

**République algérienne démocratique et populaire**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA**



**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et des Sciences de la Terre et de l'Univers**

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

## **Mémoire**

**Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de**

**MAGISTER**

**En géologie**

**Spécialité: Géosciences et environnement**

**Option: Géochimie de surface**

**Par : HOUARI Idir Menad**

## **THEME**

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EVOLUTION  
GEOCHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE DU COMPLEXE  
TERMINAL DU SAHARA SEPTENTRIONAL**

**Soutenu publiquement devant le jury composé de:**

Dr. IDDER T.	M.C.A	Université de Ouargla	Président
Dr. DJIDEL M.	M.C.A	Université de Ouargla	Examineur
Dr. HACINI M.	M.C.A	Université de Ouargla	Examineur
Dr. NEZLI I.	M.C.A	Université de Ouargla	Promoteur

**Année universitaire 2011/2012**

# *Dédicace*

Je dédie ce modeste travail, à tous ceux qui ont une place particulière dans mon cœur :

A mon très cher père

A ma très chère mère

A mon adorable sœur El-Kahina et mes chers frères: Samir et sa femme Naima, Jugurtha et Massinissa

A mes amis(es) intimes: Mohamed, Laïd, Lotfi, Hamza, Abdelkarim, Krimou, Miloud, Miloud et Hamid

A tous mes amis(es) sans exception

A mes collègues de Magistère

A tous les étudiants(es) et enseignants (es) de Géologie de l'université de Ouargla

A tous ceux qui sont animé par l'amour du savoir et de la recherche et dans le but essentiel est d'aider l'humanité.

## *Remerciements*

Je tiens avant tout à remercier ALLAH le tout puissant, le tout miséricordieux qui, grâce à sa protection et sa bienveillance, il m'est permis d'acquérir le savoir et d'arriver à ce niveau.

Au terme de ce travail, il est de mon devoir de remercier vivement et chaleureusement tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste mémoire. Je dois remercier particulièrement:

Le Dr. NEZLI Imed Eddine, pour son encadrement scientifique, son appui, ses conseils et ses orientations tout au long de ce travail. Je lui adresse ici mes vifs remerciements et ma reconnaissance.

Le Dr. IDDER Tahar, qui m'a fait l'honneur de présider le jury. Le Dr. DJIDEL Mohamed et le Dr. HACINI Messaoud qui ont bien voulu faire parti du jury. Qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Ma profonde gratitude ira aussi à Madame BECHICH, Mr LACHELILI, Mr SAKHRI, Mr HOSNI, Mr MESSAOUDI, Mr CHENNITI, Mlle ATTAB et toute l'équipe du laboratoire de corrosion (Haoud Berkaoui) pour leur accueil chaleureux et leur aide précieuse.

Mes vifs remerciements iront aussi à Mr ARIF, Mesdames MESSAOUDI, ZERROUKI et KENNOUCH et toute l'équipe du laboratoire de l'ANRH de Ouargla pour m'avoir aidé à effectuer les analyses d'eaux.

Ma reconnaissance la plus sincère va également au Pr. OUELD EL HADJ, Mlle BOUGHABA et l'ensemble du staff du laboratoire de protection des écosystèmes en zones arides et semi-arides, Université de Ouargla, pour leur accueil et aide. Qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde gratitude.

Toute ma gratitude à Mr BEGGARI, Madame IDDER, et l'équipe du laboratoire pédagogique de la faculté des sciences de la nature et de la vie et des sciences de la Terre et de l'univers, Université de Ouargla, qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Je tiens aussi à exprimer ma vive reconnaissance à ma sœur Kahina, Maître Assistant A à l'Université de Ouargla, pour son appui moral et son aide matérielle le long de la réalisation de ce travail.

Et enfin, je tiens à remercier toute ma famille pour leur soutien moral et leur compréhension durant toute la réalisation de ce travail.

# *Table des matières*

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## **Première partie : Généralités sur la zone d'étude**

### **Chapitre I: Cadre physique**

I.1	Introduction.....	3
I.2	Cadre géographique de la zone d'étude.....	3
I.3	Synthèse climatique sur la région.....	3
I.3.1	Température.....	4
I.3.2	Evaporation.....	5
I.3.3	Précipitation.....	8
I.4	Réseau hydrographique.....	10
I.4.1	Oued M'ya .....	10
I.4.2	Oued Rhir .....	10
I.4.3	Les oueds de la dorsale du M'zab.....	10
I.5	Unités géomorphologiques et topographie.....	12
I.6	Conclusion.....	13

### **Chapitre II : Contexte géologique**

II.1	Introduction.....	14
II.2	Cadre géologique de la région.....	14
II.2.1	Structure géologique du bassin oriental.....	14
II.2.2	Lithostratigraphie.....	16
II.3	Tectonique régionale.....	18
II.4	Paléogéographie.....	18
II.5	Conclusion.....	20

### **Chapitre III : Contexte hydrogéologique**

III.1	Introduction.....	21
III.2	Le Continental Intercalaire (CI).....	21
III.3	Le Complexe Terminal (CT).....	23
III.4	Conclusion.....	26

### **Chapitre IV : Matériels et méthodes**

IV.1	Introduction.....	27
IV.2	Traitement des données géologiques.....	27
IV.3	Prélèvement des échantillons.....	27
IV.3.1	Echantillons de roche.....	27
IV.3.1.1	Echantillons pour analyse par diffraction X.....	27
IV.3.1.2	Echantillons pour fabrication des lames minces.....	28
IV.3.2	Echantillons d'eaux.....	28
IV.3.2.1	Mesures In Situ.....	29

IV.3.2.1.1	Le pH et T°.....	29
IV.3.2.1.2	La conductivité électrique (CE).....	29
IV.3.2.2	Analyses au laboratoire.....	29
IV.3.2.2.1	Par spectrophotométrie.....	29
IV.3.2.2.2	Par photométrie de flamme.....	29
IV.3.2.2.3	Par titrimétrie.....	30
IV.3.2.2.4	Par complexométrie.....	31
IV.4	Outil informatique.....	31
IV.4.1	RockWorks 15.....	31
IV.4.2	Match! 2.....	31
IV.4.3	Statistica 6.1.....	31
IV.4.4	Phreeqi 2.18.....	32
IV.4.5	Diagramme 5.1.....	32
IV.4.6	Surfer 9.....	32
IV.5	Les concepts utilisés dans la modélisation géochimiques des eaux.....	32
IV.5.1	L'activité et le coefficient d'activité.....	32
IV.5.1.1	L'activité ionique.....	32
IV.5.1.2	Le coefficient d'activité.....	33
IV.5.1.3	La force ionique I.....	33
IV.5.1.4	L'activité de l'eau.....	34
IV.5.2	Equilibre minéraux solutions.....	35
IV.6	Conclusion.....	36

## **Deuxième partie : Résultats et discussion**

### **Chapitre V : Reconnaissance géologique et minéralogique**

V.1	Introduction.....	37
V.2	Reconnaissance géologique de la région.....	37
V.2.1	Emplacement des forages et directions des coupes.....	39
V.2.1.1	Région de Ouargla.....	39
V.2.1.2	Région de Touggourt.....	39
V.2.1.3	Région d'El Oued (Djamaa, Mghaier et Still).....	39
V.2.1.4	Région d'étude.....	39
V.2.2	Description des coupes géologiques.....	41
V.2.2.1	Région de Ouargla.....	41
V.2.2.2	Région de Touggourt.....	42
V.2.2.3	Région de Souf.....	43
V.2.2.4	Synthèse des données géologiques de la zone d'étude.....	44
V.2.3	Interprétation des spectres de diffractométrie des rayons X.....	45
V.2.4	Description des lames minces.....	49
V.3	Conclusion.....	50

### **Chapitre VI : Hydrochimie et évolution géochimique des eaux**

VI.1	Introduction.....	51
VI.2	Présentation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux.....	51
VI.2.1	Le potentiel hydrogène (pH).....	51
VI.2.2	La température (°C).....	52

VI.2.3	La conductivité électrique CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).....	52
VI.2.4	Les sulfates $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l).....	52
VI.2.5	Les chlorures $\text{Cl}^-$ (mg/l).....	53
VI.2.6	Les bicarbonates $\text{HCO}_3^-$ (mg/l).....	53
VI.2.7	Les nitrates $\text{NO}_3^-$ (mg/l).....	54
VI.2.8	Les nitrites $\text{NO}_2^-$ (mg/l).....	54
VI.2.9	Le calcium $\text{Ca}^{2+}$ (mg/l).....	54
VI.2.10	Le magnésium $\text{Mg}^{2+}$ (mg/l).....	55
VI.2.11	Le sodium $\text{Na}^+$ (mg/l).....	55
VI.2.12	Le potassium $\text{K}^+$ (mg/l).....	56
VI.2.13	Le fer total Fe (mg/l).....	56
VI.3	Analyse statistique des paramètres physico-chimiques.....	57
VI.3.1	Corrélations entre les paramètres physico-chimiques.....	57
VI.3.2	Classification des variables (éléments chimiques).....	57
VI.3.3	Classification des observations (forages par régions).....	59
VI.4	Caractéristiques hydrochimiques des eaux de la région.....	60
VI.4.1	Les paramètres physiques (CE, pH et $T^\circ$ ).....	60
VI.4.2	Les anions majeurs.....	61
VI.4.3	Les cations majeurs.....	62
VI.4.4	Les ions mineurs.....	62
VI.5	Faciès chimiques des eaux.....	63
VI.6	Origine des éléments chimiques.....	68
VI.6.1	Origine des chlorures et du sodium.....	68
VI.6.2	Origine des sulfates, du magnésium et du calcium.....	68
VI.6.3	Origine du potassium et des bicarbonates.....	72
VI.7	Evolution du chimisme.....	72
VI.7.1	Détermination du facteur de concentration (Fc).....	72
VI.7.2	Evolution des paramètres physico-chimiques par rapport au facteur de concentration.....	72
VI.7.2.1	La conductivité électrique.....	72
VI.7.2.2	Les sulfates.....	73
VI.7.2.3	Les bicarbonates.....	74
VI.7.2.4	Le sodium.....	74
VI.7.2.5	Le calcium.....	76
VI.7.2.6	Le magnésium.....	76
VI.7.2.7	Le potassium.....	77
VI.8	Equilibres Sels/solutions et évolution géochimique des eaux de la nappe.....	78
VI.8.1	Evolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux prépondérants.....	78
VI.8.2	Evolution des indices de saturation par rapport au facteur de concentration (Fc).....	81
VI.8.2.1	La saturation vis-à-vis des minéraux sulfatés.....	81
VI.8.2.2	La saturation vis-à-vis de la halite.....	81
VI.8.2.3	La saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés.....	82
VI.9	Influence des argiles sur le chimisme des eaux.....	83
VI.9.1	Echanges de base.....	83
VI.9.2	Dissolution des minéraux alcalins.....	84
VI.10	Conclusion.....	85

Conclusion générale..... 87

## Liste des figures et des photos

### Première partie : Généralités sur la zone d'étude

#### Chapitre I: Cadre physique

Figure I.1	Localisation de la zone d'étude.....	3
Figure I.2	Température mensuelle moyenne dans la région de Ouargla (1996-2009)....	4
Figure I.3	Température mensuelle moyenne dans la région de Touggourt (1990-2010).	5
Figure I.4	Température mensuelle moyenne dans la région de Souf (1997-2009).....	5
Figure I.5	Evaporation mensuelle moyenne dans la région de Ouargla (1996-2009).....	6
Figure I.6	Evaporation mensuelle moyenne dans la région de Touggourt (1990-2010)..	7
Figure I.7	Evaporation mensuelle moyenne dans la région de Souf (1997-2009).....	7
Figure I.8	Précipitations mensuelles moyennes dans la région de Ouargla (1996-2009)	8
Figure I.9	Précipitations mensuelles moyennes dans la région de Touggourt (1990-2010).....	9
Figure I.10	Précipitations mensuelles moyennes dans la région de Souf (1997-2009)....	9
Figure I.11	Vallée de l'oued Rhir.....	11
Figure I.12	Réseau hydrographique dans la région d'étude.....	11

#### Chapitre II : Contexte géologique

Figure II.1	Les grandes unités géologiques au Sahara.....	15
Figure II.2	Coupe hydrogéologique transversale du « CT ».....	16
Figure II.3	Colonne chronostratigraphique synthétique du Sahara septentrional algérien.....	16

#### Chapitre III : Contexte hydrogéologique

Figure III.1	Extension géographique du système aquifère CI et CT.....	21
Figure III.2	Coupe hydrogéologique de SASS.....	22
Figure III.3	Carte piézométrique de référence du CI.....	23
Figure III.4	Coupe hydrogéologique transversale du CT.....	25
Figure III.5	Carte piézométrique de référence du CT.....	25

#### Chapitre IV : Matériels et méthodes

Figure IV.1	Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau.....	28
Figure IV.2	Courbe d'étalonnage du Sodium (Na).....	30
Figure IV.3	Courbe d'étalonnage du Potassium (K).....	30

### Deuxième partie : Résultats et discussion

#### Chapitre V : Reconnaissance géologique et minéralogique

Figure V.1	Carte des affleurements géologiques de la zone d'étude.....	37
Photo 1	Le plateau de Ouargla.....	38
Photo 2	Les argiles d'El Goug.....	38
Photo 3	Les argiles et limons de Blidet Amor.....	38



Photo 4	Dépôts sableux à petits galets.....	39
Figure V.2	Carte des emplacements des forages et directions des coupes (Ouargla et Touggourt).....	40
Figure V.3	Carte des emplacements des forages et directions des coupes (El Oued et zone d'étude).....	40
Figure V.4	Coupe géologique de la région de Ouargla.....	42
Figure V.5	Coupe géologique de la région de Touggourt.....	43
Figure V.6	Coupe géologique de la région d'El Oued.....	44
Figure V.7	Coupe géologique synthétique de la zone d'étude.....	45
Figure V.8	Carte des emplacements des points d'échantillonnage.....	45
Figure V.9	Spectre de diffraction et minéraux présents (Ouargla).....	46
Figure V.10	Spectre de diffraction et minéraux présents (Touggourt).....	46
Figure V.11	Spectre de diffraction et minéraux présents (Djamaa).....	47
Figure V.12	Spectre de diffraction et minéraux présents (Mghaier).....	47
Figure V.13	Spectre de diffraction et minéraux présents (Oum Tior).....	48
Figure V.14	Spectre de diffraction et minéraux présents (Still).....	48
Figure V.15	Profil géologique du lieu d'échantillonnage (Sebkha d'El Khafdji).....	49
Figure V.16	Echantillons B1 (droite) et B3 (gauche) sous microscope polarisant en LPA	50

### **Chapitre VI : Hydrochimie et évolution géochimique des eaux**

Figure VI.1	Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables (éléments chimiques).....	58
Figure VI.2	Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations (forages)	59
Figure VI.3	Carte de conductivité électrique des eaux de la zone d'étude.....	60
Figure VI.4	Evolution des anions majeurs.....	61
Figure VI.5	Evolution des cations majeurs.....	62
Figure VI.6	Evolution des ions mineurs.....	63
Figure VI.7	Faciès chimiques des eaux du Mio-Pliocène du Sahara septentrional.....	64
Figure VI.8	La relation Na/Ca vs SO <sub>4</sub> /Cl.....	65
Figure VI.9	La relation Na/Mg vs SO <sub>4</sub> /Cl.....	66
Figure VI.10	La relation Mg/Ca vs SO <sub>4</sub> /Cl.....	66
Figure VI.11	La relation Ca vs SO <sub>4</sub> .....	67
Figure VI.12	La relation Cl vs Na.....	67
Figure VI.13	La relation Na vs Cl.....	68
Figure VI.14	La relation Ca/HCO <sub>3</sub> vs Na/Cl.....	69
Figure VI.15	La relation Ca/SO <sub>4</sub> vs Na/Cl.....	70
Figure VI.16	La relation Mg/HCO <sub>3</sub> vs Na/Cl.....	71
Figure VI.17	La relation Mg/SO <sub>4</sub> vs Na/Cl.....	71
Figure VI.18	La relation entre le facteur de concentration (Fc) et la conductivité.....	73
Figure VI.19	L'évolution des sulfates par rapport au facteur de concentration.....	74
Figure VI.20	L'évolution des bicarbonates par rapport au facteur de concentration.....	75
Figure VI.21	L'évolution du sodium par rapport au facteur de concentration.....	75
Figure VI.22	L'évolution du calcium par rapport au facteur de concentration.....	76
Figure VI.23	L'évolution du magnésium par rapport au facteur de concentration.....	77
Figure VI.24	L'évolution du potassium par rapport au facteur de concentration.....	78
Figure VI.25	L'évolution de l'indice de saturation de la halite (gauche), du gypse (centre) et de l'anhydrite (droite) dans les eaux du MP du Sahara septentrional.....	79

Figure VI.26	L'évolution de l'indice de saturation de la calcite (gauche), la dolomite (centre) et du CO <sub>2</sub> dissous (droite) dans les eaux du MP du Sahara septentrional.....	80
Figure VI.27	L'évolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux sulfatés en fonction du facteur de concentration.....	81
Figure VI.28	L'évolution des indices de saturation vis-à-vis de la halite en fonction du facteur de concentration Fc.....	82
Figure VI.29	L'évolution des indices de saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés en fonction du facteur de concentration Fc.....	83
Figure VI.30	La relation entre (Ca+Mg-HCO <sub>3</sub> -SO <sub>4</sub> ) et (Na+K-Cl) dans les eaux du Mio-Pliocène.....	84
Figure VI.31	L'évolution du rapport K/Cl.....	85
Figure VI.32	Correlations entre minéraux et indices de saturation .....	86

## **Liste des tableaux**

### **Chapitre I: Cadre physique**

Tableau I.1	Température moyenne mensuelle (°C) dans la région de Ouargla, période 1996 – 2009.....	4
Tableau I.2	Températures moyennes mensuelles (°C) dans la région de Touggourt, période 1990 – 2010.....	4
Tableau I.3	Températures moyennes mensuelles (°C) dans la région de Souf, période 1997 – 2009.....	5
Tableau I.4	Evaporation moyenne mensuelle (mm) dans la région de Ouargla, période 1996 – 2009.....	6
Tableau I.5	Evaporation moyenne mensuelle (mm) dans la région de Touggourt, période 1990 – 2010.....	6
Tableau I.6	Evaporation moyenne mensuelle (mm) dans la région de Souf, période 1997 – 2009.....	7
Tableau I.7	Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Ouargla, période 1996 – 2009.....	8
Tableau I.8	Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Touggourt, période 1990 – 2010.....	8
Tableau I.9	Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Souf, période 1997– 2009.....	9

### **Chapitre IV : Matériels et méthodes**

Tableau IV.1	Valeurs des coefficients A, B et C en fonction de la température.....	34
Tableau IV.2	Valeurs du coefficient $a^\circ$ pour les ions majeurs $a^\circ$ .....	34
Tableau IV.3	Solubilité des différents sels dans l'eau à 20° C.....	36

### **Chapitre VI : Hydrochimie et évolution géochimique des eaux**

Tableau VI.1	Variations du pH selon les régions.....	51
Tableau VI.2	Variations de la température selon les régions.....	52
Tableau VI.3	Variations des conductivités électriques selon les régions.....	52
Tableau VI.4	Variations des concentrations des sulfates selon les régions.....	53
Tableau VI.5	Variations des concentrations des chlorures selon les régions.....	53
Tableau VI.6	Variations des concentrations des bicarbonates selon les régions.....	54
Tableau VI.7	Variations des concentrations des nitrates selon les régions.....	54
Tableau VI.8	Variations des concentrations des nitrites selon les régions.....	54
Tableau VI.9	Variations des concentrations du calcium selon les régions.....	55
Tableau VI.10	Variations des concentrations du magnésium selon les régions.....	55
Tableau VI.11	Variations des concentrations du sodium selon les régions.....	56
Tableau VI.12	Variations des concentrations du potassium selon les régions.....	56
Tableau VI.13	Variations des concentrations du fer selon les régions.....	56
Tableau VI.14	Matrice de corrélation des éléments chimiques.....	58

## *Liste des abréviations*

<b>ANRH</b>	Agence Nationale des Ressources Hydriques
<b>BRL</b>	Bas Rhône Languedoc (bureau d'étude français)
<b>CI</b>	Continental Intercalaire
<b>CT</b>	Complexe Terminal
<b>DHW</b>	Direction de l'hydraulique de la Wilaya
<b>EDTA</b>	Ethylène diamine tétracétique acide
<b>ERESS</b>	Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional
<b>HBA</b>	Hassi Ben Abdallah
<b>LPA</b>	Lumière Polarisée Analyisée
<b>MP</b>	Mio-Pliocène
<b>NPK</b>	Azote, Phosphore, Potassium
<b>OMS</b>	Organisation Mondiale de la Santé
<b>ONM</b>	Office National de Météorologie
<b>OSS</b>	Observation du Sahara et du Sahel
<b>SASS</b>	Système Aquifère du Sahara Septentrional
<b>WEC</b>	Well Evaluation Conference

## **CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE DU COMPLEXE TERMINAL DU SAHARA SEPTENTRIONAL**

### *Résumé*

Les ressources en eaux souterraines dans le Sahara Septentrional sont représentées par deux grands systèmes aquifères superposés : le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). Les eaux issues de ces nappes aquifères posent de sérieux problèmes de qualité physico-chimique, elles sont fortement minéralisées et très dures.

Le présent travail a pour objectif de décrire l'évolution hydrogéochimique des eaux de la nappe des sables (Mio-Pliocène) du Complexe Terminal de l'amont vers l'aval, par la recherche de la relation entre la composition chimique des eaux et la nature lithologique des formations aquifères traversées. L'utilisation des chlorures comme facteur de concentration permet de suivre cette évolution et déterminer l'origine du chimisme et l'ordre de précipitation des minéraux prépondérants.

Les résultats obtenus montrent que le chimisme est gouverné essentiellement par la dissolution des formations évaporitiques qui confère aux eaux une minéralisation excessive, de fortes concentrations en sulfates, chlorures et en sodium qui évoluent le long du sens présumé d'écoulement des eaux.

**Mots clés :** Sahara Septentrional, évolution géochimique, hydrochimie, Mio-Pliocène, facteur de concentration.

**CONTRIBUTION OF THE STUDY OF WATER'S GEOCHEMICAL  
EVOLUTION OF COMPLEX TERMINAL GROUNDWATER IN THE  
SEPTENTRIONAL SAHARA**

*Abstract*

The groundwater resources in the Northern Sahara are represented by two superimposed major aquifer systems : the Continental Intercalaire (CI) and the Complexe Terminal (CT). The waters of these aquifers pose a serious physical and chemical quality problems ,they are highly mineralized and very hard.

The present work aims to describe the water's hydrogeochemical evolution of sand groundwater (Mio-Pliocene) of the Complexe Terminal from upstream to downstream, by the research of the relationship between water's chemical composition and lithology of aquifer formations through. The using of chlorides as concentration factor has allowed to follow this evolution and determine the origin of the water's chemistry and the precipitation order of predominate minerals.

The results obtained show that the water's chemistry is essentially governed by the dissolution of evaporite formations which gives to waters an excessive mineralization expressed by high concentrations of sulfates, chlorides and sodium that evolve along the presumed direction of waters flow.

**Key words :** Septentrional Sahara, geochemical evolution, hydrochemistry, Mio-Pliocène, concentration factor.

# *Introduction générale*

## **Introduction générale**

La compréhension des mécanismes par lesquels les eaux souterraines acquièrent leur composition chimique est devenue depuis quelques années un enjeu important et vital pour la protection et la gestion de notre environnement. Dans le sud algérien, les réserves utilisables représentent des volumes impressionnants. Mais leur utilisation reste limitée du fait de problèmes d'exploitation liés aux difficultés d'accès aux aquifères ainsi qu'à la médiocrité de leur qualité physico-chimique. La région Est du Sahara septentrional est particulièrement concernée par ces problèmes. Divers travaux antérieurs ont en effet mis en exergue que les eaux souterraines de cette région présentaient une salinité importante, surtout les eaux du complexe terminal. Ces études ont porté sur la reconnaissance géologique (Bel et al, 1966 ; Busson, 1970 ; Fabre, 1976), et hydrogéologique (Cornet, 1964 ; Bel et al, 1969. Castany, 1982) du système aquifère du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire du Sahara septentrional. Alors que d'autres, ont évalué les potentialités hydriques du système, tout en proposant, divers scénarios de son exploitation à moyen et à long terme (Unesco, 1970 ; Nesson, 1978. BRL, 1998 ; OSS, 2003b).

L'âge, et la vitesse d'écoulement des différentes masses d'eau, ainsi que les mélanges éventuels dans un système, ont été déterminés à l'aide du traçage naturel isotopique (carbone-14, chlore-36, oxygène-18, deutérium, tritium), appliqués au système aquifère (CI et CT) du Sahara septentrional (Guendouz, 1985, Guendouz et al, 1994 ; 2003 Edmunds et al, 1997 ; Edmunds al, 2003, Guendouz et al, 2003, Guendouz et al, 2006). Cependant, les études, par l'outil isotopique, de Conrad et al (1970), Conrad et al (1972), Conrad et al (1975), Ould Baba Sy (2005), et Ould Baba Sy et al (2006) se sont focalisées sur les modalités de recharge et de paléorecharge de ce système.

L'objectif de notre travail est une contribution à l'étude des aspects se rapportant à la géochimie des eaux du Complexe Terminal, du Sud (Ouargla) au Nord (Still) ; de l'Amont, selon l'axe présumé d'écoulement de la nappe, vers l'aval (zones des chotts). Nous limiterons néanmoins notre champ d'investigation à la nappe du Mio-Pliocène du complexe terminal.

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

### **Première partie : Généralités sur la zone d'étude**

#### **Chapitre I : Cadre physique**

Dans ce chapitre, on a présenté la situation et le cadre physique de notre région d'étude, puis, on a synthétisé les composantes climatiques essentielles dans le but de déterminer l'influence de ce facteur sur les eaux et leur composition chimique, et on a terminé par un aperçu sur le réseau hydrographique drainant la région et les différentes unités géomorphologiques fréquemment rencontrées dans les régions sahariennes.

#### **Chapitre II : Contexte géologique**

On a exposé dans ce chapitre, la synthèse des travaux antérieurs portant sur les caractéristiques géologiques et lithologiques des aquifères et du sous sol de la région Est du Sahara septentrional, afin de déterminer la relation existant entre la lithologie et la composition chimique des eaux.



### **Chapitre III : Contexte hydrogéologique**

Ce troisième chapitre consiste à présenter les caractéristiques hydrogéologiques et hydrodynamiques de l'aquifère du Mio-Pliocène de notre zone d'étude en se basant sur les travaux portés dans ce sens dans le but d'exploiter ces reconnaissances dans l'interprétation des résultats obtenus.

### **Chapitre IV : Matériel et méthodes**

Ce chapitre expose les différentes méthodes et approches suivies pour étudier l'évolution du chimisme des eaux en fonction de la lithologie le long du sens présumé d'écoulement (reconnaissance géologique, méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux, outil informatique).

### **Deuxième partie : Résultats et discussion**

#### **Chapitre V : reconnaissance géologique et minéralogique**

Dans ce chapitre, on a présenté les résultats obtenus à partir de la description des coupes géologiques, des diffractogrammes des rayons X et des lames minces afin d'exploiter le maximum de ces reconnaissances dans l'interprétation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux pour bien déterminer la relation existant entre roche et eau.

#### **Chapitre VI : Hydrochimie et évolution géochimique des eaux**

Ce chapitre a pour objectif en premier lieu, la présentation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux, en comparant parallèlement avec des résultats obtenus à partir des travaux antérieurs effectués dans ce sens, puis on a essayé d'interpréter ces résultats en fonction des caractéristiques lithologiques de la région.

# *Première partie*

## *Généralités sur la zone d'étude*

- *Cadre physique*
- *Contexte géologique*
- *Contexte hydrogéologique*

# *Chapitre I*

## *Cadre physique*

## I.1- Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter notre zone d'étude, en donnant quelques composantes climatiques, hydrographiques et géomorphologiques de la région Est du Sahara septentrional.

## I.2- Cadre géographique de la zone d'étude

Le Sahara septentrional (nord-oriental) algérien se situe dans le Sud-Est de l'Algérie (Figure I.1), limité au Nord par l'Atlas saharien, au Sud par les wilayas de Tamanrasset et Illizi, au Nord-Ouest par la wilaya de Djelfa, à l'Ouest par la wilaya de Ghardaïa et à l'Est par la Tunisie et la Libye. Administrativement, il s'étale de la wilaya de Ouargla jusqu'à la wilaya d'El Oued.

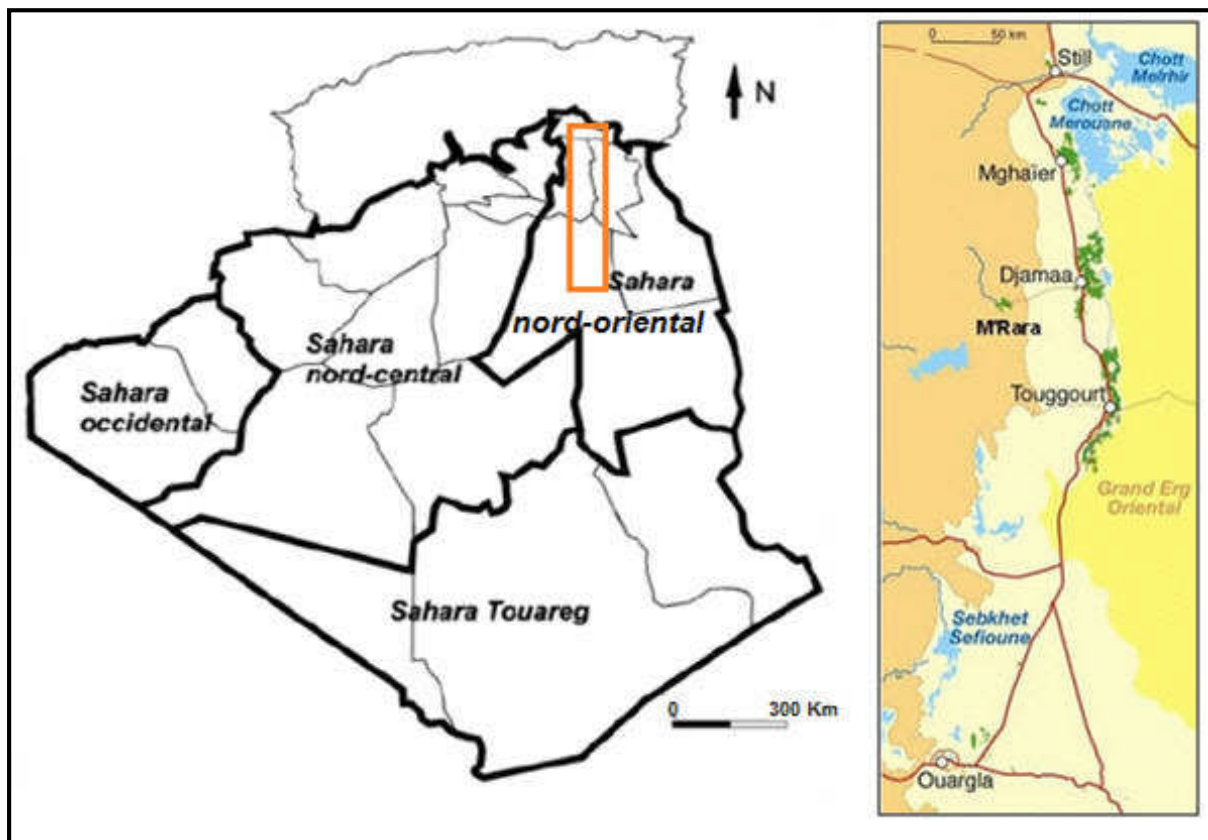


Figure I.1: Localisation de la zone d'étude

## I.3- Synthèse climatique sur la région

L'étude climatologique permet de ressortir les caractéristiques climatiques de la région en se basant sur les données mesurées depuis les stations météorologiques de Ouargla, de Touggourt et d'El Oued, ces données sont représentatives du climat régnant dans la région.

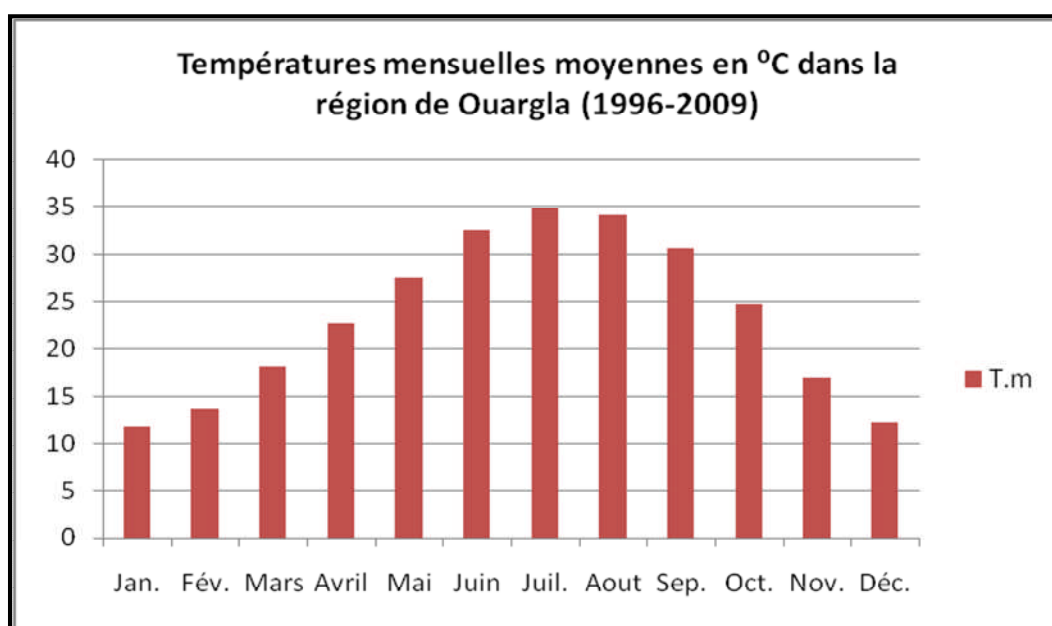
Nous analyserons les composantes suivantes : la température, l'évaporation et les précipitations. Selon la disponibilité des données, ces composantes sont analysées pendant des périodes différentes ; Ouargla (1996-2009), Touggourt (1990-2010), El Oued (1997-2009).

### I.3.1- Température

La moyenne mensuelle des mois les plus chauds (Juillet et Aout) dépasse les 34°C à Ouargla (moyenne des températures diurnes et nocturnes), et environ 33°C à Touggourt et El Oued, et celle du mois le plus froid (Janvier) est à environ 11 °C dans toutes les régions (ONM, 2010).

**Tableau I.1: Température (°C) moyenne mensuelle dans la région de Ouargla, période 1996 – 2009 (ONM, 2011)**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T °C	11,8	13,6	18,0	22,6	27,5	32,5	34,8	34,1	30,7	24,6	16,9	12,2



**Figure I.2 : Température mensuelle moyenne dans la région de Ouargla (1996-2009)**

**Tableau I.2: Températures (°C) moyennes mensuelles dans la région de Touggourt, période 1990 – 2010 (ONM, 2011)**

Mois	Jan.	Fev.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
T °C	10,86	13,11	16,9	20,89	26,11	31,13	33,93	33,54	29,01	23,48	16,2	11,93

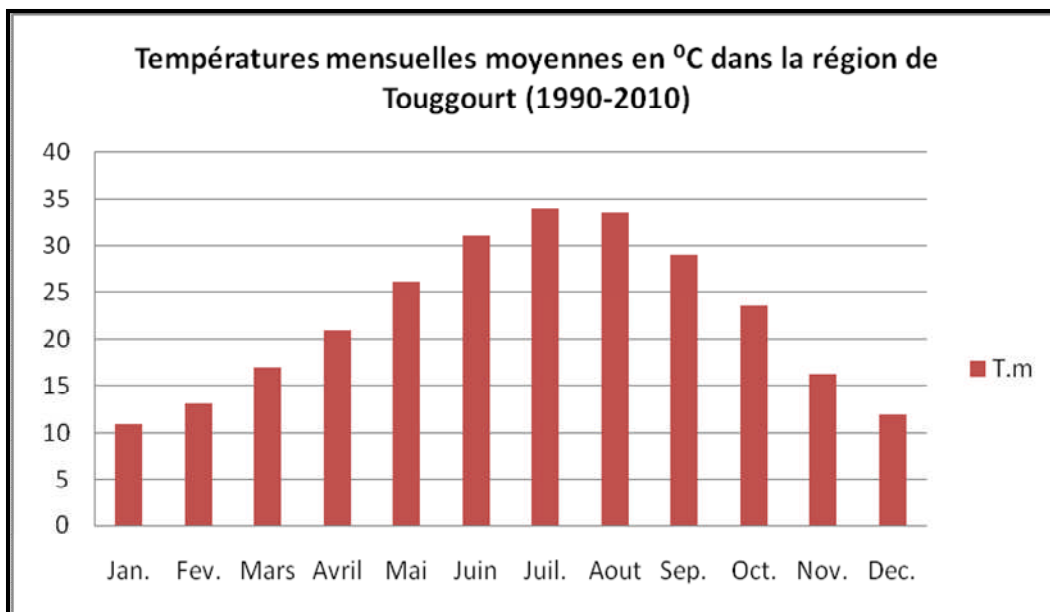


Figure I.3 : Température mensuelle moyenne dans la région de Touggourt (1990-2010)

Tableau I.3: Températures (°C) moyennes mensuelles dans la région de Souf, période 1997 – 2009 (ONM, 2011)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T °C	11,35	13,07	17,39	21,86	26,19	31,38	34,59	31,23	28,67	22,88	17,23	12,59

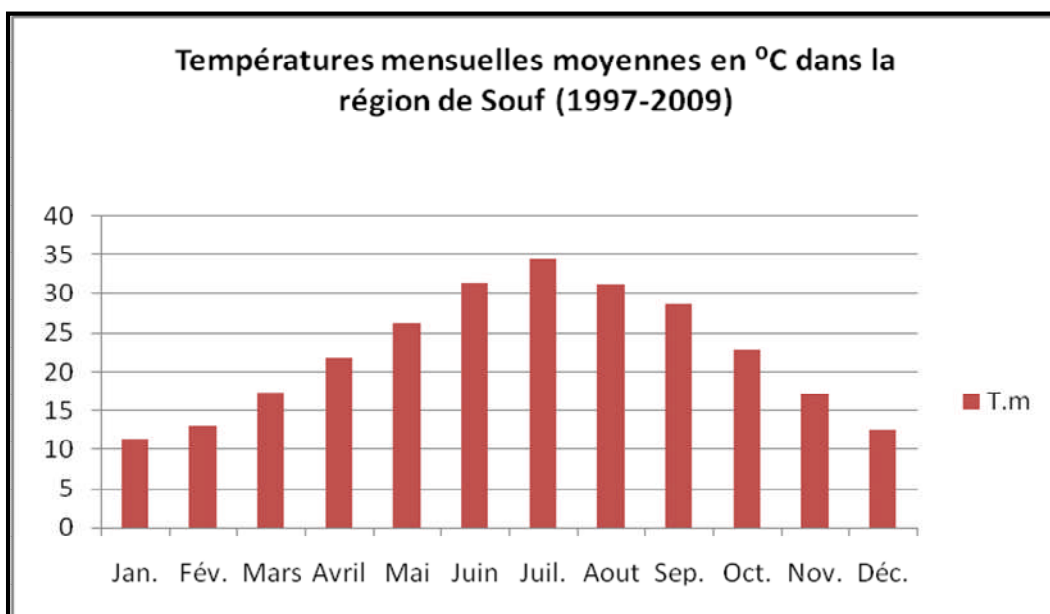


Figure I.4 : Température mensuelle moyenne dans la région de Souf (1997-2009)

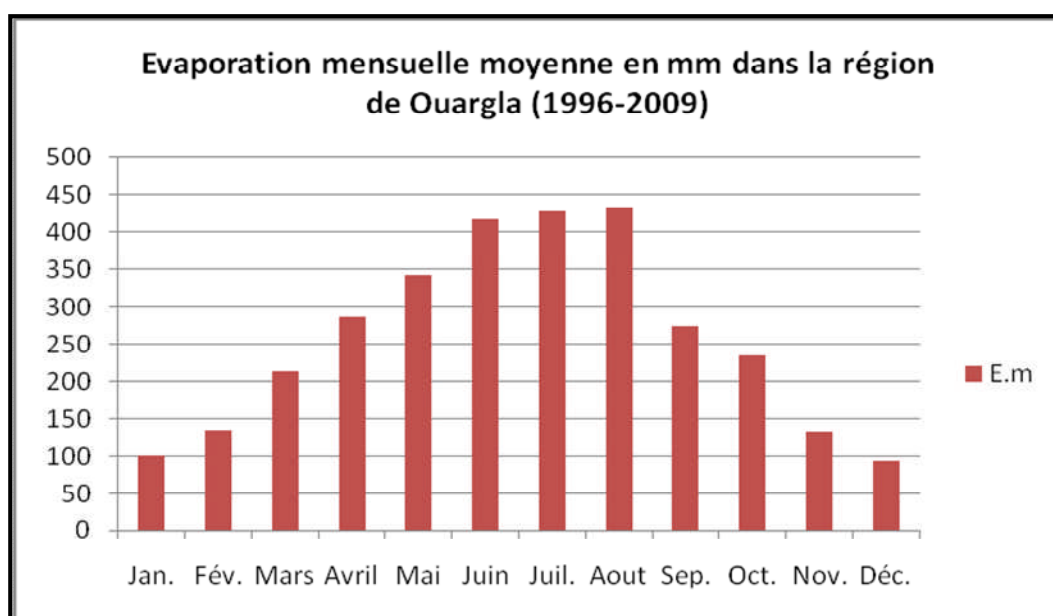
### I.3.2- Evaporation

L'évaporation est très élevée et très variable suivant les années, les mois et aussi les semaines. Dans la région de Ouargla, elle est en moyenne de 434 mm au mois de Août et de

92,3 mm au mois de Décembre, soit 3091.1 mm moyenne annuelle, Dans la région de Touggourt, elle atteint 385,74 mm en moyenne au mois de Juillet et 84,72 mm au mois de Janvier, soit 2684.45 mm comme moyenne annuelle. Dans la région de Souf, elle est de 336 mm au mois de Juillet et de 79 mm au mois de Janvier, soit 2297,1 mm moyenne annuelle.

