

# Université KASDI Merbah – Ouargla

Faculté des sciences appliquées  
Département de génie civil et de l'hydraulique



## Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT 3ème cycle en hydraulique  
Spécialité : Aménagement hydraulique en milieu aride

## Thème

**Caractérisation hydrochimique et classification des eaux  
souterraines en zone aride (Cas de cuvette d'Ouargla)**

Présenté et soutenu publiquement par

**BELHADJ AISSA Rachid**

### Devant le jury composé de :

Président :	Mr. KRIKER Abdelouahed	Professeur	Université de Ouargla
Promoteur :	Mr. BOUTOUTAOU Djamel	Professeur	Université de Ouargla
Examineur :	Mr. ZERROUKI Djamel	Professeur	Université de Ouargla
	Mr. SEKIOU Fateh	MCA	Université de Oum El Bouaghi
	Mr. AMITOUCHE Mourad	MCA	Université de Boumerdes

Année universitaire : 2019/2020.

## *Avant propos*

Au terme de ce modeste travail, je remercie ALLAH de m'avoir aidé à le réaliser. Il m'est agréable de remercier, vivement mon promoteur Monsieur **BOUTOUTAOU Djamel**, professeur au Département de génie civil et de l'hydraulique, Faculté des sciences appliquées, Université Kasdi Merbah Ouargla, d'avoir proposé et dirigé ce travail, Je lui atteste ma profonde gratitude pour son encadrement, ses encouragements, ses conseils, ses orientations et sa patience.

Je tien à remercier Monsieur le Professeur **KRIKER Abdelouahed**, Doyen de la Faculté des Sciences Appliquées, chef de laboratoire **EVNZA**, Université Kasdi Merbah Ouargla pour son appui et ses conseils précieux, d'avoir accepté de présider ce jury.

Je tiens à exprimer mes respectueux et sincères remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté d'examiner ce travail de thèse le professeur **ZERROUKI Djamel**, de l'Université Kasdi Merbah Ouargla, les docteurs; Monsieur **SEKIOU Fateh** de l'Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouagh et Monsieur **AMITOUCHE Mourad** de l'Université de Boumerdes.

Mes remerciements vont à l'ensemble des enseignants de l'Université Kasdi Merbah Ourgla, spécialement les enseignants de département de génie civil et hydraulique pour avoir participé à ma formation.

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans l'orientation et les données fournies par Agence Nationale des Ressources Hydraulique de Ouargla Je remercie, spécialement Mr. **ARIF Salim**, Mr. **BENHAMIDA Slimane** et Mme. **MESAI Zineb**.

Tous les travaux de terrain n'auraient pu être réalisés sans l'aide précieuse et l'encouragement de mon frère et mon ami **RECEOUI Ibrahim**.

Un grand merci à toute l'équipe L'ensemble du laboratoire de l'**ADE** Ghardaia, notamment le chef service Mme. **AMIEUR Amel**, et Mr. **BELHADJ AISSA Kamel**.

Enfin, que tout ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail, soient assurés de ma profonde gratitude.

# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail, à mes parents, pour  
leurs sacrifices et encouragements à mon égard, que  
dieu leur accorde une longue vie.*

*A mon très cher oncle pour ses encouragements*

*A mon frère, A mes sœurs, A ma femme*

*A toute la famille Belhadj Aïssa, Meddah*

*A tout mes amis chacun en son nom*

*A toutes mes adorables que j'ai connu pendant toute  
ma vie...*

*BELHADJ AÏSSA Rachid*

## *Résumé*

---

La caractérisation hydrochimique d'un système aquifère implique les analyses physico-chimique de l'eau souterraine, la présente étude s'intéresse à la caractérisation et la classification des eaux souterraines en zones arides (cas de la cuvette de Ouargla).

Au total de 129 échantillons ont été prélevés lors de trois campagnes de différentes aquifères exploitées dans la région. Les principaux résultats montrent que le faciès chloruré sodique est dominant dans les trois systèmes aquifères, avec la présence d'un faciès sulfaté sodique pour la nappe phréatique.

Les résultats montrent par ailleurs que les eaux sont sursaturées vis-à-vis des minéraux carbonatés. Par contre, elles sont saturées ou sous-saturées vis-à-vis les minéraux évaporitiques, ce qui montre bien qu'elles sont capables de dissoudre les minéraux sulfatés en vue de contribuer à l'augmentation de la minéralisation.

L'Analyse des Composantes Principales, a montré que la chimie de l'eau dans la région est plus affectée par les variables  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , et  $\text{SO}_4^{2-}$  essentiellement.

La classification qualitative, nous a permis de constater que les eaux de la nappe phréatique sont très dégradées et non utilisable quelque soit la destination prévue. D'autre part, les eaux de CT et CI sont peu dégradées, mais il est impératif d'améliorer leurs qualité par des méthodes de traitement convenables avant l'usage.

**Mots clés :** caractérisation, eaux souterraines, minéralisation, Ouargla.

## *Summary*

---

The hydrochemical characterization of an aquifer system involves physicochemical analyses of groundwater.

This study focuses on the characterization and classification of groundwater in arid zones (case of the Ouargla basin).

A total of 129 samples were collected during three campaigns from different aquifers in the study area.

The main results, show that sodium chlorinated facies are dominant in all the aquifers system, with the presence of sodium sulfate facies in the phreatic waters.

The results also show that the water is oversaturated towards carbonated minerals. On the other hand, they are saturated or undersaturated towards the evaporative minerals, indicating that they are capable of dissolving sulfide minerals in order to contribute to increased mineralization.

The Analysis of the Main Components showed that water chemistry in the region is more affected by the  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , and  $\text{SO}_4^{2-}$  variables essentially.

The qualitative classification has allowed us to see that the water table is very degraded and not usable regardless of the intended destination. On the other hand, CT and IC waters are poorly degraded and it is imperative that their quality be improved by appropriate treatment methods prior before use.

Key words: characterization, groundwater, mineralization, Ouargla.

## ملخص

يشمل التوصيف الهيدروكيميائي لنظام طبقة المياه الجوفية تحليلات فيزيائية كيميائية للمياه الجوفية. تهدف الدراسة الحالية إلى توصيف وتصنيف المياه الجوفية في المناطق القاحلة حالة حوض ورقلة).

بمجموع 129 عينة تم جمعها أثناء ثلاث خرجات ميدانية من مختلف الطبقات المائية الموجودة بمنطقة الدراسة. أهم النتائج المتحصل عليها أظهرت أن صنف كلوريد الصوديوم هو النوع الغالب في طبقات المياه الثلاث، مع وجود صنف كبريتات الصوديوم في طبقة المياه الفرياتيكية.

وبينت النتائج أيضا أن المياه مشبعة جدا فيما يتعلق بالمعادن الكربوناتية (carbonatés) . ومن ناحية أخرى فهي مشبعة أو أقل تشبعا فيما يتعلق بالمعادن الإيفابوراتية (évaporitiques)، مما يشير إلى أنها قادرة على إذابة معادن الكبريت من أجل الإسهام في زيادة التمعدن.

وقد أظهر تحليل المكونات الرئيسية أن كيمياء المياه في المنطقة أكثر تأثرا بالمتغيرات الأساسية مثل  $Na^+$  ,  $Mg^{+2}$  ,  $Ca^{+2}$  ,  $Cl^-$  و  $SO_4^{-2}$ . وقد سمح لنا التصنيف النوعي من التأكيد بأن مياه الطبقة السطحية متدهورة جدا وغير قابلة للاستخدام بغض النظر عن الوجهة المقصودة. ومن ناحية أخرى، فإن مياه المتداخل القاري و المركب النهائي هما أقل تضررا ومن الضروري تحسين نوعيتها بطرق علاجية مناسبة قبل استخدامها.

**الكلمات المفتاحية:** التوصيف ، المياه الجوفية ، التمعدن ، ورقلة.

# **Liste des Figures**

## ***Chapitre I. Contexte général***

Figure I-1 : <i>Situation géographique de la zone d'étude</i> .....	4
Figure I-2 : <i>Carte de localisation de la région d'étude</i> .....	6
Figure I-3 : <i>Variation des précipitations moyenne mensuelle</i> .....	8
Figure I-4 : <i>Variation des Températures moyenne mensuelle</i> .....	10
Figure I-5 : <i>diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls</i> .....	12
Figure I-6 : <i>Climagramme d'EMBERGER de la région de Ouargla</i> .....	13
Figure I-7 : <i>Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Aïn el Beïda</i> .....	14
Figure I-8 : <i>Vitesses des vents moyennes enregistrées à la station de Aïn el Beïda</i> .....	15
Figure I-9 : <i>Variations de la durée d'insolation enregistrées à la station de Aïn el Beïda</i> .....	16
Figure I-10 : <i>Réseau hydrographique de la vallée de Ouargla (UNESCO., 1972).</i> .....	20

## ***Chapitre II. Contexte Géologique***

Figure II-1 : Les bassins les plus importants en Algérie .....	24
Figure II-2 : Coupe stratigraphique des provinces de la plate-forme saharienne.....	26
Figure II-3 : Coupe géologique NO-SE de l'Algérie .....	27
Figure II-4 : Carte géologique de la région de Ouargla .....	28
Figure II-5 : Colonne stratigraphique du sondage J.10-580.....	29
Figure II-6 : Colonne stratigraphique du sondage J.10-818.....	33
Figure II-7 : Géomorphologie schématique Ouest-Est de la cuvette de Ouargla.....	35

## ***Chapitre III. Contexte hydrogéologique***

Figure III-1 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara .....	36
Figure III-2 : Modèle du bilan hydrologique schématique des apports-exhaures à Ouargla .....	37
Figure III-3 : Coupe lithostratigraphique de la région de Ouargla .....	39
Figure III-4 : Log géologiques de piézomètres au Quaternaire dans la Vallée de l' Oued Mya d'après ..	41
Figure III-5 : Carte des toits de la nappe du Miopliocène .....	42
Figure III-6 : Carte des toits de la nappe du Sénonien .....	43
Figure III-7 : Cartes des murs de la nappe du Miopliocène .....	45
Figure III-8 : Cartes des murs de la nappe du Sénonien.....	46

## **Chapitre IV. Matériels et méthodes**

Figure IV-1 : Carte de localisation des point d'eau du CI et CT de la cuvette de Ouargla.....	51
Figure IV-2 : Carte de localisation des piézomètres de la nappe Phréatique.....	52
Figure IV-3 : Approche méthodologique d'étude.....	53

## **Chapitre V. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines**

Figure V-1 : Box plots de la température des eaux de la cuvette.....	61
Figure V-2 : Box plots de pH des eaux de la cuvette.....	62
Figure V-3 : Box plots de la conductivité électrique des eaux de la cuvette.....	63
Figure V-4 : Carte de distribution spéciale de la minéralisation globale (g/l) des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla.....	66
Figure IV-5 : pourcentage des éléments chimique dans l'eau en fonction des nappes.....	68
Figure V-6 : Diagramme de Piper pour la nappe Phréatique.....	72
Figure V-7 : Caractérisation du facies chimique de la nappe Phréatique.....	72
Figure V-8 : Diagramme de Piper pour la nappe du Miopliocène.....	74
Figure V-9 : Caractérisation du facies chimique de la nappe du Miopliocène.....	75
Figure V-10 : Diagramme de Piper pour la nappe du Sénonien.....	77
Figure V-11 : Caractérisation du facies chimique de la nappe du Sénonien.....	77
Figure V-12 : Diagramme de Piper pour la nappe Albienne.....	79
Figure V-13 : Caractérisation du facies chimique de la nappe du l'Albien.....	79
Figure V-14 : Carte des Chlorures de la nappe phréatique.....	81
Figure V-15 : Carte des Chlorures de la nappe du Miopliocène.....	82
Figure V-16 : Carte des Chlorures de la nappe du Sénonien.....	83
Figure V-17 : Carte des Sulfates de la nappe phréatique.....	84
Figure V-18 : Carte des Sulfates de la nappe du Miopliocène.....	85
Figure V-19 : Carte des Sulfates de la nappe du Sénonien.....	86
Figure V-20 : Saturation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla vis-à-vis des minéraux carbonatés.....	89
Figure V-21 : Saturation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla vis-à-vis des minéraux évaporitique.....	91
Figure V-22 : Variation du rapporte $[\text{HCO}_3^-] / [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}]$ – conductivité électrique des eaux de la cuvette de Ouargla.....	92
Figure V-23 : Variation du rapporte $[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$ – conductivité électrique des eaux de la cuvette de Ouargla.....	93
Figure V-24 : Corrélation $[\text{Na}^+]$ vs $[\text{Cl}^-]$ des eaux de la cuvette de Ouargla.....	94
Figure V-25 : Corrélation $[\text{Ca}^+]$ vs $[\text{HCO}_3^-]$ des eaux de la cuvette de Ouargla.....	95



Figure V-26 : Corrélation $[Ca^+]$ vs $[SO_4^{2-}]$ des eaux de la cuvette de Ouargla .....	95
Figure V-27 : Représentation graphique en ACP de la nappe de l'Albien. ....	97
Figure V-28 : Représentation graphique des Individus de la nappe de l'Albien.....	97
Figure V-29 : Représentation graphique en ACP de la nappe du Sénonien.....	98
Figure V-30 : Représentation graphique des Individus de nappe du Sénonien.....	98
Figure V-31 : Représentation graphique en ACP de la nappe du Miopliocène .....	99
Figure V-32 : Représentation graphique des Individus de nappe du Miopliocène. ....	100
Figure V-33 : Représentation graphique en ACP de la nappe Phréatique. ....	101
Figure V-34 : Représentation graphique des Individus de nappe Phréatique.....	101
Figure V-35 : Représentation graphique en ACP globale.....	102
Figure V-36 : Représentation graphique des Individus globale. ....	102

## ***Chapitre VI. Classification qualitative des eaux souterraines***

Figure VI-1 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe Phréatique.....	106
Figure VI-2 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe Phréatique. ....	106
Figure VI-3 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe Phréatique. ....	107
Figure VI-4 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments pour la nappe Phréatique. ....	108
Figure VI-5 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe du Miopliocène. ....	109
Figure VI-6 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe du Miopliocène.....	110
Figure VI-7 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe du Miopliocène. ....	111
Figure VI-8 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments pour la nappe du Miopliocène. ....	112
Figure VI-9 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe du Sénonien.....	113
Figure VI-10 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe du Sénonien. ....	114
Figure VI-11 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe du Sénonien. ....	115
Figure VI-12 : Qualité de l'eau vis-à-vis nutriments pour la nappe du Sénonien.....	116
Figure VI-13 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe du l'Albien. ....	117
Figure VI-14 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe du l'Albien.....	117
Figure VI-15 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe du l'Albien.....	118
Figure VI-16 : Variations du nitrates pour la nappe du l'Albien. ....	118
Figure VI-17 : Risque de SAR dans l'eau en fonction des nappes .....	121
Figure VI-18 : Diagramme de Riverside.....	123
Figure VI-19 : Risques de la salinité dans l'eau en fonction des nappes .....	124
Figure VI-20 : Risques des bicarbonates dans l'eau en fonction des nappes.....	126
Figure VI-21 : Risques des chlorures dans l'eau en fonction des nappes .....	127
Figure VI-22: Risques du Sodium dans l'eau en fonction des nappes. ....	128
Figure VI-23: L'indice de stabilité de Ryzanr en fonction des nappes. ....	130
Figure VI-24: L'indice de saturation Langelier en fonction des nappes.....	131

Figure VI-25: L'indice de CCPP en fonction des nappes. ....	132
Figure VI-26: L'indice de corrosivité de Larson en fonction des nappes. ....	134

# Liste des tableaux

## *Chapitre I. Contexte général*

Tableau I-1 : Précipitations moyennes Mensuelles .....	8
Tableau I-2 : Température moyenne mensuelle.....	9
Tableau I-3 : Détermination de régime climatique par la méthode d’Euverte .....	10
Tableau I.4 : indice d’aridité mensuel .....	11
Tableau I.5 : Humidités relatives moyennes enregistrées.....	13
Tableau I.6 : Vitesses moyennes des vents enregistrées .....	14
Tableau I.7 : Insolation moyennes enregistrées .....	15
Tableau I-8 : Evaporation (mm) moyenne mensuelle.....	16
Tableau I-9 : ETP (mm) moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE.....	17
Tableau I-10 : Bilan hydrique de THORNTHWAITE.....	18

## *Chapitre IV. Matériels et méthodes*

Tableau IV-1 : précision des résultats d’analyse.....	58
---	----

## *Chapitre V. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines*

Tableau V-1 : Variation de la température (°C) selon les nappes .....	61
Tableau V-2 : Calcule de la minéralisation à partir de la conductivité mesurée à 20°C .....	64
Tableau V-3 : Variation de la dureté total (°F) selon les nappes .....	67
Tableau V-4 : Variations des concentrations des cations selon les nappes.....	69
Tableau V-5 : Variations des concentrations des anions selon les nappes.....	71
Tableau V-6 : Répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe Phréatique .....	73
Tableau V-7 : Répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe du Miopliocène .....	76
Tableau V-8 : Répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe du Sénonien .....	78

## *Chapitre VI. Classification qualitative des eaux souterraines*

Tableau VI-1 : Normes Algérienne de potabilité des eaux .....	105
Tableau VI-02 : Le risque du SAR dans l’eau d’irrigation .....	120
Tableau VI-03 : SAR/Risque de salinité pour l’eau d’irrigation.....	122
Tableau V-04 : Relation entre l’indice de stabilité et la tendance de l’eau.....	129
Tableau V-05 : Relation entre l’indice de corrosivité et la tendance de l’eau.....	133

## **Liste des abréviations**

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydraulique.

LTPS : Laboratoire des Travaux Publics du Sud.

ADE : l'Algérienne Des eaux.

ONM : Office Nationale de Météorologie.

CI : Nappe Continental Intercalaire.

CT : Nappe Complexe Terminal.

Phr : Nappe phréatique.

C.E : Conductivité électrique.

ACP : Analyse en Composantes Principales.

SAR : Sodium Adsorption Ratio.

# Table des matières

<i>Remerciement</i>	
<i>Dédicace</i>	
<i>Résumé</i>	
<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des photos</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des abréviations</i>	
Introduction générale .....	1

## **Chapitre I. Contexte général**

I.1. Cadre Géographique .....	4
I.1.1. Situation géographique de la cuvette .....	4
I.1.2. Topographie .....	7
I.2. Cadre Climatique .....	7
I.2.1. Les précipitations .....	7
I.2.1.1. Précipitation annuelles .....	7
I.2.1.2. Précipitation moyenne mensuelle.....	8
I.2.2. Les températures .....	9
I.2.2.1. Variation moyenne mensuelle de la température .....	9
I.2.3 Caractérisation climatique .....	10
I.2.3.1 Méthode d'Euverte .....	10
I.2.3.2 Calcule de l'indice d'aridité .....	11
I.2.3.2.1 L'indice d'aridité de De Martonne.....	11
I.2.3.2.2 L'indice d'aridité mensuel .....	11
I.2.3.3 Diagramme Pluviothermique .....	11
I.2.3.4 Climagramme d'EMBERGER .....	12
I.2.4. L'humidité relative de l'air.....	13
I.2.5. Les vents.....	14
I.2.6. Insolation.....	15
I.2.7. Evaporation .....	16
I.2.8. Etude de l'évapotranspiration.....	16
I.2.8.1. Evapotranspiration potentielle (ETP).....	16
I.2.8.2. Evapotranspiration réelle (ETR) .....	17
I.2.8.3. Bilan hydrique par la méthode de G.W.THORNTHWAITE.....	18

I.3. Cadre Hydrologique .....	19
I.3.1. Le réseau hydrographique .....	19
I.3.1.1. Oued Mya.....	19
I.3.1.2. Oued N'sa .....	19
I.3.1.3 Oued M'zab .....	20
I.3.2. Les crues.....	20
I.4. Conclusion.....	21

## ***Chapitre II. Contexte Géologique***

II.1. Introduction .....	23
II.2. Contexte Géologique à l'échelle régional.....	23
II.2.1. La plate-forme saharienne .....	23
II.2.2. Aperçu lithostratigraphique .....	25
II.2.3. Tectonique .....	27
II.3. Contexte Géologique à l'échelle locale .....	27
II.3.1. Les affleurements .....	27
II.3.2 Litho-stratigraphie .....	28
II.3.3. Caractéristiques géomorphologiques de la cuvette d'Ouargla .....	33
II.3. conclusion.....	35

## ***Chapitre III. Contexte hydrogéologique***

III.1. Introduction .....	36
III.2. Systèmes Aquifères .....	36
III.2.1. Nappe du Continental Intercalaire (CI) .....	37
III.2.2. Nappe du Complexe Terminal (CT).....	38
III.2.3. Nappe phréatique .....	38
III.3. Caractéristiques Lithologie et épaisseur du réservoir .....	39
III.3.1. Lithologie de CI et CT .....	39
III.3.2. Lithologie de la nappe phréatique.....	40
III.4. Formation aquifère .....	41
III.4.1. Cartes des toits des formations des réservoirs profonds .....	41
III.4.2. Cartes des murs des formations des réservoirs profonds.....	44
III.5. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères .....	47
III.5.1. Coefficient d'emmagasinement.....	47
III.5.2. Transmissivité.....	47

III.6. Exploitation des aquifères .....	47
III.6.1. Nappe du l'Albien.....	47
III.6.2. Nappe du Sénonien.....	48
III.6.3. Nappe du Miopliocène.....	48
III.7. Etude de la piézométrie de la nappe phréatique .....	48
III.7.1. Cartes piézométriques de la nappe phréatique .....	48
III.8. Conclusion .....	49

## ***Chapitre IV. Matériels et méthodes***

IV.1. Introduction .....	50
IV.2. Matériels d'étude.....	50
IV.2.1. Choix de la zone d'étude .....	50
IV.2.2. Choix de site de prélèvement .....	50
IV.2.3. Approche méthodologique .....	53
IV.2.4. Protocole d'échantillonnage .....	54
IV.3. Méthodes d'étude .....	54
IV.3.1 Mesure in situ .....	55
IV.3.2 Méthode d'analyse au laboratoire .....	55
IV.3.2.1 Les paramètres physique .....	55
IV.3.2.2 les paramètres chimique .....	55
IV.3.2.2.1 La dureté totale (TH).....	55
IV.3.2.2.2 Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ) et Magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ ).....	55
IV.3.2.2.3 Titre alcalimétrique complet (TAC).....	56
IV.3.2.2.4 Les Chlorures ( $\text{Cl}^-$ ) .....	56
IV.3.2.2.5 Sodium ( $\text{Na}^+$ ) et de Potassium ( $\text{K}^+$ ).....	56
IV.3.2.2.6 Sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ).....	56
IV.3.2.2.7 l'Azote Ammoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ) .....	56
IV.3.2.2.8 Nitrites ( $\text{NO}^{-2}$ ) .....	57
IV.3.2.2.9 Nitrates ( $\text{NO}_3^{-2}$ ) .....	57
IV.3.2.2.10 Phosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ ).....	57
IV.4. Traitement des données hydrochimiques .....	57
IV.4.1. Précision des mesures .....	57
IV.4.2. Méthodes d'analyse graphique .....	58
IV.4.2.1. Diagramme de piper .....	58

IV.4.2.2. Logiciel de surfer.....	59
IV.4.2.3. XLSTAT.....	59

## ***Chapitre V. Caractérisation hydrochimique des eaux souterraines***

V.1. Introduction .....	60
V.2. Caractéristiques physiques des eaux.....	60
V.2.1. Température.....	60
V.2.2. pH des eaux .....	62
V.2.3. La conductivité électrique .....	62
V.2.4 La minéralisation totale .....	63
V.2.4.1 Distribution spatiale de la minéralisation .....	64
V.2.5 La dureté totale .....	66
V.3. Caractérisation chimique des eaux .....	67
V.3.1. Les éléments majeurs.....	68
V.3.1.1. Les cations .....	68
V.3.1.2. Les anions .....	70
V.3.2. Faciès chimiques et formules caractéristiques des eaux .....	71
V.3.2.1. Nappe phréatique .....	71
V.3.2.2. Nappe du Miopliocène .....	74
V.3.2.3. Nappe du Sénonien.....	76
V.3.2.4. Nappe du l'Albien.....	78
V.4. Cartographie hydrochimique .....	80
V.4.1 Les chlorures .....	80
V.4.1.1 Carte des chlorures de la nappe phréatique .....	80
V.4.1.2 Carte des chlorures de la nappe du Miopliocène.....	81
V.4.1.3 Carte des chlorures de la nappe du Sénonien .....	82
V.4.2 Les Sulfates .....	83
V.4.2.1 Carte des sulfates de la nappe phréatique .....	83
V.4.2.2 Carte des sulfates de la nappe du Miopliocène.....	84
V.4.2.3 Carte des sulfates de la nappe du Sénonien.....	86
V.5. Mécanismes de la minéralisation des eaux.....	87
V.5.1. Indices de saturation vis-à-vis des phases minérales.....	87
V.5.1.1. Saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés.....	88
V.5.1.2. Saturation vis-à-vis des minéraux évaporitiques .....	90



V.5.2	Corrélations entre les éléments majeurs .....	92
V.5.2.1.	La relation $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ – conductivité électrique .....	92
V.5.2.2.	Corrélation $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ .....	93
V.5.2.3.	Corrélation $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-$ .....	94
V.6.	Analyse en Composantes Principales .....	96
V.6.1	ACP des eaux de la nappe Albienne.....	96
V.6.2.	ACP des eaux du la nappe du Sénonien .....	97
V.6.3.	ACP des eaux du la nappe du Miopliocène.....	99
V.6.4.	ACP des eaux du la nappe Phréatique .....	100
V.6.5.	ACP globale .....	101
V.7.	Conclusion .....	103

## ***Chapitre VI. Classification qualitative des eaux souterraines***

VI.1.	Introduction .....	104
VI.2.	Qualité des eaux destinées à la consommation humaine.....	104
VI.2.1.	La nappe phréatique .....	105
VI.2.1.1.	Les éléments mesurés in-situ.....	105
VI.2.1.2.	Les anions.....	106
VI.2.1.3.	Les cations.....	106
VI.2.1.4.	Les paramètres de pollution .....	108
VI.2.2.	La nappe du Miopliocène .....	109
VI.2.2.1.	Les éléments mesurés in-situ.....	109
VI.2.2.2.	Les anions.....	109
VI.2.2.3.	Les cations.....	110
VI.2.2.4.	Les paramètres de pollution .....	111
VI.2.3.	La nappe du Sénonien .....	112
VI.2.3.1.	Les éléments mesurés in-situ.....	112
VI.2.3.2.	Les anions.....	113
VI.2.3.3.	Les cations.....	114
VI.2.3.4.	Les paramètres de pollution .....	115
VI.2.4.	la nappe Albienne.....	116
VI.2.4.1.	Les éléments mesurés in-situ.....	116

VI.2.4.2. Les anions.....	117
VI.2.4.3. Les cations.....	117
VI.2.4.4. Les paramètres de pollution .....	118
VI.3. Qualité des eaux destinées à l'irrigation.....	119
VI.3.1. Les risques du (SAR) .....	119
VI.3.2. Relation entre le SAR et l'indice de salinité .....	121
VI.3.3. Les risques de la salinité.....	123
VI.3.4. Risque des bicarbonates .....	125
VI.3.5. Les risques de présence d'ions toxiques dans l'eau d'irrigation .....	126
VI.4. Qualité des eaux destinées à l'industrie .....	121
VI.4.1. Indicateurs calco-carboniques .....	129
VI.4.1.1. L'indice de Ryznar (indice de stabilité) .....	129
VI.4.1.2. L'indice de Langelier (indice de saturation) .....	131
VI.4.1.3. Indication du CCPP (calcium carbonate précipitation potentiel).....	132
VI.4.2. Indication de corrosivité.....	133
VI.4.2.1. L'indice de Larson (indice de corrosivité).....	133
VI.5. Conclusion.....	135
Conclusion générale .....	136
Références bibliographiques.....	139
Annexes .....	150
Article scientifique	

# **Introduction générale**

## Introduction Générale

Dans le monde, les eaux souterraines représentent 8 à 10 millions de km<sup>3</sup> ce qui correspond 98 à 99% des réserves d'eau douce (moins de 1% pour les lacs), ce qui ne correspond néanmoins qu'à moins de 1% du volume de l'hydrosphère. Globalement, les 2/3 des prélèvements d'eau souterraine se font pour l'irrigation agricole, 1/4 est consacré à l'alimentation en eau potable (consommation humaine) et 1/10 aux industries ou aux extractions minières. La situation est évidemment très variable selon les différentes parties du monde (MARGAT, 2008).

Les eaux souterraines constituent une ressource fragile, Un patrimoine, qu'il importe de gérer dans une vision durable. La dégradation de cette ressource vitale est causée par plusieurs facteurs à savoir, la surexploitation et les rejets non contrôlés ainsi que l'utilisation intensive et anarchique des engrais chimique dans l'agriculture. Pour cela il est nécessaire de préserver cette ressource par la gestion rationnelle et le bon contrôle.

Des études réalisées antérieurement (Killian, 1992 ; Cornet et Gouscov, 1952 ; UNESCO, 1972 ; Eckstein, 2003 ; OSS, 2003, 2008) affirment que les ressources en eaux souterraines au niveau de la cuvette de Ouargla (Bas-Sahara) sont contenues dans trois réservoirs principaux ;

- En haut, la nappe phréatique (Phr) située dans une formation perméable à sable gypseux du Quaternaire ;
- Au milieu, l'aquifère du Complexe Terminal (CT) est le plus exploité et inclut plusieurs aquifères dans différentes formations géologiques (Eocène inférieur, Sénonien et Miopliocène) ;
- A la base, l'aquifère Continental Intercalaire (CI) où l'eau est contenue dans les formations continentales du Crétacé inférieur (Barrémien et Albien).

Lors des trois dernières décennies, la cuvette de Ouargla a connue une augmentation très rapide des besoins en eaux. Cela est dû à l'augmentation démographique d'une part et au développement agricole et industriel d'autre part. Cette forte demande, à incité les services d'hydraulique de la wilaya de Ouargla à augmenter le nombre de forages profonds pour capter la nappe de complexe terminal et celle de l'intercalaire continental.

L'exploitation intense ainsi que l'absence d'un exutoire naturel pour les rejets des eaux d'assainissement domestiques et agricoles dans la cuvette de Ouargla, ont également engendré des impacts négatives sur la flore, le sol et les habitants de cette grande cité ( Idder, 1998, 2007 ; Slimani et al., 2011, 2015 ).

La nature lithologique des aquifères et des terrains superficiels traversés par l'eau, ont un rôle primordiale dans la composition de faciès chimique naturel des eaux souterraines (Blum et al., 2001).

La compréhension des mécanismes par lesquels les eaux souterraines acquièrent leur composition chimique est devenue un enjeu important et vital pour la protection et la gestion de notre environnement.

Plusieurs auteurs dont (Melloul et Collin, 1992 ; Varsanyi et Kovacs, 1994 ; Güler et Thyne, 2004 ; Cloutier et al., 2008 ; Silva-Fihlo et al., 2009 ; Belkhiri et al., 2010 ; Subrahmani et al., 2010 ; Walter, 2010 ; Beaudry, 2013 ; Zghibi et al., 2014 ; et Montcoudiol et al., 2014) ont démontré que la caractérisation hydrochimique et d'un système aquifère permet d'identifier différents types d'eau souterraine et les principaux facteurs influençant la composition géochimique de l'eau souterraine. La plupart de ces études ont également permis de démontrer l'existence d'une importante corrélation entre les conditions hydrogéologiques et la composition hydrochimique de l'eau souterraine.

Sekiou et Kellil., (2014) ont par ailleurs démontré que la combinaison de méthodes d'analyses graphiques et statistiques permet de classier de façon solide et relativement objective une grande quantité de données.

L'objectif de ce travail de recherche est la caractérisation hydrochimique des eaux souterraines, comprendre les processus de leurs minéralisation, l'origine de la salinité des eaux dans la cuvette de Ouargla et de relier les résultats d'analyse aux classes de qualité de l'eau en comparant les valeurs observées des paramètres aux normes pour différents types d'utilisation (Eau potable, irrigation, différents types d'industries, etc...).

Afin de mener à bien ce travail, nous avons adopté une structure de thèse organisée en six chapitres.

- **Première partie** : Synthèse bibliographique

Cette partie est composée de trois chapitres, dont les deux premiers chapitres comportent la situation géographique, climatique et le contexte géologique de la cuvette de Ouargla, où nous avons faire une synthèse sur les données relatives à cette région, et de montrer les différentes phases lithologiques.

Le troisième chapitre a été consacré à une étude hydrogéologique de la cuvette de Ouargla, par l'établissement des coupes lithostratigraphiques afin de comprendre la géométrie des réservoirs et l'extension de différents niveaux des aquifères.

- **Deuxième partie** : Matériels et méthodes

Le quatrième chapitre est consacré au mode d'échantillonnage, aux méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines ainsi que le traitement des résultats et outil informatique.

- **Troisième partie : Résultats et discussion**

Le cinquième chapitre a été consacré à la présentation et l'interprétation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux, des cartes de salinité, des faciès chimiques des différentes nappes souterraines, la corrélation et les analyses statistiques entre les paramètres étudiés. Ce chapitre a été consacré aussi à une cartographie hydrochimique permettant de voir la répartition spatiale des éléments indicateurs de salinisation, à savoir les chlorures, et les sulfates.

Le sixième chapitre est surtout consacré pour déterminer la qualité des eaux des nappes de la cuvette de Ouargla selon leurs utilisations (eau destinée à la consommation humaine, eau destinée à l'irrigation et eau destinée à l'industrie).

# Première partie

---

## Synthèse bibliographique

# CHAPITRE I

---

## CONTEXTE GEOGRAPHIQUE, CLIMATIQUE ET HYDROLOGIQUE

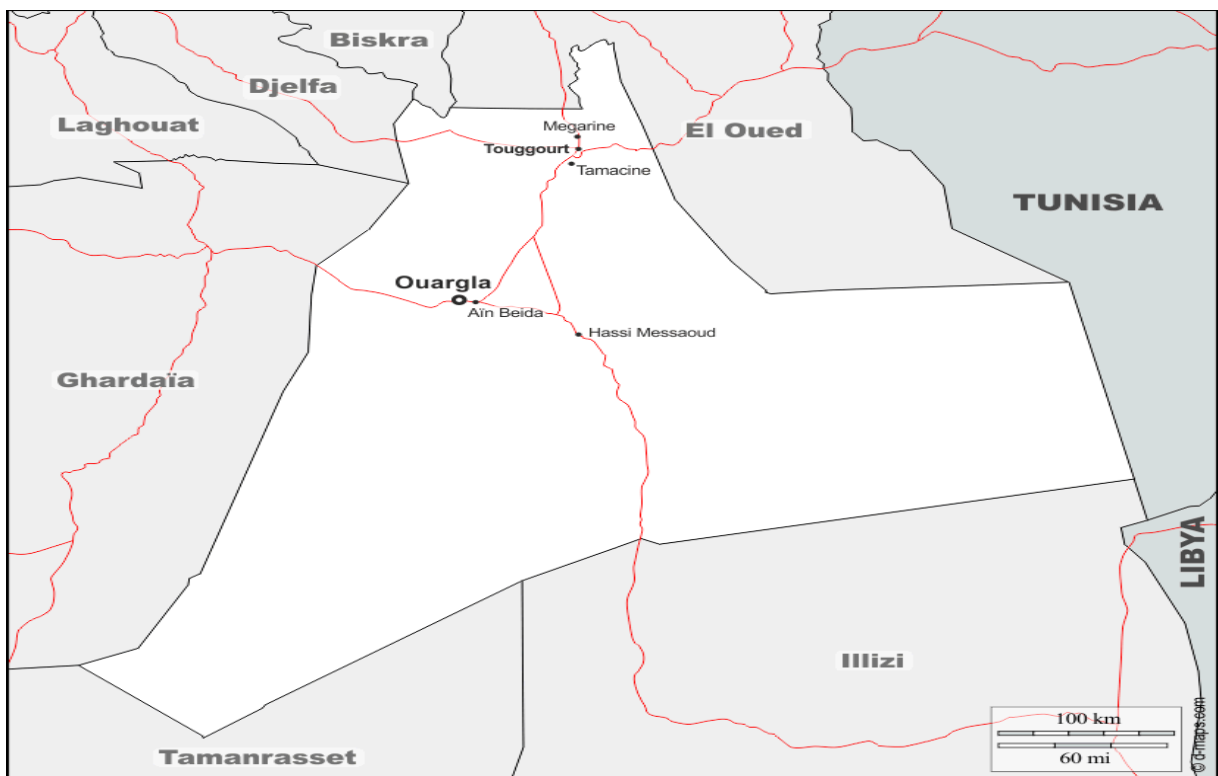


### I.1. Cadre Géographique

La région de Ouargla se situe au nord-est du désert Algérien "Bas-Sahara", à 800 km de la capitale d'Alger. Elle occupe une superficie de 163 238 km<sup>2</sup>, limitée entre :

- Au Nord-Est par la wilaya d'El Oued ;
- Nord-Ouest par la wilaya de Djelfa ;
- A l'Est par la Tunisie ;
- Au Sud-Est par les wilayas d'Illizi et Tamanrasset ;
- A l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa. (fig. I -1).

Ses coordonnées géographiques sont : entre une longitudes de : 5°15' et 5°25' à l'Est, une latitudes de 31°55' et 32°00' au Nord avec une altitude moyenne de 134 m (Rouvilleis-Brigol, 1975; ANAT, 1995).



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

#### I.1.1. Situation géographique de la cuvette

La zone centrale de Ouargla est installée dans une cuvette très large de la basse vallée de l'Oued MYA, cette dernière occupe une superficie de 99.000 ha (fig. I-2) et comprend partialement les daïras et les communes suivantes (DPAT, 2001):

- N'Goussa: N'Goussa ;

- Ouargla: Ouargla et Rouissat ;
- Sidi Khouiled: Aïn el Beida, Hassi Ben Abdellah et Sidi Khouiled.

La cuvette de Ouargla est caractérisée par une dissymétrie. On observe la présence d'une falaise occidentale particulièrement nette et continue, tandis que la limite orientale est imprécise (Lelièvre, 1969; Rouvillois-Brigol, 1975).

- A l'Ouest : le plateau de la Hamada Pliocène (plateau des Ganntra) à environ 220 m d'altitude, en confluence avec oued Mzab et oued N'sa ;
- A l'Est : le plateau est très démantelé, les rebords de ce plateau disparaissent sous les sables et dont les limites ne sont pas nettes, avec une altitude ne dépassant pas les 160 m, les rebords de ce plateau disparaissent sous les sables (Erg Touil, Erg Boukhezna et Erg Arifdji) ;
- Au Sud : les ruines de Sedrata sont ensevelies sous le massif dunaire qui recouvre et prend la vallée en diagonale du nord-ouest au sud-est à la Gara Krim, son altitude dépasse les 155 m ;
- Au Nord : Zabret Bouaroua (Hassi el Khefif), constitue en même temps la limite supérieure de Sebkhet Sefioune avec une pente faible d'environ 1% qui constitue un élément déterminant dans le paysage morphologique de la cuvette.

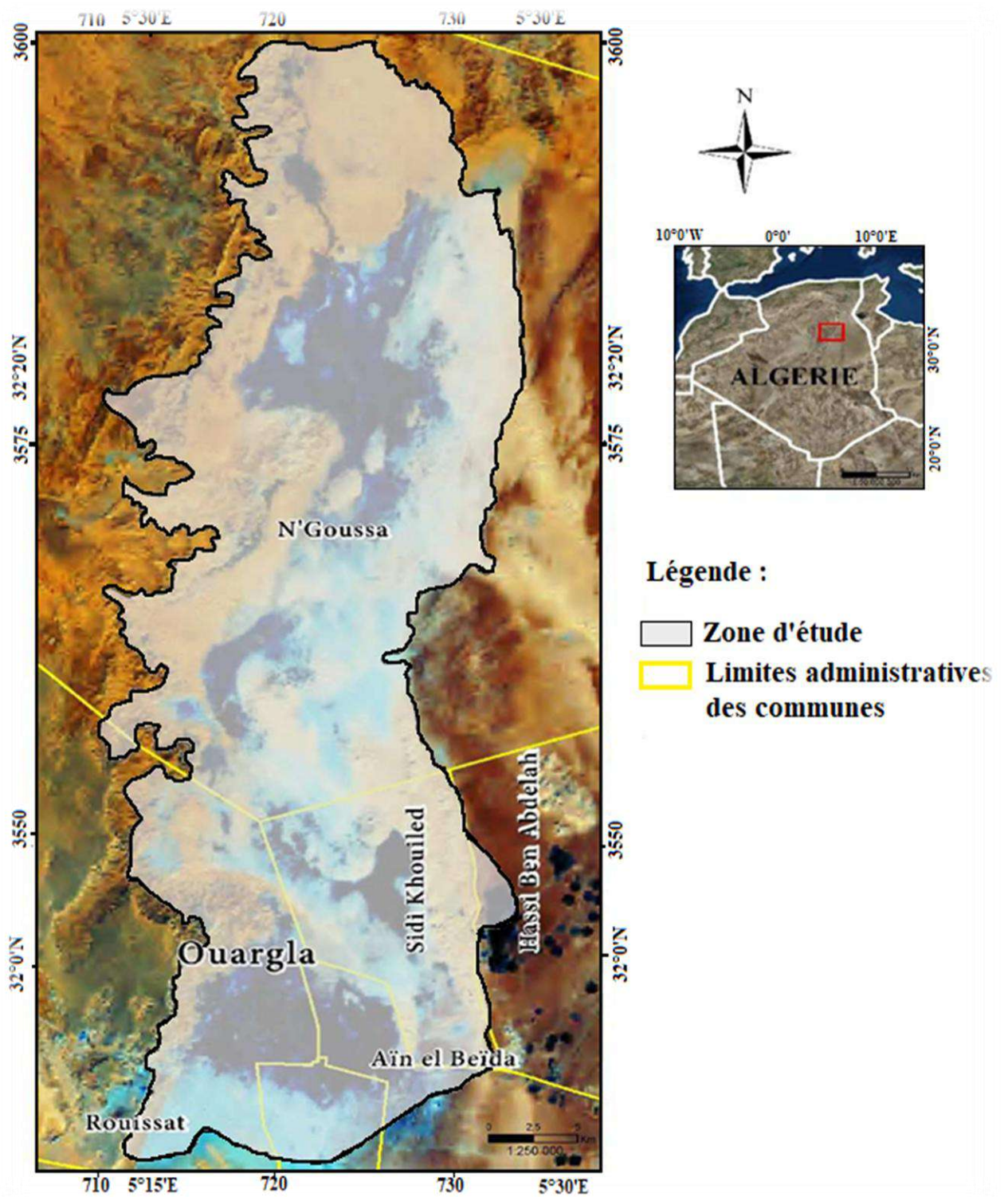


Figure I-2: Carte de localisation de la région d'étude ( EarthSat, 2015 in Slimani, 2016).

### **I.1.2. Topographie**

Sur le plan topographique, l'altitude atteint 147m pour descendre 102m, à une distance de 45km, la cuvette de Ouargla présente une pente légèrement inférieure à 1‰ qui n'est pas constante, ce qui permet d'isoler trois tronçons (Rouillois-Brigol, 1975):

- les pentes de 2 ‰, se localisent des pieds du Djebel Abbad à la rive nord de la Sebkha de Ouargla ;
- 1,8 ‰ au nord de la sebkha, de très près le massif dunaire au sud de la palmeraie de N'goussa ;
- 0,6 ‰ après le seuil de N'goussa, la topographie devient pratiquement plane jusqu'aux rives de Sebkhet Safioune. (ANRH, 2005).

### **I.2. Cadre Climatique**

Par son emplacement géographique, l'Algérie doter de trois zones climatiques distinctes ; la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride qui caractérise le grand Sahara.

La cuvette de Ouargla fait partie de la troisième zone, elle est caractérisée par des hivers froids et courts, des étés longs, chauds et secs.

Dans ce qui suit nous présentons un aperçu hydro climatologique, pour nous permettre d'établir le bilan hydrique et les liaisons existant entre les différents paramètres climatologiques caractérisant la région.

#### **I.2.1. Les précipitations**

Les précipitations représentent le paramètre climatique le plus important, notamment dans les zones arides et semi-arides. Elles constituent également le facteur essentiel du régime hydrologique.

Comme dans la majeure partie des régions sahariennes, les précipitations à Ouargla, sont marquées par leur caractère faible et irrégulier.

##### **I.2.1.1. Précipitation annuelles**

Sur un cycle de trente-deux ans (1975-2017), nous allons examiner la variation des précipitations observées

L'étude des variations des précipitations en fonction du temps pour la station de Aïn el Beïda montre une grande différence entre l'année (1983) la plus arrosée avec 90,9 mm/an et l'année (2011) la plus sèche avec 2,84 mm/an. Sachant que la moyenne interannuelle pour la

période de 1909- à 2015 était de 44 mm/an (Dubief, 1963; Oueld Belkhir, 2002; ONM, 1975-2017).

### I.2.1.2. Précipitation moyenne mensuelle

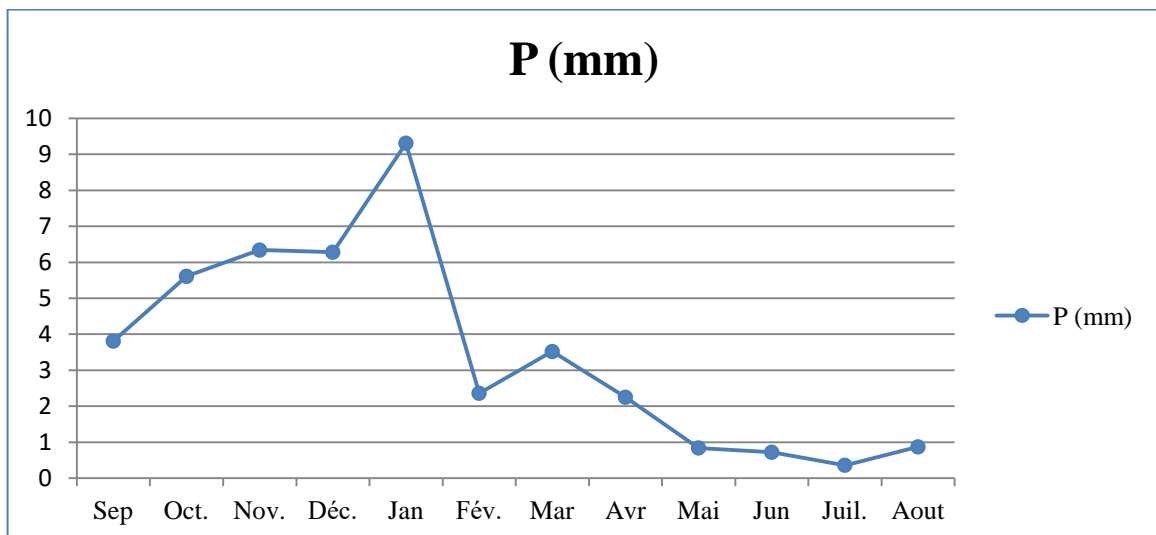
La variation mensuelle de la précipitation pour la période allant de 1975 à 2017 est représentée dans le tableau suivant :

**Tableau I-1** : Précipitations moyennes Mensuelles en mm, (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	Cumuls
<b>P (mm)</b>	3,81	5,61	6,34	6,28	9,31	2,36	3,52	2,25	0,84	0,72	0,36	0,87	42,27

La représentation des moyennes mensuelles des relevés pluviométriques sur la période d'observation (fig. I-3) nous amènons aux remarques suivantes :

- l'absence presque totale de précipitations qui s'étend du mois de mai au mois d'août ;
- la moins arrosé est le mois de juillet avec une précipitation moyenne mensuelle égale à 0,36 mm ;
- Les plus fortes valeurs sont enregistrées pendant les mois de novembre, décembre et janvier avec respectivement 6,34 ; 6,28 et 9,31 mm.



**Figure I-3:** Variation des précipitations moyenne mensuelle, Station de Aïn el Beïda (1975 - 2017).

### I.2.2. Les températures

Le paramètre température est indispensable à la climatologie, car il est très important dans les problèmes d'évaporation, d'évapotranspiration de toute la région.

Les données des températures de l'air recueillies à la station de Aïn el Beïda (tableau I-2) couvrent la période allant de 1975 à 2017, montrent que le climat de Ouargla se caractérise par des températures très élevées, avec 30,3 °C de température maximal en moyenne et 16.4 °C de température minimal en moyenne.

La région de Ouargla présente une température moyenne annuelle de 23,2 °C, Cette forte chaleur conjuguée à une amplitude thermique très élevée, favorise une intense évaporation.

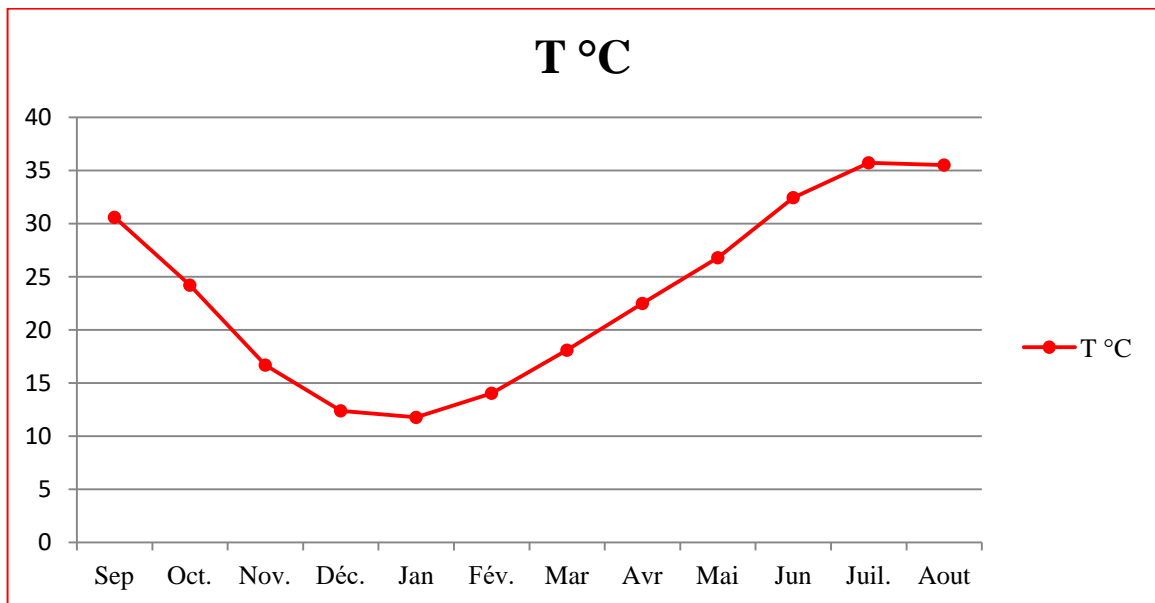
#### I.2.2.1. Variation moyenne mensuelle de la température

Les données des températures moyennes mensuelles de la région sont représentées dans le tableau suivant pour la période : 1975-2017.

**Tableau I-2 :** Température moyenne mensuelle en °C, (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	Moy
<b>T<sub>moy</sub></b>	30,60	24,22	16,7	12,4	11,78	14,05	18,10	22,50	26,8	32,45	35,73	35,52	23,40
<b>T<sub>max</sub></b>	37,14	31,39	23,59	19,36	19,19	22,78	25,51	29,67	34,43	39,91	43,35	42,67	30,74
<b>T<sub>min</sub></b>	23,09	17,16	10,17	5,96	5,33	6,94	10,73	14,91	19,45	24,63	27,72	27,42	16,12

A l'échelle mensuelle (fig. I-4), les mois les plus froids sont ceux de décembre et janvier qui atteignent une température moyenne de 12,4 °C et de 11,78 °C. La période la plus chaude de l'année se situe entre les mois de juillet et août avec une moyenne de l'ordre de 36 °C.



**Figure I-4:** Variation des Températures moyenne mensuelle, Station de Aïn el Beïda (1975 - 2017).

### I.2.3 Caractérisation climatique

Une caractérisation globale du climat peut être réalisée par l'emploi d'indices ou des diagrammes climatiques. Pour caractériser le climat de notre étude, nous avons utilisé plusieurs méthodes ; méthode d'Euvette ; Diagramme Ombrothermique de Gausson Bagnoules ; Indice d'aridité de Martonne ; Diagramme d'Emberger.

#### I.2.3.1 Méthode d'Euvette

Le rapport précipitation, température établit mensuellement permet de connaître plusieurs régimes :

- $P/T < 1$  : régime très sec
- $1 < P/T < 2$  : régime sec
- $2 < P/T < 3$  : régime sub-humide
- $P/T > 3$  : régime humide

**Tableau I-3 :** Détermination de régime climatique par la méthode d'Euvette, (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017)

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout
<b>P (mm)</b>	3,81	5,61	6,34	6,28	9,31	2,36	3,52	2,25	0,84	0,72	0,36	0,87
<b>T °C</b>	30,60	24,22	16,7	12,4	11,78	14,05	18,10	22,50	26,8	32,45	35,73	35,52
<b>P/T</b>	0,12	0,23	0,38	0,5	0,79	0,17	0,19	0,1	0,03	0,02	0,01	0,02



Nous remarquons qu'il y a un régime très pour tout les mois de l'année.

### I.2.3.2 Calcul de l'indice d'aridité

#### I.2.3.2.1 L'indice d'aridité de De Martonne

L'indice d'aridité de De Martonne, note I, cet indice permet de déterminer le degré d'aridité d'une région. Défini par la formule et la classification suivantes :

$$I = \frac{P}{T+10} \text{ où :}$$

P : précipitations annuelles moyennes (mm)

T : températures annuelles moyennes (°C)

$I < 5$  : climat hyperaride

$5 < I < 7,5$  : climat désertique

$7,5 < I < 10$  : climat steppique

$10 < I < 20$  : climat semi-aride

$20 < I < 30$  : climat tempère

$$I = \frac{42,27}{23,4+10} = 1,26$$

D'après cette classification, le climat est de type hyperaride.

#### I.2.3.2.2 L'indice d'aridité mensuel

L'indice mensuel (i), donné par la formule :  $i = \frac{12p}{T+10}$  Avec :

p : moyenne mensuelle des précipitations en mm ;

T : moyennes mensuelle des températures en °C.

Cette équation définit l'évolution des conditions climatiques au cours de l'année, donne les résultats suivants (tableau I-4).

**Tableau I.4 :** indice d'aridité mensuel

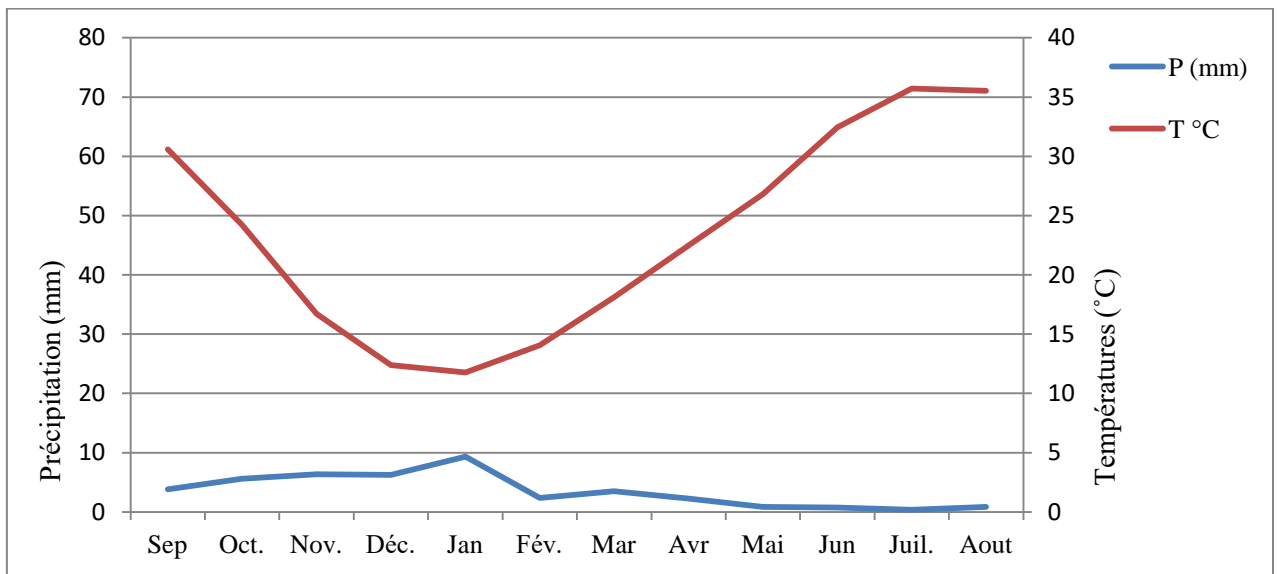
Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout
i	1,12	1,96	2,85	3,36	5,13	1,17	1,5	0,83	0,27	0,2	0,09	0,22

Les résultats montrent un climat hyperaride pour tous les mois, sauf pour le mois de janvier qui marque un climat désertique.

#### I.2.3.3 Diagramme Pluiothermique

Il a été mis au point par **F. BAGNOULS** et **GAUSSEN**. Ils ont établi des diagrammes ombrothermiques pour évaluer la durée et l'intensité de la saison sèche pendant l'année. Ils se sont basés sur la formule  $P(\text{mm}) = 2T(^{\circ}\text{C})$  ; les mois secs sont définis, quand la courbe des précipitations est située au-dessous de celle des températures moyennes.





**Figure I-5:** diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls.

Ce diagramme dressé pour la station d'étude pour la période de 1975 à 2017 révèle que la période sèche s'étale pendant toute l'année (fig. I-5).

#### I.2.3.4 Climagramme d'EMBERGER

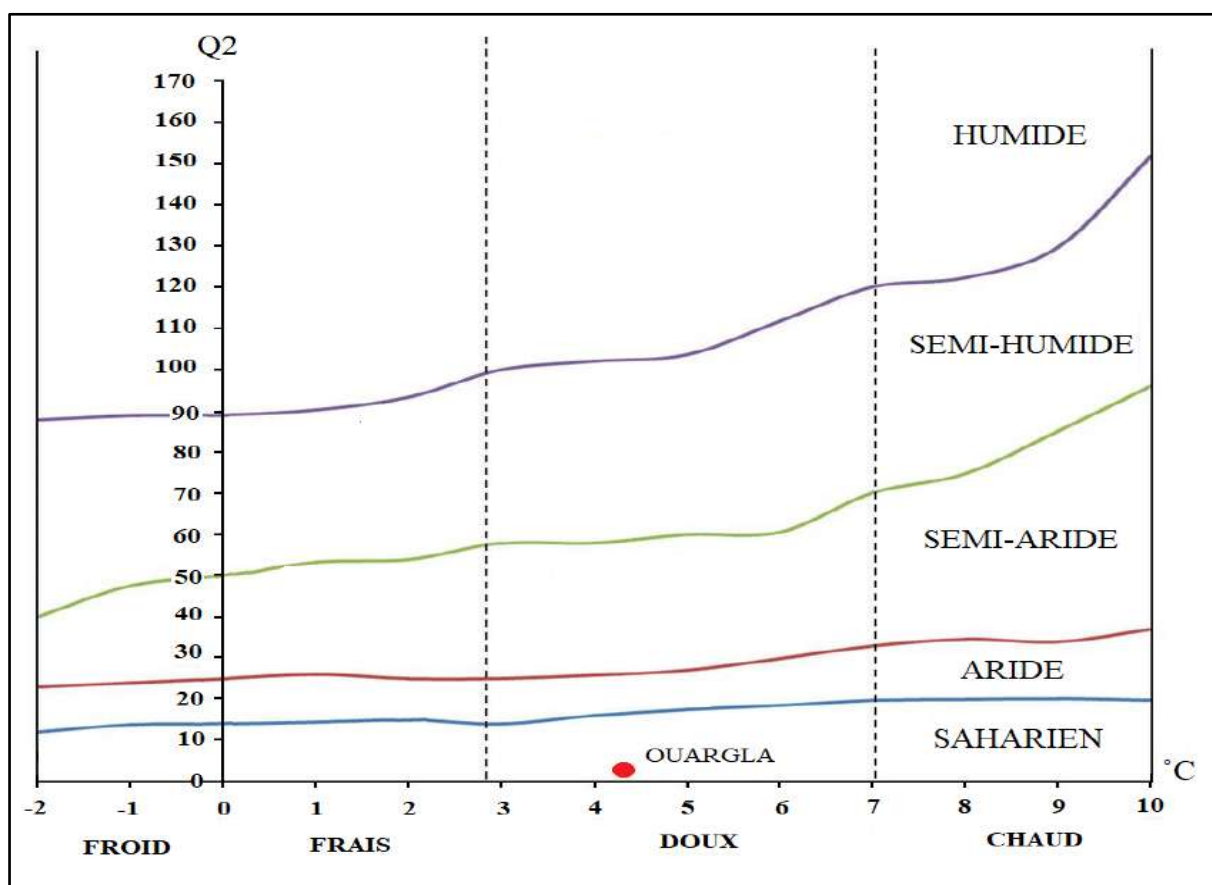
Le climagramme d'EMBERGER permet de déterminer l'étage bioclimatique d'une station donnée. Il est déterminé à partir de la formule :  $Q2 = 2000 P / M^2 - m^2$ , dont

- P : précipitation annuelle (mm) ;
- M : la température maximale du mois le plus chaud en °C ;
- m : la température minimale du mois le plus froid en °C.

En appliquant la formule de STEWART adaptée pour l'Algérie, exprimé par  $Q2=3,43(P/M - m)$  (STEWART, 1968), où

- Q le quotient pluviométrique d'EMBERGER ;
- P est la pluie annuelle exprimée en mm ;
- M est la température maximale du mois le plus chaud en °C ;
- m est la température minimale du mois le plus froid en °C (Le Houérou, 1995; Dajoz, 1971).

Après application de cette formule ( $Q2= 3,81$ ), donc la région est caractérisé par un bioclimat saharien à hivers tempéré (fig.I-6).



**Figure I-6:** Climagramme d'EMBERGER de la région de Ouargla (1975-2017).

#### I.2.4. L'humidité relative de l'air

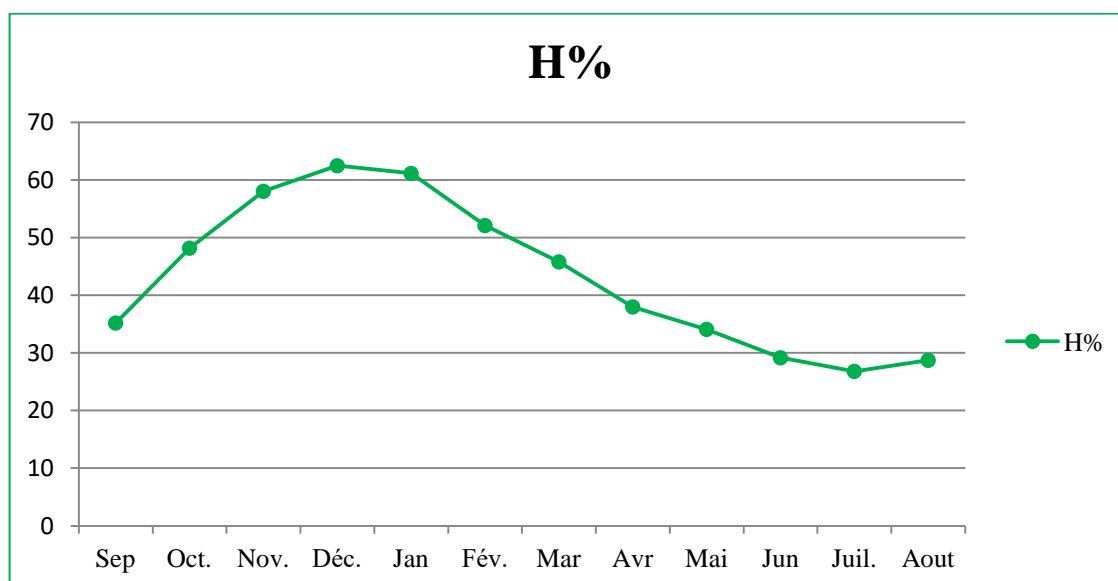
L'humidité relative de l'air, ou degré hygrométrique, correspond au rapport de pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air (Pa) sur la pression de vapeur saturante ( $P_r$ ) à la même température.

Ce paramètre est relativement faible dans la zone d'étude ; la moyenne est de 43,3 %. Cette faiblesse s'explique par l'aridité du climat et la concentration des masses d'air chaudes du Sahara. Les valeurs moyennes mensuelles sont insérées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau I.5 :** Humidités relatives moyennes enregistrées (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	Moy
H%	35,19	48,18	58,05	62,48	61,15	52,1	45,8	37,98	34,09	29,16	26,8	28,72	43,3

Cependant la période hivernale est relativement humide (48 - 62 %) (fig.I-7). En été les fortes températures dissipent la vapeur d'eau atmosphérique, ce qui explique les faibles valeurs de l'humidité (< 30%).



