

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Hydrocarbures, des Energies renouvelables et des Sciences de la
Terre et des l'Univers
Département des sciences de la Terre et de l'Univers



Mémoire
D'INGENIEUR D'ETAT

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers
Filière : Géologie
Spécialité : Géologie de l'ingénieur

Présenté par : GHETTAS Saci
ZEMALA Abdelhamid

Thème :

EVOLUTION GEOCHIMIQUE DES EAUX DE LA NAPPE DES SABLES DU
MIO-PLIOCENE DANS L'OUED RHIR (DJAMAA, MEGHAIER, STILL ET
OUM THIOUR)

Soutenu publiquement

Le 11/06/2014

Devant le jury :

Mr. BELEKSEIR Mohamed Salah	MA(A)	Président	UKM Ouargla
Mr. HOUARI Idir Menad	MA(B)	Encadreur	UKM Ouargla
Mr. BOUSSALSSAL Boualem	MA(A)	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2013/2014

Remerciements

Nous tenons 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 notre devoir de remercier vivement et chaleureusement tous ceux qui ont contribué à la réalisation de ce modeste mémoire.

Notre plus profonde gratitude va à Monsieur **HOUARI Idir Menad** qui a accepté la prise en charge de notre encadrement. Nous tenons à le remercier vivement pour sa présence, sa compréhension, son aide et ces précieux conseils. Nous remercions également **Mr BELEKSEIR M.S**, qui nous a fait l'honneur de présider le jury. **Mr BOUSSALSSAL B**, qui a bien voulu examiner ce mémoire. Qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Nous tenons également à remercier tous les enseignants qui nous ont accompagnés durant tout notre cursus universitaire.

Table des matières

Introduction générale..... 1

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	Précipitation.....	4
I.3.3	Evaporation.....	5
I.4	Réseau hydrographique.....	6
I.4.1	Oued M'ya.....	6
I.4.2	Oued Rhir.....	7
I.4.3	Les oueds de la dorsale du M'zab.....	7
I.5	Conclusion.....	8

Chapitre II : Contexte géologique

II.1	Introduction.....	9
II.2	Cadre géologique de la région.....	9
II.2.1	Structure géologique du bassin oriental.....	9
II.2.2	Lithostratigraphie.....	11
II.3	Tectonique régionale.....	13
II.4	Paléogéographie.....	14
II.5	Conclusion.....	15

Chapitre III : Contexte hydrogéologique

III.1	Introduction.....	16
III.2	Le Complexe Terminal (CT).....	17
III.2.1	Géométrie du CT.....	18
III.2.2	Piézométrie du CT.....	19
III.2.3	Recharge et conditions de recharge du CT.....	20
III.3	Conclusion.....	21

Chapitre IV : Matériels et méthodes

IV.1	Introduction.....	22
IV.2	Prélèvement des échantillons.....	22
IV.2.2	Mesures In Situ.....	24
IV.2.2.1	Le pH et T°.....	24
IV.2.2.2	La conductivité électrique (CE).....	24
IV.2.3	Analyses au laboratoire.....	24
IV.2.3.1	Par spectrophotométrie.....	24
IV.2.3.2	Par photométrie de flamme.....	24
IV.2.3.3	Par titrimétrie.....	24
IV.2.2.2.4	Par complexométrie.....	25
IV.3	Outil informatique.....	25
IV.3.1	Statistica 6.1.....	25
IV.3.2	Diagramme 5.1.....	25
IV.3.3	Surfer 10.....	25
IV.4	Conclusion.....	26

Chapitre VI : Résultats et discussion

V.1	Introduction.....	27
V.2	Présentation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux.....	27
V.2.1	Le potentiel hydrogène (pH).....	27
V.2.2	La température (°C).....	28
V.2.3	La conductivité électrique CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).....	28
V.2.4	Les sulfates SO_4^{2-} (mg/l).....	28
V.2.5	Les chlorures Cl^- (mg/l).....	29
V.2.6	Les bicarbonates HCO_3^- (mg/l).....	29
V.2.7	Les nitrates NO_3^- (mg/l).....	30
V.2.8	Les nitrites NO_2^- (mg/l).....	30
V.2.9	Le calcium Ca^{2+} (mg/l).....	30
V.2.10	Le magnésium Mg^{2+} (mg/l).....	31
V.2.11	Le sodium Na^+ (mg/l).....	31
V.2.12	Le potassium K^+ (mg/l).....	31
V.2.13	Le fer total Fe (mg/l).....	32
V.3	Caractéristiques hydrochimiques des eaux de la région.....	32
V.3.1	Les paramètres physiques (CE, pH et T°).....	32
V.3.2	Les anions majeurs.....	34
V.3.3	Les cations majeurs.....	34
V.3.4	Les ions mineurs.....	35
V.4	Faciès chimiques des eaux.....	36
V.5	Origine des éléments chimiques.....	41
V.5.1	Origine des chlorures et du sodium.....	41
V.5.2	Origine des sulfates, du magnésium et du calcium.....	41
V.5.3	Origine du potassium et des bicarbonates.....	44
V.6	Conclusion.....	45
Conclusion et recommandations.....		46

Liste des figures et des photos

Chapitre I: Cadre physique

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

Chapitre II : Contexte géologique

Figure II.1	Les grandes unités géologiques au Sahara.....	10
Figure II.2	Coupe géo structurale transversale régionale	11
Figure II.3	Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est septentrional algérien.....	12
Figure II.4	Coupe géologique de la région d'El Oued.....	13

Chapitre III : Contexte hydrogéologique

Figure III.1	Délimitation du "SASS"	16
Figure III.2	Coupe hydrogéologique de SASS.....	17
Figure III.3	Coupe hydrogéologique transversale du CT	18
Figure III.4	Carte des épaisseurs de CT	19
Figure III.5	Carte de profondeur du toit du CT.....	19
Figure III.6	Carte piézométrique de référence du "CT"	20

Chapitre IV : Matériels et méthodes

Figure IV.1	Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau.....	23
-------------	--	----

Chapitre V : Résultats et discussion

Figure V.1	Carte de conductivité électrique des eaux de la zone d'étude.....	33
Figure V.2	Evolution des anions majeurs.....	34
Figure V.3	Evolution des cations majeurs.....	35
Figure V.4	Evolution des ions mineurs.....	36
Figure V.5	Faciès chimiques des eaux du Mio-Pliocène du l'Oued Rhir Nord.....	37
Figure V.6	La relation Na/Ca vs SO ₄ / Cl.....	38
Figure V.7	La relation Na/Mg vs SO ₄ / Cl.....	39
Figure V.8	La relation Mg/Ca vs SO ₄ / Cl.....	39
Figure V.9	La relation Ca vs SO ₄	40
Figure V.10	La relation Cl vs Na.....	40
Figure V.11	La relation Na vs Cl.....	41
Figure V.12	La relation Ca/HCO ₃ vs Na/Cl.....	42
Figure V.13	La relation Ca/SO ₄ vs Na/Cl.....	43
Figure V.14	La relation Mg/HCO ₃ vs Na/Cl.....	44
Figure V.15	La relation Mg/SO ₄ vs Na/Cl.....	44

Liste des tableaux

Chapitre I: Cadre physique

Tableau I.1	Températures moyennes mensuelles (°C) dans la région de Souf, période 1997 – 2009.....	4
Tableau I.2	Précipitations moyennes mensuelles (mm) dans la région de Souf, période 1997– 2009.....	4
Tableau I.3	Evaporation moyenne mensuelle (mm) dans la région de Souf, période 1997 – 2009.....	5

Chapitre V : Résultats et discussion

Tableau V.1	Variations du pH selon les régions.....	27
Tableau V.2	Variations de la température	28
Tableau V.3	Variations des conductivités électriques	28
Tableau V.4	Variations des concentrations des sulfates	29
Tableau V.5	Variations des concentrations des chlorures	29
Tableau V.6	Variations des concentrations des bicarbonates.....	29
Tableau V.7	Variations des concentrations des nitrates	30
Tableau V.8	Variations des concentrations des nitrites	30
Tableau V.9	Variations des concentrations du calcium	31
Tableau V.10	Variations des concentrations du magnésium	31
Tableau V.11	Variations des concentrations du sodium	31
Tableau V.12	Variations des concentrations du potassium	32
Tableau V.13	Variations des concentrations du fer	32

Liste des abréviations

ANRH	Agence Nationale des Ressources Hydriques
CI	Continental Intercalaire
CT	Complexe Terminal
EDTA	Ethylène diamine tétracétique acide
ERESS	Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional
MP	Mio-Pliocène
NPK	Azote, Phosphore, Potassium
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONM	Office National de Météorologie
OSS	Observation du Sahara et du Sahel
SASS	Système Aquifère du Sahara Septentrional
WEC	Well Evaluation Conference

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) est un bassin transfrontalier partagé par l'Algérie, la Libye et la Tunisie. Il renferme des réserves d'eau considérables qui constituent un potentiel essentiel pour le développement économique et social. Cependant, ces ressources sont peu renouvelables et leurs possibilités d'exploitation se trouvent limitées par des facteurs naturels et anthropiques : région aride inaccessible, importantes profondeurs des nappes, surexploitation de la ressource depuis les années 80, grande vulnérabilité environnementale due à la dégradation des terres.

La région d'Oued Righ fait partie d'un des plus grands déserts du monde, elle recèle d'énormes réserves d'eaux souterraines. Ces eaux se trouvent sous forme de nappes aquifères contenant dans des horizons géologiques de différentes profondeurs et épaisseurs. Dans le grand Sahara algérien, deux célèbres réservoirs rencontrés; de bas en haut nous avons, le Continental Intercalaire dit (CI) et le Complexe Terminal dit (CT). Ces deux systèmes aquifères renferment plusieurs nappes d'eaux superposées l'une sur l'autre.

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).

Notre contribution a pour objectif de se focaliser sur l'évolution des eaux de la nappe miocène de la basse vallée de l'Oued Righ, et pour atteindre l'objectif de l'étude, nous avons développés les chapitres suivants :

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, (méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux, outil informatique...etc).

Chapitre V : Résultats et discussion

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 et climatiques de la région.

Chapitre I:

Cadre physique

I.1- Introduction

Dans ce premier chapitre, on va présenter géographiquement notre zone d'étude, puis donner quelques informations sur ses différentes composantes climatiques.

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

Le Sahara Est septentrional algérien (Bas Sahara) d'où appartient notre zone d'études, se situe dans le Sud-Est de l'Algérie, 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.

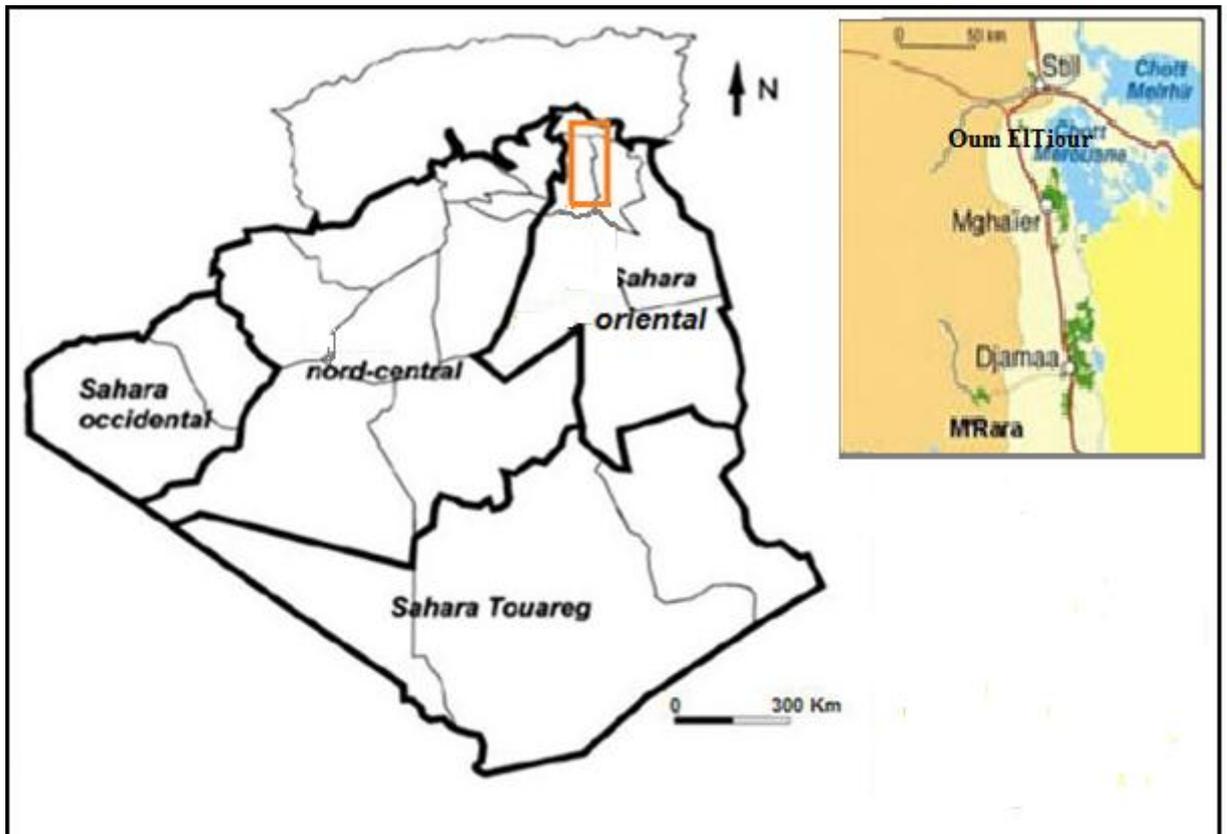


Figure. I.1 : Localisation de la zone d'étude

I.3- Synthèse climatique sur la région

La vallée de l'Oued Righ, qui est caractérisé par un climat typiquement saharien et se caractérise par des précipitations très faibles, une température élevée et une humidité relativement faible, D'après les données des plusieurs années (11 ans) d'observations météorologiques aux stations ONM (Office National de Métrologie) .

