

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEURE ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
*Faculté des Sciences de nature et de la vie et
des sciences de la terre et de l'univers*
Département de science de la terre

Mémoire de Magister

Thème

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Magister

ETUDE GEOCHIMIQUE ET MINERALOGIQUE DES CHOTTS DE LA REGION D'EL HADJIRA

Option: Géochimie de surface

Année 2012

Présenté par: LAMINI Abdellah

Encadre par:

Mr. HACINI Messaoud (*Maître de conférences A Université de Ouargla*)

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

Mr. Hamdi Aissa Baelhadj (*professeur Université de Ouargla*)..... **Président.**

Mr. Aissani Belkacem (*Maître de conférences A Université de Ouargla*) **Examineur.**

Mr. Nezli Imed Eddine (*Maître de conférences A Université de Ouargla*) **Examineur.**

Année Universitaire: 2011 / 2012

DEDICACES

Merci Dieu le tout puissant qui ma éclairé le chemin de la réussite et du savoir.

A mes très chères parents, avant tous et pour tous, que j'adore et je souhaite toujours les voir à mes côtés :

A mes très chère mère Fatma, symbole de tendresse et de patience.

A mon cher père Mansour, je te remercie infiniment de tes sacrifices.

A mes très chers frères : Abderrahman, Brahim, Moussa, Hamza et Mohamed.

A mes très chères sœurs :Messaouda, Fatma, Aicha, Halima.

Je vous remercie pour votre inquiétude et tendresse.

A ma grande mère Salha.

*A mes amis intimes : Hamid, Djelloul, Nesrddine, Yakoub, Houcine, Tahar
Ahmed, El hadj*

A mon encadreur Hacini Messaoud,

ABDELLAH

Remerciements

Je tiens à adresser mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin, en particulier :

Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus profonde gratitude à Mr Hacini Messaud pour la confiance qu'elle m'a accordée, pour sa constante disponibilité, pour son soutien et enfin pour la fidélité à son engagement de directrice de thèse. Mr Hacini a su me transmettre la vision d'une géochimie créative empruntée de curiosité et de rigueur, nécessaires au développement de techniques analytiques.

J'exprime toute ma reconnaissance aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont prêté à cette thèse en acceptant de juger ce travail dans le cadre de ce mémoire de magister.

Je remercie Mme Chiban Aïcha de m'avoir sollicité pour les analyses physico-chimiques une année de recherches menées dans le laboratoire de ADE sur la thématique des éléments majeurs, sans lesquels la partie analytique de cette thèse n'aurait pu être achevée. Merci tout autant aux ingénieurs du laboratoire d'ADE pour leur contribution et leur motivation dans le cadre de ce projet.

A notre très sympathique technicien de laboratoire de cartothèque CRD de Hassi Messaoud Mr Mokran. Sans oublier Mr, Berrabh Mohamed technicien de laboratoire DRX de l'université de M'silla.

Toute ma gratitude est exprimée à Mr Bouregha pour m'avoir fait bénéficier de son savoir-faire relatif aux méthodes sédimentologiques et pour m'avoir accueilli quelques temps dans son bureau de recherche.

Je remercie également Saggou Abdelhak, Bounacer Ismail, Ferhat Salem, Missoun Belkhir pour son aide et m'orienté pour réaliser cette mémoire.

Merci tout spécialement à mon camarade Gueuriani Abdellhamid qui sait plus que quiconque les difficultés qu'il a fallu surmonter et la patience dont il a fallu faire preuve pendant ces années d'échantillonnage, de chimie et d'analyses intensives. Qu'il trouve ici le témoignage de ma reconnaissance pour ses initiatives, son enthousiasme et ses idées, ainsi que pour notre excellente relation de travail qui pourrait inspirer nos professeurs, anciens comme nouveaux.

Je remercie tous les enseignants (graduation-post graduation) de géologie pour leurs orientations pendant ma formation : Mr Hamdi Aïssa, Mr Nezli Imad Eddine, Mr Djidel Mohamed, Mr Zedouri, Mr Bellaouar Abd El Aziz

Sans oublier les enseignants du tronc commun en particulier : Mr Boularak Moussa, Mr Belhanachi Hamza, Mr Marmi Ramdane, Mr Bourfis et Belabbas.

Toutes ces personnes sont les gènes d'une géologie résolument moderne tournée vers ce qu'elle a de plus enrichissant et de plus humain : son inestimable diversité.

Mon souhait pour l'avenir serait que ceux qui instrumentalisent « l'environnement », sous le prétexte de leur vision élitiste d'une géologie qu'ils prétendent moderne, puissent trouver le recul pour apprécier les multiples nuances des sciences de la Terre afin qu'ils acquièrent l'humilité nécessaire pour reconnaître l'expertise de leurs contemporains.

Remerciements

J'aimerais dédier ce travail....

A mes amis, auprès desquels je ne peux que m'excuser pour m'être petit à petit éloigné alors que l'enseignement et la recherche me réclamaient corps et âme ; je les remercie tous, pour ne pas m'en avoir tenu rigueur.

Résumé

L'eau est une source essentielle et permanente pour le développement durable. Il est indispensable pour la protection des organismes de toutes sortes, les animaux, végétaux, et les biosphères.

Chott Baghdad est située dans le Sahara septentrional Algérien. Il est de 31m au-dessus du niveau de la mer. Le climat dans cette zone a un changement remarquable avec une longue période de sécheresse où la température maximale peut atteindre les 45°C. La sécheresse influence les caractéristiques de l'eau de la nappe phréatique et les eaux salées de sebkha, ce qui est considéré parmi les grands problèmes dans ces zones sèches et arides. La présence des roches évaporitiques est remarquable, telle que le gypse, l'halite, les sulfates, ... etc.

Les caractéristiques géologiques et géochimiques des dépôts évaporitiques du bassin de Baghdad, laissent apparaître une évolution de ce dernier en un système de petites lagunes fermées, où se concentrent des saumures riches en ions SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- et sous l'effet de l'évaporation engendrent la précipitation de gypse et de sel gemme.

L'objectif de ce genre d'étude est de faire une simulation d'évolution géochimique des formations évaporitiques déposées durant un cycle géochimique, puis comparé avec celle obtenue en laboratoire (DRX).

Suite à l'analyse de la situation actuelle des saumures et de son environnement, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations temporelles, en fonction de la lithologie et des facteurs climatiques. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres hydrodynamiques et physicochimiques au cours d'un cycle géochimique (depuis janvier jusqu'à décembre 2011). Différentes méthodes d'analyses ont été effectuées (titration, émission de flamme, spectrophotométrie).

Les conclusions qui ont été obtenues :

- Le chlore et le sodium ont évolué en diminution à la fin de cycle.
- Bicarbonates, Potassium et Magnésium ont augmenté au début de cycle puis diminué à la fin de cycle géochimique.
- Calcium est pratiquement stable par rapport aux autres éléments majeurs.
- Donc les phases de précipitation sont comme suit : L'halite, gypse avec carbonate de calcium, anhydrite, epsomite.

Mots clés : hydrochimie, hydrogéologie, sebkha, les évaporites.

Abstract

Water is an essential source for a permanent development, in the substance of all the alive organisms, animals, vegetables and the biosphere because it is necessary to insure the life in our planet as well for the health and the socio-economic progress of the societies with the respect of the environment. Chott and sebkha is characterized with water content. Allot of study was made to see spatio-tomporelle evolution of brine in these area. Chott Baghdad is our objective in this study which located in Algerian Sahara part.

Chott Baghdad is situated in septontrional Algerian sahra basin (northern of Africa).these small depression is fall dawn about 31m below sea level. One of characteristic of this zone is dry climate in summer when temperature reach 45°C and decrease in winter to less zero °C. chott Beghdad irrigate with surface water zone, continental saharien aquifer and precipitated water. Geologics and gitologic carcteristics of deposited evaporits in Baghdad basin, small closed lagon take place with brines rich in Ions SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Na^+ , Cl^- and under the effect of evaporation generate the rock salt and gypsum precipitation.

The objective of this study is to simulate evolution the geochemical cycle inside of chott Baghdad, in addition try to interpreter behavior of major element which constructs this small depression. The most important thing is to calculate saturated index of evaporated mineral and compare it with DRX result.

To reach this study, monthly brine samples were collected from January to December. Different analytic methods were used: physicchemical analytic (PH, temperature and conductivity). In addition, spectrophotometer and titration, phlame emission was done to calculate major element concentration.

From this study, we can conclude that major element behavior (Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , Mg^+ , K^+ , HCO_3^- , and Ca^{2+}) is as follow:

- Chlore and sodium was decreasing at end of geochemical cycle.
- Bicarbonate, potassium and magnesium have characteristic evolution, where they increase at the beginning of geochemical cycle till summer then decrease steadily at the end of cycle.
- Calcium is quit steady during year cycle.
- Precipitation of: firstly halite and gypsum with calcium carbonate followed by anydrite Epsomite.

Key words: hydrochemical, hydrogeological, sebkha, evaporates.

ملخص:

الماء هو عنصر الأساسي للتطور المستمر لجميع الكائنات الحية بما فيها الحيوانات، النباتات الخضروات و المحيط الذي تعيش فيه لأنه ضروري لضمان الحياة في كوكبنا وكذلك ضروري للصحة والتطور الاقتصادي الاجتماعي للمجتمعات مع احترام المحيط. الشطوط والسبخ من بين هته المراكز التي تحتوي علي هذه المادة الحيوية حيث هناك عدة دراسات لملاحظة مدي تطورها في الزمان و المكان. على سبيل المثال في دراستنا سنقوم بدراسة شط بغداد من بين شطوط الصحراء الجزائرية.

يقع شط بغداد في حوض الصحراء الشمالية و ينتمي إلى امتدادات الأنظمة الصخور البخارية للشمال الأفريقي .تتخفف هذه الشطوط على سطح البحر لتصل إلى 31 متر تحت سطح البحر بالتقريب . تتميز هذه المنطقة بمناح صحراوي جاف حيث تصل درجات الحرارة صيفا إلى 45 ° مئوية وتتنخفض لتصل إلى حدود الصفر درجة مئوية في فصل الشتاء . يغذى شط بغداد مياه الطبقة المائية السطحية مع الطبقة المائية للقاري النهائي إضافة إلي مياه التساقط التي في الغالب جد ضئيلة. الخصائص الجيولوجية و الجيولوجية للترسبات الناتجة عن التبخر في حوض بغداد بالحجيرة تبرز تطور هذا الأخير على شكل بحيرات مغلقة و مبعثرة أين تتركز مملحات غنية بأيونات: SO_4^{2-} ، Ca^{2+} ، Cl^- ، Na^+ و بفعل ظاهرة التبخر نتجت ، ترسبات جبسية و ملحية.

أن الهدف من هذه الدراسة يرمي الى إعادة بناء الدورة الجيوكيميائية للشط ، محاولة لدراسة سلوكيات العناصر الغالبة المشكلة لمياه السبخة ، وكذلك المساهمة في حساب سرعة ومعدل الترسيب لبعض المعادن البخارية في الميدان ومقارنتها بتلك المحسوبة في المخبر DRX.

إن الطريقة المستعملة في هذه الدراسة هي أخذ عينات مياه الشط بانتظام كل شهر وذلك انطلاقا من فترة الذروة المائية في شهر جافني إلى غاية شهر ديسمبر .مع قياس المعامل الهيدروجيني pH ، درجة الحرارة و الناقلية . ثم قمنا بتحليل هذه العينات في مخبر التحاليل المياه لتحديد تركيز كل عنصر من العناصر الغالبة .حيث تم استعمال عدة طرق منها: التلوين، مرور الاحتراق.

من نتائج هذه الدراسة كون إن العناصر الغالبة في مياه السبخة تخضع في تصرفاته إلي عوامل الطقس الخارجي مع كون كل عنصر يتصرف بتصرف خاص خلال الدورة التطورية.

- انخفاض Cl^- مع Na^+ مند بداية الدورة الجيوكيميائية.
- فيما يخص SO_4^{2-} ، Mg^{+} ، K^{+} ، HCO_3^- تأخذ شكل أخر من التطور حيث تتزايد في التركيز إلي غاية نهاية الفصل الصيفي تم تبدأ في التناقص إلي غاية شهر ديسمبر.
- عنصر Ca^{2+} نوع من الاستقرار.
- خلال هذه الدورة الجيوكيميائية قد تم ملاحظة :ترسيب و تشكل الأملاح في بداية الأمر كربونات الكالسيوم مع الجبس و ملح الطعام.

الكلمات المفتاحية : الهيدروكيميائية، الهيدروجيولوجية، السبخة، المتبخرات.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....	01
Chapitre I : hydroclimatologie	
I.1 Introduction.....	04
I.2 Situation géographique.....	05
I.2.1 Station pluviométrique de Ouargla.....	05
I.3 Importance des paramètres climatiques sur le fonctionnement géochimique des Sebkhass	06
I.4 Hydrologie et Réseaux Hydrographique.....	06
I.4.1 L'oued Mya.....	06
I.4.2 Les oueds de la dorsale du M'Zab.....	07
I.5 Etude des facteurs climatiques.....	08
I.5.1 La Température	08
I.5.1.1 Variations des températures moyennes annuelles et mensuelles.....	08
I.5.2 La pluviométrie	09
I.5.2.1 Variations interannuelles des précipitations	09
I.5.2.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations	10
I.6 Estimation de l'évapotranspiration.....	10
I.6.1 L'évapotranspiration potentielle (ETP)	10
I.6.2 D'ETP De Thornthwaite (1948)	11
I.6.3 D'ETP de Turc.....	12
I.6.4 D'ETP de la formule de Hargreaves.....	13
I.6.5 Comparaison des formules D'ETP.....	14
I.7 L'humidité de l'aire.....	15
I.8 L'insolation.....	15
I.9 Le vent.....	15
I.10 Caractérisation du climat.....	15
I.10.1 Diagramme Ombrothermique.....	16
I.10.2 Indice de De Martonne.....	17
I.10.3 Indice d'aridité mensuel.....	18
I.10.4 Climagramme de Louis Emberger	20
I.10.5 Indice de Paul Moral	21

I.10.6 Comparaison des indices climatiques	22
I.11 Bilan hydrologique	22
I.11.1 Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite	23
I.11.2 Commentaire sur le bilan-hydrologique	25
I.12 Conclusion	25
 Chapitre II : Contexte géologique de la zone d'étude 	
II.1 Introduction	26
II.2 Cadre géologique régional	26
II.3 Stratigraphie	28
II.3.1 Le primaire	28
II.3.1.1 Le cambrien	28
II.3.1.2 Ordovicien	28
II.3.1.3 Silurien	30
II.3.1.4 Dévonien	30
II.3.1.5 Permo-Carbonifère	30
II.3.2 Le Secondaire	30
II.3.2.1 L'Albien	30
II.3.2.2 Le Vraconien	31
II.3.2.3 Le Cénomanién	31
II.3.2.4 Le Turonien	31
II.3.2.5 Le Sénonien	31
II.3.2.5.1 Le sénonien inférieur (lagunaire)	31
II.3.2.5.2 Le Sénonien supérieur carbonaté (Maestrichtien)	32
II.3.3 Le Tertiaire	32
II.3.3.1 L'Eocène	32
II.3.3.2 L'Eocène carbonaté (Yprésien)	32
II.3.3.3 L'Eocène évaporitique (Lutétien)	32
II.3.3.4 Le Mio-Pliocène	33
II.3.4 Le Quaternaire	33
II.4 Reconstitution paléogéographique	34
II.5 Cadre Hydrogéologiques du la zone d'étude	35
II.5.1 La nappe phréatique	35
II.5.2 La nappe de Complexe Terminale	36
II.5.3 La nappe du Continental Intercalaire	36

II.6 Géomorphologie et unités géomorphologiques	38
II.6.1 La hamada	38
II.6.2 Les glacis	38
II.6.3 Les sebkhas	38
II.6.4 Les dunes	38
II.7 Pédologie	39
II.7.1 Plateau (lithosol pétrocalcaire)	39
II.7.2 Glacis (regosol sableux à graviers)	39
II.7.3 Dans le chott l'horizon de surface (salisol chloruré sulfaté)	39
II.7.4 Les sols salés de la sebkha	40
II.7.5 Les dunes « regosol »	40
II.8 Salinité des sols	40
II.8.1 Description morphologique	41
II.9 Aperçu Tectonique	41
II.10 Conclusion	42

Chapitre III : Initiation au évaporites et époques évaporitiques en Algérie

III.1 Rappels des principales caractéristiques des roches évaporitiques	43
III.2 Processus de formation des roches évaporitiques	43
III.3 Les modèles de dépôts des évaporites	44
III.3.1 Les évaporites continentales	44
III.3.2 Les évaporites marines de bassin peu profond	45
III.3.3 Les évaporites marines de bassin profond	46
III.3.4 Le cycle gypse anhydrite	47
III.4 Aperçu sur les époques évaporitiques en Algérie	48
III.4.1 Epoque évaporitique du Trias	48
III.4.2 Epoque évaporitique Sénonienne	49
III.4.3 Epoque évaporitique Nummulitique	50
III.4.4 Epoque évaporitique Plio-Quaternaire	50

Chapitre IV : Matériel et méthode

IV.1 Introduction	52
IV.2 Méthode de travail	52
IV.3 Protocole d'échantillonnage des solutions	52
IV.4 Techniques de mesures et d'analyses des solutions	53

IV.4.1. Mesures in situ	53
IV.4.2. Analyses au laboratoire	53
IV.4.2.1 Spectrophotométrie	53
IV.4.2.1.1 Caractéristiques de l'appareil DR-2000	53
IV.4.2.1.2 Méthode	54
IV.4.2.2 Émission de flamme	54
IV.4.2.3 La titrimétrie	56
IV.4.2.3.1 Protocole expérimental typique d'un titrage	57
IV.4.2.3.2 Détermination du Chlorure : Cl-	57
IV.4.2.3.3 Détermination du calcium (Ca²⁺) et du magnésium (Mg²⁺) et la dureté (TH)	58
IV.4.2.3.4 Détermination de l'alcalinité (HCO₃⁻)	59
IV.5 Protocole d'échantillonnage et analyse des sédiments et des roches	59
IV.5.1 La méthode échantillonnage par la tarière	59
IV.5.2 Préparation des échantillons solides	60
IV.5.2.1 Tamisage des sédiments et séparation de la fraction inférieure à 2 mm, 63 µm et 2 µm	60
IV.5.2.2 Broyage des échantillons	60
IV.5.2.3 Réalisation des lames minces	61
IV.5.3 Principe et l'analyse de la diffraction des rayons	61
IV.5.3.1 Dépouillement de diagrammes de diffraction X	62
IV.5.3.2 Préparation et analyse des échantillons prélevés en DRX	63
IV.6 Logicielle et software utilisé	63

Chapitre V : Résultats et discussion : Géologie du chott Baghdad

V.1 Introduction	64
V.3 Présentation de la zone d'étude	64
V.4 La répartition spatiale des sédiments superficiels à partir image satellitaire	67
V.5 Principales roches des dépôts évaporitiques du chott Baghdad	68
V.5.1 Les argiles	68
V.5.2 Les calcaires	69
V.5.3 Le gypse	70
V.5.4 Les Oxydes de fer	70
V.5.5 Le sel gemme	71
V.5.6 L'anhydrite	71

V.6 Etude sédimentologique de Sebkha Baghdad	71
V.6.1 L'implantation des carottes et leur objectif	71
V.6.2 Interprétation lithologique des carottes	72
V.6.2.1 Sondage BG-1	72
V.6.2.2 Sondage BG-2	73
V.6.2.3 Sondage BG-3	73
V.6.2.4 Sondage BG-4	74
V.6.2.5 Sondage BG-5	74
V.6.2.6 Sondage BG-6 et BG-7	75
V.6.3 Granulométrie	75
V.6.4 Morphoscopie des grains de quartz	77
V.6.5 Analyse de la fraction carbonatée	77
V.7 Etude minéralogique	78
V.7.1 Minéraux non argileux	78
V.8 Corrélation géologique des carotte d'orientation N-S ou sein de Sebkha Baghdad	79
V.9 Fonctionnement des Lamines et leur intérêt paléoclimatique	80
V.9.1 Les séquences de quartz et les éléments détritiques	80
V.9.2 Les séquences de gypse (gypse, anhydrite)	81
V.9.3 Les lamines sulfato-organiques	81
V.10 La morphologie de surface de sebkha Baghdad	82
V.11 Le mécanisme de fonctionnement de sebkha	83
V.12 La reconstitution de sebkha	85
V.13 Synthèse et conclusion	85
Chapitre VI : Résultats et discussion : Géochimie de sebkha Baghdad	
VI.1 Introduction	87
VI.2 Etudes des paramètres physico-chimiques des saumures	87
VI.2.1 La température (T°)	87
VI.2.2 Potentiel d'Hydrogène (pH)	88
VI.2.3 La conductivité électrique (CE)	89
VI.3 Comportement des éléments majeurs	90
VI.3.1 Comportement du chlore (Cl-)	91
VI.3.2 Comportement de sodium (Na+)	92
VI.3.3 Comportement du Magnésium (Mg+2)	93
VI.3.4 Comportement du Calcium (Ca+2)	96
VI.3.5 Comportement des Sulfates (SO4-2)	97

VI.3.6 Comportement du Potassium (K⁺)	99
VI.3.7 Comportement des Bicarbonates (HCO₃⁻)	101
VI.3.8 La salinité	102
VI.3.9 Résidus secs	104
VI.4 Les représentations graphiques des analyses hydrochimiques	104
VI.4.1 Le diagramme de Piper	105
VI.4.2 Les diagrammes binaires	106
VI.4.2.1 Les diagrammes binaires ions-chlore	107
VI.4.2.1.1 Le diagramme binaire sodium-chlore (Na-Cl)	107
VI.4.2.1.2 Le diagramme binaire (Ca-Cl)	109
VI.4.2.1.3 Le diagramme binaire (Mg-Cl)	110
VI.4.2.1.4 Le diagramme binaire (SO₄-Cl)	110
VI.4.2.1.5 Le diagramme binaire (K-Cl)	112
VI.5 Cycle saisonnier des éléments majeurs	112
VI.5.1 Production ionique	113
VI.5.2 Etude de l'évolution des minéraux et des éléments dissous (Calculs thermodynamiques)	113
VI.6 Interprétations des analyses de DRX	117
VI.7 Discussion et conclusions	120
Conclusion Général	122

Bibliographiques

Figure. I.1 : Situation géographique de la région d'El Hadjira	05
Figure. I.2 : Les oueds de la dorsale du M'Zab.	07
Figure. I.3 : Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Ouargla pour la période (1999/2010).	08
Figure. I.4 : Evolution des températures moyennes mensuelles à Ouargla (1999-2010)	14
Figure. 1.5 : Evolution des précipitations annuelles à la station de Ouargla pour la période (2001-2009).	09
Figure. I.6 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Ouargla pour la période (1999-2010).	09
Figure. I.7 : Evolution de l'ETP mensuelle à Ouargla (1999-2010)	11
Figure. I.8 : L'ETP estimée par différentes méthodes.	14
Figure. I.9: Courbe Ombrothermique de la station de Ouargla.	16
Figure. I.10 : Abaque de l'indice de l'aridité de De Martonne.	18
Figure. I.11 : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923).	20
Figure. I.12 : Climagramme d'Emberger de la station de Ouargla.	21
Figure. I.13 : La carte mondiale des terres arides Source: UNEP/GRID 1991 dans WRI. ...	22
Figure. II.1: Carte géologique du Bas-Sahara (d'après Nesson, 1978)	27
Figure. II.2: Carte géologique du Sahara septentrionale (d'après G-Busson G, 1967)	28
Figure. II.3 : Colonne stratigraphique typique du Sahara septentrional (Sonatrach Division Forage, 2004)	29
Figure. II.4 : Coupe géologique du Sahara (Sonatrach, 1972)	33
Figure. II.5 : Carte Hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes.	37
Figure. II.6 : Carte tectonique représente Sahara septentrional (J. Fabre ,1978)	42
Figure. III.1: Masse de sels précipités dans une saumure en cours d'évaporation.	43
Figure. III.2: Ordre de formation des minéraux lors de l'évaporation d'eau de mer (Extrait de Blatt et al, 1980, modifiée).	44
Figure. III.3 : Répartition des faciès évaporitiques dans le cas d'un bassin marin fermé (D'après ;cojean et Renard, 1997)	45
Figure. III.4: Répartition des faciès en carte (A) et en coupe (B) dans le cas d'un bassin marin a seuil (d'après Einsele, 1992). Variante du modèle dans le cas d'une alimentation par infiltration d'eau de mer (C). (Extrait Cojean & Renard, 1997).	46
Figure. III.5 : Les bassins évaporitiques profonds.	47
Figure. III.6 : Les environnement de dépôt et de diagenèse des différent types de gypse et d'anhydrite (D'après, turker, 1995 :Cojean et Renard. 1997)	47

Liste des figures

Figure. III.7: Esquisse des bassins salifères post jurassiques.	51
Figure. IV.1: Spectrophotomètre de type DR-2000	54
Figure. IV.2 : Principe de fonctionnement de l'émission de flamme et courbe étalonnage...	55
Figure. IV.3 : Courbe d'étalonnage du sodium.....	55
Figure. IV.4 : Courbe d'étalonnage du potassium.....	56
Figure. IV.5 : Mode typique d'un titrage.....	57
Figure. V.1 : Situation géographique du chott Baghdad.....	65
Figure. V.2 : Photos des différents niveaux de sebkha Beghdad.....	66
Figure. V.3 : Coupe simplifié des formations qui affleurement proche de sebkha Beghdad...	67
Figure. V.4 : Distribution latérale des faciès dans la sebkha Baghdad.	68
Figure. V.5: photos montrant un affleurement de calcaire emprunte de Mud-cracks, intercalé par pure gypse.....	69
Figure. V.6 : Photographies de calcaires en lames minces sous microscope polarisant.....	70
Figure. V.7 : Localisation des stations de prélèvements et lithologie des sédiments carottés.	72
Figure. V.8 : Courbes granulométriques des échantillons ayant plus de 50 % de sables des carottes (BG-1, BG-2, BG-3, BG-4, BG-5 et BG-6) prélevées dans la sebkha de Baghdad...	76
Figure. V.9 : Corrélation lithologique des carottes de sebkha Baghdad.....	80
Figure. V.10 : Photo des Fentes de dessiccation.....	82
Figure. V.11 : Contact eau souterrain avec sebkha.....	83
Figure. V.12 : Différents sources d'alimentation du sebkha Baghdad par les eaux chargées des minéraux évaporitiques.....	84
Figure. VI.1: Variations de la température de l'eau en fonction du temps pour la période d'observation de Janvier à Décembre 2011.....	88
Figure. VI.2 : Variations du pH de l'eau en fonction du temps pour la période d'observation de Janvier à Décembre 2011.....	88
Figure. VI.3: Comparaison du pH mesuré in situ et au laboratoire mesurée in situ et au laboratoire.....	89
Figure. VI.4: Comparaison de la conductivité électrique mesurée in situ et au laboratoire...	90
Figure. VI.5 : Variations de la concentration du chlore en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.....	91
Figure. VI.6 : Variations de la concentration du sodium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.....	93
Figure. VI.7 : Variations de la concentration du Magnésium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.....	94
Figure. VI.8 : Variations des concentrations en Mg ⁺ en fonction de celles de k ⁺ dans les	

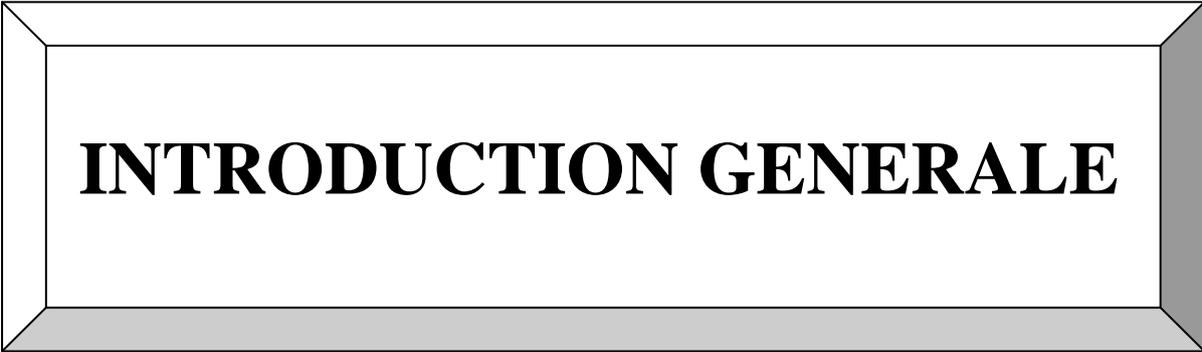
saumures de sebkha Baghdad.	94
Figure. VI.9 : Variations des concentrations en Mg^{+} en fonction de celles de Ca^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.	95
Figure. VI.10 : Variations des concentrations en Mg^{+} en fonction de celles de HCO_3^{-} dans les saumures de sebkha Baghdad.	95
Figure. VI.11 : Variations de la concentration du Calcium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.	96
Figure. VI.12 : Variations de la concentration du Calcium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.	98
Figure. VI.13 : Variations des concentrations en SO_4^{2-} en fonction de celles de Mg^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.	98
Figure. VI.14 : Variations des concentrations en SO_4^{2-} en fonction de celles de Ca^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.	99
Figure. VI.15 : Variations des concentrations en SO_4^{2-} en fonction de celles de K^{+} dans les saumures de sebkha Baghdad.	99
Figure. VI.16 : Variations de la concentration du potassium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.	100
Figure. VI.17 : Variations des concentrations en K^{+} en fonction de celles de HCO_3^{-} dans les saumures de sebkha Baghdad.	100
Figure. VI.18 : Variations des concentrations en K^{+} en fonction de celles de Ca^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.	101
Figure. VI.19 : Variations de la concentration de bicarbonates en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.	102
Figure. VI.20: Variations de la salinité de l'eau en fonction du temps pour la période d'observation de Janvier à Décembre 2011.	103
Figure. VI.21: Participation des éléments majeurs en pourcentages (%).....	103
Figure. VI.22 : Variations de la concentration du résidu sec en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.	104
Figure. VI.23 : Représentation en diagramme de Piper des eaux analysées.	106
Figure. VI.24 : Concentration des sodiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.	108
Figure. VI.25: Rapports molaires Na/Cl , SO_4/Cl , des principales sources de salinité (d'après Vengosh, 2003).	109
Figure. VI.26 : Concentration des calciums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.	109

Liste des figures

Figure. VI.27 : Concentration des magnésiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.	110
Figure. VI.28 : Concentration des sulfates dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.	111
Figure. VI.29 : Concentration des potassiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.	112
Figure. VI.30 : Types des lacs fermé (J.P. Yan et al, 2002)	113
Figure. VI.31 : Les indices de saturation des minéraux carbonatés précipités.....	115
Figure. VI.32 : Les indices de saturation des minéraux chlorures précipités.....	115
Figure. VI.33 : Les indices de saturation des minéraux sulfates précipités.....	116
Figure. VI.34 : Les Spectre des sels d'échantillon N°1 de chott Baghdad.....	117
Figure. VI.35 : Les Spectre des sels d'échantillon N°2 de chott Baghdad.....	118
Figure. VI.36 : Les Spectre des sels d'échantillon N°3 de chott Baghdad.....	118
Figure. VI.37 : Les Spectre des sels d'échantillon N°7 de chott Baghdad.....	119
Figure. VI.38 : Les Spectre des sels d'échantillon N°9 de chott Baghdad.....	119
Figure. VI.39 : Les Spectre des sels d'échantillon N°10 de chott Baghdad.....	119

Liste des tableaux

Tableau. I.1 : Les coordonnées de la station climatique de Ouargla.....	05
Tableau. I.2 : Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite.	12
Tableau. I.3 : Valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc.	13
Tableau. I.4 : Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Hargreaves.	13
Tableau. I.5 : Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Ouargla pour l'année 2011	19
Tableau. I.6 : Indices de Paul Moral (IM) à la station de Ouargla.	22
Tableau. I.7: Bilan hydrologique moyen (2009-2011) à la station de Ouargla, par la méthode de Thornthwaite.	24
Tableau. I.8: Bilan hydrologique pour l'année la plus humide à la station de Ouargla (2009), par la méthode de Thornthwaite.....	24
Tableau. I.9: Bilan hydrologique pour l'année la plus sèche à la station de Ouargla (2007), par la méthode de Thornthwaite.	24
Tableau. IV.1 : Pics caractéristiques des minéraux argileux et non argileux, et facteurs de correction (aguilla, 2004 ; Gomez et Gonzalez, communication personnelle).....	62
Tableau. V.1 : Paramètres granulométriques par rapport à la moyenne.....	76
Tableau. V.2 : Distribution granulométrique des quantiles	77
Tableau. V.3 : pourcentages des bicarbonates dans sebkha Baghdad.....	78
Tableau. VI.1 : Les éléments majeurs des eaux superficielles.	90
Tableau. VI.2 : Les résultats des analyses pour les éléments majeurs des milieux salés au monde.....	92
Tableau. VI.3 : Caractéristiques géochimiques des sources de salinité (d'après Vengosh, 2003)	108



INTRODUCTION GENERALE

Introduction général

Le travail de recherche que nous présentons à travers ce thème dans le cadre du mémoire de magister est l'étude de l'évolution géochimique des saumures de la sebkha Baghdad dans la partie Nord-Est de sahar septentrional (région d'El Hadjira).

