

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

**MINISTRE DE L'ENSEGNEMENT SUPERIEURS ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

**Faculté des Hydrocarbures, des Énergies
renouvelables et des Sciences de la Terre et de
l'Univers**



Département des Sciences de la Terre et de l'univers

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master

Domaine : Sciences de la Terre et de l'Univers

Filière : Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Thème :

**Apport des éléments en trace à l'étude
hydrogéochimique de la nappe du Complexe Terminal
du Bassin Oriental du Sahara septentrional**

Présenté par : EL VERAH ebeti sidatti

Soutenu publiquement le 24/06/2024

Devant le jury :

Mr. Houari Idir Menad	MCB (Univ KM Ouargla)	Président
Mr. Bellaouar Abdelaziz	MCA (Univ KM Ouargla)	Examineur
Mr. Nezli Imed Eddine	Professeur (Univ KM Ouargla)	Encadreur

Année Universitaire : 2023-2024

Dédicace

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

À mes très chers parents, qui m'ont soutenu avec amour et patience tout au long de cette aventure scientifique, je dédie ce mémoire en signe de reconnaissance pour votre soutien indéfectible et votre encouragement constant.

À mes chers frères et sœurs dont le soutien et les encouragements ont été d'inspiration tout au long de ce parcours.

À tous mes amis et mes collègues, qui ont partagé les hauts et les bas de cette expérience avec moi, je vous remercie pour votre amitié et votre soutien.

À mes professeurs qui m'ont guidé et inspiré tout au long de mes études, je vous suis reconnaissant pour votre expertise et votre dévouement.

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.

Nos remerciements très chaleureux vont tout d'abord à :

Professeur Nezli Imad Eddine, mon Encadreur pour son encadrement scientifique, ses conseils et ses orientations tout au long de ce travail.

Mr Gadja Omar, ingénieur de laboratoire de géologie du Sahara, Université de Ouargla, pour leur accueil et aide.

Les gens de l'algérien des eaux (ADE) et de la direction des services agricole (DSA) pour leurs aides dans le prélèvement de nos échantillons.

Dr. BELKSIER Mohamed Salah, chef de département des sciences de la terre et de l'univers, et à tous les enseignants du département des sciences de la terre et de l'univers, Université de Ouargla, qu'ils trouvent ici ma sincère reconnaissance.

Table des matières

Introduction générale	1
I.1- Introduction	3
I.2- Contexte géographique de la région d'étude.....	3
I.3- Topographie et composition géomorphologique.....	3
I.3.1- Les Hamadas	4
I.3.2- Les Regs	4
I.3.3- Les accumulations sableuses	4
I.3.4- Les Chotts et les Sebkha	4
I.4 -Climatologie	4
I.4.1-Les précipitations.....	4
I.4.2-Les températures.....	4
I.4.3-Le vent	5
I.4.5-L'évaporation	5
I.4.6-L'Aridité.....	5
I.5- Réseau hydrographique.....	5
I.5.1- Oued M'ya	6
I.5.2- Oued Rhir	6
I.5.3- Les oueds de la dorsale du M'zab	6
I.6- Cadre géologique.....	7
I.6.1- Structure géologique du bassin oriental.....	7
I.6.2- Litho-stratigraphie	9
I.6.2.1- L'Albien.....	10
I.6.2.2- Le Vraconien	10
I.6.2.3- Le Cénomaniens.....	10
I.6.2.4- Le Turonien	10
I.6.2.5- Le Sénonien	10

I.6.2.6- L'Éocène	11
I.6.2.7- Le Mio-Plio-Quaternaire	11
I.6.3- Tectonique régionale.....	11
I.6.4- Paléogéographie	12
I.7- Contexte hydrogéologique	13
I.7.1- Le Continental Intercalaire (CI)	15
I.7.2- Le Complexe Terminal (CT).....	16
I.8- Conclusion	20
II.1- Introduction.....	21
II.2- Échantillons d'eaux	21
II.3- Outil informatique	22
II.3.1- AqQA :.....	22
II.3.2-Diagramme :.....	22
II.3.3-Phreeqc v.3.....	22
II.3.4- ArcGIS.....	22
II.4- Mesures in situ	22
II.4.1- Le pH et température.....	22
II.4.2- La conductivité électrique (CE)	23
II.5- Analyses au laboratoire	23
II.5.1- L'analyse des éléments majeurs.....	23
II.5.1.1- Dosage de magnésium par méthode titrimétrie a l'EDTA :	23
II.5.1.2- Dosage des carbonates et bicarbonates.....	24
II.5.1.3- Dosage de sulfates :	25
II.5.1.4- Dosage de calcium par méthode titrimétrique a l'EDTA :	26
II.5.1.5- Le Chlorure	27
II.5.1.6- Le sodium et le potassium.....	29

II.6-Conclusion	29
III.1- Introduction	30
III.2- Résultats d'analyses physico-chimiques	30
III.2.1- Les paramètres physico-chimiques	30
III.2.1.1- Le potentiel hydrogène (pH).....	30
III.2.1.2- La température (°C).....	31
III.2.1.3- La conductivité électrique CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)	31
III.2.2- Les éléments majeurs	31
III.2.2.1- Les sulfates SO_4^{2-} (mg/l).....	31
III.2.2.3- Les bicarbonates HCO_3^- (mg/l)	32
III.2.2.4- Le calcium Ca^{2+} (mg/l).....	32
III.2.2.5- Le magnésium Mg^{2+} (mg/l)	32
III.2.2.6- Le sodium Na^+ (mg/l).....	33
III.2.2.7- Le potassium K^+ (mg/l).....	33
III.2.2.8- Les nitrates NO_3^- (mg/l).....	33
III.2.3- Les éléments en traces.....	34
III.2.3.1- Le Strontium (Sr)	34
III.2.3.2- Le fluor (F)	34
III.2.3.3- Le lithium (Li).....	34
III.2.3.4- Le bore (B).....	34
III.2.3.5- Le Baryum (Ba)	34
III.2.3.6- Brome (Br).....	34
III.2.3.7- Iode (I).....	35
III.3- Faciès chimique des eaux	35
III.3.1- Par le diagramme de Piper.....	35
III.3.2- Par les rapports caractéristiques.....	36

III.4- Les processus d'acquisition du chimisme	38
III.4.1- Altération des silicates.....	38
III.4.2- Equilibre entre l'eau et les minéraux néoformés	39
III.4.3- Évolution des indices de saturation vis-à-vis des minéraux prépondérants	42
III.5- Apport des éléments traces.....	43
III.6- Conclusion	48
Conclusion général.....	49

Liste des figures et des photos

Chapitre I : Cadre physique de la zone d'étude

Figure I-1: Délimitation de la zone d'étude	3
Figure I-2: Réseau hydrographique dans la région d'étude (Ballais, 2010).....	6
Figure I-3: Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978)	8
Figure I-4: Coupe géo-structurale transversale du Sahara algérien (WEC, 2007)	8
Figure I-5: Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est septentrional algérien (Sonatrach et Schlumberger, 1990).....	9
Figure I-6: Coupe géologique synthétique de la zone d'étude (Houari, 2012)	9
Figure I-7: Délimitation géographique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972).....	14
Figure I-8: Coupe hydrogéologique de SASS (UNESCO, 1972).....	16
Figure I- 9: Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003).....	16
Figure I-10: Coupe hydrogéologique transversale du CT (UNESCO, 1972) modifiée par Edmunds et al, 1997)	19
Figure I-11: Carte piézométrique de référence du CT (OSS, 2003).....	20

Chapitre II : Matériels et méthodes

Figure II-1: Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau.....	21
Photo II-1: Point de virage	27
Photo II-2: appareil Titron plus 848.....	28
Photo II-3 : l'appareil photométrie de flamme.....	29

Chapitre III : Hydrogéochimie de la nappe du CT

Figure III- 1 : Faciès chimiques des eaux du Complexe Terminal de la région d'étude	36
Figure III-2: Faciès chimiques des eaux par la relation rNa/rCa vs rSO_4/rCl	37
Figure III-3: Faciès chimiques des eaux par la relation rNa/rMg vs rSO_4/rCl	38
Figure III-4: diagramme d'activité $\text{Log } H_4SiO_4(aq)$ vs $\text{Log}(Na^+/H^+)$	39
Figure III-5: diagramme d'activité $\text{Log } H_4SiO_4(aq)$ vs $\text{Log } Ca^{2+}/(H^+)^2$	40
Figure III-6: diagramme d'activité $\text{Log } H_4SiO_4(aq)$ vs $\text{Log}(K^+/H^+)$	41
Figure III-7: diagramme d'activité $\text{Log } H_4SiO_4(aq)$ vs $\text{Log } Mg^{2+}/(H^+)^2$	41
Figure III-8: Évolution des indices de saturation vis-à-vis le gypse, l'anhydrite et l'halite	42
Figure III-9: Évolution des indices de saturation vis-à-vis le calcite, l'aragonite, la dolomite et CO ₂	43

Figure III-10 : Signature géochimiques des éléments majeurs, en traces et métallique normalisées au PAAS et UCC dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal..... 44

Figure III-11 : Corrélation entre les différents éléments en traces dans les eaux de la nappe du CT 46

Liste des tableaux

Chapitre III : Hydrogéochemie de la nappe du CT

Tableau III-2: indices de saturation de Barite, de Celestite, de Fluorite et de Strontianite	45
Tableau III-3: formes oxydés de l'uranium.....	47

Listes des abréviations

ADE, Algérien Des Eaux

CE, Conductivité Électrique

CI, Continental Intercalaire

CT, Complexe Terminal

DSA, Direction des Services Agricoles

EDTA, Ethylène Diamine Tétracétique Acide

i.e.b, Indices d'Échanges de Base

IS, Indices de Saturation

OMS, Organisation Mondiale de la Santé

OSS, Observation du Sahara et du Sahel

PASS, Post-Archean Australian Shale

Ph, Potentiel d'hydrogène

SASS, Système Aquifère du Sahara Septentrional

T°, Température

UNESCO, United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

UCC, Upper Continental Crust

WEC, Well Evaluation Conference

Résumé

Le bassin oriental du Sahara septentrional algérien, renferme deux grands systèmes aquifères, le Continental Intercalaire sableux et gréseux plus profond et le Complexe Terminal moins profond, ce dernier comprend deux sous-aquifères superposés, de bas en haut ; le Sénono-Eocène carbonaté surmonté par le Mio-Pliocène sableux et argileux, ces systèmes recèlent des potentialités hydriques importantes, industriels et l'irrigation des palmeraies, mais leur qualité physico-chimique reste médiocre. Le présent travail a pour objectif de décrire l'évolution hydrogéochimique des eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara septentrional algérien, du Sud de Ouargla, Hassi Messaoud jusqu'à Ghassi-Touil et vers le Nord de Ouargla de Touggourt jusqu'à Mghaier ; de l'amont vers l'aval (zones des chotts), selon l'axe présumé d'écoulement des eaux de la nappe, par la recherche de la relation entre la composition chimique des eaux et la nature lithologique des formations aquifères traversées. Les résultats obtenus par normalisation des cations majeurs des éléments en traces et métaux lourds montrent que le chimisme est gouverné essentiellement par la dissolution des formations évaporitiques qui confère aux eaux une minéralisation excessive. Les enrichissements en Na, Ca et Mg, Sr, B et Li témoignent de la dissolution prolongée des évaporites, tandis que les appauvrissements en Fe et métaux lourds indiquent des processus de précipitation sur une longue période. La stabilité des conditions géochimiques et redox contribue à un équilibre distinct et révélant les interactions complexes entre l'eau et les roches dans cet environnement ancien.

Mots clés : éléments en traces, géochimie, minéralogie, Complexe Terminal, Mio-Pliocène, Sahara septentrional Sénono-Eocène

Abstract

The eastern basin of the Algerian northern Sahara contains two major aquifer systems, the deeper sandy and sandstone Continental Intercalaire and the shallower Terminal Complex, the latter comprising two superimposed sub-aquifers, from bottom to top; the carbonate Senono-Eocene surmounted by the sandy and clayey Mio-Pliocene, these systems harbor significant water potential for industrial and palm-tree irrigation, but their physico-chemical quality remains mediocre. The aim of the present work is to describe the hydrogeochemical evolution of the water table in the terminal complex of the Algerian northern Sahara, from south of Ouargla, Hassi Messaoud to Ghassi-Touil and north of Ouargla from Touggourt to Mghaier; from upstream to downstream (chotts zones), according to the presumed axis of groundwater flow, by investigating the relationship between the chemical composition of the water and the lithological nature of the aquifer formations crossed. The results obtained by standardizing major cations, trace elements and heavy metals show that chemism is essentially governed by the dissolution of evaporitic formations, which confers excessive mineralization on the water. Enrichments in Na, Ca and Mg, Sr, B and Li testify to the prolonged dissolution of evaporites, while depletions in Fe and heavy metals indicate precipitation processes over a long period. Stable geochemical and redox conditions contribute to a distinct equilibrium, revealing the complex interactions between water and rocks in this ancient environment.

Key words: trace elements, geochemistry, mineralogy, Terminal Complex, Mio-Pliocene, Seno-Eocene Northern Sahara.

ملخص

في الحوض الشرقي للصحراء الشمالية الجزائرية، يوجد نظام طبقتان مائيتان كبيرتان، المتداخل القاري ذو التكوينات الرملية والأكثر عمقا، والمركب النهائي الأقل عمقا، هذا الأخير يحتوي على طبقتان مائيتان مترابطتان، من الأسفل الى الأعلى نجد طبقة السينونوايوسان الكلسية يليها الميوليبوسان الرملي الطيني. تتمتع هذه الأنظمة بإمكانيات مائية كبيرة للاستخدام الصناعي وري بساتين النخيل، ولكن تبقى جودتها الفيزيائية والكيميائية رديئة. الهدف من هذه الدراسة هو وصف التطور الهيدروجيوكيميائي للمياه الجوفية في المجمع الطرفي للصحراء الشمالية الجزائرية، من جنوب ورقلة وحاسي مسعود إلى غاسي الطويل وشمال ورقلة من تفرقت إلى المغير؛ من المنبع إلى المصب (مناطق الشطوط)، وفقاً لمحور التدفق المفترض لطبقة المياه الجوفية التي يتم عبورها من خلال بحث العلاقة بين التركيب الكيميائي للمياه والطبيعة الصخرية لتشكيلات طبقة المياه الجوفية التي يتم عبورها. تُظهر النتائج التي تم الحصول عليها من خلال توحيد الكاتيونات الرئيسية والعناصر النزرة والمعادن الثقيلة أن الكيمياء محكومة بشكل أساسي بانحلال التكوينات التبخيرية التي تعطي المياه تمعدناً مفرطاً. ويشهد التخصيب في الصوديوم والكالسيوم والمغنيسيوم والكالسيوم المغنيسيوم والسرينوسين والبوليسترين والليثيوم على انحلال طويل الأمد في المتبخرات، بينما يشير انخفاض الحديد والمعادن الثقيلة إلى عمليات الترسيب على مدى فترة طويلة. وتساهم الظروف الجيوكيميائية المستقرة وظروف الأكسدة والاختزال في تحقيق توازن متميز، مما يكشف عن التفاعلات المعقدة بين الماء والصخور في هذه البيئة القديمة.

الكلمات المفتاحية: العناصر النزرة، الكيمياء الجيولوجية، الكيمياء الجيولوجية، علم المعادن، المركب النهائي، الميو-بليوسيني، سينو-إيوسين الصحراء الشمالية.

Introduction

générale

Introduction générale

Le Sahara septentrional algérien renferme deux grands systèmes aquifères, le Continental Intercalaire sableux et gréseux plus profond et le Complexe Terminal moins profond, ce dernier comprend deux sous aquifères superposés, de bas en haut ; le Sénono-Eocène carbonaté surmonté par le Mio-Pliocène sableux et argileux, les réserves en eaux dans ces systèmes sont énormes et impressionnantes, mais leur qualité physico-chimique reste médiocre.

Notre travail est une contribution à l'étude de l'apport des éléments en trace en la compréhension de l'évolution du chimisme de la nappe de complexe terminal du Sahara septentrional algérien, du Sud de Ouargla, Hassi Messaoud jusqu'à Ghassi-Touil et vers le Nord de Ouargla de Touggourt jusqu'à Mghaier, selon l'axe présumé d'écoulement des eaux de la nappe.

L'approche adoptée dans ce travail est de se baser sur l'échantillonnage sur le terrain, l'analyse au laboratoire de géologie du Sahara (éléments majeurs) et le CRAPC (éléments en traces) mais au vu des difficultés rencontrées lors des analyses des éléments en traces nous nous sommes servi des données analytiques de Guendouz et al 2003 afin de plier à ce manque.

Notre mémoire a été structuré en trois chapitres :

Dans le premier chapitre, dit cadre physique de la zone d'étude, la situation géographique de notre région d'étude, Puis on a donné un aperçu sur le topographie et les différentes unités géomorphologiques fréquemment rencontrées dans les régions sahariennes, ensuite on a parlé sur le climat et le réseau hydrographique drainant la région, et finalement une synthèse de données géologiques et hydrogéologiques y a été introduite.

Dans le second chapitre dit ; matériels et méthodes, on a présenté les matériels utilisés et les méthodes suivies pour étudier l'évolution du chimisme des eaux en fonction de la lithologie de la lithologie le long du sens présumé d'écoulement des eaux de la nappe (mesure in situ, méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux et outil informatique).

En fin, le troisième et dernier chapitre dit , hydrochimie de la nappe du CT, a été consacré en premier lieu, à la présentation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux, puis on a essayé de modéliser ces résultats par l'emploi de multiples approches (hydrochimiques et géochimiques) et par normalisation des cations majeurs des éléments en traces et métaux lourds afin de ressortir les faciès

chimiques et de comprendre et interpréter Les processus d'acquisition du chimisme de des eaux de la nappe du complexe terminal.

Chapitre I :

Cadre Physique de la zone d'étude

I.1- Introduction

Ce chapitre représente des généralités sur notre région d'étude du point de vue Contexte géographique, Topographie et composition géomorphologique, climatologique, hydrographique, géologique et hydrogéologique, en se basant sur des études et publications antérieures dans le sens de notre recherche.