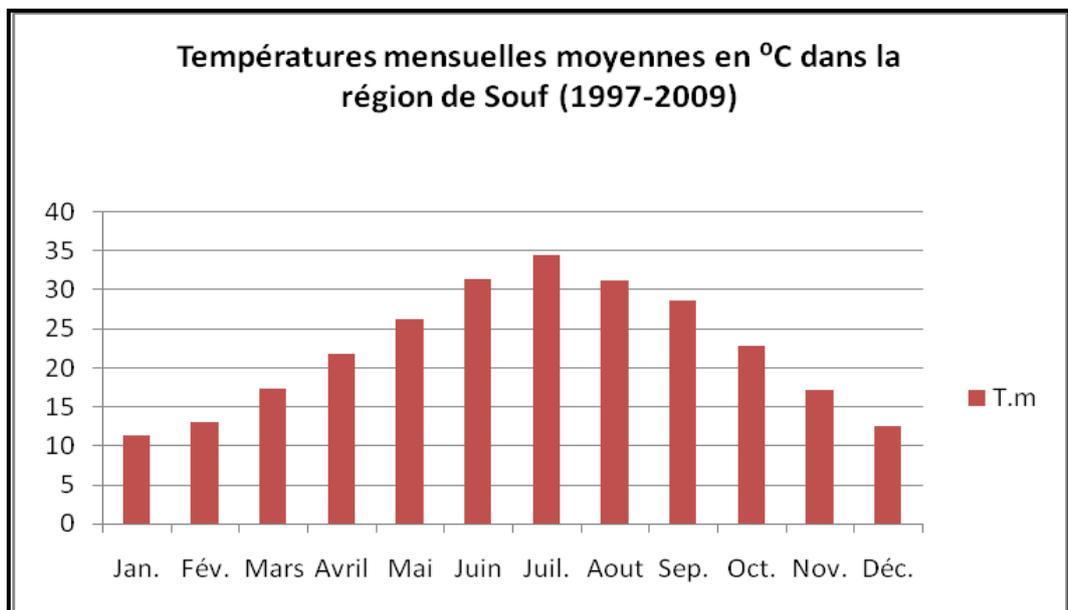
I.3.1- Température

La température joue un rôle primordial sur le climat, dans notre zone d'étude, de type désertique, elle a plus d'ampleur et influe grandement sur les autres paramètres météorologique, tels que l'évaporation et le taux d'humidité de l'atmosphère. environ 34°C à et celle du mois le plus froid (Janvier) est à environ 11 °C dans la région.

Tableau I.1: 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.2 : Température mensuelle moyenne dans station Ouad Righ la région de Souf (1997-2009)



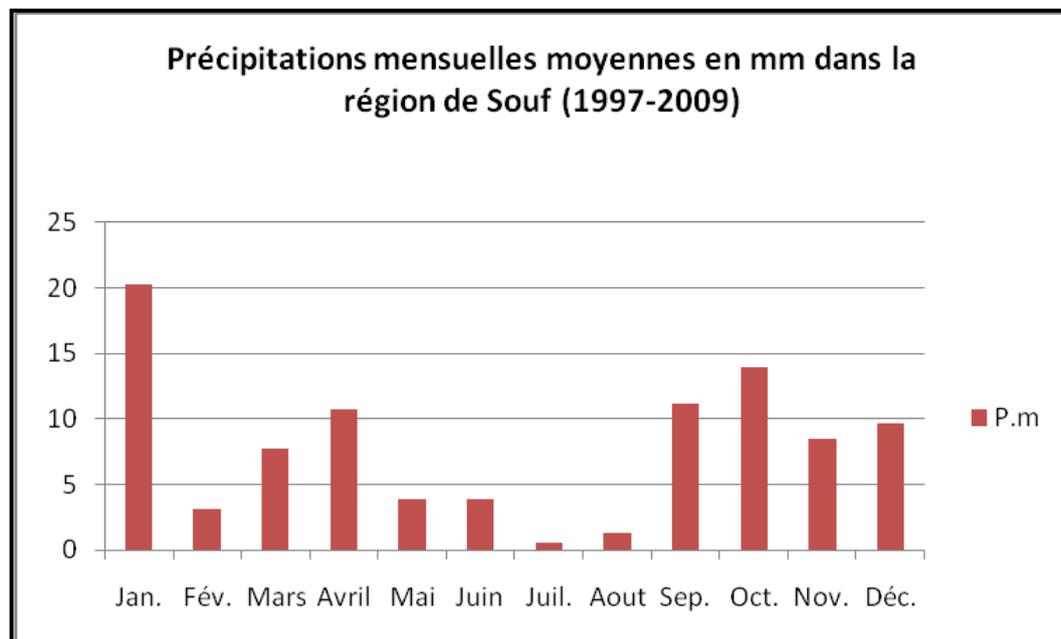
I.3.2- Précipitation

La vallée de l'oued Righ subit l'influence d'un gradient pluviométrique décroissant du nord vers le sud 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.2 : 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.3 : Précipitations mensuelles moyennes dans station Ouad Righ la région de Souf (1997-2009)



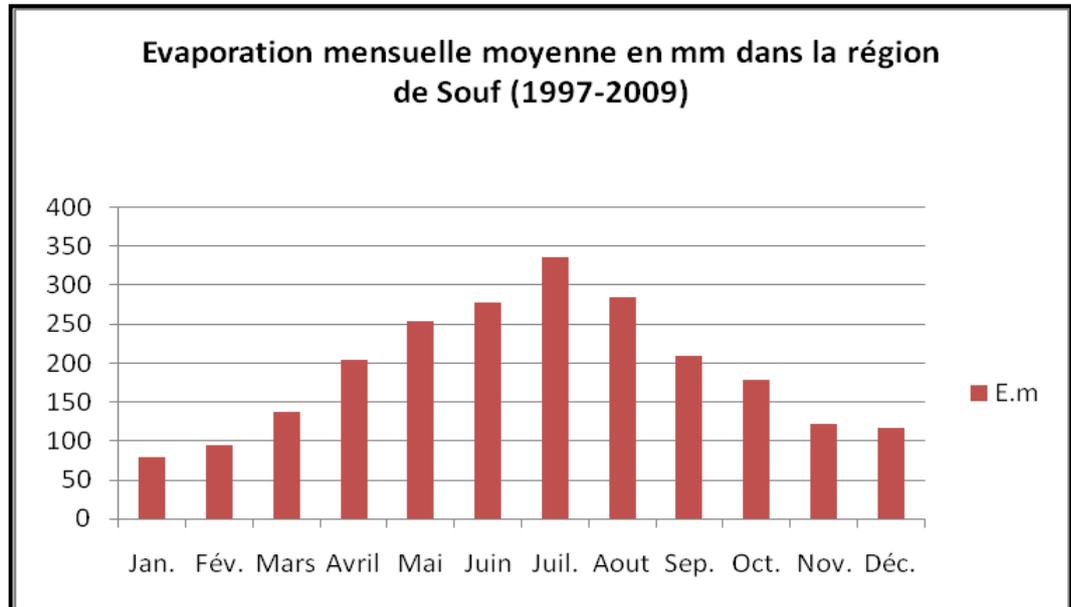
I.3.3- Evaporation

L'évaporation est très élevée et très variable suivant les années, les mois et aussi les semaines. 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.

Tableau I.3 : 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.4 : Evaporation mensuelle moyenne dans station Ouad Righ 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).

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.5) 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.6), 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.

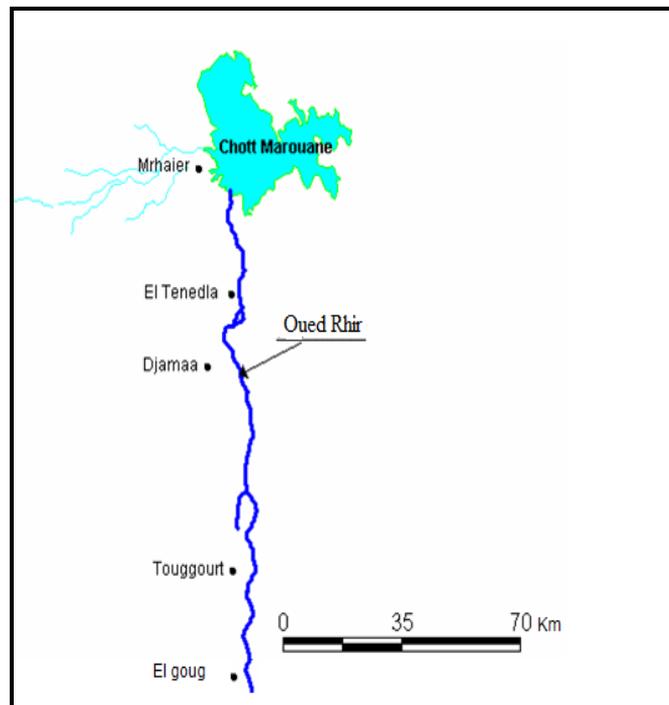


Figure I.5: Vallée de l'oued Rhir

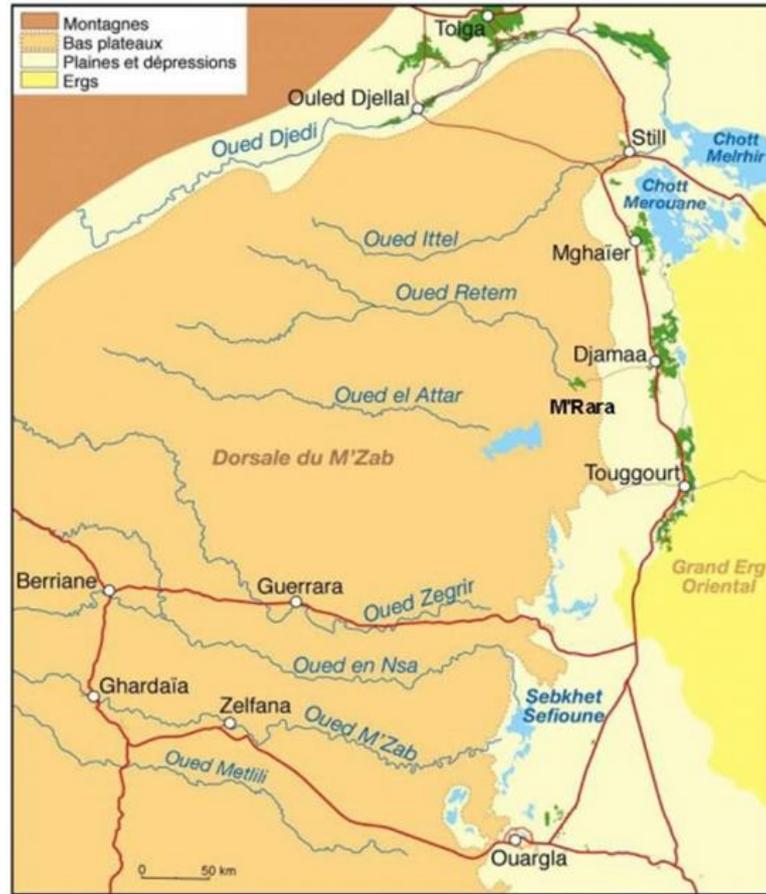


Figure I.6: Réseau hydrographique dans la région d'étude (Ballais, 2010)

I.5- 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.

Chapitre II:

Contexte géologique

II.1- Introduction

Le rôle de la géologie est primordial en hydrogéologie, il permet la description lithologique et stratigraphique des formations et d'identifier celles susceptibles d'être aquifères. Dans ce chapitre, nous aborderons les aspects géologiques à l'échelle générale de la forme saharienne.

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 Tadmait 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. (Houari, 2012).

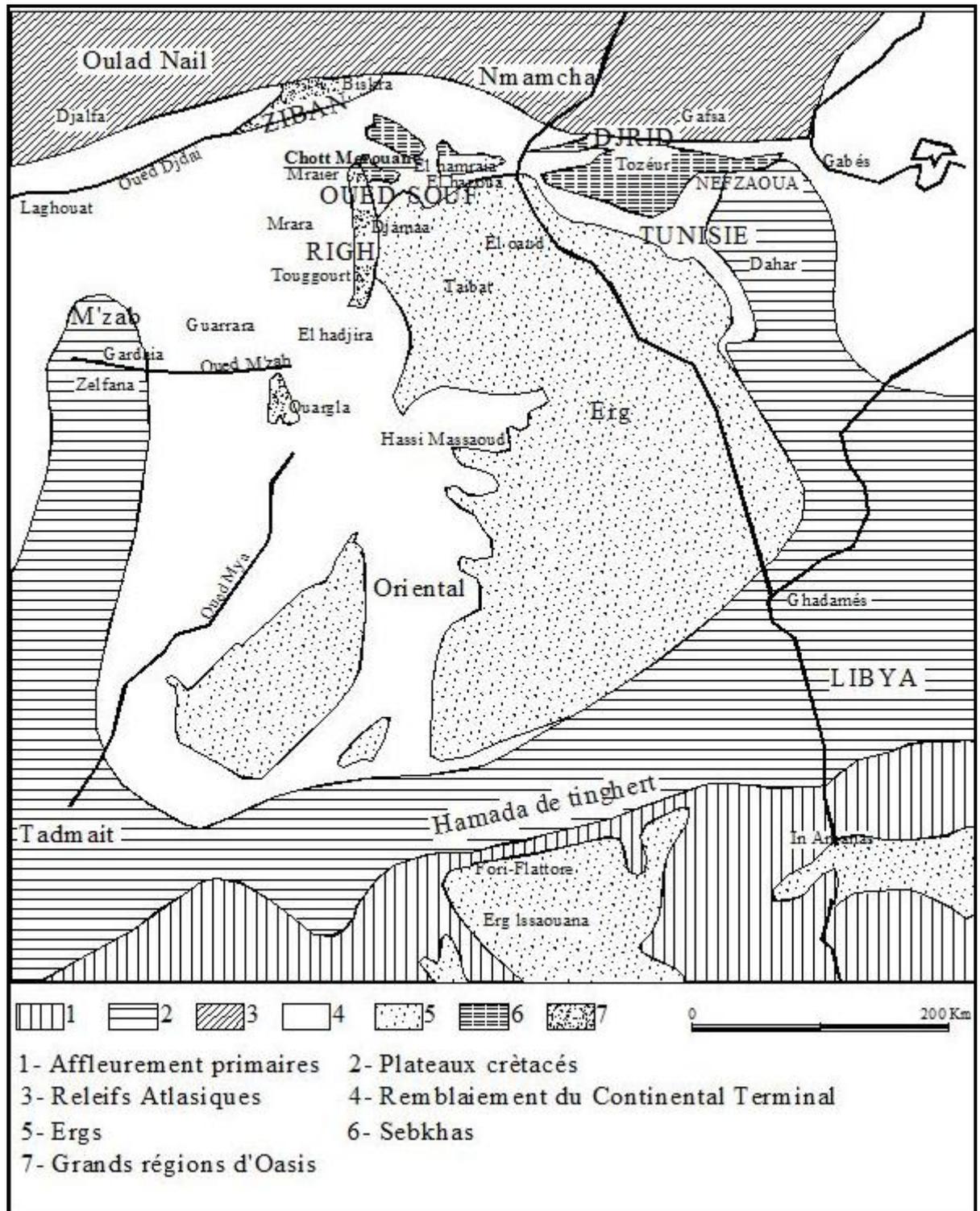


Figure II.1 : Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978)