**Figure I-7:** Humidités relatives moyennes enregistrées à la station de Aïn el Beïda (1975-2017).

### I.2.5. Les vents

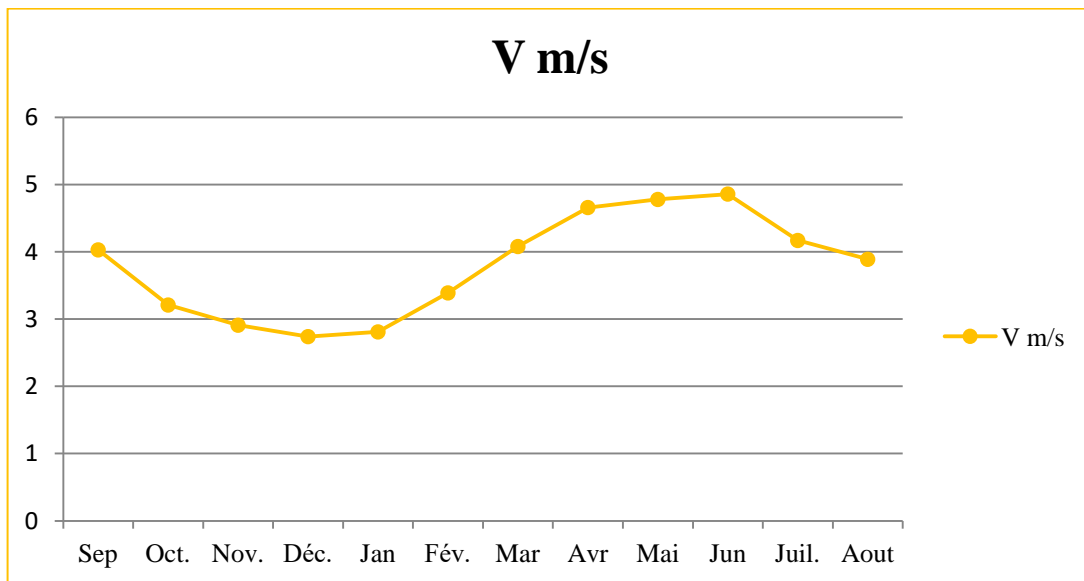
Les vents les plus fréquents, soufflent du nord, mais les plus forts proviennent généralement du nord-est et du sud. Ils suivent approximativement l'orientation générale de la cuvette (Rouvillos-Brigol, 1975).

Ces vents soufflent essentiellement durant les mois : Mars, Avril, Mai, Juins et Juillet (tableau I-6), avec une intensité moyenne de 4 à 4,86 m/s, ils occasionnent des gênes importantes en transportant des quantités considérables de sable et en favorisant les phénomènes de désertification. En outre, ils contribuent d'une manière notable à l'assèchement de l'atmosphère (Dubief, 1963).

**Tableau I.6 :** Vitesses moyennes des vents enregistrées (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	Moy
V m/s	4,03	3,21	2,91	2,74	2,81	3,39	4,08	4,66	4,78	4,86	4,17	3,89	3,79

Les vents sont fréquents et répartis sur toute l'année avec des vitesses moyennes mensuelles de 3,79 m/s environ (fig.I-8); alors que les vitesses maximales sont enregistrées aux mois de mai et Juin (respectivement 4,78 et 4,86 m/s).



**Figure I-8:** Vitesses des vents moyennes enregistrées à la station de Aïn el Beïda (1975-2017).

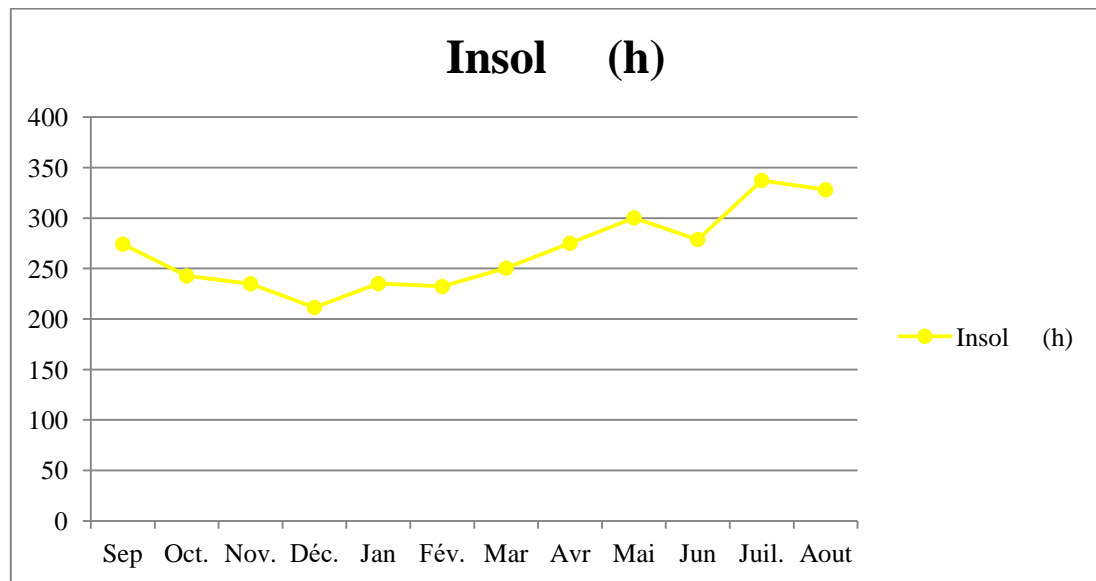
**I.2.6. Insolation**

Les durées d'insolation sont évidemment très importantes au Sahara et varient assez notablement d'une année à l'autre et même suivant les périodes de l'année envisagées (Dubief, 1963).

**Tableau I.7 :** Insolation moyennes enregistrées (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	cumuls
<b>Insol (h)</b>	274,17	242,72	234,9	211,43	235,08	232,22	250,34	275,06	300,2	278,7	337,31	327,96	3200,08

La durée moyenne annuelle de l'insolation (I) est de 266,67 heures, avec un maximum de 337,31 heures en juillet et un minimum de 211,43 heures en décembre (fig.I-9).



**Figure I-9:** Variations de la durée d'insolation enregistrées à la station de Aïn el Beïda (1975-2017).

### I.2.7. Evaporation

L'évaporation est un paramètre climatique qui a une grande influence sur la variation des niveaux des nappes proches du sol. Pour un même pouvoir évaporant de l'atmosphère, le taux d'évaporation d'une nappe d'eau dépend surtout de son étendue et de sa profondeur (Remanieras, 1986).

L'évaporation dans la région de Ouargla est très élevée, et très variable, elle est en moyenne de 393,06 mm au mois de juillet et de 84,05 mm au mois de janvier. La moyenne annuelle est de 2676,22 mm (tableau I-8)

**Tableau I-8 :** Evaporation (mm) moyenne mensuelle (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	cumuls
<b>EV(mm)</b>	264,82	178,96	121,43	110,5	84,05	121,8	176,18	228,42	274,82	347,96	393,06	374,22	2676,22

### I.2.8. Etude de l'évapotranspiration

L'évapotranspiration est la somme des quantités d'eau, exprimées en mm, évaporées à partir de la surface du sol et utilisées par les plantes.

#### I.2.8.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)

C'est une quantité d'eau pouvant être évaporé ou transpirer sur une surface donnée et pendant une période définie, en considérant que les apports en eau sont suffisants.

Diverses formules permettent d'évaluer l'évapotranspiration. Pour notre région d'études on a obtenus la formule Thornthwaite.

L'évapotranspiration potentielle non corrigée est donnée par la formule :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^\alpha \times K$$

- ETP : Evapotranspiration mensuelle corrigée ; T: Température moyenne mensuelle (en °C) ;
- I : Indice thermique annuelle, ( $I = \sum i$ ) ;
- i: Indice thermique mensuel, déterminé par l'expression : ( $i = \left( \frac{T}{5} \right)^{1,514}$ ) ;
- $\alpha$  : Coefficient calculé par la formule :  $\alpha = \left( \frac{1,6}{100} \right) i + 0,5$  ;
- EP : Evapotranspiration potentielle non corrigée, déterminée par l'expression :

$$EP = 16 \left( \frac{10T}{I} \right)^\alpha ;$$

- K : Coefficient de correction qui dépend du temps, du mois et de l'altitude du lieu, par lequel, on doit multiplier les valeurs de l'ETP pour obtenir les valeurs corrigées.

**Tableau I-9** : ETP (mm) moyennes mensuelles et annuelles calculées par la formule de THORNTHWAITE (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017).

Mois	Sep	Oct.	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Jun	Juil.	Aout	cumuls
<b>T<sub>moy</sub></b>	30,60	24,22	16,7	12,4	11,78	14,05	18,10	22,50	26,8	32,45	35,73	35,52	
<b>i</b>	15,5	10,9	6,2	3,9	3,6	4,7	7	9,7	12,7	16,9	19,6	19,5	130,2
<b>K</b>	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15	
<b>ETP<sub>C</sub></b>	149,83	77,92	26,78	12,27	11	16,75	38,59	71	122,9	201,45	262,68	245,88	1237,05

Les valeurs d'ETP atteignent leurs maximums au mois de juillet avec 262,68 mm pour une moyenne annuelle de l'ordre de 1237,05 mm soit environ 46 % de l'évaporation (tableau 09).

### I.2.8.2. Evapotranspiration réelle (ETR)

L'évapotranspiration réelle est la somme de l'évaporation et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période donnée.

Le calcul de ETR d'après L.TURC annuelle

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

- P : précipitation annuelles moyennes en (mm) ;
- $L = 300 + 25T + 0,05T^3$  où T est la température annuelle moyenne en C°.

Application :

$L = 1525,64$  ;  $P = 42,27$  mm donc on aura :  $ETR = 44,54$  mm (105,37%).

### I.2.8.3. Bilan hydrique par la méthode de G.W.THORNTHWAITE.

Le calcul mensuel de l'ETP et de la RFU (réserve facilement utilisable), est basé de cette méthode. Elle permet de relever deux constatations lorsqu'on compare l'ETP et la précipitation du même mois :

- $P > ETP \Rightarrow ETR = ETP$  et on aura un excédent ;
- $P < ETR \Rightarrow ETR = P$  : l'évapotranspiration épuisera la RFU, et on aura un déficit hydrique.

**Tableau I-10** : Bilan hydrique de THORNTHWAITE (Station Aïn el Beïda, ONM 1975-2017).

Mois	P	ETP	P-ETP	RFU	ETR	Def	Exc
Jan	9,31	11	-1,69	0	9,31	1,69	0
Fév.	2,36	16,75	-14,39	0	2,36	14,39	0
Mar	3,52	38,59	-35,07	0	3,52	35,07	0
Avr	2,25	71	-68,75	0	2,25	68,75	0
Mai	0,84	122,9	-122,06	0	0,84	122,06	0
Jun	0,72	201,45	-200,73	0	0,72	200,73	0
Juil.	0,36	262,68	-262,32	0	0,36	262,32	0
Aout	0,87	245,88	-245,01	0	0,87	245,01	0
Sep	3,81	149,83	-146,02	0	3,81	146,02	0
Oct.	5,61	77,92	-72,31	0	5,61	72,31	0
Nov.	6,34	26,78	-20,44	0	6,34	20,44	0
Déc.	6,28	12,27	-5,99	0	6,28	5,99	0
<b>Total</b>	42,27	1237,05	/	0	42,27	1194,78	0

Nous constatons que les précipitations sont toujours inférieures à l'ETP ; l'ETR est donc égale aux précipitations (42,27 mm), ce qui conduit à un déficit couvrant toute l'année. La réserve utile du sol n'atteint jamais son maximum qui est de 100 mm telle que suggérée

par THORNHTHWAITE dans sa formulation. Ce déséquilibre entre les précipitations et l'évaporation montre la nécessité d'une irrigation importante pour l'agriculture utilisant surtout les eaux souterraines.

### **I.3. Cadre Hydrologique**

Sur les 17,10 m<sup>3</sup> de pluie que reçoit en moyenne l'Algérie, la part de Ouargla est de 5,107 m<sup>3</sup>, ce qui représente 0,3 % de la pluie totale. La partie qui engendre le ruissellement est en fait insignifiante.

Deux principaux oueds appartenant au bassin du M'zab se jettent dans la cuvette de Ouargla au niveau de Sebkhath Sefioune qui sont oued N'sa et oued M'zab. Le mont Tadmait dispose aussi d'un principal oued dit oued Mya de direction sud-ouest / nord-est, et qui passe par la cuvette de Ouargla (Dubief, 1953; Lelièvre, 1969; Rouvillois-Brigol, 1975).

#### **I.3.1. Le réseau hydrographique**

L'hydrographie de la cuvette de Ouargla se caractérise par son endoréisme (Dubief, 1953), c'est-à-dire les eaux se déversent dans une cuvette fermée.

Le réseau hydrographique qui traverse la région d'étude est composé des oueds suivants (fig. I-10):

##### **I.3.1.1. Oued Mya**

Cet oued draine la partie orientale du plateau de Tadmait (Medinger, 1961; Dubief, 1953). Le bassin de l'oued M'ya est en forme d'une large gouttière avec une altitude au Sud de l'ordre de 800 m, avec une inclinaison très faible (0,1 à 0,2 %) vers le Nord-est. Il s'étend sur 19 800 km<sup>2</sup>, le cours fossile de l'oued M'ya inférieur est caractérisé par de sebkhas étendus jusqu'à Ouargla, à une distance environ de 200 km du point externe atteint par les dernières crues. Si on suppose cependant que l'oued Mya quaternaire se jetait dans le chott Melrhir actuel, sa longueur devrait atteindre 900 km (Dubief, 1953).

##### **I.3.1.2. Oued N'sa**

Il peut présenter des crues considérables selon les fréquences. La superficie de bassin versant de oued N'sa est estimée de 7800 Km<sup>2</sup>, dont il reçoit plusieurs affluents dont les plus importants sont le Ballouh et le Soudou qui arrosent l'oasis de Beriane (Dubief, 1953; ANAT, 1995; Dubost, 2002).

##### **I.3.1.3 Oued M'zab**



Il passe par la ville de Ghardaïa, son bassin est caractérisé par une superficie d'environ 5000 km<sup>2</sup>, L'oued M'zab prend naissance dans la région de Botma Touila à une altitude de 750 m et il coule sensiblement d'Ouest en Est sur 325 km environ, les crues de ce oued peuvent atteindre Sebkheth Safioune (Dubief, 1953; Ben Brahim, 1997).



**Figure I-10:** Réseau hydrographique de la vallée de Ouargla (UNESCO., 1972).

### I.3.2. Les crues

Les écoulements superficiels jouent un rôle primordial dans l'alimentation des nappes phréatiques. Dans les régions arides et semi-arides, la fréquence des crues est très variable dans le temps, et les variations interannuelles observées sont très importantes. A une longue période de sécheresse peut succéder une courte série d'années humides, D'après Dublet (1953), sur une période de 39 ans allant de 1921 à 1952, on a enregistré 26 mois de crues importantes de l'oued M'zab ou de ces affluents qui se sont produites à Ghardaïa et d'après Ouled belkhir (2002), sur une autre période de 31 ans allant de 1969 à 2001, il y a eu 21 mois d'écoulements ayant inondé les palmeraies de la région. Quant à l'oued N'sa, il est dépourvu de toute mesure. En effet, c'est très rare de signaler des crues sur cet oued sans qu'il y ait eu un écoulement sur l'oued M'zab. On peut noter que les crues les plus ou moins importantes se produisent à peu près chaque année.

Les vitesses d'écoulement instantané des eaux dans les oueds sahariens ont fait l'objet de peu de mesures. Il est possible d'observer des fronts de propagation en forme de houle, lors

des pluies qui tombent partiellement sur le bassin versant, et lorsque le lit de l'oued est asséché. Les premières eaux écoulées sont en effet absorbées par les sédiments, les sables et les graviers, qui couvrent le lit de l'oued sur plusieurs mètres d'épaisseur. Dans le cas contraire, et lorsque les pluies tombent sur l'ensemble du bassin, les écoulements latéraux en aval satureront le lit, avant l'arrivée de l'écoulement massif des eaux (Roche, 1973, 1996; SIDAT, 1998; Oueld Belkhir, 2002).

Selon Dubief (1953), la vitesse de la crue d'octobre 1951 sur oued N'sa à Hassi Khefif, à son embouchure dans la Sebkhet Sefioune, coule "à la vitesse d'un cheval au trot", alors que la hauteur atteint 1,6 m et la largeur 30 m.

La période de retour des crues sur l'oued N'sa et M'zab qui atteignent Sebkhet Sefioune, ont été évaluées à 8 ans. Les pluies journalières de même fréquence ont une hauteur de 38 mm à Ghardaia. Les crues importantes se produisent le plus fréquemment de mars à mai et de septembre à décembre, disons au printemps et à l'automne. Ainsi, elles peuvent intervenir en tout mois de l'année (crue du 2 juin 1991). Les mois de fréquences les plus faibles ou nulles sont: janvier, juillet et août (Oueld Belkhir, 2002).

#### **I.4. Conclusion**

Ouargla, région du Bas-Sahara algérien, se situe au lit quaternaire de la basse vallée fossile de l'oued Mya, une cuvette d'une superficie d'environ 99.000 ha.

Cette Cuvette est soumise à un climat aride, caractéristique de climat des régions sahariennes. Les précipitations sont irrégulières, l'étude des variations séculaire a fait ressortir une moyenne de 42,27 mm de pluie annuellement. Les pluies sont de faible intensités au Sahara, d'où une variance de chiffre de 0mm à 30,9mm durant les mois de novembre, décembre et janvier qui sont considérés comme les plus arrosés, avec des températures moyennes de 14°C pour les mois hivernaux (janvier et février), de 36°C pour la période chaude de l'année (juillet et août).

Les vents, notamment les vents de sables ont un effet de dessèchement avec une direction SW-NE, d'où la faible moyenne d'humidité, qui est ressentie de 26% en mois de juillet et atteint un maximum de 62% en décembre. Les valeurs importantes de l'évaporation par comparaison avec la pluviométrie engendrent un déficit couvrant toute l'année.

Le réseau hydrographique de la cuvette de Ouargla de vue hydraulique, est peu dense, il est constitué d'un oued fossile dit oued Mya et de deux oueds fonctionnels dits oued N'sa et oued Mzab. Ces derniers ont un écoulement temporaire variable selon les secteurs et les

années. Les débits de ces crues sont souvent faibles, mais peuvent atteindre des valeurs importantes qui alimentent la nappe phréatique.

# CHAPITRE II

---

## Contexte Géologique

## II.1. Introduction

L'étude géologique d'une région est indispensable pour pouvoir déterminer les formations susceptibles de contenir des nappes aquifères à partir de leur lithologie.

De nombreux auteurs qui ont publié des travaux sur la géologie du Sahara septentrional (Glangeaud, 1932, Conrad., 1969, Busson;1970, Fabre, 1976). Nous pensons que ces travaux assez cohérents peuvent nous donner une conclusion sur la géologie de la région d'étude.

Dans un premier temps nous résumons la géologie générale de la plate-forme saharienne avant de détailler la géologie locale ainsi que la stratigraphie des différentes formations du secteur d'étude.

La géologie de la partie septentrionale de l'Algérie est marquée par l'empreinte de l'orogénèse alpine (domaines tellien et atlasique) (Glangeaud, 1932). Le linéament majeur du pays correspond à la flexure sud-atlasique qui sépare l'Algérie alpine au nord de la plate-forme saharienne au sud, constituée pour l'essentiel de terrains du Précambrien et du Paléozoïque (Boote et al., 1998; Bracène al., 2002).

## II.2. Contexte Géologique à l'échelle régional

### II.2.1. La plate-forme saharienne

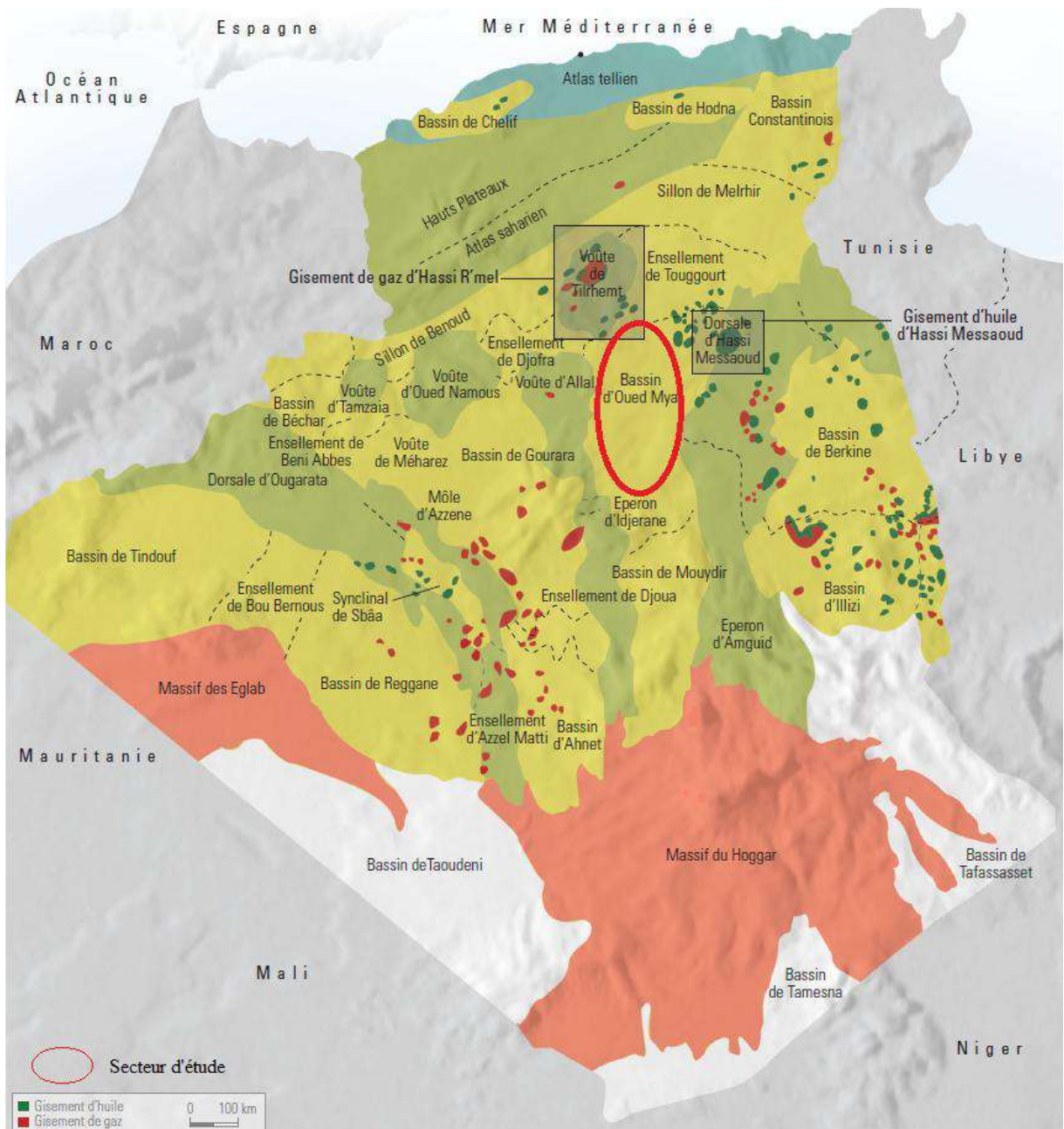
L'Algérie est divisée en deux unités tectoniques majeures séparées par la faille sud-atlasique :

- le Nord de l'Algérie portant l'empreinte de la tectonique alpine ;
- la plate-forme saharienne, relativement stable, où la tectonique est moins prononcée.

La plate-forme saharienne, située au sud de l'Algérie alpine, s'étend sur une superficie de 8.000.000 km<sup>2</sup>, et appartient au Craton Nord Africain (fig. II-1). Elle comprend un socle précambrien sur lequel repose en discordance une puissante couverture sédimentaire, structurée au Paléozoïque en plusieurs bassins séparés par des zones hautes (Leikine. M., 1971, Fabre, 1976; Coward et Ries, 2003). On distingue d'ouest en est :

- Les bassins de Tindouf et de Reggane situés sur les bordures nord et nord-est du bouclier Reguibat. La couverture sédimentaire atteindrait 8 000 m dans le bassin de Tindouf et 6 500 m dans celui de Reggane ;
- Le bassin de Béchar limité au nord par le Haut Atlas, au sud et à l'ouest par la chaîne d'Ougarta. Sa couverture sédi-mentaire atteindrait 8 000 m ;
- Le bassin d'Ahnet-Timimoun limité au nord par le haut fond d'Oued Namous, à l'ouest par la chaîne d'Ougarta, au sud par le bouclier Touareg et à l'est par la dorsale d'Idjerane-Mzab. La couverture serait en moyenne de 4 000 m ;

- Les bassins du Mouydir et de l'Aguemour-Oued Mya sont limités à l'ouest par la dorsale d'Idjerane-Mzab et à l'est par la dorsale Amguid-El Biod. Au sud, les sédiments paléozoïques affleurent dans le Mouydir. Au nord, dans la dépression d'Aguemour-Oued Mya, comblée par une puissante série paléozoïque et méso-cénozoïque (5 000 m à Oued Mya ;
- La synclise d'Illizi-Ghadamès est limitée à l'ouest par la dorsale d'Amguid-El Biod et à l'est par le môle de Tihemboka et les confins tuniso-libyens. Dans le bassin de Ghadamès, la couverture sédimentaire (supérieure à 6 000 m).



**Figure II-1:** Les bassins les plus importants en Algérie. (SONATRACH, 2013).

### II.2.2. Aperçu lithostratigraphique

Le Sahara septentrional algérien a été l'objet d'une prospection très active de la part des pétroliers et des hydro géologues. Sur le plan stratigraphie et lithologique, les pétroliers ont modelé la Plate-forme Saharienne en un certain nombre de bassins répartis dans la province occidentale, la province orientale et la province triasique.

#### a) La province occidentale

La province occidentale comprend les bassins de Béchar, Tindouf, Reggane, Ahnet, Mouydir, Timimoun et Sbaa (Aliev et al., 1971; Beuf et al, 1971; Fabre, 1988). Ces dépressions sont à remplissage paléozoïque, Cambrien à Namurien (fig. II-2.a). Le Méso-Cénozoïque y est peu développé. La puissance des séries varie de 3500 à 8000m.

#### b) La province orientale

Cette province, appelée synéclyse Est Algérie, se compose des bassins d'Illizi et de Ghadamès séparés par le môle d'Ahara. La série sédimentaire type discordante sur le Précambrien (fig. II-2.b), présente tous les termes, du Cambrien à l'Actuel. Une série sableuse d'âge Mio-pliocène recouvre localement les formations terminales du Mésozoïque.

Enfin le Quaternaire discontinu, de faible épaisseur, constitue le dernier élément de la série stratigraphique.

#### c) La province triasique

Située dans la partie septentrionale de la Plate-forme Saharienne, la province triasique est un anticlinorium de direction Est-Ouest où les éléments majeurs suivants ont été individualisés :

- la voûte de Tirlhemt et le haut fond de Talemzane;
- le système structural de Djemâa-Touggourt;
- le système de dislocation d'El Agreb-Messaoud;
- le môle de Dahar.

Ces éléments sont séparés par des dépressions (Oued Mya) où l'on rencontre les séries types de la province triasique. Les dépôts paléozoïques sont souvent très érodés, aussi profondément que l'Ordovicien ou le Cambrien (Figure II-2.C).

Le Mésozoïque, discordant sur le Paléozoïque, est présent du Trias au Crétacé. Le Cénozoïque est représenté par une série détritique du Mio-Pliocène.



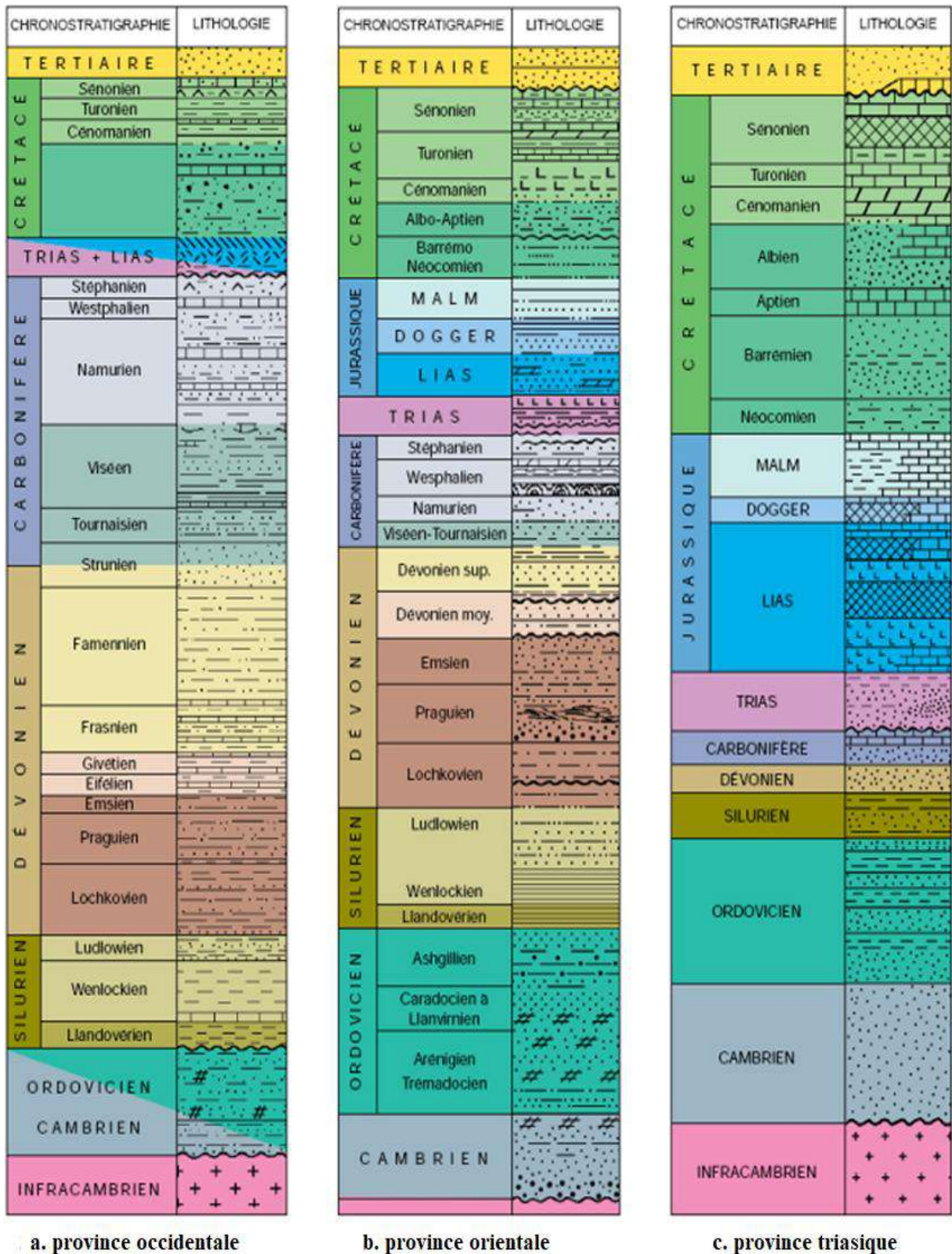


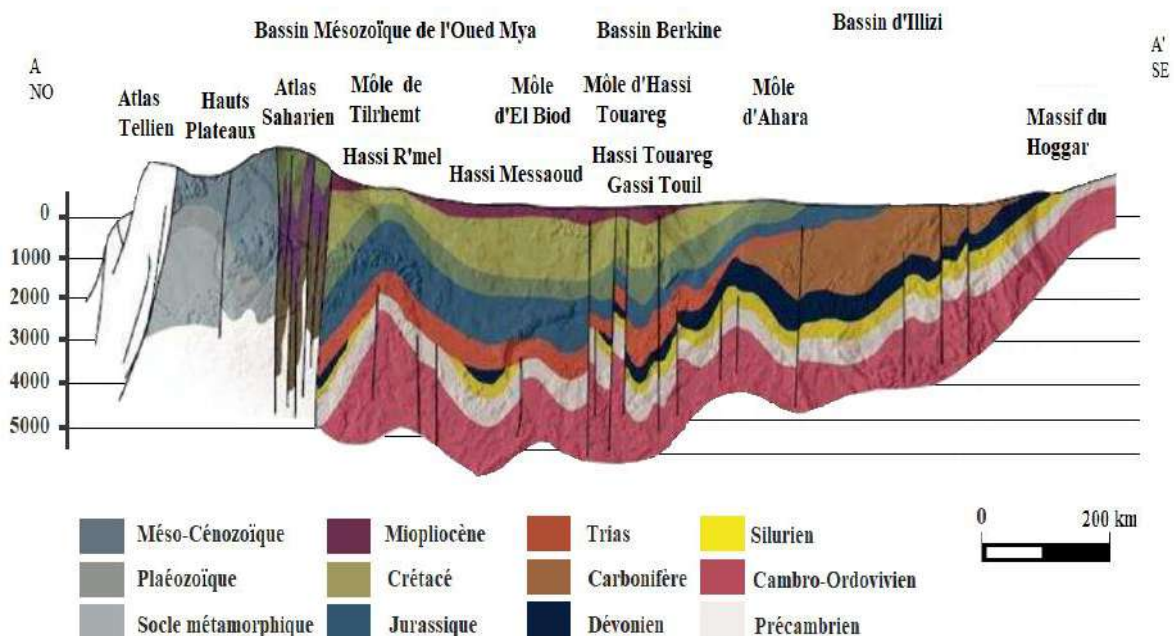
Figure II-2 : Coupe stratigraphique des provinces de la plate-forme saharienne (ALNAFT).



**II.2.3. Tectonique**

Dans son ensemble, la dépression de l'Oued Mya est le résultat de mouvements compressifs NO-SE et N-s du Mésozoïque et du Cénozoïque ainsi que de la réactivation à partir du Sénonien d'anciens accidents tectoniques hercyniens. Cette dépression a constitué plus tard un milieu favorable pour le dépôt des formations néogènes et Quaternaires du bas Sahara (Aliev et al., 1972).

Sur la coupe géo-structure transversale régionale (fig. II-3), sont représentées toutes les structures et les failles mises en évidence par les études géophysiques, montrant que la dépression est structurellement affectée par les failles hercyniennes du Hoggar à partir du Combien jusqu'au Sénonien inférieur. Ces failles sont orientées sud-est nord-ouest et traversent la région de Ouargla à l'est; elles seraient à l'origine des communications entre les différents aquifères dans cette zone (Guendouz et al., 1992, 2003; Edmund et al., 2003).

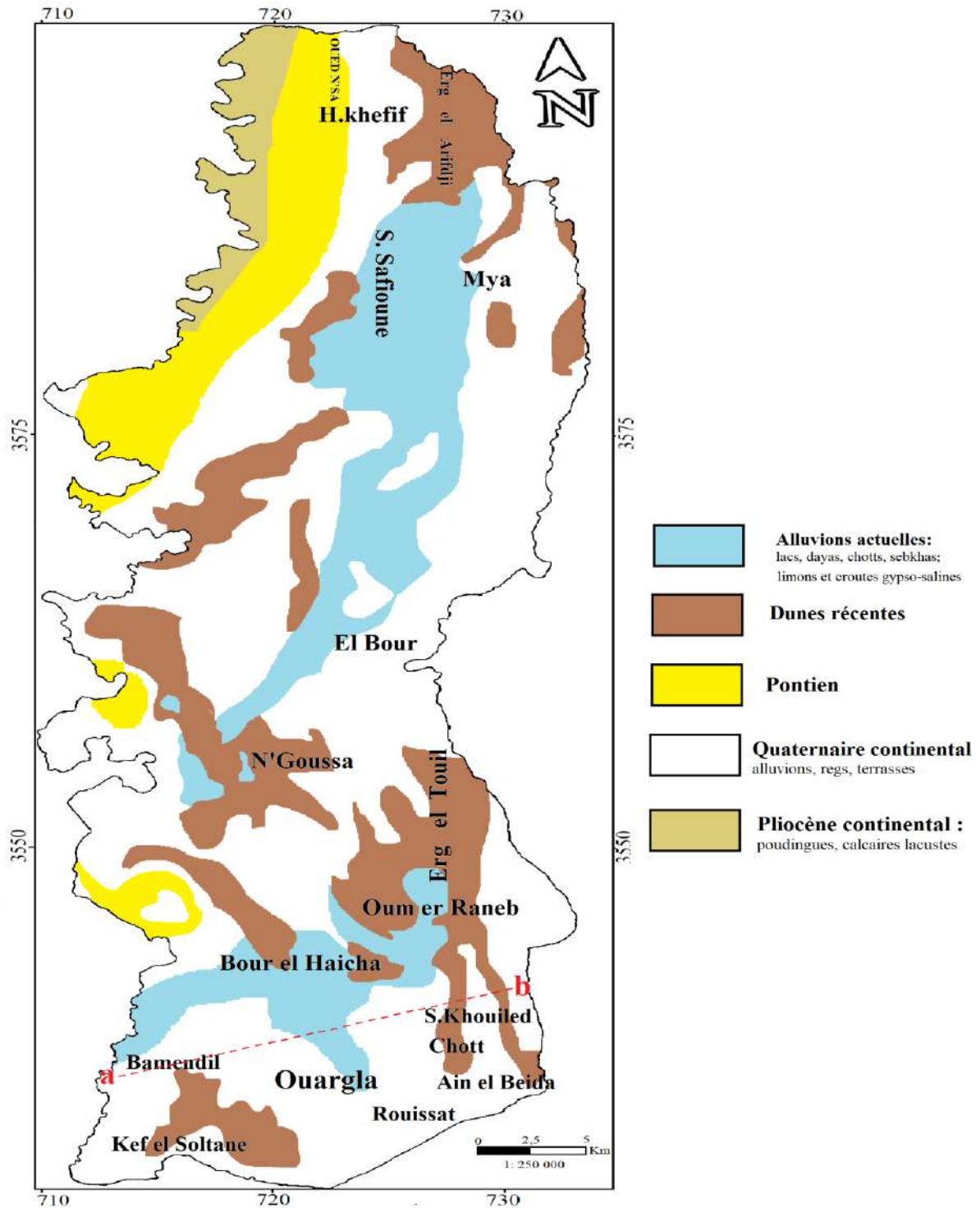


*Figure II-3 : Coupe géologique NO-SE de l'Algérie (WEC, 2007).*

**II.3. Contexte Géologique à l'échelle locale**

**II.3.1. Les affleurements**

Les terrains du Miopliocène affleurent dans notre zone d'étude du fait d'une importante couverture de dépôts de surface d'âge quaternaire (fig. II-4). Ces dépôts de surface sont constitués par des ergs (massifs de dunes de sable) et des regs (plateaux caillouteux)



**Figure II-4:** Carte géologique de la région de Ouargla (d'après Cornet et Gouscov, 1952 modifier)

### II.3.2 Litho-stratigraphie

A partir des données de forages pétroliers et celles des forages hydrauliques, nous avons établi des coupes géologiques et un log synthétique des formations lithologiques. La description des différentes formations a pu être effectuée (fig. II-5).

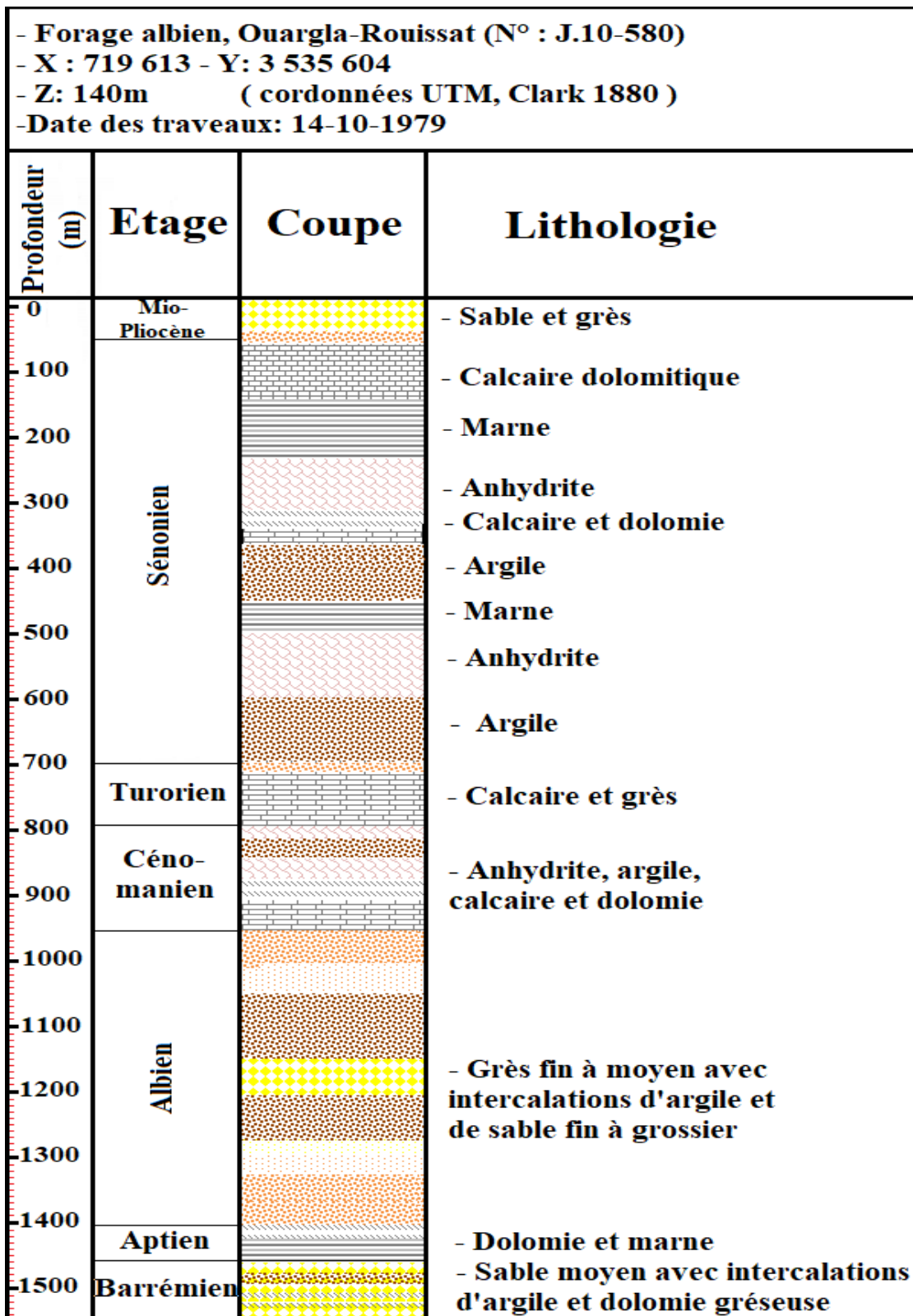


Figure II-5: Colonne stratigraphique du sondage J.10-580.

- **Le Barrémien**

Capté à partir de 1500m environ. Il présente une alternance de grès et d'argile, avec des intercalations calcaro-dolomitiques.

- **L'Aptien**

Il est constitué par la "barre aptienne" dans la région d'Ouargla, elle est formée de marnes dolomitiques, gris, vertes, brunes ou blanches et de dolomies cristallines. Son épaisseur est variable, généralement inférieure à 50m.

- **L'Albien**

Il correspond à la série lithologique supérieure du Continental Intercalaire, des grès, argiles et des sables. L'épaisseur de ces formations est variable (> 400m). Les éléments détritiques (non argileux) sont largement prépondérants (70 à 90%) et sont représentés par des grès fins avec des passées de grès moyens et parfois des intercalations de sables grossiers à limons argileux ou carbonatés. On note des passées d'argiles brunes-rougeâtres, elles sont même pélitiques et sableuses dans les puits les plus septentrionaux.

- **Le Vraconien**

L'intercalation albo-cénomaniennne caractérise un épisode dolomitique remarquable entre les sables de l'Albien et les marnes du Cénomaniennne, il est formé de dolomies et quelques fois de calcaires dolomitiques parfois argileux contenant de rares débris de mollusques, les épaisseurs y sont de 50 à 100m et argiles et marnes dolomitiques et des éléments détritiques.

- **Cénomaniennne**

Il est formé de deux séries : (inférieure et supérieure): La série inférieure est constituée par des argiles dolomitiques et des marnes grises, avec parfois des argiles brunes-rougeâtres ou grises-verdâtres, son épaisseur varie entre 60 et 80m. On note aussi quelques passées de calcaires dolomitiques en particulier à la partie médiane de la série. La série supérieure est formée d'une alternance d'argiles et de marnes dolomitiques grises, parfois d'argiles salifères, de bancs d'anhydrite et de quelques intercalations dolomitiques, son épaisseur est de l'ordre de 70 m.

- **Le Turonien**

Il se présente sous forme d'une dalle "barre turonienne" ayant une épaisseur régulière de l'ordre de 70m. Il s'agit d'une formation essentiellement calcaire; calcaire poreux blancs, parfois grisâtres, pulvérulent, quelques fois dolomitique, de calcaire beige dolomitique et de calcaire fin légèrement dolomitique.

- **Le Sénonien**

Il est constitué de deux formations lithologiques superposées :

- Le Sénonien lagunaire à la base qui est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. Les proportions de ces formations varient d'un point à un autre.

- L'anhydrite forme des bancs qui peuvent atteindre 250 m.
- La dolomie constitue parfois des barres d'environ 60 m.
- Les niveaux d'argile et de marne ne dépassent généralement pas 120 m d'épaisseur.
- Le Sénonien carbonaté au sommet (200 m environ) : Calcaire blanc, tendre à moyennement dur, parfois crayeux à vacuolaire et passées de marne gris tendre à pâteuse dolomitique.

- **Le Sénono-Eocène**

Il est formé essentiellement de carbonates ayant une épaisseur comprise entre 150 et 200m. Il s'agit de calcaires dolomitiques cristallins ou microcristallins parfois vacuolaire ou crayeux ou carrément argileux.

- **Le Miopliocène**

Il correspond au Continental Terminal tel qu'il a été défini par Kilian, (1931). C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles, qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance sur le Sénono-Eocène

On distingue quatre niveaux différents dans la région de Ouargla, se sont de bas en haut (fig. II-6):

- Un dépôt argileux peu épais (< 10m) recouvrant dans la partie centrale de la cuvette et suivant une bande Nord-Sud du Sénono-Eocène.
- Un niveau grés-sableux qui devient argileux vers le sommet, c'est le niveau le plus épais (> 30m) et le plus constant.
- Un niveau argilo-sableux dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Cette couche n'apparaît que dans certains endroits.
- Un niveau très épais (≈ 30m) dans la zone des chotts, à sommet affleurant sur de grandes surfaces et souvent constitué par une croûte de calcaire gréseux (croûte hamadienne).

- **Le Quaternaire**

A la base, il existe un niveau argilo-gréseux qui se présente comme une croûte ancienne. Le niveau le plus superficiel est constitué de sables éoliens parfois gypseux et de produit de remaniement des terrains du Miopliocène.

Les sondages superficiels effectués dans différentes localités de la cuvette (fig. II-6), ont permis de rencontrer les ensembles suivants :

Sur les plateaux, le sol est constitué d'un matériau meuble exclusivement détritique, hérité de l'altération des grès à sable rouge du Miopliocène, c'est le sol le plus pauvre en gypse dans la région, à 10m de profondeur, il s'agit d'un sol sableux à graviers.

Sur les Chotts et les terrains intermédiaires, l'horizon de surface est une croûte gypseuse épaisse, blanchâtre partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux. De 10 à 20cm de profondeur, on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40cm d'épaisseur ; plus en profondeur un tuf présente une teneur de gypse décroissante.

- Les Sebkhass : sont caractérisées par une salure extrêmement élevée, des croûtes salines reposent sur des matériaux limonosableux.
- Les dunes : sont formées de sable éolien d'origine gréseux provenant de la Hamada Miopliocène. Elles existent dans les talwegs, sur les bordures des Sebkhass et sur les versants rocheux.



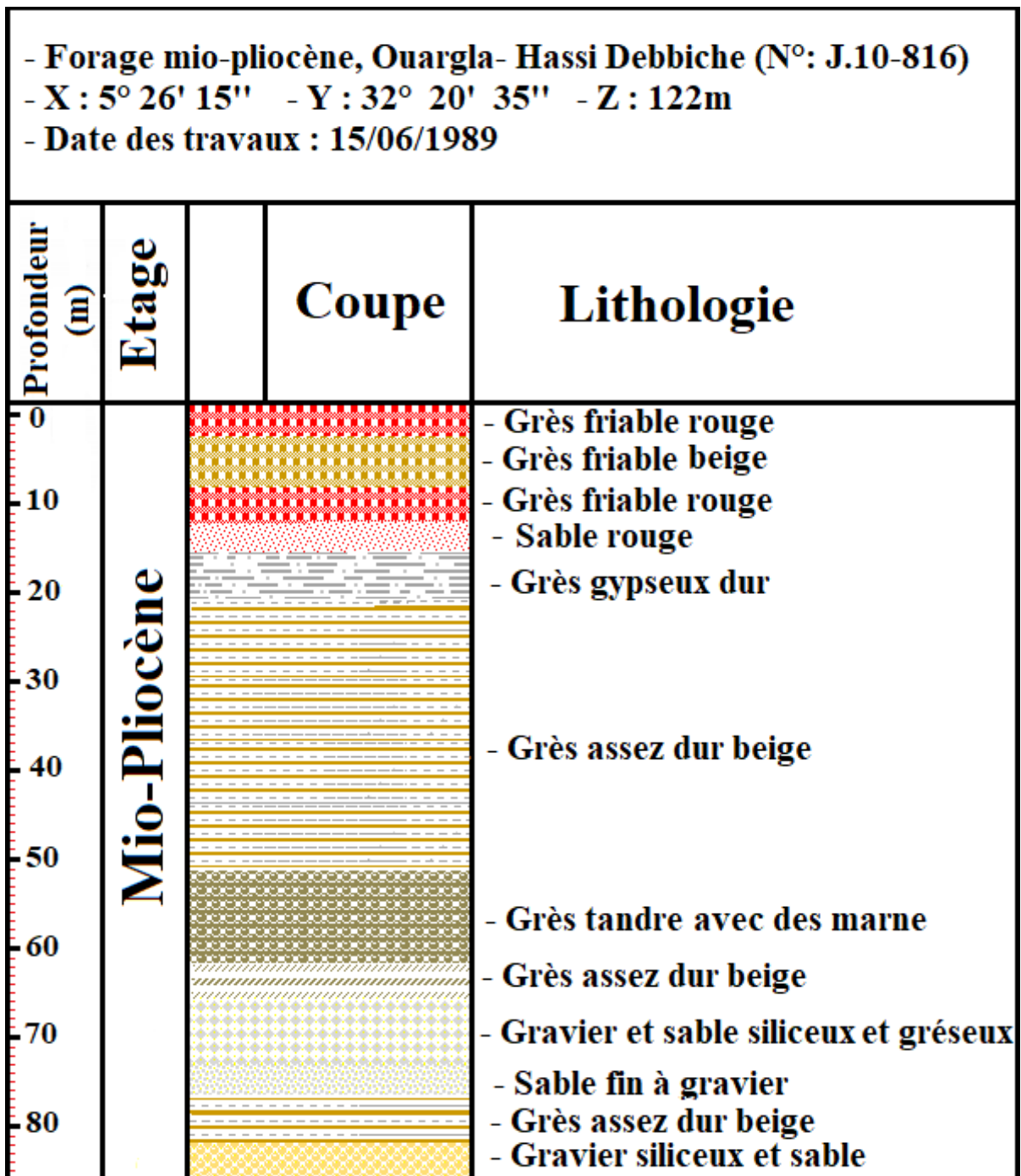


Figure II-6: Colonne stratigraphique du sondage J.10-818.

### II.3.3. Caractéristiques géomorphologiques de la cuvette d'Ouargla

L'étude géomorphologique de la région d'Ouargla fait apparaître les éléments suivants (fig. II-7) :

A l'Ouest de Ouargla, la vallée est limitée par le plateau de la Hamada pliocène de 200 à 250m d'altitude, appelé localement "plateau des Gantra". Il s'abaisse légèrement d'Ouest en Est. Il est interrompu par une vaste dépression ovale de Sebkhha de Mellala (30Km de long, de

6 à 11Km de large, 80 à 90m de profondeur), qui s'étend parallèlement à la vallée de l'Oued M'ya. D'après Capot-Rey (1959); cette dépression peut être considérée comme un phénomène karstique.

La dissymétrie de la vallée de l'Oued M'ya est marquée par la présence d'une falaise gréseuse occidentale, particulièrement nette et continue, avec une pente très abrupte, tandis que la limite orientale est beaucoup plus imprécise (Hamdi-Aïssa., 2001).

Le versant Ouest de la cuvette présente quatre niveaux étagés de glacis caractéristiques, la plus ancienne recoupe le sommet de la bordure du plateau en buttes. Sa couverture très caractéristique est une croûte gypso-calcaire épaisse de 1,5m ; son altitude s'abaisse de 225m à l'Ouest à 200m environ à l'Est; son exigüité le rend souvent difficile à distinguer de la surface du plateau de la Hamada. C'est à ce niveau qu'il faut rattacher certains Gara(s) de la vallée Djebel Abbad, Gara Krime, Bab el Hattabat, les buttes de Trois pitons sur la route de Touggourt...etc.).

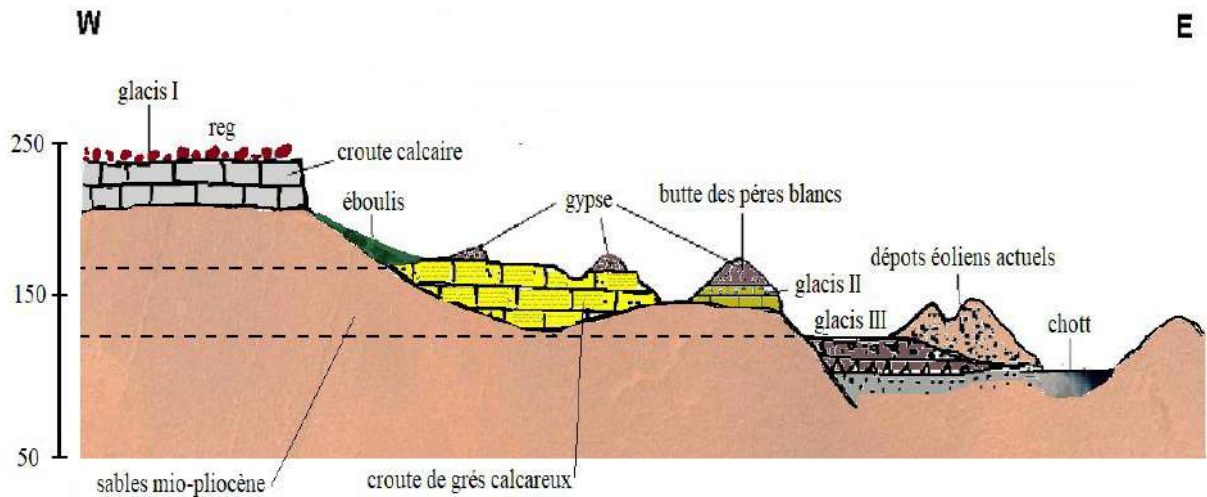
Le second glacis, beaucoup plus visible, est à une altitude de 180m environ, comme le troisième niveau, à 160m, caractérisé par l'affleurement du substrat gréseux de Mio-Pliocène (Fig. II-7). Ce dernier est souvent recouvert de sable et de graviers gréseux plus ou moins encroûtés de gypse ; sa pente est faible.

Le glacis de 160m a été fortement démantelé lors de la formation du dernier glacis, développé à 140m d'altitude environ, et a donné naissance à des formes de relief originales sur lesquelles se sont installées quelques palmeraies de Bamendil. Leur position topographique sur élevée par rapport au niveau de la sebkha les protège de risque de remontée de nappe qui menace actuellement les oasis de bas-fond, (Côte1998 ; Hamdi-Aïssa et al., 2000).

Les formations quaternaires occupent tous les points bas des grands bassins sédimentaires et forment généralement des zones salées appelées Sebkhas, ou Chott (chott de Ouargla). Se sont de grandes zones d'épandage de matériel alluvial, sableux le plus souvent. La pente Sud-Nord de la vallée est légèrement inférieure à 0,1%; (150m d'altitude aux ruines de Sedrata, 136m à Ouargla, 131m dans la sebkha de Ouargla). Elle s'accroît légèrement en aval de Ouargla où les sebkhas (Oum Raneb, El Mergueb et Safioune) alternent avec les massifs dunaires (Et-Touil, Arifdji, Bou-Khezana...etc.).

La limite Est de la cuvette de Ouargla est marquée par un dénivelé d'une trentaine de mètres, plus ou moins net. Après le seuil d'Ain Beida (144m), qu'emprunte la route de Touggourt, l'altitude remonte à 163m au dessus de Sidi Khouiled, puis la falaise disparaît sous les sables de l'erg Et-Touil. Cette falaise correspond probablement au glacis du niveau 140m à l'Ouest de la cuvette, (Hamdi-Aïssa., 2001).





**Figure II-7:** Géomorphologie schématique Ouest-Est de la cuvette de Ouargla, (d'après Lelièvre, 1969).

#### II.4. Conclusion

La géologie de la région caractériser par des formations sédimentaires qui avec le temps sont accumulées dans la cuvette, particulièrement le continental intercalaire qui est constitué d'une série gréseuse, forment un important aquifère reposant sur un substratum correspondant à la série imperméable du cénonanien an hydrique et argileux.

Les crétacés moyen et supérieur se caractérisent par une mise en place des marnes-calcaires au cénonanien et des calcaires fissurés au turonien. Ces derniers forment deux couches qui jouent un rôle fondamental dans le paysage morphologique de la région.

Le Miopliocène repose en discordance sur le Sénonien, qui est constitué d'une alternance d'argile et de sable, ou l'on constate deux niveaux perméables séparés par une couche d'argile.

Alors que le quaternaire se caractérise par des affleurements d'alluvions récents et des dépôts sableux.



# CHAPITRE III

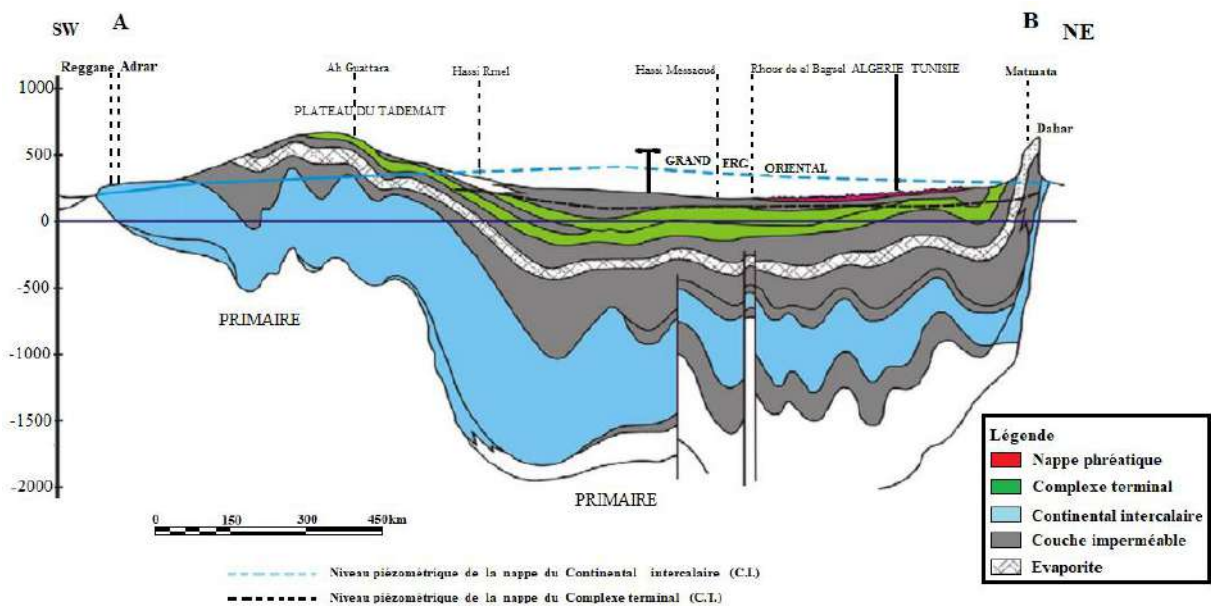
---

## Contexte Hydrogéologique

### III.1. Introduction

Le Sahara renferme d'importantes réserves d'eaux souterraines. Certains auteurs pensent que les eaux des nappes du Sahara sont fossiles (Burdon, 1977 ; Margat et Saad, 1982 et 1984 ; Margat, 1990), c'est-à-dire qu'elles se sont infiltrées et accumulées au cours des temps géologiques.

En Algérie, le Système Aquifère du Sahara Septentrional désigne la superposition de deux principales couches aquifères profondes (fig. III-1) : la formation du Continental Intercalaire, CI, et celle du Complexe Terminal, CT. Ce Système recouvre une étendue de plus de 700.000 km<sup>2</sup> (OSS, 2003).

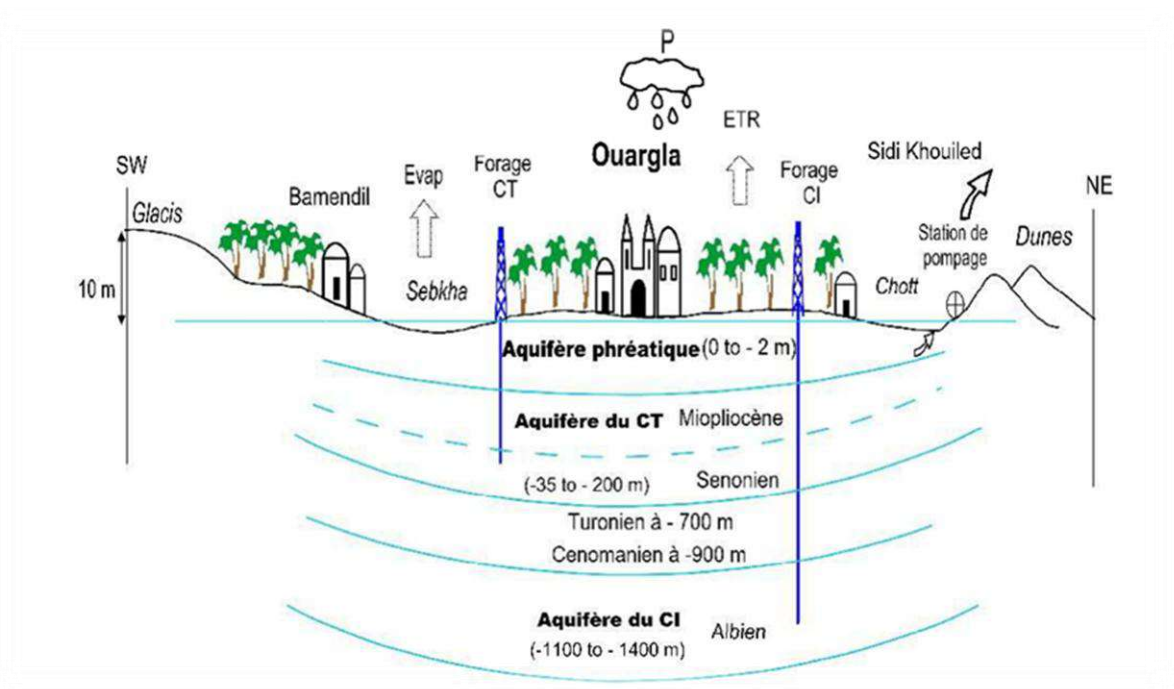


**Figure III-1 :** Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).

### III.2. Systèmes Aquifères

Le système d'aquifères de la cuvette de Ouargla est caractérisé par la superposition de trois aquifères (OSS, 2003), il s'agit de bas en haut (fig. III-2):

- L'aquifère de continental intercalaire constituée de sables de grès argileux d'âge albien et barrémien ;
- L'aquifère du complexe terminal constitué de deux nappes : la nappe de sable d'âge Sénonien carbonatée et la nappe de sable d'âge mio-pliocène ;
- L'aquifère superficiel est libre et constitué de formations détritiques d'âge Quaternaire représentées par de sables, de grès et de graviers avec présence de gypse et des niveaux des concrétisations calcaires (Zeddouri, 2008).



**Figure III-2 :** *Modèle du bilan hydrologique schématique des apports-exhaures à Ouargla (Slimani, 2016).*

### III.2.1. Nappe du Continental Intercalaire (CI)

Le réservoir du Continental Intercalaire est compris entre le Trias et le Crétacé inférieur, il est contenu dans les formations sablo-gréseuses et argilo-sableuses (Cornet et Gouscov 1952; UNESCO, 1972). C'est l'un des aquifères les plus étendus de la planète. Il s'étend sur plus de 600 000 Km<sup>2</sup>, le nom de nappe de l'Albien en référence à son étage supérieur (Cornet, 1961).

C'est un énorme réservoir qui est alimenté par l'infiltration des eaux dans l'Atlas saharien et suralimenté par les eaux circulant sous la hamada sud-oranienne et sous l'Erg Occidental (Cornet, 1964; Castany, 1982). André Cornet (1961) estimait l'alimentation de réservoir à (25m<sup>3</sup>/s), et sur la base d'informations complémentaires, elle est évaluée (15 m<sup>3</sup>/s) en 1963. Enfin (8,5 m<sup>3</sup>/s) en 1990, contre des sorties de l'ordre de (23 m<sup>3</sup>/s) (UNESCO, 1972 ; Dubost, 1992).

La carte des conditions aux limites, établie en 1970 pour les besoins de l'étude ERESS de l'UNESCO (1972), montre que :

- Les eaux en provenance du Nord-Ouest (piedmonts de l'Atlas), alimentent le sous bassin du Grand Erg Occidental, et s'écoulent vers les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt : seules sorties visibles naturelles ;

- Au Nord-Est, le sous bassin du Bas-Sahara est alimenté également par les piedmonts de l'Atlas, et qui a comme exutoire le chott Fedjej et la plaine côtière de Gabès en Tunisie. La nappe côtière de Gabès constitue l'exutoire de la majeure partie de la nappe du C.I. par l'intermédiaire de la faille de Mednine (ou El Hamma). Le chott Fedjej qui entaille un anticlinal crétacé inférieur est pour partie alimenté par ascensum par la nappe du CI ;
- Les eaux en provenance du plateau du Tinrhert-Grand Erg Oriental, dans le Sud-Ouest, s'écoulent vers le Nord-Est vers l'exutoire tunisien.

