure.12 : cartes géologiques de l'Algérie (OSS2003).	15
Figure13: Log de forage F3Albien, cité 19 Mars El oued (coupe d'après ANRH 2011).	19
Figure 14: Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale (UNESCO 1972).	20
Figure 15: Zone d'alimentation de la nappe libre et le sens d'écoulement De la nappe (Cote Marc, 2006).	21
Figure 16: Présentation des formations aquifères du complexe terminal à El Oued.	22
Figure 17: Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS 2003).	23
Figure 18: Carte d'extension des Systèmes Aquifères (CT et CI) en Algérie.	25
Figure 19: Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).	26

Figure 20: Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2010.....	27
Figure 21: Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2017.....	28
Figure 22: Carte de pH des Forages CI de la région d'El Oued Souf .....	34
Figure 23: Carte de la Conductivité électrique des Forages CI région d'El Oued Souf.....	35
Figure 24: Carte de Calcium (Ca++) .....	37
Figure 25: Carte de Magnésium (Mg2+).....	38
Figure 26: Carte de Sodium (Na+ ) .....	39
Figure 27 : Carte de Potassium (K+ ).....	40
Figure 28 : Carte de Chlorure (Cl- ).....	41
Figure 29: Carte de Sulfate (SO4 2- ).....	42
Figure 30: Carte de Bicarbonate (HCO3 - ).....	43
Figure 31: Carte de Nitrate (NO3 - ).....	44
Figure 32 : Diagramme de Piper de champ captant d'el Oued Souf .....	48
Figure 33: Diagramme de Piper de champ captant d'El Oued Souf (suit) .....	49
Figure 34 : Diagramme de Schöeller de champ captant d'El Oued Souf.....	50
Figure 35: Diagramme de Schöeller de champ captant d'El Oued Souf (suit) .....	51
Figure 36: Diagramme de Stabler des forages CI Région Oued Souf .....	53
Figure 37: Diagramme de Stabler des forages CI Région Oued Souf (suit) .....	54
Figure 38: Relation Na-Cl .....	57
Figure 39: Relation Na-Cl(suit) .....	58
Figure 40: Relation SO4-Ca .....	59
Figure 41: Relation SO4-Ca (suit) .....	60
Figure 42: Relation-Sulfate-Sodium (SO4-Na) .....	61
Figure 43: Relation-Sulfate-Sodium (SO4-Na) (suit) .....	62
Figure 44: Relation SO4-Mg .....	63

Figure 45: Relation SO <sub>4</sub> -Mg (suit) . . . . .	64
Figure 46: Relation K-Cl . . . . .	65
Figure 47: Relation K-Cl (suit) . . . . .	66
Figure 48: Relation Ca- TH . . . . .	67
Figure 49: Relation Ca- TH (suit) . . . . .	68
Figure 50: Diagramme Wilcox Log . . . . .	71
Figure 51: Diagramme Wilcox Log (suit) . . . . .	72
Figure 52: Diagramme de Wilcox . . . . .	75
Figure 53: Diagramme de Wilcox (suite) . . . . .	76
Figure 54: Diagramme de Riverside . . . . .	77
Figure 55: Diagramme de Riverside (suite) . . . . .	78
Figure 56: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre . . . . .	83
Figure 57: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre PH . . . . .	83
Figure 58: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Ca <sup>2+</sup> . . . . .	84
Figure 59: Diagramme en boîte à Moustaches de paramètre TH . . . . .	84
Figure 60: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Mg <sup>2+</sup> . . . . .	85
Figure 61 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Na <sup>2+</sup> . . . . .	85
Figure 62 : Diagramme en boîte à moustaches de paramètre K <sup>+</sup> . . . . .	86
Figure 63: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Cl <sup>-</sup> . . . . .	86
Figure 64: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre SO <sub>4</sub> . . . . .	87
Figure 65: Diagramme en boîte à moustaches de paramètre HCO <sub>3</sub> . . . . .	87
figure 66: Diagramme en boîte à moustaches de paramètres NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> . . . . .	88
figure 67: Histogramme de classement des forages CI Selon l'IQE . . . . .	92
figure 68: Histogramme de classement des forages CI Selon l'IQE . . . . .	92

## LISTE DES TABLEAUX.

Tableau 1: Caractéristiques géographiques de station climatique (OMN : 1989 et 2017)	05
Tableau 2: Les températures moyennes mensuelles d'El-Oued (1989-2017).	06
Tableau 3: précipitations moyennes mensuelles d'El-Oued (1989-2017).	07
Tableau 4: données des précipitations et des températures moyennes mensuelles (1989-2017) .	08
Tableau 5: Humidité relative moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017) .	08
Tableau 6: La durée d'insolation moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017).	09
Tableau 7: vitesses du vent moyennes mensuelles à Oued Souf. (1989-2017).	10
Tableau 8: Evaporation moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017).	11
Tableau 9 : Analyses physico-chimiques des forages CI d'El Oued Souf (ANRH).	32
Tableau 10 : Résultats d'analyses physico-chimiques en (méq/l) d'El Oued Souf .	46
Tableau 11 : Balance Ionique .	46
Tableau 12: Statistiques descriptives (Données quantitatives) .	55
Tableau 13: Coefficients de détermination (Pearson) .	56
Tableau 14: Classification des eaux d'irrigation de Wilcox (méthode Richards).	70
Tableau 15: Classification des forages CI selon l'irrigation .	73
Tableau 16: Pourcentage de Sodium Na <sup>+</sup> des forages CI.	74
Tableau 17 : Classification de la qualité des eaux souterraines selon l'IQES .	81
Tableau 18 : Analyses physico-chimiques des forages CI d'El Oued Souf (ANRH).	81
Tableau 19 : Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques d'El Oued Souf	82
Tableau 20 : Poids des paramètres physico-chimiques au norme Algérienne .	89
Tableau 21: Résultats de l'IQE de forage F4 .	90
Tableau 22: Valeurs de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) et classe de qualité des eaux souterraines de 24 forages CI de la région Oued Souf .	91
Tableau 23: Répartition des forages CI selon IQE .	91

### Liste des unités

**m** : mètre.

**km<sup>2</sup>** : Kilomètre carré

**mm** : millimètre

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

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

**l/s** : litre par seconde

**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

## GENERALE

## **Introduction générale**

L'eau est un élément principal pour la vie et une source importante pour le Développement durable les réserves d'eau souterraines dans les régions sahariennes restent toujours à la demande aux besoins en eau suivi d'une croissance démographique.

Depuis l'indépendance l'accroissement démographique , le développement agricole et industriel dans le Sahara ont entraîné une augmentation considérable de la demande en eau.

Mais la rareté des précipitations , nécessite le recours aux ressources en au souterraines.

Dans la région d'El-Oued Souf , les prélèvements des eaux de **Complexe Terminal (CT)** et de **Continental Intercalaire(CI)** augmentent chaque année (1134Hm<sup>3</sup> en1999, 1566 Hm<sup>3</sup> en 2010 et 1722Hm<sup>3</sup> en 2012), ses quantités d'eaux prélevées sont rejetées directement dans la nappe superficielle sans aucun traitement.

L'objectif de cette mémoire c'est :

l'étude hydrochimique et hydrogéologique des eaux souterrains concernant les forages de champ captant CI destiné pour AEP,

La qualité physico-chimique de l'eau exploitée,

Origine des eaux de l'aquifère CI,

détermination de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) par la formule de Horton Water Quality Index (WQI).

Ce travail est divisé en quatre chapitres :

-le premier chapitre englobe sur les caractéristiques géographique et climatologique.

-le deuxième chapitre traite les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.

-le troisième chapitre évaluation de la qualité physico-chimique des eaux de champ

Captant de la région (résultats et discussions).

-le quatrième chapitre 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. Description géographique

### I.1. Situation géographique :

La wilaya d'El-Oued (Fig.1) est située au Sud Est algérien à 500 Km d'Alger, elle est limitée par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa au Nord, Djelfa au Nord-Ouest, Ouargla au Sud et Sud-ouest et la Tunisie à l'Est. Elle occupe une superficie de 44586 km<sup>2</sup>, avec une population de 750 840 habitants (estimation fin 2013) répartie à travers 30 communes regroupées dans 12 daïras.

La zone d'étude (Fig.2) fait partie de la wilaya El-Oued, étendue sur neuf communes (El-Oued, Kouinine, Ourmes, Trifaoui, Oued Al Alenda, Robbah, Nekhla, Oglia et Bayada) Elle occupe une superficie d'environ 500Km<sup>2</sup> et se situe entre les coordonnées UTM : X = 290000 E/315000 E, et Y = 3680000 N/3700000 N.

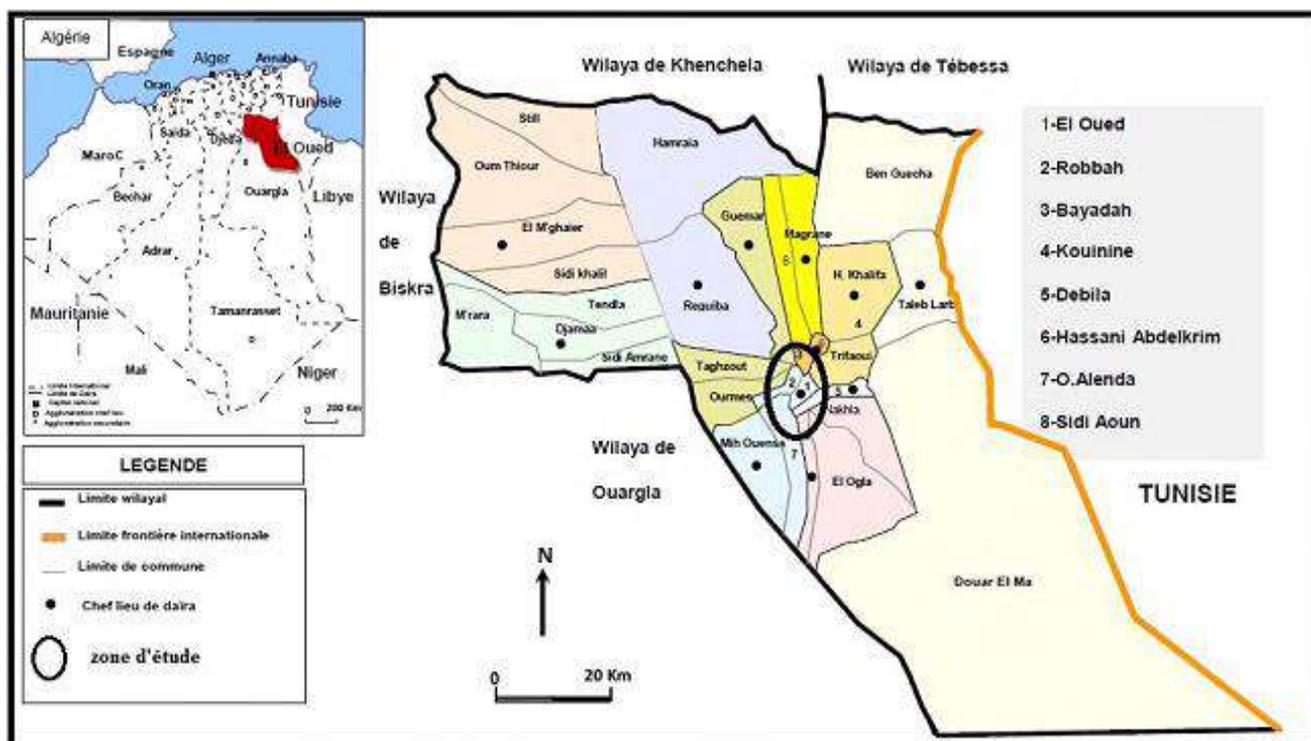


Figure1: Situation géographique de la zone d'étude dans la wilaya d'El-Oued.

### **1.I.1. Structure géomorphologique et géologique :**

Le sous-sol présente des contrastes frappants. C'est ainsi qu'au Sud, à 6 kilomètres d'El Oued et jusqu'à El Oglâ 24 Km plus loin, on remarque l'absence totale de

" Tefza " (pierre à plâtre calcaire), tandis que sur un autre axe allant d'El Oued à Ghamra (en passant par Tiksebt, Kouinine et Guemar) la " Tefza " y occupe tout le terrain. Ainsi deux bandes de terrains sédimentaires, de formations différentes, renfermant des roches dissemblables dont dépend de la qualité de la nappe aquifère, prolongent de part et d'autre sur les principaux

axes du Souf. Une coupe dans le sol, nous permet de distinguer :

#### **1.1.1.1. Tercha:**

Formé de fins cristaux qui lui donnent un aspect de grès ; se rencontre en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer.

#### **1.1.1.2. Louss:**

Louss est fait de cristaux de gypse en fer de lames imbriqués, il se rencontre sous forme de couches continues, très dures de réseaux mélangés au sable, de bancs isolés ou de colonnes qui semblent être constituées autour d'anciennes racines gypseuses.

#### **1.1.1.3. Salsala ou Smida:**

Se trouve en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer comme le Louss, mais c'est plus fins et plus serrés.

#### **1.1.1.4. Tefza:**

C'est un grès blanc assez dur, et constitue de la pierre à chauffer qui donnera le plâtre. (Tercha, Louss, Salsala, Smida et Tefza sont les appellations locales, utilisés pour les différentes couches géologiques).

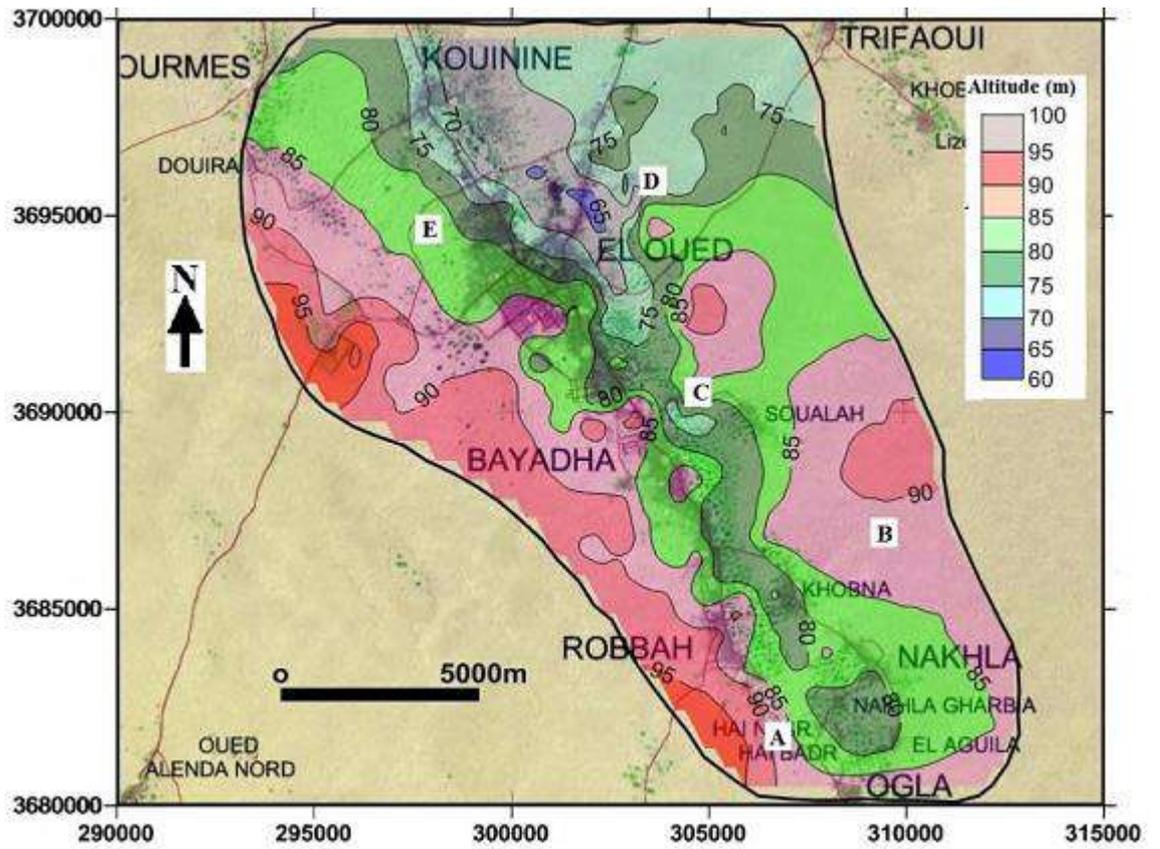


Figure.2. : Carte topographique de la zone d'étude à l'El-Oued

## **I.2. Contexte climatologique:**

### **I.2.1.Introduction:**

La connaissance des caractéristiques climatologiques est nécessaire pour l'étude hydrogéologique, il est indispensable pour l'établissement d'un bilan hydrique et pour l'évaluation de la recharge de réservoir souterrain (nappe phréatique) par infiltration.

L'Algérie, est partagée en trois zones climatiques distinctes, la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride aux hauts plateaux et enfin un climat aride, qui caractérise le grand Sahara. La wilaya d'El-Oued se trouve au Nord du Sahara Oriental .

Pour cette étude nous avons utilisé les données Les données climatologiques traitées relevées de l'Office National Météorologique d' El-Oued (ONM), et enregistrées à la station climatologique de l'aérodrome de Oued Souf sur la période (1989 et 2017).

**Tableau 1: Caractéristiques géographiques de station climatique (OMN : 1989 et 2017).**

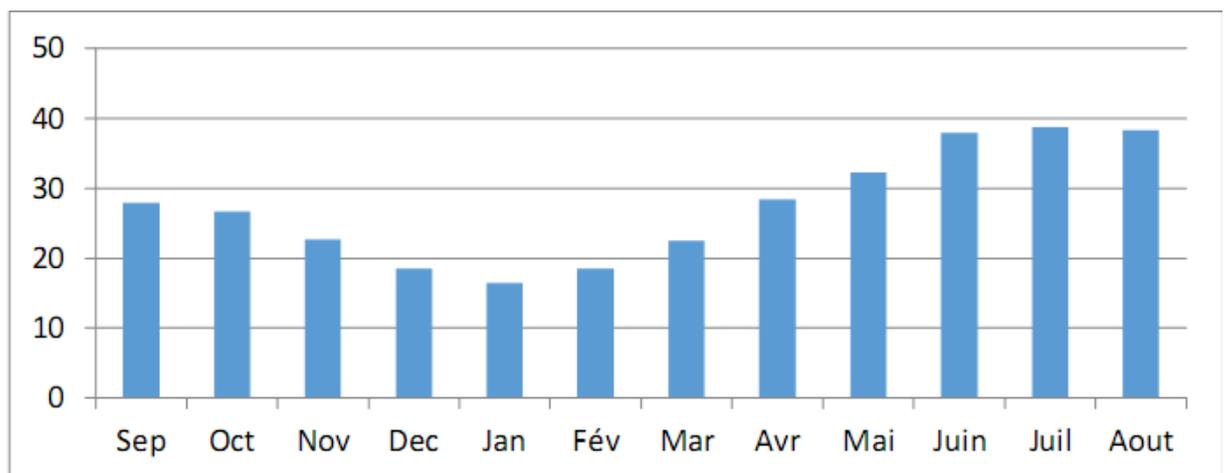
Station	X	Y	Z(m)	Période d'observation
Oued Souf	33,356°	6,863°	84	1989 et 2017

### I-2-2. Température :

Les températures dans cette région sont constamment variables. Les écarts entre la nuit et le jour dépassent parfois 21°C à l'ombre, les minimax de températures progressent régulièrement de 3 °C à 25 °C, alors que les maximas de 15°C à 40°C et c'est selon la durée de l'ensoleillement. Ces valeurs sont élevées entre le début du mois de Janvier et la fin du mois de Juillet. Ce tableau montre une variabilité de température dans le temps sur (1989-2017): On enregistre une température moyenne mensuelle de 27,05°C, elle est maximale pendant le mois de juillet est de l'ordre de 38,74 °C qui représente le mois chaud et minimale pendant le mois de janvier est de l'ordre 16,42°C.

**Tableau.2 : Les températures moyennes mensuelles d'El-Oued (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	T Moy
T (C°)	27.94	26.65	22.7	18.45	16.42	18.43	22.5	28.35	32.23	37.95	38.74	38.28	27.39



**Figure.3 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (T°C) d'El-Oued (1989-2017)**

### I.2.3. Précipitation:

les origines des précipitations dans les régions sahariennes sont différentes et c'est selon les saisons :

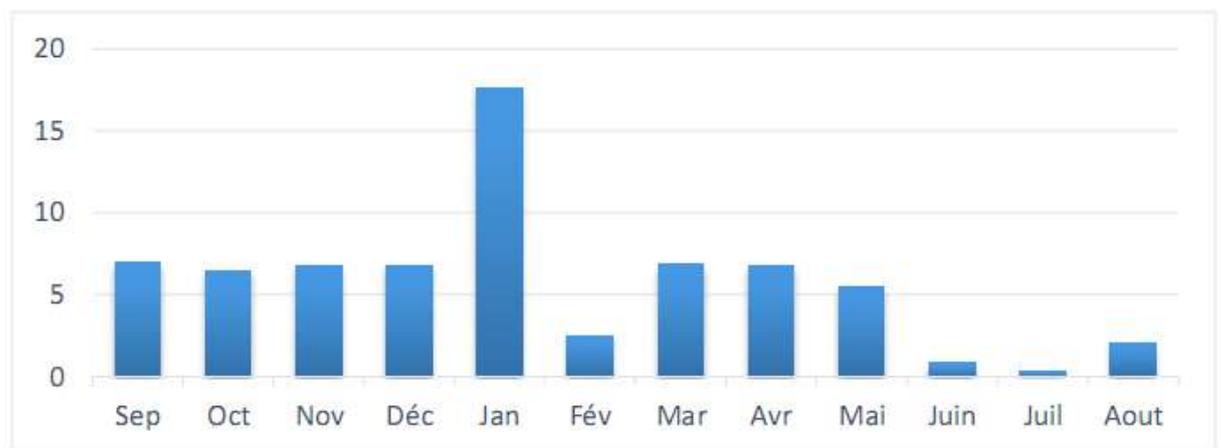
Durant l'été, elles sont dues aux dépressions de mousson, et en hiver, leur provenance est des eaux dépressions accompagnant la migration vers le sud des fronts polaires, alors que pendant la période intermédiaire, ces précipitations sont dues aux dépressions Soudano Sahariennes traversant notre Sahara du sud vers le Nord.

Oued Souf connaît une variation saisonnière minime en termes de fréquence des jours de précipitation (c'est-à-dire les jours connaissant une précipitation d'eau ou mesurée en eau supérieure à 1 millimètre). La fréquence varie de 0 % à 6 %, avec une valeur moyenne de 3%.

Le tableau ci-dessous et la figure donne les précipitations moyennes mensuelles observées durant (1989-2017). On remarque que la pluviométrie maximale est de l'ordre de 17,64 mm enregistré pendant le mois de Janvier, et le minimum est de l'ordre de 0,36 mm enregistré pendant le mois de juillet.

**Tableau.3 : précipitations moyennes mensuelles d'El-Oued (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P Moy (mm)	6.96	6.46	6.7	6.8	17.64	6.32	6.83	6.76	5.51	0.81	0.36	2.07



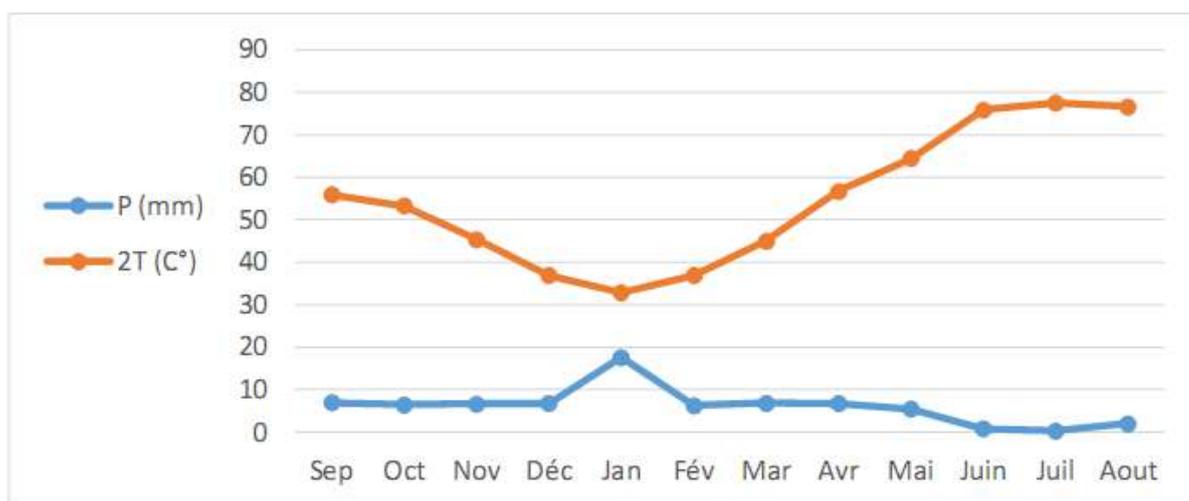
**Figure.4 : Histogramme précipitations moyennes mensuelles (mm) d'El-Oued (1989-2017)**

#### I.2.4. Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN:

Les valeurs des précipitations et des températures et enregistrées à la station climatologique de l'aérodrome de Oued Souf , permettent l'établissement du diagramme pluvio thermique (Fig.5). Suivant Gausсен et Bagnouls, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne (°C) du même mois. Le diagramme pluviothermique montre que la période sèche est étendue sur les douze mois de l'année dans la zone d'étude.

**Tableau.4 : données des précipitations et des températures moyennes mensuelles d'El-Oued (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
P (mm)	6.96	6.46	6.7	6.8	17.64	6.32	6.83	6.76	5.51	0.81	0.36	2.07
2T (C°)	55.88	53.3	45.4	36.9	32.84	36.86	45	56.7	64.46	75.9	77.48	76.56



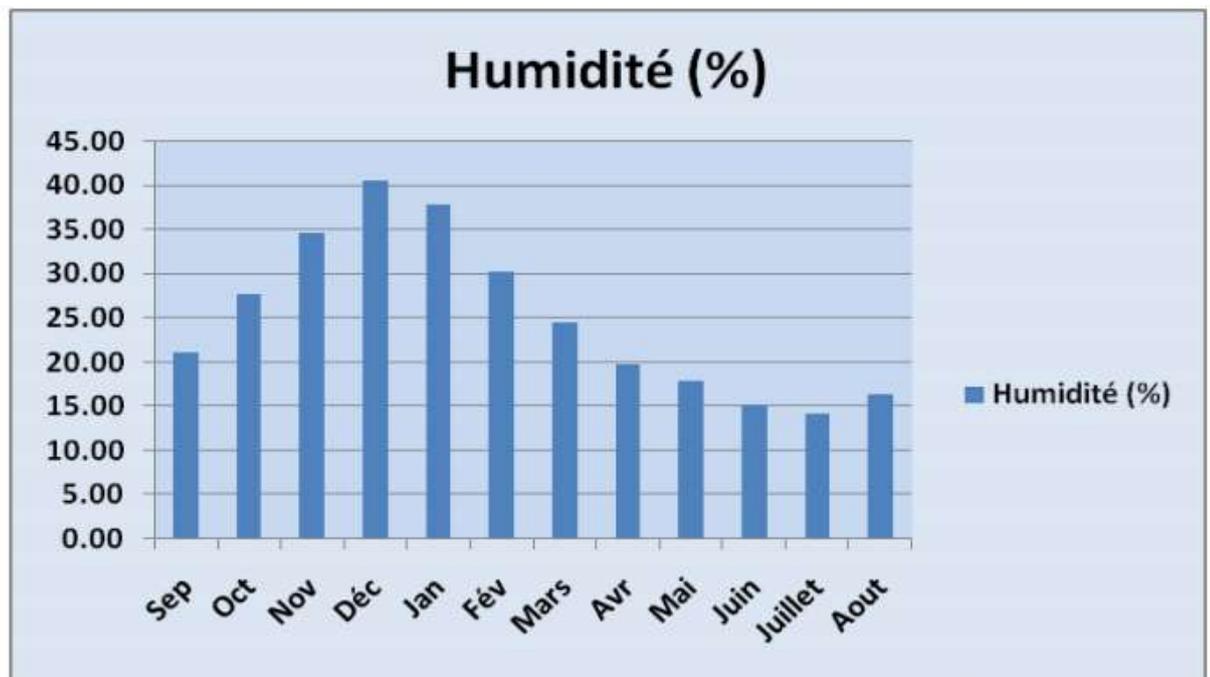
**Figure.5 : Diagramme pluvio-thermique de GAUSSEN d'El-Oued (1989-2017)**

### I.2.5. Humidité :

L'humidité représente le pourcentage de l'eau existant dans l'atmosphère, Le tableau suivant donne les valeurs d'humidité relative moyenne, observées durant la période de (1989-2017). L'histogramme (Fig.6) permet de distinguer les mois secs des mois relativement humides. On remarque que les mois humides ( $HR > 49\%$ ) sont Janvier, Février, Octobre, Novembre, Décembre et les mois secs caractérisant le reste de l'année.

**Tableau.5: Humidité relative moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
HR (%)	44.58	51.01	56.74	64.21	64.24	53.25	46.56	42.28	36.98	32.04	29.91	32.93



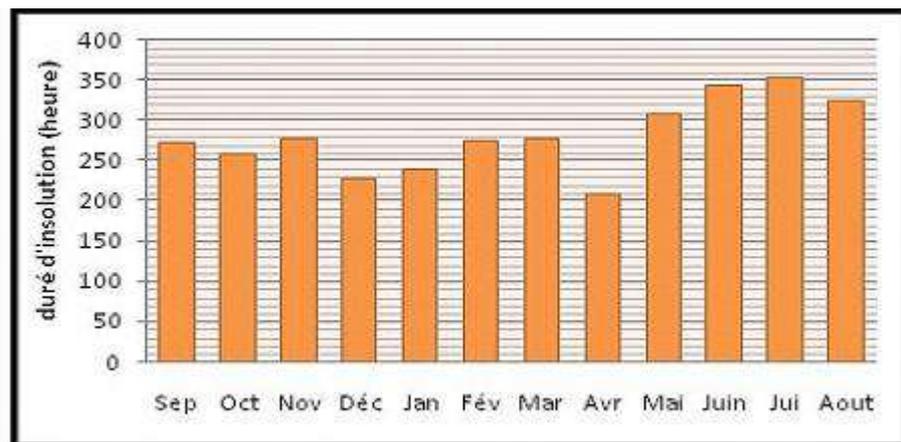
**Figure.6 : Variation mensuelles de l'humidité relative moyenne d'El-Oued (1989-2017)**

### I.2.6.L'insolation :

La région d'El-Oued reçoit une quantité de lumière solaire relativement très forte, le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée d'insolation de 353.29 heures et le minimum est enregistré au mois de Décembre avec une durée de 227.35 heures.

**Tableau 6: La durée d'insolation moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Jui	Aou
Insolation	271.	257.1	277.6	227.3	238.1	247.2	275.8	283.7	307.0	344.2	353.2	323.1



**Figure.7: Histogramme de la durée d'insolation moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017)**

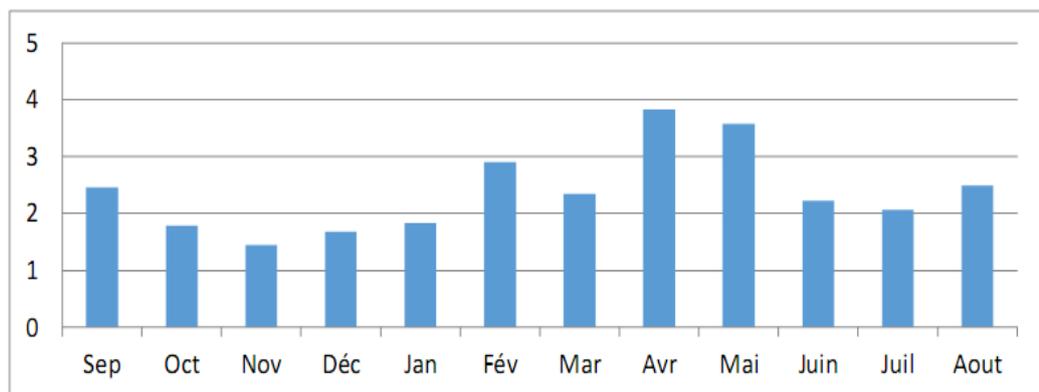
### I.2.7.le vent :

énéralement c'est au printemps ,que les vents sont les plus forts, ils sont chargés de sables éoliens donnant au ciel une teinte jaune et peuvent durer jusqu'à trois jours consécutifs,

La vitesse moyenne des vents enregistrée pour la période de (1989-2017) est reportée sur le Tableau.On peut remarquer que la vitesse du vent moyenne oscille entre 1,68 m/s enregistrée durant le mois de décembre et 3,83 m/s pour le mois d'avril, Les vitesses du vent moyennes annuelles est 2,39 m/s.

**Tableau.7 : vitesses du vent moyennes mensuelles à Oued Souf. (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent (m/s)	2.45	1.78	1.45	1.68	1.83	2.91	2.34	3.83	3.57	2.23	2.07	2.49



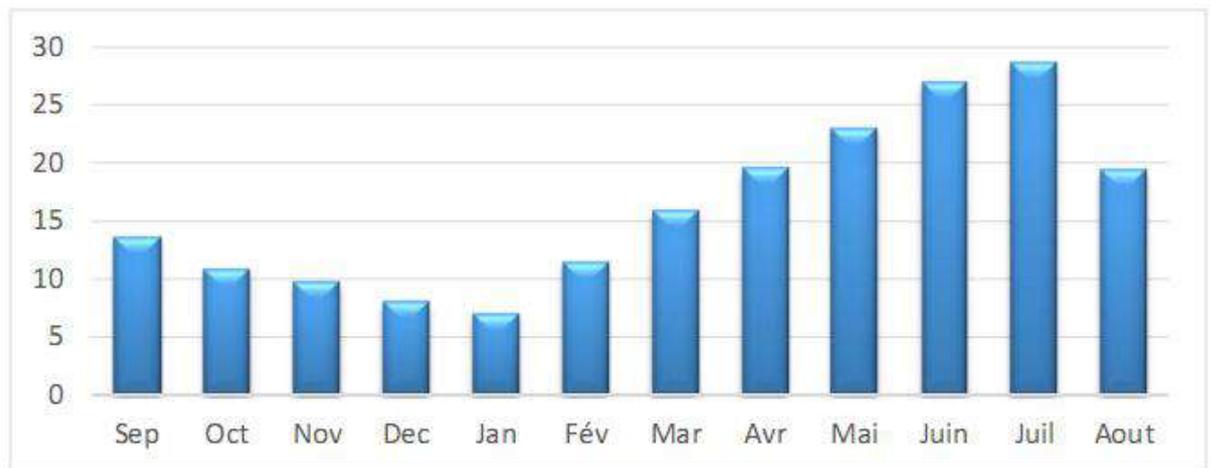
**Figure.8 : Histogramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (m/s). à Oued Souf. (1989-2017)**

### I.2.8. Evaporation :

L'évaporation la plus élevée se produit en Juin. Juillet et Août et la plus faible en Janvier. Avec une moyenne de 15.45mm par an , Le tableau suivant porte les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation période (1989-2017).