Les chotts et les sebkhas ont fait l'objet de diverses études, à la fois biologiques, sédimentologiques, géochimiques et économiques. Au cours des trois dernières décennies, les études ont ciblé surtout l'aspect sédimentologique et géochimique de ces dépressions naturelles. Parmi les travaux et analyses on peut citer les travaux d'analyses les plus connus de chaque continent :

En Afrique : les travaux de Hcini, M (2008) de chotte Merouane en Algérie, François-Xavier COGELS, Jean-Yves GAC (1986) du lac Guiers en Sénégal et G Maglione et M. Carn (1978) en Mauritanie,

En Amérique : Can.j. Earth Sci (1983) à USA, J.-L. GUYOT, D. CORBIN, J. QUINTANILLA, H. CALLE (1991) en Bolivie.

En Asie: J.P. Yan et al, (2001) en chine

Tous ces travaux a des intérêts géochimique et sédimentologique de l'évolution des Sebkhas et donne des bonnes concepts sur la révolution des modèles géochimique chacune et ces spécifiés.

Les différents types des sebkhas du sahar septentrional dépendent de leur milieu de formation. Mais toutes les sebkhas ont un point commun ; il s'agit de zones proches de la nappe phréatique. La déflation joue jusqu'à ce que soit atteint le niveau hydrostatique. Par capillarité, l'eau de la nappe subit une aspiration due à sa propre évaporation en surface. Se faisant, elle dépose successivement des sels dissous de carbonate de calcium (CaCO_3), de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), d'anhydrite (CaSO_4) et de chlorure de sodium (NaCl) et d'autre minéraux évaporitique qui précipitent pour donner une croûte imperméable et parfois très épaisse d'évaporites.

Ces zones sont considérées comme des laboratoires à ciel ouverts sur la nature mais sont mal étudiés. Il y a les moyens existants actuellement nous permettent d'analyser l'aspect hydrochimique qui peuvent être utilisés pour l'analyse hydrochimiques des saumures seulement les fortes concentrations qui rendent les analyses très difficiles.

Les caractéristiques d'eaux et leur évolution géochimique sont liées aux caractéristiques hydrogéologiques, hydroclimatologiques et hydrodynamiques qui régissent le mode d'alimentation et le taux d'évaporation.

A cet effet et essentiellement pour les chotts et les sebkhas en zones arides et semi-arides, la connaissance exacte de leur fonctionnement et leur relation avec la nappe phréatique est très pratique pour la planification et la traite du problème de la remontée des eaux.

Dans cette étude, nous allons déterminer l'effet des conditions extérieures qui influencent des saumures de sebkha Baghdad, tels que la température, le taux de précipitation, l'évaporation, etc., sur la qualité des eaux de la sebkha en utilisant les rapports caractéristiques des éléments chimiques, la simulation de l'évaporation par le logiciel Phreeqc (Version 2 démo Parkhurst and Appelo, 1999) et par l'analyse en composante principale.

Pour cela, on a proposé une étude hydrogéologique de la région dont le but était de définir et caractériser des eaux de la nappe phréatique de la région, qui sont connus dans leur ensemble et surtout de déterminer les caractéristiques hydrochimiques essentielles afin d'obtenir des informations sur leur ordre, évolution et origine.

Cela va permettre des propositions en vue de l'exploitation rationnelle des sels de la région par la délimitation d'éventuelles zones favorables à l'exploitation.

C'est dans cette optique, que cette synthèse hydrogéologique et hydrochimique dans la région d'étude est axée principalement sur l'identification des processus d'évaporation et de la détermination de leur caractéristique hydrodynamique et également sur l'établissement des cartes de minéralisation et des faciès chimiques des eaux.

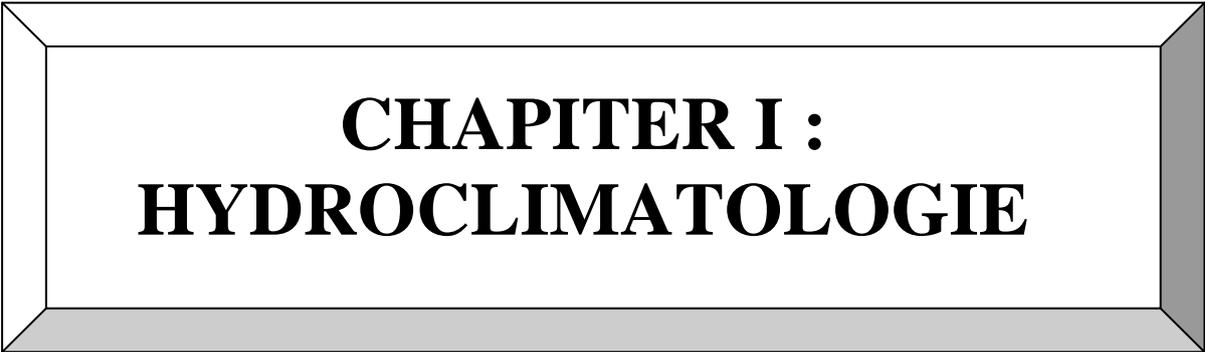
Dans ce contexte, le travail consiste, en une présentation des facteurs géographiques, à une étude géologique, hydroclimatique et particulièrement hydrochimique, basée sur l'analyse des échantillons prélevés.

Enfin, le travail sera terminé par une synthèse des différents résultats obtenus sous forme de conclusion générale et de recommandations utiles pour les travaux futurs.

La présente étude est constituée de six chapitre: Introduction générale puis chapitre I : hydroclimatologie, Chapitre II : contexte géologique de la zone d'étude, Chapitre III :

Introduction général

initiation ou évaporite et les séries évaporitiques en Algérie, Chapitre IV : matériels et méthodes, Chapitre V : résultats et discussions sur la géologie du chott Beghdad Chapitre VI : résultats et discussions analyse hydrochimique du chott Beghdad qui traite la qualité des paramètres physicochimiques de l'eau durant la période 1999 à 2001 et finalement: conclusion et recommandations, finalement conclusion générale avec des recommandations.



**CHAPTER I :
HYDROCLIMATOLOGIE**

I.1 Introduction

La zone d'El Hadjira est située dans le prolongement du grand bassin de la partie Nord Est du Sahara Algérien. Le climat est aride, avec une pluviométrie moyenne à faible, et une évaporation potentielle très élevée. Les régions des dépressions sahariennes souffrent depuis longtemps d'un excès d'eau, dont l'origine est la remontée des eaux de la nappe phréatique. Cette situation a créé de nombreux problèmes écologiques dans les zones urbaines et agricoles.

Le comportement des nappes aquifères et la variation du niveau piézométrique dépendent étroitement des précipitations et des évaporations. À cet effet, il est important de signaler que l'alimentation est régie par la fraction de pluie qui s'infiltré vers la zone saturée, constituant à moyen terme la véritable ressource mobilisable.

Le climat en raison de ses composantes tels que la température, les précipitations, le vent et l'humidité relative à l'air contrôle de nombreux phénomènes sur l'hydrochimie des saumures des sebkhas. Les phénomènes de précipitation des évaporites et leur dissolution sont étroitement liés aux conditions climatiques de la zone d'étude. Il nous est apparu très utile d'examiner les principaux facteurs climatiques des régions d'étude.

I.2 Situation géographique

La région d'El Hadjira est située dans le prolongement du grand bassin de la partie nord Est du sahara, qui s'étend sur une superficie de 9114,49 Km² environ du lit quaternaire de la basse vallée fossile de l'Oued M'ya.

Il est caractérisé par un ensemble des chottes tel que : Chott El Malah et Chott Baghdad qui sont des dépressions d'orientation NE -SW. Sebkhha de Baghdad est une petite dépression endoréique saline du sahara septentrional. Il est situé à proximité de la ville d'El Hadjira 100Km de distance dans la partie nord de chef lieu Willaya de Ouargla (Fig. I.1).

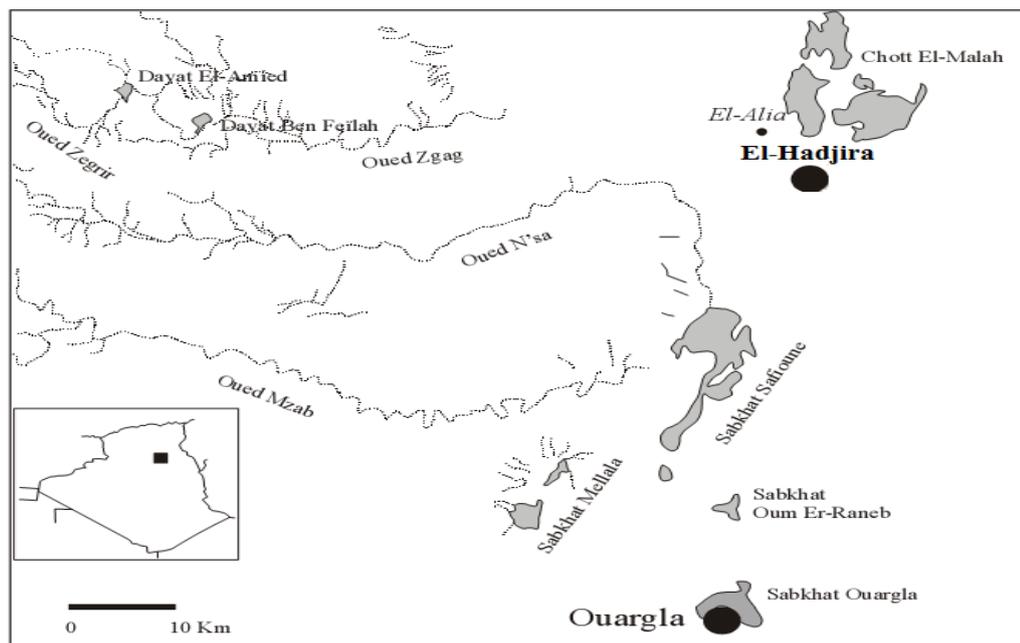


Figure. I.1 : Situation géographique de la région d'El Hadjira

I.2.1 Station pluviométrique de Ouargla

L'étude hydrogéologique nécessite une étude sur le climat tel que la précipitation, la température et l'évapotranspiration. Pour cette étude, les séries de données, qui sont à la base de la détermination de différents paramètres climatiques, ont été enregistrées à la station pluviométrique de Ouargla. Les coordonnées de cette station sont mentionnées dans le Tab I.1.

Tableau. I.1 : Les coordonnées de la station climatique de Ouargla

Station	coordonnées		Altitude en m
	X	Y	
Ouargla	05° 19' 22"	31° 57' 17"	136

I.3 Importance des paramètres climatiques sur le fonctionnement géochimique des Sebkhass

Les actions météoriques montrent la prépondérance des processus mécaniques (gélifraction-déflation..) sur les processus physico-chimiques et biochimiques des sels et saumures dans les chotts et les sebkhass. Cette prépondérance se traduit par la texture des formations évaporitiques superficielles les plus répandues, gypse, calcite, halite, etc. qui constituent une véritable « livrée du désert ».

L'importance relative à l'activité des processus mécaniques tient au caractère très contrasté des manifestations météoriques. D'une part, l'ampleur des variations thermiques annuelles, et surtout diurnes, s'exerçant sur ces évaporites et saumures résiduelles généralement dénudés, provoque sans doute une thermoclastie responsable de concentrations élevées des saumures résiduelles dans certains éléments et, d'autre part, l'instabilité des minéraux, à titre d'exemple, on cite à ce propos le changement de gypse en anhydrite par l'effet déshydratation. Dans les milieux arides à gel hivernal en présence d'eau (pluies, rosées ou condensations occultes), la cryoclastie est en tout cas indéniable et plus efficace dans le débitage des roches.

L'évaporation est la principale opération qui consiste à augmenter la concentration d'une saumure faible jusqu'à la saturation correspondante à chaque sel. Cette évaporation peut-être obtenue soit par des rayons solaires, soit avec une chaleur résultante d'une combustion quelconque, soit avec les deux à la fois, (Hacini, 2008).

I.4 Hydrologie et Réseaux Hydrographique

I.4.1 L'oued Mya

Dans les recherches récentes, trop peu de temps a été consacré à cet oued. Cependant, il apparaît clairement que le plateau à l'ouest de Ouargla, vers 200-220 m d'altitude, forme l'extrémité de la dorsale du M'Zab, constituée de calcaires éocènes. Il domine, par un talus de 6080 m, orienté nord-sud. La dépression de Ouargla est développée dans les sables et argiles Mio-pliocènes discordants. Plus généralement, l'organisation du relief de l'ouest vers l'est : plateau, talus, dépression dissymétrique, évoque un relief de cuesta, ce qui impliquerait un pendage vers l'ouest et, dans cette hypothèse, les "oueds" Mya et Righ correspondraient à la dépression orthoclinale. Plus probablement, il s'agit, comme plus au nord, d'un escarpement de faille. Cet Oued fossile, dont la source se situait au sud dans les massifs montagneux du Tademaït (région de Ain Salah), traversait, autrefois Ouargla, avant de recevoir, au niveau de la Sebkhass Safioune, les apports de deux des principaux Oueds de la dorsale du M'Zab (Oued M'Zab et Oued N'ssa). Plus au Nord, aux environs de Touggourt, la vallée de l'Oued Mya converge avec celle de l'Oued Igharghar pour constituer la vallée de l'Oued Righ qui aboutit au Chott Melrhir voir fig. I.2.

I.4.2 Les oueds de la dorsale du M'Zab

A l'est de la dorsale du M'Zab, un réseau hydrographique qui fonctionne encore parfois, dessine une série de vallées de direction ouest-est qui se jettent ensuite dans deux vastes collecteurs, l'oued Mya au sud et l'oued Righ au nord "jalonnés par une série de dépressions qui empêchent maintenant tout écoulement continu fig. I.2, trois régions s'individualisent qui sont du nord au sud :

- La ligne des chotts (Merouane, Melrhir, Djérid, Rharsa, Fedjadj) dans la gouttière située au pied de l'Atlas saharien et servant de niveau de base aux vallées qui descendent de l'Atlas.
- Le grand erg oriental, énorme masse sableuse qui occupe tout le centre de cette zone.
- Le plateau du Tinrhert au sud, entre Temassinine et In Amenas.

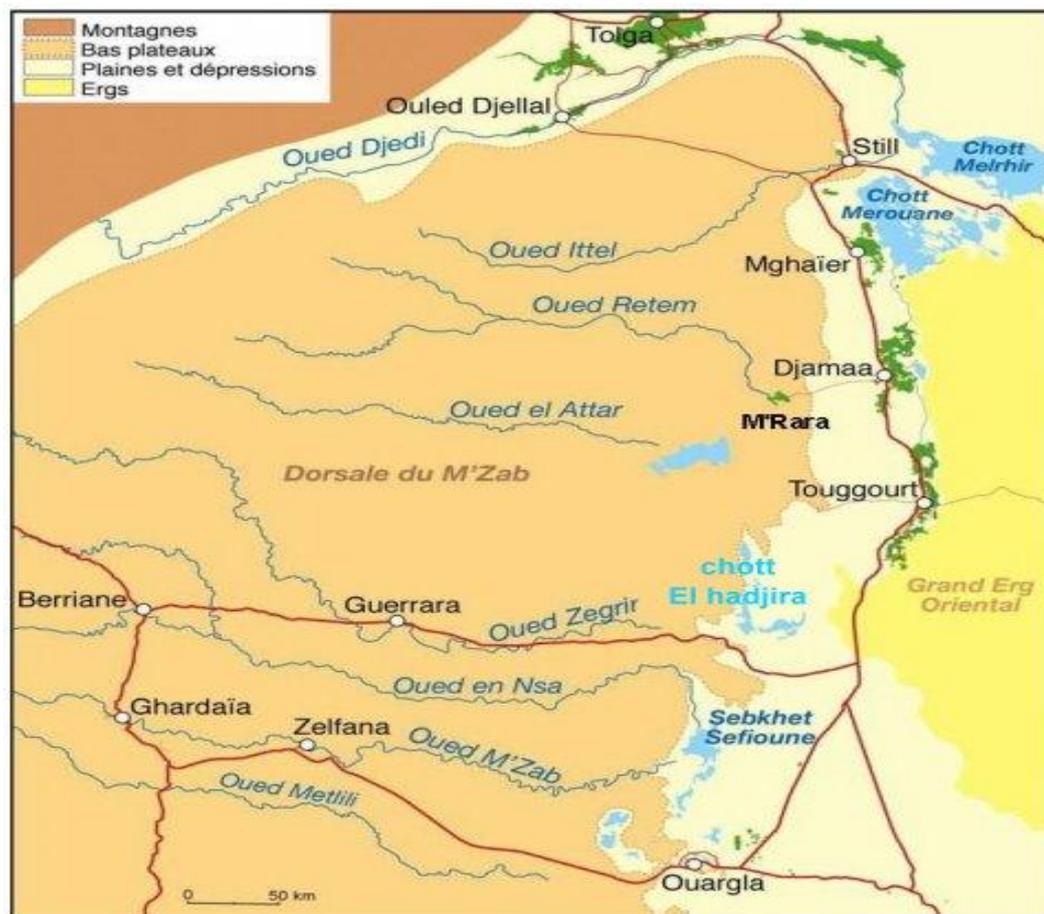


Figure. I.2 : Les oueds de la dorsale du M'Zab (P. Rognon, 1994).

I.5 Etude des facteurs climatiques

I.5.1 La Température

La température est un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. Sa variation influe sur la transformation des eaux en vapeur, que ce soit à la surface ou dans le sous-sol. De ce fait, elle influe sur le degré d'évapotranspiration et par conséquent elle agit sur le taux de salinité des eaux. Toutefois, la température a un rôle important dans la variation des composantes du bilan hydrologique.

I.5.1.1 Variations des températures moyennes annuelles et mensuelles

Le régime thermique de la région est caractérisé par des températures élevées en été et relativement moyen en hiver.

Les histogrammes représentent la variation annuelle de la température, sur une période de onze ans (1999-2010), montre que la température moyenne varie de 24,6 °C en 2001 plus tempéré et 22,2 °C en 1999 moins tempéré. En général, La température moyenne annuelle est de 23.6 °C.

L'analyse de la courbe de variation de la température mensuelle, sur une période de onze ans (1999-2010), montre que les valeurs de température maximale sont observées pendant l'été (juin-août) avec des températures allant de 37,33 à 43,63 °C. Les valeurs de température minimales, qui varient de 5,03 à 10,17°C, sont observées durant la période hivernale (novembre – mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (5°C).

L'influence de la température sur la qualité chimique se fait sentir pendant la période d'été, où il y a une concentration des éléments par évaporation fig. I.3 et I.4.

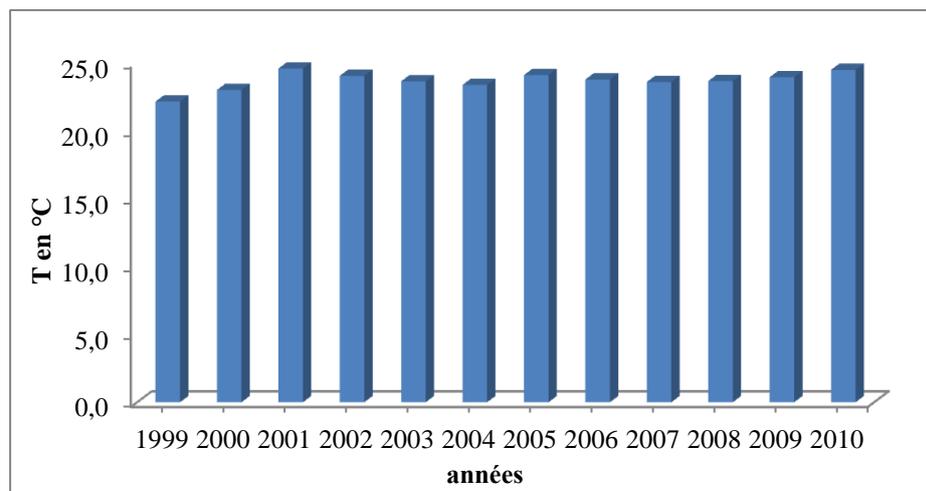


Figure. I.3 : Evolution de la température moyenne annuelle à la station de Ouargla pour la période (1999/2010).

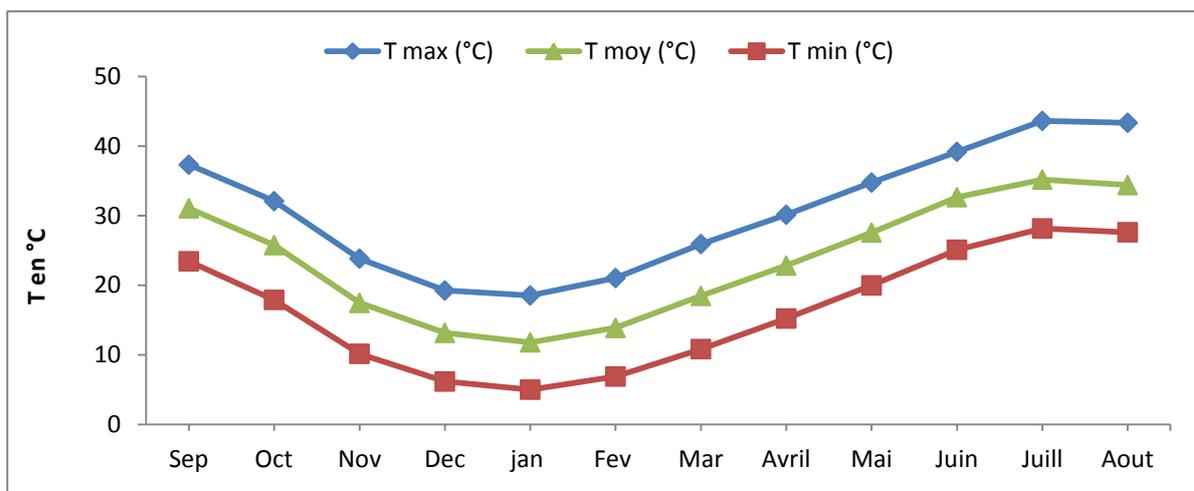


Figure. I.4: Evolution des températures moyennes mensuelles à Ouargla (1999-2010).

I.5.2 La pluviométrie

I.5.2.1 Variations interannuelles des précipitations

L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations sur une période de onze ans (1999-2010) montre que l'année 2000 est la plus arrosée avec une précipitation de 15,9 mm et l'année 2001 est la plus sèche avec 1,2 mm. Notons que les précipitations moyennes inter annuelles s'évaluent à 6,3 mm Fig. I.5.

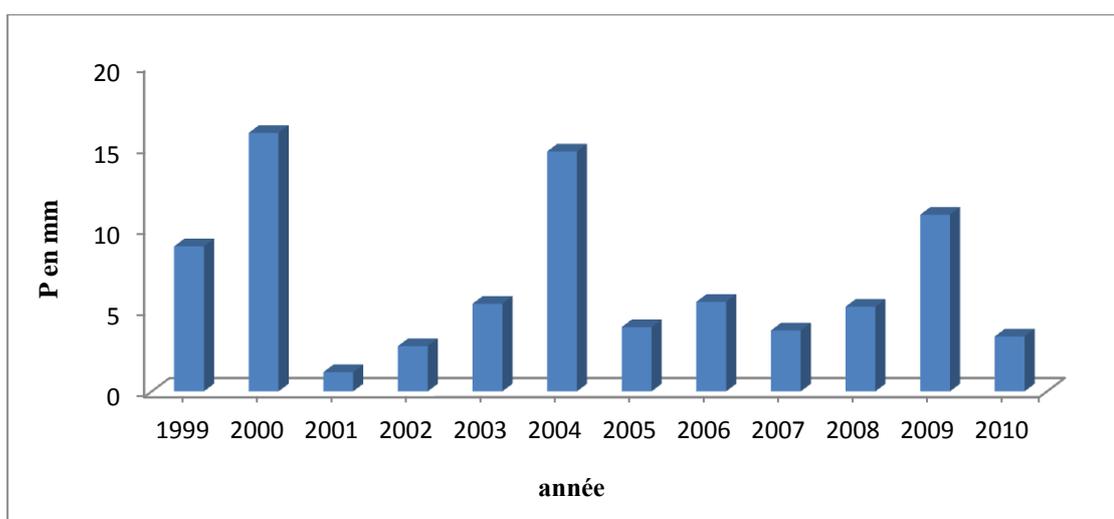


Figure. I.5 : Evolution des précipitations annuelles à la station de Ouargla pour la période (2001-2009).

I.5.2.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de onze ans (1999-2010) montre que le mois de janvier est le plus pluvieux, avec une précipitation de 13,18 mm tandis que le mois de juin est le plus sec, avec 1,53 mm Fig. I.6.

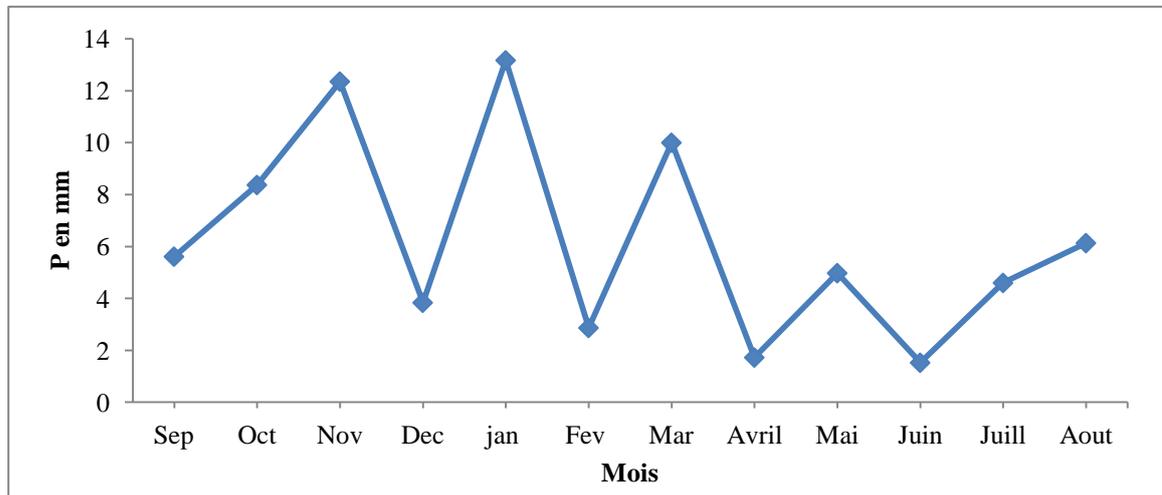


Figure. I.6 : Variation des précipitations moyennes mensuelles à la station de Ouargla pour la période (1999-2010).

I.6 Estimation de l'évapotranspiration

L'évaporation représente le processus au cours duquel l'eau se transforme en vapeur. L'ensemble des processus d'évaporation et de transpiration est connu sous le nom d'évapotranspiration. Cette dernière est l'une des composantes fondamentales du cycle hydrologique. La précision avec laquelle l'évaporation est estimée est essentielle pour le calcul du bilan hydrique. L'estimation de ce paramètre a été faite à l'aide de la formule de G.W.Thornthwaite.

I.6.1 L'évapotranspiration potentielle (ETP)

Les températures élevées et les vents fréquents et violents provoquent une évapotranspiration potentielle considérable. Il est mesurée par un évapomètre type Piche, le cumul dépasse largement 3000 mm/an, presque 150 fois celui de la pluviométrie. La période allant du mois d'Avril au mois d'Août est la plus importante (plus de 3613 mm/mois) où le mois de juillet représente la valeur maximale d'évaporation de 497,42 mm voire fig. I.7.

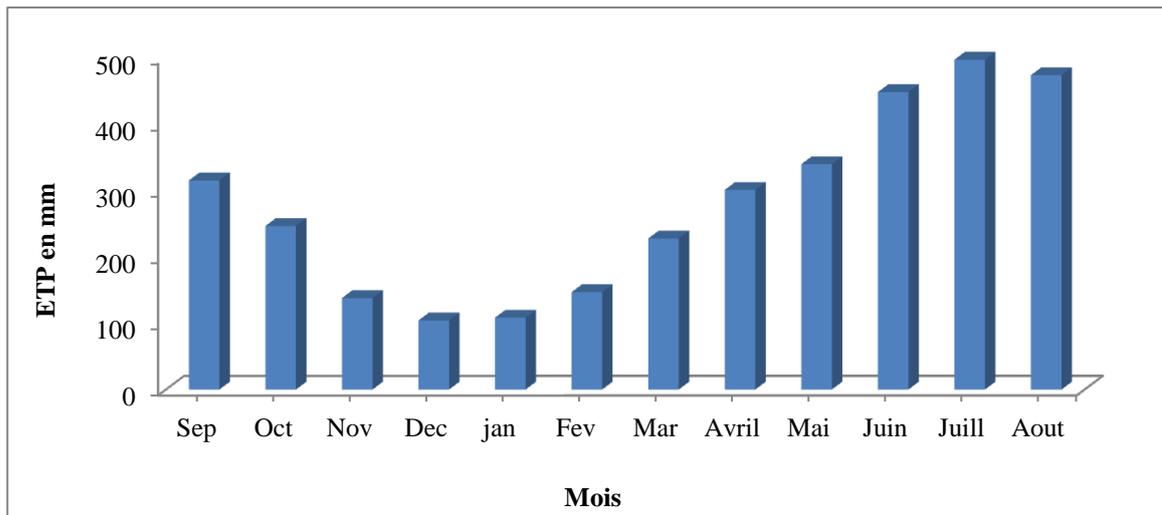


Figure. I.7 : Evolution de l'ETP mensuelle à Ouargla (1999-2010)

I.6.2 D'ETP De Thornthwaite (1948)

La formule s'appuie sur des données facilement accessibles : la température moyenne de l'air et la durée théorique de l'insolation qui dépend de la saison et de la latitude. L'évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm) est donnée par :

$$ETP_{(mm/mois)} = 16 \times \left[\left(\frac{10 \times t}{I} \right) \right]^a \times F \dots\dots\dots 1$$

- **t** = température moyenne mensuelle (°C)
- **I** = indice thermique annuel

$$I = \sum_1^{12} l_j \dots\dots\dots, \text{ Avec } l_j = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \dots\dots\dots 2$$

- **a** = fonction de l'indice I :

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} (I^3) - 7,71 \cdot 10^{-5} (I^2) + 1,79 \cdot 10^{-2} (I) + 0,49239 \dots\dots\dots 3$$

- **F** = terme correctif fonction de la durée théorique de l'insolation.

Ou les valeurs obtenues sont corrigées par un coefficient de correction F qui dépend de la latitude du bassin Tab. I.2.

Tableau. I.2: Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite.

	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév.	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T moy (°C)	31,08	25,78	17,48	13,18	11,83	13,89	18,49	22,84	27,58	32,68	35,19	34,42
I	15,90	11,98	6,65	4,34	3,68	4,70	7,24	9,97	13,27	17,15	19,19	18,55
I2	252,66	143,57	44,28	18,80	13,55	22,07	52,47	99,48	176,12	294,15	368,25	344,23
I3	4016,1	1720,2	294,6	81,5	49,9	103,7	380,1	992,2	2337,2	5044,8	7066,6	6386,8
a	0,76	0,70	0,61	0,57	0,56	0,57	0,62	0,66	0,72	0,78	0,81	0,80
F	1	1,15	1,2	1,29	1,27	1,06	1,07	0,93	0,86	0,78	0,84	0,92
ETP Th	153,46	156,33	140,27	143,85	140,52	118,87	126,94	119,05	121,63	124,49	142,91	153,44

I.6.3 D'ETP de Turc

La formule originale est utilisable à l'échelle journalière, décadaire ou mensuelle et prend deux formes selon l'humidité relative moyenne (Turc, 1955, 1961). la formule est ci-dessus ou ci-dessous:

$$ETP_{(mm/n \text{ jours})} = n \times 0,013 \times (R_g + 50) \times \left(\frac{t}{t+15}\right) \dots \dots \dots 4$$

- **n** = période considérée [jour (n = 1), décade (n = 10), mois (n = 28, 29, 30 ou 31)]
- **t** = température moyenne de l'air de la période en °C.
- **R_g** = rayonnement global en cal/cm²/jour.