### III.2.2. Nappe du Complexe Terminal (CT)

Appellation publiée pour la première fois par BEL et CUCHE (1969) : ce terme de « nappe du Complexe Terminal » qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques. Sur le territoire algérien, il existe deux formations aquifères distinctes dans ce Complexe Terminal (Cornet, 1964; Nesson, 1978; Castany, 1982).

Le Complexe Terminal est représenté par deux aquifères à Ouargla. La première est contenue dans les sables du Miopliocène, à une profondeur qui varie entre 30 et 65 m ; et la deuxième, c'est le Sénonien qui se trouve à une profondeur d'environ 200 m (Rouvillois et Brigol 1975).

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

### III.2.3. Nappe phréatique

Le nom de nappe phréatique désigne les aquifères superficielles dont la profondeur ne dépasse pas les 50 mètres. Ces nappes sont présentées au Sahara dans les dépressions et les vallées. (Tesco- Visterv, 1985-1986).

La nappe phréatique de Ouargla est contenue dans les formations Quaternaires composées essentiellement d'alluvions de la vallée de l'oued Mya. Elle est reposée sur un substrat étanche, imperméable, de plus de 20 m d'épaisseur qui empêche toute communication entre la nappe phréatique et la nappe du Miopliocène sous-jacente (Bonnard et Gardel, 2003). Cette nappe est essentiellement alimentée par les eaux de drainage de la palmeraie et par les eaux urbaines (Idder, 1998).

La nappe phréatique dont le niveau est souvent proche de la surface, parfois moins de 1 m, généralement entre 1 et 2 m, peut dépasser 18 m au sud de Ouargla ou sous les reliefs

(Bonnard et Gardel, 2003). Cette nappe s'écoule du Sud vers le Nord, suivant la pente de la vallée (Rouillois-Brigol, 1975).

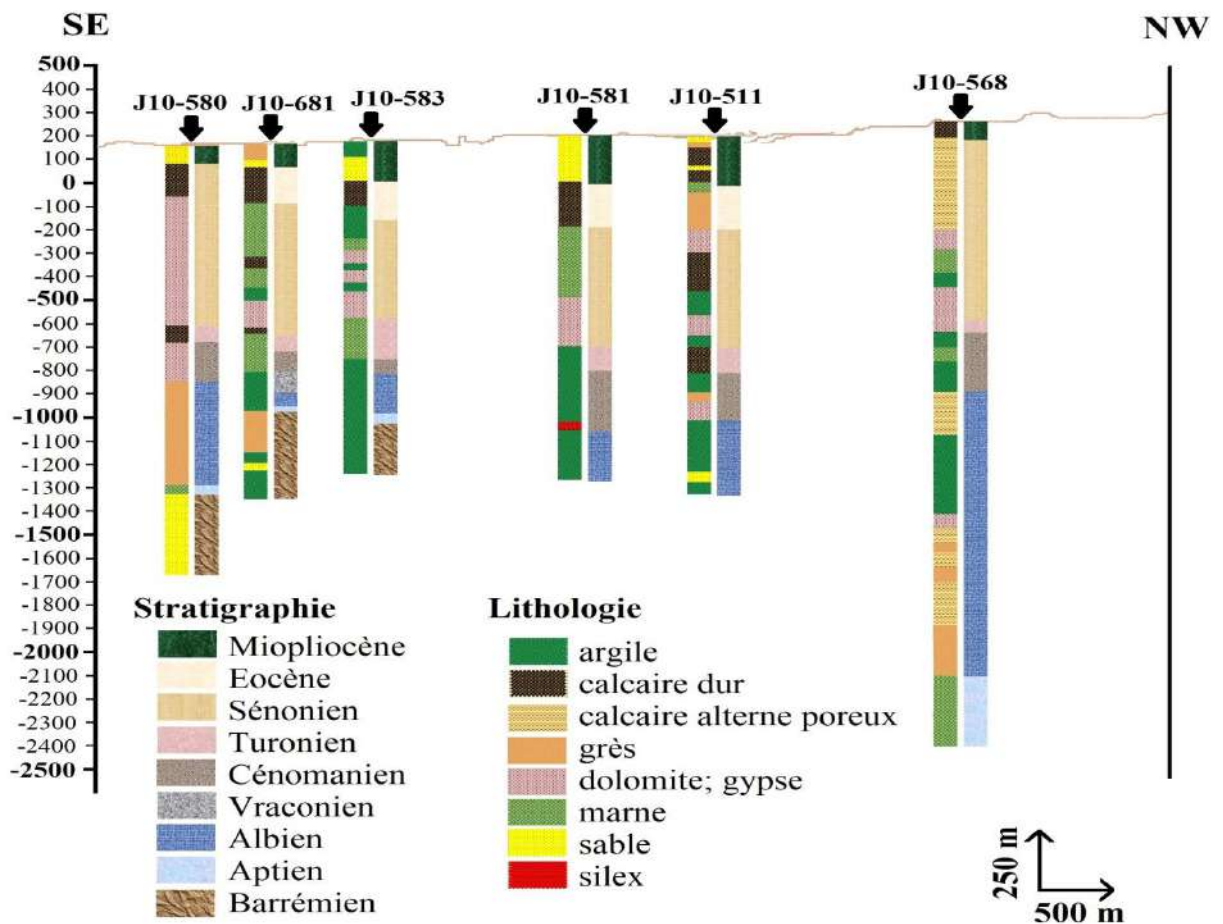
**III.3.Caractéristiques Lithologie et épaisseur du réservoir**

**III.3.1. Lithologie de CI et CT**

Il nous a paru utile d'illustrer sur des coupes les affleurements des formations aquifères à notre zone d'étude et de préciser leur profondeur. Cela a été rendu possible en se basant sur les renseignements fournis par les coupes lithologiques et stratigraphiques des forages d'eau, et des carottes réalisées sur toutes la cuvette (ENAGEO, 1992; LTPS, 1995, 1998).

D'après les données récoltées des forages qui captent le Continental Intercalaire : J10-580, J10-581, J10-583, J10-511, J10-568, une corrélation lithostratigraphique a été réalisée.

La coupe est orientée du sud-est vers le nord-ouest (fig. III-3). Elle passe par Rouissat, Aïn el Beïda, Sidi Khouiled, Bour el Haïcha, N'goussa.



**Figure III-3:** Coupe lithostratigraphique de la région de Ouargla.

En observant la coupe lithostratigraphique de la zone d'étude (figure III-2), on note :



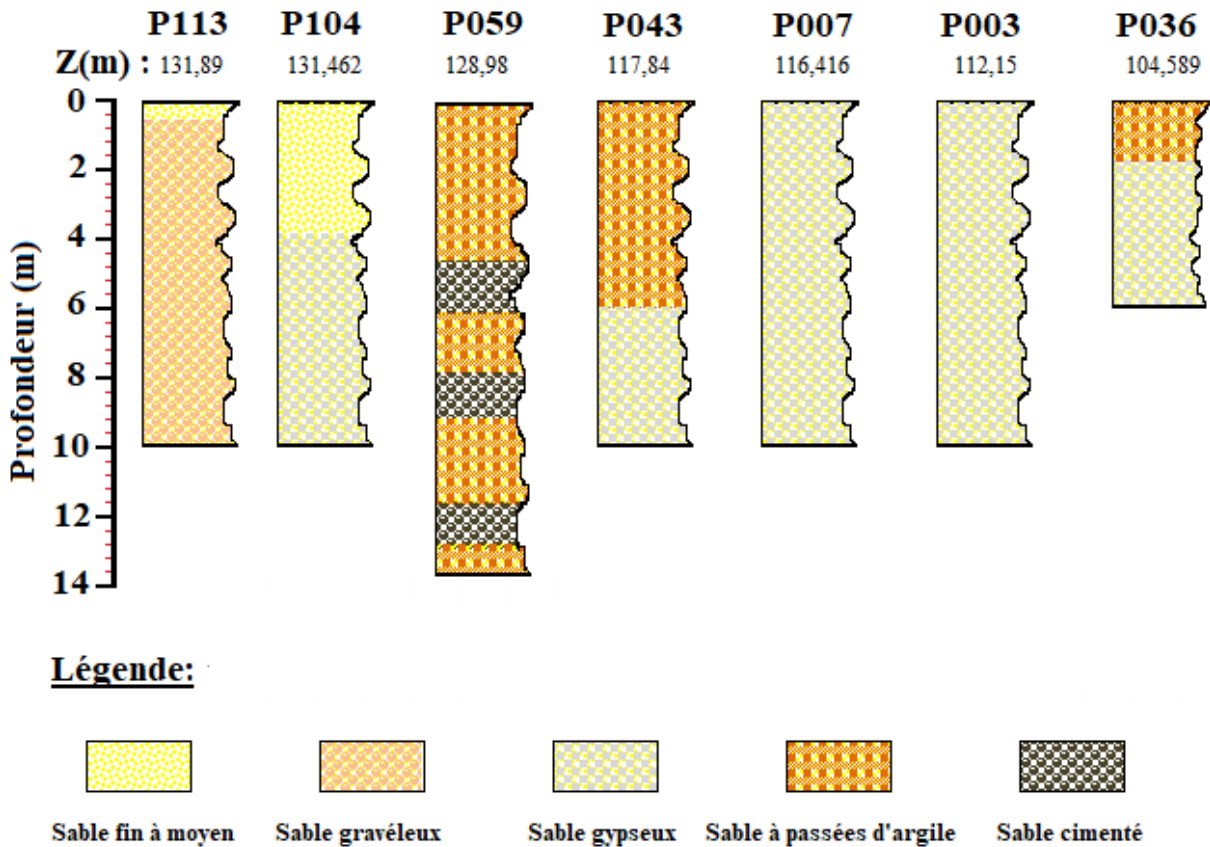
- Le Barrémien est située à une profondeur de 1100 à 1700 m, capté dans la formation lithologique argilo-sableuse dans les forages (J10-580, J10-681 et J10-583) ;
- L'Aptien est présente au nord-ouest à une profondeur de 2300 m, son épaisseur augmente et atteint 310 m au forage J10-568 ;
- L'Albien on se trouve sur toute la région à une profondeur de 1100 à 1400 mètres, avec une épaisseur utile près de 640 m mais cette épaisseur diminue vers le sud-est entre les forages J10-568 et J10-581, cet étage constituée de grès fins, gris, à ciment argileux, parfois dolomitiques, avec intercalation de marnes dolomitiques et argiles sableuses ;
- Le Vraconien est quasiment absent, on ne le retrouve qu'au niveau du forage J10-681 avec une épaisseur de 120 m ;
- Le Cénomaniens est formé par une alternance de bancs de dolomie, de calcaire dolomitique et d'argiles, il est présenté dans toute la région ;
- Le Turonien se présente sur toute la région, son épaisseur moyenne varie entre 50 et 100 m caractérisé par un faciès calcaro-marneux ;
- Le Sénonien est présent sur toute la région avec une épaisseur très important (E= 600 m) ;
- L'Eocène est absent au forage J10-580 et J10-568 sud-est, son épaisseur plus au moins stable au niveau des autres forages ;
- Le Miocène est présent dans toute la région avec une épaisseur moins stable; Au niveau du forage J10-568, il recouvre directement le sénonien.

### III.3.2. Lithologie de la nappe phréatique

La nappe phréatique est contenue dans les formations perméables sablo-gypseuse du Quaternaire, la lithologie de la nappe (fig. III-4) a été mise en évidence par des sondages (piézomètres) réalisés par l'ENAGEO (1990), de profondeur allant de 6 à 10 mètres.

Au Sud de Ouargla la nappe est constituée de sable fin à moyen argileux, rarement grossier, et plus vers le Nord (N'goussa et Sebkhet Sefiounes) les sables sont riches en gypse, qui devient dominant à Sebkhet Sefiounes. (Nezli, 2004)





**Figure III-4 :** Log géologiques de piézomètres au Quaternaire dans la Vallée de l'Oued Mya d'après (l'ENAGEO, 1990 in Nezli, 2004 (modifier)).

### III.4. Formation aquifère

#### III.4.1. Cartes des toits des formations des réservoirs profonds

L'établissement de la morphologie des toits imperméables des aquifères de miopliocène et du sénonien a été faite en courbes isobathes à partir de la carte du toit de la formation réservoir, selon la base des données des coupes lithologiques des forages réalisés durant la période allant de 1898 à 1995 (fig. III-5 et fig. III-6). Concernant le toit de la formation, notez que leurs courbes d'égale profondeur elles sont déterminées par rapport à la surface du sol (Castany, 1982).

Selon SLIMANI (2016) et concernant le Continental Intercalaire, où nous avons seulement que cinq forages, il est impossible de dresser ce type de cartes.

Ces forages de Continental Intercalaire sont caractérisés par un toit situé à (- 850 m) par rapport au niveau de la mer et à (-1000) m par rapport au sol, avec une épaisseur total de l'ordre de 800 m.

En ce qui concerne le Complexe Terminal, l'aquifère de Miopliocène a une carte du toit du présente de faibles profondeurs ne dépassants pas les 40 m dans la partie sud, plus en allant vers le sud, la profondeur augmente jusqu' à 90 m à Sebket Safioune (fig. III-5).

Pour le Sénonien, et selon l'inventaire réalisé par l'ANRH en 2011 concernant les données de forages récoltées de cette nappe il affirme qu'ils ne sont localisés qu'au sud de la zone d'étude, sachant que la profondeur du toit augmente du sud-est au nord-ouest (Slimani, 2016).

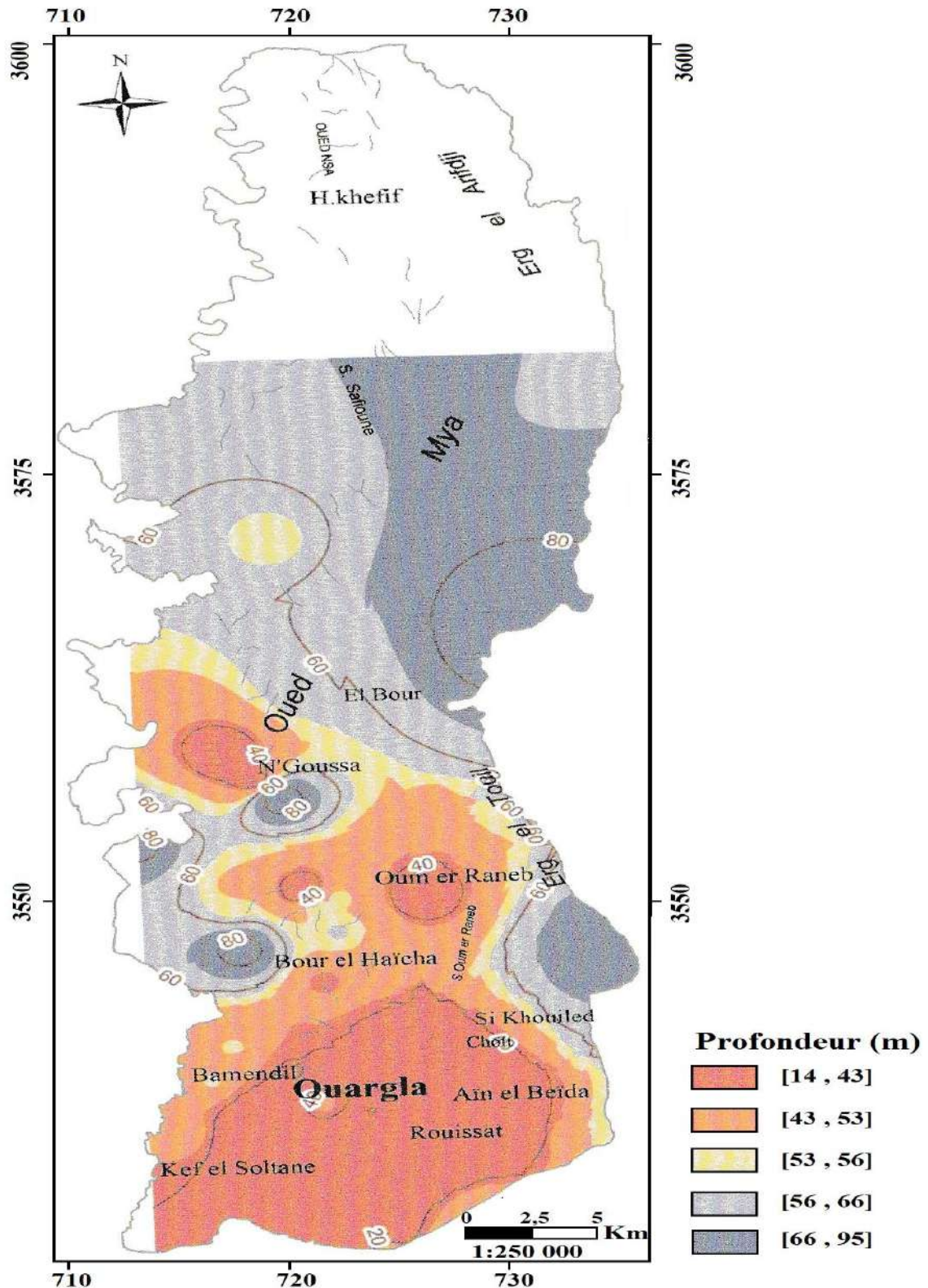


Figure III-5: Carte des toits de la nappe du Miopliocène (Slimani, 2016).

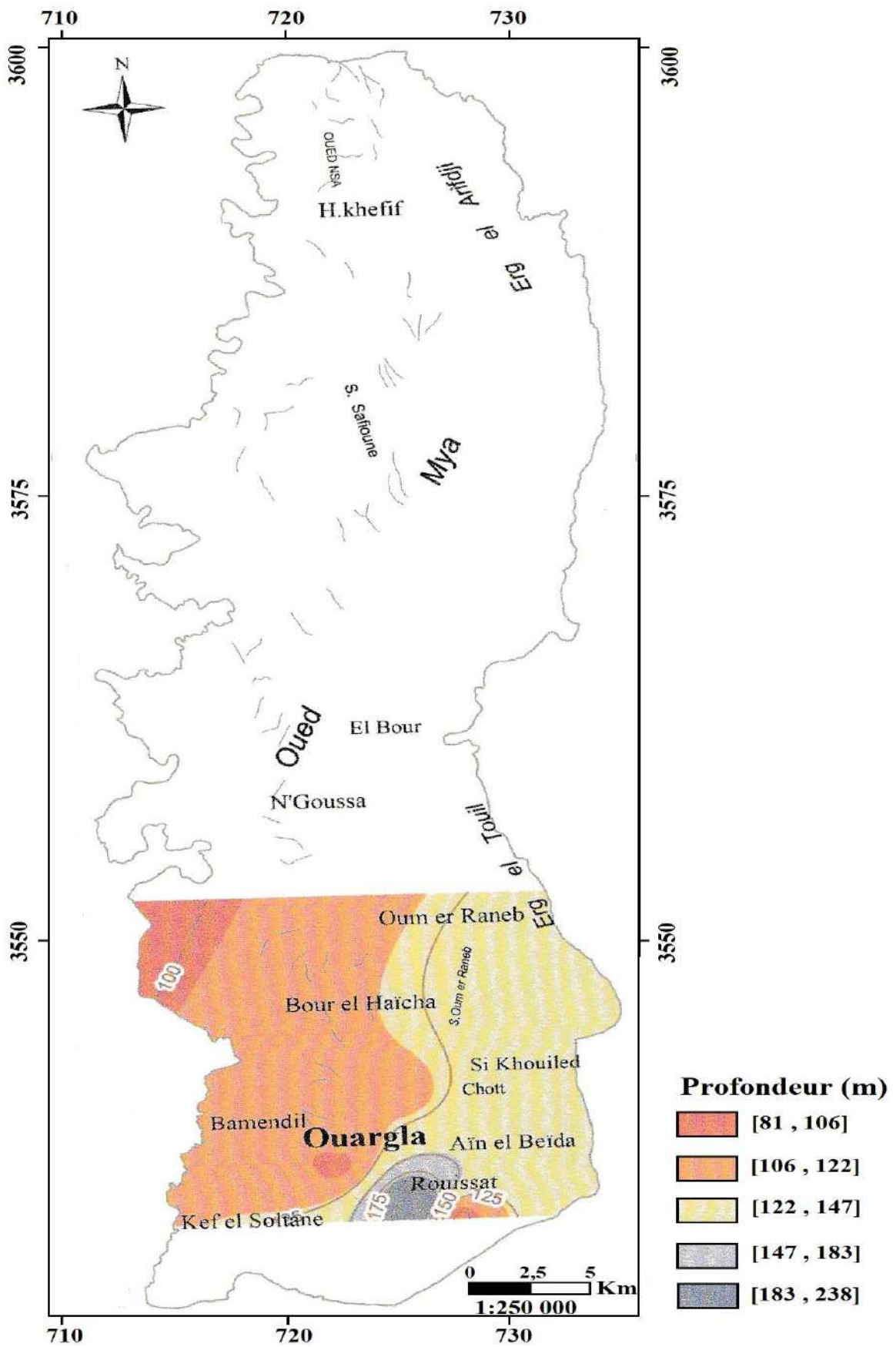


Figure III-6: Carte des toits de la nappe du Sénonien (Slimani, 2016).

#### III.4.2. Cartes des murs des formations des réservoirs profonds

Toujours selon Slimani (2016), les nappes profondes du Miopliocène et du Sénonien de la zone d'étude ont des cartes des murs qui présentent la même allure que celles du toit de la même formation (fig. III-7 et fig. III-8).

L'aquifère Miopliocène caractérisée par un mur qui atteint des profondeurs supérieures à 200 m au sud-est. Par contre les profondeurs sont faibles au sud-ouest de la région ainsi qu'au centre-ville de Ouargla et au nord-ouest de N'goussa.

Plus nous nous dirigeons vers le nord, la profondeur augmente considérablement, dont elle atteignant une valeur de 120 m au niveau de El Bour et 175 m à Hassi El Khafif.

D'autre part, la profondeur du mur de l'aquifère Sénonien augmente de l'ouest vers l'est, dont il atteint des profondeurs qui dépassent les 300 m au nord d'Aïn el Beïda et les profondeurs les plus faibles sont rencontrées à l'ouest de Kef El Soltane.



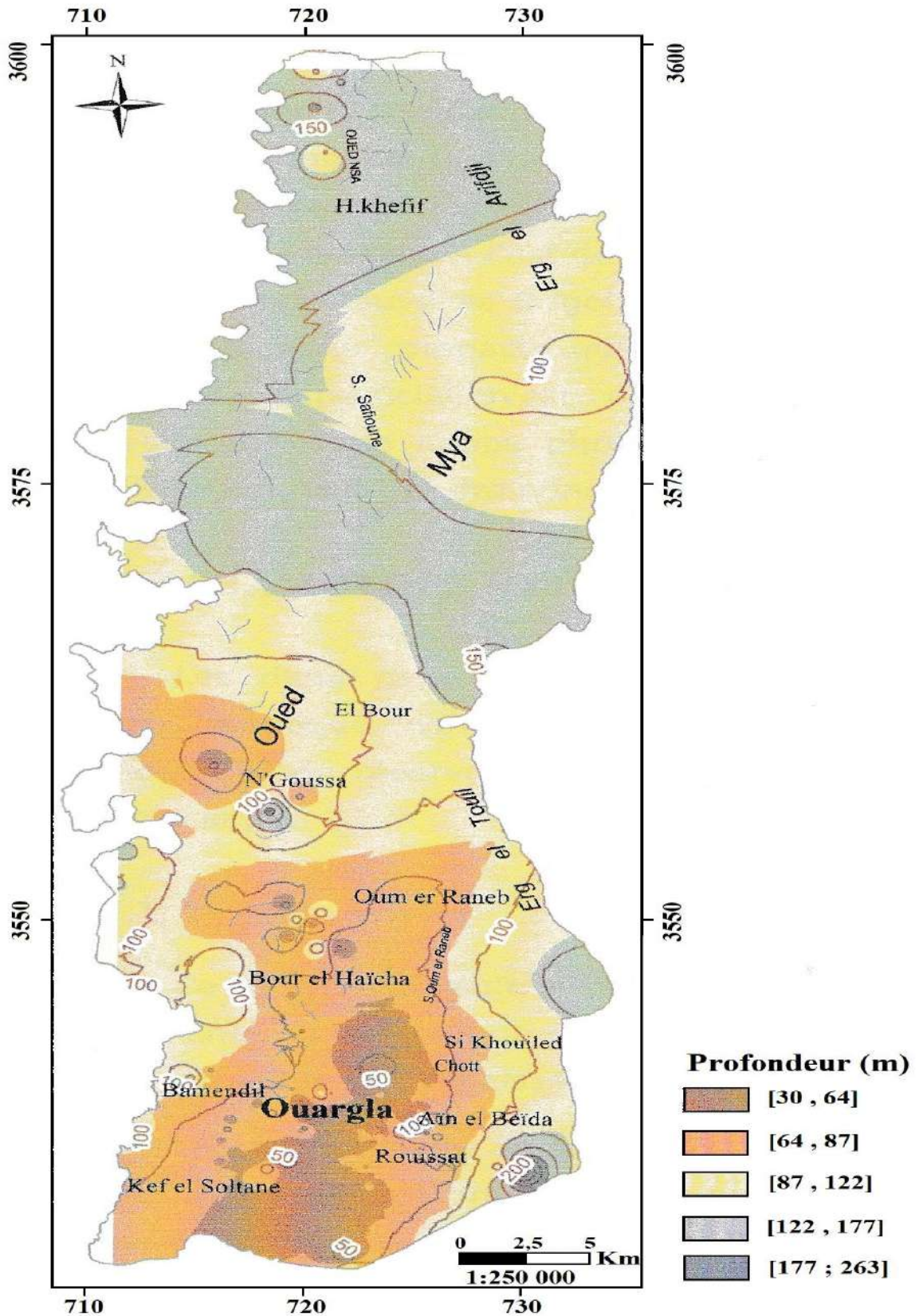


Figure III-7: Cartes des murs de la nappe du Miopliocène. (Slimani, 2016).

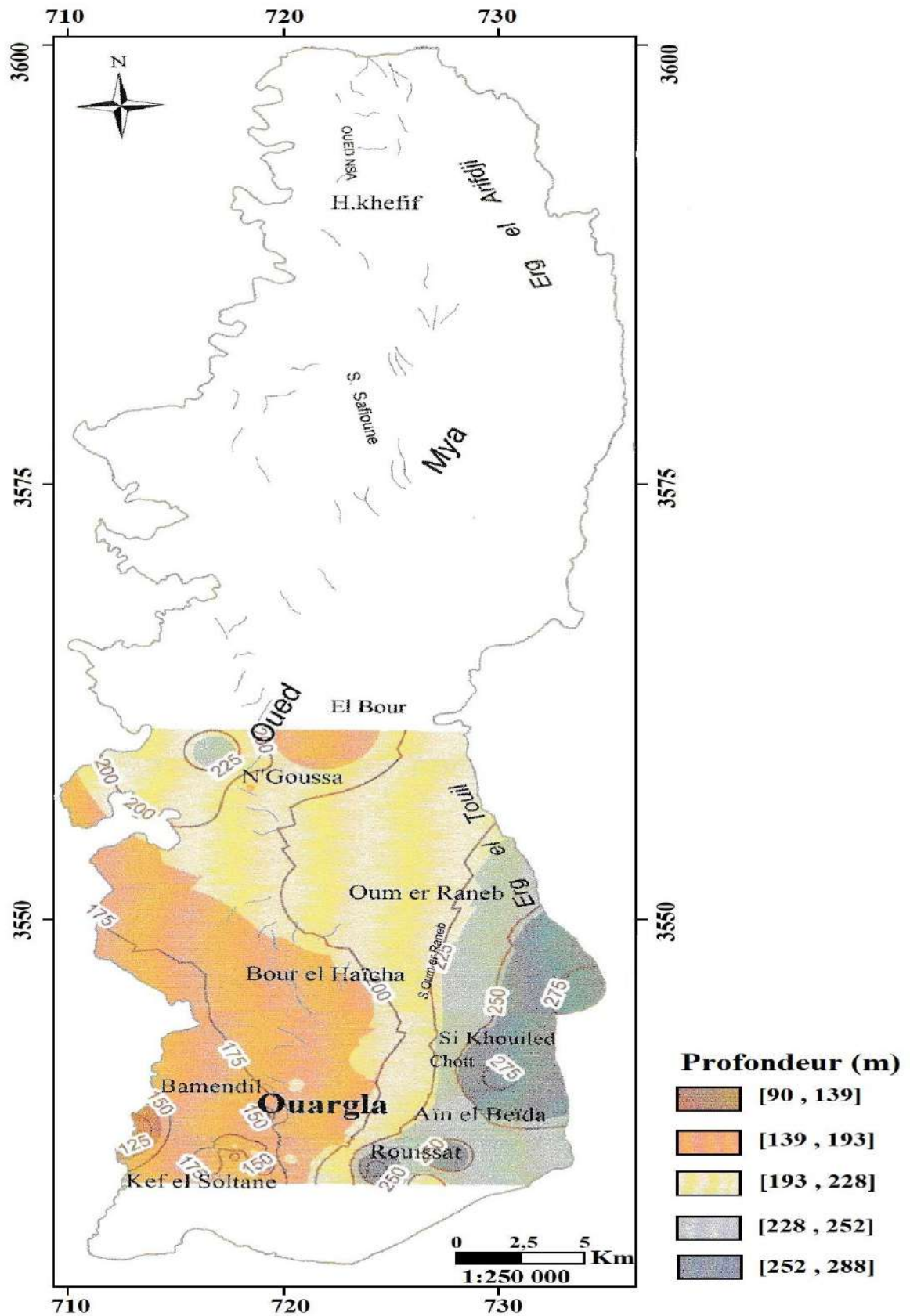


Figure III-8: Cartes des murs de la nappe du Sénonien (Slimani, 2016).

### III.5. Caractéristiques hydrodynamiques des aquifères

Les deux paramètres essentiels caractérisent un aquifère du point de vue hydrodynamique, sont la Transmissivité et le coefficient d'emmagasinement.

#### III.5.1. Coefficient d'emmagasinement

Le coefficient d'emmagasinement (S) qui caractérise la fonction de stockage, exprime le rapport du volume d'eau libéré, par unité de surface de l'aquifère et par unité de variation de la charge hydraulique. Pour une nappe libre, ce paramètre est équivalent à la porosité efficace, il est exprimé en %; il est beaucoup plus petit pour un aquifère captif.

Les valeurs du coefficient d'emmagasinement moyen calculées pour les nappes captives de la région de Ouargla sont de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s pour le Continental Intercalaire et entre  $5.10^{-3}$  à  $3.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s pour le complexe terminal. Au niveau de l'aquifère libre de la nappe phréatique, les valeurs de S varient entre  $10^{-2}$  et  $2.10^{-1}$  m<sup>2</sup>/s (Abderrahmane, 1997).

#### III.5.2. Transmissivité

La transmissivité exprimée en m<sup>2</sup>/s qui caractérise la fonction conductrice du réservoir, il régit le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur d'un aquifère, sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. La transmissivité est égale au produit de la perméabilité par l'épaisseur de l'aquifère (Castany, 1982).

La transmissivité de la nappe du Continental Intercalaire de la région de Ouargla, obtenue à partir des résultats des essais de pompage est de  $8.10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s. Les valeurs propres à la nappe du Complexe Terminal varient de  $8.10^{-3}$  à  $9.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s et de  $9,37.10^{-2}$  à  $1,86.10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s pour la nappe phréatique (Abderrahmane, 1997).

### III.6. Exploitation des aquifères

#### III.6.1. Nappe du l'Albien

Pour cette nappe, en 1970 on comptait deux forages qui fournissaient un débit de 0,3 m<sup>3</sup>/s (Rouillois-Brigol, 1975). En 2002, le nombre de forages est passé à trois, fournissant un débit de 0,9 m<sup>3</sup>/s. En 2010, le débit exploité à partir de cette nappe a connu une certaine régression (0,22 m<sup>3</sup>/s) pour retrouver à peu près le niveau de 1970. Cette régression est due à la suppression de l'un des trois forages par à cause des problèmes d'entartrage et de fortes températures des eaux de cet aquifère.

D'après les chiffres présentés, nous constatons que le débit exploité dans la cuvette a pratiquement été augmenté 3 fois en 2010 par rapport à 1970 (Idder T, 2007).

Actuellement, six forages sont implantés à savoir trois (03) à Rouissat, un (01) à Ziaina, un (01) à Khafdji et un (01) forage à Ain El-Beida pour assurer l'alimentation en eau potable de la région de Ouargla.

### III.6.2. Nappe du Sénonien

En 1953, un puits de reconnaissance atteignant 315 m de profondeur a été réalisé par la direction de l'hydraulique, le débit n'a jamais dépassé (540 l/mn) (Bel et Dermagne, 1969). Jusqu'en 1969, il s'était maintenu à (480 l/mn) avec un artésianisme inférieur à 1 km.cm et un niveau piézométrique ne dépassant pas 136 m. on a depuis installé une pompe fournissant un débit de 420 (l/mn) (Rouvillois-Brigol, 1975).

Actuellement 73 forages sont répartis sur les régions de Ouargla, Rouissat, Hassi Ben Abdallah, Sidi Khouiled, Ain el Beida et N'goussa (ANRH, 2011).

### III.6.3. Nappe du Miopliocène

L'exploitation de la nappe du MioPliocène à Ouargla, remonte à un passé déjà lointain. Cette nappe a acquis une réputation légendaire, puisqu'elle a été à l'origine de la création de l'oasis et a permis sa prospérité (Moulias, 1927).

Au XIXe siècle, en 1888, le débit total dont disposait la région de Ouargla était de l'ordre de 0,4 m<sup>3</sup> /s. À cette période, la plupart des puits étaient encore jaillissants et leur niveau hydrostatique se situait à plus de 5 mètres au-dessus du niveau du sol (Bel F, 1969).

Il est à présent impossible de dire si les ressources compensent ou non l'exploitation actuelle, d'après l'inventaire de 2011 (ANRH, 2011), plus de 900 forages ont été répertoriés. La prudence impose une limite d'utilisation au-delà de laquelle la nappe risquerait de se dénoyer.

## III.7. Etude de la piézométrie de la nappe phréatique

Au niveau de la région de Ouargla, le réseau de suivi de la nappe phréatique a été réalisé dans le cadre du projet intitulé "Evacuation et drainage des eaux de la cuvette de Ouargla", 160 piézomètres ont été installés par l'ENAGEO en 1991. Plus tard, un programme complémentaire a été lancé durant les années 1992, 2001 et 2003; ces programmes comprennent plus de 200 piézomètres (ANRH, 2004-2008). L'état actuel du réseau exprime une diminution très remarquable, il n'en reste que 85 piézomètres d'après l'inventaire de l'ANRH réalisé en 2011.

### III.7.1. Cartes piézométriques de la nappe phréatique

Les campagnes de mesures piézométriques effectuées périodiquement par l'ANRH durant les périodes : juin 1994, novembre 1998, avril 2001, juin 2003, novembre 2007 et les cartes établies par (Slimani, 2016) concernant les campagnes de juin et novembre 2013 nous ont permis d'établir sept (07) cartes piézométriques représentant l'état de la nappe phréatique dans la zone d'étude (Annexe 1).



La comparaison entre les cartes piézométriques précédentes nous ont permis de constater que les points suivants :

- Le niveau piézométrique en 2013 ne diffère pas trop de ce qu'elle était dans les années précédentes ;
- Les écoulements souterrains suivent en général la topographie locale, avec une pente vers les sebkhas de Oum Raneb (Est) et Bamendil (Ouest) ;
- L'existence de deux zones distinctes, séparées par une ligne de partage située au sud de Bour El Haicha La première zone correspond à la partie sud de la cuvette englobe Rouissat, Aïn el Beïda, et les chotts environnants, et la deuxième s'étend de Bour el Haicha au sud, jusqu'à Sebket Sefioune au nord ;
- Un dôme piézométrique considérable sous l'agglomération, gonflement qui s'étend même en amont, à l'endroit de zones faiblement urbanisées et sans eau courante ;
- La présence d'un gonflement circulaire autour des palmeraies de N'goussa, plus important en amont qu'en aval ;
- Un rétrécissement des courbes piézométriques à été remarqué dans la région des chotts correspond à une aire d'alimentation importante.

### III.8. Conclusion

La compréhension de la géométrie du réservoir souterrain a été possible suite à l'établissement d'une coupe hydrologique, en se basant sur des renseignements fournis par la stratigraphie des forages d'eau et la lithologie.

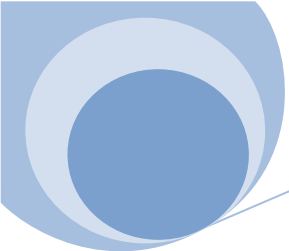
L'établissement des coupes lithostratigraphique résultant, ont permis de distinguer que le système aquifère de la région de Ouargla est formé de trois unités : la continental intercalaire qui se situe dans les formations continentales du crétacé inférieur, la nappe du complexe terminal regroupant plusieurs aquifères qui circulent dans l'une ou deux formations lithostratigraphique du Sénonien, l'Eocène carbonatés ou Miopliocène sableux, ainsi que la nappe phréatique logée dans les formations perméables sablo-gypseuses du quaternaires.

La superposition des cartes structurales établies ont permis de donner une estimation de l'épaisseur des aquifères en profonds. Ce qui donne, au continental intercalaire une épaisseur de 800m au total, pour le complexe terminal une épaisseur en moyenne de l'aquifère Miopliocène avoisine 95m, et aussi le Sénonien une épaisseur de 140m.

# Deuxième partie

---

## Matériels et méthodes



# CHAPITRE IV

---

## Matériels et méthodes

### **IV.1. Introduction**

Le présent chapitre représente deux phases d'étude pour but de décrire une combinaison des processus d'analyses ainsi que les logiciels utilisés pour assurer une exploitation des résultats sous différents formes (graphique, cartographique, statistique, et géochimique).

La première phase de l'étude est l'échantillonnage qui ce fait par la prospection, et la description du terrain ainsi que le choix des localités dans toute la cuvette de Ouargla.

La deuxième phase est la méthodologie de collecte des données des analyses physico-chimiques ainsi que la méthodologie de traitement des données adoptée, afin de caractériser la composition hydrogéochimique des différentes aquifères.

### **IV.2. Matériels d'études**

#### **IV.2.1. Choix de la zone d'étude**

Nous avons choisi de réaliser notre travail de recherche dans la cuvette de Ouargla, vue les problèmes enregistrés dans cette vallée concernant la qualité des ressources en eaux souterraines. La détermination des déférents paramètres physico-chimique des eaux reste primordiale comme objectif dans notre étude qui visant à déterminer la qualité des eaux des trois aquifère.

#### **IV.2.2. Choix de site de prélèvement**

L'Agence National des Resource Hydrique (ANRH) de Ouargla constitue la principale source publique d'information disponible pour identifier les stations d'échantillonnage.

Pour mettre en évidence la qualité physico-chimique ainsi que les paramètres de pollution dans la cuvette de Ouargla. Les sites d'échantillonnage ont été sélectionnés de telle sorte à couvrir les différents forages du CT et de CI (Fig. IV-1), et les piézomètres de la nappe phréatique (Fig. IV-2), cette sélection a également été réalisée de façon à obtenir une répartition la plus homogène possible sur le territoire étudié. Chaque point de prélèvement a été répertorié en fonction du type d'aquifère exploité.

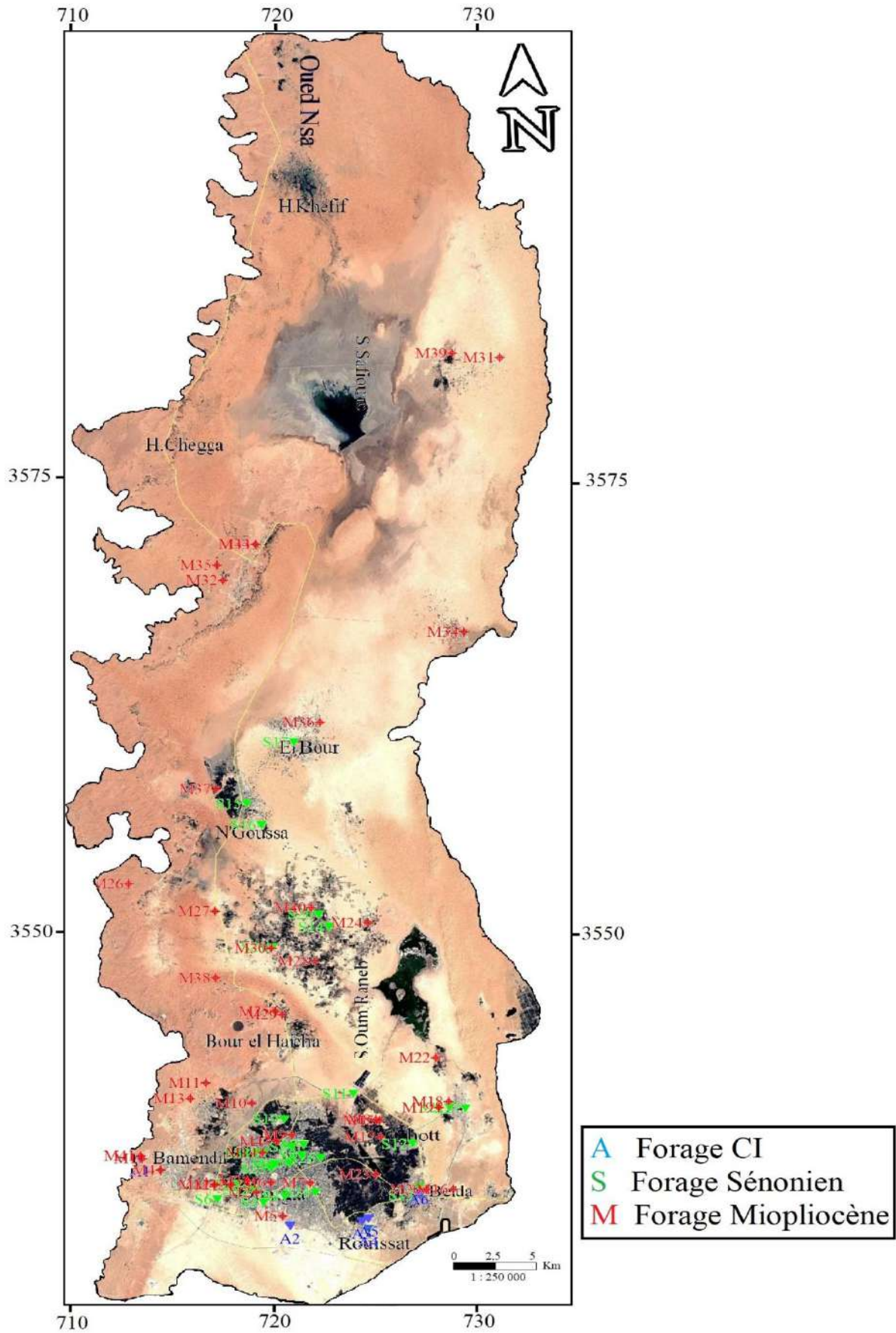


Figure IV-1 : Carte de localisation des point d'eau du CI et CT de la cuvette de Ouargla.



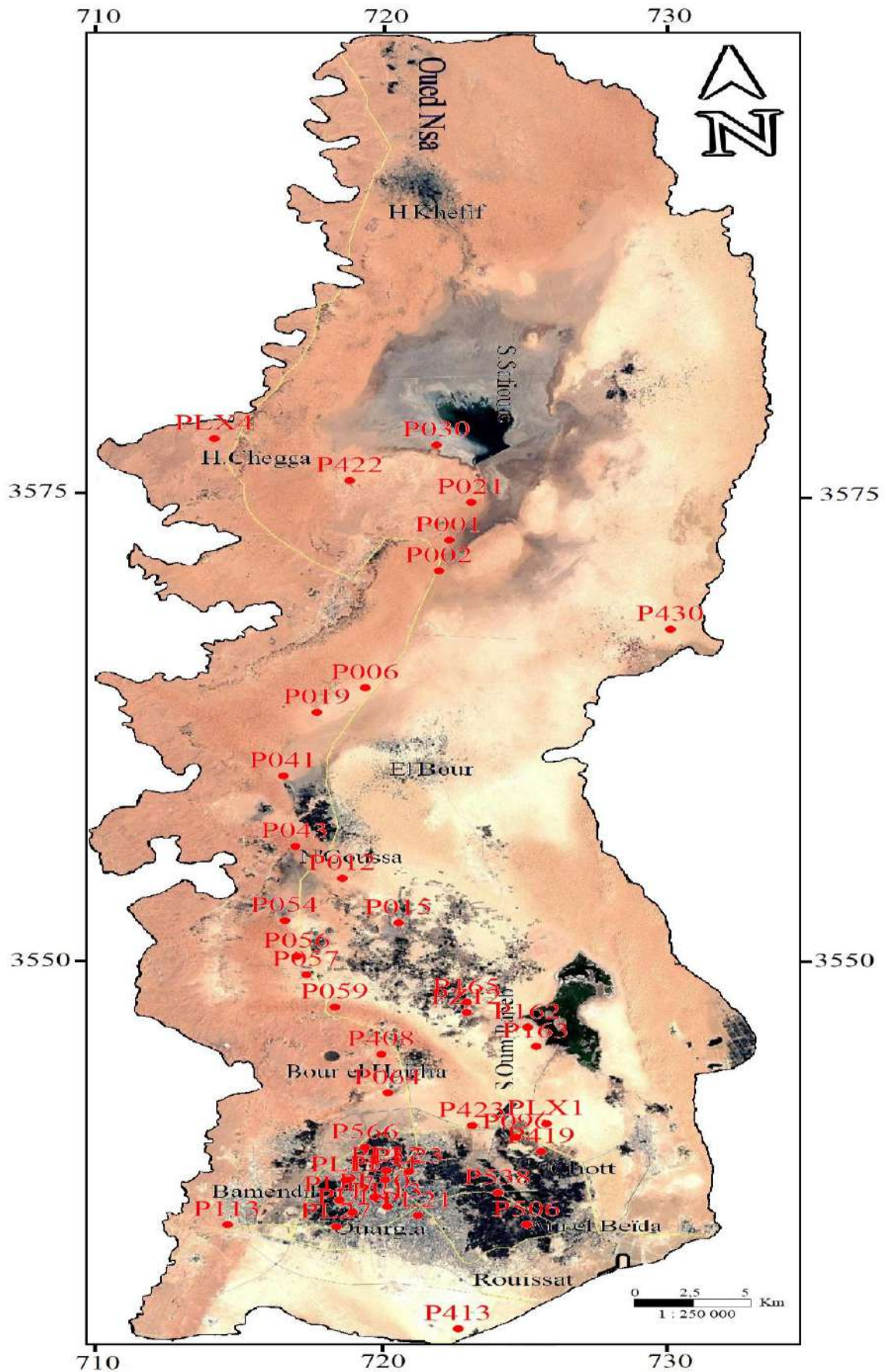


Figure IV-2 : Carte de localisation des piézomètres de la nappe Phréatique.

### IV.2.3. Approche méthodologique

Notre travail de recherche consiste à étudier les caractéristiques hydrochimiques des eaux souterraines et de les classer selon les normes de potabilité, de l'irrigation et de l'industrie pour avoir déterminé la destination de chaque type d'eau selon les résultats obtenus (Fig. IV-3):

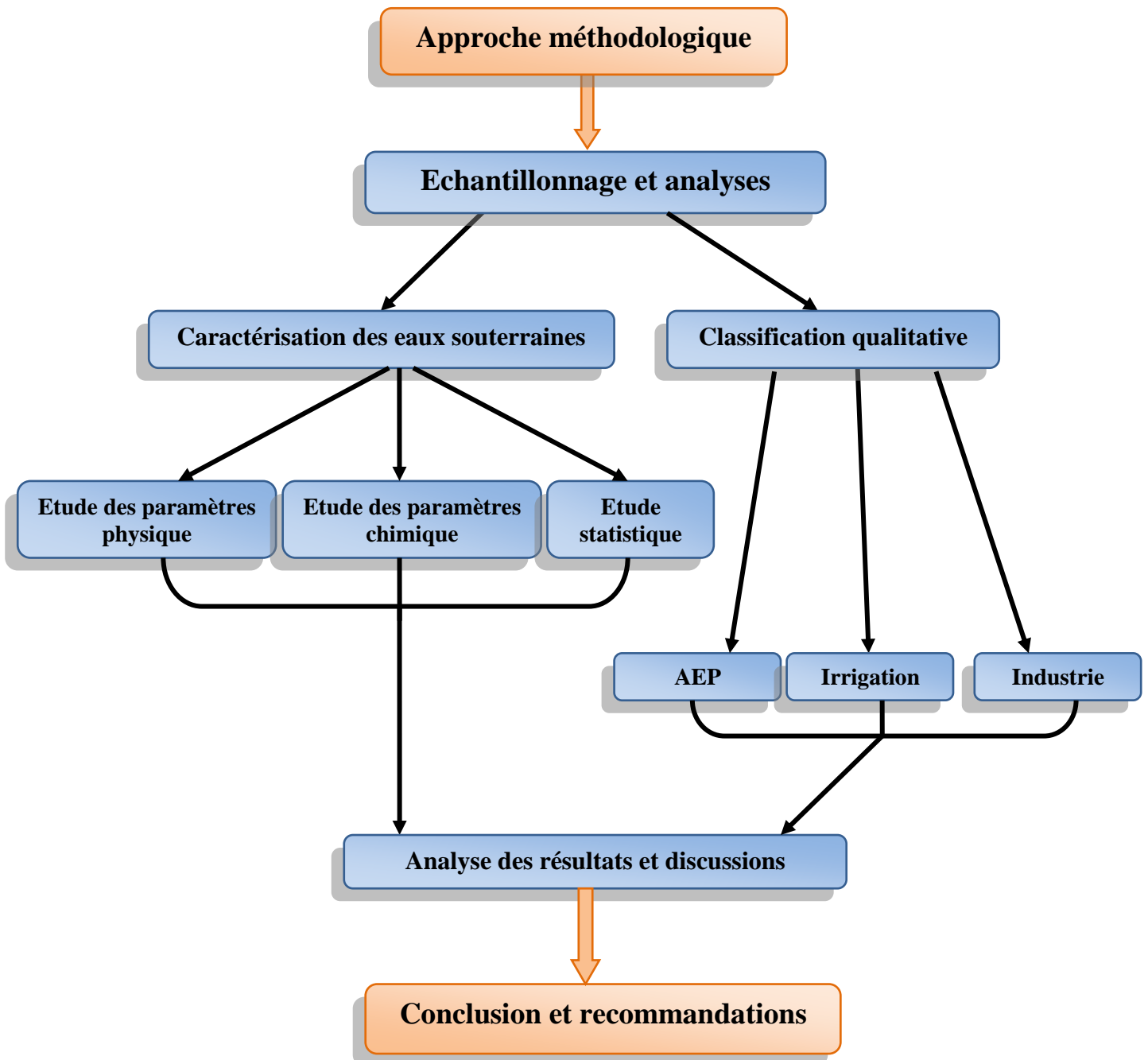


Figure IV-3 : Approche méthodologique d'étude

#### IV.2.4. Protocole d'échantillonnage

L'échantillonnage est une étape indispensable des études hydrochimiques, l'objectif de cette étape est l'obtention d'échantillons représentatifs de la qualité des eaux prélevées.

Pour assurer un échantillonnage sans modification des caractéristiques physico-chimiques de l'eau, le préleveur doit avoir une connaissance précise des conditions du prélèvement tel que :

- estimation visuelle de la qualité globale de l'eau (rejeter les eaux contenant des matières en suspension, sable...etc.)
- laisser couler l'eau durant un certain temps pour éviter les eaux stagnantes dans la vanne du forage.

Ces conditions, son important pour la qualité des résultats analytiques, (Rodier, 2009).

Le travail a commencé en décembre 2014, notre méthode d'échantillonnage était basée sur le prélèvement d'eau souterraine des différentes aquifères : la nappe du Continental Intercalaire (06 forages albien), la nappe du Complexe Terminal avec ces deux couches sénonien et miopliocène (75 forages), et la nappe phréatique (48 piézomètres et puits). En total 129 échantillons d'eau souterraine ont été recueillies afin de mieux suivre l'évolution de la qualité physico-chimique de ces eaux.

Les prélèvements ont été effectués en trois campagnes :

- En 2014 durant les mois de novembre et décembre ;
- En 2015 mois de mars ;
- En 2016 soit au moi de février ;

Les échantillons d'eau ont été prélevés dans des flacons en plastique de 1000 ml de capacité, ils sont rincés avec l'eau à analyser et hermétiquement fermés sans laisser de bulles d'air dans le flacon. Ces dernières doivent être clairement identifiées à l'aide d'étiquettes indiquant le nom de forage, la date et l'heure de prélèvement (Rodier1996).

Pour la conservation des échantillons à une température de 4°C, nous avons utilisé des glaisières avec des agents en glaces, puis transportés au laboratoire dans un délai ne dépassant pas 4 heures selon les normes exigées.

L'analyse a été effectuée rapidement moins de 48 h après le prélèvement.

#### IV.3. Méthodes d'étude

Les appareils, le protocole de préparation des réactifs chimique sont présentés en l'annexe 2.



### IV.3.1 Mesure in situ

Certains paramètres physico-chimiques sont rarement maintenus constants pendant la conservation des échantillons et doivent être mesurés sur le terrain. Deux paramètres ont été mesurés in situ, la température et le pH.

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau (Rodier, 1984). La connaissance de ce paramètre permet aussi de donner des indications sur les profondeurs et la circulation des eaux souterraines (De Villers et al., 2005).

Le pH est dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant hydrogéologique traversé. (B.Dussart, 1966 ; R.Bermond, 1973).

Le pH et la température ont été mesurés avec un pH-mètre de type HI 931000.

### IV.3.2 Méthode d'analyse au laboratoire

Nous avons suivi la qualité des eaux souterraines à travers des analyses qui ont été effectuées au niveau des laboratoires de l'ADE (Algérienne des eaux), unité de Ghardaïa et unité de Ouargla. Les procédures de dosage sont déduites des méthodes d'analyse standard (Tardat-Henry, 1984 ; Rejesk, 2002 ; Rodier, 2005).

#### IV.3.2.1 Les paramètres physique

La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau (Pescod, 1985 ; Rodier, 1984).

La conductivité électrique et la charge totale en sels dissous (TSD) ont été mesurées à l'aide d'un conductimètre de type WTW LF330/tetra.

#### IV.3.2.2 les paramètres chimique

Les paramètres à étudier sont : les cations ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}^{+2}$ , TH) et les anions ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^{-2}$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ , TAC), par des différentes méthodes.

##### IV.3.2.2.1 La dureté totale (TH)

La dureté totale d'une eau est la concentration totale en ions calcium, magnésium et autres cations bivalents et trivalents de cette eau (Ghazali et al., 2013).

##### IV.3.2.2.2 Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ) et Magnésium ( $\text{Mg}^{+2}$ )

Pour le calcium : le titrage des ions de calcium avec une solution aqueuse de sel disodique (EDTA) à un pH compris entre 12 et 13. Le HSN, qui forme un complexe rouge avec le calcium, est utilisé comme indicateur.

Pour le magnésium : Le magnésium est précipité sous forme d'hydroxyde et n'interfère pas lors du dosage. Lors du titrage, l'EDTA réagit tout d'abord avec les ions calcium combinés avec l'indicateur qui vire alors de la couleur rouge à la couleur bleu clair (Rodier J., 1996).

#### **IV.3.2.2.3 Titre alcalimétrique complet (TAC)**

Se réalise par la méthode volumétrique. Le titre alcalimétrie complet ou TAC correspond à la teneur de l'eau en alcalis libres, carbonates et hydrogénocarbonates. Ces déterminations sont basées sur la neutralisation d'un certain volume d'eau par un acide minéral dilué en présence d'un indicateur coloré (Rodier J., 1996).

#### **IV.3.2.2.4 Les Chlorures (Cl<sup>-</sup>)**

Réaction des ions chlorure avec des ions argent pour former du chlorure d'argent insoluble qui est précipité quantitativement. Addition d'un petit excès d'ions argent et formation du chromate d'argent brun-rouge avec des ions chromates qui ont été ajoutés comme indicateur. Cette réaction est utilisée pour l'indication du virage. Durant le titrage, le pH est maintenu entre 5 et 9,5 afin de permettre la précipitation (ADE, 2015).

#### **IV.3.2.2.5 Sodium (Na<sup>+</sup>) et de Potassium (K<sup>+</sup>)**

Principe : Aspiration de l'échantillon dans une flamme de gaz présentant une énergie thermique suffisante pour provoquer l'émission de radiations caractéristiques du sodium et du potassium présents dans la solution. Mesure de l'intensité à une longueur d'onde de 589.0nm pour le sodium et de 766.5nm pour le potassium (ADE, 2015).

Pour le sodium en utilisons une solution de NaCl come solution étalon

Pour le potassium la solution étalon et celle de Kcl.

Les résultats de Sodium et de potassium en mg/l.

#### **IV.3.2.2.6 Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>)**

Les ions sulfates sont précipités à l'état de sulfate de baryum et évalués gravimétriquement.

#### **IV.3.2.2.7 l'Azote Ammoniacal (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>)**

L'ammoniaque est un gaz soluble dans l'eau mais suivant les conditions de pH il se transforme, soit en un composé non combiné, soit sous forme ionisée. En plus, l'ammoniaque est favorable au développement de certaines bactéries qui à leur tour génèrent de mauvais goûts (Bremond R., 1976).

Principe : Mesure spectrométrique à environ 655nm du composé bleu formé par réaction de l'ammonium avec les ions salicylate et hypochlorite en présence de nitroprussiate de sodium.

#### IV.3.2.2.8 Nitrites ( $\text{NO}^{-2}$ )

Les Nitrite peuvent être rencontrés dans l'eau, Mais à des doses Faibles. Les Nitrites proviennent soit d'une Oxydation incomplète de l'ammoniaque, la nitrification n'étant pas Conduite à son Terme, soit d'une réduction des nitrates Sous l'influence d'une Action dénitrifiant (Bremond R., 1976).

Principe : Les nitrites réagissent avec le Sulfanilamide pour former un composé diazoïque qui, après copulation avec le N1 Naphtyléthylènediamine dichloride donne naissance à une coloration rose mesurée à 543nm.

#### IV.3.2.2.9 Nitrates ( $\text{NO}_3^{-2}$ )

La teneur en nitrates dans l'eau des puits liée à l'apport des engrais (Chapman & Kimstach, 1996).

En présence de salicylate de sodium, les nitrates donnent du paranitrosionate de sodium coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique.

#### IV.3.2.2.10 Phosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ )

Les phosphates font partie des anions facilement fixés par le sol ; leur présence dans les eaux naturelles est liée à la nature des terrains traversés et à la décomposition de la matière organique (Ladjel F., 2002).

### IV.4. Traitement des données hydrochimiques

Différentes bases de données hydrochimiques ont été élaborées à partir des données récoltées. Cette section présente l'élaboration de ces bases de données hydrochimiques ainsi que les différentes méthodes d'analyse appliquées aux bases de données résultantes afin de caractériser la chimie de l'eau souterraine.

#### IV.4.1. Précision des mesures

Une fois les résultats d'analyse obtenus, ces derniers doivent être vérifiés.

Un premier contrôle a été réalisé en calibrant les instruments de mesure avant chaque début de journée de prélèvements, pour assurer un maximum de précision aux résultats.

Un second contrôle de la validité des résultats s'est basé sur le calcul de la balance ionique, en se basant sur le principe de neutralité de l'eau suivant la relation (Hem, 1970 ; Appelo et Postma, 2005).

La balance ionique s'exprime en pourcentage d'erreur et se calcule par rapport de la différence des anions et des cations sur leur somme, le tout est multiplié par 100. Soit:

$$B.I(\%) = \frac{\sum_{\text{cation}} - \sum_{\text{anion}}}{\sum_{\text{cation}} + \sum_{\text{anion}}} \times 100$$

Remarque : la somme des cations et la somme des anions, exprimés en milliéquivalent par litre d'eau (még/L).

$$\text{még/L} = \text{mg/l} * \text{valence} / \text{masse atomique}$$

La valeur du pourcentage obtenu peut être positive ou négative. (Subramani et al. 2010) considèrent acceptable un écart de  $\pm 10\%$  d'erreur sur la balance ionique. À l'inverse, si l'erreur évaluée est supérieure à  $\pm 10\%$ , l'analyse est rejetée. Au total, 11 échantillons dépassent cette limite tableau (IV-1).

Le calcul de la balance ionique est fait à l'aide du logiciel DIAGRAMMES 6.48 (Logiciel d'hydrochimie, 2013).

**Tableau IV-1** : précision des résultats d'analyse.

Nappe	Nombre d'analyses	Acceptable	Non acceptable
Phréatique	48	44	4
Miopliocène	45	44	1
sénonienne	30	28	2
albienne	6	6	0
Total	129	122	7

#### IV.4.2. Méthodes d'analyse graphique

Un important aspect de l'étude des eaux souterraines est la compilation et la présentation des données chimiques de la façon la plus avantageuse possible afin de faciliter notre compréhension (D'amore et al., 1983).

Pour caractériser au mieux la géochimie de l'eau échantillonnée, une représentation graphique (le diagramme de piper, logiciel de surfer, logiciel de ArcGIS) sont réalisés.

##### IV.4.2.1. Diagramme de piper

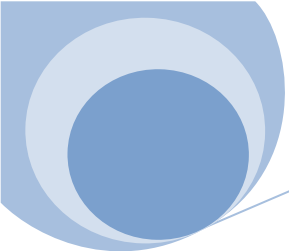
Le diagramme de Piper est particulièrement adapté à l'étude de l'évolution des faciès lorsque la minéralisation augmente, ou bien pour comparer des groupes d'échantillons entre eux et indiquer les types de cations et anions dominants. Il est composé de deux triangles, permettant de représenter le faciès cationique et le faciès anionique, et d'un losange synthétisant le faciès global. Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques (Sekiou et al, 2014).

**IV.4.2.2. Logiciel de surfer**

Le logiciel de Surfer nous à permis de réaliser les cartes d'emplacements des échantillons et celles de l'évolution des paramètres étudiés. Après avoir introduit les données en un fichier Excel, on choisit la méthode d'interpolation convenable. Après la sélection de la méthode, on obtient des cartes de courbes de niveau (courbes d'isovaleurs) liant les points ayant les mêmes valeurs.

**IV.4.2.3. XLSTAT**

L'analyse en composantes principales (ACP) est une méthode descriptive dont l'objectif est de présenter sous une forme graphique le maximum d'informations contenues dans une base de données. Cette base est constituée, en lignes par des «individus» (forages, sources) sur lesquels sont mesurées des «variables quantitatives» (les éléments majeurs et les éléments traces) disposées en colonnes. Elle permet de réduire le nombre de variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes factoriels ou facteurs (Cloutier et al., 2008 ; Yidana et al., 2008).



# **TROISIEME PARTIE**

---

## **Résultats et discussions**

# CHAPITRE V

---

Caractérisation hydrochimique des eaux  
souterraines

## V.1. Introduction

Les eaux souterraines sont les eaux de sous-sol, ils sont une ressource naturelle très importante et a un rôle important dans l'économie. En général, les eaux souterraines sont une source fiable d'eau pour l'agriculture, l'alimentation en eau potable et l'industrie.

La composition et la qualité des eaux souterraines sont à l'origine liées à la nature géologique du terrain. Elles ont un impact direct sur celle des eaux de surface, ainsi que sur les écosystèmes aquatiques et terrestres associés.

Les eaux souterraines sont moins sensibles aux pollutions accidentelles, mais la croissance démographique et la modernisation de l'agriculture ainsi que le développement industriel entraînent un grand problème de détérioration de la qualité de cette source souterraine, déjà en quantité limitée (Degremont, 1978).

La caractérisation hydro chimique des eaux souterraines implique la caractérisation de certain nombre de paramètres physiques et chimiques. 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 d'autres usages (irrigation, industrie....etc). L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la région d'étude pour les différents niveaux aquifères, la nappe Phréatique, la nappe de miopliocène, la nappe de sénonien et la nappe albienne. Une représentation graphique facilitant et aidant l'interprétation.

## V.2. Caractéristiques physiques des eaux

Les paramètres mesurés sur le terrain concernent, la température, le pH et la conductivité électrique.

L'étude statistique des paramètres in situ a concerné les différents niveaux aquifères.

### V.2.1. Température

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques. Et d'une façon générale, la température des eaux est influencée par l'origine dont elles proviennent (superficielles ou profondes) (Rodier, 1984).

Les températures des eaux souterraines dans la cuvette de Ouargla (tableau V-1) sont comprises entre 22,5 et 34,5 °C pour la nappe phréatique; dans la nappe du Miopliocène est



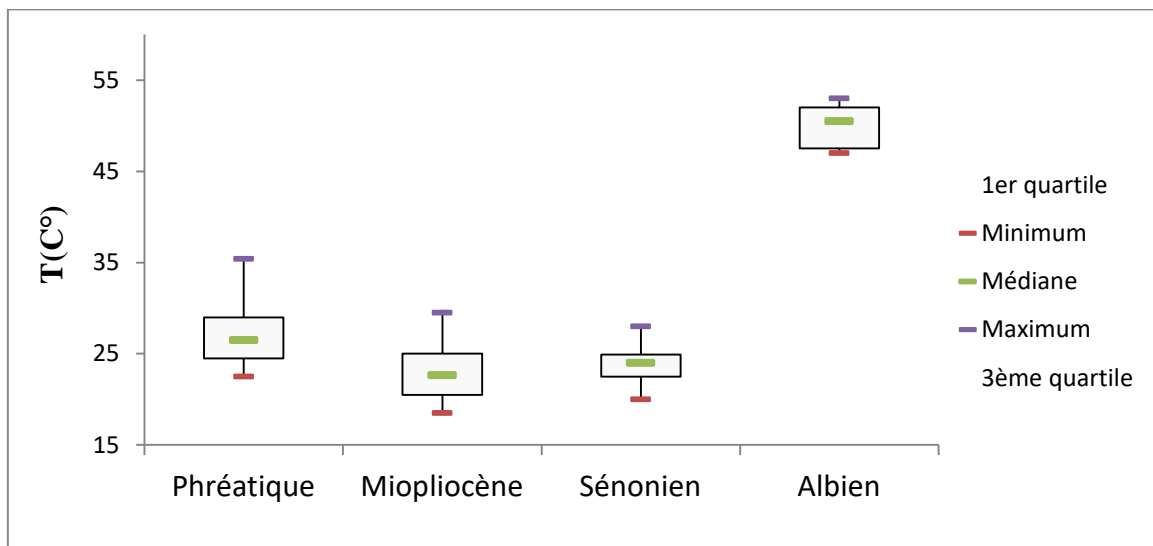
moyennement élevée varient entre 18,5 et 29,5 °C. Celles du Sénonien, varient entre 20 et 28 °C et elles peuvent atteindre 53 °C pour la nappe de l'Albien.