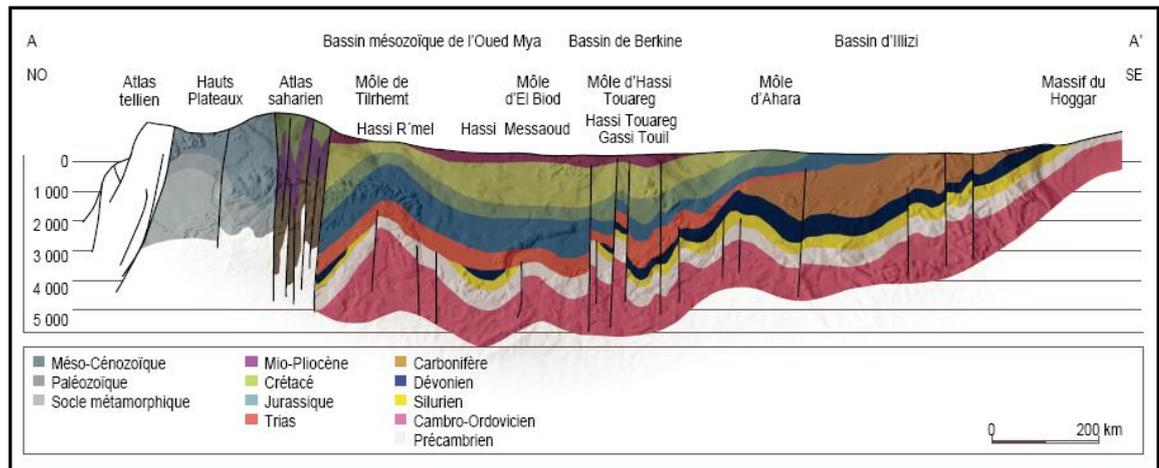


Figure. II.2 : Coupe géo structurale transversale régionale (WEC, 2007)

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).

L'Albien

Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sus-jacent attribué au Cénomaniens. 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 (sommets du Continental Intercalaire) et le Cénomaniens argilo-carbonaté (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 Cénomaniens.

Le Cénomaniens

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

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.

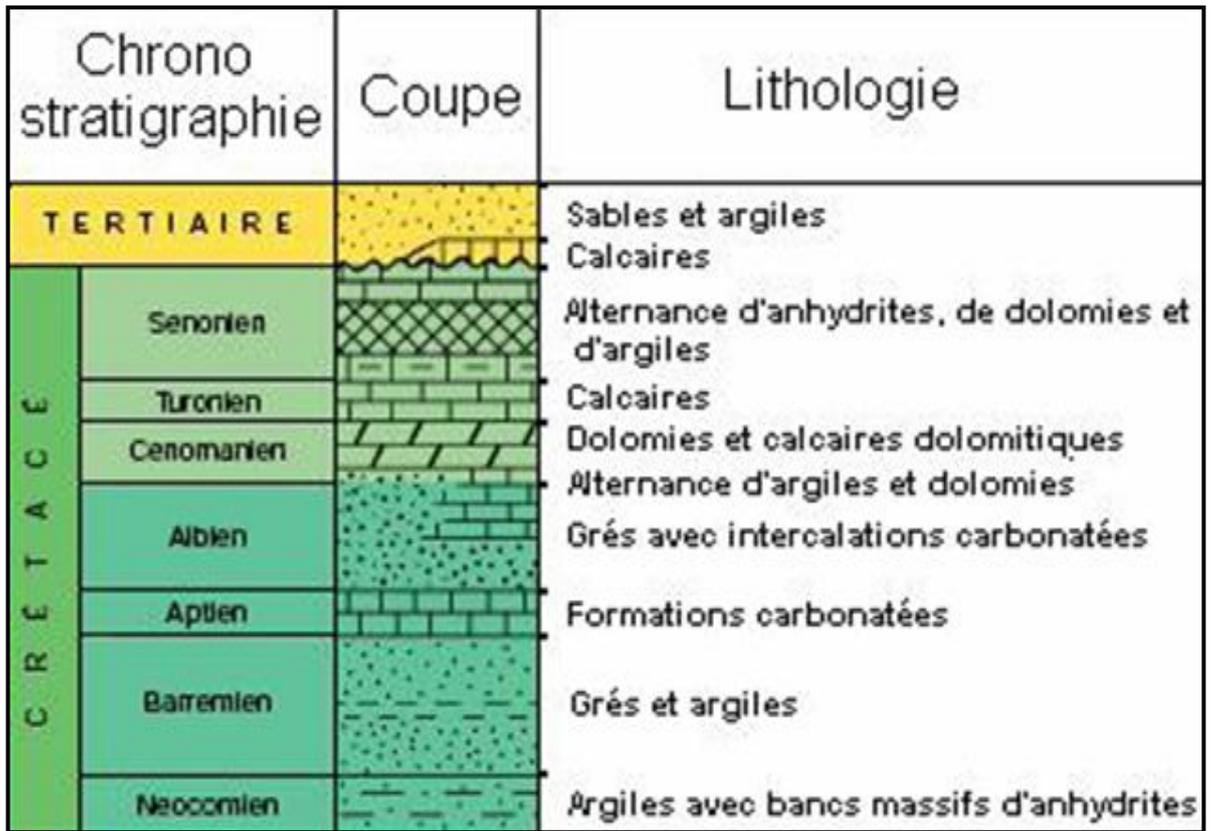


Figure. II.3: Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est septentrional algérien (Sonatrach et Schlumberger, 1990)

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 Cuche, 1969).

Le Mio-Plio-Quaternaire

Le Tertiaire continental du Sahara peut être varié entre (150 et 400 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).

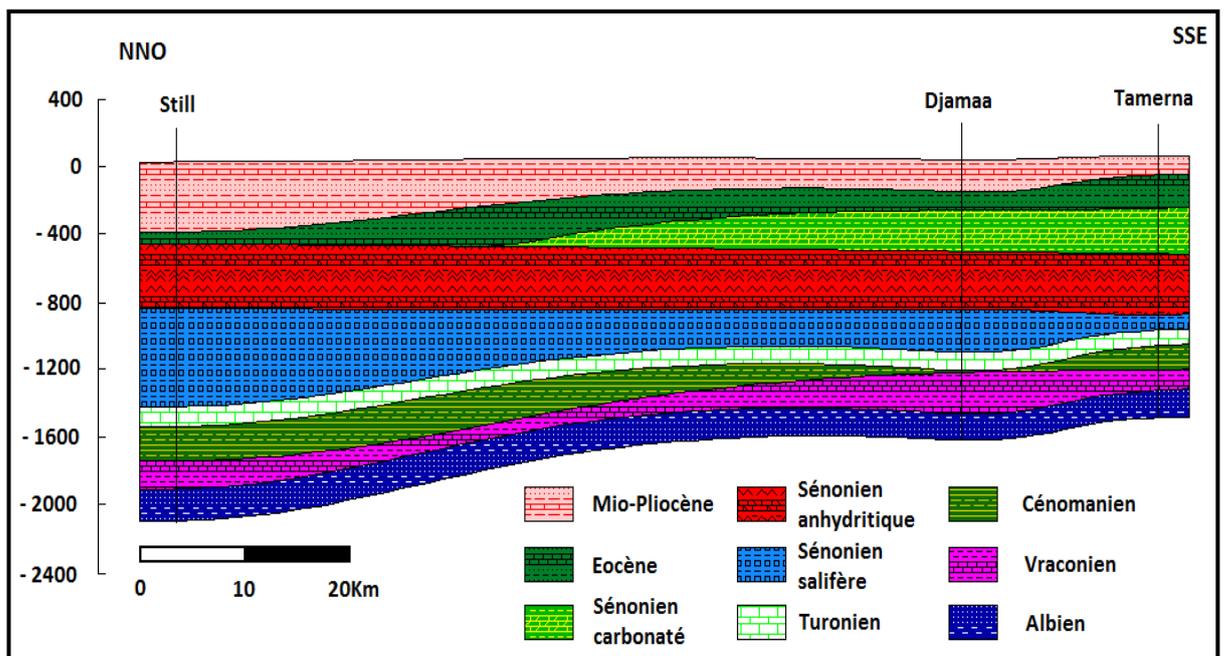


Figure II.4 : Coupe géologique de la région d'El Oued (Houari, 2012)

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 Aurésien », 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. (Houari, 2012).

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 fluviatile. 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.

Chapitre III:

Contexte
hydrogéologique

III.1- Introduction:

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) 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 km² dont 70 % se trouve en Algérie, 24 % en Lybie et 6 % en Tunisie (Fig. III.1), sa réserve est estimée à 31.000×10⁹ m³ (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 Km², et est d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètres environ (Cornet, 1964).

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).

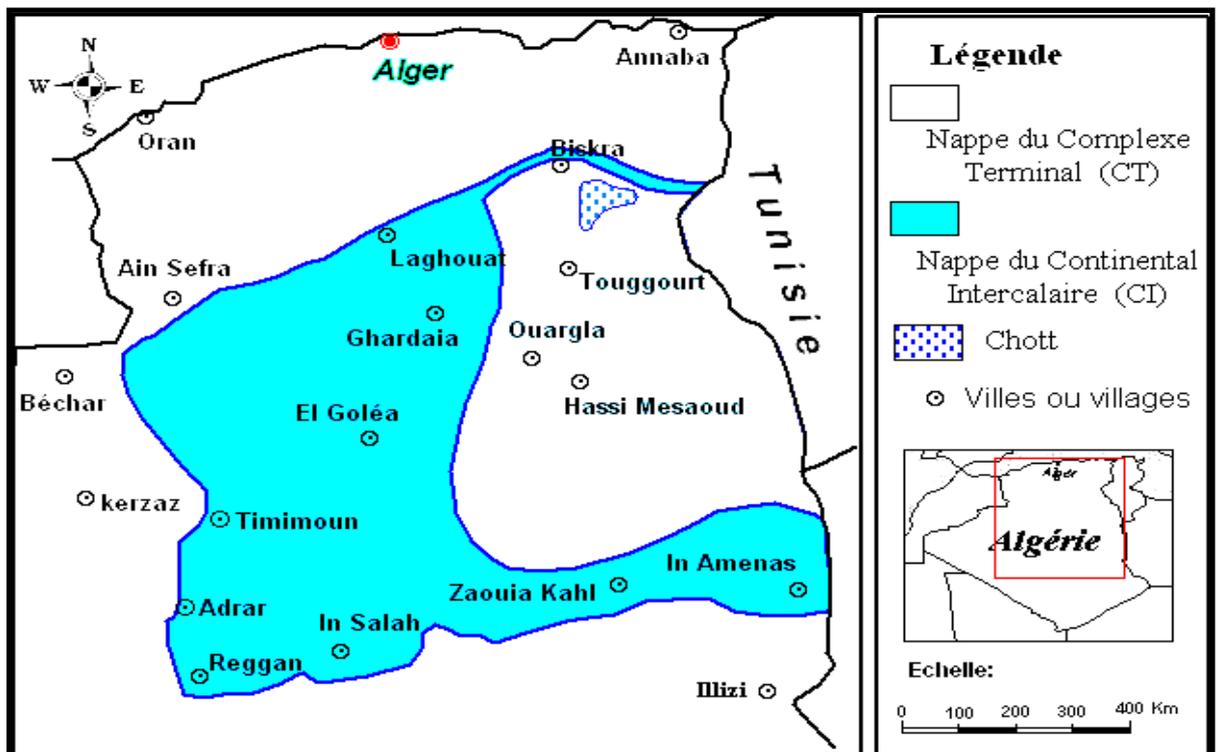


Figure. III.1 : Délimitation du "SASS" en Algérie (OSS, 2003)

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, 1970), (Fabre, 1976).

Et comme notre étude s'intéresse beaucoup plus à la nappe du Complexe Terminal, on ne va pas discuter sur le Continental Intercalaire dans ce chapitre.

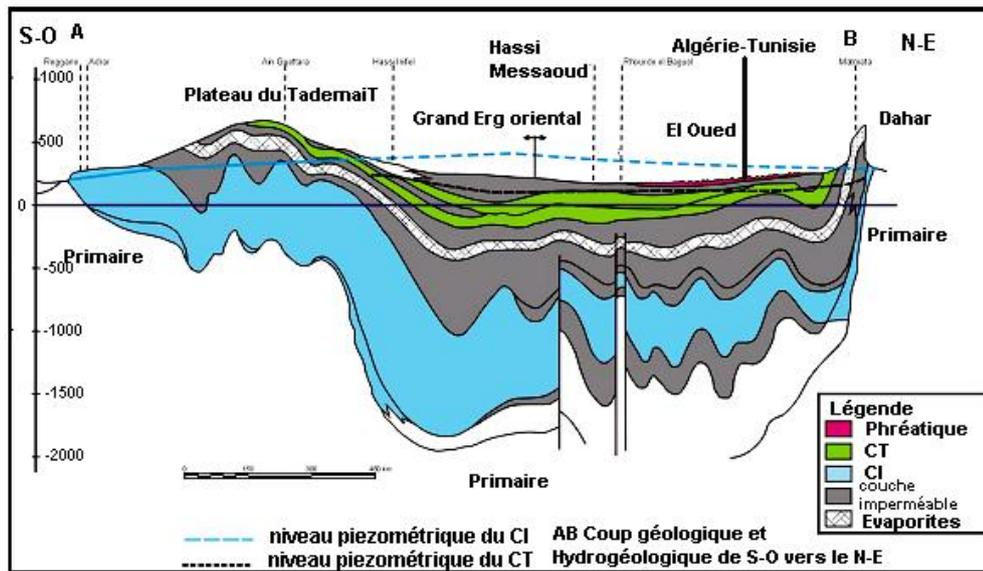


Figure III.2 : Coupe hydrogéologique de SASS (UNESCO, 1972)

III.2- Le Complexe Terminal (CT):

Le système aquifère du Complexe Terminal est moins étendu que le CI. Néanmoins, il couvre une grande partie du bassin oriental du Sahara septentrional, sur environ 350 000 km². Sa profondeur oscille entre 100 et plus de 500m et son épaisseur, en moyenne de 220 m. Sont désignées sous le nom de Complexe Terminal (CT) les formations les plus récentes, déposées au bas Sahara. Il se compose de deux ensembles aquifères principaux, d'âge et de lithologie différents, séparés par des formations semi-perméables ou imperméables. Ce sont:

- Au sommet, le Continental Terminal, constitué par les sables du Mio-Pliocène, couvrant en discordance, pratiquement la totalité de l'Erg oriental depuis la dorsale du M'zab à l'Ouest jusqu'au Dahar tunisien à l'Est. L'épaisseur de l'aquifère des sables du Mio-Pliocène est de 50 à 100 m en moyenne. Elle est minimale dans la région de Hassi-Messaoud (30 m) et augmente vers le Sud (400 m), et le Nord où elle peut atteindre 600 m.
- Les formations carbonatées du Sénonien supérieur, s'étendent sur l'ensemble du bassin oriental. L'Eocène inférieur ne couvre que la zone située au Nord d'une ligne Djemaa-Tozeur.