**Tableau.8: Evaporation moyenne mensuelle d'El-Oued (1989-2017)**

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Evap(mm)	13.56	10.87	9.76	8.03	6.97	11.43	15.82	19.47	23.03	26.87	28.56	19.43



**Figure.9 : Variation mensuelle de l'Evaporation moyenne d'El-Oued (1989-2017)**

## **Conclusion :**

La vallée de Souf située au Sud-Est algérien, occupe une superficie de 11738 km<sup>2</sup>, et englobe un nombre de population de 523 656 habitants, Le relief d'El-oued est caractérisé par trois principales formes : une région sableuse, une forme de plateau rocheux, et une zone de dépression.

D'après l'analyse des données climatiques pour les dernières années de la Période (1989 jusqu'à 2017) on conclure que cette région est caractérisée par un Le climat est de type saharien , caractérisé par un été chaud, sec et un hiver doux, la température moyenne interannuelle est de l'ordre de 27,4°C. Les précipitations moyennes interannuelles sont de l'ordre de 71.16 mm. Le bilan hydrique est déficitaire à cause des faibles précipitations et une forte évapotranspiration.

De point de vu géologique la zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional. Sur la carte seuls les terrains d'âge Quaternaire et Mio-Pliocène sont visibles, la succession des terrains et leur description lithologique ont été rendus possibles grâce à l'interprétation des logs de forage d'eau .

Nous concluons, donc, que le climat dans la région à un impact négatif sur le Comportement hydraulique des aquifères, où ne contribue pas à l'alimentation ou le Renouvellement de la nappe.

# Chapitre II

## Contexte géologique et hydrogéologique

## II.1.Contexte Géologique :

### II.1.1.Introduction

L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique: le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine et la plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée. Elle est constituée d'un socle précambrien recouvert de sédiments phanérozoïques transgressifs.

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780 000 Km<sup>2</sup>. Ce bassin, est une vaste zone d'épandage, constituée d'une importante dépression topographique, laquelle est sous tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacé forme un vaste synclinal ( Fig .10) dont le fond a un très grand rayon de courbure

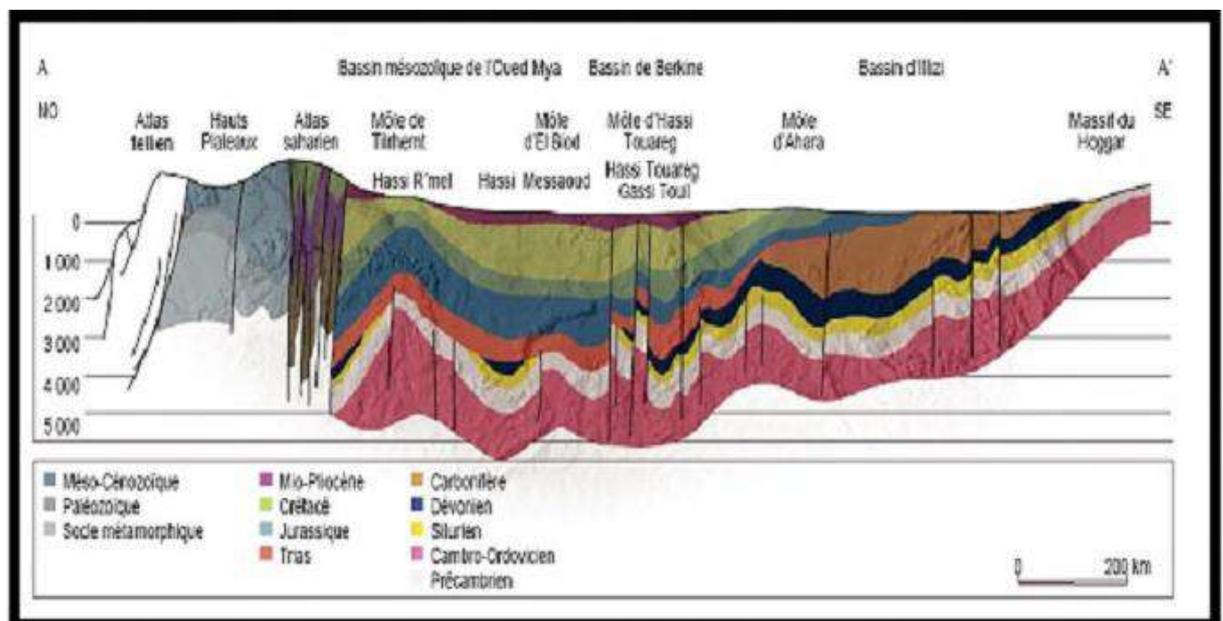


Figure.10 : Coupe géostructurale et ransversale régionale du Sahara(WEC,2007).

## II.1.2.Géologie de la région d'étude :

La région d'étude est située exactement dans la partie Nord-est de la plate forme saharienne. La carte géologique d'El-Oued montre que seuls les terrains d'âge Quaternaire et Mio-Pliocène sont visibles à la surface. Ils sont représentés par des dunes et cordons d'Erg. (Fig.11). La succession des terrains et leurs descriptions lithologiques ont été rendus possibles grâce à l'interprétation des logs de forage d'eau, réalisés dans la zone d'étude (Fig.13), on distingue de bas en haut :

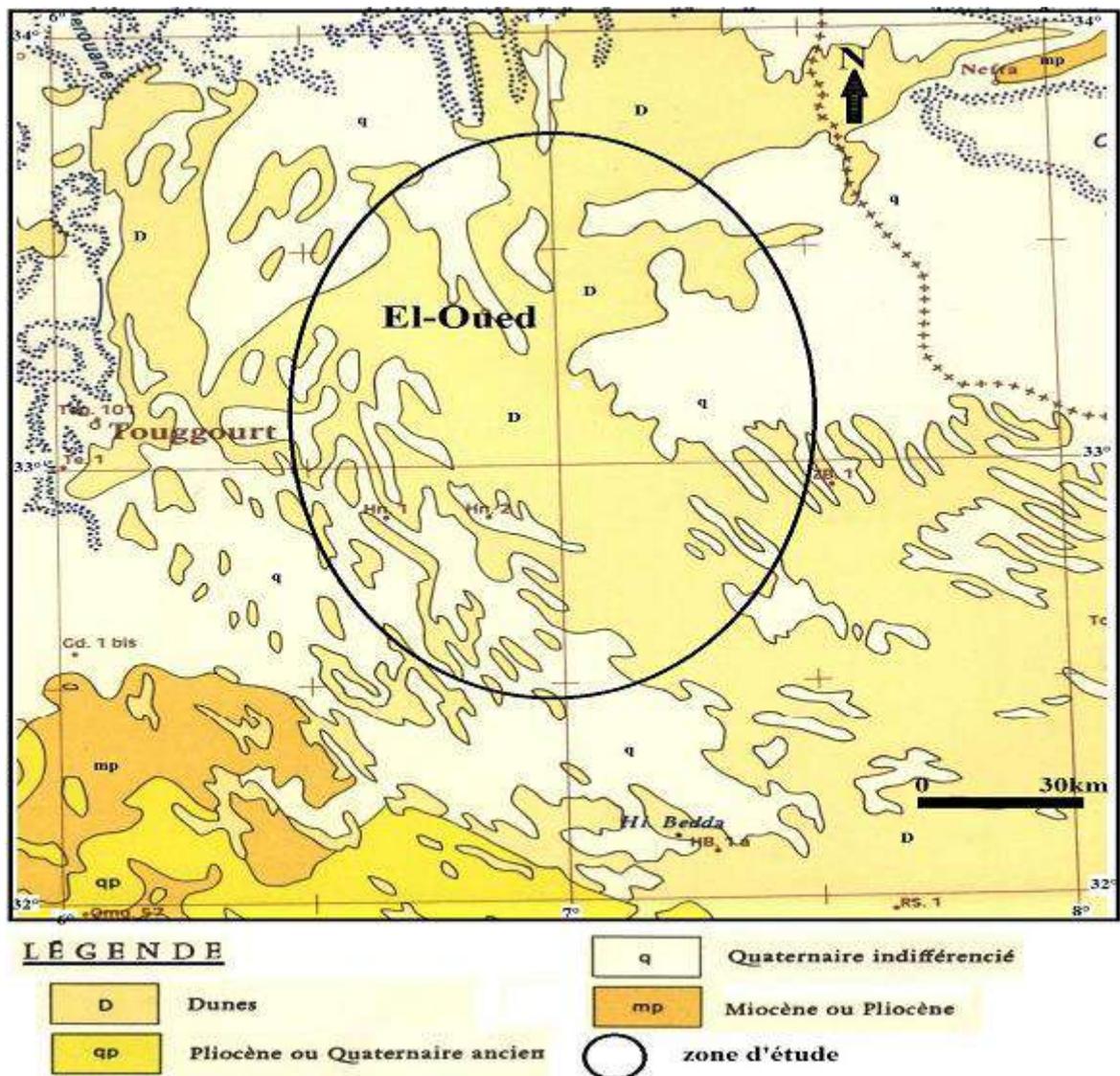
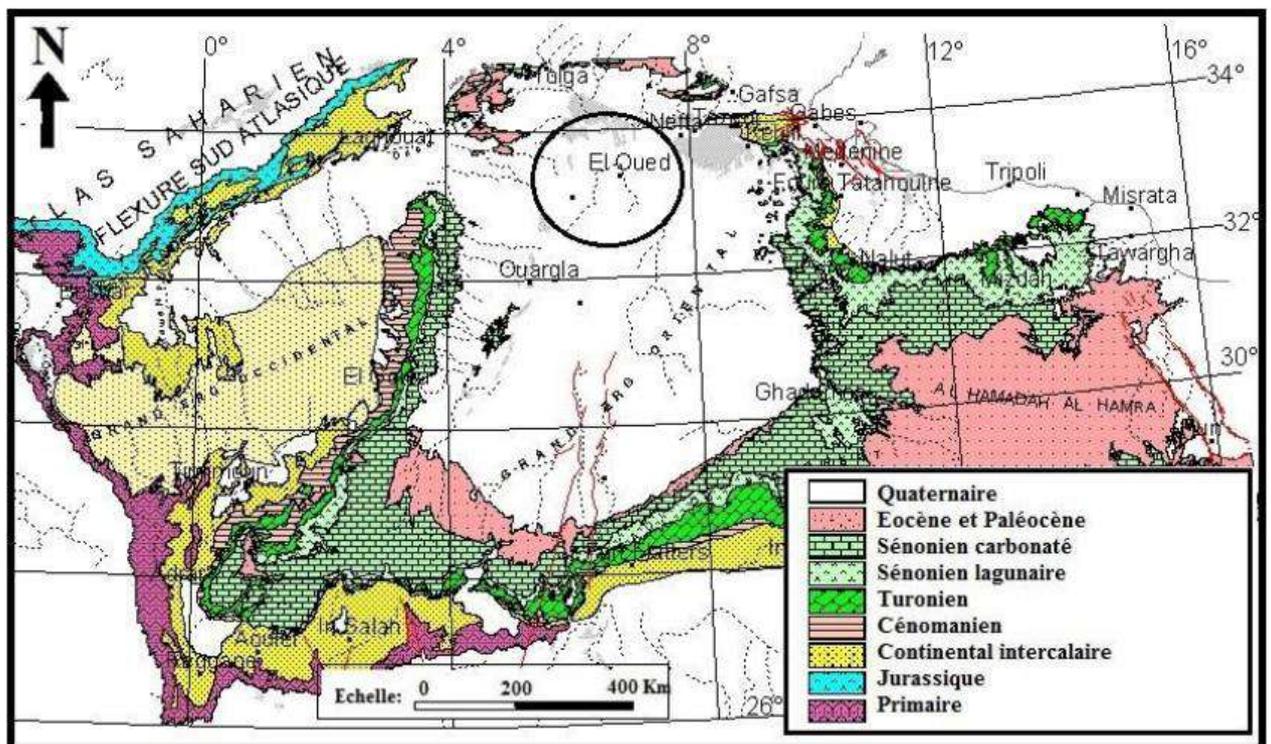


Figure.11:Carte géologique de la zone d'étude (extrait de la carte de nordouest Afrique 1976)

En Sahara algérien, les travaux de G. Busson (1963, 1967 et 1970) et de J. Fabre (1976) constituent les références de base pour une bonne compréhension de la géologie du Sahara algérien. Toutefois, un complément d'information est recherché dans les différentes cartes géologiques qu'ont couvrant cette région(Fig.12) (SASS 2002).

Notre région d'étude fait partie de la plate forme saharienne constituée d'un bouclier précambrien, n'émergeant des sédiments qu'ils surmontent que dans le Sahara Central (Massif du Hoggar) et le Sahara Occidental (Massif des Eglab) (UNESCO, 1972).À la base de l'édifice sédimentaire il y a des terrains paléozoïques marins contenant des niveaux aquifères salés et des gisements d'hydrocarbure au-dessus, et en discordance on rencontre des formations d'âge Secondaire et Tertiaire qui peut dépasser 3000 m d'épaisseur dans le centre du bassin (régions d'Ouargla, Touggourt, El Oued ainsi que sur la bordure des Aurès Ziban). Le Quaternaire représenté essentiellement par des sables dunaires, atteint parfois plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. L'existence de sable éoliens dans les dunes provient essentiellement de l'érosion du Hoggar.



**Figure.12 :cartes géologiques de l'Algérie (OSS2003).**

La litho-stratigraphie de la région d'El Oued est définie par l'étude des logs des forages d'eau et des sondages d'exploration pétroliers réalisés dans la région.

### **3.1.1. Le Secondaire**

#### **Le Barrémien:**

Cet étage est capté par tous les forages car continental Intercalaire réalisés dans cette région; il présente une lithologie, d'alternance de grés avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire, dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 m.

#### **L'Aptien:**

De même que le Barrémien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires.

D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région, L'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse guère 30 mètres.

#### **L'Albien :**

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, degrés de sables et surtout par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre Aptienne, alors que sa limite supérieure par l'apparition, des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 m ; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 m.

#### **Le Vraconien:**

C'est en fait, une zone de transition entre l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo dolomitiques. On montre aussi des argiles sableuses et de rares passages degrés à ciment calcaire. Le plus important dans cet étage, c'est qu'en raison de l'importance de ses niveaux argileux, il constitue une importante couverture de l'Albien.

L'épaisseur de cet étage, dans toute la zone d'étude varié entre 250 et 300 mètres.

## **Le Cénomaniens:**

Tous les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Cet étage joue le rôle d'un écran imperméable. Quant aux limites de cet étage, on peut dire que la limite inférieure est caractérisée par l'apparition d'évaporantes et de dolomies qui la distingue nettement, la limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporantes et de calcaires correspondants à la limite inférieure du Turonien.

## **Le Turonien:**

Cet étage représente la base du complexe terminale. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies micro cristallines compactes avec des intercalations de calcaire Turonien et parfois de marne. Les forages de la région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre ; elle dépasse parfois 650 mètres.

## **Le Sénonien :**

La plupart des études géologiques effectuées à travers le Sahara Algérien montrent que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents du point de vue faciès : L'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base, l'autre au Sénonien carbonaté (la partie supérieure).

### **a. Sénonien lagunaire :**

La limite de ce sous étage est bien distinguée. Le Sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporé avec des argiles ou ces derniers sont aisément différentiant, de ceux du Turoniens. Il est constitué également d'anhydrites, de calcaires dolomitiques d'argiles et surtout les bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine 150 mètres. La limite supérieure de cette formation coïncidée avec le toit de la dernière intercalation anhydride.

### **b. Sénonien carbonaté :**

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques avec des intercalations, marno-argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés et de dolomies vacuolaires. Son épaisseur dépasse parfois 300 mètres. Il faut mentionner par ailleurs l'existence d'une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et Eocène qui présentent tous deux des calcaires de même nature avec présence de nummulites.

### **3.1.2 Le Tertiaire**

#### **L'Eocène :**

Cet étage est formé par sables et des argiles, parfois on rencontre des gypses et des graviers. Dans cette région, l'étage de l'Eocène est carbonaté à la partie inférieure, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaires. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres

#### **Le Miopliocène :**

Ce dernier repose en discordance indifféremment sur le primaire d'une part et sur le crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément complexe terminale (C.T). La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Miopliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo argileux avec des intercalations gypseuses et dépassées degrés. Sur toute l'étendue du Sahara oriental, BEL et DEMARGNE séparent cet horizon en 4 niveaux :

##### **1-Niveau argileux :**

il présente une faible épaisseur, son existence n'affecte que la partie centrale de Sahara oriental.

##### **2-Niveau grés-sableux :**

c'est le plus puissant par rapport aux autres, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara. C'est en fait à ce niveau que se trouve le principal horizon aquifère - appelé aussi complexe terminal (CT).

##### **3-Niveau argilo-sableux :**

il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique ; ses limites demeurent toujours confondues

#### 4-Niveau sableux :

ce niveau constitué le deuxième horizon aquifère du complexe terminal. Donc du point de vue hydrogéologique les deux niveaux sableux (b et d) présentent un grand intérêt. Ils correspondent à la nappe des sables du complexe terminal.

#### 3.1.3. Quaternaire

Le quaternaire est formé par des dépôts sableux de type éolien donnant naissance à des dunes, qui forment à leur tour l'extrémité ouest du grand Erg oriental .Au nord ce sont les chotts qui disparaissent peu à peu sous les sables dunaires. C'est au niveau de cet horizon que l'on rencontre la nappe phréatique. Les colonnes stratigraphiques de certains forages montrent que l'épaisseur moyenne de cette nappe est de l'ordre de 60 mètres.

**Figure.13 :Log de forage F3Albien, cité 19 Mars El oued (coupe d'après ANRH 2011)**

Coupe de forage d'El-Qued F3	X=33.20.193 Y=6.51.323 Z=105	Description géologique	Etages
0		Alternance d'argile parfois sableuse et de sable hétérogène à intercalation de gypse	Mio-pliocène
50			
100			
150			
200			
250			
300	300	Alternance de calcaire fissuré et de calcaire massif	Eocène
350			
400			
450			
500			
550		Alternance de marne gris- verdâtre et de calcaire gris, compact et dur ; Alternance de dolomie beige compact d'hanydrite blanche et de calcaire argileux	Sénonien Carbonaté
600	640		
650		Anhydrite blanche, massive dure avec passage de dolomie gris claire et intercalation de calcaire	Sénonien Lagunaire
700	740		
750		Dolomie beige microcristalline compacte, dure, avec passage de calcaire peu dolomitique	Turonien
800	840		
850		Anhydrite massive et calcaire argileux à passages de marne	Cénomanién
900			
950		Anhydrite avec passage de calcaire, de dolomie et de marne	Cénomanién
1000			
1050		Anhydrite avec passage de calcaire, marne et dolomie avec intercalation d'argile	Cénomanién
1100	1110		
1150	1167	Calcaire gris clair argileux à passage de dolomie compact, parfois microcristalline	Vraconien
1200	1200		
1250	1270	Marne grise à passage d'argile gris-vert, intercalation de silex, à faible passage de grès calcaire	Albien
1300			
1350	1374	Dolomie, calcaire, marne	Aptien
1400	1498		
1450		Argile brune rouge à intercalations de grès	Barrémien
1500	1589		
1550		Grès, dolomie, calcaire et sable, intercalation de silex	Barrémien
1600	1613		
1650	1683		
1700	1720		
1750	1770		
1800	1800		
1850	1850		

## II.2. Contexte Hydrogéologique :

### II.2.1. Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » :

Le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) est partagé entre trois pays : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Il recouvre une étendue de plus d'un million de km<sup>2</sup>, dont 70 % se trouvent en Algérie, 6 % en Tunisie, et 24 % en Libye. Le SASS est la superposition de deux principales couches aquifères; la formation du Continental Intercalaire, CI, la plus profonde et celle du Complexe Terminal, CT (Fig.14).

Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois aquifères (UNESCO, 1972 ; OSS, 2003 ; Guendouz et Al, 2006; Saibi et Al, 2009; Khechana, 2014), un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)).

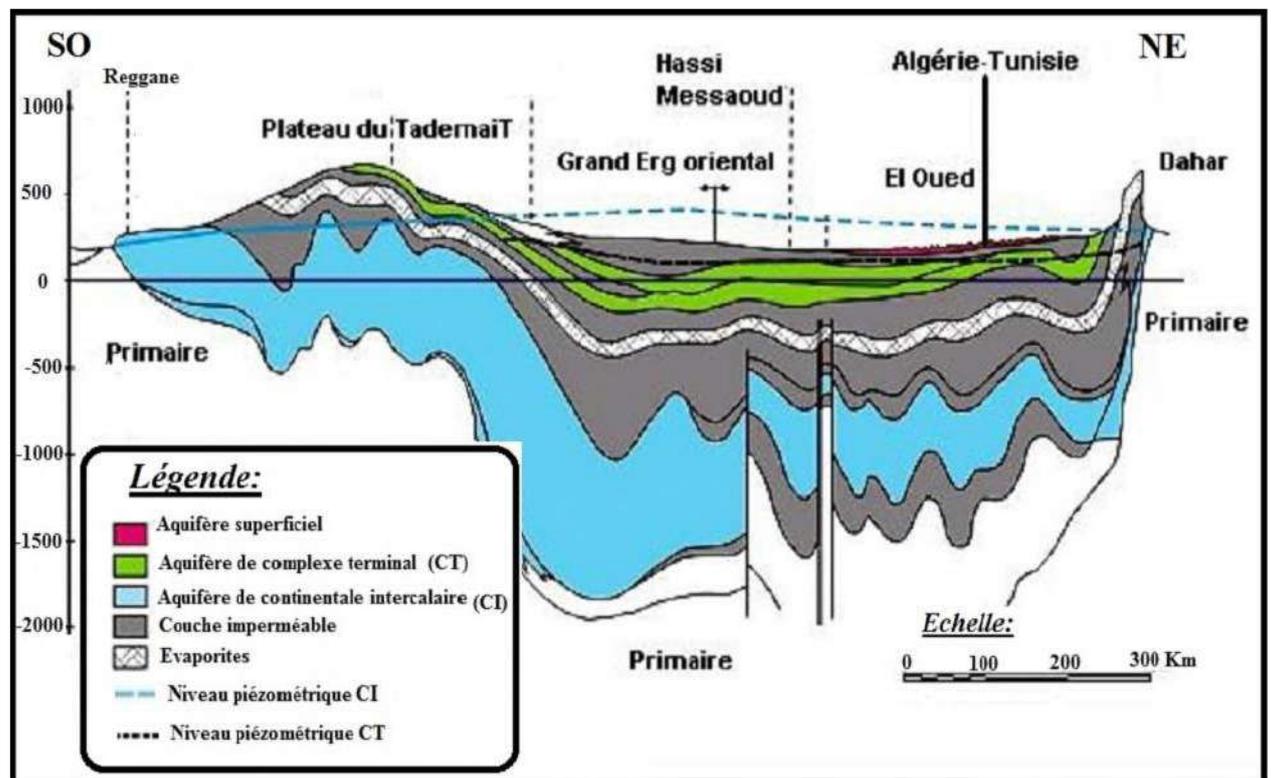


Figure.14 : Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale (UNESCO 1972).

## II.2.2. Définition des nappes aquifères du SASS :

### II.2.2.1. Nappe libre :

La nappe libre présente dans toute l'Oasis du Souf correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire, elle peut être rencontrée à des profondeurs variant de 1 et 20 mètres (BG2002).

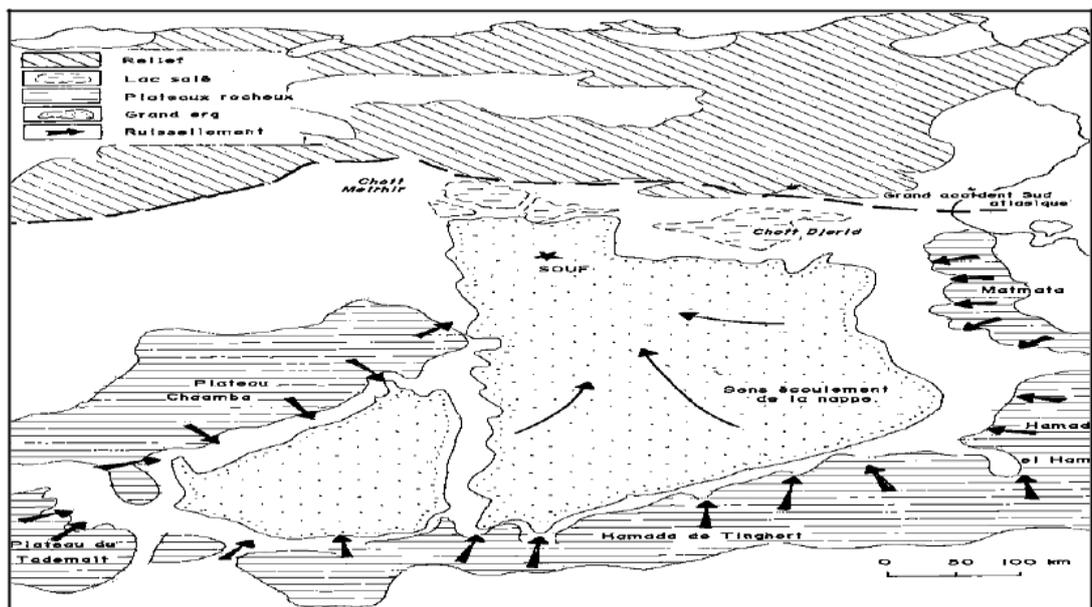
Vu son importance, cette nappe représentait la source principale d'irrigation d'importantes palmeraies, elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui sont en nombre de 16000 puits.

La nappe libre est constituée de formations détritiques d'âge quaternaire et mio-pliocène représentées par des sables, grès, sables argileux et des argiles sableuses avec un substratum constitué d'argiles. La profondeur du substratum dans la région de Souf est comprise entre 50 et 90 m (Senoussi et al, 1992 ; Meziani et al, 2011). La porosité efficace a été définie de la nappe libre, comprise entre 6 % et 23 %. Ces valeurs sont usuelles pour des sables fins (BG, 2003).

La circulation des eaux dans cette nappe est relativement lente sur toute la région d'El-Oued, particulièrement dans les zones caractérisées par l'existence de lentilles argileuses qui influent sur la perméabilité des sables. Excepté dans la région des Chotts la nappe libre est présente sur toute la région de Souf.

Les principales sources d'alimentation de cette nappe sont les pluies torrentielles, l'infiltration des eaux domestiques sous les zones urbaines, viennent s'ajouter depuis quelques années, les eaux d'irrigation provenant des nappes profondes (CT et CI).

**Figure.15 : Zone d'alimentation de la nappe libre et le sens d'écoulement De la nappe (Cote Marc, 2006).**



### II.2.2.2. Nappe du complexe terminal (CT).

Le terme de complexe terminal regroupe sous une même dénomination un ensemble de nappes aquifères qui sont situées dans des formations géologiques différentes allant du Sénonien supérieur (carbonaté) au Mio-Pliocène (détritique). D'après CORNET 1964, nous rappelons l'existence des 03 nappes dont les deux premières correspondent respectivement aux nappes de sables d'âge Miocène (Pontien) et Pliocène, alors que la dernière à l'Eocène inférieur.

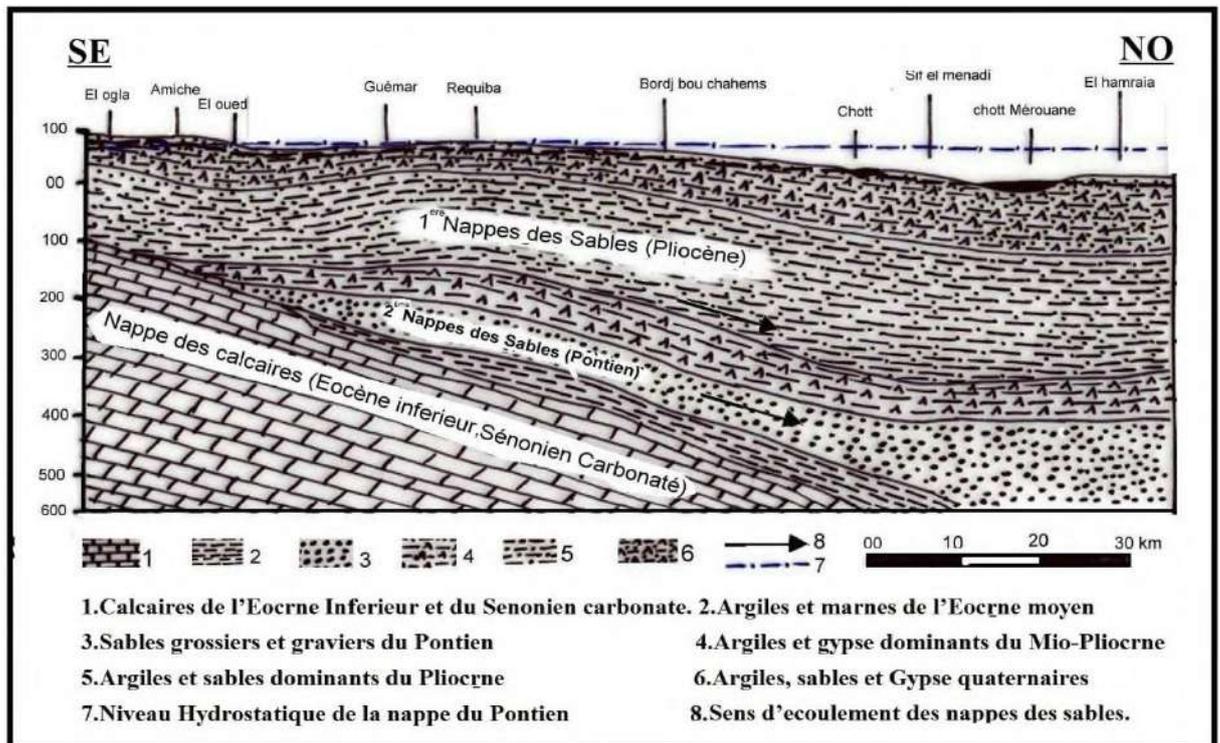
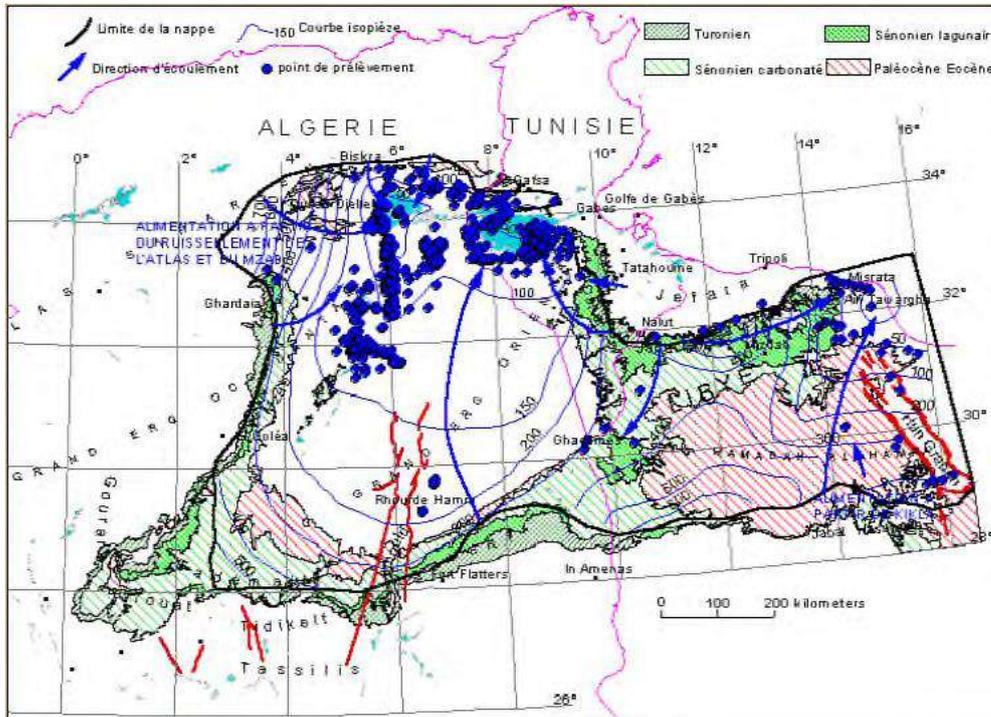


Figure.16 :Présentation des formations aquifères du complexe terminal à El Oued.

L'écoulement des eaux de la nappe du CT (Fig.17) s'oriente vers les chotts du Sahara Oriental ; Melghir et Merouane en Algerie, Rharsa et Djerid en Tunisie. Alors que dans le bassin occidental les eaux de la nappe se mélangent avec celles du Continental Intercalaire (OSS 2003 ; Guendouz et al 1992-1995).



**Figure.17 :Carte piézométrique de référence du Complexe Terminal (OSS 2003).**

### **II.2.2.2.1.Nappe des Sables.**

Au sein de ces niveaux sableux viennent s'engendrer deux nappes de type captif, dont la première correspond à la formation supérieure du complexe terminal appelée communément réservoir du "Sub-Souf". Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal, émerge progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud au Rustine. Dans la région d'étude elle se trouve en moyenne à 280 mètres de profondeur. Il faut mentionner également l'existence d'une deuxième nappe de sables d'âge pontien. Au dessus des bancs supérieurs de la nappe des calcaires et en contact avec les marnes de l'éocène inférieur et des graviers siliceux constituant donc une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du pontien du sud Tunisien, la profondeur de cette nappe varie entre 400 et 450 mètres, quant à l'épaisseur utile de cette nappe elle est de 50 mètres environ. L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-ouest vers le Nord-est, autrement dit vers la zone des Chotts (Melghir et Merouane). Dans les zones à fortes exploitations telles que la ville d'EL Oued, l'extraction des eaux se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Larbi et Douar EL Maa, la nappe est artésienne : c'est le cas de la nappe de Pontien.