**Tableau V-1** : Variation de la température (°C) selon les nappes

	Phréatique	Miopliocène	Sénonien	Albien
Minimum	22,5	18,5	20	47
Médiane	26,5	22,65	24	50,5
Maximum	35,4	29,5	28	53
Ecart-type	3,45	2,51	2,07	2,68

Les profondeurs des aquifères justifient cette large gamme de température. D'après les données de température il est possible de calculer la profondeur minimale (Pm) des aquifères. (Chenini I, 2009)

$$Pm = ( T_{\text{eau}} [^{\circ}\text{C}] - T_{\text{région}} [^{\circ}\text{C}] ) / (\text{Gradient thermique local})$$



**Figure V-1** : Box plots de la température ‘boîtes à moustaches’,  $n$  Phréatique = 44,  $n$  Miopliocène = 44,  $n$  Sénonien = 28,  $n$  Albien = 6.

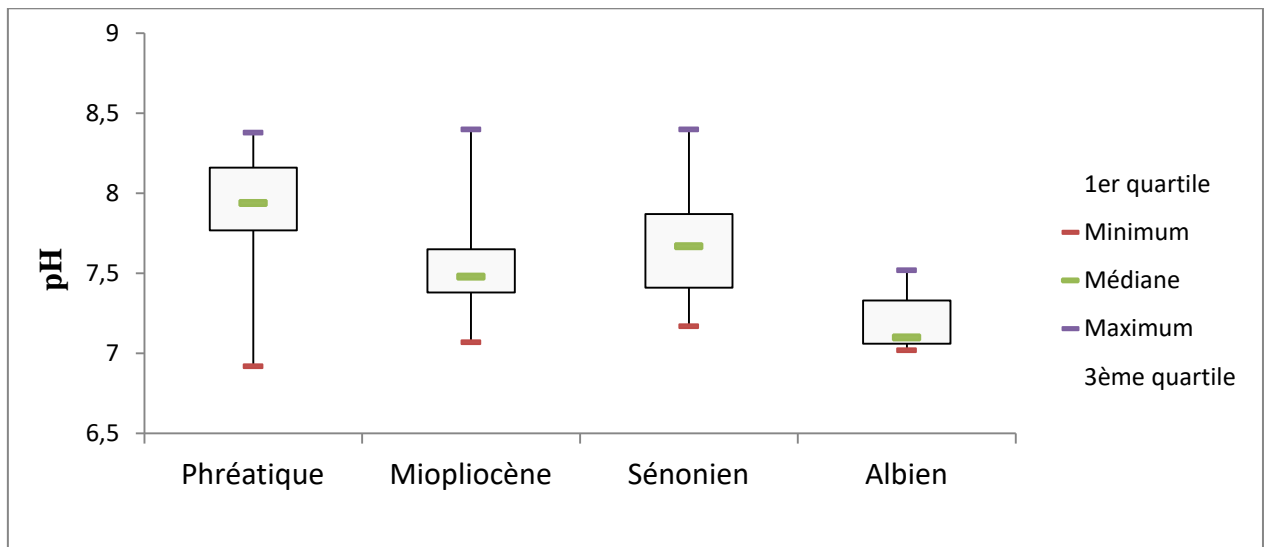
D'après la figure V-1, les températures de l'eau de la nappe phréatique sont élevées, comparables à la température ambiante, s'expliquent par l'effet du rayonnement solaire journalière sur le sol.

La température des eaux de la nappe du Miopliocène et celle de la nappe du Sénonien montre une homogénéité thermique avec une légère augmentation de la température pour la nappe du Miopliocène.

### V.2.2. pH des eaux

Le pH (potentiel Hydrogène) mesure la concentration en ions H<sup>+</sup> de l'eau. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples, dont la température et l'origine de l'eau, il représente une indication importante en ce qui concerne l'agressivité de l'eau (aptitude à dissoudre le calcaire).

Le pH des eaux de différentes nappes étudiées varie entre 6,92 et 8,4. Il apparaît que le pH de toutes ces eaux est voisin de la neutralité avec un caractère alcalin. Les valeurs du pH enregistrées oscillent entre 6,92 et 8,38 avec une médiane de 7,94 pour la nappe phréatique, entre 7,07 et 8,4 pour la nappe du Miopliocène avec une moyenne de 7,48 et une variation entre 7,17 et 8,4 avec une moyenne de 7,67 dans la nappe sénonienne, et de 7,1 pour la nappe Albienne (fig. V-2).



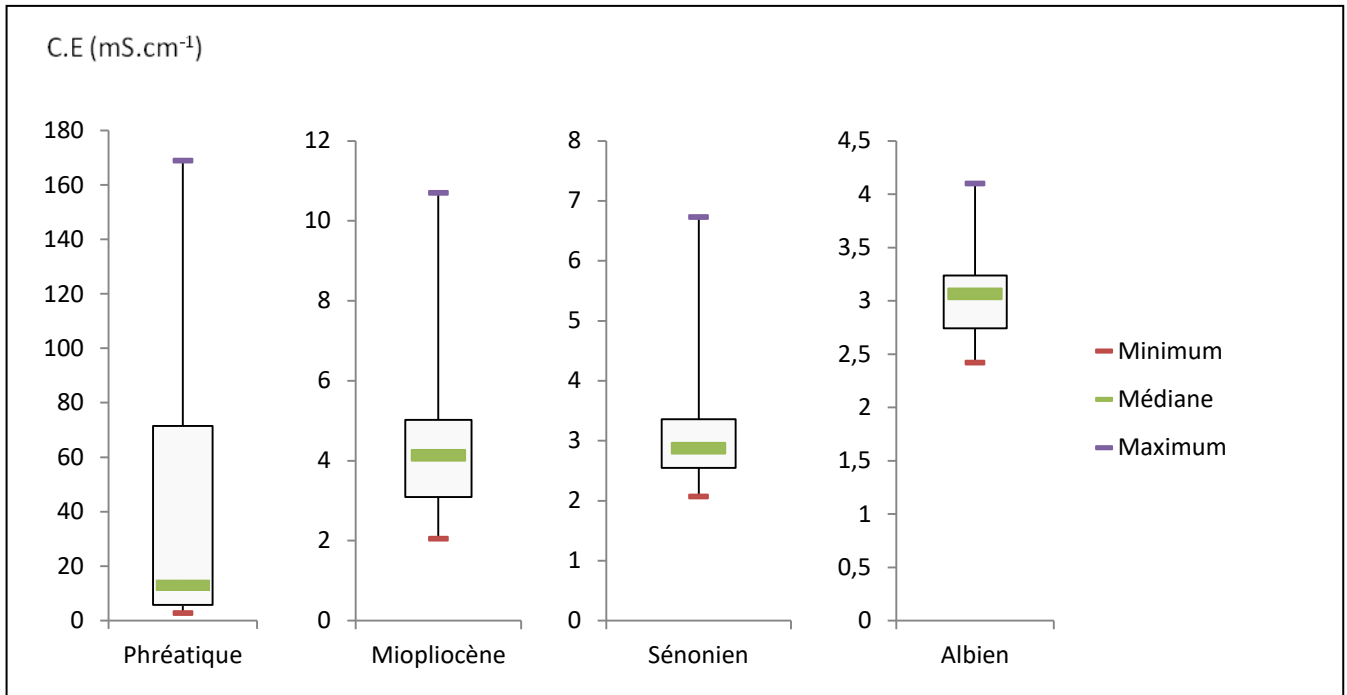
**Figure V-2** : Box plots de pH ‘boîtes à moustaches’,  $n$  Phréatique = 44,  $n$  Miopliocène = 44,  $n$  Sénonien = 28,  $n$  Albien = 6.

Les expériences de (Bouchahm et Achour, 2008), ont montré que le pH des eaux du Sahara Septentrional dans toutes les eaux est voisin de la neutralité avec un caractère plus ou moins alcalin.

### V.2.3. La conductivité électrique

La conductivité électrique est généralement liée à la concentration des sels dissous, elle a aussi une liaison avec la nature lithologique, la vitesse d'écoulement d'une nappe et le temps de séjour d'une eau.

La conductivité est également en fonction de la température de l'eau, et proportionnelle à la minéralisation (Meybeck, 1986 ; Polan et al., 1998 ; Mens et Derouane, 2000 ; Rodier, 2009).



**Figure V-3 :** Box plots de la conductivité électrique,  $n$  Phréatique = 44,  $n$  Miopliocène = 44,  $n$  Sénonien = 28,  $n$  Albien = 6.

Les valeurs de la conductivité électrique des eaux (fig. V-3) varient entre 2,42 et 4,1 mS/cm pour la nappe du l'Albien. Pour la nappe du sénonien entre 2,07 à 6,73 mS/cm et 2,05 et 10,7 mS/cm dans la nappe du Miopliocène. Cette eau contient plus de sulfate et chlorure de sodium. Elle nettement plus dure que les eaux du Sénonien ou de la nappe du Albien.

Dans la majorité les valeurs de la conductivité sont élevées, elles dépassent les normes algériennes (Jora, 2011) soit 2,8 mS/cm.

Pour la nappe phréatique, la conductivité électrique atteint des valeurs très élevées, elles montrent des eaux assez chargées en sels dissous, surtout dans la région du Chott (P096 = 91,1 mS/cm), et Sebkhate Safioune (P021 = 165,5 mS/cm) et sabkhet Oum Raneb (P162 = 166,6 mS/cm). Ces zones sont occupées, en grand partie, par des sebkhas qui sont les exutoires d'eaux de drainage très salées, avec l'influence de l'évaporation, les sels chargent progressivement la nappe. Une exception de quelques zones où nous remarquons des valeurs de la conductivité électrique moins élevées telles que Bour el-haicha (P059 = 2,7 mS/cm), (Puits Hassi naga = 2,9 mS/cm).

#### V.2.4 La minéralisation totale

La conductivité électrique traduit le degré de minéralisation globale, elle nous renseigne sur le taux de salinité. Le calcul de la conductivité permet une évaluation rapide et approximative de la minéralisation globale ou la salinité de l'eau et même permet d'en suivre l'évolution (Boeglin, J. C., 2000 ; Dib I., 2009).

**Tableau V-2 :** Calcule de la minéralisation à partir de la conductivité mesurée à 20°C (Rejsek, 2002).

Conductivité en $\mu\text{s/cm}$	Minéralisation en mg/l
< 50	Conductivité $\times$ 1,365079
Entre 50 et 166	Conductivité $\times$ 0,947658
Entre 166 et 333	Conductivité $\times$ 0,769574
Entre 333 et 833	Conductivité $\times$ 0,715920
Entre 833 et 10 000	Conductivité $\times$ 0,758544
> 10 000	Conductivité $\times$ 0,850432

La minéralisation correspond à la totalité des sels dissous contenus dans l'eau, nous l'avons déterminé à partir de la conductivité des échantillons prélevés, pour les eaux de la cuvette de Ouargla selon les relations suivantes :

**Minéralisation (mg/l) = Conductivité ( $\mu\text{s/cm}$ )  $\times$  0,758544.**

**Conductivité ( $\mu\text{s/cm}$ )  $\times$  0,850432.**

Pour mieux suivre l'évolution de ces concentrations dans les différentes nappes, nous avons dressé les cartes de minéralisation des nappes de la région.

#### V.2.4.1 Distribution spatiale de la minéralisation

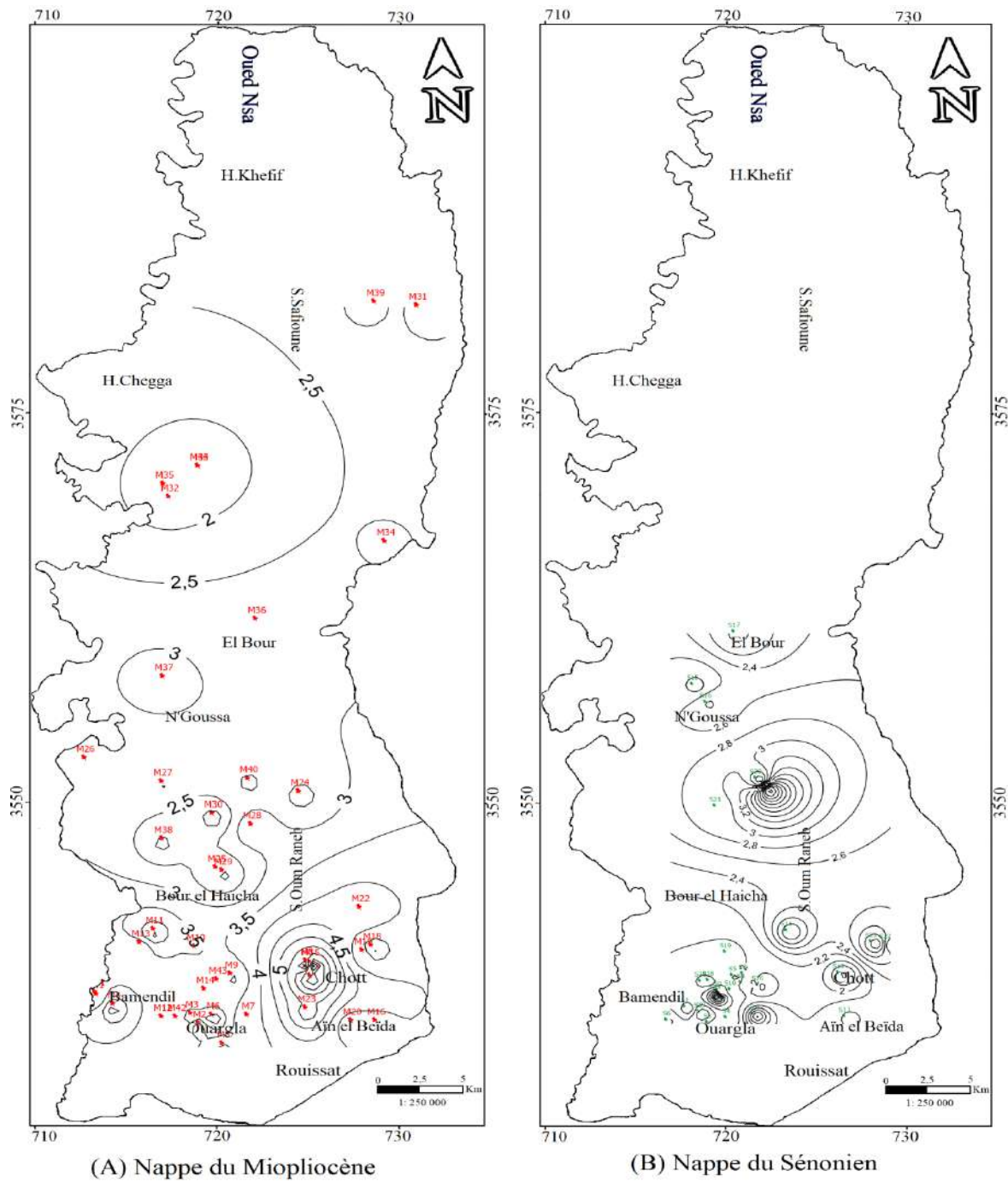
La carte de salinité de la nappe du Miopliocène (fig. V-4 A) montre une minéralisation qui varie entre 1,55 au forage M44 (El Koum D6 F67) et 9,1 g/l au forage d'irrigation M15 (A.Briss D5 F132).

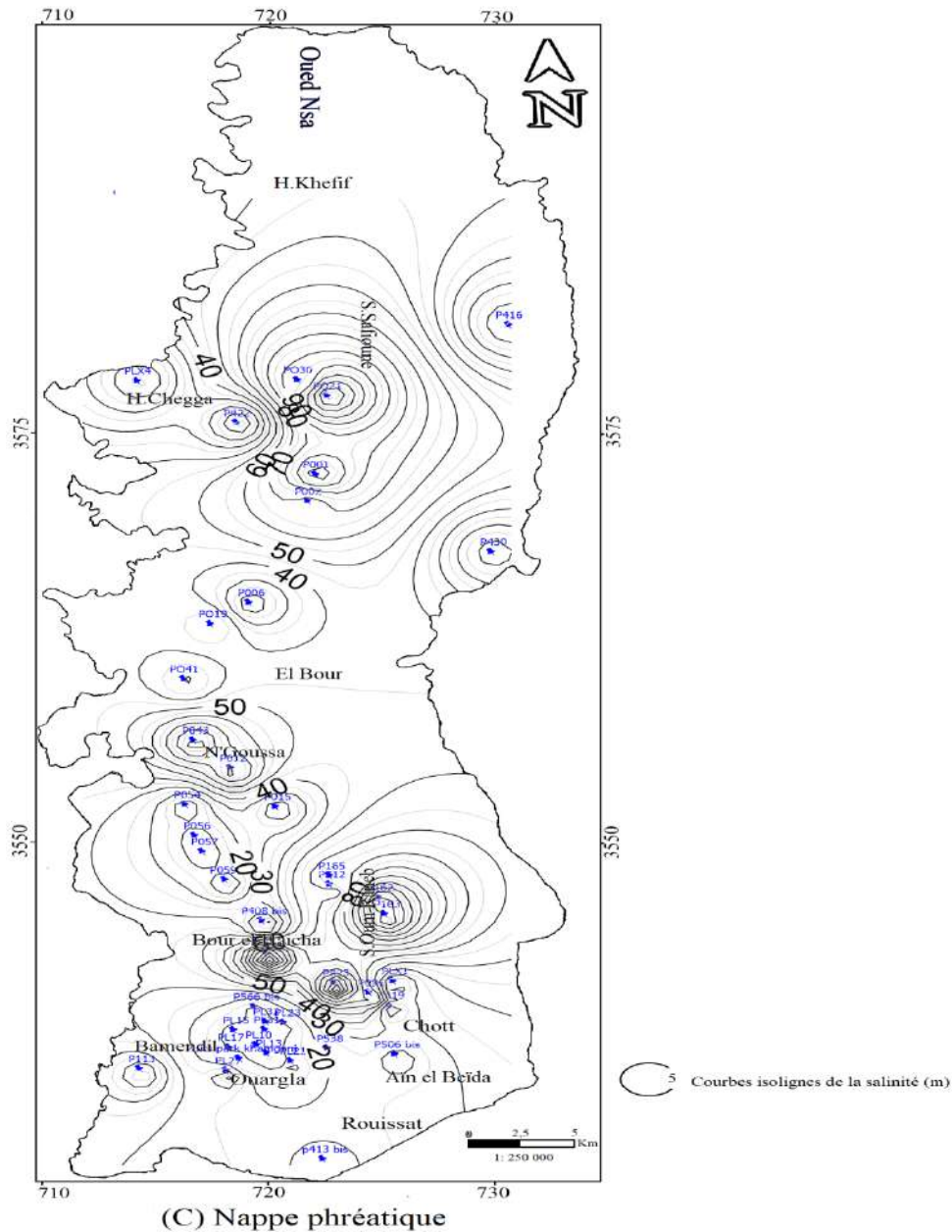
La carte de la nappe du Sénonien (fig. V- 4 B), ne montre pas une minéralisation importante et la salinité mesurée pour l'ensemble des points d'eau varie entre 0,076 g/l au forage S25 (Lala Mimouna D1 F128) et 5,1 g/l au forage S14 (GL/NE1). Cette différence peut s'expliquer par la diminution intensive d'exploitation des forages artésiens, qui a pour conséquence une baisse sensible du niveau piézométrique. Le pompage des eaux a entraîné un lessivage des couches semi-perméables argileuses présentes dans l'aquifère des sables, ce qui a pour effet d'augmenter la salinité des eaux.

La carte de salinité de la nappe phréatique (fig. V- 4 C) montre une minéralisation très élevées et varie d'une zone à une autre, il marque des faible valeurs dans les zones bien irriguées et naturellement drainées vers des sebkhas, comme les palmeraies de Hassi Miloud au nord de la cuvette, sa pente naturelle lui permet de dégager les sels vers la sebkha d'Oum

Raneb. Le centre de la cuvette est marqué par des plages de minéralisation atteignant les 3g/l issues de la concentration des sels par évaporation suite à la stagnation des eaux dans la zone.

Par contre les eaux les plus chargées sont celles des piézomètres situés dans les régions de Chott (P096 = 77,75 g/l), sebkhet Oum Raneb (P163 = 141,68 g/l) et sebkhet Safioune (P001 = 105,2 g/l). Ces zones sont occupées, en grande partie, par des sebkhas et bien souvent à moins de 50 cm de la surface du sol.





**Figure V-4 :** Carte de distribution spéciale de la minéralisation globale (g/l) des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla.

### V.2.5 La dureté totale

Le titre hydrotimétrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium et permet une évaluation de la qualité des eaux exprimée en degré française (°F).

Les valeurs de la dureté mesurée, pour tous les échantillons prélevés sont classées en valeurs minimales et maximales dans le tableau (Tableau V-3).

Les résultats obtenus montrent que la totalité des eaux analysées (100%) sont supérieur à 54 °F, d'après les normes de potabilité des eaux établies par (Jora, 2011). Ce qui

montre que les eaux de cette région sont très dures. On compare les différentes nappes, celle du Albien présente la plus faible dureté en moyenne.

**Tableau V-3 :** Variation de la dureté total (°F) selon les nappes

Nappes	Phréatique	Miopliocène	Sénonien	Albien
Min	67,4	61	67	74
Max	7911,2	256	160	96
Moyenne	363,9	112,5	90,5	84
Ecart-type	1932,4	35,96	19,72	7,26

### V.3. Caractérisation chimique des eaux

Dans les études de caractérisation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla, l'importance des ions (valeurs exprimées en meq/l) suit l'ordre suivant :

- Dans la nappe Phréatique :  $\text{Cl}^-$  -  $\text{Na}^+$  -  $\text{Mg}^{+2}$  -  $\text{Ca}^{+2}$  -  $\text{SO}_4^{-2}$  -  $\text{K}^+$  -  $\text{HCO}_3^-$  -  $\text{NO}_2^-$  -  $\text{NH}_4^+$  -  $\text{NO}_3^-$  -  $\text{PO}_4^{-3}$  -  $\text{CO}_3^{-2}$ .
- Dans la nappe Miopliocène :  $\text{Cl}^-$  -  $\text{Na}^+$  -  $\text{SO}_4^{-2}$  -  $\text{Ca}^{+2}$  -  $\text{Mg}^{+2}$  -  $\text{HCO}_3^-$  -  $\text{K}^+$  -  $\text{NO}_3^-$  -  $\text{CO}_3^{-2}$  -  $\text{NO}_2^-$  -  $\text{NH}_4^+$  -  $\text{PO}_4^{-3}$ .
- Dans la nappe Sénonienne  $\text{Cl}^-$  -  $\text{Na}^+$  -  $\text{SO}_4^{-2}$  -  $\text{Ca}^{+2}$  -  $\text{Mg}^{+2}$  -  $\text{HCO}_3^-$  -  $\text{K}^+$  -  $\text{NO}_3^-$  -  $\text{CO}_3^{-2}$  -  $\text{NO}_2^-$  -  $\text{NH}_4^+$  -  $\text{PO}_4^{-3}$ .
- Dans la nappe albienne :  $\text{Cl}^-$  -  $\text{Na}^+$  -  $\text{SO}_4^{-2}$  -  $\text{Ca}^{+2}$  -  $\text{Mg}^{+2}$  -  $\text{HCO}_3^-$  -  $\text{K}^+$  -  $\text{NO}_2^-$  -  $\text{NO}_3^-$  -  $\text{CO}_3^{-2}$  -  $\text{PO}_4^{-3}$  -  $\text{NH}_4^+$ .

La contribution relative des ions dominants à la minéralisation des eaux est illustrée sur la (fig. V-5). Le graphe à secteur apparaît que les chlorures occupent une part importante au niveau du pool ionique suivi du sodium dans les différentes nappes de la région.



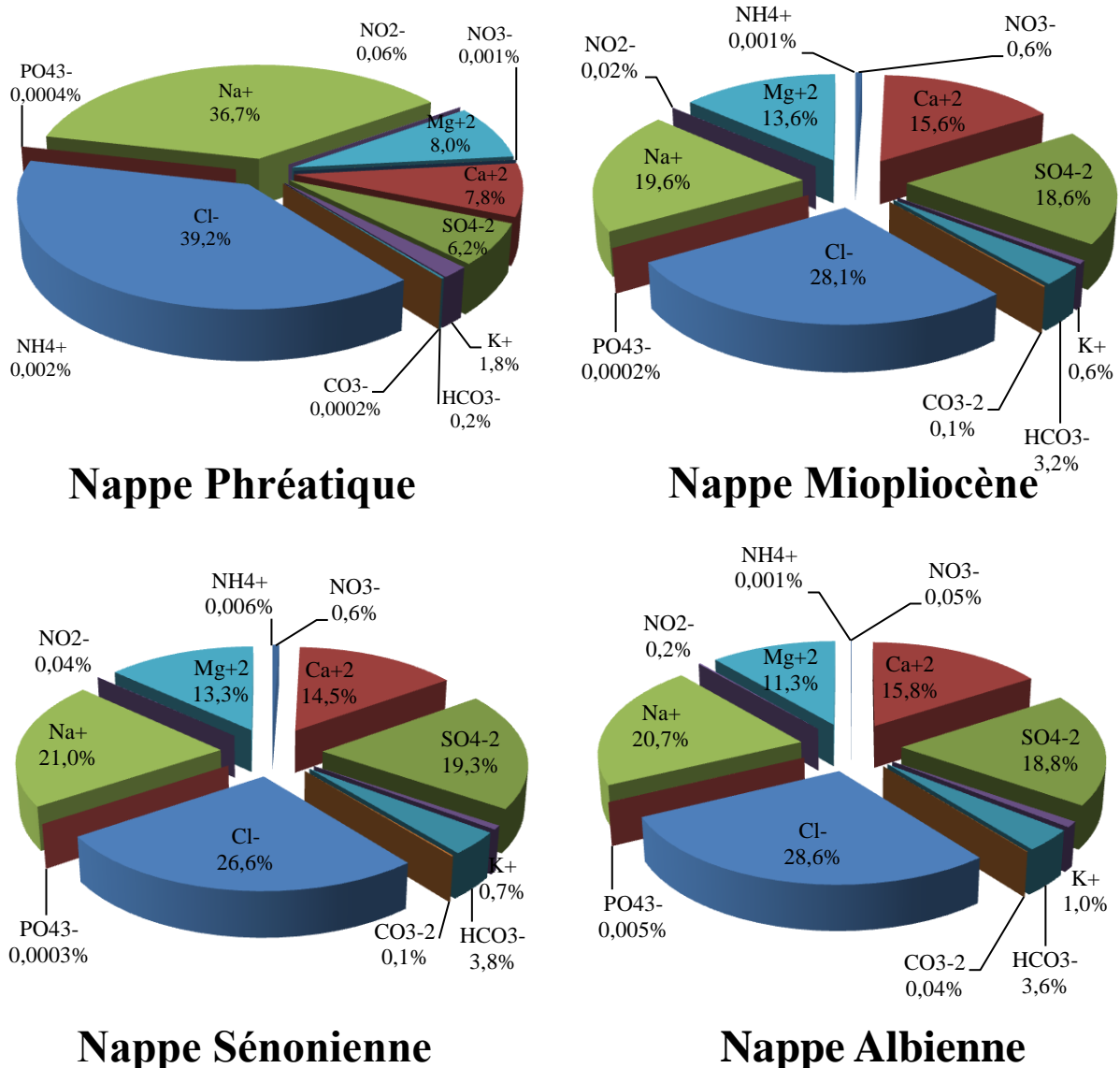


Figure V-5 : pourcentage des éléments chimique dans l'eau en fonction des nappes.

### V.3.1. Les éléments majeurs

#### V.3.1.1. Les cations

Le calcium ( $Ca^{+2}$ ), le magnésium ( $Mg^{+2}$ ), le sodium ( $Na^{+}$ ), et le potassium ( $K^{+}$ ), sont des paramètres utiles, en combinaison avec les anions pour la détermination de la minéralisation dans l'eau.

Les résultats des analyses chimiques des cations sont présentés dans le tableau V-4. Les teneurs en calcium dans la nappe phréatique, sont relativement élevées, variant de 160 à 20000 mg/l avec une moyenne de  $4023,06 \pm 585,8$  mg/l. Concernant la nappe du Miopliocène, sa teneur varie de 142,64 à 496,99 mg/l (moy.  $258,3 \pm 71,14$  mg/l). Dans la nappe du Sénonien, les teneurs variant de 142,68 à 340,68 mg/l avec (moy.  $196,61 \pm 41,15$



mg/l). La teneur en calcium des eaux de la nappe Albienne varie entre 172,35 et 292,58 mg/l. Une moyenne de 198,83 et un Ecart-type de 46,43 mg/l.

Les données du magnésium sont par ailleurs comprises entre 57,6 et 8600 mg/l pour les piézomètres de la nappe phréatique (moy.  $1115,95 \pm 142,5$  mg/l), de 49,57 à 320,76 mg/l (moy.  $135,7 \pm 50,6$  mg/l) pour les forages du Miopliocène, de 63,87 à 182,25 mg/l avec (moy.  $107,91 \pm 31,73$  mg/l), pour la nappe du Sénonien et entre 55,9 et 99,65 mg/l pour les eaux de l'Albien ( moy.  $85,01 \pm 18,4$  mg/l).

Au niveau de la nappe phréatique, les teneurs en sodium varient de 312,5 à 81500 mg/l avec (moy.  $14090,17 \pm 2241,41$  mg/l), entre 210 à 650 mg/l au niveau des eaux du Miopliocène ( $372,9 \pm 116,13$  mg/l), de 230 à 498 mg/l ( $326,97 \pm 82,67$  mg/l) et au niveau de la nappe Albienne les teneur en sodium sont faibles et varient de 245 à 400 mg/l ( $299,17 \pm 55,71$  mg/l).

Quand au potassium, ces teneurs sont compris entre 18,5 à 10700 mg/l ( $1328,61 \pm 249,31$ mg/l) dans la nappe phréatique, de 9 à 46 mg/l ( $19 \pm 9$  mg/l) dans la nappe du Miopliocène, de 11 à 29 mg/l ( $17,98 \pm 5,69$  mg/l) pour la nappe du Sénonien et entre 18 à 31 mg/l ( $24 \pm 4,9$  mg/l) dans la nappe de l'Albien.

**Tableau V-4** : Variations des concentrations des cations selon les nappes.

Nappe	paramètres	Ca <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>
		mg/l			
Phréatique	Min	160	57,6	312,5	18,5
	Max	20000	8600	81500	10700
	Moyenne	4023,06	1115,95	14090,17	1328,61
	Ecart-type	585,8	142,5	2241,41	249,31
Miopliocène	Min	142,64	49,57	210	9
	Max	496,99	320,76	650	46
	Moyenne	258,3	135,7	372,9	19,01
	Ecart-type	71,14	50,6	116,13	9,03
Sénonien	Min	142,68	63,87	230	11
	Max	340,68	182,25	498	29
	Moyenne	196,61	107,91	326,97	17,98
	Ecart-type	41,15	31,73	82,67	5,69
Albienne	Min	172,35	55,9	245	18
	Max	292,58	99,65	400	31
	Moyenne	198,83	85,01	299,17	24
	Ecart-type	46,43	18,4	55,71	4,9

### V.3.1.2. Les anions

Les chlorures (Cl), les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>), les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), sont aussi des paramètres utiles, en combinaison avec les cations pour la détermination de la salinité dans l'eau.

Les résultats des analyses chimiques des anions sont présentés dans le tableau V-5. Les chlorures prennent une part importante à la minéralisation de la nappe, sa teneur moyenne est de 630,06 ± 128,78 mg/l au niveau de la nappe Albienne (min 510,36 et max 830,28 mg/l). Pour la nappe du Sénonien, les teneurs varient entre 350 et 1130 mg/l (629,93 ± 183,72 mg/l), de 405 à 1701 mg/l (814,13 ± 128,78 mg/l) pour la nappe du Miopliocène. Tandis que dans la nappe phréatique, elles sont plus élevées et varient entre 335 et 135000 mg/l (26611,28 ± 41039,7mg/l).

Les sulfates sont également présents. Leurs teneurs varient entre 232 et 880 mg/l une moyenne de 566,73 ± 214,26 mg/l pour les eaux de la nappe du l'Albien, de 272,44 à 1025 mg/l (628,4 ± 171,34 mg/l) au niveau des forages du Sénonien, de 342,5 à 1180 mg/l (740,79 ± 187,39 mg/l) et de 688 à 87000 mg/l (7580,57 ± 13817,76 mg/l) au niveau des piézomètres de la nappe phréatique. Les sulfates avec les chlorures sont parmi les éléments majeurs qui déterminent le faciès chimique de l'eau dans la région.

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaire. dolomite.....etc.) par des eaux chargées en gaz carbonique. L'équation de dissolution est donnée comme suit :  $\text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 = 2\text{HCO}_3^- + \text{Ca}_2^+$ . Dans la nappe du l'Albien, les teneurs en ions bicarbonates varient de 105,73 à 234,85 mg/l (139,45 ± 47,76 mg/l). Dans la nappe du Sénonien entre 85 et 256,75 mg/l (157,43 ± 34,93 mg/l). Dans la nappe du Miopliocène, les valeurs sont entre 98 et 256,75 mg/l (160 ± 37,97 mg/l). Dans la nappe phréatique, elles sont nettement plus élevées, la teneur varie entre 51,85 et 619,15 mg/l (234,2 ± 128,43 mg/l).

**Tableau V-5** : Variations des concentrations des anions selon les nappes.

Nappe	paramètres	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
		mg/l		
Phréatique	Min	335	688	51,85
	Max	135000	87000	619,15
	Moyenne	26611,28	7580,57	234,2
	Ecart-type	41039,7	13817,76	128,43
Miopliocène	Min	405	342,5	98
	Max	1701	1180	256,75
	Moyenne	814,13	740,79	160
	Ecart-type	281	187,39	37,97
Sénonien	Min	350	272,44	85
	Max	1130	1025	222,39
	Moyenne	629,93	628,4	157,43
	Ecart-type	183,72	171,34	34,93
Albienne	Min	510,36	232	105,73
	Max	830,28	880	234,85
	Moyenne	630,06	566,73	139,45
	Ecart-type	128,78	214,26	47,76

### V.3.2. Faciès chimiques et formules caractéristiques des eaux

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et cations sur deux triangles. Les unités utilisées sont les pourcentages en meq/l par rapport au total de ces ions. L'intersection des deux lignes issues des triangles dans le losange représente l'analyse de l'échantillon. La représentation des analyses chimiques sur le diagramme de Piper permet de catégoriser les familles des points d'eau.

#### V.3.2.1. Nappe phréatique

Représentées sur le diagramme de Piper (fig. V-6), les eaux de la nappe Phréatique montre que la distribution des points d'eau occupe, au niveau du triangle des cations le pôle sodique sauf quatre piézomètre ou elle occupe le pôle magnésien et occupe au niveau du triangle des anions entre le pôle chloruré et le pôle sulfaté. Ceci montre bien trois faciès chimique. Chloruré sodique dominant et deux faciès secondaire sulfaté sodique et sulfaté magnésien.

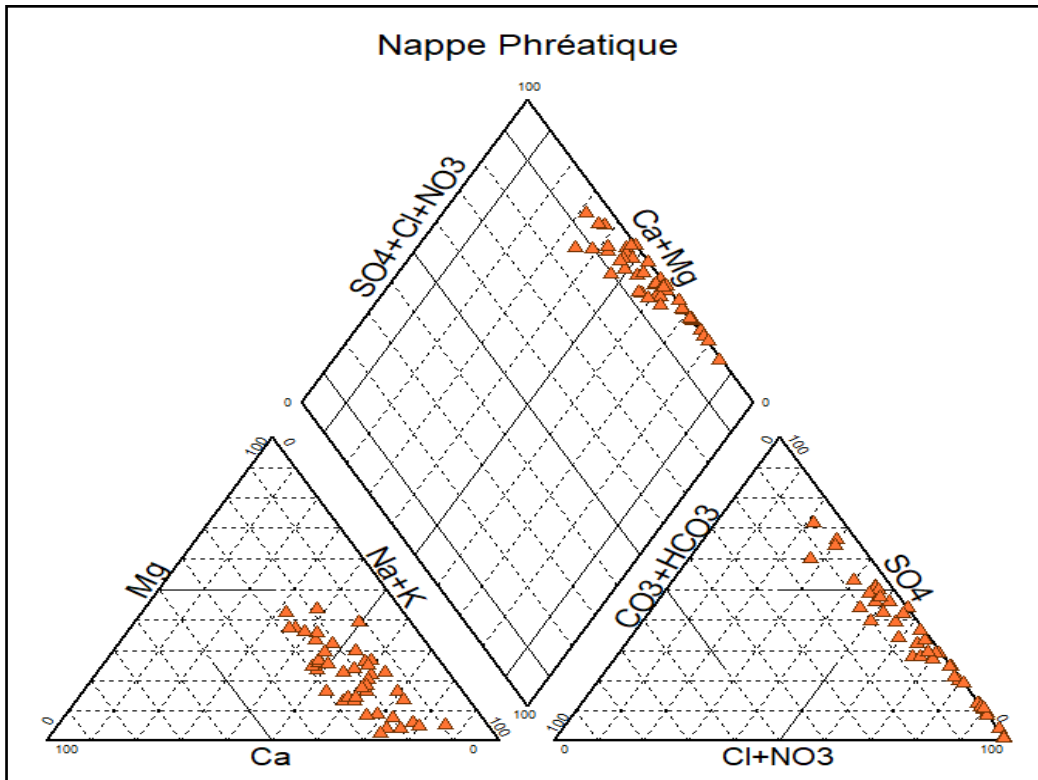


Figure V-6 : Diagramme de Piper pour la nappe Phréatique.

Une représentation des faciès chimique dans un diagramme ( $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ ) montre l'existence de deux pôles caractéristiques de la nappe Phréatique (fig.V-7). Le faciès chloruré sodique et l'autre entre sulfaté sodique et sulfaté magnésien.

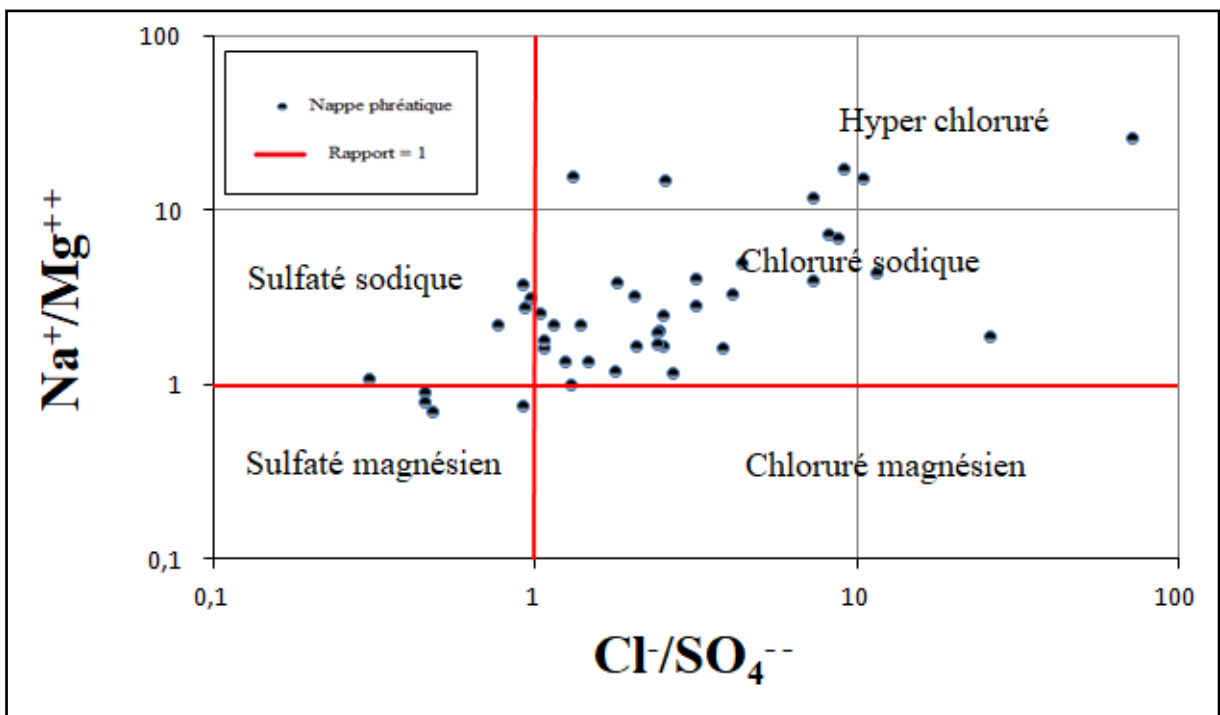


Figure V-7 : Caractérisation du faciès chimique de la nappe Phréatique.

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et la classification des ions (formule ionique), nous avons déterminé les faciès qui se résument dans le tableau suivant (Tableau V-6) :

- Une famille chlorurée, la plus dominante représenté près de 77,27 % des eaux de la nappe phréatique, avec un faciès
  - $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$  représente 38 % de cette famille.
  - $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  cette catégorie représente 62 %

Les eaux de cette famille sont des eaux des dépressions (sebkhas et chotts) là où l'influence de l'évaporation est intense (donc précipitation des carbonates et des sels minéraux).

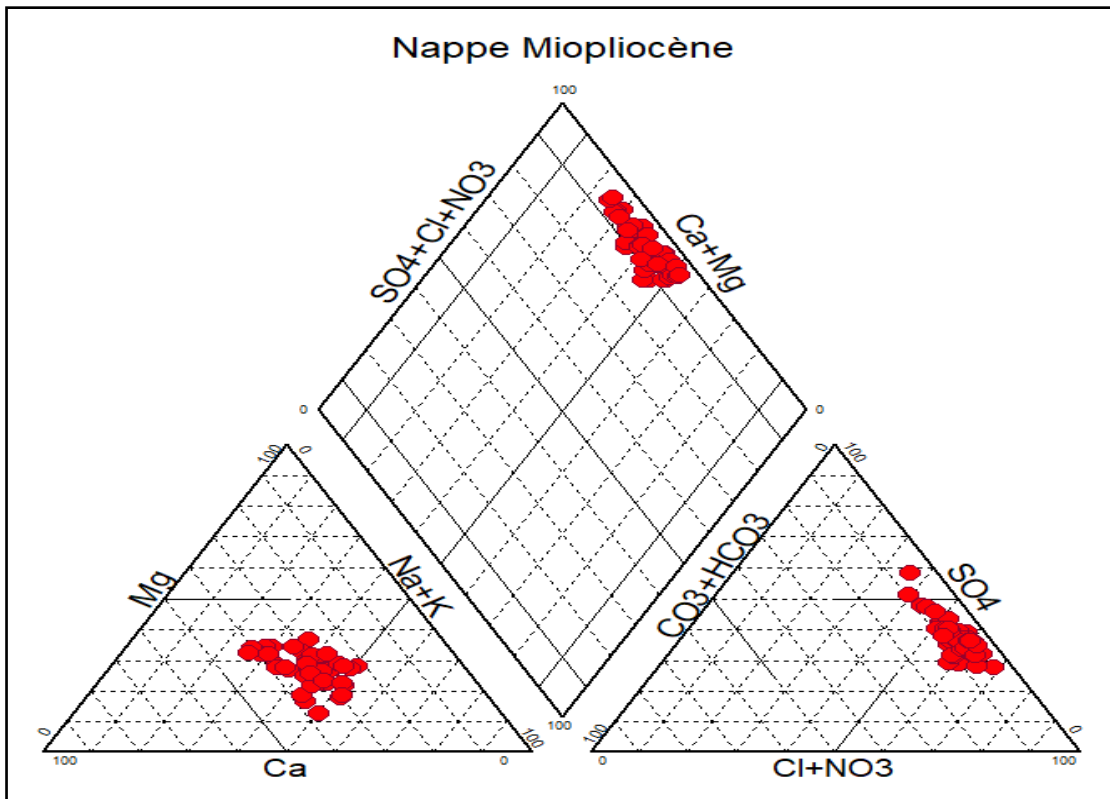
- Une famille sulfatée ne présente que 22,73 % des eaux de la nappe phréatique avec un faciès
  - $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ , quatre piézomètres (P566 bis / Puits park khamgani / PL15 / PL31) présentent ce faciès ;
  - $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  dans les piézomètres (P056 / Puits Hassi Naga) ;
  - $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$  représenté dans les piézomètres (PLX1 / P408 bis / PL13 / PL10 DSA).

**Tableau V-6 :** Répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe Phréatique

Faciès chimique	Faciès caractéristique	Piézomètres	Observation
Chloruré sodique	(r%) $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	ENTV PL21 / PL17 / P015 / P419 / P054 / P430 / PO19 / P006 / Hotel Transat PL23 / P422 Aine Djemel / P416 Hassi Debiche / PL32 Ecole Paramédicale / PLX4 Hassi chgga.	77,27%
	(r%) $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	PZ12 / P538 / P012 / P165 / P506 bis / p413 bis / p162 / P423 / P096 / P163 / P059 / P057 / P064 / PO21 Sabkhet Safioune / PO41 N'goussa / P043 / P002 Sabkhet Safioune / P001 Sabkhet Safioune / PO30 Sabkhet Safioune / PL27 / P113.	
Sulfaté sodique	(r%) $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	P566 bis / Puits park khamgani / PL15 / PL31.	16,63%
	(r%) $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P056 / Puits Hassi Naga.	
Sulfaté magnésienne	(r%) $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+}$	PLX1 / P408 bis / PL13 / PL10 DSA .	9,1%

### V.3.2.2. Nappe du Miopliocène

Représentées sur le diagramme de Piper (fig. V-8), les eaux de la nappe du Miopliocène montre que la distribution des points d'eau occupe, au niveau du triangle des cations le pole sodique et le pole calcique et occupe au niveau du triangle des anions entre le pole chloruré et le pole sulfaté. Les eaux de cette nappe présentent les faciès chimique suivant : chloruré sodique, chloruré calcique, sulfaté sodique.

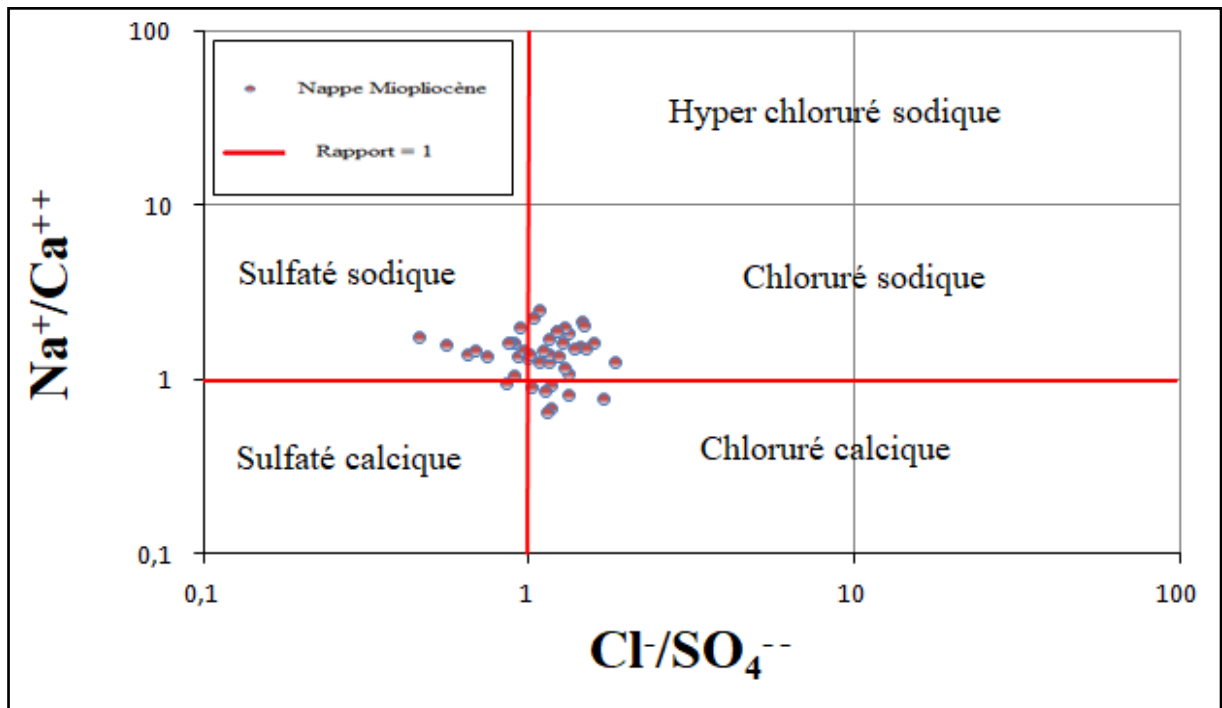


**Figure V-8 :** Diagramme de Piper pour la nappe du Miopliocène.

Le diagramme caractéristique des eaux de la nappe du Miopliocène ( $\text{Na}^+/\text{Ca}^{++} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{--}$ ) montre l'existence des pôles suivante (fig.V-9).

Le pole chloruré : regroupé le faciès chloruré sodique et le faciès chloruré calcique.

Le pole sulfaté : regroupe le faciès sulfaté sodique. Un seul forage représenté le faciès sulfaté calcique.



**Figure V-9 :** Caractérisation du faciès chimique de la nappe du Miopliocène.

L'ensemble des diagrammes des eaux de la nappe du Miopliocène a montré deux familles chimiques (tableau V-7) :

- Une famille chlorurée, représente près de 66 % des points d'eaux de cette nappe avec :
  - $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  représente 79,31 % de cette famille ;
  - $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$  représente 20,69 %.
- Une famille sulfatée, ne représente que 34 % des eaux de la nappe du Miopliocène, avec une majorité sodique ( $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ ), un seul forage (Oum Raneb D6 F69) présente un faciès calcique ( $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+}$ ).

**Tableau V-7** : Répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe du Miopliocène

Faciès chimique	Faciès caractéristique	Forage	Observation
Chloruré sodique	(r%) $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ (r%) $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$	Cité universitaire / Ziayna AEP / SONACOB / A Benithour AEP / Ain Mbarek / Timlaouine D2 F52 / Kouchane D1 F106 / Bamendil II D7 F7 / ITAS D1F 150 / Bamendil AEP / Matmoura / A.Briss D5 F132 / Ceinture verte D5F111 / AIN ZAKINOU D5F44 / S. Khouiled Palmeraie D9 / Bour El Haicha D1F139 / Bordji D9 F17 / Gherbouz D6 F47 / DEBBICHE IRR / Hassi Chetta / Elkhafji 3 /D1f144 Université / Bahmid.	52,27%
Sulfaté sodique	(r%) $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$ (r%) $Na^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$	Khafdji AEP / Abattoir / Mekhadma AEP II / S.Khouiled Daira D9 F5 / H.Miloud Benyaza / Bour El Haicha D1F134 / Laouini D9F15 / Frane AEP D6F98 / El Koum AEP D6F40 / Oglat Larbaâ D6F64 / Frane jeune D6 F62 / Hassi Ehta AEP / H.Miloud AEP / El Koum.	31,82%
Chloruré calcique	(r%) $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$ (r%) $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$	A.Aéroport nouveau / Station naftal / Garet Diaba D9 F2 / A.Degla D5 F117 / Abazat D2F69 / DEBICHE AEP.	13,64%
Sulfaté calcique	(r%) $SO_4^{2-} > Cl^- > HCO_3^-$ (r%) $Ca^{2+} > Na^+ > Mg^{2+}$	Oum Raneb D6 F69	2,27%

### V.3.2.3. Nappe du Sénonien

Pour cette nappe du Sénonien, le diagramme de piper et le diagramme caractéristique ( $Na^+/Mg^{++} - Cl^- / SO_4^{--}$ ) (fig. V-10 et fig. V-11) ont montré deux faciès chimique chloruré sodique et sulfaté sodique.



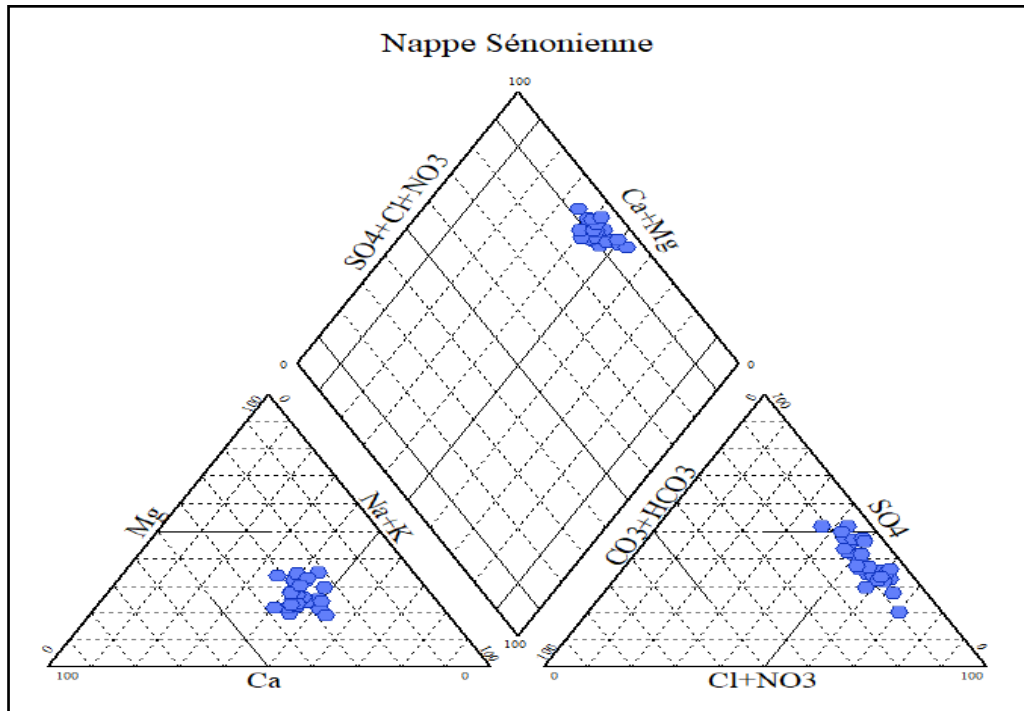


Figure V-10 : Diagramme de Piper pour la nappe du Sénonien.

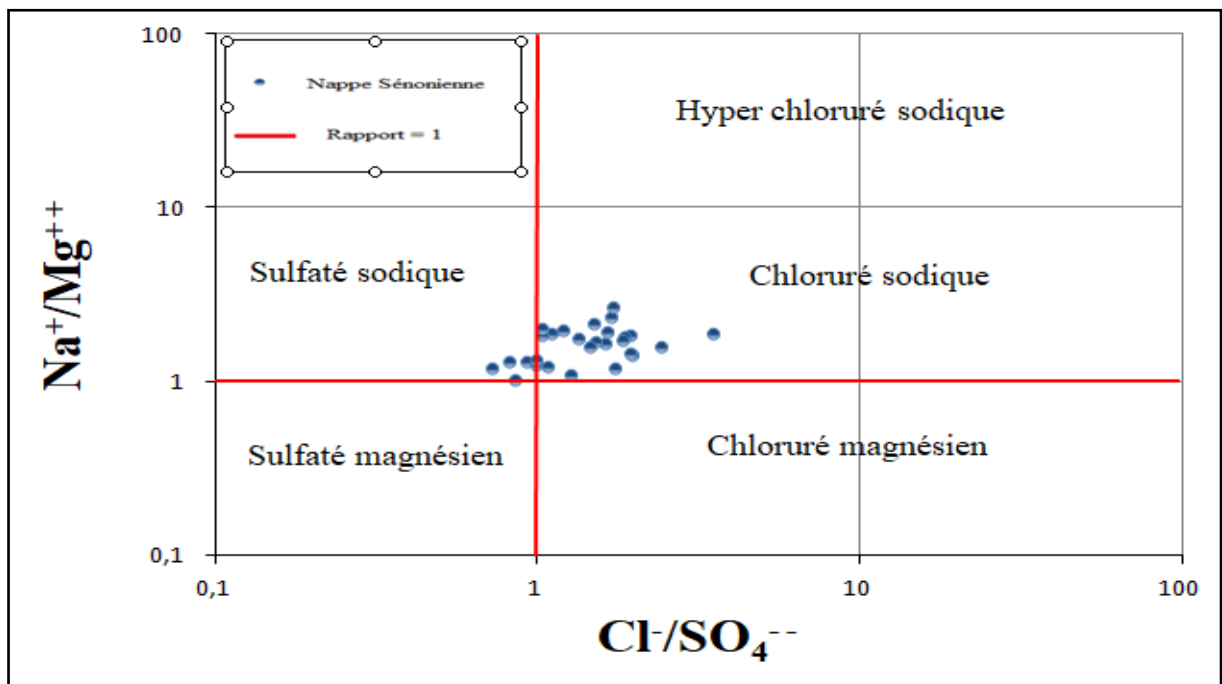


Figure V-11 : Caractérisation du faciès chimique de la nappe du Sénonien.

La répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe du Sénonien (tableau V-8) représente famille chloruré avec une majorité sodique et calcique ( $r\%$   $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$  représente 81 % de cette famille, et une famille sulfaté avec totalité sodique et magnésienne  $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ .

**Tableau V-8** : Répartition des faciès caractéristiques des eaux de la nappe du Sénonien.

Faciès chimique	Faciès caractéristique	Forage	Observation
Chloruré sodique	(r%) $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	Mekhadma AEP I / N'goussa Est AEP/ Ain Hadji / Ain moussa 02.	78,57%
	(r%) $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	SAR Mekhadma / Sokra II AEP / Sokra I AEP / Hopital D1 F143 / Gare Chemia / Ifri D1 F151 / Ifri silis D1 F149 / Jardin Communal D1 F137 / St. pompage chott/ CHOTT AEP NOUVEAU/ Ain baida AEP/ GL/NE1/ N'goussa El Houa / El Bour AEP /D1f123 M'Khadma I/D4 F95 Beni Thour I/ D1 F128 Lala Mimouna / D9 F12 Sidi Khouiled.	
Sulfaté sodique	(r%) $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{HCO}_3^-$ (r%) $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$	Chateau d'eau / Said Otba / Nakhil / Sidi Khouiled 01 / D1 F140 Gara Nord/Gherbouz I AEP D1 F124.	21,43%

#### V.3.2.4. Nappe du l'Albien

Pour cette nappe du l'Albien (fig. V-12) ; (fig. V-13), les eaux sont de faciès chloruré sodique.

Selon les formules caractéristiques, les ions s'ordonnent de la manière suivante :



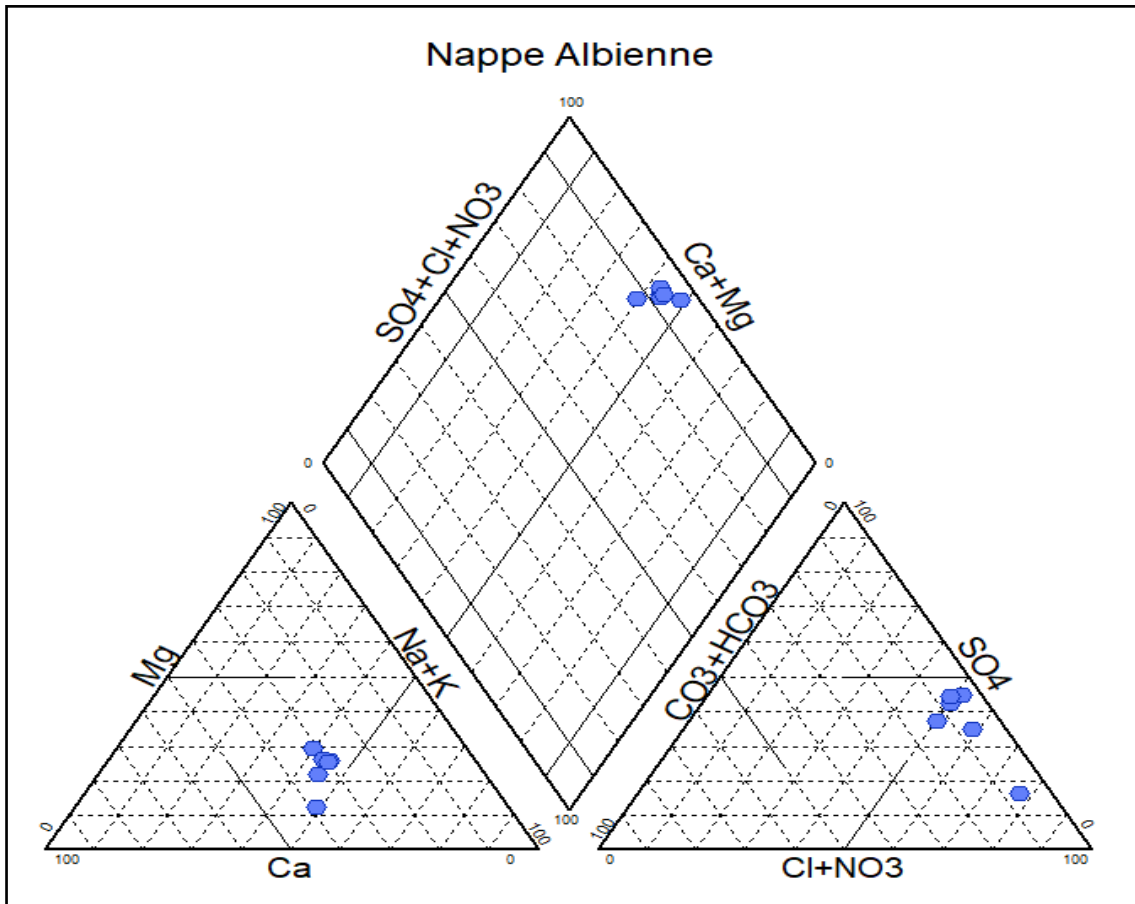


Figure V-12 : Diagramme de Piper pour la nappe Albienne.

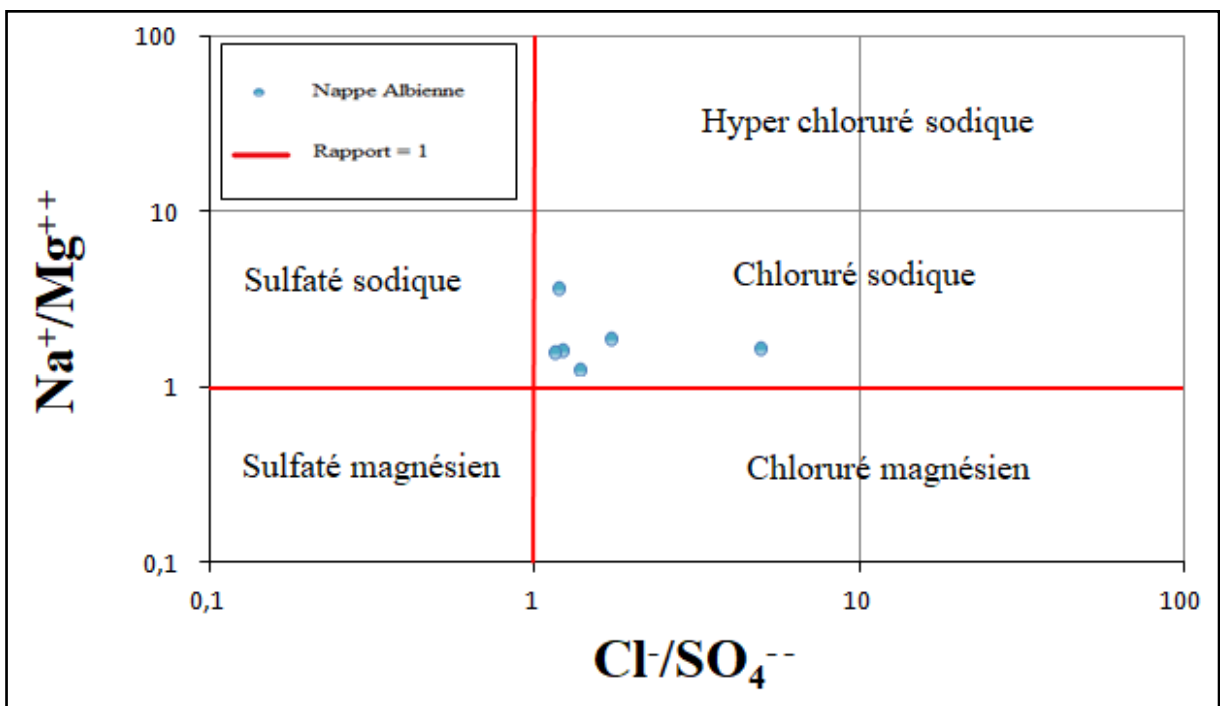


Figure V-13 : Caractérisation du faciès chimique de la nappe de l'Albien.

#### **V.4. Cartographie hydrochimique**

L'outil cartographique, même dans l'aspect qualitatif des eaux, reste un outil très appréciable, dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque, ou d'un polluant (Rouabhia, 2006).