Une journée estivale dans le Sud correspond à des valeurs de rayonnement global R_g de l'ordre de 20 à 25 MJ/m² (400 à 600 cal/cm²/jour). Elle est d'environ de 15 à 20 MJ/m² dans le Nord (350 à 500 cal/cm²/jour).

Dans la formule présentée ci-dessus, si la majorité l'humidité (Hr) est inférieure à 50 %, il faut multiplier la valeur de l'ETP par un terme correctif K.

$$1 + \frac{(50-Hr)}{70} \dots \dots \dots 5$$

Les résultats de l'application de cette formule sur la région d'El Hadjira sont présentés dans le Tab. I.3.

Tableau. I.3: Valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc.

	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T moy (°C)	31,08	25,78	17,48	13,18	11,83	13,89	18,49	22,84	27,58	32,68	35,19	34,42
Hr (%)	38,58	45,58	57,33	59,83	59,58	51,58	42,08	35,67	32,75	27,00	25,42	27,58
Rg	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
n	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
ETP Turc nc	131,52	123,28	104,95	91,18	85,96	93,76	107,66	117,70	126,31	133,65	136,72	135,81
k	1,16	1,06	0,90	0,86	0,86	0,98	1,11	1,20	1,25	1,33	1,35	1,32
ETP Turc co	152,97	131,06	93,96	78,38	74,19	91,64	119,84	141,81	157,44	177,56	184,74	179,30

I.6.4 D'ETP de la formule de Hargreaves

Cette formule est adaptée aux zones tempérées pour estimer l'évapotranspiration potentielle journalière des systèmes agricoles (Hargreaves et Allen, 2003). Afin de réduire les biais relatifs aux variations journalières rapides de la vitesse du vent ou de la couverture nuageuse, Hargreaves et Allen (2003) recommandent d'utiliser la formule avec un pas de temps d'au moins 5 jours (cumuls sur au moins 5 jours des valeurs journalières). Cette formule, qui a été utilisée en 1997 pour élaborer un atlas climatique mondial, est de la forme :

$$ETP_{(mm/jours)} = 0,0023 \times Ra \times (t + 17,8) \times \sqrt{\Delta t} \dots\dots\dots 6$$

- **t** = température moyenne en °C.
- **Δt** = amplitude thermique (T max – T min) en °C.
- **Ra** = rayonnement extraterrestre exprimé en équivalent d'eau évaporée (mm/jour).

Le tableau 1.4 représente les valeurs ETP par la formule de Hargreaves.

Tableau. I.4: Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Hargreaves.

	Sep	Oct	Nov	Dec	jan	Fev	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T max (°C)	37,33	32,10	23,84	19,26	18,56	21,06	25,94	30,15	34,78	39,19	43,63	43,36
T min (°C)	23,46	17,92	10,17	6,19	5,03	6,91	10,85	15,24	19,99	25,12	28,18	27,63
Rg	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
ΔT (°C)	13,88	14,18	13,68	13,07	13,53	14,15	15,09	14,91	14,78	14,07	15,45	15,73
√ΔT	3,72	3,77	3,70	3,61	3,68	3,76	3,88	3,86	3,84	3,75	3,93	3,97
ETP	7,12	6,42	5,10	4,38	4,26	4,66	5,51	6,14	6,82	7,40	8,14	8,10
ETP Harg mm/mois	213,55	192,53	153,05	131,34	127,84	139,84	165,38	184,07	204,68	222,11	244,33	242,89

I.6.5 Comparaison des formules D'ETP

Des nombreuses études ont comparé les méthodes de calculs de l'ETP (Choisnel et al., 1992 ; Winter et al., 1995 ; Federer et al., 1996 ; Jensen et al., 1997 ; Droogers et Allen, 2002 ; Rosenberry et al., 2004). Dans ces travaux, la valeur de référence est soit celle d'un couvert herbacé en croissance et bien alimenté en eau suivi sur plusieurs années en case lysimétrique de quelques dizaines de m², ou celle donnée par la formule de Penman-Monteih qui est reconnue comme la meilleure formule dans une large gamme de contexte climatique. Les estimations par les différentes formules sont alors comparées aux mesures réelles ou de Penman et les résultats sont discutés en termes d'écart moyens journaliers.

La comparaison des ETP moyennes (période 1999-2010) qui sont calculées de la région d'étude entière et au pas kilométrique met clairement en évidence des différences importantes. L'ETP Turc donne les valeurs annuelles les plus faibles (moyenne : 131,91 mm), devant Thornthwaite (136,81 mm) et Hargreaves (185,13 mm).

L'amplitude des valeurs est plus forte avec les formules de Hargreaves et Turc ; la formule de Thornthwaite ayant tendance à uniformiser les ETP.

Ainsi, les écarts entre deux méthodes Turc et Thornthwaite qui sont presque identiques et celle de Hargreaves peuvent atteindre 60 mm sur la zone d'El Hadjira fig. I.8.

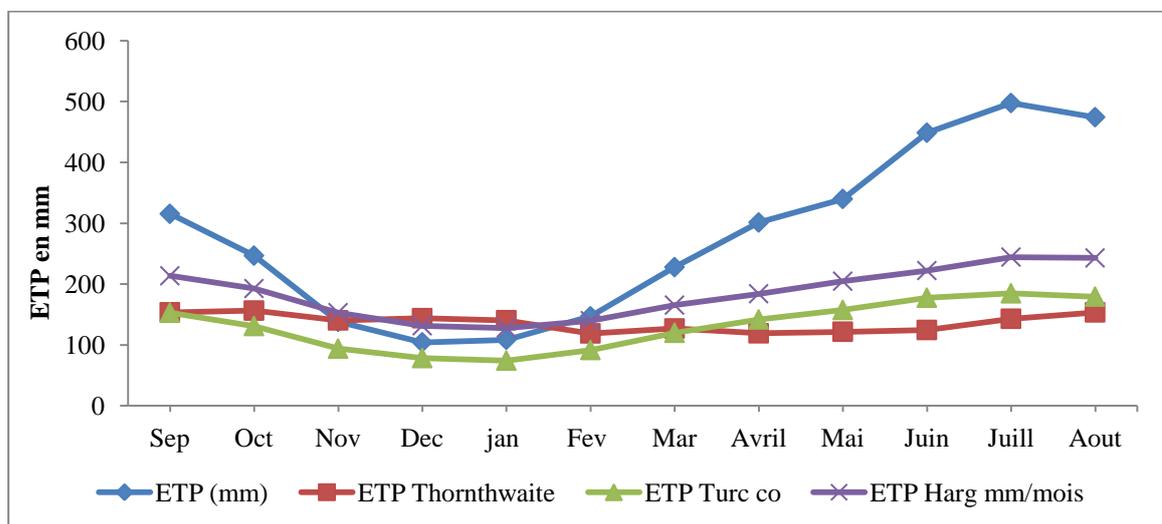


Figure. I.8 : L'ETP estimée par différentes méthodes.

I.7 L'humidité de l'aire

L'humidité relative est très faible (25,42% en moyenne en juillet), atteignant un maximum en décembre de 60%. L'humidité dans la région d'El Hadjira est en moyenne d'ordre 42% pendant la période (1999 et 2010), cependant elle est plus élevée que dans d'autre oasis, ce qui est particulièrement perceptible sous le couvert de la palmeraie en hiver et au printemps. Elle varie selon les points de la cuvette en fonction de l'évaporation. Celle-ci est en effet toujours très importante, mais évidemment plus élevée en zone désertifiée que sous couvert d'arbres.

I.8 L'insolation

L'ensoleillement est en effet considérable (fraction d'insolation qui varient de valeur minimal en hiver 200. Elle peut atteindre 300 en été comme une valeur maximale avec 136 jours en moyenne dans l'année ou le ciel est totalement clair .cependant, en saison froide, le ciel est assez fréquemment couvert sans pour cela qu'il y ait de pluie.

I.9 Le vent

Les vents, et notamment les vents de sable, jouent un rôle particulièrement desséchant. Les vents les plus forts sont supérieurs à 20 m/s soufflent du NE et de S. En hiver, ce sont des vents d'W, printemps du N, du NE et de W, en été du quart NE. Les vents de sable soufflent, notamment au printemps, du NE et du SW.

I.10 Caractérisation du climat

La recherche d'indices bioclimatiques, permettant de caractériser le plus simplement possible le niveau de sécheresse ou d'aridité d'un lieu ou d'un climat, a été une préoccupation importante de la communauté scientifique dans la première moitié du XXe siècle (Curé, 1945).

La caractérisation du climat d'une zone donnée à l'aide d'indices ou des diagrammes permet de comparer les climats d'une région à l'autre. Ils prennent, généralement en compte, l'offre pluviométrique se rapportant à la demande évaporative et les températures. Ces indices qui sont les plus couramment utilisés sont les suivants :

I.10.1 Diagramme Ombrothermique

C'est encore à l'heure actuelle est considéré comme l'un des indices le plus utilisé. Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (P en mm) et de la température (T en °C) et donne une expression relative à la sécheresse estivale en durée et en intensité (Gausсен et Bagnouls, 1952). Un mois donné est considéré comme sec quand $p < 2t$, c'est-à-dire quand les pertes en eaux (supposées causées par une température trop forte) sont supérieures aux apports (précipitations).

On constate que la saison sèche est formée par plusieurs mois secs consécutifs. Le diagramme de Gausсен (fig. I.9) permet de mettre en évidence une saison humide débutant au mois de novembre qui se termine au mois de février, et une saison sèche qui s'étale du mois d'avril jusqu'au mois de novembre.

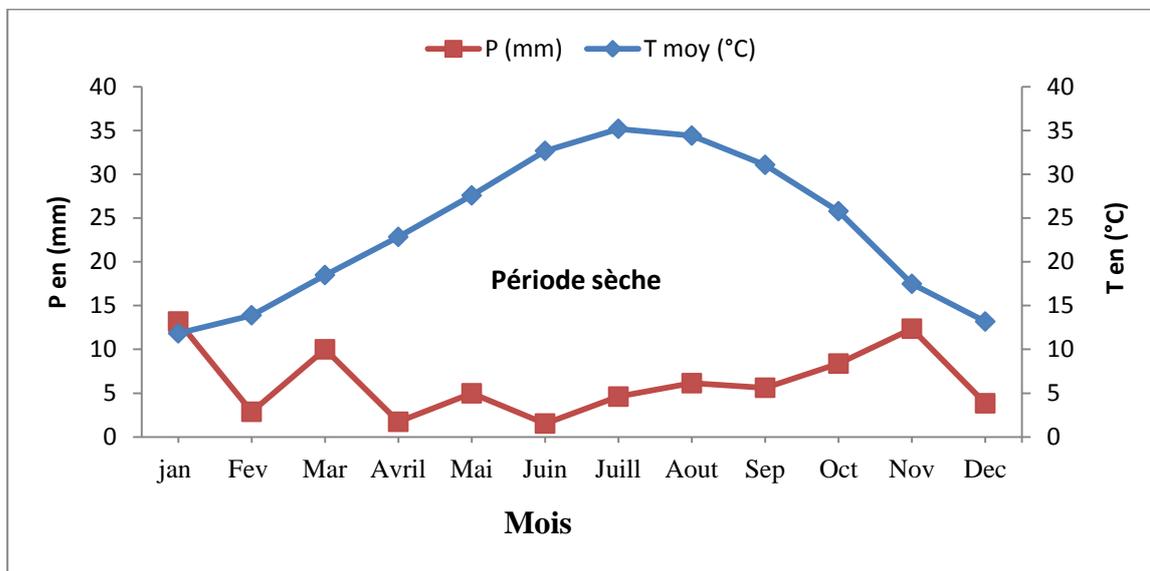


Figure. I.9 : Courbe Ombrothermique de la station de Ouargla.

I.10.2 Indice de De Martonne

Cet indice est calculé en fonction des températures et des précipitations ; L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. L'indice de Martonne (1926) a défini l'aridité du climat à l'échelle annuelle par l'équation :

$$I = \frac{P}{T+10} \dots\dots\dots 7$$

Où

I : indice d'aridité

P : précipitations moyennes annuelles en mm.

T : températures moyennes annuelles en °C.

Application :

$$P = 10,6 \text{ mm}$$

$$T = 17,67 \text{ °C}$$

Ce qui donne :

$$I = 0,38$$

Suivant les valeurs de (I) L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé de différents grands types de macroclimats, De Martonne a établi la classification suivante :

Suivant les valeurs de (I) L'aridité augmente quand la valeur de l'indice diminue. Au niveau mondial, De Martonne a proposé différents grands types de macroclimats, De Martonne a établi la classification suivante :

- $I < 5$: climat hyperaride
- $5 < I < 7,5$: climat désertique
- $7,5 < I < 10$: climat steppique
- $10 < I < 20$: climat semi-aride
- $20 < I < 30$: climat tempéré

Selon les paramètres enregistrés au niveau de station de Ouargla, si on projette ces données sur la région d'El Hadjira, tu peux classer cette zone où bénéficie d'un climat hyperaride voire la fig. I.10.

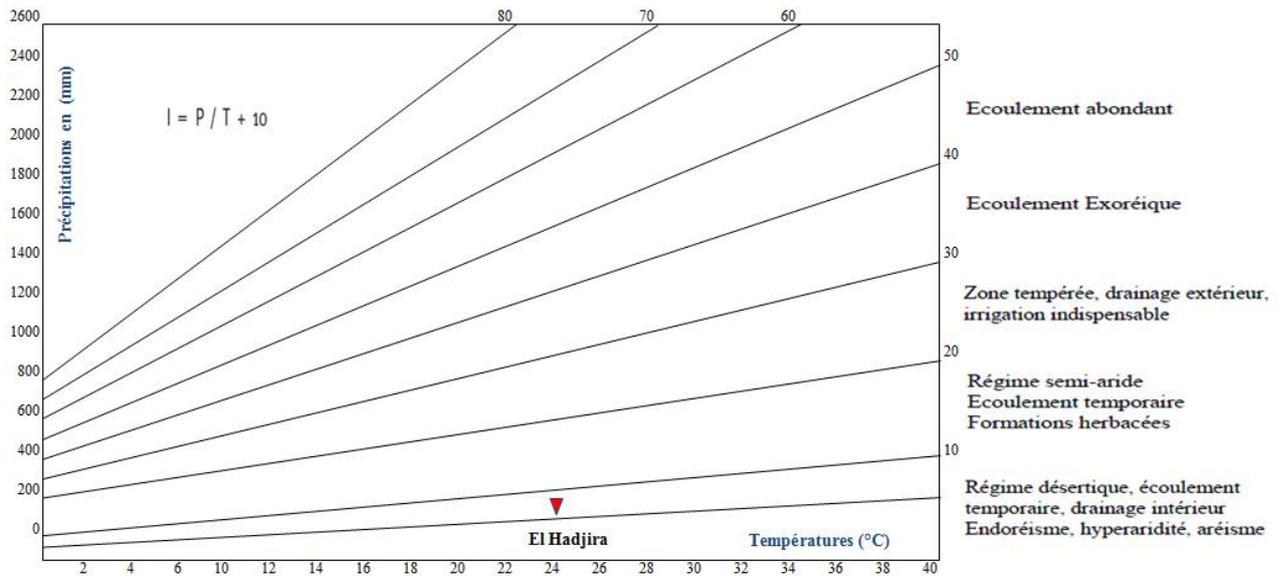


Figure. I.10 : Abaque de l'indice de l'aridité de De Martonne.

I.10.3 Indice d'aridité mensuel

De Martonne a également défini un indice utilisable à l'échelle mensuelle. Pour un mois donné caractérisé par une précipitation et une température moyenne P en mm et T en °C, l'indice d'aridité mensuel est :

$$I = \frac{12 \times P}{T^{\circ} + 10} \dots\dots\dots 8$$

Où

- I : Indice d'aridité mensuel
- P : Précipitations moyennes mensuelles en mm.
- T° : Température moyenne mensuelle en °C.

L'application de la formule (2) a permis de dresser le Tab I.5.

Tableau. I.5 : Indices d'aridité mensuels (I) à la station de Ouargla pour l'année 2011.

Mois	I	Etage bioclimatique
Septembre	1,64	hyperaride
Octobre	2,81	hyperaride
Novembre	5,40	hyperaride
Décembre	1,99	hyperaride
Janvier	7,24	désertique
Février	1,44	hyperaride
mars	4,21	hyperaride
Avril	0,63	hyperaride
Mai	1,59	hyperaride
Juin	0,43	hyperaride
Juillet	1,22	hyperaride
Aout	1,66	hyperaride

Selon la classification précédente de De Martonne, le mois de Janvier présente un climat désertique tandis que les autres mois sont hyperarides avec des valeurs d'indice d'aridité moins que quatre (voire fig. I.11).

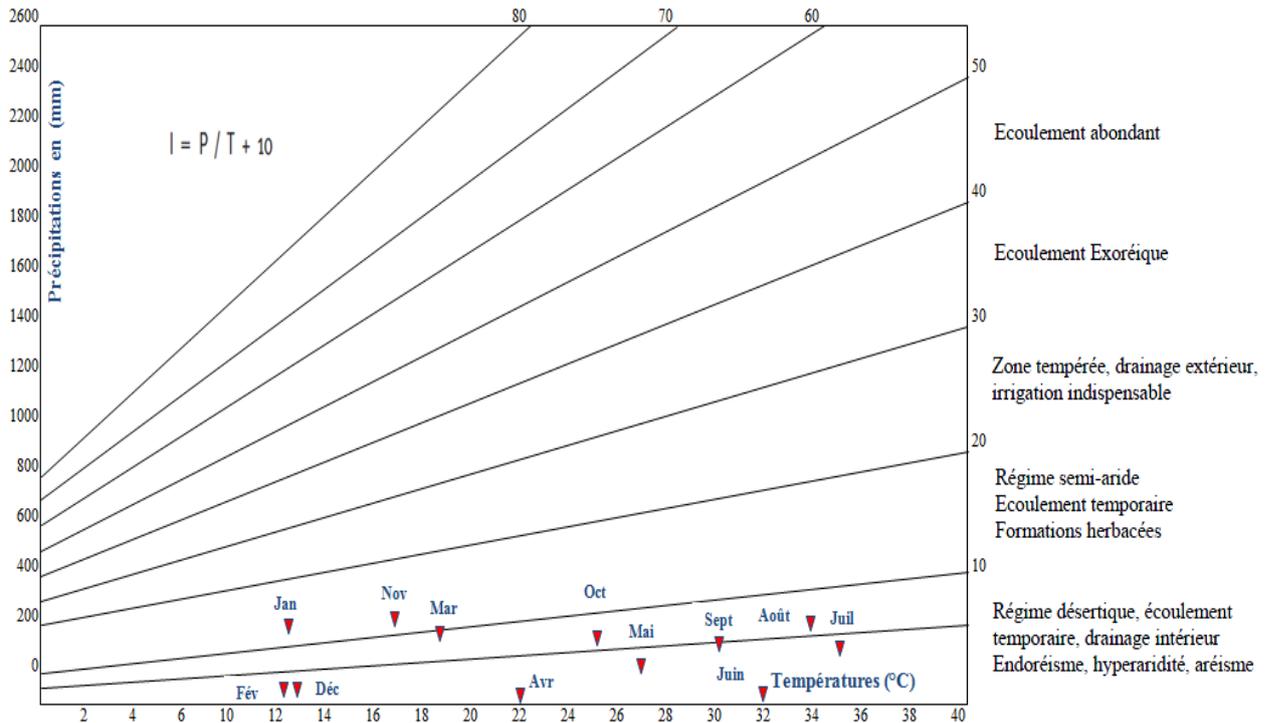


Figure. I.11 : Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923).

I.10.4 Climagramme de Louis Emberger

Pour déterminer les climats de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q₂, qui dépend des précipitations moyennes annuelles et des moyennes de températures minima et maxima, respectivement des mois le plus froid et le plus chaud. Il propose donc la formule suivante :

$$Q_2 = \frac{P}{\frac{(M+m)(M-m)}{2}} \cdot 1000 \dots\dots\dots 9$$

Où

- **P** : précipitation moyenne annuelle (mm).
- **M** : moyenne des maxima du mois le plus chaud (degrés/Kelvin).
- **m** : moyenne des minima du mois le plus froid (degrés/Kelvin).

L'application numérique donne les résultats suivants :

P = 6,01 mm

M= 317,84 °K

m = 279,27 °K

Ce qui donne :

Q₂ = 0,26

Le rapport de notre station sur la Fig. I.12 permet de dire que le climat de la région d'El Hadjira est de type saharien.

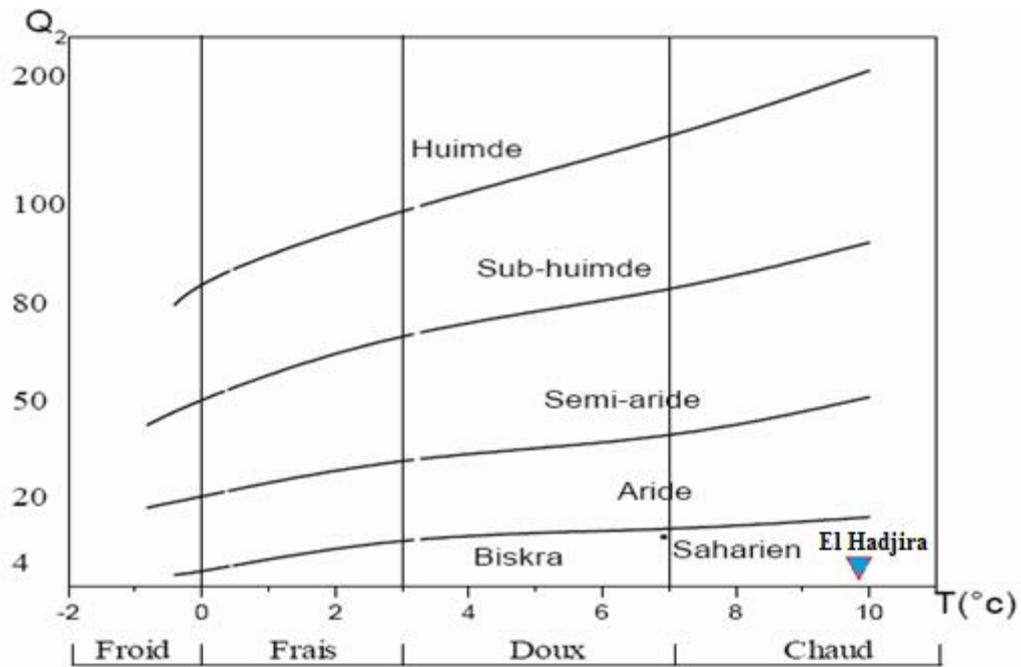


Figure. I.12 : Climagramme d'Emberger de la station de Ouargla.

I.10.5 Indice de Paul Moral

Les résultats précédents sont confirmés par l'indice pluviométrique de Moral (IM), qui utilise aussi la hauteur annuelle des précipitations (en mm) et les températures moyennes annuelles en $^{\circ}\text{C}$. Cet indice permet déterminer aridité ou bien l'humidité de la région d'étude. Il est calculé par la formule suivant :

$$IM = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} \dots\dots\dots 10$$

Si :

- **IM** < 1. Il existe un climat sec.
- **IM** > 1. Il existe un climat humide.

Calcul numérique :

$$P = 12.36 \text{ mm}$$

$$T = 17.48 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ce qui donne

$$IM = 0,03$$

On peut dire que le climat d'El Hadjira est sec et aride, c'est-à-dire, il peut être qualifié hyperaride. Les indices d'aridité Paul Mural sont mentionnés dans le Tab. I.6

Tableau. I.6 : Indices de Paul Moral (IM) à la station de Ouargla.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Août
I Paul Mural	0,007	0,014	0,037	0,016	0,059	0,011	0,028	0,003	0,007	0,002	0,004	0,006

I.10.6 Comparaison des indices climatiques

Sachant que les éléments climatiques les plus importants pour caractériser un climat sont les précipitations, les températures et l'évaporation ; les méthodes combinant ces éléments sont plus intéressantes que celles qui incluent un seul élément. Toutes ces méthodes ont qualifié le climat de la région d'El hadjira comme étant hyperaride, ce qui est en conformité avec la carte des étages bioclimatiques, établie par UNEP/GRID 1991 dans WRI (fig. I.13).

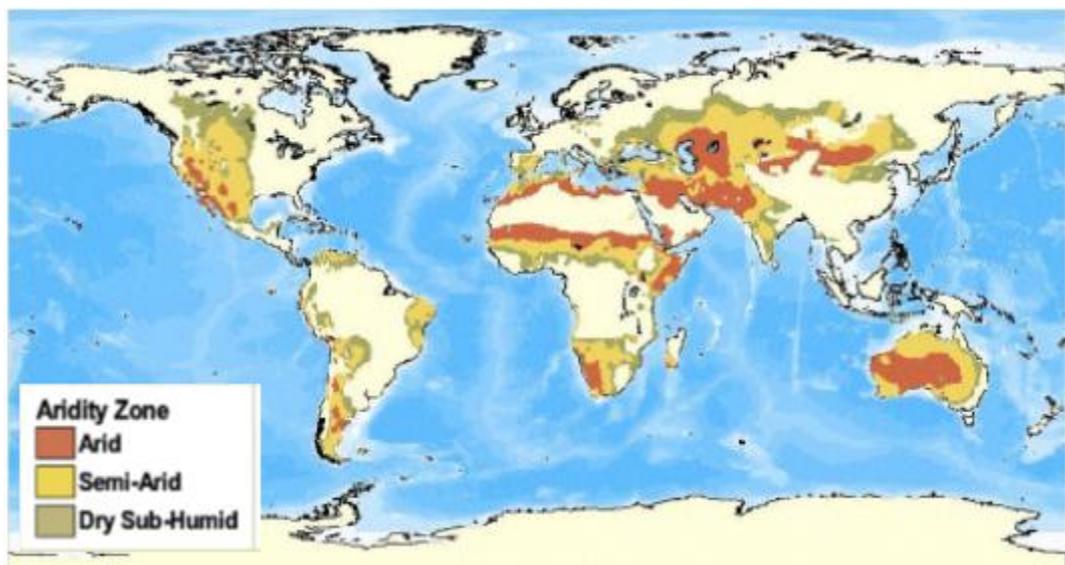


Figure. I.13 : La carte mondiale des terres arides Source: UNEP/GRID 1991 dans WRI.

I.11 Bilan hydrologique

Un système hydraulique est défini un volume d'eau que l'on veut étudier. Ce système peut être un lac ,une rivière, un aquifère, un bassin versant etc. l'équation de base dans un système hydrogéologique s'écrit :

$$\text{Variation des réserves} = \text{Entrée} - \text{Sorties}$$

- **Entrées** : précipitation, infiltration dans le sol, infiltration souterraines, apport artificiel (stockage souterrain d'eau).
- **Sorties** : évaporation, transpiration, ruissellement de surface, ruissellement souterrain, pompage.
- **Variation des stocks** : variation du débit ou de la hauteur d'une rivière ou bien d'un lac, changement de l'humidité du sol, stockage dans les dépressions occasionnelles,

Le calcul du bilan hydrologique est fonction de plusieurs facteurs du système hydrologique tels que: les précipitations, le ruissellement, l'infiltration et l'évaporation. L'évapotranspiration réelle peut ainsi être calculée en faisant le bilan sur un long terme des entrées et sorties d'eau sur des unités hydrologiques ou hydrogéologiques bien circonscrites. Si, sur l'ensemble du bassin, on connaît bien les précipitations, grâce à des réseaux de pluviomètres et les débits des cours d'eau grâce à des seuils de mesure.

Dans le cas notre zone d'étude (sebkhas), l'évaporation est 45 fois plus importante que la précipitation (6 mm). Donc le bilan hydrique pendant une année en déficit, à l'exception pendant les crues.

I.11.1 Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite :

Cette méthode est utilisée pour les climats sub-humide et semi-aride, ce qui convient à la région de El Hadjira, vu les caractéristiques de son climat. Elle est basée sur la notion de réserve d'eau facilement utilisable (RFU). L'estimation de ce paramètre a été faite par l'application de la formule de Hallaire 1960 (cité par J.Ricard 1979).

$$RFU = \frac{1}{3} \times Da \times He \times P \dots \dots \dots 11$$

Où

Da : densité apparente du sol, pour la plaine de Ouargla $Da = 0,9$

He : humidité équivalente en %, estimée à 20 %.

P : profondeur de la couche traversée par les racines, estimée à 22 cm.

L'observation du bilan hydrologique nous amène à dire que l'ETP est importante du mois de mars jusqu'au mois d'août, avec des valeurs atteignant les 497,42 mm au mois d'août. A partir du mois de novembre, on assiste à une reconstitution du stock qui s'accompagne d'une augmentation de la RFU, qui atteint son maximum entre les mois de janvier et mars. Au-delà de cette période, on assiste à une baisse de la RFU, traduisant un épuisement du stock.

L'application de la méthode de Thornthwaite pour l'année moyenne, l'année la plus humide et l'année la plus sèche a donné les résultats qui sont consignés dans les Tab. I.7 à I.9

Tableau. I.7: Bilan hydrologique moyen (2009-2011) à la station de Ouargla, par la méthode de Thornthwaite.

	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fev	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T moy (°C)	31,08	25,78	17,48	13,18	11,83	13,89	18,49	22,84	27,58	32,68	35,19	34,42
Evap(mm)	315,33	246,67	137,92	104,25	108,42	146,92	227,75	301,08	339,83	448,58	497,42	474,17
P (mm)	5,61	8,37	12,36	3,84	13,18	2,87	10,00	1,73	4,98	1,53	4,60	6,13
P-ETP(Déficit)	-309,7	-238,2	-125,5	-100,4	-95,2	-144,0	-217,7	-299,3	-334,8	-447,0	-492,8	-468,0
RFU	0,34	0,50	0,74	0,23	0,79	0,17	0,60	0,10	0,30	0,09	0,28	0,37
ETR	5,92	8,83	13,02	4,05	13,88	3,02	10,54	1,82	5,24	1,61	4,85	6,47

Tableau. I.8: Bilan hydrologique pour l'année la plus humide à la station de Ouargla (2009), par la méthode de Thornthwaite.

	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T moy (°C)	29,1	32,1	16,7	14,9	12,3	13,8	17,4	19,8	26,4	33,1	36,7	35,1
Evap (mm)	222	167	110	111	81	115	152	173	153	333	417	384
P (mm)	6,3	0,1	0	0	54,1	1,5	10,6	0,8	0	2,5	0	0
P-ETP (Déficit)	-215,7	-166,9	-110,0	-111,0	-26,9	-113,5	-141,4	-172,2	-153,0	-330,5	-417,0	-384,0
RFU	0,38	0,01	0,00	0,00	3,25	0,09	0,64	0,05	0,00	0,15	0,00	0,00
ETR	6,64	0,11	0,00	0,00	56,83	1,58	11,17	0,84	0,00	2,64	0,00	0,00

Tableau. I.9: Bilan hydrologique pour l'année la plus sèche à la station de Ouargla (2007), par la méthode de Thornthwaite.

	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T moy (°C)	32,4	25,2	16,5	11,5	12,4	16	17,2	21,8	27,4	33,8	33,9	35,1
Evap (mm)	395	278	131	109	93	164	256	283	418	499	469	517
P (mm)	0	3	0	6,1	0	0	0	3,7	3	0	0	2,9
P-ETP (Déficit)	-395,0	-275,0	-131,0	-102,9	-93,0	-164,0	-256,0	-279,3	-415,0	-499,0	-469,0	-514,10
RFU	0,00	0,18	0,00	0,37	0,00	0,00	0,00	0,22	0,18	0,00	0,00	0,17
ETR	0,00	3,16	0,00	6,43	0,00	0,00	0,00	3,90	3,16	0,00	0,00	3,06

I.11.2 Commentaire sur le bilan hydrologique

Le calcul du bilan hydrologique permet de faire les constatations suivantes :

La pluie ne permet pas un stockage permanent de l'eau dans le sol de sebkas, ce qui induit un déficit plus ou moins long. Ainsi, la saturation de la RFU, pour une année moyenne, ne dure que 03 mois de janvier à mars. Cette saturation ne dure que 07 mois pour une année sèche et peut atteindre 03 mois pour une année humide. Cette situation induit un déficit pendant 06 mois (de mai à octobre). Pour l'année la plus sèche, le déficit est enregistré pendant 07 mois (de mai à novembre). Les sols agricoles demandent donc une irrigation par les eaux de surface, qui vont produire une recharge supplémentaire de la nappe et une modification de la composition chimique des eaux. Généralement, notre zone d'étude est toujours en déficit hydrique très intense.