### **II.2.2.2.2.Nappe des Calcaires.**

Le Complexe Terminal du Souf possède une lithographie plus complexe. Les forages captant cette nappe montrent l'existence de deux niveaux durs servants de repère pour la classification des eaux souterraines. Du Sud au Nord nous observons l'existence d'un premier niveau calcaire mieux individualisé, parfois il est purement calcaire, quelque fois il est formé par des calcaires gypseux et correspond ainsi au niveau inférieur. Le niveau supérieur, principalement représenté par des calcaires siliceux est considéré comme une zone de transition entre la nappe des calcaires et celle des sables. Dans l'ensemble ces deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses en passant par des argiles (rouges). Les forages profonds captant cette nappe, nous montrent que sa profondeur varie entre 350 et 700 mètres, mais il faut mentionner également que cette dernière n'est pratiquement pas exploitée dans la région du Souf.

### II.2.2.3. Nappe du Continental Intercalaire (CI).

Le terme du Continental Intercalaire, correspond ainsi aux formations continentales du Crétacé inférieur, qui ne peut être que la période continentale intercalée entre deux cycles sédimentaires; la régression marine suivie d'une transgression du Crétacé supérieur. Le Continental Intercalaire (C.I) occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'Albien. Le traitement manquant du réservoir aquifère du Continental Intercalaire est son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600 000 Km<sup>2</sup> et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Bien que l'intérêt majeur de ce système Aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eaux qui ont été stockées au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et qui peuvent maintenant être exploitées ; il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoire. Le réservoir est constitué par des sables et des grès d'âge crétacé inférieur. La nappe est confinée entre un toit, constitué par une épaisse couche d'argiles et de marnes d'âge Cénomaniens, alors que le mur est constitué des argiles d'âge néocomien. L'épaisseur totale du réservoir dépasse 250 m dans les plus grandes parties du Sahara Septentrional. Elle atteint 1000 m au Nord-Ouest. Le C.I affleure dans la partie Sud et Sud-ouest (Fig.17) par contre il plonge en profondeur vers le Nord-est, captive sous le M'Zab, le Tademaït, le Grand Sud tunisien et la Hamada AlHamra, et artésienne dans l'oued Rhigh-Souf-Djerid-Fedjej (Besbes M et al 2007).

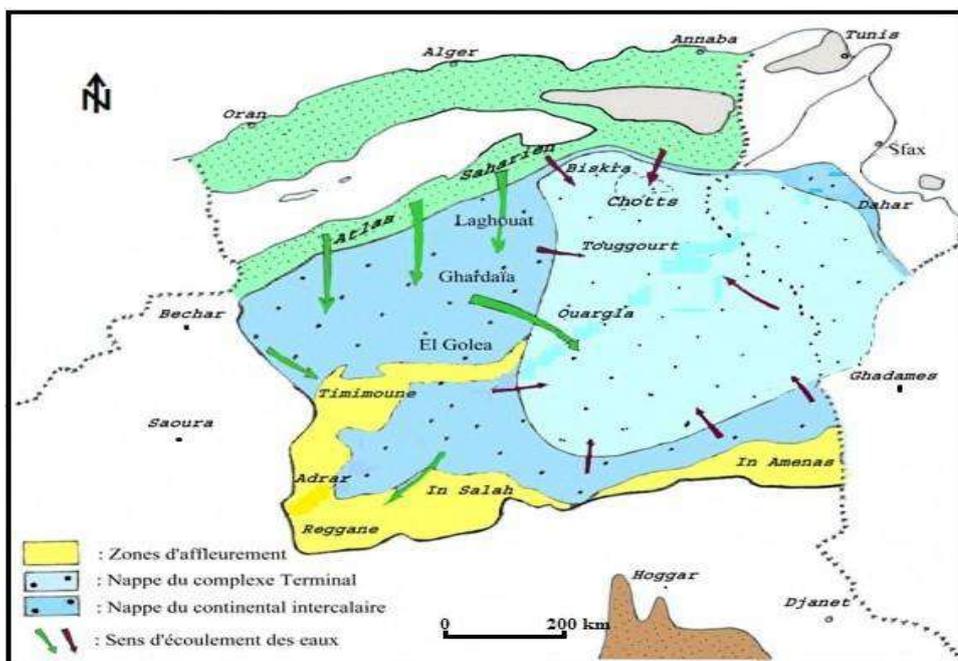
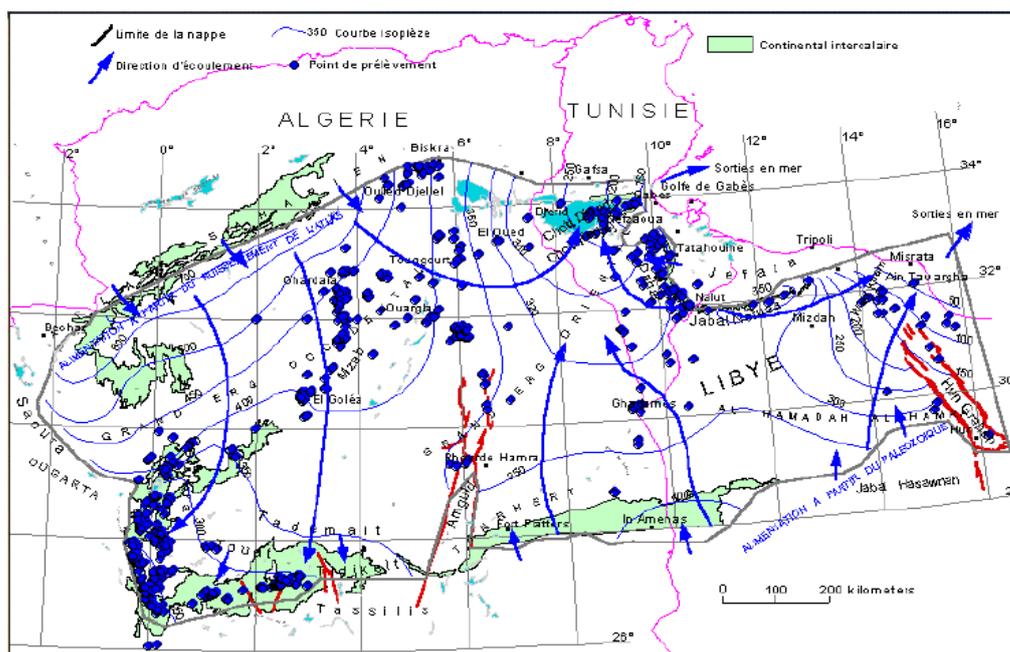


Figure.18 : Carte d'extension des Systèmes Aquifères (CT et CI) en Algérie

L'écoulement de la nappe du CI (Fig.19) se produit du piedmont de l'Atlas vers les zones des Foggaras au sud, du Tihert et du Djebel Hassaouna vers le golfe de Syrte et vers l'exutoire tunisien du golfe de Gabès. Les exutoires naturels du CI sont formés par les bordures occidentales et méridionales du Tademaït où se trouvent les foggaras du Gourara, du Touat et du Tidikelt et les remontées dans la zone du Chott Fedjaj.



**Figure.19 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).**

### **II.2.3. Etude piézométrique de la nappe du Complexe Terminal (CT).**

La mesure de niveau des eaux souterraines, est effectuée à l'aide d'une sonde électrique, dont le capteur est réactif à la conductivité de l'eau. Lorsque la sonde atteint le niveau de l'interface air/eau, un contact électrique est établi entre deux tiges métalliques, déclenchant un signal sonore et lumineux. D'après les mesures piézométriques faites en 2010 et 2017 par la Direction des ressources hydriques (DRH) d'EL-Oued on obtient les résultats suivants :

<b>Commune</b>	<b>NP (m)</b>	
	<b>Mars 2010</b>	<b>Mars 2017</b>
<b>El-Oued</b>	<b>45.85</b>	<b>33.6</b>
<b>MihOuensa</b>	<b>67.4</b>	<b>59.2</b>
<b>Robbah</b>	<b>67.55</b>	<b>59.55</b>
<b>Guemar</b>	<b>17.6</b>	<b>8.1</b>
<b>Reguiba</b>	<b>40.2</b>	<b>28.9</b>
<b>Hassani A. Karim</b>	<b>40.8</b>	<b>28.75</b>
<b>Debila</b>	<b>23.95</b>	<b>12.2</b>
<b>HassiKhalifa</b>	<b>22.9</b>	<b>8.9</b>
<b>Kouinine</b>	<b>36.8</b>	<b>21</b>

### II.2.3.1. Carte piézométrique Mars 2010 :

Les hauts niveaux piézométriques de la nappe est située à Robbah 67,55m et MihOuensa qui marqué une valeur de 67.4m, une zone basse située au Nord-Ouest à Hassi Khalifa et Debila aussi Guemar où le niveau piézométrique est compris entre 21 et 25m, on remarque aussi que le niveau piézométrique dans la commune d'El-Oued environ 42m. Le sens d'écoulement des eaux est orienté suivant une direction générale S-N. On constate que la surface piézométrique n'est pas régulière.

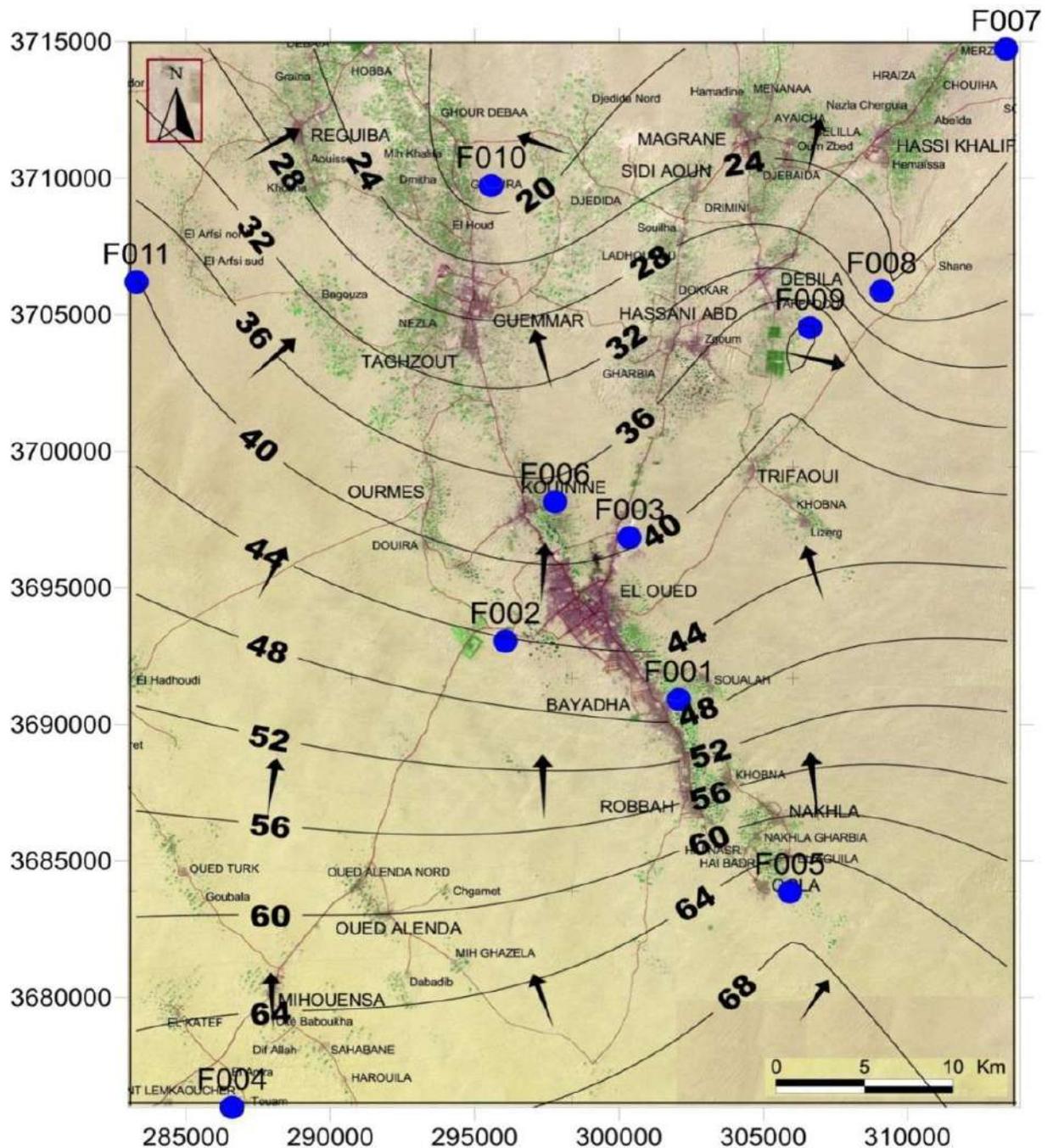


Figure.20. Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2010.

### **II.2.3.2. Carte piézométrique Mars 2017:**

La carte piézométrique dressée pendant la période des basses eaux (2017) a permis de déterminer le sens d'écoulement et les cotes piézométriques dans les différentes zones de Oued Souf. Les hauts niveaux piézométriques de la nappe est située à Robbah 59,55m et MihOuensaqui marqué une valeur de 59.2m, une zone basse située au Nord-Ouest à Hassi Khalifa, Debilaet Ghamra(Guemar) où le niveau piézométrique est compris entre 8 et 12m, on remarque aussi que le niveau piézométrique dans la commune d'El-Oued environ 28m. Le sens d'écoulement des eaux est orienté suivant une direction générale S-N.

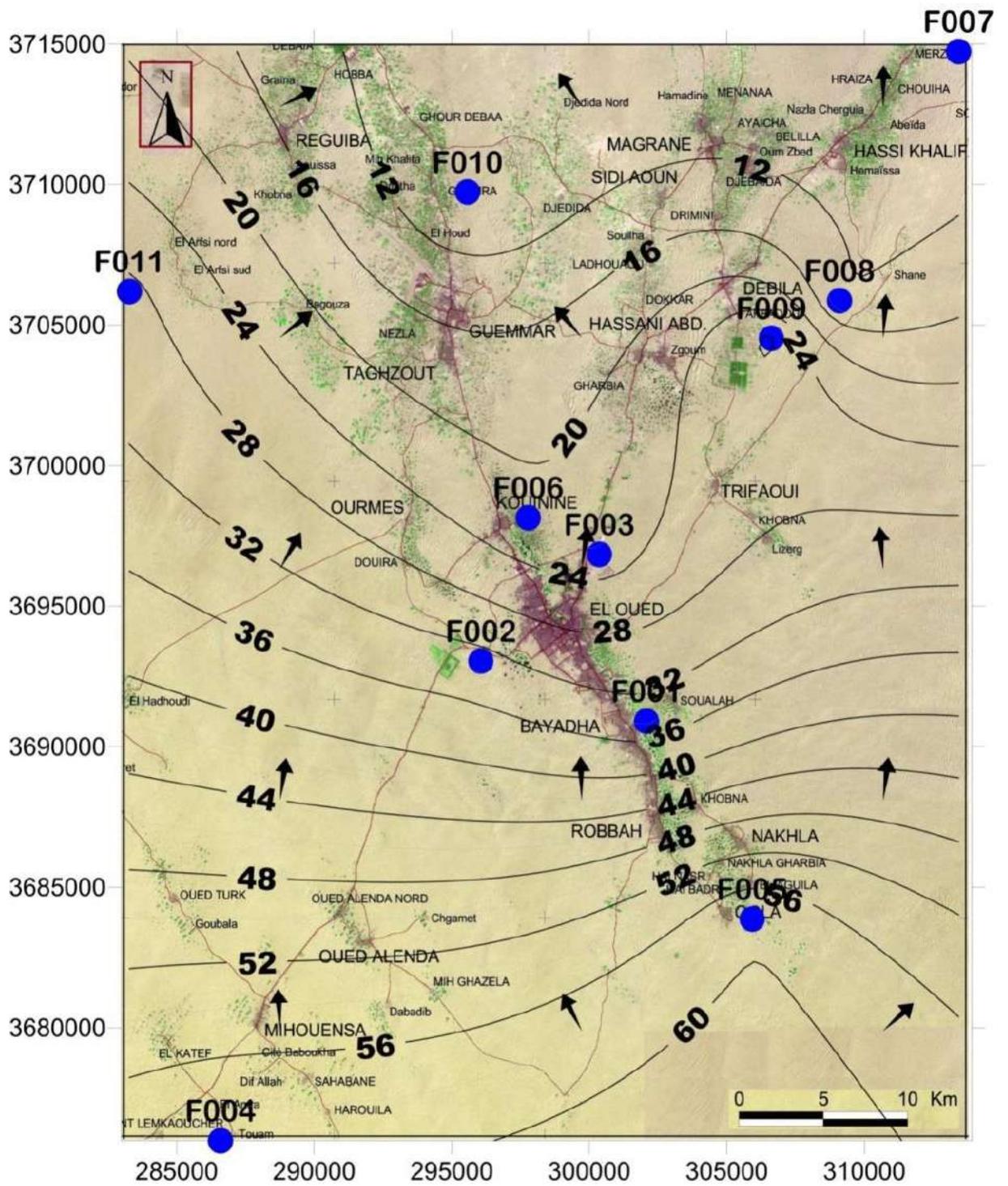


Figure.21. Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2017

#### **II.2.4. CONCLUSION.**

Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois nappes : nappe libre (phréatique), et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)). La nappe de complexe terminal englobe du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. En effet, il est possible d'y distinguer trois corps aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. D'une manière générale la profondeur moyenne de cette nappe du CT varie entre 200 et 600 mètres. Quant à l'épaisseur utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ, avec une réserve estimée à  $200 \times 10^9 \text{m}^3$ .

l'aquifère libre d'El Oued est constitué de sables fins, de grés à ciment gypseux friable, des sables moyens et grossiers, et des argiles sableuses. Le substratum est argileux, sa profondeur oscille entre 40m et 70m. Les limites latérales de l'aquifère libre, n'ont pas été atteintes étant donné que cette dernière s'étend au-delà de la zone d'étude.

examen des cartes piézométriques montrent que le sens d'écoulement de la nappe du complexe terminal est en général Sud vers le Nord. L'interprétation des essais de pompage par la méthode graphique nous permet de définir les différents paramètres hydrodynamiques.

Le débit soutiré oscille entre 10 l/s à 50 l/s, Le débit spécifique est d'ordre de  $4.06 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$  et la transmissivité moyenne de la nappe du CT est  $3.12 \times 10^{-3}$  et la porosité efficace est estimée à 5%.

# Chapitre III

# HYDROCHIMIE

### **III. 1 Introduction:**

La composition chimique d'une eau joue un rôle important dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou pour d'autres usages (irrigation, industrie...etc.).

La chimie des différentes sources en eau (eaux de surface, eaux souterraines) est souvent influencée par la dissolution des formations géologiques, des rejets industriels et l'activité agricole. En raison de l'utilisation multiple de ces eaux, cette étude a été menée afin de contrôler l'état actuel de la chimie des eaux souterraines de l'aquifère de Miopliocène de la vallée d'Oued Souf, son évolution dans le temps et dans l'espace.

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau que nous avons prélevés au niveau de 20 forages d'eau sélectionnés.

## III.2 Méthodes et stratégie de travail :

### III.2.1.L'échantillonnages :

Les échantillons ont été prélevés au niveau de laboratoire de l'ANRH d'El Oued Souf Sur 20 Forages de la nappe de Miopliocène de la région d'El Oued Souf voir le Tableau.9 de la année 2020.

N°	CE	Min	Ré.se	PH	TH	CA+2	MG+2	Na +	K+	NH4+	CL-	So4-	HCo3-	NO-3	NO-2
////	us/cm	mg/l	mg/l	//////	° F	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
F1	2680	1715	2360	7.73	155.01	412.82	126.39	290	35	0.14	560.16	401.80	162.26	0.57	0.000
F2	2730	1747	2500	7.38	150.01	400.80	121.53	300	36	0.13	489.25	412.31	152.50	0.24	0.000
F3	3880	2483	3640	7.36	180.02	392.78	199.30	410	27	0.04	928.87	510.72	122.00	14.74	0.000
F4	4130	2643	3800	7.68	191.01	484.96	170.14	530	27	0.02	914.69	638.72	136.64	13.75	0.000
F5	3900	2496	3560	7.64	168.01	392.78	170.14	530	28	0.02	801.24	622.12	129.32	19.48	0.000
F6	4000	2560	3720	7.45	183.33	402.78	201.30	430	28	0.14	948.87	650.17	134.20	21.88	0.000
F7	3950	2528	3720	7.32	168.01	392.78	170.14	420	27	0.02	932.51	529.47	132.98	18.70	0.000
F8	3930	2512	3710	7.39	153.01	448.90	99.65	530	28	0.01	815.42	678.29	131.76	24.09	0.000
F9	4200	2688	3920	7.73	193.98	486.96	176.12	540	28	0.04	910.32	669.94	147.62	1.05	0.000
F10	3940	2521	3700	7.36	134.01	324.65	128.82	450	27	0.05	730.33	807.71	122.00	17.77	0.000
F11	3850	2464	3420	7.86	176.68	402.78	185.14	540	28	0.04	822.24	630.69	132.22	17.91	0.000
F12	3850	2464	3420	7.86	176.68	402.78	185.14	540	28	0.04	822.24	639.69	132.22	0.21	0.000
F13	1117	715	600	7.67	44.00	92.18	51.04	140	7	0.04	230.89	124.41	52.46	0.45	0.000
F14	1150	736	620	7.25	46.67	97.45	54.32	150	7	0.01	256.16	186.17	57.34	26.48	0.000
F15	3910	2502	3220	7.29	192.02	416.83	213.88	530	28	0.08	843.78	687.12	139.08	24.09	0.000
F16	4110	2630	3480	7.31	180.01	505.01	131.25	400	28	0.04	914.69	711.57	139.08	13.78	0.000
F17	3960	2534	3300	7.51	148.00	492.98	60.76	420	29	0.00	772.88	699.80	139.08	26.93	0.000
F18	3950	2528	3720	7.32	192.02	416.83	213.88	420	27	0.02	900.51	651.14	139.08	17.77	0.000
F19	3960	2534	1600	7.35	161.01	480.96	99.65	530	29	0.02	631.06	589.84	139.08	17.37	0.000
F20	4980	3185	3520	7.72	203.02	585.17	138.55	520	27	0.07	1184.13	693.31	139.08	21.37	0.048

**Tableau 9: Analyses physico-chimiques des forages CI d'El Oued Souf (ANRH)**

### **III.3. Analyses des eaux : (voir le Tableau.9)**

Les analyses chimiques effectuées aux échantillons concernant :

- les paramètres physico-chimiques :

- a. Potentiel d'Hydrogène (PH)
- b. la Conductivité Électrique (CE)
- c. Résidu du Sec Titre Hydrométrique (TH)
- d. La Minéralisation
- e. Dureté Total (TH) en °F

- les paramètres chimiques : Les éléments majeurs

- a. Cations : ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  ,  $\text{K}^+$ )
- b. Anions : ( $\text{Cl}^-$  ,  $\text{SO}_4^{2-}$  ,  $\text{HCO}_3^-$  )
- c. Les éléments d'origine biologique ( $\text{NO}_3^-$  ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{NH}_4^+$ ).

### **III.3 Paramètres physico-chimiques :**

#### **III.3.1 Paramètres physiques :**

##### **III.3.1.1 Résidu Sec :**

Le résidu sec est la quantité des sels dissous de la matière organique contenue dans l'eau obtenue par dessiccation de l'eau à 180°C, les résultats montrent que les valeurs de résidu sec autour de la région d'El Oued Souf sont entre 600 et 3920 mg/l .

### III.3.1.2 Potentiel d'hydrogène (PH) :

La concentration des ions ( $H^+$ ) est exprimée par le logarithme décimal de l'inverse de cette concentration :  $pH = -\text{Log} [H^+]$ .

L'échelle du pH varie de 0 à 14 en fonction de la force ionique, si :

$[H^+] < [OH^-]$  donc  $pH > 7$  et l'eau est basique

$[H^+] > [OH^-]$  donc  $pH < 7$  et l'eau est acide

$[H^+] = [OH^-]$  donc  $pH = 7$  et l'eau est neutre

D'après les mesures qu'on a effectuées sur les échantillons d'eau prélevé, La teneur minimale de PH est enregistrée au forage 14 avec  $pH = 7.25$ , et la teneur maximale est enregistrée aux forages 11 et 12 avec  $pH = 7.86$ , ce qui reflète un caractère basique des eaux de la région.

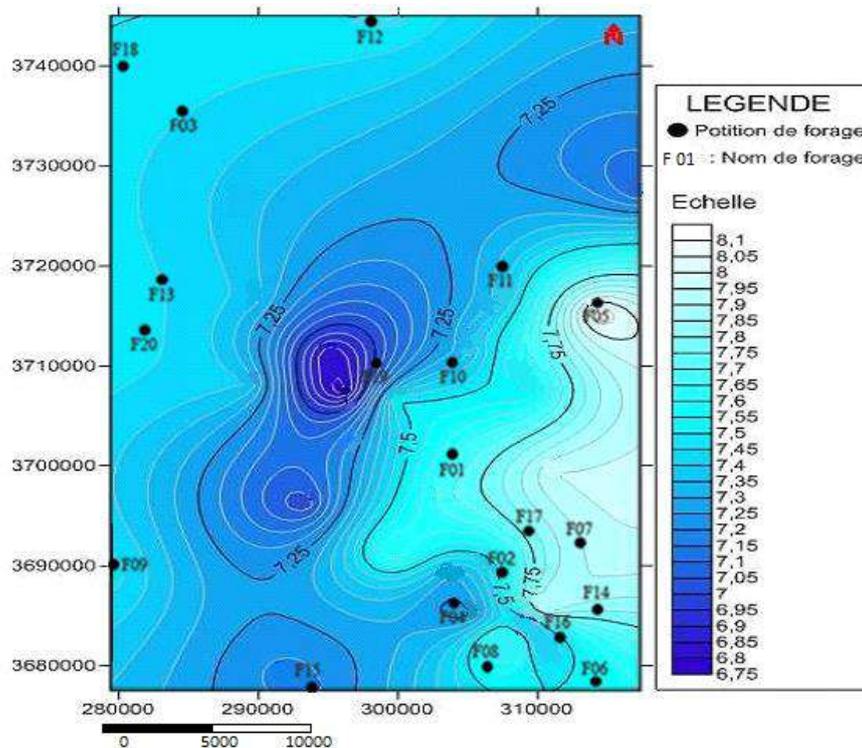


Figure .22. Carte de pH des Forages CI de la région d'El Oued Souf

### III.3.1.3 La conductivité électrique :

La conductivité électrique d'une eau caractérise sa faculté à laisser passer le courant électrique, elle augmente avec la concentration des ions en solution et la température. Elle correspond à la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface, séparées l'une de l'autre de 1 cm. Elle est exprimée en  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Généralement les valeurs sont ramenées à 25°C. La conductivité, ou son inverse la résistivité, permet donc une estimation de la minéralisation des eaux. On sait qu'une eau salée est très conductrice, par contre une eau pure est très résistante. Le tableau montre que la majorité des eaux de la nappe du complexe terminal de la vallée d'Oued-Souf ont une forte conductivité, donc un degré de minéralisation élevée.

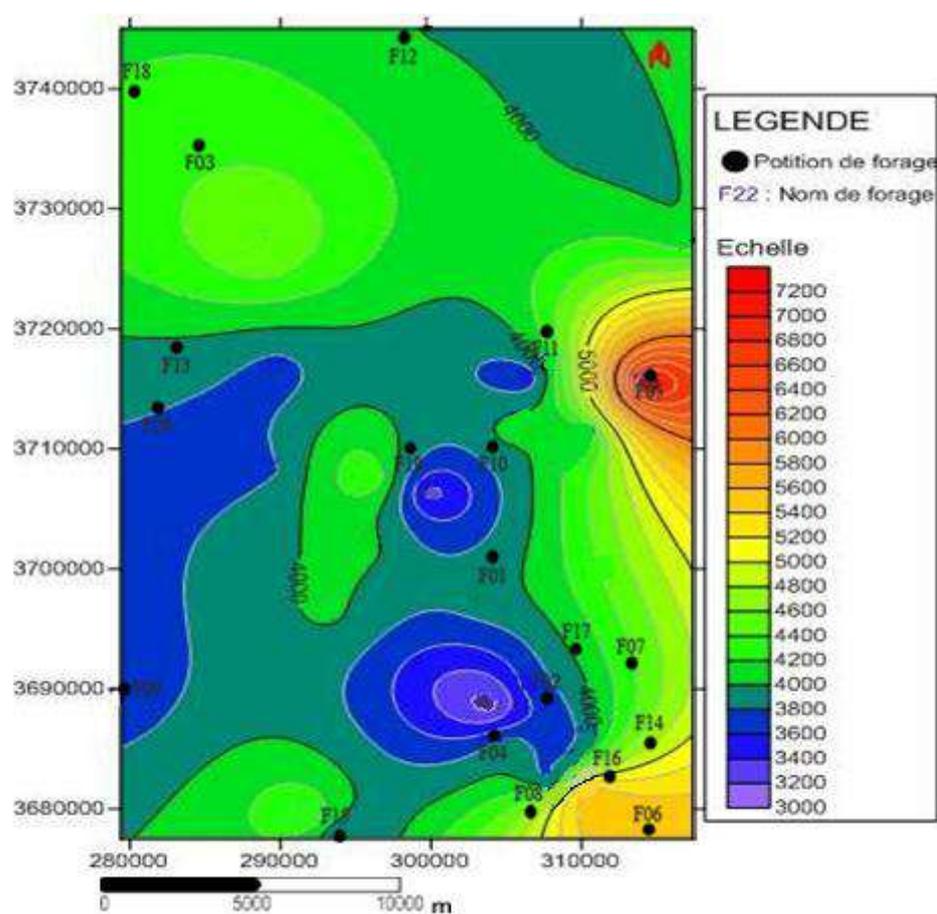


Figure.23. Carte de la Conductivité électrique des Forages CI région d'El Oued Souf

### III.3.1.4. 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. La relation entre la conductivité et la minéralisation exprimée au tableau suivant:

Conductivité(CE) ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C	Minéralisation
CE<450	Tres faible
450-750	Faible
750-1500	Moyen
1500-2300	Moyennement élevé
2300-3000	Elevé
CE>3000	Tres élevé

### III.3.1.5. Dureté Total (TH) en °F:

C'est la somme des teneurs en calcium et magnésium contenue dans l'eau exprimée en degré français (°F), la dureté des eaux des forages de la région d'étude se situe entre 44 et 203°F, ces teneurs indiquent que les eaux très dures sont supérieures à 44°F.

**TH** = Titre Hydrométrique Total

Il se calcule par la formule suivante :

$$\text{TH} = (r \text{ Ca}^{2+} + r \text{ Mg}^{2+}) \times 5 \text{ (}^\circ\text{F)}$$

$r \text{ Ca}^{2+}$  : quantité en réaction du calcium exprimée en méq/l

$r \text{ Mg}^{2+}$  : quantité en réaction du magnésium exprimée en méq/l.

(°F) : Degré Français

### III.3.2 Paramètres chimiques :

Lors de son transit, l'eau acquit une composition chimique liée à la nature lithologique du terrain traversé. L'analyse des eaux montre les principaux éléments chimiques suivants :

#### III.3.2.1. Calcium (Ca<sup>2+</sup>) :

Le calcium est l'un des principaux cations associés à la dureté de l'eau potable. C'est le cinquième élément le plus abondant dans la nature. La concentration du calcium dans l'eau dépend du temps de séjour de l'eau dans des formations géologiques riches en calcium. Le calcium peut provenir de deux origines naturelles différentes qui sont : La dissolution des formations carbonatées et la dissolution des formations gypsifères (Ca SO<sub>4</sub>, 2H<sub>2</sub>O).

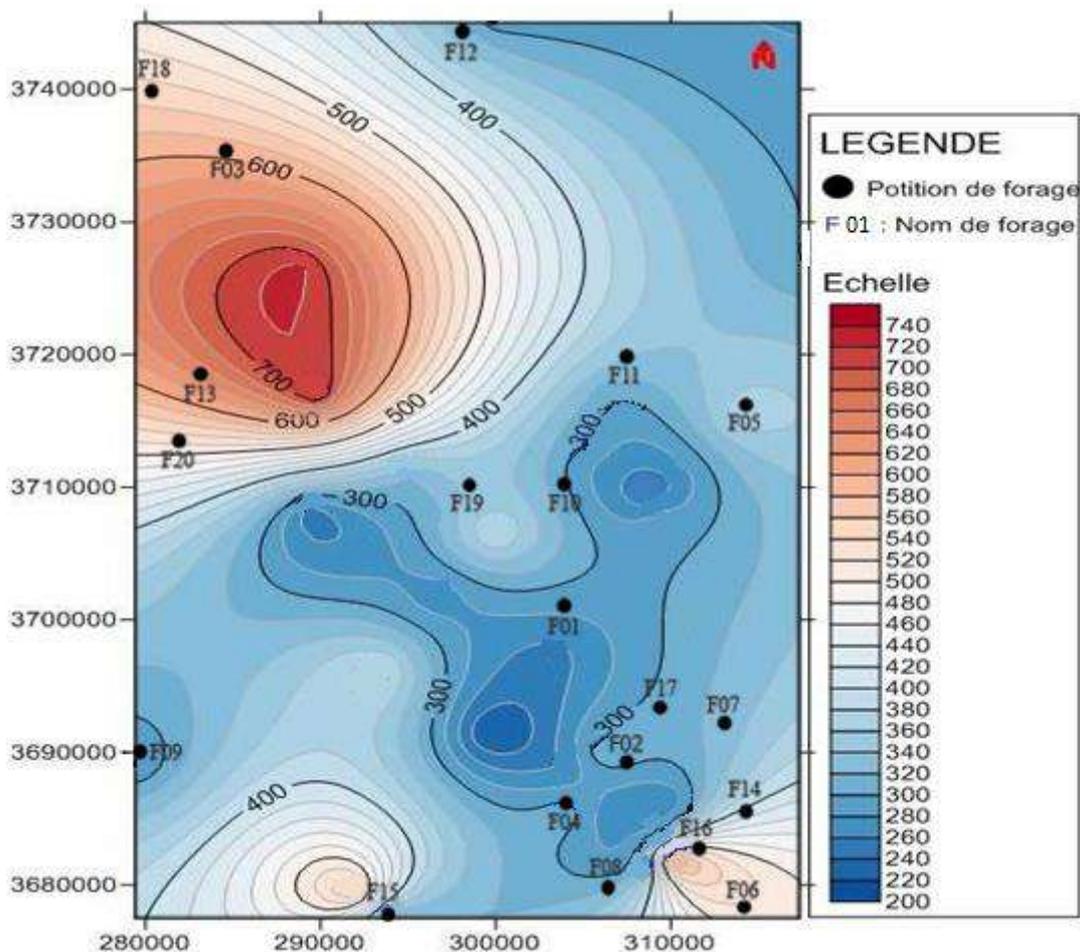


Figure.24. Carte de Calcium (Ca<sup>++</sup>)

### III.3.2.2. Magnésium (Mg<sup>2+</sup>):

Le magnésium se place au huitième rang parmi les éléments naturels les plus abondants. Il constitue 2,5 pour cent de la croûte terrestre et forme généralement des minéraux comme la giobertite (magnésite), la dolomie, l'olivine, la serpentine, le talc et l'amiante. Toutes les eaux naturelles en contiennent et il contribue largement à leur dureté. Les principales sources du magnésium contenu dans ces eaux sont les minéraux ferromagnésiens des roches ignées et les carbonates de magnésium des roches sédimentaires.