**Tab. I.4 : Evaporation (mm) moyenne mensuelle dans la région de Ouargla, période 1996 – 2009 (ONM, 2011)**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	total
ETP	99,8	135	213	286	343	417	429	434	274	235	133	92,3	3091



**Figure I.5 : Evaporation mensuelle moyenne dans la région de Ouargla (1996-2009)**

**Tableau I.5 : Evaporation (mm) moyenne mensuelle dans la région de Touggourt, période 1990 – 2010 (ONM, 2011)**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	total
ETP	84,7	119,2	188,9	232,4	301,3	363,3	385,7	332,9	254,7	194,8	127,6	98,2	2684

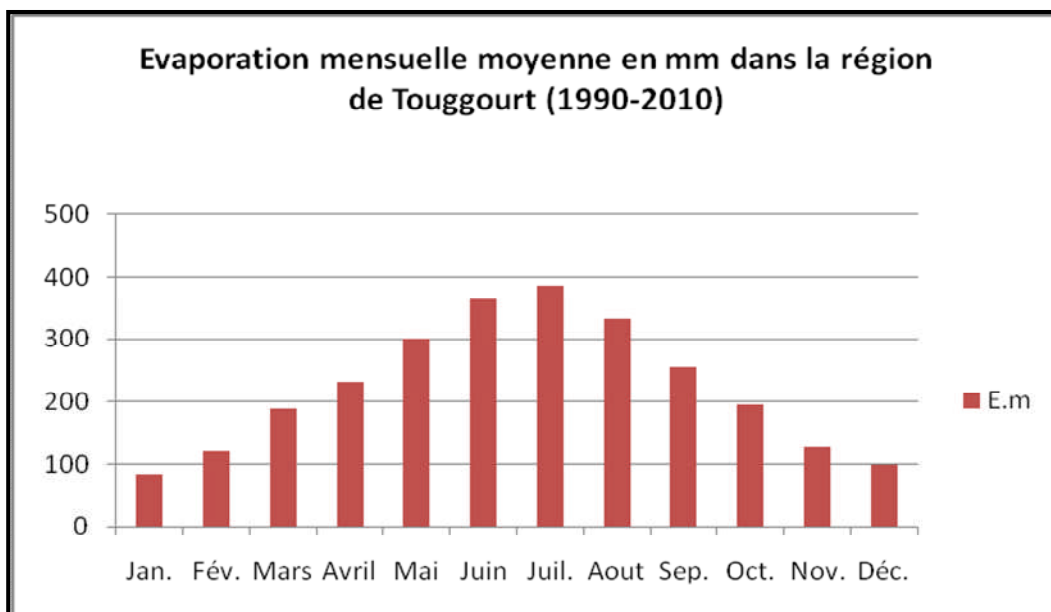


Figure I.6 : Evaporation mensuelle moyenne dans la région de Touggourt (1990-2010)

Tableau I.6 : Evaporation (mm) moyenne mensuelle dans la région de Souf, période 1997 – 2009 (ONM, 2011)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	total
ETP	79,3	94,3	138,1	205	254,8	278,2	336,2	284,8	208,7	177,9	122,4	117,4	2297

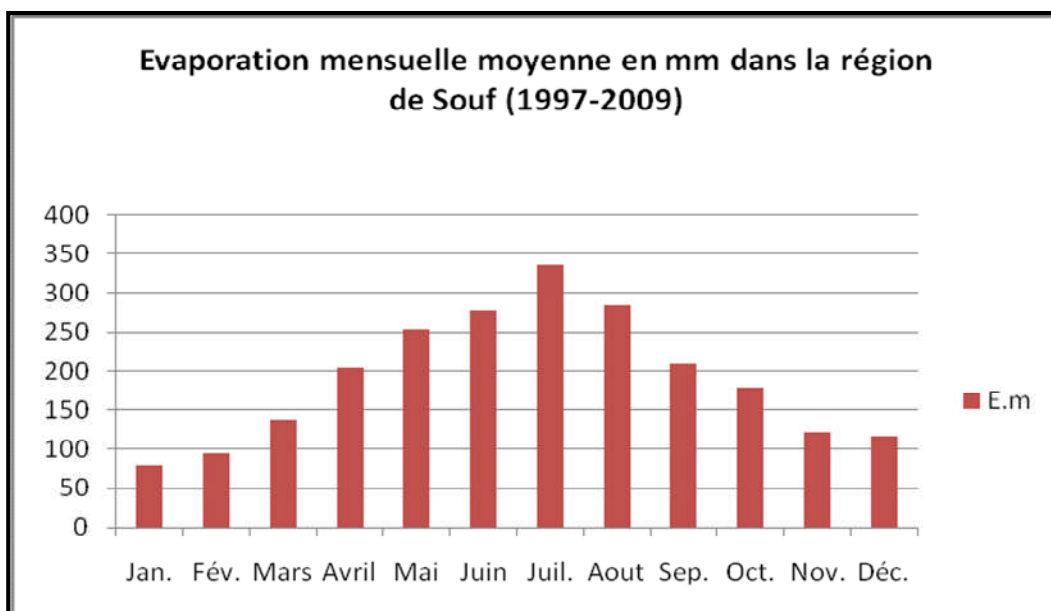


Figure I.7 : Evaporation mensuelle moyenne dans la région de Souf (1997-2009)



### I.3.3- Précipitation

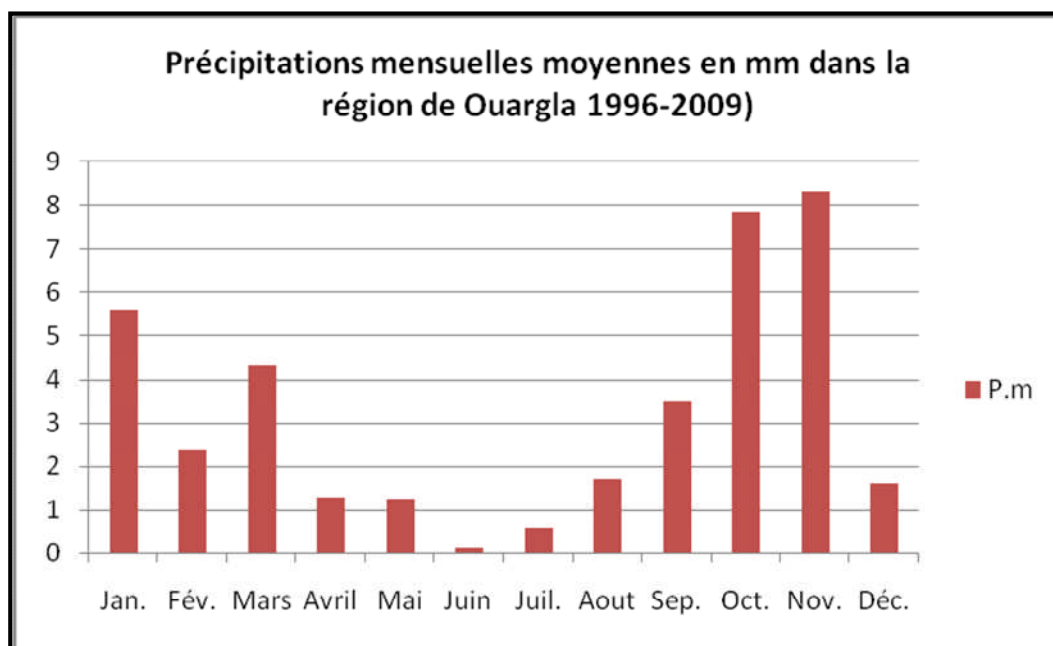
Au niveau de la région de Ouargla, les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 38 mm, novembre est le mois le plus pluvieux avec 8 mm, juin et juillet sont les mois les plus secs avec 0,35 mm.

Dans la région de Touggourt, elles dépassent les 54 mm en moyenne annuelles avec 15 mm au mois le plus pluvieux (Janvier) et 0,5 mm au mois le plus sec (Juillet).

Pour la région de Oued Souf, les précipitations dépassent 94,57 mm comme moyenne annuelle, Janvier est le mois le plus pluvieux avec 20,26 mm, par contre, Juillet est le mois le plus sec avec 0,55 mm.

**Tableau I.7 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Ouargla, période 1996 – 2009 (ONM, 2011)**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	total
P	5,57	2,40	4,33	1,29	1,26	0,12	0,59	1,71	3,53	7,84	8,32	1,61	38,6



**Figure I.8 : Précipitations mensuelles moyennes dans la région de Ouargla (1996-2009)**

**Tableau I.8 : Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Touggourt, période 1990 – 2010 (ONM, 2011).**

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	total
P	15,85	2,33	4,9	4,32	3,14	0,63	0,5	2,72	5,77	4,92	4,34	4,59	54

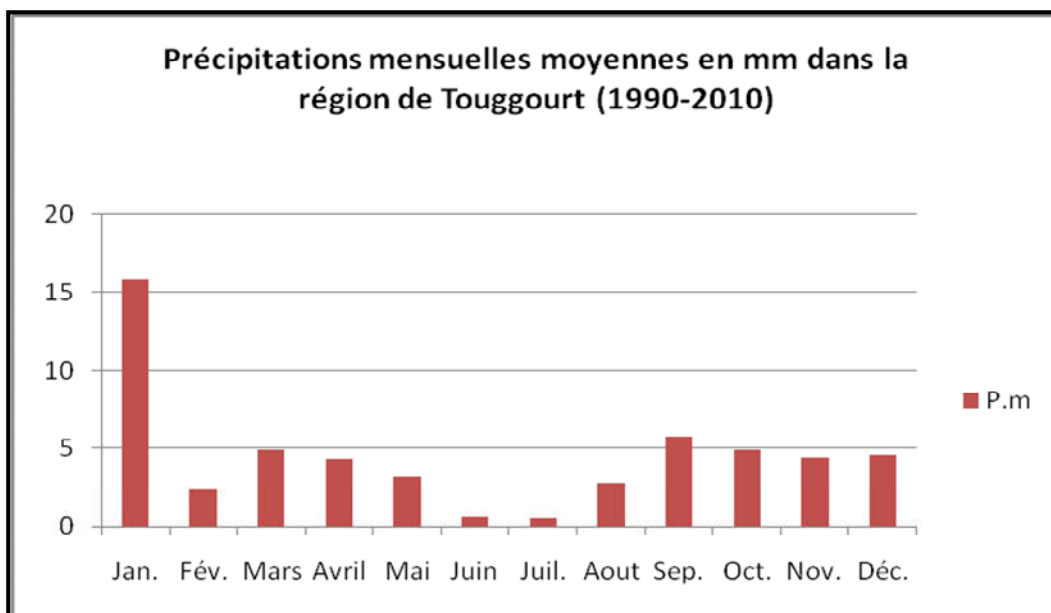


Figure I.9 : Précipitations mensuelles moyennes dans la région de Touggourt (1990-2010)

Tableau I.9 : Précipitations (mm) moyennes mensuelles dans la région de Souf, période 1997– 2009 (ONM, 2011).

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Aout	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	total
P.m	20,26	3,11	7,72	10,72	3,9	3,84	0,55	1,26	11,16	13,91	8,46	9,68	94,6

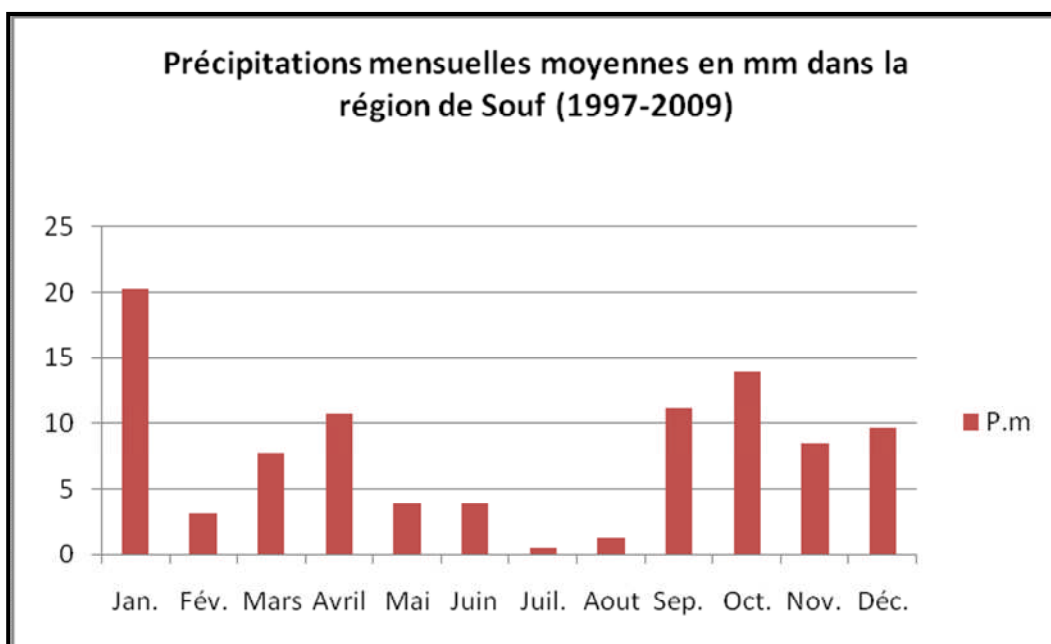


Figure I.10 : Précipitations mensuelles moyennes dans la région de Souf (1997-2009)

## **I.4- Réseau hydrographique**

L'hydrographie du Sahara septentrional basée sur les travaux des chercheurs fondateurs : J. Dubief (1953) est reconsidérée par des recherches universitaires récentes effectuées par M. Côte (2005) montre que les oueds mythiques, Igharghar à partir du sud du Grand Erg Oriental, M'ya au niveau de Ouargla et Rhir n'existent pas. Parmi les oueds réels fonctionnels, on commence à mieux connaître ceux qui descendent de l'Atlas saharien avec leurs barrages et beaucoup moins bien ceux de la dorsale du M'zab. Des oueds réels fossiles viennent d'être découverts dans le Souf, à l'amont du Grand Erg Oriental. Les seules vraies rivières, pérennes, tel le grand drain, sont celles alimentées par les eaux de colature des oasis et des réseaux pluviaux des villes. (Ballais, 2010).

En effet, dans le Sahara septentrional, les précipitations sont non seulement rares, mais toujours très irrégulières. Par suite les conditions de l'écoulement y sont particulières (l'absence d'un écoulement permanent dans les talwegs, la désorganisation du réseau hydrographique et la dispersion de l'eau (Dubief, 1953).

La basse vallée de Oued M'ya (Ouargla) et le canal de l'Oued Rhir (Touggourt, Djama, et M'ghaïer) et l'oueds Ittel (stil) où appartiennent les localités de notre zone d'étude, sont drainés par différents et plusieurs oueds, qui déposent leurs apports en eaux et en minéraux dans les chotts Melrhir et Merouane.

### **I.4.1- Oued M'ya**

Ouargla, ou la basse vallée de l'Oued M'ya ne connaît pas de talweg attribuable à l'oued M'ya (Dubief, 1953), alors qu'il existe bien une vallée façonnée par l'oued Mya dans le Tademaït, mais elle disparaît dès la latitude de Ouargla où elle est remplacée par une dépression irrégulière. Les crues de l'oued Mya dans le Tademaït sont bien connues (Dubief, 1953) dont la région l'en subit au printemps du 1985 (Ballais, 2010).

### **I.4.2- Oued Rhir**

La dépression topographique de l'oued Rhir (Figure I.11) paraît bien trop immense (15 à 30 km de large (Busson, 1972) pour être constituée par une vallée, même celle d'un très grand cours d'eau.

### **I.4.3- Les oueds de la dorsale du M'zab**

Des oueds drainent le versant des piedmonts Sud-Est de l'Atlas saharien à l'Est de la dorsale du M'Zab (Figure I.12), encore parfois fonctionnel, constitué de vallées orientées ouest-est qui se jettent dans deux vastes collecteurs, l'oued M'ya au sud et l'oued Rhir au nord jalonnés par une série de dépressions qui empêchent maintenant tout écoulement continu.

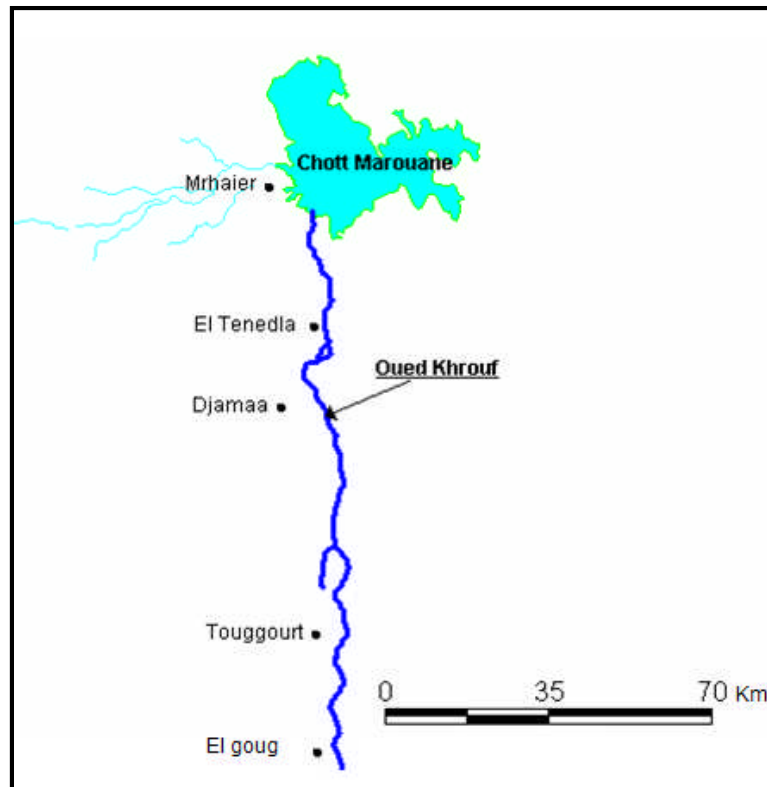


Figure I.11: Vallée de l'oued Rhir



Figure I.12: Réseau hydrographique dans la région d'étude (Ballais, 2010)

**Oued R'tem**

Parmi ces oueds, s'individualise l'oued R'tem (bassin versant théorique d'environ 4500 km<sup>2</sup>). Cet oued a connu des crues en 1969, 1973 et octobre 1984 au moins (DHW d'El Oued). Il coule sensiblement de l'Ouest vers l'Est de la région de Mchibigue à 720m d'altitude, à la daïa d'Hassi M'rara situé à la cote 100, qu'il gagne après être infléchi brusquement vers le Sud dans les derniers kms de son parcours. L'apparition plus ou moins d'anciennes gouffres d'effondrement dans le lit majeur, révèle un endokarst dans les couches calcaires éocènes à M'rara. (Aissani et al, 2010. Kolli, 2012).

Il atteint une longueur de 196 km environ, en prenant comme tête l'Oued Berriche, L'Oued R'tem connaît souvent à l'occasion de pluies diluviennes des crues torrentielles durant lesquelles l'eau traverse les secteurs de M'rara avec une certaine violence, des structures ont été installées en amont de l'oued pour contenir la force des torrents, mais en vain puisque celles-ci n'ont pas résisté. (Dubief, 1953).

**Oued N'sa et M'zab**

Les deux Oueds N'sa et M'zab aboutissent à la cuvette de Ouargla, ils sont fonctionnels, ils peuvent avoir une ou deux crues par an et ils n'atteignent la cuvette que lorsque la crue est importante; ils coulent donc de l'Ouest vers l'Est –Sud-Est jusqu'à sebkhet Safioune.

Les alluvions de Oued N'sa ferment la vallée au Nord de sebkhet Safioune, empêchant un écoulement vers l'aval. Cette fermeture s'est rompue dans sa partie Est et les eaux du lac ont pu s'échapper vers le Nord / Est; en direction de Touggourt et Chott Melrhir. Celles de l'Oued M'zab atteignent sebkhet Safioune deux fois par siècle, alors que celles de l'Oued N'sa semblent plus fréquentes.

**Oued Ittel**

Cet Oued prend son origine dans la région d'Elmengoub, le plateau d'El Djouf par 475m d'altitude. Il se jette dans le chott Merouane aux environs de la cote 20, après un parcours de 165km. (Dubief, 1953).

Il n'existe pas de poste pluviométrique dans ce bassin. Les observations d'écoulement sont pratiquement inexistantes, du moins à notre connaissance. Cet Oued coule assez fréquemment et ses crues sont parfois suffisamment violentes qui coupe la voie ferrée Biskra-Touggourt.

**Oued El Attar**

Cet Oued prend son origine sous le nom d'Oued Bel Aroug dans la région de Ras Bel Aroug, vers 760m d'altitude. Il se perd après un parcours sensiblement Ouest-Est de 180km. Il est encore susceptible de couler, mais aucune de ces crues n'atteint plus son ancien niveau de base, le chott de Dzioua. Aucune observation de crue précise n'est parvenue à notre connaissance. (Dubief, 1953).

**I.5- Unités géomorphologiques et topographie**

Sur le plan géomorphologique, le Sahara possède plusieurs paysages caractéristiques. Les oueds descendant des reliefs se perdent souvent dans des dépressions, s'ennoient dans les ergs

ou terminent leur course en mer. On peut aussi distinguer des plateaux sur lesquels s'érigent des reliefs (Hamdi Aissa, 2001).

**Les Hamadas :** Ce sont des plateaux rocheux à topographie très monotone, souvent plate à perte de vue

**Les Regs :** Ce sont des plaines de graviers et de fragments rocheux. Au Sahara, ils occupent des surfaces démesurées.

**Les accumulations sableuses :** Le sable est un élément essentiel du paysage saharien. Cependant, les dunes sont loin de recouvrir la totalité du Sahara, mais se localisent généralement dans de vastes régions ensablées appelées les ergs, les dunes peuvent avoir des formes différentes en fonction de la direction dominante du vent.

**Les Sebkhha et les Chott :** Ce sont des dépressions qui se forment lorsque les eaux s'évaporent sous l'effet de la chaleur, des plaques de sels divers se déposent en surface formant suivant l'origine de leurs eaux (phréatiques ou superficielles) les chotts et les sebkhas. Les sebkhas sont apparues au cours d'une période humide antérieure, vraisemblablement le dernier grand épisode pluvial contemporain à la glaciation de Würm, (Dubief, 1963).

## **I.6- Conclusion**

Notre zone d'étude fait partie de la région Est du Sahara septentrional algérien, elle est caractérisée par un climat désertique aride avec des températures extrêmes en été (plus de 50 °C).

Les précipitations annuelles sont faibles, à distribution très irrégulière dans le temps comme dans l'espace, et notablement inférieures à l'évaporation potentielle annuelle qui y atteint des valeurs considérables, telles caractéristiques du climat actuel ne peuvent expliquer les énormes réserves d'eaux souterraines, mais peuvent contribuer quand même à une certaine recharge s'il y a présence d'un nombre de conditions géologiques, climatiques et topographiques. Cette recharge reste toujours négligeable par rapport à l'exploitation excessive. En fait, seuls les oueds de l'atlas saharien qui dévalent à chott Melrhir et Merouane et ont un effet sur la recharge de la nappe du Mio-Pliocène.

D'un climat aride, notre zone d'étude, et comme la totalité du Sahara, se caractérise par une topographie relativement plane, et d'un paysage saharien caractérisé par les dunes de sable, les regs, les hamadas et les chotts et sebkhas.

# *Chapitre II*

## *Contexte géologique*

## **II.1- Introduction**

Dans ce deuxième chapitre, nous allons exposer la synthèse des travaux de nombreux auteurs ayant étudié la géologie du Sahara septentrional, nous citons : Busson, (1972), Fabre, (1976). Bel et Cuche, (1969). Bel et Dermagne, (1966). sans pour autant oublier les travaux des compagnies pétrolières et les chercheurs universitaires nationaux et internationaux.

## **II.2- Cadre géologique de la région**

Lorsqu'on aborde le Sahara par le Nord, on est surpris par la rapidité avec laquelle on passe des montagnes et plateaux de l'Atlas à la plate-forme désertique saharienne. Ce passage souligné par des affleurements de calcaires blancs sub-verticaux, correspond à l'accident sud-atlasique, qui est selon les endroits un pli, un pli-faille, ou une flexure. Au sud de cet accident qui va d'Agadir au Golfe de Gabès, s'étend le bouclier africain formé de roches éruptives et métamorphiques où se sont déposés plusieurs milliers de mètres de terrains sédimentaires allant du Cambrien au Quaternaire (Cornet, 1964). On y subdivise en deux (02) sous domaines : le bassin occidental et le bassin oriental, séparés par l'anticlinal du M'Zab. Notre zone d'étude, s'inscrit dans cet immense bassin sédimentaire oriental occupant dès le Secondaire, l'emplacement de l'actuel Sahara septentrional (Gouscov, 1952).

### **II.2.1- Structure géologique du bassin oriental**

Le bassin oriental (Figure II.1) du Sahara, à couverture sédimentaire, d'âge paléozoïque au Récent, est nettement mieux connu que sa contre partie occidentale, grâce aux recherches pétrolières. Il est limité à l'Ouest par la dorsale du M'zab et au Sud par les plateaux du Tadmaït et du Tinrhert, se plonge vers l'est en Tunisie et en Libye. Il comporte à la base des sédiments Paléozoïques plissés, et pénéplaines par l'orogénèse hercynienne, surmontés en discordance par des sédiments variés (marins et continentaux) du Secondaire et du Tertiaire sur une épaisseur de 2000 mètres environ. Le bassin oriental se présente également comme un vaste synclinal, ouvert vers le Nord. Dans sa moitié Sud, ce synclinal est traversé par un grand axe anticlinal Nord-Sud; siège de plusieurs gisements pétroliers. C'est le haut-fond d'Amguid-El Biod. Cet axe n'est plus apparent dans les formations du Mio-Pliocène ; il y a même inversion de relief puisque l'axe de l'actuel synclinal Mio-Pliocène se superpose à l'ancien haut-fond. Dans le bassin du Sahara septentrional, une seconde zone haute a existé, du Cénomaniens au Mio-Pliocène, entre Hassi-Messaoud et la frontière tunisienne. Cette structure est orientée Est-Ouest ; elle sépare la fosse des chotts au nord, du reste du bassin. Il semble que cet axe joue un rôle important dans l'hydrogéologie de cette région.



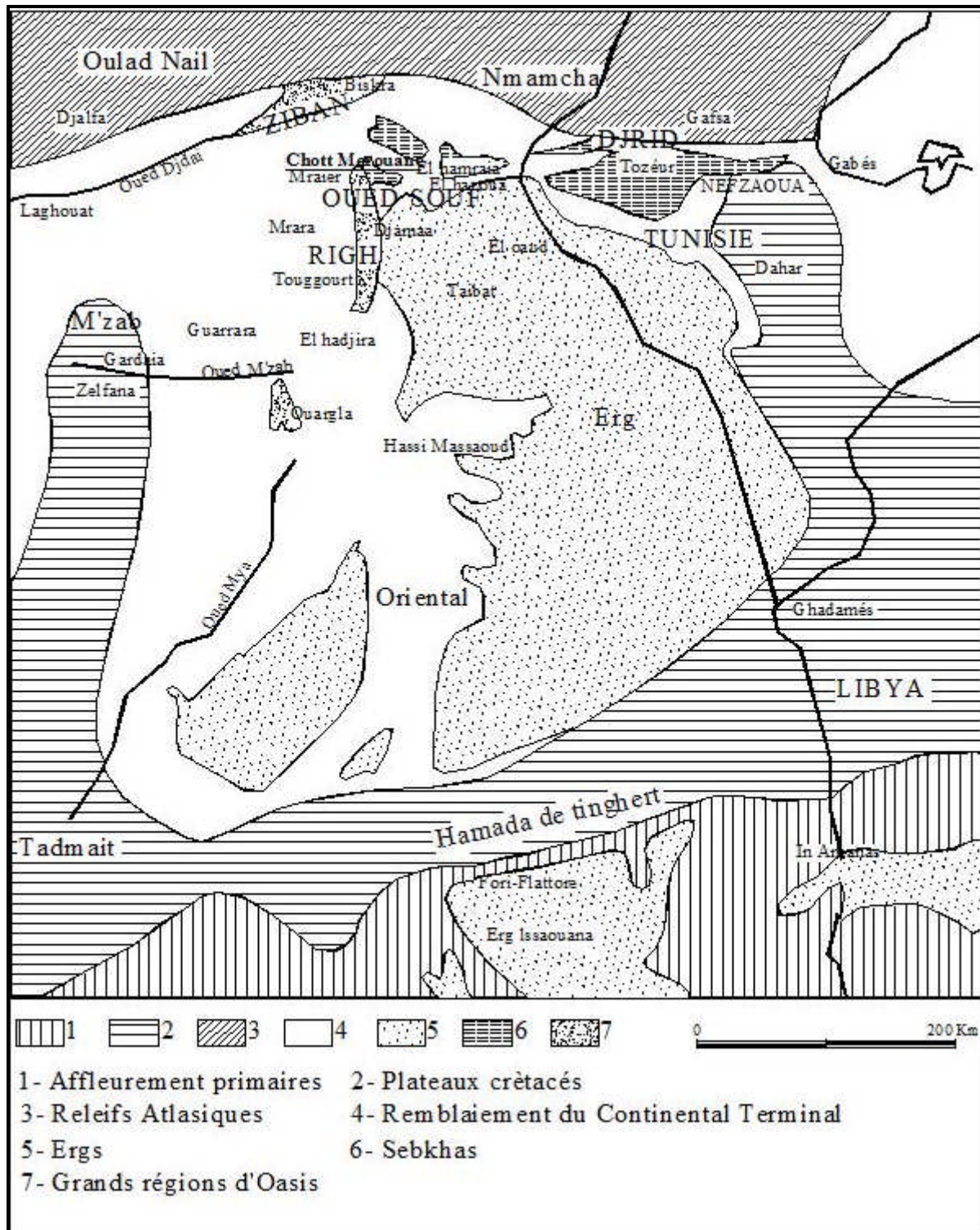


Figure II.1 : Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978)

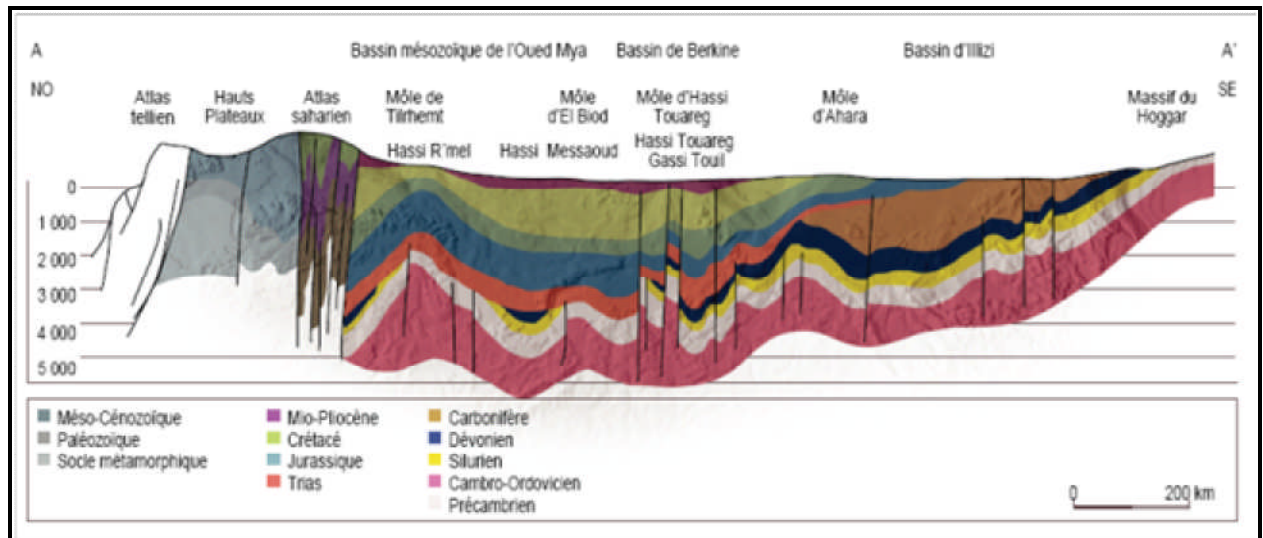


Figure II.2 : Coupe géostructurale transversale régionale (WEC, 2007)

II.2.2- Lithostratigraphie

La carte géologique ne fait apparaître qu’une couverture tabulaire de terrains tertiaires, et de dépôts détritiques quaternaires. La lithostratigraphie est plus ou moins complète, elle n’est connue que grâce aux forages profonds d’exploration pétrolière ou hydraulique (Figure II.3).

Chronostratigraphie		Lithologie	Epaisseur (m)	
Tertiaire	Mio-Pliocène	[Lithologie]	150	
	Eocène	[Lithologie]	0-150	
Secondaire	Sénonien	Carbonaté	100	440
		Anhydritique	220	
		Salifère	120	
	Turonien	[Lithologie]	80	
	Cénomanién	[Lithologie]	120	
	Vraconien	[Lithologie]	0 - 70	
	Albien	[Lithologie]	300	
	Aptien	[Lithologie]	25	
	Barrémien	[Lithologie]	280	
Néocomien	[Lithologie]	200		

Figure II.3 : Colonne chronostratigraphique synthétique du Sahara septentrional algérien (WEC, 2007)

**L'Albien**

Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomanién. On remarque que le changement de régime sédimentaire et l'arrivée en masse des sédiments détritiques s'est produit entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien, (Fabre, 1976).

**Le Vraconien**

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

**Le Cénomanién**

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

**Le Turonien**

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

**Le Sénonien**, Il s'individualise en deux faciès:

Le Sénonien inférieur (Sénonien salifère et anhydritique) à sédimentation lagunaire caractérisée par des formations argileuses et salifères à anhydrite, il est très peu perméable, (Busson, 1972).

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

**L'Eocène**, On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique, à la base:

L'Eocène carbonaté est formé essentiellement par des dolomies et des calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argile et même d'anhydrite et de sel. La puissance de cette formation varie entre 100 et 500 m, l'épaisseur maximum se situant dans la zone du bas Sahara.

Au sommet, l'Eocène évaporitique est formé par une alternance de calcaire, d'anhydrite et de marnes. Son épaisseur atteint une centaine de mètres sous les Chotts, (Bel et Cuhe, 1969).

### **Le Mio-Plio-Quaternaire**

Le Tertiaire continental du Sahara peut être relativement épais (150 m). Il se présente sous forme d'un faciès sableux et argileux avec du gypse. Dans le bas Sahara, la sédimentation lacustre se présente sous forme de séries sableuses et argileuses connues sous le nom du Continental Terminal (Mio-Pliocène) dont l'épaisseur peut atteindre dans la région des Chotts algéro-tunisiens quelques centaines de mètres. On y identifie, dans la région de Oued Righ, deux niveaux aquifères au sein des sables qui sont séparés par une couche argileuse au milieu (première et deuxième nappe de Oued Righ). L'ensemble est surmonté par le Plio-Quaternaire argilo-sableux et gypseux qui résulte de la sédimentation en milieu lacustre durant la phase d'assèchement des lagunes et des chotts, (Busson, 1972).

### **II.3- Tectonique régionale**

Au cours du Secondaire, le Sahara algérien oriental subissait des mouvements verticaux d'ensemble. Pendant que de véritables chaînes de montagnes se formaient plus au Nord, dans le géosynclinal de l'Atlas saharien, la zone saharienne tendait plutôt à un effondrement progressif de sa partie centrale, suivant un axe passant sensiblement par la vallée de l'Oued R'hir et par le tronçon supérieur de la vallée de l'Oued Mya. (Fabre, 1976).

La géométrie actuelle des formations du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal du Sahara est caractérisée par l'absence des déformations tectoniques importantes. La chaîne des Maghrébides qui a subi plusieurs phases orogéniques au Tertiaire, va avoir des contrecoups sur la plate forme saharienne :

- Les mouvements de l'Eocène moyen à supérieur, sont bien nets, la phase du Miocène inférieur qui succède et donne naissance au Tell et aux Aurès,
- Enfin, la phase plio-quaternaire qui s'insère avec les précédentes dans la phase alpine ; d'où l'apparition des fractures de direction Est-Ouest, forment la surrection du massif des Aurès et l'affaissement de la partie Sud « sillon sud Aurèsien », ces fractures régissent l'écoulement des eaux souterraines d'où la naissance des chotts tels que chott Merouane et chott Melghir. La flexure sud atlasique de direction Est-Ouest qui sépare deux domaines distincts, c'est ainsi qu'on, peut avoir au Nord des points culminant « monts des Aurès » et au Sud les points les plus affaissés.

### **II.4- Paléogéographie**

Les caractéristiques paléogéographiques du Sahara oriental, du Cénomaniens à la fin de l'Eocène sont donc :

- L'existence d'une plate forme très régulière sur laquelle les moindres variations du niveau de la mer, provoque des changements importants dans la sédimentation.
- L'existence d'une mer profonde dans le Bas Sahara actuel à partir de laquelle se produisent plusieurs transgressions dont les plus importantes étant celles du Cénomaniens et du Sénonien supérieur.

- A la fin de l'Eocène et la régression définitive de la mer s'accompagne de bouleversements importants.
  - L'érosion enlève une partie des calcaires du Sénonien et l'Eocène.
  - Le régime marin est remplacé par un régime continental.

Cette reconstitution paléogéographique est tirée des travaux de Bel et Dermagne, 1966, elle s'applique à l'ensemble du Bas Sahara.

Pendant la première moitié de l'ère secondaire, la sédimentation dans tout le Sahara oriental a été de type continental. En effet, du Trias à l'Albien, se sont déposés des argiles, des sables et des évaporites d'origine éolienne ou fluviale. On note cependant, quelques rares incursions marines, en particulier en Jurassique et à l'Albien. Ces dépôts constituent « le continentale intercalaire » et contiennent la plus importante ressource aquifère du Sahara.

Durant la seconde moitié du secondaire, d'autres phénomènes se sont succédé :

- Au dessous des grès continentaux albiens viennent en transgression les calcaires marins du Cénomaniens. Ces calcaires qui s'intercalent avec les argiles et les évaporites. Cette alternance est l'indice d'un régime marin peu profond, évoluant vers un régime lagunaire responsable du dépôt des évaporites et des argiles gypsifères.
- Au Turonien, le régime marin s'est stabilisé, permettant le dépôt d'une barre calcaire homogène, atteignant parfois plus de 100 mètres dans le Sahara oriental. La stabilisation du régime marin durant le Turonien n'est que temporaire.
- En effet, dès le début du Sénonien, se dépose en alternance de l'anhydrite, des argiles, des dolomies ainsi que quelques bancs calcaires. Le dépôt parfois d'un banc de sel massif à la base dans le Bas Sahara témoigne particulièrement du régime lagunaire qui s'était installé sur le Sahara oriental durant tout le Sénonien inférieur.
- Au Sénonien supérieur, le régime marin réapparaît une nouvelle fois déposant ainsi la seconde série calcaire. Cette transgression Sénonienne semble moins importante que celle du Turonien. En effet, on note la présence de petites intercalations d'évaporites dans les calcaires Sénoniens, ce qui n'est pas le cas des dépôts turoniens.
- Au début de l'Eocène inférieur, la mer recouvre toujours le Sahara oriental, c'est le dépôt des calcaires à Nummulites.
- Durant l'Eocène moyen et supérieur, les sédiments marins de l'Eocène inférieur sont peu à peu remplacés par des dépôts lagunaires où alternent les argiles, les évaporites et les calcaires. La faible extension de ce golfe marin localisé dans le Bas Sahara marque les dernières manifestations de la mer saharienne dont la disparition définitive se situe vers la fin de l'Eocène.
- A la fin de l'Eocène, le Sahara oriental se présente sous l'aspect d'une plate forme calcaire émergée qui sera exposée à l'érosion durant tout l'Oligocène.
- Au Mio-pliocène, suite à l'épirogénèse alpine, des sédiments argileux et sableux continentaux se déposent sur l'ensemble du Sahara oriental. Cette sédimentation

continentale se poursuit durant le Quaternaire. C'est donc aux époques Tertiaires et Quaternaire que le Sahara oriental a pris la configuration que nous lui connaissons aujourd'hui.

## **II.5- Conclusion**

Notre zone d'étude appartient au Sahara Nord-Est septentrional algérien, géologiquement, elle est formée de deux unités structurales ; le socle précambrien composé de roches éruptives et métamorphiques, surmonté par des milliers de mètres de couches sédimentaires allant du Cambrien jusqu'au Quaternaire.

Dans cette partie du Sahara algérien, trois formations géologiques contiennent les nappes d'eau du SASS ; l'Albien gréseux et sableux (CI), le Sénonien lagunaire et carbonaté et le Mio-Pliocène sableux et argileux, ces formations ainsi que tout le bassin sédimentaire du Sahara Est septentrional sont caractérisées par l'absence de déformations tectoniques importantes.

# *Chapitre III*

## *Contexte hydrogéologique*



III.1- Introduction

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), (Figure III.1) s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Lybie. Ce bassin renferme une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés: le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Le domaine du SASS couvre une superficie d'environ 1 000 000 km<sup>2</sup> dont 70 % se trouve en Algérie, 24 % en Lybie et 6 % en Tunisie, sa réserve est estimée à 31.000×10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (Ould Baba Sy, 2005). Il s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas saharien jusqu'aux affleurements de Tidikelt et du rebord méridional de Tinrhert et d'Ouest en Est depuis la vallée de Guir-Saoura jusqu'au graben de Hun en Lybie. En Algérie, ce système aquifère couvre une surface de 700 000 Km<sup>2</sup>, et est d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètres environ (Cornet, 1964). Nous rappelons ci-dessous les définitions des aquifères du "CI" et du "CT".

Le terme "Continental Intercalaire" désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins:

- En base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne.
- Au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultat de la transgression cénomaniennne.

Le "Complexe Terminal" est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène (Busson, 1972), (Fabre, 1976).

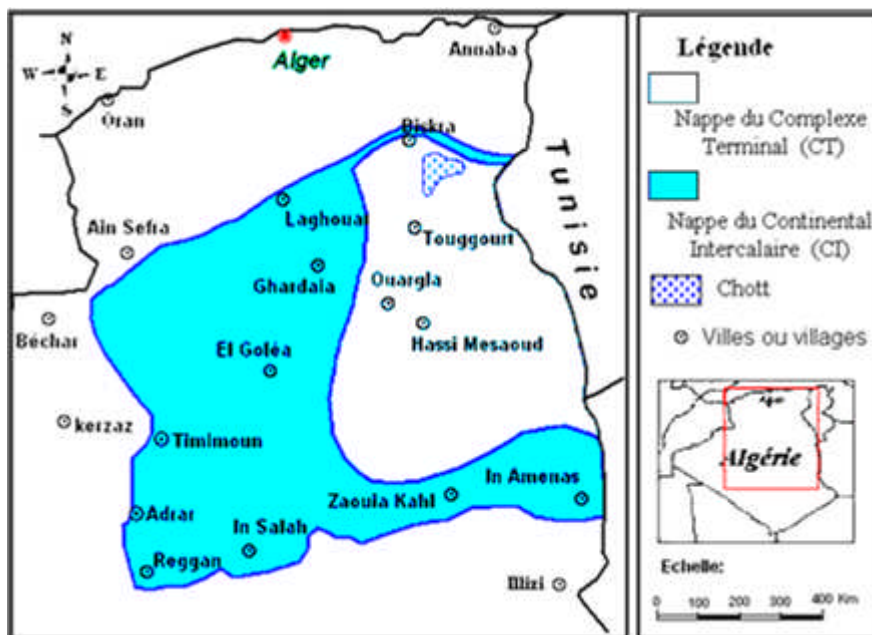


Figure III.1 : Extension géographique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)

III.2- Le Continental Intercalaire (CI)

D'après Kilian, (1931), le «Continental Intercalaire» désigne un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins à la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne, alors qu'au sommet, le cycle du Crétacé supérieur, résultant de la



transgression cénomaniennne. (Busson, 1970 ; Fabre, 1976). Il occupe les formations sableuses et argilo gréseuses du Néocomien, Barrémien, Aptien, et de l'Albien (Cornet, 1964 ; Cornet et Gouscov, 1952). L'aquifère est continu du Nord au Sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar, et d'Ouest en Est, depuis la vallée du Guir et de la Saoura jusqu'au désert libyen. Le débit d'alimentation du Continental intercalaire provenant du piémont de l'Atlas saharien est de 7.7 m<sup>3</sup>/s, (Ould Baba Sy, 2005 ; Ould Baba Sy, et al, 2006). Ce débit entre dans l'intervalle des estimations recueillies dans les études antérieures qui le situent entre 4 m<sup>3</sup>/s (Cornet, 1964) et 8.5 m<sup>3</sup>/s (Margat, 1990).