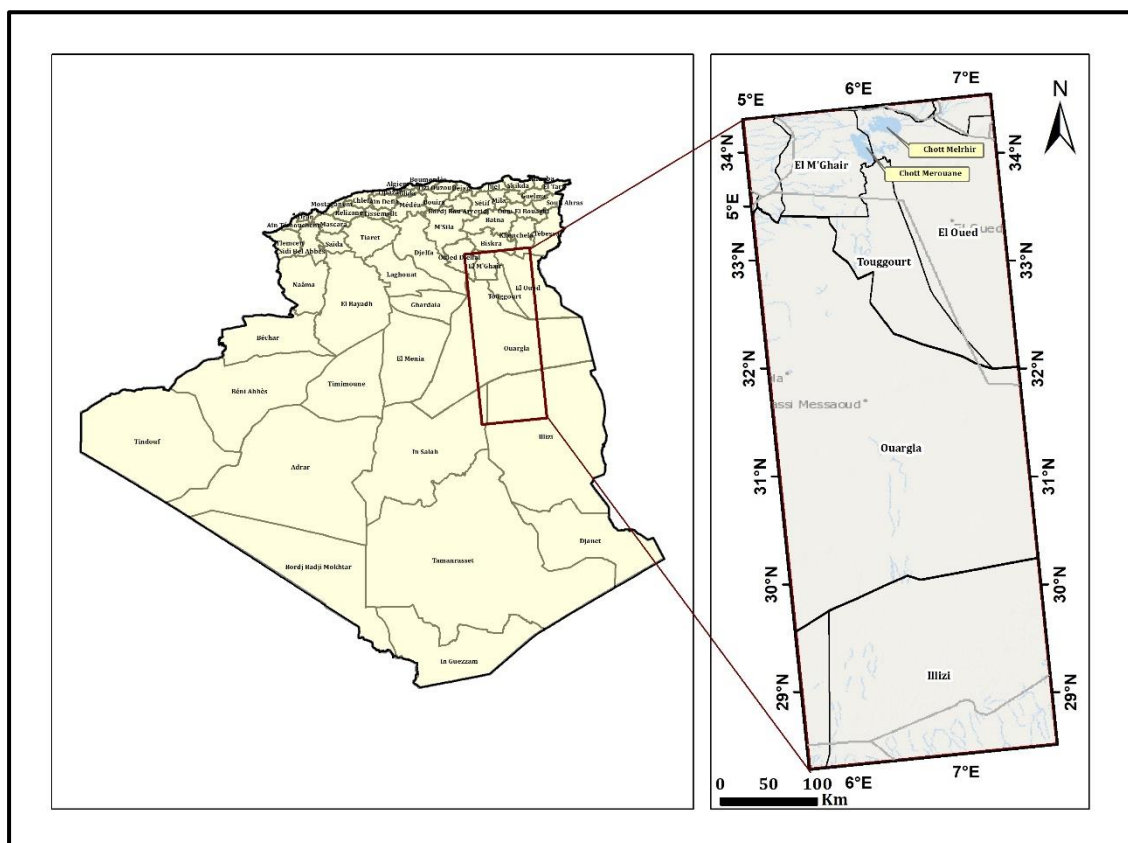


Figure I-1: Délimitation de la zone d'étude

I.2- Contexte géographique de la région d'étude

Le Sahara septentrional algérien se situe dans le Sud-Est de l'Algérie (Figure I.1), limité au Nord par la chaîne montagneuse de 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'étend de la wilaya de Ouargla jusqu'à la wilaya d'El Oued.

I.3- Topographie et composition géomorphologique

Sur le plan géomorphologique, le Sahara représente plusieurs paysages caractéristiques. Les oueds descendant les reliefs se perdent souvent dans des dépressions, se noient dans les ergs ou terminent leur course en mer. On peut aussi distinguer des plateaux sur lesquels s'érigent des reliefs (Hamdi Aissa, 2001).

I.3.1- Les Hamadas

Ce sont des plateaux rocheux à topographie très monotone, souvent plate à perte de vue, situés dans les régions Ouest du Sahara.

I.3.2- Les Regs

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

I.3.3- 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.

I.3.4- Les Chotts et les Sebkha

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.

I.4 -Climatologie

Le Sahara Algérie est caractérisé par un climat chaud et désert, avec une intense sécheresse donc un taux d'humidité très faible. La diminution des précipitations résulte à cause de l'air marin perd la majorité de sa vapeur humide pendant la transformation en air continental plus frais et plus dense en zones côtières.

I.4.1-Les précipitations

D'après (Ouali 2005) le climat saharien caractérise par une faiblesse de la pluviosité, Les pluies sont des sources officielles de la précipitation, elles sont rares et faible importance quantitative, elles sont définies par leurs grandes variabilités, écrivent annuellement près de 200 mm au Nord et 20 mm au Sud ; mais sont inférieurs à 100 mm /an sur la plus grande partie du Sahara.

I.4.2-Les températures

Le climat thermique est assez uniforme, entre l'hiver et l'été il y a un grand écart de température, avec des étés chauds et des hivers rigoureux, Les températures extrêmes sont de plus de 50 °C en été. Les températures moyennes annuelles sont élevées dépasser 55° (Ould Baba Sy 2005).

I.4.3-Le vent

Le saharien est soumis à des vents dont il très sec et permanente, Il est traduit d'Est en Ouest par les courants marins froids où la bande côtière atlantique.

I.4.4-La luminosité

Les durées d'insolation sont évidemment très importantes au Sahara (de 9 à 10 heures par jour) ce désert est avant tout le pays du soleil (DUBIEF, 1959).

I.4.5-L'évaporation

L'évaporation ou l'évapotranspiration sont des mécanismes importants de pertes en eau. Elles sont très forte dans le Sahara Algérie, la hauteur moyenne d'eau évaporée annuellement serait de 3 à 5 m.

I.4.6-L'Aridité

L'aridité est un terme désignant la sécheresse qualitative ou quantitative d'une région. L'Aridité du Sahara est caractérisée par des périodes de sécheresse prolongées (Ould Baba Sy 2005).

I.5- Réseau hydrographique

L'hydrographie du Sahara septentrional algérien fondée sur les travaux des chercheurs fondateurs : Jean Dubief (1953) est reconsidérée il n'y a pas longtemps par des recherches universitaires effectuées par le géographe français Marc Côte (2005) montre que les oueds mythiques, Igharghar à partir du sud du Grand Erg Oriental, M'ya et Rhir à Ouargla n'existent plus. 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. Ensuite, les conditions de l'écoulement y sont particulières (l'absence d'un écoulement permanent dans les oueds). (Dubief, 1953).

La basse vallée de Oued M'ya (Ouargla) et le canal de l'Oued Rhir (Touggourt, Djamaa, et Mghaier) et l'oued Ittel (still) sont drainé par différents oueds, qui déposent leurs apports en eaux et en minéraux dans les chotts Melrhir et Merouane.

I.5.1- 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 ce dernier dans le Tademaït, mais elle disparaît dès la latitude de Ouargla où elle est remplacée par une dépression irrégulière. Les crues de l'oued M'ya dans le Tademaït sont bien connues (Dubief, 1953) que la région a subi au printemps du 1985 (Ballais, 2010).

I.5.2- Oued Rhir

La dépression topographique de l'oued Rhir 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.5.3- 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.2), encore parfois fonctionnels, constitués 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, (Ballais, 2010).

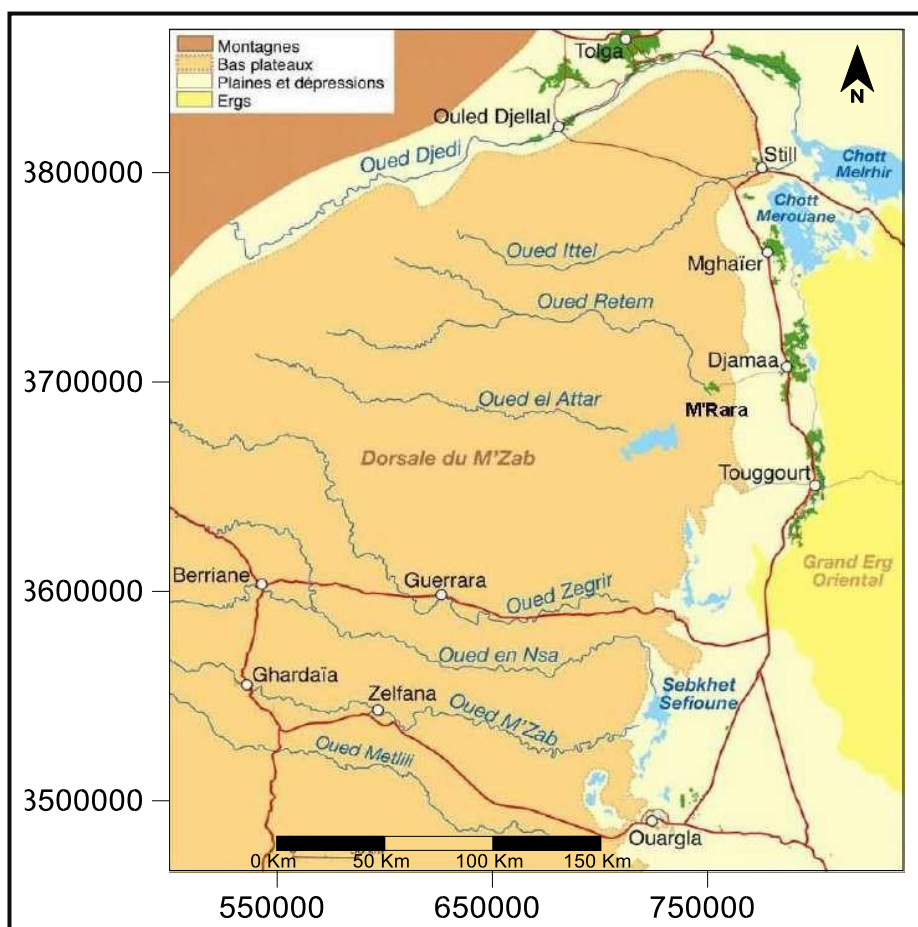


Figure I-2: Réseau hydrographique dans la région d'étude (Ballais, 2010)

I.6- Cadre géologique

Lorsqu'on aborde le Sahara par le Nord, on sera surpris par la rapidité avec laquelle on passe des montagnes et plateaux de l'Atlas saharien 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 (notre zone d'étude), 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).

I.6.1- Structure géologique du bassin oriental

Le bassin oriental (Figure I.3) du Sahara, à couverture sédimentaire, d'âge paléozoïque au quaternaire 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 Tinrherth, 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 (Figure I.4). 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).

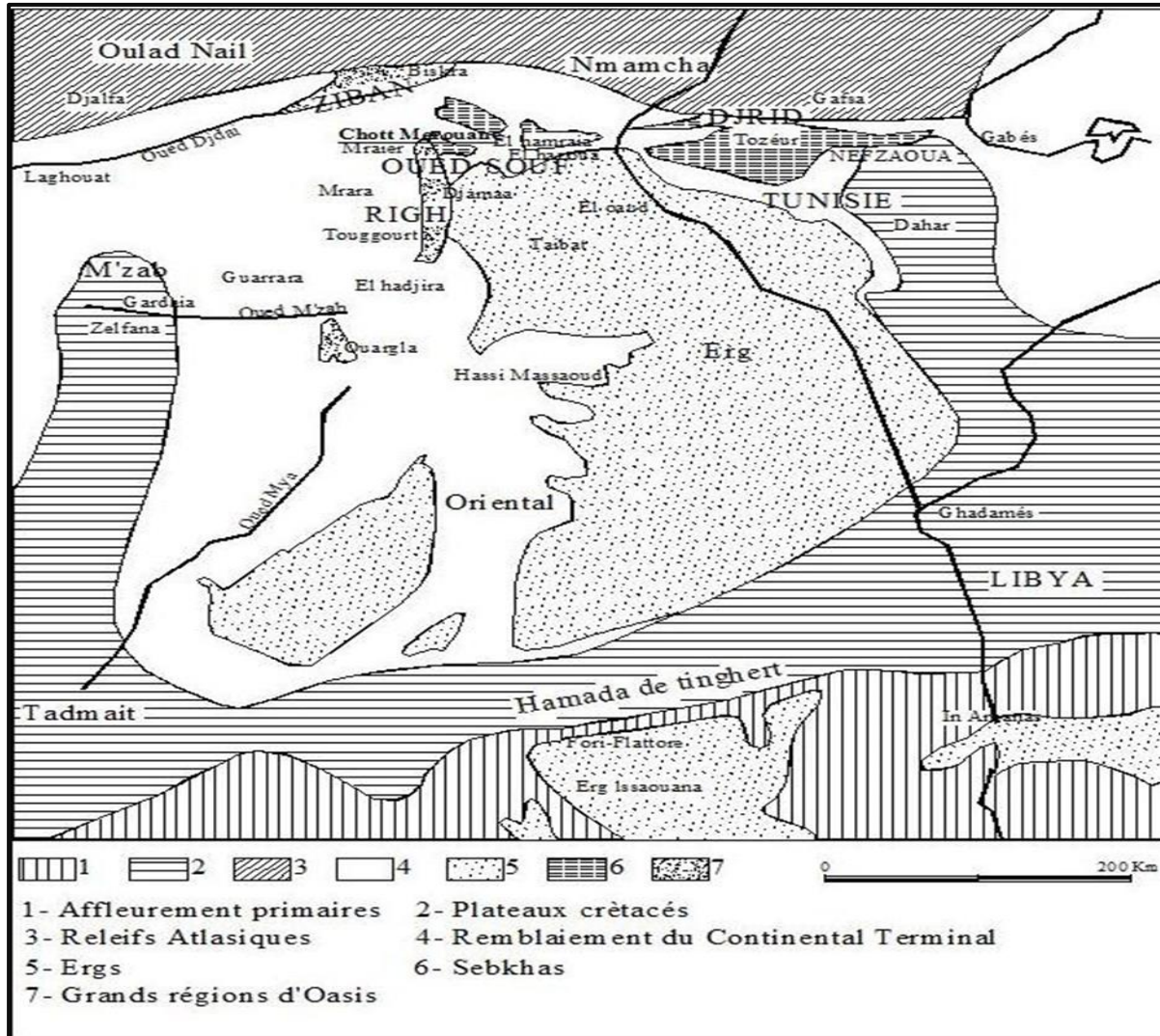


Figure I-3: Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1978)

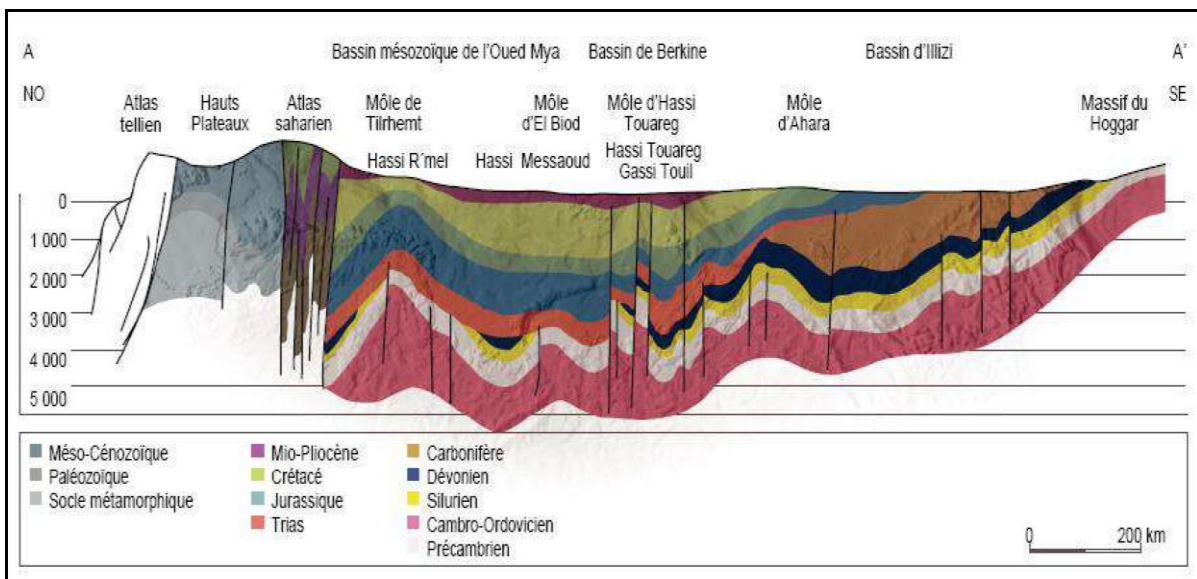


Figure I-4: Coupe géo-structurale transversale du Sahara algérien (WEC, 2007)

I.6.2- Litho-stratigraphie

La carte géologique ne fait apparaître qu'une couverture horizontale de terrains tertiaires, et de dépôts détritiques quaternaires. La litho-stratigraphie est plus ou moins complète, elle n'est connue que grâce aux forages profonds d'exploration pétrolière et hydraulique (Figure I.5,6).