A cet effet, nous avons dans notre cas, choisi également ce mode de représentation, pour la variabilité des éléments chimiques qui ont le plus dominant dans l'eau.

Dans ce qui suit nous allons observer la répartition de ces éléments dans l'espace selon les nappes étudiées

##### **V.4.1 Les chlorures**

###### **V.4.1.1 Carte des chlorures de la nappe phréatique**

Les concentrations en chlorures pour cette nappe (fig. V-14), sont très élevées, et se concentrent au centre et au niveau de sabkhet Safioune et Oum Raneb. Dans tous les endroits, les chlorures présentent des teneurs supérieures à la norme (500 mg/l).

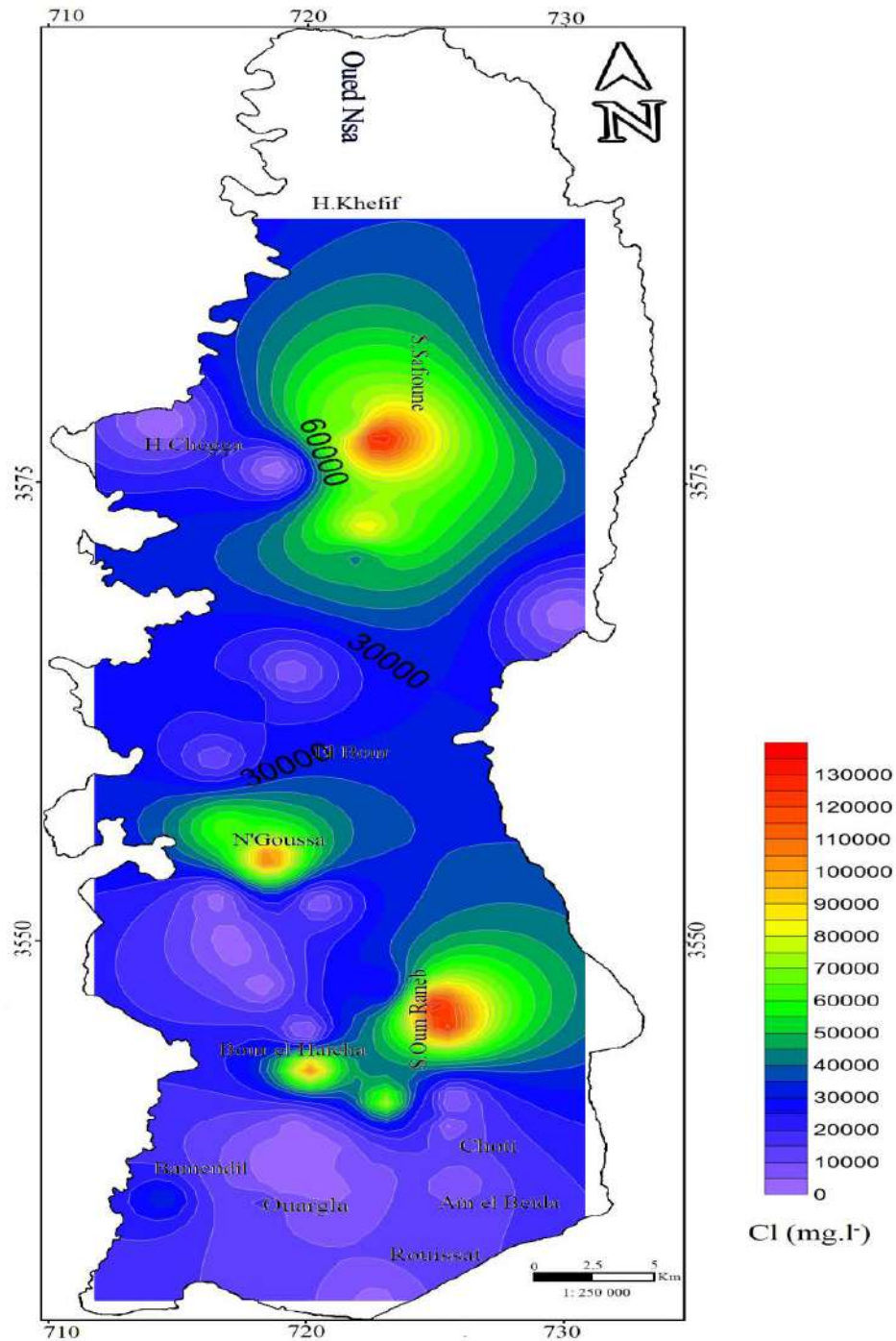


Figure V-14 : Carte des Chlorures de la nappe phréatique.

#### V.4.1.2 Carte des chlorures de la nappe du Miopliocène

La majorité des zones présentent des fortes teneurs en chlorures (fig. V-15). A l'exception de deux endroits présentant des teneurs acceptables, il s'agit de la zone nord à proximité de H.Chegga (forage Frane AEP D6F98), et de la zone centrale de Bour el Haicha.

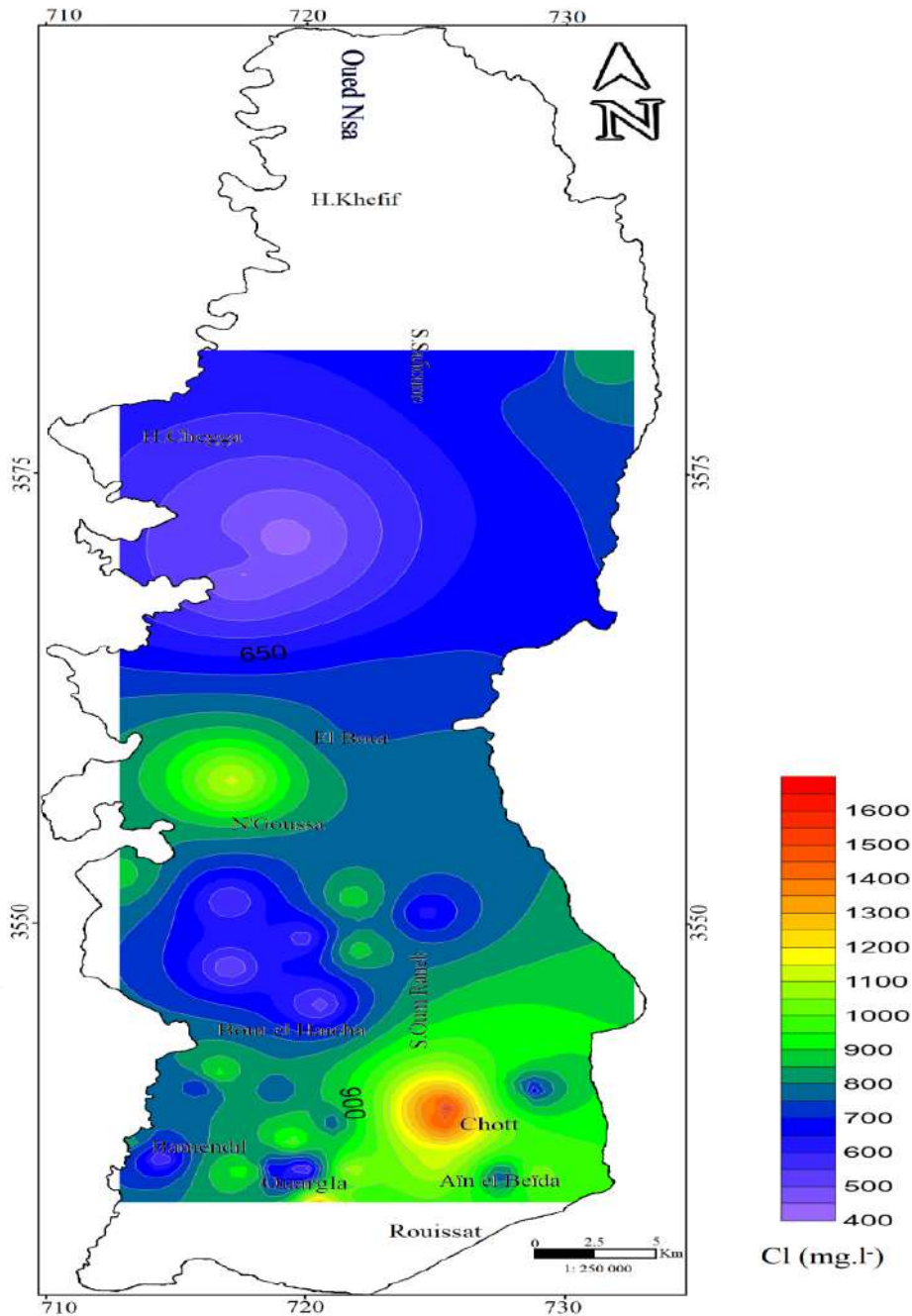


Figure V-15 : Carte des Chlorures de la nappe du Miopliocène.

#### V.4.1.3 Carte des chlorures de la nappe du Sénonien

La même constatation est valable que pour la nappe du Miopliocène, là aussi les concentrations en chlorures sont élevées, notamment au centre et au sud de la cuvette. Les concentrations conformés les normes (<500 mg/l) trouvent au Chott, Ain el Baida et au Bour el Haicha (fig. V-16).

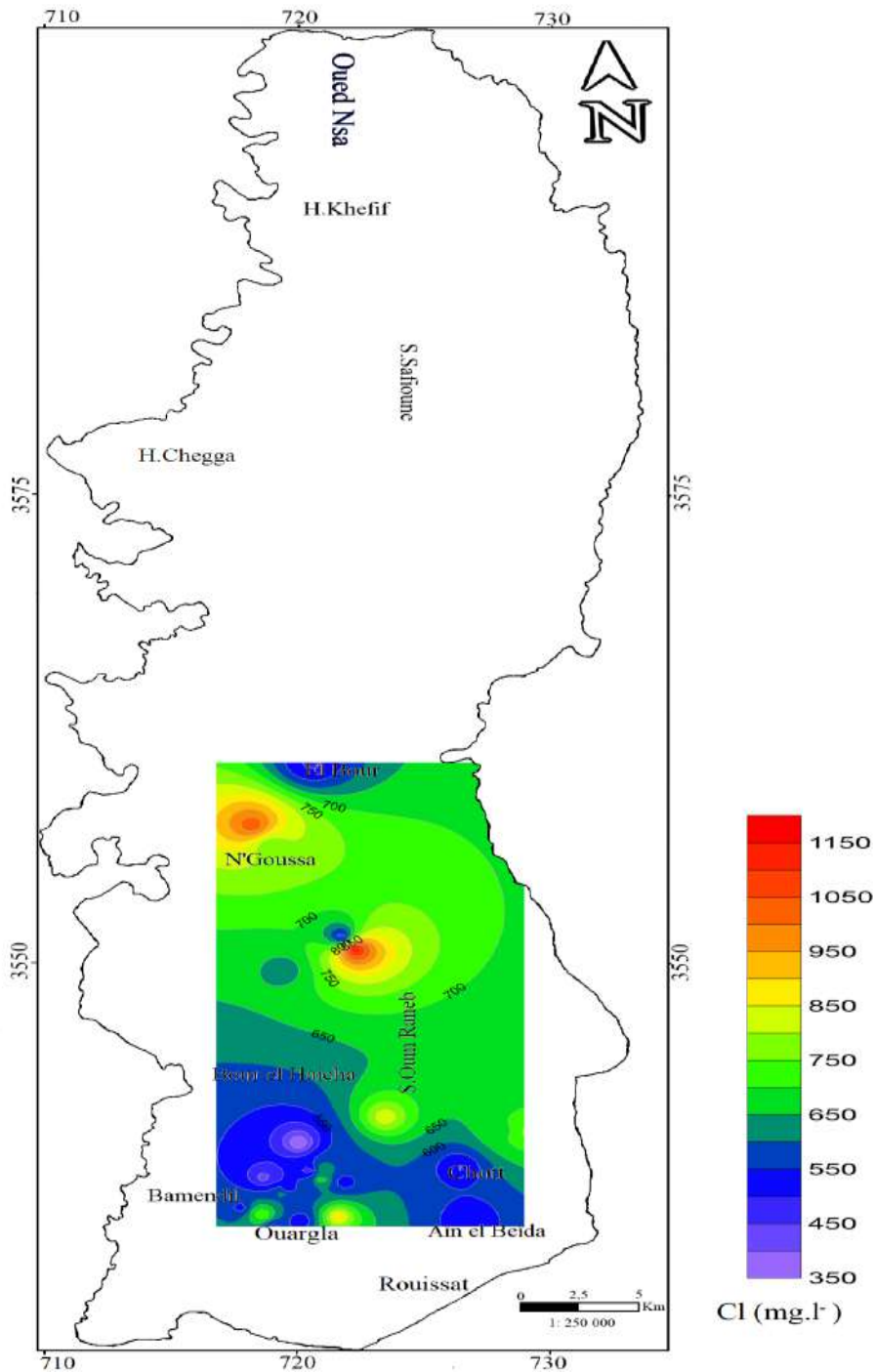


Figure V-16 : Carte des Chlorures de la nappe du Sénonien.

#### V.4.2 Les Sulfates

##### V.4.2.1 Carte des sulfates de la nappe phréatique

Les fortes concentrations en sulfate se manifestent au sud (sabkhet Oum Raneb) et au nord (Sabkhet Safioune) de la plaine, tous les teneurs dépassent les 400 mg/l. (fig. V-17)



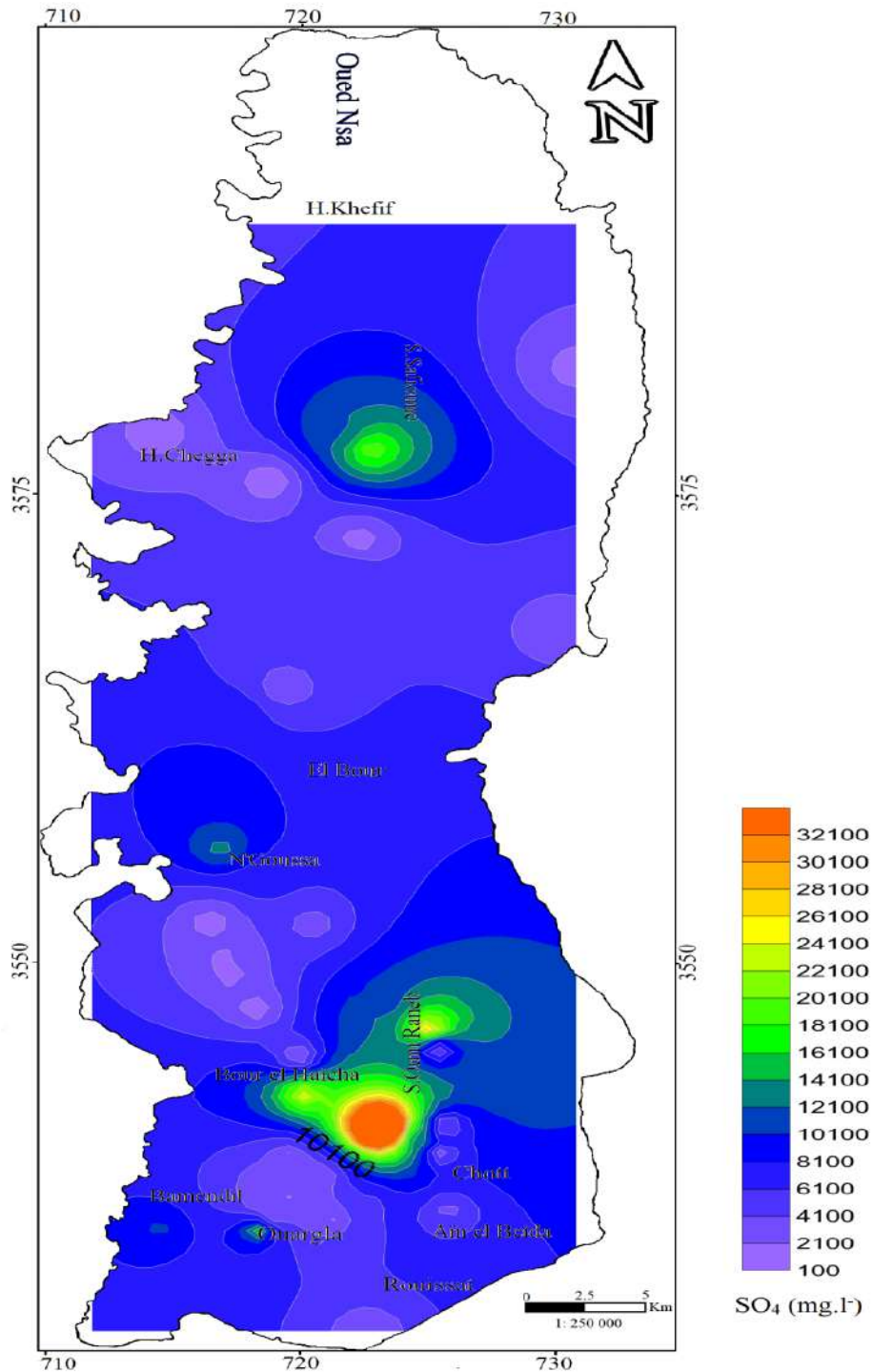


Figure V-17 : Carte des Sulfates de la nappe phréatique.

#### V.4.2.2 Carte des sulfates de la nappe du Miopliocène

Sur la carte de la nappe du Miopliocène, (fig. V-18) les fortes concentrations en sulfates sont localisées dans le secteur sud de la cuvette (Chott). Les teneurs en sulfates ne confirment pas les normes de potabilité (400 mg/1) dans toute la cuvette de Ouargla.



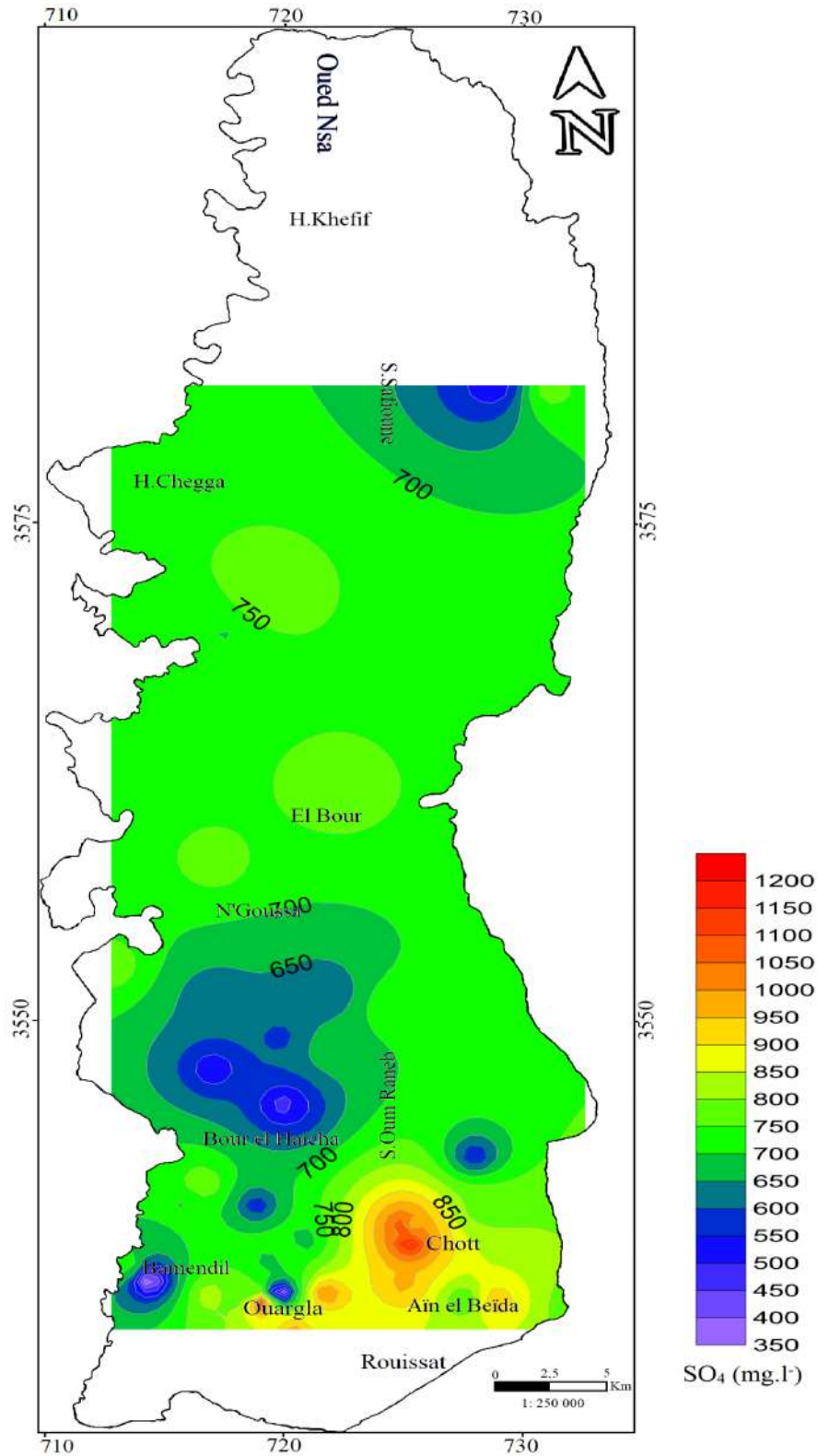


Figure V-18 : Carte des Sulfates de la nappe du Miopliocène.

### V.4.2.3 Carte des sulfates de la nappe du Sénonien

Dans cette nappe du Sénonien (fig. V-19), les teneurs en sulfates compris entre 650 et 850 mg/l dans la majorité des points d'eaux, les fortes concentrations se localisent au Sud-Est (Sidi Khouiled D9 F12) et au centre de la cuvette à la proximité de Ain Moussa forage (GL/NE1).

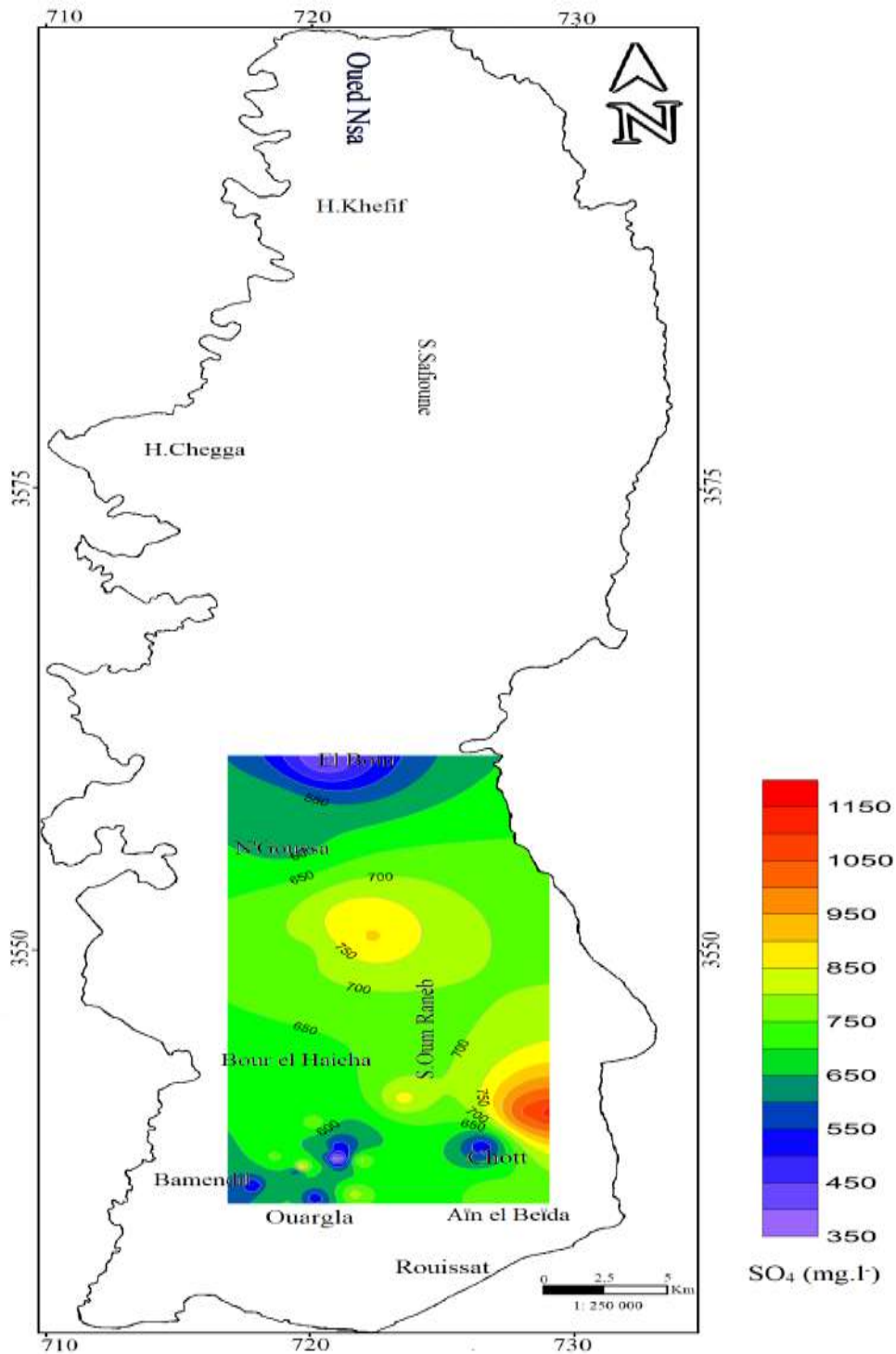


Figure V-19 : Carte des Sulfates de la nappe du Sénonien.

### V.5. Mécanismes de la minéralisation des eaux

Le chimisme des eaux souterraines est caractérisé par la présence de certains ions plus abondants (ou plus facilement mis en solution) que d'autres. L'abondance de ces éléments résulte d'une origine qui peut être soit naturelle soit anthropique. Elle est ensuite contrôlée par des processus physiques ou chimiques. Parmi ces processus on peut citer ceux liés à l'interaction avec l'encaissant, dépendant de la nature de cet encaissant, du temps du transit des eaux au sein de la formation aquifère et des processus chimiques contrôlant la mise en solution ou la précipitation. Les influences anthropiques comme le retour des eaux d'irrigation dans les régions à forte activité agricole peuvent également contribuer significativement à la minéralisation des eaux souterraines.

La classification des données chimiques à l'aide des diagrammes de Piper a permis de donner une première idée sur les mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Pour les confirmer, il est maintenant nécessaire d'examiner de manière plus détaillée l'évolution des paramètres de l'analyse chimique les uns par rapport aux autres, en relation avec le fonctionnement du système hydrogéologique. Les états de saturation vis-à-vis des principaux minéraux constituent un élément de contrôle majeur de la concentration des ions en solutions. Nous avons donc préalablement déterminé, à l'aide du logiciel Diagramme, les indices de saturation vis-à-vis des principaux minéraux carbonatés et évaporitiques.

#### V.5.1. Indices de saturation vis-à-vis des phases minérales

Les indices de saturation permettent de savoir ou de connaître le degré de saturation des eaux par rapport au minéraux présents, ou ceux susceptibles de se précipiter dans l'aquifère (Plummer et al., 1976 ; Foucault et Raoult, 1980 ; Atteia, 2015).

L'état de saturation d'une solution donnée par rapport à un minéral est exprimé par l'indice de saturation  $I_s$

$I_s = \log( PAI / K_s )$  avec PAI : le produit d'activité ionique des ions concernés et  $K_s$  : la constante d'équilibre. Si :

- $PAI = K_s$  alors  $I_s = 0$  : l'eau est dite saturée vis-à-vis du minéral considéré ;
- $PAI < K_s$  alors  $I_s < 0$  : l'eau est dite sous saturée vis-à-vis du minéral considéré ;
- $PAI > K_s$  alors  $I_s > 0$  : l'eau est dite sur saturée vis-à-vis du minéral considéré.

Néanmoins, la précision du calcul de l'Indice de Saturation est fortement dépendante de la précision des mesures des concentrations ioniques et du pH. Par conséquent, il est recommandé de considérer que le domaine de saturation est obtenu pour des valeurs compris

entre -1 et 1 (Plumber et al., 1976 ; Glynn et Plumber, 2005). La meilleure solution étant de considérer la courbe d'évolution de IS en fonction de la concentration des éléments considérés.

#### **V.5.1.1. Saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés**

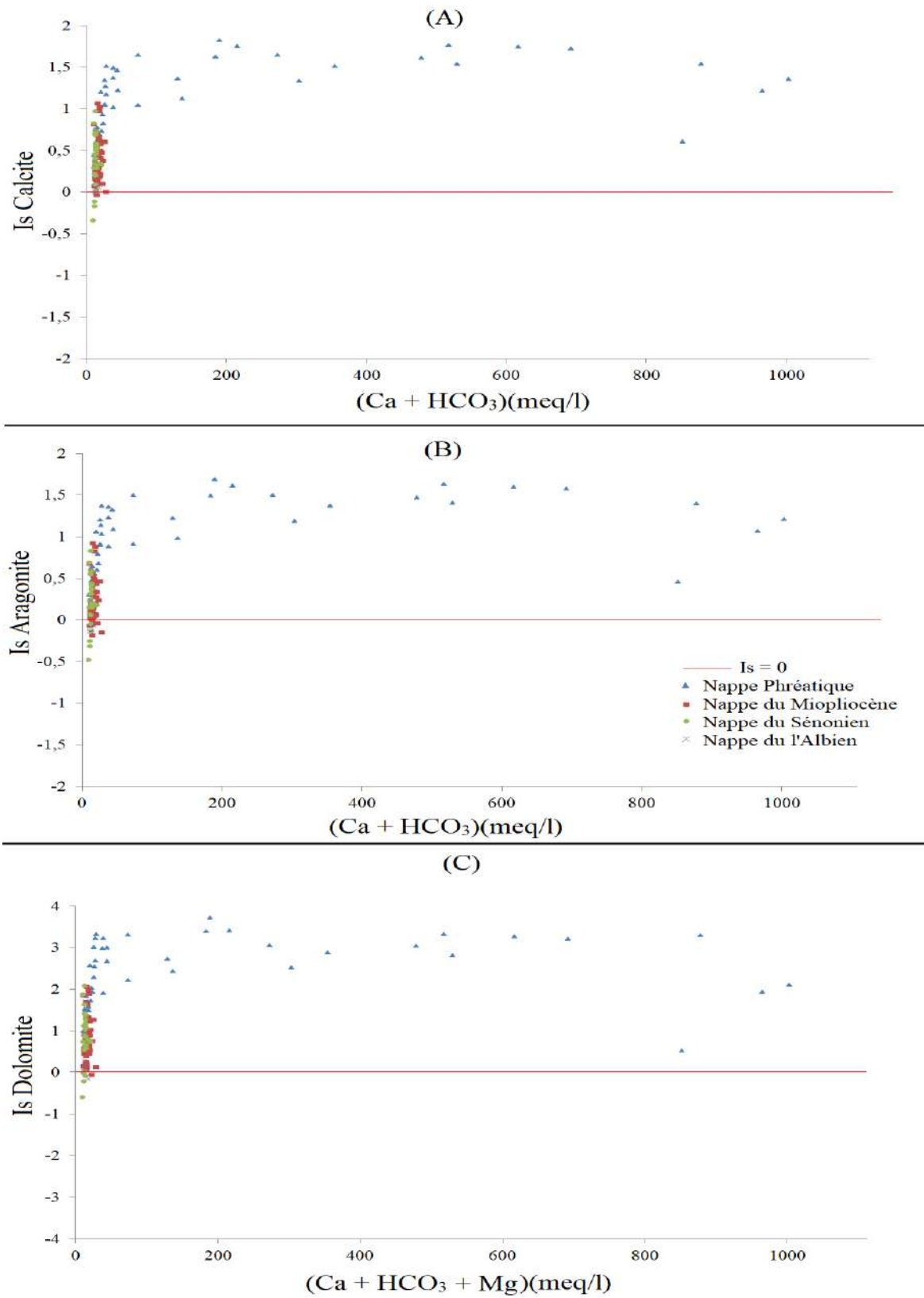
Le calcul des indices de saturation a concerné uniquement les minéraux carbonatés les plus abondant dans les environnements sédimentaires à savoir, la calcite, l'aragonite ( $\text{CaCO}_3$ ) et la dolomite ( $\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$ ).

La saturation vis-à-vis de la calcite est généralisée dans la cuvette (fig. V-20(A)) ; la majorité des échantillons sont sursaturés (indice de saturation supérieur à 0). La dissolution de la calcite est une réaction rapide et l'eau peut atteindre la saturation en traversant la zone non saturée (Appelo, 1993).

Les eaux souterraines de la cuvette montrent des valeurs positives des indices de saturation ( $\text{IS} > 0$ ) vis-à-vis de l'aragonite (fig. V-20(B)), Ces indices, dans l'ensemble, varient entre 0 et 1.5 reflétant un état de saturation ou sursaturation vis à- vis de ce minéral.

La grande majorité des échantillons montre des valeurs des indices de saturation vis-à-vis de la dolomite (fig. V-20(C)) qui varient entre 0 et 3,5 indiquant un état de sursaturation des eaux souterraines étudiées vis-à-vis de ce minéral.

La différence entre le degré de déséquilibre entre la calcite et la dolomite est liée à la cinétique de dissolution de ces minéraux. La dissolution de la dolomite est une réaction plus lente (de l'ordre de quelques mois) que celle de la calcite.



**Figure V-20** : Saturation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla vis-à-vis des minéraux carbonatés.

### V.5.1.2. Saturation vis-à-vis des minéraux évaporitiques

Pour les minéraux évaporitiques on a calculé les indices de saturation vis-à-vis de l'halite (NaCl), du gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et de l'anhydrite ( $\text{CaSO}_4$ ).

Tous les échantillons du système aquifère étudié montrent des indices de saturation négatifs ( $IS < 0$ ) vis-à-vis de l'halite (fig. V-21(A)), témoignant d'un état de sous-saturation des eaux souterraines par rapport à ce minéral. Un bon nombre d'échantillons montrent également un état de sous-saturation vis-à-vis l'anhydrite (fig. V-21(B)), et les minéraux sulfatés à savoir, le gypse (fig. V-21(C)), à l'exception les échantillons de la nappe phréatique (P002, P012, P021, P030, P041, P043, P064, P096, P113, P162, P163, PZ12, P165, P423, PL27) situés dans les Sebkhat (Sefioune, Oum Eraneb, Bemendil) et le Chott Ain el Beida montrent une saturation vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite, ce qui est conforme à ces milieux (évaporation intense) (UNESCO, 1972 ; vallès et al., 1997 ; Hamdi-Aissa, 2004 ; Slimani, 2006 ; Slimani, 2016).

La saturation des eaux vis-à-vis des minéraux carbonatés montre qu'une éventuelle dissolution de ces minéraux par les eaux n'est pas possible et ne peut en aucun cas contribuer à l'acquisition de la charge saline des eaux des différentes nappes. Par contre l'état de sous-saturation de ces eaux vis-à-vis des minéraux évaporitiques montre bien qu'elles sont capables de dissoudre les minéraux sulfatés en vue de contribuer à l'augmentation de la minéralisation.

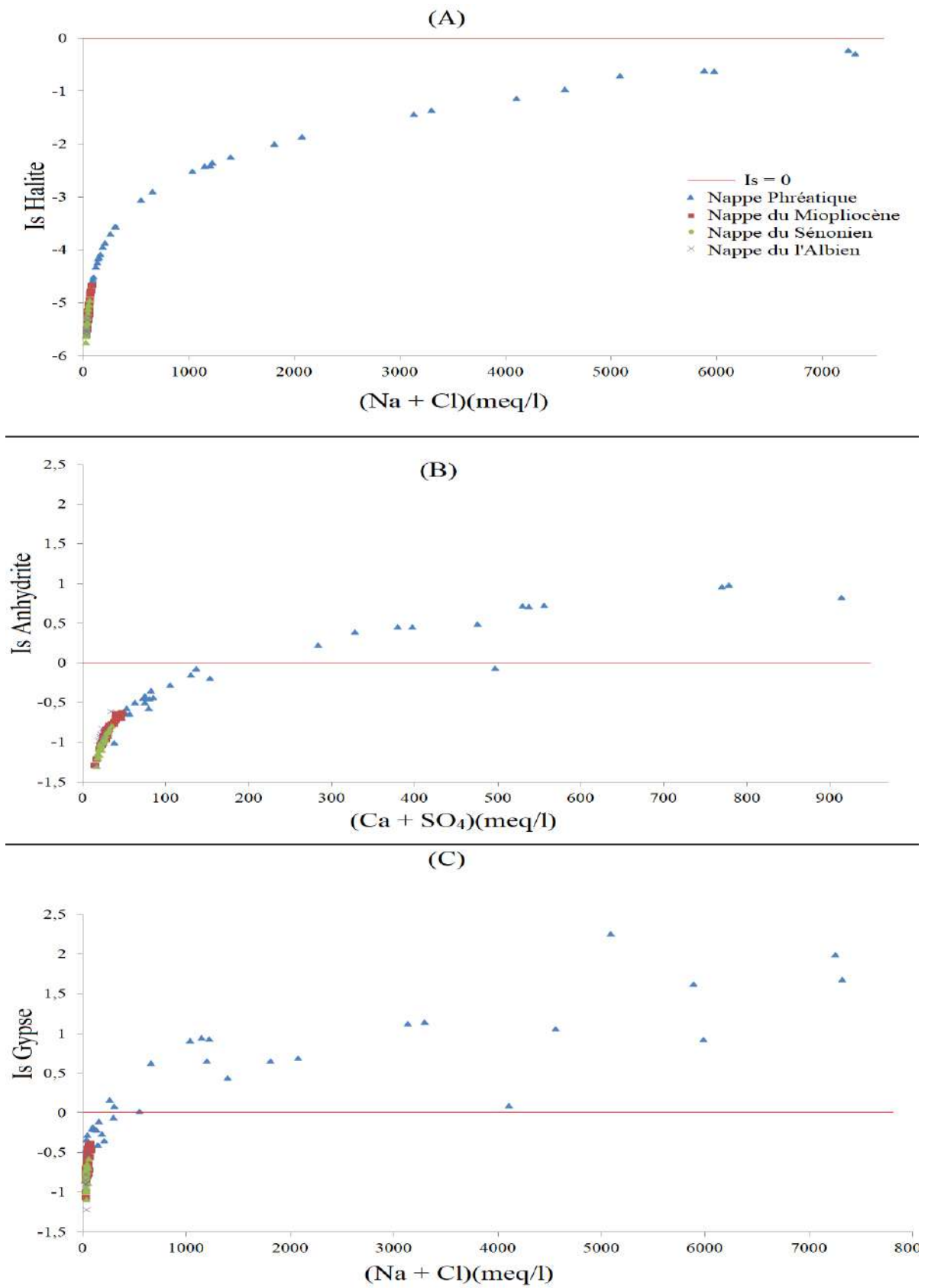


Figure V-21 : Saturation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla vis-à-vis des minéraux évaporitiques.

### V.5.2 Corrélations entre les éléments majeurs

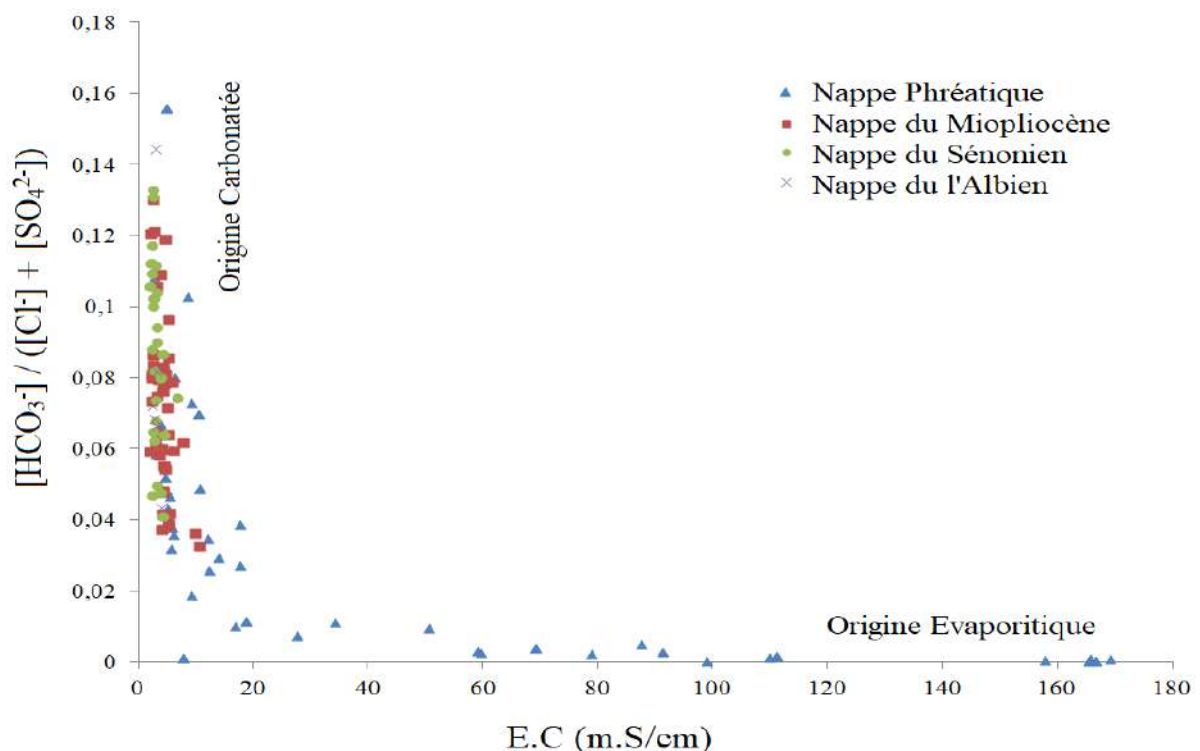
Pour préciser les principaux processus responsables de la minéralisation des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla, et tenter de déterminer l'origine de chaque élément chimique il est nécessaire de réaliser des corrélations entre les différents ions. Parmi ces dernières : la corrélation  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , la corrélation  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}/\text{SO}_4^{2-}$ ...etc.

Remarque : la composition de l'eau de Mer ( $\text{Na}^+ = 459,3$  meq/l ;  $\text{Cl}^- = 535,3$  meq/l ;  $\text{Ca}^{2+} = 10,2$  meq/l ;  $\text{HCO}_3^- = 2,38$  meq/l ;  $\text{SO}_4^{2-} = 23,2$  meq/l) (Stumm et Morgan., 1996).

#### V.5.2.1. La relation $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ – conductivité électrique

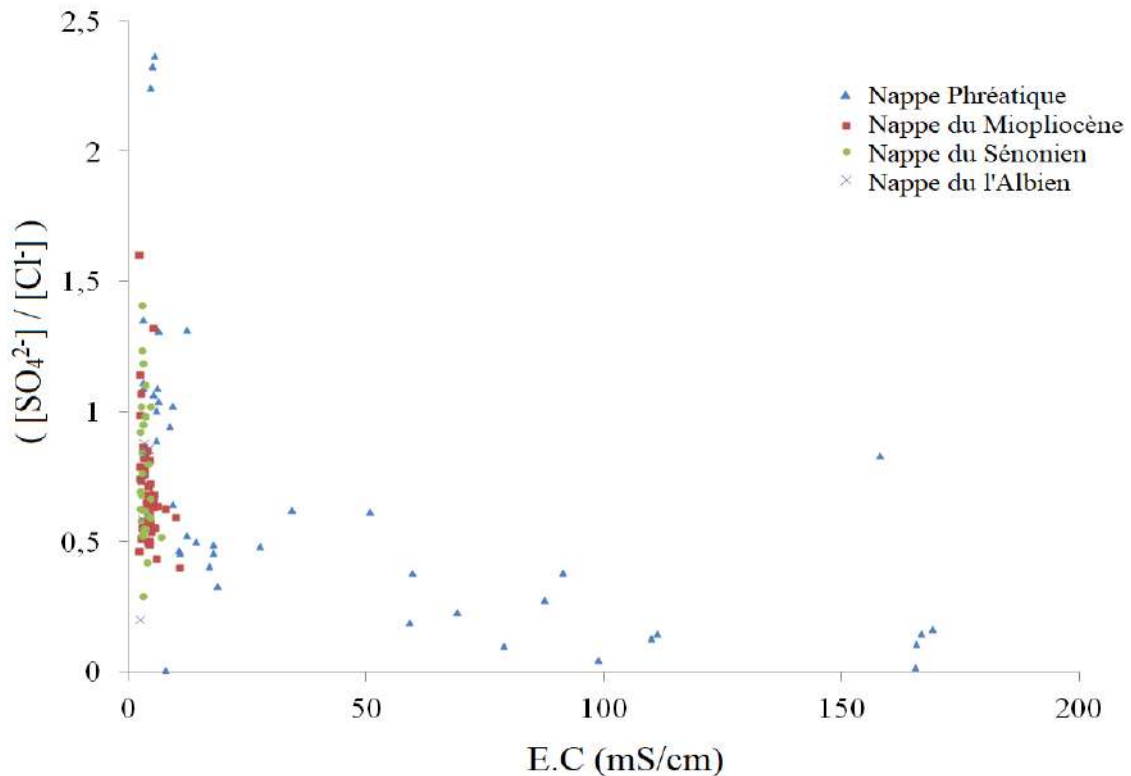
Nous constatons ici une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité, Deux pôles sont observés (fig. V-22) : l'un carbonaté caractérisé par une dominance des ions ( $\text{HCO}_3^-$ ), il englobe les eaux des nappes CI et CT et l'autre représente le pôle évaporitiques qui affirme une dominance des ions Cl et  $\text{SO}_4$ . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités et rassemble la presque totalité des points de la nappe phréatique.

Le changement du faciès carbonaté vers l'évaporite est illustré par la diminution du rapport  $[\text{HCO}_3^-] / [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}]$  (fig. V-22) de 0,16 à 0 et le rapport de  $[\text{SO}_4^{2-}] / [\text{Cl}^-]$  de 1,4 à 0 (fig. V-23) lorsque la salinité augmente.



**Figure V-22 :** Variation du rapporte  $[\text{HCO}_3^-] / [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{2-}]$  – conductivité électrique des eaux de la cuvette de Ouargla.





**Figure V-23 :** Variation du rapporte  $[SO_4^{2-}] / [Cl^-]$  – conductivité électrique des eaux de la cuvette de Ouargla.

#### V.5.2.2. Corrélation $Na^+ / Cl^-$

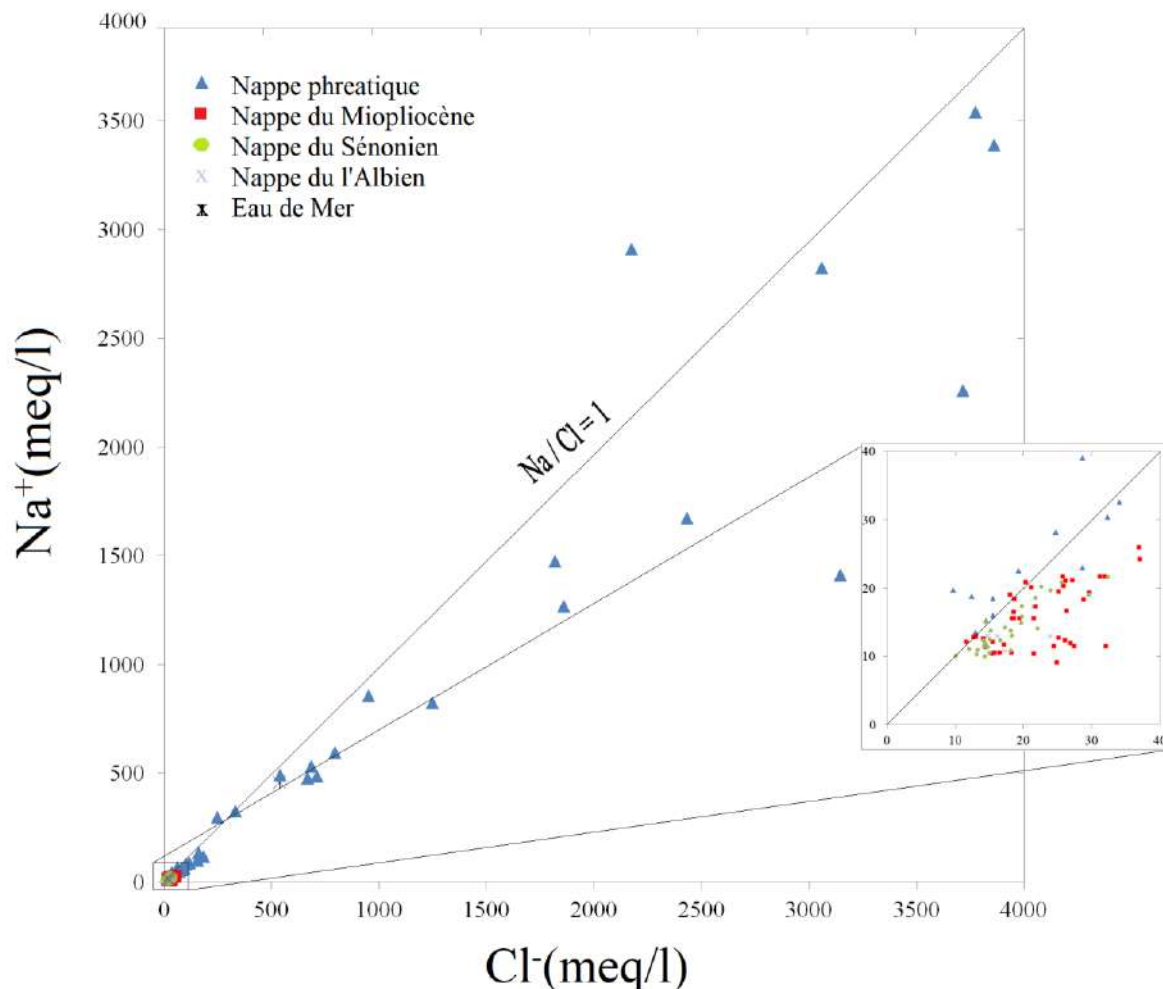
Le chlorure des eaux souterraines peut provenir de trois sources différentes :

- Ancienne eau de mer piégée dans les sédiments ;
- Une solution de la halite et de minéraux associés dans des dépôts par évaporation ;
- Solution de retombées sèches de l'atmosphère, en particulier dans les régions arides (Rosen et Jones, 1998 ; Hadj-Ammar et al., 2014 ; Matias et al., 2014).

L'évolution de Na est étudiée en fonction des teneurs en chlorure, car ce dernier est considéré comme un traceur stable et conservatif des évaporites, très soluble, entrant rarement dans les précipitations salines, n'intervenant pas dans les phénomènes d'oxydoréduction et peu influencé par l'intervention des bactéries. (Eriksson, 1960, 1976 ; Roche, 1973 ; Maliki, 2000 ; Fedrigoni et al., 2001).

La représentation graphique de l'évolution des teneurs en sodium en fonction des concentrations en chlorures (fig. V-24), montre que, la plupart des points reste proche de 1, mais des écarts élevés sont observés : 0,5 à 1,02 pour la nappe Albienne, de 0,6 à 1,4 pour la nappe sénonienne, de 0,6 à 1,2 pour la nappe du Miopliocène et de 0,4 à 2,06 pour la nappe Phréatique.

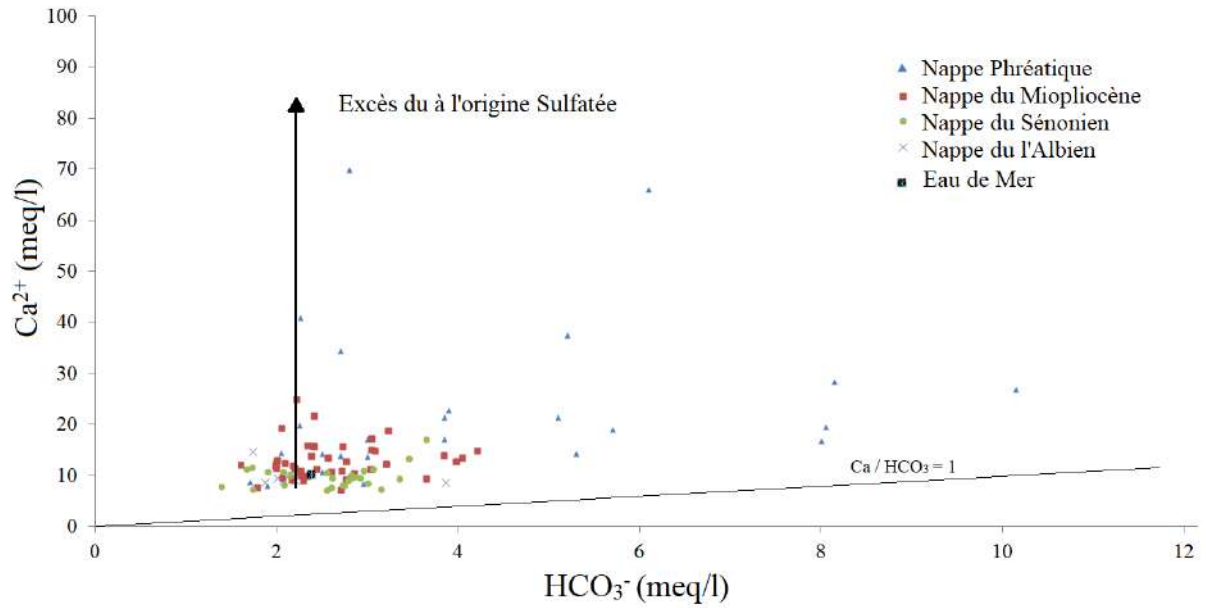
Toutefois, la corrélation entre  $\text{Na}^+$  et  $\text{Cl}^-$  ( $r = 0,9$ ) indique, une distribution dans un modèle linéaire autour de la droite de pente. Ce qui confirme que la dissolution de la halite ( $\text{NaCl}$ ) est le principal processus.



**Figure V-24 :** *Corrélation  $[\text{Na}^+]$  vs  $[\text{Cl}^-]$  des eaux de la cuvette de Ouargla.*

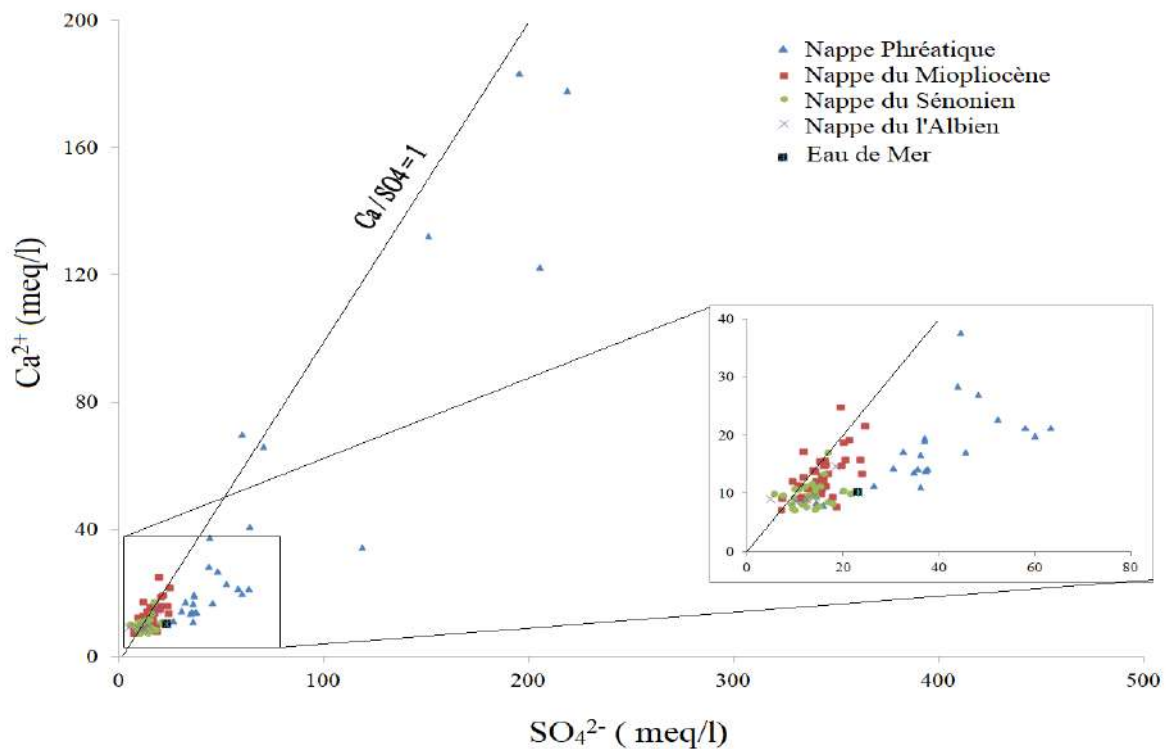
### V.5.2.3. Corrélation $\text{Ca}^{2+} / \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^-$

La représentation du graphique (fig. V-25), montre que la totalité des échantillons se situent au-dessus de la droite de pente 1 mettant en évidence un excès en Ca, qui a été expliquée la dissolution du sulfate de calcium.



**Figure V-25 :** *Corrélation  $[Ca^{+}]$  vs  $[HCO_3^{-}]$  des eaux de la cuvette de Ouargla.*

La relation entre Ca et les ions de sulfate montrent une bonne corrélation concernant les eaux de CI et CT. Par contre, des grandes valeurs de sulfate observées dans la nappe Phréatique avec  $(Ca^{+}) / (SO_4^{-}) < 1$  peuvent être attribuées à la dissolution du sulfate de sodium (fig. V-26).



**Figure V-26 :** *Corrélation  $[Ca^{+}]$  vs  $[SO_4^{2-}]$  des eaux de la cuvette de Ouargla.*

## V.6. Analyse en Composantes Principales

Dans cette étude, plusieurs analyses en composantes principales ont été effectuées sur les eaux des nappes de la cuvette de Ouargla. Celle-ci se décompose présentement en quatre parties : analyse des eaux de la nappe phréatique, analyse des eaux de la nappe du Complexe Terminal (nappe du Miopliocène et nappe du Sénonien), analyse des eaux de la nappe de l'Albien et une analyse globale des éléments chimiques de toutes les nappes. Le logiciel utilisé est Xlstat premium 2018.2 : <https://www.xlstat.com>.

L'objectif de cette analyse étant de décrire ou de classer les données pour permettre l'interprétation du fonctionnement hydrochimique des aquifères, En effet, l'étude des ressemblances entre les différents échantillons et les liaisons entre les variables permettent de mettre en évidence les associations existant entre les différentes variables et l'existence éventuelle de sous populations. L'ACP a été faite sur 11 paramètres physico-chimiques provenant de l'analyse d'eaux échantillonnées sur l'ensemble de la zone d'étude.

Les éléments statistiques utilisés pour faciliter l'interprétation des résultats sont :

- La matrice de corrélation (tableau 1, 2, 3, 4 et 5 en annexe IV) ;
- Les valeurs propres des facteurs (tableau 6 en annexe IV) ;
- Les vecteurs propres (tableau 6 en annexe IV).

### V.6.1 ACP des eaux de la nappe Albienne

Les pourcentages de variance exprimés par les facteurs F1 et F2 de la nappe Albienne sont respectivement de 50,25 % et de 24,74 %, soit 74,99 % des informations. Les facteurs F3 et F4 expriment respectivement 14,24 % et 10,42 % de la variance. Plusieurs relations entre les éléments chimiques ont été observées, la projection des variables sur le plan factoriel F1xF2 montre l'existence de trois groupes (fig. V-27, fig. V-28) :

- Le facteur 1 deux groupes, Le premier est exprimé par le  $\text{Cl}^-$  et  $\text{Na}^+$  et le second est exprimé par la TDS,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{K}^+$ . la projection des individus montre que cet axe est représenté surtout par les forages de Ziayna et El Khafdji
- Le facteur 2, affiche le troisième groupe exprimé par la température  $T^\circ$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , pH,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NO}_2^-$ . Il est représenté principalement par le forage de Ain el Beida.

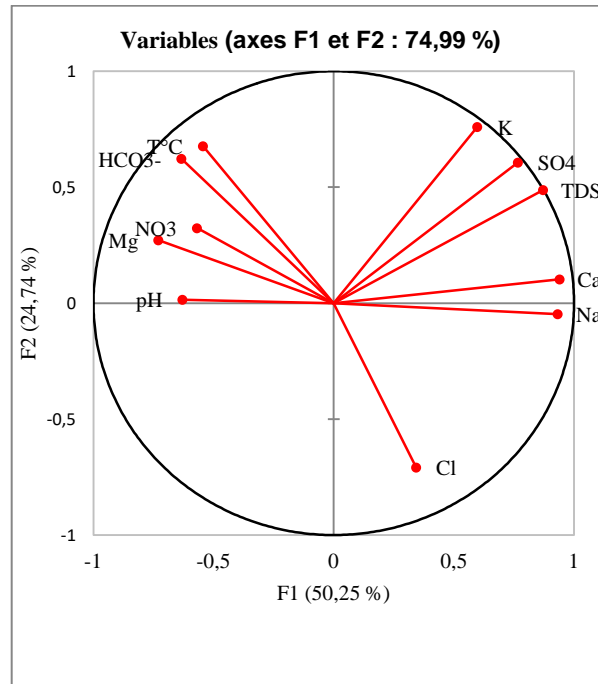


Figure V-27 : Représentation graphique en ACP de la nappe de l’Albien.

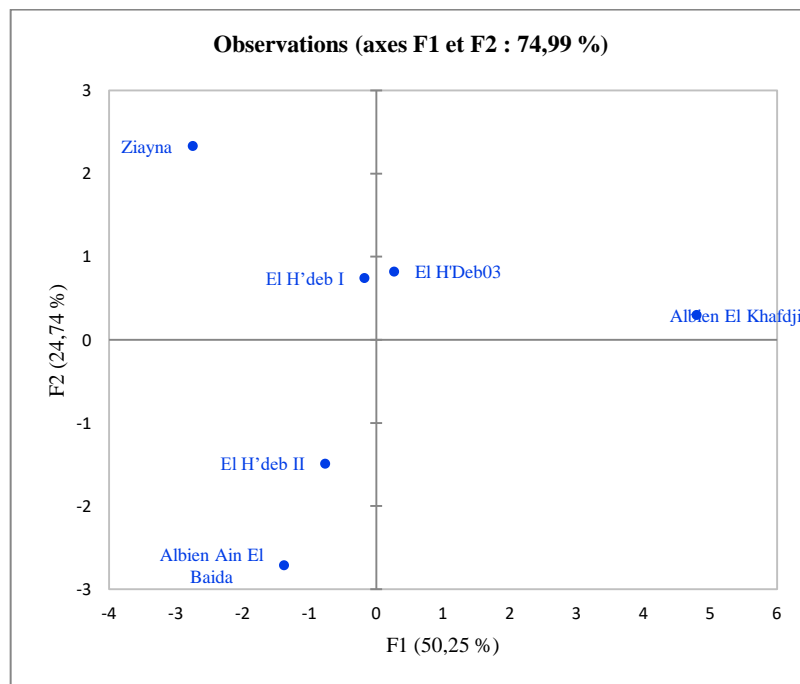


Figure V-28 : Représentation graphique des Individus de la nappe de l’Albien.

**V.6.2. ACP des eaux du la nappe du Sénonien**

Les facteurs F1 et F2 de la nappe du Sénonien expriment respectivement 41,47 % et 18,66 % de la variance soit 60,13 %, l’importance du facteur 3 est de 13,73 % et elle est de 7,96 % pour le facteur 4. La projection des variables sur le plan factoriel F1xF2 montre l’existence de trois groupes (fig. V-29 et fig. V-30) :

- Le premier et le deuxième ensemble se positionnent sur le plan F1, il présente le pôle des évaporites et des carbonates avec une relation positive entre la TDS,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ . Il est représenté par les forages S1, S4, S11, S12, S14, S18, S19, S22
- Le troisième se développe sur plan F2, les valeurs positives ne représentent que la température  $T^\circ$ . La projection des individus montre que ce pôle est lié aux forages de S26, S27.

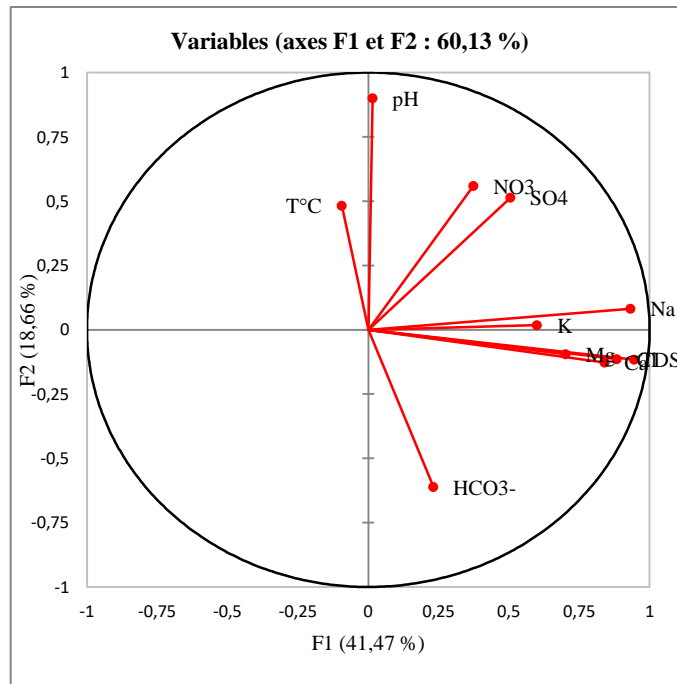


Figure V-29 : Représentation graphique en ACP de la nappe du Sénonien.