La carte piézométrique (Figure III.3) de référence du Continental Intercalaire établie, à l'état stationnaire (peu ou pas influencée par les pompages), sur la base des études antérieures (Cornet, 1964 ; UNESCO, 1972, 1972 ; Pallas, 1978), met en évidence les zones d'alimentation suivantes (Ould Baba Sy, 2005) :

- Piémont sud atlasique au Nord-Ouest ;
- Tinrhert au Sud ;
- Dahar à l'Est ;
- Jebel Nafusa au Nord-est ;
- Jebel Hassawna au Sud, où la nappe du Cambro-Ordovicien est drainée vers le Nord par la nappe du Continental Intercalaire.

Les zones d'exutoire sont :

- Les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt ;
- L'exutoire tunisien marqué par la faille d'El-Hamma ;
- L'exutoire libyen au niveau d'AinTawargha.

Les failles de la dorsale d'Amguid (Figure III.2) sont à l'origine d'une drainance verticale, préalablement signalée, des eaux du CI vers la nappe du CT (Guendouz, 1985, Edmunds et al, 2003 ; Moulla et al, 2002 ; Guendouz et al, 2003).

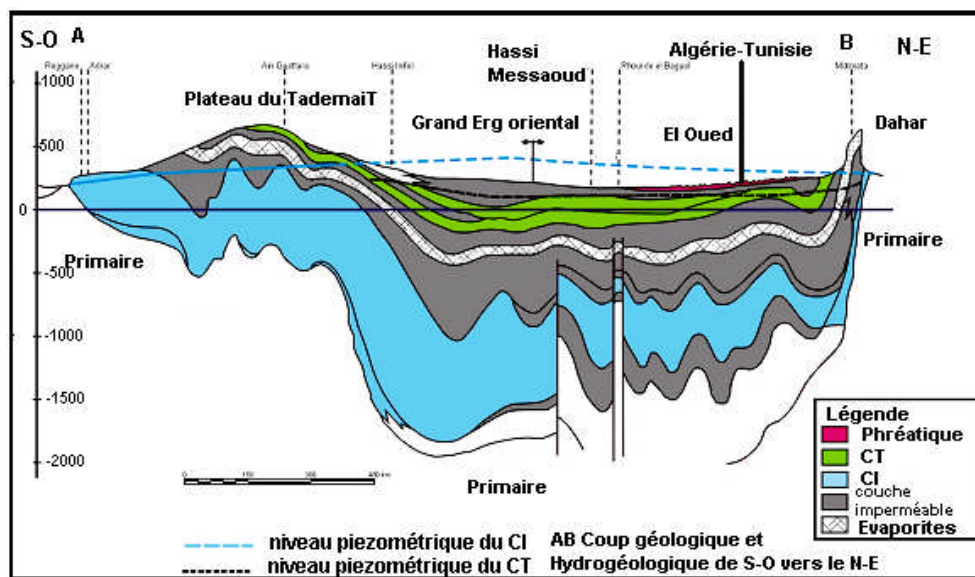


Figure III.2 : Coupe hydrogéologique de SASS (UNESCO, 1972)

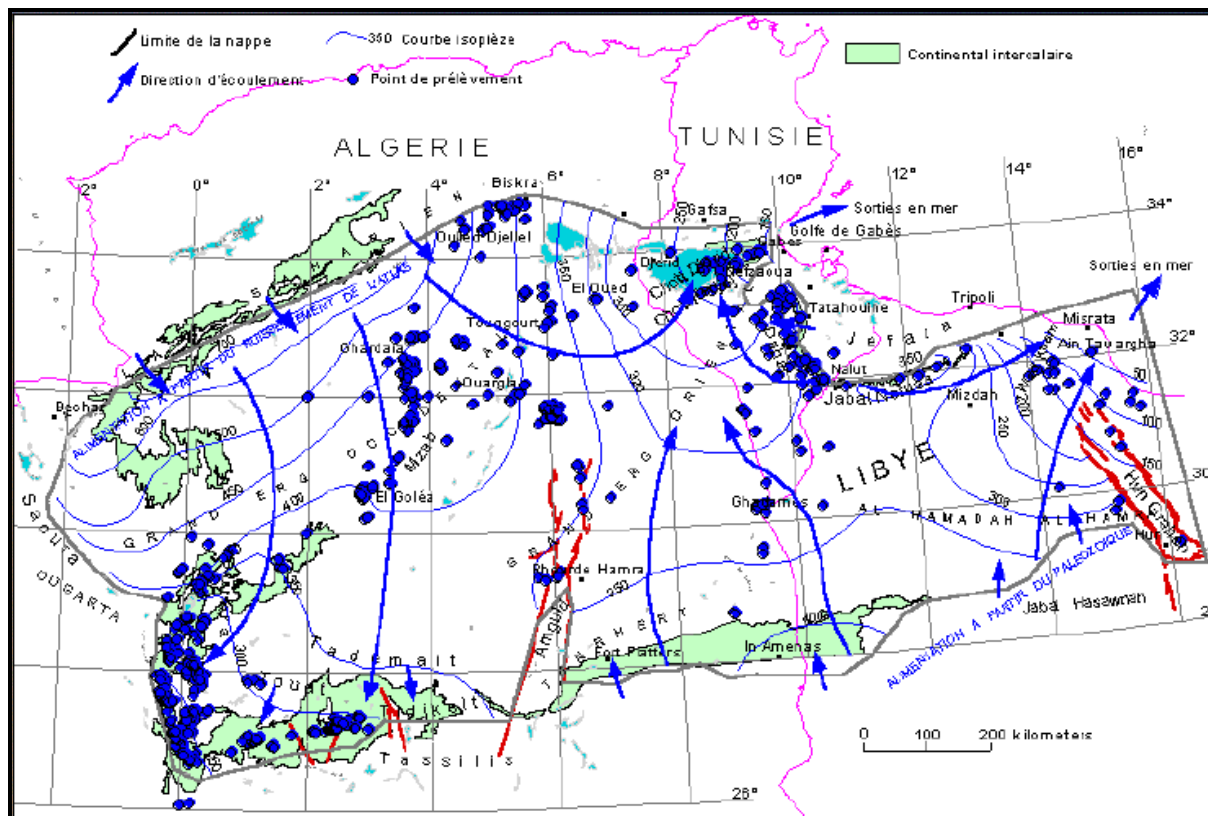


Figure III.3 : Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003)

### III.3- Le Complexe Terminal (CT)

Il est noté dans l'étude OSS (2003 b) que classiquement, et selon la définition de Killian (1931), le terme "Continental Terminal" désignait les formations continentales, sableuses et argileuses du Mio-Pliocène. Mais d'après Bel et Dermagne (1966): "*La nappe du Continental Terminal contenue dans les sables du Mio-Pliocène et plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe, la nappe du Continental Terminal, par opposition au Continental Intercalaire*". C'est avec le projet ERESS que l'on verra apparaître la notion du "Complexe Terminal", appellation publiée pour la première fois par Bel et Cuche (1969).

Le terme de "nappe du Complexe Terminal" qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même ensemble hydraulique. Les intercommunications entre Sénonien, Eocène et Mio-Pliocène sont évidentes sur l'ensemble du bassin, à l'exception de la région des chotts où l'Eocène moyen et supérieur imperméable vient s'intercaler. La nappe turonienne est plus individualisée par suite de la couverture imperméable du Sénonien inférieur. Cependant, ses niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du Mio-Pliocène sur la bordure du bassin.

Le système aquifère du "Complexe Terminal" couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350 000 km<sup>2</sup>.

La profondeur du "CT" est comprise entre 100 et 600 m et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m.

Le "Complexe Terminal" affleure aux endroits suivants:

- Au Nord, dans le sillon des chotts algéro-tunisiens.
- A l'Est, le long du flanc oriental du Dahar.
- Au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït.
- A l'Ouest, sur la dorsale de M'zab.

Comme pour le "CI", la construction de la carte piézométrique du "CT" est le résultat de l'accumulation des contributions successives élaborées depuis quarante ans, depuis la publication par Cornet, (1964) de la première carte piézométrique couvrant tout le Continental Terminal du Sahara. Parmi les contributions les plus significatives, on peut citer notamment Bel et Cuche, (1969) et le projet ERESS, (1972).

L'ensemble de ces travaux a permis de dresser une carte piézométrique initiale ou encore peu influencée par pompage, à l'échelle du bassin du Sahara Septentrional.

Cette piézométrie a concerné les formations calcaires sénoniennes et éocènes ainsi que les sables du Pontien (Oued Righ et Djérid) assez souvent en relais hydrogéologiques. Elle se raccorde parfaitement et permet d'avoir la continuité de l'écoulement souterrain en passant d'une zone à l'autre, (OSS, 2003).

L'examen de la carte piézométrique (Fig. III.5) met en évidence les zones d'alimentation, à savoir:

- L'Atlas Saharien du Nord-ouest.
- Le Dahar à l'Est.
- Le Tinrhert au Sud.
- Le J. Nafusa au Nord-est

Les zones d'exutoires sont principalement centrées sur les Chotts algéro-tunisiens et sur le Golfe de Syrte.

L'écoulement de cette nappe se produit (Fig. III.4):

- A partir de la dorsale du M'zab, où l'ensemble de l'écoulement converge vers les zones des chotts (c'est-à-dire qu'il se renverse et s'effectue du Sud vers le Nord sous le Grand Erg Oriental).
- Dans le sens Ouest-est, où les eaux en provenance de l'Atlas Saharien, convergent vers la zone des chotts.
- Dans le sens Sud-Nord, du plateau du Tinrhert vers la zone des chotts et le golfe de Syrte.

Le concept de recharge ainsi que ses conditions sont adoptables pour tout les aquifères du SASS, de ce fait, le CT doit obéir aux mêmes conditions.

Certains auteurs pensent que les eaux des nappes du Sahara sont fossiles (Burdon, 1977 ; Margat & Saad, 1982 et 1984 ; Margat, 1990) in Ould Baba Sy, (2005), c'est-à-dire qu'elles se sont infiltrées et accumulées au cours des temps géologiques, leur alimentation s'est poursuivie au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire par infiltration sur les affleurements des couches perméables jusqu'à débordement de ces derniers, et que le niveau actuel des nappes traduit le résultat d'un tarissement pur depuis l'Holocène (Ould Baba Sy, 2005). Pour d'autres par, contre il existe une recharge actuelle des nappes sahariennes. Cette

alimentation se manifeste lorsque certaines conditions climatiques, topographiques et géologiques sont réunies (Dubief, 1953).

Les précipitations exceptionnelles associées à certaines conditions de surface spécifiques (sols à grains grossiers) peuvent être particulièrement génératrices de recharges (Ould Baba Sy, 2005). L'alimentation des nappes du Sahara septentrional, par exemple se manifeste sur les bordures Nord du bassin lorsque trois conditions sont réunies:

- Des précipitations suffisantes.
- Un relief relativement accentué pour produire un ruissellement dans les oueds.
- L'affleurement de formations perméables appartenant à un des systèmes aquifères ou en relation directe avec un des aquifères sahariens (Dubief, 1953).

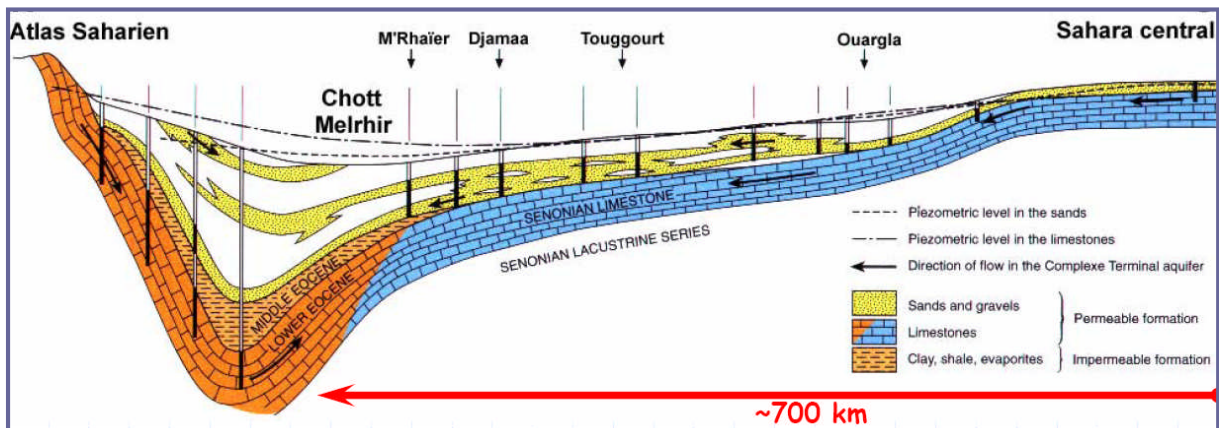


Fig. III.4 : Coupe hydrogéologique transversale du CT (UNESCO, 1972)

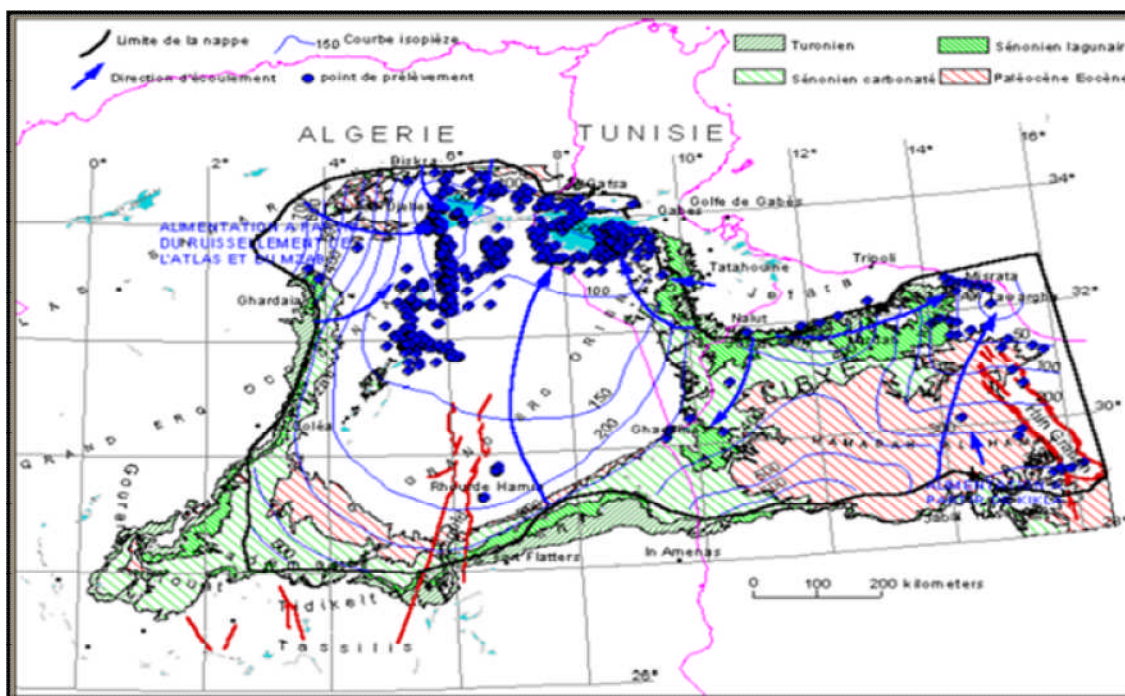


Fig. III.5 : Carte piézométrique de référence du CT (OSS, 2003)

**III.4- Conclusion**

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) regroupe deux énormes réservoirs d'eaux souterraines ; le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT). Ce dernier s'étale sur une surface de 350 000 km<sup>2</sup> et couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sa puissance moyenne est de 300 m environ.

La recharge actuelle de cette nappe peut se réaliser lorsque certaines conditions climatiques (des précipitations exceptionnelles), topographiques (relief favorisant le ruissellement des oueds) et géologiques (affleurements perméables) se réunissent.

# *Chapitre IV*

## *Matériels et méthodes*

## **IV.1- Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes de notre travail commençant par la reconnaissance géologique et lithologique de la région d'étude par établissement des coupes lithostratigraphiques et analyse de quelques échantillons par diffraction des rayons X et la fabrication de quelques lames minces, puis les analyses physicochimiques des eaux effectués sur les 32 échantillon prélevés des forages mio-pliocènes (nappe des sables) le long de la zone d'étude et suivant le sens d'écoulement des eaux de cette nappe. Des programmes informatiques (logiciels) vont être employés pour modélisations: graphique, cartographique, statistique et géochimique, des paramètres physicochimiques et en tirer des renseignements particuliers. Par ailleurs, des concepts utilisés dans la modélisation géochimiques des eaux nécessitent d'être brièvement présentés.

## **IV.2- Traitement des données géologiques**

Au niveau de cette partie, nous allons nous baser essentiellement sur le traitement des données des différents forages réalisés soit par la société nationale SONATRACH dans le cadre de l'exploitation des réserves en hydrocarbures, ou bien les forages d'eau réalisés par l'agence nationale des ressources hydriques (ANRH) dont le but d'établir des coupes géologiques descriptives de la lithologie des aquifères de toute la zone d'étude.

## **IV.3- Prélèvement des échantillons**

### **IV.3.1- Echantillons de roche**

#### **IV.3.1.1- Echantillons pour analyse par diffraction X**

Six (6) échantillons ont été prélevé dans des différentes régions couvrant toute la zone d'étude sur les affleurements mio-pliocènes, les points d'échantillonnage se situent dans les mêmes régions où les échantillons d'eaux ont été prélevé (Ouargla, Touggourt, Djamaa, Mghaier, Oum Tior et Still). Ces six échantillons ont été prélevés à 30 cm de profondeur, séchés et broyés puis analysé par diffractomètre de rayons X.

Les corps cristallins peuvent être considérés comme des assemblages de plans réticulaires plus ou moins denses. Les plans contiennent les atomes : certains plans contiennent bien plus d'atomes que d'autres en fonction de la formule chimique du minéral. Ces plans réticulaires sont séparés par des distances caractéristiques (d) selon la nature du cristal ou du minéral considéré. Trois ou quatre distances réticulaires bien choisies permettent une reconstitution du réseau cristallin du minéral.

Les rayons X, comme toutes les ondes électromagnétiques, provoquent un déplacement du nuage électronique par rapport au noyau dans les atomes ; ces oscillations induites provoquent une réémission d'ondes électromagnétiques de même fréquence ; ce Phénomène est appelé diffusion Rayleigh.

La longueur d'onde des rayons X étant de l'ordre de grandeur des distances interatomiques (quelque angström), les interférences des rayons diffusés vont être alternativement constructives ou destructives. Selon la direction de l'espace, on va donc avoir un flux important de photons X, ou au contraire très faible ; ces variations selon les directions forment le phénomène de diffraction X.



### IV.3.1.2- Echantillons pour fabrication des lames minces

L'échantillonnage s'est effectué au niveau des affleurements mio-pliocènes d'El Khafdji (cuvette de Ouargla), les échantillons prélevés sont de nature friable et peu compacts, parfois durs, les grès à ciment gypseux sont très durs et ils ne présentent aucune difficulté, c'est les grès friables qui présentent des contraintes pour la préparation des lames minces.

### IV.3.2- Echantillons d'eaux

Trente deux (32) échantillons d'eau (Figure IV.1) de la nappe des sables du Mio-Pliocène ont été prélevés dans des flacons en polyéthylène de volume de 1500 ml pendant la période allant d'Avril à Mai 2011. Les flacons ont été bien rincés à l'eau du forage lui même, et égouttés puis remplis par l'eau à analyser. Ils ont été transportés au laboratoire puis conservés à 4 °C (Rodier, 2009).

L'emplacement des points échantillonnés couvre une étendue d'environ de 350 km allant de Ouargla jusqu'aux zones d'exutoire de la nappe (chott Merouane et Melghigh) et sont répartis sur trois régions (Ouargla, Touggourt et El Oued) selon la direction d'écoulement des eaux (Sud/Nord).

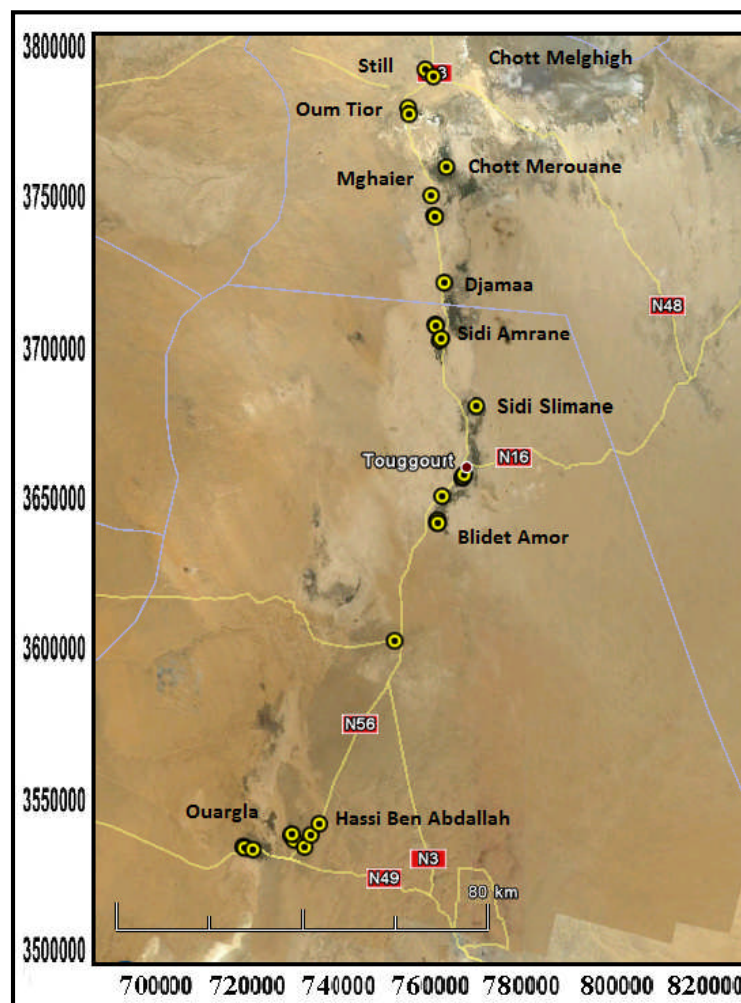


Figure IV.1 : Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau



### IV.3.2.1- Mesures In Situ

Les paramètres physico-chimiques suivants : le potentiel d'hydrogène (pH), la température (T°) et la Conductivité électrique (CE) ont été mesurés *in situ*, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon.

#### IV.3.2.1.1- Le pH et T°

Ces paramètres ont été mesurés à l'aide d'un pH mètre de terrain de marque Hanna, réf : HI 9025. Affichage simultané du pH et de la température. De gammes : pH : 0 → 14 ; T° : 0 → 100°C.

#### IV.3.2.1.2- La conductivité électrique (CE)

Ce paramètre a été déterminé à l'aide d'un Conductivimètre type CD 4301 de gammes de mesure : 0-199,9µS, 0,2-1,999mS et 2-19,99mS. La compensation de la température d'utilisation est automatique de 0° à 50°C.

### IV.3.2.2- Analyses au laboratoire

Les analyses des paramètres physico-chimiques des eaux ont été effectuées au laboratoire d'analyses physico-chimiques et de corrosion de la SONATRACH, direction régionale de Haoud Berkaoui (Ouargla), et au laboratoire de l'ANRH de Ouargla.

#### IV.3.2.2.1- Par spectrophotométrie

Les sulfates, les nitrates, les nitrites, et le fer total ont été dosés par un spectrophotomètre type DR2000, marque HACH, avec des réactifs en gélules :

Elément	Longueur d'onde	Réactif
Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	450 nm	SulfaVer 4
Les nitrates ( $\text{NO}_3^-$ )	500 nm	NitraVer 5
Les nitrites ( $\text{NO}_2^-$ )	507 nm	NitriVer 3
Le fer total (Fe)	510 nm	FerroVer

#### IV.3.2.2.2- Par photométrie de flamme

Le sodium  $\text{Na}^+$ , et le potassium  $\text{K}^+$  : sont analysés par un photomètre à flamme, de marque JENWAY. Photomètres de flamme Modèle IC9223, de précision : < 0.2 ppms.

Les réactifs sont des solutions étalons de chaque élément. Les courbes d'étalonnage correspondantes au dosage de ces éléments sont représentées dans les figures (Figure IV.2, IV.3).

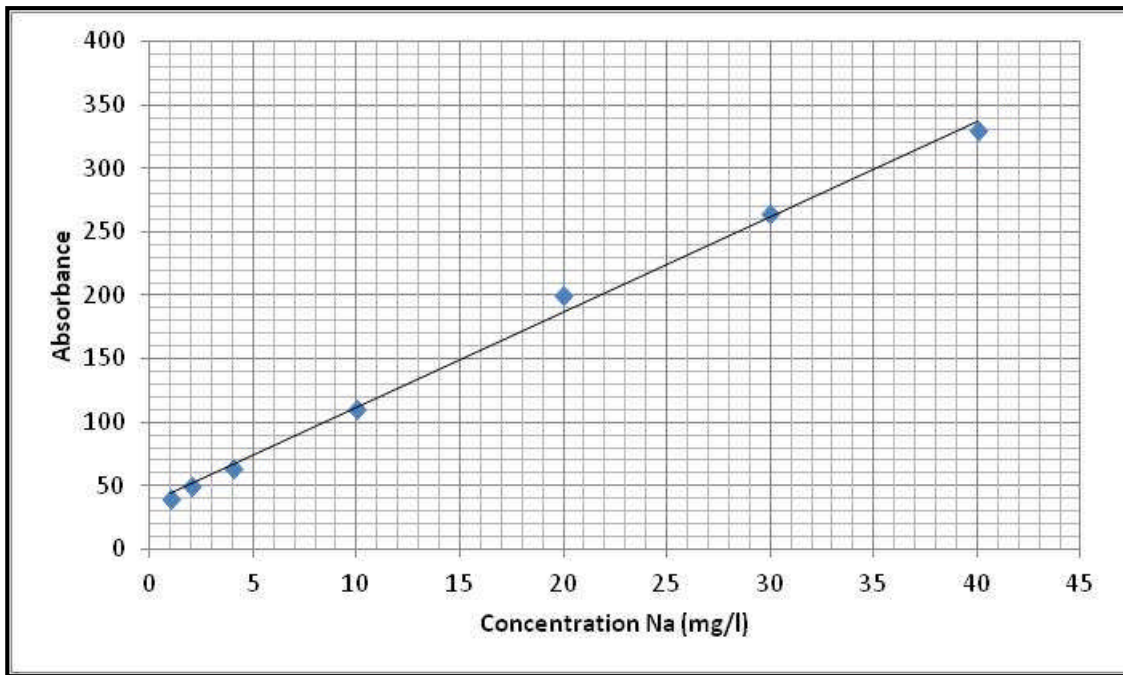


Figure IV.2 : Courbe d'étalonnage du Sodium (Na)

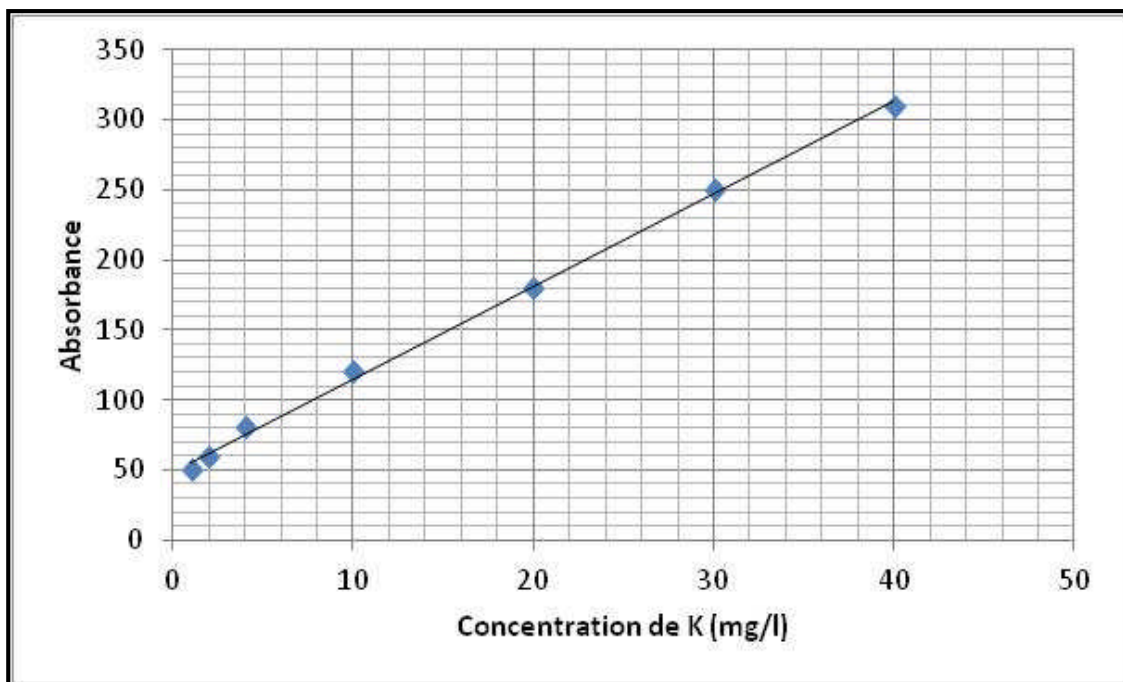


Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage du Potassium (K)

#### IV.3.1.2.3- Par titrimétrie

Les Chlorures  $\text{Cl}^-$ , les bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$ , ainsi que le calcium  $\text{Ca}^{2+}$  ont été dosés par titrimétrie (Rodier, 2009).

- Les chlorures  $\text{Cl}^-$ , selon la méthode de MOHR (Rodier, 2009), basée sur le titrage d'un volume d'eau avec une solution de nitrates d'argent  $\text{AgNO}_3$  concentrée en présence de l'indicateur Chromates de potassium ( $\text{K}_2\text{CrO}_4$ ), jusqu'au virage de la coloration du jaune au rouge brique et le début du dépôt d'un précipité rouge.
- Les carbonates  $\text{CO}_3^{2-}$  et les bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$ , par ajustement de pH à 4,4 par l'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) en maintenant la température de l'eau à analyser à 25°C. Il est à noter que  $\text{CO}_3^{2-}$  n'existe pas car le pH est toujours compris entre 4,4 à 8,3 dans tous les échantillons.
- Le calcium  $\text{Ca}^{2+}$ , par ajout d'un volume de solution d'hydroxyde de sodium (NaOH), avec une pincée de calcone carboxylique comme indicateur, puis titrage avec une solution d'EDTA jusqu'au virage de la coloration vers le bleu.

#### IV.3.1.2.4- Par complexométrie

La dureté totale a été déterminée par complexométrie, en utilisant l'EDTA magnésien comme réactif et le noir Eriochrome comme indicateur coloré. Ce dosage représente la mesure de la dureté de l'eau (TH) en degré français, avec  $\text{TH} (^\circ\text{F}) = [\text{Ca}^{2+} (\text{m}\acute{\text{e}}\text{q.l}^{-1}) + \text{Mg}^{2+} (\text{m}\acute{\text{e}}\text{q.l}^{-1})] \times 5$ , et par conséquent :  $\text{Mg}^{2+} = \text{TH} - \text{Ca}^{2+}$ .

### IV.4- Outil informatique

#### IV.4.1- RockWorks 15

Le logiciel RockWorks établit des logs et des coupes géologiques en introduisant les données des forages: la profondeur totale du forage, son altitude (Z), le toit et le mur de chaque couche, sa nature lithologique en prenant en considération les figurés conventionnels de chaque formation géologique (calcaire, marne, argile, sable...etc.), la stratigraphie si nous travaillons sur plusieurs étages (Albien, Cénomaniens, Turonien...etc.)

Le logiciel Rock Works peut établir des corrélations entre plusieurs logs stratigraphiques et nous donne en suite des coupes géologiques significatives.

#### IV.4.2- Match! 2

Ce logiciel permet de traiter et d'interpréter les spectres de diffraction des rayons X en appliquant la loi de Bragg, chaque raie observée sur les spectres correspond à une distance inter-réticulaire  $d_{hkl}$  d'un minéral qui est calculée selon la formule de Bragg :

$$D_{hkl} = \lambda / 2 \sin \theta$$

Où :  $\lambda$  est la longueur d'onde et  $\theta$  est l'angle de faisceau incident. Les mesures sont effectuées sur le domaine de  $2\theta = 10$  à  $90^\circ$ .

#### IV.4.3- Statistica.v6.1

Nous nous sommes servis de ce logiciel afin de déterminer les paramètres statistiques de nos données physicochimiques. Il s'agit de coefficient de corrélation, les valeurs max, min, ainsi que l'écart type. Une méthode de classification hiérarchique ascendante (CHA), a été

réalisée par ce programme qui consiste à classer "p" variables, "n" observations, par construction d'une matrice de distances entre les variables et les observations. On définit ensuite une règle de calcul de distances entre les groupements disjoints de variables ou d'observations. Les deux groupements dont la distance est la plus faible (selon ce critère) se réunissent et on réitère le processus jusqu'au regroupement complet de classes (Saporta, 1990 in Nezli, 2009). On peut représenter la classification ascendante hiérarchique par un dendrogramme ou arbre de classification.

#### IV.4.4- Phreeqci 2.18

L'étude géochimique a été effectuée par simulation à l'évaporation naturelle (température de l'échantillon), en utilisant le logiciel thermodynamique chimique, Phreeqci.v.2.18. Le calcul de l'indice de saturation ( $IS = \log(Q) / \log(Kps)$ ) des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de Debye-Hückel, en considérant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle de -0,5 à +0,5.

#### V.4.5- Diagramme 5.1

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles témoignant les teneurs relatives en chacun des ions par rapport au total des ions. A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle.

#### IV.4.6- Surfer 9

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

### IV.5- Les concepts utilisés dans la modélisation géochimiques des eaux

#### IV.5.1- L'activité et le coefficient d'activité

##### IV.5.1.1- L'activité ionique

A température et à pression constantes, l'enthalpie libre molaire partielle de Gibbs  $G_i$  ou le potentiel chimique  $\mu_i$  de l'espèce ionique  $i$  est défini d'après Valles et Bourgeat (1988a) et Valles et De Cockborne (1992) par :

$$\mu_i = G_i = (\delta G / \delta n_i)_{T,P,n_j \neq i}$$

Où:

G: enthalpie libre de Gibbs

$n_i$  et  $n_j$  : nombre de moles de composés  $i,j$

T: température absolue (°K)

P: pression

L'activité  $a_i$  de l'espèce  $i$  est en relation avec son potentiel chimique par :

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i \quad \text{où} \quad a_i = \exp [(\mu_i - \mu_i^\circ)/RT]$$

Où:

$\mu_i^\circ$  : potential chimique standard (constant thermodynamique)

R: constant de gaz parfait = 8,314

T: temperature

La relation entre l'activité  $a_i$  et la molalité  $m_i$  peut s'écrire:

$$a_i = \gamma_i \cdot m_i$$

Avec

$a_i$ : activité de l'ion  $i$

$\gamma_i$ : coefficient d'activité de l'ion  $i$  en solution

$m_i$ : molalité (concentration d'ion  $i$  en moles/Kg d'eau)

#### IV.5.1.2- Le coefficient d'activité

$\gamma_i$  de l'ion  $i$  est une grandeur qui dépend de la température, de la charge de l'ion et surtout de la présence d'autres ions dans la solution. Le coefficient d'activité est calculé par l'expression de la loi de Debye et Hückel (1923) :

$$-\log \gamma_i = AZ_i^2 \sqrt{I} / (1 + a_i^\circ B \sqrt{I})$$

Où :

A et B : constantes de Debye-Hückel, caractéristiques du solvant pur, dépendants de la température et de la pression.

$Z_i$ : la charge de l'ion  $i$

$a_i^\circ$ : coefficient dépendant du rayon de l'ion  $i$  hydraté.

I : force ionique de la solution en mmol/l.

#### IV.5.1.3- La force ionique I

Elle est calculée en fonction de la molalité  $m_i$  et de la charge  $Z_i$  de tous les ions en solution:

$$I = \frac{1}{2} \sum Z_i^2 \cdot m_i$$

L'équation de Debye-Hückel (1923) n'est valable que pour des solutions diluées (force ionique  $I < 0,1$ ). Cependant, pour tenter d'étendre cette équation à des solutions plus concentrées ( $I > 0,1$ ), il a été proposé une équation qui fait intervenir un coefficient C de correction (Helgeson, 1969) :

$$-\log \gamma_i = [AZ_i^2 \sqrt{I} / (1 + a_i^\circ B \sqrt{I})] - C \cdot I$$

C : est un coefficient qui dépend de la température et de la nature des ions en solution.

Les valeurs des coefficients A, B et C sont données dans le tableau IV.1 et  $a_i^\circ$  dans le tableau IV.2.

**Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients A, B et C en fonction de la température (Helgeson, 1969)**

T°C	0	25	60	100
A	0,4884	0,5095	0,5471	0,6019
B.10 <sup>8</sup>	0,3241	0,3284	0,3347	0,3425
C	0,0174	0,0410	0,0440	0,0460

**Tableau IV.2 : Valeurs du coefficient a° pour les ions majeurs a° (Helgeson, 1969)**

a° (A°)	Ions
3,0	K <sup>+</sup> , Cl <sup>-</sup>
3,5	OH <sup>-</sup> , KSO <sub>4</sub>
3,8	KCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
4,0	Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , HS <sup>-</sup> , MgHCO <sub>3</sub> <sup>2+</sup>
4,3	NaSO <sub>4</sub> <sup>-</sup>
4,5	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , NaCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
5,0	S <sup>2-</sup>
5,2	CaHCO <sub>3</sub> <sup>+</sup>
6,0	Ca <sup>2+</sup> , Fe <sup>2+</sup> , Al(OH) <sup>2+</sup>
8,0	Mg <sup>2+</sup>
9,0	Al <sup>3+</sup> , H <sup>+</sup> , Fe <sup>2+</sup>

#### IV.5.1.4- L'activité de l'eau

Quand on considère des hydrates, on doit tenir compte du nombre de molécules d'eau dans le calcul du produit ionique de la solution, en appliquant la loi d'action de masse.

L'activité de l'eau dans un sel binaire est liée au coefficient osmotique de l'électrolyte par la relation suivante (Fritz, 1975).

$$\ln (H_2O) = -0,018 \gamma^{\pm} m \square$$

Où:

0,018 : représente l'inverse du nombre de mole d'eau par Kg de H<sub>2</sub>O.

$\gamma^{\pm}$ : est le nombre d'ion constituant l'électrolyte en question ( $\gamma^{\pm} = 2$  pour NaCl,  $\gamma^{\pm} = 3$  pour CaCl<sub>2</sub> .....).

m: molalité

$\square$ : coefficient osmotique de l'électrolyte présent dans la solution considérée (Helgeson, 1969).

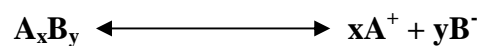
Pratiquement, on calcule l'activité de l'eau à partir des valeurs obtenues pour une solution de NaCl ayant la même force ionique que la solution considérée (Guédari, 1984). La formule devient :

$$\ln (H_2O) = -0,036 \gamma^{\pm} m$$

#### IV.5.2- Equilibre minéraux solutions

Lorsqu'un minéral est en contact avec une solution, un équilibre s'établit et il existe une relation entre les activités des ions en solution et les éléments qui entrent dans la composition du minéral. La loi d'action de masse établit cette relation selon le principe suivant :

Considérant la réaction d'équilibre d'un minéral  $A_xB_y$  en solution aqueuse :  $A_xB_y$  :



A l'équilibre, les activités ioniques des différentes espèces en solution vérifient la relation suivante :

$$K_{ps} = (A^+)^x \cdot (B^-)^y / (A_xB_y) \quad \text{avec :}$$

( ) : activité

$K_{ps}$  : constante de solubilité du minéral AB.

$(AB) = 1$ , pour un minéral AB pur.

La loi d'action de masse s'écrit alors si le minéral est pur :

$$K_{ps} = (A^+)^x \cdot (B^-)^y$$

La constante d'équilibre  $K_{ps}$  d'un minéral avec une solution, qui est en fait le produit de solubilité du minéral, est une constante indépendante de la composition chimique de la solution, mais qui est fonction de la température et de la pression. On l'exprime à 25 °C et à 1 atmosphère.

Le degré de saturation, de sous-saturation ou d'état d'équilibre d'une solution vis-à-vis d'un minéral n'est apprécié que si l'on peut comparer le produit de solubilité ( $K_{ps}$ ) au produit ionique ( $Q$ ) des ions de référence dans la solution :

$$Q = (A^+)^x \cdot (B^-)^y$$

Si  $Q = K_{ps}$ , la solution est juste à saturation vis-à-vis du minéral.

Si  $Q > K_{ps}$ , la solution est sursaturée par rapport au minéral.

Si  $Q < K_{ps}$ , la solution est sous-saturée par rapport au minéral.

Les produits de solubilité  $K_{ps}$  sont des constantes connues. Les tests de saturation ne peuvent être conduits que si on est en mesure de calculer la distribution des espèces aqueuses complexes et l'activité des ions servant de référence dans une solution donnée (Droubi et al, 1976).

Il est important aussi de rappeler certains principes de la solubilité de quelques sels, on s'intéresse aux sels des évaporites dont la dissolution a donné les faciès chlorurés et sulfatés, il s'agit de : Chlorure de sodium (NaCl), Sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ), Sulfate de magnésium ( $\text{MgSO}_4$ ), les eaux des roches évaporitiques, source de sels solubles, renferment en proportions variables les anions  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , et les cations  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{K}^+$ . Ces sels dissous possèdent généralement une grande solubilité dans l'eau comme en témoigne le tableau IV.3 concernant quelques espèces minérales simples. Parmi ces différents sels simples, seul le gypse présente une faible solubilité et sera le premier à précipiter.

**Tableau IV.3 : Solubilité des différents sels dans l'eau à 20° C (Schoeller, 1962)**

Désignation du sel	Formule chimique	Solubilité en « g » pour 100 cc d'eau à 20°C
Chlorure de sodium	NaCl	36,0
Sulfate de sodium	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	19,3
Sulfate de magnésium	$\text{MgSO}_4$	34,8
Sulfate de calcium	$\text{CaSO}_4$	0,19

#### IV.6- Conclusion

Afin de concrétiser une étude se rapportant à l'hydrogéochimie de l'aquifère du Mio-Pliocène de la région du Sahara Est septentrional, nous avons repéré dans la mesure du possible le maximum des forages d'eau ayant une bonne répartition significative dans toute la région, ainsi que des échantillons de roche. Des mesures in situ et des analyses au laboratoire ont été effectuées et ont porté sur la reconnaissance géologique de la région et un certain nombre de paramètres physicochimiques. Des programmes informatiques ont été utilisés pour représenter les paramètres sus indiqués et en tirer des renseignements particuliers.



# *Deuxième partie*

## *Résultats et discussion*

- *Reconnaissance géologique*
- *Hydrochimie et évolution géochimique des eaux*

# *Chapitre V*

## *Reconnaissance géologique*

## V.1- Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les résultats obtenus après le traitement des données géologiques, l'analyse par diffraction des rayons X et les lames minces.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en relation les caractéristiques géologiques et lithologiques de notre zone d'étude avec les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux dans le but de déterminer l'influence soit de la lithologie sur la composition géochimique des eaux ou même le contraire.

## V. 2- Reconnaissance géologique de la région

L'abstraction faite sur la carte des affleurements géologiques et sur le terrain lors d'échantillonnage montre que dans notre zone d'étude, seuls les terrains quaternaires et mio-pliocènes qui affleurent (Figure V.1, photos 1, 2 et 3).