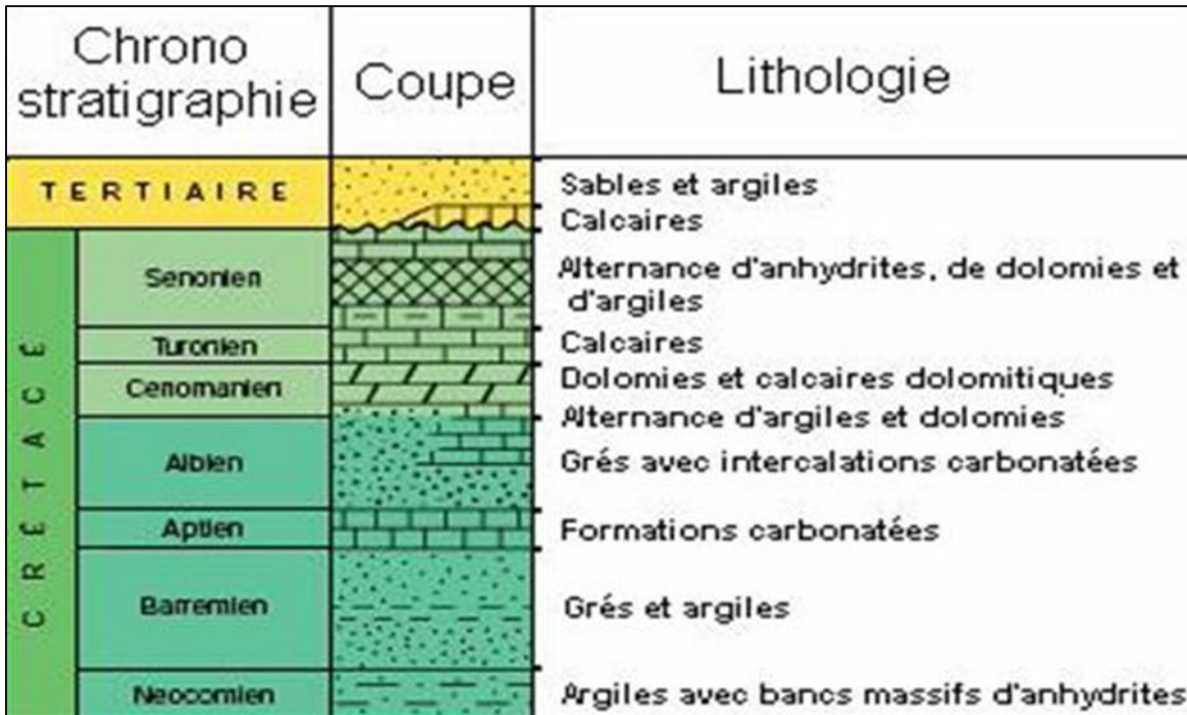


Figure I-5: Colonne stratigraphique synthétique du Sahara Nord-Est septentrional algérien (Sonatrach et Schlumberger, 1990)

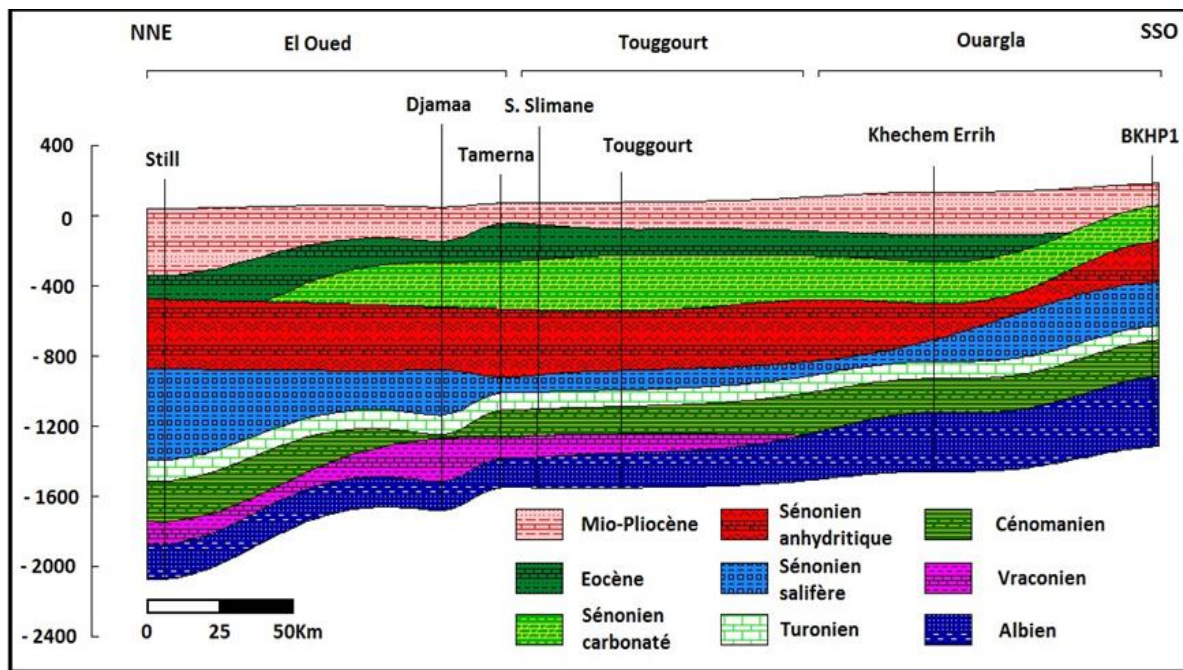


Figure I-6: Coupe géologique synthétique de la zone d'étude (Houari, 2012)

I.6.2.1- 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 se sont produits entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien (Fabre, 1976).

I.6.2.2- Le Vraconien

Le Vraconien est le terme de passage entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomaniens argilo-carbonaté (base du Complexe Terminal). Il est représenté d'une alternance irrégulière de niveaux argileux 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. (Fabre, 1976).

I.6.2.3- 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. (Fabre, 1976).

I.6.2.4- Le Turonien

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

I.6.2.5- 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.

I.6.2.6- L'Éocène

On distingue deux ensembles différents du point de vue lithologique, à la base :

L'Éocène 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'Éocène 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).

I.6.2.7- Le Mio-Plio-Quaternaire

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

Dans Région de Ouargla On remarque par l'analyse de cette coupe (Figure I.7) l'abondance des formations carbonatées (calcaire, dolomie), l'absence du Paléogène (Paléocène, Éocène et Oligocène) au Sud de la région (Berkaoui), une homogénéité des couches, une stratification quasi horizontale.

I.6.3- Tectonique régionale

Au cours du Secondaire, le Sahara oriental algérien 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 '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 plateforme saharienne :

- Les mouvements de l'Éocène moyen à supérieur, sont bien nets, la phase du Miocène inférieur qui succède et donne naissance au Tell et aux Aurès, (Fabre, 1976).
- Enfin, la phase plio-quadernaire qui s'insère avec les précédentes dans la phase alpine ; d'où l'apparition des fractures de direction Est-Ouest, formant 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 culminants « monts des Aurès » et au Sud les points les plus affaissés. (Fabre, 1976).

I.6.4- Paléogéographie

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

- L'existence d'une plateforme très régulière sur laquelle les moindres variations du niveau de la mer provoquent 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'Éocène et la régression définitive de la mer s'accompagne de bouleversements importants.
 - L'érosion enlève une partie des calcaires du Sénonien et l'Éocène.
 - 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 déposent 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'Éocène inférieur, la mer recouvre toujours le Sahara oriental, c'est le dépôt des calcaires à Nummulites.
- Durant l'Éocène moyen et supérieur, les sédiments marins de l'Éocène inférieur sont peu à peu remplacé 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'Éocène.
- À la fin de l'Éocène, le Sahara oriental se présente sous l'aspect d'une plateforme calcaire émergée qui sera exposée à l'érosion durant tout l'Oligocène.
- Au Mio-pliocène, suite à l'épirogenèse 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 tertiaire et quaternaire que le Sahara oriental a pris la configuration que nous lui connaissons aujourd'hui.

I.7- Contexte hydrogéologique

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS), (Figure I.5) 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, sa réserve est estimée à 31.000×10^9 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 d'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). 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 cénomanienne. 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).

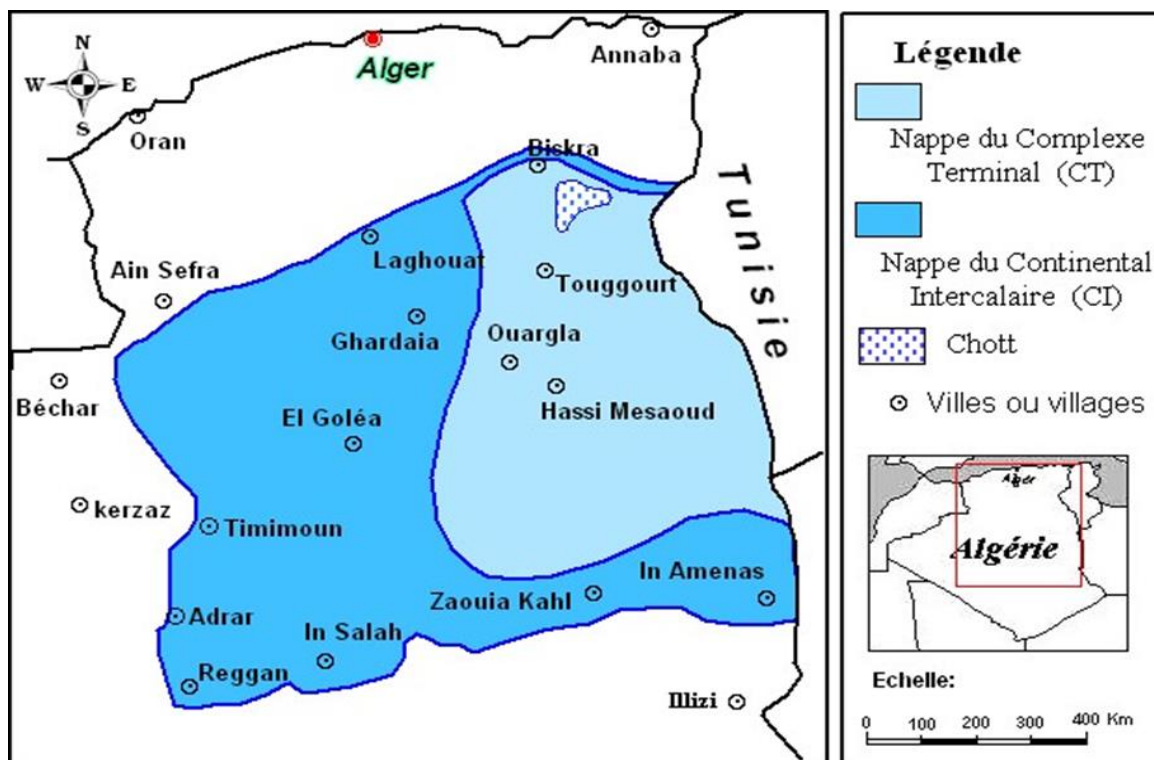


Figure I-7: Délimitation géographique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)

I.7.1- Le Continental Intercalaire (CI)

Selon 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, 1972 ; Fabre, 1976). Il occupe les formations sableuses et argilo gréseuses du Néocomien, Barrémien, Aptien, et de l'Albien (Cornet, 1964, 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 m³/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 m³/s (Cornet, 1964) et 8.5 m³/s (Margat, 1990).

La carte piézométrique de référence du Continental Intercalaire (Figure I.10), établie, à l'état stationnaire (peu ou pas influencée par les pompages), sur la base des études antérieures (Cornet, 1964, UNESCO, 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'Ain Tawargha.

Les failles de la dorsale d'Amguid (Figure I.9) sont à l'origine d'un drainage verticale, préalablement signalé, des eaux du CI vers la nappe du CT (Guendouz, 1985 ; Guendouz et al, 1992; Moulla et al, 2002; Edmunds et al, 2003; Guendouz et al, 2003; Guendouz et al, 2006).

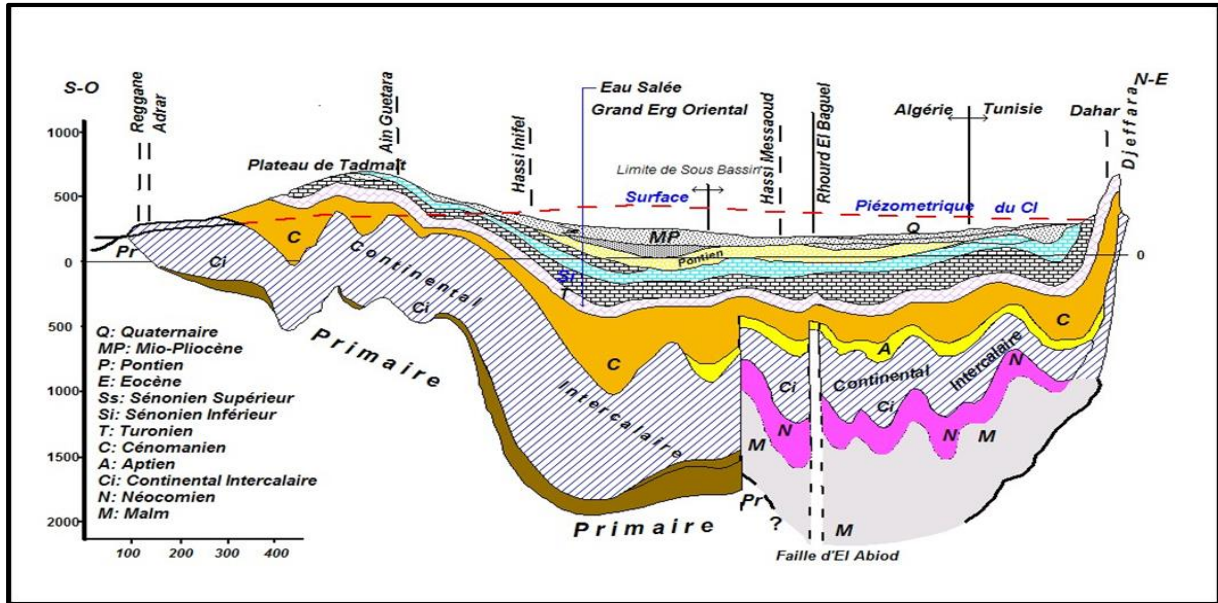


Figure I-8: Coupe hydrogéologique de SASS (UNESCO, 1972)

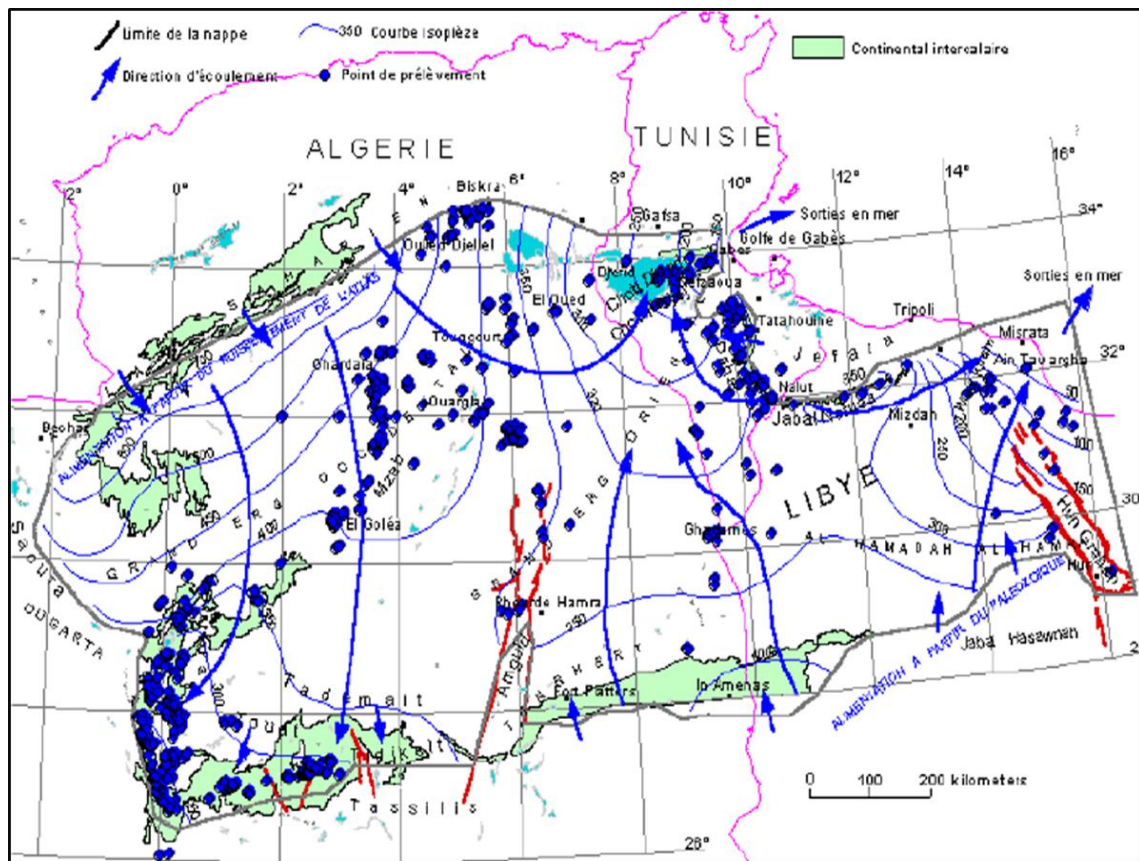


Figure I-9: Carte piézométrique de référence du CI (OSS, 2003)

I.7.2- Le Complexe Terminal (CT)

Il est noté dans l'étude OSS (2003) 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 regroupe 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, Éocène et Mio-Pliocène sont évidentes sur l'ensemble du bassin, à l'exception de la région des chotts où l'Éocène 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 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-tunisien.
- À l'Est, le long du flanc oriental du Dahar.
- Au Sud, sur les plateaux de Tinrhert et de Tademaït.
- À l'Ouest, sur la dorsale du 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 Cuhe, (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 (Figure I.12) 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 Jebel Nafusa au Nord-Est.
- Les zones d'exutoire sont principalement centrées sur les Chotts algéro-tunisien et sur le Golfe de Syrte.

L'écoulement de cette nappe se produit (Figure I.12) :

- À 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 tous 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), (Hadj Ammar et al, 2020). 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 perméable appartenant à un des systèmes aquifères ou en relation directe avec un des aquifère sahariens (Dubief, 1953).