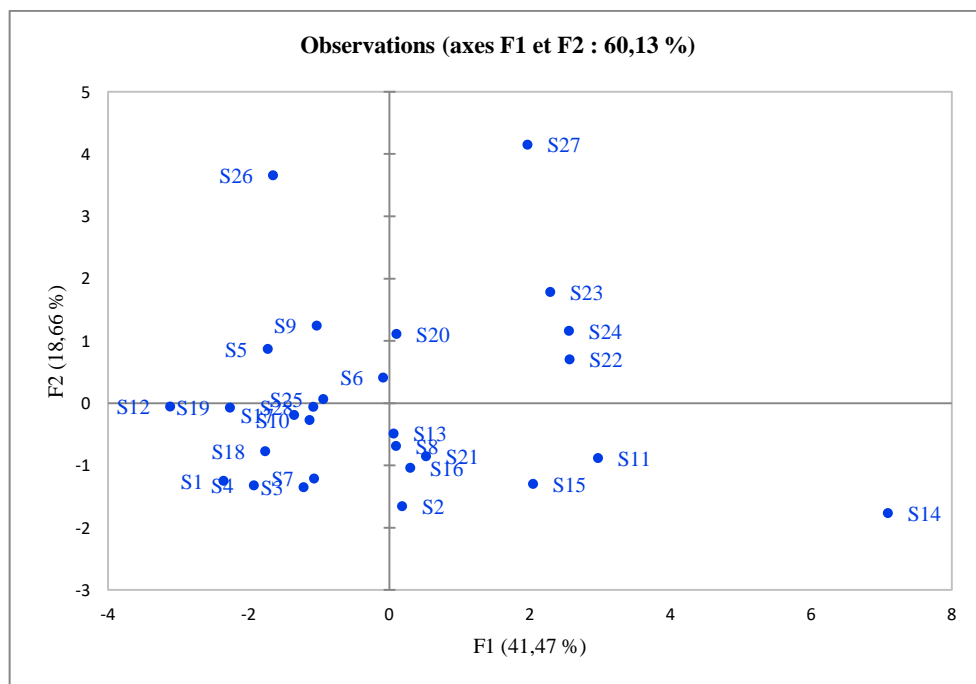


Figure V-30 : Représentation graphique des Individus de nappe du Sénonien.

### V.6.3. ACP des eaux du la nappe du Miopliocène

Les facteurs F1 et F2 de la nappe du Miopliocène sont respectivement de 49,16 % et de 13,68 %, soit 62,84 % des informations. Les facteurs F3 et F4 expriment respectivement 10,03 % et 8,22 % de la variance. Quatre évolutions sont observées sur le plan factoriel F1xF2 (fig. V-31 et fig. V-32) :

- Le facteur 1 présente deux groupes, le premier est exprimé par le  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Cl}^-$ , la TDS,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  et le  $\text{Mg}^{2+}$  expriment le deuxième groupe. Il est représenté par les forages M5, M6, M8, M15, M17, M29, M30 ;
- Le facteur 2, affiche un troisième groupe exprimé par  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{T}^\circ$  et le quatrième exprimé par le pH. Il est représenté principalement par les forages M28, M40, M41.

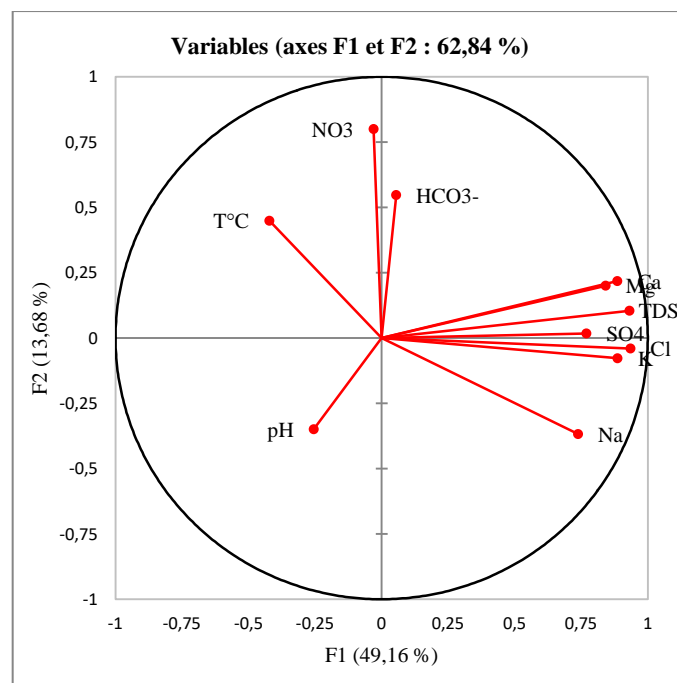


Figure V-31 : Représentation graphique en ACP de la nappe du Miopliocène.

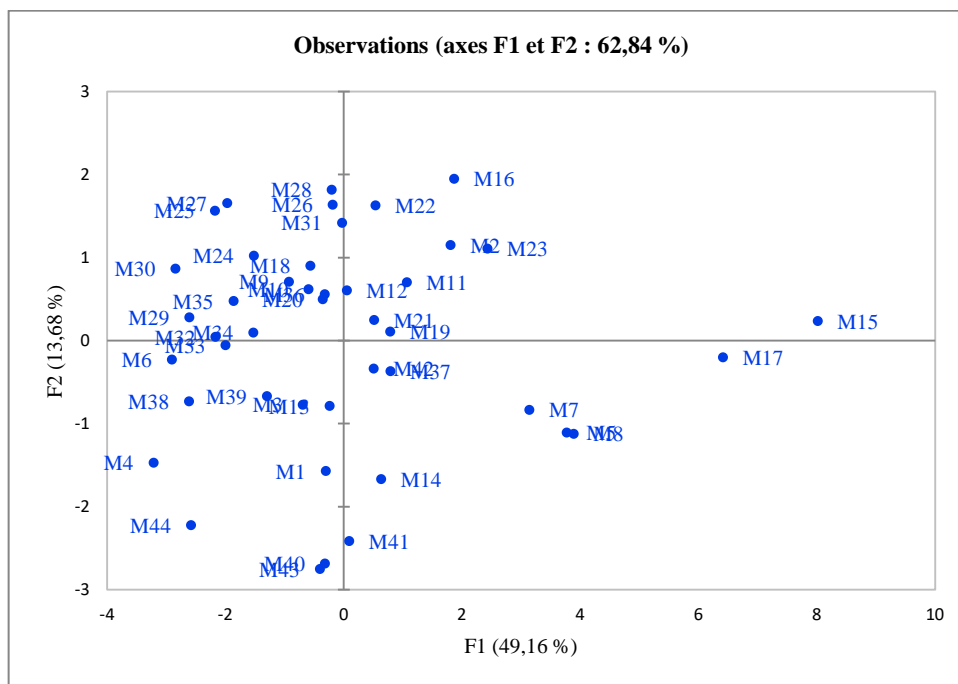


Figure V-32 : Représentation graphique des Individus de nappe du Miopliocène.

#### V.6.4. ACP des eaux de la nappe Phréatique

Les facteurs F1 et F2 de la nappe du Miopliocène sont respectivement de 57,58 % et de 12,32%, soit 69,90 % des informations, les facteurs F3 et F4 expriment respectivement 9,03% et 7,71 % de la variance. La projection des variables sur le plan factoriel F1xF2 montre l'existence de trois groupes (fig. V-33, fig. V-34) :

- Le premier groupe se place sur l'axe F1, il exprime le pôle de la salinité évaporitique de la nappe avec une relation proportionnelle entre les éléments  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et la TDS. Il est représenté principalement par les piézomètres (P162, P566, PLX1, P163, P408, P064, P021, P043, P030 et P416).
- Le deuxième et le troisième se positionnent sur le plan F2, les valeurs positives ne représentent que le  $\text{NO}_3^-$ . La projection des individus montre que ce secteur est lié au piézomètre P422.



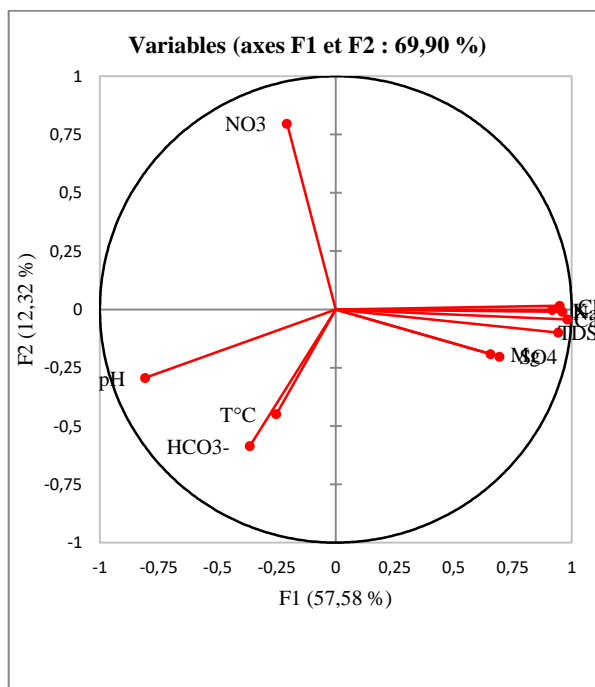


Figure V-33 : Représentation graphique en ACP de la nappe Phréatique.

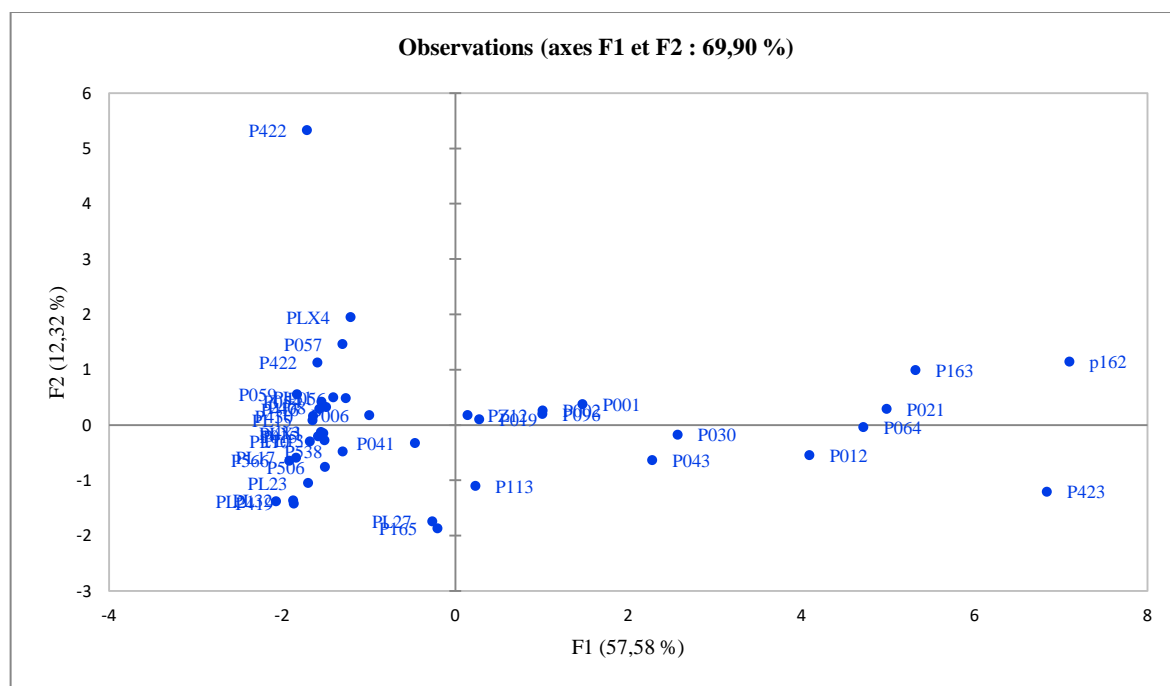


Figure V-34 : Représentation graphique des Individus de nappe Phréatique.

### V.6.5. ACP globale

Cette étude a été réalisée sur les quatre nappes, la projection des variables et des individus a été effectuée sur deux axes, qui représentent 69,83 % de la variance totale. La variable TDS est fortement corrélée du  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et au  $\text{Mg}^{2+}$  (fig. V-35) dans toutes les nappes. La matrice de corrélation montre des valeurs supérieures à 0,8 entre la TDS et par chacune des autres variables. Ce sont ces éléments qui dominent la minéralisation de l'eau.

Cette explication est cohérente d'autant plus que les quatre éléments ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ) ont des teneurs élevées par rapport aux autres. La corrélation est aussi bonne ( $\sim 0,7$ ) entre la TDS et les teneurs en  $\text{K}^+$  et  $\text{Mg}^{2+}$ .

Dans l'espace des individus (fig. V-36), les eaux de tous les nappes sont dans l'ensemble très homogènes.

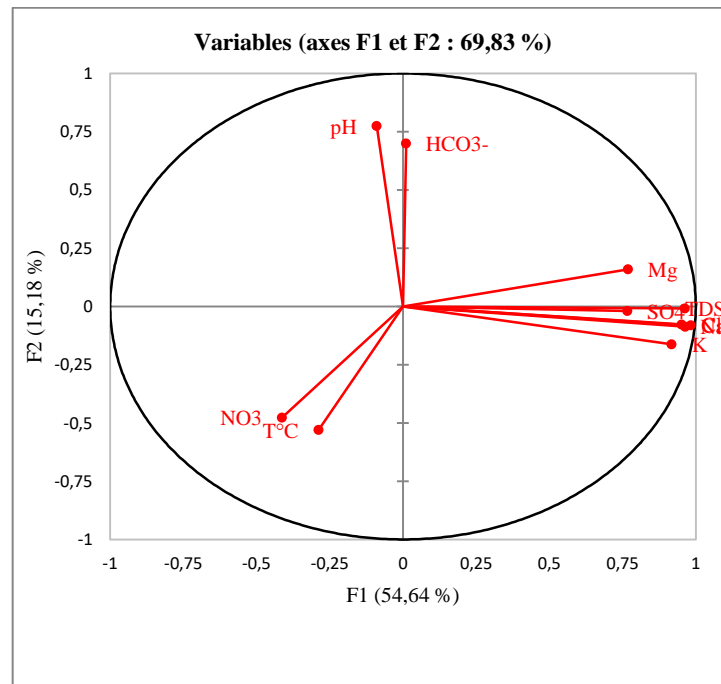


Figure V-35 : Représentation graphique en ACP globale.

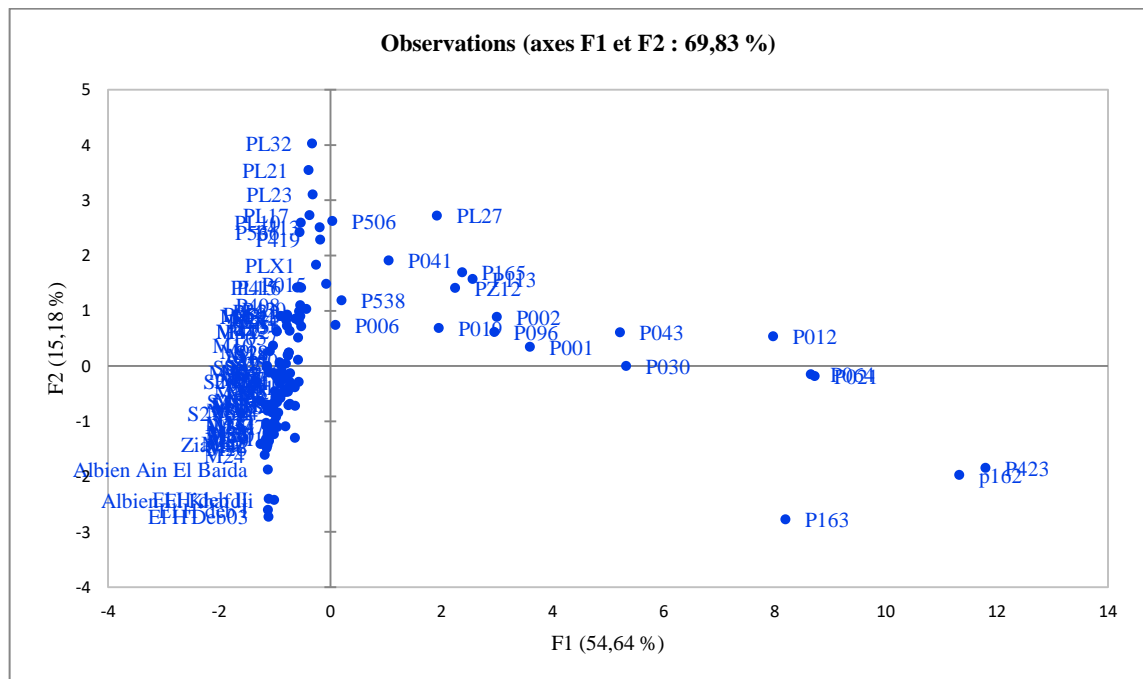


Figure V-36 : Représentation graphique des Individus globale.

### V.7. Conclusion

L'analyse et l'interprétation des données hydrochimiques des eaux des nappes de la cuvette de Ouargla (phréatique, Miopliocène, Sénonien et la nappe Albienne) ont permis d'évaluer la qualité chimique des eaux et de déterminer les processus responsables de la minéralisation.

Les eaux du CI et CT sont relativement chargées (entre 1,5 et 9,1 g/l) et très chargées atteint 141 g/l pour les eaux de la nappe Phréatique. Cette dernière est caractérisée par trois faciès chimiques à savoir chloruré sodique dominant et deux faciès secondaire sulfaté sodique et sulfaté magnésien ; pour la nappe du Miopliocène entre chloruré sodique et calcique et un faciès sulfaté sodique ; la nappe du Sénonien montré caractérise par deux faciès chimique chloruré sodique et sulfaté sodique ; la nappe Albienne présente un faciès chloruré sodique.

L'examen détaillé des diagrammes et des différentes corrélations établis entre les concentrations en éléments majeurs a montré

- un changement progressivement du pôle carbonaté englobe les eaux des nappes CI et CT vers le pôle évaporitique dans les eaux Phréatique ;
- une forte sensibilité des minéraux carbonatés à la précipitation par rapport aux minéraux évaporitiques ;
- la charge saline des eaux souterraines résulte principalement de l'interaction des eaux avec les formations encaissantes et d'une influence non négligeable de l'évaporation, en particulier sur la nappe Phréatique ;

Les variables hydrochimiques résultant de l'analyse des échantillons d'eau ont été décrites à travers l'analyse en composantes principale (ACP). la projection des variables dans les deux principaux axes factoriels (F1×F2), a montré que la chimie de l'eau dans la région est plus affectée par les variables  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , et  $\text{SO}_4^{2-}$  essentiellement.

# CHAPITRE VI

---

## Classification qualitative des eaux

### VI.1. Introduction

La qualité d'une eau est déterminée après avoir connaître quelques conditions inévitables à savoir, elle dépend de la présence des polluants dans l'eau ainsi que leurs qualités, de facteurs physiques et chimiques comme la conductivité électrique et le pH et de la quantité des sels présente dans cette eau et la présence ou non des engrais.

Ces derniers facteurs sont très influencés par des causes d'ordre anthropique, car les êtres humains rejettent leurs déchets dans l'eau, ce qui nuire à leur qualité par l'ajout des polluants et des substances qui peuvent êtres toxiques, et ne sont pas présents naturellement dans l'eau.

On entend par eau salée, une eau contient une certaine quantité de sels. Cette salinité est exprimée par une conductivité électrique élevée et un goût saumâtre de l'eau quand on la. Donc cette eau salée n'est pas considérée comme eau potable, car les quantités excessives de sels dans l'eau de consommation drainent l'eau hors du corps humain et elles peuvent causée la déshydratation.

Pour une eau douce, il est faut que le pourcentage de la concentration en sels dissous soit inférieure à 1%. A peine 2,5% de l'eau disponible dans le monde est de l'eau douce. Les zones constituantes de l'eau douce sont souvent menacées par l'ajout permanent de matières organiques, de nutriments inorganiques et de polluants car elles sont habituellement proche des terres.

Afin de déterminer la qualité des eaux prélevées au laboratoire, il est impératif de vérifier est qu'elles répondent aux normes de la qualité des eaux par la détermination de certains facteurs.

Des grandes quantités d'eau sont utilisées quotidiennement pour différentes raisons domestiques (faire de vaisselle, douche, cuisinier...etc.), agricoles (arrosages et irrigation...etc) et industrielles.

La destination d'une eau est déterminée après avoir connaître la qualité de cette eau vis-à-vis des normes demandées par les utilisateurs. Ces normes doit impérativement répondre aux critères de potabilité données par l'OMS. Tandis qu'à l'irrigation, l'exigence est relativement moindre, elle est basée particulièrement sur la salinité et la texture du sol.

### VI.2. Qualité des eaux destinées à la consommation humaine

Une eau est caractérisée par certains paramètres accessibles à l'analyse. Tous ces derniers constituent la minéralisation de l'eau dont l'importance dépend principalement de la nature géologique des terrains traversés.

Selon la classification de la législation Algérienne, on distingue :

- **Les paramètres physico-chimiques :**

la température, la conductivité électrique, le calcium, le magnésium, le pH, le sodium, le potassium, les chlorures, les sulfates, la dureté totale, les silices, le résidu sec à 180 °C.

L'excès de certains sels (Chlorure de sodium ou de magnésium) dans l'eau peut lui rendre désagréable à la consommation humaine, comme il peut même engendrer des désordres physiologiques (Sulfate de Magnésium laxatif, propriété de certaines eaux minérales). Pour cela la réglementation fixe des limites de concentration pour ces ions (Tableau V-1).

- **Les substances indésirables :** dans cette rubrique, on classe : nitrates, nitrites, ammonium, , phosphore.

**Tableau VI-1 :** Normes Algérienne de potabilité des eaux (Journal officiel, 2011).

Paramètres	Valeurs limites
pH	$\geq 6,5$ et $\leq 9$
Conductivité $\mu\text{S}/\text{cm}$	2800
Résidu sec $\text{mg}/\text{l}$	1500
Dureté $\text{mg}/\text{l}$ en $\text{CaCO}_3$	200
Calcium ( $\text{Ca}^{+2}$ ) $\text{mg}/\text{l}$	200
Magnésium ( $\text{Mg}^+$ ) $\text{mg}/\text{l}$	150
Sodium ( $\text{Na}^+$ ) $\text{mg}/\text{l}$	200
Potassium ( $\text{K}^+$ ) $\text{mg}/\text{l}$	12
Chlorures ( $\text{Cl}$ ) $\text{mg}/\text{l}$	500
Sulfates ( $\text{SO}_4^{-2}$ ) $\text{mg}/\text{l}$	400
Nitrates ( $\text{NO}_3^{-2}$ ) $\text{mg}/\text{l}$	50
Nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ) $\text{mg}/\text{l}$	0,2
Ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) $\text{mg}/\text{l}$	0,5
Phosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) $\text{mg}/\text{l}$	5

Afin d'évaluer et représenter la qualité de différentes types d'eaux présentes dans la cuvette de Ouargla, nous avons utilisé des histogrammes pour toutes les nappes concernées. La ligne limite des normes Algérienne, facilite l'interprétation de ces histogrammes.

### VI.2.1. La nappe phréatique

#### VI.2.1.1. Les éléments mesurés in-situ

La salinité exprimée par la conductivité électrique (CE) et le pH sont des paramètres facilement mesurables et indispensables pour déterminer la qualité des eaux phréatiques.

D'après les résultats obtenus (Fig.VI-1), nous avons trouvé que les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla ne dépassent pas les normes de potabilité vis-à-vis de pH. Par contre, elles sont très salées et loin de satisfaire les besoins en eaux de consommation pour l'être humain.

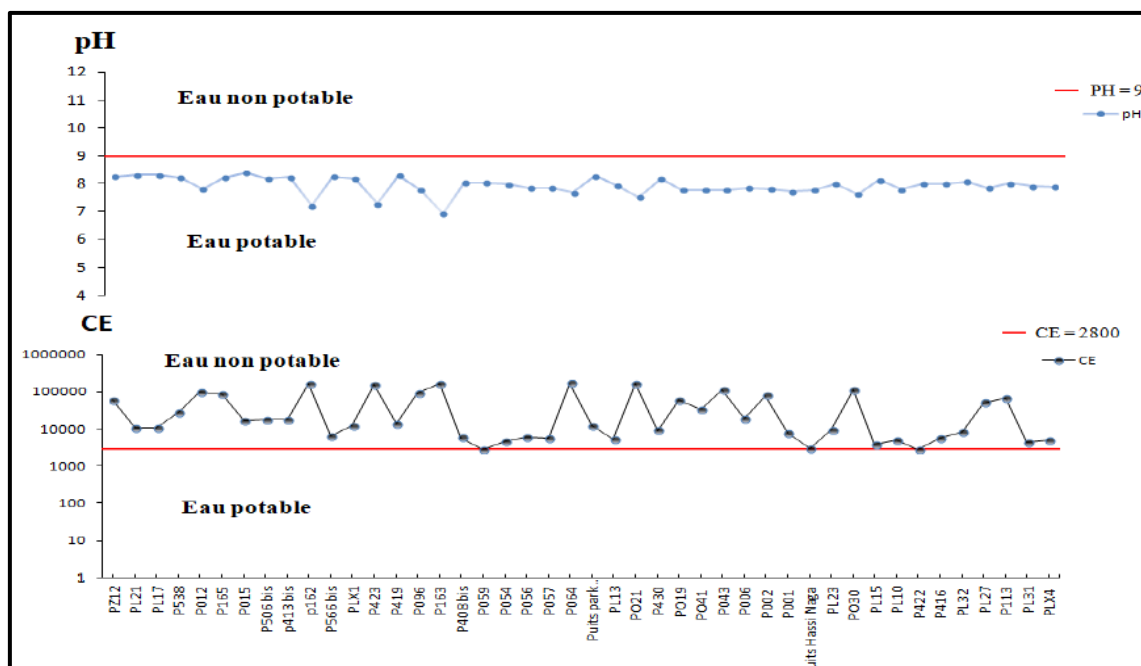


Figure VI-1 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe Phréatique.

### VI.2.1.2. Les anions

Concernant la nappe phréatique (fig. VI-2) nous avons observé que les chlorures ont des concentrations très élevées qui varient entre 335 et 135000 mg/l, ce qui dépasse les normes algériennes estimées à (500mg/l).

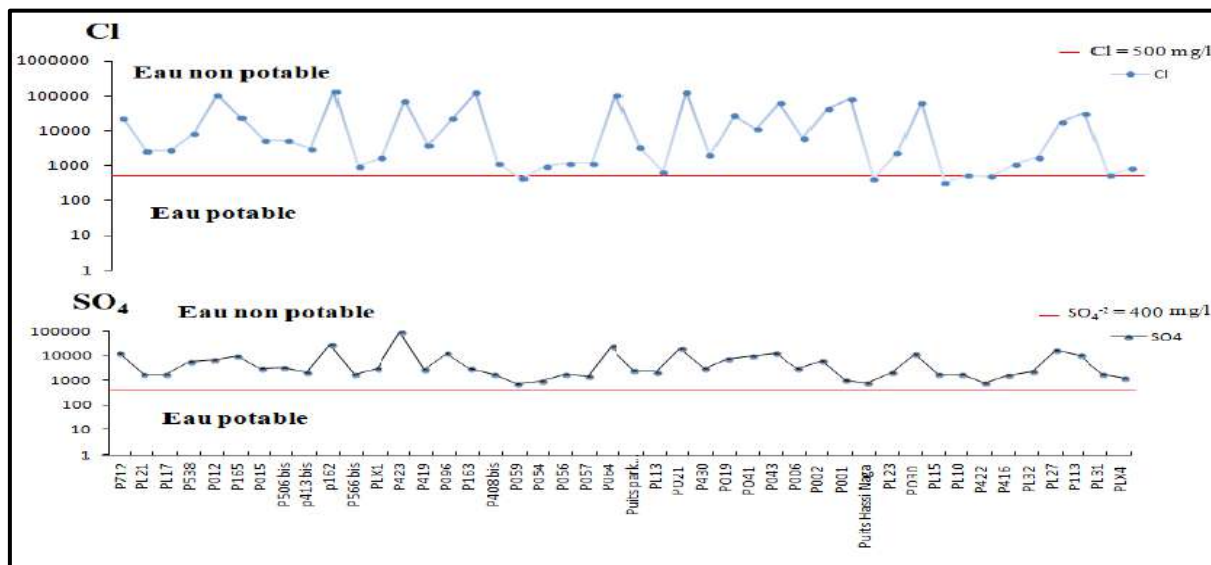


Figure VI-2 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe Phréatique.

### VI.2.1.3. Les cations

Dans les eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla (fig. VI-3), les teneurs en calcium sont compris entre 160 mg/l au piézomètre P422 et 20000 mg/l au piézomètre P423. Toutes les concentrations en ion  $Ca^{+2}$  dépassent la norme autorisée soit (200mg/l), à l'exception des piézomètres P059, Puits Hassi naga, P422 Ain djemel. Les valeurs de magnésium obtenues

varient entre 57,6 mg/l au puits Hassi naga et 8600 mg/l au niveau du piézomètre P012. Nous ne constatons que toutes les valeurs dépassent la norme soit (150mg/l), à l'exception P059, puits Hassi naga, P422 Ain djemel, et Plx Hassi chega. Le sodium est trop élevé et dépasse la ligne de potabilité (400 mg/l). Le potassium aussi dépasse les normes, supérieures à (20mg/l). Les graphiques (fig. VI-3), montrent que les dépressions et chott sont les plus chargées en sels.

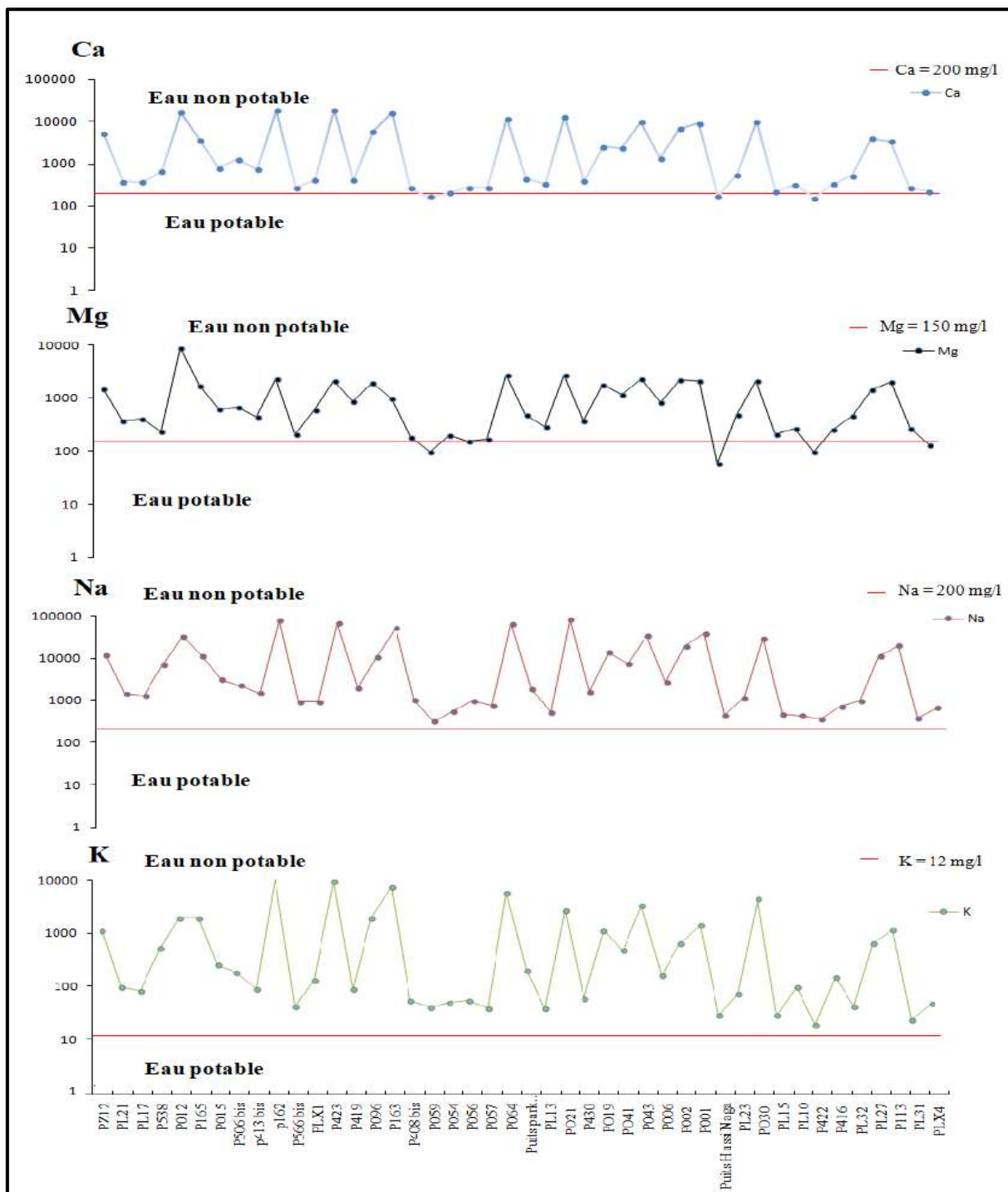


Figure VI-3 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe Phréatique.



VI.2.1.4. Les paramètres de pollution

Les paramètres de pollution étudiés dans la présente étude sont : les nitrates ( $\text{NO}_3^{-2}$ ), les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ ), les phosphates ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) et l'ammoniac ( $\text{NH}_4^+$ ). Les résultats obtenus montrent que ces derniers ont des concentrations différentes et variables dans chaque nappe, l'évolution de ces paramètres est présentée sous forme d'histogrammes de la variation des nutriments ( $\text{NO}_3^{-2}$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{-3}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), toujours avec l'utilisation de la ligne des normes algériennes comme référence.

Pour la nappe phréatique, presque tous les nutriments (fig.VI-4) sont situés dans la marge des normes algériennes de potabilité des eaux, notamment les phosphates, par contre les nitrates montrent cinq piézomètres (P021, P002, P001, P030, P113) dont leurs valeurs de nitrates ne sont pas dans les normes. Concernant les nitrites nous avons trouvé que deux piézomètres (P422, PL31) ne sont pas dans les normes.

La forte concentration de nitrates apparaît surtout dans les secteurs ou le type de sol est très perméable associé à une faible profondeur de la nappe et à une forte recharge.

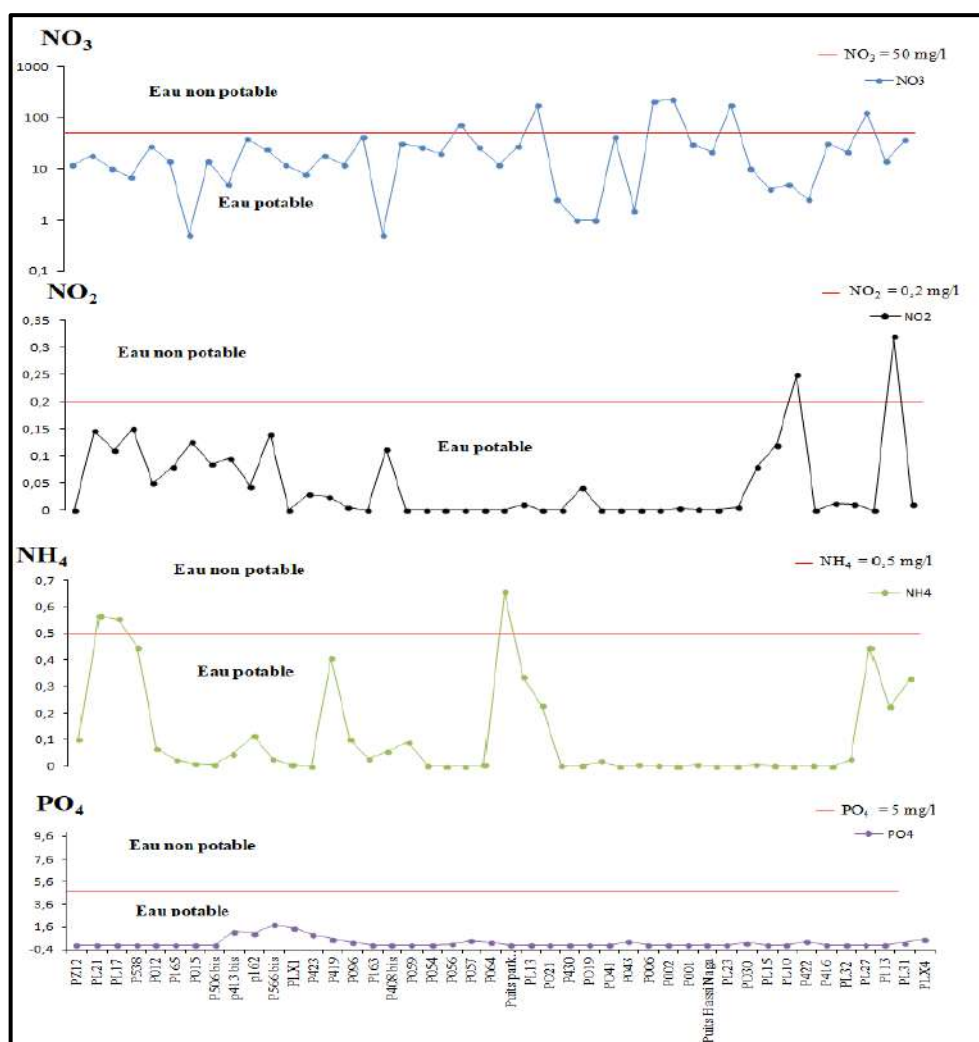


Figure VI-4 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments pour la nappe Phréatique.

VI.2.2. La nappe du Miopliocène

VI.2.2.1. Les éléments mesurés in-situ

Dans cette nappe du Miopliocène (fig.VI-5) on remarque que les eaux ne dépassent pas les normes de potabilité vis-à-vis le pH, par contre on remarque que les valeurs de la conductivité sont élevées, et dépassent les normes algériennes soit 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

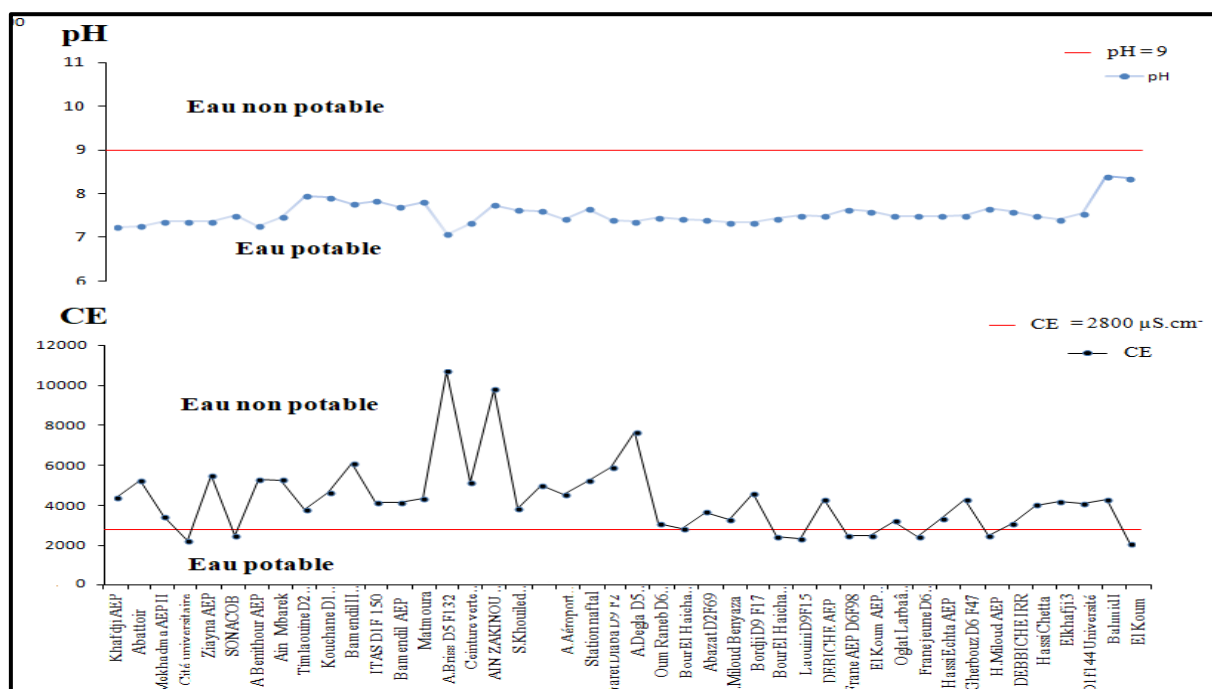


Figure VI-5 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe du Miopliocène.

VI.2.2.2. Les anions

Les concentrations en chlorures présentent des valeurs importantes allant de 405 mg/l au forage (El Koum) et 1701 mg/l au forage (A.Briss D5 F132), globalement elles dépassent la ligne de potabilité. Les valeurs de sulfates sont trop élevées, dont elles dépassent 400 mg/l. Par contre, les bicarbonates présentent des valeurs inférieures à 400 mg/l. (fig. IV-6).

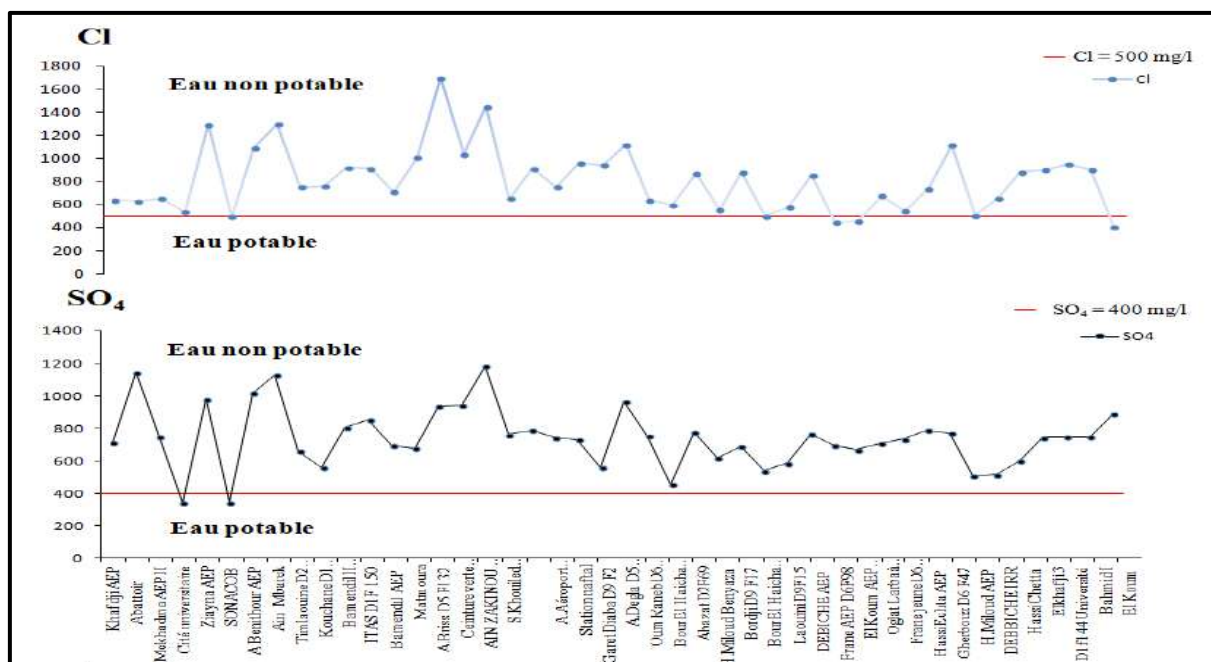


Figure VI-6 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe du Miopliocène.

### VI.2.2.3. Les cations

Dans la nappe du Miopliocène (fig. VI-7) les valeurs de calcium sont élevées, elles sont comprises entre 142,64 et 497 mg/l, sept (07) forages (Cité universitaire, SONACOB, ITAS D1F 150, Bour El Haicha D1F134, Laouini D9F15, El Koum AEP D6F40, H.Miloud AEP ), présentent des valeurs conformes aux normes. Le magnésium a des valeurs généralement faibles avec une moyenne de 131,46 mg/l, sauf en ce qui concerne les quatre forages (Bamendil II D7F7, A.Briss D5 F132, AIN ZAKINOU D5F44, A.Degla D5 F117) qui présentent des concentrations en  $mg^{+2}$  élevées et dépassent les normes Algérienne autorisées. Le potassium et le sodium sont trop élevés et dépassent la ligne de potabilité.

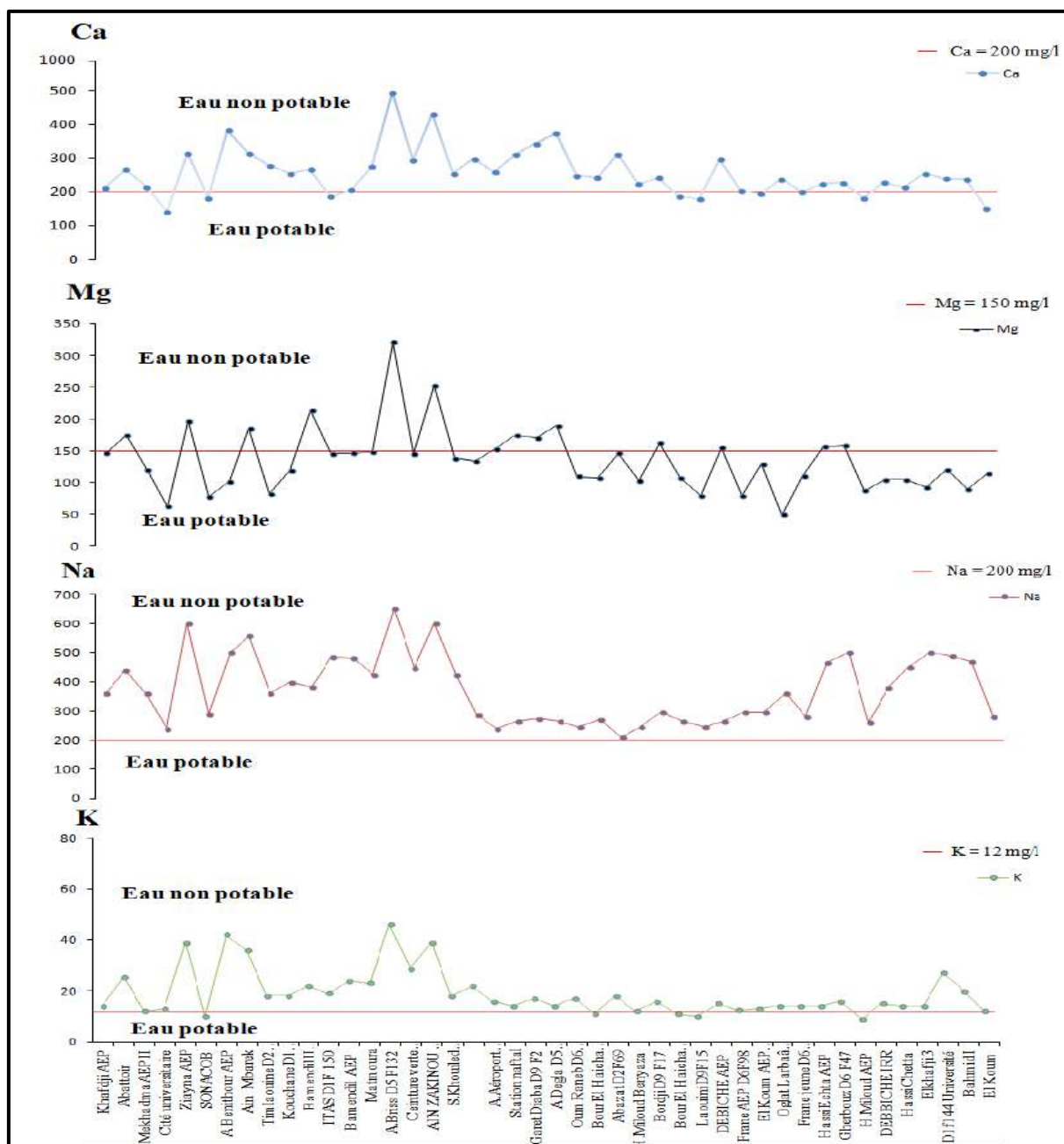


Figure VI-7 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe du Miopliocène.

#### VI.2.2.4. Les paramètres de pollution

Tous les paramètres étudiés dans cette nappe (fig. VI-8) sont situés dans les normes de potabilité, les nitrates présentent de faibles concentrations atteignent 41,5 mg/l, inférieur à la valeur limite dans les normes algériennes soit 50 mg/l mais reste une valeur importante. Les nitrites et les phosphates sont presque nuls.

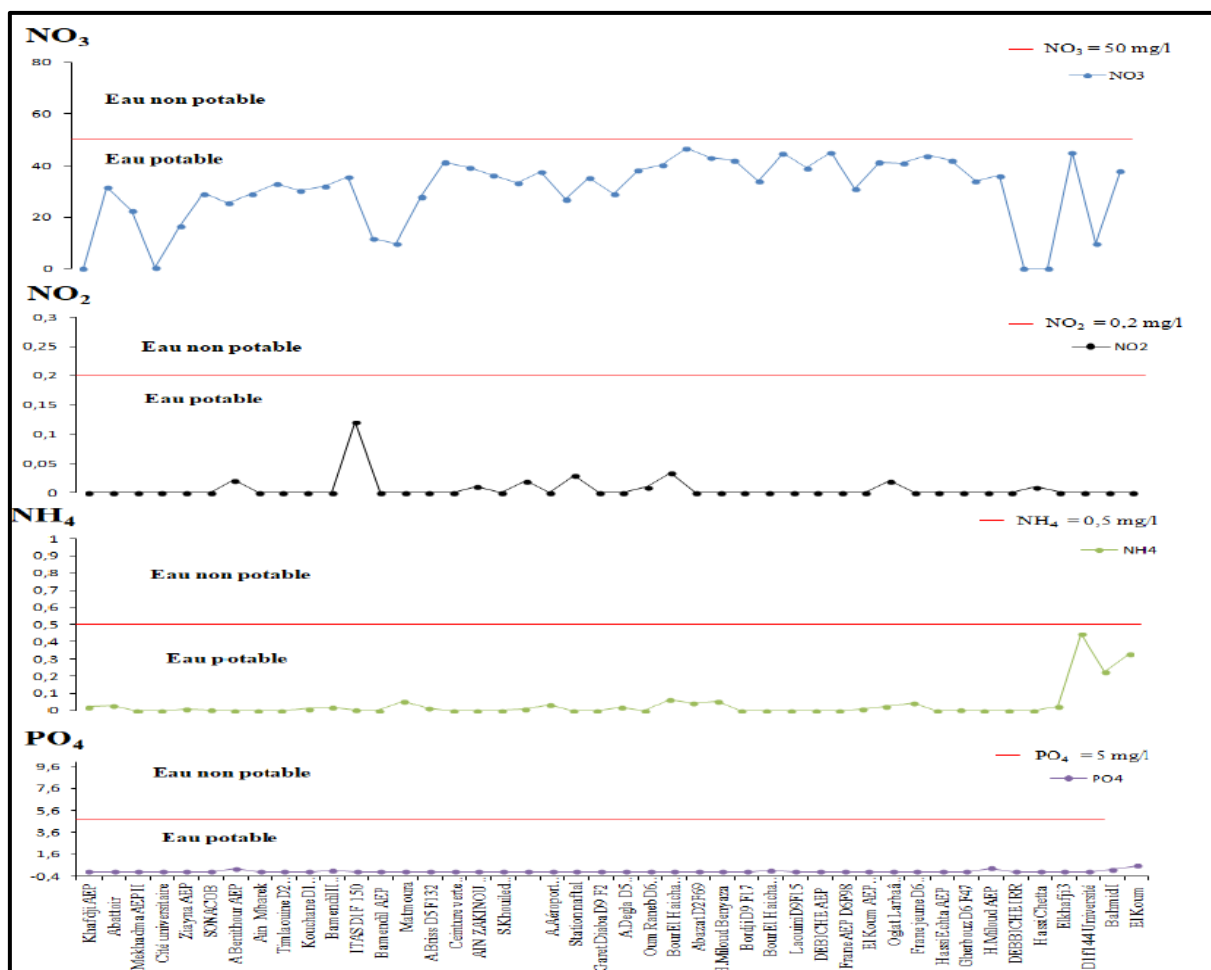


Figure VI-8 : Qualité de l'eau vis-à-vis les nutriments pour la nappe du Miopliocène.

### VI.2.3. La nappe du Sénonien

#### VI.2.3.1. Les éléments mesurés in-situ

Les valeurs de la conductivité dans cette nappe du Sénonien (fig.VI-9) présente des faibles valeurs en comparaison avec les autres nappes, les valeurs de pH ne dépassent pas les normes de potabilité.

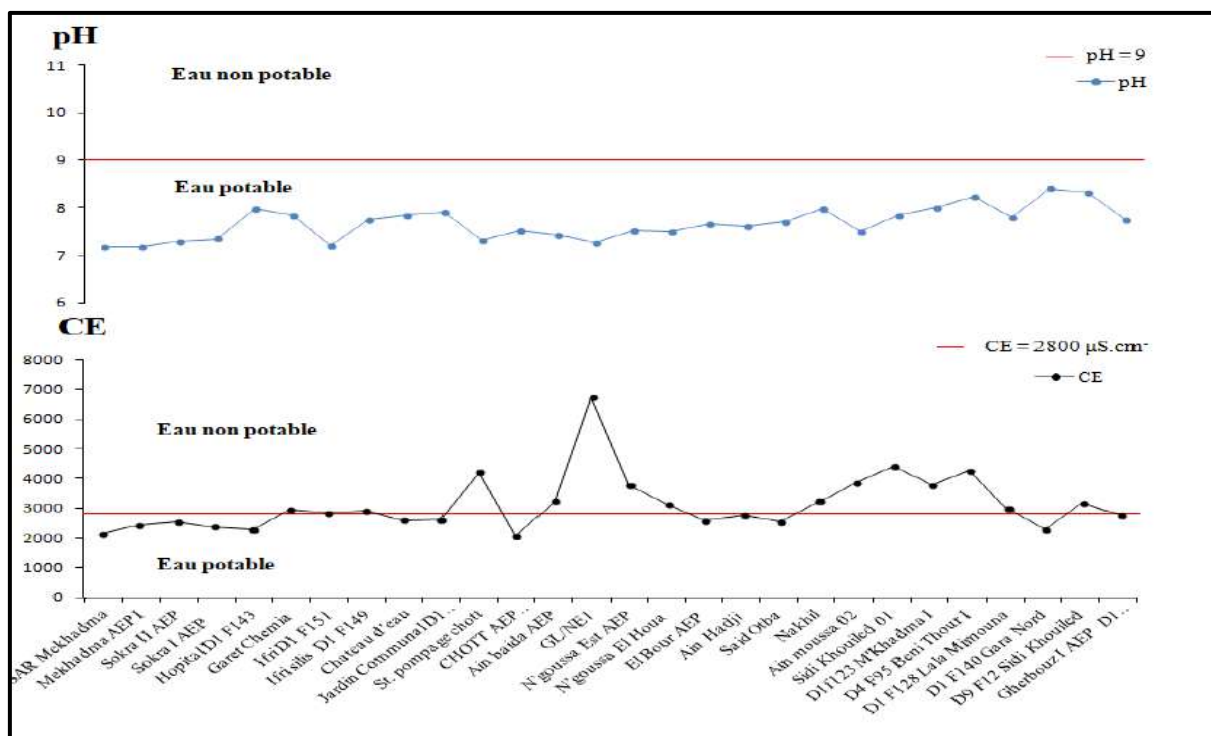


Figure VI-9 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe du Sénonien.

### VI.2.3.2. Les anions

Pour la nappe du Sénonien (fig. IV-10), les concentrations en chlorures sont élevées sauf en ce qui concerne les forages (Cité universitaire, ITAS D1F 150, AIN ZAKINOU D5F44, S.Khouiled Daira D9 F5, S. Khouiled Palmeraie D9, Bordji D9 F17). Les sulfates sont trop élevées allant jusqu'au 1025 mg/l (D9 F12 Sidi Khouiled).

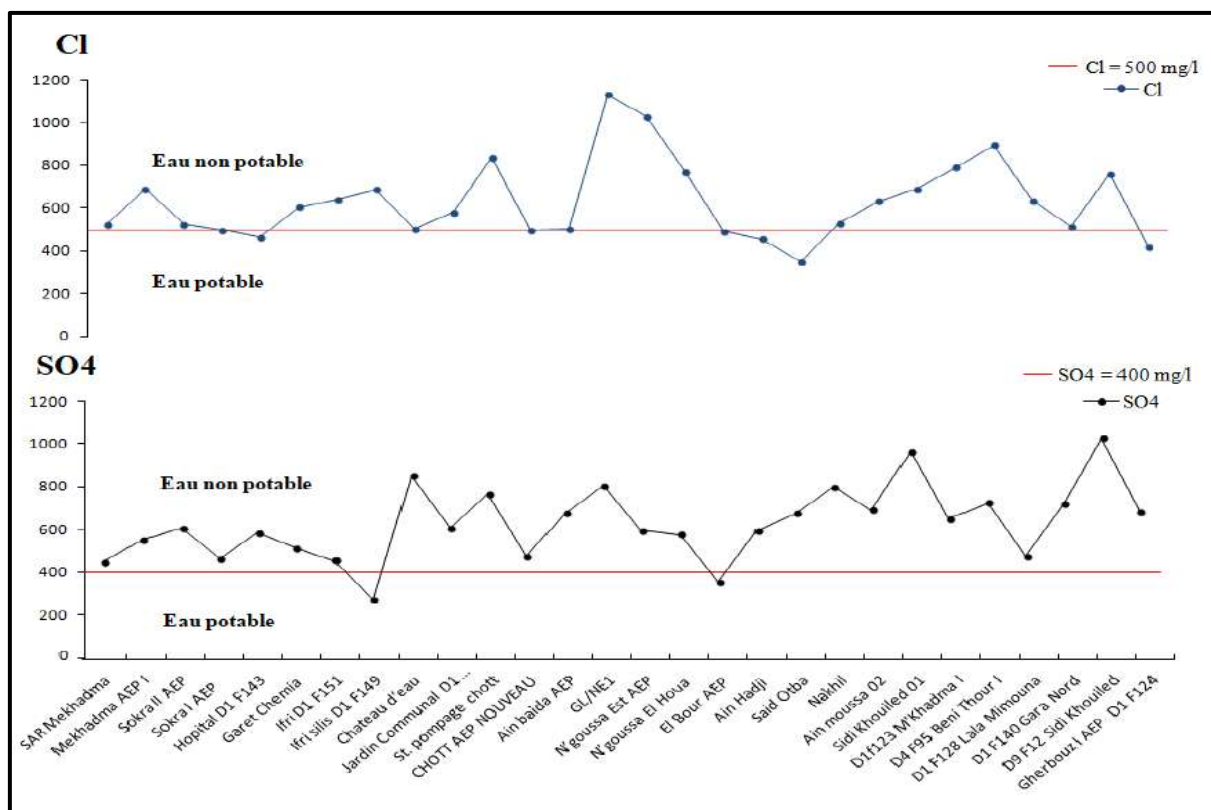


Figure VI-10 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe du Sénonien.

### VI.2.3.3. Les cations

Nous remarquons que les valeurs de calcium varient entre 142,67mg/L au forage (chott AEP) et 340,68 mg/l au forage (GL/NE). La majorité des valeurs enregistrées respectent les normes. Le magnésium présente des valeurs moyennes comprises entre 63,87 et 182,25 mg/l, dans la majorité confirmant les normes. Le potassium varie entre 11 mg/l dans le forage (SAR Mekhadma) et 29 mg/l dans le forage (GL/NE1). Nous signalons que tous les points d'eau dépassent la norme de potabilité concernant le sodium (200mg/L) (fig. IV-11).



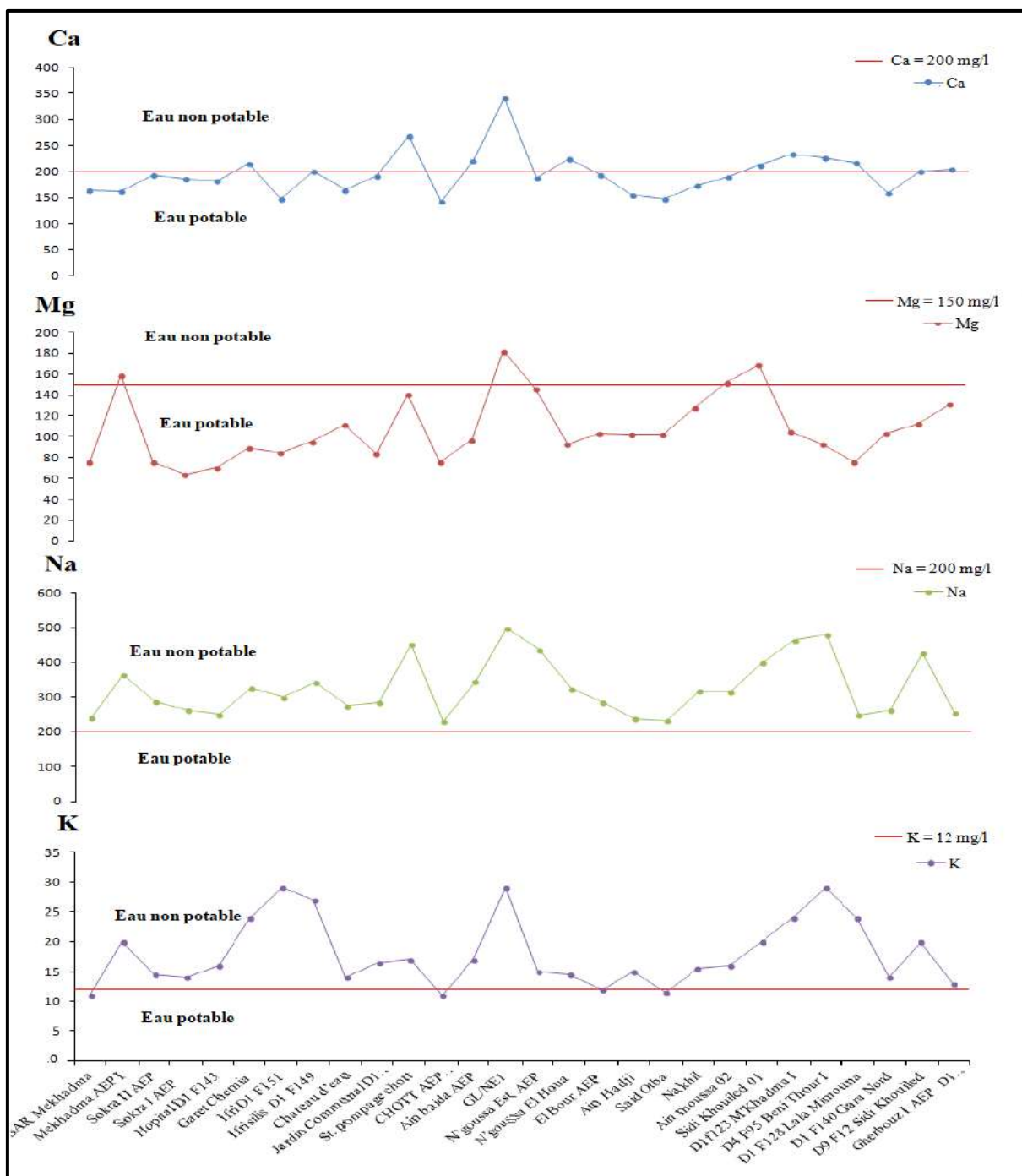


Figure VI-11 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe du Sénonien.

VI.2.3.4. Les paramètres de pollution

Tous les paramètres étudiés dans cette nappe (fig. VI-12) sont inférieurs à la ligne de potabilité, les nitrates présentent des concentrations variables qui atteignent 61mg/l et 78 mg/l au niveau des forages D1f123 M'Khadma I et D9 F12 Sidi Khouiled respectivement, c'est-à-dire cette valeur est supérieur à la valeur limite dans les normes algériennes soit 50 mg/l. d'autre part, les nitrites et les phosphates sont inexistants.



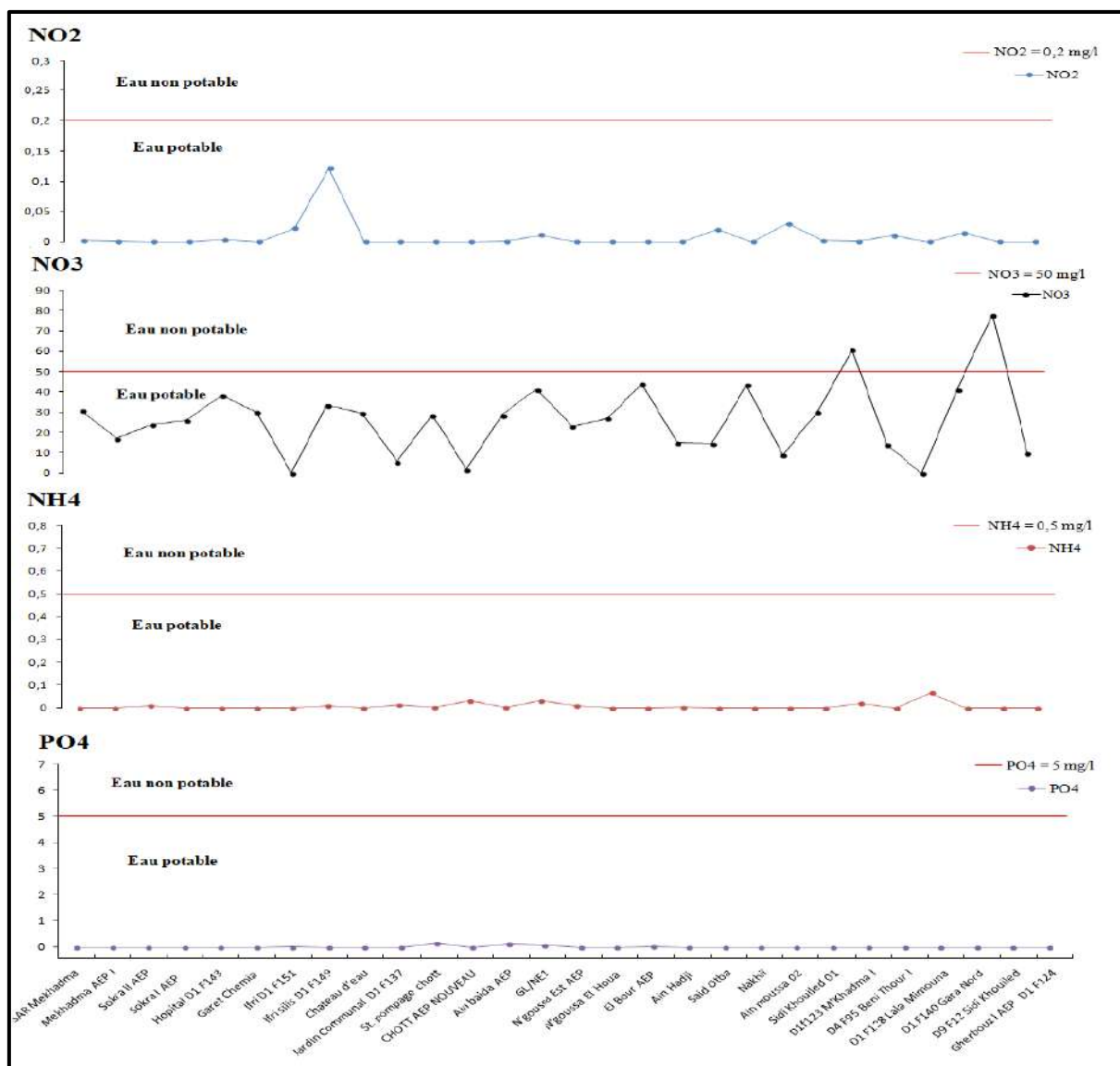


Figure VI-12 : Qualité de l'eau vis-à-vis nutriments pour la nappe du Sénonien.