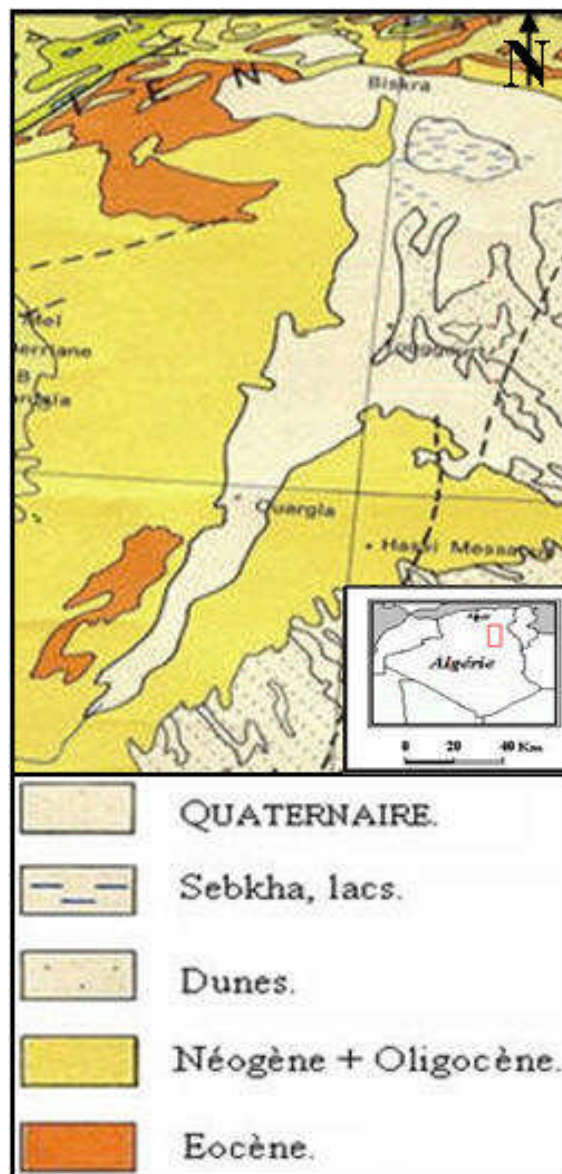


Figure V.1 : Carte géologique de la zone d'étude (Busson, 1972)

Le plateau à l'Ouest de Ouargla, ou le baten, vers 200-220 m d'altitude (Photo 1), forme l'extrémité de la dorsale du M'Zab, constitué des calcaires éocènes. Il domine, par un talus de 608 m, orienté Nord-Sud, la dépression de Ouargla, développée dans les sables et argiles calcaires et du gypse mio-pliocènes.

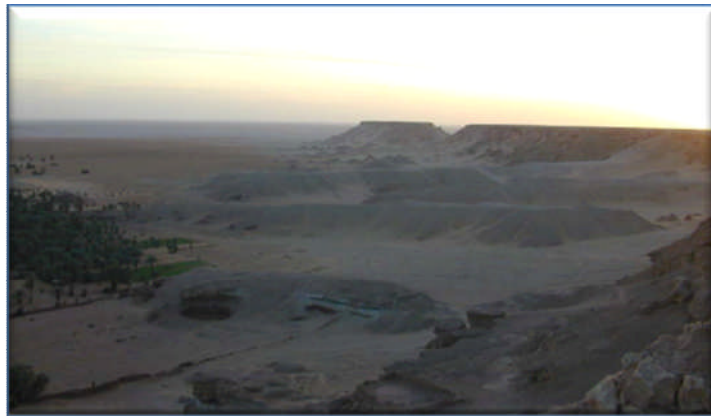


Photo 1 : Le plateau de Ouargla

Au Sud de Touggourt, dans l'ancien village d'El Goug (Photo 2), les buttes et les bas plateaux sont constitués d'argiles (probablement mio-pliocènes).

Au Nord de Blidet Amor (Photo 3), une coupe dans les formations mio-pliocènes, montre des sables à stratification entrecroisée typiquement fluviale. Vers le Nord-Ouest, les carrières entaillent les formations attribuées au Mio-Pliocène sur plusieurs dizaines de mètres de haut : il s'agit d'argiles et de limons, souvent gypseux, dépourvus de sable.



Photo 2: Les argiles d'El Goug



Photo 3: Les argiles et limons de Blidet Amor

Au Nord-Est, près de Djamaa, une butte tabulaire en bordure de la route nationale 3 est constituée d'argiles vertes, gypseuses, couvertes d'une croûte gypseuse. À Sidi Khelil, au Sud de Mghaïer, des buttes similaires dépassent 140 m d'altitude.

Au niveau de base constitué par le chott Merouane, les dépôts lacustres sont constitués d'argiles plus ou moins gypseuses. De dépôts sableux avec nombreux galets arrondis (Photo 4) sur la rive nord, preuve de l'apport accru par les oueds qui descendent de l'Atlas saharien et qui transportent des limons, alors que sur les rives sud et ouest, on observe que de rares plages sableuses.



Photo 4 : Dépôts sableux à petits galets

Les formations quaternaires sont représentées par des accumulations sableuses (ergs), elles occupent généralement les points bas des grands bassins sédimentaires et forment des "sebkhas" et "chotts".

## **V.2.1- Emplacement des forages et directions des coupes**

### **V.2.1.1- Région de Ouargla**

Les données de trois (3) forages allongés selon une direction SO/NE et une distance d'environ de 70 Km (Figure V.2) ont été utilisés pour établir la coupe géologique de la région de Ouargla à l'aide du logiciel RockWorks.

### **V.2.1.2- Région de Touggourt**

La coupe géologique de la région de Touggourt a été établie en basant sur les données lithologiques de quatre (4) forages (Figure V.2), elle est de direction SSE/NNO et s'allonge sur une distance de 40 Km environ.

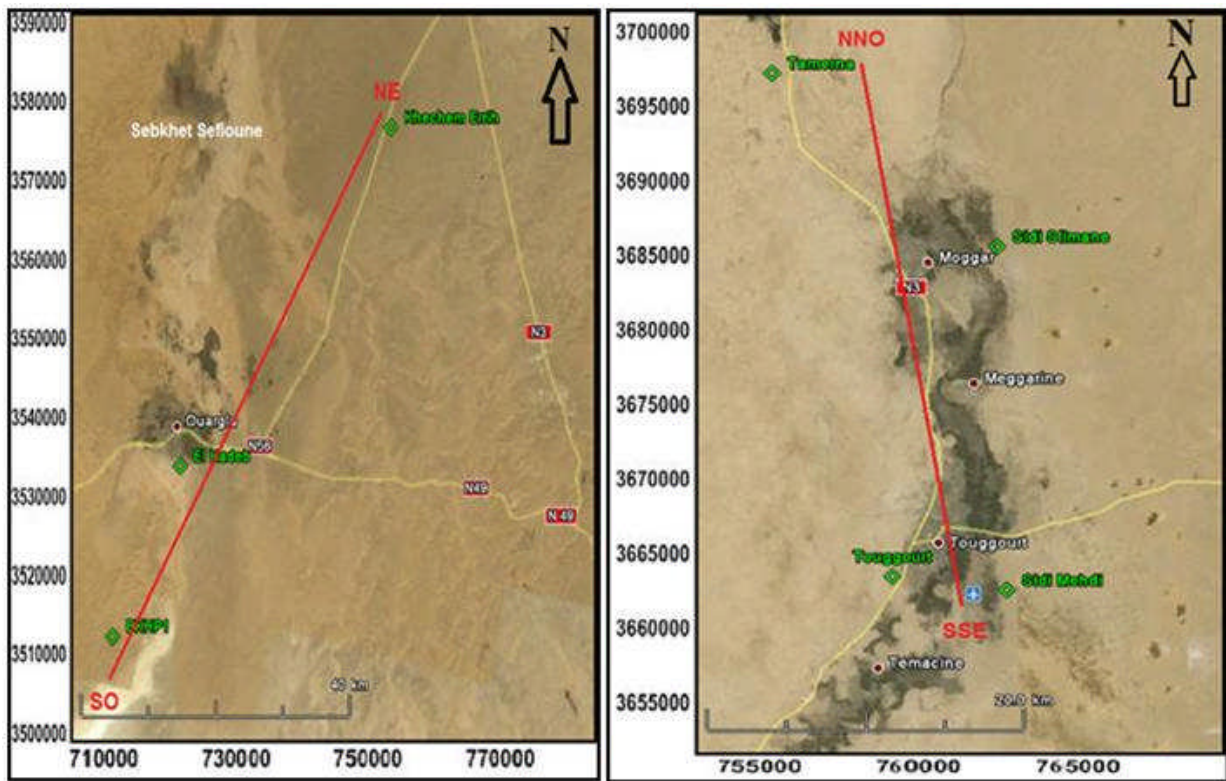
### **V.2.1.3- Région d'El Oued (Djamaa, Mghaier et Still)**

Les données de trois (3) forages (Figure V.3) ont été utilisées pour établir la coupe géologique de la région d'El Oued, elle est de direction SSE/NNO et s'allonge sur une distance de 100 Km environ.

### **V.2.1.4- Région d'étude**

Pour l'ensemble de la zone d'étude, nous sommes servis des données géologiques de sept (7) forages, la coupe tracée s'allonge sur une distance d'environ de 350 Km, et elle est de direction SSO/NNE (Figure V.3).

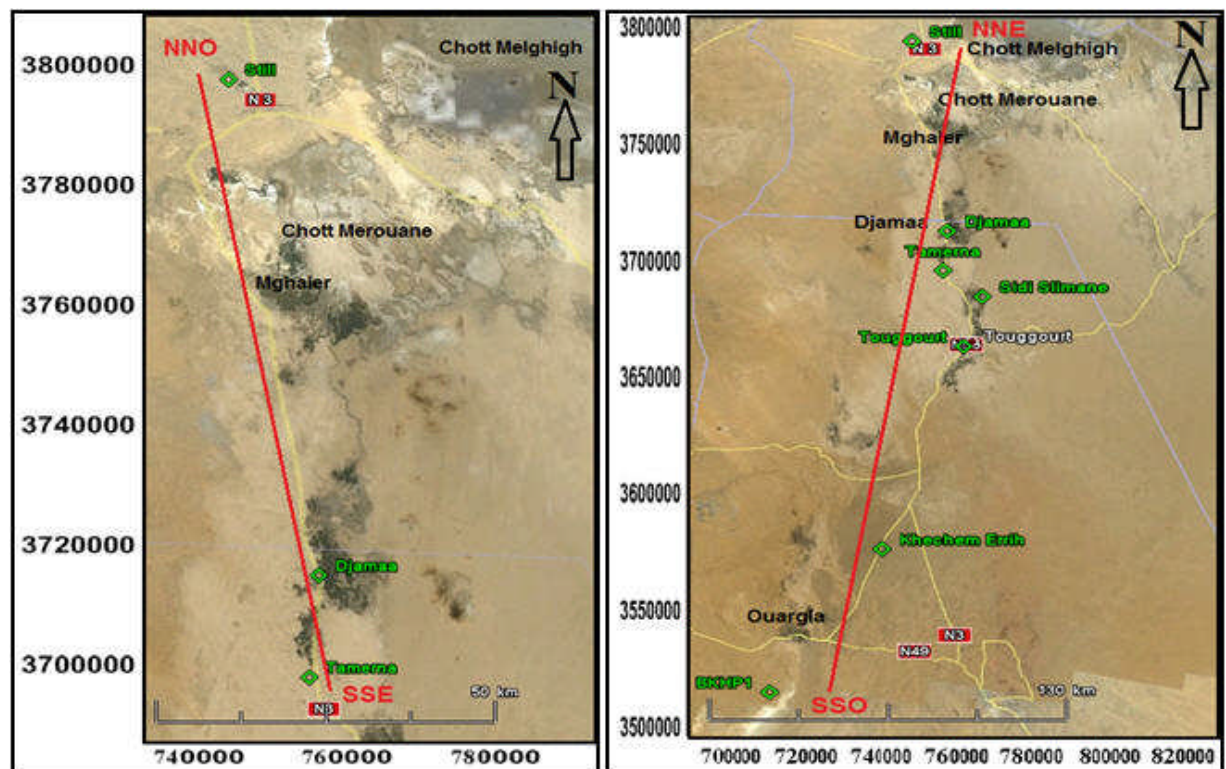




Région de Ouargla

Région de Touggourt

Figure V.2 : Carte des emplacements des forages et directions des coupes (Ouargla et Touggourt)



Région d'El Oued

Zone d'étude

Figure V.3 : Carte des emplacements des forages et directions des coupes (El Oued et zone d'étude)

## V.2.2- Description des coupes géologiques

### V.2.2.1- Région de Ouargla

On remarque par l'analyse de cette coupe (Figure V.4) l'abondance des formations carbonatées (calcaire, dolomie), l'absence du Paléogène (Paléocène, Eocène et Oligocène) au Sud de la région, une homogénéité des couches, une stratification quasi horizontale. En ce qui concerne la lithologie de chaque étage, on remarque ce qui suit:

L'Albien est caractérisé par une grande épaisseur (>400 m) dans presque tous les forages, il est marqué essentiellement par des formations détritiques: grès, sables, parfois argiles et marnes et très rarement des calcaires.

Le Cénomaniens est caractérisé surtout par des formations argileuses dolomitiques, on trouve parfois des calcaires, de l'anhydrite et rarement des sels, son épaisseur balance dans les environs de 200 m.

Le Turonien se manifeste sous forme de bancs calcaires d'une épaisseur ne dépassant pas les 100 m dans la plupart des cas, parfois crayeux avec des marnes.

Le Sénonien est subdivisé en trois sous étages, de bas en haut, on rencontre: le Sénonien salifère, le Sénonien anhydritique et le Sénonien carbonaté, ce dernier est caractérisé par des formations carbonatées (calcaire dolomitique en majorité), son épaisseur varie au voisinage de 200 m. Le deuxième est anhydritique, mais cela n'empêche pas de trouver quelquefois des calcaires, des argiles, des dolomies...etc., son épaisseur moyenne est de l'ordre de 240 m. Le Sénonien salifère comme son nom l'indique est connu par le sel massif, on trouve parfois des argiles, des calcaires et de l'anhydrite, l'épaisseur de cette formation est de l'ordre de 205 m en moyenne des cinq forages.

La limite entre l'Albien et le Sénonien est remarquablement épaisse car elle est formée par le Cénomaniens ( $\approx 180$  m) qui est une formation imperméable (argiles et marnes), donc on peut confirmer l'absence de tout contact entre les eaux des deux aquifères (à l'exception des cas de présence de failles et fissures).

L'Eocène, absent au Sud (Berkaoui), est caractérisé par des marnes, de l'anhydrite et parfois des sables au sommet, dit Eocène évaporitique (Lutézien), et des calcaires et des dolomies à la base, dit Eocène carbonaté (Yprésien), à une épaisseur relativement faible au centre (50 m) et épais au Nord de Ouargla ( $\approx 200$  m).

Le Mio-Pliocène de la région de Ouargla est formé par des sables et des grès et parfois des calcaires et des argiles, l'épaisseur de cette formation est de l'ordre de 75 m en moyenne au Sud (Berkaoui) et atteint les 250 m au Nord (Khechem Errih). Il peut y avoir des contacts entre les deux nappes sus-jacentes: Mio-Pliocène et Sénonien/Sénono-Eocène à cause de l'absence d'une limite imperméable claire, des changements d'eaux et des éléments chimiques peuvent être mis en place.

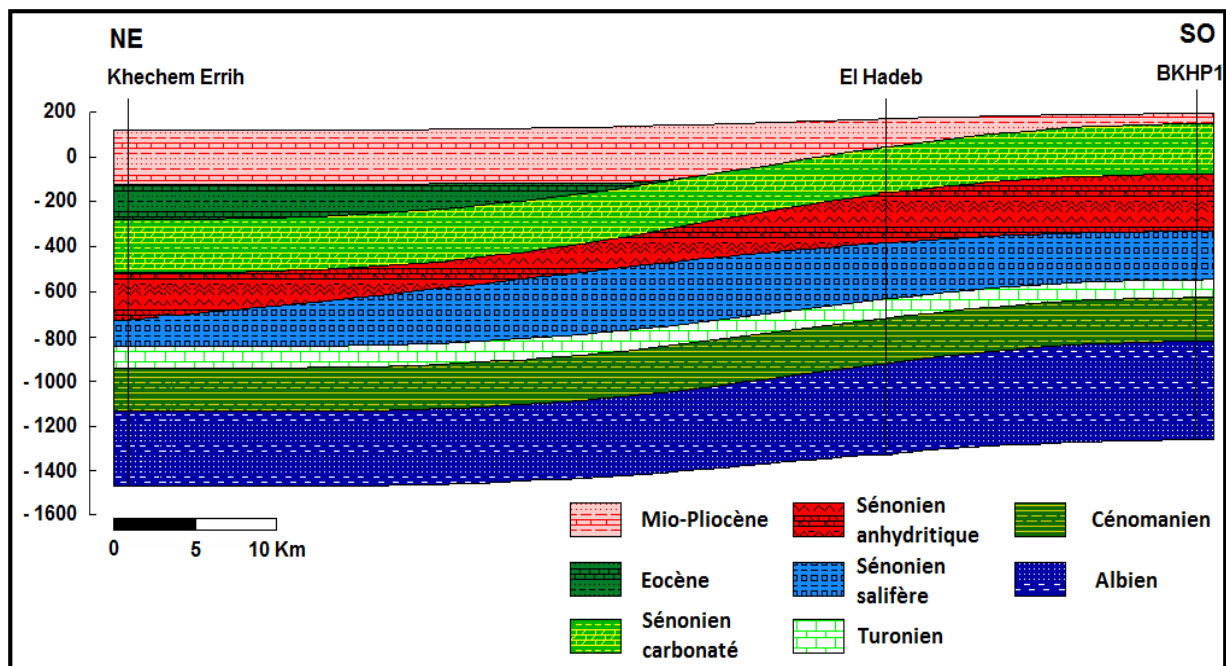


Figure V.4 : Coupe géologique de la région de Ouargla

#### V.2.2.2- Région de Touggourt

La région de Touggourt présente une stratigraphie quasi parfaite, les couches sont horizontales et leurs épaisseurs sont constantes le long de la coupe (Figure V.5).

L'Albien de cette région se caractérise par des formations détritiques (sable et grès) avec des passées d'argile plus ou moins importantes, la puissance de cet étage est de l'ordre de 200 m et relativement faible par rapport à la puissance de l'Albien de la région de Ouargla.

Le Vraconien, qui n'apparaît pas sur la coupe de Ouargla, se manifeste ici par alternance des formations carbonatées (calcaire et calcaire dolomitique) et lacustres et lagunaires (marne, argile et parfois gypse et anhydrite), son épaisseur est de 100 m environ.

Le Cénomaniens marneux argileux présente quelques fois des passées de gypse et d'anhydrite, son épaisseur varie entre 150 et 250 m environ.

Le Turonien carbonatées (calcaire massif et parfois calcaire dolomitique) et quelques fois avec des passées d'argile et de marne et même d'anhydrite. Il est de 80 à 100 m d'épaisseur.

Le Sénonien salifère se caractérise par le sel massif dans toute la région, il a une épaisseur relativement faible ( $\approx 80$  m).

Le Sénonien anhydritique, puissant au niveau de la région de Touggourt ( $\approx 400$  m), formé d'anhydrite, d'argile et de marne avec des passées de calcaire dolomitique.

Le Sénonien carbonatés puissant aussi dans cette région ( $\approx 300$  m), se manifeste des calcaires dolomitiques dominants au sommet et des passées d'argile, marne et anhydrite et parfois gypse à la base.



L'Eocène avec des calcaires et calcaires dolomitiques et parfois des argiles et gypses à la base, et des marnes, calcaires marneux au sommet. Son épaisseur est de l'ordre de 150 m en moyenne.

Le Mio-Pliocène, avec des sables, des grès et des graviers, des évaporites, plus des passées d'argile et parfois des calcaires, son épaisseur atteint les 100 m dans presque toute la région.

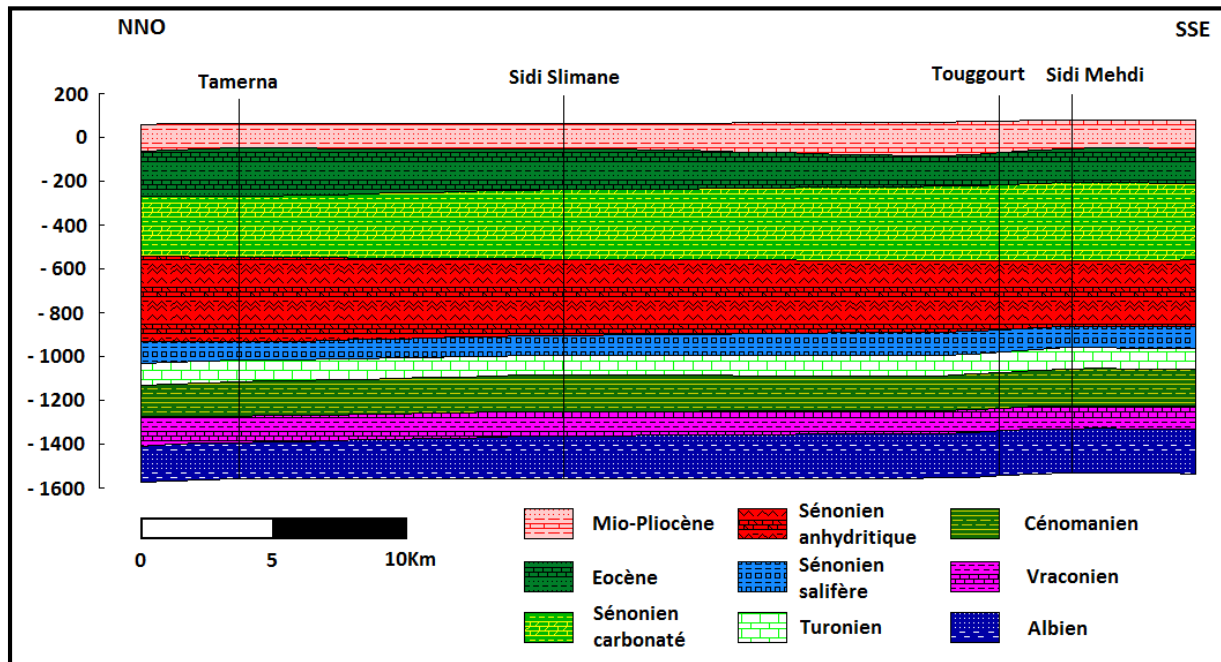


Figure V.5 : Coupe géologique de la région de Touggourt

### V.2.2.3- Région de Souf

La région de Souf (Figure V.6) ne présente plus la même homogénéité et l'aspect horizontal de ses couches géologiques, elles sont légèrement plissées en allant vers le nord (Still).

L'Albien se caractérise par des formations détritiques (sable et grés) avec des passées d'argile plus ou moins importantes et dominantes au sommet, la puissance de cet étage est de l'ordre de 200 m environ et pareille à celle de l'Albien de Touggourt.

Le Vraconien est caractérisé par des calcaires et calcaires dolomitiques et parfois des marnes, argiles gypse et anhydrite, son épaisseur varie entre 100 à 200 m environ.

Le Cénomaniens marneux et argileux présente avec des passées de gypse et d'anhydrite, son épaisseur varie entre 20 à 250 m environ.

Le Turonien carbonatées (calcaire massif et parfois calcaire dolomitique) et quelques fois avec des passées d'argile et de marne et même d'anhydrite. Il est de 80 à 100 m d'épaisseur, cette couche est légèrement plissée.

Le Sénonien salifère se caractérise par le sel massif dans toute la région, il a une épaisseur relativement faible ( $\approx 80$  m) au Sud et puissant vers le Nord et atteint 400 m environ.

Le Sénonien anhydritique représenté dans la coupe par une couche horizontale et épaisse ( $\approx 400$  m), formé d'anhydrite, d'argile et de marne avec des passées de calcaire dolomitique.

Le Sénonien carbonatés puissant au Sud de cette région ( $\approx 300$  m) et probablement absent au Nord, se manifeste par des calcaires et dolomies avec des intercalations gypseuses et anhydritiques.

L'Eocène avec des calcaires et à intercalations sableuses et marneuses avec quelques fois des gypses. Il est relativement épais au centre ( $\approx 200$  m) et mince au Sud et au Nord ( $\approx 100$  m).

Le Mio-Pliocène, avec des sables, des grés et des graviers, plus des passées d'argile et parfois de calcaire, son épaisseur est d'environ 50 m au Sud de la région, et elle dépasse les 400 m au Nord (Still). En fait, on remarque que dans ces régions (Mghaier, Oum Tior et vers Still) la dominance des formations argileuses.

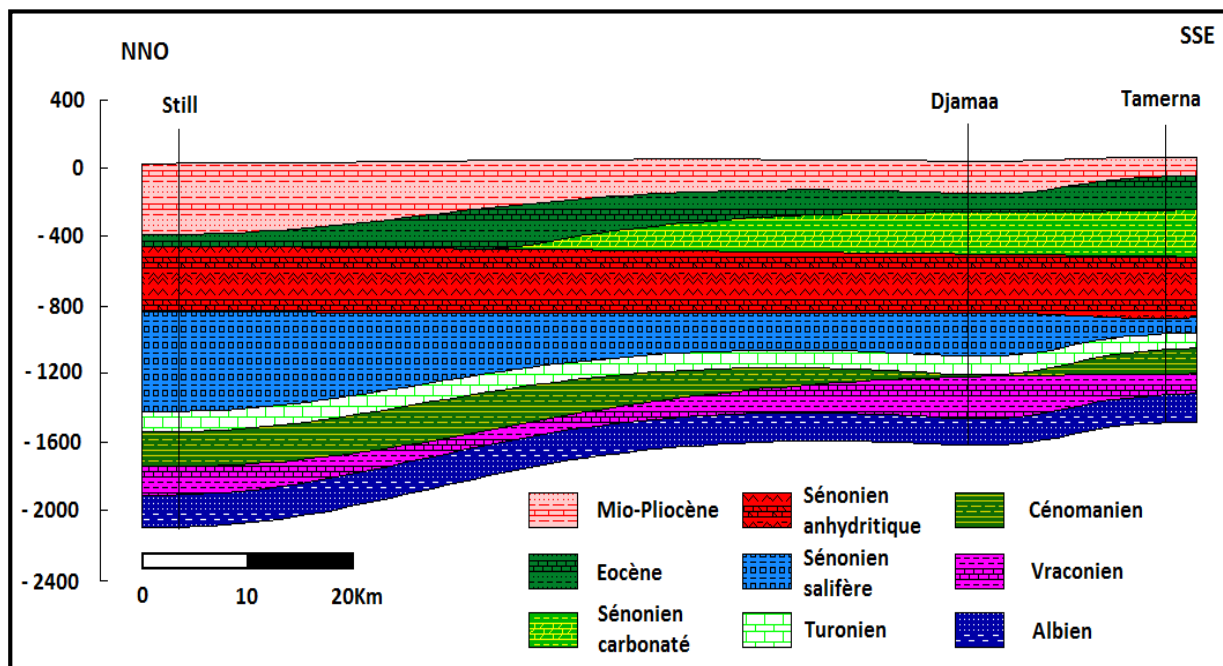


Figure V.6 : Coupe géologique de la région d'El Oued

#### V.2.2.4- Synthèse des données géologiques de la zone d'étude

Pour synthétiser toutes les caractéristiques géologiques de la zone d'étude, nous sommes servis des données des forages disponibles (Figure V.7) et nous avons établis une coupe géologique synthétique.

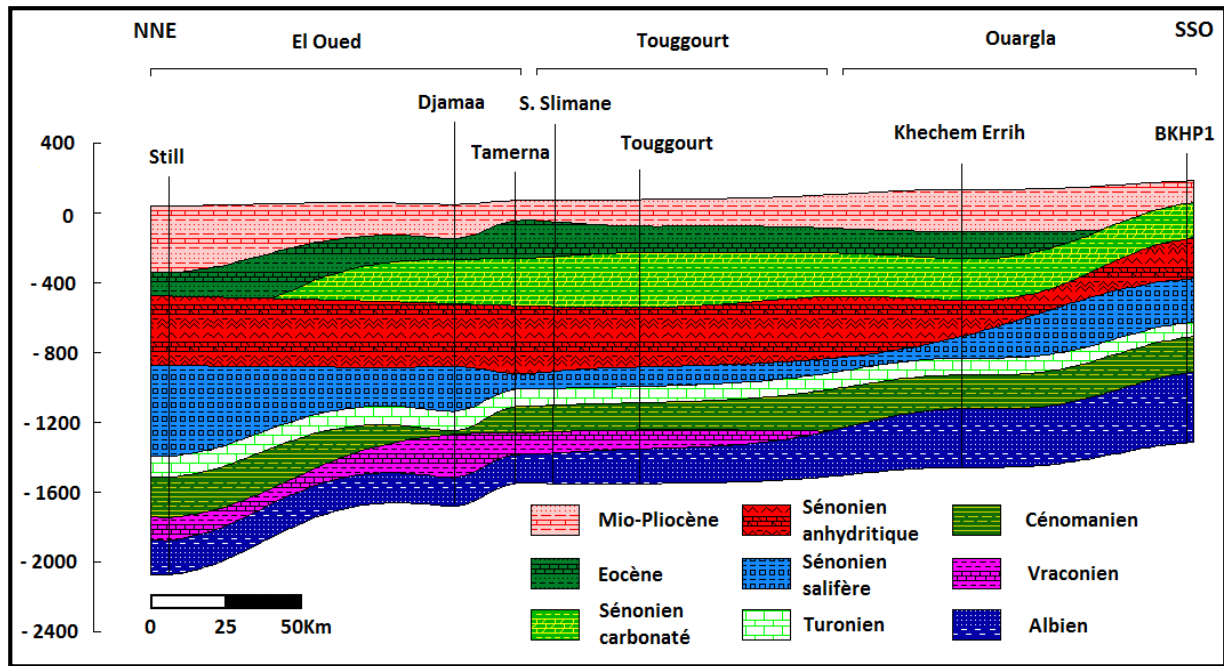


Figure V.7 : Coupe géologique synthétique de la zone d'étude

### V.2.3- Interprétation des spectres de diffractométrie des rayons X

Six (6) échantillons ont été prélevés dans des différentes régions couvrant toute la zone d'étude (Figure V.8) sur des affleurements mio-pliocènes, les points d'échantillonnage se situent dans les mêmes régions où les échantillons d'eaux ont été prélevés (Ouargla, Touggourt, Djamaa, Mghaier, Oum Thior et Still). La figure suivante présente l'emplacement des stations de prélèvement.

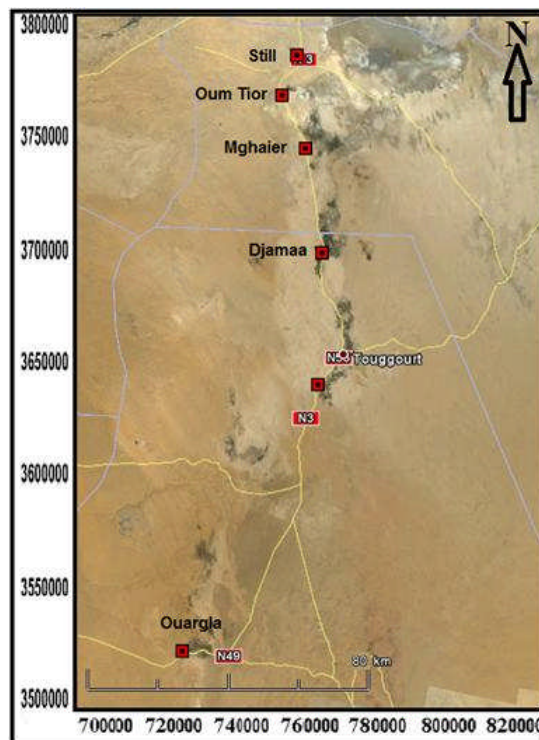


Figure V.8 : Carte des emplacements des points d'échantillonnage

L'ensemble des spectres de diffraction des rayons X établis révèlent une dominance du Quartz et du gypse, synonymes d'affleurements riches en sables, argiles et évaporites (gypses).

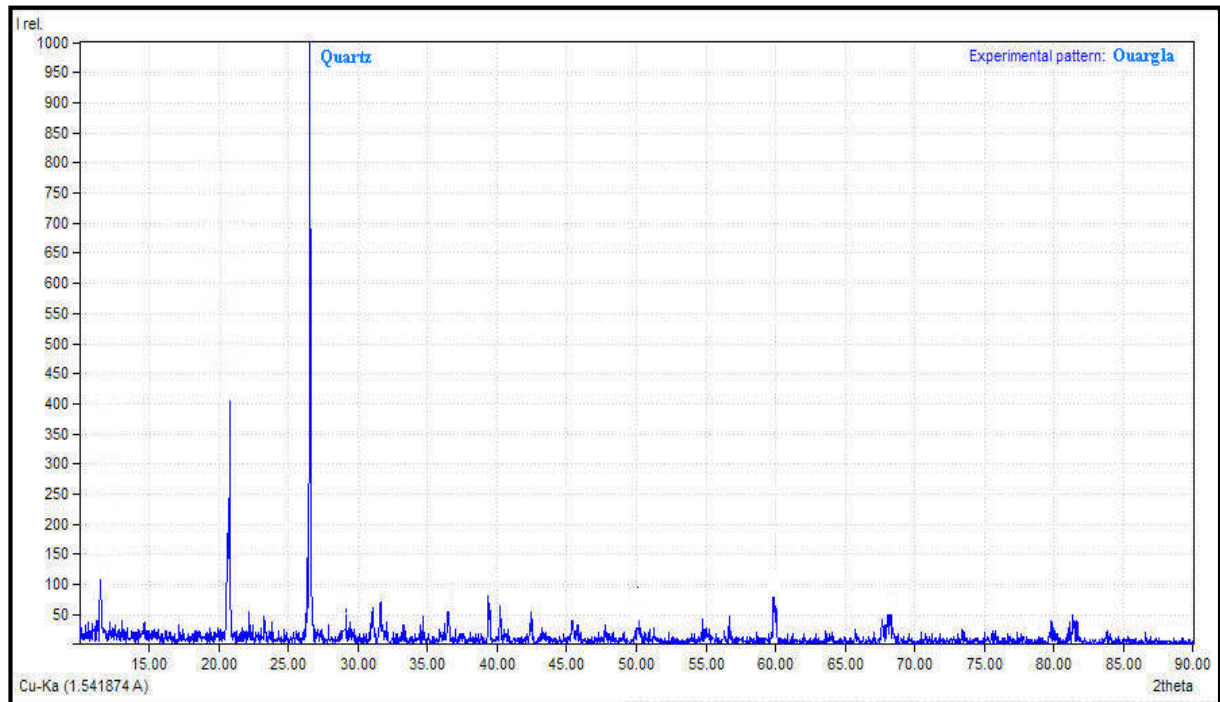


Figure V.9 : Spectre de diffraction et minéraux présents (Ouargla)

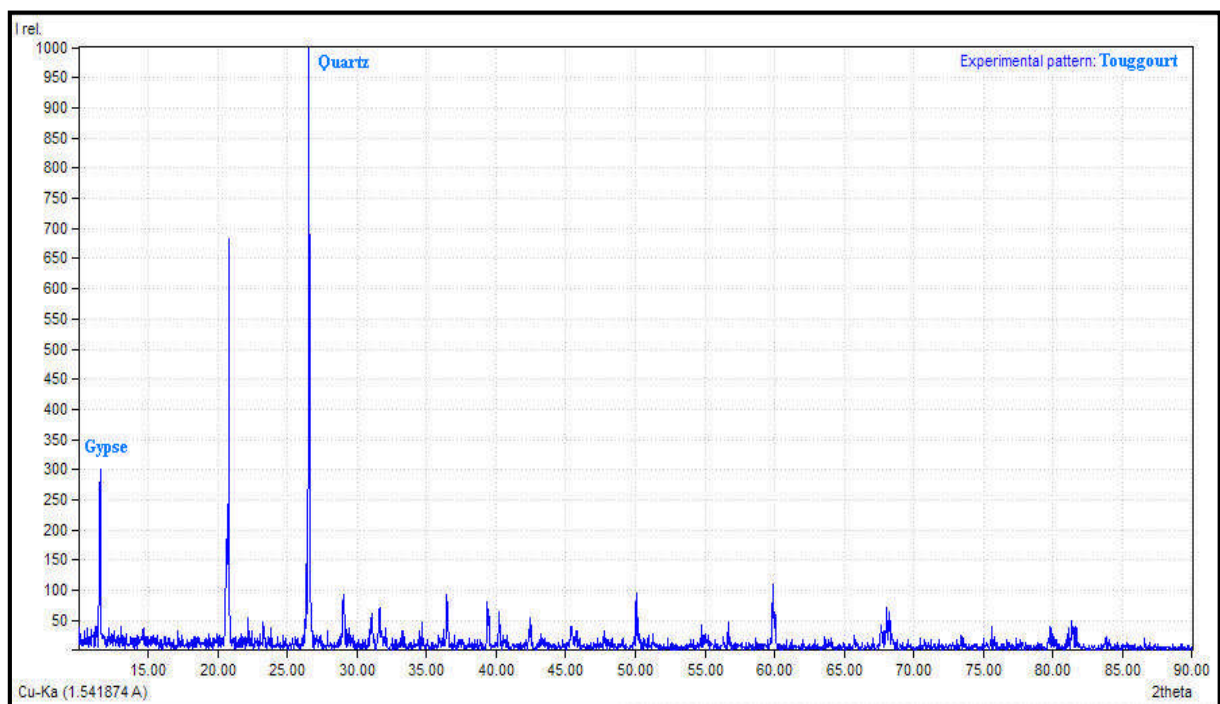


Figure V.10 : Spectre de diffraction et minéraux présents (Touggourt)

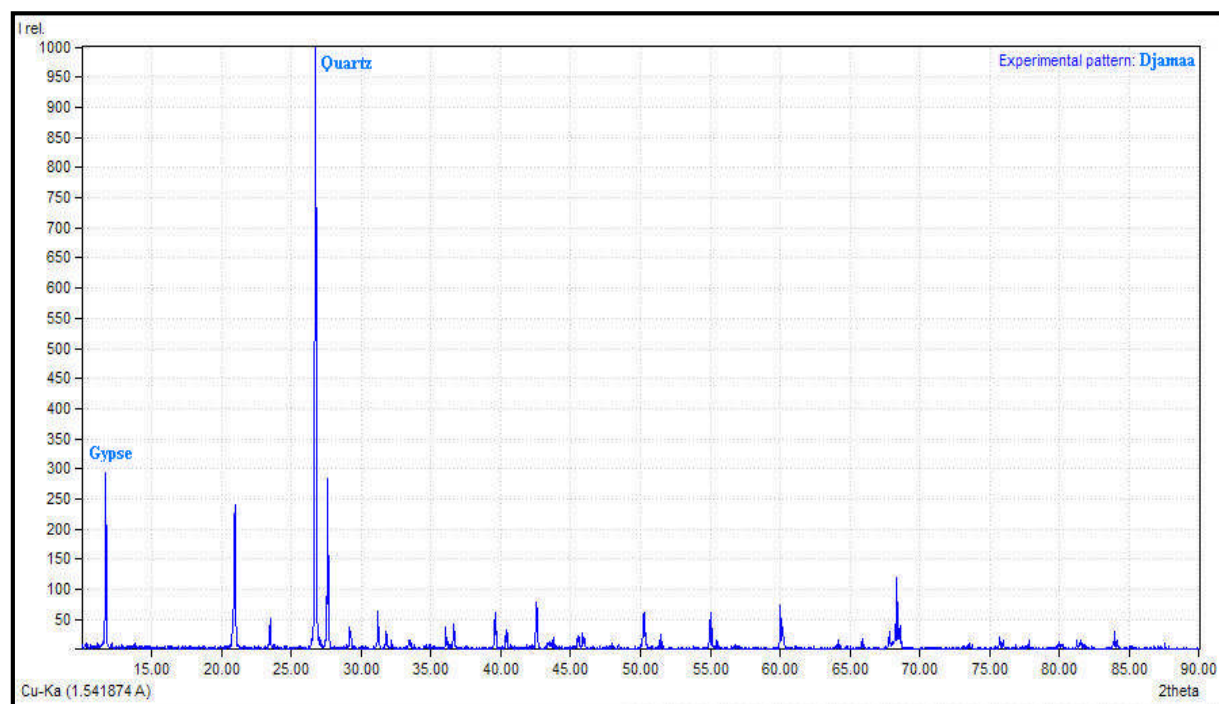


Figure V.11 : Spectre de diffraction et minéraux présents (Djamaa)

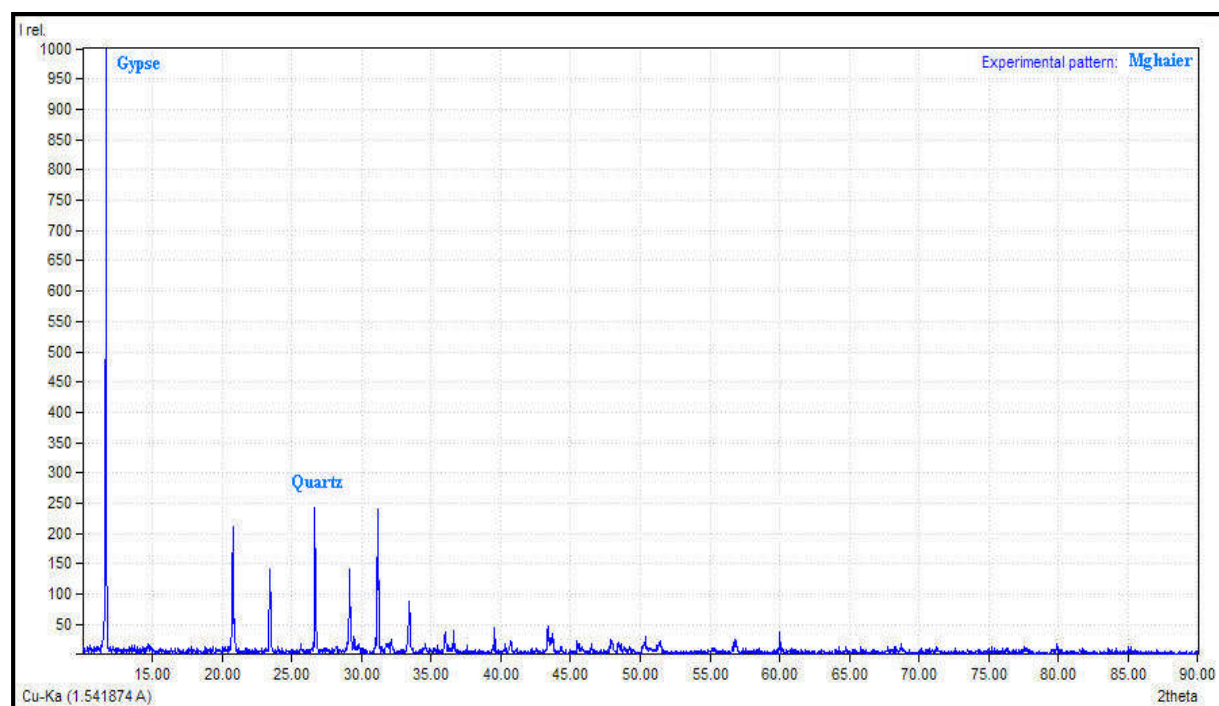


Figure V.12 : Spectre de diffraction et minéraux présents (Mghaier)



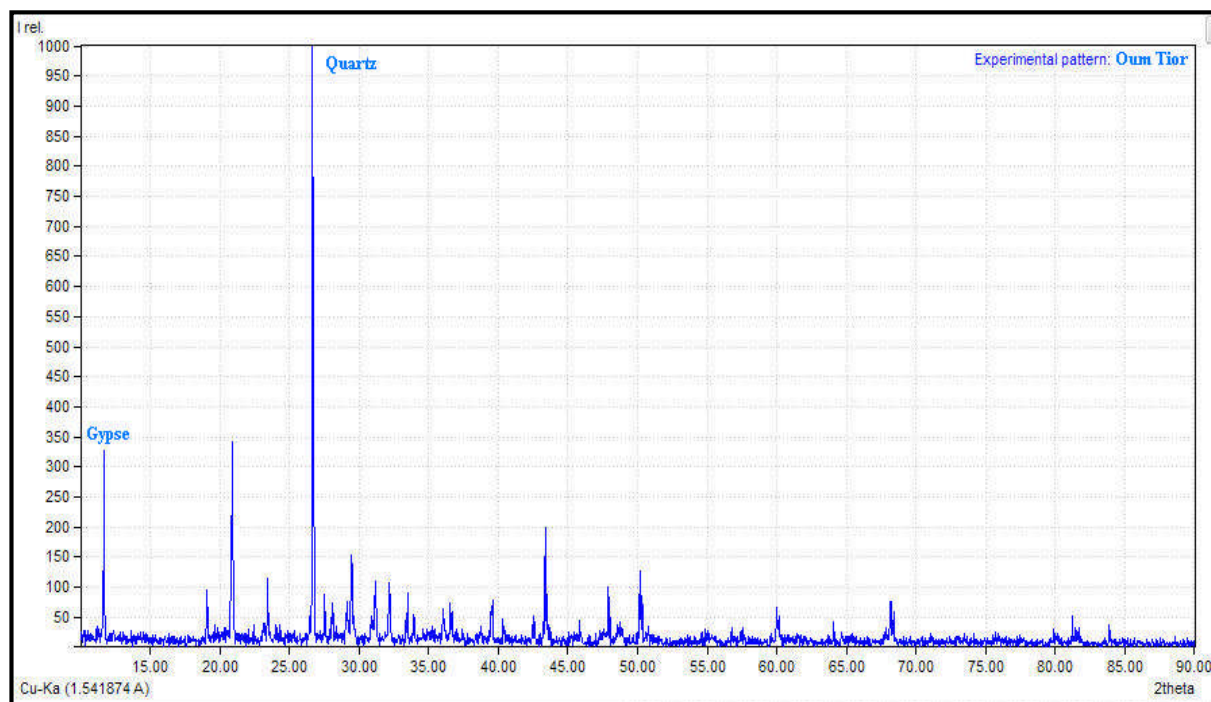


Figure V.13 : Spectre de diffraction et minéraux présents (Oum Tior)

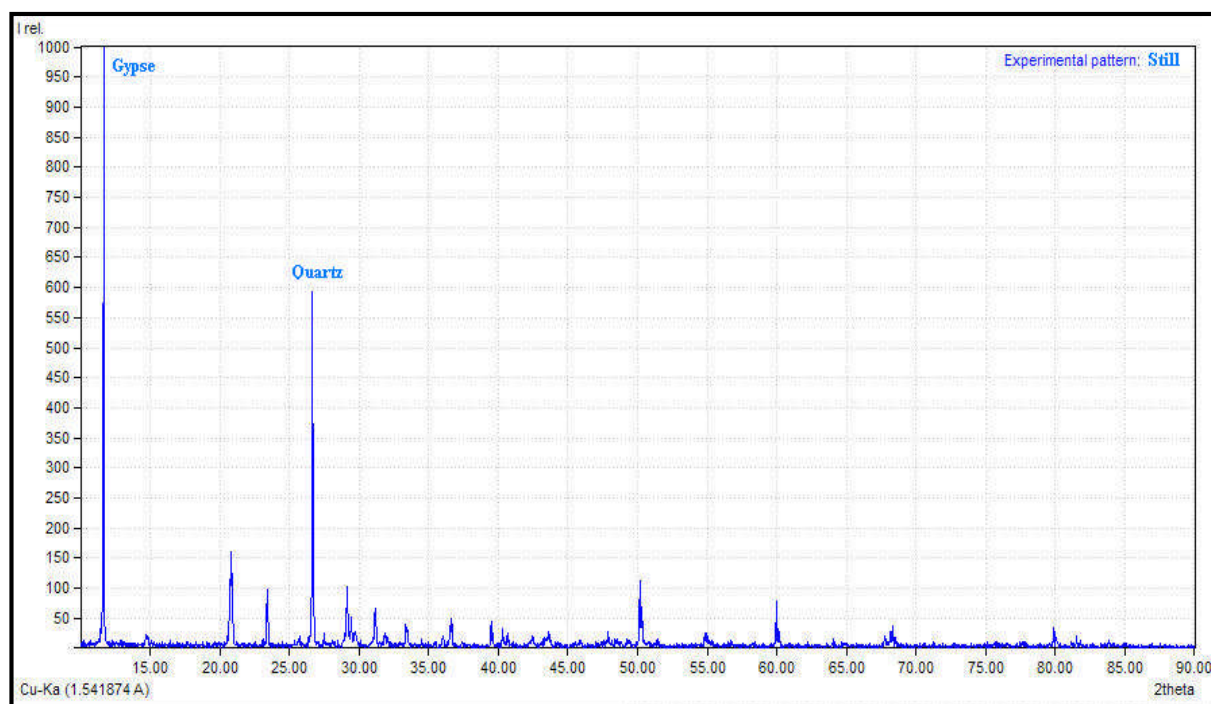


Figure V.14 : Spectre de diffraction et minéraux présents (Still)

### V.2.4- Description des lames minces

Le profil géologique ci-dessous (Figure V.15), illustre le lieu où les échantillons de roche pour fabrication des lames minces ont été prélevés, il montre les différentes formations échantillonnées.