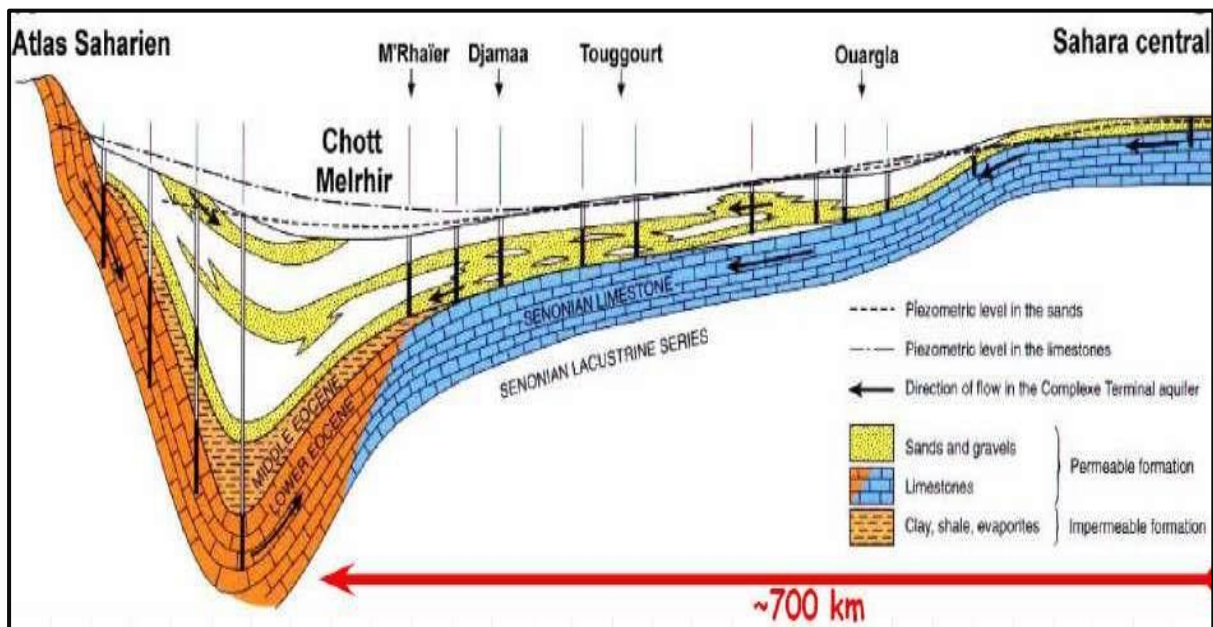


Figure I-10: Coupe hydrogéologique transversale du CT (UNESCO, 1972) modifiée par Edmunds et al, 1997)

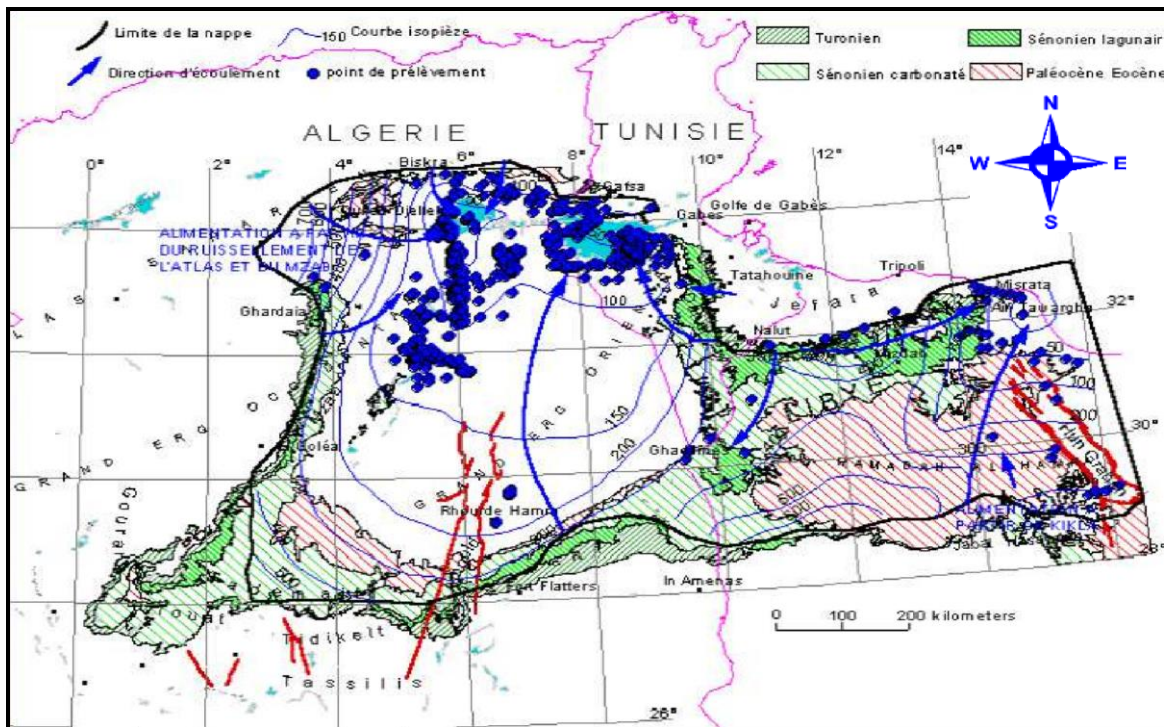


Figure I-11: Carte piézométrique de référence du CT (OSS, 2003)

I.8- Conclusion

Notre zone d'étude faite 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 et notablement inférieures aux évaporations potentielles annuelles 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.

Notre zone d'études 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.

Géologiquement, notre zone 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. Trois formations géologiques contiennent les nappes d'eau du SASS ; l'Albien gréseux et sableux (CI), le Sémonien lagunaire et carbonaté et le Mio-Pliocène sableux et argileux. Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) regroupe deux énormes réservoirs d'eaux souterraines ; le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Chapitre II :

Matériel et méthodes

II.1- Introduction

Dans le présent chapitre, notre intérêt se focalise sur les matériels utilisée et les méthodes suivies pour étudier l'évolution du chimisme des eaux en fonction de la lithologie le long du sens présumé d'écoulement des eaux de la nappe (mesure in situ, méthodes d'analyses physico-chimiques des eaux et outil informatique).

II.2- Échantillons d'eaux

Neuf (09) échantillons d'eau de la nappe du Mio-Pliocène et de la nappe du sénonien du complexe terminal ont été prélevés pendant mars 2024 à l'échelle de Ouargla dans des bouteilles en polyéthylène de volume de 1500 ml, les flacons ont été bien rincés à l'eau du forage lui-même, et égouttés puis remplis par l'eau à analyser puis Ils ont été transportés au laboratoire. Par ailleurs, d'autres données analytiques sont issues de la littérature (Guendouz et al, 2003).

L'emplacement des échantillonnés étaient dans les régions du Sud de Ouargla, Hassi Messaoud jusqu'à Ghassi-Touil et vers le Nord de Ouargla de Touggourt jusqu'à Mghaier comme montre le carte ci-dessous (Figure II.1).

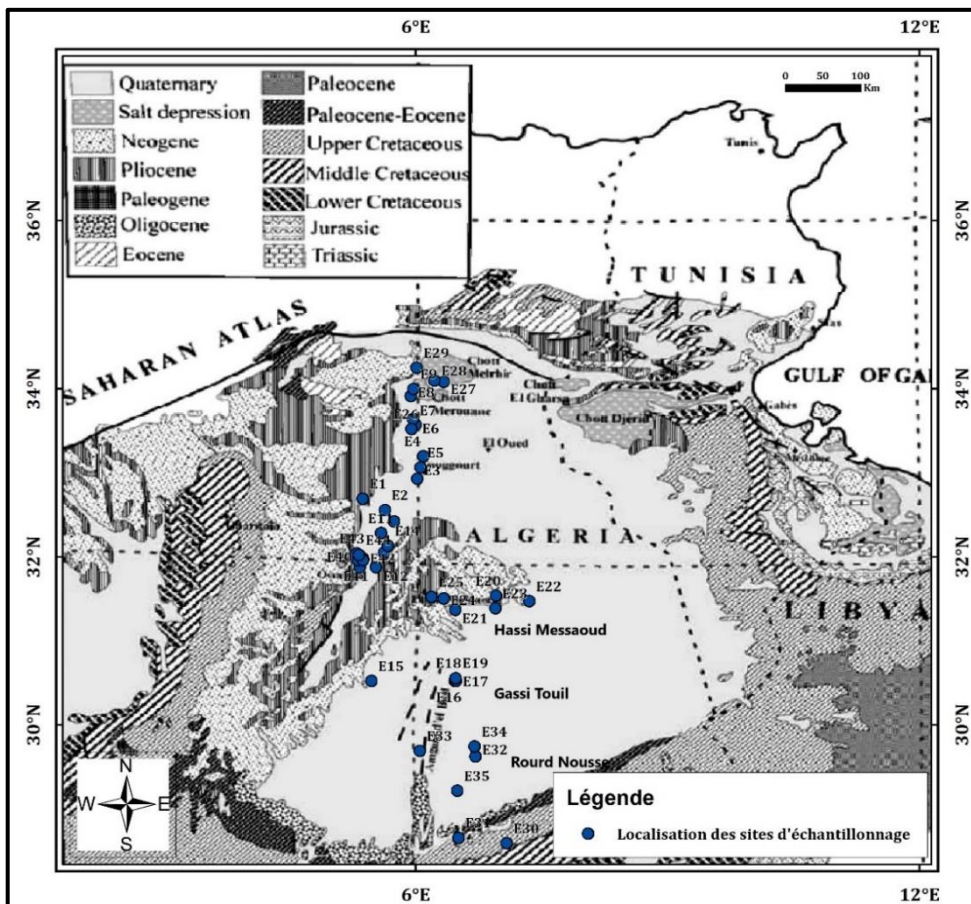


Figure II-1: Carte des emplacements des points d'échantillonnage d'eau

II.3- Outil informatique

II.3.1- AqQA :

Rassemble toutes les mesures qui justifient et documentent les analyses. AqQA examine et vérifie l'analyse. Le but est d'assurer, dans le contexte des analyses en ligne, une garantie de qualité cohérente et la validation des valeurs analytiques mesurées, enregistrées continuellement par des organismes.

II.3.2-Diagramme :

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.

II.3.3-Phreeqc v.3

L'étude géochimique a été effectuée par simulation à l'évaporation naturelle (température de l'échantillon), en utilisant le logiciel thermodynamique chimique, Phreeqc.v.3. Le calcul de l'indice de saturation ($IS = \log(Q) / \log(K_{ps})$) des minéraux dissous dans l'eau a été mené en utilisant la loi de Debye-Hückel.

II.3.4- ArcGIS

ArcGIS est un système complet qui permet de collecter, organiser, gérer, analyser et communiquer et diffuser des informations géographiques. C'est avec ce logiciel qu'on a pu réaliser les cartes d'emplacements des échantillons d'eau.

II.4- 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.

II.4.1- Le pH et température

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.

II.4.2- La conductivité électrique (CE)

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

II.5- Analyses au laboratoire

L'analyse des éléments majeurs a été effectuée au laboratoire de centre de recherche scientifique (laboratoire de la géologie du Sahara) et au laboratoire de l'algérien des eaux (ADE), tandis que les éléments en traces ont été analysés par un spectromètre de masse au Crapc.

II.5.1- L'analyse des éléments majeurs**II.5.1.1- Dosage de magnésium par méthode titrimétrie à l'EDTA :****• Principe :**

Titration par complexométrie des ions des magnésiums avec une solution aqueuse de sel disodique d'acide éthylène-diamine tétra-acétique (EDTA) à un Ph de 10. L'indicateur utilisé est le noir érichrome T, qui donne une couleur rose en présence des ions magnésiums. Lors du titrage avec l'EDTA la solution vire au bleu.

• Réactifs :

- EDTA, solution titrée à 0.01 mol/l
- Solution tampon PH 10.

❖ Matériels

- Burette de 25 à 50 ml utilisée pour l'EDTA ;
- Matériel courant de laboratoire : fioles, pipettes, béchers.

❖ Mode opératoire :

Prélever une prise d'essai de 25 ml de l'échantillon, ajouter 2 ml de la solution tampon (C) et une pincée d'indicateur NET (d). bien mélanger, la solution doit se colorer en rose. Chauffer la solution à 60°C pendant quelques minutes. Titrer immédiatement avec la solution d'EDTA (b). En versant lentement jusqu'au virage au bleu, noter le volume de l'EDTA au virage le couleur ne doit plus changer avec l'ajout d'une goutte supplémentaire de la solution d'EDTA.

❖ Calculs

La teneur en Magnésium, exprimée en mg/l, est donnée par l'équation :

$$\text{Mg}^{2+} = \frac{V2 * C1 * A * 1000 * F}{V0}$$

Avec :

C1 : concentration, exprimée en mole par litre, de la solution EDTA, soit 0.05

V0 : est le volume, en millilitres, de la prise d'essai, soit 25 ml.

V2 : est le volume, en millilitres, de la solution d'EDTA, utilisé pour me dosage

A : est la masse atomique du calcium 24g

F : facteur de dilution.

II.5.1.2- Dosage des carbonates et bicarbonates

❖ Principe :

Les carbonates n'existent qu'à $\text{pH} > 8.3$, et les bicarbonates si $4.4 < \text{pH} < 8.3$ il est facile de savoir au cours d'un dosage acidimétrique doublé d'une mesure de pH , à quel moment ces ions sont encore ou non présents dans l'échantillon.

❖ Réactifs :

- Solution acide chlorhydrique HCL 0.02N.
- Solution rouge de méthyle 0.1 %.

❖ Mode opératoire :

- Prélever une prise d'essai de 10 ml de la solution à titrer.
- Ajoutez deux gouttes de rouge de méthyle 0.1% mélangez bien la solution jusqu'à ce qu'elle se colore en jaune.
- Préparez une solution d'acide chlorhydrique de concentration connue. La concentration dépendra de la concentration de la solution à titrer et du volume attendu de l'acide chlorhydrique nécessaire pour atteindre le point de virage. Vous pouvez utiliser une burette pour ajouter l'acide chlorhydrique à la solution à titrer.
- Titrez immédiatement la solution en ajoutant de l'acide chlorhydrique lentement jusqu'à ce que la solution vire au rose. Le point de virage est le moment où la couleur de la solution change de jaune à rose.
- Notez le volume d'acide chlorhydrique au point de virage.

❖ Calculs

La teneur en bicarbonates, exprimée en mg/l, est donner par l'équation :

$$\text{HCO}_3^- = \frac{[\text{HCL}] * 61000 * \text{VHCL}}{\text{VPE}}$$

VPE : volume de la prise d'essai.

V : volume de HCL versé

II.5.1.3- Dosage de sulfates :

❖ Principe :

La méthode gravimétrique présentée est basée sur le principe de faire précipiter les sulfates sous formes de de sulfates de baryum par le chlorure de baryum.

❖ Réactif :

- Solution de chlorure de baryum à 0.05
- HCL 0.5 M

❖ Matériel :

- Filtres sans cendres.
- Entonnoirs
- Etuve de séchage
- Béchers de 250 ml bain-marie appareil de filtration sous vide pipette jaugé

❖ Mode opératoire :

- Prélever 10 à 50 ml de l'eau à analyser et transférer dans un Erlenmeyer de 250 ml.
- Ajouter 0.5 ml HCL 0.5 M.
- Porter a douce ébullition à 60-80°C dans un bain-marie ou sur bain de sables (20min).
- Faire précipiter les sulfates à chaud en ajoutant aux gouttes à gouttes à la pipette de la solution de chlorure de baryum. Quand il ne se forme plus de précipités, ajouter quelques gouttes de chlorure de baryum en excès.
- Laisser les béchers dans le bain-marie à 70-80°C jusqu'à ce que les sulfates soient complètement déposés.
- Filtrer le surnageant en utilisant du pipier filtres sans cendre.
- Transférer le filtre contenant le précipité dans une capsule tarer.
- Faire sécher à l'étuve à 105°C pendant 5 heures
- Ensuite dans un dessiccateur, peser après refroidissement.

❖ Calculs

La teneur en sulfates, exprimée en mg/l, est donnée par l'équation :

$$[\text{SO}_4^{2-}] = \frac{B * 0.142 * 1000 * A}{V}$$

Avec :

B : poids de BaSO₄ précipité.

V : volume de la prise d'essai.

A : inverse du facteur de dilution

II.5.1.4- Dosage de calcium par méthode titrimétrique à l'EDTA :**❖ Principe :**

Titration des ions calcium avec une solution aqueuse de l'EDTA à un pH compris entre 12 et 13. L'indicateur utilisé est le murexide, qui forme un complexe rose avec le calcium.

Lors du titrage, l'EDTA réagit avec les ions calcium, l'indicateur vire alors de la couleur rose à la couleur violette.

❖ Réactif :

- Hydroxyde de sodium, solution 2N
- EDTA, solution titrée 0.01 mol/l
- Murexide (indicateur)

❖ Mode opératoire :

- Prélever une prise d'essai de 25 ml de l'échantillon, ajouter 2 ml de la solution d'hydroxyde 2N et une pincée d'indicateur (murexide). Bien mélanger le tout.
- Titrer avec la solution d'EDTA, en versant lentement.
- Le virage est atteint lorsque la couleur devient nettement violette.
- La couleur ne doit plus changer avec l'ajout d'une goutte supplémentaire de la solution d'EDTA.



Photo II-1: Point de virage

❖ Calculs :

La teneur en calcium, exprimée en mg/l, est donnée par l'équation :

$$Ca^{2+} = \frac{V1 * C1 * A * 1000 * F}{V0}$$

C1 : concentration, exprimée en mole par litre, de la solution EDTA, soit 0.05.

V0 : est le volume, en millilitres, de la prise d'essai, soit 25 ml.

V1 : est le volume, en millilitres, solution d'EDTA, utilisé pour le dosage.

A : est la masse atomique du calcium(40.08g)

F : facteur de dilution.

II.5.1.5- Le Chlorure

Méthode potentiométrique :

❖ Matériel :

- Pipette 1ml
- Pipette 2ml
- Fiole 100ml

- Bécher 100ml
- Barreau aimanté

❖ **Réactifs :**

- Acide nitrique (HNO₃) à 65% massique
- AgNO₃ de 0.1 mol l⁻¹

❖ **Appareil utilisé :**

- Titron plus 848 de marque Metrom ;
- Une électrode combinée de type argent massif ;
- Un réactif (AgNO₃) de concentration 0.1 mol l⁻¹

❖ **Mode opératoire**

On met dans un bécher de 100 ml :

- 100 ml de solution ont utilisé fiole jaugée 100 ml
- 2 ml d'acide nitrique 2M
- On provoque la réaction entre AgNO₃ et la solution. Le potentiomètre s'arrête au point d'équivalence qui correspond au taux des Ag nécessaire à neutraliser les Cl. Et la lecture se fait directement sur le potentiomètre (équipé d'un clavier de dialogue pour choisir la prise d'essai et l'unité de volume).