I.12 Conclusion

La région d'El Hadjira fait partie de Sahara septentrional. Il est caractérisé par un climat type hyper-aride, un bassin versant canalise l'eau de pluies vers les Sebkhha de la région telle que sebkhha Beghdad. L'étude hydroclimatologique nous permet de déduire que :

- Le climat de la région d'El Hadjira est de type hyper-aride, caractérisé par un été chaud et sec et un hiver froid.
- Cette zone est caractérisée par l'irrégularité et la faiblesse de ses précipitations. Les précipitations moyennes annuelles pour la période 1999 –2010 sont de 6 mm.
- La température moyenne est de 23.6 °C pour la période (1999-2010), avec un maximum de 43,63 °C au mois de juillet et un minimum au mois de janvier 10,17°C.
- L'évapotranspiration potentielle calculée par la formule de Thornthwaite nous donne 136,81 mm pour la période (1999-2010), l'évapotranspiration réelle est de 274,89 mm pour la même période, cette valeur va servir dans le calcul du bilan hydrique.

La rareté des averses et la quantité annuelle minimale de précipitations dans cette zone induisent un déficit hydrique accentué entre -95,2mm et -468,0mm par l'évaporation plus importante que l'humidité.

**CHAPITER II : CONTEXTE
GEOLOGIQUE DE LA ZONE
D'ETUDE**

II.1 Introduction

La géologie du bassin de Sahara septentrional a été étudiée en se référant aux anciens travaux géologiques, réalisés par de nombreux géologues chercheurs tels que : J.FABER et G.BUSSON et al (1967), qui ont réalisé la carte géologique de Sahara Algérien au 1/2.000. 000, (1967)

Ces travaux sur le bassin de Sahara septentrional ont montré qu'il s'agit des terrains sédimentaires affleurent en surface qui offrent aux géoscientifiques un corpus vierge, une situation de départ, une source d'inspiration et un pôle d'observations et de réflexions où de nombreuses questions demeurent non résolues et vagues et qui suscitent par la suite un intérêt scientifique et économique.

De nombreux ouvrages ont été alors consacrés à cette région. Les écrits de Jean Fabre sur cette région décrivent les aspects géologiques qui étaient très nombreux et le lecteur avait toujours la curiosité de les feuilleter.

La géologie est une partie très importante dans toute étude hydrologique et hydrochimique. Ainsi, la lithologie, la tectonique et la structure géologique jouent un rôle primordial sur la qualité des eaux suite à la dissolution des minéraux qui se trouvent dans la roche et sur la quantité d'eau qui ruissèle ou s'infiltré selon le type du terrain. Donc la connaissance de géologie est primordiale.

II.2 Cadre géologique régional

La région d'Oued Mya fait partie de bassin du Sahara oriental, il appartient à la plate forme saharienne dont elle ne constitue qu'un sous bassin intra-cratonique, sa bordure Nord s'allonge progressivement vers la flexure sud atlasique saharienne où l'existence d'un fossé très subsidient au Mésozoïque donnera naissance à la chaîne péri-cratonique de l'Atlas saharien.

L'évolution de la région d'Oued Mya (d'après BICIPE) depuis le Cambrien comporte deux étapes majeures :

- 1-La sédimentation du Paléozoïque, pratiquement restreinte au Paléozoïque inférieur et sa structuration pré-hercynienne,
- 2-La création d'un bassin au Trias et son évolution au cours du Mésozoïque et du Tertiaire.

Ces deux étapes principales de l'histoire régionale conduisent à considérer deux mégacycles sédimentaires, paléozoïque et mésozoïque, classiquement séparés par la discordance hercynienne, avec la pérennité pendant tout le Paléozoïque des zones hautes structurant la région.

Le bassin oriental se présente également comme un vaste synclinal. 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.

D'après Cornet et Gouscov (1952) ; Cornet (1964) ; Bel et Cuche (1968 et 1971) ; et les travaux de l'Ecole des Mines de Paris en 1975 : La carte géologique (fig. II.1 et II.2) de la région ne fait apparaître qu'une couverture tabulaire de terrains tertiaires, et de dépôts détritiques quaternaires. La lithostratigraphie est plus ou moins complète, elle n'est connue que grâce aux forages profonds d'exploration pétrolière ou hydraulique.

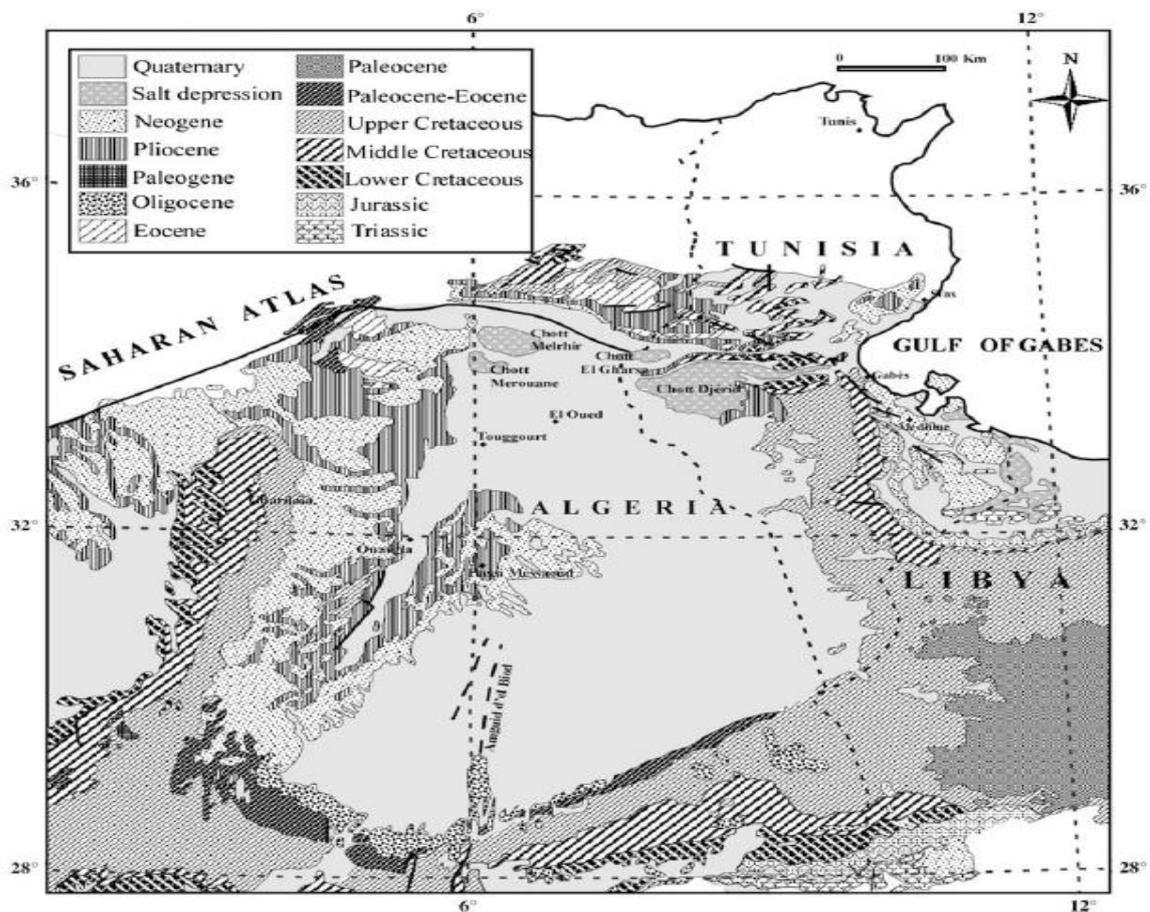


Figure. II.1: Carte géologique du Bas-Sahara (d'après Nesson, 1978)

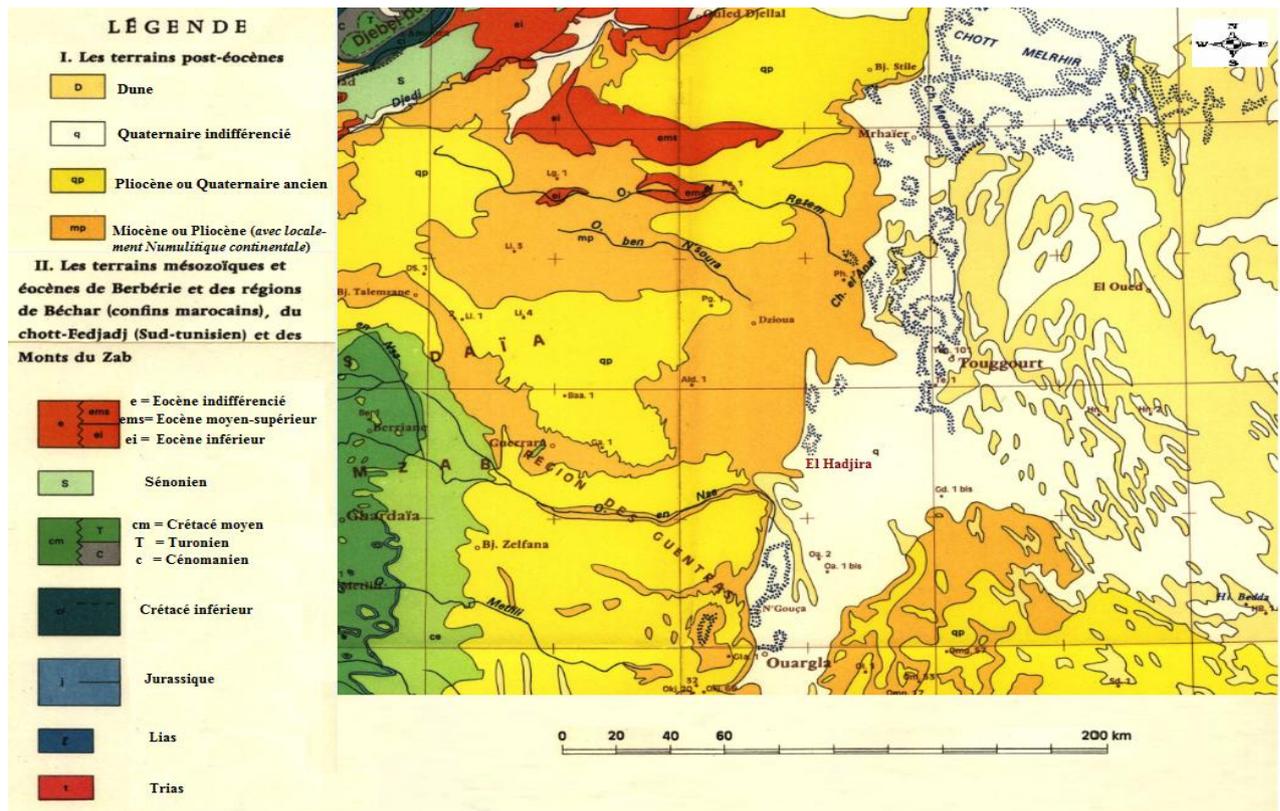


Figure. II.2: Carte géologique du Sahara septentrionale (d'après G-Busson G, 1967)

II.3 Stratigraphie

Les formations qui se représentent dans la zone d'étude sont (Fig. II.3):

II.3.1 Le Paléozoïque

II.3.1.1 Le cambrien

Les dépôts cambriens reposent sur le socle cristallin et sont représentés par des grès et des quartzites à passées conglomératiques. L'origine de ces ensembles est azoïque grés-conglomératique. Ce sont continentales (fluviale).

II.3.1.2 L'Ordovicien

L'Ordovicien dans la région de Sahara septentrional est comme celle dans le sud tunisien, les premiers sédiments de l'ordovicien sont datés du Trémadoc, ils sont des grès bien classés, dits « grès isométriques d'El Gassi ». Les sondages pétroliers ont traversé, sous le grand Erg orientale, un ordovicien « moyen » argileux ou argilo-gréseux. Ce sont les formations de Hassi Touareg. celui-ci comporte un membre argileux médian (Azal), riche en fossiles (graptolites, brachiopodes, lamellibranches, trilobites), encadré de deux membres gréseux, les grès de Ouargla à la base, et ceux de l'Oued Saret au-dessus. Les superpositions des autres séries gréseux tel que grés d'El Hamra grés El Atchan contiennent de mince intercalations argileuses. Elles ont livré des graptolites de l'Arenig inférieur. Épaisseur de cette série et de 300 à 400m.

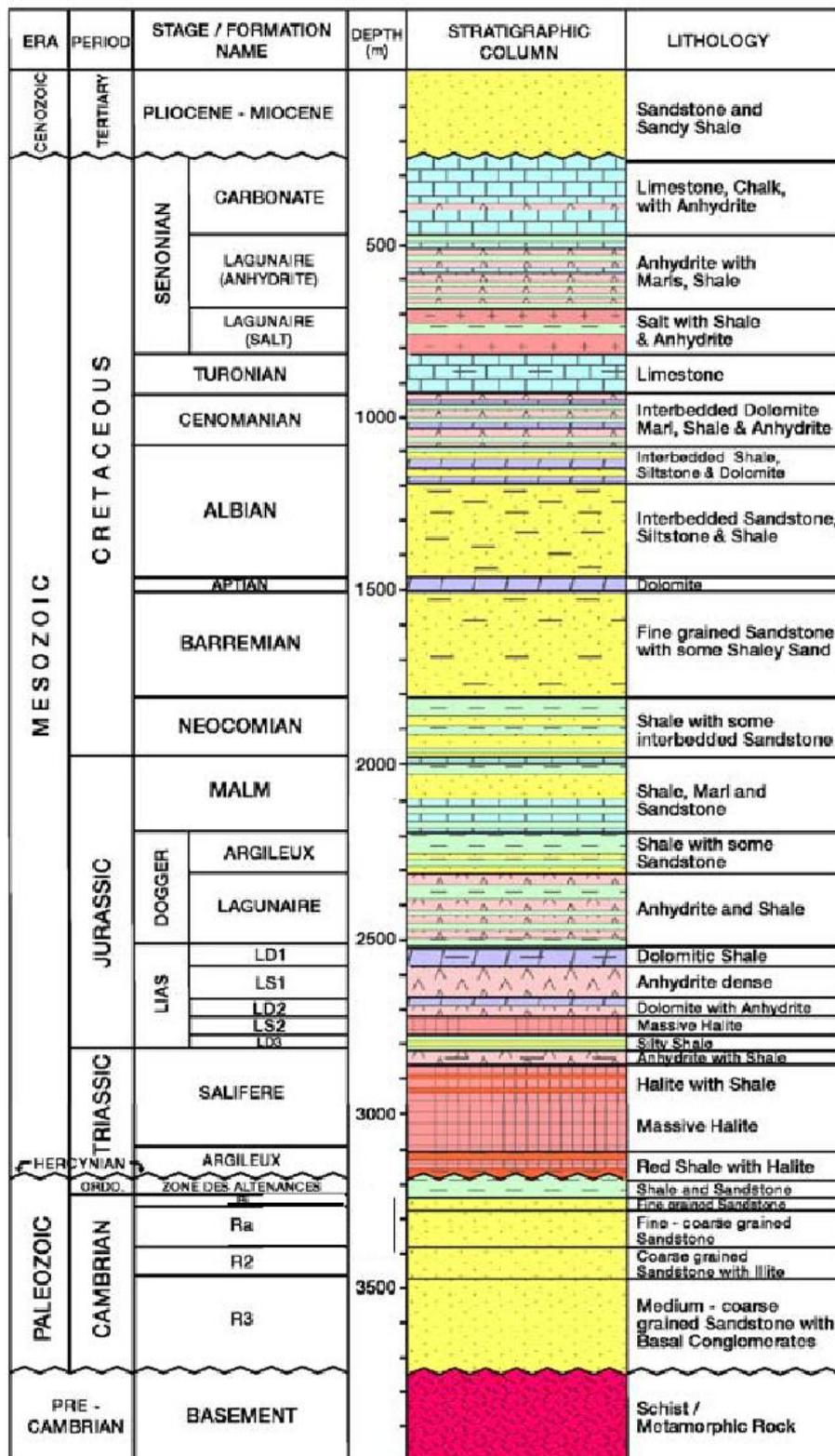


Figure. II.3 : Colonne stratigraphique typique du Sahara septentrional (Sonatrach Division Forage, 2004)

II.3.1.3 Le Silurien

Le silurien est caractérisé par une sédimentation terrigène fine, argileuse en milieu marin. Il est formé des argiles noires et siltites à graptolite, des argiles à passées gréseuses et rares bancs carbonatés sont bien développées au Sahara septentrional d'environ 600m d'épaisseur. Des nombreux sondages pétroliers les ont rencontrées sous une couverture de terrains méso-cénozoïques. Les fossiles caractérisant de silurien du sahara septentrional sont des orthocères, quelques petits trilobites (Phacops), des lamellibranches (Cardiola) qui caractérise du silurien, des débris de poissons cuirassés (Massa et al, 1965) et des graptolites.

II.3.1.4 Le Dévonien

Le Dévonien du Sahara oriental apparaissait autrefois comme un mégacycle sédimentaire bien caractérisé. Le passage du silurien au Dévonien se fait au sein d'une sédimentation argileuse continue. Plus tard, reprise de sédimentation sableuse fine (formation des grès de Zeilmet) à laquelle succède une sédimentation argileuse parfois interrompue par des dépôts calcaires

II.3.1.5 Permo-Carbonifère

Le Carbonifère correspond au cycle sédimentaire paléozoïque final. On peut l'observer dans les domaines occidentaux et orientaux, séparés par le môle d'Amguid-El Biod- Messaoud d'où les dépôts sont absents. Les faciès varient, de marin profond jusqu'à continental. De même, les épaisseurs varient de 900m à l'est pour atteindre 2800m à l'ouest.

II.3.2 Le Secondaire

II.3.2.1 L'Albien

A la base de l'albien, les grès fins rouges avec des intercalations argileuses, Suivi des couches d'une épaisseur de 50 à 60 m. La partie inférieure est entièrement continentale alors que la partie supérieure comprend des argiles, des marnes, des anhydrites, des calcaires et des dolomies. Au sommet, l'Albien, avec une puissance de 400 m, et qui renferme principalement des grès rouges avec des intercalations argileuses L'ensemble a une épaisseur de l'ordre de 500 m. On y trouve peu de fossiles : des débris de bois, des mollusques.

II.3.2.2 Le Vraconien

Le Vraconien est représenté par des dépôts de 70 m à 100 m de calcaire dans le nord du grand erg oriental. Il est représenté par des dolomies microcristallines et de calcaires dolomitiques à intercalation d'argiles pélitiques et de marnes dolomitiques de couleur brune ou rouge. Ce Vraconien carbonaté n'est qu'un terme de passage entre l'Albien gréseux (sommet du Continental Intercalaire), et le Cénomanién argilo-carbonaté (base de Complexe Terminal).

II.3.2.3 Le Cénomanién

Busson et Cornée (1991) remarquent que du gypse, de l'anhydrite et des argiles de Cénomanién se déposent dans le sahara juste avant la transgression marine cénomanién. L'argile vert de Cénomanién est riche en bancs de gypse (évaporites) et son épaisseur semble varier d'environ 100 à 200m d'épaisseur, La facies caractéristiques ce sont des argiles et gypse de faciès laguno-marin qui marquent le début de la grande transgression néo-crétacée après la phase d'émersion du « Continental intercalaire ». Ces dépôts, parfaitement imperméables, constituent le « toit » de la nappe aquifère en charge contenue dans les grès sous-jacents. L'épaisseur est de 300 à 500 m.

Au cénomanién supérieur, la mer s'avance sur une pénéplaine en parle de la transgression Cénomanién. A cet âge en remarque des facies de calcaire à ammonites.

II.3.2.4 Le Turonien

Le Turonien du sahara septentrional est constitué des calcaires crayeux en gros bancs à silex, ces formations affleurant sont formés par les plateaux, les cuestas de Tademaït, du Tinrhert et du Dahar. Ils sont d'épaisseur de 120 m environ.

II.3.2.5 Le Sénonien

Le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées :

- **Le sénonien inférieur (lagunaire)**
- **le Sénonien supérieur carbonaté**

II.3.2.5.1 Le Sénonien lagunaire

Le sénonien lagunaire est marqué par des formations argileuses et salifères à anhydrite et de sel gemme. Quelques lits de lignite mais aussi de marnes dolomitiques, de dolomies ou de calcaire oolitique y sont interstratifiés. Ces derniers ont livré des poissons, des ostracodes, des foraminifères, des algues calcaires et des polypiers. Ces facies indiquent tantôt un golfe à demi fermé et des lagunes où se déposent des évaporites, tantôt un milieu continental de lacs d'eau douce ou de marais à lignites. Le Sénonien lagunaire a une épaisseur qui varie de 0 à 500 mètres

II.3.2.5.2 Le Sénonien carbonaté (Maestrichtien)

Le Sénonien carbonaté est essentiellement constitué de calcaire crayeux fossilifère et argileux, dolomies beiges vacuolaires, dolomies calcaires à débris, marnes dolomitiques et marnes grises. L'épaisseur du Sénonien carbonaté dans la région de Ouargla est de 90 mètres environ. La transition Sénonien lagunaire-Sénonien carbonaté est floue. On peut prendre comme limite supérieure du Sénonien lagunaire : soit le toit du dernier banc d'anhydrite lorsque le changement est franc, soit le niveau où le pourcentage des carbonates devient supérieure à celui des évaporites, lorsque le changement de faciès est progressif.

II.3.3 Le Tertiaire

2.3.3.1 L'Eocène

Dans l'Eocène, on distingue deux formations lithologiques, comme dans le Sénonien :

- l'Eocène inférieure carbonaté à la base
- l'Eocène moyen évaporitique au sommet

II.3.3.2 L'Eocène carbonaté (Yprésien)

En Bordure du Grand Erg Oriental, l'Eocène est représenté dans la majeure partie du Bas-Sahara et jusque sur la bordure sahara septentrionale par des calcaires, des dolomies et des marno-calcaires à Nummulites et Operculines. Ces formations sont surmontés par des grés, marnes et calcaire à Globorotalia (Busson, 1964). Dans la région des Ziban ce sont ces calcaires qui, associés aux calcaires massifs du Sénonien terminal de la bordure atlasique, renferment la nappe aquifère alimentant les oasis du groupe de Tolga. Son épaisseur est de 140 mètres environ.

II.3.3.3 L'Eocène moyen évaporitique (Lutétien)

Les formations de L'Eocène moyen sont des séries lagunaires, à anhydrite, argiles et rares calcaires. A cette formation est associée une microfaune, d'âge éocène (moyen), constituée de nummulites, de milioles et de globigérines. A l'Eocène moyen annonçant l'émersion définitive de tout le Sahara septentrional algérien. Généralement, l'épaisseur de ces formations est faible

II.3.3.4 Le Mio-Pliocène

Le formations de Mio-Pliocène sont continentales de remblaiement constituées par une alternance d'argiles, d'argiles sableuses et de sables plus ou moins consolidés en grès dont la puissance est de l'ordre de 150 à 200 m. Des calcaires sont présents à la base dans la région de El Hadjira. Le Mio-Pliocène est donc caractérisé par une forte hétérogénéité, aussi bien dans la direction verticale que dans les directions horizontales. Bel et Dermagne (1966) ont tenté de différencier à l'échelle du bassin oriental du Sahara Algérien,

II.3.4 Le Quaternaire

La série tertiaire se termine par des formations argilo-sableuses rouges, avec dépôts évaporitiques, puis par quelques bancs calcaires assez épais. Une croûte de grès conglomératiques à ciment siliceux en forme la surface. Cette période, d'abord nettement sub-aride atténuée, correspond vraisemblablement au Plio-Villafranchien (Aumassip. et al, 1972).

Mais ces dernières formations n'apparaissent pas dans la vallée. Que ce soit par érosion fluviale (la subsidence récente des chotts Melghir et Merouane provoquant l'encaissement progressif de l'Oued Mya dans le plateau des Gantra), ou par déflation éolienne, les couches supérieures de la série tertiaire ont disparu du fossé et le remblaiement quaternaire, constitué de sables alluviaux ou éoliens, fins à moyen, et sables gypseux et parfois argileux ou carbonaté, vient reposer en discordance et irrégulièrement dans la vallée sur les séries moyennes du Continental Terminal. Les épaisseurs de ce dépôt détritique augmentent considérablement du Sud au Nord du bassin de 10 mètres environ. (Voir Fig. II.4).

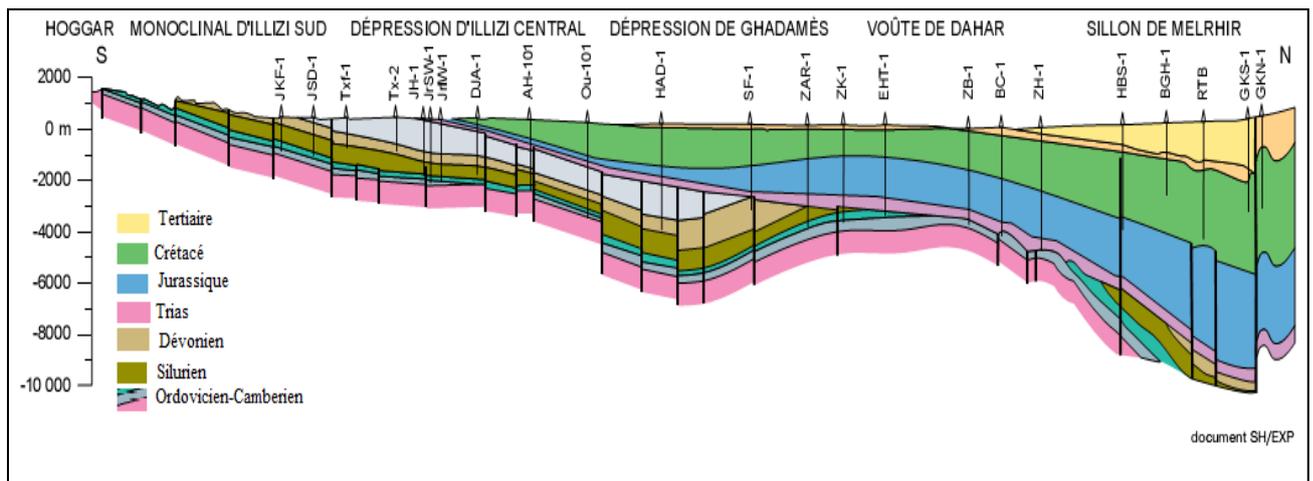


Figure. II.4 : Coupe géologique du Sahara (Sonatrach, 1972).

II.4 Reconstitution paléogéographique

Pendant toute la première moitié de l'ère secondaire ; la sédimentation sur la plateforme saharienne a été de type continentale. Du trias à l'albien se sont en effet déposés des argiles et des sables d'origine éolienne ou fluviatile et des évaporites. On note cependant quelques rares intrusions marines en particulier au jurassique et à l'Albien. Ces dépôts constituent le continental intercalaire et contiennent la plus importante ressource aquifère du Sahara.

Au dessus des grès continentaux Albien, viennent en transgression, les calcaires marins du Cénomaniens. Ces calcaires alternent avec des argiles et des évaporites. Cette alternance est l'indice d'un régime marin peu profond où les régressions sont responsables du dépôt d'évaporites et d'argiles gypsifères. La transgression Cénomaniens est très vraisemblablement, venue du Nord-Est comme le montre l'épaississement de la série et l'augmentation du pourcentage des carbonates dans cette direction. Au Turonien, le régime marin s'est stabilisé permettant le dépôt d'une barre calcaire homogène atteignant, par endroit plus de 100m d'épaisseur. La transgression marine Turonien est venue comme la précédente, Nord-Est. Du Sud au Nord, le Turonien passe d'un faciès légèrement lagunaire (marnes vertes à anhydrites du Tademaït et Tinhert) à un faciès marin franc. Cette variation de faciès s'accompagne d'un épaississement des sédiments. La stabilisation du régime marin durant le Turonien n'est que passagère. En effet, dès le début du Sénonien, dans tout le Sahara oriental, se dépose en alternance, de l'Anhydrite, des sels, des argiles, des dolomies et aussi quelques bancs calcaires

En particulier, le dépôt en certains points, de plus de cent mètres de sel, témoigne du régime lagunaire qui s'est établi au Sahara oriental durant tout le Sénonien inférieur. Il est important de noter que le sénonien lagunaire n'existe que dans le bassin du Sahara oriental. On ne le connaît pas à l'Ouest de Laghouat.

Le régime marin franc se rétablit, une nouvelle fois au Sénonien supérieur et dépose la deuxième falaise calcaire. Cette transgression Sénonienne semble moins importante que la transgression Turonienne.

En effet ; d'une part, on trouve toujours dans les calcaires Sénoniens des petites intercalations d'évaporites, ce qui n'existe pas au Turonien. D'autre part, il est possible aussi que les dépôts du Sénonien supérieur aient été décapés par l'érosion avant la sédimentation du Mio-Pliocène.

Au début du Tertiaire, pendant l'Eocène inférieur, la mer continue à recouvrir le Sahara oriental. Les calcaires à Nummulites semblent toujours concordants sur le Sénonien. Il est d'ailleurs très difficile de les distinguer les uns des autres.

Durant l'Eocène moyen et supérieur, les sédiments marins de l'Eocène inférieur sont peu à peu remplacés par des dépôts lagunaires où alternent les argiles, les évaporites et les calcaires. Ce dernier golf marin du Saharien est très réduit en surface. Il ne recouvre plus que le bas Sahara au Nord de Ouargla.

Ce sont les derniers dépôts de la mer Saharienne dont la disparition définitive se place vers la fin de l'Eocène, le Sahara se présente donc comme une grande plateforme émergée. Pendant tout l'Oligocène, l'érosion va pouvoir agir.

Au Mio-pliocène, après des modifications des structures apportées par les contres-coups de la tectonique Alpine, des sédiments argileux et sableux continentaux se déposent sur l'ensemble du Sahara, à l'exception vraisemblablement du M'Zab, sans doute émergés à cette époque. Les dépôts du Mio-pliocène sont particulièrement épais (2000m) dans la fosse Sud-Atlantique.

II.5 Cadre Hydrogéologiques de la zone d'étude

Les études géologiques (Cornet, 1964; Busson, 1971; ERESS, 1972 Fabre, 1974;) et hydrogéologiques ont permis de mettre en évidence l'existence de plusieurs réservoirs aquifères d'importance bien distincte de part leur constitution lithologique, leur structure géologique et les facilités d'exploitation qu'ils présentent. Ces aquifères sont de haut en bas :

- Nappe phréatique du Quaternaire
- Nappe Complexe Terminale (sables du Mio-Pliocène, des calcaires de l'Eocène inférieur et de Sénonien)
- Nappe des grés du Continental Intercalaire.

II.5.1 La nappe phréatique

La nappe phréatique ou nappe superficielle contenue dans les alluvions dont la profondeur varie dans l'agglomération entre 0,5 m et 1,5 m par rapport au niveau du sol, mais dans les zones les plus basses, elle se trouve pratiquement en surface. Cette nappe repose sur un épais niveau imperméable, étanche, qui occupe tout le fond de la vallée de Ouargla jusqu'à la région d'El Hadjira extrémité nord de oued N'sa. Ce substratum imperméable isole des nappes artésiennes sous-jacentes. La nappe phréatique est essentiellement alimentée par les précipitations et les crues des oueds alimentée et par les eaux de drainage de la palmeraie et par les eaux usées. Les nappes le plus importants de la région d'El Hadjira sont celles de l'oued N'sa.

II.5.2 La nappe de Complexe Terminal

Cette nappe a été dessinée sous le nom de complexe terminal car elle est contenue dans les divers horizons perméables du crétacé supérieur et du tertiaire, essentiellement :

Le sénonien supérieur carbonaté (surtout le Maestrichtien) l'Éocène inférieur carbonaté et parfois alternance des niveaux d'argile, sable, et cailloutis, sableux d'âge Mio-pliocène. Ces couches aquifères étant en plus ou moins étroite relation.

Dans le bassin oriental, le complexe terminal s'étend sur une superficie de l'ordre de 350.000Km². La nappe du complexe Terminal est en charge à l'intérieur de la limite d'extension des argiles du Mio-pliocène. Elle est donc jaillissante dans le centre du bassin et libre sur les bordures (Dahar-M'Zab). Elle est en général peu profonde (100 à 400 mètres), de température peu élevée et de bonne composition chimique sur les bordures et moyenne dans le centre du bassin.

II.5.3 La nappe du Continental Intercalaire

Le Continental Intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base du Trias et le sommet de l'albien. Il s'étend sur tout le bassin sédimentaire du Sahara septentrional sur une superficie de 600 000 km².