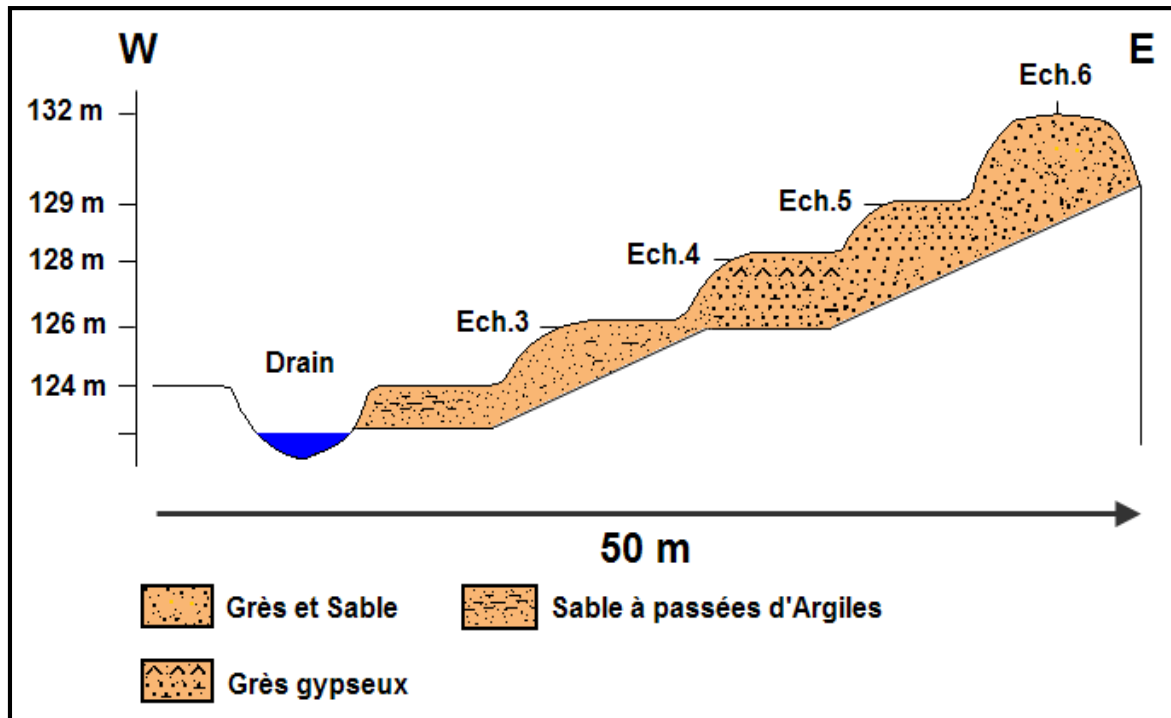


Figure V.15 : Profil géologique du lieu d'échantillonnage (Sebkha d'El Khafdji)

#### Echantillon 3

Sous le microscope polarisant, et à lumière polarisée analysée, on voit de petits cristaux de quartz de forme anguleuse à sub-arrondie, la porosité est importante et apparaît sous forme de vacuoles. Le ciment est en général sparitique, mais parfois on le trouve argileux.

#### Echantillon 4

Il s'agit d'un grès à éléments de forme sub-arrondis, les grains sont entourés d'un liseré argileux, on remarque la présence de certaines vacuoles, de petits cristaux de gypse, microsparite. La matrice est de nature argileuse, calcique en mosaïque.

#### Echantillon 5

C'est des grès à grains de quartz arrondis à sub-arrondis souvent entourés d'un liseré argileux, la porosité est faible et se manifeste sous forme de quelques vacuoles. Le ciment est sparitique et la matrice est argilo-gypseuse.

## Echantillon 6

On remarque la présence des plagioclases et des quartz sub-arrondis souvent entourés d'un liseré argileux, on note aussi la présence de vacuoles de dissolution (porosité vacuolaire). Le ciment est carbonaté et de nature sparitique à microsparitique en mosaïque.

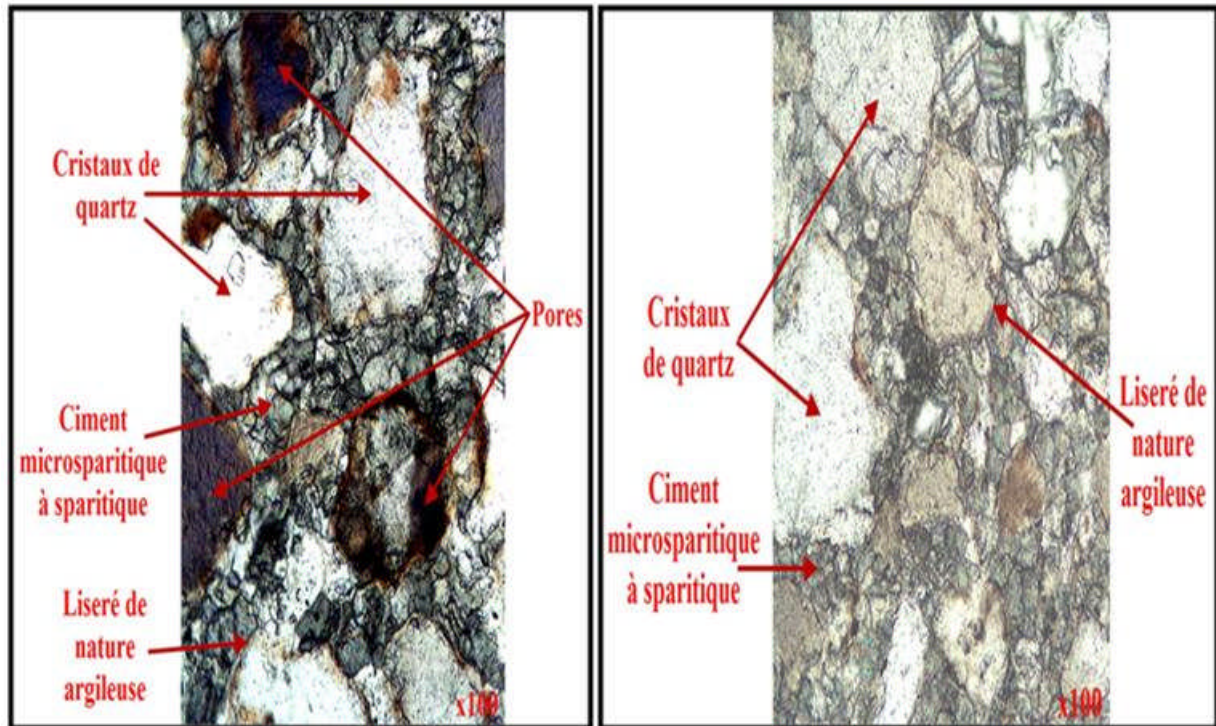


Figure V.16 : Echantillons 3 (droite) et 5 (gauche) sous microscope polarisant en LPA

## V.3- Conclusion

L'aquifère du Mio-Pliocène du Sahara Est septentrional se caractérise par une lithologie très hétérogène. L'analyse des coupes géologiques et l'observation des lames minces et des diffractogrammes des rayons X montre l'abondance des évaporites (gypse et anhydrite), et des argiles. Le tableau suivant montre les formations dominantes dans chaque région.

<b>Ouargla</b>	Evaporites, et d'un degré moins les carbonates puis les argiles.
<b>Touggourt</b>	Evaporites, argiles et d'un degré moindre des carbonates.
<b>El Oued (Djamaa, M'ghaïer et still)</b>	Les argiles sont dominantes.



# *Chapitre VI*

## *Hydrochimie et évolution géochimique des eaux*

## VI.1- Introduction

Selon les études antérieures (Guendouz et al, 2003 ; Bouchahem et al, 2008 ; Nezli, 2009) effectuées sur les eaux de la nappe du CT à l'échelle locale et régionale, la température des eaux du Mio-Pliocène de la région de Ouargla est de l'ordre de 20,5° à 28,6° C, ces variations ne sont pas contrôlées par la profondeur, mais plutôt par la température de l'air et les saisons. Au niveau des régions de Touggourt et d'El Oued, la température est comprise entre 23° et 25° C.

Les eaux sont alcalines bicarbonatées (pH < 8,3), très dures, et affichent des minéralisations excessives, exprimées par des conductivités électriques oscillant entre 2000 et 6000  $\mu\text{S cm}^{-1}$ , et allant jusqu'à 8000  $\mu\text{S.cm}^{-1}$  dans les cas les plus exceptionnels, la minéralisation augmente du Sud vers le Nord selon la direction d'écoulement. De telles minéralisations sont dues principalement à la richesse de la lithologie des formations par les évaporites (Halite, Gypse, etc...). En effet, les eaux lors de leur écoulement, à partir des zones d'alimentation, vers l'exutoire, se chargent, de plus en plus, par les éléments :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , et  $\text{Mg}^{2+}$ , et acquièrent, par conséquent, un faciès anionique, exclusivement, chloruré et/ou sulfaté.

Une augmentation homologue des concentrations en  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , et d'un degré moindre de  $\text{Mg}^+$  et  $\text{K}^+$ , les concentrations en bicarbonates  $\text{HCO}_3^-$  restent relativement constantes du fait de la saturation des eaux en minéraux carbonatés.

Des concentrations, relativement, élevées en nitrates (35  $\text{mg.l}^{-1}$ , en moyenne), attestent l'enrichissement par l'azote végétal à partir des zones de recharge, et indiquent, que les conditions aérobies sont maintenues.

Dans le présent chapitre notre intérêt se focalise sur l'interprétation des résultats obtenus en utilisant des approches diverses ; modélisation statistique, géochimique et cartographique afin de mettre en évidence la corrélation entre la composition chimique des eaux des sables moi-pliocènes et la lithologie de cette formation.

## VI.2- Présentation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux

Pour la présentation et l'interprétation des résultats des analyses physico-chimiques des eaux, on a adopté les symboles suivants pour les forages de chaque région : (W1, W2, W3 ... etc.) pour les forages de la région de Ouargla, (T1, T2, T3 ... etc.) pour les forages de Touggourt, (O1, O2, O3 ... etc.) pour les forages des localités appartenant à la wilaya d'El Oued.

### VI.2.1- Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH détermine l'acidité ou l'alcalinité d'une eau en mesurant la concentration des ions  $\text{H}^+$ , il varie selon une échelle de 0 à 14, alors que 7 est le pH de neutralité. Les valeurs de pH mesurées (Tableau VI.1) paraissent proches de la neutralité à légèrement alcalins dans toutes les régions avec de faibles écarts types.

Tableau VI.1 : Variations du pH selon les régions

Région	Ouargla (W)	Touggourt (T)	El Oued (O)
Moyenne	7,26	7,30	7,38
Max	7,80	7,60	7,70
Min	6,90	6,90	7,00
Ecart-type	0,27	0,24	0,22

### VI.2.2- La température (°C)

La température des eaux est variable selon différents facteurs; il s'agit essentiellement de la température extérieure (air), les saisons, la nature géologique des aquifères et également de la profondeur des eaux (gradient thermique).

Les températures (Tableau VI.2) dépassent légèrement celles recommandées par l'OMS (22-25°C), et ne présentent pas de grandes variations, avec un écart type de 0,82 au niveau de Ouargla, 0,35 à Touggourt et 0,59 à El Oued.

Tableau VI.2 : Variations de la température selon les régions

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
Moyenne	24,74	24,36	24,27
Max	25,90	24,80	25,10
Min	23,40	23,90	23,40
Ecart-type	0,82	0,35	0,59

### VI.2.3- La conductivité électrique CE ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ )

La conductivité électrique donne une idée sur la minéralisation totale d'une eau (sels minéraux). Elle se mesure à une température des eaux entre 20° à 25° C, elle augmente avec la température et s'exprime en  $\mu\text{S}\cdot\text{Cm}^{-1}$ .

Les conductivités (Tableau VI.3) des eaux dépassent les normes ( $>1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ) de potabilité de l'OMS (normes mises à jour en 2006), voir supérieure à  $8000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  selon les cas, elles présentent une évolution remarquable le long du sens d'écoulement des eaux, soit  $4385 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  au niveau de Ouargla, 5972 à Touggourt et 6623 dans la région du Souf.

Tableau VI.3 : Variations des conductivités électriques selon les régions

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
Moyenne	4385,00	5972,22	6623,08
Max	6200,00	7800,00	8300,00
Min	3030,00	4650,00	5000,00
Ecart-type	931,43	1065,69	1282,68

### VI.2.4- Les sulfates $\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)

La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses, selon la relation :



Les concentrations des sulfates observées (Tableau VI.4) dépassent les normes (500 mg/l), elles atteignent des concentrations très fortes (3075 mg/l) et présentent une augmentation nette le long du sens d'écoulement des eaux de la nappe.

**Tableau VI.4 : Variations des concentrations des sulfates selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	1197,50	1944,44	2435,58
<b>Max</b>	2475,00	2250,00	3075,00
<b>Min</b>	500,00	1712,50	1862,50
<b>Ecart-type</b>	603,28	218,94	357,10

### VI.2.5- Les chlorures $\text{Cl}^-$ (mg/l)

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution de la Halite ( $\text{NaCl}$ ), qui se fait selon la relation suivante :



Cet élément présente des concentrations très élevées (> 2300 mg/l), son augmentation est nettement remarquable le long du sens d'écoulement des eaux (Tableau VI.5).

**Tableau VI.5 : Variations des concentrations des chlorures selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	969,66	1336,94	1354,38
<b>Max</b>	1260,25	2325,00	2200,00
<b>Min</b>	738,40	775,00	625,00
<b>Ecart-type</b>	160,14	530,97	604,34

### VI.2.6- Les bicarbonates $\text{HCO}_3^-$ (mg/l)

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 :



Les bicarbonates dans les eaux du Mio-Pliocène du Sahara Est septentrional présentent des teneurs dépassant les normes de potabilité (30 mg/l), mais sans une grande augmentation le long de sens d'écoulement ; voir une moyenne de 124 mg/l à Ouargla, 122 mg/l à Touggourt et 144 mg/l au niveau de la région d'El Oued.

**Tableau VI.6 : Variations des concentrations des bicarbonates selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	124,14	121,79	144,52
<b>Max</b>	186,05	132,40	155,55
<b>Min</b>	88,45	112,85	128,10
<b>Ecart-type</b>	26,08	7,49	8,03

#### VI.2.7- Les nitrates $\text{NO}_3^-$ (mg/l)

Les nitrates représentent la forme la plus oxygénée de l'azote, et c'est la forme la plus soluble de ce dernier. Les teneurs en nitrates observées (Tableau VI.7), sont relativement moyennes, quelques fois, elles dépassent les normes (50 mg/l) ce qui laisse penser à l'infiltration de l'azote végétal à partir des zones d'infiltrations des eaux d'irrigation.

**Tableau VI.7 : Variations des concentrations des nitrates selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	34,65	38,56	30,62
<b>Max</b>	69,50	57,00	57,00
<b>Min</b>	12,50	22,50	13,00
<b>Ecart-type</b>	18,78	10,53	14,07

#### VI.2.8- Les nitrites $\text{NO}_2^-$ (mg/l)

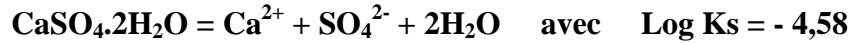
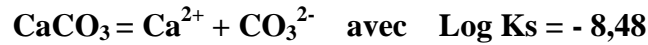
Les nitrites présentent la forme la moins oxygénée et la moins stable de l'azote. Les concentrations observées (Tableau VI.8) sont faibles et inférieures à la norme (0.2 mg/l) dans la plupart des échantillons, mais ça n'a pas empêché d'enregistrer des concentrations élevées surtout dans la région de Hassi Ben Abdallah (Ouargla) ; (0,42 mg/l).

**Tableau VI.8 : Variations des concentrations des nitrites selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	0,06	0,01	0,01
<b>Max</b>	0,42	0,02	0,04
<b>Min</b>	0,01	0,00	0,00
<b>Ecart-type</b>	0,13	0,01	0,01

### VI.2.9- Le calcium $\text{Ca}^{2+}$ (mg/l)

La présence des ions  $\text{Ca}^{2+}$  dans les eaux est liée principalement à la dissolution des formations carbonatées ( $\text{CaCO}_3$ ) ainsi que les formations gypseuses ( $\text{CaSO}_4$ ) selon les équations suivantes :



Les eaux (Tableau VI.8) présentent des teneurs supérieures à 200 mg/l. voir des teneures extrêmes (> 600 mg/l), on remarque que ces concentrations évoluent en allant de Ouargla vers El Oued.

**Tableau VI.9 : Variations des concentrations du calcium selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	344,71	509,08	515,13
<b>Max</b>	687,37	645,28	633,26
<b>Min</b>	200,40	353,32	404,80
<b>Ecart-type</b>	154,78	97,85	76,29

### VI.2.10- Le magnésium $\text{Mg}^{2+}$ (mg/l)

Cet élément provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium en l'occurrence ; la Dolomite selon la relation suivante :



Les concentrations moyennes observées (Tableau VI.10), sont proches des valeurs naturelles, cet élément présente une augmentation remarquable en fonction du sens d'écoulement des eaux de la nappe.

**Tableau VI.10 : Variations des concentrations du magnésium selon les régions**

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
<b>Moyenne</b>	172,05	310,63	282,54
<b>Max</b>	262,24	394,24	496,64
<b>Min</b>	98,80	194,56	128,00
<b>Ecart-type</b>	51,08	77,93	109,79

### VI.2.11- Le sodium $\text{Na}^+$ (mg/l)

L'existence de cet élément est liée, essentiellement, à la dissolution de la Halite. En effet, le sodium, de même que pour les chlorures, affiche des teneurs élevées dans les eaux du Mio-Pliocène, avec des valeurs maximales de plus de 1400 mg/l. Cet élément lui aussi présente une évolution remarquable.

Tableau VI.11 : Variations des concentrations du sodium selon les régions

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
Moyenne	537,50	681,11	922,31
Max	790,00	1255,00	1440,00
Min	350,00	440,00	460,00
Ecart-type	155,41	292,76	293,86

VI.2.12- Le potassium  $K^+$  (mg/l)

Il provient, essentiellement, des évaporites, en l'occurrence la Sylvite (KCl), ou par suite d'altération des argiles potassiques.



Les teneurs en potassium observées dans les eaux (Tableau VI.12) dévoilent des valeurs relativement élevées, en dépassant les normes (12 mg/l), mais contrairement aux autres éléments, le potassium ne présente aucune évolution remarquable.

Tableau VI.12 : Variations des concentrations du potassium selon les régions

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
Moyenne	35,45	37,22	37,29
Max	61,00	55,00	59,00
Min	25,00	25,00	24,50
Ecart-type	13,61	9,26	9,88

## VI.2.13- Le fer total Fe (mg/l)

La présence du fer dans l'eau peut avoir une origine naturelle, par lessivage des terrains argileux, ou une origine industrielle, par corrosion des tubages. Les valeurs relevées (Tableau VI.13), dépassent selon les cas, les normes (0.3 mg/l) de l'OMS.

Tableau VI.13 : Variations des concentrations du fer selon les régions

Région	Ouargla	Touggourt	El Oued
Moyenne	0,28	0,49	0,41
Max	0,80	1,80	1,30
Min	0,10	0,00	0,00
Ecart-type	0,22	0,52	0,41

### VI.3- Analyse statistique des paramètres physiques et éléments chimiques

Cette analyse concerne les résultats des analyses chimiques des eaux. Elle nous permettra d'avoir une vision globale des relations qui peuvent exister entre les différents paramètres mesurés ainsi que les tendances que présentent les observations. Ces relations vont être interprétées au fur et à mesure.

L'objectif est de faire ressortir les tendances chimiques dans ces eaux. Ces tendances sont en réalité une approche sur les origines dans le cas des variables. Alors que pour les observations, ces tendances traduisent notamment des classes de la minéralisation. On a choisi de traiter nos résultats par la méthode de classification ascendante hiérarchique *CAH*.

#### VI.3.1- Corrélations entre les paramètres physico-chimiques

On remarque une dépendance étroite entre quelques paramètres (Ca, Mg, Na, SO<sub>4</sub>, Cl). Cette relation se traduit par les coefficients de corrélation se rapprochant de "1" (Tableau VI.14). Les liens significatifs peuvent être probablement attribués à des origines communes de ces éléments.

#### VI.3.2- Classification des variables (éléments chimiques)

Le dendrogramme de la classification des variables (Figure VI.1) montre tout d'abord la participation de tous les paramètres mesurés dans la conductivité mais à des degrés variables. On remarque, par ailleurs, le regroupement des paramètres mesurés en trois tendances:

- Un premier groupe représentant une étroite liaison entre le sodium et les chlorures qui sont liés à leur tour par les sulfates bien corrélés (groupe des évaporites) (Tableau VI.14).
- Un deuxième groupe représente une dépendance entre calcium et magnésium qui sont tous deux en relation étroite avec les bicarbonates (groupe des carbonates).
- Un troisième groupe représentant une liaison entre les nitrates, le fer et le potassium, c'est une famille qu'on peut appeler la famille des polluants



Tableau VI.14 : Matrice de corrélation des éléments chimiques

	pH	CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\text{SO}_4^{2-}$	$\text{Cl}^-$	$\text{HCO}_3^-$	$\text{NO}_3^-$	$\text{Ca}^{2+}$	$\text{Mg}^{2+}$	$\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	Fe (tot)
pH	1,00	-0,07	-0,09	0,00	0,52	-0,14	-0,23	0,09	-0,06	-0,15	0,07
CE ( $\mu\text{S/cm}$ )	-0,07	1,00	0,89	0,85	0,15	-0,04	0,83	0,76	0,85	0,32	-0,01
$\text{SO}_4^{2-}$	-0,09	0,89	1,00	0,53	0,22	0,00	0,84	0,62	0,69	0,25	0,13
$\text{Cl}^-$	0,00	0,85	0,53	1,00	0,05	-0,13	0,57	0,68	0,83	0,33	-0,17
$\text{HCO}_3^-$	0,52	0,15	0,22	0,05	1,00	-0,01	0,05	0,02	0,21	0,14	0,11
$\text{NO}_3^-$	-0,14	-0,04	0,00	-0,13	-0,01	1,00	0,16	-0,02	-0,18	-0,07	-0,08
$\text{Ca}^{2+}$	-0,23	0,83	0,84	0,57	0,05	0,16	1,00	0,66	0,52	0,30	0,14
$\text{Mg}^{2+}$	0,09	0,76	0,62	0,68	0,02	-0,02	0,66	1,00	0,39	0,14	-0,07
$\text{Na}^+$	-0,06	0,85	0,69	0,83	0,21	-0,18	0,52	0,39	1,00	0,38	-0,11
$\text{K}^+$	-0,15	0,32	0,25	0,33	0,14	-0,07	0,30	0,14	0,38	1,00	-0,26
Fe (total)	0,07	-0,01	0,13	-0,17	0,11	-0,08	0,14	-0,07	-0,11	-0,26	1,00

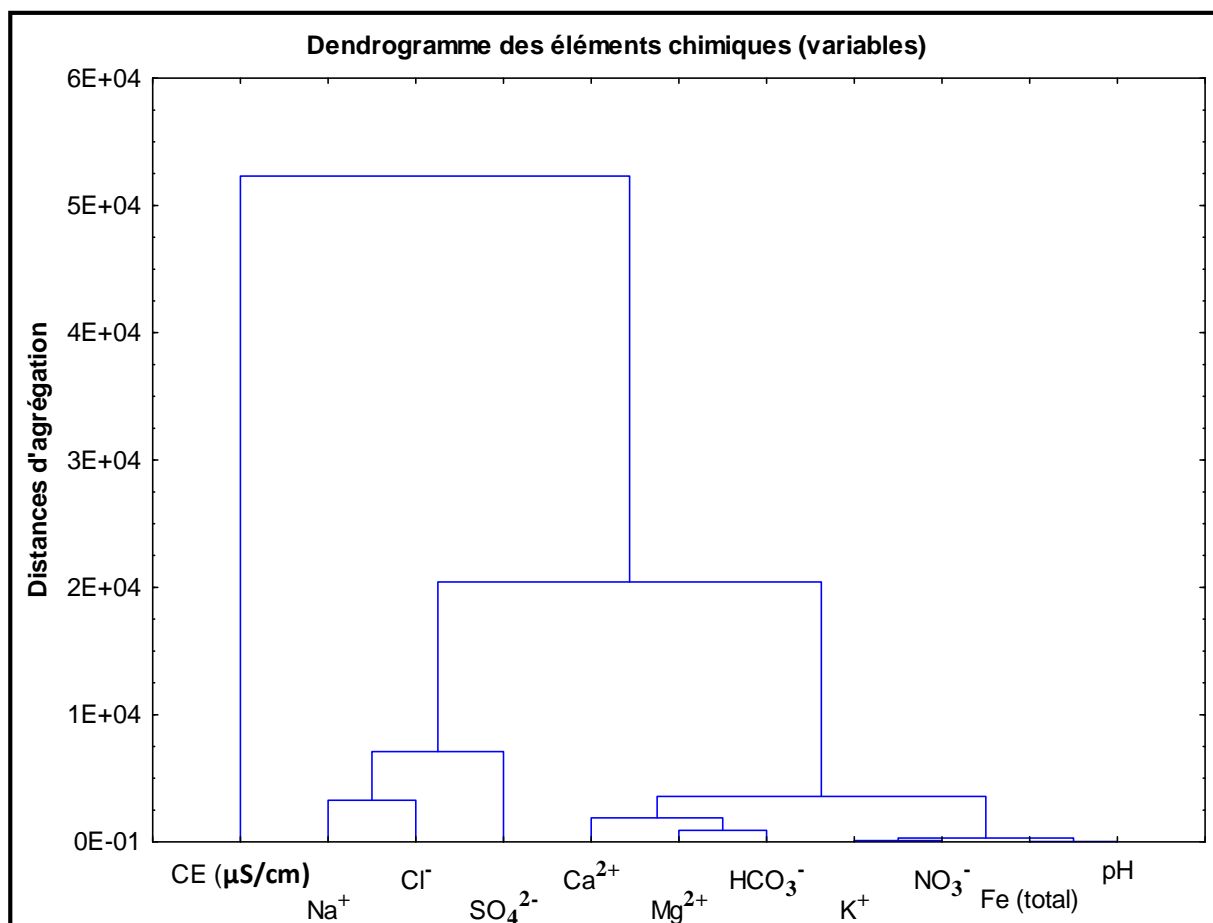
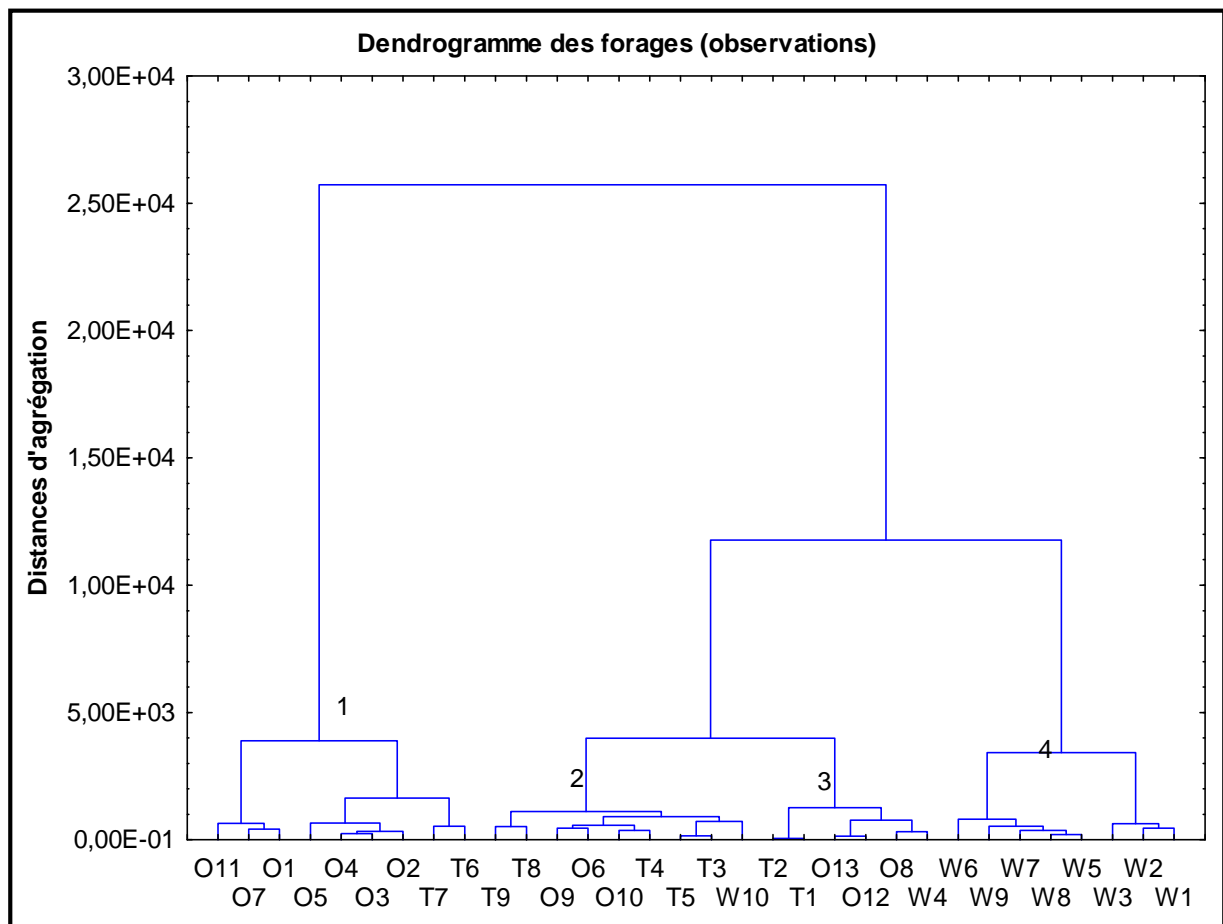


Figure VI.1 : Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des variables (éléments chimiques)

**VI.3.3- Classification des observations (forages par régions)**

Le dendrogramme des observations. Le choix des classes est basé sur la matrice de proximité (Distance euclidienne) en regroupant des différentes classes selon la variabilité des observations. Ce qui correspond dans notre cas à l'importance de la minéralisation.

Le principe est basé sur la classification des observations autour d'un centre de gravité pour chaque variable dans chaque classe. Le traitement statistique des observations par la méthode ci-citée fait ressortir quatre classes, elles se regroupent selon la lithologie (Figure VI.2).



**Figure VI.2 : Classification ascendante hiérarchique (C.A.H) des observations (forages)**

La première classe regroupe les forages où les eaux sont caractérisées par de fortes conductivités et donc de fortes minéralisations, du fait de leur forte salinité, cette famille regroupe des forages situant au niveau de la région d’El Oued (Djamaa, Mghaier, Still), en aval du sens d’écoulement (lessivage), près des chotts et la lithologie se caractérise par des sables, des argiles et des évaporites.

La deuxième classe est celle des eaux à dominance des minéraux évaporitiques, ce sont des forages situant au niveau des régions surtout de Touggourt et El Oued dans la plupart des cas, en fait, la lithologie dans ces régions est caractérisée par l’abondance des formations

évaporitiques (voir chapitre reconnaissance géologique) (gypse, anhydrite, halite ... etc) par rapport aux formations carbonatées.

La troisième classe qui représente une minorité des forages, se caractérise par des eaux où les carbonates présentent un facteur en commun, ceci peut être expliqué par la contribution des minéraux carbonatés existant dans ces régions plus que les autres, à l'enrichissement des eaux. Une autre explication peut être lancée aussi, c'est un apport supplémentaire de ces éléments en provenance de la nappe du Sénonien carbonaté sous-jacente

La quatrième et la dernière classe englobe des forages situant au niveau de HBA dans la région de Ouargla, ce sont des eaux où les éléments de pollution se rapprochent, c'est tout à fait évident puisque cette zone est caractérisée par une forte activité agricole.

#### VI.4- Caractéristiques hydrochimiques des eaux de la région

##### VI.4.1- Les paramètres physiques (CE, pH et T°)

Les valeurs de la conductivité électrique montrent de fortes amplitudes et s'avèrent caractéristiques des eaux de la nappe du Mio-Pliocène (Figure VI.3), au niveau de la région de Ouargla, les valeurs dépassent les normes mais restent relativement faibles par rapport aux autres régions (de 3030 à 6200  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), celles de la région de Touggourt montrent une augmentation remarquable (de 4650 à 7800  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), par contre, des valeurs extrêmes ont été enregistrées au niveau de quelques forages de la région de Djamaa et Still (8300  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).

Les valeurs du pH et de la température restent proches des normes et aucun forage ne montre des anomalies.

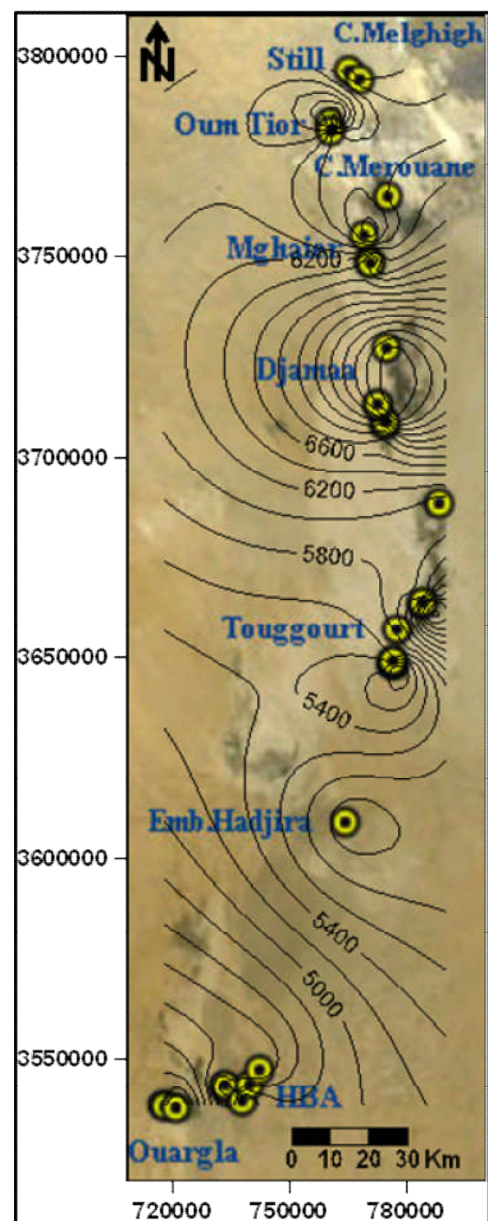


Figure VI.3 : Carte de conductivité électrique de la zone d'étude

### VI.4.2- Les anions majeurs

Les anions majeurs montrent un excès par rapport aux normes (Figure VI.4), pour les sulfates, l'augmentation des concentrations le long des sens d'écoulement des eaux est nettement remarquable, avec quelques valeurs extrêmes pour les points W4 (HBA) et W10 (embranchement d'El Hadjira), (par rapport à la moyenne des dix points échantillonnés au niveau de Ouargla), également pour les points T5 (Temacine), et T6, T7 (Nezla), par contre, la totalité des points échantillonnés au niveau des localités Djamaa, Mghaier, Oum Thior et Still présentent des concentrations ultra fortes (> 2000 mg/l).

Pour les chlorures, on a enregistré des concentrations élevées au niveau des trois régions (Ouargla, Touggourt et El Oued), avec une augmentation des valeurs le long de la zone d'étude, puis une rechute nette au niveau des régions de Mghaier, Oum Tior, vers des valeurs minimales à Still (625 mg/l).

Les concentrations en bicarbonates sont également au-delà des normes (30 mg/l), toutes les valeurs enregistrées le long de notre région d'étude dépassent les 100 mg/l et restent presque constantes et ne présentent pas de variations remarquable.

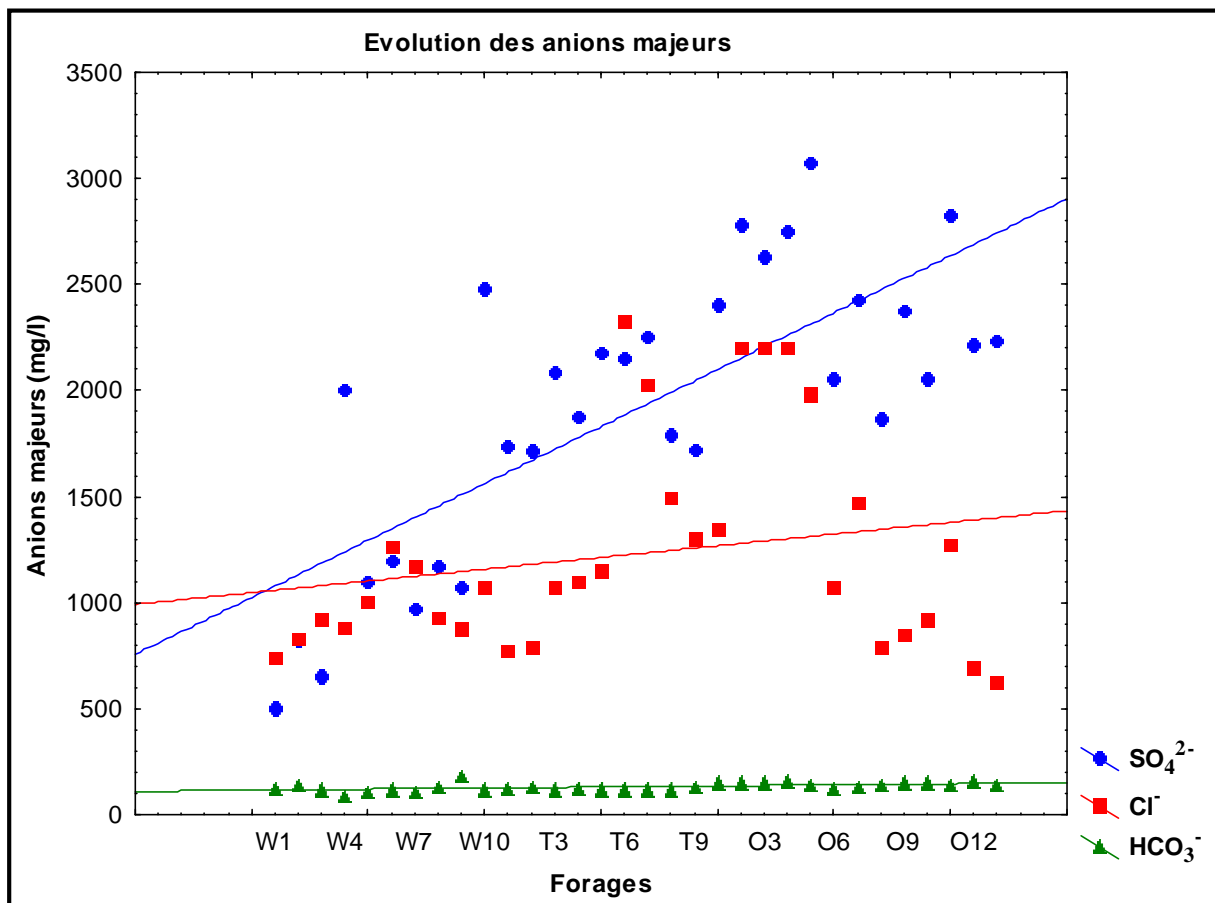


Figure VI.4 : Evolution des anions majeurs

### VI.4.3- Les cations majeurs

Pour les cations majeurs, la dominance du sodium est nette, les valeurs enregistrées (Figure VI.5) montrent des concentrations élevées, parfois, ultra fortes ( $> 1200$  mg/l) au niveau des points T6 (Nezla), O3 Tinedla) et O4 et O5 (Djamaa). Cet élément évolue également le long du sens d'écoulement des eaux, et simultanément aux chlorures, on a enregistré la chute des concentrations au niveau des points échantillonnés à Mghaier, Oum Thior et Still.