Photo II-2: appareil Titron plus 848

II.5.1.6- Le sodium et le potassium

La détermination des teneurs en potassium et en sodium se fait directement par l'appareil photométrie de flamme, en suivant les étapes suivantes :

- Laissez l'instrument se réchauffer pendant 5 à 10 minutes.
- Alimentez l'instrument en eau distillée.
- Sélectionnez l'élément Na^+ ou K^+ en tournant le sélecteur.
- Tirez légèrement le bouton et ajustez l'affichage à 0.
- Aspirez la solution étalon la plus concentrée et ajustez la lecture à environ 250-300.
- Aspirer de l'eau distillée - l'instrument doit lire 0.
- Aspirez l'eau distillée pendant au moins 5 minutes pour nettoyer le système.



Photo II- 3 : l'appareil photométrie de flamme

II.6-Conclusion

Afin de concrétiser une étude se rapportant à l'hydrogéochimie de la nappe de complexe terminal du Sahara septentrional algérien, du Sud de Ouargla, Hassi Messaoud jusqu'à Ghassi-Touil et vers le Nord de Ouargla de Touggourt jusqu'à Mghaier ; de l'amont vers l'aval (zones des chotts), nous avons prélevé neuf échantillons en plus données analytiques sont issues de la littérature (Guendouz et al, 2003). 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 (Phreeqc v.3, Diagramme, ArcGis...) ont été utilisés pour représenter les paramètres sus indiqués et en tirer des renseignements particuliers.

Chapitre III :

Hydrogéochimie de la nappe du CT

III.1- Introduction

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

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.

Le présent chapitre, a été consacré en premier lieu, à la présentation des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux, puis on a essayé de modéliser ces résultats par l'emploi de multiples approches (statistique, hydrochimiques et géochimiques) et par normalisation des cations majeurs des éléments en traces et métaux lourds afin de ressortir les faciès chimiques et de comprendre et interpréter les processus d'acquisition du chimisme de des eaux de la nappe du complexe terminal.

III.2- Résultats d'analyses physico-chimiques

III.2.1- Les paramètres physico-chimiques

III.2.1.1- 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 qu'on a mesurées variant entre 7,058 et 7.536 ; pendant que celles mesurées par Guendouz et al, 2003 variant entre 6.52 et 8. Les valeurs de pH (Tableau III.1 annexes) mesurées paraissent proches de la neutralité à légèrement alcalins.

III.2.1.2- 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 géothermique).

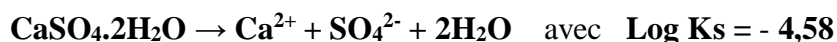
Les températures de nos échantillons dépassent légèrement celles recommandées par l'OMS (22-25 °C), avec une valeur minimale de 22,1 °C et une valeur maximale de 26,4 °C ; Alors que les températures mesurées par Guendouz et al, 2003 dépassant fortement les normes de l'OMS est ce variant entre 22.5 °C et 33.6 °C l'origine de ces variations doit revenir à l'un des facteurs cités ci-dessus (Tableau III.1 annexes).

III.2.1.3- La conductivité électrique CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$)

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 33.6 °C, elle augmente avec la température et s'exprime en $\mu\text{S.cm}^{-1}$. Les valeurs des conductivités des eaux dépassent les normes ($>1000 \mu\text{S.cm}^{-1}$) de potabilité de l'OMS (normes mises à jour en 2006), voir une valeur minimal 2130 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et une valeur maximal 9460 $\mu\text{S.cm}^{-1}$; de mêmes que les valeurs des celles obtenues par Guendouz et al, 2003 qui dépassent aussi les normes de l'OMS est se variant entre 10300 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ et 1555 $\mu\text{S.cm}^{-1}$ (Tableau III.1 annexes). Elles présentent une évolution remarquable le long du sens d'écoulement des eaux.

III.2.2- Les éléments majeurs**III.2.2.1- Les sulfates SO_4^{2-} (mg/l)**

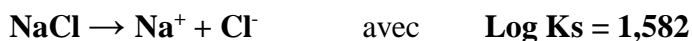
La présence des ions sulfatés dans l'eau est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses, selon l'équation :



Les concentrations des sulfates observées dans nos échantillons dépassent les normes (500 mg/l) dans certaines zones, elles se variant entre 320 mg/l et 1529 mg/l et de même pour les concentrations obtenues par Guendouz et al, 2003 qui oscillants entre 321mg/l et 1990mg/l (Tableau III.1 annexes). Elles présentent une augmentation nette le long du sens d'écoulement des eaux de la nappe.

III.2.2.2- Les chlorures Cl^- (mg/l)

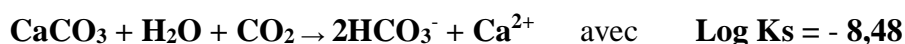
L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution de l'Halite (NaCl), qui se fait selon la relation suivante :



Cet élément présente des concentrations très élevées 1886 mg/l et avec une valeur minimale de 409.9 mg/l dans nos données, par ailleurs elle présente de concentration variant entre 164 mg/l et 2500mg/l dans les données de Guendouz et al, 2003 et son augmentation est nettement remarquable le long du sens d'écoulement des eaux (Tableau III.1 annexes).

III.2.2.3- Les bicarbonates HCO_3^- (mg/l)

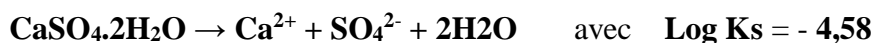
La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées (calcaire. Dolomite...etc.) par des eaux chargées en gaz carbonique. L'équation de dissolution est donnée comme suit :



Les bicarbonates dans les eaux du complexe terminal du Sahara Est septentrional algérien présentent des teneurs dépassant les normes de potabilité (30 mg/l) dans toutes les points qu'on a échantillonnés, les concentrations oscillent entre 97,6 mg/l et 268,4 mg/l. Pendant que les données de Guendouz et al, 2003 montrant des concentrations moins élevées et se variant entre 58 mg/l et 159mg/l (Tableau III.1 annexes)

III.2.2.4- Le calcium Ca^{2+} (mg/l)

La présence des ions Ca^{2+} dans les eaux est liée principalement à la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) ainsi que les formations gypseuses (CaSO_4) selon les équations suivantes :



Le calcium présente des concentrations oscille entre 96,19 mg/l et 168,3 mg/l dans nos échantillons, par contre il présente des concentrations plus fortes les données de Guendouz et al, 2003 est oscillant entre 67.9mg/l et 719mg/l, on remarque que ces concentrations augmentent en allant de l'amont vers l'aval (Tableau III.1 annexes).

III.2.2.5- Le magnésium Mg^{2+} (mg/l)

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



Cet élément présente des concentrations variant entre 72.91mg/l et 384mg/l dans nos échantillons ; par ailleurs les données de Guendouz et al, 2003 montrant des concentrations oscillant entre 23.5mg/l et 630mg/l, cet élément présente une augmentation remarquable en fonction du sens d'écoulement des eaux de la nappe (Tableau III.1 annexes).

III.2.2.6- Le sodium Na^+ (mg/l)

L'existence de cet élément est liée, essentiellement, à la dissolution de l'Halite. En effet, le sodium, de même que pour les chlorures, affiche des teneurs élevées dans les eaux du complexe terminal, avec des valeurs variant entre de 209mg/l et 1232mg/l dans les points qu'on a échantillonnés ; pendant que leur teneur varie entre 172mg/l et 1450mg/l dans les données de Guendouz et al, 2003, Cet élément lui aussi présente une évolution remarquable (Tableau III.1 annexes).

III.2.2.7- Le potassium K^+ (mg/l)

Il provient essentiellement, des évaporites, en l'occurrence la Sylvite (KCl), ou par suite d'altération des argiles potassiques, et même par infiltration des eaux d'irrigation riches en cet élément suite à l'utilisation abusive des engrais agricoles.



Les teneurs en potassium observées dans les eaux de complexe terminal dévoilent des valeurs relativement élevées, en dépassant les normes (12 mg/l), et oscillant entre 15mg/l et 66.6mg/l dans nos échantillons ; par ailleurs elle varie entre 9.3mg/l et 50.3mg/l dans les données de Guendouz et al, 2003 mais contrairement aux autres éléments, le potassium ne présente pas de grande évolution, de même que le sodium le potassium montre aussi une augmentation avec le sens de écoulement (Tableau III.1 annexes).

III.2.2.8- 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 III.1 annexes), sont relativement moyennes, quelques fois, elles dépassent les normes (50 mg/l) ce qui laissent penser à l'infiltration de l'azote végétal à partir des zones d'infiltrations des eaux d'irrigation.

III.2.3- Les éléments en traces**III.2.3.1- Le Strontium (Sr)**

L'existence de cet élément est liée, essentiellement, à la dissolution de célestite et de la strontianite. Elle montre des teneurs élevées dans les eaux du complexe terminal, avec des valeurs variant entre de 933 µg/l et 14000 µg/l, cet élément présente une augmentation remarquable en fonction du sens d'écoulement des eaux de la nappe du CT (Tableau III.1 annexes).

III.2.3.2- Le fluor (F)

Le fluor provient essentiellement de la dissolution de fluorite (CaF₂), Cet élément présente des concentrations variant entre 0.55mg/l et 2.75mg/l dans nos échantillons, de même que le strontium le fluor montre aussi une augmentation avec le sens d'écoulement des eaux de la nappe du CT (Tableau III.1 annexes).

III.2.3.3- Le lithium (Li)

Le lithium provient essentiellement de la dissolution des formations évaporitiques, leurs teneurs observées dans les eaux de complexe terminal dévoilent des valeurs relativement élevées et varie entre 40 µg/l et 175 µg/l. Il montre des enrichissements relatifs de l'amont vers l'aval de la nappe (Tableau III.1 annexes).

III.2.3.4- Le bore (B)

Cet élément présente des concentrations variant entre 150µg/l et 720µg/l dans nos échantillons, on remarque que ces concentrations augmentent en allant de l'amont vers l'aval (Tableau III.1 annexes).

III.2.3.5- Le Baryum (Ba)

Le Baryum provient essentiellement de la dissolution de la barytine (BaSO₄). Cet élément présente des faibles concentrations variant entre 13 µg/l et 24 µg/l. Il montre des appauvrissements relatifs de l'amont vers l'aval de la nappe (Tableau III.1 annexes).

III.2.3.6- Brome (Br)

Cet élément présente des faibles teneurs oscillants entre 0.11 µg/l et 2.96µg/l dans les eaux de la nappe du complexe terminal, on remarque que ces concentrations diminuent en allant de l'amont vers l'aval (Tableau III.1 annexes).

III.2.3.7- Iode (I)

L'iode provient essentiellement de la dissolution des formations évaporitiques, leurs teneurs observées dans les eaux de complexe terminal dévoilent des valeurs relativement faibles et varient entre 0.037µg/l et 0.163µg/l. Il montre des appauvrissements relatifs de l'amont vers l'aval de la nappe (Tableau III.1 annexes).

III.3- Faciès chimique des eaux**III.3.1- Par le diagramme de Piper**

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

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

Selon les diagrammes de Piper (Figure III-1, III-2 et III-3) les faciès chimiques des eaux du Complexe Terminal de notre région d'étude montrent la présence de quatre types de faciès chimique :

- Faciès chlorurés calcique ou magnésien.
- Faciès sulfatés calcique ou magnésien.
- Faciès chloruré sodique.
- Faciès sulfaté sodique.

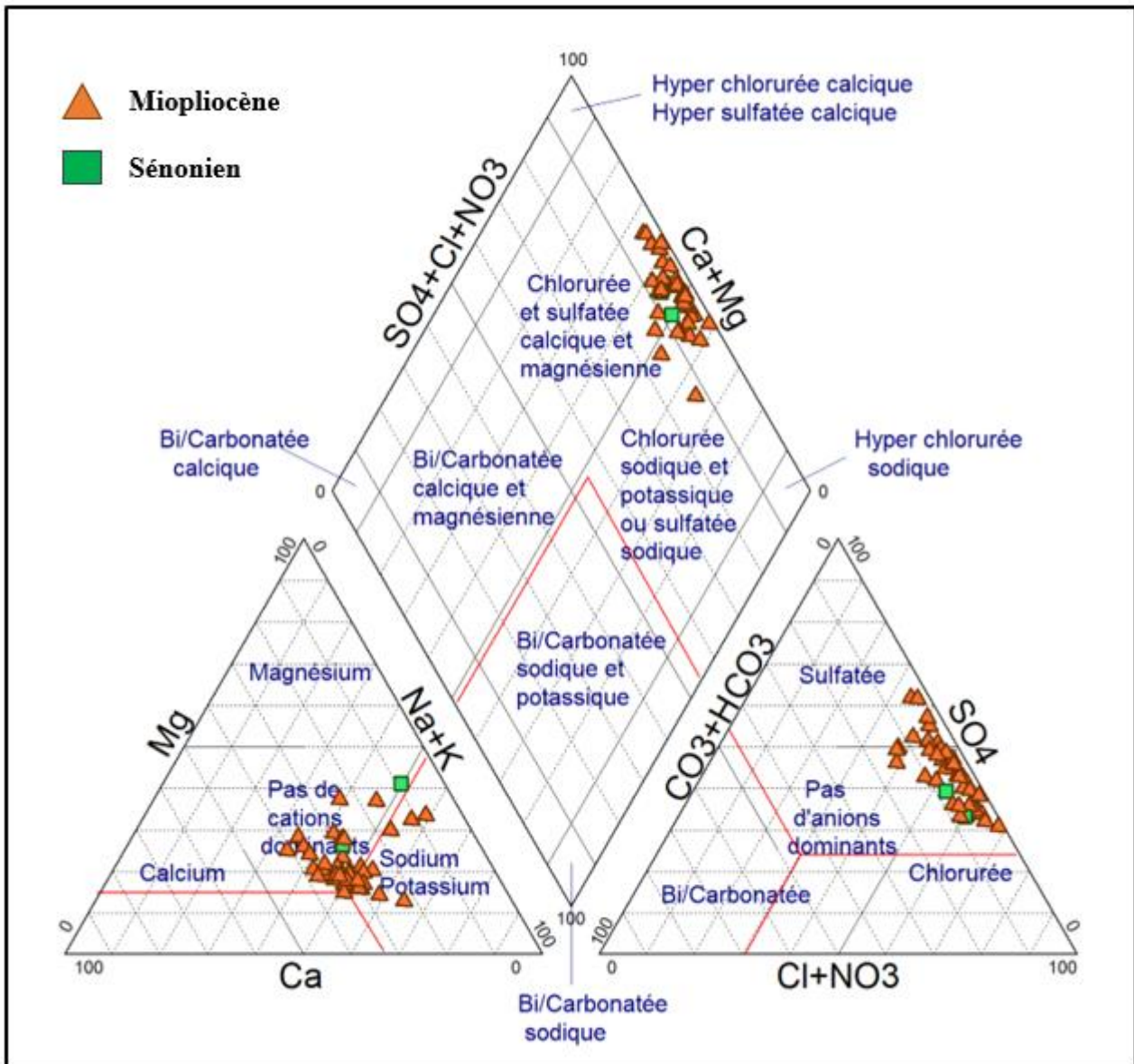


Figure III- 1 : Faciès chimiques des eaux du Complexe Terminal de la région d'étude

III.3.2- Par les rapports caractéristiques

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 $r\text{Na}^+/\text{rCa}^{2+}$ versus $r\text{SO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$, puis $r\text{Na}^+/\text{rMg}^{2+}$ versus $r\text{SO}_4^{2-}/\text{rCl}^-$ pour expliquer l'évolution des faciès géochimiques rencontrés dans le diagramme de Piper.

Le rapport $r\text{SO}_4/\text{rCl}$ (Figure III-4 et Figure III-5) 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 $r\text{Na}/\text{rCa}$ (Figure III-4) montrant des valeurs supérieures à 1, indique un enrichissement en sodium, ou inférieur à 1, indique un enrichissement en

calcium, par conséquent les faciès dominant est chloruré sodique avec un taux de 66% , suivi par les faciès sulfaté sodique qui représente presque de 30% au détriment du faciès sulfatés calcique qui n'affecte que les trois échantillons (E1,E2 et E3) entre hadjira et Touggourt (Blidet Oumar).

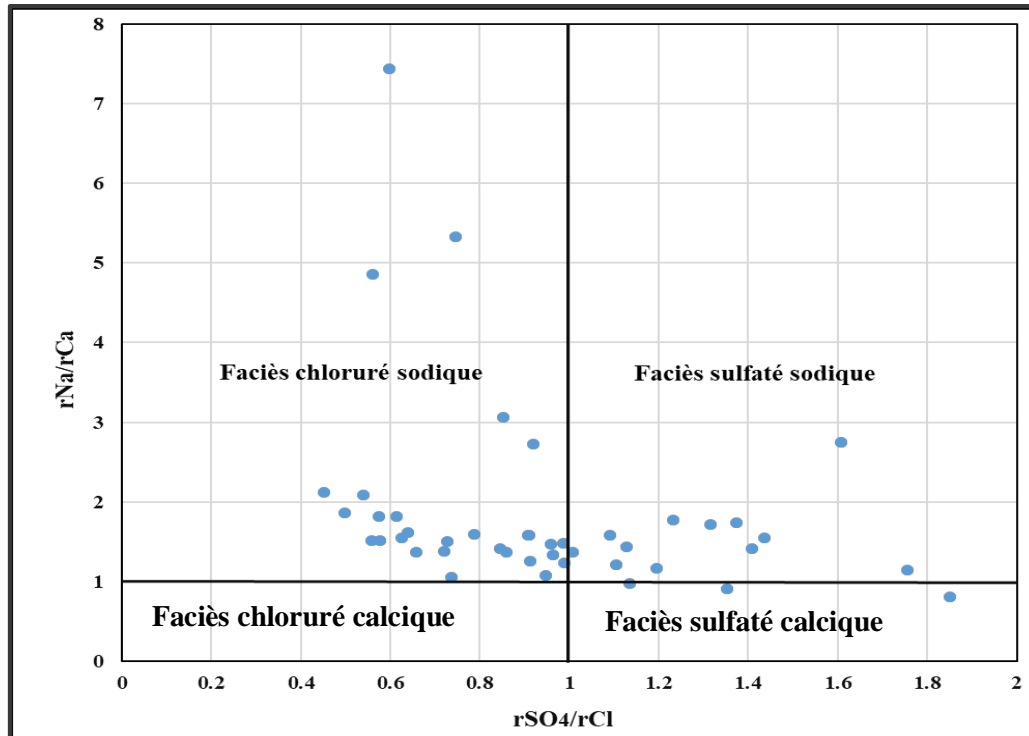


Figure III-2: Faciès chimiques des eaux par la relation rNa/rCa vs rSO_4/rCl

Le rapport rNa/rMg (Figure III.5) montrant des valeurs supérieures à 1, indique un enrichissement en sodium, ou inférieur à 1, indique un enrichissement en magnésium, la dominance du faciès sodique est nettement remarquable.