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux, sablo-argileux et de marne du Crétacé Inférieur (Albien et Barrémien). Il est considéré comme un réservoir très important dans l'exploitation des aquifères. Cependant, bien que l'intérêt majeur de ce système aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eau qui ont été stockées pendant les périodes pluvieuses du quaternaire et qui peuvent maintenant être exploitées. La plus grande partie de l'eau de cette ressource a été remplie pendant les périodes pluvieuses du quaternaire. Il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques au niveau des cours d'eau de l'Atlas saharien et de quantité inférieure au plateau du Tademaït (manque de pluviométrie). C'est un système aquifère multicouche dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m. dans la région d'El Hadjira, il est exploité entre 1150 m et 1350 m de profondeur et d'une température d'eau qui dépasse les 60 °C.

Les eaux du Continental Intercalaire sont caractérisées par :

- Une température qui dépasse les 60°C sauf aux endroits où l'aquifère est proche de la surface du sol.
- Une charge en H₂S et CO₂ qui lui donne un caractère corrosif.

- La minéralisation de l'eau oscille entre 1 et 2g/l de résidu sec et peut atteindre les 5g/l (Gassi Touil).
- L'alimentation de la nappe, relativement faible, se fait par ruissellement à la périphérie du réservoir, tout au long et à l'extrémité des Oueds, qui descendent des monts de l'Atlas saharien, du Dahar tunisien, du plateau de Tademaït et Tinhert et par les pluies exceptionnelles sur les grands ergs.
- L'écoulement des eaux de cette nappe se fait dans la partie occidentale du Nord vers le Sud et dans sa partie orientale de l'Ouest vers l'Est (Tunisie) et du Sud vers le Nord (voire l'étude de ERESS, (1969). il montre que la nappe du complexe terminal se divise dans le chott par percolation de quantité importante d'eau (par drainance) de l'ordre 62.34×10^6 m³/an fig. II.5.

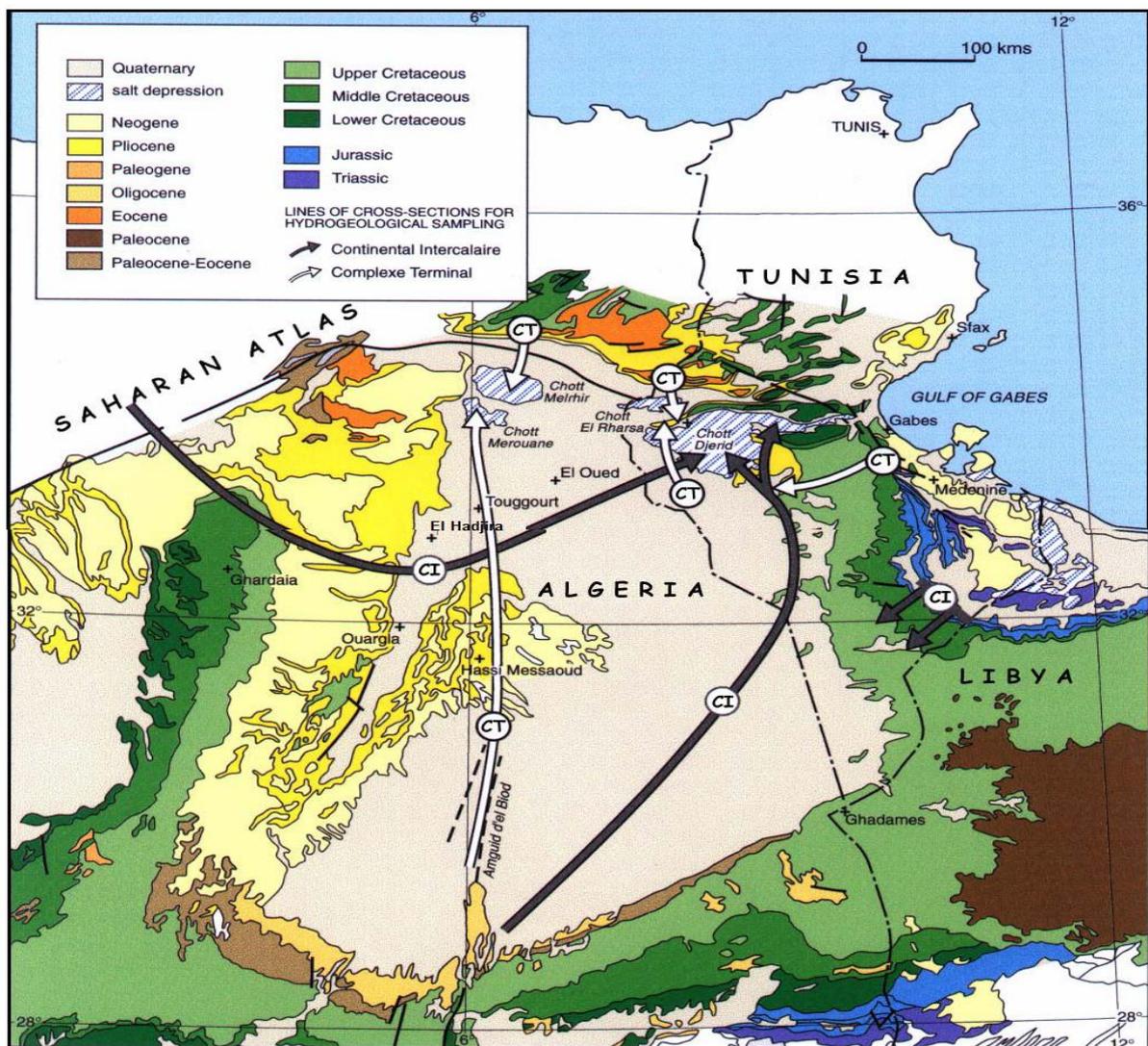


Figure. II.5 : Carte Hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes.

II.6 Géomorphologie et unités géomorphologiques:

La morphologie générale de la zone d'El Hadjira est subdivisée en quatre unités géomorphologiques :

- hamada
- Les glacis
- Les sebkhas
- Les dunes

II.6.1 La hamada

Mio-Plio-Quaternaire (plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses) : C'est une formation continentale détritique qui forme un plateau dont l'altitude moyenne est de 200 m. Ce plateau s'abaisse légèrement où il est très fortement érodé et ne laissant que quelques buttes témoins appelées « goure ».

II.6.2 Les glacis

Sur les versants, les glacis s'étagent du plus ancien au plus récent, sur quatre niveaux de 200 à 140 m d'altitude. De 180 à 160 m les glacis situés se caractérisent par des affleurements du substrat gréseux du Mio-Pliocène. L'Est de la cuvette est un vaste glacis alluvial à sable grossier situé à 150 m d'altitude.

II.6.3 Les sebkhas

Elles regroupent des marécages salés et les zones d'épandage (zones inondables), le plus souvent asséchés, occupant le fond d'une dépression. Le chott (ou sebkha) constitue le point le plus bas. Il est constitué de sable siliceux et/ou gypseux à croûte gypseuse de surface et de subsurface. Le bas fond se caractérise par une nappe phréatique permanente très peu profonde de 1 à 5 m parfois jaillisse en surface se forme des petites marécages.

II.6.4 Les dunes

Elles s'étendent sur toute la surface de la zone sous forme de voiles sableux ou de petits amas de sables pièges dans de petites touffes de végétation, mais particulièrement dans le secteur nord-ouest aux environs. Les principaux facteurs d'érosion qui ont marqué (et qui marquent encore, même à un degré moindre), l'évolution de la région sont le ruissellement, sous ses deux formes (concentre et diffus) d'une part, et l'action du vent qui prend le relais notamment à l'ère actuelle. Ces deux processus, conjugués, sont responsables de l'ablation, le transport et l'accumulation des matériaux détritiques arrachés à la roche mère. Ces deux facteurs d'érosion sont davantage favorisés par la nature lithologique du substrat contenant des matériaux éolisables (généralement

des grès), le climat (la rareté des précipitations et leur mauvaise répartition), ou encore par l'absence d'une couverture végétale protectrice.

II.7 Pédologie

Les conditions climatiques sont en effet telles que tous les phénomènes d'altération qui ont pour résultat de transformer la couche superficielle. Ces transformations des terrains en une couche meuble bien individualisée sont organisées en horizon dotés de leurs caractéristiques physiques propres et d'une activité géochimique ou biochimique originale. Ils sont au moins aujourd'hui quasiment inexistantes dans les conditions naturelles. Selon la dénomination des sols du référentiel pédologique ont été reconnus. Les cinq pédo-paysages sont :

II.7.1 Plateau (lithosol pétrocalcarique)

Les sols présentent une surface graveleuse, reg à graviers, ou pierreuse, reg à pierre, et des voiles éoliens. Cet horizon de surface surmonte une croûte calcaire à dolomie, très dure, de 30 cm d'épaisseur. On trouve ensuite un horizon calcaire, nodulaire, moins dur et fissuré, entre 35 et 60 cm puis, au-delà de 60 cm, un horizon pétrogypsiq à 57 % de gypse. La conductivité électrique (CE) est faible (1,97 à 3,4 mS.m⁻¹), le pH est neutre. C'est un lithosol pétrocalcarique de Hamada à encroûtement gypseux en profondeur.

II.7.2 Glacis (regosol sableux à graviers)

À 140 m d'altitude, le sol est constitué d'un matériau meuble, exclusivement détritique, hérité de l'altération du grès à sable rouge du Mio-Pliocène. C'est le sol le plus pauvre en gypse de la région ; jusqu'à 8 m de profondeur, il ne présente aucun niveau d'encroûtement ; le maximum de CE est de 22,05 mS.m⁻¹ entre 25 et 75 cm de profondeur. Il s'agit d'un regosol sableux à graviers, saliques.

II.7.3 L'horizon de surface (salisol chloruré sulfaté)

C'est une croûte gypseuse épaisse ou polygonale, blanchâtre, partiellement couverte de voiles de sable éolien gypso-siliceux et de Nebkhas associés à une végétation gypsohalophiles. À 15-20 cm d'épaisseur, on trouve un encroûtement gypseux pulvérulent, homogène, de couleur jaune rougeâtre très claire. En dessous, on trouve un encroûtement gypseux induré de 40 cm d'épaisseur, moins riche en gypse que l'horizon précédent. Le calcaire présente une teneur en gypse décroissante de 68,6 % dans la croûte polygonale à 43 %. La CE varie de 17,2 à 54,6 mS.m⁻¹, le pH est de 7,8. C'est un salisol chloruré sulfaté à horizon gypseux et pétrogypsiq de surface.

II.7.4 Les sols salés de la sebkha

Se caractérisent par une salure extrêmement élevée de l'horizon de surface et des croûtes et efflorescences salines continues. La nappe phréatique varie de 40 cm (février) à 60 cm (septembre) et jusqu'à 1 m. Sa CE moyenne est de $17,9 \text{ mS.m}^{-1}$.

Les sols du centre de la sebkha se caractérisent par une croûte saline qui repose sur un matériau limono-sableux. La teneur en gypse est de 11 à 21 %. Le pH est de 6,8 à 7,6. La CE est de 160,7 à 200 mS.m^{-1} dans la croûte saline, puis descend à $38,2 \text{ mS.m}^{-1}$ dans les horizons sous-jacents. Il s'agit d'un salisol chloruré sulfaté.

Les sols de la bordure de la sebkha se caractérisent soit par une croûte saline de surface similaire à celle du centre de la sebkha, soit par une croûte peu développée à surface lisse plus ou moins battante. Dans les deux cas, la couverture pédologique peut comporter ou non des horizons gypseux et/ou calcaire. Les teneurs en gypse varient de 8,5 % dans la croûte saline à 77,8 % dans l'horizon pétrogypsiq ue de profondeur. On a ainsi toute une gamme de salisol chloro-sulfatés, avec ou sans horizon gypseux et/ou calcaire.

II.7.5 Les dunes « regosol »

Il existe aussi des cordons dunaires, enfin dans les talwegs et sur les versants rocheux, on trouve en surface des affleurements de grès rouge du Mio-pliocène.

II.8 Salinité des sols

Les sols sont caractérisés par l'excès d'eau et des sels liés à la présence d'une nappe phréatique proche de la surface du sol la salinité des sols peu atteindre 50 mmhos/cm en surface et décroît brusquement ou progressivement, avec la profondeur. Le caractère de salinité des sols peut varier d'une façon quantitative et qualitative surtout en présence d'un plan d'eau. Les sels solubles sont dominés par le chlorure et par le sodium. Le PH de ces sols halomorphes est souvent alcalin, résultant surtout d'une importante teneur en gypse.

Le phénomène d'halo-morphisme dans les milieux saturés en eau est caractérisé par des variations à grande amplitude et la relation nappe-sol-salinité est étroitement liée.

II.8.1 Description morphologique

- 0-30cm : sec, de couleur jaunâtre de texture sableuse, de structure particulière avec des efflorescences blanchâtre de sels, consistance et cohésion faibles, poreux (horizon d'apport anthropique) effervescence à HCl faible, limite peu nette irrégulière
- 30-50 cm : humide de couleur jaune- rougeâtre de texture sableuse, de structure particulière à fondue, faiblement enraciné, consistance et cohésion faibles, effervescence à HCl faible, limite nette et irrégulière.
- 50-90cm : idem que le précédent ; mais plus humide et plus enraciné.
- 90-120cm : mouillé, de couleur gris clair de texture sableuse et de structure fondue avec beaucoup de tache hydromorphie. (Gley) est effervescence en contact avec HCl faible.
- Supérieur à 120cm : nappe.

II.9 Aperçu Tectonique :

Les bassins du Sahara septentrional est relativement stable. La plate-forme saharienne était le siège des mouvements épi-orogéniques au cours du Secondaire et du Tertiaire, parfois émergée, sur laquelle se déposaient un matériel continental, et d'autres fois immergée favorisant le dépôt de plate-forme néritique. Cependant, des mouvements orogéniques affectaient les sillons atlasiques et telliens formant de véritables chaînes de montagnes.

Un effondrement de la partie centrale du bassin suivant un axe N-S ou NE-SW (fig. II.6) qui longe sensiblement les vallées de l'Oued Mya et de l'Oued Righ a marqué le Cénomaniens, et des phases orogéniques alpines d'âge Eocène moyen et supérieur responsables de la fermeture du sillon atlasique, ont donné naissance à la chaîne intra-cratonique de l'Atlas saharien. Les répercussions de ces mouvements est marquées par un exhaussement général permettent d'expliquer l'absence de l'Oligocène dans tout le Sahara, ceci est suivi par un mouvement de descente dès le Miocène et dure encore actuellement.

Des ondulations subméridiennes à grandes amplitudes de 50 à 100 m de large (la dorsale du M'zab), dont le prolongement des grandes failles méridiennes du Hoggar et leur rejet seront responsables (Fabre, 1976).

La tectonique actuelle, bien que perceptible ne joue qu'un rôle mineur dans la nature des dépôts contrairement à ce que l'on observe dans des régions atlasiques et en particulier sur les rives de la Méditerranée. Par contre elle paraît responsable de la création de certaines dépressions, lacs et leur mode d'alimentation. La surrection du massif central saharien au Plio-Quaternaire serait d'environ 500 m pour 5Ma et 4 m seulement depuis l'arrivée des atériens au pléistocène supérieur.

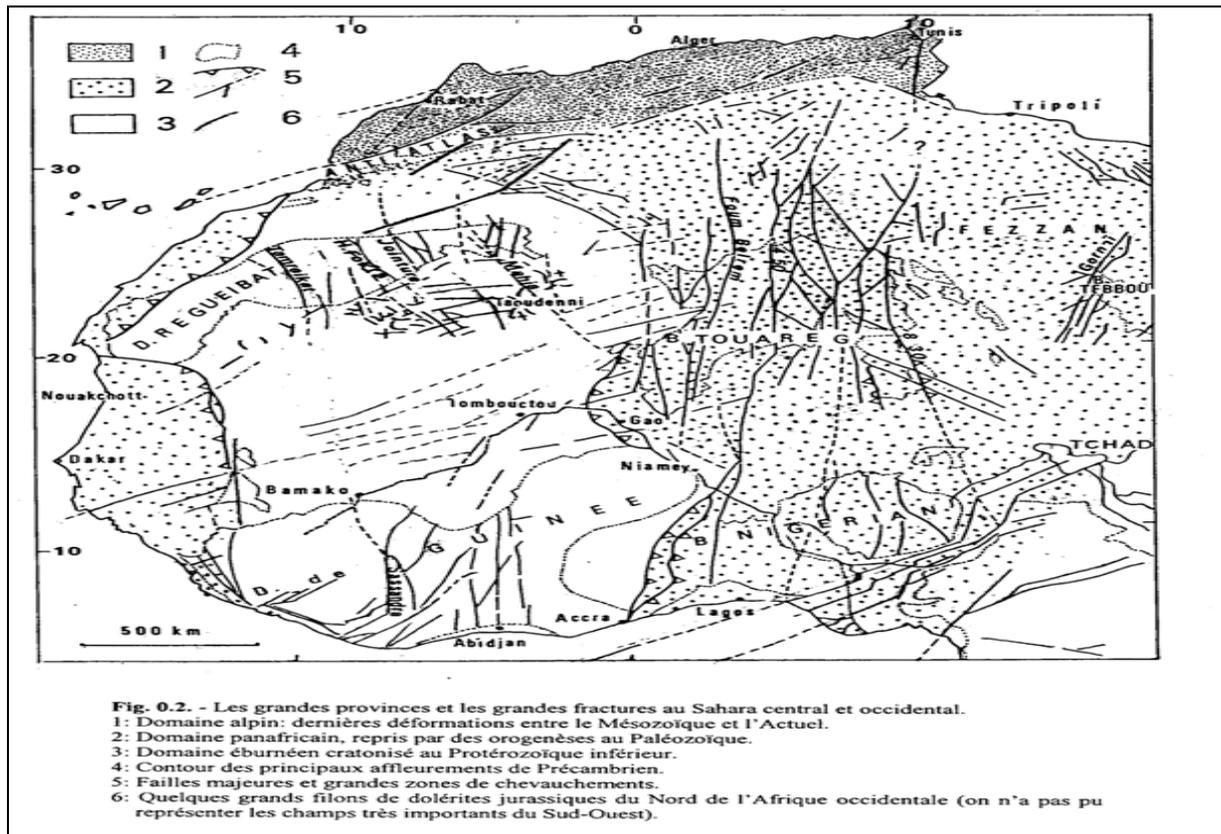


Figure. II.6 : Carte tectonique représente Sahara septentrional (J. Fabre ,1978)

II.10 Conclusion

L'étude géologique de la zone d'étude nous a permis de dégager les constatations suivantes :

- La zone d'El Hadjira fait partie de plateforme saharienne et se localise dans la partie orientale du Sahara Algérienne. Elle est constituée de cinq grands ensembles d'affleurement exogène qui sont : les dunes de sable, quaternaire indifférencié, Mio-Pliocène, Plio-Quaternaire et Sénonien et Eocène
- Avec des unités complètes de Mésozoïque et de Cénozoïque (tertiaire et quaternaire) sont endogènes. On ne peut pas déceler qu'à l'aide des forages à objectifs pétrolières ou bien hydriques des lacunes ou cours de paléozoïques sont marqués.
- Les activités tectoniques ont produit des dépressions et des chotts de direction NE-SW.
- Au Plio-Quaternaire, les dépressions fermées ont subi des accumulations de dépôts contenant d'importantes concentrations de sel gemme provenant du lessivage des niveaux salifères plus anciens.

**CHAPITER III : INITIATION À
L'EVAPORITES ET EPOQUES
EVAPORITIKUES EN ALGERIE**

III.1 Rappels des principales caractéristiques des roches évaporitiques

Les évaporites sont des roches d'origine chimiques, résultant de la précipitation de sels par concentration à partir de saumures dans des contextes géodynamiques continentaux ou marins figure. III.1.

Les principaux minéraux constituant les roches évaporitiques sont les suivants:

- Gypse: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.
- Anhydrite: CaSO_4 .
- Halite : NaCl .
- Sylvine ou Sylvite : KCl .
- la Carnalite : $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

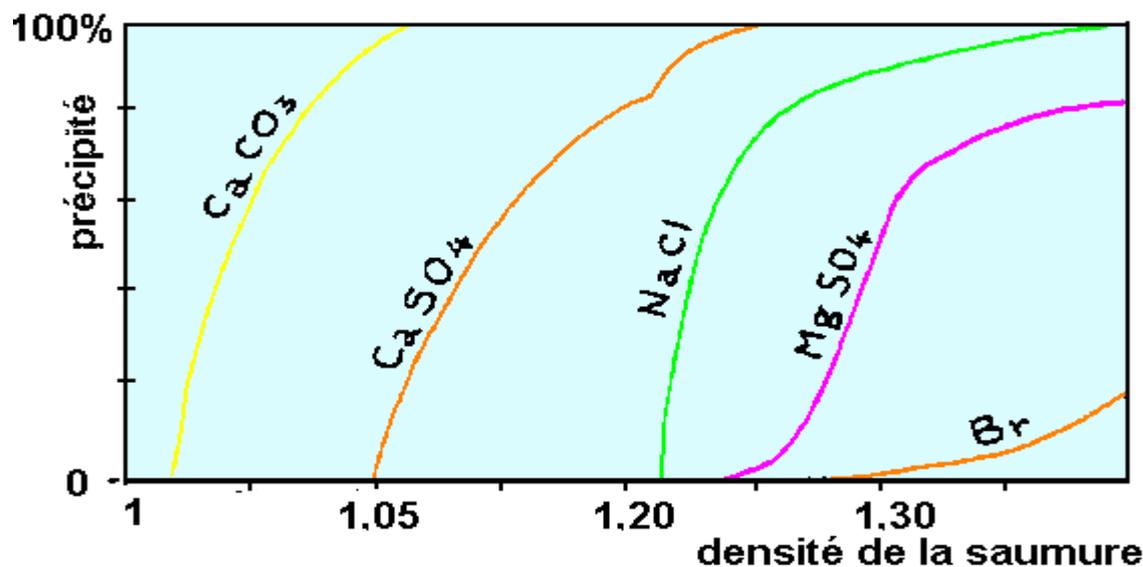


Fig. III.1: Masse de sels précipités dans une saumure en cours d'évaporation.

III.2 Processus de formation des roches évaporitiques :

La formation des roches évaporitiques se fait à partir de solutions sursaturées. Les sels dissous se déposent en ordre inverse à leur solubilité. Lors de l'évaporation d'une colonne d'eau de mer (fig. III.2), on obtient :

- Dépôt de gypse à 1/3 d'eau restante.
- Dépôt de NaCl à 1/10ème d'eau restante.
- Dépôt de sels de magnésium et de potassium à 1/20ème d'eau restant.

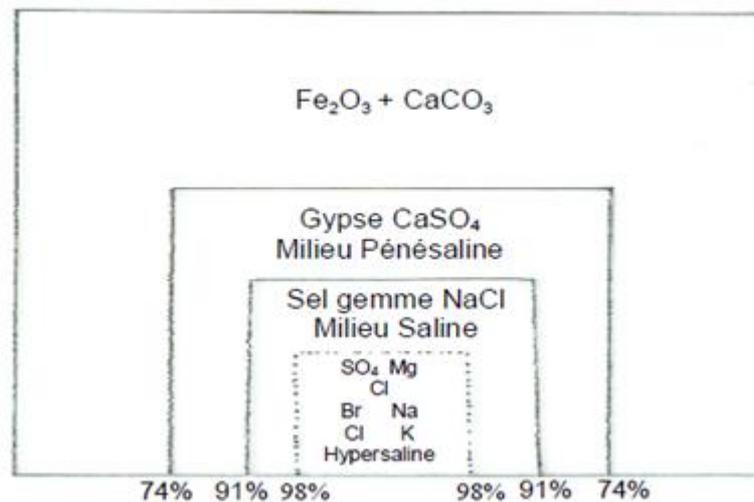


Fig. III.2: Ordre de formation des minéraux lors de l'évaporation d'eau de mer (Extrait de Blatt et al, 1980, modifiée).

Les conditions favorables au dépôt d'évaporites se rencontrent dans les zones arides et semi-arides. En arctique et en antarctique, la transformation d'eau en glace concentrerait les saumures jusqu'à la précipitation du gypse.

III.3 Les modèles de dépôts des évaporites :

Les évaporites sont classées généralement en trois grands types : les évaporites continentales, les évaporites marines de milieu peu profond et les évaporites marines profondes.

III.3.1 Les évaporites continentales :

Les évaporites continentales sont observées dans les chotts et les playas. La minéralogie de ces évaporites est relativement variable puisqu'elle dépend de la composition des eaux fluviales, elles mêmes sont dépendantes de la géologie régionale. Ces sièges de sédimentation terrigène et d'évaporation permettent la formation d'évaporites de gypse et d'une croûte de sel (halite), la répartition des évaporites en fonction de leur degré de solubilité, les plus solubles étant localisés au centre lorsque l'extension du lac en cours d'assèchement était la plus restreinte. Généralement, ils ont formé dans les régions arides quand l'évaporation est plus importante que la pluviométrie, il y a formation de roses de sables. Les précipitations carbonatées donnent de la calcite.

III.3.2 Les évaporites marines de bassin peu profond :

On distingue classiquement deux modèles de bassin peu profond (Fig.III.3)

- Les bassins fermés (en oeil) ou les faciès s'organisent concentriquement avec les sels les moins solubles à la périphérie (carbonates) et les plus solubles au centre (sel de potasse). En fait ce modèle est très rare dans la nature sous sa forme pure. Des apports complémentaires d'eau de mer augmentent en général la quantité de sels précipités et, le plus souvent la composition initiale de l'eau de tels bassins est modifiée par les apports des eaux souterraines et de ruissellements. Ces bassins évoluent donc lentement vers le type lac salé continental (chotts ou playas).

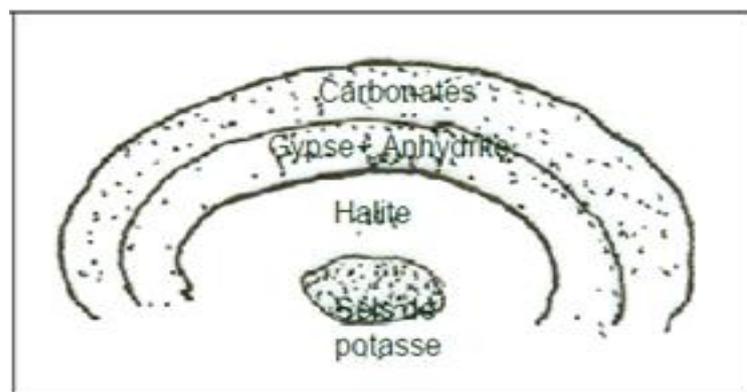


Fig. III.3 : Répartition des faciès évaporitiques dans le cas d'un bassin marin fermé (D'après ;cojean et Renard, 1997).

-Les bassins en goutte d'eau : Ces bassins gardent une connexion avec la mer. Le faciès est organisé suivant une polarité centrée sur la passe qui relie le bassin à la mer. Les sels les moins solubles sont au voisinage de la passe et les plus solubles à l'opposé (au fond de la lagune) figure.III.4.

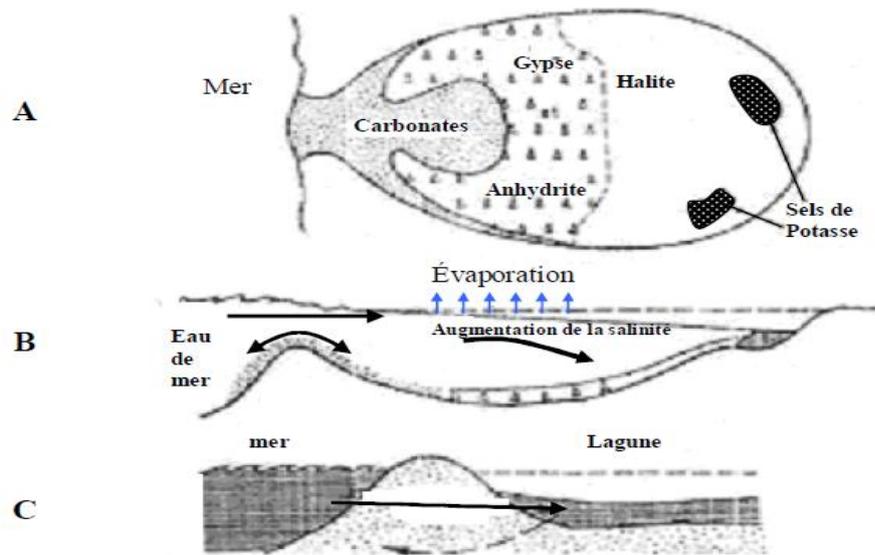
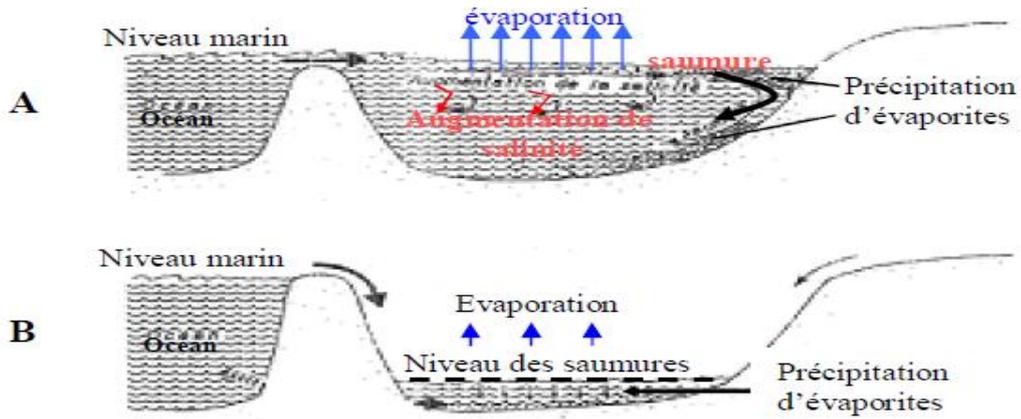


Fig. III.4: Répartition des faciès en carte (A) et en coupe (B) dans le cas d'un bassin marin à seuil (d'après Einsele, 1992). Variante du modèle dans le cas d'une alimentation par infiltration d'eau de mer (C). (Extrait Cojean & Renard, 1997).

III.3.3 Les évaporites marines de bassin profond

Il est difficile d'expliquer la genèse des grandes séries évaporitiques anciennes à partir des modèles actuels. Les milieux évaporitiques de nos jours sont d'extension réduite et la puissance des sels accumulés ne dépasse guère la dizaine de mètres. A ce propos, des auteurs ont supposé que des sels pouvaient précipiter au fond de corps d'eau soumis à forte évaporation mais en communication restreinte avec la mer libre et donc constamment réalimentés. Une forte épaisseur d'évaporites pourrait précipiter sans pour cela faire intervenir la subsidence (Fig.III.5). On distingue deux cas de bassins profonds :

- Les bassins structurellement profonds d'eau profonde
- Les bassins structurellement profonds d'eau peu profonde

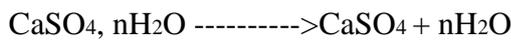


A: bassin structurellement profond d'eau profonde;
 B: bassin structurellement profond d'eau peu profonde.

Fig. III.5 : Les bassins évaporitiques profonds (Extrait Cojean & Renard 1997).

III.3.4 Le cycle gypse anhydrite :

L'anhydrite a rarement une formation primaire. Généralement sa transformation est secondaire et vient de la déshydratation et de la recristallisation du gypse en anhydrite. Au cours de l'enfouissement (compaction) qui provoque la perte d'eau suivant une réaction réversible :



Cette transformation est réalisée avec 38% de perte de volume. Le processus inverse peut se produire lors du passage de couche d'anhydrite dans la zone phréatique. Le gypse secondaire se présente alors sous la forme de porphyrotopes et l'albâtre (Fig.III.6)

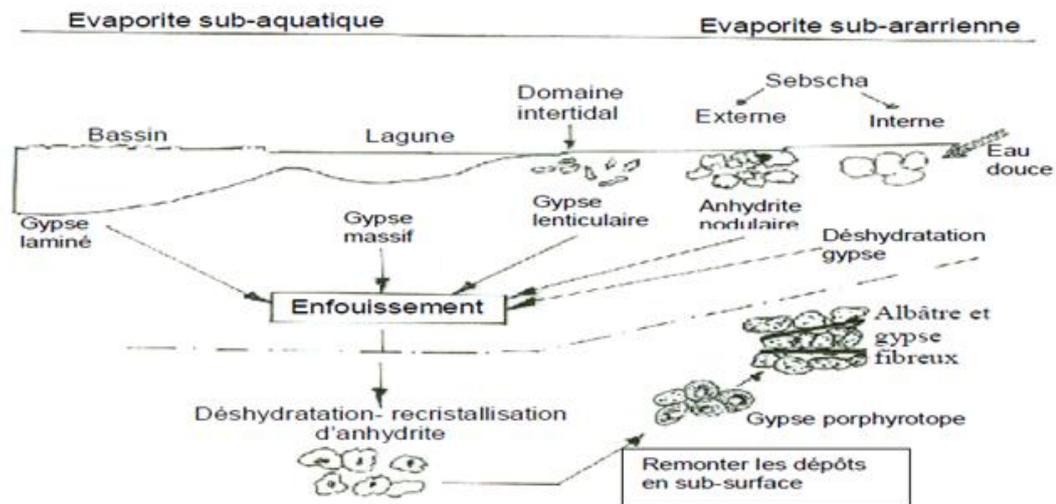


Fig. III.6 : Les environnements de dépôt et de diagenèse des différents types de gypse et d'anhydrite (D'après, turker, 1995 :Cojean et Renard. 1997)

III.4 Aperçu sur les époques évaporitiques en Algérie :

En Algérie, quatre époques évaporitiques importantes et d'intensité décroissante ont pu être mises en évidence :

- Une époque évaporitique triasique.
- Une époque évaporitique sénonienne.
- Une époque évaporitique nummulitique.
- Une époque évaporitique plio-quadernaire.