Les teneurs en calcium montrent une évolution remarquable et des concentrations élevées et dépassant les normes de potabilité (100 mg/l), même chose pour le magnésium, mais d'un degré moindre soit en matière des concentrations ou de la vitesse d'évolution.

Contrairement, les teneurs en potassium paraissent au-delà des normes (12 mg/l), mais sans présenter de remarquable évolution.

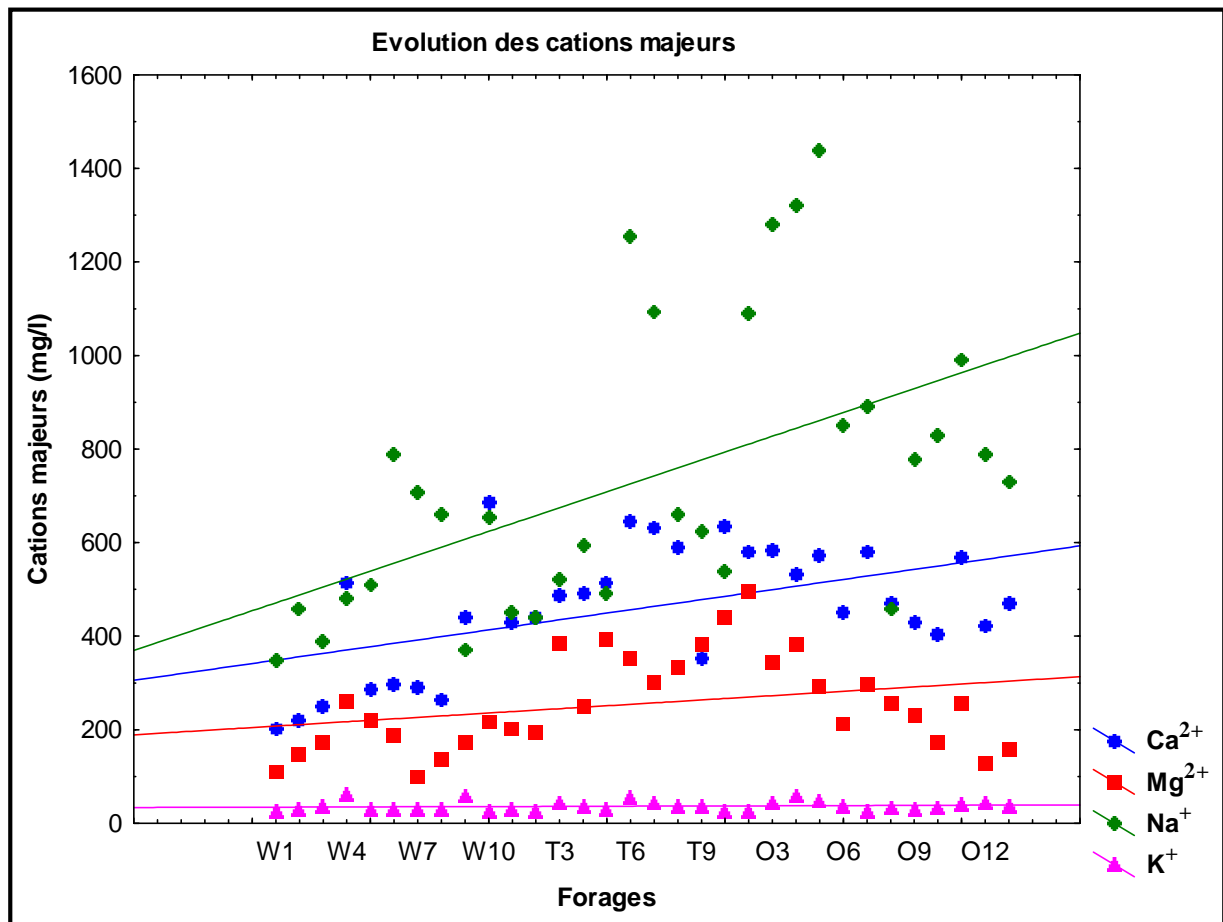


Figure VI.5 : Evolution des cations majeurs

### VI.4.4- Les ions mineurs

Les nitrates présentent des concentrations plus ou moins dans les normes, mais on a enregistré des valeurs élevées aux points W9, W10, T3, O6 et O11 (Figure VI.6), tous ces points se situent au niveau des zones agricoles. Les nitrites avec des valeurs presque nulles et

sous la valeur de référence, par contre, celles du fer total dépassent les normes (0,3 mg/l) dans la majorité des cas.

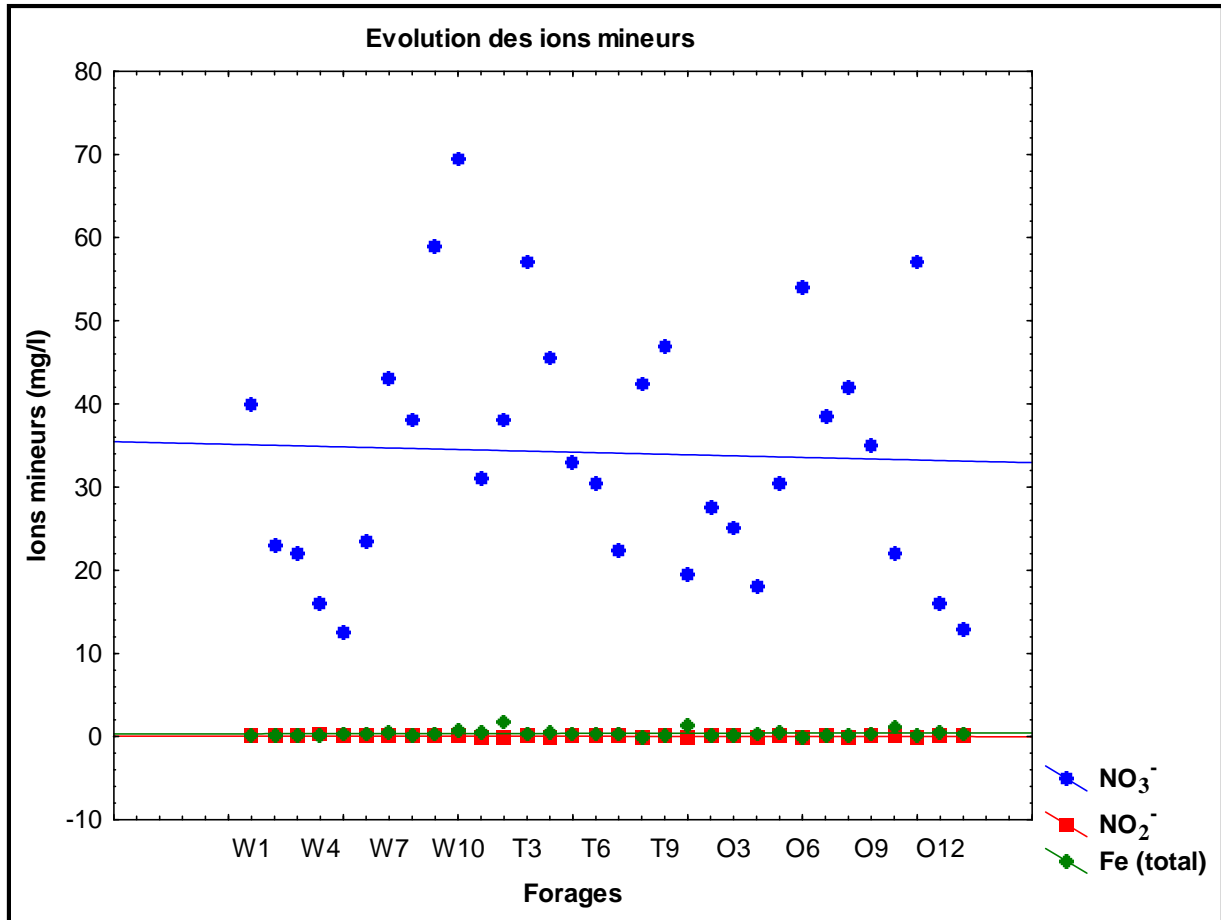


Figure VI.6 : Evolution des ions mineurs

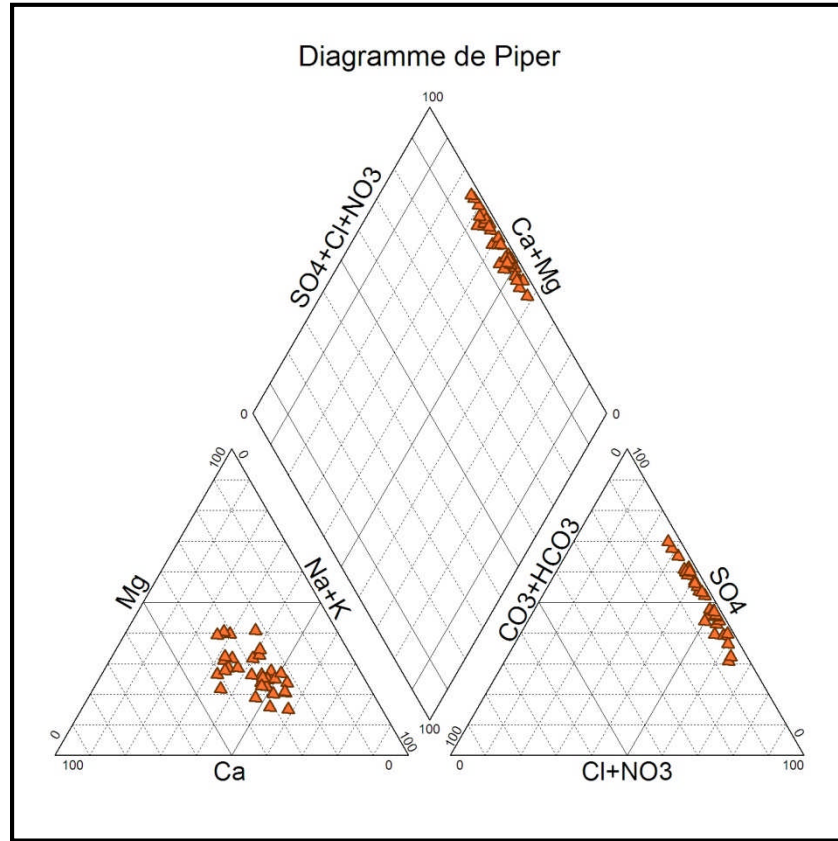
### VI.5- Faciès chimiques des eaux

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite). La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique.

A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau minérale concernée.

Selon le diagramme de Piper (Figure VI.7), le faciès chimique des eaux du Mio-Pliocène de notre région d'étude montre la présence de deux familles :

La première est celle caractérisée par le faciès chloruré sodique ou calcique ou magnésien. La deuxième est celle caractérisée par le faciès sulfaté sodique ou calcique ou magnésien.



**Figure VI.7 : Faciès chimiques des eaux du Mio-Pliocène du Sahara septentrional**

Pour classer chimiquement les eaux, on fait recours à plusieurs formules, la plus simple est celle de STABLER, elle consiste à calculer le pourcentage de chaque ion par rapport à la concentration totale de l'eau, cette formule est :

$$r \% = (100/c) \times r ;$$

Avec : r : est la quantité en réaction de l'ion considéré en  $\text{meq.l}^{-1}$  ; c : la concentration totale.

On classe séparément les anions et les cations par ordre décroissant, on obtient les différents faciès chimiques des eaux étudiées.

Étant donné que la lithologie de leurs niveaux aquifères est riche en éléments évaporitiques ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , et  $\text{Ca}^{2+}$ ), les eaux souterraines du Sahara se trouvent dominées, exclusivement, par les faciès chlorurés et/ou sulfatés : ( $r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{HCO}_3$  et/ou  $r\text{SO}_4 > r\text{Cl} > r\text{HCO}_3$ ), quand aux anions. Alors que pour les cations, il n'y a pas de cation dominant. Divers processus hydrogéochimiques peuvent intervenir, pour rendre les eaux, tantôt sodiques, tantôt calciques et parfois magnésiennes, en modifiant ainsi le faciès chimique des eaux dans une même nappe.

La prédominance des cations  $\text{Na}^+$  vis-à-vis de  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$ , ainsi que l'abondance des anions  $\text{Cl}^-$ , et  $\text{SO}_4^{2-}$ , nous permettent d'établir des diagrammes binaires par les rapports caractéristiques  $r\text{Na}^+/r\text{Ca}^{2+}$  versus  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$  (Fig), puis  $r\text{Na}^+/r\text{Mg}^{2+}$  versus  $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$  pour expliquer l'évolution des faciès géochimiques rencontrés dans le diagramme de Piper.

Le rapport  $r_{SO_4/rCl}$  (Figure VI.8, Figure VI.9 et Figure VI.10) montrant des valeurs supérieures à 1, indique un enrichissement en ion sulfate, par contre, si ce rapport est inférieur à 1, cela indique un enrichissement en ion chlore, alors que le rapport  $r_{Na/rCa}$  (Figure VI.8) montrant des valeurs supérieures à 1, indique un enrichissement en sodium, ou inférieur à 1, indique un enrichissement en calcium.

Pour la plupart des échantillons de la région de Ouargla, le faciès dominant est celui chloruré sodique et calcique, mais ce faciès évolue le long du sens d'écoulement des eaux vers le sulfaté sodique et calcique, ce qui traduit l'influence de la matrice gypse avec  $r = 0.84$  (Figure VI.11) sur la matrice halite, où  $r = 0.82$  (Figure VI.12). Cependant, le rapport  $r_{Na/rCa}$  est, également, supérieur à 1, dans la plupart des cas, indiquant l'influence de la matrice halite sur la matrice calcaire. Mais en observant toujours des faciès à dominance calcique (Figure VI.8), c'est le cas des forages W4, W9, W10, T1, T2, T3, T5, T8, O1 et O8 qui peut être expliqué par la dissolution de la matrice gypse  $CaSO_4$ , et des faciès à dominance magnésienne (Figure VI.9).

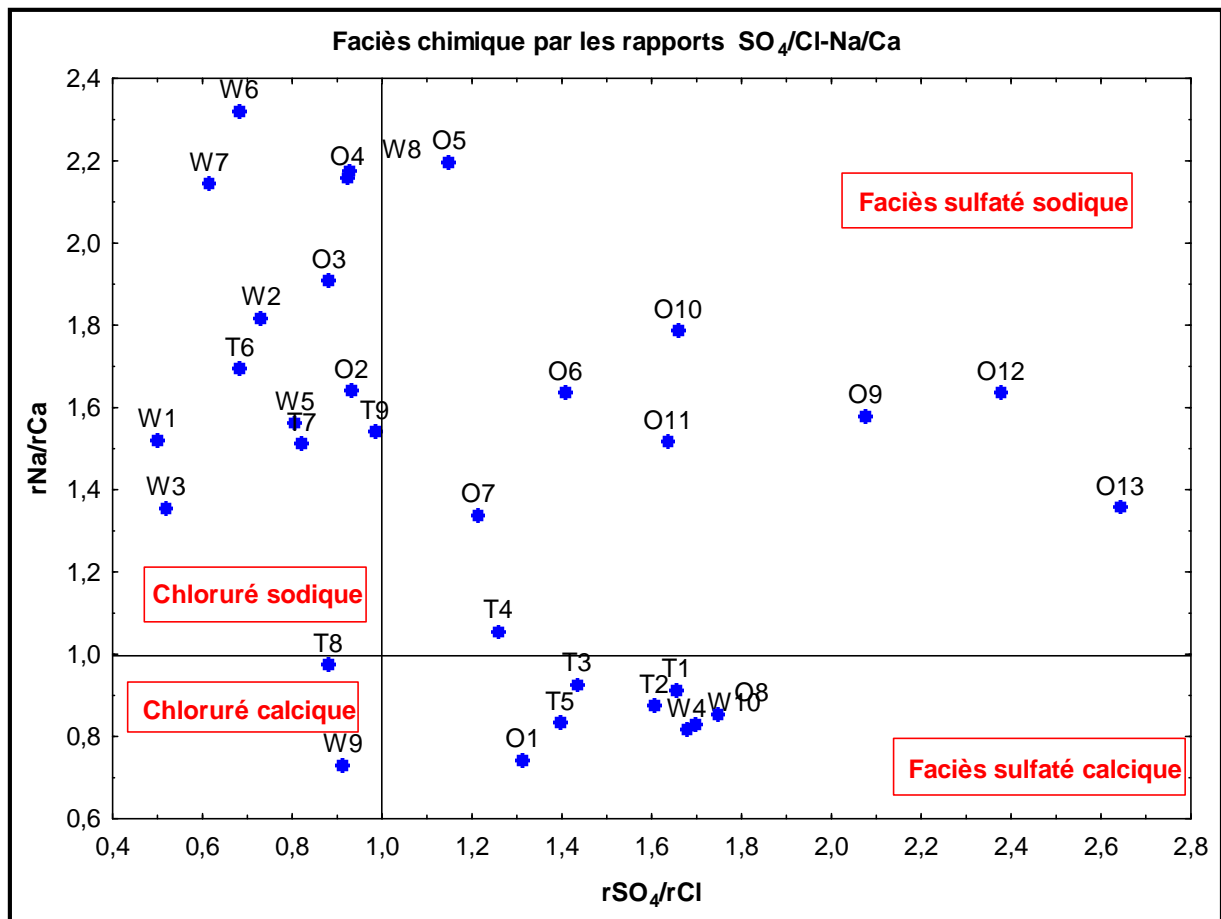


Figure VI.8 : La relation Na/Ca vs  $SO_4/Cl$



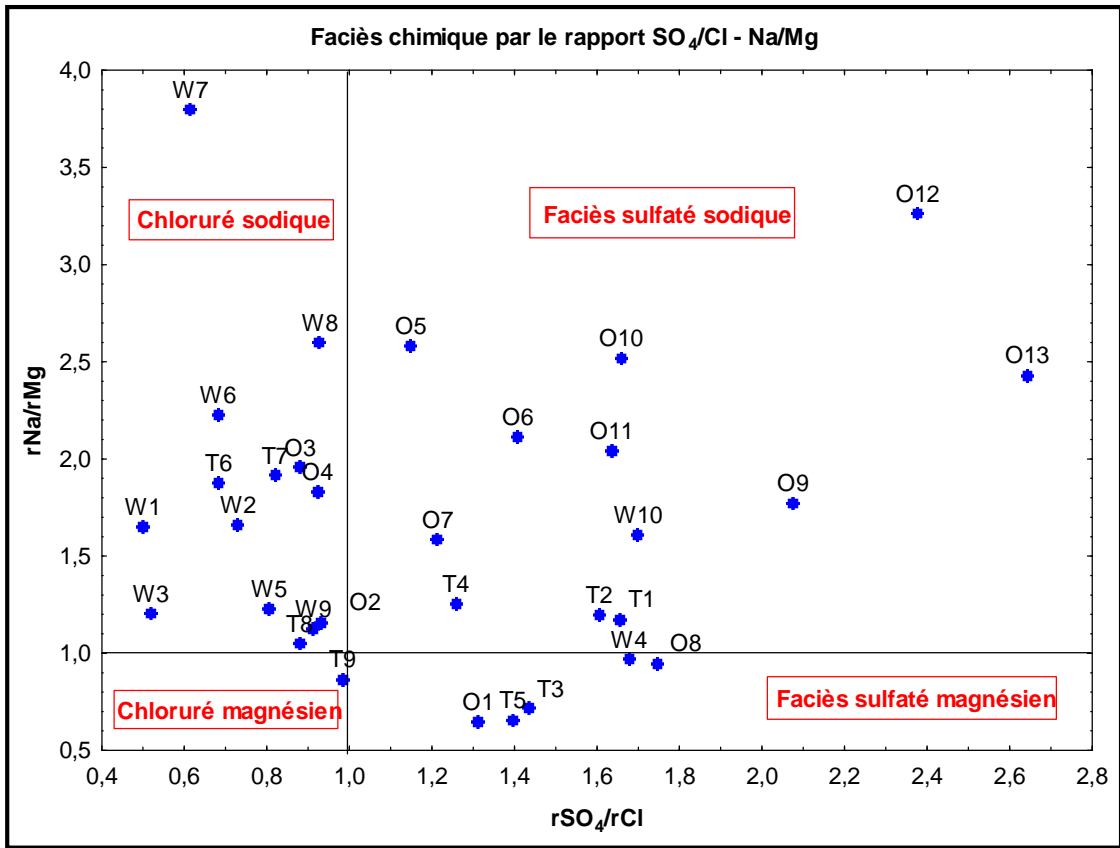


Figure VI.9 : La relation Na/Mg vs  $SO_4/Cl$

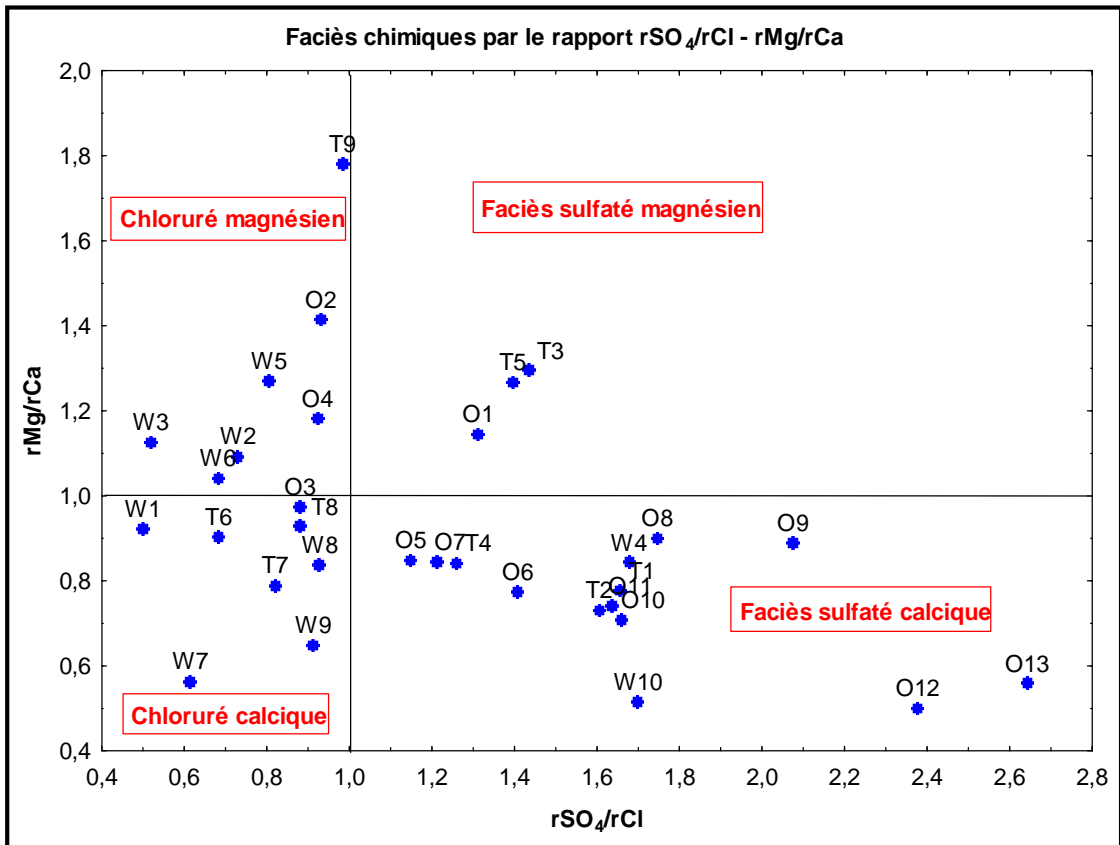


Figure VI.10 : La relation Mg/Ca vs  $SO_4/Cl$

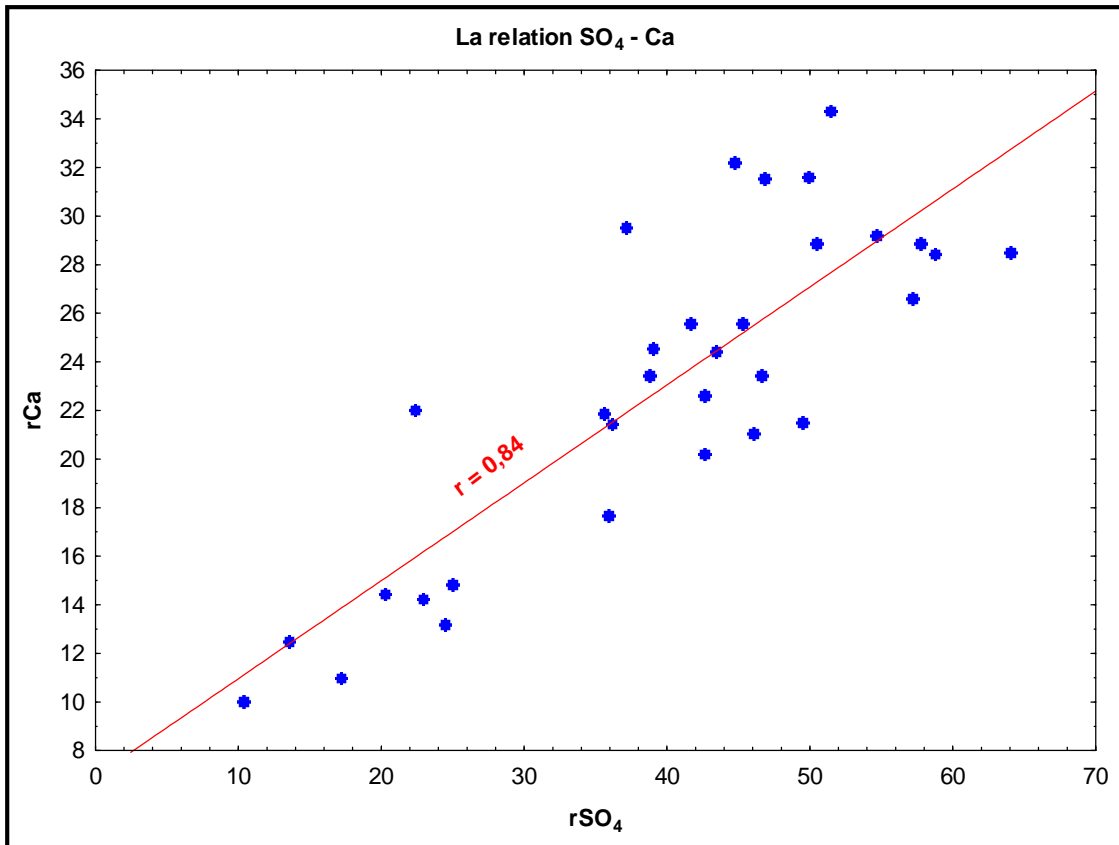


Figure VI.11 : La relation Ca vs SO<sub>4</sub>

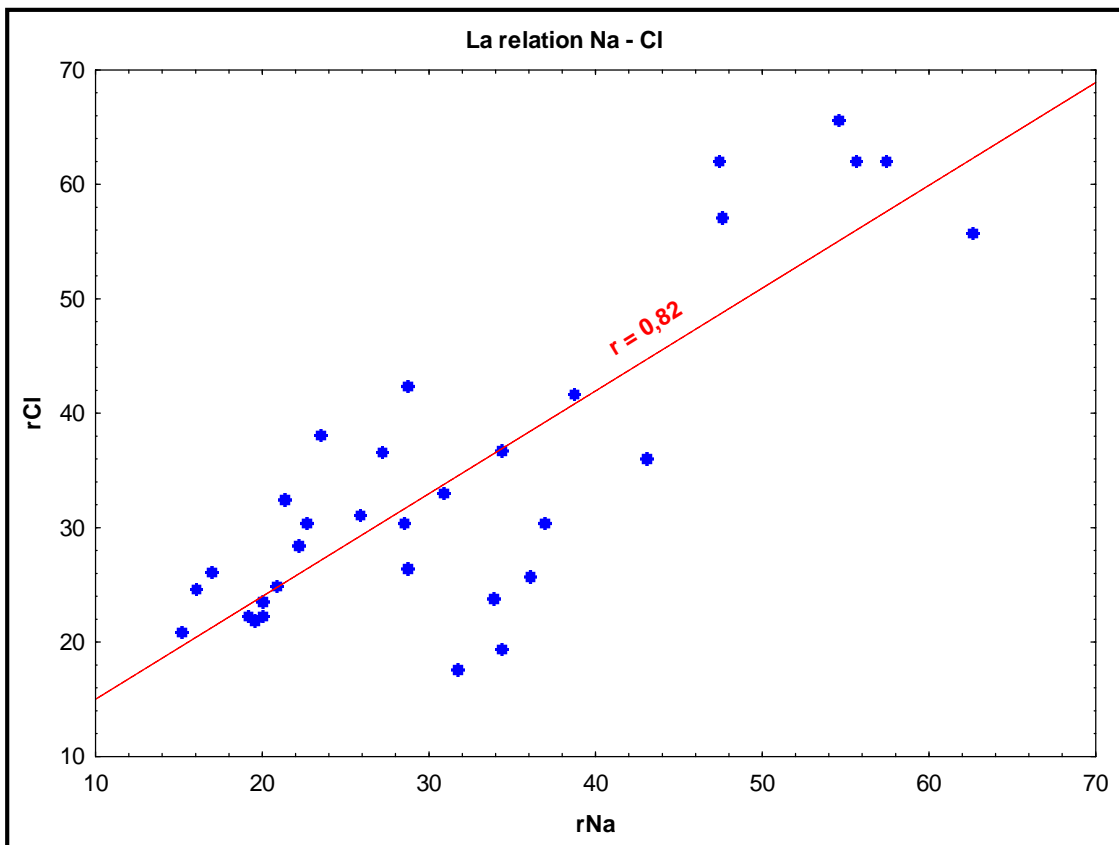


Figure VI.12 : La relation Cl vs Na

## VI.6- Origine des éléments chimiques

### VI.6.1- Origine des chlorures et du sodium

Le graphique (Figure VI.13) montre un alignement des points. Le sodium et les chlorures doivent avoir la même origine, en l'occurrence, la dissolution de la halite. Mais on remarque que le sodium présente un excès surtout vers les zones en proximité des chotts (Mghaier, Oum Thior et Still). Cet excès peut être expliqué par deux facteurs : par l'apport des eaux de précipitations convergeant vers les chotts qui fait diluer les eaux de la nappe et provoquant une diminution des chlorures, et l'échange de base qui peut être mis en place, et qui enrichit les eaux par d'autres quantités de sodium. Bien que la halite reste le sel principal qui génère le sodium et les chlorures dans les eaux étudiées.

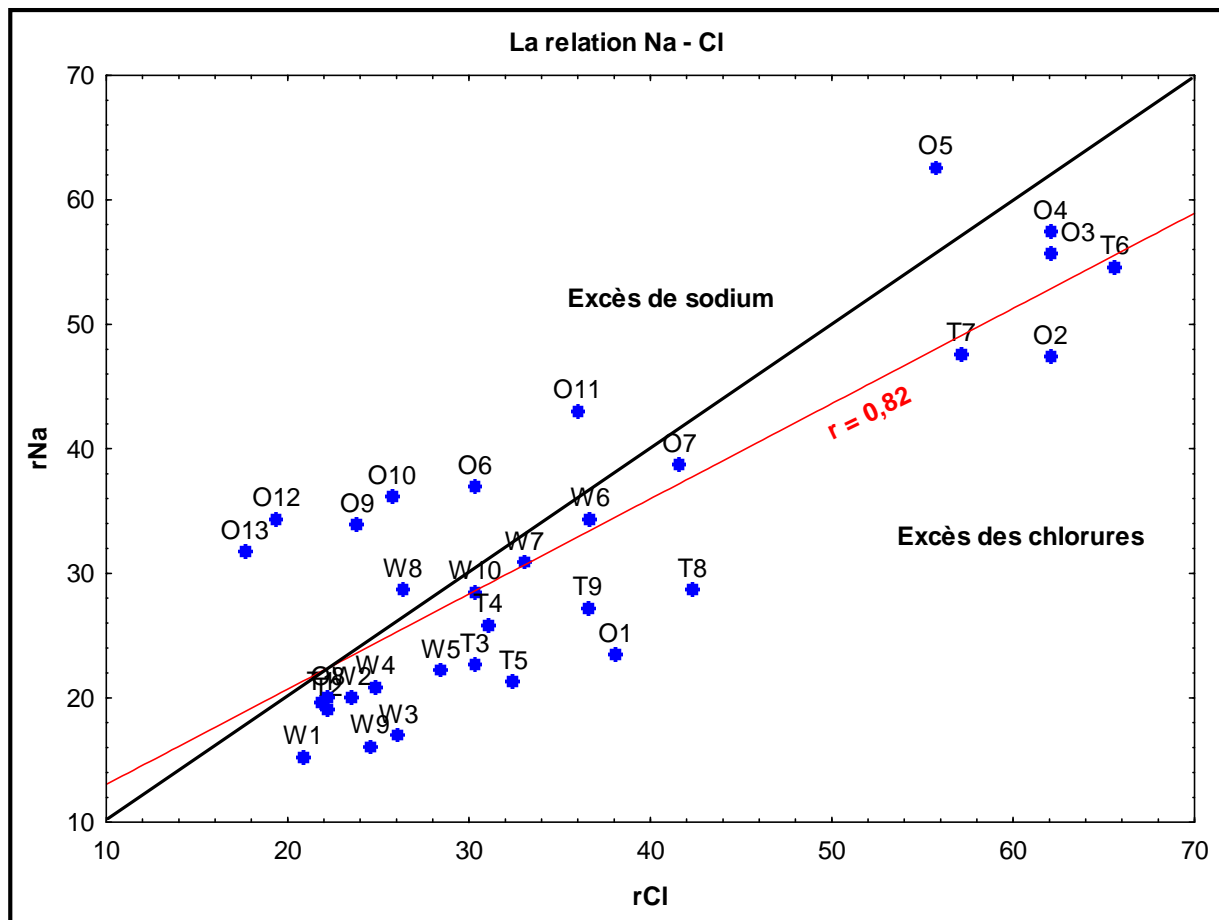


Figure VI.13 : La relation Na vs Cl

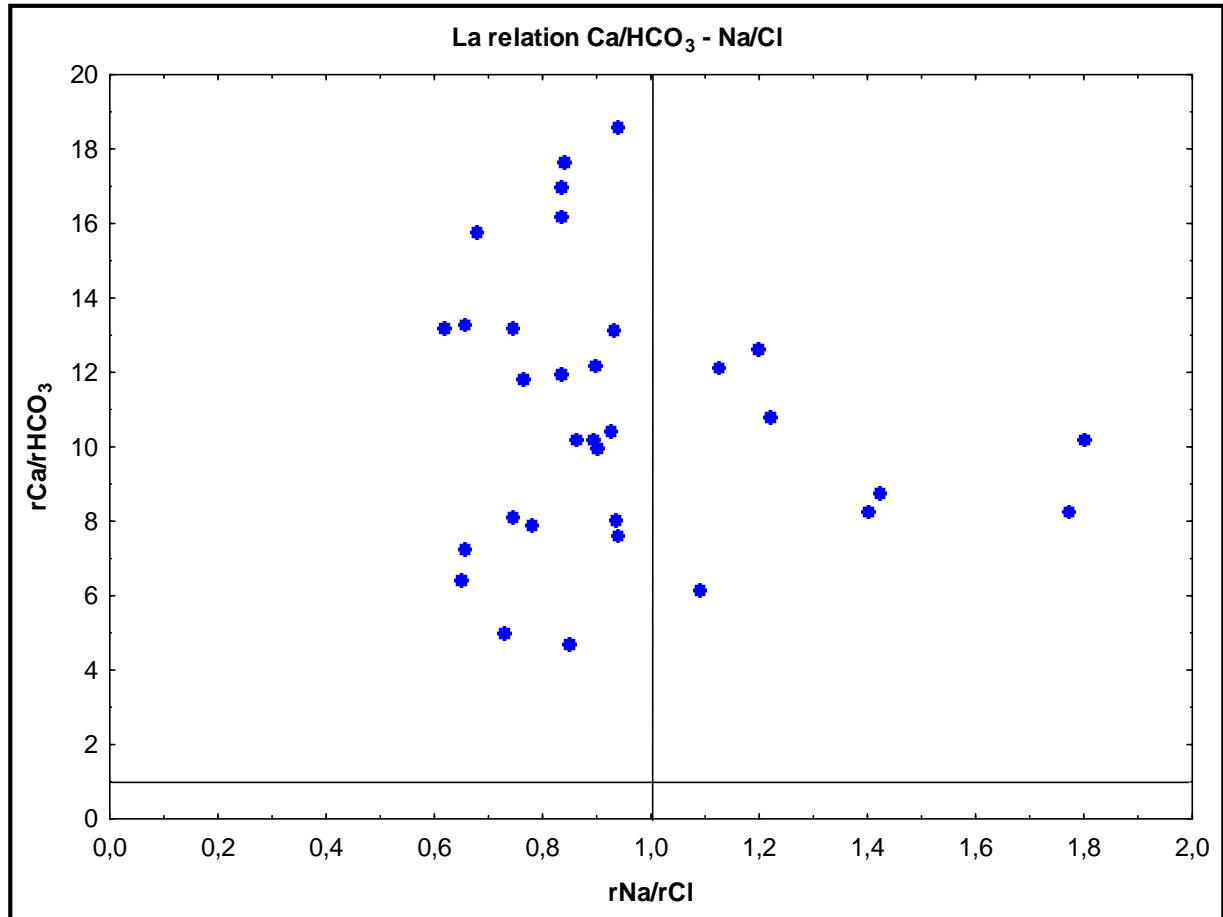
### VI.6.2- Origine des sulfates, du magnésium et du calcium

Pour les sulfates, les roches évaporitiques (gypse, anhydrite, epsomite ... etc.) sont, sans doute, à l'origine de cet élément dans les eaux de notre région d'étude, mais pour le magnésium, les carbonates contribuent aussi à son enrichissement dans les eaux.

L'origine du calcium est en majorité, la dissolution des roches gypseuses par simple lessivage, ou des roches calcaires par l'attaque par le  $\text{CO}_2$  dissous (acide carbonique). Dans l'eau, il peut être échangé, sous certaines conditions, contre le sodium des roches traversées

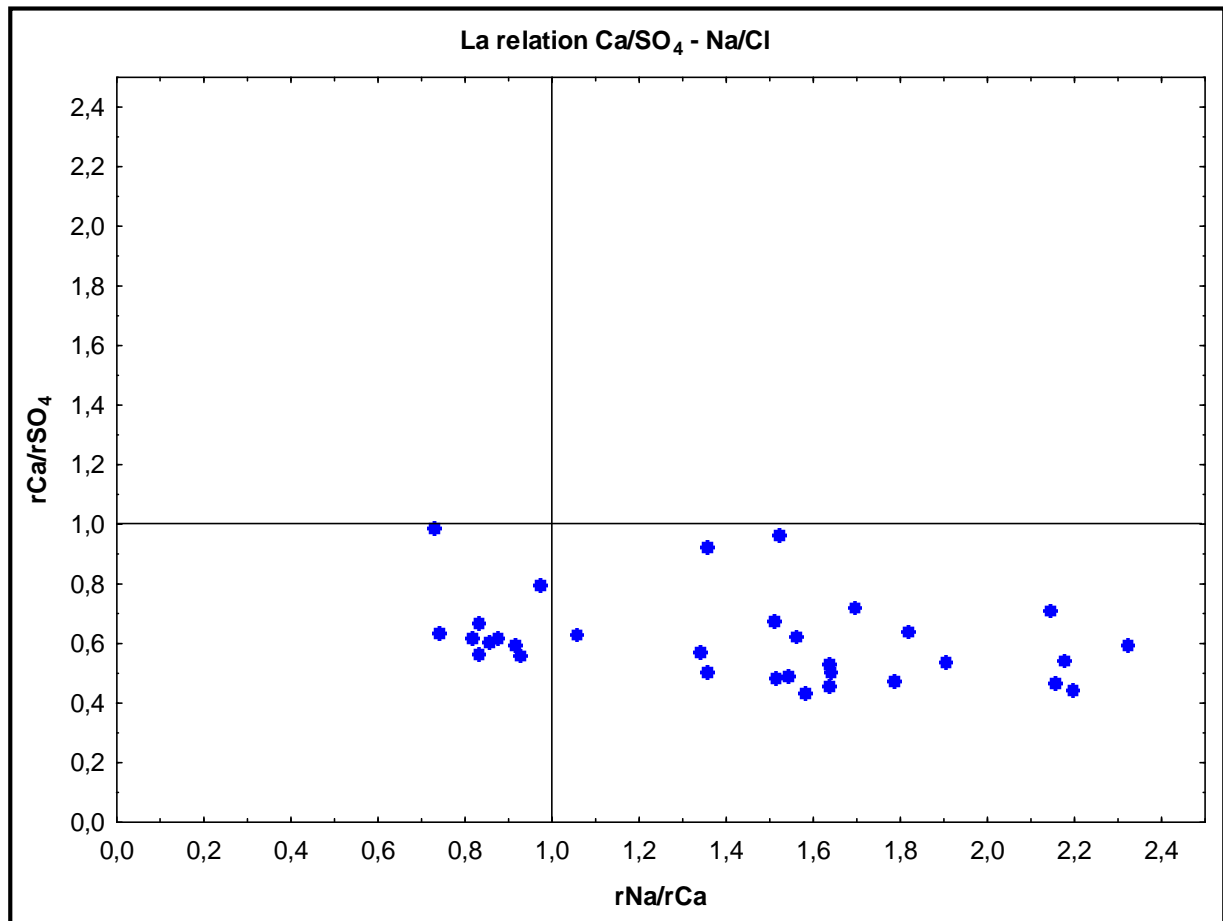
(argile). Une substitution entre magnésium et calcium dans les eaux est aussi possible. (Schoeller, 1963). Il participe aux phases de précipitations avec les bicarbonates dans l'aragonite et la calcite.

Le diagramme dans la figure (Figure VI.14) montre que la totalité des points sont en excès par rapport aux bicarbonates. Le calcium dissout dans l'eau doit évoluer donc avec un autre élément supposé être le sulfate.



**Figure VI.14 : La relation  $\text{Ca}/\text{HCO}_3$  vs  $\text{Na}/\text{Cl}$**

Dans la figure (Figure VI.15) et contrairement à la précédente, il semble que tous les ions calcium présents dans les eaux évoluent avec les sulfates. Ce qui confirme que les bicarbonates n'influence pas le chimisme des eaux étudiées. Les sources génératrices de  $\text{HCO}_3$  sont très faibles ou que les sels des bicarbonates sont sursaturés et se trouvent en phase solide.