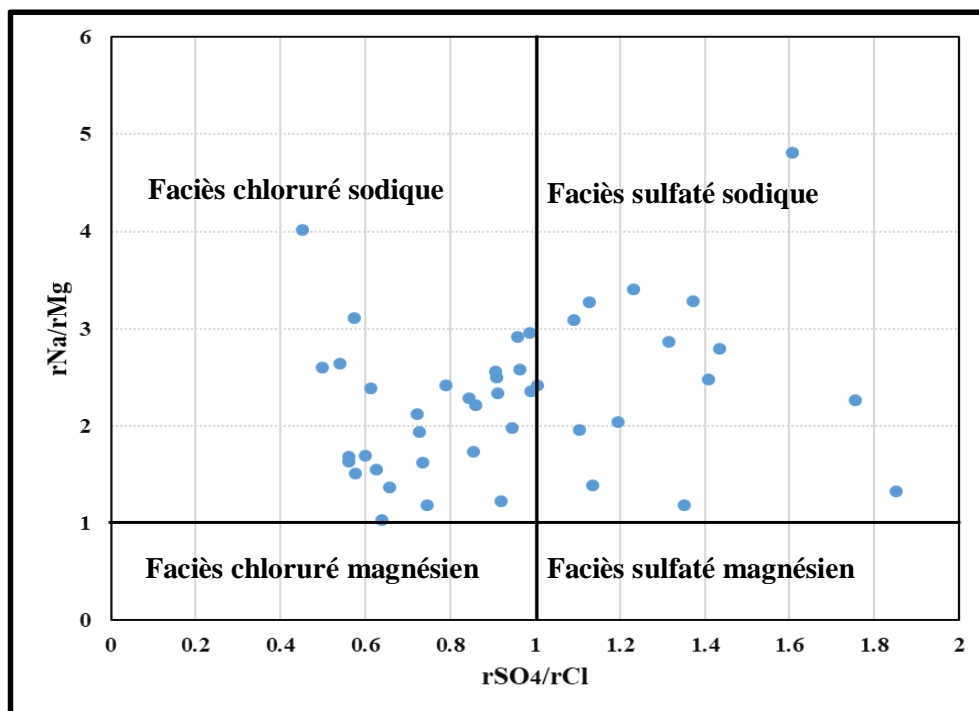


Figure III-3: Faciès chimiques des eaux par la relation rNa/rMg vs rSO_4/rCl

Pour la plupart des échantillons de notre région, le faciès dominant est celui chloruré sodique et sulfaté sodique par rapport à celui chloruré calcique et sulfaté calcique, en l'absence total d'un faciès magnésien. Ceci peut s'expliquer par un probable échange de base entre l'eau et les argiles de l'aquifère maintenant le sodium a des teneurs élevées

III.4- Les processus d'acquisition du chimisme

III.4.1- Altération des silicates

Les silicates sont les éléments minéraux les plus répandus de l'écorce terrestre. Du fait de cette abondance, leur altération constitue la source la plus importante d'approvisionnement d'éléments dissous des eaux.

L'hydrolyse des silicates est facilitée par les eaux d'infiltration riche en CO_2 dissous.

Le contact de ces eaux agressives avec les minéraux silicatés va entraîner la libération des cations les plus mobiles (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+}), de la silice et de l'aluminium suite au processus d'hydrolyse. La destruction des minéraux primaires par dissolution incongruente (plagioclase, minéraux ferromagnésiens,...) engendre l'apparition d'une séquence d'argile de néoformation telles que la montmorillonite, la kaolinite, la gibbsite, en fonction de leur teneur de bases (Hamadi et al., 1997).

III.4.2- Equilibre entre l'eau et les minéraux néoformés

L'étude d'équilibre eau- roche a été réalisée grâce au diagramme d'activité de korjinski.

La teneur en silice dissoute (SiO_2) augmente en concentration de l'amont vers aval selon les zones présumées d'écoulement et passe de 13.26 mg/l au Rhourde Nouss, St. pompage au Nord-est de Ouargla pour arriver à 15.62 mg/l au forage El Alia 1987 à El-Meghaïer.

Par ailleurs, dans le diagramme d'activité $\text{Log H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})$ vs $\text{Log}(\text{Na}^+/\text{H}^+)$ qui représente graphiquement les domaines de stabilité de : l'albite, la kaolinite, la gibbsite et la silice amorphe ; cela a permis de situer les eaux en fonction de leurs teneurs en Na^+ , en silice et de leur pH (Figure III-6), montre que la plupart des échantillons soient en équilibre vis-à-vis de kaolinite, et uniquement le forage de Hassi-Messaoud Sagra, S1(E24) qui présente en pH alcalin de 7.63 qui se trouve proches de la limite de kaolinite albite. Ceci suggère que l'hydrolyse partielle de l'albite donne de la kaolinite et les ions de Na^+ (45.45% des échantillons montrent un rapport $\text{Na}/\text{Cl} > 1$) (équation 1) ce qui permet un phénomène d'échange de base entre les cations des minéraux (Na^+) et les ions H^+ (agissant comme un acide faible) de l'eau. Ce qui permet d'expliquer l'augmentation de concentration en sodium (Na^+) en fonction du sens d'écoulement des eaux de la nappe.



Albite + eau \leftrightarrow Kaolinite + Acide silicique + ions

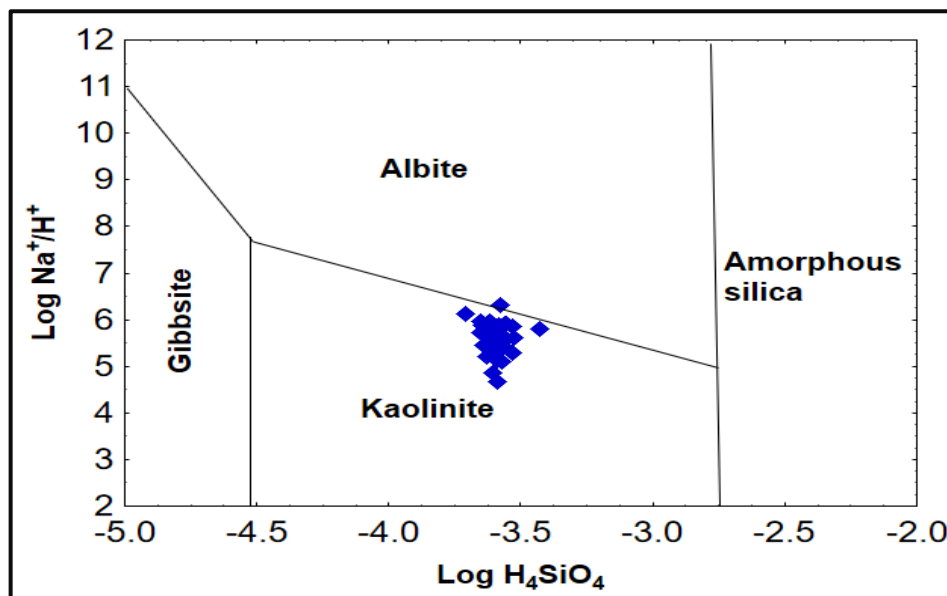


Figure III-4: diagramme d'activité $\text{Log H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})$ vs $\text{Log}(\text{Na}^+/\text{H}^+)$

Par ailleurs, le diagramme d'activité $\text{Log H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})$ vs $\text{Log Ca}^{2+}/(\text{H}^+)^2$ (Figure III-7) repr ente graphiquement les domaines de stabilité de : la kaolinite, le gibbsite, l'anorthite, le montmorillonite-Ca et le silice amorphus cela a permis de situer les eaux en fonction de leurs teneurs en Ca^{2+} , en silice et de leur pH, montre que tous les échantillons soient en équilibre vis-à-vis de kaolinite c'est-à-dire que l'hydrolyse est total.

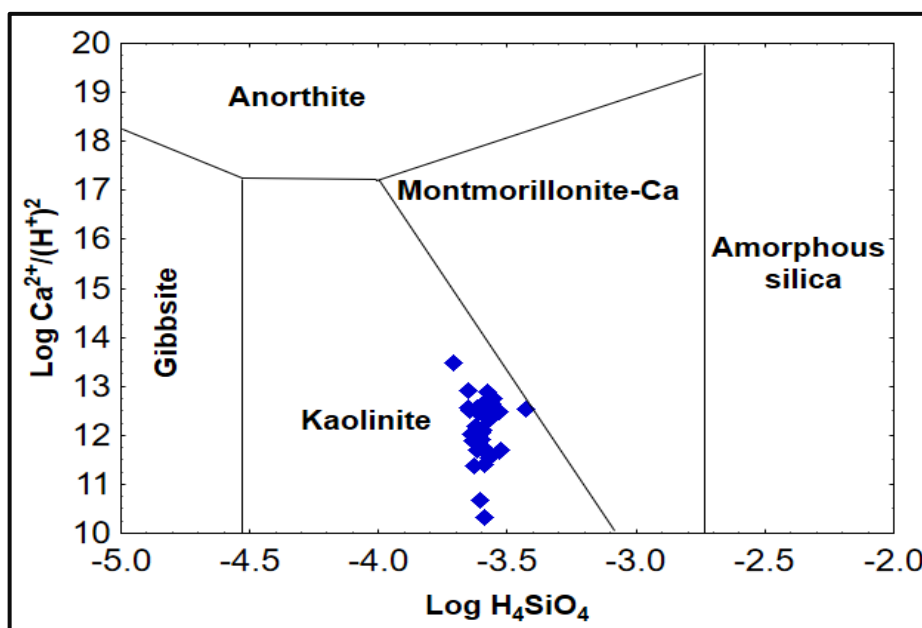


Figure III-5: diagramme d'activité $\text{Log H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})$ vs $\text{Log Ca}^{2+}/(\text{H}^+)^2$

Pendant que le diagramme d'activité $\text{Log H}_4\text{SiO}_4(\text{aq})$ vs $\text{Log}(\text{K}^+/\text{H}^+)$ (Figure III-8), repr ente graphiquement les domaines de stabilité de : la kaolinite, le feldspath-potassique (orthose), le gibbsite, l'anorthite, le montmorillonite-Ca et le silice amorphus cela a permis de situer les eaux en fonction de leurs teneurs en K^+ , en silice et de leur pH ; montre que trois échantillons E2, E24 et E25 sont en équilibre vis-a-vis le feldspath-potassique et les échantillons E4,E5,E7,E8,E9 et E11 sont a la limite d'équilibre feldspath-potassique (orthose) et la kaolinite, par ailleurs les plupart des échantillons sont en équilibre vis-à-vis de kaolinite, Ceci indique que l'hydrolyse partielle de feldspath-potassique (orthose) donne de la kaolinite et les ions de K^+ ( quation 2) ce qui permet aux d'échange de base entre l'eau et la matrice argileuses et qui permet d'autre part d'expliquer l'enrichissement de l'eau en potassium (K^+) lors de son trajet de l'amont vers l'aval.



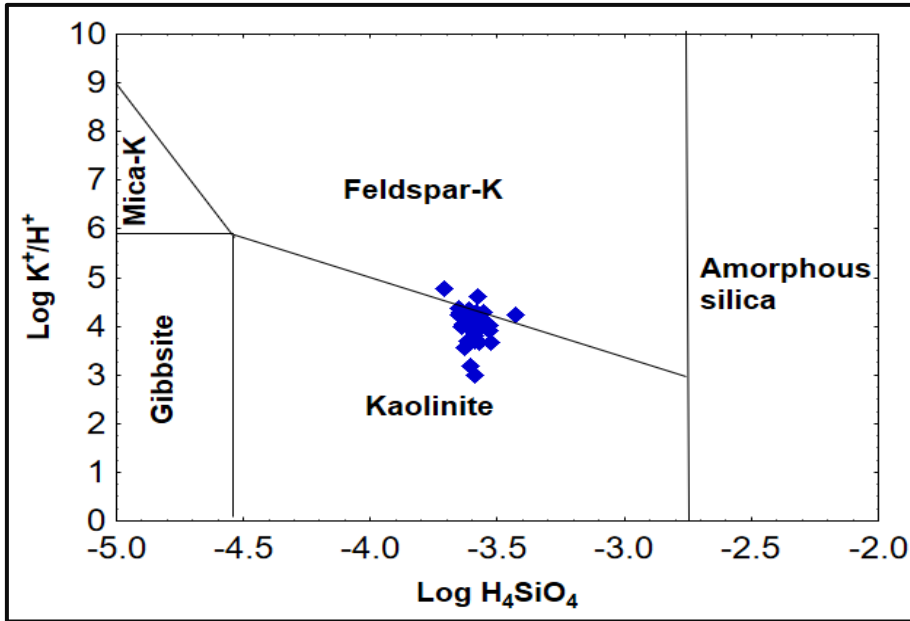


Figure III-6: diagramme d'activité Log H₄SiO₄(aq) vs Log(K⁺/H⁺)

Alors que le diagramme d'activité Log H₄SiO₄(aq) vs Log Mg²⁺/(H⁺)² (Figure III-9), repr ente graphiquement les domaines de stabilité de : kaolinite, gibbsite, anorthite, montmorillonite-Ca et amorphus silica cela a permis de situer les eaux en fonction de leurs teneurs en Mg²⁺, en silice et de leur pH, indique que toutes les échantillons soient en équilibre vis-à-vis de kaolinite, ceci sugg eres que l'hydrolyse est compl ete.

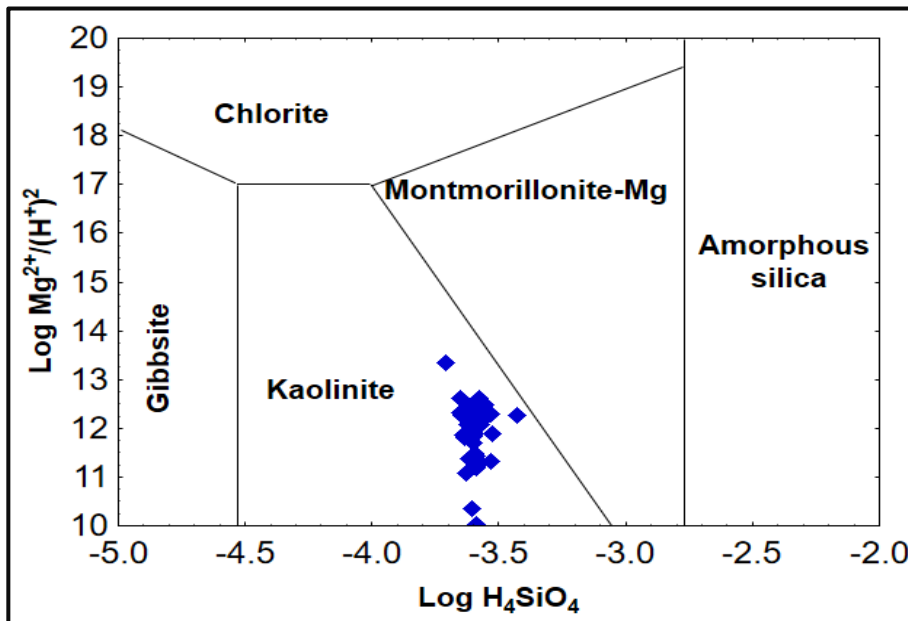


Figure III-7: diagramme d'activité Log H₄SiO₄(aq) vs Log Mg²⁺/(H⁺)²

III.4.3- Évolution des indices de saturation vis-à-vis des minéraux prépondérants

En utilisant la base de données thermodynamiques « Wateq4F » établie par Ball et Nordstrom (1991) et intégrée au logiciel PHREEQC, nous avons calculé l'indice de saturation des eaux de la nappe du Mio-Pliocène et du Sénonien pour les minéraux dominants. L'indice de saturation permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre (ou de déséquilibre) vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés de la roche réservoir (Maliki, 1993).

Les indices de saturation des minéraux prépondérants (évacués et carbonates) évoluent le long des sens d'écoulement des eaux de la nappe du Mio-Pliocène et du sénonien de notre région d'étude, pour illustrer cette évolution, pour les évaporites, on a choisi les sels sulfatés en l'occurrence, le gypse, l'anhydrite très solubles et précèdent les sels chlorurés dans l'ordre de précipitation, tandis que pour les sels chlorurés on s'est contenté de l'Halite.

Le graphique ci-dessous (Figure III-10) indique que les eaux de tous les forages échantillonnés sont légèrement sous-saturées à proches de l'équilibre vis-à-vis du gypse et de l'anhydrite et fortement sous-saturées vis-à-vis de l'halite avec une forte anomalie au niveau de région de sidi-slimane (E4) qui est proche de l'équilibre ce qui peut être expliqué par sa proximité du chott Marouane et par conséquent l'infiltration des eaux fortement chargées en sels. Les indices de saturation augmentent légèrement avec le sens d'écoulement des eaux du fait de l'enrichissement par les sulfates, le calcium, le magnésium et le sodium pour le gypse, l'anhydrite et par le sodium et les chlorures pour l'halite.