### VI.2.4.la nappe Albienne

#### VI.2.4.1. Les éléments mesurés in-situ

Au niveau de la nappe albienne (fig.VI-13), les valeurs de la conductivité électrique varient entre 2420  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 4200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Elles sont globalement élevées dans les forages (El h'deb I, Albien el khafdji, El hdeb03) et dépassent les normes autorisées. Pourtant les valeurs de la conductivité dans les autres forages sont conformes aux normes algériennes.

Les valeurs de pH sont dans les normes.

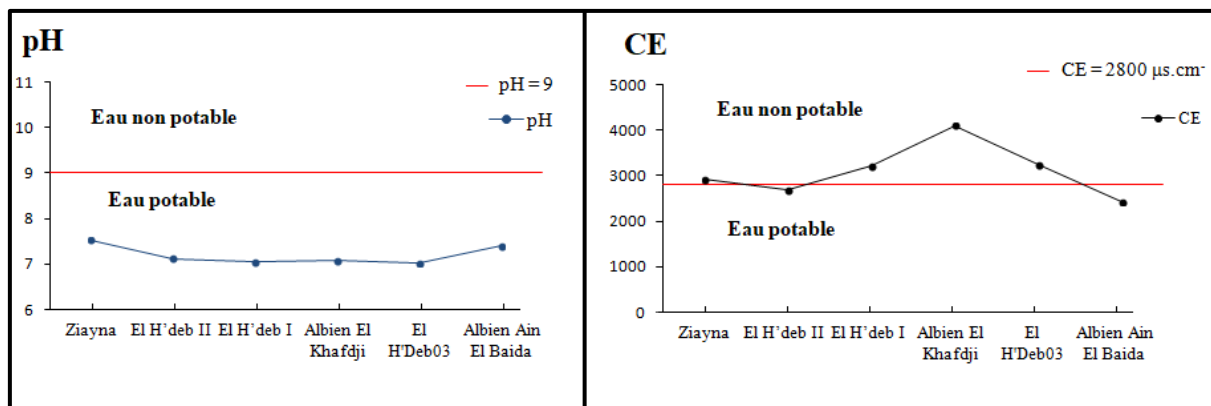


Figure VI-13 : Qualité de l'eau vis-à-vis la conductivité et le pH pour la nappe du l'Albien.

### VI.2.4.2. Les anions

Dans l'ensemble des forages de cette nappe du l'Albien (Fig.VI-14), les chlorures et les sulfates dépassent la ligne de potabilité, sauf en ce qui concerne le forage (Ain El Beida) où la concentration de sulfates est de 232 mg/l.

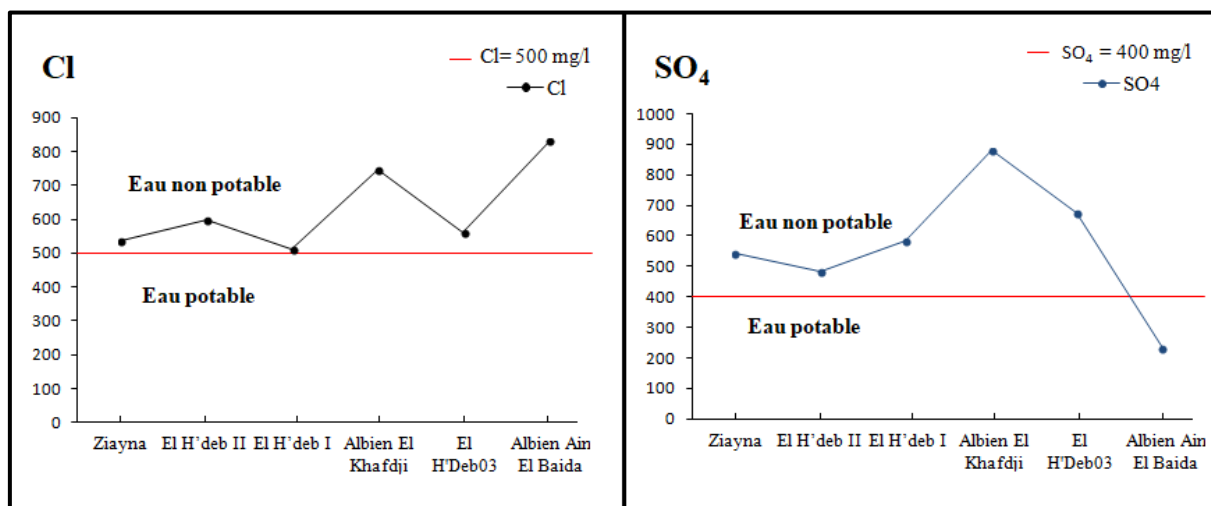


Figure VI-14 : Qualité de l'eau vis-à-vis les anions pour la nappe du l'Albien.

### VI.2.4.3. Les cations

Pour cette nappe (Fig.VI-15), les concentrations sont tout à fait différentes ou les valeurs du calcium sont faibles, ne dépassent pas 200mg/l, à l'exception dans le forage (Elkhafdj). Le magnésium aussi présente des faibles concentrations conformes aux normes algériennes. Par contre le sodium et le potassium présentent des valeurs supérieures à la ligne de potabilité.

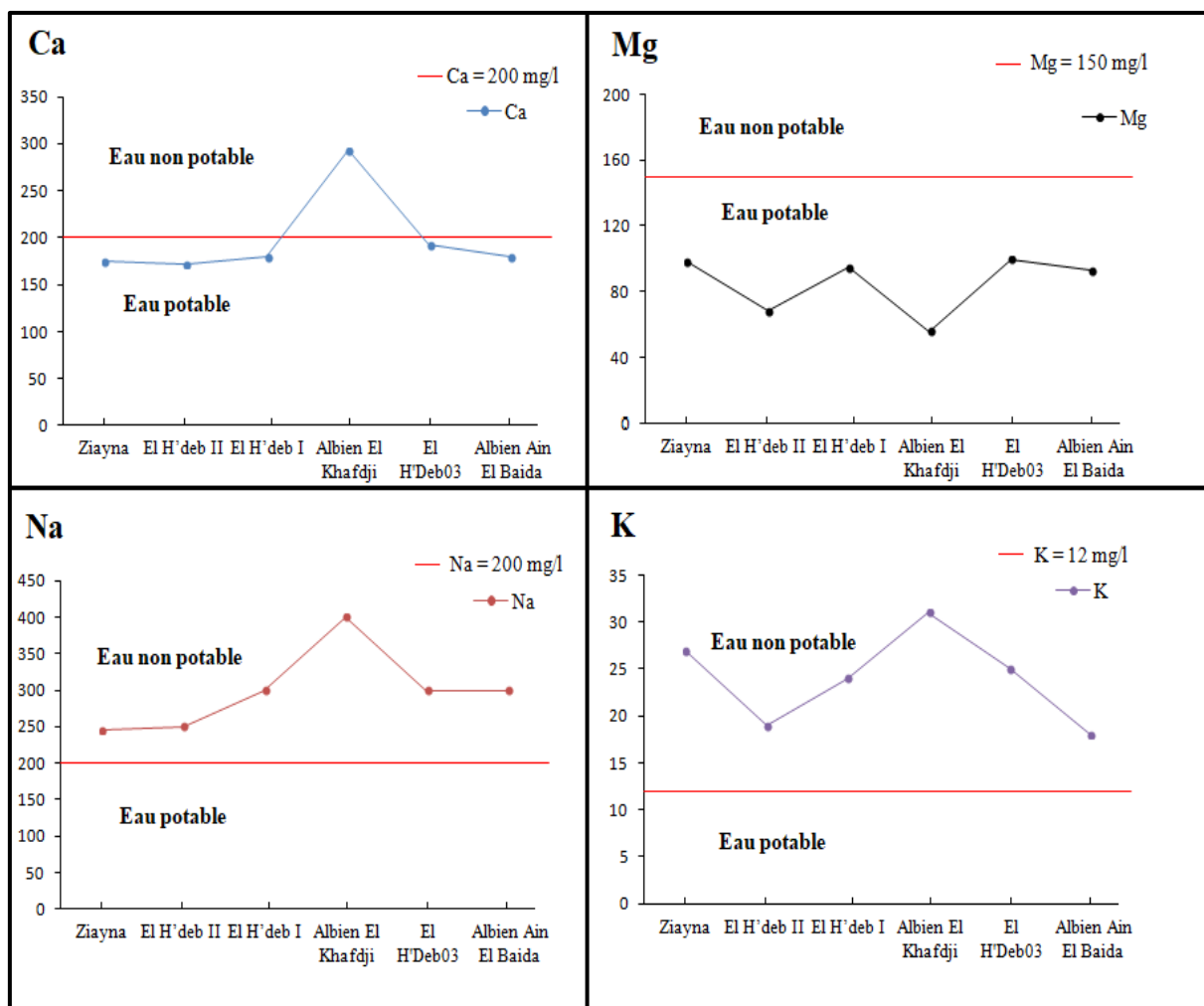


Figure VI-15 : Qualité de l'eau vis-à-vis les cations pour la nappe du l'Albien.

VI.2.4.4. Les paramètres de pollution

Pour la nappe Albienne (Fig.VI-16), les nitrates sont très faibles inférieurs à 0,8 mg/l. Les nitrites et les phosphates sont inexistantes.

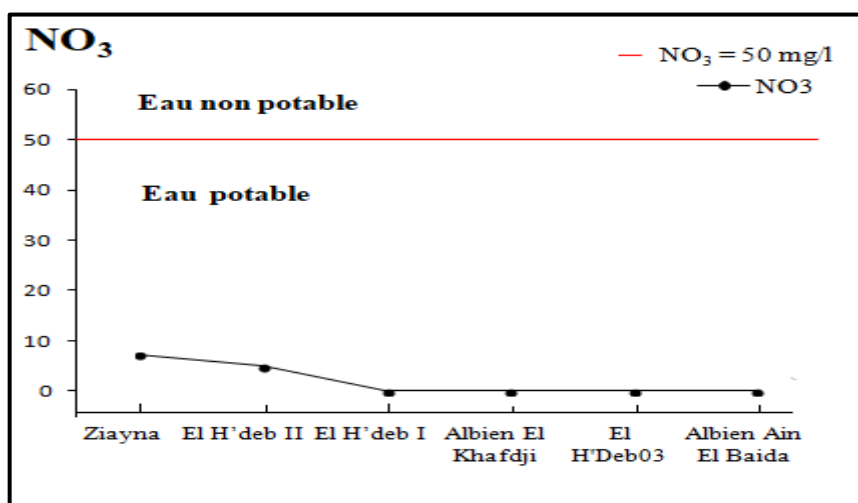


Figure VI-16 : Variations du nitrates pour la nappe du l'Albien.

### VI.3. Qualité des eaux destinées à l'irrigation

L'agriculture représente le plus important consommateur des ressources en eau. Ces ressources, suivant les régions dont elles proviennent, et leur contact éventuel avec des sources de pollution ont des caractéristiques très diversifiées.

De plus, vu la diminution des apports en eaux constatée depuis plusieurs décennies, les agriculteurs, notamment dans les régions continentales, s'intéressent à l'utilisation des eaux usées et les eaux salées. C'est ainsi que des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation ont été établies afin de :

- protéger le public et les ouvriers agricoles ;
- protéger les consommateurs des produits agricoles ;
- protéger les ressources en eau superficielle et souterraine et les sols ;
- protéger le matériel d'irrigation ;
- maintenir des rendements acceptables.

#### VI.3.1. Les risques du (SAR)

Une grande quantité d'ions sodium dans l'eau affecte la perméabilité des sols et pose des problèmes d'infiltration. Ceci est dû au fait que le sodium présent dans le sol en forme échangeable remplace les calcium et les magnésium adsorbés (échange de bases) sur les argiles de sol et cause la dispersion des particules dans le sol (c.-à-d. si le calcium et le magnésium sont les cations prédominants adsorbés sur le complexe d'échange du sol, le sol tend à être facilement cultivé et a une structure perméable et granulaire).

Cette dispersion a comme conséquence l'altération des agrégats des sols. Le sol devient alors dur et compact (lorsqu'il est sec) réduisant ainsi les vitesses d'infiltration de l'eau et d'air, affectant ainsi sa structure, par conséquent l'asphyxie des plantes.

Ce problème est également relié à plusieurs facteurs tels que le taux de salinité (voir ci dessous) et le type de sol. Par exemple les sols sableux ne subiront pas de dommage si facilement en comparaison aux sols argileux quand ils sont irrigués avec de l'eau à haut SAR. L'eau destinée à l'irrigation doit répondre à certaines exigences de sa qualité. Dans ce sens, on utilise le SAR et la minéralisation.

L'indice utilisé est le (SAR) qui exprime l'activité relative des ions de sodium dans les réactions d'échange dans les sols. Cet indice mesure la concentration relative du sodium par rapport au calcium et au magnésium.

**Tableau VI-02:** Le risque du SAR dans l'eau d'irrigation

	SAR	Notes
Nul	< 3.0	Pas de restriction sur l'utilisation d'eau
Léger à modéré	3.0 - 9.0	Entre 3 et 6, une attention particulière doit être portée sur les récoltes sensibles ; Entre 6 et 8 du gypse doit être utilisé. Récoltes non sensibles. Des échantillons de sol doivent être prélevés et examinés tout les 1 ou 2 jours pour déterminer s'il y a une augmentation des teneurs en Sodium.
Elevé	> 9.0	Domage sévère.

Le SAR est défini par l'équation suivante (en meq/l) :

$$SAR = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{2+}] + [Mg^{2+}]}{2}}}$$

L'ensemble des points d'eaux dans la nappe phréatique (fig. VI-17) présente un risque sévère du SAR pour l'irrigation (plantes et sols), sauf pour les piézomètres (PLX1, P059, P054, P057, PL31, Puits Hassi Naga, PL15, PL10, P422, P416, PL32, PL31, PLX4) présentent le risque est léger à modéré.

Les eaux dans la nappe du Miopliocène, du Sénonien ainsi celle du l'albien regroupant dans le risque léger à modéré sauf les forages (A.Aéroport nouveau, Station naftal, Garet Diaba D9 F2, A.Degla D5 F117, Abazat D2F69) dans la nappe du Miopliocène présentent un risque nul.

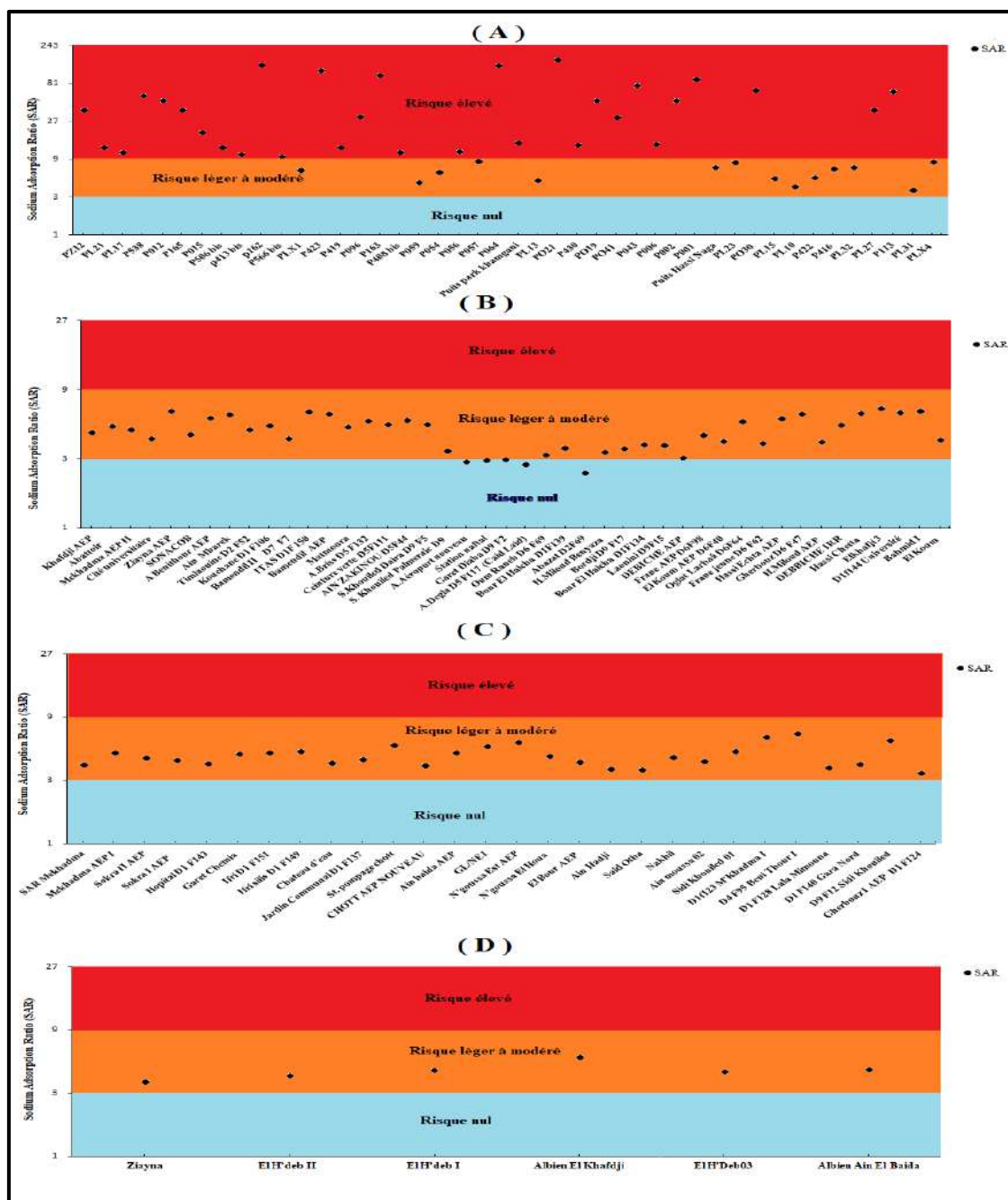


Figure VI-17 : Risque de SAR dans l'eau en fonction des nappes (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

### VI.3.2. Relation entre le SAR et l'indice de salinité

A un SAR donné, le taux d'infiltration augmente avec certaines conditions comme, notamment, la salinité. Donc le SAR et la CE devraient être utilisés en combinaison pour évaluer de problèmes potentiels.

Comme on peut le voir dans le tableau VI-03, pour une eau très faiblement salée, une eau avec, pourtant, un SAR faible doit être évitée. Mais, une eau très salée (CE1.05-3.00) avec un SAR au-dessus de 4, doit être soigneusement gérée. Il est recommandé que, une fois par an, les sols doivent être soumis à des tests de détecter d'éventuel problème de sodisation.

Le taux de salinité et le SAR sont des indices proportionnelles, plus la salinité est élevée, plus l'indice SAR pourra poser des problèmes d'infiltration. Mais, plus la salinité sera basse, plus les problèmes d'infiltration seront indépendants de la valeur du SAR.

Les averses de pluie peuvent réduire la salinité des sols et, par conséquent, augmenter l'indice SAR et affecter la pénétration d'eau dans ces sols.

**Tableau VI-03 : SAR/Risque de salinité pour l'eau d'irrigation**

SAR de :	0-3	3-6	6-12	12-20	20-40
Risques					
Nul	>0.7	>1.2	>1.9	>2.9	>5.0
Léger	0.7	12	1.9	2.9	5.0
Modéré	0.2	0.3	0.5	1.3	2.9
Sévère	>0.2	<0.3	<0.5	<1.3	<2.9

Sur le diagramme de Riverside (fig.VI-18), le classement des eaux de la nappe phréatique montre une eau à très forte salinité C4 et moyen pouvoir alcalinisant pour sept piézomètres (P059, P422, puits Hassi naga, PL15, PL31, PL10, P054) .par contre, l'ensemble des points se situe dans la classe C5 où on note une salinité excessive et un fort pouvoir alcalinisant.

Les eaux de la nappe du Miopliocène sont classées entre C4 très forte salinité et C5 salinité excessive avec une alcalinité moyenne pour les deux classes, un seul forage (Bour El Haicha D1F139) montre une très forte salinité C4 et faible pouvoir alcalinisant, les forages (Ziayna AEP, Ain Mbarek, AIN ZAKINOUE D5F44, A.Briss D5 F132) ont salinité excessive C5 et une forte alcalinité.

Pour la nappe du Sénonien, un seul forage (GL/NE1) montre une salinité excessive C5 et un fort alcalinisant, par contre tout l'ensemble des points se situe dans la classe C4 très forte salinité et moyen pouvoir alcalinisant.

Dans cette nappe albienne, tous les points d'eau sont classés dans C4 avec une alcalinisation moyenne.

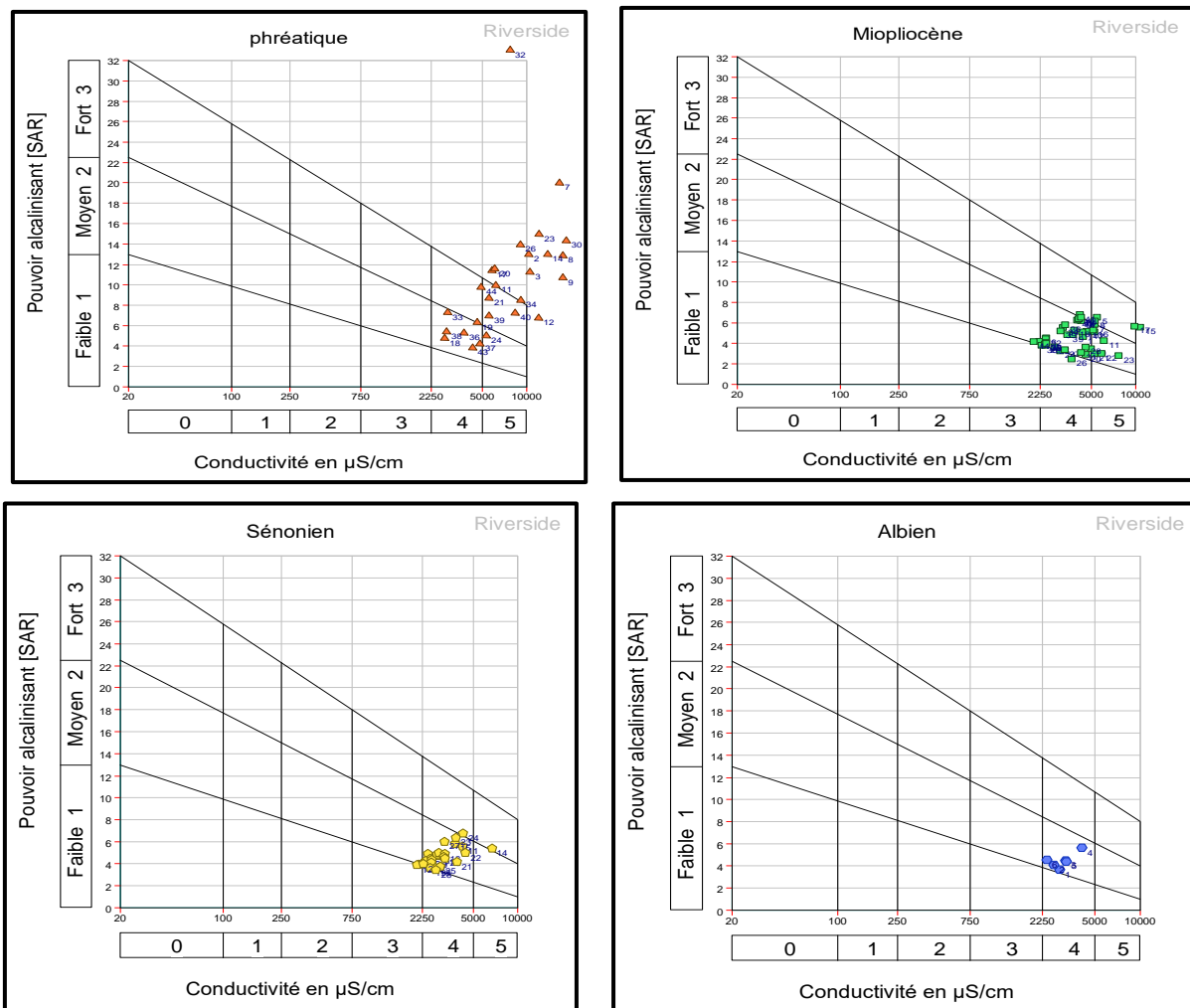


Figure VI-18 : Diagramme de Riverside.

### VI.3.3. Les risques de la salinité

L'excès de teneur en sel est l'un des soucis principaux avec l'eau utilisée pour l'irrigation. Une concentration élevée en sel dans l'eau ou dans les sols affectera négativement le rendement des récoltes, provoquera une dégradation des sols et une pollution des eaux souterraines.

L'utilisation d'une eau salée pour l'irrigation dépendra de plusieurs facteurs :

- La tolérance en sel des plantes ;
- Les caractéristiques du sol sous l'irrigation ;
- Les conditions climatiques : la qualité de l'eau d'irrigation joue un rôle essentiel dans les secteurs arides affectée par des taux d'évaporation élevés entraînant une accumulation importante de sel dans les sols ;
- Les procédures de gestion des sols et de l'eau.

En général, l'eau réutilisée pour l'irrigation doit avoir un degré faible ou moyen de salinité.



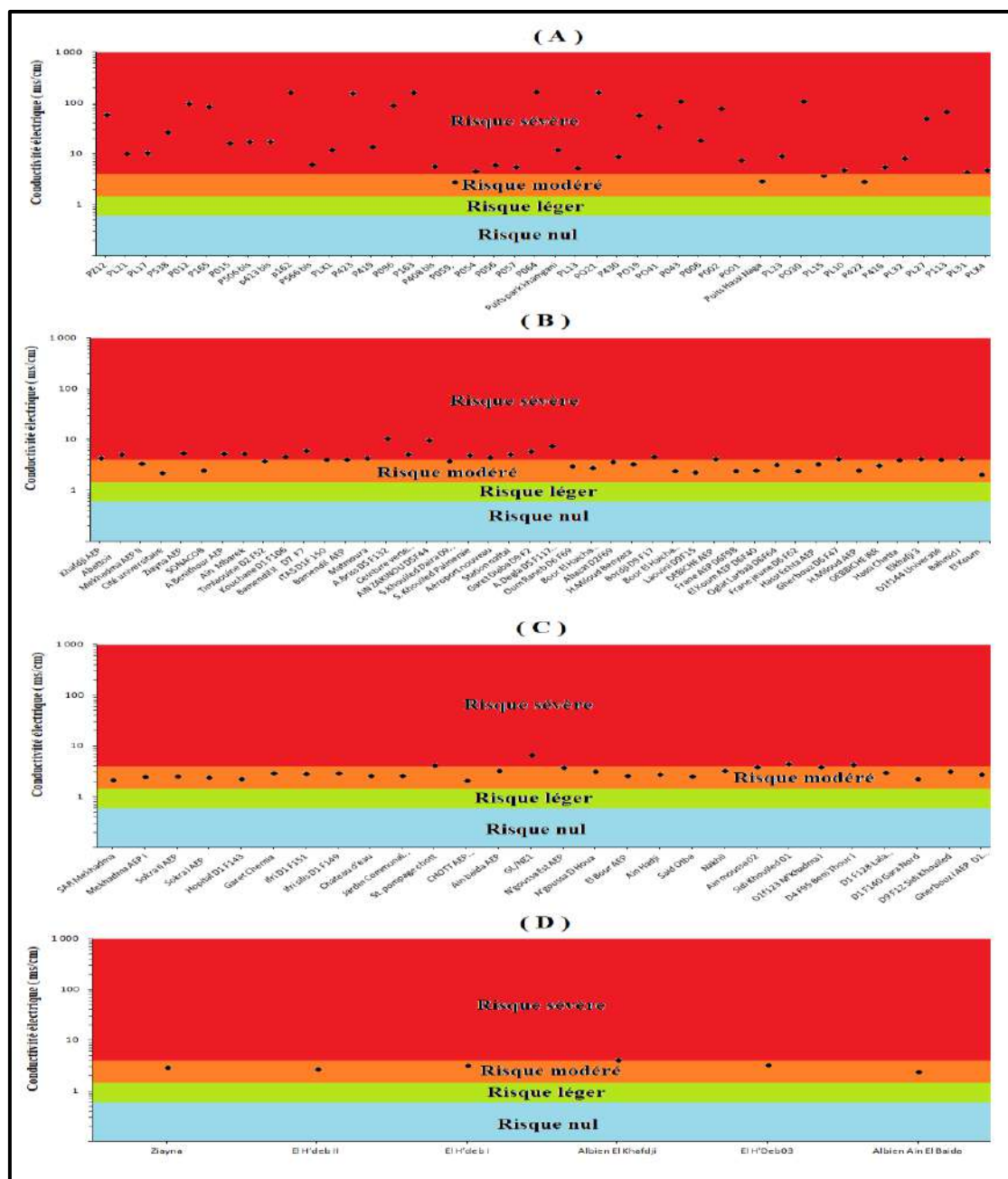


Figure VI-19 : Risques de la salinité dans l'eau en fonction des nappes (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sémonien, (D) nappe Albien.

La figure (fig.VI-19) montre que tous les piézomètres de la nappe phréatique présentent un risque sévère de la salinité, à l'exception quatre piézomètres (P059, puits hassi naga, PL15, P422) présentent un risque modéré. Donc les eaux de la nappe dans leur état naturel, sont inutilisables pour l'irrigation. Les eaux de la nappe du Miopliocène sont classées entre le risque modéré et le risque sévère. Les eaux de la nappe sénonien et la nappe albienne présent dans la majorité un risque modéré.

#### VI.3.4. Risque des bicarbonates

Une forte teneur en carbonate ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) et en bicarbonate ( $\text{HCO}_3^-$ ) augmente la valeur de SAR (environ  $>3-4\text{meq/l}$  ou  $>180-240\text{mg/L}$ ), pour les raisons suivantes :

- ✓ Les ions carbonate et bicarbonate combinés au calcium ou au magnésium précipitent sous forme de carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) ou carbonate de magnésium ( $\text{MgCO}_3$ ) dans des conditions de sécheresse (la cuvette de Ouargla montre une sécheresse permanente).
- ✓ Lorsque la concentration de Ca et de Mg décroît, la teneur du sodium et l'indice SAR deviennent plus importants. Ceci casera un effet d'alcalisation et augmentera le pH. Par conséquent, lorsqu'une analyse et bicarbonate. Tel est le cas des eaux de la nappe superficielle et des eaux du canal évacuateur. Les eaux sont soumises à une teneur en  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et pH élevées, résultant de la précipitation de  $\text{CaCO}_3$  et du  $\text{MgCO}_3$ .

Ainsi la figure (fig. VI-20) montre que la majorité des eaux des nappes de la cuvette de Ouargla ont un risque de bicarbonates léger à modéré, sauf que le piézomètre P163 (situé dans sebkhet Oum Raneb) présente un risque nul, par contre les trois piézomètres PL21, PL23, PL27 et PL32, (des piézomètres situés dans la ville) montrent un risque sévère des bicarbonates.

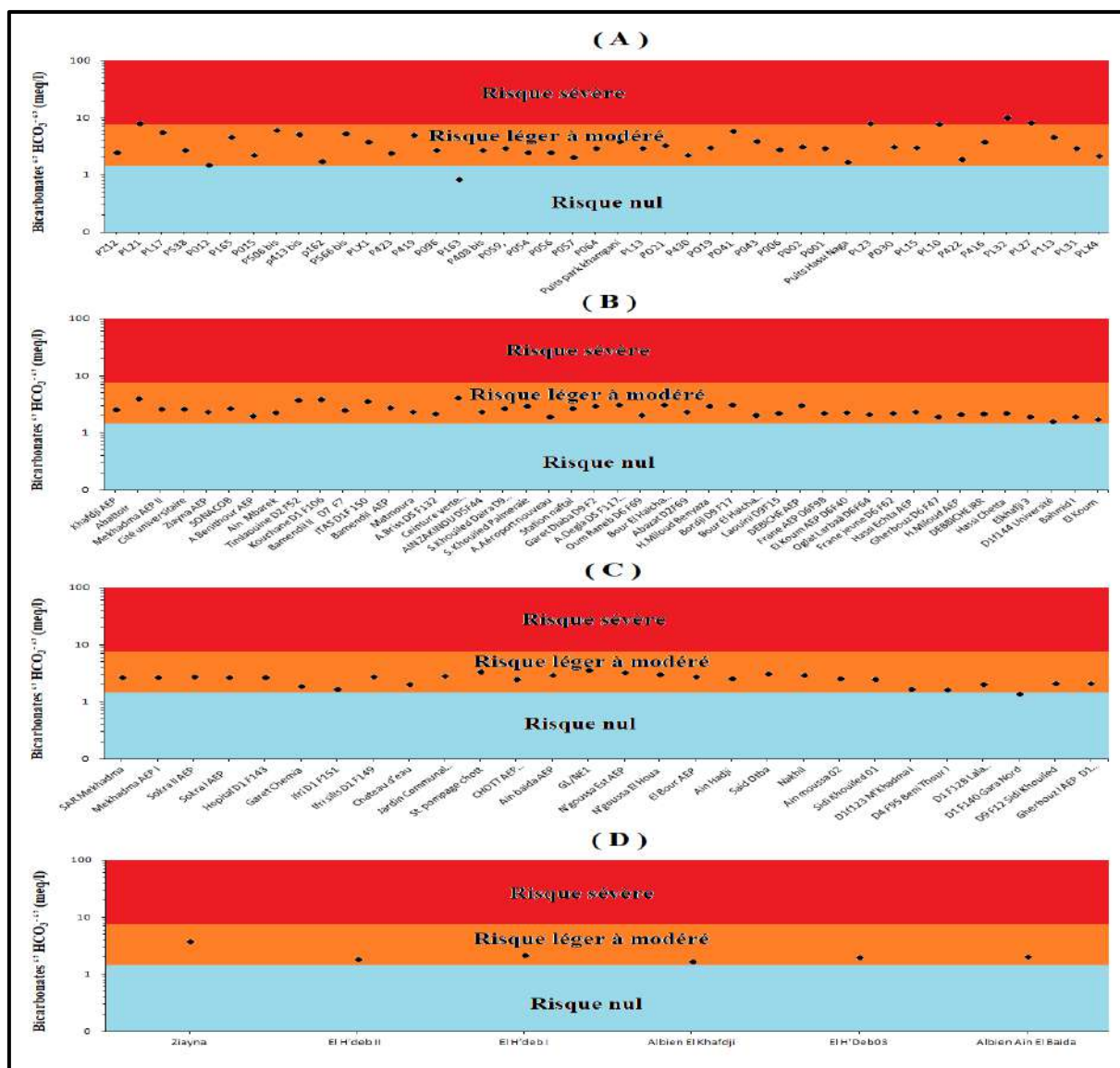


Figure VI-20 : Risques des bicarbonates dans l'eau en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

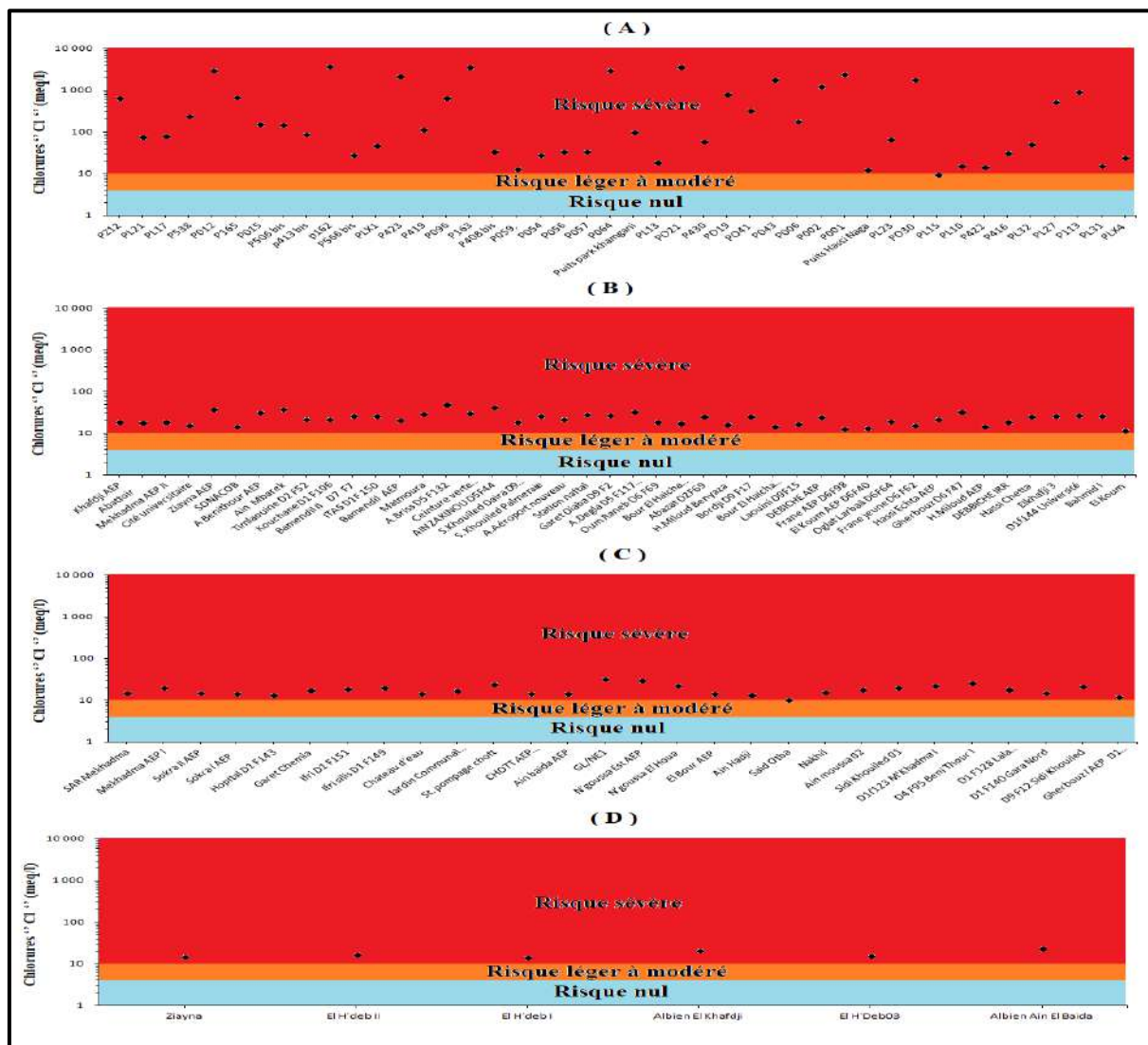
### VI.3.5. Les risques de présence d'ions toxiques dans l'eau d'irrigation

Les ions toxiques les plus communs dans les eaux d'égouts sont :

- Chlorure (Cl)
- Sodium (Na)

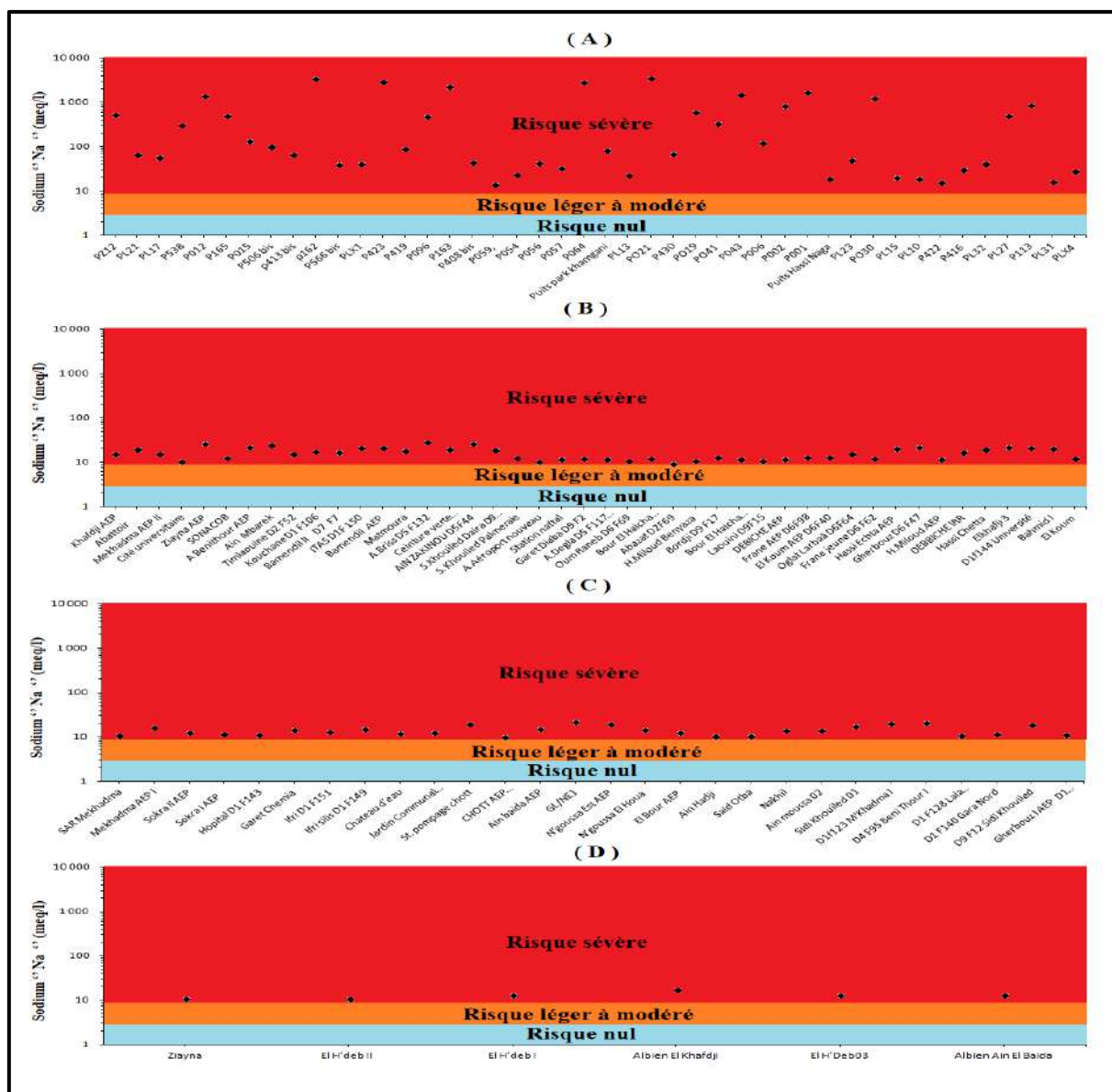
Le sodium et le chlorure sont habituellement absorbés par les racines. Lorsque l'absorption se fait par les feuilles le taux d'accumulation est plus grand, l'absorption directe se produit habituellement dans des systèmes d'irrigation par arrosage dans des conditions de faible humidité et de hautes températures. La convenance de concentration de ces anions dépend du type de récolte, de l'état de croissance, de la concentration en ions, du climat et de l'état des sols.

La figure (fig. VI-21) montre que toutes les eaux souterraines de la cuvette de Ouargla ont un risque sévère des chlorures vis-à-vis les plantes.



**Figure VI-21 :** Risques des chlorures dans l'eau en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

Les teneurs élevées en sodium posent un problème crucial lorsque la vitesse d'infiltration est réduite. Dans ce cas, la perméabilité du sol est faible et l'eau d'irrigation atteint difficilement la plante. On note par ailleurs, une saturation du sol et la formation d'une croûte de graine avec un pH élevé, provoquant ainsi une possibilité accru de présence de maladies, des herbes, d'érosion des sols, de manque d'oxygène et de disponibilité nutritive insatisfaisante.



**Figure VI-22:** Risques du Sodium dans l'eau en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

Au niveau de la cuvette de Ouargla, les plantes et le sol sont très affectés par les eaux chargées en sodium (Fig. VI-22) et le graphique montre bien que le risque du sodium dépasse bien les 9 meq/l dans l'ensemble des points de tous les nappes observées.

#### VI.4. Qualité des eaux destinées à l'industrie

Dans l'industrie et la construction, la corrosion et l'incrustation ont des conséquences économiques considérables, tant directement, par les coûts d'intervention et la consommation de produits métallurgiques qu'elle engendrent, qu'indirectement (arrêt des unités industrielles de production pour réparations, dégradation de la qualité des produits manufacturés en contact avec l'eau chargée de métaux dissous, etc.).

La qualité des eaux utilisée dans ce domaine se distingue par :



- Leur agressivité vis-à-vis des calcaires, bétons et ciment ;
- Leur corrosivité vis-à-vis des métaux ;
- Leur caractère incrustant.

Dans les deux premiers cas, les ouvrages et les équipements concernés sont endommagés et même détruits et l'eau acquiert turbidité et coloration. Dans le dernier cas, les canalisations sont rétrécies, parfois même obstruées et ne transitent plus les débits prévus.

Lorsqu'il s'agit d'eau de consommation humaine, la pollution de l'eau par les métaux mis en solution dans l'eau peut avoir des conséquences tantôt désagréables pour le consommateur (couleur ou saveur altérées), tantôt beaucoup plus graves (intoxications par certains métaux lourds comme le plomb et le cadmium, par exemple).

### VI.4.1. Indicateurs calco-carboniques

Le déséquilibre calco-carbonique dans une eau, peut être néfaste sur les conduite, les chaudières,... pour définir l'aspect ou le caractère agressif ou entartrant les eaux des nappes de la cuvette de Ouargla, nous avons utilisé un logiciel de calcul appelé Equilibre (EQUIL1). Ce dernier s'appuie sur les données d'analyses demandées par le diagramme de Langelier, permet de définir certains indices calco-carbonique.

#### VI.4.1.1. L'indice de Ryznar (indice de stabilité)

Cet indice est défini de la façon suivant :  $I_R = 2pH_S - pH$ . (Ryznar, 1944)

Où  $pH_S$  = pH théorique de saturation ;  $pH$  = pH mesuré à 25°C.

Il permet de définir la tendance aggressive ou entartrant d'une eau aérée. Le tableau ci-contre donne la relation entre l'indice de stabilité et la tendance incrustante ou corrosive de l'eau.

**Tableau V-04** : Relation entre l'indice de stabilité et la tendance de l'eau

$I_R$	Tendance
4 à 5	Entartrage important
5 à 6	Entartrage faible
6 à 7	Equilibre
7 à 7.5	Légère corrosivité
7.5 à 8.5	Corrosivité notable
>8.5	Corrosivité important

Les résultats sont regroupés en (fig.VI-23) représentant l'indice de Ryzant, montre que les eaux de la nappe phréatique présentent un entartrage entre faible et important, un seul piézomètre (puits Hassi naga) présente un équilibre calco-carbonique. Les eaux de la nappe

du Miopliocène ainsi que les eaux de la nappe du Sénonien présentent entre un équilibre calco-carbonique et un entartrage faible. La nappe Albienne présente un entartrage faible.

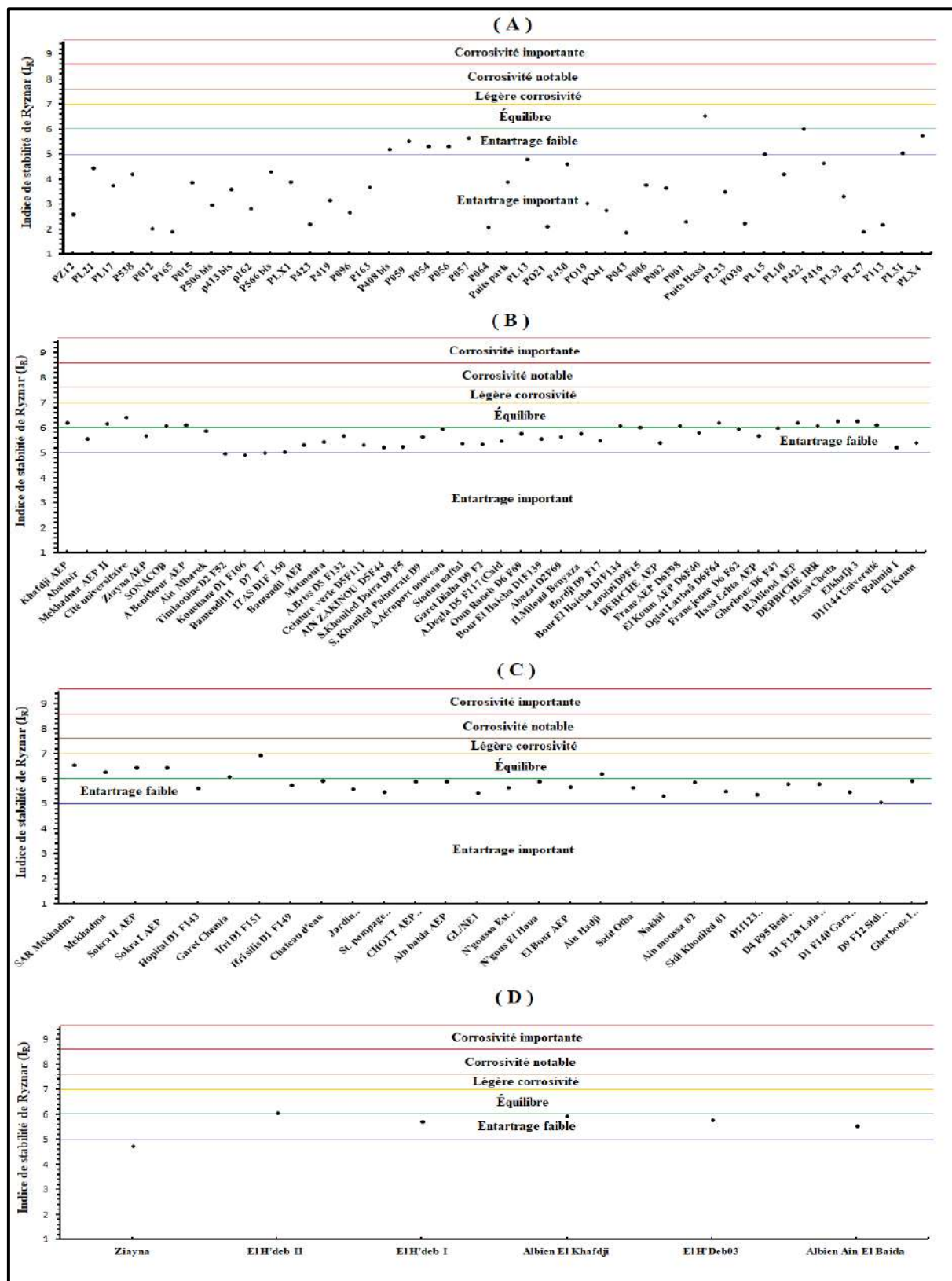


Figure VI-23: L'indice de stabilité de Ryznar en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

VI.4.1.2. L'indice de Langelier (indice de saturation)

Cet indice est défini de façon suivante :  $I_L = pH - pH_s$

Une eau agressive est caractérisée par un indice de Langelier négatif, ce qui signifie que le pH de l'eau mesuré est inférieur au pH<sub>s</sub> de saturation ; l'eau, sous saturée en CaCO<sub>3</sub>, dissout le calcaire sous l'action du CO<sub>2</sub> agressif. S'il est positif, il y a formation d'une couche de carbonate de calcium qui protège les tuyauteries.

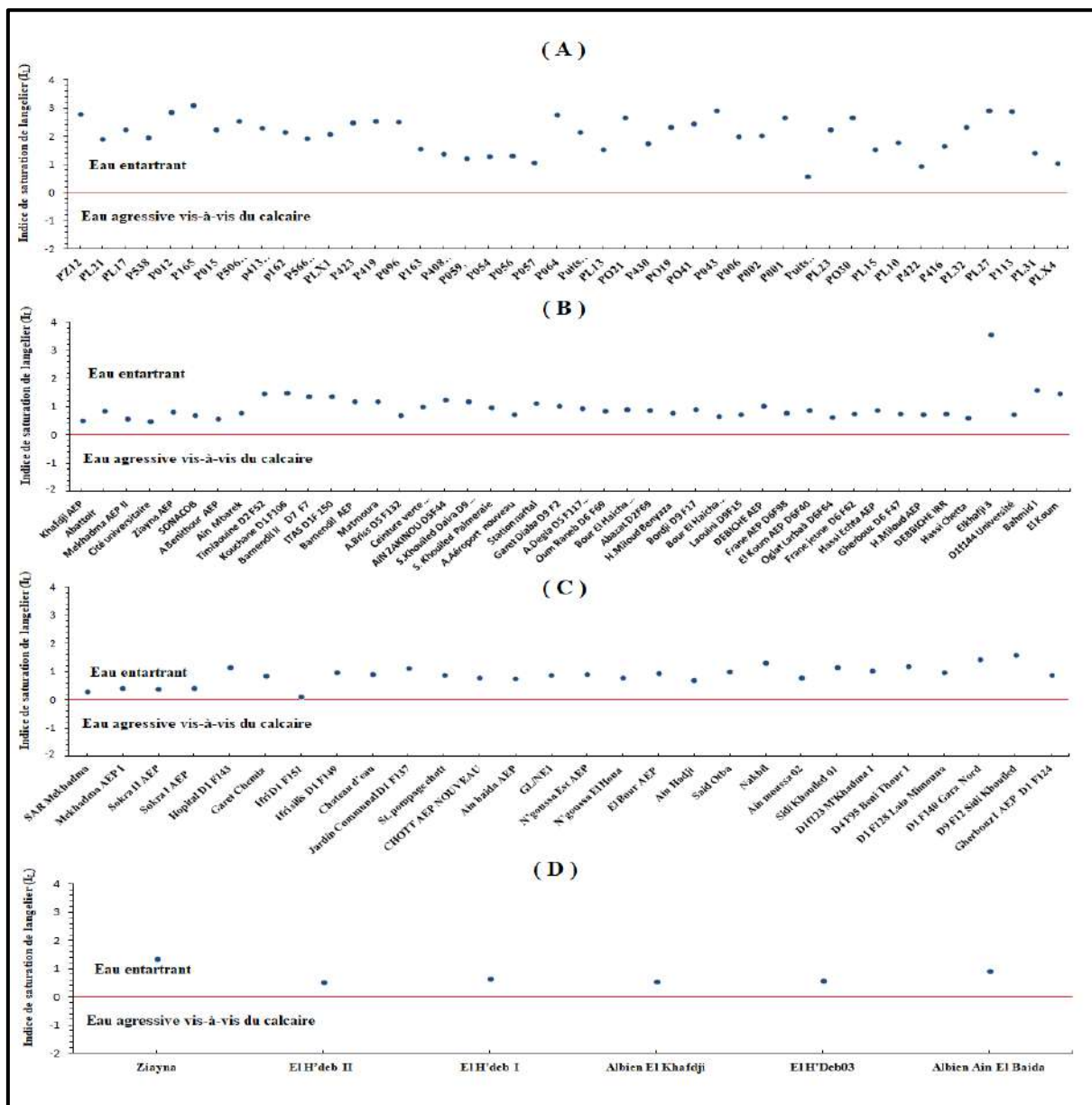


Figure VI-24: L'indice de saturation Langelier en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

Les eaux des nappes de la cuvette de Ouargla montrent qu'elles sont des eaux entartrant (fig.VI-24).



VI.4.1.3. Indication du CCPP (calcium carbonate précipitation potentiel)

La quantité de CaCO<sub>3</sub> qui peut être théoriquement précipitée (eau entartrant) ou dissoute (eaux agressives), dans ce dernier cas la valeur est négative.

Cette indication confirme la tendance entartrant des eaux des nappes de la cuvette de Ouargla (fig.VI-25) déterminée par l'indice de Langelier.

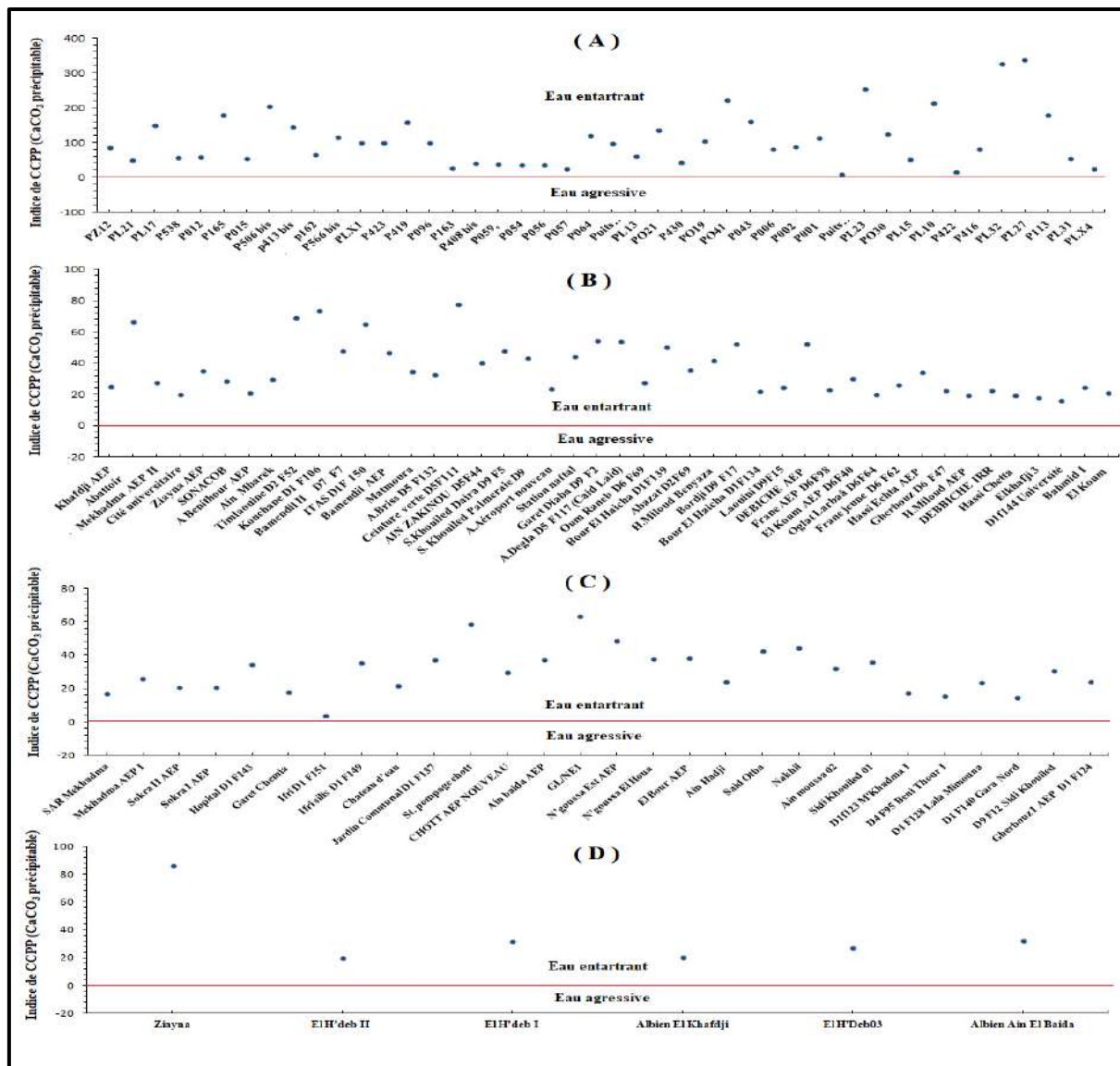


Figure VI-25: L'indice de CCPP en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du MioplIOCène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

**VI.4.2. Indication de corrosivité****VI.4.2.1. L'indice de larsen (indice de corrosivité)**

Cet indice est défini de la façon suivante :  $I_C = ([Cl^-] + 2*[SO_4^{2-}] / [HCO_3^-])$  (Larson and Skold, 1958).

Les concentrations sont exprimées en mol/l. Cette formule empirique est basée sur de nombreuses expérimentations effectuées par les américains Larson et Skold, qui ont estimé que cet indice ne devrait pas dépasser 0,2 ou 0,3. D'autres ont estimé que des valeurs allant jusqu'à l'unité étaient acceptables. Le tableau ci-dessous montre l'interprétation que l'on peut faire des valeurs de l'indice.

**Tableau V-05** : Relation entre l'indice de corrosivité et la tendance de l'eau

$I_C$	Tendance
< 0.2	Pas de tendance à la corrosion
0.2 à 0.4	Faible tendance
0.4 à 0.5	Légère tendance
0.5 à 1	Tendance moyenne
>1	Nette tendance à la corrosion

Cet indice permet de déterminer la corrosivité d'une eau à partir des concentrations en ions chlorures, sulfates et bicarbonates. Mais il ne tient pas compte des ions calcium et magnésium qui ralentissent le phénomène de corrosion.

Cet indice (fig.VI-26) montre que les eaux de la cuvette de Ouargla montre une nette tendance à la corrosion vis-à-vis des métaux, quelque soit la nappe.

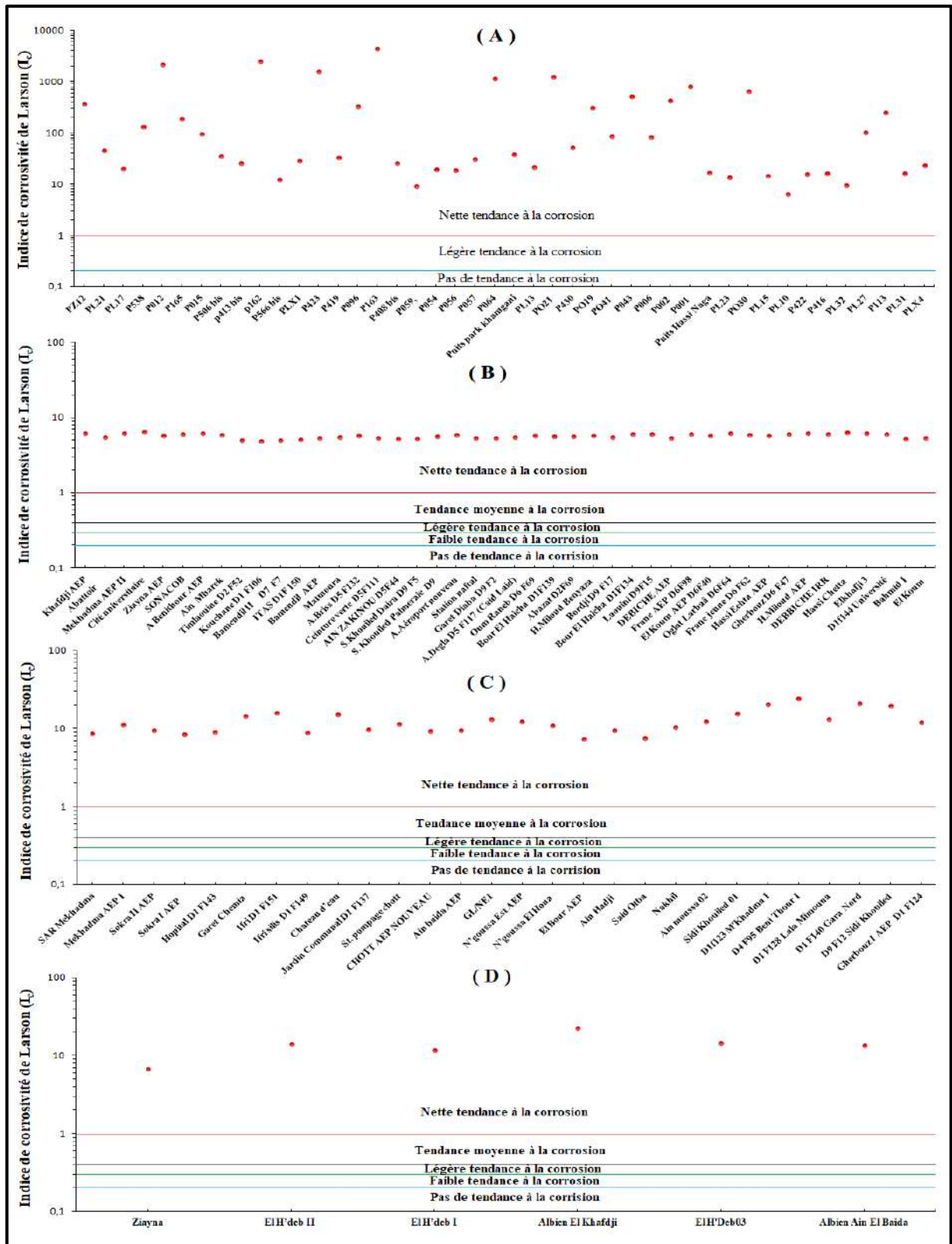
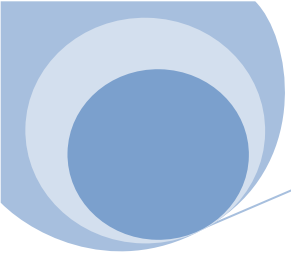


Figure VI-26: L'indice de corrosivité de Larson en fonction des nappes. (A) nappe phréatique, (B) nappe du Miopliocène, (C) nappe du Sénonien, (D) nappe Albien.