**Figure VI.15 : La relation  $\text{Ca}/\text{SO}_4$  vs  $\text{Na}/\text{Cl}$**

Le diagramme (Figure VI.16) montre que les quantités en réaction de l'ion magnésium dépassent de loin celles des bicarbonates, mais le nuage de points paraît qu'il présente une certaine relation entre ces deux éléments. Ceci donc n'exclut pas la liaison du magnésium avec les bicarbonates et confirme que son origine n'est pas seulement évaporitique.

Pour la relation  $\text{Mg}/\text{SO}_4$  vs  $\text{Na}/\text{Cl}$  (Figure VI.17) et bien qu'il existe un échantillon ayant la teneur en magnésium en excès par rapport aux sulfates, le magnésium évolue mieux avec les sulfates plutôt qu'avec les bicarbonates. Son origine est plus reliée aux formations évaporitiques.

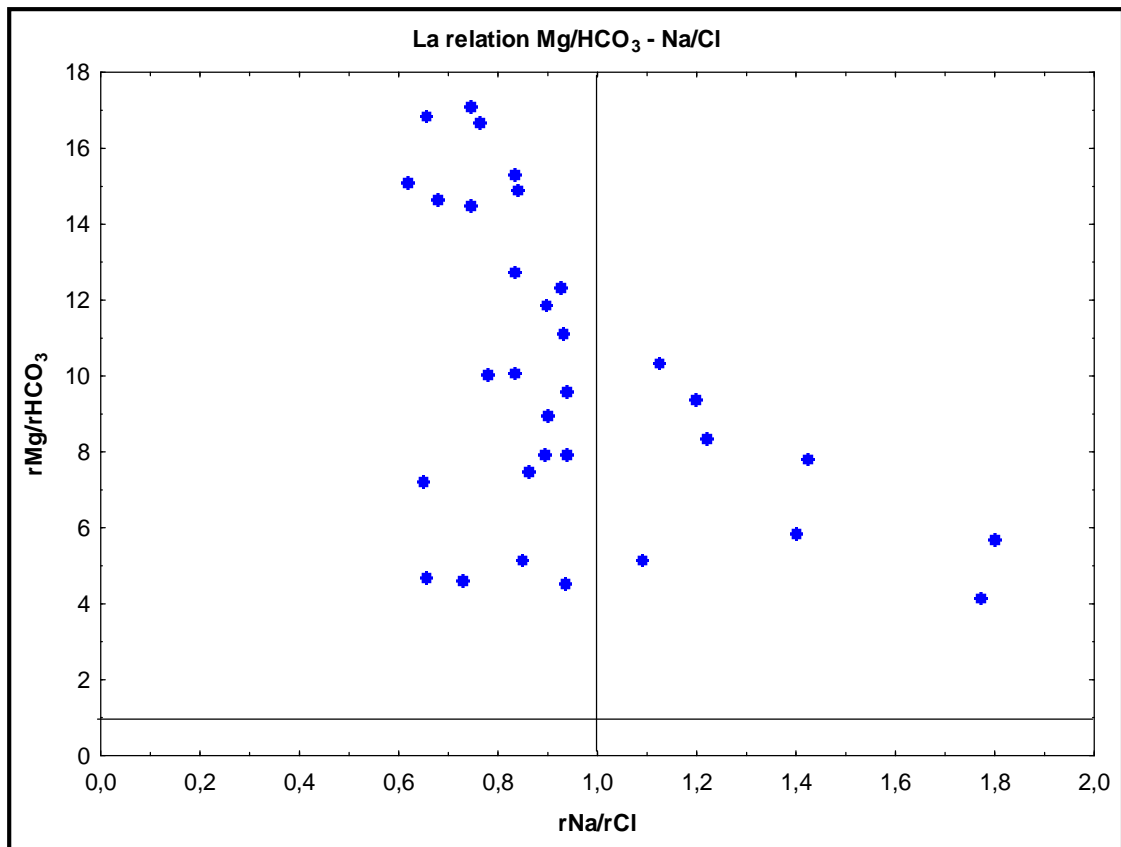


Figure VI.16 : La relation Mg/HCO<sub>3</sub> vs Na/Cl

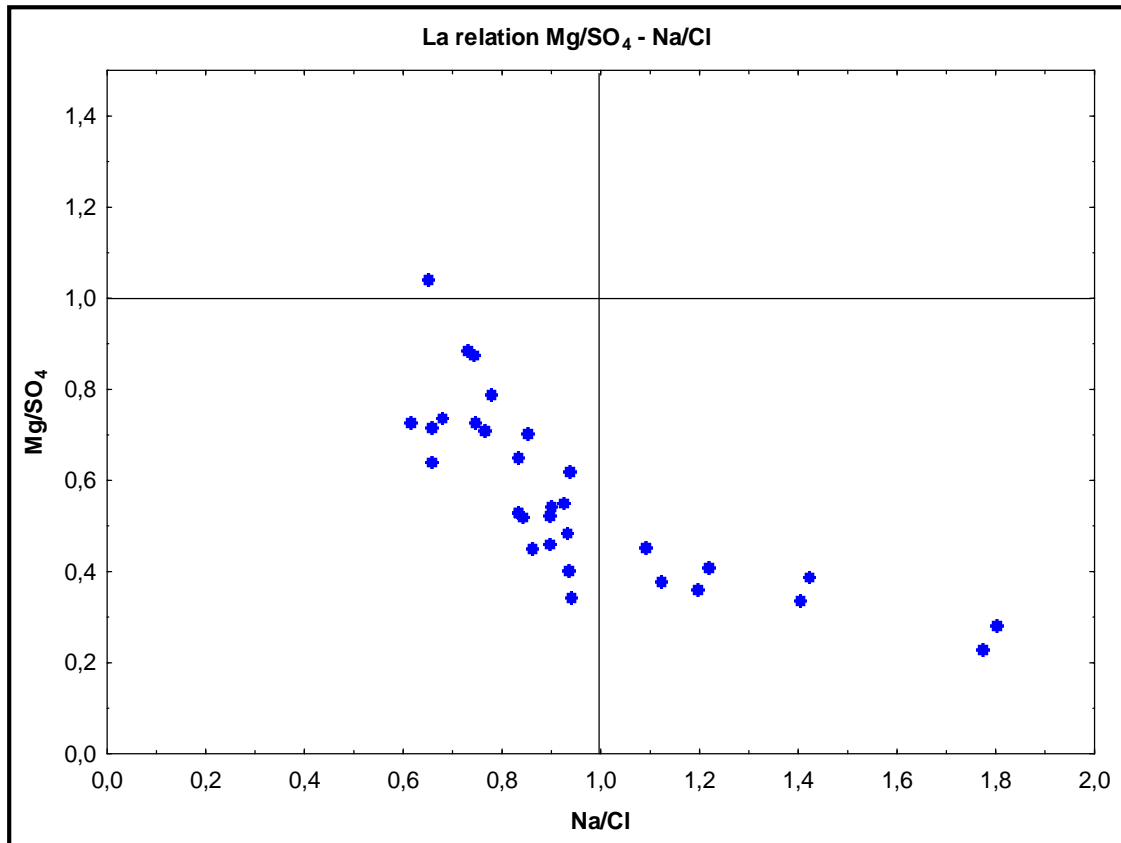


Figure VI.17 : La relation Mg/SO<sub>4</sub> vs Na/Cl

**VI.6.3- Origine du potassium et des bicarbonates**

Les valeurs de potassium dans les eaux étudiées n'évoluent pas le long du sens d'écoulement, mais c'est bien de montrer que son origine ne peut pas être liée seulement à la dissolution de la sylvite (KCl) et des argiles potassiques, mais aussi à l'infiltration des eaux d'irrigation chargées en potassium provenant des engrais du type (NPK).

Pour les bicarbonates, et par leur faible vitesse d'évolution dans les eaux, on peut confirmer que leur origine est due essentiellement aux formations carbonatées ayant de faibles degrés de solubilité.

**VI.7- Evolution du chimisme****VI.7.1- Détermination du facteur de concentration (Fc)**

L'estimation de la concentration des eaux se fait à l'aide d'un traceur chimique. Cette méthode a été utilisée par Valles (1987) dans la vallée de l'oued de Medjerdah en Tunisie, Gueddari (1984) pour l'étude de la géochimie du lac Natron en Tanzanie et Chott Djerid en Tunisie, et Barbiero (1992) dans la vallée du fleuve Niger, Hamdi-Aïssa (2001) sur les sols de la cuvette de Ouargla, et Nezli et al (2007) sur les eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya.

Le travail consiste à tester que la salinité résulte de la concentration des eaux, c'est pour quoi on fait intervenir le concept du « facteur de concentration (Fc) » qui est estimé à partir du rapport entre la teneur en chlorure d'une eau et la plus petite teneur en chlorure observée dans l'ensemble des échantillons.

On procède par la suite à un classement de nos analyses selon leur teneur en ion chlorure, et suivre l'évolution de la molalité (méq/l) de chaque élément majeur ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) depuis les échantillons d'eau les plus dilués, aux échantillons les plus concentrés, en fonction de la molalité croissante de  $\text{Cl}^-$ . Le nuage de points représentant les données de terrain ne s'oriente jamais suivant une pente supérieure à l'unité et cela indique que la détermination du facteur de concentration des solutions à partir de leur molalité en ions chlorures est acceptable. (Barbiero & al, 1992).

**VI.7.2- Evolution des paramètres physico-chimiques par rapport au facteur de concentration****VI.7.2.1- La conductivité électrique**

L'origine des grandes valeurs de conductivité des eaux du Mio-Pliocène de la zone d'étude est sans doute leur forte salinité, l'évolution de la conductivité se fait donc de la même façon que celle de cette salinité. Le graphique ci-dessous (Figure VI.18) montre que la droite de l'évolution de la conductivité est presque parallèle à celle du facteur de concentration et se fait selon la même pente, ce qui confirme la possibilité d'utilisation des chlorures pour l'estimation du facteur de concentration.

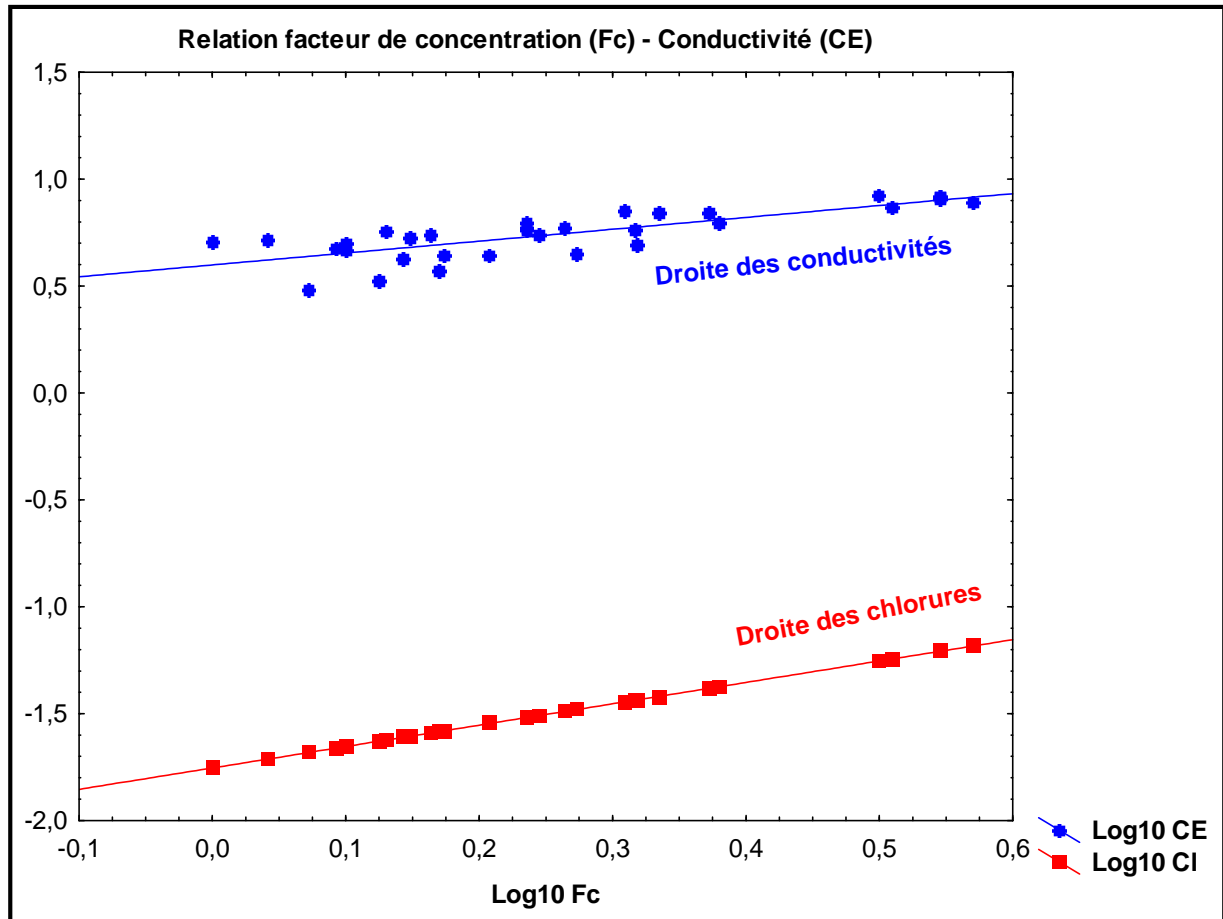


Figure VI.18 : La relation entre le facteur de concentration (Fc) et la conductivité

### VI.7.2.2- Les sulfates

Le graphique (Figure VI.19) montre que l'évolution des sulfates par rapport au facteur de concentration présente de différents comportements selon les régions, d'où on distingue deux familles : la première englobe la plupart des points d'eaux échantillonnées au niveau de la région de Ouargla, les sulfates évoluent de la même façon que les chlorures avec une pente quasi identique, la deuxième famille comprend le reste des échantillons, elle évolue d'une vitesse inférieure à celle des chlorures, ce qui peut être expliqué par la participation des sulfates dans des précipitations (gypse et anhydrite). On remarque aussi des valeurs de molalité des sulfates supérieures à la droite des chlorures dans les forages O8, O9, O12 et O13, ce phénomène est lié essentiellement aux chutes des teneurs en chlorures, en fait, ces forages qui se situent à proximité des zones d'exutoire de la nappe (chott Merouane pour les forages O8 et O9 et chott Melghigh pour les forages O12 et O13), c'est l'influence des apports d'eaux de précipitations qui dilue les eaux de la nappe.



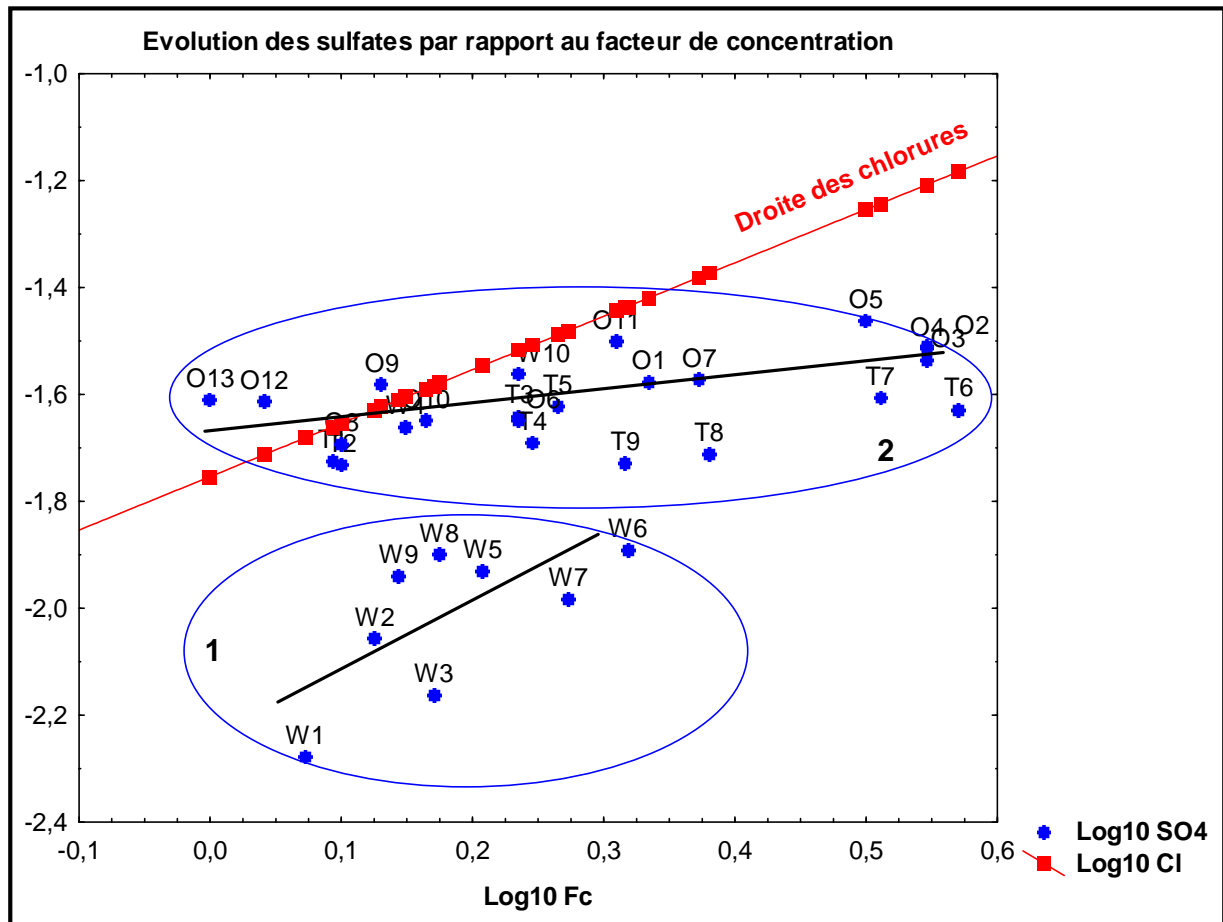


Figure VI.19 : L'évolution des sulfates par rapport au facteur de concentration

### VI.7.2.3- Les bicarbonates

L'analyse du graphique (Figure VI.20) montre que les bicarbonates n'évoluent pas avec la concentration globale dès le départ, ce qui peut être expliqué soit par leur participation à des précipitations, soit par un enrichissement très faible des eaux par cet anion du fait que les carbonates (calcite et dolomite) sont peu solubles.

### VI.7.2.4- Le sodium

Le diagramme ci-dessous (Fig.VI.21) montre que le sodium dans le cas général, suit le facteur de concentration, mais ça n'a pas empêché de distinguer trois comportements différents suivant toujours les régions et leurs variations de lithologie, la première famille représente des forages situés au niveau de Ouargla et Touggourt dans la plupart des cas, l'évolution du sodium de cette famille suit parfaitement celle du facteur de concentration, la deuxième famille comprend des eaux de la région d'El Oued, le sodium évolue à vitesse faible par rapport aux chlorures et en présente un excès de concentration dû peut être à un apport supplémentaire de cet ion par échange de base. La troisième famille est celle caractérisée par de fortes teneurs en sodium et en chlorures et une forte vitesse d'évolution, cette anomalie due peut être aux caractéristiques locales de ces régions (présence de petites dépressions formant des petits chotts), c'est la région de Djamaa et ses environs.

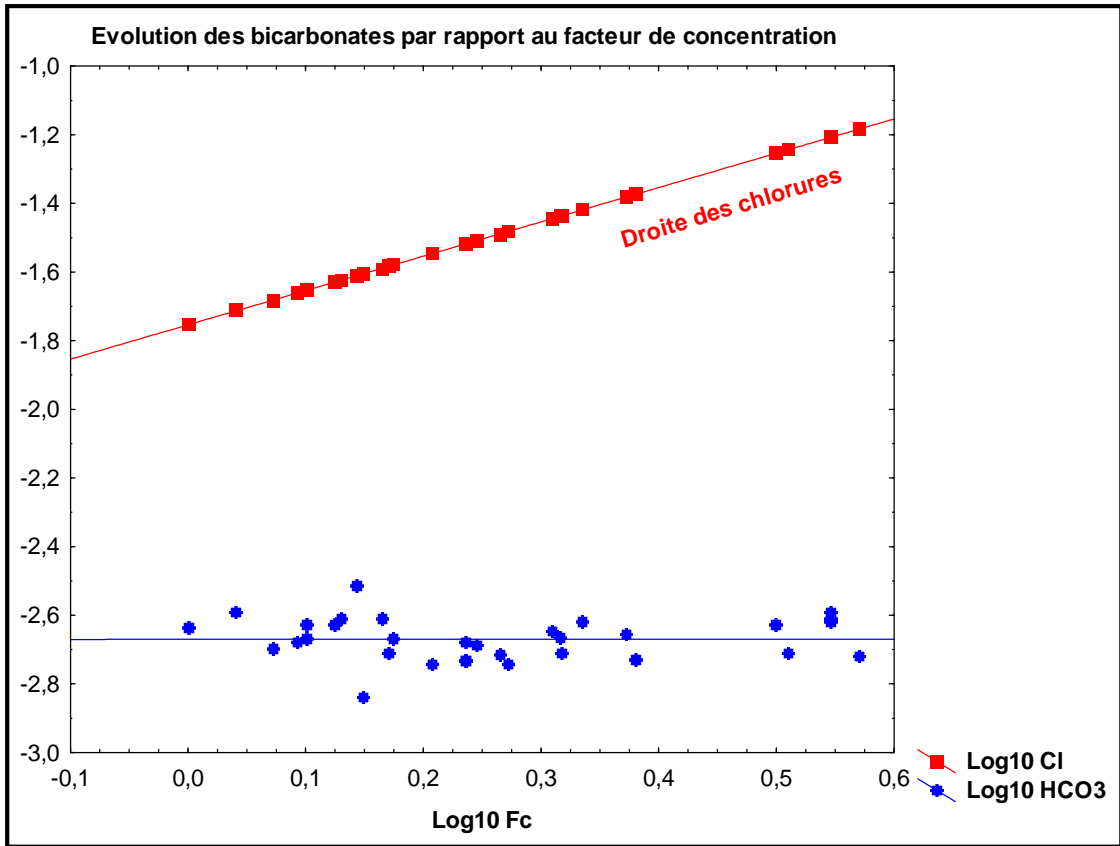


Figure VI.20 : L'évolution des bicarbonates par rapport au facteur de concentration

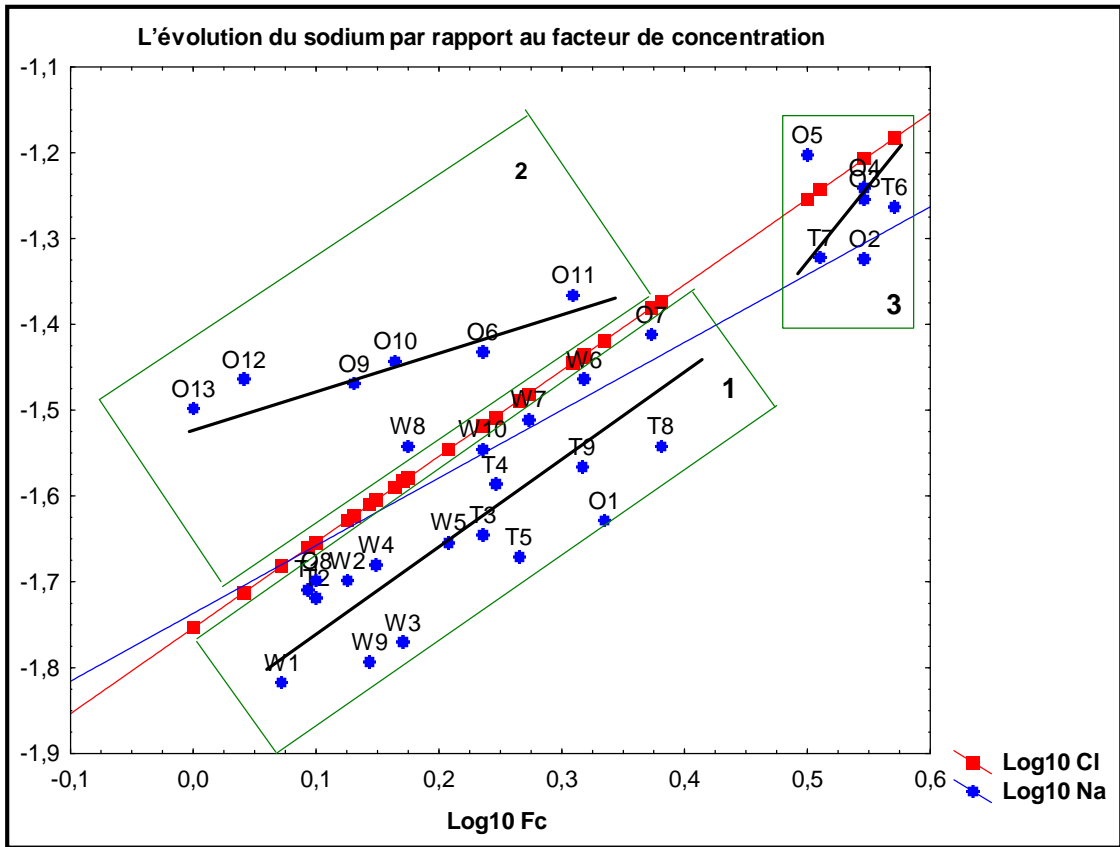


Figure VI.21: L'évolution du sodium par rapport au facteur de concentration

### VI.7.2.5- Le calcium

Le diagramme (Figure VI.22) montre que la concentration du calcium est moins importante que les chlorures mais il suit une certaine évolution avec ce facteur de concentration dans le cas général. On remarque toujours qu'il y a des différences surtout concernant la vitesse de l'évolution d'où on peut distinguer deux familles : la première est celle des forages de Ouargla, le calcium évolue parallèlement avec le facteur de concentration, cette augmentation des concentrations indique que la précipitation de cet élément n'a pas encore mise en place dans cette région. Par contre, la deuxième famille comprend les forages des autres régions où on remarque que ce cation évolue à une vitesse faible par rapport aux chlorures, ce qui peut être expliqué par sa contribution à la précipitation de quelques minéraux tels que le gypse et l'anhydrite.

### VI.7.2.6- Le magnésium

Pour l'évolution du magnésium, le graphique (Figure VI.23) montre que le nuage de points suit quasi parfaitement le facteur de concentration, et la droite du magnésium est presque parallèle à celle des chlorures.

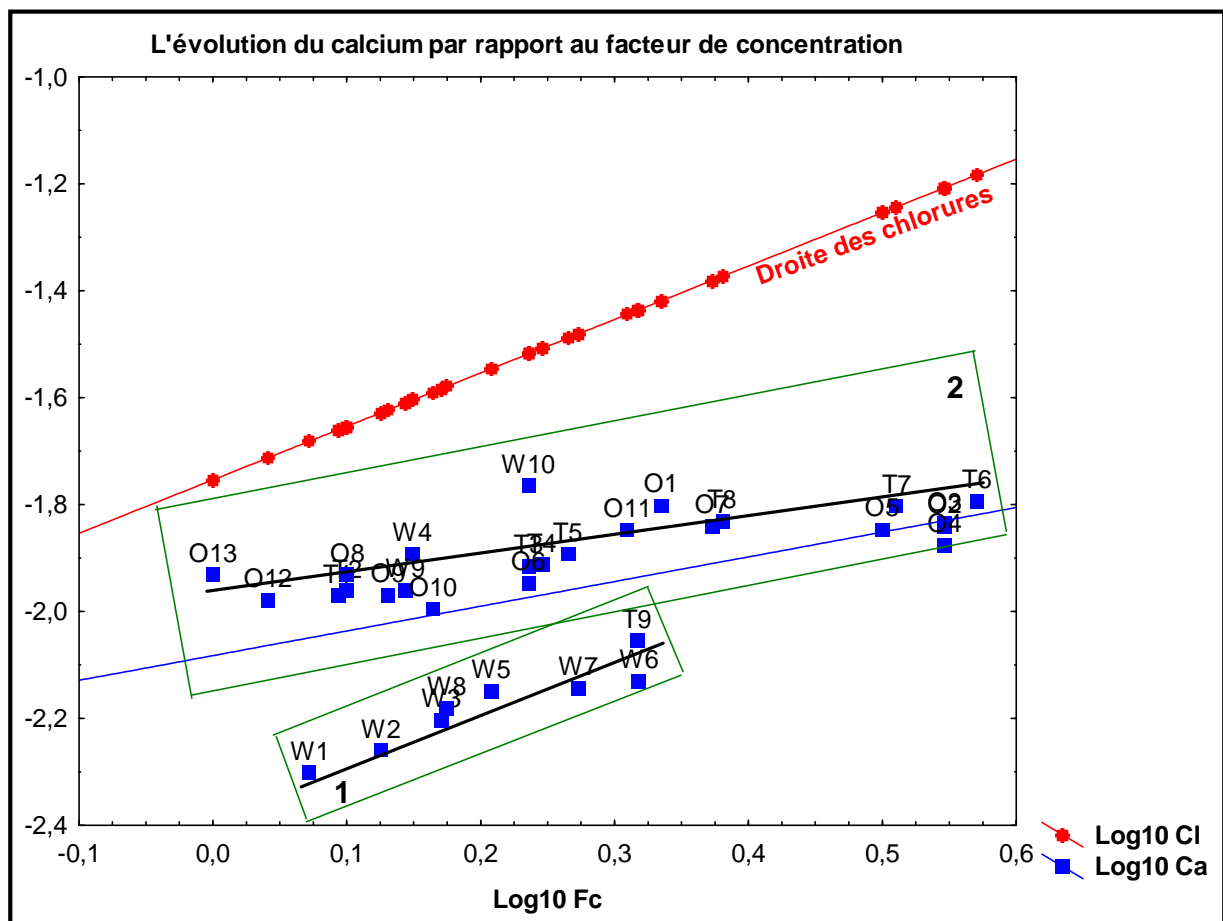
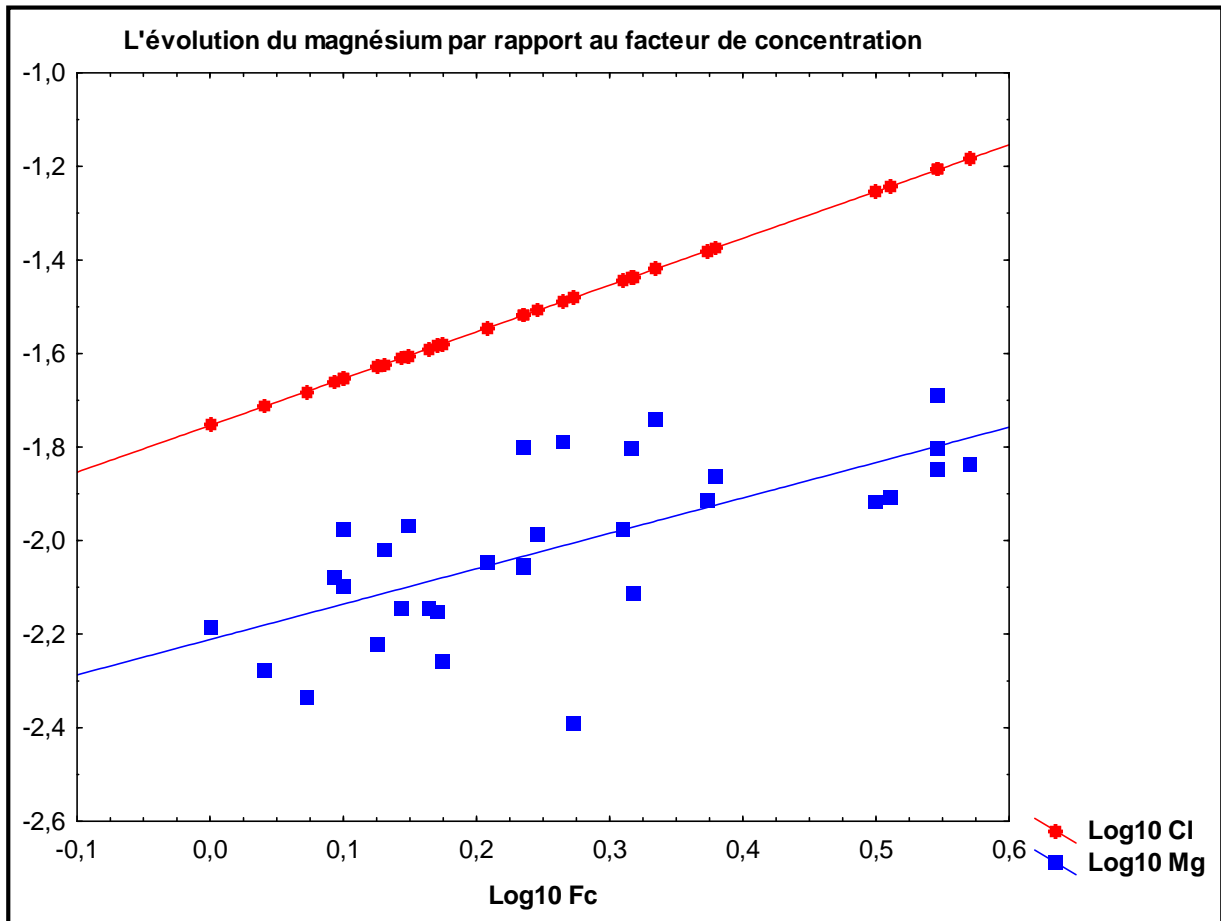


Figure VI.22 : L'évolution du calcium par rapport au facteur de concentration



**Figure VI.23 : L'évolution du magnésium par rapport au facteur de concentration**

#### VI.7.2.7- Le potassium

Même chose que les bicarbonates, le potassium (Figure VI.24) n'évolue pas avec la concentration globale des eaux, on remarque un enrichissement très faible, la sylvite qui donne naissance à cet élément dans les eaux du Mio-Pliocène de notre région d'étude doit être présente mais pas au point qu'elle puisse influencer fortement le chimisme.

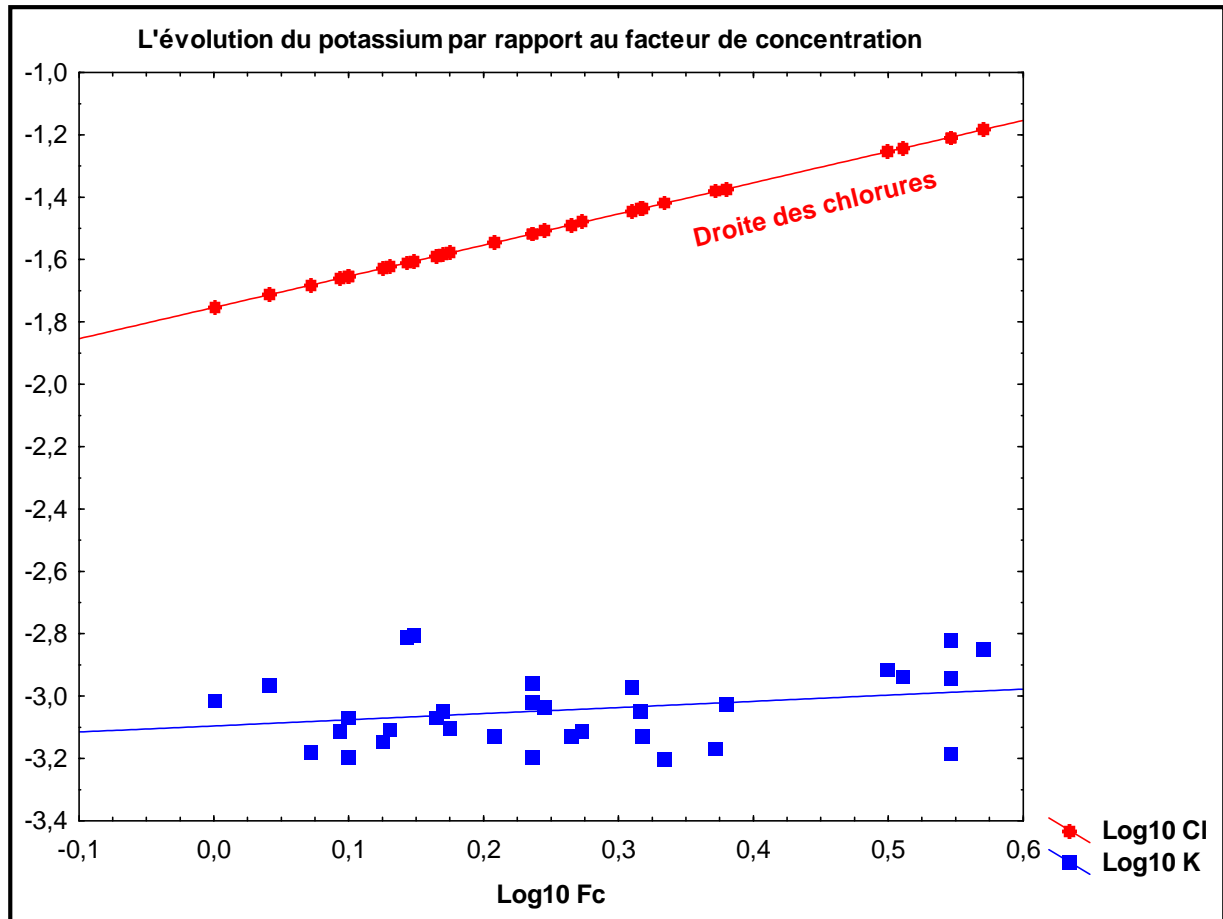


Figure VI.24 : L'évolution du potassium par rapport au facteur de concentration

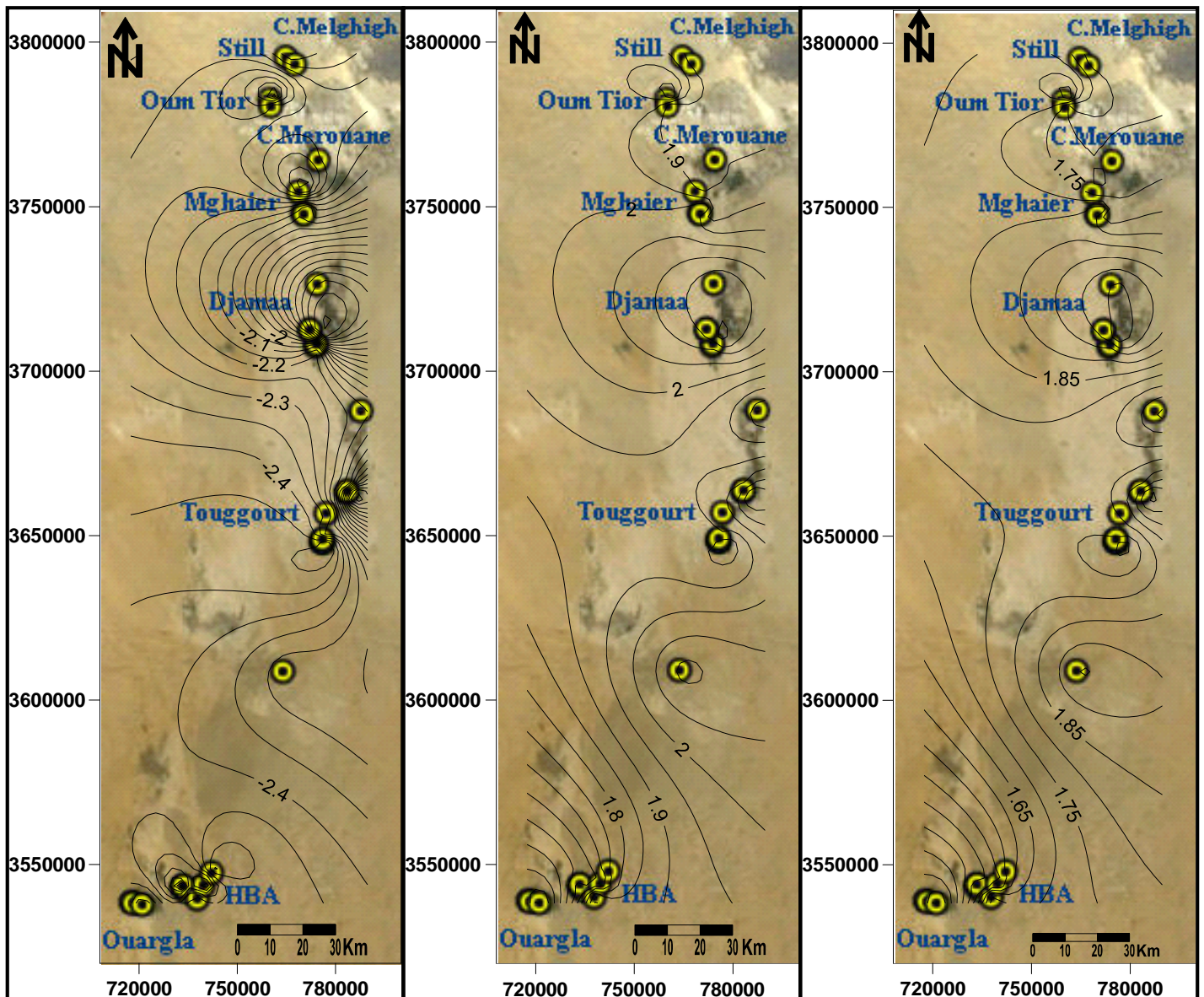
## VI.8- Equilibres Sels/solutions et évolution géochimique des eaux de la nappe

### VII.8.1- Evolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux prépondérant

En utilisant le modèle thermodynamique, Phreeqci.v.2.18, nous avons calculé l'indice de saturation ( $IS = \log(Q) / \log(Kps)$ ) des eaux de la nappe par les minéraux dominants.

Comme pour les éléments chimiques majeurs, les indices de saturation des minéraux prépondérants (évaaporites et carbonates) évoluent le long des sens d'écoulement des eaux de la nappe du Mio-Pliocène de notre région d'étude.

Pour les évaporites, on a choisi le gypse, l'anhydrite et la halite pour illustrer cette évolution, les cartes ci-dessous (Figure VI.25), indiquent que les eaux de tous les forages échantillonnés sont sursaturées vis-à-vis le gypse et l'anhydrite et sous-saturées vis-à-vis la halite.