III.4.1 Epoque évaporitique du Trias :

En Afrique du Nord, le Trias marno-gypso-salifère a été reconnu depuis longtemps (Glangeand, 1932 ; Durand .Delga, 1955 ; Caire, 1957). Il s'agit le plus souvent de Trias supérieur.

La première époque salifère du Trias supérieur est liée à la transgression marine triasique, qui a recouvert progressivement l'Afrique du Nord et la partie septentrionale de la plate forme saharienne. Malgré la péné-planisation des reliefs, cette transgression à caractère lagunaire et laguno-marin présente d'importantes variations des dépôts dues à l'existence des zones hautes partiellement émergées, des fosses à forte subsidence et des sièges d'éruptions volcaniques basiques syn-sédimentaires.

Sur le plan tectonique ces évaporites ont joué un rôle important. En effet, elles ont servi de semelles glissantes aux « charriages » de l'orogénèse alpine.

Au Trias inférieur, les mouvements différentiels de réajustement avec rejeux de fractures profondes et anciennes, affectent la plate forme saharienne et sont accompagnés d'éruptions volcaniques basiques.

Les zones hautes du domaine atlasique (mole néritique et la Kabylie) restent émergées. Les dépôts détritiques (conglomérats et grès) se forment en bordure de ces zones sans manifestations diapiriques.

- Au Muschlkalk, la sédimentation se caractérise essentiellement par des dépôts d'argile et de calcaire marquant ainsi la vaste transgression marine du Trias moyen.
- Au Keuper, le régime lagunaire s'installe sur l'ensemble de l'Algérie. Trois domaines se différencient du Sud vers le Nord :
 - a) Le domaine continental du Sahara central et occidental avec des dépôts de grès et d'argile passant progressivement au Nord aux dépôts lagunaires.

b) Le bassin salifère du Sahara septentrional, développé au Nord d'une ligne passant par El Goléa-Rhourde Nouss et séparé peut être par le domaine atlasique par une zone de hauts fonds. Dans ce bassin très subsidés ou plus de 1000 mètres de sel gemme se sont déposés. Les hauts fonds n'ont plus d'influence sensible sur la sédimentation. L'absence de coulées volcaniques indique une tranquillité tectonique. À ce propos, il est à noter le rôle important de cette couverture salifère pour le piégeage des hydrocarbures.

c) Le domaine atlasique nettement différencié de celui de la plate forme. Les mouvements tectoniques sont très actifs pendant le Trias surtout les rejeux de failles (probablement hercyniennes) et qui ont été accompagnés par des éruptions volcaniques, l'accident sud-atlasique aurait été activé à cette époque.

III.4.2 Epoque évaporitique Sénonienne :

Après une longue période essentiellement continentale au Sahara et plus ou moins marine en Algérie du Nord, l'Afrique du Nord est recouverte par la mer jusqu'à l'atlas saharien. Le Sahara au Crétacé n'était donc pas un désert comme aujourd'hui.

Les conditions lagunaires apparaissent de nouveau au Néocomien sur une partie du Sahara septentrional et à l'emplacement de l'atlas saharien, mais l'instabilité des lagunes ne permet pas un cycle continu de sédimentation évaporitique (dépôt de gypse uniquement) (Busson, 1969).

Au Cénomaniens, la mer envahit la plate forme saharienne sur un millier de kilomètres du Nord au Sud, depuis la Berbérie jusqu'au plateau de Tinrhert et aux contre forts du Hoggar.

Après une régression du Turonien supérieur, la mer revient sur les mêmes lieux, dans la région du plateau de Tinrhert. La nouvelle transgression est marquée par un dépôt de sel massif de 250mètres d'épaisseurs, suivi de couche d'argile, d'anhydrite et de dolomie, puis de calcaire argileux.

Au Sénonien supérieur, les lagunes occupent une superficie très étendue de la plate forme saharienne et de l'atlas saharien. La présence de niveaux carbonatés et de dépôts de sel gemme avec l'anhydrite indique un régime laguno-marin. A partir du Sénonien, les lagunes n'existent que sur la plate forme saharienne ou deux bassins salifères s'installent :

- a) Le bassin salifère de Béchar avec une puissance formation de sel gemme et peu de gypse et d'anhydrite (450 a 500m) caractérisé par sa subsidence.
- b) Le bassin de l'oued Mya avec une formation salifère à la base (100m) et une formation d'anhydrite intercalée de marnes, de calcaires et de dolomie au sommet. En Algérie du Nord, du gypse se dépose localement notamment sur les hauts plateaux oranais.

III.4.3 Epoque évaporitique Nummulitique :

Les mers chaudes à Nummulites recouvrent l'Afrique du Nord. Elles dessinent trois grands golfes, dont le plus important est celui qui traverse le Sahara algérien. La mer va se retirer du Sahara à la fin de l'Yprésien, en se maintenant en Afrique du Nord. (Furon, 1972)

Au Nummulitique, les conditions laguno-marine persistent par endroit. Les dépôts salifères sont rares et peu importants, par contre le gypse se dépose en couches puissantes dans la région du Hodna (400m).

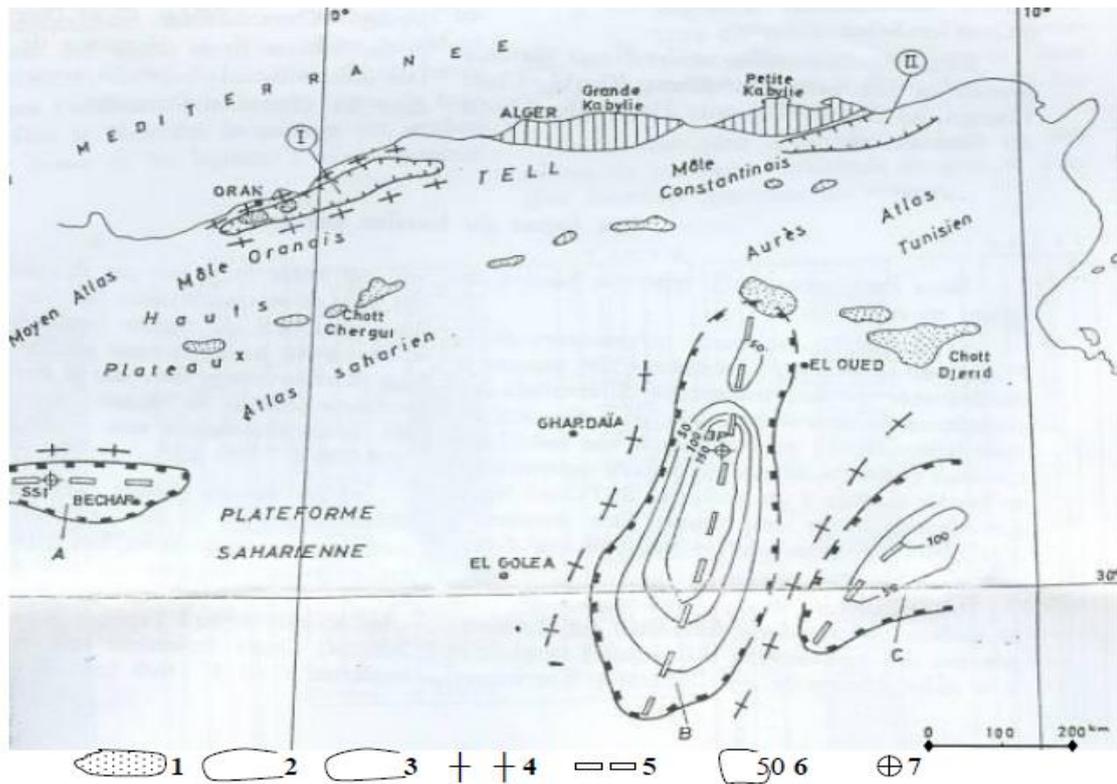
Après la phase tectonique de la fin du l'Eocène, la mer s'était retirée du Sahara proprement dit. A la fin du Lutétien, elle régresse encore, laissant d'importants dépôts de gypse dans le Sud du département de Constantine (Flandrin, 1938) et dans le sud de l'Aurès (Laffitte, 1938).

III.4.4 Epoque évaporitique Plio-Quaternaire :

Au Pliocène, des mouvements orogéniques et épi-orogéniques importants se manifestent.

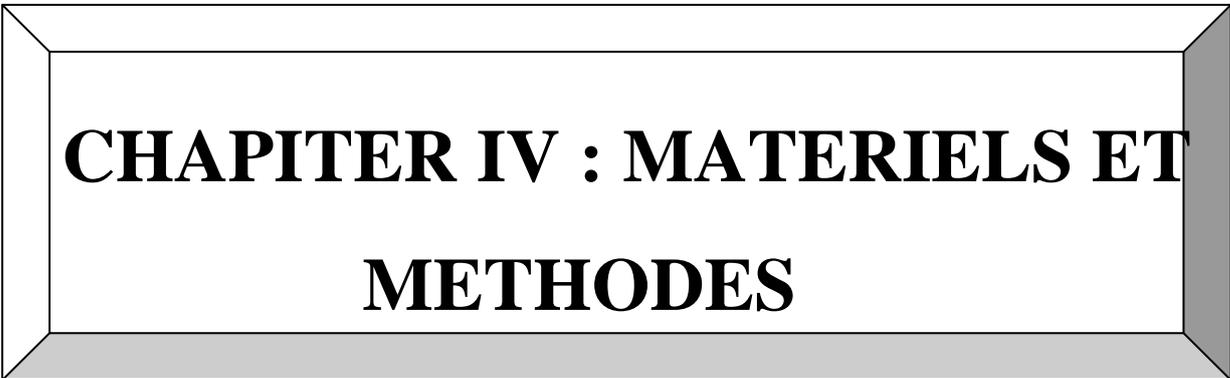
Le Plio-quaternaire est caractérisé par une fermeture totale des bassins et la formation de chotts, situés dans les dépressions importantes, s'accumule des dépôts continentaux post-orogéniques avec d'importantes concentrations de sel gemme prévenant des niveaux salifères du Miocènes et du Trias.

A cette époque de Plio-quaternaire, le lessivage est lié à des eaux de ruissellement, qui s'accumule au centre de ces chotts, puis suite au phénomène d'évaporation durant les périodes sèches, il y a dépôt d'évaporites (Fig.III.7)



1. Chotts salifères (quaternaire);
2. Bassins d'évaporites du miocène supérieur : I- Bassin de Chélif, II- Bassin de Constantine;
3. Bassins salifères sénoniens Sahara septentrional : A. Bassin de Bechar; B. Bassin d'oued Mya; C. Bassin du grand erg oriental (évaporites);
4. Axes des zones hautes;
5. Axes subsidents;
6. Isopaques et sa valeur en mètres;
7. Sondages.

Fig. III.7: Esquisse des bassins salifères post jurassiques (d'après : Merabet O & Popov A ; 1968).



**CHAPTER IV : MATERIELS ET
METHODES**

IV.1 Introduction

Avant d'exposer les résultats des mesures et d'analyses physico-chimiques d'eau obtenus dans notre zone d'étude (sebkha Baghdad), nous jugeons utile de présenter les conditions et le mode d'échantillonnage, ainsi que les techniques de mesure et d'analyse de nos échantillons. Des outils informatiques (logiciels), employés pour le traitement de nos résultats, nécessitent d'être brièvement présentés.

IV.2 Méthode de travail

L'objectif de notre étude est de faire un suivi du fonctionnement du chott Baghdad au cours de son cycle géochimique pour l'année 2011, et la reconstitution de l'histoire des éléments chimiques majeurs pendant l'évaporation complète du Chott. Pour cela, nous avons procédé à la méthode d'échantillonnage suivante :

- Un échantillonnage mensuelle des saumures dans le chott, depuis le mois de janvier jusqu'au mois de décembre.
- deux campagnes des sels sèches sont prélevés chaque mois proche de zone de prélèvements saumures, dont l'objectif est de faire une zonalité minéralogique et voire la succession des minéraux précipité.
- Des carottes de deux mètre sont fait au centre et périphéries du sebkha, objectif pour donne une idée sur les sédiments de sebkha et leur nature sédimentologique.
- sur les affleurements de notre zone d'étude, des échantillons des roches sont arraché pour donné une idée sur la nature des affleurements, leur nature et est qu'il ya une relation entre ces affleurements et cette dépression?

IV.3 Protocole d'échantillonnage des solutions

La séquence de mise en flaconnage lors des prélèvements est ainsi : anions, cations. Cet ordre n'est pas choisi au hasard. Tout d'abord, la quantité nécessaire pour l'analyse des éléments majeurs est prélevée sans acidification. Le flacon de prélèvement est rincé avec un peu d'échantillon avant de le remplir. Ensuite, Tous les échantillons une fois prélevés sont conservés dans une glacière, et dans un délai maximal de 12 heures placés dans un frigo à 5°C.

Plusieurs paramètres ont été mesurés in situ pratiquement en tous les points prélevés. Cela concerne : la température, le pH, le Eh, la conductivité et le positionnement géographique. La qualité des mesures des paramètres chimiques et physiques sur le terrain a été contrôlée grâce à la balance ionique pour la fiabilité des résultats.

- Pour les analyses physico-chimique : Les douze prélèvements sont repartis comme suite ; les prélèvements pendant période d'une année (janvier jusque décembre).

IV.4 Techniques de mesures et d'analyses des solutions

IV.4.1 Mesures in situ

Les analyses dites de routine comprennent les mesures des variables suivantes de l'eau :

La température en °C, Il était mesuré à l'aide d'un appareil de type HANNA. Le pH, Il est mesuré à l'aide d'un pH mètre type Bedienungsanleitung HI 83141 avec une résolution de 0,1.troisième paramètre si la conductivité en mS/cm, Il été mesuré à l'aide d'un conductimètre de sonde type Bedienungsanleitung HI 83141.

Les mesures ont été réalisées chaque mois en profondeur de 30 cm à partir de Janvier 2011 jusque Décembre 2011. Les variables de routine sont mesurées généralement entre 10h00 -13h00 sur notre site d'étude. Les mesures sont effectuées avec des sondes électroniques appropriées pour chacun des paramètres.

IV.4.2 Analyses au laboratoire

IV.4.2.1 Spectrophotométrie

C'est la méthode analytique la plus utilisé en analyse d'eau. Elle nécessite la mise en ouvre préliminaire d'une réaction coloré spécifique de l'élément recherché. Elle s'appuie sur le fait que toute solution colorée traversée par un faisceau de lumière ne laisse passe qu'une fraction de la lumière incidente; la quantité de la lumière absorbé est proportionnel à la concentration du composé coloré recherché (loi de Beer-Lambert).

IV.4.2.1.1Caractéristiques de l'appareil DR-2000

L'appareil est un spectrophotomètre type DR-2000 dans le domaine du visible (325 à 900 nm) fig. IV.1. Il est pré-programmé pour la quantification de divers éléments et composés minéral « inorganiques » contenus dans l'eau. L'analyse de l'élément ou du composé est réalisée suite à une complexation de celui-ci avec le réactif ajouté ce qui développe certaines couleur. L'intensité de la couleur obtenue et le choix approprié de la longueur d'onde permettent l'analyse (i.e. l'obtention de la concentration) de l'élément ou du composé dans l'échantillon.

IV.4.2.1.2 Méthode

1. mettre l'appareil sous tension;
2. choisir la méthode no 0, pour lecture de l'absorbance;
3. ajuster la longueur d'onde à 560 nm;
4. emplir une cellule d'eau déionisée et faire le zéro de l'appareil avec cette cellule;
5. emplir une cellule avec une solution standard;
6. ajouter le contenu d'une gélule de réactifs à la cellule, bien agiter, attendre au moins 2 minutes pour permettre au complexe de se former complètement;
7. mesurer l'absorbance de la solution.



Figure. IV.1: Spectrophotomètre de type DR-2000

Les sulfates ont été analysés par un spectrophotomètre type DR2000, marque HACH, avec des réactifs en gélules :

<u>Elément ;</u>	<u>Longueur d'onde ;</u>	<u>Réactif.</u>
Les sulfates (SO_4^{2-})	450nm	SulfaVer 4

IV.4.2.2 Émission de flamme

L'émission de flamme est principalement une méthode d'analyse quantitative. La pratique de cette méthode, on réalise une courbe d'étalonnage avec une gamme étalon ou l'intensité émise est proportionnelle à la concentration (Fig. IV.2). Pour les concentrations faibles (quelques mg/l en général), l'absorbance est proportionnelle à la concentration si la loi de Beer-Lambert est obtenue. En revanche, pour les concentrations plus élevées les cas des eaux salées

(sebkha). On procédera à des dilutions suffisantes pour travailler dans le domaine linéaire ou quasi-linéaire.

Par un calcul très simple qui sera développé, on remonte facilement à la concentration initiale de l'élément ou niveau de notre échantillon. Il faut cependant se trouver dans le domaine de validité de la loi de Beer-Lambert pour obtenir des résultats précis.

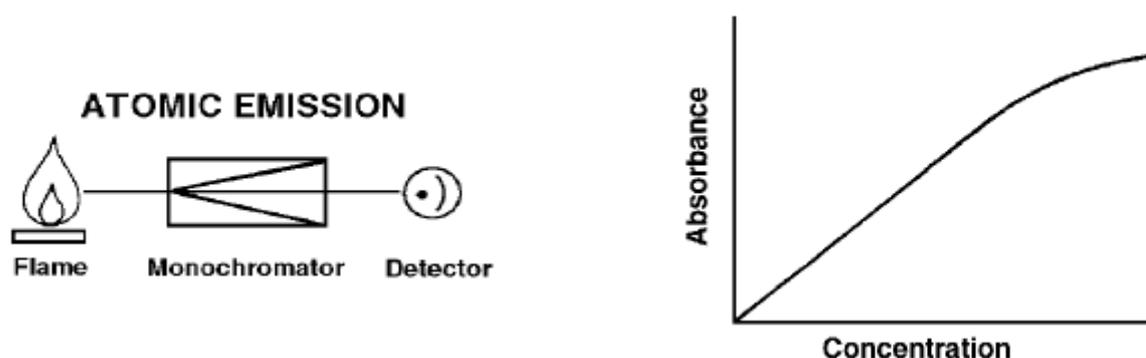


Figure. IV.2: Principe de fonctionnement de l'émission de flamme et courbe étalonnage

Le sodium Na^+ , et le potassium K^+ : sont analysés par le photomètre à flamme, de marque Sherwood flamme photomètre. Photomètres de flamme Modèle 410, de précision : < 0.2 ppms.

Les réactifs sont des solutions étalons de chaque élément. qui sont préparé au niveau de ADE (algérien des eaux) Les courbes d'étalonnage correspondantes au dosage de ces éléments sont représentées dans la fig. IV.3 et IV.4.

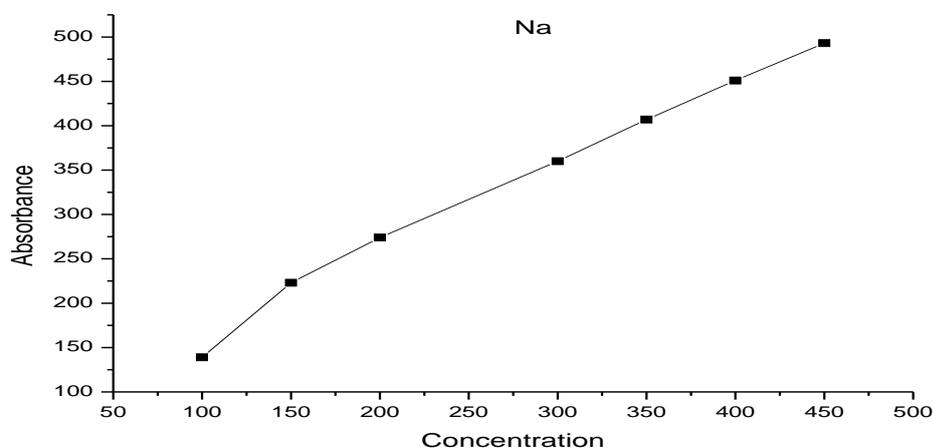


Figure. IV.3: Courbe d'étalonnage du sodium

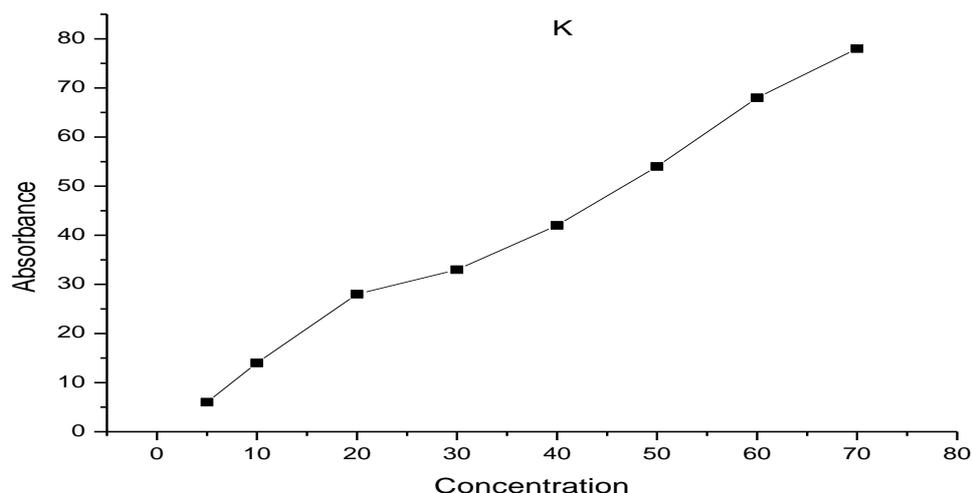


Figure. IV.4: Courbe d'étalonnage du potassium

IV.4.2.3 La titrimétrie

La titrimétrie c'est l'opération qui consiste à déterminer la concentration d'une espèce chimique (Ca, Mg, Cl, SO₄, HCO₃...etc.) en solution à l'aide d'une transformation chimique.

Avant le titrage, les réactifs sont séparés en deux solutions. Dans l'une des deux se trouve l'espèce dont la concentration est inconnue, il s'agit de la solution titrée. Dans l'autre se trouve un réactif dont la concentration est parfaitement connue, il s'agit de la solution titrant. Lors du titrage, on ajoute progressivement l'une des solutions à l'autre. Pour cela, on place un volume parfaitement connu d'une des solutions dans un bécher. L'autre solution est mise dans une burette graduée qui permet d'en ajouter un volume mesurable dans le bécher.

En outre, on dispose une agitation magnétique pour la solution de bécher afin qu'elle soit toujours homogène. En général, la solution titrée est placée dans le bécher et la solution titrant dans la burette

Les Chlorures, les carbonates et les bicarbonates (HCO₃), ainsi que le calcium et le magnésium ont été dosés par la méthode de titrimétrie.

IV.4.2.3.1 Protocole expérimental typique d'un titrage (Fig. IV.5)

- On prélève dans un bécher à l'aide d'une pipette jaugée ou graduée, un volume V_A déterminé de la solution aqueuse contenant l'espèce chimique A à titrer, de concentration inconnue C_A .
- On verse progressivement, dans le bécher à l'aide d'une burette graduée, une solution aqueuse du réactif titrant B, de concentration C_B connue, appelée solution titrant.
- On arrête de verser la solution titrant lorsque l'on a atteint l'équivalence du titrage (cf repérage de l'équivalence) pour la colorimétrie si le changement de couleur.

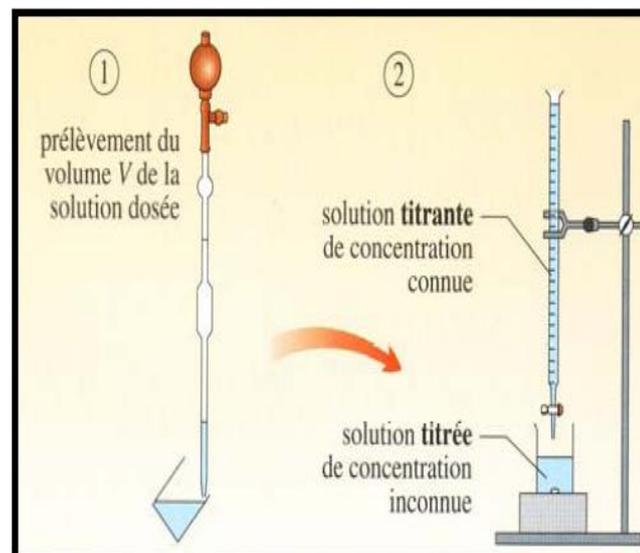


Figure. IV.5: Mode typique d'un titrage

On mesure alors le volume équivalent V_{equiv} c'est dire le volume de solution titrant versé pour atteindre l'équivalence ; la détermination expérimentale de V_{equiv} permet de calculer la concentration inconnue C_A (cf plus loin (détermination de la concentration de l'espèce à titrer)).

$$C_A = \frac{n(A)_{\text{prélevé}}}{V_A} \dots\dots\dots$$

NB : Les valeurs de concentration qui sont calculé doit être multiplié par le facteur de dilution. Dans notre analyse, nous étions utilisés (utilisions) un simple software qui donne directement les résultats. Généralement, les dilutions sont d'ordre 1000.

IV.4.2.3.2 Détermination du Chlorure : Cl-

A) Préparation des solutions

- Solution de nitrate d'argent à 0,01 N: 4.7791 D'AgNO₃ → 1000 ml d'eau distillée
- Indicateur coloré K₂CrO₄ à 10 %: 10g de K₂CrO₄ → Q.S.P 100 ml d'H₂O dist.
- Solution de chlorures à mg/l: 1.648g de NaCl.....1000ml d'eau distillée

B) La Titrations

- 0,1 ml + 100 ml eau distillé
- Ajouté 1ml de chromate de potassium Cr K (solution tempo)

- Titration avec nitrate d'argent ($\text{NO}_3 \text{ Ag}$) jusqu' à l'apparition permanente d'un faible précipité rouge brique

NB : effectuez le titrage d'un blanc en procédant de la même façon qu'aux étapes de titration, mais en remplace la solution d'eau analysé par une même quantité d'eau distillée. Cette opération permet de déterminer la quantité de titrant requise pour observer le point de virage. Ce volume de titrant devra être retranché (en guise de correction) des volumes de AgNO_3 requis pour les titrages des échantillons lors de vos calculs

IV.4.2.3 Détermination du calcium (Ca^{2+}) et du magnésium (Mg^{2+}) et la dureté (TH)

A) Préparation des solutions

- Solution d'E.D.T.A N/50 ($\text{C}_{10} \text{H}_{14} \text{N}_2 \text{Na}_2 \text{O}_8 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) : (0,02N ou 0,01M)
 - EDTA 3,725 g. après déshydratation à 80°C pendant 2 h.
 - H_2O distillée q.s.p 1000 ml.
 - H S N : 0.2 g de acide de calcone carboxylique +100 g de NaCl ($\text{C}_{21}\text{H}_{14}\text{N}_2\text{O}_7$, $3\text{H}_2\text{O}$ +NaCl)
- Solution d'hydroxyde de sodium (NaOH) 2 N :
 - NaOH (pastilles) 80 g.
 - H_2O distillée q.s.p 1000 ml.
- Solution tampon (NH_4Cl) pH = 10,1:
 - Chlorure d'ammonium 67,5 g.
 - NH_4OH (25%) 570 ml
 - Sel disodique de magnésium E.D.T.A. ($\text{C}_{10}\text{H}_{12}\text{N}_2\text{O}_8\text{Na}_2\text{Mg}$). 5g
 - H_2O distillée q.s.p 1000
 - Noir Eriochrome 0,5 g
 - éthanol 25 ml

B) La Titrations de Ca^{+}

- 0,5ml prise d'essai+50 ml de l'eau distillé
- Ajouté 2 mg de HSN
- 2 ml de solution tempo hydroxyde de sodium Na OH
- Titration avec EDTA de Na jusque couleur bleu

C) La Titrations de TH

- 0,5ml prise d'essai+50 ml de l'eau distillé
- Ajouté 4 ml de Chlorure d'ammonium

- 3 gouttes de noire Eriochrome
- Titration avec EDTA de Na

IV.4.2.3.4 Détermination de l'alcalinité (HCO₃⁻)

A) Préparation des solutions

- Solution d'acide sulfurique (H₂SO₄) à N/50 :
 - (H₂SO₄) à N /50 (0.5ml de (H₂SO₄) ...dans. 1000 ml de l'eau distillé
- Solution de NaOH de N/50 (0.8 g dans 1000 ml de l'eau distillé)
- méthyle orange (0.5 g dans 100 ml de l'eau distillé)

B) La Titrations

- 0,1ml prise d'essai+100 ml de l'eau distillé
- Ajouté 2 gouttes de méthylorange
- Titration avec H₂SO₄ jusque l'apparition de couleur rouge brique

IV.5 Protocole d'échantillonnage et analyse des sédiments et des roches

Les sédiments ont toujours été prélevés sur l'affleurement proche de notre zone d'étude, avec quelques points additionnels. Le nombre d'échantillons prélevé avoisine ainsi vingtaine. Pour la récolte des échantillons de sédiments, des gants stérilisés ont été systématiquement utilisés. Les sédiments des points échantillonnés ont été placés dans des sachets plastiques, qui sont nommé et numéroté.

Les roches ont été échantillonnées à l'aide d'une masse métallique avec puis conservé dans des sachées de nylon. Les points sélectionnés concernant les affleurements rocheux des unités géologiques principales des régions étudiées.

IV.5.1 La méthode échantillonnage par la tarière

La prospection à tarière, où l'on mesure la profondeur à l'aide d'un mètre de mesure à laquelle une pique rencontre un refus, cette méthode d'échantillonnage est très ancienne, même si peu d'auteurs en ont revendiqué l'emploi. Elle partage avec la prospection « à la tarière », où l'on prélève en profondeur des échantillons de sol de petits volumes, le défaut de correspondre à une information très ponctuelle et d'être d'une exécution lente. C'est pourquoi l'exploration du sous-sol repose d'abord en pratique sur les méthodes géophysiques.

Pour l'étude sédimentologique, sept carottes réparties sur l'ensemble du site ont été prélevé. Le carottage a été effectué à l'aide d'une tarière de 2 m sur une profondeur moyenne de 1,9 m. Au laboratoire, chaque carotte a été subdivisée en deux moitiés. La première moitié a fait l'objet d'une description lithologique macroscopique (la composition globale, la texture, la structure et la

couleur des sédiments) et la seconde moitié, d'une analyse granulométrique, d'une détermination de la teneur en CaCO₃ et d'une identification minéralogique.

Les subdivisions de la fraction sableuse obtenues par tamisage à sec, sur une série de tamis de type AFNOR, ont été exprimées sous forme de courbes cumulatives semi-logarithmiques (RIVIERE, 1977) permettant le calcul des indices granulométriques (M_z , S_{ki} et σ) (FOLK & WARD, 1957 ; RIVIERE, 1977 ; CHAMLEY, 1988, 2000).

L'analyse morphoscopique a été appliquée aux dépôts sableux de la colonne sédimentaire; l'observation des grains de quartz étant réalisée sous loupe binoculaire. Les carbonates ont été déterminés par calcimétrie et la minéralogie par diffraction des rayons X sur les sédiments bruts et sur la fraction argileuse.

IV.5.2. Préparation des échantillons solides

A la différence des échantillons liquides, les échantillons solides sédiments et roches exigent une préparation particulière en fonction de type de technique d'analyse que l'on doit réaliser. Tous les échantillons arrivés au laboratoire sont secs et prêts pour effectuer les tâches suivantes de préparation.