- Les calcaires et les dolomies du Turonien sont reliés hydrauliquement aux formations carbonatées précédentes par l'aquifère des sables du Mio-Pliocène. L'épaisseur moyenne du réservoir carbonaté est de 100 à 200 m, augmentent vers le Nord où elle atteint 500 m sous le Chott Melghir et 600 m dans la fosse atlasique.
- Le substratum du complexe aquifère et d'une manière générale, constitué par la formation lagunaire du Sénonien. La couverture est formée par les argiles plus ou moins sableuses du sommet du Mio-Pliocène et les marnes et évaporites de l'Eocène moyen pour l'aquifère Eocène.
- La nappe est en charge au Nord et libre dans sa partie sud. Sa porosité dépend de la lithologie. Elle est estimée à 30% dans les sables du Mio-Pliocène et à 20% dans les calcaires du Sénonien et de l'Eocène supérieur.
- L'écoulement se fait du Sud vers le Nord. Il converge des zones d'alimentation vers les chotts Merouane et Melghir, ainsi que vers l'exutoire souterrain du golfe de Gabes.
- L'alimentation se fait sur les affleurements perméables, par infiltration des eaux de ruissellement apportées par les oueds qui descendent les reliefs de bordure. Un apport non négligeable se fait par l'impluvium propre du Grand Erg oriental. (mission V qualité des eaux final1, 2006).

III.2.1- Géométrie du CT:

Le système aquifère du "Complexe Terminal" couvre la majeure partie du bassin oriental du Sahara septentrional sur environ 350 000 km².

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.

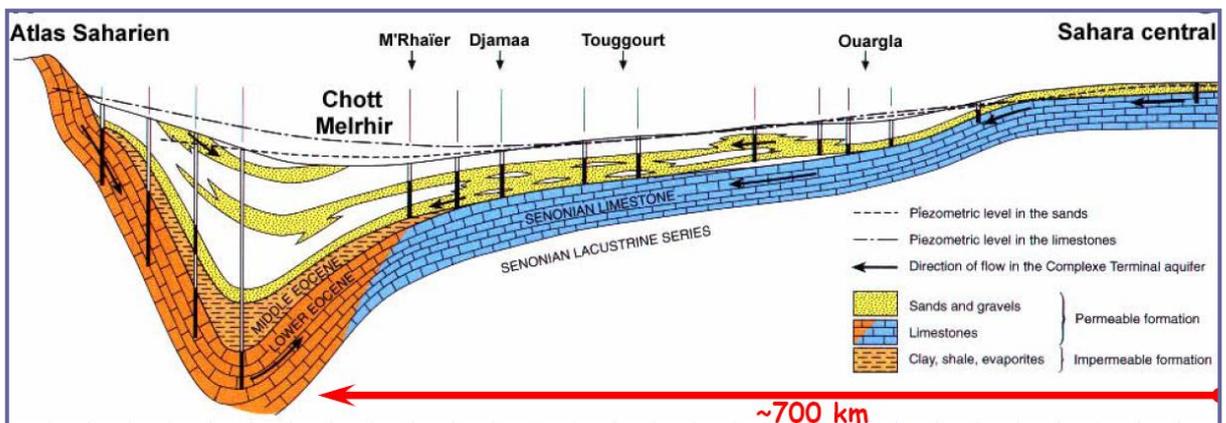


Figure. III.3 : Coupe hydrogéologique transversale du "CT" (UNESCO, 1972)

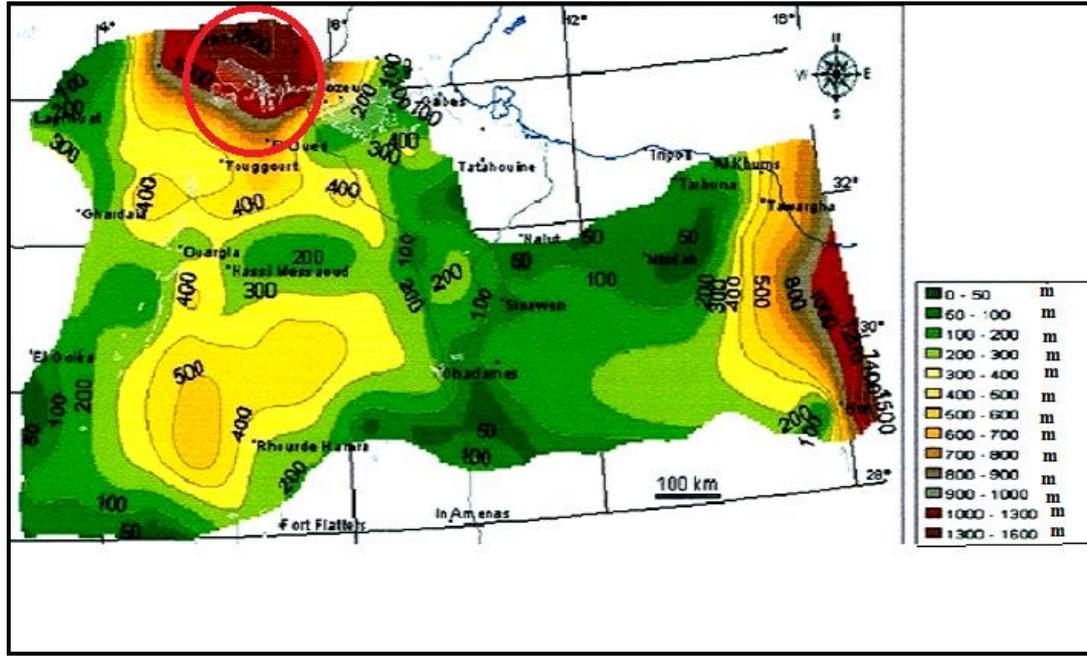


Figure.III.4: Carte des épaisseurs de CT (OSS, 2003)

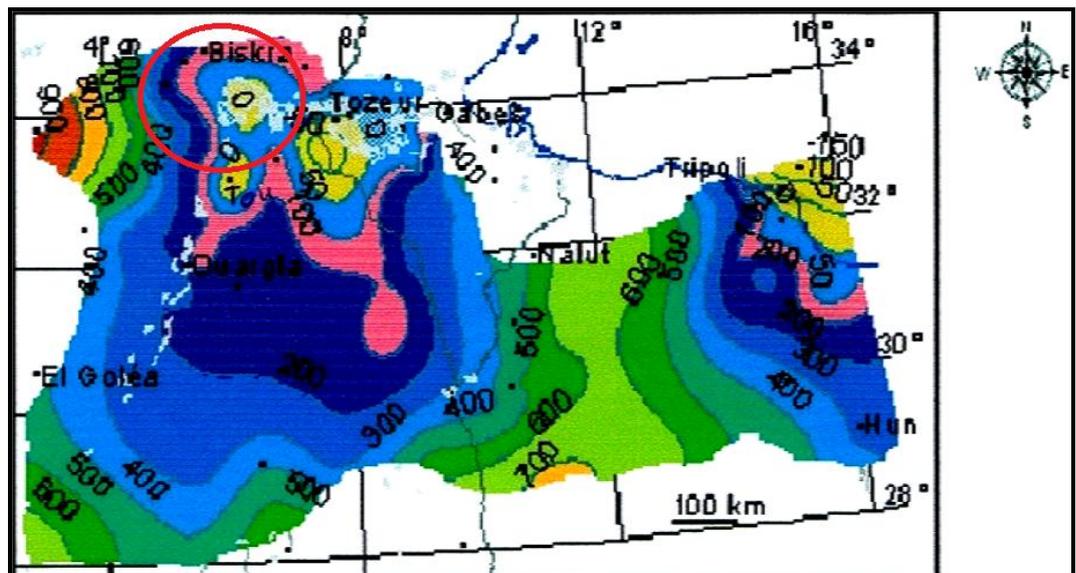


Figure.III.5 : Carte de profondeur du toit du CT (OSS, 2003)

III.2.2- Piézométrie du CT:

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 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:

- A partir de la dorsale de 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, se 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.

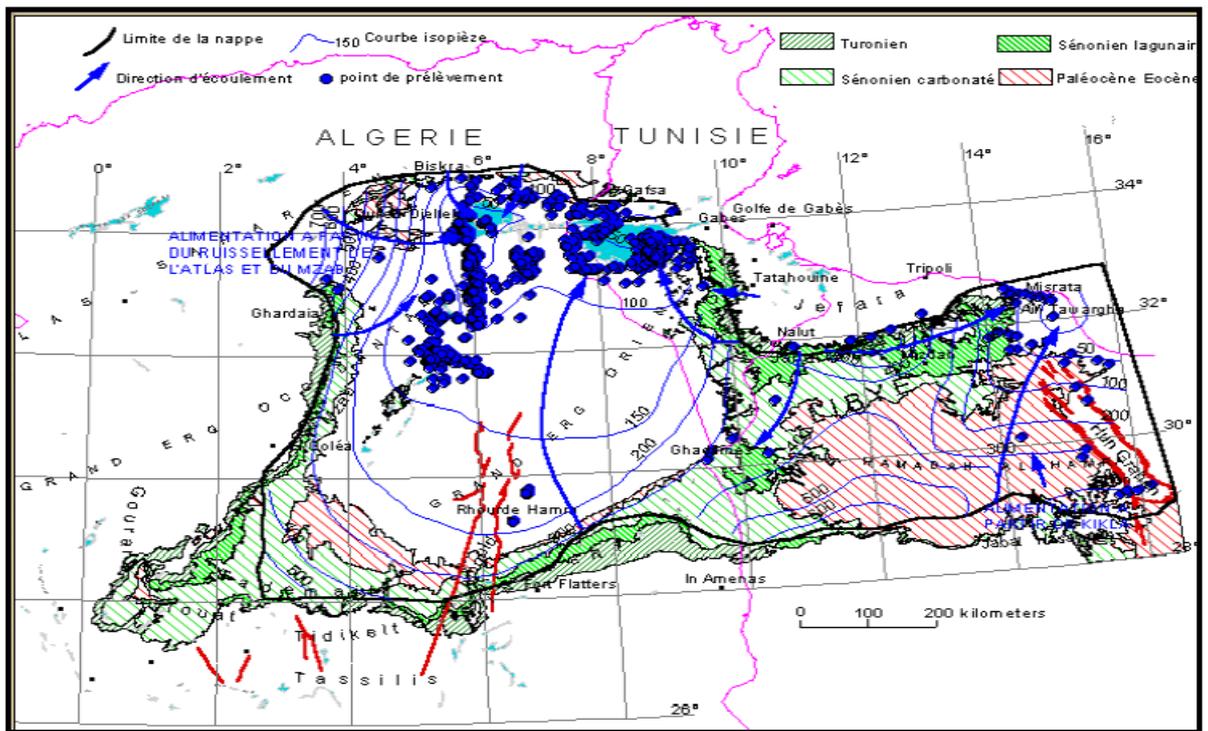


Figure. III.6: Carte piézométrique de référence du "CT" (OSS, 2003)

III.2.3- Recharge et conditions de recharge du CT:

Le concept de recharge ainsi 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), 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 (PIZZI et SARTOLI, 1984).

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 (GLENDON et HILLEL, 1988). L'alimentation des nappes du Sahara septentrional, par exemple, se manifeste sur les bordures Nord du bassin lorsque trois conditions sont présentes :

- 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).

III.3- 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 km² 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 exister 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 réalisation des analyses physicochimiques des eaux effectués sur les 11 échantillons 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- Prélèvement des échantillons

Onze (11) 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 cl. 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, 1996).