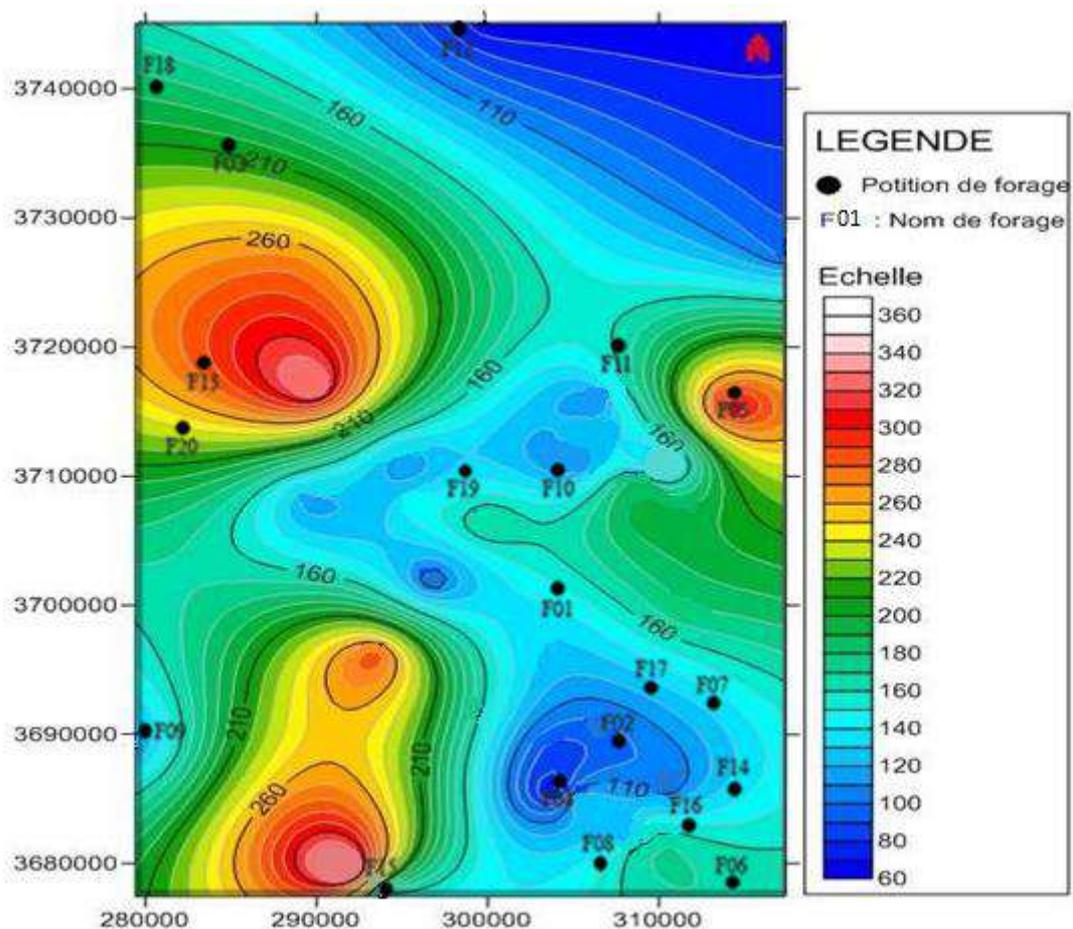


Figure.25. Carte de Magnésium (Mg<sup>2+</sup>)

### III.3.2.3.Sodium (Na<sup>+</sup>) :

Le sodium est un métal mou, blanc argenté et fortement réactif qui, dans la nature, ne se rencontre qu'à l'état combiné. Ce métal alcalin se présente fréquemment sous forme ionisée. On observe que, dans les milieux biologiques et même dans les solides tels que le chlorure de sodium, le métal garde l'état ionisé. À cause de la forte solubilité de ses minéraux, le sodium se retrouve partout dans le milieu aquatique. Ses concentrations varient considérablement selon les paramètres hydrologiques et géologiques régionaux et locaux, la saison et le mode d'utilisation du sel.

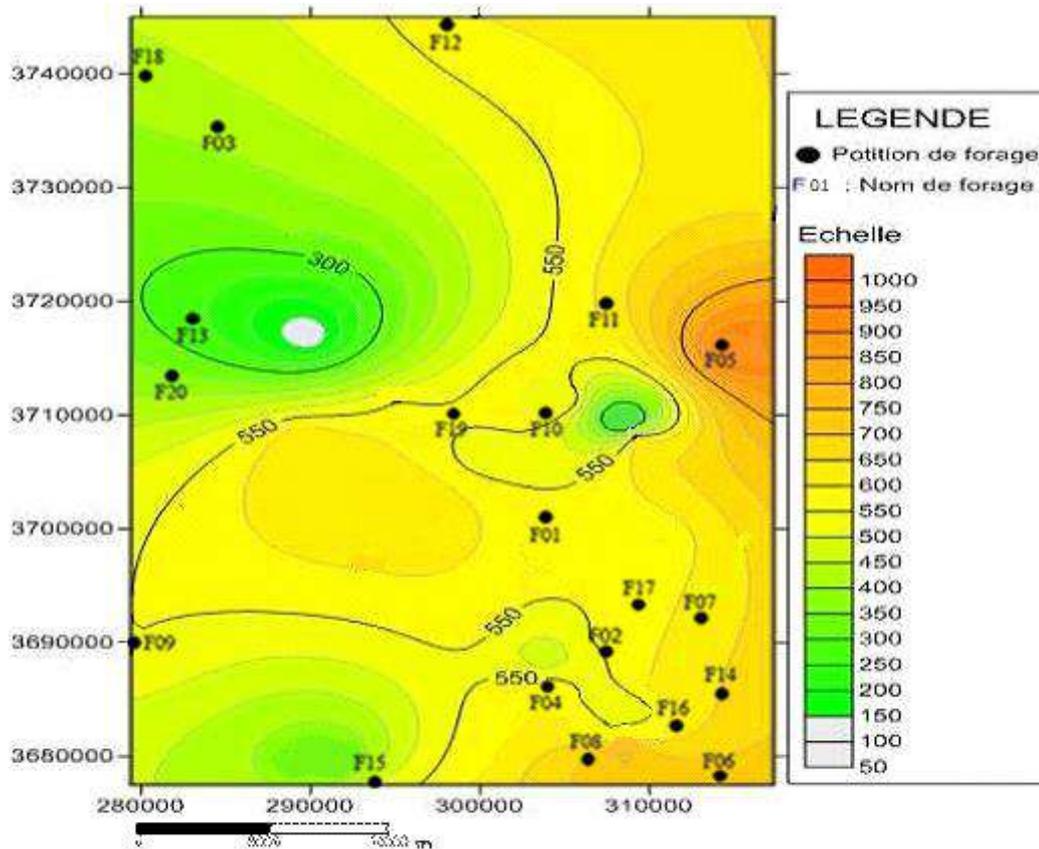


Figure.26.Carte de Sodium (Na<sup>+</sup>)

### III.3.2.4. Potassium (K<sup>+</sup>) :

Le potassium est le deuxième élément le plus léger, le plus réactif, le plus électropositif des métaux. C'est un solide mou qui est facilement coupé à l'aide d'un couteau. Les surfaces fraîchement coupées ont un aspect métallique. Il s'oxyde rapidement dans l'air et doit donc être conservé dans l'huile. Comme les autres métaux alcalins, il se décompose au contact de l'eau avec formation d'hydrogène. Lorsqu'il est plongé dans l'eau, il prend feu spontanément. Ses sels émettent une couleur violette lorsqu'ils sont exposés à une flamme.

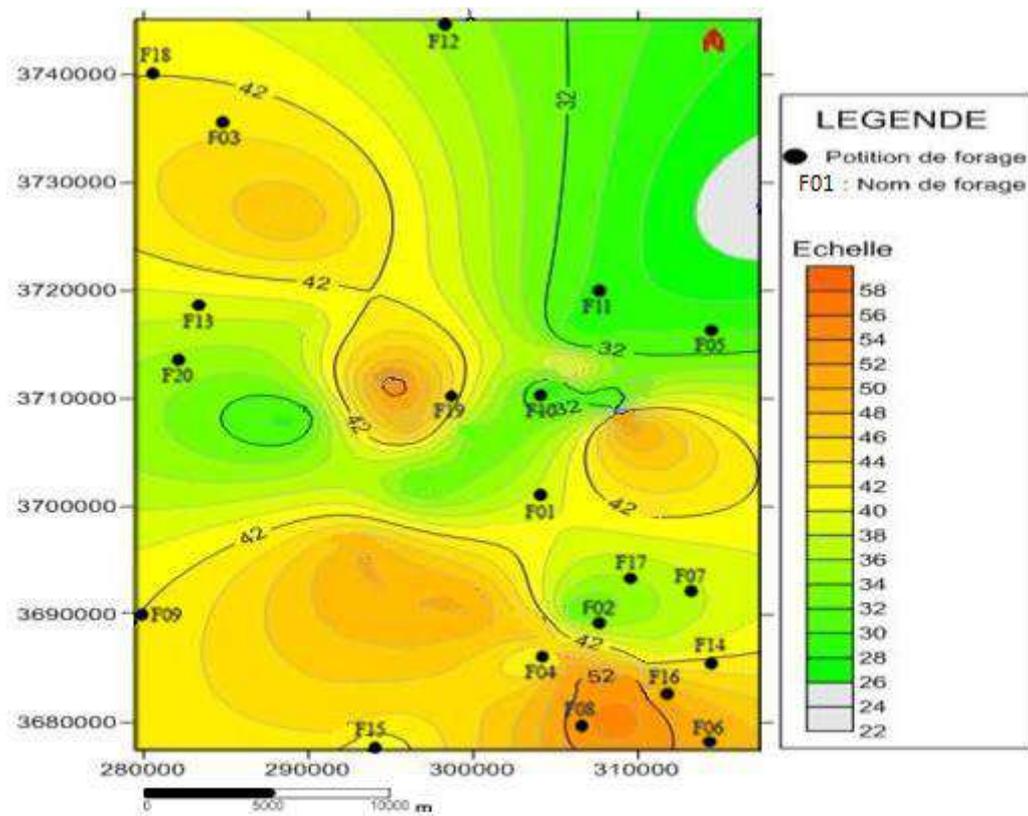


Figure.27. Carte de Potassium (K<sup>+</sup>)

### III.3.2.5. Chlorure (Cl<sup>-</sup>):

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (Na<sup>+</sup>) et de potassium (K<sup>+</sup>); ils représentent environ 0,05 % de la lithosphère. Ce sont les océans qui contiennent de loin la plus grande quantité de chlorures dans l'environnement.

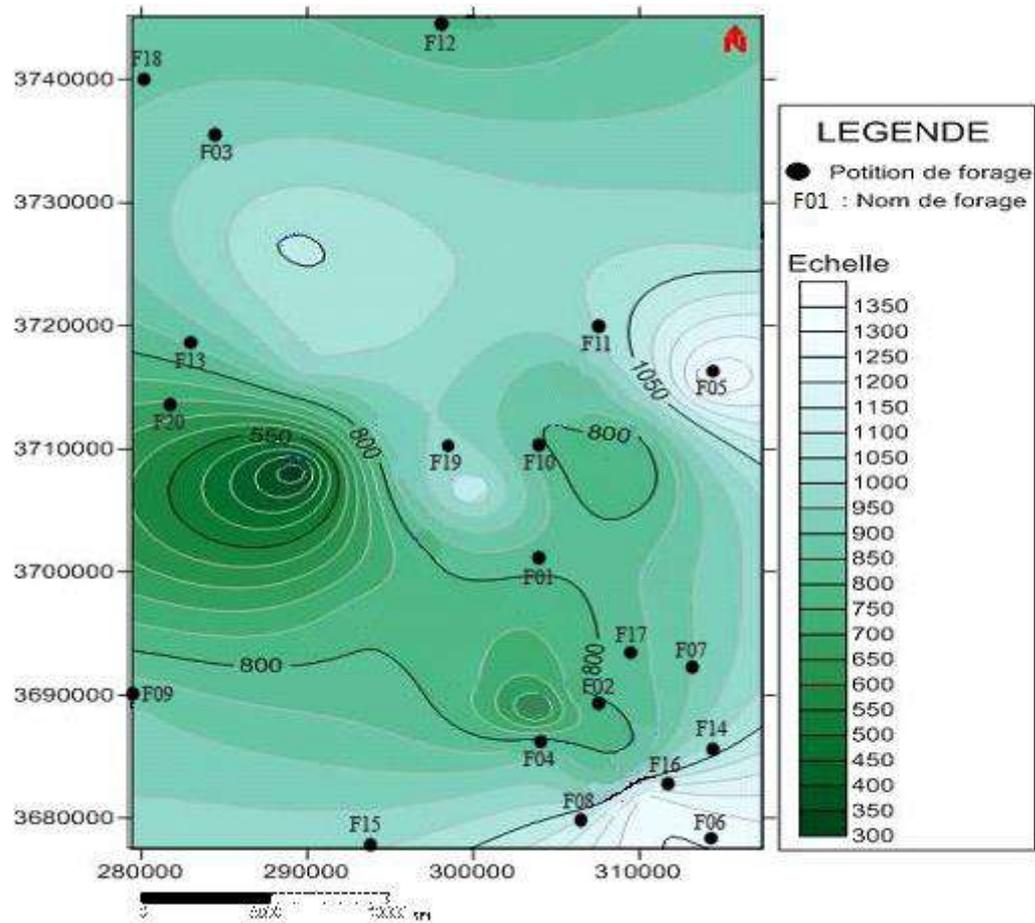


Figure.28. Carte de Chlorure (Cl<sup>-</sup>)

### III.3.2.6.Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>):

Les eaux naturelles contiennent pratiquement toujours des sulfates, en proportion très variables. Leurs présences résultent de la légère solubilité du sulfate de calcium des roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures répandus dans les roches (les pyrites). De plus l'oxydation de H<sub>2</sub>S et des oxydes de soufre émis dans l'atmosphère entraîne lors de précipitation l'acidification des lacs et des rivières ainsi qu'une augmentation de la teneur en sulfates.

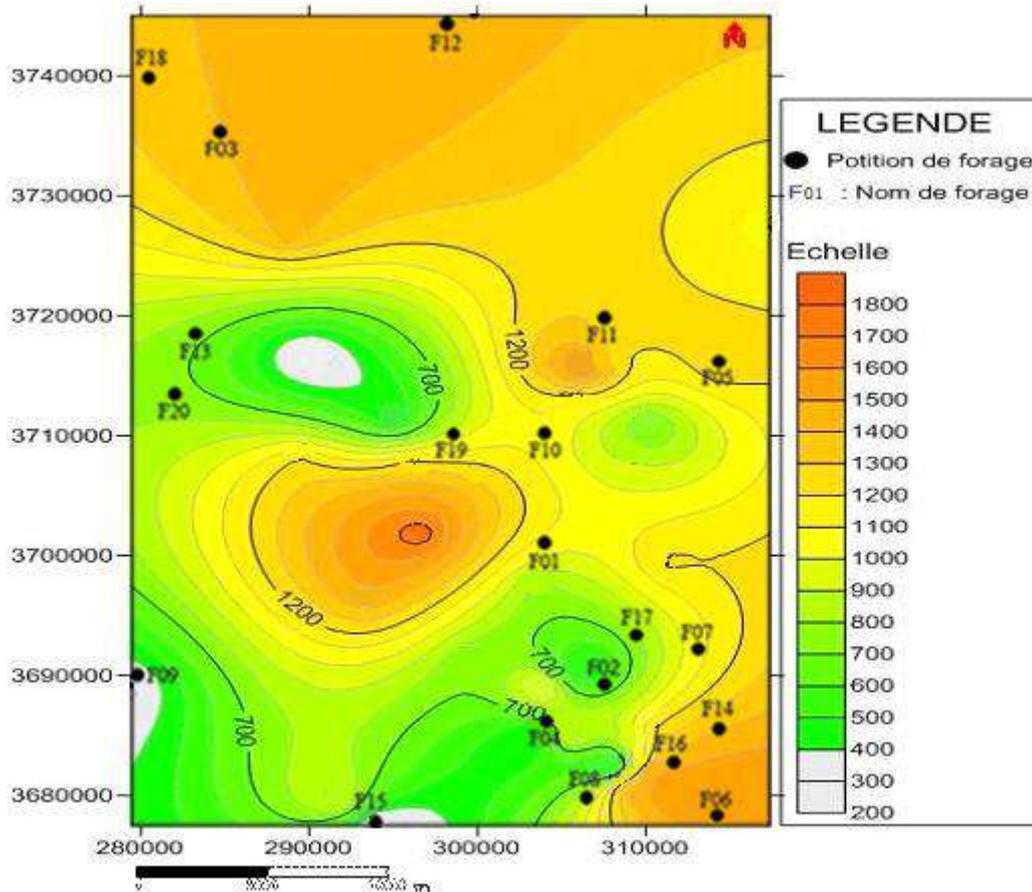


Figure.29.Carte de Sulfate (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

### III.3.2.7. Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) :

Les bicarbonates, ou hydrogénocarbonate, est un ion poly atomique dont la formule chimique est  $\text{HCO}_3^-$ . "Bicarbonate porte ce nom de par le caractère double de ses propriétés, il est à la fois acide et base appartenant à deux couples acido-basiques différents, on appelle cela une espèce ampholyte. À ne pas confondre avec les ions carbonates qui portent deux charges négatives. Il s'agit de la forme intermédiaire entre la déprotonation de l'acide carbonique : ôter le premier proton (ion  $\text{H}^+$ ) de l'acide carbonique donne le bicarbonate ; ôter le second proton donnera la forme carbonate ionique.

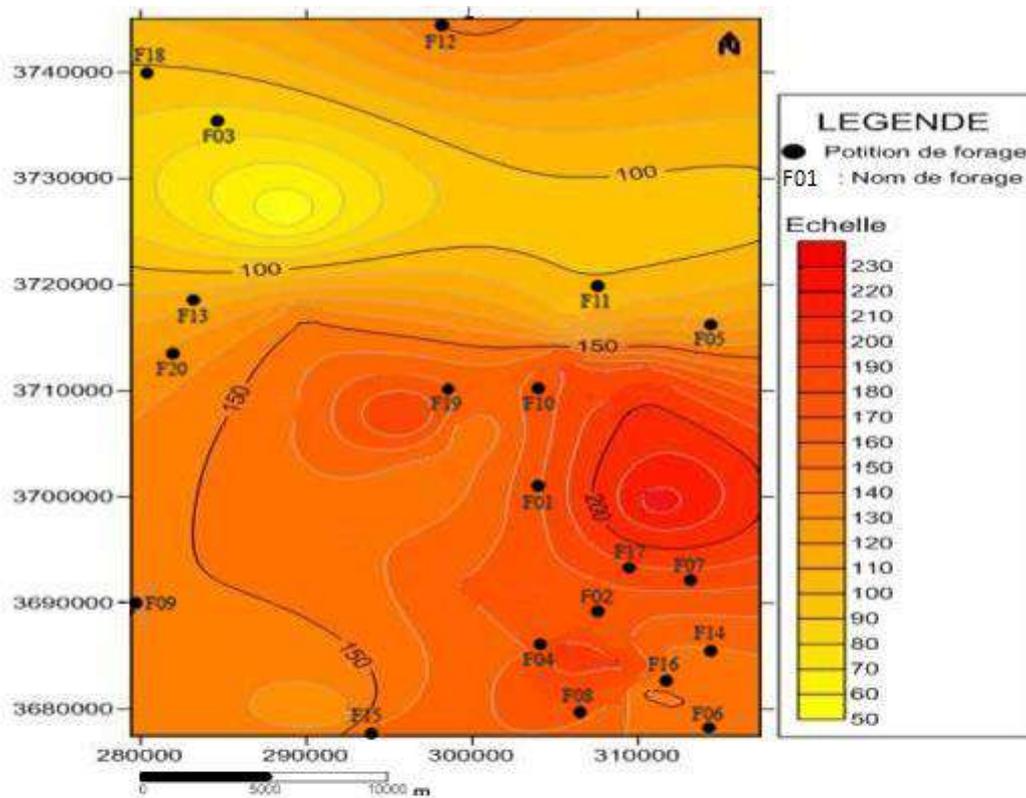


Figure.30. Carte de Bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ )

### III.3.2.8. Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>):

Les nitrates résultent de l'oxydation de l'azote organique et sont donc présents à l'état naturel dans les sols et dans les eaux. L'augmentation du taux de nitrates dans les eaux superficielles et souterraines est due pour une large part à l'enrichissement des sols par des engrais chimiques ou organiques, ainsi qu'aux rejets d'eaux usées ou mal traitées dans les cours d'eau. Les nitrates en eux-mêmes ne présentent pas de danger particulier pour la santé, c'est leur transformation en nitrites dans l'estomac qui peut être toxique.

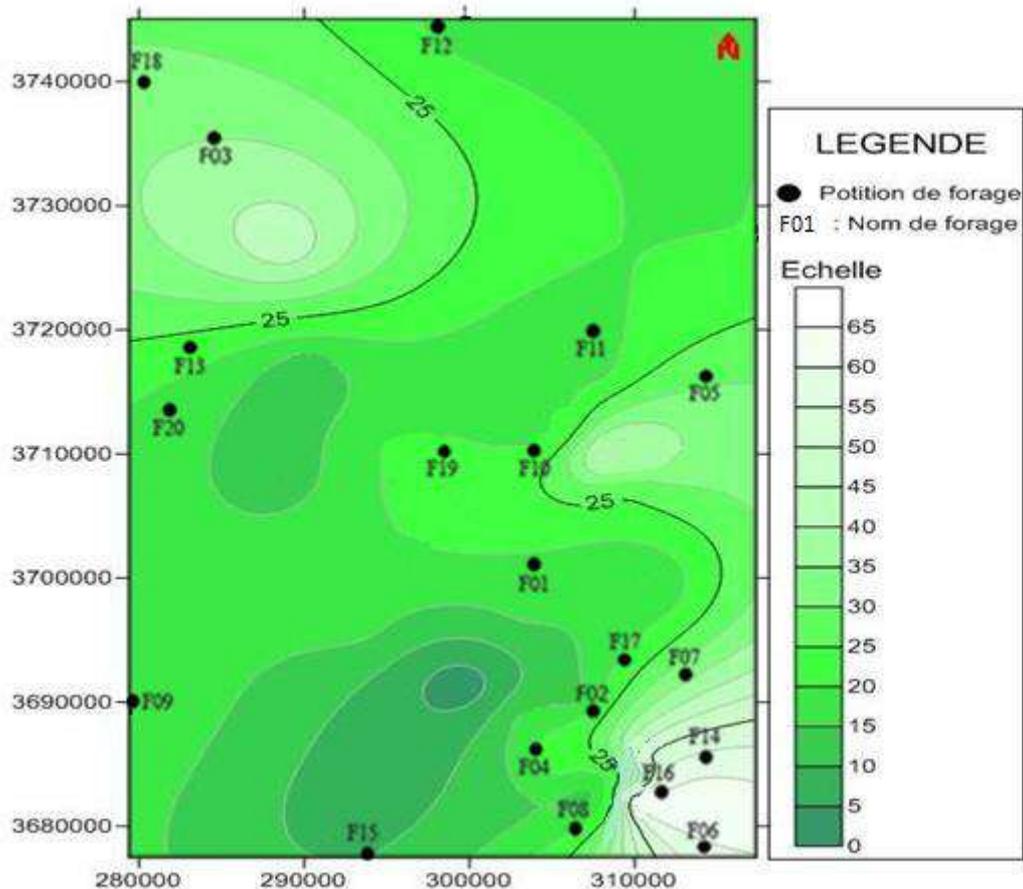


Figure.31. Carte de Nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

### III.3.2.9. Les Nitrites (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) :

Les nitrites représentent la forme de passage entre les nitrates et l'ammonium. Il s'agit d'une forme toxique, dans l'ensemble, les teneurs en nitrites sont inférieures à 0.1 mg/l.

### III.3.2.10. L'Ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) :

L'Ammonium est la forme d'azote la plus toxique, sa présence dans l'eau est liée à une contamination urbaine ou industrielle, les teneurs en ammonium dans les eaux de la zone d'étude sont dans la totalité inférieures à 0.3 mg/l.

### III.3.2.11. Balance Ionique (BI) :

La Balance Ionique se base sur le principe de tous les éléments dissous dans l'eau sont à l'état d'ionique, de ce point de vue une solution électriquement neutre ce qui veut dire que la somme des charges positives est égale à la somme des charges négatives (Kouamé Xavier KOUASSI, 2011) Une bonne représentation graphique des données est très importante à la vérification de la balance ionique qui est calculée par la relation suivante :

$$BI(\%) = 100 \times \frac{|\sum \text{cation} - \sum \text{anions}|}{|\sum \text{cation} + \sum \text{anions}|}$$

$\sum$  cations : Somme des cations majeurs contenus dans l'eau en milliequivalent

$\sum$  anions : Somme des anions majeurs contenus dans l'eau en milliequivalent

$$\sum \text{Cations}(+) = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^{+} + \text{K}^{+} + \text{NH}_4^{+})$$

$$\sum \text{Anions} (-) = (\text{HCO}_3^{-} + \text{Cl}^{-} + \text{NO}_3^{-} + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_2^{-} + \text{PO}_4^{3-})$$

D'une manière générale, les analyses chimiques sont considérées :

- Fiabilité des résultats d'analyses excellente lorsque  $BI < 5\%$
- Fiabilité des résultats d'analyses acceptable lorsque  $5\% \leq BI < 10\%$ ,
- Fiabilité des résultats d'analyses douteuse lorsque  $BI \geq 10\%$ .

	CE	Min	Ré.se	PH	TH	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	ΣCa(+)	ΣAn(-)
	us/cm	mg/l	mg/l	//////	° F	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l	még/l
F1	2680	1715	2360	7.73	155.01	20.60	10.40	12.61	0.9	0.008	15.80	8.37	2.66	0	0.01	44.52	26.84
F2	2730	1747	2500	7.38	150.01	20.00	10.00	13.05	0.9	0.007	13.80	8.58	2.50	0	0.00	43.98	24.89
F3	3880	2483	3640	7.36	180.02	19.60	16.40	17.83	0.7	0.002	26.20	10.63	2.00	0	0.24	54.53	39.07
F4	4130	2643	3800	7.68	191.01	24.20	14.00	23.05	0.7	0.001	25.80	13.30	2.24	0	0.22	61.95	41.56
F5	3900	2496	3560	7.64	168.01	19.60	14.00	23.05	0.7	0.001	22.60	12.95	2.12	0	0.31	57.37	37.99
F6	4000	2560	3720	7.45	183.33	20.10	16.57	18.7	0.7	0.008	26.77	13.54	2.20	0	0.35	56.09	42.86
F7	3950	2528	3720	7.32	168.01	19.60	14.00	18.27	0.7	0.001	26.30	11.02	2.18	0	0.30	52.56	39.81
F8	3930	2512	3710	7.39	153.01	22.40	8.20	23.05	0.7	0.001	23.00	14.12	2.16	0	0.39	54.37	39.67
F9	4200	2688	3920	7.73	193.98	24.30	14.50	23.49	0.7	0.002	25.68	13.95	2.42	0	0.02	63.00	42.06
F10	3940	2521	3700	7.36	134.01	16.20	10.60	19.57	0.7	0.003	20.60	16.82	2.00	0	0.29	47.07	39.70
F11	3850	2464	3420	7.86	176.68	20.10	15.24	23.49	0.7	0.002	23.19	13.13	2.17	0	0.29	59.54	38.78
F12	3850	2464	3420	7.86	176.68	20.10	15.24	23.49	0.7	0.002	23.19	13.32	2.17	0	0.00	59.54	38.68
F13	1117	715	600	7.67	44.004	4.60	4.20	6.09	0.2	0.002	6.51	2.59	0.86	0	0.01	15.07	9.97
F14	1150	736	620	7.25	46.668	4.86	4.47	6.525	0.2	0.001	7.23	3.88	0.94	0	0.43	16.04	12.47
F15	3910	2502	3220	7.29	192.02	20.80	17.60	23.05	0.7	0.005	23.80	14.31	2.28	0	0.39	62.18	40.78
F16	4110	2630	3480	7.31	180.01	25.20	10.80	17.4	0.7	0.002	25.80	14.82	2.68	0	0.22	54.12	43.52
F17	3960	2534	3300	7.51	148	24.60	5.00	18.27	0.7	0.000	21.80	14.57	2.06	0	0.43	48.61	38.87
F18	3950	2528	3720	7.32	192.02	20.80	17.60	18.27	0.7	0.001	25.40	13.56	2.14	0	0.29	57.36	41.39
F19	3960	2534	1600	7.35	161.01	24.00	8.20	23.05	0.7	0.001	17.80	12.28	2.04	0	0.28	56.00	32.40
F20	4980	3185	3520	7.72	203.02	29.20	11.40	22.62	0.7	0.004	33.40	14.44	1.94	0.001	0.34	63.92	50.12

**Tableau .10.: Résultats d'analyses physico-chimiques en (még/l) d'El Oued Souf**

forages	ΣCations	ΣAnions	ΣCations -ΣAnions	ΣCations + ΣAnions	BI(%)	Résultats
F1	44.51928	26.8352	17.68405654	71.35449671	24.783	Douteuse
F2	43.97902	24.8886	19.09040923	68.86763252	27.72	Douteuse
F3	54.53019	39.0726	15.45761506	93.60276773	16.514	Douteuse
F4	61.94763	41.5615	20.3861239	103.5091335	19.695	Douteuse
F5	57.37371	37.9882	19.38547213	95.36195632	20.328	Douteuse
F6	56.09486	42.8552	13.23962391	98.95010526	13.38	Douteuse
F7	52.56339	39.8094	12.75394649	92.37284221	13.807	Douteuse
F8	54.37187	39.6719	14.7000109	94.0437289	15.631	Douteuse
F9	63.00184	42.0635	20.93833098	105.0653533	19.929	Douteuse
F10	47.06912	39.7045	7.364629346	86.77361245	8.4872	Acceptable
F11	59.54336	38.7811	20.76222808	98.32450091	21.116	Douteuse
F12	59.54336	38.6831	20.86021617	98.22651283	21.237	Douteuse
F13	15.07189	9.9704	5.101494651	25.04229411	20.372	Douteuse
F14	16.03796	12.4689	3.569081828	28.50683372	12.52	Douteuse
F15	62.17784	40.7758	21.40205436	102.9536183	20.788	Douteuse
F16	54.11937	43.5187	10.60067289	97.63805849	10.857	Douteuse
F17	48.61171	38.8655	9.746196118	87.47722366	11.141	Douteuse
F18	57.36414	41.3851	15.97906226	98.74920792	16.181	Douteuse
F19	55.99811	32.4017	23.59642325	88.39979782	26.693	Douteuse
F20	63.91635	50.1228	13.79350514	114.0391952	12.095	Douteuse

**Tableau .11. Balance Ionique**

### **III.4 Caractéristiques chimiques des eaux**

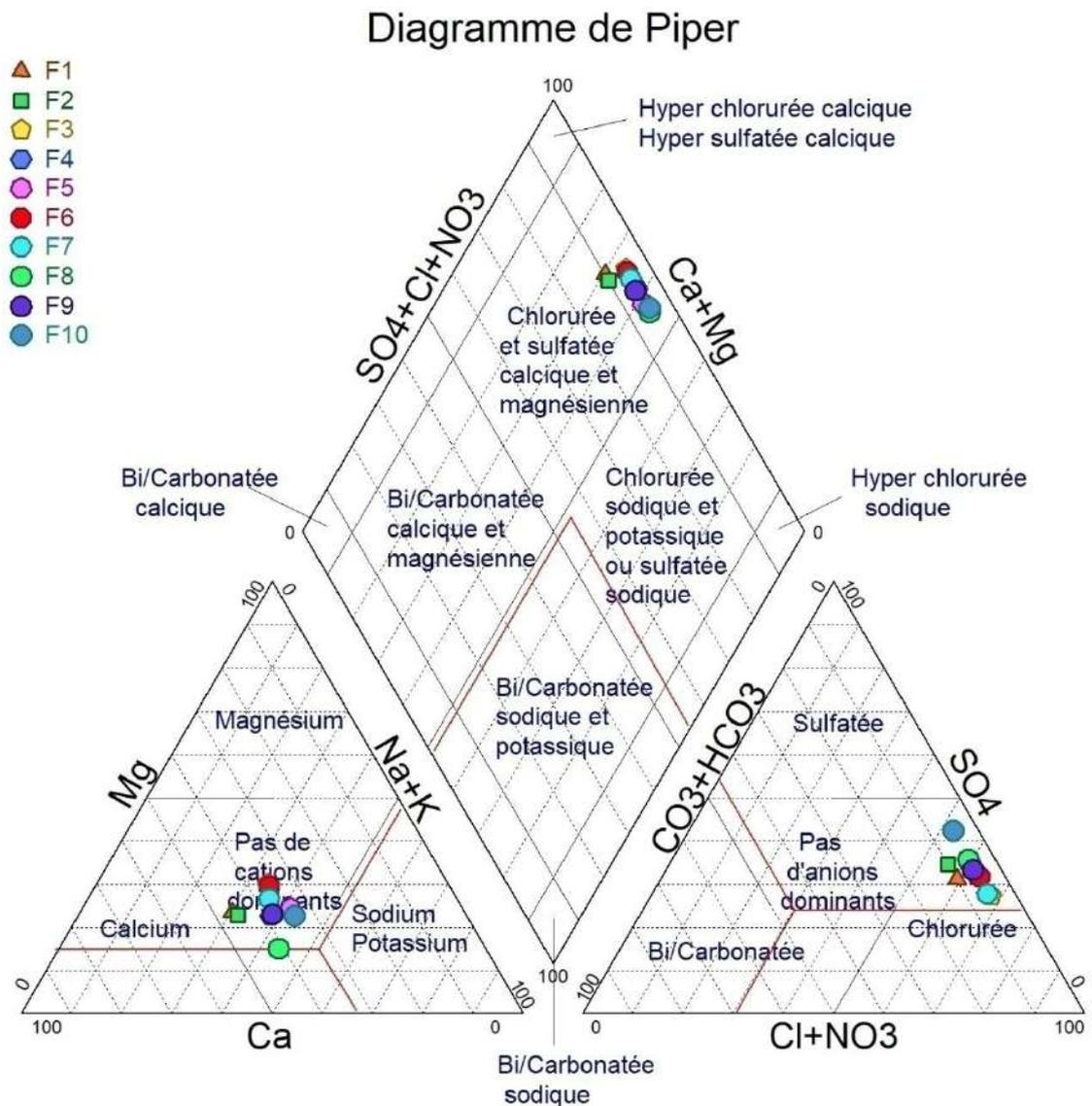
#### **III.4.1. Représentation graphique des faciès hydro-chimiques:**

Le principal outil utilisé pour les représentations graphiques des analyses Chimiques est le logiciel DIAGRAMMES créé 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 :

- 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 nous permet de représenter les anions et les cations sur Deux triangles témoignant les teneurs relatives en chacun des ions par rapport au total des ions. ces deux triangles, est associé un losange synthétisant le faciès global.