Ainsi le tamisage a été effectué pour caractériser la granulométrie des sédiments et définir les fractions sur lesquelles on doit mesurer la composition chimique totale. Le broyage des sels prélevés a été appliqué l'objectif si de faire des analyse diffraction de rayon X. Des sections polies des roches et des lames minces des sédiments ont été préparées pour les méthodes de microscopie. Ces procédures sont détaillées dans ce qui suit.

IV.5.2.1 Tamisage des sédiments et séparation de la fraction inférieure à 2 mm, 63 μ m et 2 μ m

Les sédiments ont été tamisés avec des tamis en PP de type, dont la maille de tamisage est en nylon, ce qui permet d'éviter la contamination des sédiments. Le tamisage a permis de séparer les sédiments en quatre fractions (>2 mm, <2 mm, compris entre 2 mm et 63 μ m, et <63 μ m). Les tamis ont été bien nettoyés avant d'utilisation et après le tamisage de chaque échantillon. Les grains bloqués dans la maille des tamis ont été nettoyés à l'aide d'une pissette d'eau ou d'une brosse à dent propre.

En préalable au tamisage, les sédiments ont été quartés. Après quartage, les extrêmes opposés étaient tamisés à 2 mm. Deux quarts restants ont été utilisés pour obtenir les quatre fractions. Chaque fraction obtenue a été pesée avec une balance de précision.

IV.5.2.2 Broyage des échantillons

Les échantillons ont été broyés pour les digestions acides dans tous les cas dans un mortier en agate. Les mortiers en agate garantissent un broyage sans contamination des échantillons. En fonction du type d'échantillon, leur dureté et leur quantité, différents mortiers ont été utilisés. Pour des petites quantités et des matériaux peu résistants, un mortier manuel a été utilisé.

Dans tous les cas, entre chaque échantillon, les différents mortiers en agate ont été nettoyés avec soin avec un chiffon de papier puis avec plusieurs fois. Cette procédure permet de s'affranchir de la contamination entre les échantillons broyés.

IV.5.2.3 Réalisation des lames minces

Les lames minces ont été préparées à l'Atelier Roches du CRD (centre de recherche et de développement à Sonatrach).

IV.5.3 Principe et l'analyse de la diffraction des rayons X

Le principe de cette méthode est basée sur le fait que lorsqu'un faisceau de rayons X est dirigé sur un cristal, il se produit une déviation du rayon qui est diffracté par les plans du réseau cristallin.

La diffraction des rayons X (DRX) a été réalisée sur poudre totale et appliquée à la fraction inférieure à 2 mm pour tous les échantillons des sédiments. Cela a permis d'identifier qualitativement les minéraux majeurs bien cristallisés (>1%) des échantillons étudiés. Technique bien connue et aux principes simples, elle applique la loi de Bragg.

$$2d \sin \theta = n \cdot \lambda$$

Où :

- θ (thêta) est l'angle de diffraction d'un rayonnement ;
- λ (lambda) est la longueur d'onde émise par une anticathode ;
- d est la distance atomique entre deux plans d'un même cristal ; n est un numéro entier.

La source anticathodique étant connue et les angles de diffraction mesurés, la distance atomique est obtenue par application de l'équation ci dessus. La distance atomique (d) ou interarticulaire des cristaux est caractéristique de chaque minéral, ceci permet l'identification des différents minéraux.

Toutes les analyses ont été réalisées dans le service de DRX de l'université de Laghwat sur poudre totale en utilisant une anticathode de cobalt (Co Ka), dont la longueur d'onde est : 1.789Å. Le temps d'acquisition est de 1800s et la charge électrique utilisée fut 40 kV (Thibaut, pers. comm.). L'identification des minéraux a été effectuée par comparaison avec les raies décrites par les fiches minéralogiques des bases de données PCPDFWIN (JCPDS-ICDD, 1997) et

X-RAY Spacing – <http://webmineral.com/X-Ray.shtml> – (Barthelmy, 2005). Les résultats ainsi obtenus donnent un panorama de la minéralogie de chaque point échantillonné.

IV.5.3.1 Dépouillement de diagrammes de diffraction X

Le logiciel X' Pert High Score fait partie de *DIFFRAC^{plus}*, programme graphique de dépouillement des DRX. Ce logiciel a été mis en service au PANalytical B.V en 2005. Après le balayage angulaire des RX, les mesures sont transmises au logiciel et mises sous la forme de fichiers 'raw' qui permet ensuite la représentation graphique des diffractogrammes. Chaque diffractogramme est composé par une série de pics. L'identification des phases minérales est limitée par les interférences entre les raies caractéristiques. Pour éviter ce problème, le logiciel X' Pert High Score propose une boîte de recherche de minéraux qui permet la discrimination des minéraux. Après identification finale des minéraux, on peut estimer leurs proportions à partir d'une analyse semi-quantitative. Les surfaces des intensités maximales de chaque minéral identifié sont multipliées par des facteurs de correction (Aguila, 2004) (**Tab. IV.1**). Ces facteurs ont été établis par comparaison entre différents laboratoires à l'aide de minéraux standards (Gomez et Gonzalez, communication personnelle). Les proportions de chaque minéral sont déduites de la somme des intensités corrigées. Ces estimations semi-quantitatives doivent être en concordance avec les analyses chimiques.

Tableau. IV.1 : Pics caractéristiques des minéraux argileux et non argileux, et facteurs de correction (aguilla, 2004 ; Gomez et Gonzalez, communication personnelle)

FAMILLE	Nom	position raie caract. ou principale (Å)	Facteur de correction	référence
Silicates	Quartz	3.34	1.38	33-1161
	Albite (Na)	3.19	-	9-466
	Anorthite (Ca)	-	-	-
	Orthoclase (K)	-	-	-
	Microcline	3.25	-	19-926 ou 19-932
Argiles	smectite	17	1.83	-
	illite	5	5.06	-
	kaolinite	3.58	2.02	-
Carbonates	chlorite	4.82	3.29	-
	Calcite (Ca)	3.03	1	5-0586
	Dolomite (Mg)	2.89	1.03	36-0426
sulfates	Sidérite (Fe)	2.79	-	29-0696
	gypse (CaSO ₄ , 2H ₂ O)	7.64	1	33-0311
	anhydrite (CaSO ₄)	3.50	-	37-1496
chlorures	Barite (BaSO ₄)	3.1 et 3.44	-	24-1035
	Halite (NaCl)	2.82	1.49	5-0628
	Sylvite (KCl)	3.15	-	41-1476

IV.5.3.2 Préparation et analyse des échantillons prélevés en DRX

L'identification et la distribution des éléments chimiques (minéraux évaporitiques) formant durant toute la saison ont été réalisées par micro-analyse aux rayons X en dispersion d'énergie. L'appareillage utilisé se compose d'un détecteur de marque et de type LINK Pentafet et d'un analyseur LINK eXI-10 montés sur le microscope électronique à balayage précité. Les micro-analyses ont été réalisées sous une tension d'accélération de 10 ou de 15 kV et avec le détecteur en fenêtre ouverte ou muni d'une fenêtre fine de Be afin de permettre la détection des éléments légers.

Une partie des sels formés ou sebkha a été prélevée puis réduite en poudre afin de subir une diffraction par rayons X permettant de déterminer la nature minérale des minéraux formés. L'identification des minéraux par diffraction des rayons X a été effectuée à l'aide d'un diffractomètre équipé d'un monochromateur au graphite et utilisant la radiation $\text{FeK}\alpha$ ($= 1,9373 \text{ \AA}$).

IV.6 Logicielle et software utilisé

Différents diagrammes ont été utilisés pour la classification des eaux. Le programme PHREEQC et Diagramme en version démo, ont servi de moyens pour vérifier la validité des résultats d'analyses et pour effectuer les différents calculs pour l'interprétation géochimique. Les opérations de calculs et la plupart des calculs statistiques et ainsi que les graphiques ont été effectués dans des fichiers Excel. Les interprétations des pics des minéraux en rayon X sont faites par X'Pert High Score software.

CHAPITRE : V
RESULTATS ET DISCUSSIONS
GEOLOGIE DU CHOTT BAGHDAD

V.1 Introduction

La Sebkha Baghdad représente un système particulièrement intéressant pour l'étude sédimentologique et minéralogique des dépôts dans le but de mieux comprendre le remplissage sédimentaire du bassin, en relation avec son évolution récente. Des analyses sédimentologiques et minéralogiques ont été effectuées sur des sédiments carottés de la sebkha Baghdad.

L'objectif de ce chapitre, la répartition spatio-temporelle des faciès permet de reconstituer l'évolution récente de ce système : d'un petite bassin à un milieu fermé qui évolue progressivement vers un pôle évaporitique. Ce système évolutif a été observé dans d'autres zones du sahara septentrional tel que le chott Marouane et Melrhir (étude a été fait par, Hacini, et al 2008).

V.2 Présentation de la zone d'étude

Sebkha Baghdad est disposé de direction NE-SW et sont sujettes à des variations hydrologiques saisonnières très nettes. Elle est situé 15 km environ au nord-est d'El Hadjira (Fig. V.1). Elle est située au plein de sahara et n'est pas envahies par l'eau qu'au cours de la saison pluvieuse et lors de tempêtes. En été, par contre, elles s'assèchent et sont le siège d'une déflation éolienne parfois notable.

La sebkha couvre 50 km² de superficie et constitue le seul exutoire naturel de la nappe phréatique. Sebkha Baghdad est limité par :

- Au Nord : dunes de sable.
- Au Sud : des affleurements gypso-calcaire.
- A l'Est : limite d'extrémité entre Touggourt et El Hadjira.
- A l'Ouest : ruine d'ancien petite douar qui s'appel El Rachdi avec zone agriculture.

La position géographique du secteur d'étude est définie par les coordonnées Lambert suivantes :

$$X1 = 32.7028833N ; \quad Y1 = 5.673151E ;$$

$$X2 = 33 N \quad ; \quad Y2 = 6 E$$

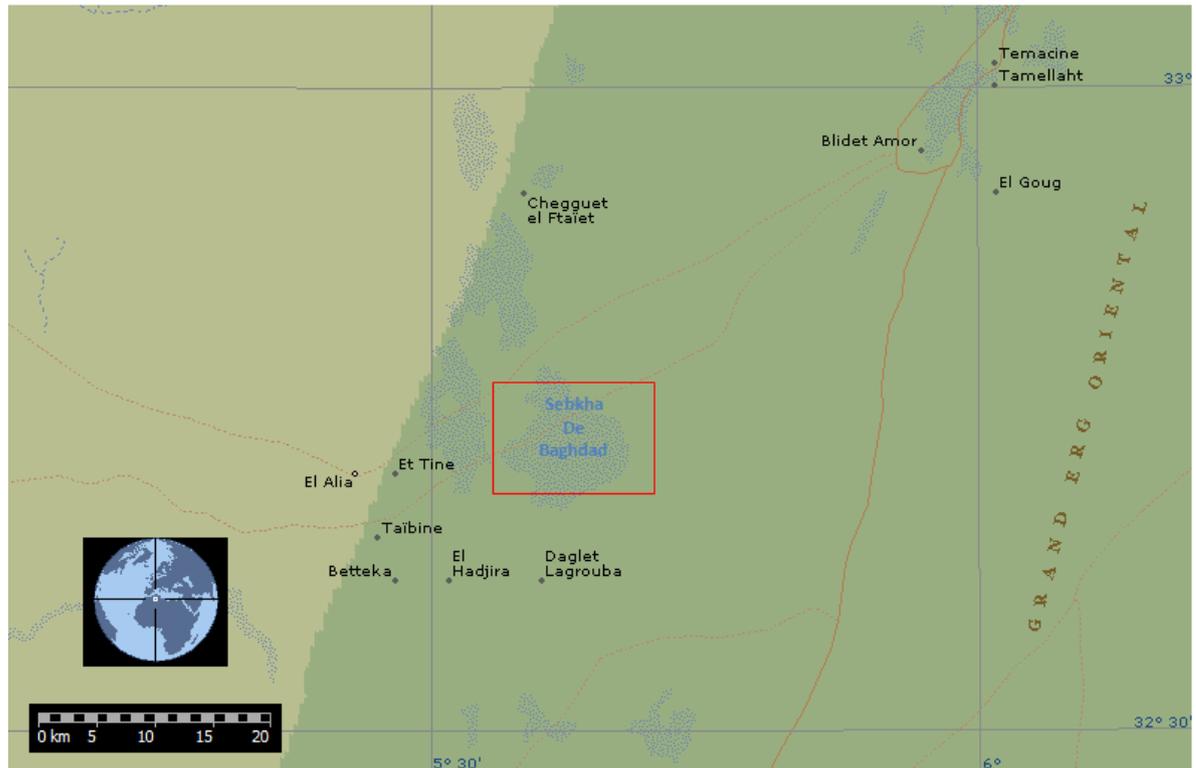


Figure. V.1 : Situation géographique du chott Baghdad

La plupart de ces sebkhas du sahara septentrional saisonnières sont restées très peu connues, comme c'est le cas de la Sebkha Baghdad, objet de cette étude. C'est une dépression coincée entre un cordon sableux actuel, interrompu par des affleurements gypso-calcaire.

Sebkha Baghdad fait partie de petite village « Laghrif ». Il est caractérisé par l'existence de deux niveaux morphologiques séparés par une dénivellation de 60 à 80 m (voire fig. V.2) qui sont :

- Le premier niveau, Le plus bas est celui exutoire. Il correspond à la sebkha fossile et aux berges de sebkha ou la présence des dunes de sable.
- Le deuxième niveau, le plus haut, est celui de garât Lagraf (Kasar Baghdad). Il est caractérisé par la présence des buttes témoin et plateaux couvert de regs de cailloutis de silex. Les buttes et plateaux se présentent comme des buttes témoins de l'extrémité sud de la sebkha Baghdad se terminant en falaise. Nous retrouverons les plateaux plus au sud avec des altitudes de l'ordre de + 100 m, mais la montée sur le plateau est ce forme d'escaliers étagés jusque au sommet.

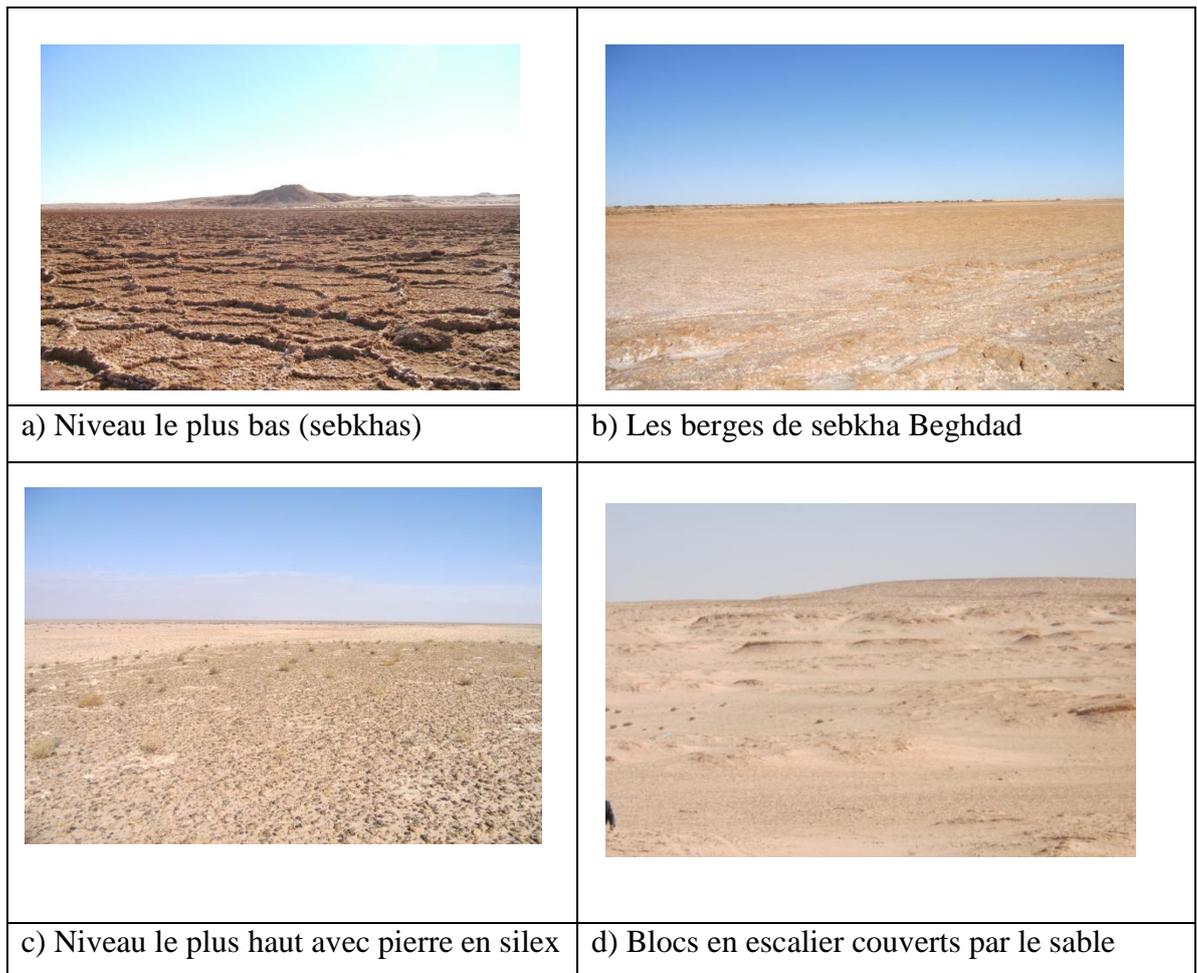
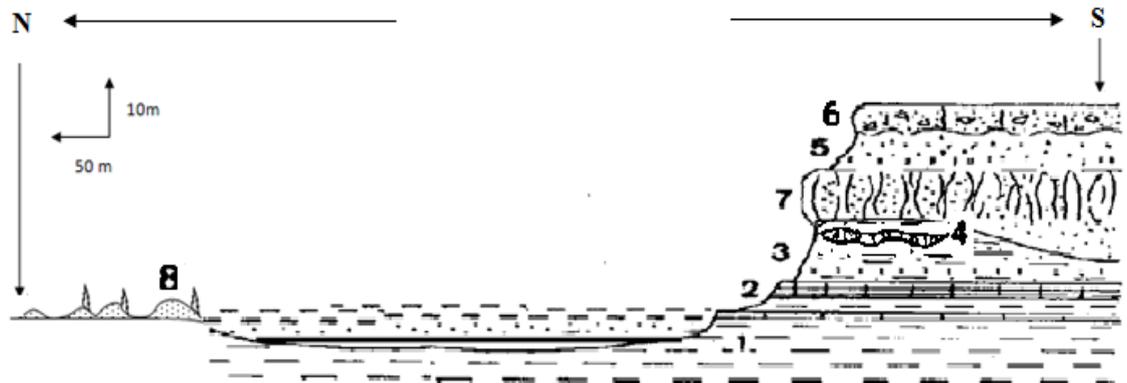


Figure. V.2 : Photos des différents niveaux de sebkha Baghdad

Les niveaux observés de bas en haut sont les suivants (fig. V.3)

- 1 à - 2 m : Sebkha ;
- + 1 à + 2 m : dune de sable; la zone des dunes blanches à la berge nord de sebkha. Ces dunes blanches sont couvertes de végétation en touffes d'herbes formant des nebkha (accumulation de sable derrière les touffes d'herbes). sable blanc couvre la majorité des berges sud de sebkha. Le sable de ces dunes n'est pas toujours blanc. Il y a souvent des passées de sable rouge alternant avec des teintes plus claires.
- + 2 à + 10m : sable blanc très fin à grands cristaux de gypse poecilitiques a inclusions de gypse.
- + 10 à + 15 m : Grès très fin, blanc, beige, vert pale, dure ; La cassure du grès n'est pas aigue, elle est plutôt adoucie et parfois même conchoïdale. Dans ce grès, généralement homométrique, il y a quelques grains de quartz de 1 mm environ.
- + 15 à + 20m : sommet dalle très dure de gypse recristallise a intercalation gréseux, contenant des grains de sable.

- + 20 m : sur les sommets buttes, présence de regs à caillouteux de silex de couleur marron, noire à brunâtre.



- 1 : Argiles brun
- 2 : Bancs de calcaire blanc
- 3 : Argilites sableuses verts.
- 4 : Lentilles de calcaire oolitique lacustre.
- 5 : Sable.
- 6 : Calcaire gréseux : sommet du plio-villafranchien avec croûte calcaro-gréseuse du villafranchien supérieur
- 7 : Gré à orgues.
- 8 : Dune de sable, hauteur de la coupe : 20 m.

Figure. V.3 : Coupe simplifié des formations qui affleurement proche de sebkha Baghdad

V.3 La répartition spatiale des sédiments superficiels à partir image satellitaire

L'étude cartographique des sédiments de surface a été réalisée à l'aide des photographies aériennes (Wikimapia) et d'une prospection du terrain démontre une répartition des différents faciès en auréoles anisopaques (fig. V.4).

Le dépôt de sable à la périphérie de sebkha Baghdad est plus étendu sur le côté ouest avec des plantes vivant dans des sols salés (halophyte). Le faciès mixte (argilo- sableux et sablo-argileux) plus fin se dépose en zone intermédiaire. Celui-ci est plus abondant sur le côté sud et enfin le centre de la sebkha est occupé par un faciès fin silto-argileux à argileux couvert par encroûtement gypseuse.

Une diminution progressive des sables et une augmentation progressive des argiles s'observent depuis les zones les plus externes jusqu'aux zones les plus internes. Ceci traduit l'existence d'un granoclassement décroissant dans la distribution latérale des matériaux détritiques. La présence des sables quartzeux sur une large étendue à l'Ouest est en relation étroite avec l'importance des apports par les courants éolien abondants de ce

côté. Au Sud de sebkha Baghdad, une répartition des affleurements qui couvre cette sebkha de cet côté. Ces affleurements piègent l'alimentation des sédiments détritiques éoliens qui vient de coté sud de sebkha (obstacle).



- 1 : dune de sable
- 2 : argile avec encroûtement gypsifère
- 3 : affleurement gypso-calcaire
- 4 : plantes type halophyte

Figure. V.4 : Distribution latérale des faciès dans la sebkha Baghdad.

V.4 Principales roches des dépôts évaporitiques du chott Beghdad :

L'étude des roches évaporitiques du chott Beghdad a été réalisée en se basant sur les travaux de terrain, les travaux de laboratoire et les analyses par diffractométrie aux rayons X.

V.4.1 Les argiles

Les argiles sont bien représentées dans sebkha Beghdad. Elles se rencontrent en partie basale des affleurements de surface, les sables et les calcaires et parfois les gypses dessus de ces couche d'argile. Les argiles du cette dépression présentent une couleur rouge foncée à noirâtre (présence de matière organique).

Les échantillons prélevés des carottes du sondage BG-1 montre une alternance avec limon sableux. Les épaisseurs des lits de cette alternance sont d'ordre centimétrique. Ces argiles sont très riches en matière organique et en pyrite indiquant un milieu de dépôts confiné, on les appelle des Sépiolites.

La richesse de ces argiles en matière organique et en pyrite indique les conditions d'un milieu réducteur ayant joué un rôle important dans la décomposition (réduction) des sulfates.

V.4.2 Les calcaires

Les calcaires sont représentés surtout dans partie supérieure des dépôts du Plio-quaternaire. Ils se présentent en bancs d'épaisseur généralement métrique. Ils sont de couleur grisâtre à blanchâtre et à grains très fin. Des échantillons de ces calcaires, prélevés des travertins, montrent des formes rappelant des emprunts de Mud-cracks, soulignées par une couleur brune (fig. V.5). Ces calcaires renferment également de petits losanges blanchâtres de gypse de taille centimétrique dispersé dans la masse calcaire.

Par ailleurs, ces calcaires sont traversés par des fissures remplies par du gypse secondaires et des oxydes de fer.



Figure. V.5 : Photos montrant un affleurement de calcaire emprunte de Mud-cracks, intercalé par pure gypse

Au microscope fig. V.6, ces calcaires montrent un fond cryptocristallin, dans lequel s'observent des formes losangiques, traduisant le pseudo-morphe des cristaux de gypse, ainsi que des fissures remplies par du gypse secondaire et des oxydes de fer.

Les oxydes de fer s'observent également en mouchetures disséminées dans le fond cryptocristallin.

A) Calcaires gréseux ferrugineux à fragments (lames nacrées-roses) Les grains de quartz sont très petits et anguleux, la matrice est calcaire mais riche en fer (brune)

B) calcaire gréseux à grain coated de quartz.

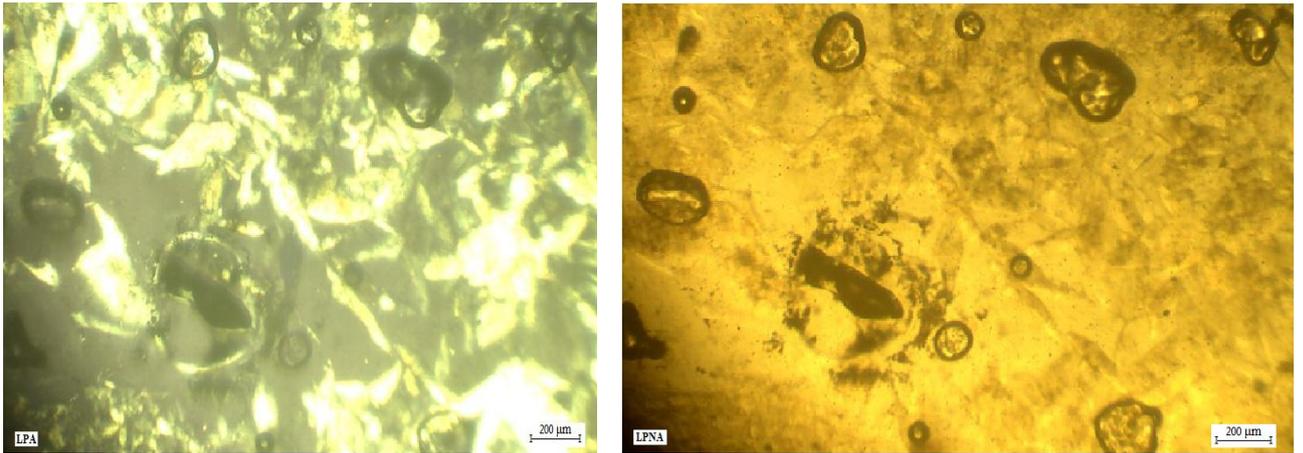


Figure. V.6 : Photographies de calcaires en lames minces sous microscope polarisant

V.4.3 Le gypse :

Dans les affleurements de région Laghrif, deux grandes variétés de gypse ont pu être observées :

- une variété pure, caractérisée par sa couleur blanche ;
- une variété impure de couleur variant d'un blanc sale au gris. Cette variété est la plus répandue.

La variété impure s'observe en intercalation avec les argiles riches en matière organique et les calcaires. Dans cette alternance de gypse, d'argile et de calcaires s'observe un développement de gypse pur blanchâtre.

Le développement de gypse pur vraisemblablement du processus de recristallisation des solutions chargées Ca SO_4 qui sont originaires si la dissolution de gypse impure très répandue dans les affleurements.

V.4.4 Les Oxydes de fer :

Les oxydes de fer sont fréquents dans les dépôts évaporitiques de cette région. Ces derniers se rencontrent avec le gypse, les calcaires, les argiles et avec le sel gemme. Les oxydes de fer se présentent sous différentes formes :

- en remplissage de veinules dans le gypse et dans les calcaires ;
- à l'interface des lits de gypse, d'argile et de calcaires.
- en imprégnation dans le sel gemme.

V.4.5 Le sel gemme :

Les échantillons de sel gemme étudiés proviennent des carottes de sondages. Au niveau du sondage BG1 le sel gemme se présente en alternance avec les argiles sableuse, les argiles et sables sous forme de lits d'épaisseur réduite. Par contre, au niveau du sondage BG 2, le sel gemme se rencontre sur une épaisseur inférieur à 50cm.

Le sel gemme sebkha Baghdad montre des couleurs variées : blanchâtre, grisâtre et brunâtre. Ces couleurs sont dépendantes du type d'impuretés qui l'accompagne (oxydes de fer, matière organique...).

La masse de sel gemme montre un aspect lité, marqué par une superposition de petits lits millimétriques. Par endroit, ces lits sont recoupés obliquement par des argiles et parfois même perpendiculairement. Ces argiles noirâtres sont elles-mêmes parcourues par du sel de recristallisation (sel gemme secondaire) de couleur blanche et de texture fibreuse.

V.4.6 L'anhydrite

Elle est intimement associée au gypse et ne s'observe que rarement dans les calcaires. L'anhydrite est un produit secondaire, résultant de la déshydratation du gypse. L'observation microscopique laisse apparaître des fronts de remplacements du gypse par l'anhydrite très nets. L'anhydrite s'observe également en remplissage dans les fissures, mais toujours en remplacement du gypse. Parfois, l'anhydrite apparaît pseudo-morphe les cristaux losangiques de gypse.

L'un des caractères de distinction entre l'anhydride et le gypse est le clivage. En effet, l'anhydrite présente des clivages orthogonaux, alors que le gypse présente des clivages losangiques.

V.5 Etude sédimentologique de Sebkha Baghdad**V.5.1 L'implantation des carottes et leur objectif**

Les sondages carottés BG-1 à BG-7 ont été implantés dans la zone d'étude (voir figure ci-dessous). L'implantation des points de sondage a été choisie pour remplir deux objectifs:

- Explorer autant que possible, la totalité des berges de la sebkha ;
- Dresser une coupe lithologique du sol à travers la sebkha.

Les carottes se subdivisent en quatre lots distincts en fonction de leur répartition géographique (Fig. V.7):

- Lot 1 : les carottes prélevées au centre de la sebkha (BG-4, BG-5) ;
- Lot 2 : les carottes vers les dunes de sable (BG-6, BG-7) ;

- Lot 3 : les carottes prélevées du côté des affleurements gypso-calcaire, à sud de la sebkha (BG-2 et BG-3) ;
- Lot 4 : la carotte BG-1, située dans la partie isolée de la sebkha.

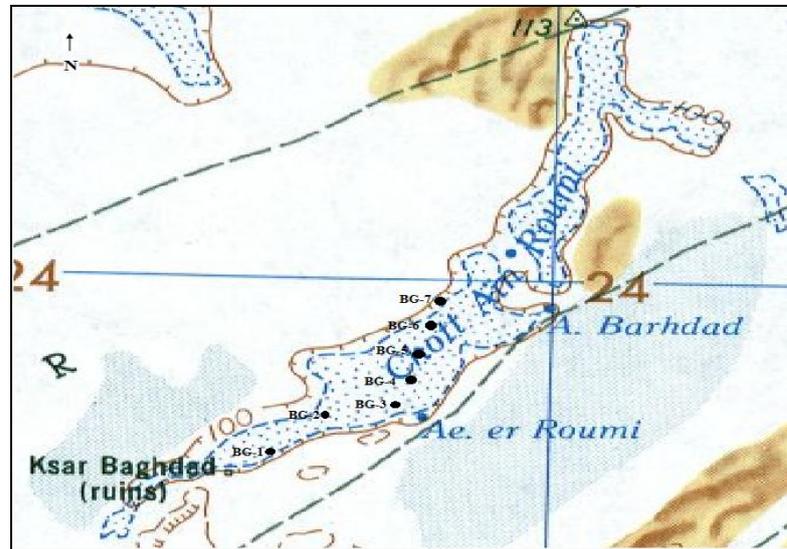


Figure. V.7 : Localisation des stations de prélèvements et lithologie des sédiments carottés.

V.5.2 Interprétation lithologique des carottes

V.5.2.1 Carotte BG-1

Il est Poussé à 2m de profondeur.

- 0 à -20 cm : une croûte ferrugineuse salé brunâtre. Deux échantillons intacts ont pu être prélevés dans cette formation pour faire analyse de DRX.
- -20 à -50 cm : A partir de -20 cm de profondeur et jusqu'à 50 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -50 à -80 cm : gypse plus anydrite massive.
- -80 à -125 cm : cousins argiles avec gypse et matière organique.
- -125 à -150 cm : sable calcaire avec pellets
- -150 à -160 cm : croûte lithifiés
- -160 à -200 cm : boue argilo-silteux

Le niveau de la nappe se trouve à -75cm.