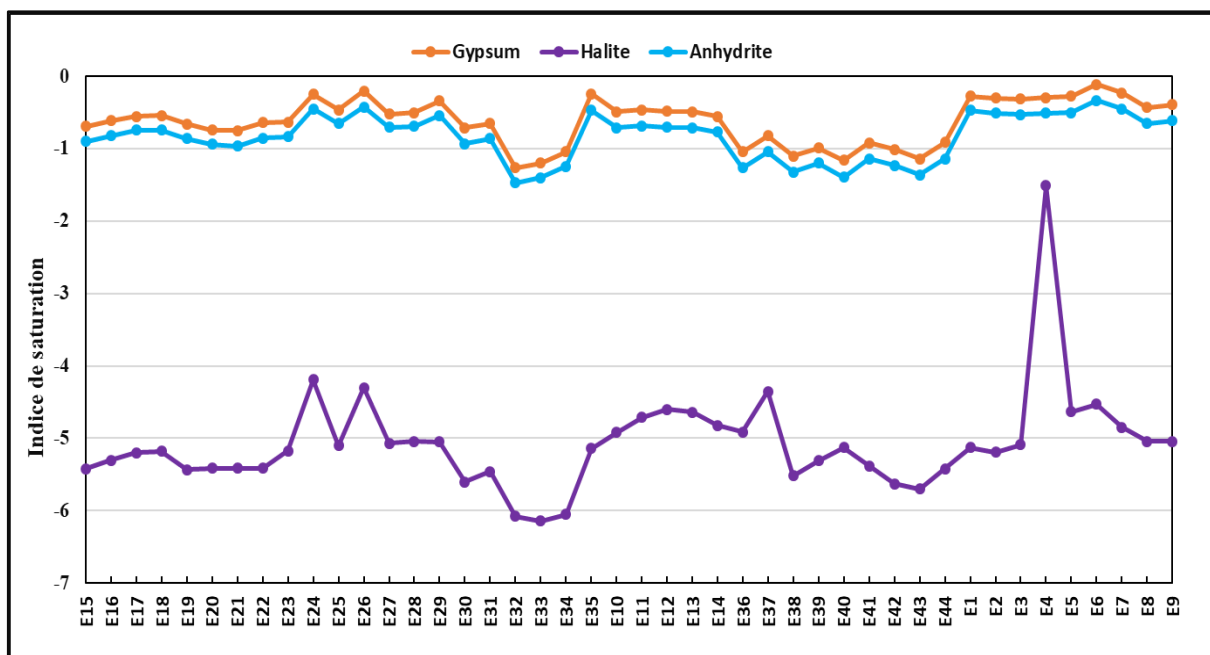


Figure III-8: Évolution des indices de saturation vis-à-vis le gypse, l'anhydrite et l'halite

Par ailleurs, pour les carbonates, on a choisi la calcite, l'aragonite, la dolomite avec le dioxyde carbonique dissous CO_2 , les graphiques ci-après (Figure III-11), indiquent que les eaux de tous les forages échantillonnés sont proche de l'équilibre a légèrement sursaturées vis-à-vis le calcite, l'aragonite et la dolomite, par contre elles sont sous- saturées vis-à-vis du CO_2 dissous. Les indices de saturation de l'aragonite, la calcite et la dolomite évoluent avec le sens d'écoulement des eaux vers la précipitation du fait de l'appauvrissement de ces dernières en calcium et en magnésium et la dissolution du CO_2 .

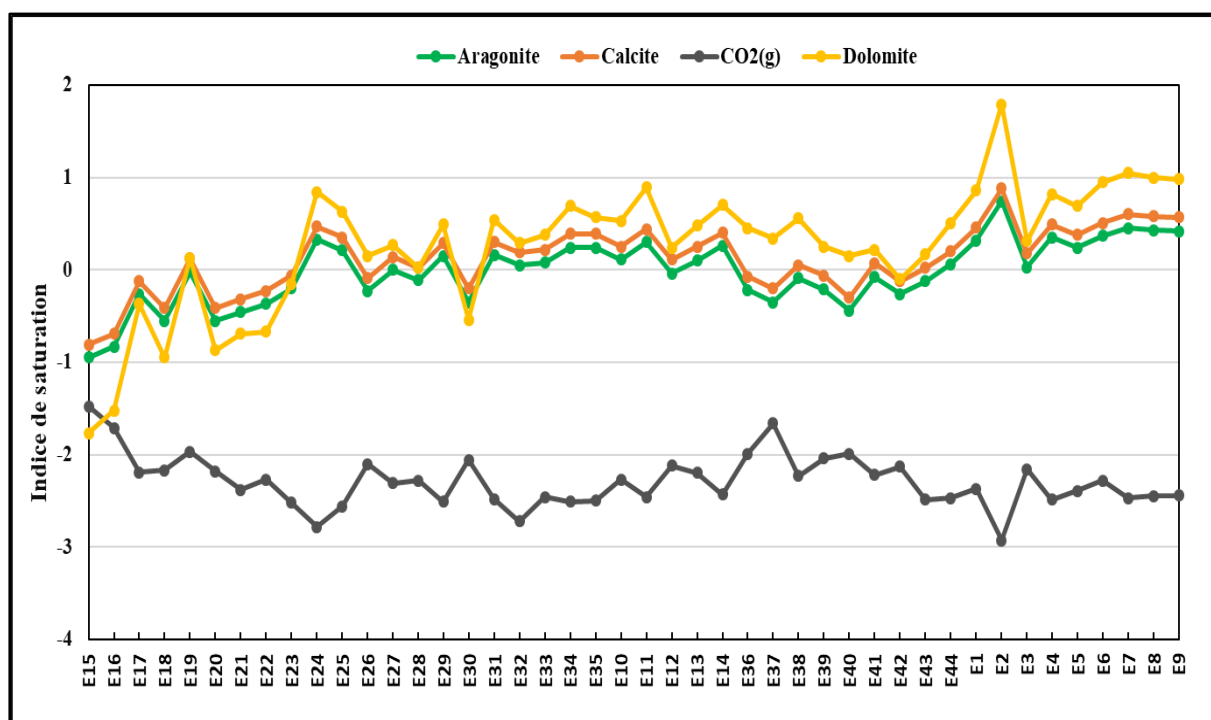


Figure III-9: Évolution des indices de saturation vis-à-vis le calcite, l'aragonite, la dolomite et CO_2

III.5- Apport des éléments traces

La figure du spectre (Figure III-10) des éléments chimiques dans des échantillons d'eaux de la nappe du CT a été normalisé au PAAS (Post-Archean Australian Shale) et UCC (Upper Continental Crust), la majorité des éléments sont normalisés au PAAS. Les éléments Fluor (F), Brome (Br), Iode (I), Lithium (Li) et Bore (B) sont normalisés au UCC.

Les valeurs sur le spectre sont en échelle logarithmique décimale, ce qui signifie que chaque unité sur l'échelle représente un facteur de 10.

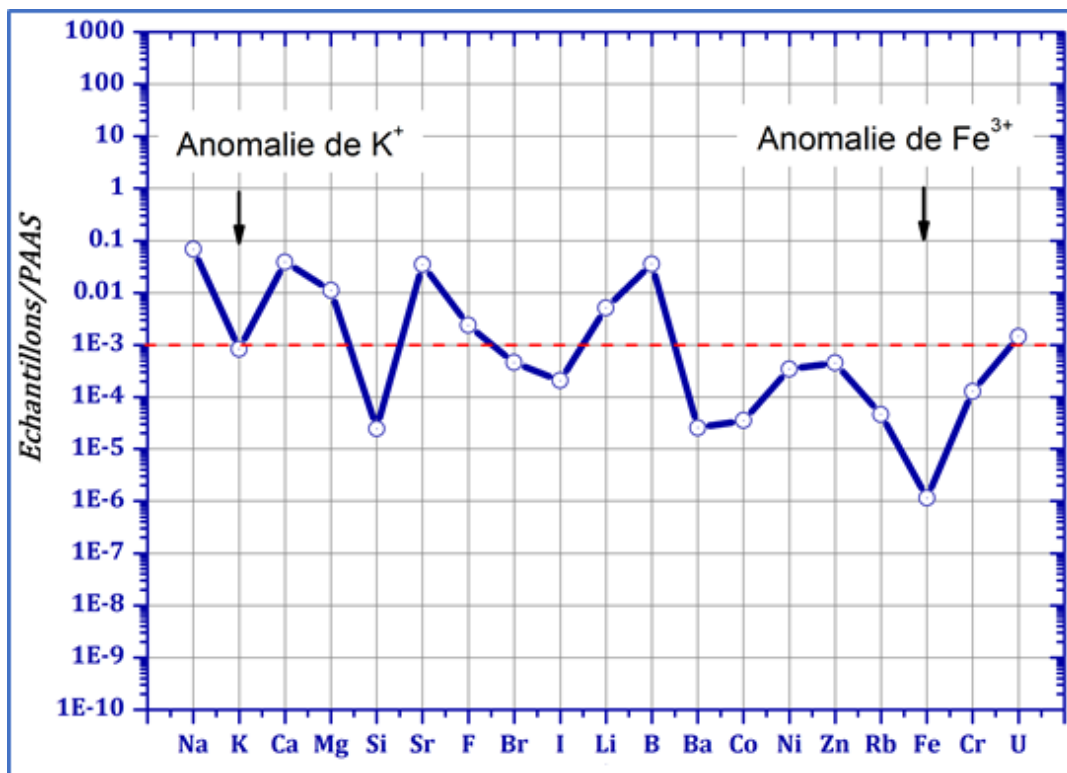


Figure III-10 : Signature géochimiques des éléments majeurs, en traces et métallique normalisés au PAAS et UCC dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal

Analyse des anomalies :

Nous observons que le potassium qui appartient à la catégorie des cations Antistockes d'après le diagramme de référence de Goldschmidt (1954), peu mobile et qui a peu d'attraction à la molécule d'eau donc peu hydraté lors de la mise en solution et possède la particularité de posséder une très faible charge, de sorte qu'il entre facilement dans de nombreuses structures minérales variées on peut le considérer comme référence d'enrichissement et d'appauvrissement afin d'interpréter nos résultats.

Il est évident que certains éléments tels que le Strontium (Sr) le fluor (F), le lithium (Li) et le bore (B) montrent des enrichissements relatifs de l'amont vers l'aval de la nappe, ce qui pourrait indiquer une dissolution de minéraux contenant ces éléments (Tableau III-2) en l'occurrence la célestite (SrSO_4), la strontianite (SrCO_3), la fluorite (CaF_2), ou d'une origine marine ancienne (Miocène). Le lithium est couramment présent dans les minéraux silicatés et son évolution montre qu'il augmente linéairement avec le F, Sr et B (Figure III-11) et peut être utilisé comme indicateur supplémentaire du temps de résidence et aux interactions eau-roche (Edmunds et al, 2003). Nous signalons que le comportement du lithium dans la nappe du CT semble le même que dans la nappe du CI.

�chantillons	Barite	Celestite	Fluorite	Strontianite
E1	-0.12	-0.2	-0.19	-0.76
E2	-0.07	-0.35	-0.36	-0.44
E3	-0.07	-0.31	-0.27	-1.08
E4	-0.05	-0.32	-0.11	-0.8
E5	-0.12	-0.28	-0.2	-0.87
E6	-0.02	-0.1	0.04	-0.74
E7	-0.03	-0.27	-0.01	-0.71
E8	-0.12	0.58	0	-0.71
E9	0.02	-0.42	0.13	-0.72
E10	-0.14	-0.51	-0.44	-0.76
E11	-0.09	-0.54	-0.54	-0.89
E12	-0.14	-0.57	-0.58	-1.24
E13	-0.04	-0.6	-0.64	-1.13
E14	-0.15	-0.64	-0.68	-0.96
E15	-0.17	-0.82	-1.4	-2.21
E16	-0.13	-0.72	-1.33	-2.08
E17	-0.13	-0.63	-1.35	-1.51
E18	-0.14	-0.62	-1.25	-1.79
E19	-0.15	-0.8	-1.45	-1.31
E20	-0.07	-0.53	-0.67	-1.49
E21	-0.07	-0.57	-0.62	-1.42
E22	0.12	-0.46	-0.48	-1.33
E23	0.03	-0.42	-0.65	-1.14
E24	0.03	0.3	-0.33	-0.87
E25	-0.15	-0.31	-0.31	-0.81
E26	-0.07	-0.21	-0.12	-1.35
E27	-0.31	-0.44	-0.23	-1.1
E28	-0.14	-0.43	-0.21	-1.22
E29	-0.13	-0.33	-0.07	-1
E30	0.02	-0.57	-0.91	-1.32
E31	-0.05	-0.48	-0.85	-0.81
E32	-0.11	-1.24	-1.38	-1.06
E33	-0.14	-1.45	-1.69	-1.32
E34	-0.1	-1.27	-1.6	-1.13
E35	0	-0.46	-1.51	-1.08

Tableau III-2: indices de saturation de Barite, de Celestite, de Fluorite et de Strontianite

L'appauvrissement relatif en Br et I, qui se trouvent en bonne corrélation avec le sodium ; respectivement (Na vs Br ; $R = 0.7884$; $p = 0.00000$) et (Na vs I ; $R = 0.5995$; $p = 0.0001$), peut-être lié à leur précipitation vers l'aval où les chlorures augmentent, car ils demeurent moins solubles que l'Halite. Cependant, le Baryum (Ba) ; son appauvrissement est probablement dû à la tendance de ces eaux à l'équilibre et à la précipitation vis-à-vis de la barytine ($BaSO_4$) en présence de sulfate, limitant sa concentration dans les eaux.

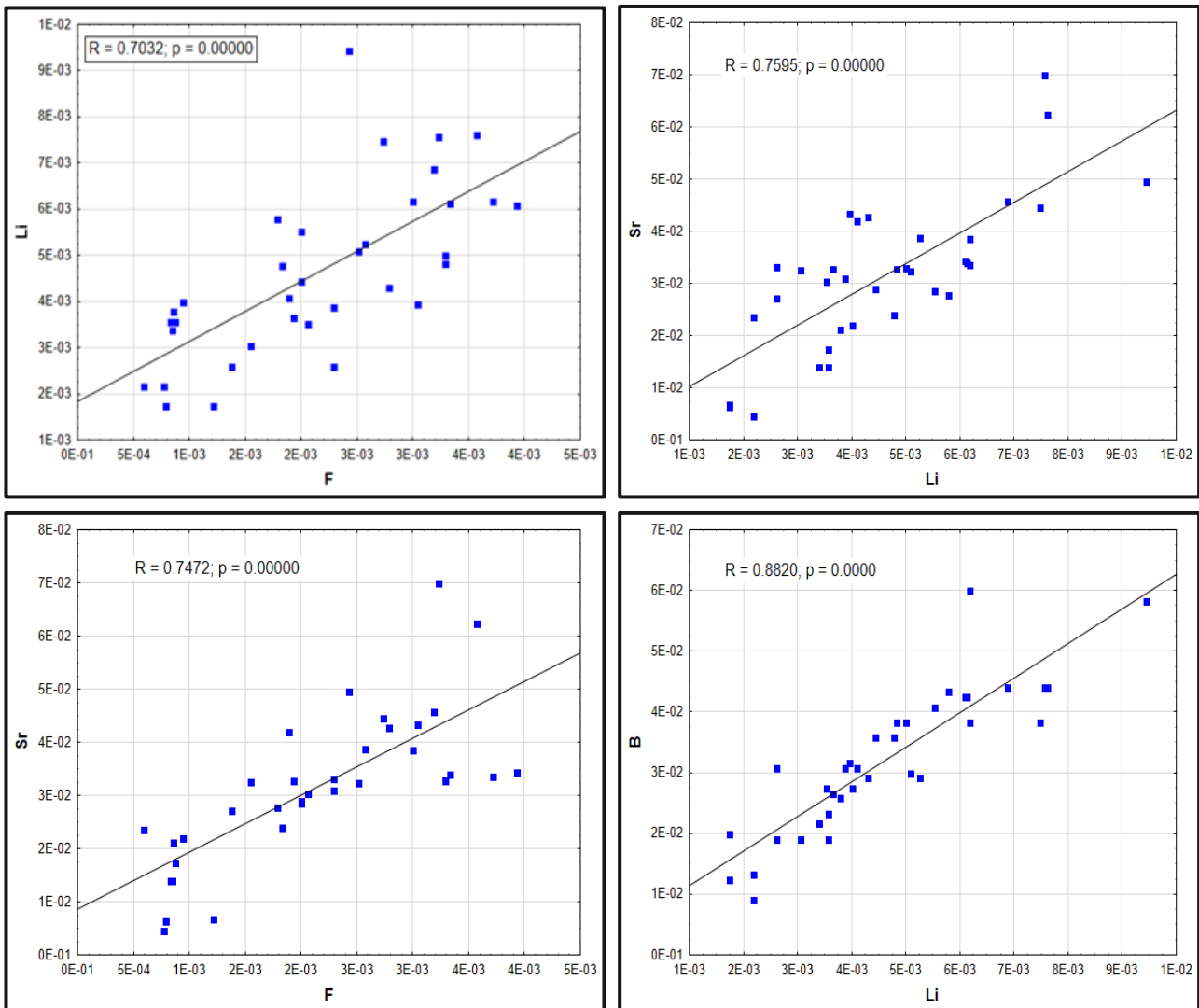


Figure III-11 : Corrélation entre les différents éléments en traces dans les eaux de la nappe du CT

Les métaux lourds montrent un appauvrissement notable et relatif et la présence de la forme oxydante du fer (Fe^{3+}) peut nous indiquer sur les conditions oxydantes de la nappe sauf que l'anomalie négative marquante du fer qu'on peut l'attribuer à la forte sensibilité du fer à la précipitation. Par ailleurs, nous pouvons constater l'appauvrissement des eaux en métaux lourds et par conséquent la

tendance générale des eaux de la nappe vers l'oxydation telle que la spéciation de ces métaux témoigne de la présence des formes oxydées de ces métaux (exemple. UO_2^+ , $\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{5-}$) (Tableau III-3).