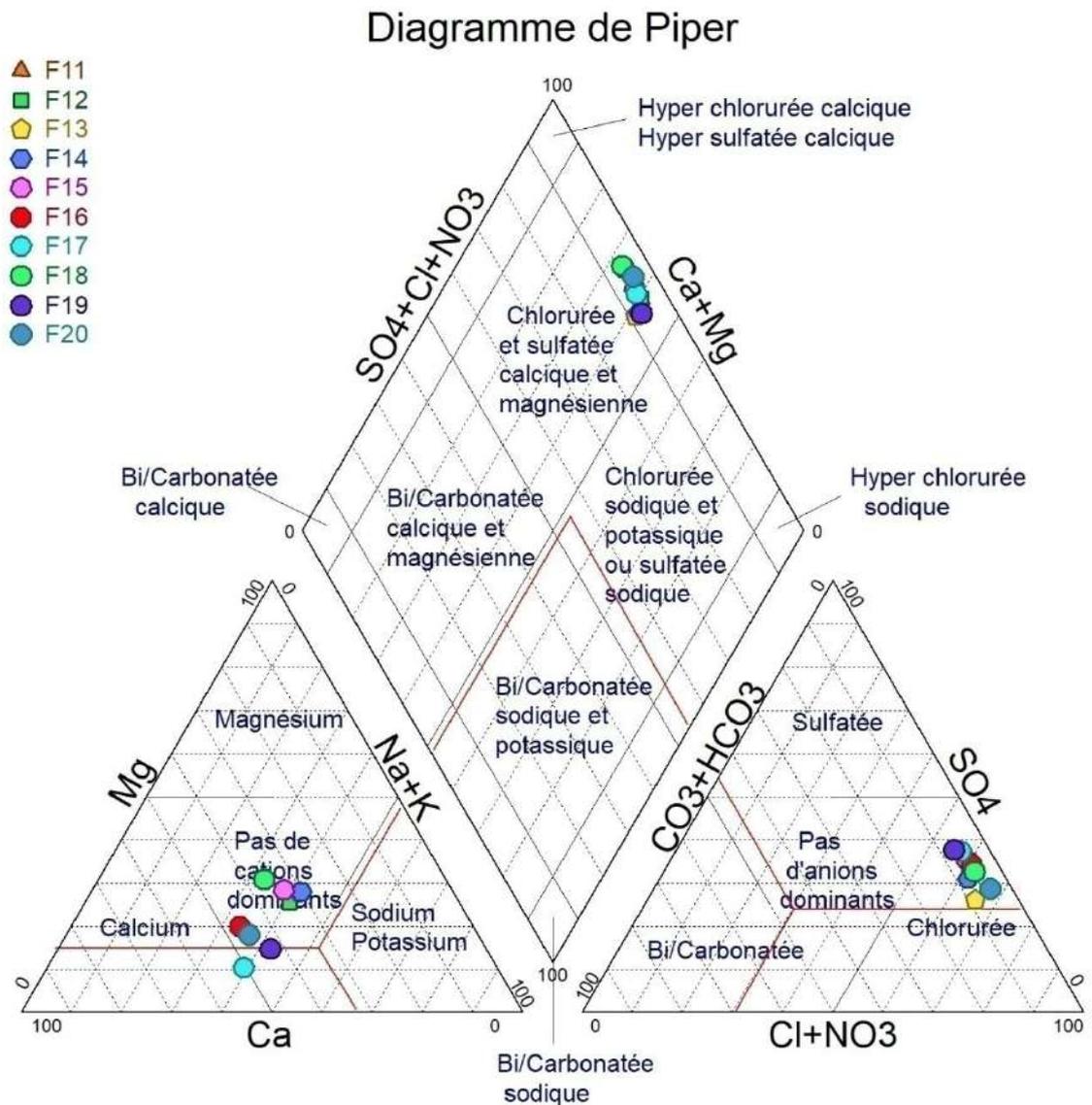


**Figure .32. Diagramme de Piper de champ captant d'el Oued Souf**

Selon la projection de Piper, les eaux de surface sont caractérisées par la présence de trois faciès d'eau qui montrent une évolution spatiale. Ces faciès sont de types:

- chlorurée et sulfato- calcique et magnésienne ,
- chlorurée et sulfato-sodique
- bicarbonaté sodique et potassique .

Le chemin évolutif de ces eaux est en relation avec leur origine. Les eaux de l'Affluent s'enrichit davantage, en allant de l'amont vers l'aval, en chlorure et en sodium au dépend du calcium et du magnésium. Par contre, les eaux de l'oued N'fis montrent une évolution d'une eau riche en bicarbonate vers une eau riche en chlorure. Cette évolution est le résultat de la rencontre entre les eaux de l'Oued N'fis et les eaux de l'affluent. L'eau est donc un mélange des eaux de N'fis (faciès carbonaté) et les eaux de l'affluent avec un faciès franchement chloruré (Figures 32.33)



**Figure .33. Diagramme de Piper de champ captant d'El Oued Souf (suit)**

## B .Diagramme de Schöeller Berkaloff :

Ce diagramme nous permet de représenter le faciès Chimiques de plusieurs Échantillons d'eaux dans un sel graphe, 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 formé en reliant tous les points Figurants les différentes éléments chimiques lorsque les lignes se croisent un Changement de faciès chimiques Les Figures (44.45.) montrent les faciès chimiques des échantillons analysés Selon le diagramme qui sont les suivants : - légèrement faciès Chlorurée calcique - domination des sulfates pour les Anions - domination des chlorures pour Anions - domination du sodium pour les cations sur l'autre élément.

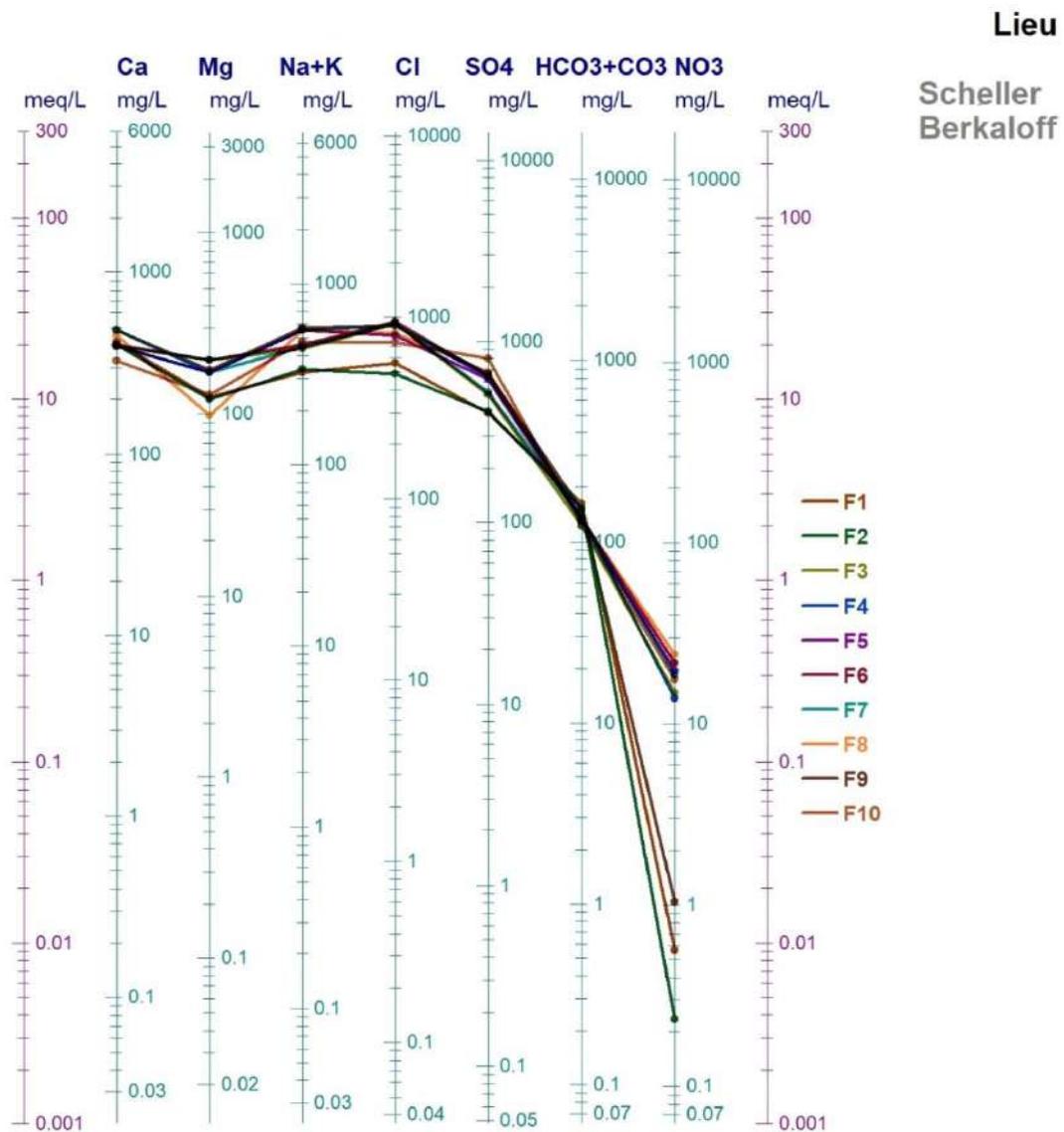


Figure .34. Digramme de Schöeller de champ captant d'El Oued Souf

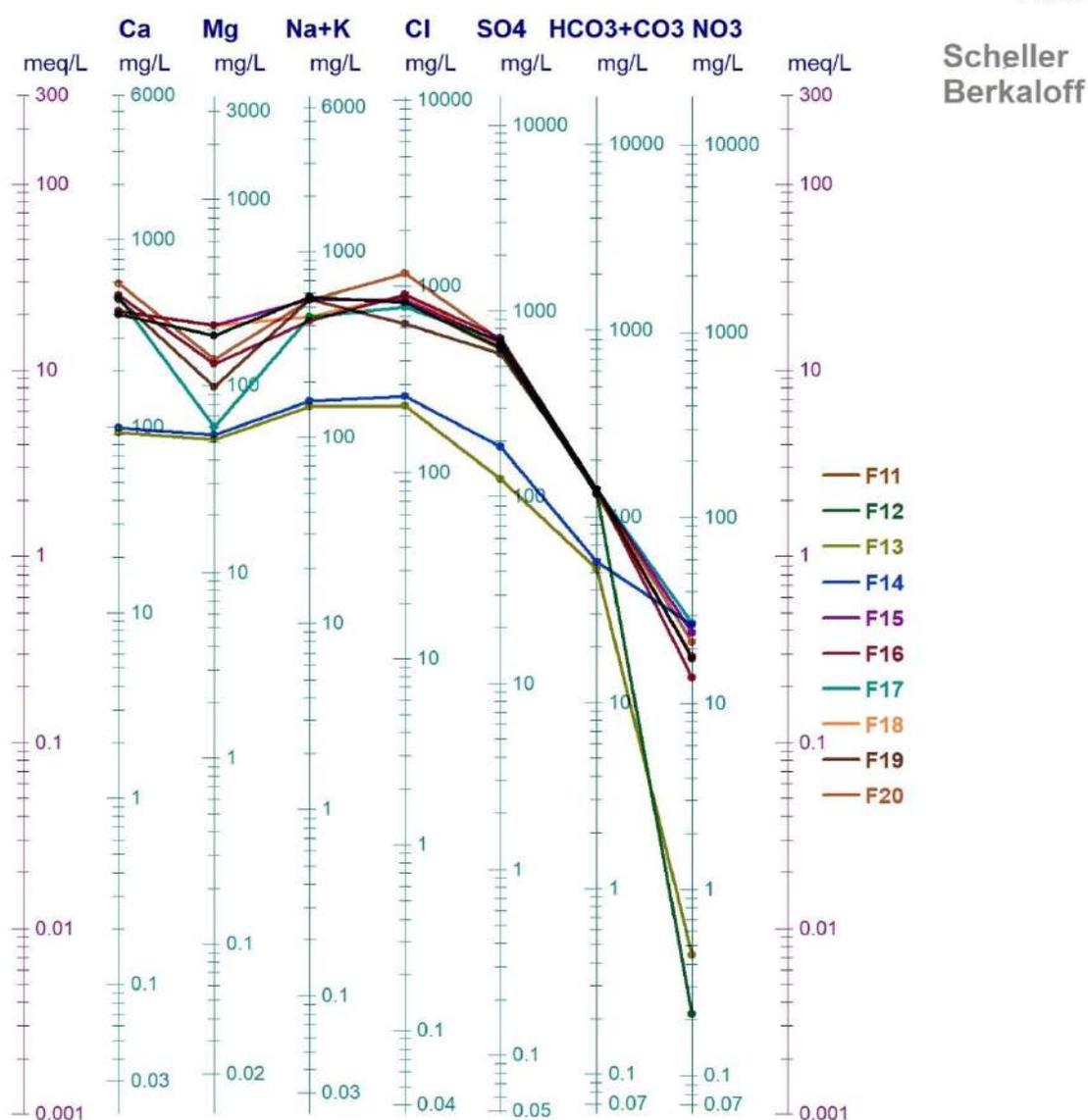


Figure .35. Digramme de Schöeller de champ captant d'El Oued Souf (suit)

### Evolution des faciès chimiques des eaux

Selon la projection des analyses des eaux de surface sur le diagramme SCHOELLER , les eaux ont une dominance apparente en élément chlorure, avec une légère évolution aperçu de l'amont vers l'aval. Les courbes montrent un parallélisme témoignant d'une certaine évolution graduelle de la chimie l'eau dans l'espace

Quant aux eaux souterraines, la projection des résultats sur le diagramme de Schöeller (Figures 34.35) confirme l'abondance dans ces eaux le parallélisme des courbes témoigne d'une certaine évolution allant de l'amont vers l'aval.

### C. Diagramme de STABLER :

La classification des eaux selon le faciès chimiques est exprimée par une Formule Caractéristique (formule ionique), elle consiste à calculer les quantités en Réaction en Pourcent par rapport à la concentration totale (50% anions, 50% cations).

$$r(\%) = r \times 100 / C$$

- r % : quantité en réaction en pourcent de l'élément.
- r : la quantité en réaction de l'ion considéré en (mécq/l).
- C : la concentration totale en (mécq/l).

La représentation graphique de classification de faciès chimique selon le Diagramme de Stabler voir la Figures 36 et 37.

#### Eléments chimiques majeurs

Afin de comprendre les faciès et le comportement chimique des eaux au voisinage de la mine de Guemassa, plusieurs projections ont été réalisées. Ces projections ont été faites à l'aide de logiciel DIAGRAMME (SMILER, 2004). Dans cette optique, les analyses ont été projetées sur des 69 diagrammes de STABLER (Figure 37 et 36). Ce dernier décrit en fonction des pourcentages la part que constitue chaque élément dans l'eau.

Les cations les plus abondants dans les eaux de surface sont le sodium (Na<sup>+</sup>) et le calcium (Ca<sup>2+</sup>). Leurs teneurs oscillent entre 140 et 540 mg/l pour le Na<sup>+</sup>, et 92.18 et 585.17 mg/l pour le Ca<sup>2+</sup>. Viendront ensuite le magnésium (Mg<sup>2+</sup>) et le potassium (K<sup>+</sup>) avec des concentrations plutôt faibles, entre 3 et 12 mg/l pour le K<sup>+</sup> et 7 et 35 mg/l pour le Mg<sup>2+</sup>. On peut classer par ordre d'abondance croissante, les cations comme suit : potassium < magnésium < sodium < calcium pour presque la totalité des eaux.

Stabler

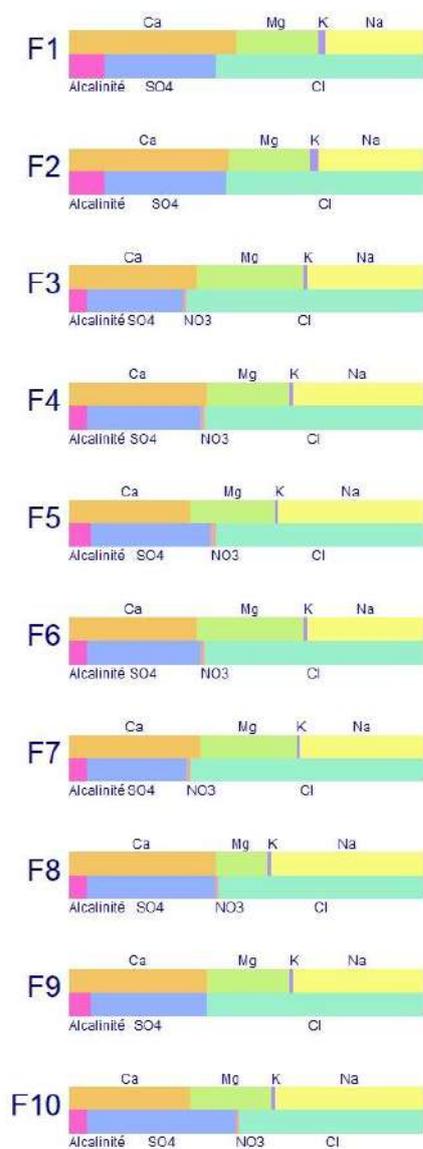


Figure.36: Diagramme de Stabler des forages CI Région Oued Souf

Stabler

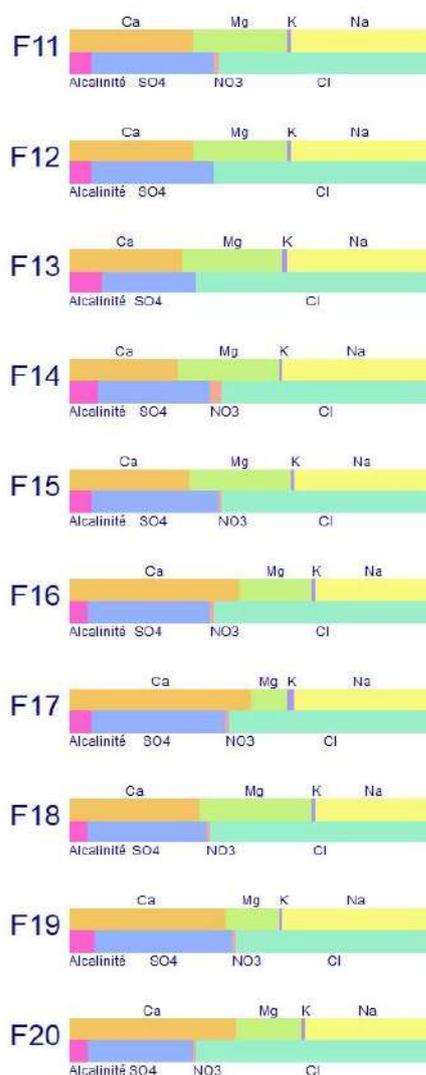


Figure.37: Diagramme de Stabler des forages CI Région Oued Souf (suit)

### III.4. Etude statistique des données Hydrochimique:

#### III.4.1. Statistique descriptive:

L'analyse statistique des données Hydrochimiques est basée sur la description quantitative (le minimum, le maximum, la moyenne, l'écart -type 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

d'El oued souf sont reportés dans le Tableau 12:

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type	CV(%)
Conductivité (us/cm)	1117	4980	3048.5	969.3493	31.798
PH	7.25	7.86	7.555	0.216121	2.8606
TH( ° F)	44.00412	203.01646	123.51	43.12766	34.918
Ca++ (meq/l)	4.6	29.2	16.9	5.95407	35.231
Mg++ (meq/l)	4.200823	17.603621	10.9022	4.27851	39.244
Na+ (meq/l)	6.089604	23.488473	14.789	5.423439	36.672
K +(meq/l)	0.179028	0.9207161	0.54987	0.181316	32.974
Cl- (meq/l)	6.513089	33.402821	19.958	6.618958	33.165
SO4 - -(meq/l)	2.590319	16.816781	9.70355	3.627303	37.381
HCO3 -(meq/l)	0.859718	0.8597181	0.85972	0.454449	52.86
NO3 -(meq/l)	0.003452	0.0034516	0.00345	0.15005	4347.3

Tableau.12.Statistiques descriptives (Données quantitatives)

### III.4.2. Origines du chimisme

Les résultats de tableau ci-dessous montre que la majorité des éléments sont bien corrélés entre eux, voir mieux avec la conductivité selon la Matrice de corrélation entre les éléments physicochimiques Voir le Tableau.13

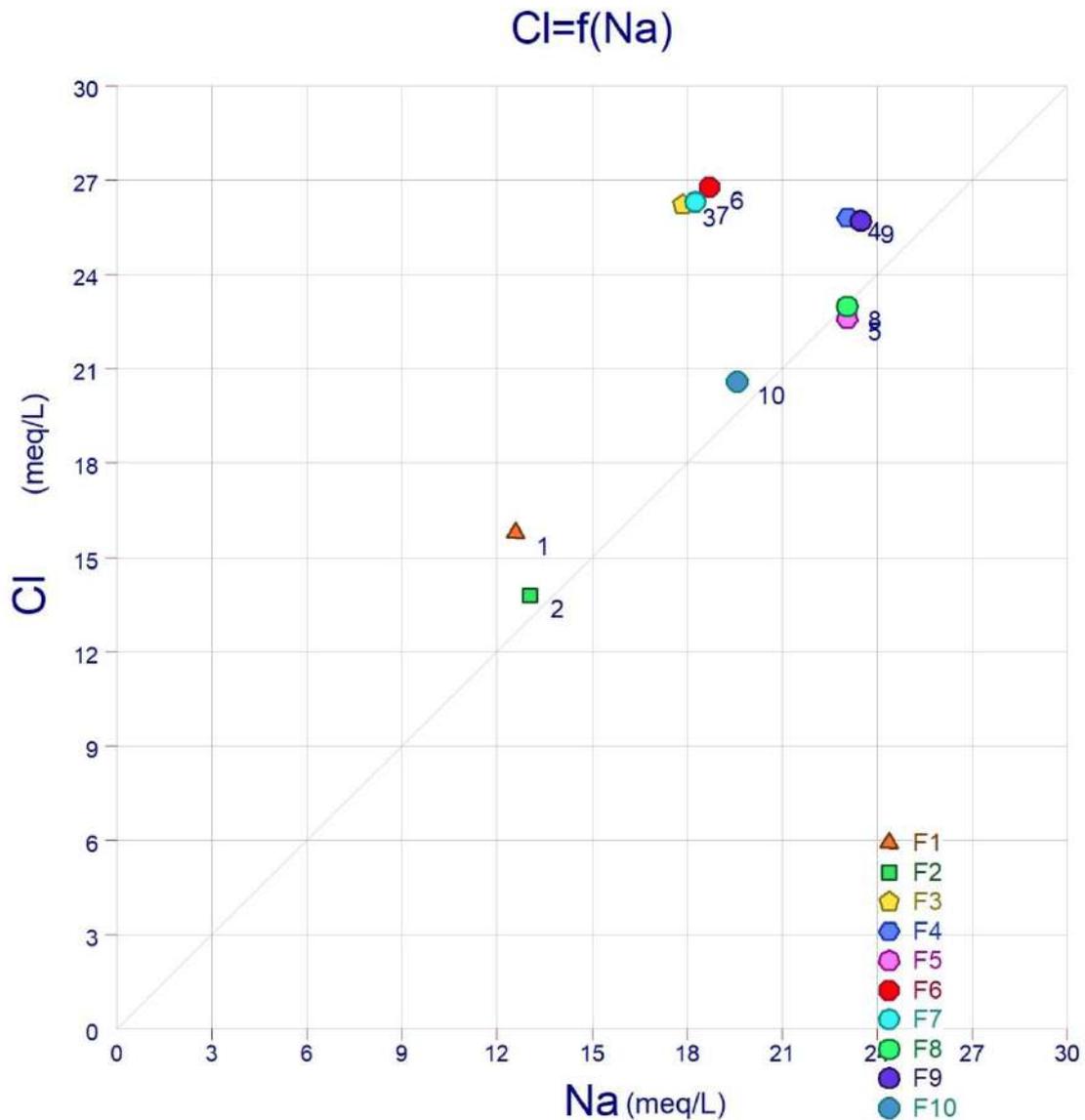
	CE	PH	TH	Ca2+	Mg2+	Na+	K+	NH4 +	Cl-	SO4 2-	HCO3 -	NO2 -	NO3 -
CE	1	0.096	0.906	0.891	0.587	0.893	0.674	-0.085	0.942	0.923	0.643	0.333	0.283
PH		1	0.162	0.157	0.109	0.253	0.099	0.105	0.119	0.022	0.075	0.243	-0.481
TH			1	0.891	0.776	0.816	0.788	0.159	0.896	0.785	0.809	0.236	0.061
[Ca2+]				1	0.405	0.763	0.805	0.068	0.810	0.781	0.794	0.362	0.105
[Mg2+]					1	0.582	0.468	0.226	0.680	0.497	0.527	-0.029	-0.022
[Na+ ]						1	0.590	-0.189	0.782	0.857	0.562	0.168	0.225
[K+ ]							1	0.382	0.548	0.636	0.933	0.018	-0.125
[NH4 + ]								1	0.034	-0.108	0.350	0.121	-0.362
[Cl-]									1	0.813	0.579	0.415	0.284
[SO4 2- ]										1	0.643	0.157	0.334
[HCO3 - ]											1	-0.077	-0.174
[NO2 - ]												1	0.163
[NO3 - ]													1

**Tableau .13. Coefficients de détermination (Pearson) .**

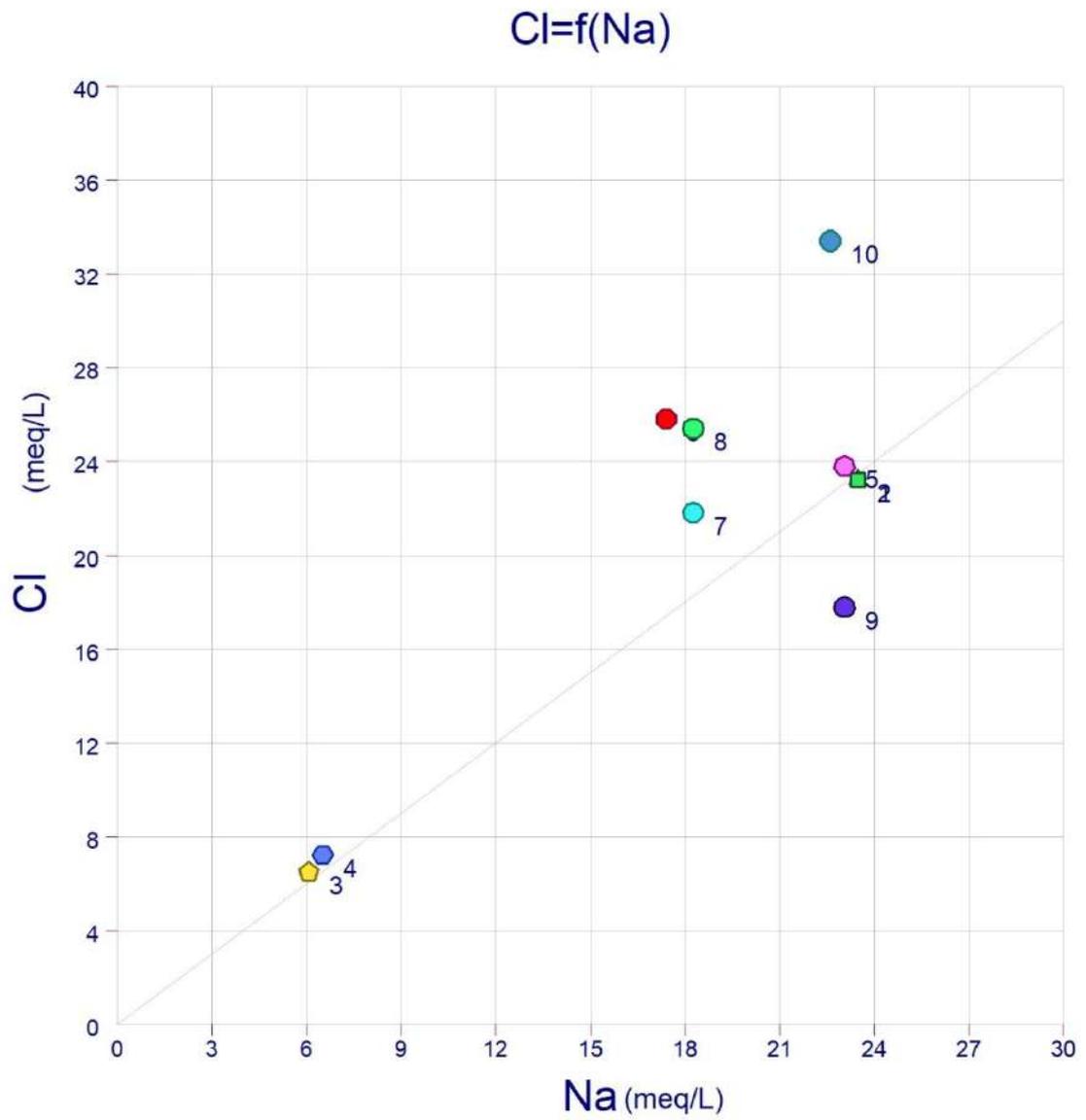
### III.4.3. Les relations chimiques entre les éléments :

#### 3a. 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 (NaCl), et qui confirme la domination du faciès chlorurée sodique. Le coefficient de corrélation est de 0.70



**Figure .38. Relation Na-Cl**



**Figure .39. Relation Na-Cl(suit)**

### 3b. 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 est 0.38

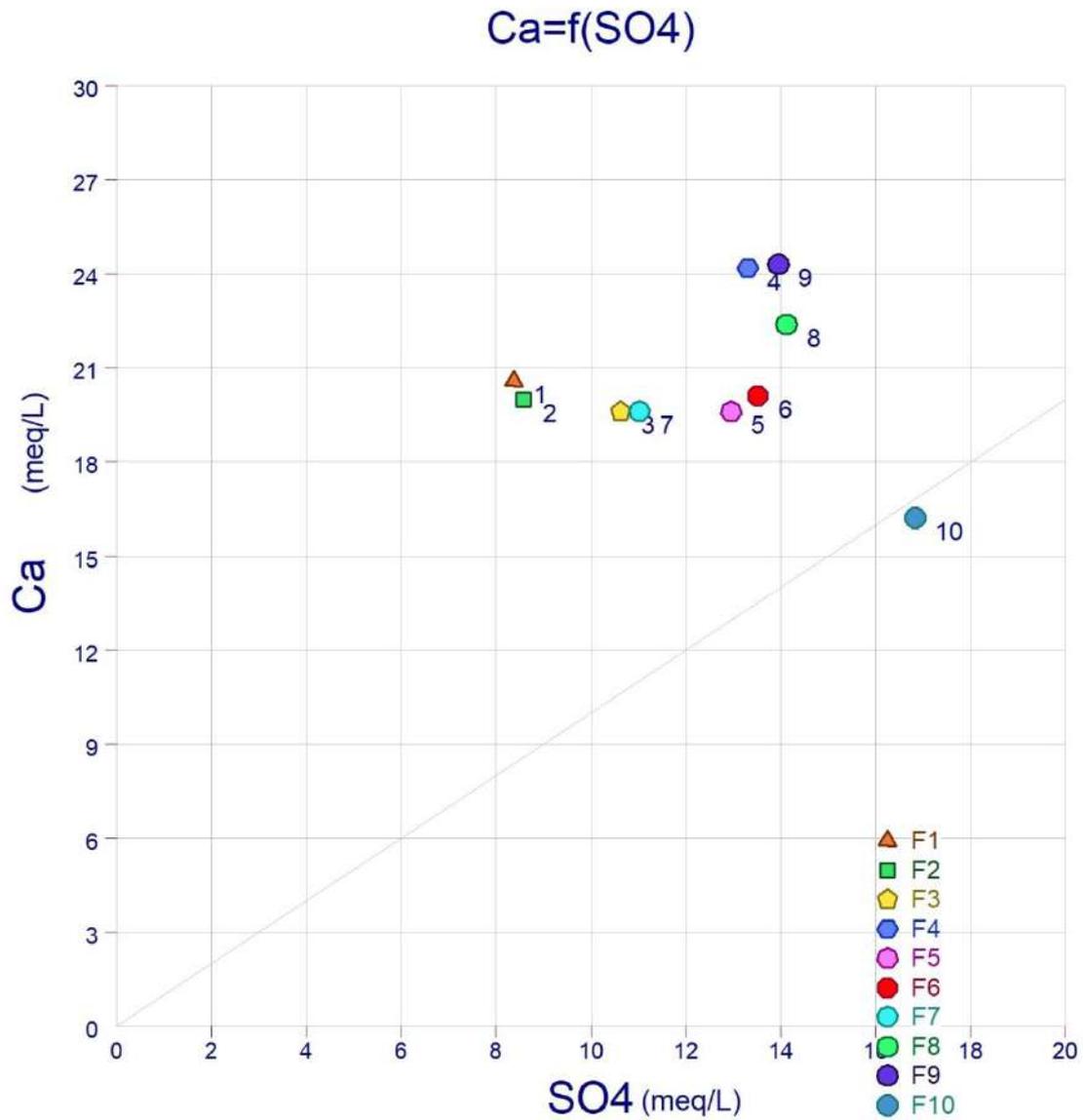
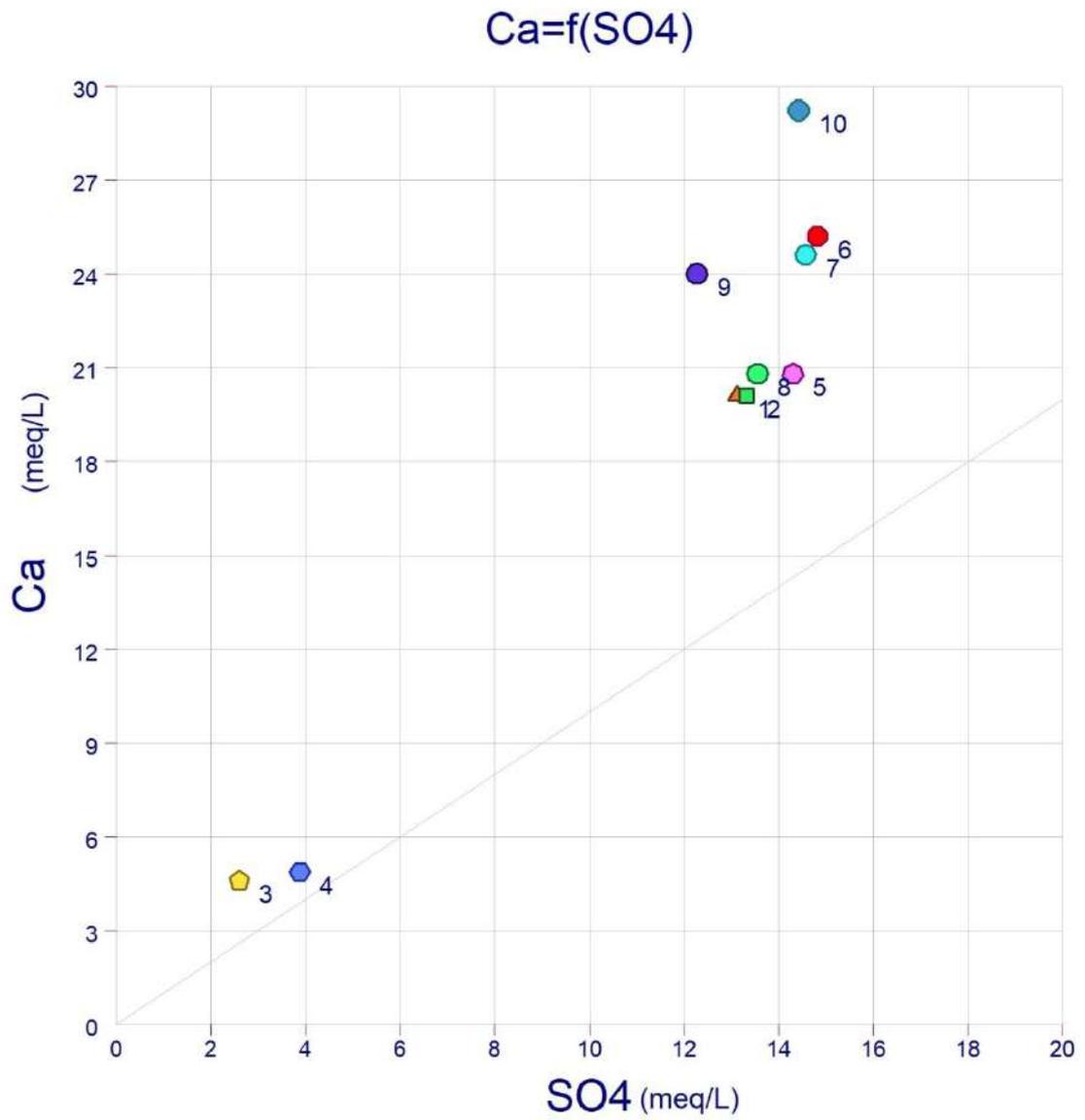