### VI.5. Conclusion

Pour les eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla, nos résultats d'analyse obtenus montrent que ces dernières ont de mauvaise qualité, notamment en ce qui concerne la salinité excessive qui dépasse les normes de potabilité et celles conseillées à l'irrigation. Pour cela, ces eaux s'avèrent non agréables à la consommation humaine avec un risque sévère pour les sols et les plantes. Les indices calco-carboniques montrent que ces eaux provoquent le problème d'entartrage, ce qui favorise les risques de bouchage des canalisations. Les indices de corrosivité montrent une nette tendance à la corrosion vis-à-vis les métaux (destruction des équipements hydrauliques). On conclue alors, que quel que soit la destination prévue des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, il est impératif d'améliorer leurs qualité par des méthodes de traitement convenables avant l'usage.

Les résultats obtenus concernant la qualité des eaux du complexe terminal (sénonien et miopliocène) et de continental intercalaire (nappe albienne), montrent que ces dernières ont de concentrations inférieures à celles des eaux phréatiques. Mais il y a toujours un excès de teneur en sel vis-à-vis les normes autorisées notamment pour la nappe miopliocène, quelque soit pour la consommation humaine ou pour l'irrigation. Dont, la projection des résultats d'analyse physico-chimique obtenus sur le diagramme de classification des risques, indique que tous les échantillons de ces trois nappes, ont un risque élevé vis-à-vis la consommation humaine où les quantités excessives des éléments indésirables dans l'eau posent le problème de la potabilité des eaux et présentent un risque pour la santé publique qui doit être pris en considération par les services concernés de la région d'étude, et la majorité ont un risque léger modéré vis-à-vis l'irrigation.



# Conclusion générale

## Conclusion Générale

La présente étude concerne la caractérisation des ressources en eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Cette dernière se situe au bas Sahara Sud-est de l'Algérie. Elle couvre une superficie de 99000 ha, et ses limites géographiques sont: Hassi Khefif au Nord, les ruines de Sedrata au Sud, Ergs Touil et Arifdji à l'Est et le versant Est de la dorsale du M'Zab à l'Ouest. Elle est creusée dans un dépôt détritique de terrains tertiaires (Miopliocène) et quaternaires de la basse vallée de Oued M'ya, dans lequel, les sables règnent avec alternance des argiles, du gypse et des calcaires.

Notre zone d'étude est caractérisée par un climat désertique aride marqué, notamment par des précipitations faibles et irrégulières d'une part, et part des amplitudes thermiques et des températures très élevées d'autre part. Cette aridité n'est pas constatée seulement en fonction du manque des précipitations, mais aussi par une évaporation intense qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui dominent dans la région d'étude.

Concernant l'hydrogéologie, la synthèse des travaux réalisée sur l'ensemble de la cuvette de Ouargla, montre que leur système aquifère renferme trois nappes différentes typologiquement, dont la première, est la nappe phréatique à surface libre située dans les formations du Quaternaire et deux nappes profondes captives à semi captives, qui sont la nappe du Continental Intercalaire renfermée dans les formations continentales du Crétacé inférieur et la nappe du Complexe Terminal constituant plusieurs aquifères, logée dans les formations géologiques du Sénonien et l'Eocène carbonatés ou du Miopliocène sableux.

Au cours de cette étude, la synthèse des données des forages existants a permis de préciser la géométrie des réservoirs aquifères. L'épaisseur moyenne de Continental Intercalaire, est de l'ordre de 800 m au total, le Sénonien est de l'ordre de 140 m et le Miopliocène est d'environ 95 m.

L'analyse et l'interprétation des données hydrochimiques des eaux des nappes de la cuvette de Ouargla (phréatique, Miopliocène, Sénonien et la nappe Albienne) ont permis d'évaluer la qualité chimique des eaux et de déterminer les processus géochimique responsables de la minéralisation. Les eaux du CI et CT sont relativement chargées (entre 1.5 et 9.1 g/l) et très chargées atteint 141 g/l pour les eaux de la nappe Phréatique. Cette dernière est caractérisée par trois faciès chimiques à savoir chloruré sodique dominant et deux faciès secondaire sulfaté sodique et sulfaté magnésien ; pour la nappe du Miopliocène entre chloruré sodique et calcique et un faciès sulfaté sodique ; la nappe du Sénonien montré deux faciès chimique chloruré sodique et sulfaté sodique ; la nappe Albienne présente un faciès chloruré sodique.

## Conclusion Générale

---

L'examen détaillé des diagrammes et des différentes corrélations établis entre les concentrations en éléments majeurs a montré

- un changement progressivement du pôle carbonaté englobe les eaux des nappes CI et CT vers le pôle évaporitique dans les eaux Phréatique ;
- une forte sensibilité des minéraux carbonatés à la précipitation par rapport aux minéraux évaporitiques ;
- la charge saline des eaux souterraines résulte principalement de l'interaction des eaux avec les formations encaissantes et d'une influence non négligeable de l'évaporation, en particulier sur la nappe Phréatique ;

Les variables hydrochimiques résultant de l'analyse des échantillons d'eau ont été décrites à travers l'analyse en composantes principale (ACP). la projection des variables dans les deux principaux axes factoriels (F1×F2), a montré que la chimie de l'eau dans la région est plus affectée par les variables  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ , et  $\text{SO}_4^{2-}$  essentiellement.

La gestion qualitative des eaux de la région impose un traitement préalable avant leur usage.

Pour les eaux phréatiques de la cuvette de Ouargla, nos résultats d'analyse obtenus montrent que ces dernières ont de mauvaise qualité, notamment en ce qui concerne la salinité excessive qui dépasse les normes de potabilité et celles conseillées à l'irrigation. Pour cela, ces eaux s'avèrent non agréables à la consommation humaine avec un risque sévère pour les sols et les plantes. Les indices calco-carboniques montrent que ces eaux provoquent le problème d'entartrage, ce qui favorise les risques de bouchage des canalisations. Les indices de corrosivité montrent une nette tendance à la corrosion vis-à-vis les métaux (destruction des équipements hydrauliques). On conclue alors, que quelques soit la destination prévue des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, il est impératif d'améliorer leurs qualité par des méthodes de traitement convenables avant l'usage.

Les résultats obtenus concernant la qualité des eaux du complexe terminal (sénonien et miopliocène) et de continental intercalaire (nappe albienne), montrent que ces dernières ont de concentrations inférieures à celles des eaux phréatiques. Mais il y a toujours un excès de teneur en sel vis-à-vis les normes autorisées notamment pour la nappe miopliocène, quelque soit pour la consommation humaine ou pour l'irrigation. Dont, la projection des résultats d'analyse physico-chimique obtenus sur le diagramme de classification des risques, indique que tous les échantillons de ces trois nappes, ont un risque élevé vis-à-vis la consommation humaine où les quantités excessives des éléments indésirables dans l'eau posent le problème de la potabilité des eaux et présentent un risque pour la santé publique qui doit être pris en

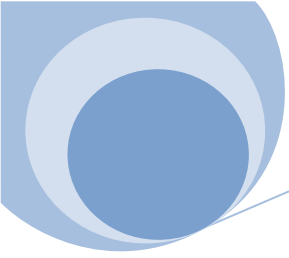
considération par les services concernés de la région d'étude, et la majorité ont un risque léger modéré vis-à-vis l'irrigation.

Ces problèmes de dégradation de la qualité des ressources en eaux dans la cuvette de Ouargla, nous a poussé de proposer les recommandations suivantes :

- La valorisation des ressources naturelles, notamment en eaux et en sol, sans oublier la dimension humaine.
- La généralisation des procédures de traitement convenables sur l'ensemble des forages destinés à l'alimentation en eau potable.
- La réutilisation des eaux épurées et les utiliser au profit de l'agriculture oasienne, pour éviter la surexploitation des nappes profondes.
- Il est impératif de généraliser le système drainage et améliorer le réseau actuel pour faciliter l'évacuation des eaux excédentaires chargées en sels.
- Développement d'une coopération scientifique multidimensionnelle, nationale, régionale et internationale, pour la prise en charge réelle des problèmes communs posés, dans une perspective de développement durable des écosystèmes en zones arides.

Enfin, ce travail de recherche reste une contribution modeste pour caractériser et classer les eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Le développement de cet axe de recherche est recommandé pour assurer un meilleur diagnostic des problèmes liés à la qualité des ressources en eaux. Les résultats obtenus peuvent contribuer à évaluer les niveaux des problèmes posés et proposer les solutions adéquates. Pour cela, il est nécessaire d'encourager la recherche scientifique en aménagement hydraulique dans une perspective de développement durable des milieux arides.





# **Références bibliographique**

## *Références Bibliographique*

### **-A-**

1. Abderrahmane, N., 1997. Synthèse sur la piézométrie et l'hydrochimie de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. ANRH, 10p.
2. ADE.2015 Document sur les matériels et méthodes des analyses des eaux Algérienne.
3. Aliev, M., Aït Laoussine, N., Avrov V., Aleksine, G., Barouline, G., Lakovlev, B., Korj, M., Kouvykine, J., Mazanov, V., Medvedev, E., Mkrтчhiane, O., Moustafinov, R., Oriev, L., Oroudjeva, D., Oulmi, M. et Said, A., 1971. Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz du Sahara algérien. Tome 1, 275p.
4. Aliev, M., Aït Laoussine, N., Benalicherif, A., Seifoul-Moulukov, R.B., Chikhalibeili, E.CH. Vyssotsky, V.I. et Said, A., 1972. Structures géologiques et perspectives en pétrole et en gaz des atlas algériens. Tome 2, 203p.
5. ANAT., 1995 - Maîtrise de la croissance urbaine de la métropole de Ouargla. Réhabilitation de l'écosystème de la Vallée de l'Oued Mya, 43p.
6. ANRH, 2004-2008. Données des fiches techniques des forages de la Wilaya de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Direction régionale Sud, Ouargla.
7. ANRH, 2011. Inventaire des forages de la Wilaya de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Direction régionale Sud, Ouargla.
8. Appelo, C.A.J., Postma, D., 2005. Geochemistry, groundwater and pollution. AA Bakelma. Rotterdam, 380p.
9. Atteia, O., 2015. Chimie et pollutions des eaux souterraines. Éditeur Lavoisier, 429p.

### **-B-**

10. Beaudry, C., 2013. Hydrogéochimie de l'aquifère rocheux régional en Montérégie-est, Québec, Mémoire de maîtrise. INRS. 193p.
11. Belkhiri, L., Boudoukha, A., Mouni, L., Baouz, T., 2010. Application of multivariate statistical methods and inverse geochemical modeling for characterization of groundwater — A case study: Ain Azel plain (Algeria). Geoderma. 159 (3-4), 390-398.
12. Ben Brahim, L., 1997. Caractéristiques des derniers événements sur le bassin de M'zab (crues juin 1991, avril 1994 et septembre 1997). Rapport interne ANRH-Ouargla, 8p.

13. Beuf S., Biju-Duval B., De Charpal D., Rognon R. et Bennacef A., 1971. Les grès du Paléozoïque inférieur au Sahara. Sédimentation et discontinuité: évolution structurale d'un craton. Institut Français du Pétrole. Collection Sciences et Techniques du Pétrole, 18, Eds Technip. Paris, 464p.
14. Bel F. Étude des nappes aquifères de la région de Ouargla. Ouargla : Direction départementale des travaux publics, de l'hydrographie et de la construction des oasis, 1969 (rapport dactylographié)..
15. Bel F., Dermagne F. 1966. Etude géologique du Continental Terminal, ANRH Alger, Algérie, 22p.
16. Bel F., Cuhe D, 1969. Mise au points des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.
17. B.DUSSART, Limnologie (Etude des eaux continentales. GauthierVillars, Ed., Paris, 1966).
18. Boeglin J.C., 2000. Contrôle des eaux douces et de consommation humaine. Ed.Techniques de l'ingénieur,24p.
19. 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, n°2, 76-82.
20. Bonnard & Gardel., 2003. La Vallée de Ouargla. Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Estimation du rôle des palmeraies à la montée de la nappe dans la cuvette de Ouargla. Mission IV Autres investigations Volet agropédologie, 26p.
21. Boote D.R.D., Clark-Lowes D.D. et Traut M.W., 1998. Paleozoic petroleum systems of North Africa. In: Petroleum Geology of North Africa, Ed. D.S. Macgregor, R.T.J. Moody and D.D. Clark-Lowes, Geol. Soc. Spec. Pub., 133, 7-68.
22. Bracène R. et Frizon de Lamotte D., 2002. The origin of intraplate deformation in the Atlas system of western and central Algeria: from Jurassic rifting to Cenozoic-Quaternary inversion. Tectonophysics, 357, 207-226.
23. BRL-BNEDER, 1999. Etude du plan directeur générale de développement des régions sahariennes. Lot 1. Etude de base. Phase II A3. Monographies spécialisées des ressources naturelles. Ressources en eau, Vol. 3. Modélisation du Complexe Terminal. 63p.

24. Bremond R., Vuichard R., 1973. Les paramètres de la qualité de l'eau. Ed. La documentation française. Paris. 173p.
25. Busson G., 1970. Le Mésozoïque saharien. Essai de synthèse des données de sondages Algéro-Tunisiens. C.N.R.S-CRZAS. Géol., 11, 788p.

### -C-

26. Castany, G., 1982. Hydrogéologie, Principes et méthodes. Ed Dunod, 238p.
27. CHAPMAN, D. & KIMSTACH, V. 1996. Selection of water quality variables. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environment monitoring, Chapman edition, 2nd ed. E & FN Spon, London, pp. 59- 126.
28. Chenini I., 2009. Hydrochimie et caractérisation qualitative des ressources en eaux d'un système aquifère multicouche en zone aride : application au bassin de Maknassy (Tunisie centrale).Sécheresse, 20(2) :217-22.
29. Cloutier, V., Lefebvre, R., Therrien, R., Savard, M. M., 2008. Multivariate statistical analysis of geochemical data as indicative of the hydrogeochemical evolution of groundwater in a sedimentary rock aquifer system. Journal of Hydrology. 353 (3-4), 294-313.
30. Conrad, G., 1969. L'évolution continentale poste-hercynienne du Sahara algérien. Cent. Rech. Zones Arides. Sér. Géol., 10 CNRS ed., Paris, 527p.
31. Cornet, A. et Gouscov, N., 1952. Les eaux du Crétacé inférieur continental dans le Sahara algérien (nappe dite « albien »). In « La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie » XIXème congrès géologique international T.II, 30p
32. Cornet, A., 1961. Initiation à l'hydrogéologie saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires sahariennes. S.E.S. Birmandreis, Alger, 108p.
33. Cornet, A., 1964. Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Géog. Phys. Et Géol.Dyn., vol. VI, fasc. 1, 5-72.
34. Coward, M.P. et Ries, A.C., 2003. Tectonic development of North African basins. In: Arthur, T-J., MacGregor, D.S. et Cameron, M.R. (Eds.), Petroleum Geology of Africa: New themes and developing technologies. Geol. Soc. London Spec. Publ., 207, 61-83.

### -D-

35. Dajoz, R., 1971. Précis d'écologie. Ed. Dunod. Paris.434p.

36. D'Amore, F., Scandiffio, G., Panichi, C., 1983. Some observations on the chemical classification of groundwaters. *Geothermics*. 12, 141-148.
37. Degrémont, 1978. *Mémento Technique de l'eau*, Ed. Degrémont, Paris.
38. De Vellers J., Squilbin M., Yourassowsky C., 2005. *Qualité physicochimique et chimique des eaux de surface*. Institut Bruxellois pour la gestion de l'environnement.
39. Dib I, 2009. *L'impact de l'activité agricole et urbaine sur la qualité des eaux souterraines de la plaine de Gadaine-Ain Yaghout (Est Algérien)*. Mémoire de Magister en hydraulique, construction hydrotechnique et environnement. Université Hadj Lakhdar. Bantna, Algérie, 127p.
40. Djidel, M., 2008 - *Pollution minérale et organique des eaux de la nappe superficielle de la cuvette de Ouargla (Sahara septentrional, Algérie)*. Thèse de Doctorat. UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA. Faculté des Sciences de la Terre. Département de Géologie. 164 p.
41. DPAT, 2001. *Division administrative de la wilaya de Ouargla*, 68p.
42. Dubief, J., 1953. *Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara*. Ed., Direction du service de la colonisation et de l'hydraulique, Service des études scientifiques. Algérie, 457p.
43. Dubief, J., 1963. *Le climat du Sahara*. Hors-série, Institut de recherches sahariennes. Mémoire Hors-série, Algérie, 275p.

## -E-

44. EarthSat, 2015. *The World's Source for Global Satellite Imagery*. <http://www.earthsat.com/HTML/naturalvue/>.
45. Edmunds, W., Guendouz, A., Mamou, A., Moulla, A., Shand, P. et Zouari, K., 2003. *Groundwater evolution in the continental intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators*. *Applied Geochemistry* 18, 805-822.
46. ENAGEO, 1992. *La prospection piézométrique de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla*. Rap Int. Ouargla, 26p.
47. Eriksson, E., 1960. *The yearly circulation of chloride and sulfur in nature: Meteorological, geochemical and pedological implications, Part 2*. *Tellus* 12, 63-109

48. Eriksson, E., 1976. The distribution of salinity in groundwater of the Delhy region and recharge rates of groundwater. In interpretation of environmental isotope and hydrochemical data in groundwater hydrology. Proceed of an advisory group meeting. Vienna, pp 171-177.

## -F-

49. Fabre, J., 1976. Introduction à la géologie du Sahara algérien et des régions voisines. Soc. nat. Ed. Diff. Alger. 422p.
50. Fabre, J., 1988. Les séries Paléozoïques d'Afrique : une approche. J. Afric. Earth Sci., 7, 1, 1-40.
51. Fedrigoni, L., Krimissa, M., Zouari, K., Maliki, A., Zuppi, G.M., 2001. Origine de la minéralisation et comportement hydrogéochimique d'une nappe phréatique soumise à des contraintes naturelles et anthropiques sévères : exemple de la nappe de Djebeniana (Tunisie). C. R. Acad. Sei. Paris, 332, 665-671.
52. Foucault, A. et Raoult, J.F., 1980. Dictionnaire de géologie, Paris, Masson, 334p.

## -G-

53. GHAZALI, D., ZAID, A., 2013. Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux de la source Ain Salama-Jerri (Région de Meknès-Maroc). Larhyss Journal 25-36.
54. Glangeaud, J.L., 1932. Etude géologique de la région littorale de la province d'Alger. Thèse Sci., Pub. Serv. Carte géol. (Nlle. Sér.). Algérie, 2, 590p.
55. Glynn, P.D. et Plummer L.N., 2005. Geochemistry and the understanding of groundwater systems. Hydrogeology Journal, 13: 263-287.
56. Guendouz, A., Reghis, Z. et Moulla A.S.1992. Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla. Rapport n° 1, 65p.
57. Guendouz, A., Moulla, A., Edmunds, W., Zouari, K., Shands, P. et Mamou, A., 2003. Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the complex terminal aquifer in Algerian Sahara. Hydrogeology Journal 11, 483-495.
58. Güler, C., Thyne, G., 2004. Hydrologic and geologic factors controlling surface and groundwater chemistry in Indian Wells-Owens Valley area, southeastern California, USA. Journal of Hydrology. 285 (1-4), 177-198.

## -H-

59. Hadj-Ammar, F., Chkir, N., Zouari, K., Hamelin, B., Deschamps, P., Aigoun, A., 2014. Hydrogeochemical processes in the Complexe Terminal aquifer of southern Tunisia : An

integrated investigation based on geochemical and multivariate statistical methods. Journal of African Earth Sciences 100, 81-95.

60. Hamdi-Aïssa, B., et Girard M.C., 200. Utilisation de la télédétection en régions sahariennes pour l'analyse et l'extrapolation spatiale des pédopaysages, Science et changements planétaires / Sécheresse. Volume 11, Numéro 3, 179-88
61. Hamdi-Aïssa, B., 2001. Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thèse Doct., Inst. National Agronomique, Paris-Grignon, 283p.
62. Hamdi-Aïssa, B., Vallès, V., Aventurier, A., Ribolzi, O., 2004. Soils and brines geochemistry and mineralogy of hyper arid desert playa, Ouargla basin, Algerian Sahara. Arid Land Research and Management 18, 103-126.
63. Hem, J. D., 1970. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. US geological survey water-supply paper, 380p.

### **-I-**

64. IDDER T., 1998. La dégradation de l'environnement urbain liée aux excédents hydriques au Sahara algérien. Impact des rejets d'origine agricole et urbaine et techniques de remédiation proposées. L'exemple de Ouargla. Thèse de doctorat, université d'Angers, 284 p.
65. IDDER T., 2007 - Le problème des excédents hydriques à Ouargla : situation actuelle et perspectives d'amélioration, Sécheresse. V 18. N° 3. pp : 161 - 167.

### **-J-**

66. Jora, 2011. Décret excutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif a la qualité de l'eau de consommation humaine, JO N°18.

### **-K-**

67. Killian, C., 1922. Essai de synthèse de la géologie du Sahara sud-constantinois et du Sahara central. C. R. XIII cong. Géol. Intern. Bruxelles, fasc. II, 887-945.

### **-L-**

68. LADJEL F., TOUDEF T., 2002. Control de paramètre physico – chimique et bactériologue d'une eau de consommation .rapport d'Epteo.pp5.6.12.
69. Larson T.E et Skold R.V., 1957. Corrosion and tuberculation of cast iron.J.AWWA, 49(10), 1294-1300.

- 70.** Larson T.E et Skold R.V., 1958. Laboratory studies relating mineral quality of water to corrosion of steel and cast iron. *Corrosion*,14(6), 285t-288t.
- 71.** Le Houérou, H.N., 1995. Bioclimatologie et biogéographie des steppes arides du Nord de l'Afrique. Diversité biologique, développement durable et désertification. *OPTIONS méditerranéennes. Série B : Etude et recherche n°10*. Ed. CIHEAM. Montpellier. 396p.
- 72.** Lelièvre, R.F., 1969. Assainissement de la cuvette de Ouargla. Ministère des Travaux Publique et de la construction, rapports Géohydraulique n° 2, 18p: n° 3, 84p.
- 73.** LTPS, 1995. Rapport d'étude de sol interne. Ecole Fondamentale Base 5. Commune de Rouissat. Ouargla, 13p.
- 74.** LTPS, 1998. Rapport d'étude géotechnique interne. Fondations des équipements. Commune de N'gouça. Ouargla, 8p.

## -M-

- 75.** Maliki, M. A., 2000. Etude hydrogéologique, hydrochimique et isotopique de la nappe profonde de Sfax (Tunisie). Thèse Doct., Univ. Tunis II. 254p.
- 76.** Margat J., Saad K.F., 1982, L'utilisation des ressources en eau souterraines non renouvelable pour le développement. ,Paris, BRGM.
- 77.** Margat J., 1990, Comment gérer les ressources en eau non renouvelables en zone aride, eaux et sols d'Algerie, n°5, p.39-51.
- 78.** Matiatos, I., Alexopoulos, A., Godelitsas, A., 2014. Multivariate statistical analysis of the hydrogeochemical and isotopic composition of the groundwater resources in northeastern Peloponnesus (Greece). *Science of The Total Environment* 476-477.
- 79.** Melloul, A., Collin, M., 1992. The 'principal components' statistical method as a complementary approach to geochemical methods in water quality factor identification; application to the Coastal Plain aquifer of Israel. *Journal of Hydrology*. 140, 49-73
- 80.** Mens et Derouane, 2000. Etat des nappes de l'eau souterraine de Wallonie.
- 81.** Meybeck, M., 1986. Composition chimique des ruisseaux non pollués de France. *Sci.Géol. Bull.* 39, pp. 3-77.
- 82.** Montcoudiol, N., Molson, J., Lemieux, J. M., 2014. Groundwater geochemistry of the Outaouais Region (Québec, Canada): a regional-scale study. *Hydrogeology Journal*. DOI 10.1007/s10040-014-1190-5.
- 83.** Moulias, D., 1927. L'eau dans les oasis sahariennes, organisation hydraulique, régime juridique. Thèse doct., Alger, 271p.



## -N-

84. Nesson, C., 1978. L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In: Recherche sur l'Algérie. Ed. CNRS, Paris, pp 7-100.
85. Nezli I.E., 2004 – Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla). Université Badji Mokhtar Annaba. Faculté des sciences de la terre. Département de Géologie Mémoire de magister en Géologie. 90p.

Lien : <http://biblio.univ-annaba.dz/wp-content/uploads/2014/05/NEZLI-Imed-Eddine.pdf>

## -O-

86. ONM, 1975/2017. Bulletins mensuels de relevé des paramètres climatologiques en Algérie. Office National de Météorologie, Centre climatologique.
87. OSS, 2003. Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel. Volume 2 : Hydrogéologie. Projet SASS. Coupes. Planches. Annexes. Tunis, Tunisie. 275p. Volume 4: Modèle Mathématique. Annexes. Tunis, Tunisie. 229p.
88. Oueld Belkhir, C., 2002. Contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette de Ouargla (Sahara Nord-est septentrional). Mém. Magister. Université de Blida. 107p.

## -P-

89. PESCOD M.B. (1985). Design, operation and maintenance of wastewater stabilization ponds in treatment and use of sewage effluent for irrigation. Ed pescodand Arar, 93-114.
90. Plummer, L.N., Jones, B.F., Truesdell, A.H. 1976. WATEQ-a fortran IV version of WATEQ, a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Geol. Surv. Wat. Res. Invest., 76-13, 61p
91. Polan, P et Henry, M., 1998. Qualité de l'eau souterraine dans la MRC de Coaticook. Vecteur Environnement. 31 (5), 46-55.

## -R-

92. R.BERMOND, R.VUICHAARD, (Les paramètres de la qualité des eaux. Documentation Française, Paris, 179p, 1973).
93. Roche M.A., 1973. L'hydrogéologie de la haute Saoura et l'erg occidental. Travaux de collaboration. bult. N° 47. 240p

94. REJESK F,(2002). Analyse des eaux : Aspect réglementaires et techniques, Centre régional de documentation pédagogique d'Aquitaine, France.
95. Remanieras, G., 1986. Hydrologie de l'ingénieur. Masson, Paris, 325p.
96. Roche M.A., 1973. L'hydrogéologie de la haute Saoura et l'erg occidental. Travaux de collaboration. bult. N° 47. 240p.
97. Roche M.A., 1996. Protection du réseau d'assainissement de la vallée du M'zab contre les crues. Rapport d'étude hydrologique interne. Lausanne, 150p.
98. Rodier, J. and Bazin, C. (1996). L'analyse de l'eau. Paris: Dunod, 788p.
99. RODIER J., BAZIN C ., BROUTIN J. P., CHAMBON P., CHAMPSAUR H., RODI L .(2005). Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, chimie, physico-chimie, microbiologie, biologie, interprétation des résultats. Ed Dunod, paris, 1384p.
100. Rodier, J., Legube, B. and Merlet, N. (2009). L'analyse de l'eau. Paris: Dunod, 1047p.
101. Rodier, J. (1984). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eau de mer.
102. Rouvillois-Brigol, M., 1975. Le pays de Ouargla (Sahara Algérien) variation et organisation. Pub. Univ. Sorbonne, Paris, 361p.
103. Rosen, M., Jones, S., 1998. Controls of the chemical composition of groundwater from alluvial aquifers in the Wanaka and Wakatipu basins, central Otago, New Zealand. Hydrogeology Journal 6, 264-281.
104. Ryznar J.W., 1944. An index for determining the amount of calcium carbonate scale formed by a water. J.AWWA, 36, 472.

## -S-

105. Sekiou, F. , Kellil, A., 2014. Caractérisation et classification empirique, graphique et statistique multivariable d'eaux de source embouteillées de l'Algérie.. Larhyss Journal , pp. 225-246.
106. SIDAT, 1998. Protection de périmètre agricole Hassi Khalifa contre les crues d'oued N'sa. Rapport ANRH Ouargla, 18p.
107. Slimani, R., 2006. Contribution à l'évaluation d'indicateurs de pollution environnementaux dans la région de Ouargla: cas des eaux de rejets agricoles et urbaines. Mém. Magister. Univ. de Ouargla, 91p.
108. Slimani R., 2016 - Étude qualitative des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité environnementale d'un aquifère au climat aride

méditerranéen : cas de la Cuvette de Ouargla, Algérie. Thèse de Doctorat. en agronomie saharienne. Université de Kasdi Merbah Ouargla. 164p.

- 109.** Silva-Filho, E. V., Sobral Barcellos, R. G., Emblanch, C., Blavoux, B., Sella, S. M., Daniel, M., SimLer, R., Wasserman, J. C., 2009. Groundwater chemical characterization of a Rio de Janeiro coastal aquifer, SE – Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. 27 (1), 100-108.
- 110.** SONATRACH, 2013. Document interne D.E.S – Division Exploration, 23p.
- 111.** STEWARD P., 1969 - Quotient pluviométrique et dégradation biosphérique, quelques réflexions. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, 59 : 23-36.
- 112.** Stumm, W., Morgan, J.J., 1996. *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*. 3rd Ed. New York: John Wiley and Sons, 1022p.
- 113.** Subramani, T., Rajmohan, N., Elango, L., 2010. Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environment Monitoring Assessment*. 162 (1-4), 123-137.

## -T-

- 114.** TARDAT-HENRY M, BEAUDRY J, (1984). *Chimie des eaux*, Ed. Le Griffon d'argile, INC, Québec.
- 115.** TESCO- VISITEREV., 1985-1986. Etude agro-économique, réaménagement et extension des palmeraies de la vallée de l'Oued-Righ Ed. Budapest.

## -U-

- 116.** UNESCO., 1972. Projet «ERESS», Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional. Rapport final, 7 plaquettes. Paris, 116p.

## -V-

- 117.** Varsanyi, I., Kovacs, L. O., 1994. Combination of statistical methods with modelling mineral-water interaction: a study of groundwater in the Great Hungarian Plain. *Applied Geochemistry*. 9, 419-430.

## -W-

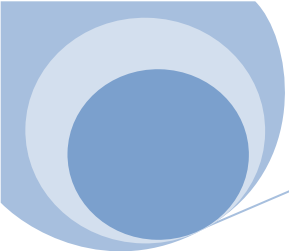
- 118.** Walter, J., 2010. Les eaux souterraines à salinité élevée du Saguenay-Lac Saint-Jean, Origines et incidences, Mémoire de maîtrise. UQAC. 177p.

## **-Y-**

- 119.**YIDANA, S.M., OPHORI, D. & BANOENG-YAKUBOB, B., 2008. A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Basin, Ghana. *Journal of Environmental Management*, 86: 80–87.

## **-Z-**

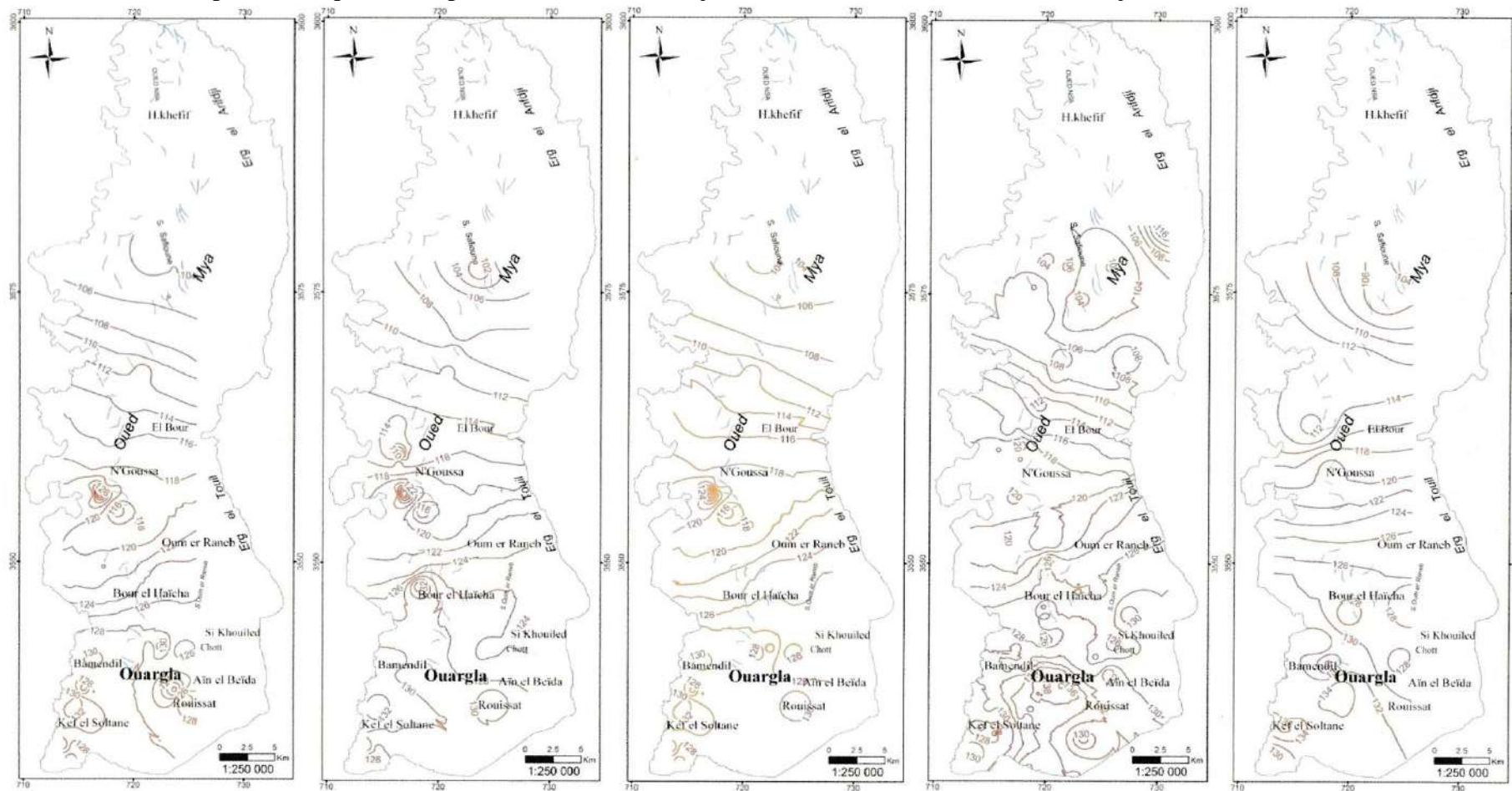
- 120.**Zeddouri, A. Caractérisation hydrogéologique et hydrochimique des nappes de complexe terminal dans la région de Ouargla Sud-Est Algérien. Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar d'Annaba, 2010, pp. 04.
- 121.**Zghibi, A., Merzougui, A., Zouhri, L., Tarhouni, J., 2014. Understanding groundwater chemistry using multivariate statistics techniques to the study of contamination in the Korba unconfined aquifer system of Cap-Bon (North-east of Tunisia). *Journal of African Earth Sciences*. 89, 1-15.
- 122.**<http://www.alnaft.gov.dz/>
- 123.** <https://www.xlstat.com>



# **Annexes et Article**

# ANNEXE I

Les cartes piézométriques correspondantes aux années : juin 1994, novembre 1998, avril 2001, juin 2003 et novembre 2007.



# Annexe II

## Matériels et mode opératoire

<i>paramètres</i>	<i>Mode opératoire</i>
<b>pH, T°</b>	étalonnage de l'appareille avec la solution tampon pH=4, pH=7 et pH= 10 ; A la fin de la mesure, rincer l'électrode avec de l'eau distillée.
<b>C.E, TDS</b>	D'une façon générale, opérer de la verrerie rigoureusement propre et rincée, avant usage, avec de l'eau distillée. Faire la mesure en prenant soin que l'électrode soit complètement immergée dans le récipient continuant de l'eau à examinée. La conductivité est donnée directement en µS/cm.
<b>TH</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>* Prendre 50 ml (25ml d'eau à analyser) et complété d'eau distillé ;</li> <li>* 4ml solution tampon PH=10 (solution de NH<sub>4</sub>Cl) ;</li> <li>* présence de l'indicateur coloré la solution ;</li> <li>* colorer en rouge foncé ou violet ;</li> <li>* titrage avec l'EDTA 0,01N ;</li> <li>* virage est atteint par la couleur Bleu royale.</li> </ul> Expression des résultats      [TH] mg/l= VEDTA x F x 20 .
<b>Ca<sup>2+</sup></b>	Prendre 50 ml d'eau à analyser ; Ajouter 2 ml de NaOH à 2 N ; Ajouter du Murexide ; Pince de HSN ; Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage (violet).    [Ca <sup>2+</sup> ] mg/l = V1 x F x 8.016.
<b>Mg<sup>2+</sup></b>	Prendre 50 ml d'eau à analyser ; Ajouter 2 ml de NH <sub>4</sub> OH (10,1 N) ; Ajouter noir eriochrome ; Et titrer avec l'E.D.T.A jusqu'au virage (bleu).    [Mg <sup>2+</sup> ] mg/l = (V2-V1) x F x 4.86.
<b>TAC</b>	Prendre 100 ml (50ml d'eau à analyser) et complété d'eau distillé. Ajouter 2 gouttes méthylorange. Et titrer avec HCL jusqu'au virage (Rouge brique).    TAC mg/l = (V-0.5) x F x 12.2
<b>Cl<sup>-</sup></b>	Prendre 100 ml (50ml d'eau à analyser) et complété d'eau distillé ; Ajouter 3 gouttes de K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> (coloration jaunâtre) ; Titrer avec Ag NO <sub>3</sub> à 0,01 N jusqu'à coloration brun rougeâtre. $\text{Cl mg/l} = \frac{V_s + C + F + f}{V_a}$
<b>SO<sub>4</sub><sup>-2</sup></b>	Introduire 100ml d'eau à analyser dans un bécher. Ajouter 5ml d'acide chlorhydrique à 10% .Chauffer jusqu'à ébullition tumultueuse en agitant constamment pour éviter les projections. Faire tomber goutte à goutte 20 ml de solution de chlorure de baryum à 10% .Prolonger l'ébullition pendant 10 minutes sans interrompre l'agitation. Laisser reposer. S'assurer que la précipitation est complète par l'addition d'une petite quantité de chlorure de baryum. Décanté le liquide surnageant encore chaud en le laissant écouler le long d'un agitateur au-dessus du filtre sans cendres. Laisse, placer sur un entonnoir de joulie .Entrainer le moins possible de précipiter au cours de cette opération. Laver le précipité resté dans le bécher avec de l'eau bouillante. Agiter. Laisser déposer 5 minutes. Décanté à nouveau sur le filtre. Pour finir, entrainer le précipité sur le filtre, en détachant, avec un agitateur muni d'un bout de caoutchouc, la parcelle de sulfate adhérant aux parois du bécher. Laver le précipité à l'eau distillée bouillante jusqu'à ce que les eaux de lavage ne précipitent plus par le nitrate

	<p>d'argent (élimination de l'excès de chlorure de baryum).</p> <p>Laver une dernière fois à l'alcool puis à l'éther. Porter le filtre et l'entonnoir à l'étuve à 500 C0 jusqu'à dessiccation complété. Renverser délicatement le filtre au-dessus d'une capsule de platine préalablement tarée après avoir été portée au rouge et refroidie dans un dessiccateur . Tapoter Légèrement le filtre pour faire tomber les particules adhérant au filtre. Saisir la pointe du filtre entre les mors d'une pince métallique et calciner au-dessus de la capsule en laissant tomber la pointe avant que la flamme ne l'atteigne. Laisser refroidir. Ajouter 2à3 gouttes d'acide nitrique. Evaporer doucement en évitant les projections, de préférence au bain-marie. Calciner .Laisser refroidir dans un dessiccateur et peser .Soit P le poids de sulfate de baryum trouvé</p> $\text{SO}_4^{-2} \text{ mg/l} = \Delta P * 4415.5$
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	<p>Prendre 40 ml d'eau à analyser ; Ajouter 4 ml du réactif Coloré I ; Ajouter 4 ml du réactif II DICHLORUSOYANURATE DE SODIUM ; Ajuster à 50 ml avec H2O distillée et attendre 1h.</p> <p>* L'apparition de la coloration verdâtre indique la présence de : NH<sub>4</sub><sup>+</sup> Effectuer la lecture à 655 nm. L'azote ammoniacal est dosé par Spectrophotomètre UV-Visible, le résultat est donné directement en mg/l.</p>
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	<p>Prendre 40 ml d'eau à analyser ; Ajouter 2 ml du réactif mixte ; Complété à 50 ml par l'eau distillée ; Attendre 20mn.</p> <p>* L'apparition de la coloration rose indique la présence des NO<sub>2</sub><sup>-</sup> , effectuer la lecture à 543 nm. lecteur direct par Spectrophotomètre UV-Visible en mg/l.</p>
NO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	<p>Prendre 10 ml de l'échantillon à analyser ; Ajouter 2 à 3 gouttes de NaOH à 30 % ; Ajouter 1 ml de salicylate de sodium ; Evaporer à sec au bain marie ou à l'étuve 75 - 88° C ; (ne pas surcharger ni surchauffer très longtemps) laisser refroidir ; Reprendre le résidu avec 2 ml H2SO4 et laisser reposer 10 mn ; Ajouter 15 ml d'eau distillée ; Ajouter 15 ml de tartrate double de sodium et de potassium puis passer au Spectromètre UV-Visible à la longueur d'onde de 415 nm.</p>
PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	<p>40 ml d'eau à analyser ; 1 ml acide ascorbique ; 2 ml du Molybdate d'acide ; Attendre 20 mn le développement de la couleur bleue.</p> <p>Effectuer la lecture à une longueur d'onde de 880 nm.</p>





Photo N°1- Spectrophotomètre



Photo N°2 - pH-mètre



Photo N°3 - Spectromètre à flamme



Photo N°4 Conductivité - mètre



Photo N°5 - Turbidimètre



Photo N°6 - Etuve à 37°C

# ANNEXE III

**Tableau 01** : Indices de saturation (Is) des minéraux des différentes nappes de la cuvette

Nom de forage	Code	Cordonnées		Indice de saturation					
		X	Y	Minéraux Cabonatéés			Minéraux évaporitiques		
				Calcite	Dolomite	Aragonite	Anhydrite	Gypsum	Halite
P001		722321	3572465	1,63	3,07	1,48	-0,05	0,1	-1,12
P002		721962	3570826	1,53	2,92	1,38	0,5	0,7	-1,85
P006		719365	3564579	1,06	2,25	0,92	-0,14	0,09	-3,55
P012		718556	3554396	1,56	3,33	1,41	0,94	1,07	-0,95
P015		720535	3552018	1,24	2,7	1,1	-0,27	-0,05	-3,55
P019		717663	3563267	1,14	2,46	0,99	0,24	0,45	-2,23
P021		723087	3574490	1,74	3,24	1,59	1,62	1,69	-0,28
P030		721870	3577548	1,56	2,85	1,42	0,97	1,13	-1,42
P041		716487	3559870	1,38	2,76	1,23	0,4	0,63	-2,89
P043		716904	3556108	1,78	3,35	1,64	0,99	1,15	-1,35
P054		716536	3552141	0,62	1,53	0,48	-0,91	-0,68	-4,95
P056		716966	3550240	0,51	1,06	0,37	-0,63	-0,4	-4,64
P057		717297	3549250	0,46	0,98	0,31	-0,66	-0,43	-4,74
P059		718295	3547517	0,74	1,56	0,59	-1	-0,78	-5,5
P064		720162	3542942	1,76	3,3	1,61	1,52	1,63	-0,6
P096		724673	3540572	1,35	2,54	1,2	0,74	0,95	-2,4
P113		714520	3535893	1,64	3,43	1,5	0,47	0,66	-1,99
P162		725073	3546440	1,23	1,97	1,08	1,94	2	-0,22
P163		725372	3545418	0,62	0,55	0,47	0,84	0,93	-0,61
PZ12		722931	3547234	1,66	3,09	1,51	0,73	0,94	-2,34
P165		722932	3547773	1,84	3,75	1,7	0,47	0,66	-2,39
P408		719930	3544999	0,71	1,53	0,57	-0,63	-0,4	-4,63
P413		722632	3530332	1,48	3,03	1,33	-0,34	-0,1	-4,07
P419		725549	3539801	1,29	3,25	1,15	-0,56	-0,34	-3,86
P422		718819	3575646	0,46	1,01	0,31	-1	-0,77	-5,4
P423		723122	3541188	1,37	2,14	1,22	2,17	2,26	-0,7
P430		730092	3567701	0,84	1,96	0,69	-0,44	-0,21	-4,23
P506		725043	3535893	1,66	3,34	1,51	-0,06	0,17	-3,69
P538		724031	3537590	1,03	1,94	0,89	-0,18	0,03	-3,04
P566		719354	3540018	1,07	2,58	0,92	-0,42	-0,19	-4,55
PL10		719690	3537362	1,06	2,32	0,91	-0,56	-0,33	-5,33
PL13		720144	3536857	0,75	1,76	0,61	-0,49	-0,27	-5,16
PL15		718688	3538269	0,79	1,86	0,65	-0,68	-0,45	-5,5
PL17		718455	3537215	1,36	3,04	1,21	-0,63	-0,4	-4,16
PL18		718926	3536540	0,21	0,23	0,07	-0,93	-0,69	-5,38
PL21		721212	3536381	1,53	3,35	1,38	-0,63	-0,4	-4,12
PL23		720894	3538726	1,39	3,01	1,24	-0,43	-0,2	-4,31

PL27	718351	3535781	1,77	3,44	1,62	0,72	0,92	-2,5
PL31	720058	3538295	0,66	1,61	0,51	-0,63	-0,4	-5,38
PL32	720114	3538785	1,51	3,26	1,37	-0,4	-0,17	-4,5
PLX1	725737	3541288	0,95	2,07	0,8	-0,61	-0,38	-4,8
PLX4	714060	3577888	0,18	0,61	0,03	-0,99	-0,75	-4,92

### Nappe du Miopliocène

KhafdjiaAEP	M1	713456	3537641	-0,03	0,08	-0,18	-0,95	-0,72	-5,3
Abattoir	M2	719098	3535802	0,23	0,6	0,08	-0,73	-0,51	-5,24
MekhadmaAEP	M3	718660	3536418	0,1	0,24	-0,05	-0,91	-0,68	-5,29
Citeuniversitaire	M4	714369	3537016	0,08	0,17	-0,06	-1,28	-1,06	-5,53
ZiaynaAEP	M5	720409	3534494	0,2	0,55	0,06	-0,76	-0,55	-4,81
SONACOB	M6	719836	3536327	0,31	0,6	0,17	-1,2	-0,98	-5,49
ABenithourAEP	M7	721773	3536319	0,11	-0,03	-0,03	-0,63	-0,4	-4,95
AinMbarek	M8	725016	3539795	0,21	0,46	0,06	-0,71	-0,47	-4,82
TimlaouineD2F52	M9	720850	3538945	1,03	1,91	0,89	-0,84	-0,64	-5,24
KouchaneD1F106	M10	718886	3540688	0,98	2	0,83	-0,96	-0,76	-5,19
BamendilIID7F7	M11	716603	3541797	0,67	1,66	0,53	-0,86	-0,67	-5,15
ITASD1F150	M12	717059	3536212	0,71	1,71	0,57	-0,95	-0,75	-5,04
BamendilAEP	M13	715835	3540943	0,56	1,37	0,42	-0,97	-0,78	-5,15
Matmoura	M14	719406	3537975	0,63	1,35	0,49	-0,9	-0,68	-5,05
ABrissD5F132	M15	725208	3539735	0,01	0,15	-0,14	-0,69	-0,46	-4,66
CeintureverteD5F111	M16	728853	3535965	0,42	0,91	0,28	-0,76	-0,55	-5,03
AINZAKINOUD5F44	M17	725252	3538830	0,61	1,29	0,47	-0,62	-0,38	-4,76
SKhouiledDairaD9F5	M18	728623	3540767	0,59	1,32	0,45	-0,84	-0,66	-5,25
SKhouiledPalmeraieD9	M19	728135	3540438	0,5	0,94	0,35	-0,79	-0,56	-5,25
AAeroportnouveau	M20	727524	3535961	0,18	0,49	0,04	-0,86	-0,64	-5,42
Stationnaftal	M21	732617	3535572	0,58	1,26	0,44	-0,83	-0,61	-5,27
GaretDiabaD9F2	M22	727984	3543181	0,48	1,05	0,34	-0,89	-0,69	-5,27
ADeglaD5F117CaidLaid	M23	725005	3536784	0,38	0,78	0,24	-0,68	-0,45	-5,21
OumRanebD6F69	M24	724638	3550577	0,31	0,67	0,17	-0,82	-0,64	-5,49
BourElHaichaD1F139	M25	720045	3545726	0,45	0,95	0,31	-1,02	-0,83	-5,46
AbazatD2F69	M26	712792	3552720	0,33	0,71	0,19	-0,77	-0,57	-5,42
HMiloudBenyaza	M27	717063	3551213	0,29	0,63	0,15	-0,93	-0,73	-5,54
BordjiD9F17	M28	721994	3548482	0,3	0,81	0,16	-0,92	-0,72	-5,27
BourElHaichaD1F134	M29	720397	3545540	0,16	0,47	0,02	-1,04	-0,84	-5,54
LaouiniD9F15	M30	719851	3549185	0,25	0,55	0,11	-1,01	-0,81	-5,52
DEBICHEAEP	M31	731151	3581579	0,48	1,05	0,34	-0,81	-0,6	-5,32
FraneAEPD6F98	M32	717451	3569368	0,35	0,62	0,21	-0,91	-0,69	-5,53
ElKoumAEPD6F40	M33	719067	3571334	0,34	0,86	0,2	-0,97	-0,76	-5,53
OglatLarbaaD6F64	M34	729379	3566530	0,26	0,21	0,12	-0,85	-0,64	-5,28
FranejeuneD6F62	M35	717154	3570195	0,23	0,56	0,08	-0,92	-0,71	-5,49
HassiEchtaAEP	M36	722250	3561576	0,27	0,77	0,13	-0,91	-0,7	-5,15
GherbouzD6F47	M37	717118	3557918	0,15	0,48	0,01	-0,93	-0,71	-4,93
HMiloudAEP	M38	717090	3547560	0,31	0,6	0,16	-1,07	-0,84	-5,52
DEBBICHEIRR	M39	728798	3581817	0,32	0,61	0,17	-1,02	-0,79	-5,26
HassiChetta	M40	721815	3551409	0,15	0,26	0	-1	-0,77	-5,06

Elkhafji3	M41	713384	3537796	0,12	0,13	-0,03	-0,86	-0,64	-5,02
D1f144Universite	M42	717843	3536207	0,17	0,42	0,03	-0,89	-0,68	-5,02
BahmidI	M43	720103	3538588	1,07	2,08	0,93	-0,87	-0,66	-5,05
ElKoum	M44	719067	3571334	0,82	1,88	0,68	-0,95	-0,75	-5,61

### Nappe du Sénonien

SARMekhadma	S1	717846	3536766	-0,1	-0,19	-0,24	-1,14	-0,92	-5,54
MekhadmaAEPI	S2	718649	3536431	-0,16	-0,01	-0,31	-1,16	-0,93	-5,26
SokraIIAEP	S3	719103	3535755	0,03	-0,07	-0,12	-0,98	-0,75	-5,46
SokraIAEP	S4	720152	3536082	0,1	0,04	-0,04	-1,08	-0,85	-5,52
HopitalD1F143	S5	720509	3538773	0,75	1,44	0,61	-1	-0,79	-5,58
GaretChemia	S6	716817	3535924	0,47	0,87	0,32	-1,03	-0,79	-5,35
IfriD1F151	S7	721073	3538896	-0,33	-0,57	-0,47	-1,19	-0,97	-5,36
IfrisilisD1F149	S8	720989	3538317	0,59	1,2	0,45	-1,3	-1,08	-5,28
Chateaudeau	S9	719672	3537843	0,38	0,91	0,24	-0,95	-0,73	-5,52
JardinCommunalD1F137	S10	720379	3537868	0,7	1,39	0,56	-1	-0,78	-5,44
Stpompachott	S11	723529	3541658	0,35	0,8	0,21	-0,85	-0,65	-5,11
CHOTTAEPNOUVEAU	S12	726462	3538937	0,3	0,75	0,16	-1,14	-0,96	-5,61
AinbaidaAEP	S13	726798	3536145	0,3	0,6	0,16	-0,92	-0,7	-5,42
GLNE1	S14	722352	3550721	0,34	0,75	0,19	-0,79	-0,57	-4,94
NgoussaEstAEP	S15	718273	3557414	0,34	0,9	0,19	-1,09	-0,87	-5,02
NgoussaElHoua	S16	719002	3556268	0,36	0,68	0,22	-0,98	-0,75	-5,26
ElBourAEP	S17	720599	3560771	0,51	1,12	0,37	-1,19	-0,98	-5,51
AinHadji	S18	719143	3538466	0,23	0,55	0,08	-1,08	-0,85	-5,6
SaidOtba	S19	720110	3540271	0,46	1,13	0,32	-1,04	-0,84	-5,74
Nakhil	S20	721816	3551406	0,71	1,65	0,57	-0,97	-0,75	-5,44
Ainmoussa02	S21	719540	3549621	0,21	0,66	0,07	-1	-0,78	-5,36
SidiKhouiled01	S22	728290	3540918	0,54	1,29	0,39	-0,87	-0,64	-5,23
D1f123MKhadmaI	S23	718649	3536431	0,59	1,15	0,44	-0,94	-0,72	-5,1
D4F95BeniThourI	S24	721663	3536305	0,74	1,4	0,6	-0,91	-0,68	-5,03
D1F128LalaMimouna	S25	719484	3537598	0,57	1,07	0,43	-1,02	-0,82	-5,46
D1F140GaraNord	S26	721914	3538171	0,84	1,89	0,7	-0,99	-0,8	-5,54
D9F12SidiKhouiled	S27	729072	3540859	0,98	2,1	0,84	-0,83	-0,64	-5,18
GherbouziaEPD1F124	S28	718706	3538417	0,41	0,93	0,26	-0,95	-0,72	-5,62

### Nappe du l'Albien

Ziayna	A2	720419	3534481	0,76	1,73	0,63	-0,92	-0,88	-5,6
ElHdebII	A4	724289	3534309	0	0,06	-0,13	-0,98	-0,89	-5,52
ElHdebI	A3	723985	3534749	0,05	0,3	-0,07	-0,89	-0,84	-5,53
AlbienElKhafdj	A1	713026	3538135	0,06	-0,14	-0,06	-0,61	-0,52	-5,25
ElHDeb03	A5	724297	3534871	-0,01	0,16	-0,13	-0,82	-0,77	-5,49
AlbienAinElBaida	A6	726783	3536593	0,38	0,97	0,25	-1,29	-1,21	-5,31

# ANNEXE IV

Tableau 1. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimique des eaux de la nappe du l'Albien.

Variabes	Cl	NO3	SO4	HCO3	Na	K	Mg	Ca	TDS	T°C	pH
Cl	1	-0,406	-0,256	-0,419	0,516	-0,181	-0,394	0,436	-0,032	-0,644	0,217
NO3		1	-0,166	0,728	-0,707	-0,041	0,043	-0,406	-0,348	0,155	0,573
SO4			1	-0,159	0,615	0,887	-0,457	0,749	0,956	-0,060	-0,570
HCO3				1	-0,552	0,206	0,520	-0,388	-0,239	0,674	0,759
Na					1	0,575	-0,547	0,928	0,802	-0,421	-0,440
K						1	-0,251	0,722	0,898	0,167	-0,168
Mg							1	-0,708	-0,497	0,888	0,349
Ca								1	0,876	-0,489	-0,341
TDS									1	-0,137	-0,524
T°C										1	0,250
pH											1

Tableau 2. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimique des eaux de la nappe du Sénonien.

Variabes	Cl	NO3	SO4	HCO3	Na	K	Mg	Ca	TDS	T°C	pH
Cl	1	0,221	0,238	0,200	0,886	0,602	0,519	0,696	0,800	-0,060	-0,075
NO3		1	0,382	-0,009	0,422	0,049	0,151	0,291	0,195	0,199	0,394
SO4			1	-0,040	0,438	0,015	0,536	0,277	0,464	0,163	0,394
HCO3				1	0,119	-0,280	0,315	0,299	0,278	-0,018	-0,545
Na					1	0,599	0,577	0,710	0,806	-0,086	0,075
K						1	0,163	0,497	0,560	-0,233	0,098
Mg							1	0,422	0,688	-0,040	-0,117
Ca								1	0,843	-0,088	-0,071
TDS									1	-0,123	-0,059
T°C										1	0,308
pH											1

Tableau 3. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimique des eaux de la nappe du Miopliocène.

Variabes	Cl	NO3	SO4	HCO3	Na	K	Mg	Ca	TDS	T°C	pH
Cl	1	-0,042	0,619	-0,006	0,703	0,808	0,760	0,844	0,878	-0,371	-0,190
NO3		1	0,072	0,145	-0,231	-0,045	0,069	0,124	-0,023	0,312	-0,155
SO4			1	0,041	0,573	0,705	0,616	0,602	0,625	-0,273	-0,064
HCO3				1	-0,076	-0,012	0,097	0,102	0,148	0,103	-0,078
Na					1	0,769	0,491	0,446	0,572	-0,306	-0,002
K						1	0,640	0,745	0,734	-0,269	-0,172
Mg							1	0,735	0,860	-0,195	-0,231
Ca								1	0,897	-0,315	-0,290
TDS									1	-0,355	-0,211
T°C										1	0,225
pH											1

Tableau 4. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimique des eaux de la nappe du Phréatique.

Variables	Cl	NO3	SO4	HCO3	Na	K	Mg	Ca	TDS	T°C	pH
Cl	1	-0,210	0,475	-0,333	0,952	0,817	0,694	0,948	0,893	-0,284	-0,749
NO3		1	-0,153	-0,208	-0,201	-0,173	-0,222	-0,217	-0,241	-0,087	-0,054
SO4			1	-0,121	0,661	0,732	0,322	0,666	0,651	0,021	-0,491
HCO3				1	-0,290	-0,311	-0,197	-0,332	-0,272	0,089	0,354
Na					1	0,871	0,567	0,928	0,912	-0,284	-0,745
K						1	0,404	0,889	0,871	-0,166	-0,771
Mg							1	0,722	0,610	-0,103	-0,340
Ca								1	0,909	-0,215	-0,769
TDS									1	-0,167	-0,706
T°C										1	0,263
pH											1

Tableau 5. Matrice de corrélation des paramètres physico-chimique des eaux globales.

Variables	Cl	NO3	SO4	HCO3	Na	K	Mg	Ca	TDS	T°C	pH
Cl	1	-0,331	0,565	-0,057	0,962	0,848	0,763	0,960	0,917	-0,241	-0,131
NO3		1	-0,268	-0,257	-0,324	-0,286	-0,349	-0,337	-0,370	0,119	-0,204
SO4			1	0,063	0,717	0,772	0,447	0,722	0,712	-0,164	-0,060
HCO3				1	-0,031	-0,075	0,064	-0,050	0,023	-0,188	0,277
Na					1	0,893	0,664	0,943	0,930	-0,236	-0,134
K						1	0,520	0,906	0,889	-0,196	-0,180
Mg							1	0,787	0,711	-0,236	0,065
Ca								1	0,930	-0,236	-0,135
TDS									1	-0,253	-0,078
T°C										1	-0,291
pH											1

Tableau 6. Les valeurs propres des facteurs.

Albien	F1	F2	F3	F4	Sénonien	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	5,527	2,722	1,566	1,146	Valeur propre	4,562	2,053	1,511	0,876
Variabilité (%)	50,246	24,741	14,239	10,417	Variabilité (%)	41,470	18,662	13,733	7,964
% cumulé	50,246	74,987	89,225	99,642	% cumulé	41,470	60,132	73,864	81,829
Miopliocène	F1	F2	F3	F4	Phréatique	F1	F2	F3	F4
Valeur propre	5,408	1,505	1,103	0,905	Valeur propre	6,334	1,355	0,993	0,848
Variabilité (%)	49,164	13,679	10,031	8,225	Variabilité (%)	57,579	12,318	9,028	7,710
% cumulé	49,164	62,843	72,874	81,099	% cumulé	57,579	69,897	78,925	86,635

Tableau 7. Vecteurs propres des variables.

Albien	F1	F2	F3	F4	Sénonien	F1	F2	F3	F4
Cl	0,146	-0,430	0,321	-0,427	Cl	0,414	-0,080	0,116	0,193
NO3	-0,242	0,196	0,464	0,450	NO3	0,175	0,390	-0,195	0,353
SO4	0,326	0,367	-0,028	0,173	SO4	0,237	0,359	-0,317	-0,497
HCO3	-0,269	0,377	0,341	-0,150	HCO3	0,108	-0,426	-0,515	0,238
Na	0,397	-0,029	0,016	-0,327	Na	0,437	0,057	0,077	0,073
K	0,254	0,461	0,168	-0,135	K	0,281	0,013	0,581	0,084
Mg	-0,310	0,164	-0,335	-0,428	Mg	0,329	-0,066	-0,309	-0,446
Ca	0,400	0,062	0,229	-0,138	Ca	0,394	-0,089	0,023	0,250
TDS	0,371	0,296	0,007	-0,027	TDS	0,443	-0,081	-0,008	-0,078
T°C	-0,231	0,410	-0,278	-0,331	T°C	-0,044	0,337	-0,361	0,502
pH	-0,268	0,009	0,543	-0,353	pH	0,007	0,629	0,112	-0,048
Miopliocène	F1	F2	F3	F4	Phréatique	F1	F2	F3	F4
Cl	0,402	-0,033	0,023	-0,038	Cl	0,378	0,014	-0,157	0,144
NO3	-0,013	0,652	0,122	-0,432	NO3	-0,082	0,684	0,248	-0,113
SO4	0,331	0,014	0,211	-0,061	SO4	0,276	-0,174	0,381	-0,382
HCO3	0,024	0,446	0,019	0,858	HCO3-	-0,145	-0,503	-0,286	-0,534
Na	0,318	-0,300	0,219	0,021	Na	0,382	-0,009	-0,053	-0,084
K	0,381	-0,063	0,139	-0,079	K	0,365	-0,002	0,167	-0,235
Mg	0,362	0,163	0,046	-0,008	Mg	0,261	-0,165	-0,218	0,585
Ca	0,381	0,178	-0,074	-0,039	Ca	0,391	-0,037	-0,015	0,074
TDS	0,401	0,085	-0,017	0,113	TDS	0,375	-0,085	0,023	-0,012
T°C	-0,181	0,366	0,557	-0,138	T°C	-0,100	-0,386	0,776	0,287
pH	-0,110	-0,285	0,745	0,179	pH	-0,321	-0,252	-0,076	0,206



Tableau 8. Coordonnées des variables.

Albien	F1	F2	F3	F4	Sénonien	F1	F2	F3	F4
Cl	0,344	-0,709	0,402	-0,457	Cl	0,884	-0,114	0,142	0,180
NO3	-0,569	0,323	0,580	0,482	NO3	0,374	0,559	-0,240	0,331
SO4	0,767	0,606	-0,035	0,185	SO4	0,505	0,514	-0,390	-0,465
HCO3-	-0,633	0,622	0,427	-0,161	HCO3	0,232	-0,611	-0,633	0,223
Na	0,933	-0,047	0,020	-0,350	Na	0,932	0,082	0,094	0,069
K	0,598	0,760	0,210	-0,144	K	0,600	0,018	0,714	0,078
Mg	-0,729	0,271	-0,420	-0,458	Mg	0,702	-0,095	-0,380	-0,417
Ca	0,941	0,102	0,286	-0,148	Ca	0,841	-0,127	0,028	0,234
TDS	0,872	0,488	0,009	-0,029	TDS	0,946	-0,116	-0,010	-0,073
T°C	-0,543	0,677	-0,348	-0,355	T°C	-0,094	0,483	-0,443	0,470
pH	-0,629	0,015	0,679	-0,377	pH	0,016	0,901	0,137	-0,045
Miopliocène	F1	F2	F3	F4	Phréatique	F1	F2	F3	F4
Cl	0,936	-0,040	0,024	-0,036	Cl	0,950	0,016	-0,157	0,132
NO3	-0,030	0,800	0,128	-0,411	NO3	-0,207	0,797	0,248	-0,104
SO4	0,770	0,017	0,221	-0,058	SO4	0,695	-0,203	0,380	-0,352
HCO3	0,055	0,547	0,020	0,816	HCO3	-0,364	-0,586	-0,285	-0,492
Na	0,738	-0,368	0,230	0,020	Na	0,962	-0,010	-0,053	-0,077
K	0,887	-0,078	0,146	-0,075	K	0,918	-0,002	0,166	-0,216
Mg	0,842	0,200	0,049	-0,007	Mg	0,657	-0,192	-0,217	0,539
Ca	0,886	0,218	-0,078	-0,038	Ca	0,983	-0,043	-0,015	0,068
TDS	0,932	0,104	-0,018	0,108	TDS	0,944	-0,099	0,023	-0,011
T°C	-0,421	0,449	0,585	-0,132	T°C	-0,252	-0,449	0,773	0,264
pH	-0,255	-0,349	0,782	0,170	pH	-0,808	-0,294	-0,076	0,190