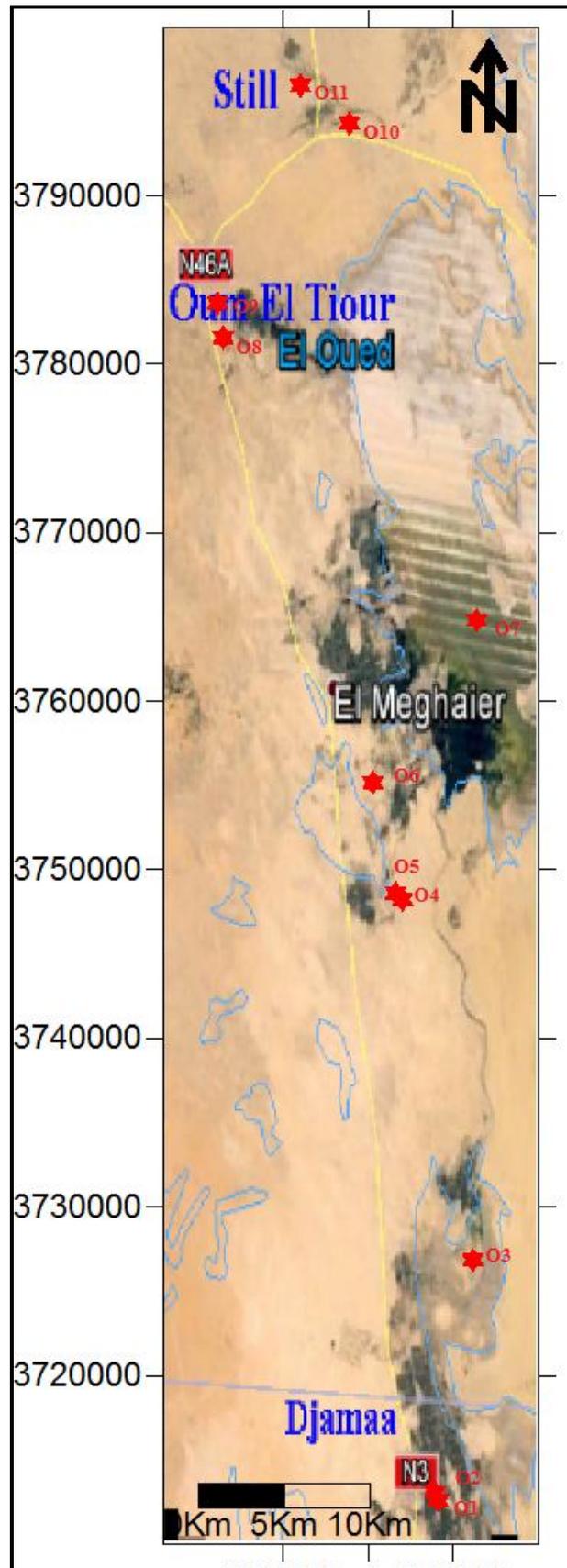


Figure IV.1 : Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau

IV.2.2- 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.2.2.1.- 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.2.2.2- 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.2.3- 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.2.3.1- 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 (SO_4^{2-})	450 nm	SulfaVer 4
Les nitrates (NO_3^-)	500 nm	NitraVer 5
Les nitrites (NO_2^-)	507 nm	NitriVer 3
Le fer total (Fe)	510 nm	FerroVer

IV.2.3.2- Par photométrie de flamme

Le sodium Na^+ , et le potassium 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.

IV.2.3.3- Par titrimétrie

Les Chlorures Cl^- , les bicarbonates HCO_3^- , ainsi que le calcium Ca^{2+} ont été dosés par titrimétrie (Rodier, 2009).

- Les chlorures Cl^- , selon la méthode de MOHR (Rodier, 2009), basée sur le titrage d'un volume d'eau avec une solution de nitrates d'argent AgNO_3 concentrée en présence de

l'indicateur Chromates de potassium (K_2CrO_4), jusqu'au virage de la coloration du jaune au rouge brique et le début du dépôt d'un précipité rouge.

- Les carbonates CO_3^{2-} et les bicarbonates HCO_3^- , par ajustement de pH à 4,4 par l'acide sulfurique (H_2SO_4) en maintenant la température de l'eau à analyser à 25°C. Il est à noter que CO_3^{2-} n'existe pas car le pH est toujours compris entre 4,4 à 8,3 dans tous les échantillons.
- Le calcium 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.2.3.4- 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 $TH (°F) = [Ca^{2+} (méq.l^{-1}) + Mg^{2+} (méq.l^{-1})] \times 5$, et par conséquent : $Mg^{2+} = TH - Ca^{2+}$.

IV.3- Outil informatique

IV.3.1- 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.3.2- 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.3.3- Surfer 10

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.4- Conclusion

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

Chapitre V:

Résultats et discussion

V.1- Introduction

On expose dans cette partie les résultats obtenus à partir des études antérieures effectuées sur la nappe du CT à l'échelle régionale.

Les eaux sont alcalines bicarbonatées ($\text{pH} < 7$), très dures, et affichent des minéralisations excessives, exprimées par des conductivités électriques oscillant entre 5000 et 8000 $\mu\text{S cm}^{-1}$, et allant jusqu'à 8300 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ 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 : Cl^- , SO_4^{2-} , Na^+ , Ca^{2+} , et Mg^{2+} , et acquièrent, par conséquent, un faciès anionique, exclusivement, chloruré et/ ou sulfaté. (Houari, 2012).

Une augmentation homologue des concentrations en Cl^- , Na^+ , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , et d'un degré moindre de Mg^+ et K^+ , les concentrations en bicarbonates HCO_3^- restent relativement constantes du fait de la saturation des eaux en minéraux carbonatés.

Des concentrations, relativement, élevées en nitrates (35 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.

V.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, (O1, O2, O3 ... etc.).

V.2.1- Le potentiel hydrogène (pH).

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

Tableau V.1 : Variations du pH.

Moyenne	7,36
Max	7,7
Min	7,0
Ecart-type	0,23

V.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 V.2) dépassent légèrement celles recommandées par l'OMS (22-25°C), et ne présentent pas de grandes variations, avec un écart type de 0,62 au niveau de la zone d'étude.

Tableau V.2 : Variations de la température.

Moyenne	24,33
Max	25,1
Min	23,4
Ecart-type	0,62

V.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 V.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, voir une moyenne de 6445,45 dans la zone d'étude.

Tableau V.3 : Variations des conductivités électriques.

Moyenne	6445,45
Max	8300,0
Min	5000,0
Ecart-type	1294,89

V.2.4- Les sulfates SO_4^{2-} (mg/l)

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



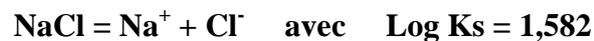
Les concentrations des sulfates observées (Tableau V.4) dépassent les normes (500 mg/l), elles atteignent des concentrations très fortes (3075 mg/l) et présentent une augmentation nette le long du sens d'écoulement des eaux de la nappe.

Tableau V.4 : Variations des concentrations des sulfates.

Moyenne	2407,95
Max	3075,0
Min	1862,5
Ecart-type	374,89

V.2.5- Les chlorures Cl⁻ (mg/l)

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution de la Halite (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 V.5).

Tableau V.5 : Variations des concentrations des chlorures.

Moyenne	1277,91
Max	2200,0
Min	625,0
Ecart-type	600,28

V.2.6- Les bicarbonates HCO₃⁻ (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 143,9 mg/l.

Tableau V.6 : Variations des concentrations des bicarbonates.

Moyenne	143,90
Max	155,6
Min	128,1
Ecart-type	8,61

V.2.7- Les nitrates 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 V.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 V.7 : Variations des concentrations des nitrates.

Moyenne	31,91
Max	57,0
Min	13,0
Ecart-type	14,91

V.2.8- Les nitrites NO_2^- (mg/l)

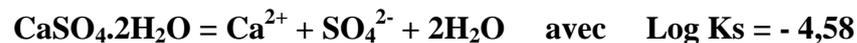
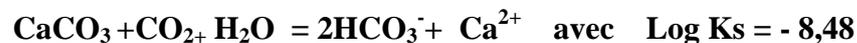
Les nitrites présentent la forme, la moins oxygénée et la moins stable de l'azote. Les concentrations observées (Tableau V.8) sont faibles et inférieures à la norme (0.2 mg/l) dans la plupart des échantillons, mais ça n'a pas empêché d'enregistrer des concentrations élevées.

Tableau V.8 : Variations des concentrations des nitrites.

Moyenne	0,012
Max	0,04
Min	0
Ecart-type	0,013

V.2.9- Le calcium Ca^{2+} (mg/l)

La présence des ions Ca^{2+} dans les eaux est liée principalement à la dissolution des lithologies carbonatées (CaCO_3) ainsi que les formations gypseuses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) selon les équations suivantes :



Les eaux (Tableau V.8) présentent des teneurs supérieures à 200 mg/l. voir des teneurs extrêmes (> 600 mg/l).

Tableau V.9 : Variations des concentrations du calcium

Moyenne	498,57
Max	585,2
Min	404,8
Ecart-type	69,84

V.2.10- Le magnésium Mg^{2+} (mg/l)

Cet élément provient de la dissolution des formations carbonatées.

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

Tableau V.10 : Variations des concentrations du magnésium

Moyenne	248,73
Max	381,4
Min	128
Ecart-type	78,32

V.2.11- Le sodium 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.

Tableau V.11 : Variations des concentrations du sodium

Moyenne	941,82
Max	1440,0
Min	460,0
Ecart-type	292,88

V.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 V.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 V.12 : Variations des concentrations du potassium

Moyenne	39,52
Max	59,0
Min	26,5
Ecart-type	9,02

V.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 V.13), dépassent selon les cas, les normes (0.3 mg/l) de l'OMS.

Tableau V.13 : Variations des concentrations du fer

Moyenne	0,35
Max	1,2
Min	0
Ecart-type	0,34

V.3- Caractéristiques hydrochimiques des eaux de la région

V.3.1- 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 V.1), des valeurs extrêmes ont été enregistrées au niveau de forages O3 (8300 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), vers l'exutoire, une chute des valeurs de conductivité a été enregistrée, ce phénomène peut être expliqué par la dilution de ces eaux par ceux de précipitations provenant des versants Sud de l'atlas saharien.

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

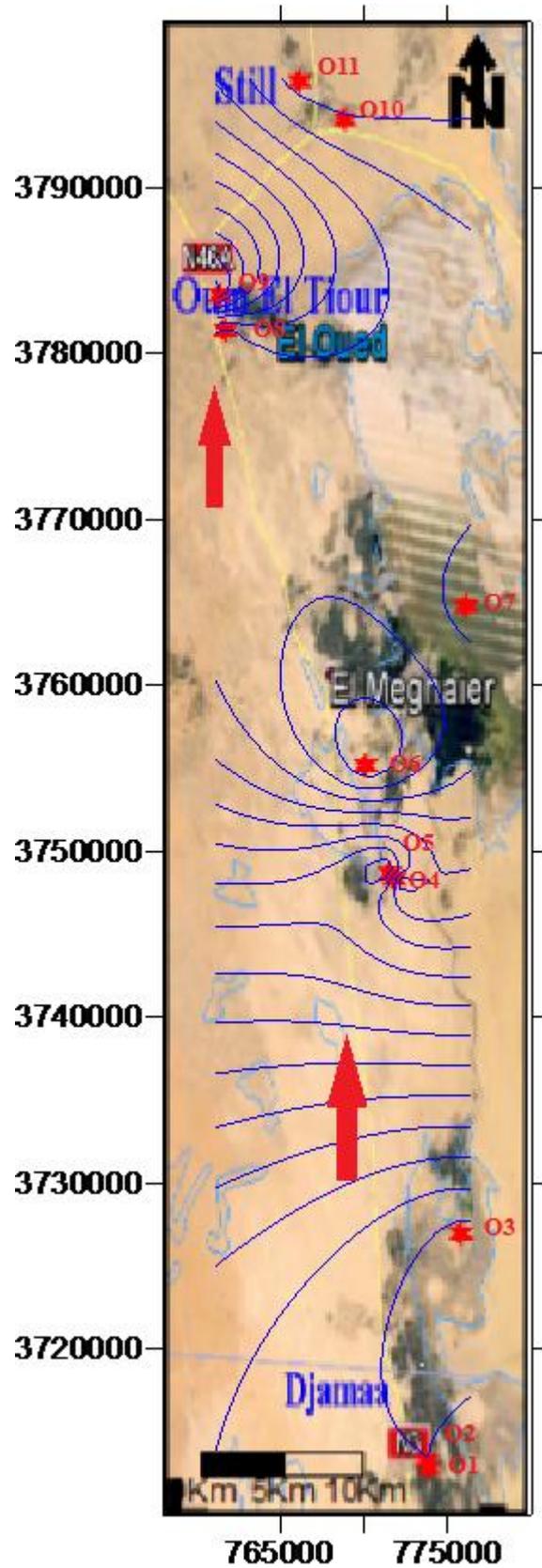


Figure V.1 : Carte de conductivité électrique de la zone d'étude (Djamaa, Meghaier, Still et Oum Thiour)

V.3.2- Les anions majeurs

Les anions majeurs montrent un excès par rapport aux normes (Figure V.2), pour les sulfates, 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 avec une diminution 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 zone d'étude dépassent les 100 mg/l et restent presque constantes et ne présentent pas de variations remarquable.

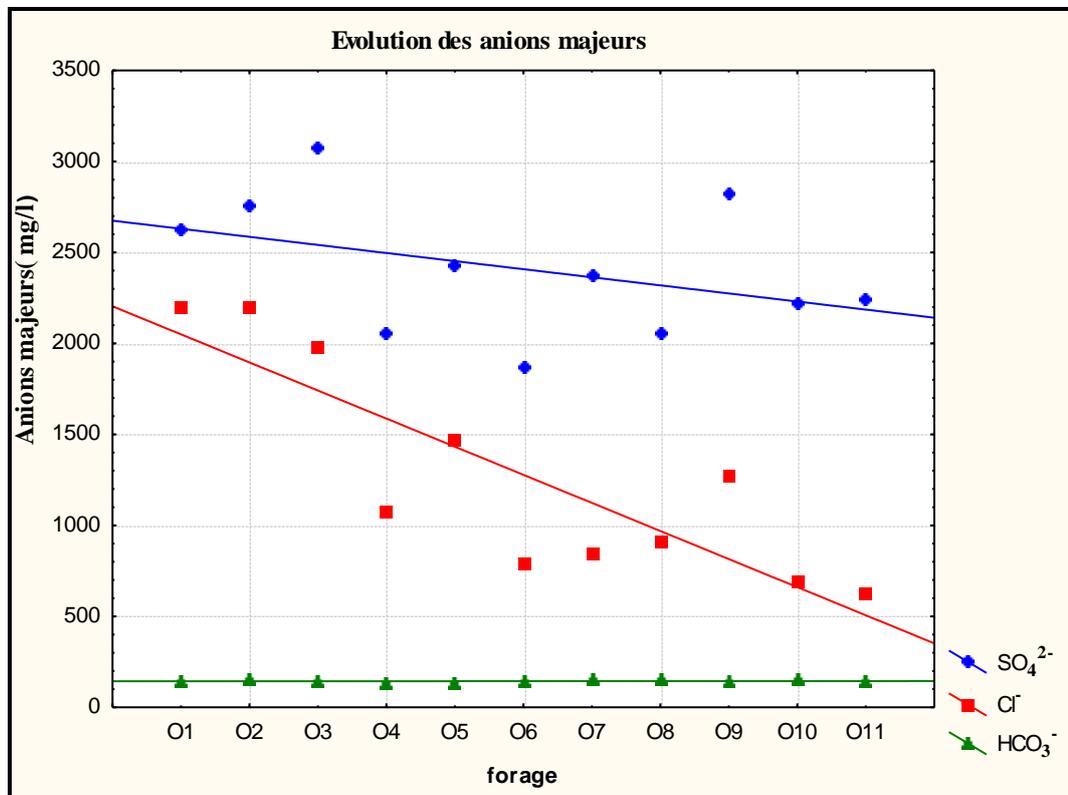


Figure V.2 : Evolution des anions majeurs

V.3.3- Les cations majeurs

Pour les cations majeurs, la dominance du sodium est nette, les valeurs enregistrées (Figure V.3) montrent des concentrations élevées, parfois, ultra fortes (> 1200 mg/l) au niveau des points O1 et O2, O3. Cet élément diminué également le long du sens d'écoulement des eaux, et simultanément aux chlorures.