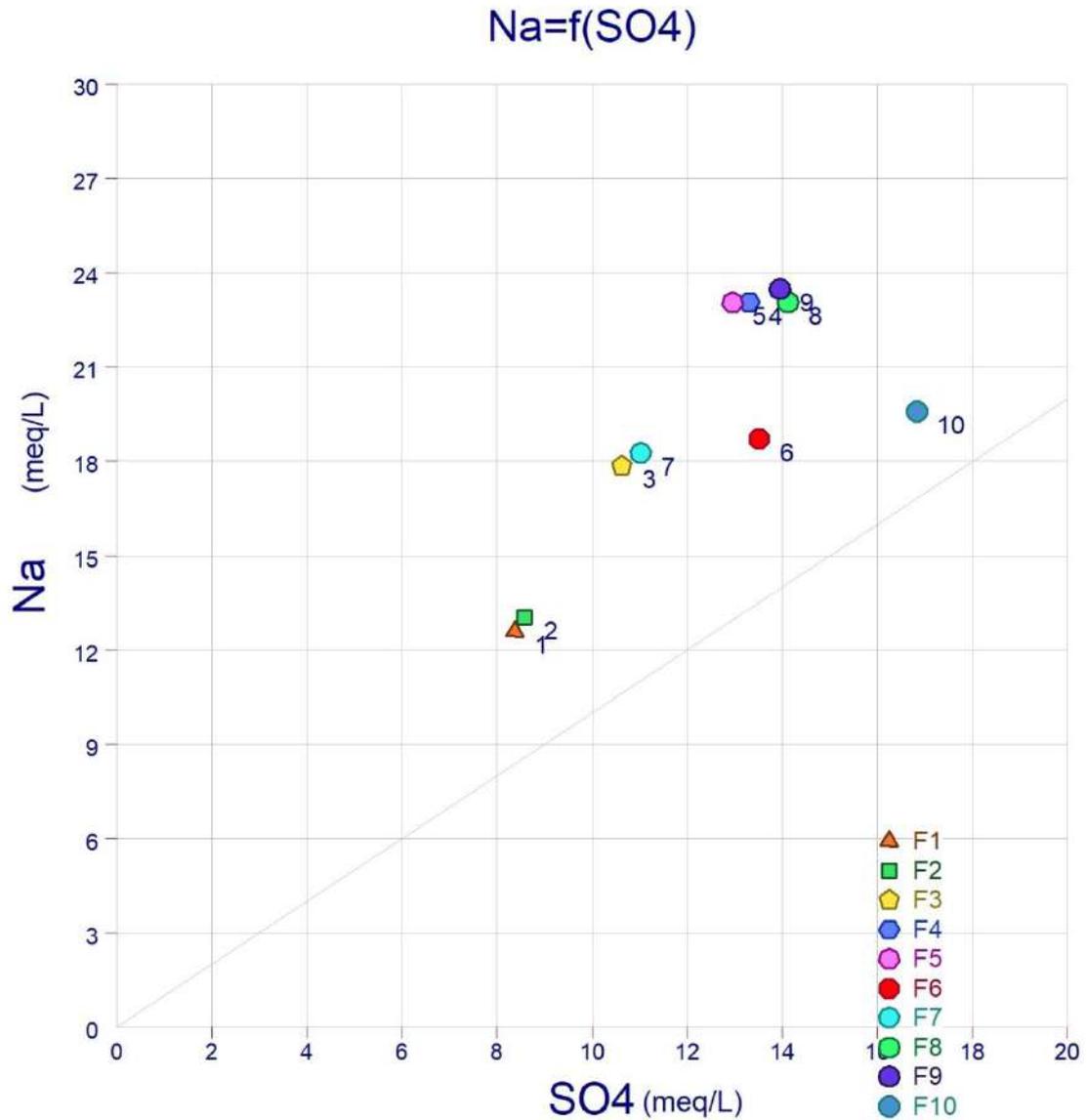
Figure .40. Relation SO4-Ca



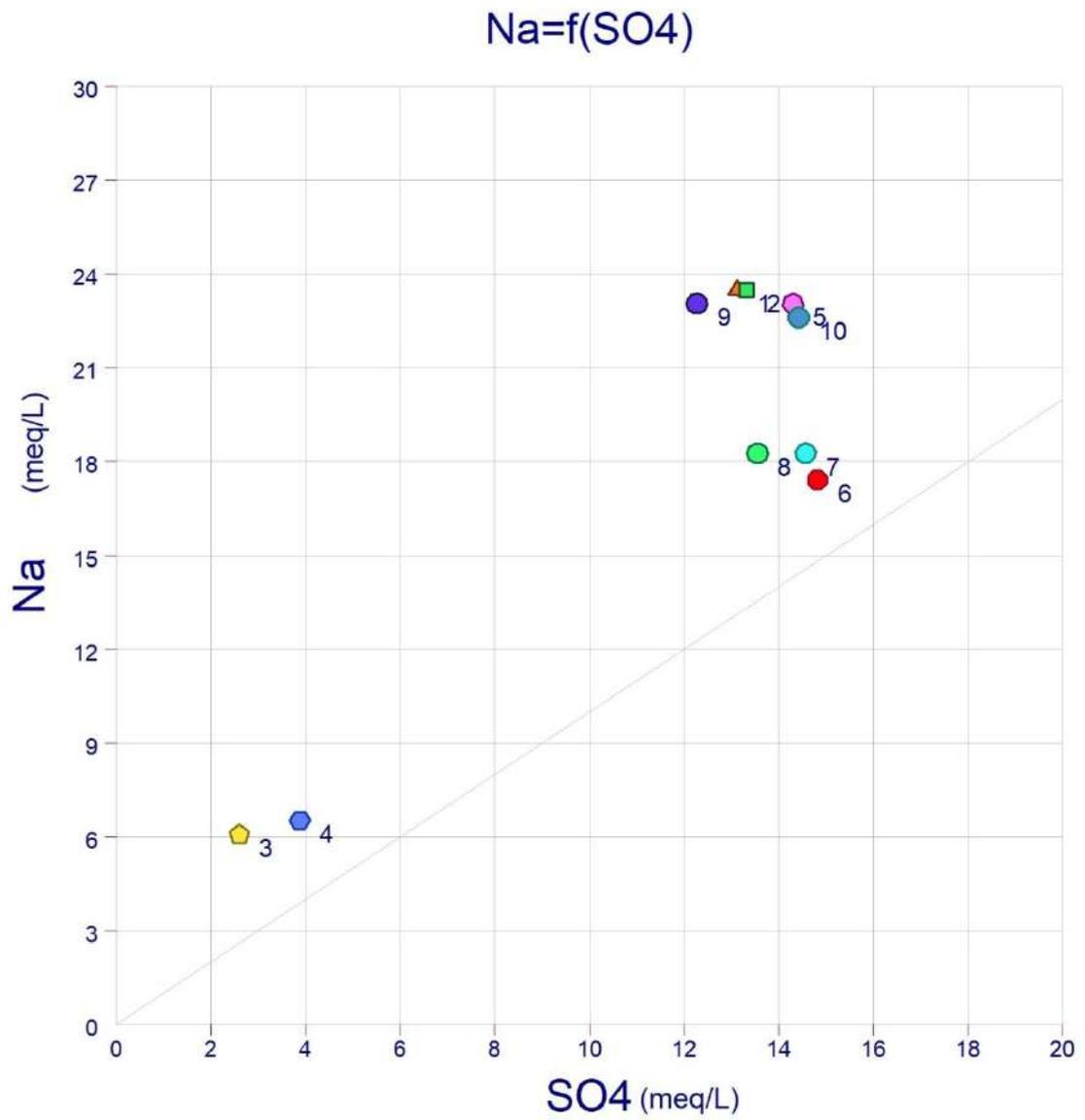
**Figure .41. Relation SO4-Ca (suit)**

### 3c.Sulfate-Sodium (SO4-Na):

L'examen de cette relation montre une évolution peut proportionnelle du sulfate et du sodium, cette proportionnalité confirme la petite domination du faciès Sulfaté sodique des eaux souterrains dans la zone d'In-Salah, le coefficient de corrélation est de 0.02.



**Figure .42.Relation-Sulfate-Sodium (SO4-Na)**



**Figure .43.Relation-Sulfate-Sodium (SO4-Na) (suit)**

### 3d. Sulfate- Magnésium (SO4-Mg):

La figure 5.33 indique que la relation sulfate magnésium est liée avec une Évolution proportionnelle, donc l'origine et probablement du sel de magnésium la Kiesérite ( $MgSO_4$ ). Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0.27.

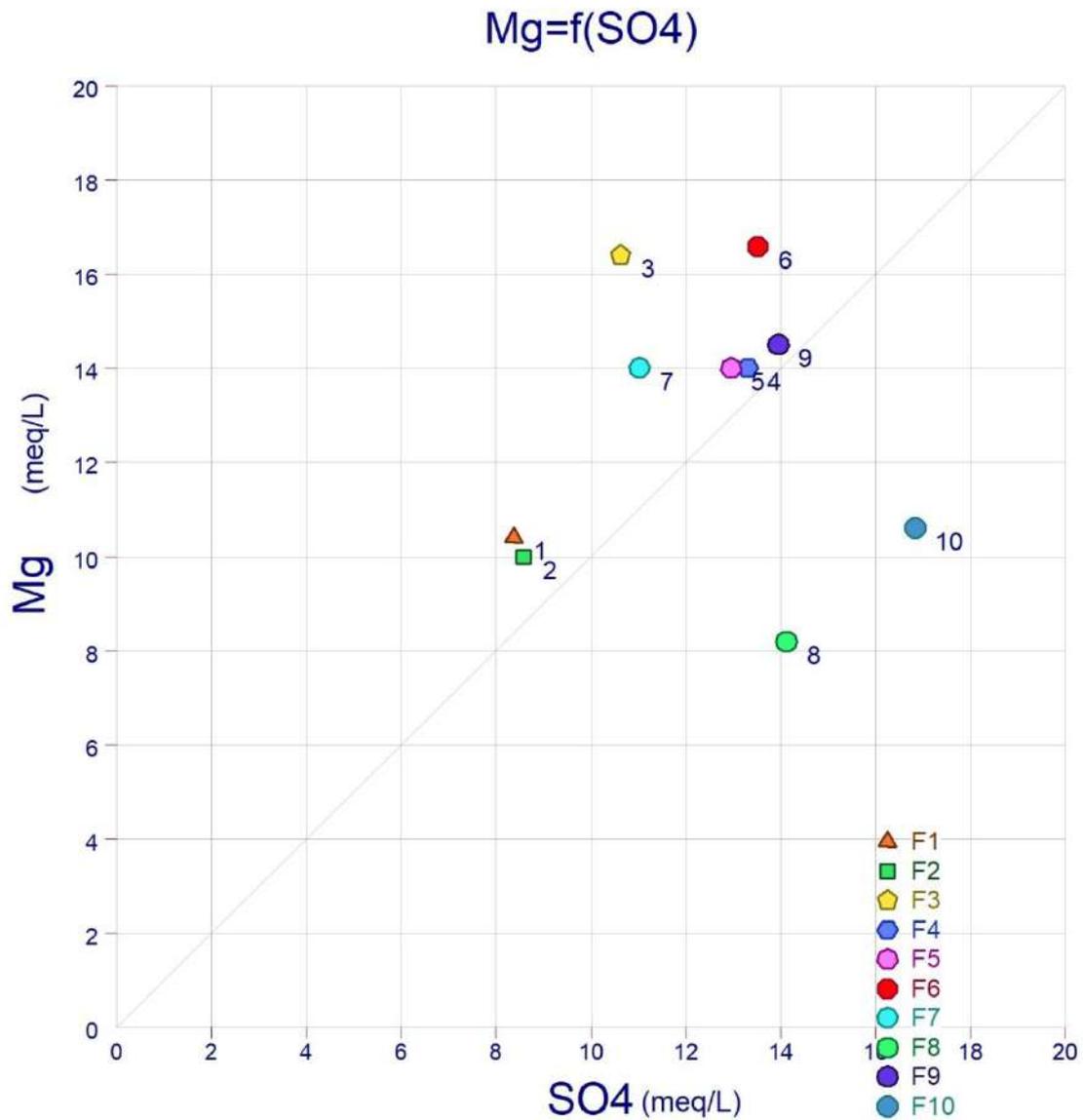
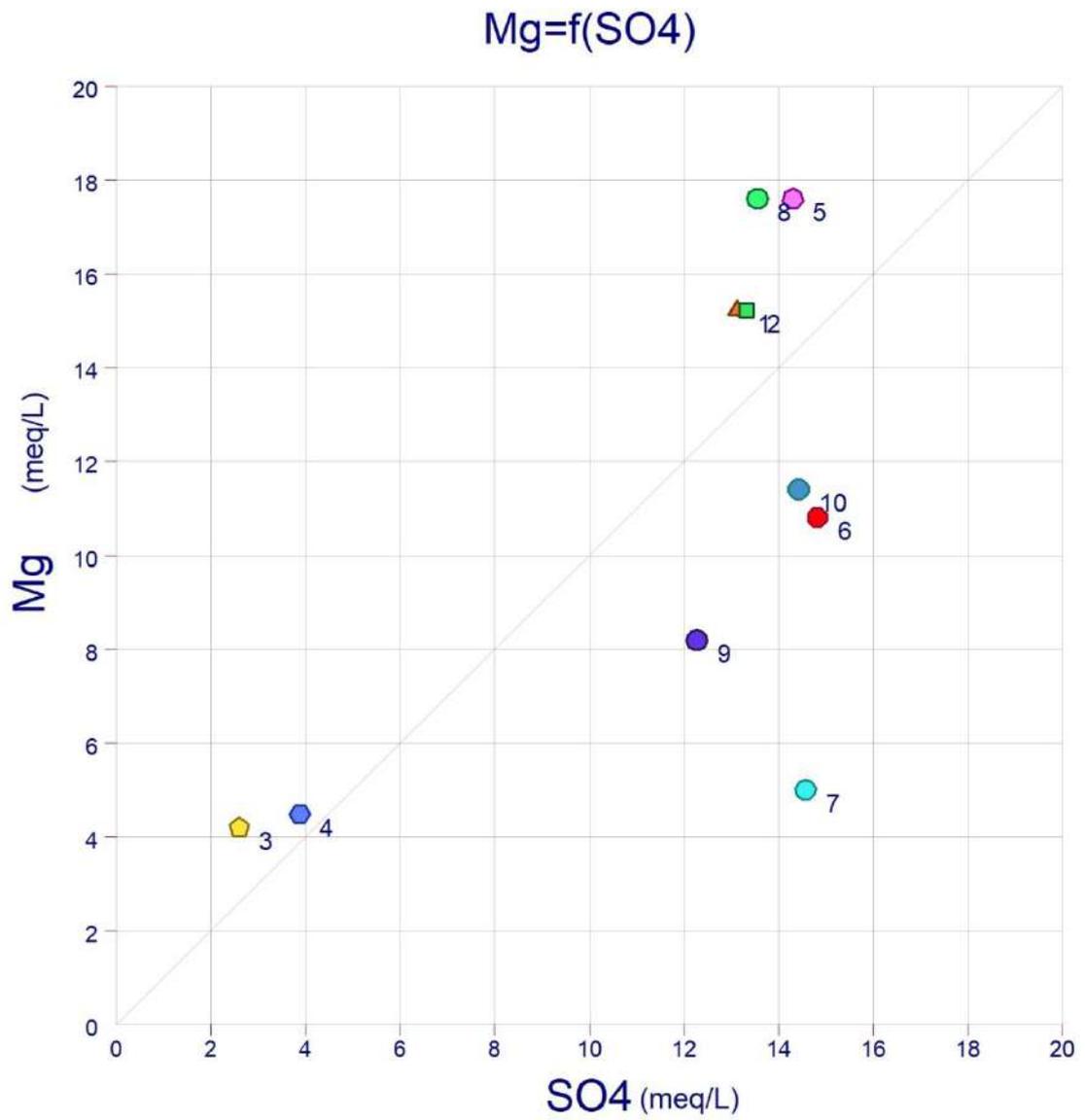


Figure.44. Relation SO4-Mg



**Figure. 45. Relation SO4-Mg (suit)**

### 3e.Potassium-Chlorure (K-Cl):

La figure 5.34 ci-dessous montre une dispersion des points indiquant que les Deux éléments chimiques ont des origines différentes, les chlorures ont un faible Relation avec le potassium, mais ils indiquent un excès donc une autre origine pour les chlorures. Le coefficient de corrélation de la régression linéaire est de 0.23

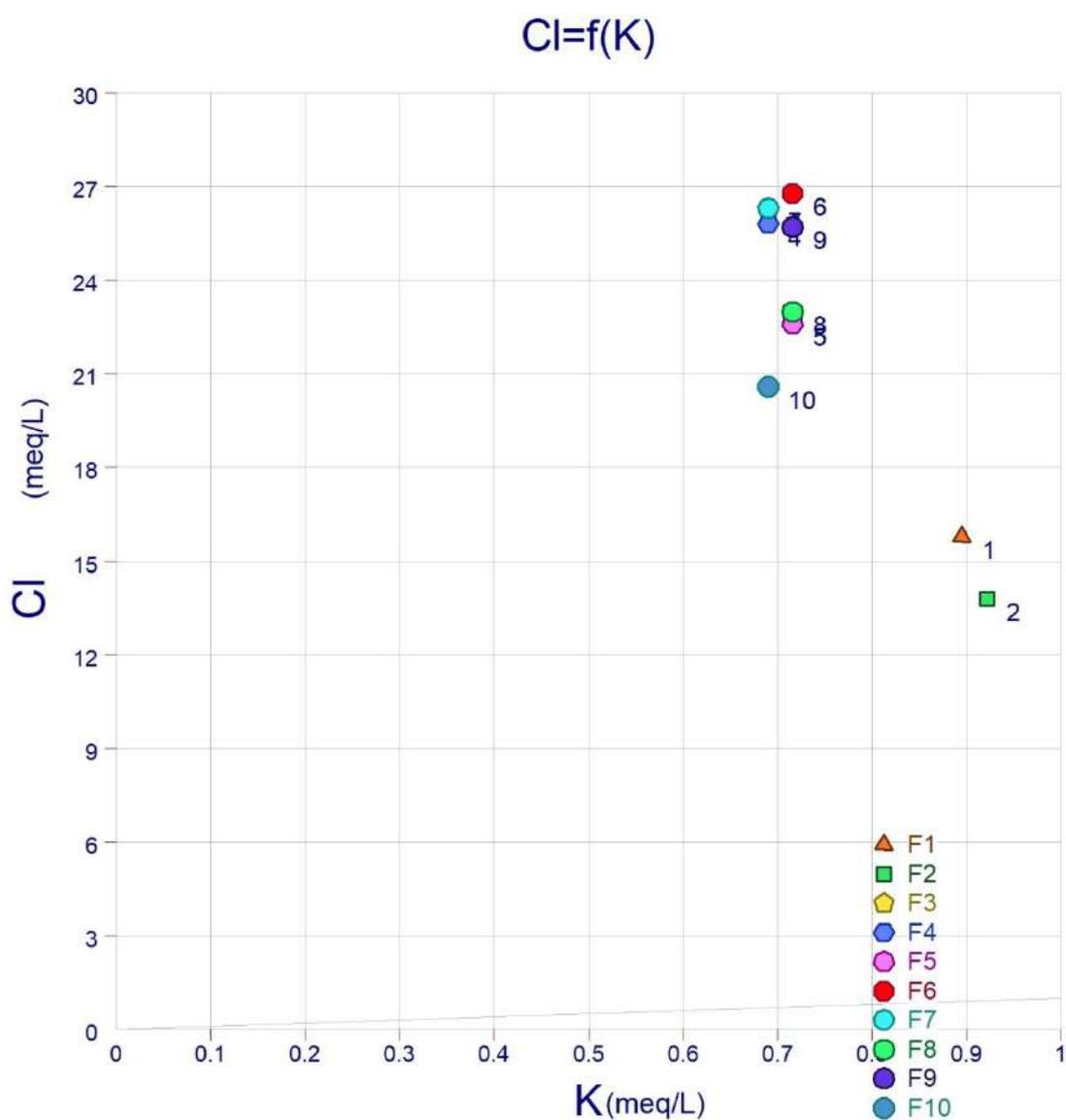
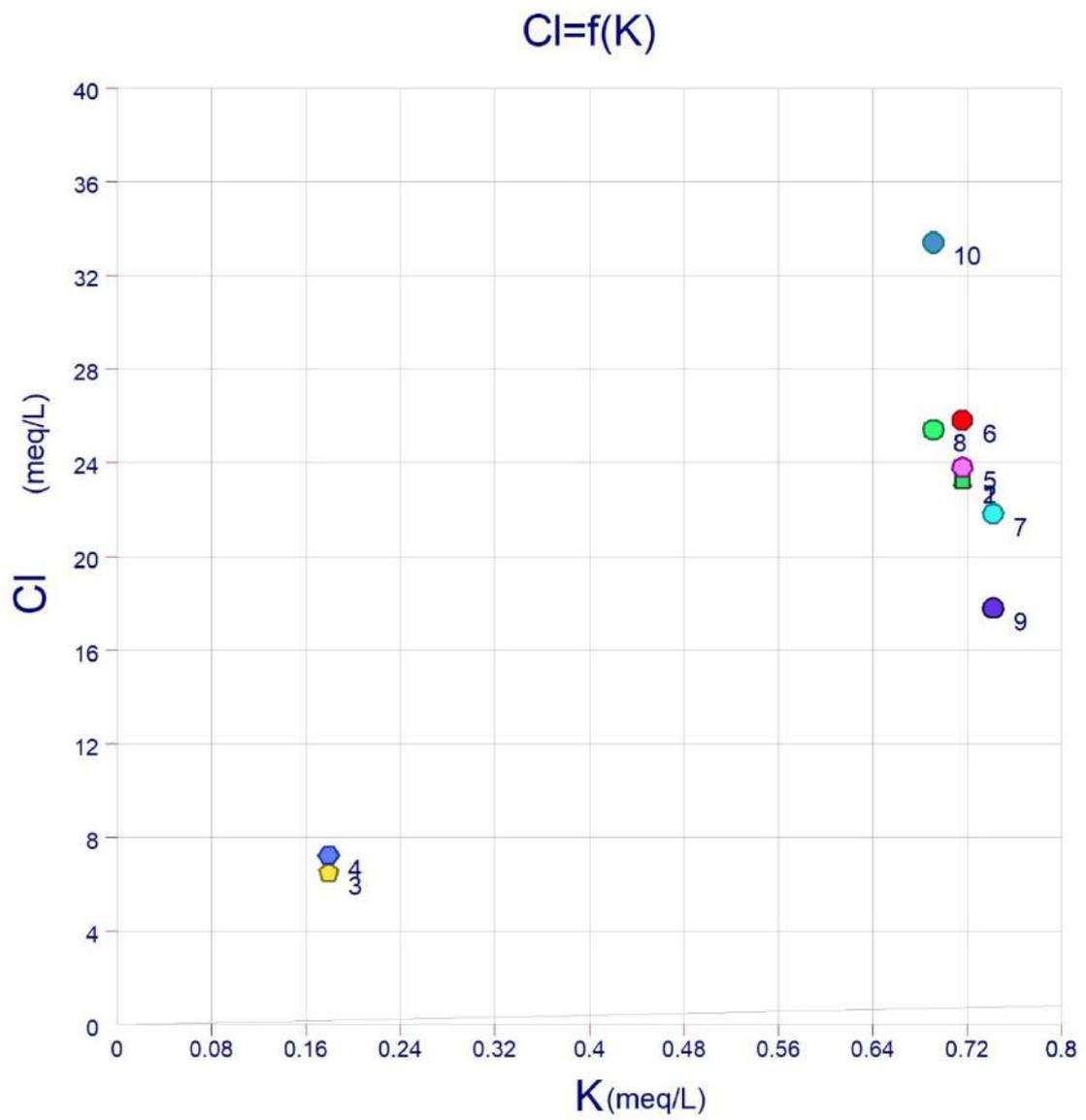


Figure .46. Relation K-Cl



**Figure .47. Relation K-Cl (suit)**

### 3f. Calcium – Dureté (Ca-TH) :

La relation est bien visible sur la figure 5.35 entre la dureté et le calcium, Avec un coefficient de corrélation de la régression linéaire de 0.66, qui confirme le Classement de diagramme de Piper où les eaux sont classés d'une dureté élevée et une salinité très élevée.

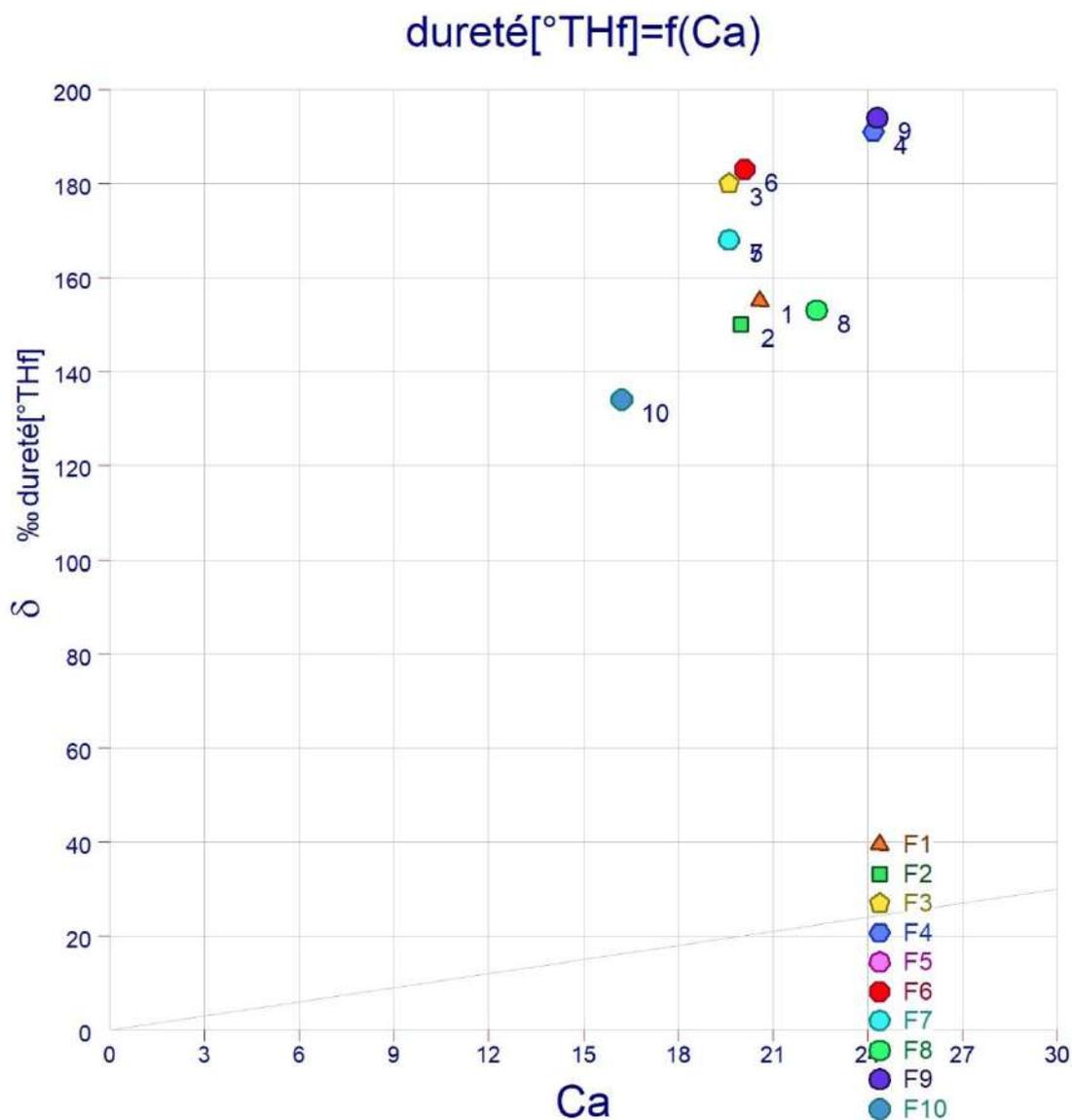


Figure .48. Relation Ca- TH

dureté[°THf]=f(Ca)

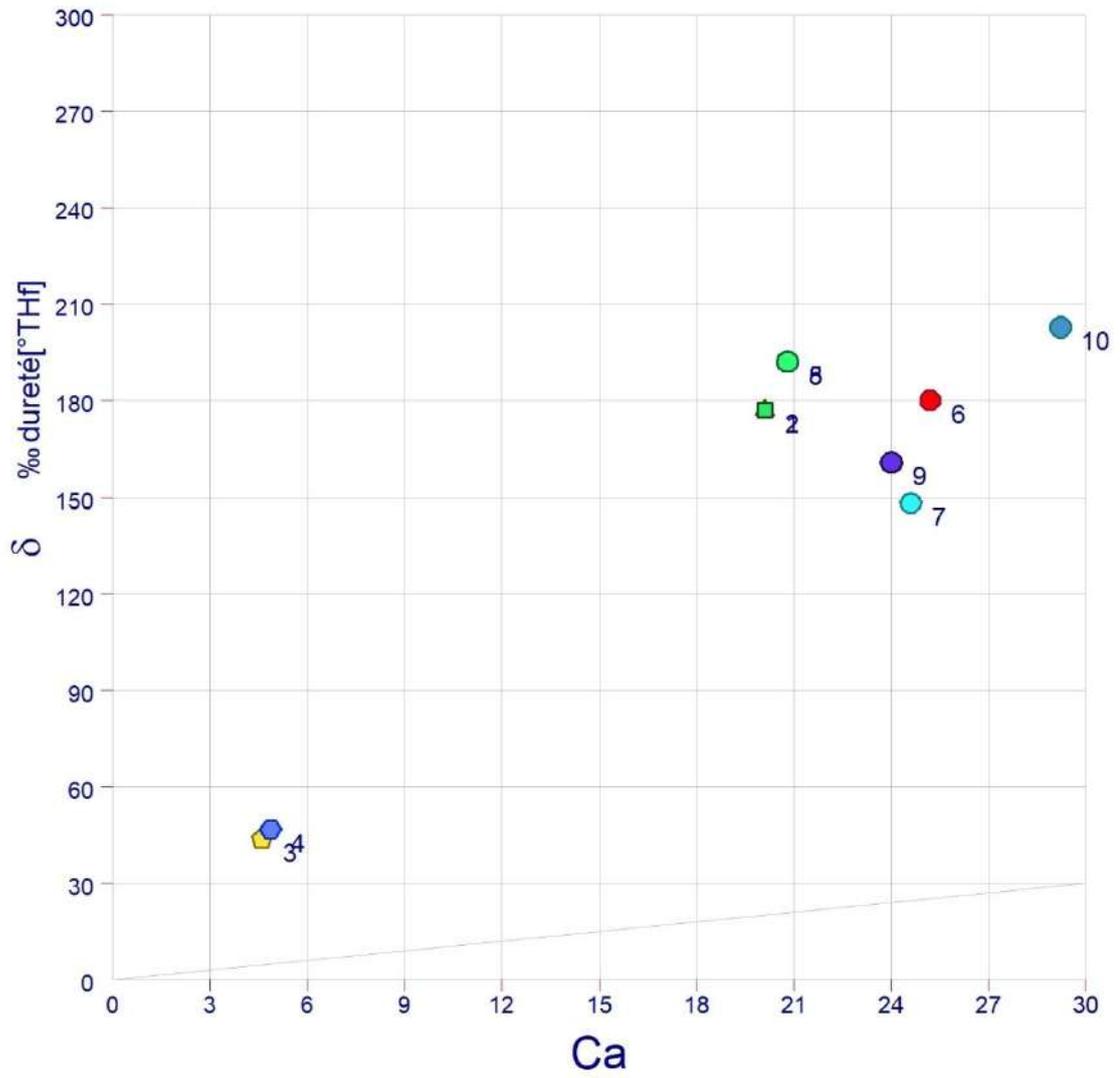


Figure .49. Relation Ca- TH (suit)

### III.5. Eau d'Irrigation :

L'étude chimique des eaux pour l'irrigation est nécessaire pour mettre en Évidence le danger que présente certains éléments chimiques, pour les plantes qui Supportent mal les sols saturés en sodium, il est nécessaire de savoir l'évolution Chimiques des eaux et leur caractéristiques qui ont une influences sur les Différentes cultures.