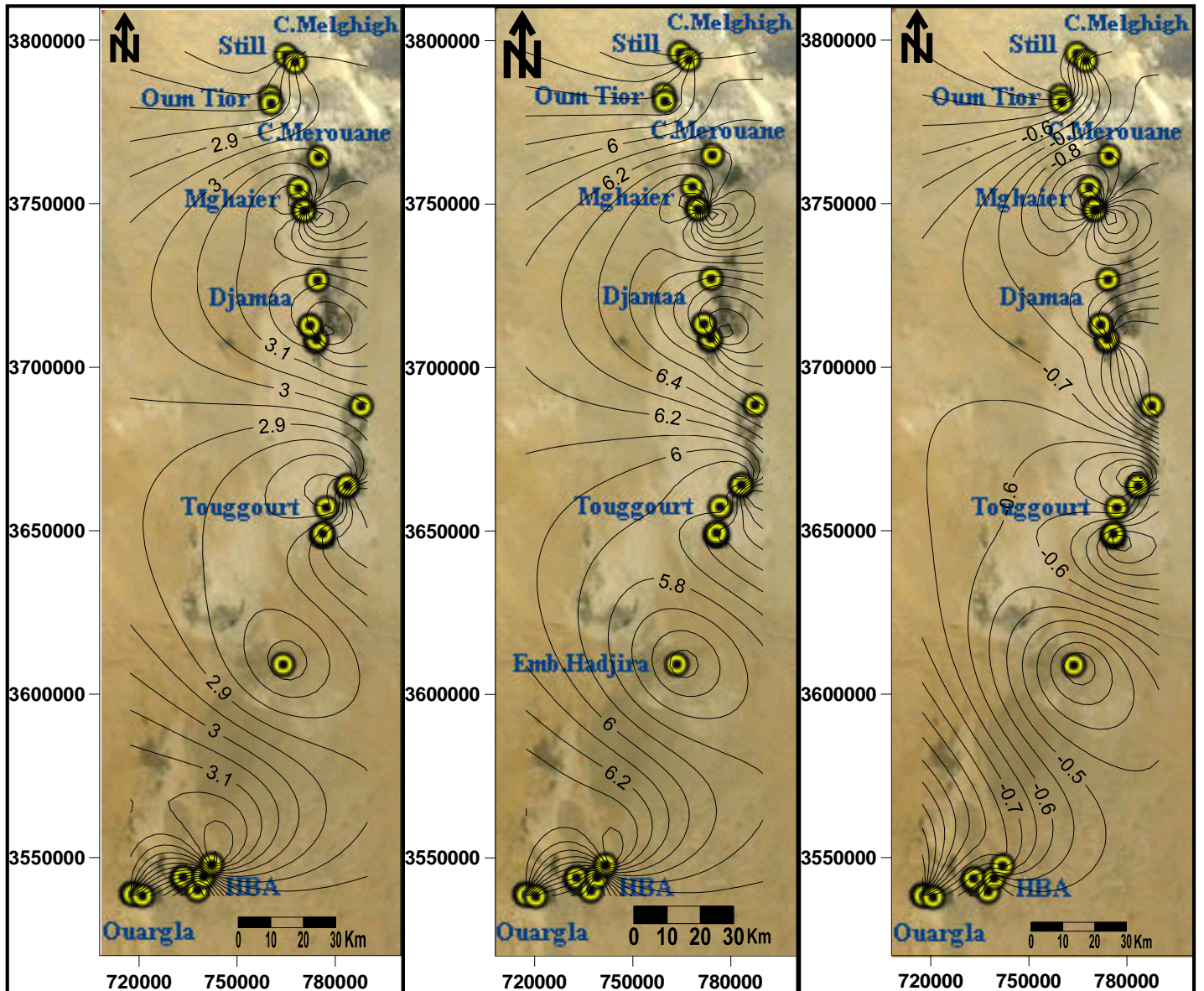


**Figure VI.25 : L'évolution de l'indice de saturation de la halite (gauche), du gypse (centre) et de l'anhydrite (droite) dans les eaux du MP du Sahara septentrional**

Les cartes montrent que les eaux sont sursaturées vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite et sous-saturées vis-à-vis de la halite, et les indices de saturation augmentent avec le sens d'écoulement des eaux du fait de l'enrichissement par les sulfates et le calcium (pour le gypse et l'anhydrite) et par le sodium en premier lieu pour la halite, on remarque dans les régions en proximité des chotts la diminution de ces indices, ceci peut être expliquer par deux phénomènes : par un apport d'eaux de précipitation gagnant ces zones de chotts en provenant des versants sud de l'Atlas tellien, et par la participation de ces minéraux à des précipitations, en l'occurrence, celle du gypse, de l'anhydrite et de la halite.

Pour les carbonates, on a choisi la calcite, la dolomite avec le  $\text{CO}_2$  dissous, les cartes ci-dessous (Figure VI.26), indiquent la sursaturation des eaux des forages échantillonnés vis-à-vis de la calcite et par un degré plus vis-à-vis de la dolomite, par contre, elles sont sous-saturées vis-à-vis du  $\text{CO}_2$  dissous.





**Figure VI.26 : L'évolution de l'indice de saturation de la calcite (gauche), la dolomite (centre) et du  $\text{CO}_2$  dissous (droite) dans les eaux du MP du Sahara septentrional**

L'observation de ces cartes montrent que les eaux sont sursaturées vis-à-vis de la dolomite et de la calcite, et sous-saturées vis-à-vis du  $\text{CO}_2$  dissous, et comme le comportement des indices de saturation des sulfates, ceux des carbonates augmentent aussi avec le sens d'écoulement des eaux du fait de l'enrichissement de ces dernières en calcium et en magnésium, mais toujours en proximité des chotts, on enregistre la diminution de ces indices, ceci est expliqué aussi par la participation de ces minéraux à des précipitations, surtout, celles du gypse, de la calcite et de la dolomite.

## VI.8.2- Evolution des indices de saturation par rapport au facteur de concentration

### VI.8.2.1- La saturation vis-à-vis des minéraux sulfatés

Le diagramme ci-dessous (Figure VI.27) montre que l'évolution des indices de saturation des eaux du Mio-Pliocène de notre région d'étude vis-à-vis des minéraux sulfatés, en l'occurrence, le gypse et l'anhydrite suit le même rythme de l'évolution du facteur de concentration, mais avec un degré de saturation en gypse plus ou moins élevé par rapport à celui de l'anhydrite.

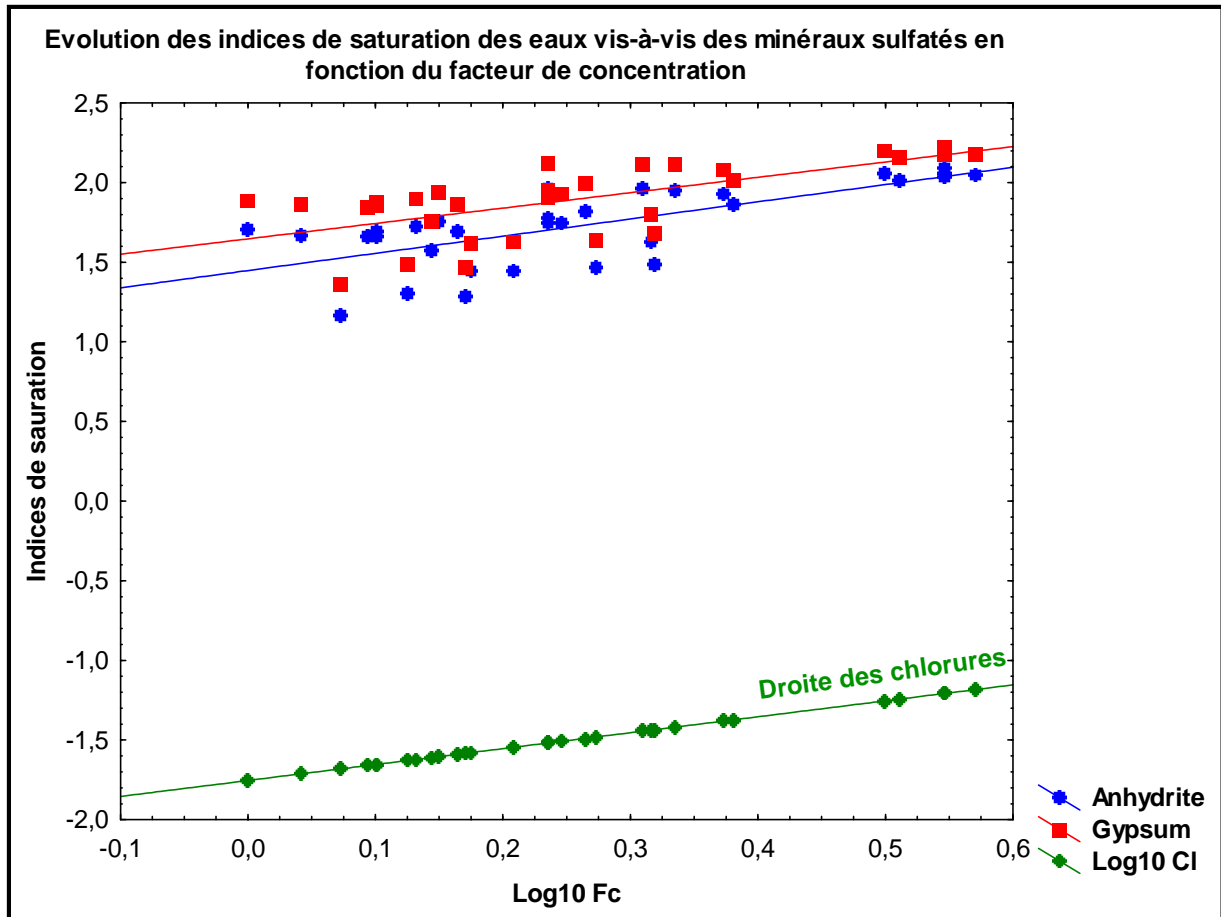
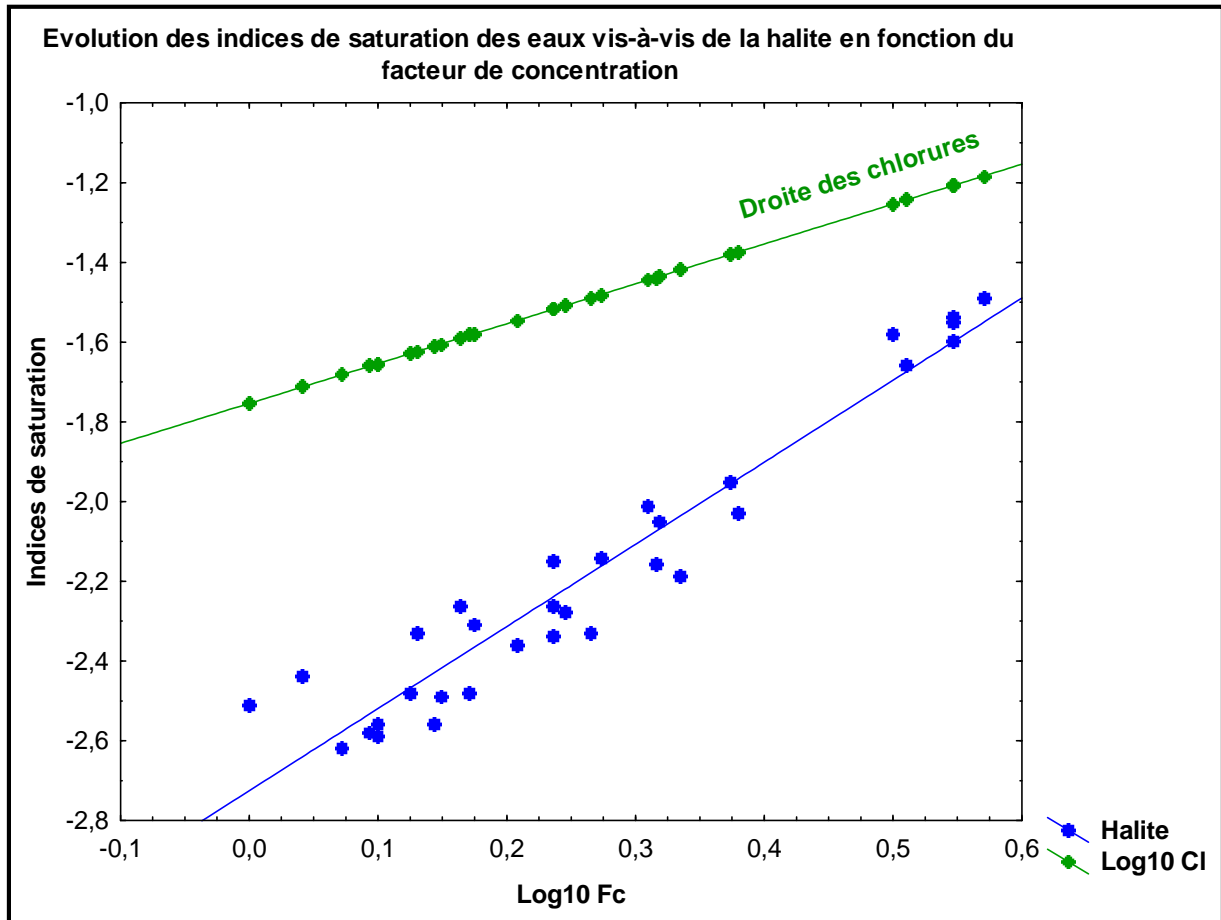


Figure VI.27 : L'évolution des indices de saturation des eaux vis-à-vis des minéraux sulfatés en fonction du facteur de concentration

### VI.8.2.2- La saturation vis-à-vis de la halite

La figure ci-dessous (Figure VI.28) montre que l'indices de saturation des eaux vis-à-vis de la halite évolue d'une vitesse supérieur à celle du facteur de concentration, mais les eaux en restent toujours sous saturés,





**Figure VI.28 : L'évolution des indices de saturation vis-à-vis la halite en fonction du Fc**

### VI.8.2.3- La saturation vis-à-vis des minéraux carbonatés

L'analyse du graphique de la figure (Figure VI.29) indique que l'évolution des indices de saturation des eaux du Mio-Pliocène vis-à-vis des minéraux carbonatés (calcite et dolomite) suit le rythme de l'évolution du facteur de concentration, mais avec un degré de saturation en dolomite plus élevé par rapport à celui de calcite, et à une vitesse d'évolution un peu plus forte.

L'évolution des indices de saturation des minéraux par rapport au facteur de concentration montre la forte sensibilité des minéraux carbonatés à la précipitation, et à un degré moindre les minéraux évaporitiques.

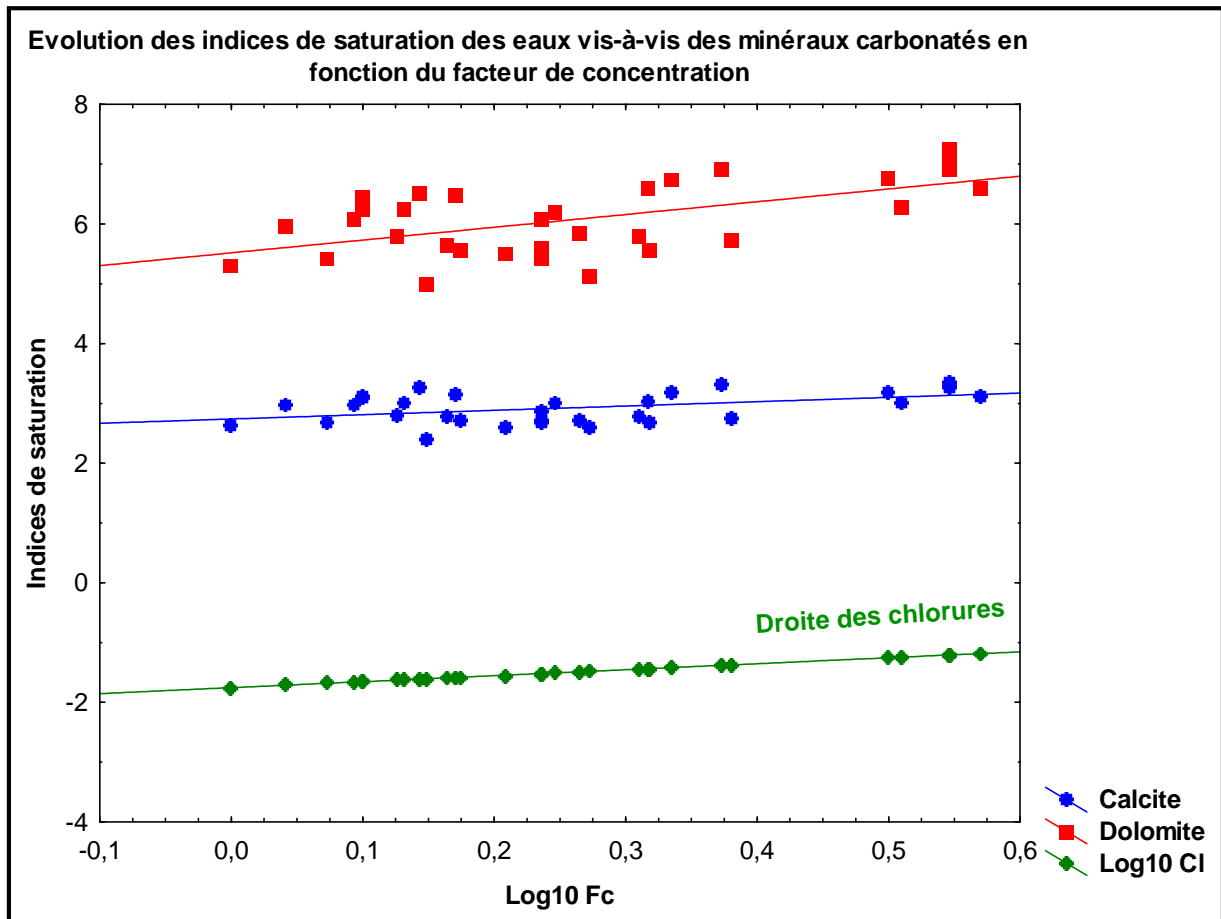


Figure VI.29 : L'évolution des indices de saturation en carbonates en fonction du Fc

## VI.9- Influence des argiles sur le chimisme des eaux

### VI.9.1- Echanges de base

Les eaux souterraines au cours de leurs trajets souterrains, se chargent de plus en plus en matières dissoutes, elles rentrent en contact avec des substances ayant la propriété d'échanger leurs ions contre ceux de l'eau. C'est une faculté particulière des argiles dont les feuillets présentent une charge négative. Celle-ci est compensée au niveau des espaces inter foliaires par des cations ( $H^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$ , et  $Mg^{2+}$ ) échangeables (Schoeller, 1962 ; Droubi, et al, 1976). L'indice d'échange de base (i.e.b), tel que :  $i.e.b = rCl^- - rNa^+ - rK^+ / rCl^-$ .

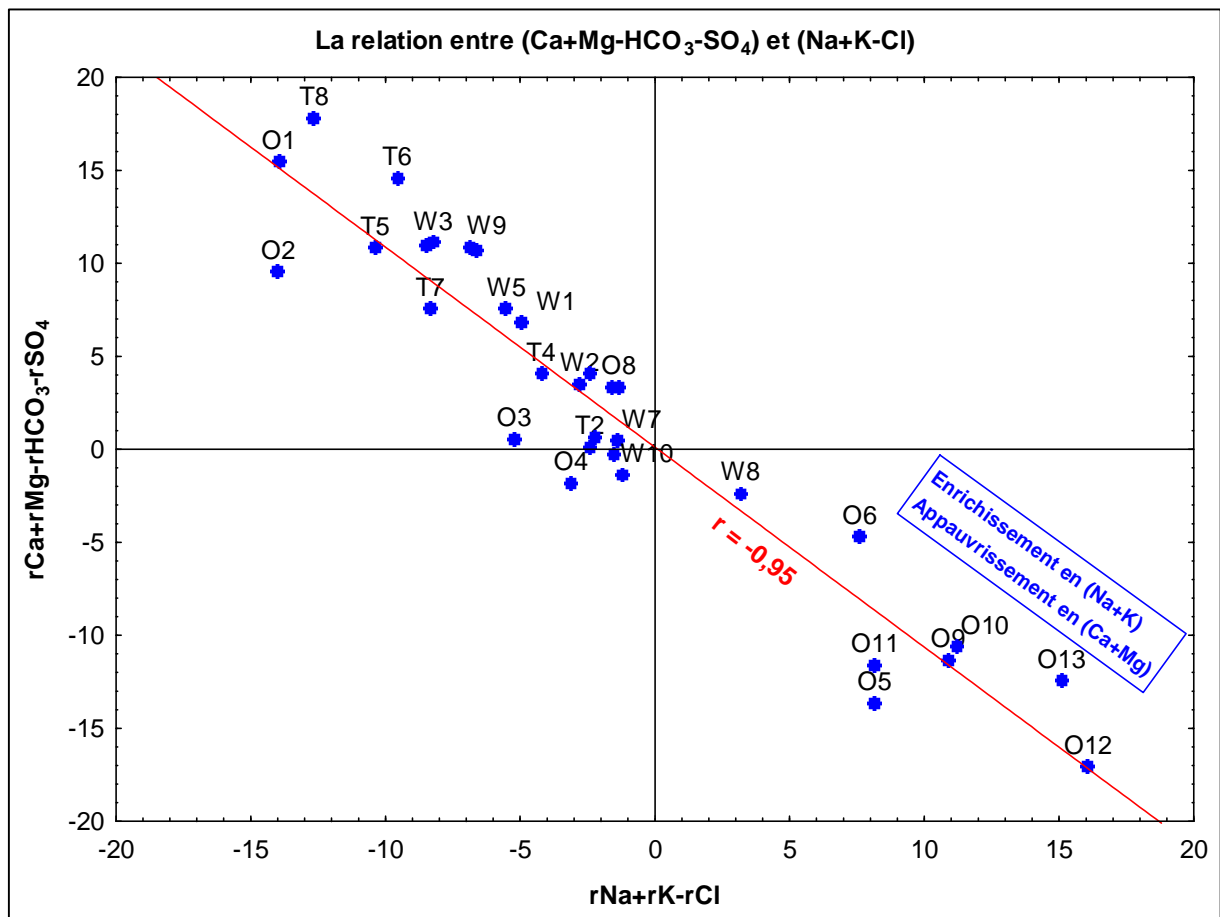
Pour qu'il y ait un échange de base, i.e.b doit être positif. Si le rapport est grand, cela signifie que l'échange est grand. (Schoeller, 1962).

Notons que l'indice d'échange de base ne correspond pas forcément à un échange de base, lorsqu'il est négatif, il correspond au déséquilibre chloro-alcalin, qui est caractérisé par l'indice :  $rCl^- - rNa^+ + rK^+ / rHCO_3^- + rSO_4^{2-} + rNO_3^-$ .

Le calcul du pourcentage des valeurs positives ou négatives de l'indice d'échange de base montre que 25% des échantillons ont un i.e.b négatif, le reste sont positifs mais toujours proches du zéro.

Le graphique ci-dessous (Figure VI.30) montre les échantillons où il y a un excès ou déficit en (Ca+Mg) ou (Na+K), la plupart des eaux dans les échantillons des régions de Ouargla et Touggourt montrent un excès en (Ca+Mg) par rapport aux ( $\text{HCO}_3+\text{SO}_4$ ) et un déficit en (Na+K) par rapport aux Chlorures (Cl), c'est la lithologie caractérisée par la dominance des formations évaporitiques qui contrôle l'enrichissement des eaux en ces éléments (Ca et Mg).

Par contre, la figure montre aussi que la plupart des eaux des forages dans la région d'El Oued, présentent un déficit en (Ca+Mg) et un excès en (Na+K), ce phénomène est toujours contrôlé par la lithologie, mais cette fois ci celle caractérisée par l'abondance des argiles par rapport aux autres formations lithologiques dans ces régions (Mghaier, Oum Tior, Still), ce qui favorise l'échange de bases entre les eaux et les formations argileuses, c'est le phénomène d'échanges de base qui est à l'origine de l'apport supplémentaire en sodium remarqué dans les eaux de ces régions (Figure VI.21), ce qui confirme cette hypothèse.



**Figure VI.30 : La relation entre  $(\text{Ca}+\text{Mg}-\text{HCO}_3-\text{SO}_4)$  et  $(\text{Na}+\text{K}-\text{Cl})$  dans les eaux du Mio-Pliocène**

### VI.9.2- Dissolution des minéraux alcalins

Du fait de l'abondance des formations argileuses dans l'aquifère du Mio-Pliocène de notre zone d'étude en aval (Mghaier, Oum Thior, Still), le phénomène de l'altération des argiles est

fortement probable, la figure ci-dessous (Figure VI.31) montre l'évolution du rapport K/Cl, on remarque trois groupes à comportements différents, le premier ne montre presque aucune évolution, ce sont les forages des régions Ouargla et Touggourt, le deuxième comprend les forages W4 et W9, il est caractérisé par des concentrations en potassium relativement élevées, probablement dues à l'utilisation intense des engrais potassiques puisque la zone est agricole. Le troisième groupe, comprend les forages de la région d'El Oued, et comme le montre la figure, présente une grande vitesse d'évolution due peut être à un enrichissement en potassium par altération des argiles.

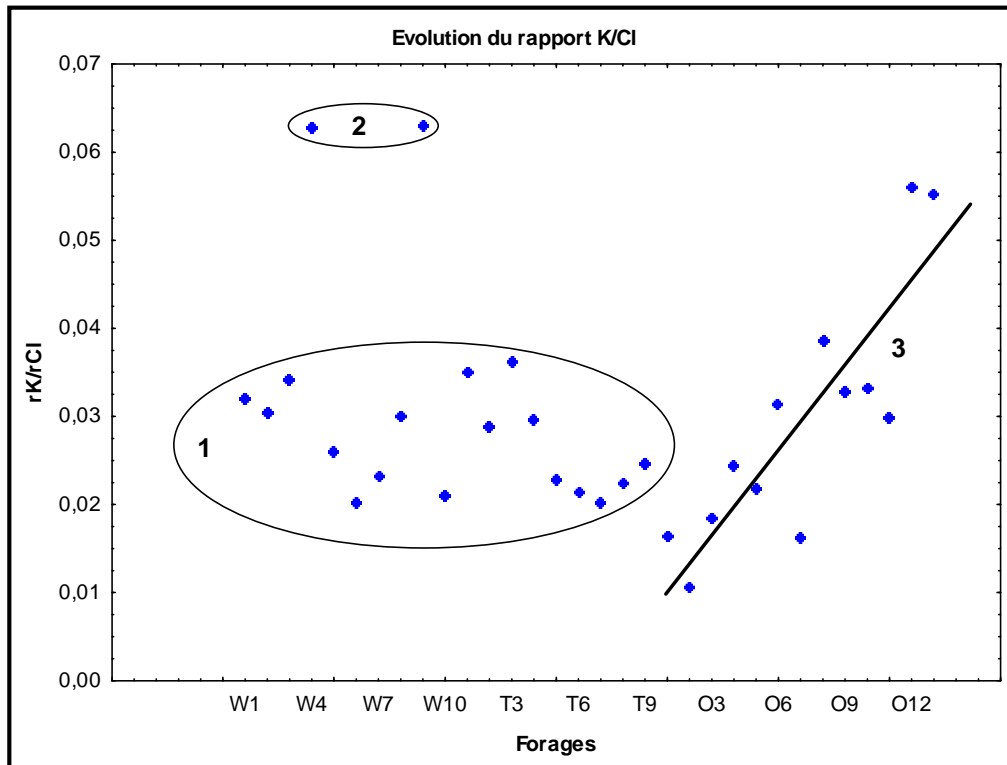


Figure VI.31: L'évolution du rapport K/Cl

### VI.10- Conclusion

Les eaux du Mio-Pliocène, en contact avec une lithologie riche en évaporites en amont, et en argiles en aval révèlent une minéralisation excessive, exprimée par des valeurs de conductivité électrique très élevées, oscillant dans la plupart des cas, entre 3030 et 8300  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , ces valeurs augmentent de l'anion vers l'aval. Des teneurs notables et variables en éléments minéraux ont été observées, les valeurs les plus élevées sont dans des échantillons prélevés de forages creusés en aval de la zone d'étude (Djamaa, Mghaier, Still).

En effet, les concentrations en sodium, en chlorure, en calcium et en sulfate sont bien corrélées (Ca vs  $\text{SO}_4$  :  $r = 0,84$ ), (Na vs Cl :  $r = 0,82$ ).

La participation des ions évaporitiques dans la minéralisation totale des eaux résulterait d'une éventuelle dissolution de la halite et du gypse et de l'anhydrite.

Les indices de saturation de l'ensemble des eaux vis-à-vis des minéraux concernés (halite, gypse, anhydrite, calcite et dolomite) montrent un état de sous-saturation vis-à-vis de l'halite

et sursaturation vis-à-vis du reste des minéraux sus-indiqués. Tandis que les figures ci-après (Figure VI.32) illustrent des corrélations très significatives entre l'indice de saturation (IS) du gypse et de l'anhydrite avec  $(Ca+SO_4)$ , ainsi que IS de l'halite et  $(Na+Cl)$  et de la sylvite  $(K+Cl)$ , Ce qui renforce l'hypothèse de la dissolution de ces évaporites. Cependant, les indices de saturations de la calcite et de l'aragonite avec  $(Ca+HCO_3)$ , et de la dolomite avec  $(Ca+Mg+HCO_3)$  ne montrent guère de corrélations, ce qui infirme la dissolution de ces minéraux carbonatés. Par ailleurs, le départ du calcium par précipitation des carbonates et des sulfates diminue son activité chimique et conduit à l'apparition d'un faciès dominant chloruré sodique, suivi d'un faciès sulfaté sodique. Il est à noter que des échanges de bases, peuvent se produire en diminuant ainsi les concentrations en Ca et Mg.

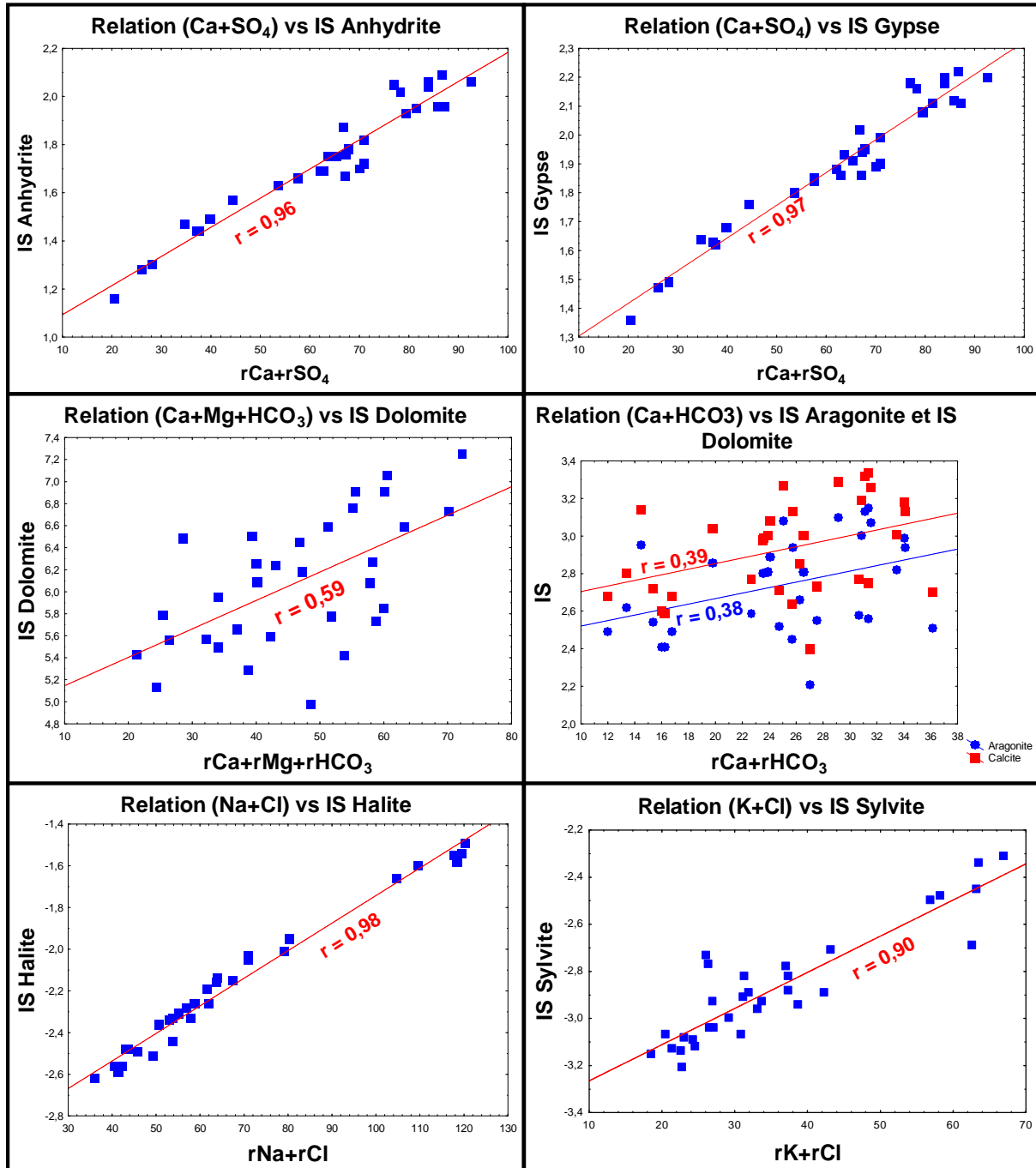


Figure VI.32: Correlations entre minéraux et indices de saturation

# *Conclusion générale*

## **Conclusion générale**

Notre zone d'étude fait partie de la région Est du Sahara septentrional algérien, elle est caractérisée par un climat désertique aride avec des températures extrêmes en été (plus de 50 °C) et des précipitations faibles, inférieures à l'évaporation potentielle annuelle, mais peuvent contribuer quand même à une certaine recharge des nappes lorsque certaines conditions s'y prêtent : climatiques (des précipitations exceptionnelles), topographiques (relief favorisant le ruissellement des oueds) et géologiques (affleurements perméables). Cependant, ces précipitations demeurent négligeables par rapport à l'exploitation excessive des nappes souterraines. Du fait de la rareté de ces précipitations, l'écoulement des Oueds de la région reste irrégulier. La topographie est relativement plane, le paysage général se manifeste par des dunes de sable, des regs, des hamadas et des chotts et sebkhas.

Géologiquement, notre région est composée de deux unités structurales ; le socle précambrien composé de roches éruptives et métamorphiques, surmonté par des milliers de mètres de couches sédimentaires allant du Cambrien jusqu'au Quaternaire, géostructuralement, le Mio-Pliocène qui fait l'objet de notre étude, n'est pas affecté par des accidents tectoniques à l'instar du reste de la série sédimentaire sous-jacente du Sahara septentrional, la lithologie y est très variée, on a constaté l'abondance des formations évaporitiques (gypse et anhydrite) et argileuses, avec quelquefois des carbonates.

Du point de vue hydrogéologique, le Complexe Terminal (CT) s'étale sur une surface de 350 000 km<sup>2</sup> et couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sa puissance moyenne est de 300 m environ.

Les eaux de la nappe du Mio-Pliocène de notre zone d'étude sont en contact avec une lithologie riche en évaporites, révèlent une forte minéralisation exprimées par des valeurs de conductivité électrique très élevées (8300  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ), qui augmentent de l'amont vers l'aval, les concentrations en éléments chimiques dépassent les normes de l'OMS et augmentent également le long du sens d'écoulement des eaux.

Le faciès chimique des eaux de la nappe du Mio-Pliocène au niveau de la région de Ouargla est chloruré, indiquant l'influence de la matrice halite, par contre, pour les autres régions (Touggourt et El Oued), c'est la matrice gypse qui gouverne et confère aux eaux un faciès sulfaté, mais pour la totalité de la zone d'étude, la minéralisation des eaux est contrôlée par les formations évaporitiques qui génèrent le chimisme. L'influence anthropique ne peut être négligée, des apports en nitrates et en potassium ont gagné les eaux de la nappe souterraine par infiltration, et c'est le cas remarqué dans la région agricole de Hassi Ben Abdallah (Ouargla).

L'utilisation des chlorures comme facteur de concentration nous a permis de suivre l'évolution des éléments chimiques, dans la région de Ouargla, tous les éléments (sauf les bicarbonates et le potassium) évoluent au même rythme que le facteur de concentration, les eaux s'en enrichissent, par contre, au niveau des autres régions, on a remarqué que ces éléments évoluent avec un rythme inférieur à celui du facteur de concentration, à cause de leur précipitation (calcite, gypse,). Nous avons constaté qu'en aval, des chutes des concentrations en chlorures ce qui suggère que le chimisme des eaux évolue vers la précipitation de la halite et sylvite à proximité des chotts.

L'abondance des argiles en aval confère aux eaux de la nappe des concentrations notables en sodium et relativement en potassium.



*Références  
bibliographiques*

## *Références bibliographiques*

**AISSANI B. et al (2010) :** Diagnostic des effondrements et de leur impact sur l'environnement, cas de M'rara, bas Sahara, Sud Est algérien. Annales des sciences et technologies. Vol. 2, N° 2. Algérie. p 153.

**ANRH (2004) :** Inventaire des forages et enquête sur les débits extraits de la Wilaya de Ouargla. Agence Nationale des Ressources Hydriques. Ouargla, Algérie.

**BALLAIS J.L. (2010):** Des oueds mythiques aux rivières artificielles: l'hydrographie du bas Sahara Algérien. Géographie physique et environnement. Vol IV, 127 p.

**BARBIERO et al (1992):** Aspects géochimiques de l'alcalinisation des sols de la vallée du Dallol Bosso (République du Niger). Cah. ORSTOM, Sér.Pédol; Vol. XXVII, n°2, 1992.

**BEL F. & CUCHE D. (1969) :** Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.

**BEL F. & DERMAGNE F. (1966) :** Etude géologique du Continental Terminal, ANRH Alger, Algérie, 22p.

**BOUCHAHEM N. et al (2008) :** Hydrochimie des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien – Identification d'un risque de fluorose endémique. LA HOUILLE BLANCHE 2008.

**BRINIS N. (2011) :** Caractérisation de la salinité d'un complexe aquifère en zone aride, cas de l'aquifère d'El Outaya, région Nord-Ouest de Biskra, Algérie. Thèse de doctorat en sciences hydrauliques, université de Biskra, 230p.

**BRULE et al. (2003) :** Aménageurs et aménagés en Algérie, Paris l'Harmattan.

**BUSSON G. (1972) :** Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Paris, 464p.

**CASTANY G. (1982) :** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Edition: DUNOD, Paris. 233p.

**CONRAD G. (1969) :** L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara Algérien. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n° 10, CNRS, Paris, 527p.

**CORNET A. (1964) :** Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. SNED, Alger Algérie, 572p.

**DROUBI et al (1976) :** Equilibres entre minéraux et solutions. Programmes de calcul appliqués à la prédiction de la salure des sols et des doses optimales d'irrigation. Cah. ORSTOM, série Pédol.

**DUBIEF J. (1953) :** Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. S.E.S., Alger, 457p.

- DUBIEF J. (1963)** : Le climat du Sahara. Mém. Hors série. Ins. Rech. Sahar, 2275p.
- EDMUNDS W.M. et al (2002)** : Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. Applied Geochemistry, elsevier (2003).
- FABRE J. (1976)** : Introduction à la géologie du Sahara Algérien. SNED, Alger Algérie, 422p.
- FRITZ B. (1975)** : Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Sci. Géol. Mém., Strasbourg, 152p.
- GOUSCOV N. (1952)** : Le problème hydrogéologique du bassin artésien de l'Oued Rhir. In «La géologie et les problèmes de l'eau en Algérie». XIXème congrès géologique international T.II, 16p.
- GUEDDARI M. (1984)** : Géochimie et thermodynamique des évaporites continentales. étude du lac Natron en Tanzanie et du Chott El Jerid en Tunisie, Sci. Géol. Mém., 76, 143p.
- GUENDOUZ A. (1985)** : Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est Septentrional (Algérie). Thèse 3<sup>ème</sup> cycle. Université de Paris-Sud, 243p.
- GUENDOUZ A. et al (2003)** : Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara, Hydrogeology Journal (2003).
- HAMDI-AÏSSA B. (2001)**, Le fonctionnement actuel et passé de sol du Nord Sahara (Cuvette de Ouargla). Thèse de Doctorat en pédologie. I.N.A Paris Grignon, 275p.
- HELGESON H C. (1969)** : Thermodynamics of hydrothermal systems at elevated temperatures and pressures. Am. J. Sci.
- HOUARI I M. et SALMI M. (2009)** : Reconnaissance géologique des formations aquifères de la basse vallée de l'oued M'ya (Région de Ouargla), mémoire d'ingénieur, université de Ouargla, 81p.
- KILIAN C. (1931)** : Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr. Paris.
- KOLLI A. (2012)** : Etude des effondrements du Sahara septentrional, cas de M'rara, Guerara et Mansourah. Mémoire de magistère en géosciences et environnement, université de Ouargla, 84p.
- MARGAT J. (1990)** : Les gisements d'eau souterraine. La Recherche, 596 p.
- MOULLA A.S et al (2002)** : Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eaux souterraines transfrontalières en Algérie. Atelier international sur la gestion partagée des ressources des systèmes aquifères en Afrique. PHI, UNESCO, Tripoli, Libye, 02-04 juin 2002.

**NESSON C. (1978)** : L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In : Recherche sur l'Algérie, (ed. CNRS), pp 7-100, Paris.

**NEZLI I. (2004)** : Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse Vallée de l'Oued Mya (Ouargla). Mémoire de Magister. Université Badji Mokhtar. Annaba. 152p.

**NEZLI I. et al (2007)** : Approche hydrogéochimique à l'étude de la fluoration des eaux de la nappe du Complexe Terminal de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla). Courrier du Savoir Scientifique et Technique. Mars 2009, N°09.

**NEZLI I. (2009)** : Approche hydrogéochimique à l'étude des aquifères de la basse vallée de l'Oued M'ya (Ouargla). Thèse de doctorat en sciences hydrauliques, université de Biskra, 117p.

**NEZLI I. et al (2009)** : Presence and Origin of Fluoride in the Complex Terminal Water of Ouargla Basin (Northern Sahara of Algeria), American Journal of Applied Sciences (2009).

**OMS (2006)** : Organisation Mondiale de la Santé. Directives de qualité de l'eau de boisson. Critères d'hygiène et documentation à l'appui, Genève, 2<sup>e</sup> ed. Volume 2, pp 272-279.

**ONM (2010)** : Bulletin climatologique de la station de Ouargla. Service archives. Ouargla, Algérie.

**OSS (2002)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional : De la concertation à la gestion commune d'un bassin aquifère transfrontière. Projet SASS. Rapport interne. Tunis, Tunisie, 58p.

**OSS (2003 a et b)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional, Rapport interne. Annexes. Tunis, Tunisie, 229p.

**OULD BABA SY M. (2005)** : Recharge et paléorecharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse de Doctorat, Université de Tunis El Manar, 261p.

**RODIER J. (2009)** : L'analyse de l'eau, 9<sup>ème</sup> édition, DUNOD, France, 1526p.

**SCHOELLER H. (1959)** : Hydrogéologie des régions arides, progrès récents. Etude UNESCO. Paris (1959). 126p.

**SCHOELLER H. (1963)** : Recherche sur l'acquisition de la composition chimique des eaux souterraines. Thèse Doctorat Es-Sciences, Lyon.

**SONATRACH et SCHLUMBERGER (1990)** : Géologie de l'Algérie. Centre de Recherche et Développement et Division Petroleum Engineering et Développement, 93p.

**SONATRACH (2009)** : Direction régionale de Haoud Berkaoui, Service surveillance géologiques, rapports internes de fin de forages.

**TABOUCHE N. et al (2004)** : Etude de la qualité des eaux souterraines de la région orientale du Sahara septentrional algérien, Larhyss Journal (2004).

**UNESCO (1972)** : Projet ERESS; Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional, et rapport sur les résultats du Projet REG-100, UNESCO, Paris (1972).

**VALLES V. & BOURGEAT F. (1988a)** : Geochemical determination of the gypsum requirement of cultivated sodic soils, I. Developpement of the thermodynamic model GYPSOL simultaning the irrigation water-soil chemical interactions. Arid Soil Research and Reabilitation (1988).

**VALLES V. & DE COCKBORNE A. M (1992)** : Elaboration d'un logiciel de géochimie appliquée à l'étude de la qualité des eaux. Colloque : Altération et restauration de la qualité des eaux continentales. Port Leucate (France).

**WEC (2007)** : La géologie pétrolière de l'Algérie. In Sonatrach – Schlumberger Well Evaluation Conference - Algérie 2007, p. 1.6 – 1.8, Édité par Schlumberger, 2007.

**ZOUGGARI H. (1996)** : Modélisation des interactions ioniques dans les solutions concentrées d'électrolytes à partir de l'étude expérimentale de la solubilité des sulfates de sodium et de magnésium. Application aux saumures et aux sols salés en zones arides. Thèse de doctorat, ENSA Rennes, 189p.