Les teneurs en calcium remarqué des concentrations élevées et dépassant les normes de potabilité (100 mg/l), même chose pour le magnésium, mais d'un degré moindre en matière des concentrations.

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

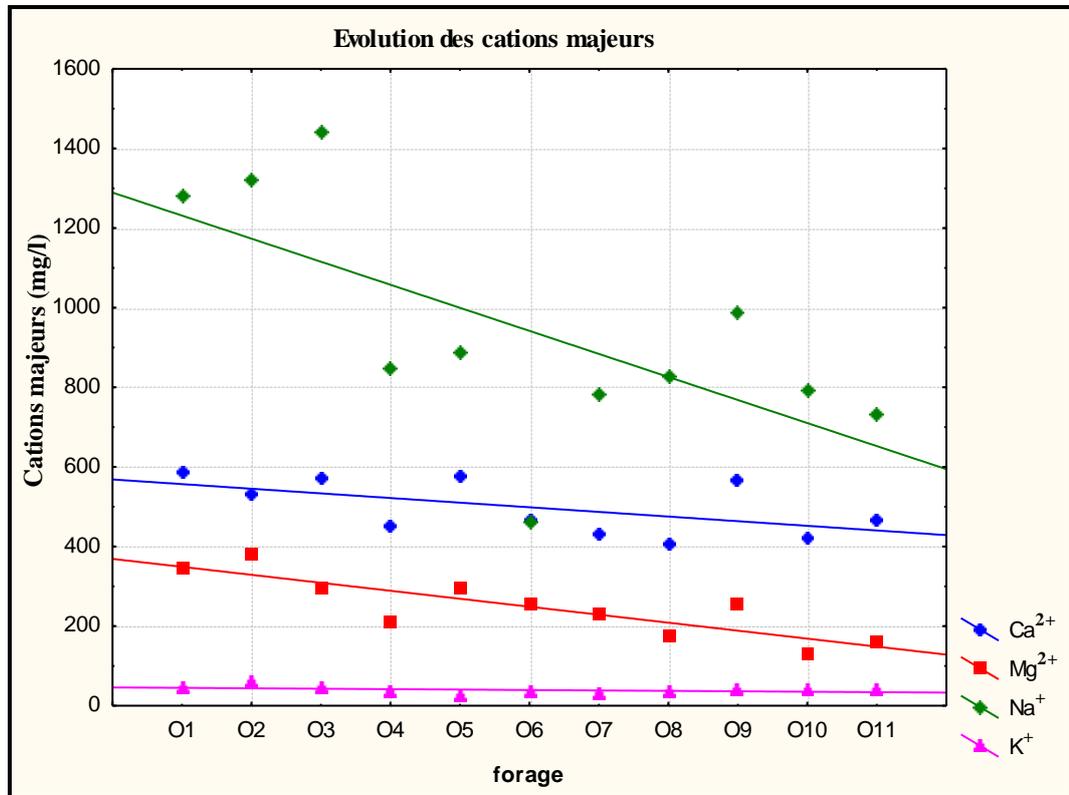


Figure V.3 : Evolution des cations majeurs

V.3.4- Les ions mineurs

Les nitrates présentent des concentrations plus ou moins dans les normes, mais on a enregistré des valeurs élevées aux points, O4 et O9 (Figure V.4), 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.

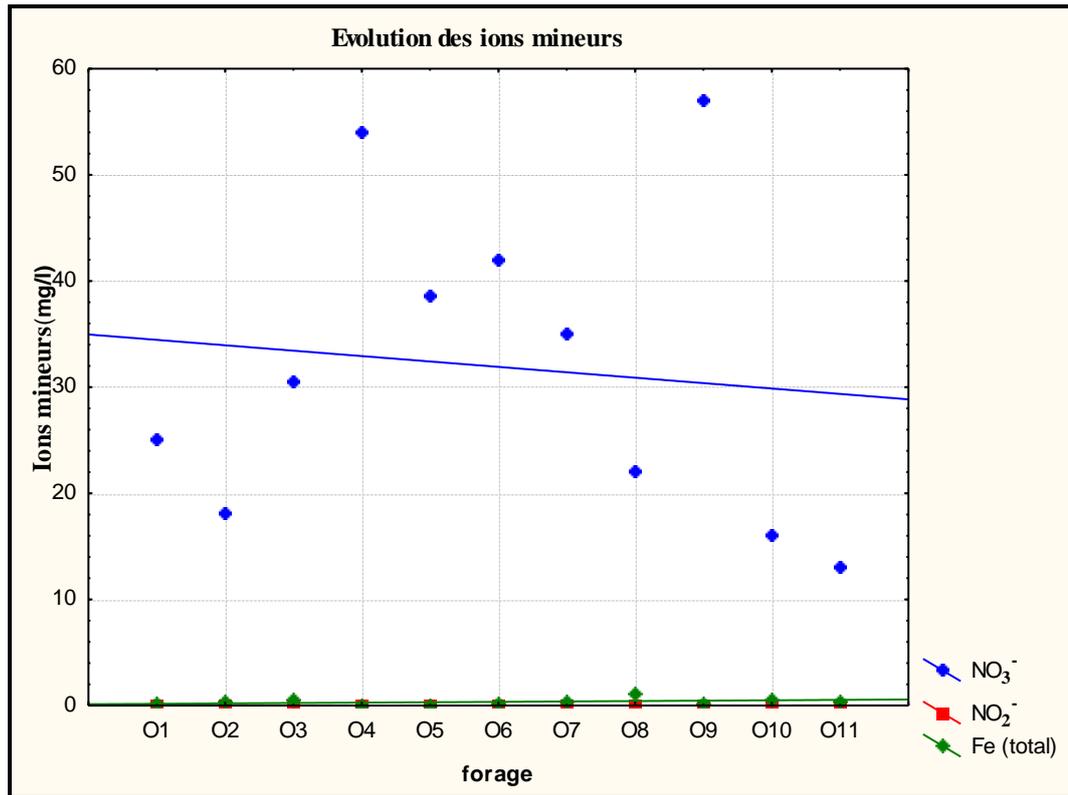


Figure V.4 : Evolution des ions mineurs

V.4- 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 V.5), 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 sulfaté calcique ou sodique ou magnésien. La deuxième est celle caractérisée par le faciès chloruré calcique ou sodique ou magnésien.

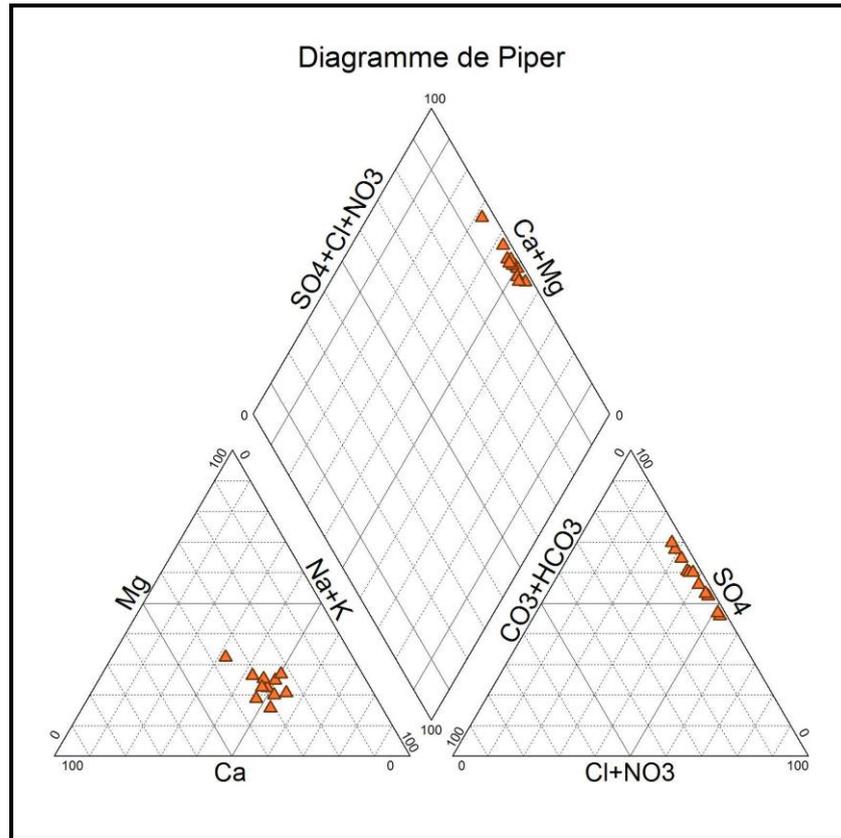


Figure V.5 : Faciès chimiques des eaux du Mio-Pliocène de l'Oued Rhir Nord (Djamaa, Meghaier, Still et Oum Thiour)

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 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 (Cl^- , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , et 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 Na^+ vis-à-vis de Ca^{2+} et Mg^{2+} , ainsi que l'abondance des anions Cl^- et SO_4^{2-} , nous permettent d'établir des diagrammes binaires par les rapports caractéristiques $r\text{Na}^+ / r\text{Ca}^{2+}$ versus $r\text{SO}_4^{2-} / r\text{Cl}^-$, 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 rSO_4/rCl (Figure V.6, Figure V.7 et Figure V.8) 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 rNa/rCa (Figure V.6) montrant des valeurs supérieures à 1, indique un enrichissement en sodium, ou inférieur à 1, indique un enrichissement en calcium. Ce qui traduit l'influence de la matrice gypse avec $r = 0.75$ (Figure V.9) sur la matrice halite, où $r = 0.90$ (Figure V.10). Cependant, le rapport rNa/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 V.6), c'est le cas des forages, O6 qui peut être expliqué par la dissolution de la matrice gypse $CaSO_4$, et des faciès à dominance magnésienne (Figure V.7).