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. (Voir la Méthode de Richards).

**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.

SAR < 10 : eau à faible danger d'alcalinisation des sols, (eaux excellentes).

10 < SAR < 18: eau avec un danger d'alcalinisation assez appréciable (eaux bonnes).

18 < SAR < 26 : eau avec un danger d'alcalinisation important (eaux convenables).

SAR > 26 : eaux présentant un danger d'alcalinisation très fort (eaux médiocres).

**Tableau.14. Classification des eaux d'irrigation de Wilcox (méthode Richards).**

N°	Qualité	Classe	Utilisation
1	eaux excellentes	C1-S1/C1-S2	Utilisation sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures sur la plupart des sols.
2	eaux bonnes	C2-S1/C2-S2	Convenable aux plantes qui ont une tolérance aux sels, cependant son utilisation peut générer des problèmes pour les argiles.
3	eaux convenables	C2-S3/C3-S1/C3-S2	La salinité doit être contrôlée, irrigation des cultures tolérables aux sels sur des sols bien drainés
4	eaux médiocres	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	eaux 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.

**III.5.1. Diagramme Wilcox Log :**

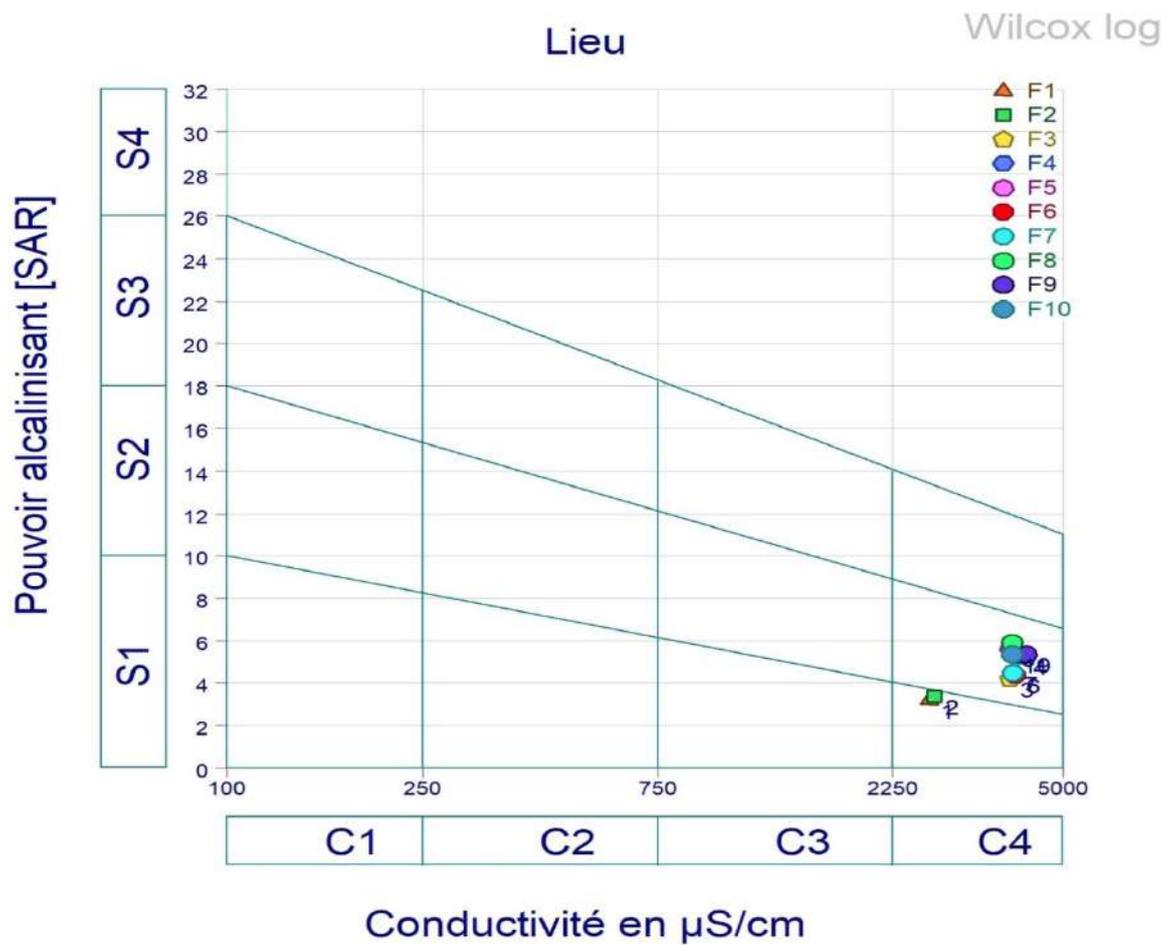
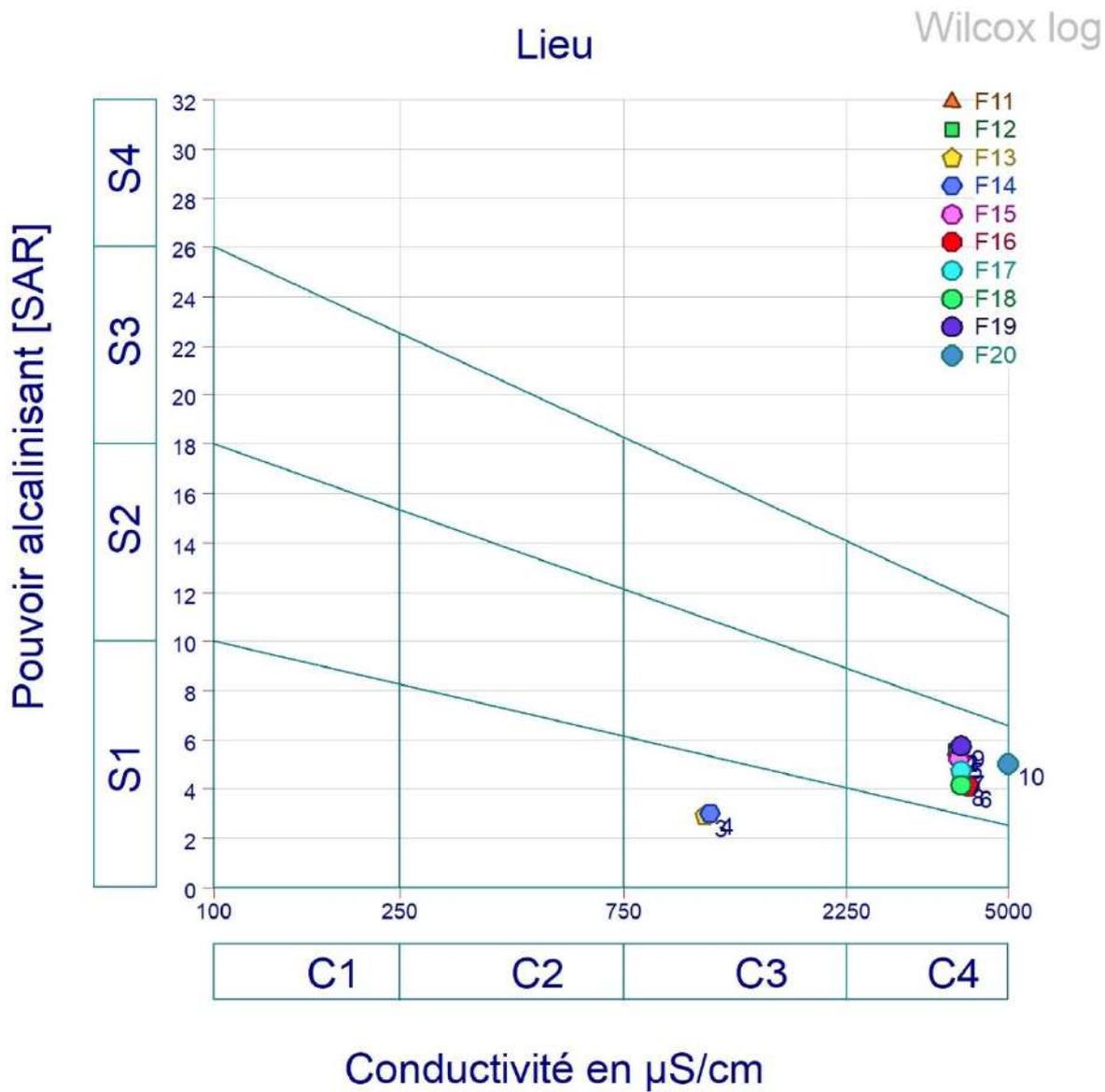


Figure.50. Diagramme Wilcox Log



**Figure.51. Diagramme Wilcox Log (suit)**

Selon les figures 50 et 51 les eaux d'irrigation de la d'El oued souf se répartissent en même classe, le tableau 15 ci-dessous montre cette classification:

Forages	S.A.R	Classe	Qualité de l'eau
1	3.20389436	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
2	3.36916097	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
3	4.20327959	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
4	5.27480136	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
5	5.62423737	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
6	4.36824389	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
7	4.45694282	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
8	5.89358433	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
9	5.3331241	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
10	5.34692147	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
11	5.5880248	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
12	5.5880248	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
13	2.90296913	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
14	3.02023428	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
15	5.26096977	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
16	4.1008262	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
17	4.74867247	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
18	4.16907038	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
19	5.74530197	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes
20	5.01994254	C1-S1/C1-S2	eaux excellentes

**Tableau.15. Classification des forages CI selon l'irrigation**

D'après le Tableau 15 ci-dessus, la région d'étude est caractérisée par la même classe, la classe C1-S2

Caractérisent par eaux **eaux excellentes** Utilisation sans danger pour l'irrigation des cultures Tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée. Cette classe se trouve dans presque toute la région.

### III.5.2. Diagramme Wilcox :

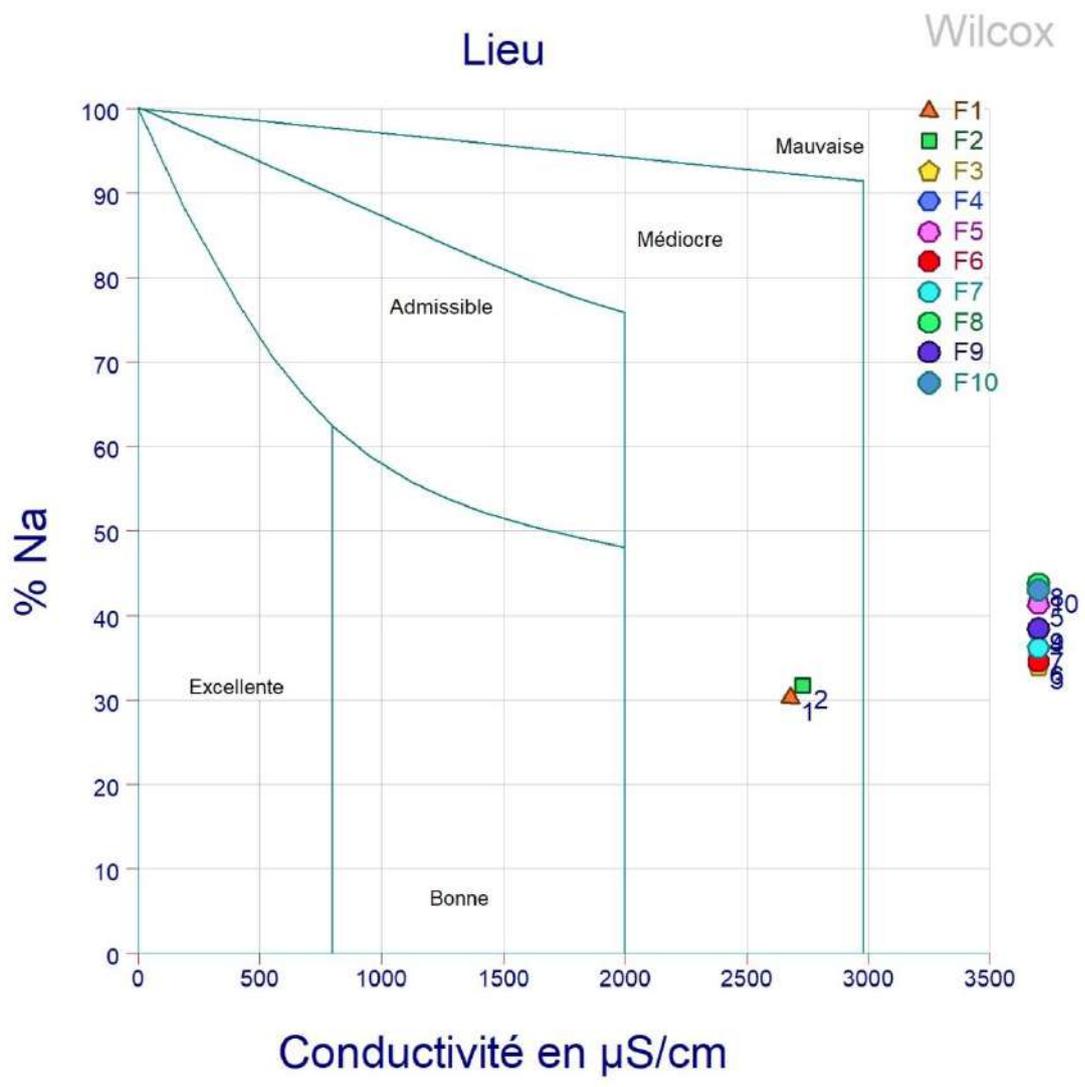
Le développement des plantes dans les sols saturés en sodium il est nécessaire de savoir la Classification des eaux de la région selon le diagramme de « Wilcox », fondée sur la conductivité électrique et le pourcentage du sodium soluble dans l'eau. Le pourcentage du sodium peut être défini comme suit :

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

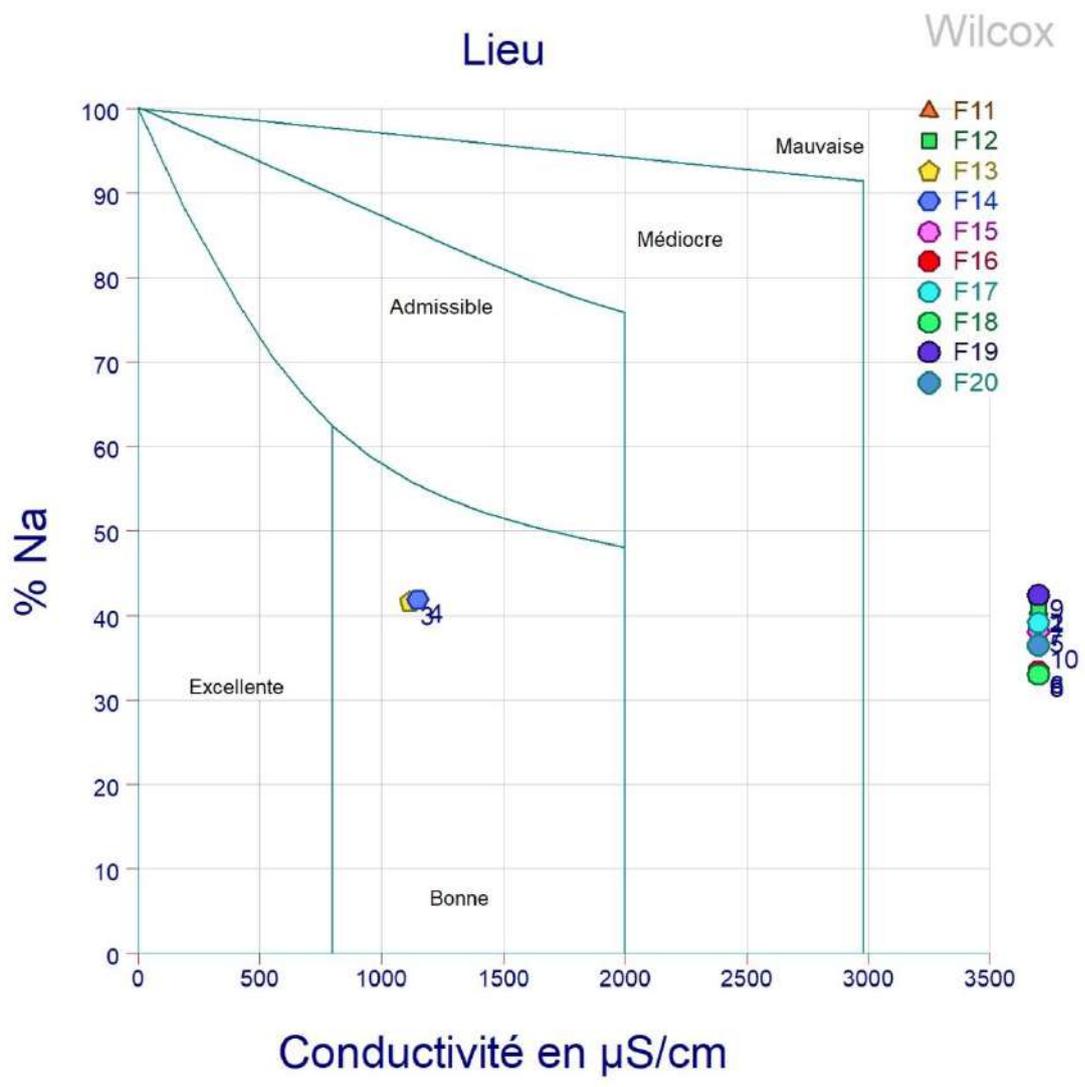
Les éléments ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) sont exprimés en  $\text{m}\ddot{\text{e}}\text{q}/\text{l}$ .

**Tableau .16. Pourcentage de Sodium  $\text{Na}^+$  des forages CI**

forages	$\text{Na}^+$ (%)
1	28.339174
2	29.676098
3	32.705989
4	37.215168
5	40.182149
6	33.347877
7	34.75654
8	42.40016
9	37.283513
10	41.587472
11	39.449218
12	39.449218
13	40.410247
14	40.683774
15	37.079462
16	32.150347
17	37.581266
18	31.847745
19	41.169293
20	35.389915



**Figure.52. Diagramme de Wilcox**



**Figure.53. Diagramme de Wilcox (suite)**

### III.5.3. Diagramme de Riverside :

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.

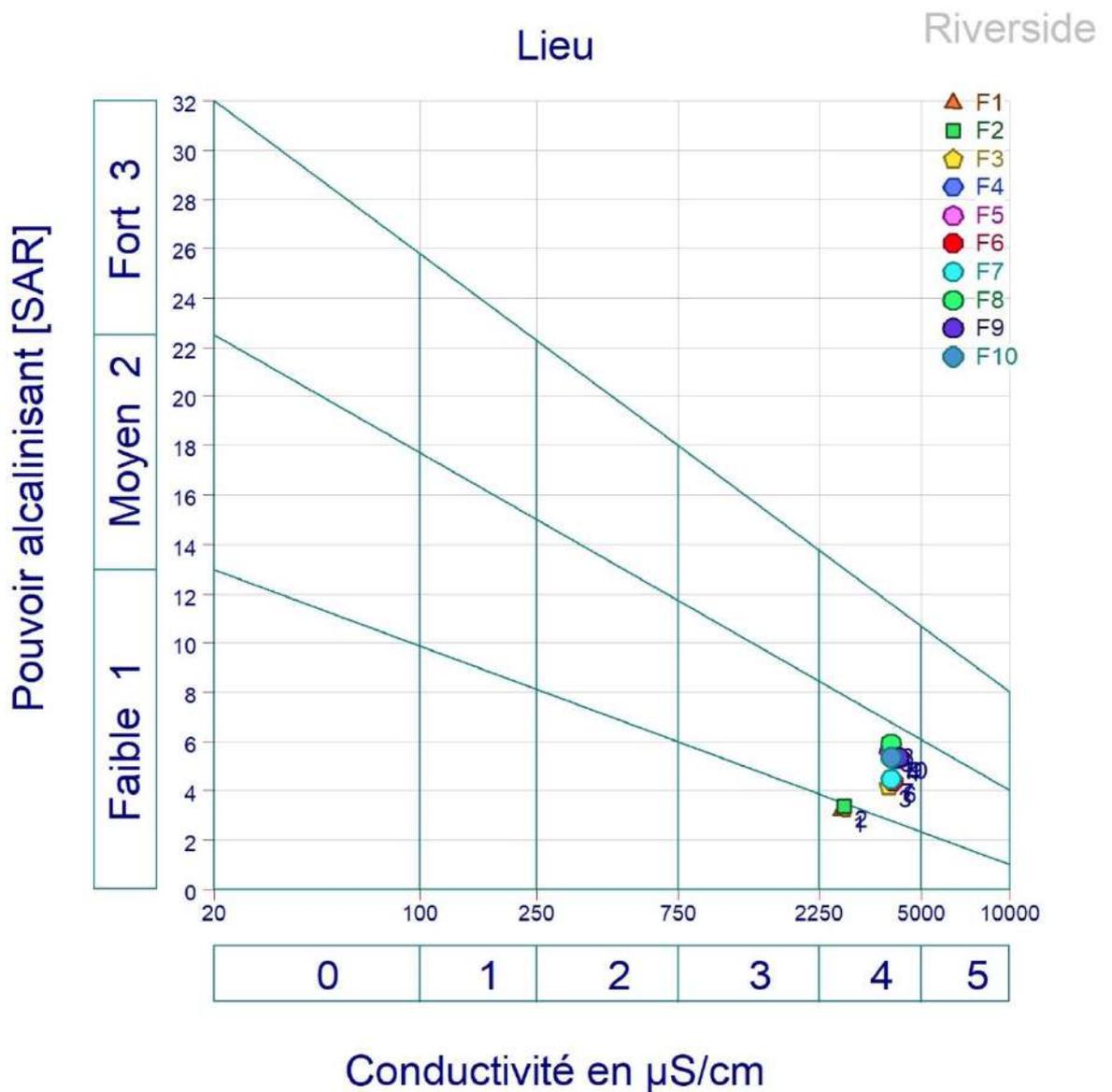
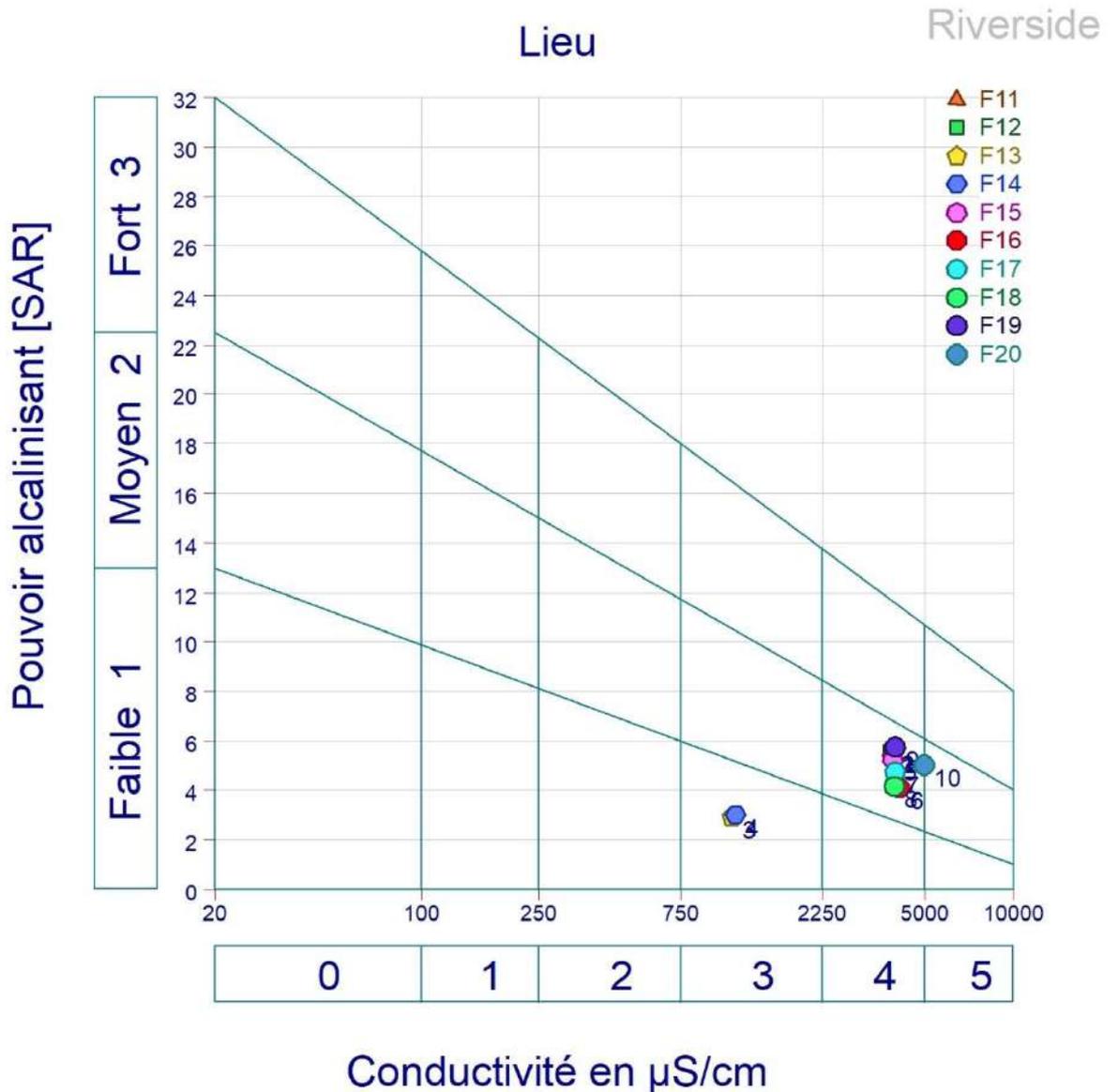


Figure.54. Diagramme de Riverside



**Figure.55. Diagramme de Riverside (suite)**

**Conclusion :**

L'étude hydrochimique des eaux de la nappe continentale intercalaire de la Région d'El Oued souf 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  $\text{SO}_4^{2-}$  Et  $\text{NO}_3^-$  dépassent la norme Algérienne.

La Conductivité électrique, résidu sec,  $\text{Ca}^{+2}$ , Mg, Na, Cl,  $\text{NO}_3^-$  ne dépassent pas la norme.

D'après le SAR et Wilcox on remarque que les eaux de la nappe CI de la Région d'El Oued souf sont médiocre à l'irrigation. les résultats obtenus par les différentes méthodes utilisées, on peut Dire que la Minéralisation des eaux de la région El Oued est due principalement à la Géologie des terrains traversés.

# **Chapitre IV**

## **Indice de Qualité de l'Eau**

## **IV- Water Quality Index (WQI) En Anglais:**

### **Indice de Qualité de l'Eau (IQE) En Français :**

#### **IV-1. Introduction :**

Dans cette étude, l'IQE est basée sur onze paramètres physico-chimiques (CE, TH, PH, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont utilisés pour évaluer la qualité globale des eaux souterraines de l'année 2020 sur 10 forages CI à la Région d'El Oued.

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

Onze paramètres importants ont été sélectionnés pour calculer l'Indice de 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 Algériennes 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).

Dans cette approche, une valeur numérique appelée poids relatif (**Wi**), Spécifique à chaque paramètre physico-chimique, est calculée selon la Formule suivante :

$$\mathbf{W_i = K/S_i} \quad (1)$$

**Wi** : poids relative

**K** : constante de proportionnalité et peut également être calculée à l'aide de L'équation suivante :

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

**n** : nombre de paramètres

**Si** : valeur maximale de norme standard Algérienne des eaux souterraines de chaque Paramètre en mg/l sauf pour la conductivité électrique, Titre hydrométrique, PH

**Qi** : échelle d'évaluation de la qualité de chaque paramètre est donnée par la formule Suivante :

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

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

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

$$\mathbf{IQE = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}} \quad (4)$$

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

N°	CE	Min	Ré.se	PH	TH	CA+2	MG+2	Na +	K+	NH4+	CL-	So4-	HC03-	NO-3	NO-2
////	us/cm	mg/l	mg/l	//////	° F	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
F1	2680	1715	2360	7.73	155.01	412.82	126.39	290	35	0.14	560.16	401.80	162.26	0.57	0.000
F2	2730	1747	2500	7.38	150.01	400.80	121.53	300	36	0.13	489.25	412.31	152.50	0.24	0.000
F3	3880	2483	3640	7.36	180.02	392.78	199.30	410	27	0.04	928.87	510.72	122.00	14.74	0.000
F4	4130	2643	3800	7.68	191.01	484.96	170.14	530	27	0.02	914.69	638.72	136.64	13.75	0.000
F5	3900	2496	3560	7.64	168.01	392.78	170.14	530	28	0.02	801.24	622.12	129.32	19.48	0.000
F6	4000	2560	3720	7.45	183.33	402.78	201.30	430	28	0.14	948.87	650.17	134.20	21.88	0.000
F7	3950	2528	3720	7.32	168.01	392.78	170.14	420	27	0.02	932.51	529.47	132.98	18.70	0.000
F8	3930	2512	3710	7.39	153.01	448.90	99.65	530	28	0.01	815.42	678.29	131.76	24.09	0.000
F9	4200	2688	3920	7.73	193.98	486.96	176.12	540	28	0.04	910.32	669.94	147.62	1.05	0.000
F10	3940	2521	3700	7.36	134.01	324.65	128.82	450	27	0.05	730.33	807.71	122.00	17.77	0.000
F11	3850	2464	3420	7.86	176.68	402.78	185.14	540	28	0.04	822.24	630.69	132.22	17.91	0.000
F12	3850	2464	3420	7.86	176.68	402.78	185.14	540	28	0.04	822.24	639.69	132.22	0.21	0.000
F13	1117	715	600	7.67	44.00	92.18	51.04	140	7	0.04	230.89	124.41	52.46	0.45	0.000
F14	1150	736	620	7.25	46.67	97.45	54.32	150	7	0.01	256.16	186.17	57.34	26.48	0.000
F15	3910	2502	3220	7.29	192.02	416.83	213.88	530	28	0.08	843.78	687.12	139.08	24.09	0.000
F16	4110	2630	3480	7.31	180.01	505.01	131.25	400	28	0.04	914.69	711.57	139.08	13.78	0.000
F17	3960	2534	3300	7.51	148.00	492.98	60.76	420	29	0.00	772.88	699.80	139.08	26.93	0.000
F18	3950	2528	3720	7.32	192.02	416.83	213.88	420	27	0.02	900.51	651.14	139.08	17.77	0.000
F19	3960	2534	1600	7.35	161.01	480.96	99.65	530	29	0.02	631.06	589.84	139.08	17.37	0.000
F20	4980	3185	3520	7.72	203.02	585.17	138.55	520	27	0.07	1184.13	693.31	139.08	21.37	0.048

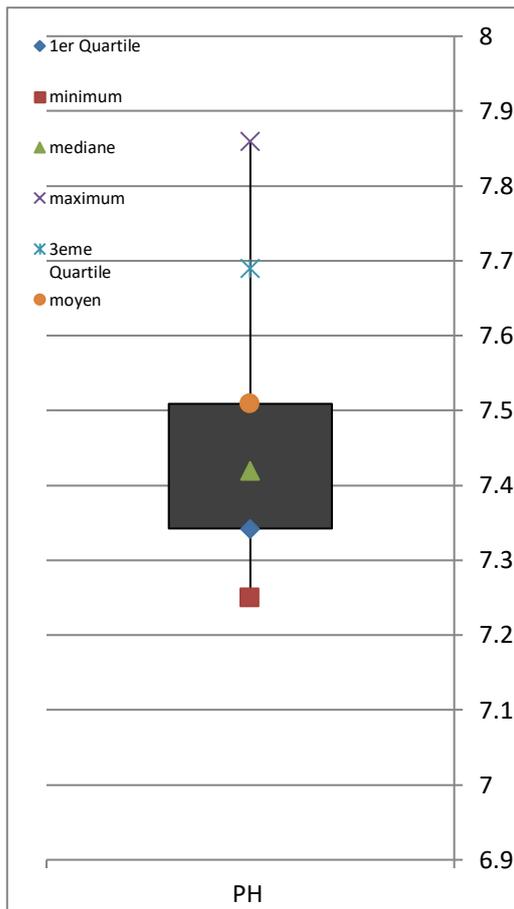
Tableau18: Analyses physico-chimiques des forages CI d'El Oued Souf (ANRH)

### IV.3. Statistique descriptive :

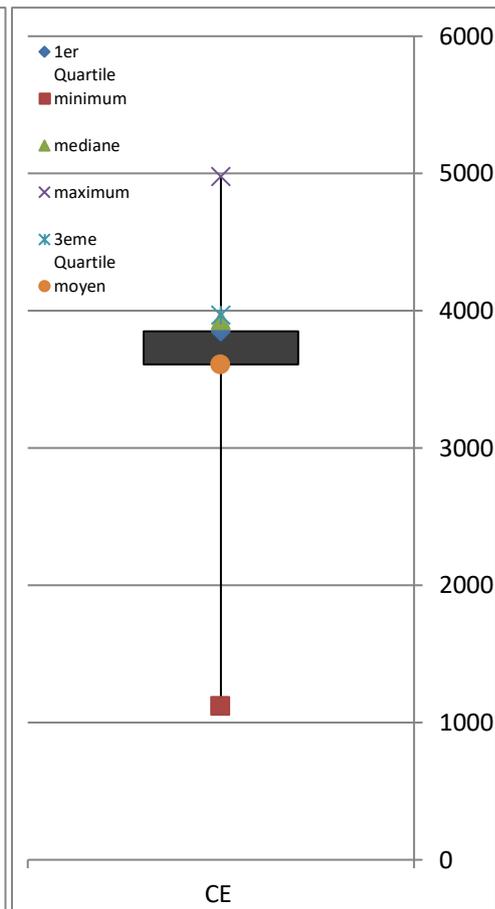
Les caractéristiques statistiques descriptives des variables physicochimiques Utilisées dans cette étude concernent