Echantillons	UO_2^+	$\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3^{5-}$
E1	1.54e-17	1.994e-24
E2	6.546e-19	2.004e-24
E3	5.351e-17	1.009e-24
E4	8.177e-18	1.427e-24
E5	2.222e-17	2.147e-24
E6	3.554e-17	3.994e-24
E7	1.082e-17	2.463e-24
E8	6.479e-18	1.533e-24
E9	8.771e-18	2.114E-24
E10	2.499e-17	1.011e-24
E11	9.058e-18	1.695e-24
E12	6.528e-17	1.328e-24
E13	3.533e-17	1.547e-24
E14	1.084e-17	1.474e-24
E15	5.358e-15	2.089e-25
E16	3.179e-15	2.232e-25
E17	2.398e-16	6.872e-25
E18	9.168e-16	3.431e-25
E19	5.249e-17	1.321e-24
E20	5.133e-16	2.277e-25
E21	3.538e-16	3.093e-25
E22	2.039e-16	3.089e-25
E23	1.393e-16	5.976e-25
E24	2.064e-17	3.356e-24
E25	2.112e-17	1.335e-24
E26	7.507e-16	3.001e-24
E27	4.133e-17	7.526e-25
E28	8.297e-17	7.045e-25
E29	2.586e-17	1.429e-24

Tableau III-3: formes oxydées de l'uranium

L'allure du spectre des éléments, même avec des valeurs inférieures au PAAS et UCC, est significative dans le contexte de ces eaux anciennes et fortement minéralisées (avec des âges de 4000 ans à 40000 ans) (Guendouz et al, 2003). Les enrichissements en Na, Ca et Mg, Sr, B et Li témoignent de la dissolution prolongée des évaporites, tandis que les appauvrissements en, Fe et métaux lourds

indiquent des processus de précipitation sur une longue période. La stabilité des conditions géochimiques et redox contribue à un équilibre distinct et révélant les interactions complexes entre l'eau et les roches dans cet environnement ancien.

III.6- Conclusion

Les eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara Algérie, en contact avec une lithologie riche en évaporites. Les résultats obtenus par normalisation des cations majeurs des éléments en traces et métaux lourds montrent que le chimisme est gouverné essentiellement par la dissolution des formations évaporitiques qui confère aux eaux une minéralisation excessive. Avec la dominance des faciès chloruré sodique et sulfaté sodique.

Conclusion

générale

Conclusion général

L'approche adoptée dans ce travail est de se baser sur l'échantillonnage sur le terrain, l'analyse au laboratoire de géologie du Sahara (éléments majeurs) et le CRAPC (éléments en traces) mais au vu des difficultés rencontrées lors des analyses des éléments en traces nous nous sommes servi des données analytiques de Guendouz et al 2003 afin de pallier à ce manque.

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, 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.

Du point de vue tectonique Les failles de la dorsale d'Amguid-Albiod sont à l'origine d'une drainance verticale des eaux du CI vers la nappe du CT.

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.

De point de vue hydrogéochimique, Les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) de bassin oriental sont en contact avec des formations lithologiques riches en évaporites, les résultats obtenus par normalisation des cations majeurs des éléments en traces et métaux lourds montrent que le chimisme est gouverné essentiellement par la dissolution des formations évaporitiques qui confère aux eaux une minéralisation excessive, augmentent également le long du sens d'écoulement des eaux. Les enrichissements en Na (passe de 172mg/l en amont à 1450mg/l en aval), Ca (atteint ses plus hauts teneurs en aval 719mg/l) et Mg (augmente avec le sens d'écoulement est atteint 630mg/l en aval), Sr (leur concentration maximal est 14000 µg/l en aval), B (varie de 150µg/l en amont à 720µg/l en aval) et Li (passe de 40 µg/l en amont à 175 µg/l en aval) témoignent de la dissolution prolongée des évaporites, tandis que les appauvrissements en, Fe et métaux lourds indiquent des processus de

précipitation sur une longue période. La stabilité des conditions géochimiques et redox contribue à un équilibre distinct et révélant les interactions complexes entre l'eau et les roches dans cet environnement ancien. Par ailleurs, la dominance des faciès chloruré sodique et sulfaté sodique est nettement remarquable dans les eaux de la nappe du complexe terminal.

Références

bibliographique

Références bibliographiques

- ABDELALI A., NEZLI I.E, KECHICHED R., ATALLAH S., BENHAMIDA S.A., PANG Z. (2020)** : Geothermometry and geochemistry of groundwater in the Continental Intercalaire aquifer, southeastern Algeria: Insights from cations, silica and SO₄-H₂O isotope geothermometers, *Applied Geochemistry* 113 (2020) 104492, Elsevier Ltd, <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104492>
- BEL F., DERMAGNE F. (1966)** : Etude géologique du Continental Terminal, ANRH Alger, Algérie, 22p.
- BUSSON. G. (1967)** : Le Mésozoïque saharien. 1ère partie : L'Extrême Sud tunisien
- BEL. F.et CUCHE. D. (1969)** : Mise au point des connaissances sur la nappe du complexe terminal
- BEL. F.,et CUCHE. D (1970)** : Etude des nappes du Complexe Terminal du bas
- BUSSON G. (1972)** : Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse Paris, 464p.
- BALLAIS J.L. (2010)** : Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du bas Sahara Algérien. Géographie physique et environnement. Vol IV, 127 p.
- CORNET A. (1964)** : Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. SNED, Alger Algérie, 572p
- CÔTE M. (2005)** : L'Algérie, édition Média-Plus, Constantine, 2005, p181.
- DUBIEF J. (1953)** : Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. S.E.S., Alger, 457p
- DUBIEF J., (1959)** : Le climat du Sahara. Ed : Inst. Rech. Saha., Alger. Mémoire h.s. Tome Edit., Paris, « CentreRech.ZonesArides», Géol., 8,194 p.Ed.C.N.R.S
- DUBIEF J. (1963)** : Le climat du Sahara. Mém. Hors série. Ins. Rech. Sahar, 2275p
- FABRE. J. (1976)** : Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions Géol.Dyn.
- 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.
- GUENDOUZ A. (1985)** : Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est Septentrional (Algérie). Thèse 3ème cycle. Université de Paris-Sud, 243p.

- GUENDOZ A., REGHIS Z., MOULLA A. (1992)** : Etude de la remontée des eaux de la nappe phréatique de la région d'Oued-Souf. Rapport sur l'interprétation des données hydrochimiques et isotopiques de la campagne d'échantillonnage effectuée en Mai 1991. Rapport interne, C.D.T.N. 72 pages.
- GUENDOZ A., MOULLA A., EDMUNDS W.M., ZOUARI K., SHAND P., MAMOU A.S. (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.
- HOUARI Idir Menad (2012)** : contribution à l'étude de l'évolution géochimique des eaux de la nappe du complexe terminal du Sahara septentrional, mémoire du magister, université Kasdi Merbah – Ouargla, PP 51-56.
- HOUARI I.M., NEZLI I.E., BELKSIER M.S. (2018)** : Groundwater geochemistry of a Mio-Pliocene aquifer in the northeastern Algerian Sahara (Djamaa region). *AIP Conference Proceedings* 1968, 030053 (2018), American Institute of Physics, <https://doi.org/10.1063/1.5039240>
- HADJ AMMAR F., DESCHAMPS P., CHKIR N., ZOUARI K., AGOUN A., HAMELING B. (2020)** : Uranium isotopes as tracers of groundwater evolution in the Complexe Terminal aquifer of southern Tunisia, *Quaternary International*, Elsevier Ltd, <http://doi.org/10.1016/j.quaint.2020.01.024>.
- KILIAN C. (1931)** : Les principaux complexes continentaux du Sahara. *C.R. Soc. Géol. Fr. Paris*.
- MARGAT J. (1990)** : Les gisements d'eau souterraine. *La Recherche*, 596 p.
- MALIKI R. (1993)** : Etude hydrogéologique du littoral béninois dans la région de Cotonou (AO). Thèse de doctorat 3ème cycle, Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal, 162 p.
- 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.E. (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.E., ACHOUR S., DJIDEL M., ATALLAH S. (2009)** : Presence and Origin of Fluoride in the Complex Terminal Water of Ouargla Basin (Northern Sahara of Algeria), American Journal of Applied Sciences 6 (5) : 876-881, 2009, ISSN 1546-9239.
- OSS (2002)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel.
- OSS (2003)** : Système Aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel. PP 21-22.
- OULD BABA SY Mohamedou (2005)** : Recharge et paleorecharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse Doctorat, université de Tunis el Manar PP 05-07.
- PALLAS P. (1978)** : Water resources of the socialist people's Libyan Arab Jamahiriya. Secretariat of dams and water resources. S.P.L.A.J., General Water Authority. Tripoli, Libya, 55p.
- UNESCO. (1972)** : Projet Reg 100. Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport sur les résultats du projet, UNESCO, Paris. Voisines. SNED, Alger, 421p.
- 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.

ANNEXES :

Échantillons	T	PH	CE	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₂ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ -N	Si
	°C		µS cm ⁻¹	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
E1	29.4	7.49	4320	365	14	394	145	126	1550	618	7.4	7.4
E2	27	8	4900	396	29.2	381	177	121	1510	824	6.6	5.5
E3	24.4	7.25	5190	450	28.1	404	171	125	1380	897	5.5	6.3
E4	24.9	7.56	5660	660	26.1	430	135	122	1400	1072	8.6	7.6
E5	23.4	7.45	6730	851	40.5	467	186	124	1500	1404	6.5	6.7
E6	23.3	7.38	5890	873	23.6	719	285	141	1790	1795	6.9	8
E7	24.7	7.56	6160	651	27.2	528	174	131	1430	1115	8.5	7.7
E8	23.9	7.59	4700	553	24.2	382	125	143	987	798	7.5	7.3
E9	24.5	7.58	4810	548	24.1	386	123	143	1090	813	7.6	7.2
E10	25.7	7.36	5080	583	25.4	338	159	123	991	1005	7.5	6.6
E11	24.7	7.55	6690	746	28.3	358	165	128	1080	1299	6.9	6.7
E12	24.7	7.21	6830	878	34.8	366	176	127	1070	1465	6.7	6.4
E13	25.6	7.31	6130	791	33.6	371	161	130	993	1470	6.6	6.9
E14	25.6	7.53	5600	647	27.8	310	110	126	887	1140	7.1	6.3
E15	27	6.52	3170	402	14.3	198	62.5	100	735	440	6.3	7.2
E16	27.7	6.66	3650	433	15.9	239	74.1	82	813	550	7	6.9
E17	30.8	7.15	4030	468	17	276	83.7	81	883	660	8	6.7
E18	30.1	6.99	3820	474	18.7	282	85.8	60	884	680	7.9	6.5
E19	29.7	7.22	3080	408	14.1	205	65.7	159	800	430	5.7	7.2
E20	28.5	7.04	3270	338	27.5	215	80.8	65	617	530	15	7.2
E21	28.6	7.19	3250	340	27.4	210	78.8	58	607	530	14.9	7.1
E22	27.9	7.17	3280	379	26.8	230	61.2	73	734	480	12.9	8.2
E23	29.1	7.34	3970	433	29.9	274	108	62	743	760	16.8	7.1
E24	29	7.63	10300	1450	50.3	597	191	74	1530	2500	1.8	7.2
E25	31.8	7.54	4520	512	24.4	327	112	87	1050	770	1.8	10.4
E26	24.1	7.01	9860	1230	24.3	662	630	96	1990	2300	7.1	8.1
E27	33.6	7.32	4660	539	23	298	114	90	986	800	5.9	7
E28	32.5	7.25	4770	552	22.6	304	114	83	1020	830	5.8	7
E29	31	7.49	5110	624	18.7	352	118	89	1420	730	2.5	7.2
E30	23.8	7.11	2820	275	17.1	205	71.2	108	658	406	14.6	7.5
E31	28.4	7.54	3210	320	17.7	230	86.3	106	751	502	14.8	7.8
E32	27.2	7.83	1806	214	15.4	67.9	23.5	114	357	164	13.8	6.3
E33	29.1	7.65	1750	172	9.3	87.6	31.7	130	321	180	8.1	7.6
E34	29.3	7.71	1555	185	9.8	114	39.5	135	397	208	6.3	7.4
E35	22.5	7.71	4670	532	17.4	407	124	78	1570	660	6.3	6.2
E36	26.4	7.298	4430	580.2	28.3	104.2	182.4	195.2	774.6	1021		
E37	23	7.058	9460	1232	66.6	144.3	384	268.4	1529	1886		
E38	23.7	7.479	2790	301	17.5	96.19	129.6	170.8	548	439.6		
E39	25.8	7.297	4530	394.1	20.83	112.2	120	170.8	659.2	570.1		
E40	22.1	7.277	3900	440.6	17.5	72.14	196.8	195.2	778.7	771.6		
E41	24.1	7.354	3020	292	21	168.3	94.78	131.8	480	633.2	14.76	
E42	26.2	7.24	2460	220	17	140.3	85.06	117.1	415	466	14.29	
E43	25.2	7.514	2130	209	15	120.2	72.91	97.6	320	409.9	19.87	
E44	22.9	7.563	2760	285	20	160.3	97.22	122	500	589	5.4	

Tableau III-1 : Données analytique des eaux du CT

Échantillons	Fe total	F	Br	I	Li	B	Cr	Co	Ni	Zn	Rb	Sr	Mo	Cd	Ba	Pb	U
	mg/l	mg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l	µg/l
E1																	
E2	0.08	2.13	0.74	0.147	91	380	37.5	0.9	32.2	30.4	6.3	8700	12.6	0.9	13	1	5.2
E3	0.12	1.76	0.72	0.093	117	360	26.4	0.8	28	26.1	9.3	6490	16.4	0.5	13.8	1.3	3.8
E4	0.07	1.8	0.9	0.075	121	350	26.4	0.8	25	30.1	8.4	7760	17.3	<0,4	13.4	0.9	3.6
E5	0.05	2.1	1.13	0.093	142	460	28.8	0.9	25.8	20.4	9.2	7740	15.8	0.4	14.4	1	3.4
E6	0.04	1.91	1.4	0.096	172	460	20.5	0.9	24	15	9.8	8940	15.4	<0,4	12.1	0.4	5
E7	0.07	2.26	1.78	0.163	174	530	19.4	1.1	31.8	21.7	8.5	14000	14.8	<0,4	15.7	1.2	7.7
E8	0.09	2.23	1.25	0.111	158	530	22.7	1	27.9	18.6	10.3	9180	15.7	<0,4	15.6	0.5	5.4
E9	0.07	2.33	0.88	0.089	141	510	24.8	0.6	21.6	25.4	8.3	6820	16.4	0.7	13.7	0.9	4.2
E10	0.05	2.75	0.51	0.090	140	510	17.3	0.4	13.1	16.2	2.2	6890	<10	<0,4	18.3	0.6	5.6
E11	0.02	1.6	0.84	0.177	89	370	11.8	0.6	19.3	100.1	8.2	6220	<10	0.7	14.5	0.2	3.2
E12	0.03	1.4	1.86	0.198	102	430	16.7	0.6	20.3	18.6	7.9	5790	<10	0.7	15.3	0.5	4
E13	0.03	1.4	0.99	0.122	127	490	14.1	0.8	20.8	22.1	8.8	5730	<10	<0,4	14.4	0.4	4
E14	0.06	1.25	0.74	0.119	133	520	10.8	0.7	16.6	17.4	8.7	5560	<10	<0,4	19.2	0.2	4.2
E15	0.04	1.28	1.76	0.124	110	430	20.8	0.6	20.8	27.2	6.9	4790	<10	<0,4	14.5	0.2	4
E16	0.04	0.59	0.7	0.092	78	260	8.4	0.6	8.9	77.7	3.2	2820	4.6	<0,5	13.1	<0,6	6.1
E17	0.12	0.61	0.8	0.096	82	280	11	0.7	11.1	54.9	3.4	3500	4.3	<0,5	14.7	0.6	4.9
E18	0.04	0.6	0.93	0.104	87	310	7.7	0.6	11.9	66	4.8	4260	4.7	<0,5	16.5	<0,6	4.8
E19	0.16	0.66	1.05	0.098	92	330	4.5	0.8	14.2	69.5	5	4390	4.2	<0,5	15.8	<0,6	4.2
E20	0.08	0.58	0.68	0.098	82	230	8.2	0.6	9.4	45.3	3.2	2790	3.6	<0,5	14.5	<0,6	6.4
E21	0.02	1.35	0.62	0.065	84	320	11.6	0.5	9.9	37.8	7.4	6550	7.1	<0,5	20	<0,6	3.1
E22	0.02	1.44	0.6	0.065	81	330	4	0.6	8.8	32.8	5.8	6080	7	<0,5	20.2	<0,6	3.5
E23	0.09	1.6	0.77	0.046	60	370	13.5	0.8	11.1	59.6	8.5	6640	17.5	<0,5	27.5	<0,6	2.9
E24	0.02	1.32	0.91	0.075	94	370	11.4	0.7	12.9	33.8	7.1	8420	6.6	1.1	25.5	<0,6	3.6
E25	0.02	1.7	2.96	0.110	217	700	2.3	1.7	31.7	39.2	16.5	9920	5.4	<0,5	24	<0,6	5
E26	0.03	1.95	0.11	0.059	99	350	2.5	1	14.6	51.6	7.9	8560	12	<0,5	15.6	<0,6	4.1
E27	0,02	2.5	1.9	0.160	175	530	4.1	2.1	30.6	41.1	8.2	12500	9	<0,5	16.1	<0,6	7.7
E28	0.06	2.3	0.12	0.074	111	460	7.3	0.8	14.6	36.6	7.3	6580	12	<0,5	18.2	<0,6	3
E29	0.08	2.3	0.12	0.074	115	460	8.5	0.7	17.9	39.7	7.1	6600	9.9	<0,5	16.6	<0,6	3.3
E30	0.05	2.6	0.13	0.098	142	720	7.9	0.8	15.5	35.5	7.4	6710	13	<0,5	14	<0,6	4.1
E31	0.02	0.96	0.41	0.061	60	230						5430			19		
E32	0.02	1.08	0.49	0.060	70	230						6540			19		
E33	0.02	0.85	0.26	0.061	40	240						1370			18		
E34	0.02	0.54	0.25	0.037	50	160						933			20		
E35	0.02	0.55	0.29	0.037	40	150						1280			20		

Tableau III-1 : continue

* Les échantillons de E1 à E35 (Guendouz et al,2003) et de E36 à E44 (cette étude)