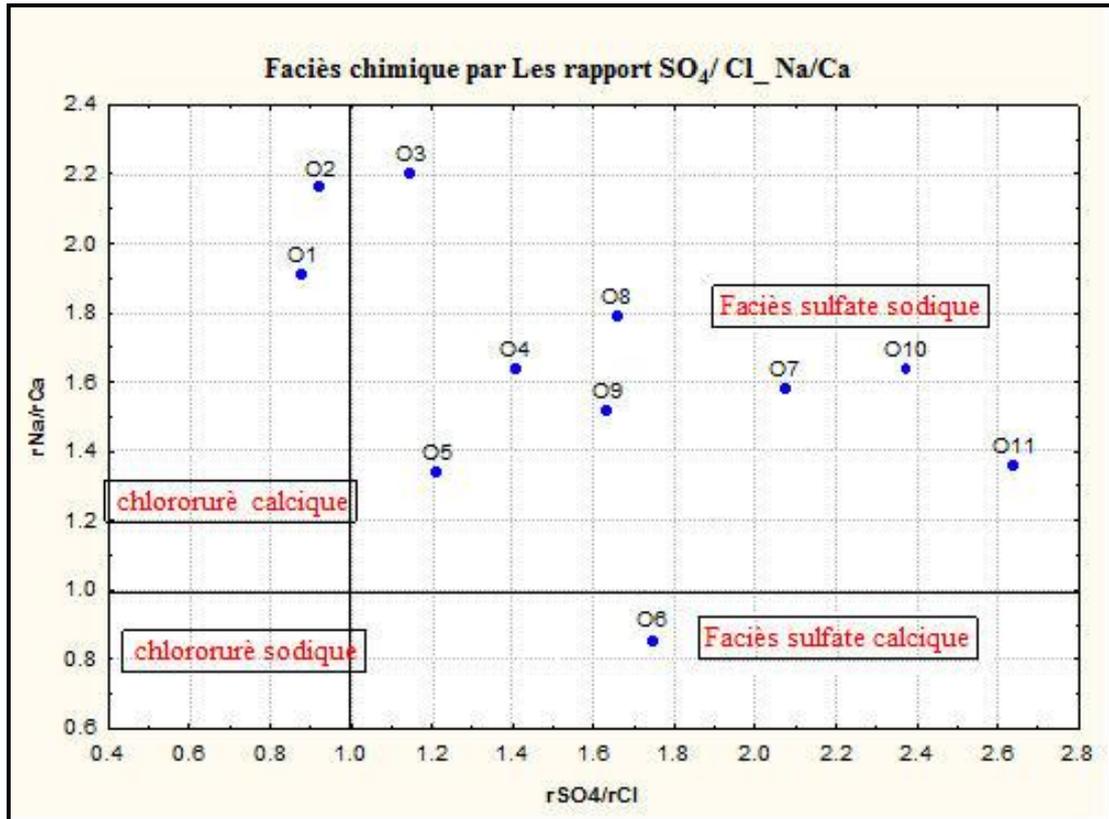


Figure V.6 : La relation Na/Ca vs SO₄/ Cl

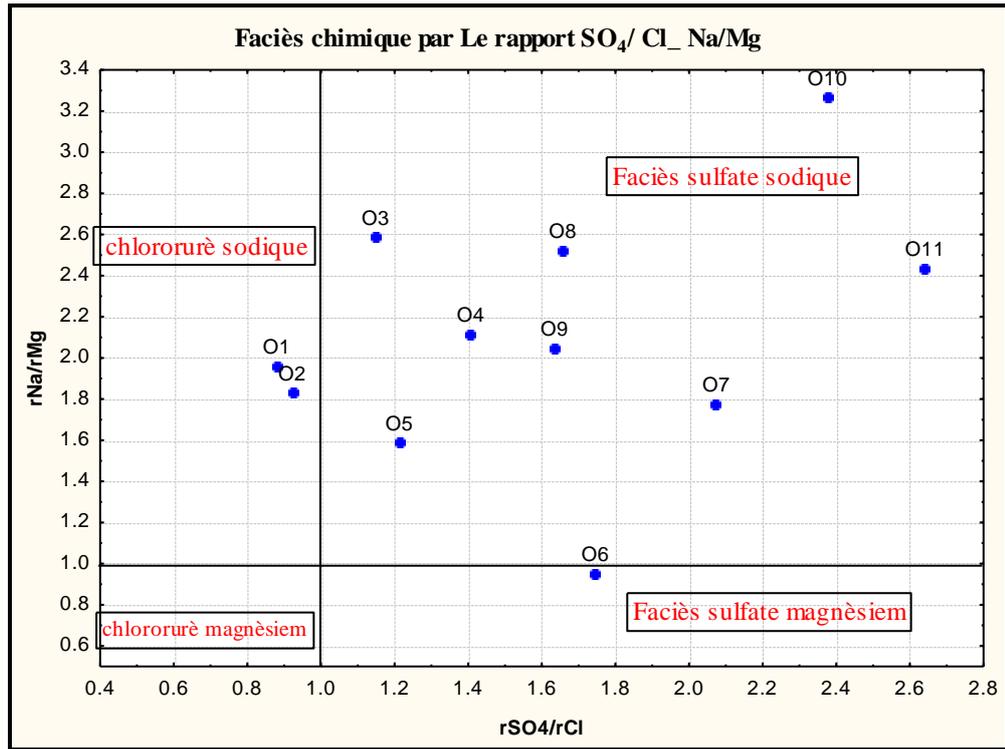


Figure V.7 : La relation Na/Mg vs SO_4/Cl

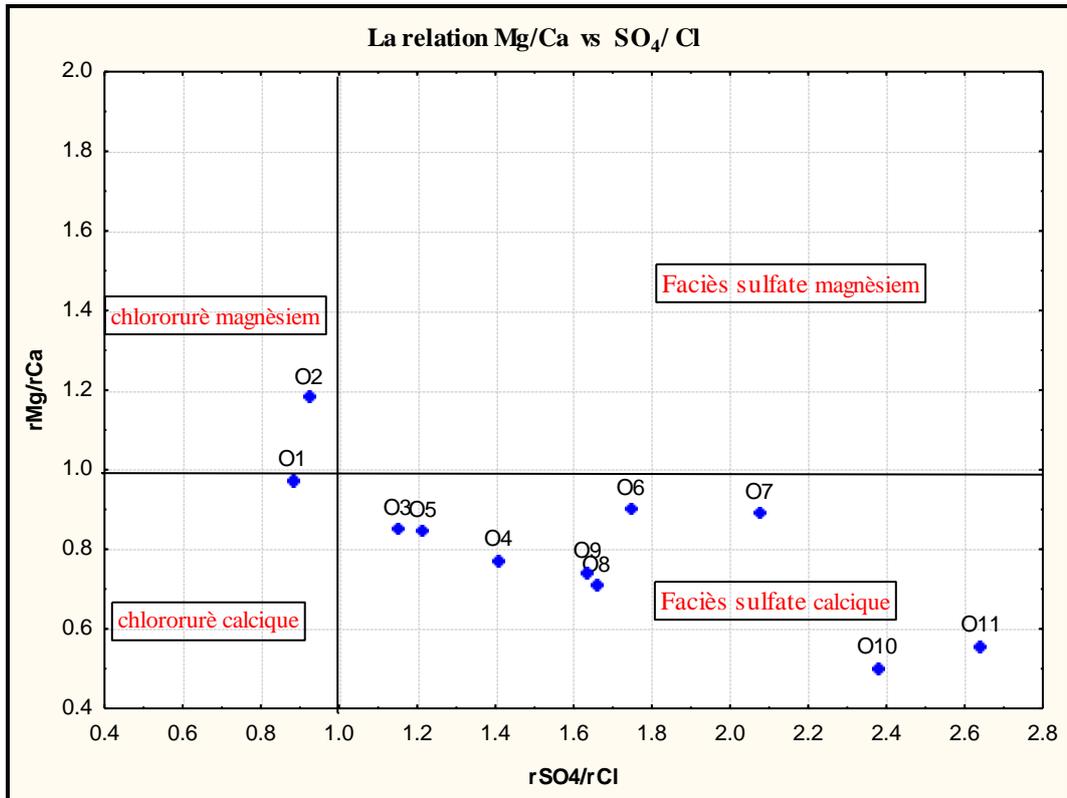


Figure V.8 : La relation Mg/Ca vs SO_4/Cl

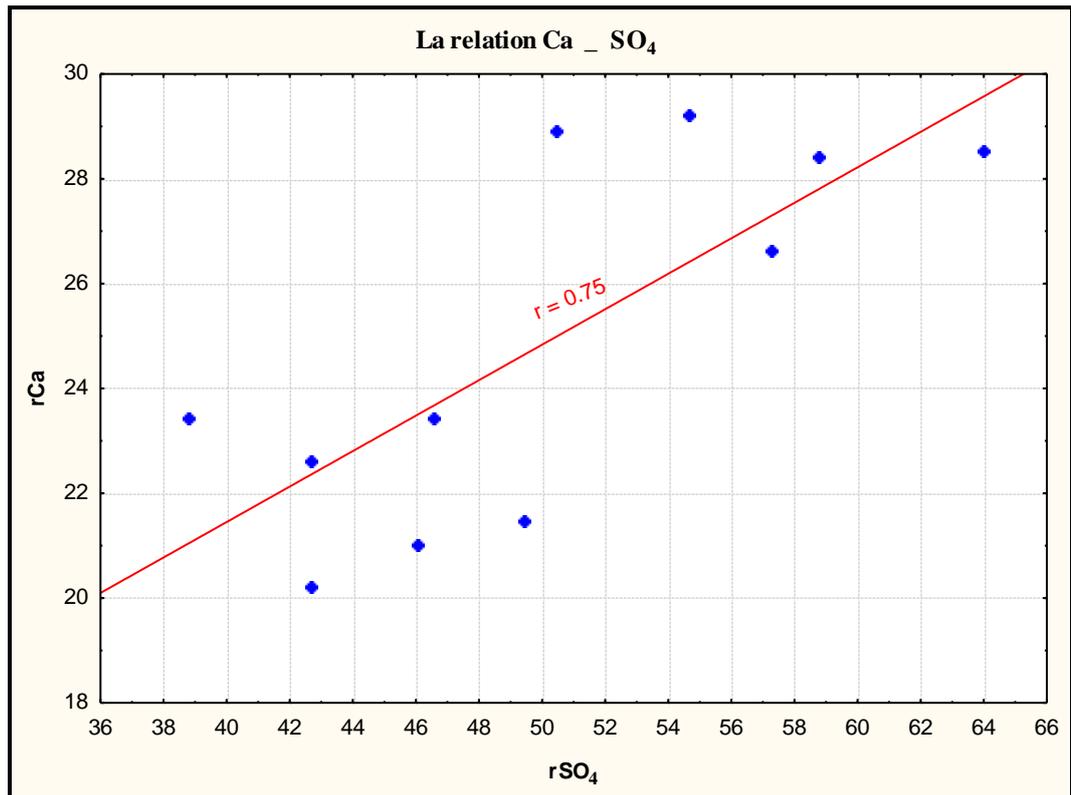


Figure V.9 : La relation Ca vs SO₄

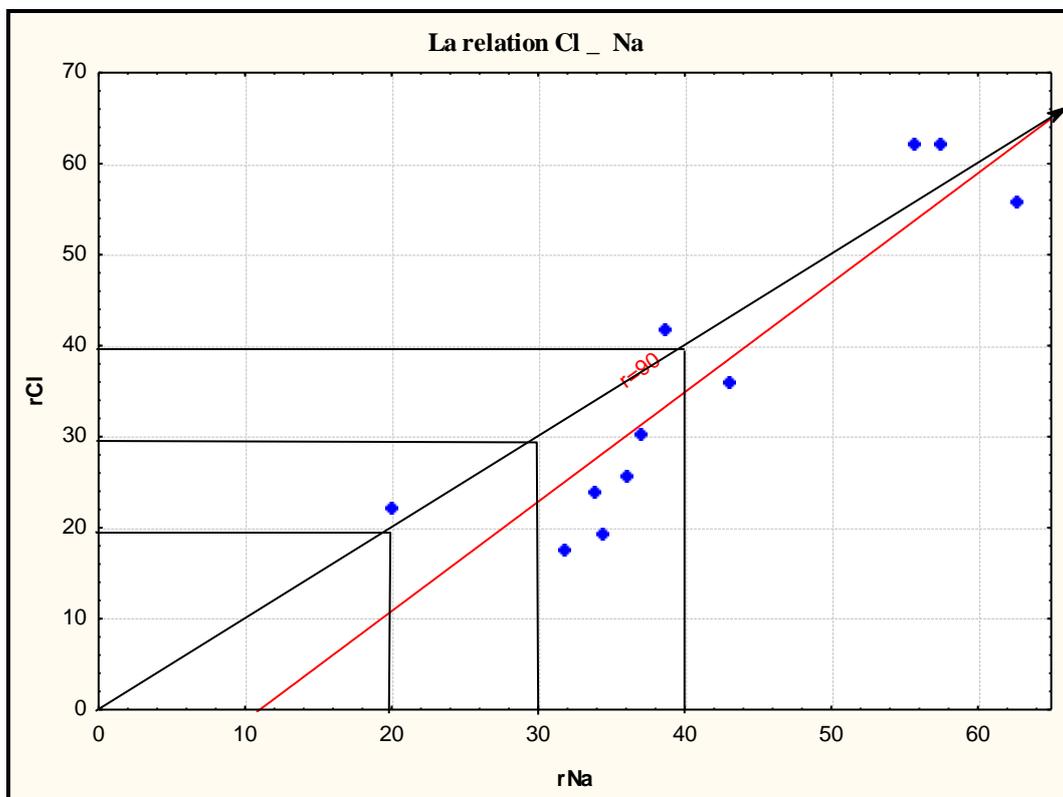


Figure V.10 : La relation Cl vs Na

V.5- Origine des éléments chimiques

V.5.1- Origine des chlorures et du sodium

Le graphique (Figure V.11) montre un alignement des points. Le sodium et les chlorures doivent avoir la même origine, en l'occurrence, la dissolution de l'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 l'halite reste le sel principal qui génère le sodium et les chlorures dans les eaux étudiées.

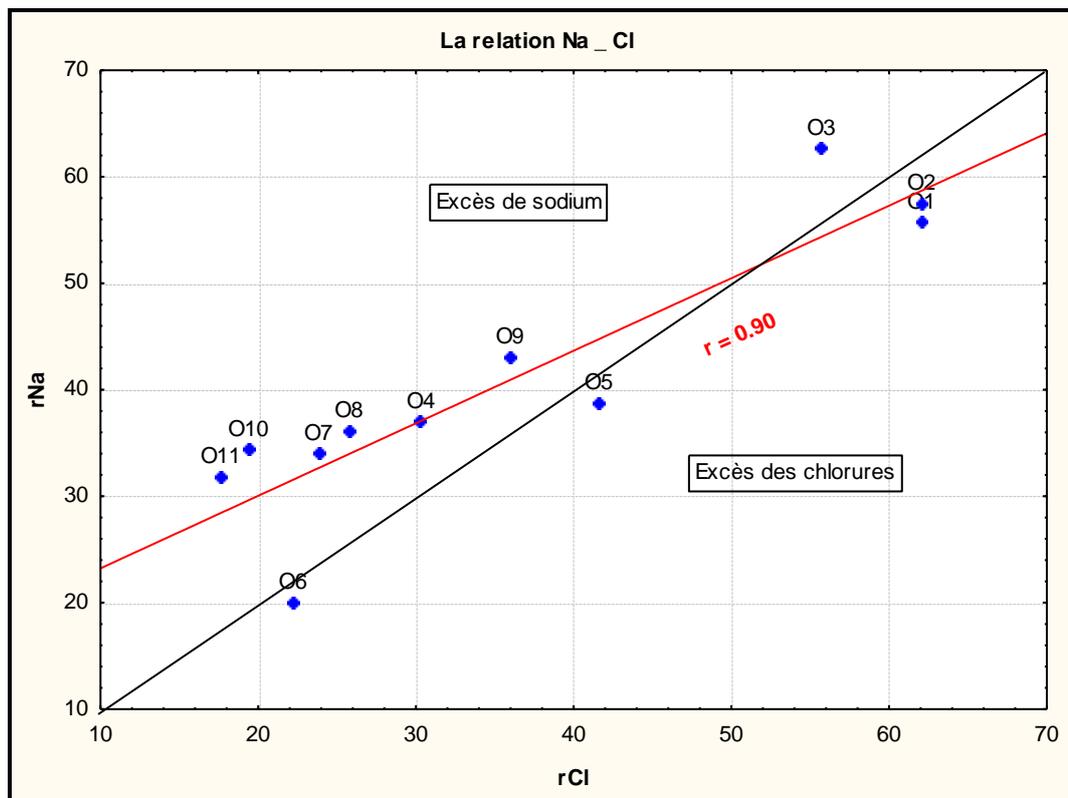


Figure V.11 : La relation Na vs Cl

V.5.2- 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 CO₂ 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 V.12) 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.