**Tableau.19. Statistiques descriptives des paramètres physico-chimiques d'El Oued Souf**

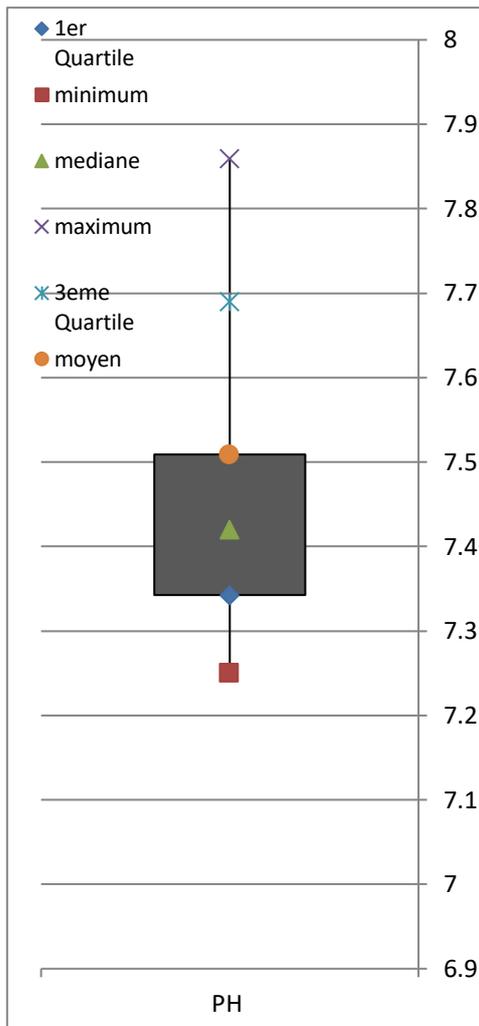
statistique	CE	PH	TH	CA+2	MG+2	Na +	K+	CL-	So4-	HCo3-	NO-3
	us/cm	///////	° F	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
minimum	1117	7.25	44.004	92.184	51.04	140	7	230.889	124.413	52.46	0.214
maximum	4980	7.86	203.02	585.168	213.884	540	36	1184.13	807.71	162.26	26.925
1er Quartile	3850	7.343	152.26	392.784	116.056	407.5	27	705.514	524.781	131.15	10.574
mediane	3935	7.42	172.35	407.804	154.343	440	28	822.237	639.2045	135.42	17.772
3eme Quartile	3970	7.69	185.25	481.96	185.135	530	28	914.687	680.49525	139.08	21.493
moyen	3608.85	7.509	159.83	401.6606	144.856	431	26.45	770.5105	576.7505	129	14.93
varaiance	939638	0.042	1860	14237.16	2702.33	15546	50.261	55056.89	30352.381	728.2134	86.548
ecart-type	969.3493	0.204	43.128	119.3196	51.9839	124.68	7.0895	234.6421	174.21935	26.98543	9.3031



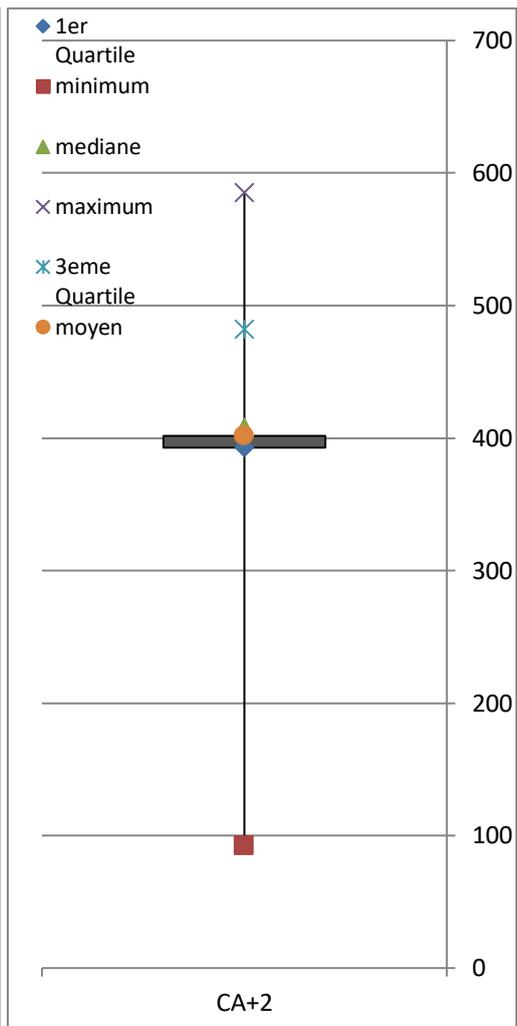
**Figure.56. Diagramme en boîte à moustaches de paramètre**



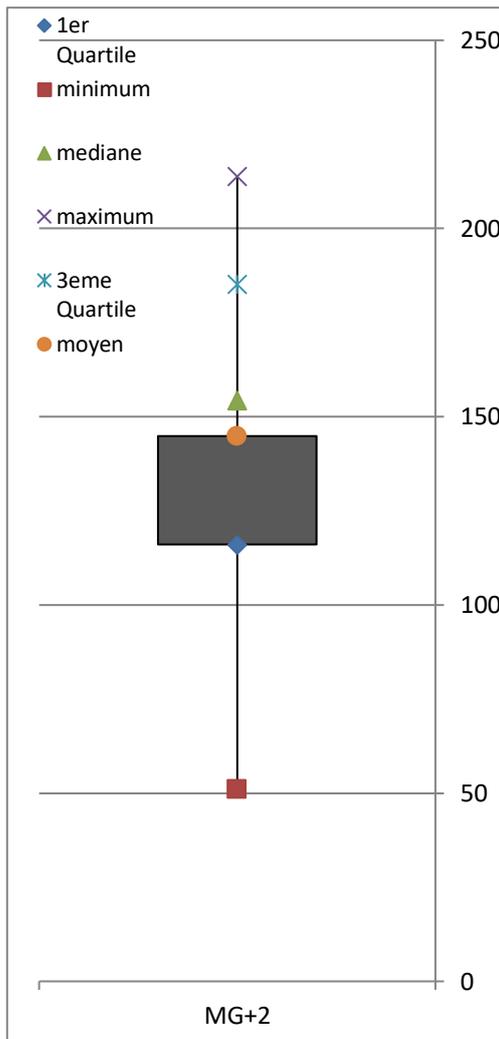
**Figure.57. Diagramme en boîte à moustaches de paramètre PH**



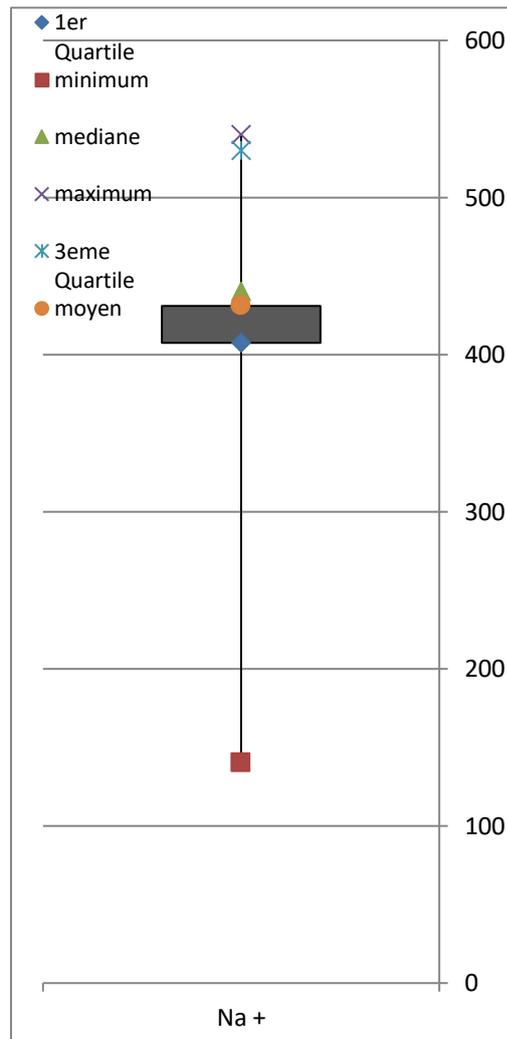
**Figure.58. Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Ca<sup>2+</sup>**



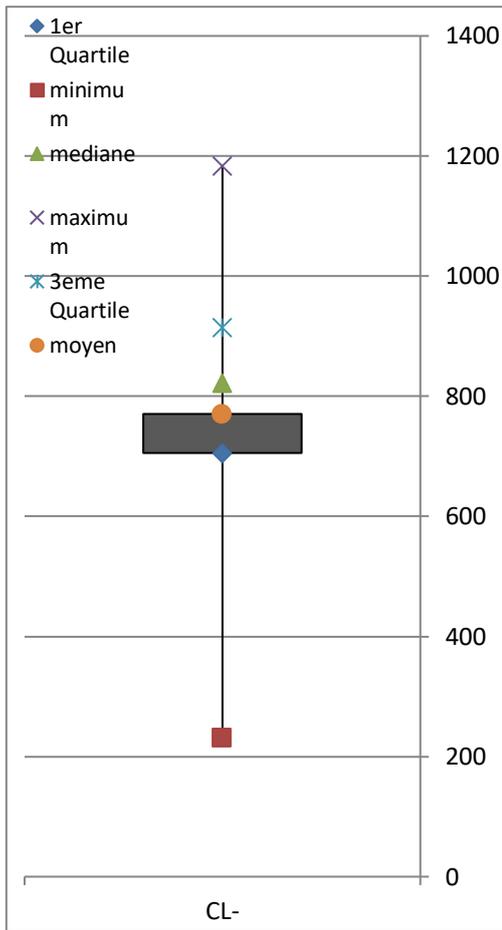
**Figure.59. Diagramme en boîte à Moustaches de paramètre TH**



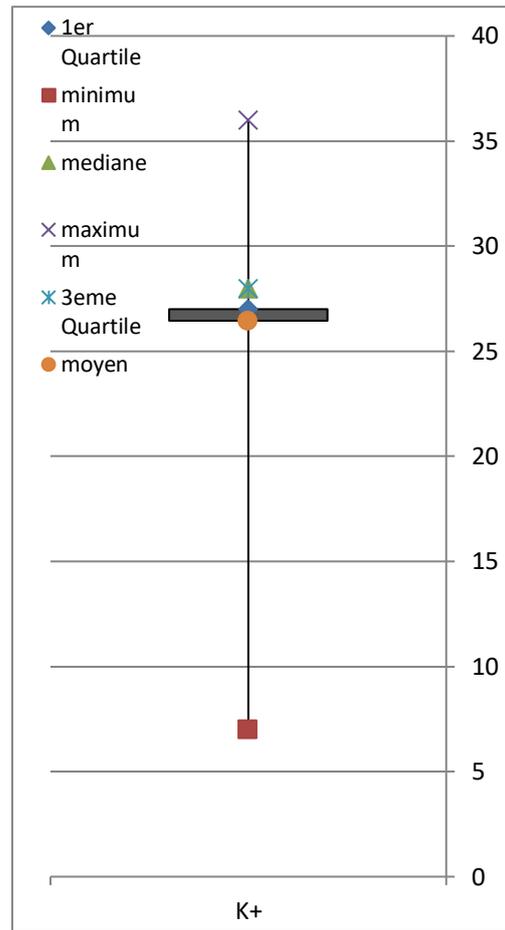
**Figure.60.Diagramme en boîte à moustaches de paramètre  $Mg^{2+}$**



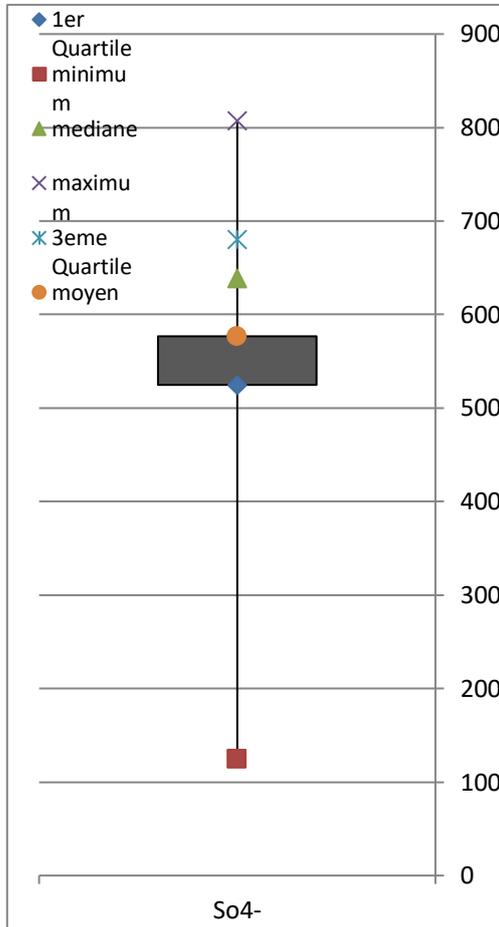
**Figure.61.Diagramme en boîte à moustaches de paramètre  $Na^{2+}$**



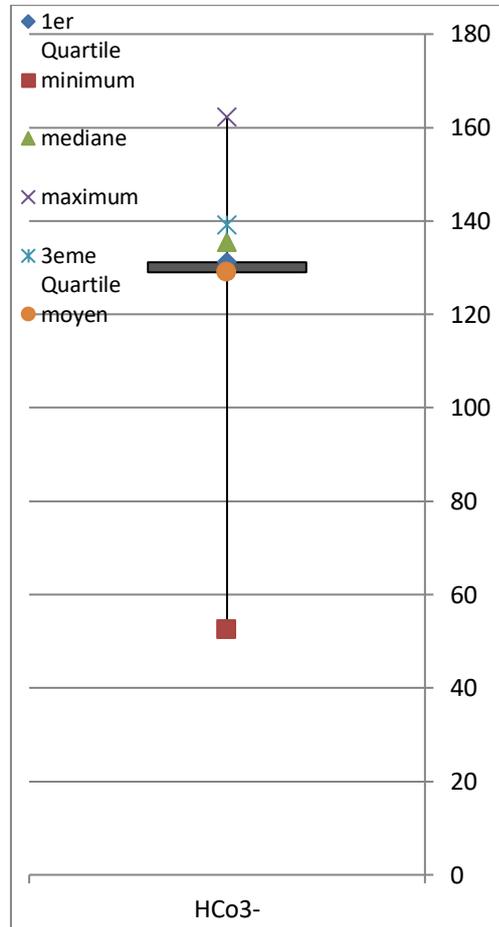
**Figure.62. Diagramme en boîte à moustaches de paramètre K+**



**Figure.63. Diagramme en boîte à moustaches de paramètre Cl-**



**Figure.64.Diagramme en boîte à moustaches de paramètre SO<sub>4</sub>**



**Figure.65.Diagramme en boîte à moustaches de paramètre HCO<sub>3</sub>**

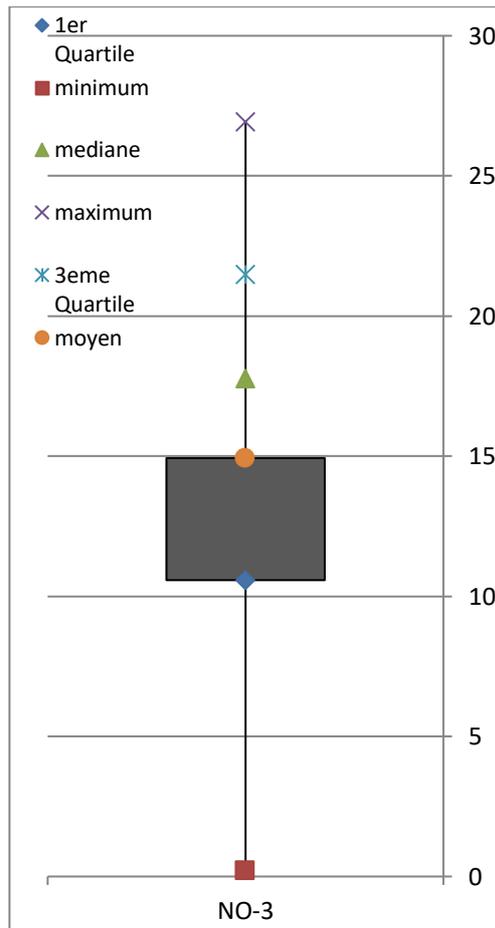


Figure .66. Diagramme en boîte à moustaches de paramètres NO<sub>3</sub><sup>-</sup>

#### 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 Algérienne	Si (Valeur Max standard, Algérie)	1/Si	K	Wi (poids relative) $W_i = K/S_i$
CE	us/cm	2800	2800	0.000357143	4.288700416	0.001531679
PH	///////	6.5-8.5	8.5	0.117647059	4.288700416	0.50455299
TH	° F	50	50	0.02	4.288700416	0.085774008
[Ca <sup>2+</sup> ]	mg/l	200	200	0.005	4.288700416	0.021443502
[Mg <sup>2+</sup> ]	mg/l	150	150	0.006666667	4.288700416	0.028591336
[Na <sup>+</sup> ]	mg/l	200	200	0.005	4.288700416	0.021443502
[K <sup>+</sup> ]	mg/l	20	20	0.05	4.288700416	0.214435021
[Cl <sup>-</sup> ]	mg/l	500	500	0.002	4.288700416	0.008577401
[SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ]	mg/l	400	400	0.0025	4.288700416	0.010721751
[HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	mg/l	250	250	0.004	4.288700416	0.017154802
[NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> ]	mg/l	50	50	0.02	4.288700416	0.085774008
SOMME				0.233170868		1

K : constante de proportionnalité

$$\text{On a: } k = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i}\right)} \text{ donc } \sum(1/S_i) = 0.233170868$$

Alors :  $K = 1 / 0.233170868$

$$\mathbf{K = 4.288700422}$$

**a. Application numérique :**

Exemple pour calculer Indice de Qualité de l'eau souterrain (**IQE**) pour Forage **F4**

**Tableau .21.Résultats de l'IQE de forage F4**

Paramètres Physico-chim	K	Ci(mg/l)	Si	Qi=(Ci/Si)x100	Wi(Poids relative)	Qi×Wi
CE	4.288700416	0	2800	0	0.001531679	0
PH	4.288700416	0	8.5	0	0.50455299	0
TH	4.288700416	0	50	0	0.085774008	0
[Ca2+]	4.288700416	484.96	200	242.48	0.021443502	5.199620384
[Mg2+]	4.288700416	170.135	150	113.4233333	0.028591336	3.242924645
[Na+ ]	4.288700416	530	200	265	0.021443502	5.682528051
[K+ ]	4.288700416	27	20	135	0.214435021	28.94872781
[Cl-]	4.288700416	914.687	500	182.9374	0.008577401	1.569127407
[SO4 2- ]	4.288700416	638.717	400	159.67925	0.010721751	1.712041165
[HCO3 - ]	4.288700416	136.64	250	54.656	0.017154802	0.93761284
[NO3 - ]	4.288700416	13.75	50	27.5	0.085774008	2.358785229

$$\sum(W_i) = 1$$

$$\sum(Q_i \times W_i) = 49.651368$$

Indice de la Qualité de l'Eau Souterrain (**IQES**) Pour le forage F4 :

$$IQE(F4) = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i \times W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}$$

$$IQE(F4) = 49.651368/1 = 49.651368$$

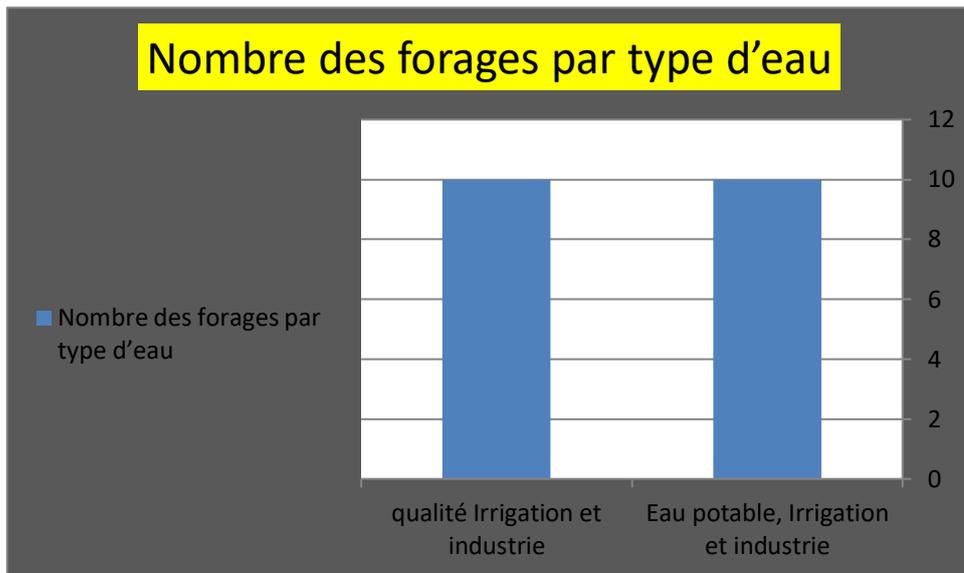
La même application pour les restes des forages CI dans la région pour évaluer l'indice de la qualité de l'eau souterrain de chaque forage Voir le **Tableau.23** sous dessous

**Tableau.22. Valeurs de l'Indice de Qualité de l'Eau (IQE) et classe de qualité des eaux souterraines de 20 forages CI de la région Oued Souf**

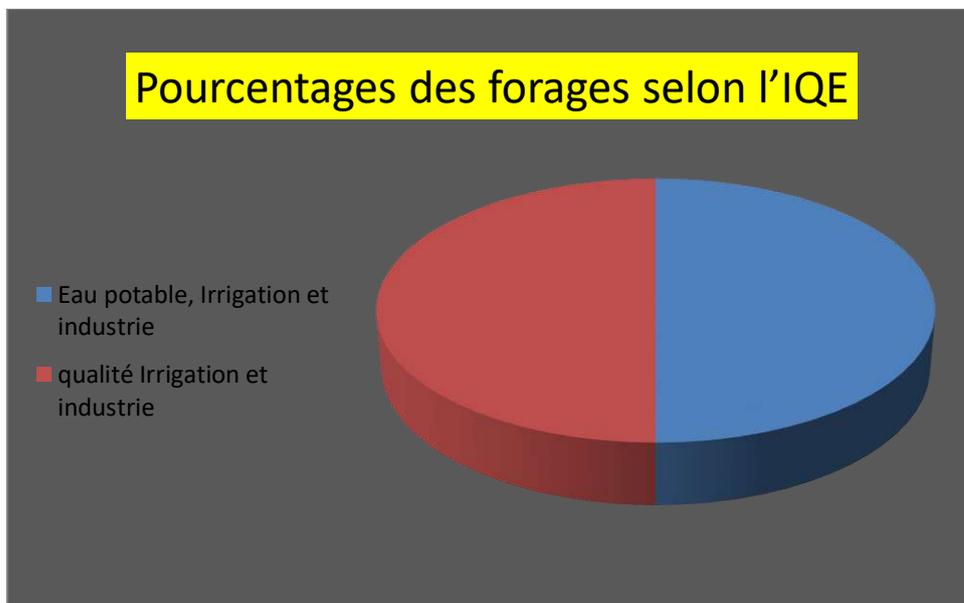
Forages	IQE	Type d'eau	Usage possible
F1	50.719455	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F2	51.459887	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F3	47.682326	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F4	49.651368	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F5	50.429241	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F6	50.830941	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F7	48.045811	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F8	50.668602	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F9	48.93853	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F10	47.013449	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F11	50.738292	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F12	47.727217	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F13	12.134424	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
F14	17.06842	Excellente qualité	Eau potable, irrigation et industrie
F15	52.624781	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F16	49.020426	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F17	50.814954	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F18	49.291105	Bonne qualité	Eau potable, Irrigation et industrie
F19	50.429513	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie
F20	51.948166	Mauvaise	qualité Irrigation et industrie

**Tableau 23. Répartition des forages CI 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	10	50%
qualité Irrigation et industrie	10	50%



**Figure .67. Histogramme de classement des forages CI Selon l'IQE**



**Figure .68. Histogramme de classement des forages CI Selon l'IQE**

**b.Discussion :**

Les résultats obtenus selon l'indice de la qualité des eaux souterrains mettent en Évidence les variations significatives avec la bonne qualité des eaux concernant les Forages:

F2;F1;F5;F6;F8;F11;F15;F17;F19;F20

sont acceptable à l'usage AEP, Irrigation et Industrie.

Les eaux de mauvaise qualité ne sont pas potable concernant les forages:

F3;F4;F7;F9;F10;F12;F13;F14;F16;F18

sont valable à l'usage D'Irrigation et Industrie.

## **Conclusion :**

La présente étude a porté sur la mesure de la qualité globale des eaux souterraine. L'indice de la qualité globale de l'eau IQE était un outil très utile pour évaluer la Qualité de l'eau dans le temps et dans l'espace. L'indice IQE nous montre qu'une différenciation importante entre les forages qui Ne sont pas de même qualité.

# **Conclusion**

# **Générale**

## CONCLUSION GENERALE

La vallée d'El Oued Souf située au Sud-Est algérien, occupe une superficie de 11738 km<sup>2</sup>, représente 18 communes administratives et englobe un nombre de population de 523 656 habitants. Le relief d'El-oued est caractérisé par trois principales formes : une région sableuse, une forme de plateau rocheux, et une zone de dépression.

L'analyse des données climatiques nous montre que la région est caractérisée par un climat de type saharien, caractérisé par un été chaud, sec et un hiver doux, le bilan hydrique montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable.

De point de vue géologique la zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, à sa base, on trouve des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par des formations continentales de Secondaire et de Tertiaire épaisses de quelques milliers de mètres et en fin le Quaternaire y succède.

La zone d'étude fait partie au système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce dernier est constitué de trois aquifères, un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)). L'interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées sur la base de logs de forages d'eau, montre que l'aquifère libre d'El Oued est constitué de sables, de grès à ciment gypseux friable et des argiles sableuses. Le substratum est argileux, sa profondeur oscille entre 40m et 70m. Les limites latérales de l'aquifère libre, n'ont pas été atteintes étant donné que cette dernière s'étend au-delà de la zone d'étude.

En hydrochimie les analyses physico-chimiques sont traités 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 les plupart des forages caractérisent Par la dominance du faciès chlorurée sodique, et de forte Minéralisation d'après la Comparaison des éléments physico-chimiques SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> Et NO<sub>3</sub> dépassent la norme Algérienne.

Evaluation de la qualité globale des eaux souterraine par la formule de L'indice de la qualité globale de l'eau WQI était un outil très utile pour évaluer la Qualité de l'eau dans le temps et dans l'espace. L'indice IQE nous montre qu'une différenciation importante entre les forages qui Ne sont pas de même qualité.

## Bibliographie

- ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques).** 1993. Etude hydrogéologique de la région d'El-Oued : contribution au problème de la remontée des eaux de la nappe phréatique. RepTech. ANRH, Ouargla .
- ANRH .1999.** Inventaire de forages et enquête sur les débits extraits de la wilaya d'El Oued. Agence nationale des ressources hydrauliques, Direction régionale Sud-est, Ouargla.
- Achour, S. 1990.** La qualité des eaux du Sahara Septentrional en Algérie. Etude de l'excès en fluor. Tribune de l'eau, Cebedeau, 42 (542), 53-57.
- Achour. S., Youcef. L. 2001.** Excès des fluorures dans les eaux du Sahara septentrional oriental et possibilité de traitement. E.I.N. International, N°6, pp 47-54.
- Ake, G. E., Dongo, K., Kouadio, B. H., Dibi, B., Saley, M. B. et Biemi, J. 2009.** Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud- Est de la Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific Research, ISSN 1450- 216X, Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171.
- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. et Hack, G. 1987.** A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035).
- Bel. F., et Demargne F. 1966 :** Etude géologique du Continental Terminal ; DEC, ANRH, Alger, Algérie, 24 planches .
- Besbes, M. et Jarraya, H.F. 2007.** Définition d'un réseau de surveillance piézométrique du système aquifère du Sahara septentrional. Sécheresse 2007.
- Boubir, H. M. N. et Abdallah, F. 2009.** Le rôle des services et des investissements dans l'hypertrophie de la ville d'El Oued au bas Sahara algérien. Environnement Urbain/Urban Environment .
- BG (Bureau d'étude Bonard et Gardel). 2002.** Vallée du Souf : Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Mission II. (2002).
- Bouchahm. N., Achour.S. 2008.** Hydrochimie des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien – Identification d'un risque de fluorose endémique. La houille blanche .

- Bouselsal, B. et Kherici, N. 2014.** Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie). *Afrique Science*, 1 septembre 2014.
- BUSSON, G. 1967.** Le Mésozoïque saharien. 1ère partie : L'Extrême Sud-tunisien. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides », Géol.
- Busson, G. 1970 :** Le Mésozoïque saharien. 2ème partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, « Centre Rech. Zones Arides »
- Busson, G. 1971.** Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Edit., Paris.
- CASTANY, G. 1982.** Principes et méthodes de l'Hydrogéologie. Dunod Edit. Paris.
- Cornet, A. 1964.** Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géographie Physique et Géologie Dynamique.
- Cote, M. 1993.** Une région saharienne malade de trop d'eau. Le Souf. Rapport.
- Cote, M. 2001.** Souf 2001 : l'Agriculture peut-elle résoudre le problème de la remontée de la nappe ; BG. Lausanne .
- Daly, D., Dassargues, A., Drew, D., Dunne, S. et Goldscheider. 2002.** Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. *Hydrogeology Journal* 10, 340-345.
- Debieche, Taha-Hocine. 2002.** Evolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle : Application à la basse plaine de la Seybouse - Nord-Est Algérien. Thèse doctorat. Univ Franche-Comté (France). 235p.
- Derradji, F., Kherici, N., Romeo, M. et Caruba, R. 2004.** Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien). *Sécheresse* 2004 ; 15 (4) : 353-60.
- Deshmukh, A.N., Wadaskar, P.M., Malpe, D.B. 1995.** "Fluorine In Environment: A Review." *Gondwana Geol. Mag*, vol.9: pp. 1-20.
- Emberger, L. 1955.** Une classification biogéographique des climats. Trav. Inst. Bot. Montpellier.
- ENAGEO. 1993.** Rapport d'étude géophysique dans la vallée du souf.
- Fabre, J. 1976.** Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger, 421p.

- Guendouz A, Moulla A.S, Remini, B, Michelot J.L. 2006.** Hydro chemical and isotopic behavior of a Saharan phreatic aquifer suffering severe natural and anthropic constraints (case of Oued- Souf region, Algeria). *Hydrogeol J* 14:955–968.
- Khechana, S. 2014.** Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien). Th. Doctorat, Univ.de Annaba, 148 p.
- Khelfaoui, Hakim. 2014.** Modélisation des écoulements et de transport de masse dans une région industrielle : Exemple de la nappe de Berrahal, Nord-Est Algérien. Thèse doctorat. Univ Annaba. 210P
- Kherici, N., Zouini, D. et Kherici, H. 1996.** Origine de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf (Nord-Est du Sahara Septentrional Algérien). *Association Espanola de Hidrologia Subterranea. Hidrogeologia* 12:49–59.
- Laouini SE, Lajdel S et Ouahrani M. 2009.** Physico-chemical characteristics and quality of feed water of the El-Oued city study of case (fluorine and arsenic). *Journal of fundamental and applied science.*2009, 1(2), 13-22p.
- Lorienne, Thüler. 2014 :** Estimation et cartographie de la vulnérabilité des aquifères en milieu forestier. Th. Doctorat, (2014), Université de Neuchâtel 2014 / 183p.
- MESSEKHER, I .2009.** Etude hydrogéologique de la vallée de Souf soumise à la remontée des eaux et perspective de solutions palliatives, Mémoire de Magister en géologie. Option : géologie du génie civil et des milieux aquifère. Université de Batna, 114 p.
- Meziani, A. et al. 2011.** The Aquifer System of the Souf Valley Algerian Northern Sahara. *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X Vol.65 No.3, pp. 416-423.
- Nezli Imed Eddine. 2009.** Approche hydrogéochimique a l'étude des aquifères de la basse vallée de l'oued m'ya (Ouargla). th. Doctorat, univ.de Biskra, 143 p.
- OMS. 2002.** "Fluoride in drinking water." Environmental health information section, WHO Headquarters Office in Geneva, 20 Avenue Appia, 12 1 1 Geneva 27, Switzerland.
- OSS (Observatoire Sahara et Sahel). 2003.** Système aquifère du Sahara septentrional : gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.
- Person. 1978.** Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. *Water Science and Technology* 1978; 19 (12):145-152.
- Piper, A.M. 1994.** Graphical interpretation of water analysis, *Transactions of the American Geophysical Union.* 25:914 -928.

- B. REMINI, B. 2006.** La disparition des ghouts dans la région D'EL OUED (Algérie). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 05, Juin 2006, pp.49-62.
- Rodier J. 1996.** L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer. 8<sup>ème</sup> édition Dunod, Paris.
- Rodier, J. 1980.** Analyse de l'eau 6<sup>ème</sup> Ed. Dunod. P 218-228.
- RODIER. J. 1984.** L'analyse de l'eau, 7<sup>ème</sup> édition DUNOD, 1353p.
- Rouabhia, A., Baali, F., Kherici, N. et Djabri, L. 2004.** Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). Sécheresse; 15 (4) : 347-52
- Saibi, H. 2003.** Analyse qualitative des ressources en eau de la vallée de l'oued Souf et impact sur l'environnement, région aride à semi-aride d'El-Oued (Qualitative évaluation of Oued-Souf valley water resources and their impact on the environment). Thesis, Houari Boumedienne University, Algiers, Algeria, 200 pp
- Schoeller, H. 1962.** Les eaux souterraines. Hydrologie dynamique et chimique. Recherche, exploitation et évaluation des ressources Masson et Cie. Editions, 642 pages.
- Senoussi, M. et Aouat, M.A. 1992.** Etude géophysique par sondages électriques de la région de Souf. Rapport ENAGEO. 40P.
- UNESCO. 1972.** Etude des Ressources en Eau de Sahara Septentrional. (7 vols. et annexes). UNESCO, Paris, France.
- ZINE, Brahim. 2009.** La remontée des eaux souterraines en surface: mécanisme et l'impact sur l'environnement (Cas de Oued Souf). Mémoire magistère en hydraulique. Univ Batna. 145p.
- ZAIZ Issam. 2015.** Etude qualitative des eaux de la nappe Complexe Terminal dans la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est Algérien) .Mémoire de Magister en Hydraulique. Université Ouargla.183p