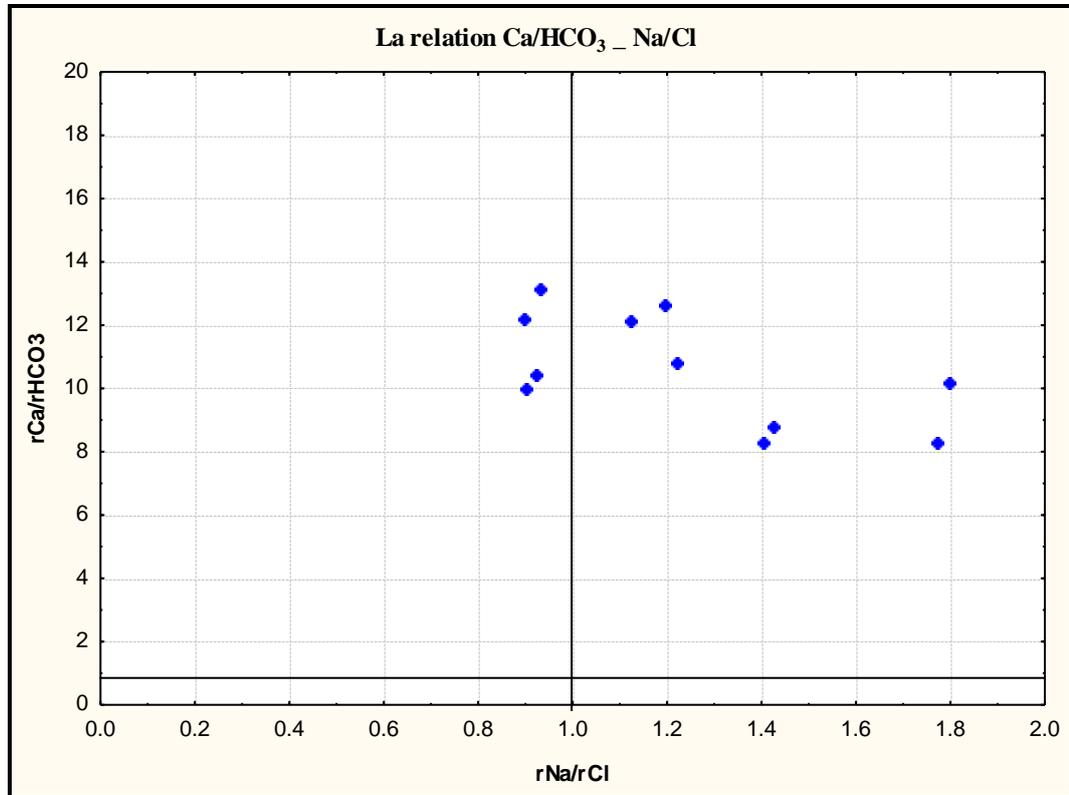


Figure V.12 : La relation Ca/HCO₃ vs Na/Cl

Dans la figure (Figure V.13) 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'influencent pas le chimisme des eaux étudiées. Les sources génératrices de HCO₃ sont très faibles ou que les sels des bicarbonates sont sursaturés et se trouvent en phase solide.

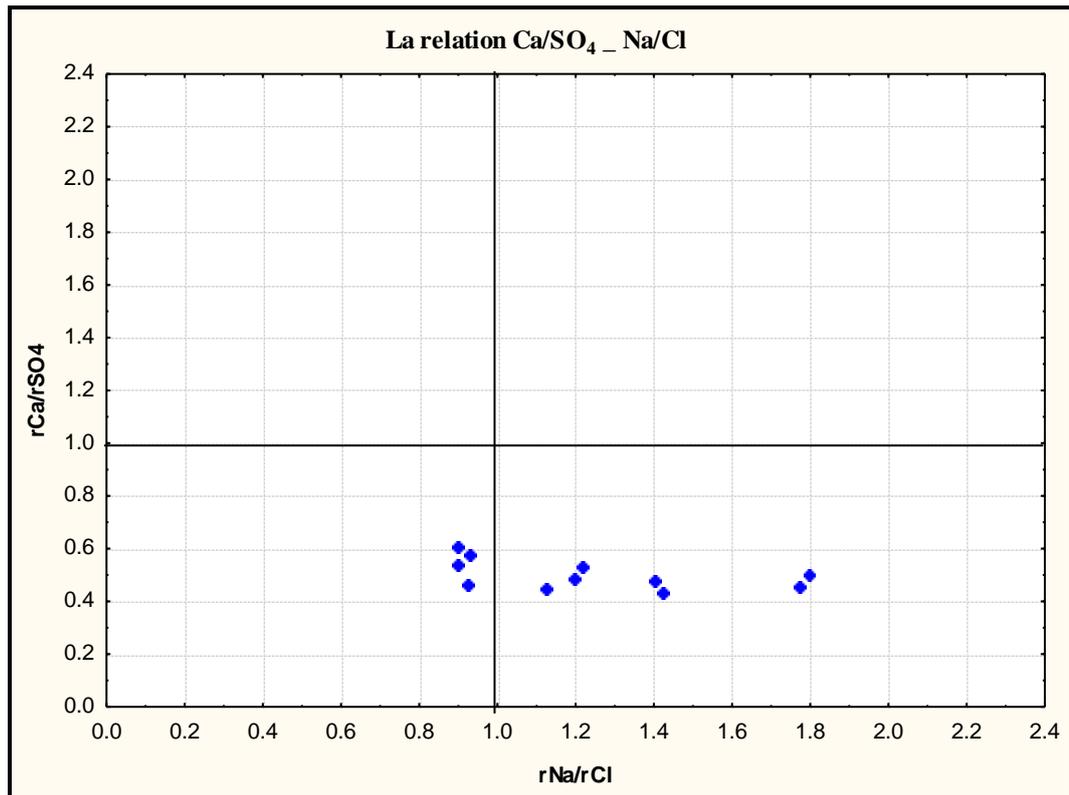


Figure V.13 : La relation Ca/SO₄ vs Na/Cl

Le diagramme (Figure V.14) 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 Mg/SO₄ vs Na/Cl (Figure V.15) 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.

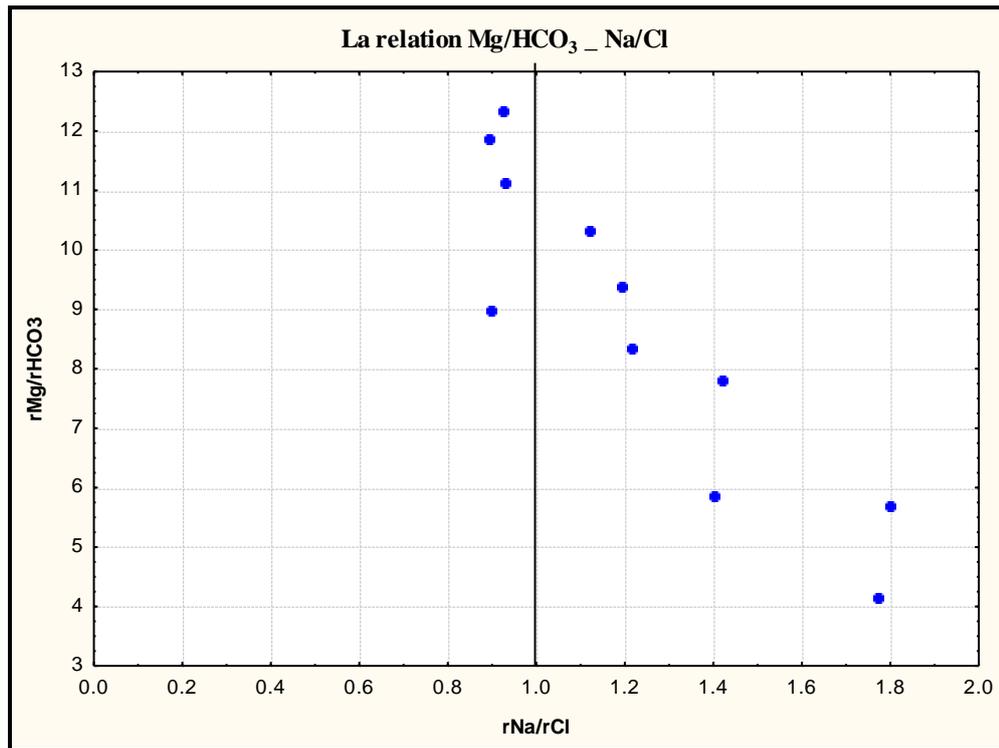


Figure V.14 : La relation Mg/HCO₃ vs Na/Cl

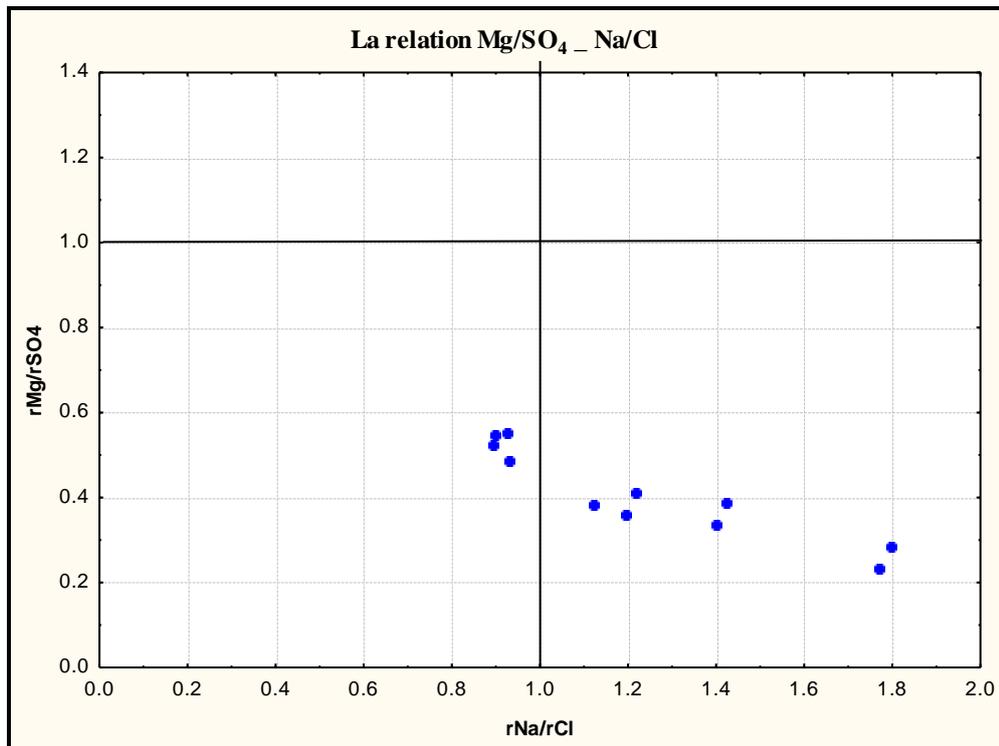


Figure V.15 : La relation Mg/SO₄ vs Na/Cl

V.5.3- 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.

V.6- 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'amont 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 SO_4 : $r = 0,75$), (Na vs Cl : $r = 0,90$).

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

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion et recommandations

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 km² 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 d'El Oued, c'est la matrice gypse qui gouverne et confère aux eaux un faciès sulfaté, 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

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

Pour une étude plus précise de l'évolution du chimisme des eaux de la nappe des sables du Mio-Pliocène dans la basse vallée de l'Oued Rhir, il est recommandé d'appuyer le travail par une reconnaissance détaillée de la géologie locale par établissement des coupes géologiques des profondeurs et faire quelques analyses de sol en surface pour en ressortir le maximum de données géologiques et lithologiques qui servent à l'interprétation des résultats d'analyses physico-chimiques, ces derniers doivent être nombreux et bien répartis le long de la zone d'étude.

Références
bibliographiques

Références bibliographiques

- 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.
- 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.
- BUSSON G. (1972)** : Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Paris, 464p.
- CORNET A. (1964)** : Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. SNED, Alger Algérie, 572p.
- DUBIEF J. (1953)** : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. S.E.S., Alger, 457p.
- 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.
- 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.
- GUENDOZ A. (1985)** : Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est Septentrional (Algérie). Thèse 3^{ème} cycle. Université de Paris-Sud, 243p.
- GUENDOZ A. et al (2003)** : Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara, Hydrogeology Journal (2003).
- HOUARI I M, 2012** : Contribution à l'étude de l'évolution géochimique des eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara septentrional.
- 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.

Mission V: qualité des eaux final1, 2006.

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. (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.

OMS (2006) : Organisation Mondiale de la Santé. Directives de qualité de l'eau de boisson. Critères d'hygiène et documentation à l'appui, Genève, 2è 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^{ème} édition, DUNOD, France, 1526p.

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.

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. Développement of the thermodynamic model GYPSOL simultanizing the irrigation water-soil chemical interactions. Arid Soil Research and Rehabilitation (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.

Evolution géochimique des eaux de la nappe des sables du Mio-Pliocène dans la région de l'Oued Rhir (Djamaa, Mghaier, Still et Oum Thiour

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 dans la région de l'Oued Rhir de l'amont vers l'aval (du Sud au Nord), par la recherche de la relation entre la composition chimique des eaux et la nature lithologique des formations aquifères traversées. 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, des phénomènes naturels influencent le chimisme des eaux comme leur dilution par les eaux de précipitations et les échanges de bases assurés par la présence des argiles vers les zones d'exutoire de la nappe.

Mots clés : Oued Rhir, évolution géochimique, hydrochimie, Mio-Pliocène, évaporites.

التطور الجيوكيميائي لمياه الطبقة الرملية بالمركب النهائي في منطقة واد ريفغ (جامعة، مغير، سطيل و أم طيور)

ملخص: تتمثل مخزونات المياه الجوفية على مستوى الصحراء الشمالية في نظامين طبقيين متراكبين: المتداخل القاري والمركب النهائي. تعرف مياه هاذين النظامين برداءة نوعيتها الكيميائية والتي تتميز بتراكيز معدنية عالية وقساوة كبيرة. يهدف هذا العمل الى متابعة التطور الجيوكيميائي لمياه الطبقة الرملية للميولوسان المنتمية لنظام المركب النهائي بداية من المنطلق ووصولاً الى المصب (من الجنوب باتجاه الشمال)، وذلك بالبحث عن العلاقة الموجودة بين التركيبة الكيميائية للمياه والطبيعة الليتولوجية للصخور التي تحتويها. النتائج المحصل عليها تبين بأن ذوبان المعادن التبخيرية هو المتحكم الرئيسي في التركيبة الكيميائية للمياه من خلال منحها تراكيب عالية تتجلى من خلال التراكيز العالية للسلفات، الكلورير والصوديوم والتي تتزايد على طول خط اتجاه جريان المياه. ظواهر طبيعية تتحكم كذلك في تركيبة المياه الكيميائية مثل تأثير مياه الأمطار و ظاهرة تبادل العناصر الكيميائية التي يتسبب فيها وجود الطبقات الطينية وهذا بالقرب من منطقة المصب.

الكلمات الدالة: واد ريفغ، التطور الجيوكيميائي، كيمياء المياه، ميولوسان، متبخرات.

Geochemical evolution of waters of the Mio-Pliocene groundwater in Oued Rhir area (Djamaa, Mghaier, Still et Oum Thiour)

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 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 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. A natural phenomena influence the chemistry of water as dilution by water precipitation and base exchanges provided by the presence of clays to the outlet of the water areas.

Key words: Oued Rhir, geochemical evolution, hydrochemistry, Mio-Pliocene, evaporites.