V.5.2.2 Carotte BG-2

Il a permis de reconnaître,

- 0 à -05 cm : une croûte ferrugineuse salé brunâtre.
- -05 à -53 cm : A partir de -05 cm de profondeur et jusqu'à 50 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -53 à -85 cm : gypse plus anhydrite massive.
- -85 à -130 cm : cousins et une couverture d'argile plastique légèrement sableuse avec gypse et matière organique.
- -130 à -160 cm : sable calcaire avec pellets
- -160 à -163 cm : croûte lithifiée
- -163 à -200 cm : boue argilo-silteux

Le niveau de la nappe se trouve à -80 m.

V.5.2.3 Carotte BG-3

Il a permis de reconnaître :

- 0 à -10 cm : une croûte ferrugineuse salé brunâtre. -20 à -50 cm : A partir de -20 cm de profondeur et jusqu'à 50 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -10 à -15 cm : une couche de sable fine à moyenne de couleur jaune-grisâtre.
- -15 à -43 cm : A partir de -15 cm de profondeur et jusqu'à -43 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -43 à -83 cm : gypse plus anhydrite massive.
- -83 à -120 cm : une couche d'argile plastique noirâtre à brunâtre (matière organique) légèrement sableuse avec cousins argiles et gypse.
- -120 à -142 cm : sable calcaire avec pellets
- -142 à -163 cm : croûte lithifiés
- -163 à -200 cm : argilo-silteux

Le niveau de la nappe se trouve à -70 m.

V.5.2.4 Carotte BG-4

Il a permis de reconnaître la succession de couches suivantes :

- 0 à -05 cm : une croûte ferrugineuse salé brunâtre.
- -05 à -17 cm : une couche de sable fin à moyen jaunâtre.
- -17 à -20 cm : une couche sable fin.
- -20 à -24 cm : argile sableuse, silt
- -24 à -63 cm : A partir de -24 cm de profondeur et jusqu'à -63 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -63 à -103 cm : gypse plus anydrite massive
- -103 à -130 cm : cousins argiles avec gypse et matière organique.
- -130 à -145 cm : une couche de sable calcaire avec pellets consolidé
- -145 à -163 cm : croûte lithifiés
- -163 à -200 cm : argilo-silteux

Le niveau de la nappe se trouve à -45 m.

V.5.2.5 Carotte BG-5

Il a permis de reconnaître la succession de couches suivantes :

- 0 à -10 cm : une croûte ferrugineuse salé brunâtre.
- -10 à -15 cm : une couche de sable fin à moyen jaunâtre.
- -15 à -30 cm : une couche sable fin.
- -35 à -42 cm : argile sableuse, silt
- -42 à -65 cm : A partir de -24 cm de profondeur et jusqu'à -65 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -65 à -103 cm : gypse plus anydrite massive
- -103 à -130 cm : cousins argiles avec gypse et matière organique.
- -130 à -145 cm : une couche de sable calcaire avec pellets consolidé
- -145 à -168 cm : croûte lithifiés
- -163 à -200 cm : boue argilo-silteux

Le niveau de la nappe se trouve à -40 cm.

V.5.2.6 Carotte BG-6 et BG-7

Il a permis de reconnaître sur toute la profondeur du sondage, une couche de sable fin à moyen jaunâtre.

- 0 à -15 cm : une croûte ferrugineuse salé brunâtre.
- -15 à -23 cm : une couche de sable fin à moyen jaunâtre.
- -23 à -40 cm : une couche sable fin.
- -40 à -45 cm : argile sableuse, silt
- -45 à -75 cm : A partir de -45 cm de profondeur et jusqu'à -75 cm, une couche de sable carbonaté jaunâtre à nodule d'anhydrite.
- -75 à -85 cm : gypse plus anhydrite massive
- -85 à -120 cm : cousins argiles avec gypse et matière organique.
- -120 à -160 cm : une couche de sable calcaire avec pellets consolidé
- -160 à -182 cm : croûte lithifiés
- -182 à -200 cm : boue argilo-silteux

Le niveau de la nappe a été relevé à -50 cm.

V.5.3 Granulométrie

L'analyse granulométrique permet de suivre la dynamique sédimentaire de la sebkha Baghdad.

Les résultats obtenus des analyses granulométrique montrent que les sables sont de texture fine à la périphérie et très fine avec siltes et argiles en zone médiane $Mz > 4 \phi$ ($Mz < 63 \mu m$). Le coefficient d'asymétrie ($Ski < 1$) montre que asymétrie de sable de zone d'étude est positive « plus les sables sont fins, plus sont abondantes les particules fines » (Lewis *et al.*, 1994 ; Chamley, 2000).

L'indice de classement (σ), qui donne une idée sur le niveau d'énergie du milieu (Folk, 1980 ; Reineck *et al.*, 1980). La valeur est $\sigma < 0,35$ montre que la sédimentation s'est faite dans un milieu calme, ou le classement des sables est modéré voire Tab V.1 et V.2. En effet, la sebkha est régie par un climat semi-aride où la pluviométrie est très faible et l'écoulement d'eau est nul.

Les sables fine à moyen sont transportés par roulement et par suspension gradée. Les sédiments ont été déposés sur un fond où les courants sont rapides à modéré, causant ainsi un entraînement de la fraction fine en suspension et son dépôt loin. Ce qui explique la présence de sables associés aux argiles dans les carottes les plus internes (BG-3 et BG-4).

Les courbes cumulatives ont une forme généralement parabolique à pente forte (fig. V.8). C'est la forme théorique correspondant à l'immobilisation globale par diminution de la capacité de transport. Cette dernière est liée à une diminution de la vitesse du courant du matériel transporté à proximité du fond à l'état de «suspension gradée» au sens de Passega.

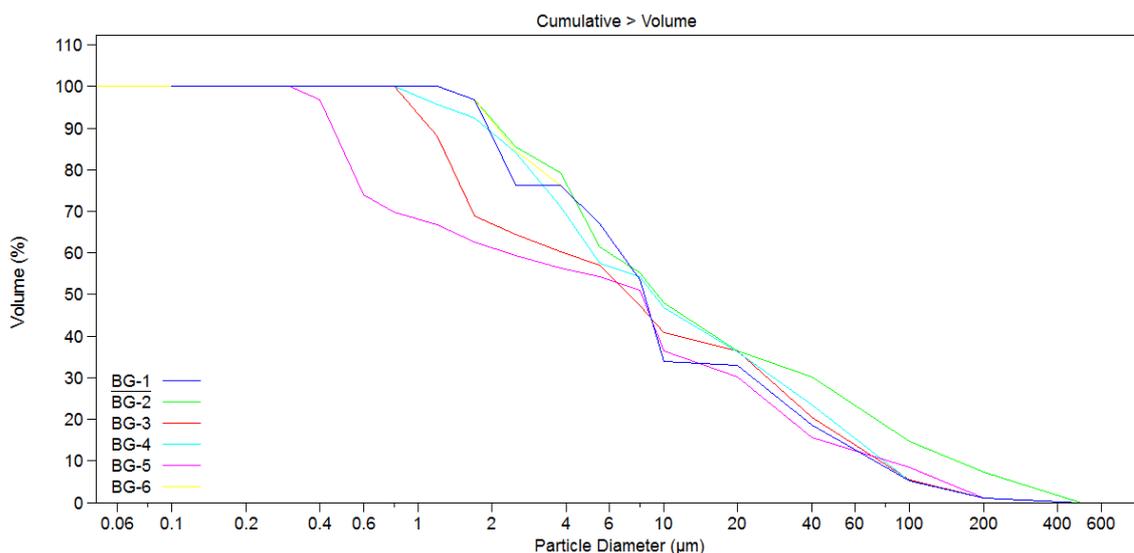


Figure. V.8 : Courbes granulométriques des échantillons ayant plus de 50 % de sables des carottes (BG-1, BG-2, BG-3, BG-4, BG-5 et BG-6) prélevées dans la sebkha de Baghdad

Tableau. V.1 : Paramètres granulométriques par rapport à la moyenne

Echantillons	Diamètre Moyen (µm)	Indice de dispersion (standard deviation)		Indice d'asymétrie (Skewness)	Indice d'aplatissement (Kurtosis)
		variance	S.D		
BG_1	9,429	39,80	6,308	0,662	-0,235
BG_2	9,459	23,36	4,813	0,484	-0,938
BG_3	7,306	25,84	5,083	0,242	-1,243
BG_4	9,143	17,11	4,137	0,232	-1,007
BG_5	8,143	49,89	7,063	0,141	-1,243
BG_6	8,368	13,01	3,606	0,510	-0,628

Tableau. V.2 : Distribution granulométrique des quantiles

quantiles échant.	10 %	25%	50 %	75%	90 %	100 %
BG_1	326,5	151,7	34,15	8,532	3,569	-
BG_2	126,9	60	9,429	4,2	2,18	-
BG_3	81,57	34,33	7,306	1,54	1,138	-
BG_4	84,47	37,50	9,143	3,421	1,940	-
BG_5	86,29	27,14	8,143	0,591	0,460	-
BG_6	78,31	31,07	8,368	4,036	2,147	-

V.5.4 Morphoscopie des grains de quartz

L'analyse au microscope binoculaire des grains de quartz a mis en évidence la prédominance des grains sub-arrondis mats ; cependant, on ne peut pas négliger les émoussés mats fig. V.9. Ces résultats suggèrent une origine éolienne du sable avec une contribution aquatique assez faible. Ce sable vient des dunes de sables qui borde la sebkha du côté NW-N et lors des grandes tempêtes il est réparti sur cette partie du surface de la sebkha en dégradation vers le centre.

V.5.5 Analyse de la fraction carbonatée

Le centre de la sebkha (BG-4) est caractérisé par les teneurs en CaCO₃ les plus faibles (0 à 4%); alors que les teneurs comprises entre 2 et 13% constituent une bande de rivage de sebkha caractérisée par l'abondance des débris et paillets gypseuse qui sont érodé des l'affleurement des périphéries de sebkha. Les pourcentages des carbonates sont relativement élevés, au niveau des carottes BG-1 et BG-2 (entre 12% et 18%), seraient dus aux eaux chargées en carbonates par suite du lessivage des terrains comportant des niveaux carbonatés. Les sédiments de la carotte BG-6 et BG-7 doivent leurs teneurs importantes en CaCO₃ (19% à 20%) vraisemblablement à leur richesse en calcite (Tab V.3).

Donc dans la fraction grossière du sédiment, les carbonates seraient formés par la fraction fine ils seraient plutôt d'origine chimique due à l'évaporation.

Tableau. V.3 : Pourcentages des carbonates dans sebkha Baghdad

Carottes	Ca CO ₃	Ca CO ₃ (%)
BG-1	12	12,7659574
BG-2	17	18,0851064
BG-3	10	10,6382979
BG-4	4	4,25531915
BG-5	18	19,1489362
BG-6	20	21,2765957
BG-7	18	19,1489362

V.6 Etude minéralogique

V.6.1 Minéraux non argileux

V.6.1.1 Quartz

Il est présent dans toute la sebkha. Les valeurs les plus fortes se trouvent sur la bordure N-NW, essentiellement du côté où la présence des dunes de sable, lieu des dépôts sableux et limono-sableux. Le pourcentage du quartz augmente systématiquement, du bas vers le haut dans chacune des carottes. Latéralement, une diminution de la fraction quartzeuse est nette de la périphérie vers l'intérieur de la sebkha.

V.6.1.2 Calcite

Généralement, la quantité de calcite varie de centre vers périphéries. Les plus faibles sont remarqués dans les bordures NW (BG-6 et BG-7). L'origine de la calcite est mixte. Elle peut être soit authigène résultant d'une évaporation; soit terrigène provenant de l'érosion de la dalle villafranchienne.

V.6.1.3 Evaporites

* **Gypse** : le gypse prend naissance dans les sédiments du bassin. Les cristaux de gypse sont présents dans la croûte gypseuse. Mais, cette croûte est diminuée graduellement jusqu'à devenir absente sur les rivages N-NW et abondante au centre et vers le S-SW. Donc, les teneurs de gypse sont concentrées au centre et au Sud en comparaison par rapport à N-NW. Des cristaux de gypse se forment dans les sédiments sub-superficiels sur la bordure orientale indiquant l'origine authigène du gypse dans Sebkha Baghdad.

* **Halite** : il est obtenu par évaporation complète. Il constitue une partie importante du sédiment brut de surface vers le centre et des sédiments superficiels des carottes en position interne où leur présence est plus importante. La calcite est moins importante à nul ver les périphéries de sebkha. Enfin dans les carottes en position médiane, les teneurs élevées se trouvent à la surface de la colonne. Latéralement, le taux de sel augmente de la périphérie vers l'intérieur.

V.7 Corrélation géologique des carotte d'orientation N-S ou sein de Sebkha Baghdad

La description des lithofaciès basée sur la nature lithologique extrais de l'interprétation des carottes qui intersecté sebkha Beghdad du Nord vers Sud, si que la granulométrie ainsi que la variation de la couleur montre que ces carottes sont composées de trois types de faciès détritiques: un faciès fin argileux à argilo-silteux, un faciès sableux fin à moyen et un faciès mixte sablo-argileux et argilo-sableux avec passé des évaporitique tel que anydrite et le gypse. Les faciès mixtes : sablo-argileux, argilo-sableux et argilo-silteux sont accessoires.

Les faciès sableux caractérisent surtout les sédiments des carottes BG-5, BG-6 et BG-7. Par contre, dans les carottes BG-1, BG-2 et BG-3, la fraction sableuse diminue au profit des silts et des argiles. La fraction silto-argileuse devient dominante (jusqu'à 50%) dans les carottes B1 et B2. La carotte BG-7 présente une composition comparable à celle des carottes BG-4 et BG-5. Ces résultats traduisent la présence d'un granoclassement décroissant au fur et à mesure qu'on se déplace des parties exposées à l'affleurement vers les parties plus plates.

En général, Le remplissage des sebkhas de sable fin a moyen, limons et argiles apportés par les crues, ruissellement local et aspect éolien qui reflète les traits minéralogiques et géochimiques du cette dépression endoréique. De plus, les mécanismes de néoformation argileuse, en particulier de illite et kaolinite, contribuent à la composition du matériel. En revanche, une origine éolienne des sédiments de sebkha a été plus envisagée. Le remplissage de sebkhas continentales comporte des alternances des dépôts détritiques, évaporitiques, lacustres mais aussi la matière organique (certaine racine des plaintes halophyte). Ces cas suggèrent que les sebkhas constituent aussi des pièges à sédiments éolien fig. V.9.

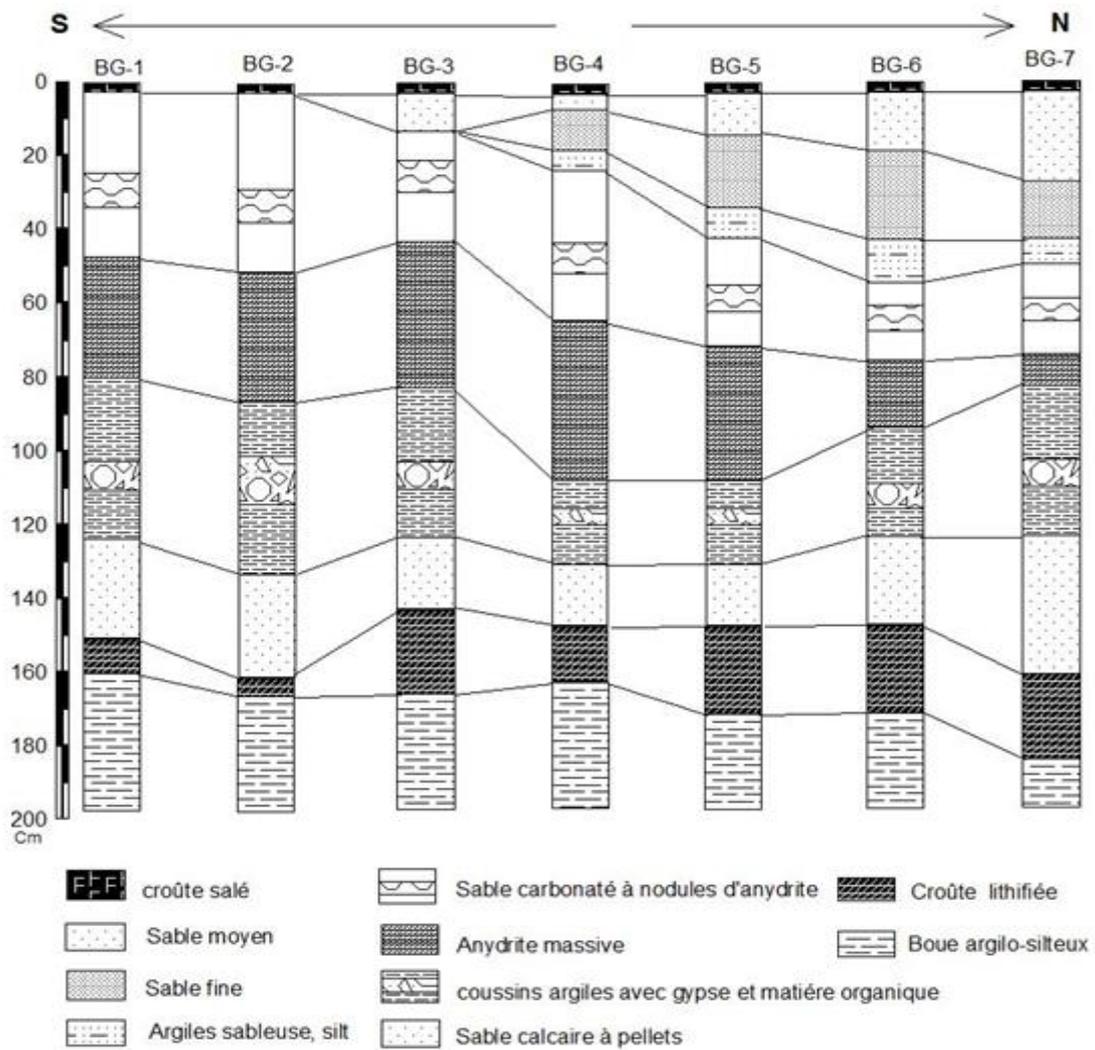


Figure. V.9 : Corrélation lithologique des carottes de sebkha Baghdad

V.8 Fonctionnement des Lamines rencontre dans les carottes de Sebkha Baghdad et leur intérêt paléoclimatique

Sebkha Baghdad est caractérisé par trois séquences typiques de sédimentation qui sont : des séquences détritiques, gypseuses et sulfato-organiques.

V.8.1 Les séquences de quartz et les éléments détritiques

Cette séquence représente les apports des eaux de ruissèlement et les crues lors d'événements pluviométriques exceptionnels. Ces apports nécessitent un écoulement laminaire où les eaux restent peu chargées en matériaux sur les glacis. En parle des lamines détritiques qui sont indicatrices de l'intensité des pluies. Les épaisseurs des lamines détritiques représentent respectivement l'intensité des pluies et des inondations et la durée des périodes sèches. L'inondation de la sebkha se produit lorsque la nappe déborde durant une saison particulièrement humide.

V.8.2 Les séquences des évaporites (gypse, anhydrite)

Le gypse et halite matérialisent donc les phases d'inondations, elles indiquent un système évaporitique après inondation. L'assèchement de la surface de la sebkha après inondation favorise la précipitation de gypse, puis la cristallisation d'halite. Elles marquent les fluctuations de la nappe.

V.8.3 Les lamines sulfato-organiques

Les lamines sulfato-organiques enregistrent des épisodes favorables à la prolifération d'un tapis cyano-bactérien. La succession de ces lamines ne se réalise bien que dans des conditions où les bactéries ne sont pas perturbées par des crues, des inondations ou l'impact des gouttes de pluie et où la biominéralisation est possible. Ils sont des marqueurs des sécheresses.

Sebkha Baghdad enregistre des cycles d'inondation et d'assèchement. La croûte de sel (gypse et halite) se forme après inondation de la sebkha et évaporation. Son épaisseur est fonction de la quantité d'eau mobilisée durant l'inondation. Les croûtes sulfato-organiques qui se forme en surface au contraire, extrêmement fragiles ne peuvent se former que durant des périodes sans pluie car elles sont facilement détruites par les gouttes. Elles se forment grâce à l'humidité atmosphérique et la rosée, la matière organique étant produite par les bactéries sulfato-gènes.

Les lamines peut s'interpréter comme suit :

- Les lamines n'enregistrent pas une cyclicité annuelle, mais des événements climatiques.
- Les lamines de sels (gypse, halite) enregistrent des épisodes d'inondation suivies de l'assèchement du plan d'eau.
- Les lamines détritiques enregistrent les périodes d'apports des oueds par les crues, lors de pluies exceptionnelles.
- Les lamines sulfato-organiques enregistrent des séquences sans pluie, mais avec une humidité et de la rosée.

V.9 La morphologie de surface de sebkha Baghdad

Au surface de sebkha, il y a des fissures qui s'ouvrent dans un sol argileux qui se dessèche. Ces fentes dessinent souvent un réseau grossièrement polygonal qui peut être moulé. Sous l'effet de la dessiccation un réseau de fentes de retrait se développe. Il découpe la masse en cellules polygonales. La partie supérieure durcie constitue un revêtement compact. Ils sont capables d'interdire toute activité au vent. Mais le comportement des argiles se révèle très différent dans les milieux riches en sels. Liés à l'évaporation, d'intenses phénomènes de cristallisation qui provoquent un véritable labourage des sols voire fig. V.10. Les particules argileuses se trouvent rassemblées en mottes micropolyédriques, sur quelques centimètres d'épaisseur. Pendant l'été la déflation s'exerce sur le pseudo-sable né des phénomènes de floculation, lorsque les petites squames issues de la fragmentation de la pellicule superficielle ont été elles-mêmes balayées par le vent.



Figure. V.10 : Fente de dessiccation

Dans sebkha Baghdad est affecté par des inondations saisonnière, vers coté NW il ya des dunes de sable qui couvrent sebkha Baghdad. Dans ce rivage la proportion de sels est assez faible et l'argile connaît une décohésion maximum avec formation de pseudo-sables, propice à la déflation. En revanche, vers coté S-SE les portions des sels augmentent, il y a formation d'une croûte et diminution progressive de la déflation.

V.10 Le mécanisme de fonctionnement de sebkha Baghdad

Sebkha Baghdad est une dépression hydro-éolienne qui devient prépondérante quand on passe au domaine des sebkhas. Cette dernière est une dépression fermée où les efflorescences salines interdisent la végétation, facilitant par conséquent une déflation, de plus amplifiée par la cristallisation des sels. Aussi l'originalité de sebkha Baghdad parmi les dépressions hydro-éoliennes réside dans le fait qu'elles fonctionnent tantôt comme zones recevant des sédiments détritiques en période sèche.

Il est considéré comme un modèle d'origine essentiellement climatique où l'inondation rare de saison fraîche fait suite aux écoulements sur le bassin-versant. En général, au contact des eaux douces de ruissellement et des eaux saumâtres de la sebkha. La source d'alimentation de la sebkha Baghdad n'est pas seulement le ruissellement mais aussi les remontées de nappes profondes souvent artésiennes (fig. V.11). Généralement, les sebkhas fonctionnent dans les climats semi-arides car en domaine vraiment aride, la nappe descend en profondeur et le sel se fige en surface : quand elle existait, la sebkha devient fossile, faute de battement de nappe ou de ruissellement.

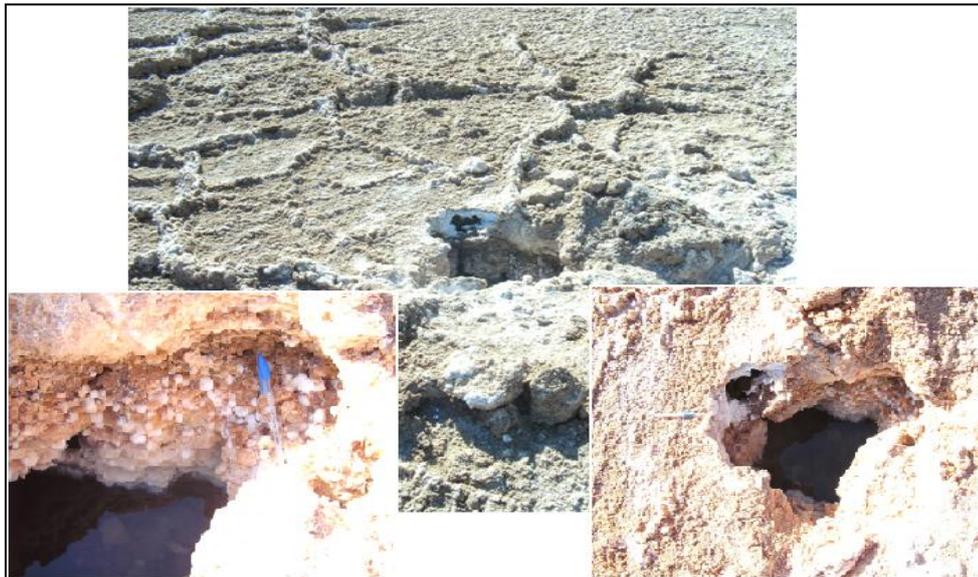


Figure. V.11 : Contact eau souterrain avec sebkha

Les apports de sel se font dans les sebkhas Baghdad par précipitation des eaux chargées, par ruissellement lessivant le bassin-versant surtout quand s'y trouvent des formations salifères; par sources des eaux souterraines où sont solubilisés des sels; par voie éolienne après déflation sur des surfaces salées des formations gypsifères de la région; par rabattement sec ou humide (pluie) (fig. V.12). L'individualisation des sels dans les sols

engendre des fortes contraintes résultat de leur cristallisation. Comparée à d'autres sels, la pression de cristallisation est élevée :

Parmi les sels simples, le gypse de faible solubilité précipite le premier. D'une part, les concentrations gypseuses développent des pressions mécaniques suite aux nucléations et croissances cristallines du gypse. Ceci expliquerait la destruction de la cohésion du matériel. A terme, l'accolement par simple interpénétration, sans ciment, des cristaux de gypse serait à la base du durcissement des encroûtements gypseux. D'autre part, le gypse serait responsable d'une microfissuration créant dans le matériel un réseau ouvert (perméabilité) de micropores de taille compatible avec le passage des solutions. Ainsi, en ajoutant expérimentalement du gypse à un matériel argile-limoneux, une forte microfissuration et une modification de l'assemblage en feuillets argileux apparaissent.

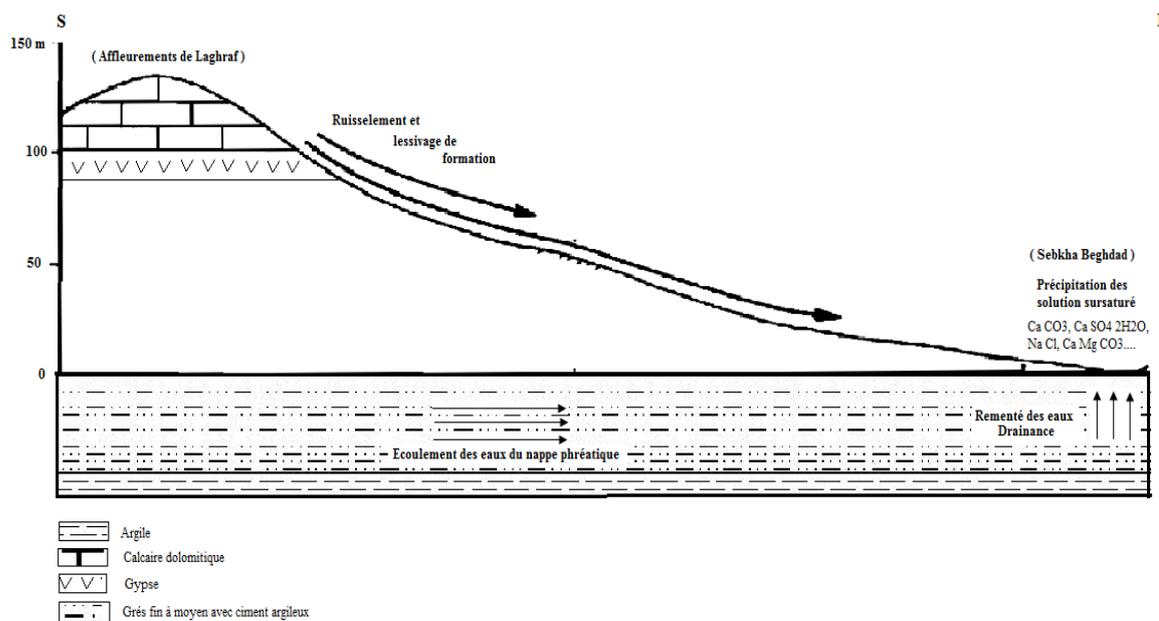


Figure. V.12 : Différents sources d'alimentation du sebkha Baghdad par les eaux chargées des minéraux évaporitiques.

V.11 La reconstitution de sebkha Baghdad

Concernant l'évolution de sebkha Baghdad on peut proposer l'hypothèse suivante:

- il est déterminé par une phase d'exhaussement de la région. Après un long creusement hydre-éolien de la cuvette, celle-ci a été partiellement remblayée par des conditions éolien vent et hydrique par ruissellement de eau. Pour la datation des événements, il faut faire des analyses isotopiques pour raccorder les séquences de sebkha. Mais elle illustre un Episode où la cuvette a joué un rôle de réceptacle de chutes massives de tous types des sédiments. Cette précipitation a eu lieu aussi en période pluviale, au Pléistocène.
- lors de l'assèchement climatique, le fonctionnement semi-aride de la sebkha Baghdad se rétablit, marqué par l'enrichissement en gypse, la fixation du versant par la croûte gypseuse et le dépôt d'un gypse presque pur dans le fond. Il est impossible de préciser l'origine du gypse, peut-être fourni par les nappes aquifères mais aussi associé à des apports de poussières depuis les affleurements gypseux proches et les autres cuvettes hydroéoliennes soumis a déflation.
- plus récemment, une partie de la sebkha a été mise déflation éolienne, probablement dans des conditions encore plus arides où la sebkha Baghdad est devenue moins fonctionnelle. Ainsi s'explique l'emboîtement des planchers.

V.12 Synthèse et conclusion

Malgré la diversité des conditions structurales, chotts Baghdad ne présente pas moins des aspects semblables à celles des chotts du sahara septentrional. Le paysage le plus original est celui de sebkha. Il consiste en de vastes surfaces planes en apparence, moins végétation, caractérisées par un tapis de cristallisations salines de types différents. Une steppe halophile de densité et de largeur variable lui succède à la périphérie. Elle constitue le chott proprement dit, que surmontent des éléments de terrasses par endroits.

La description lithologique des sédiments, leurs granulométries et la morphoscopie permettent de dégager les points suivants:

Toutes les carottes sont formées par une succession d'horizons détritiques composés de sables, de silts et d'argiles avec des formations évaporitiques gypse et anydrite.

L'évolution des zones exposées à les affleurements gypseuse qui borde la sebkha se traduit par une diminution progressive du pourcentage des sables et une augmentation des argiles.

Ceci atteste l'existence d'un granoclassement décroissant dans la distribution latérale des matériaux détritiques.

La sebkha atteint actuellement le stade évolutif où le gypse ainsi que l'halite. Pendant l'été, les vents du NO enlèvent par déflation des agrégats d'argiles et de sels sur le fond de la sebkha asséchée. Une partie des produits de déflation est arrêtée et plaquée contre le cordon des dunes sableux pour former un bourrelet argileux que les pluies d'hiver vont lessiver d'une grande partie de ses sels.

CHAPITRE : VI
RESULTATS ET DISCUSSIONS
GEOCHIMIE DES SAUMURES

VI.1 Introduction

L'étude géochimique a porté sur l'analyse des campagnes géochimiques (janvier 2011 jusqu' à décembre 2011) des eaux superficielles de sebkha Baghdad. Dans la région étudiée, le terrain naturel contient des sels plus ou moins solubles, certains minéraux dissous au contact de l'eau. Ainsi le chimisme des eaux de surface dépend essentiellement de la composition géologique des milieux traversés et du temps de séjours.

Ce chapitre décrit les principales caractéristiques physicochimiques des eaux de sebkha pendant une année, leurs évolutions, principalement en phase évaporatoire, et tente de les expliquer ainsi que de mettre en évidence et de comprendre les diverses causes de salinisation de leurs eaux. Nous aborderons ensuite l'étude des bilans hydro-salins.

En plus de ça, l'essai modélisation de l'évolution géochimique des eaux de sebkha mettant en relation les données hydrogéochimiques obtenues et l'environnement géologique d'où les scénarios (les minéraux précipite en 1^{er} stade et 2^{ème} stade). Cette relation doit tenir compte de l'origine de l'eau, ainsi que de son évolution le long de son temps de résidence pendant une année.

VI.2 Etudes des paramètres physico-chimiques des saumures

Les résultats des analyses physicochimiques qui sont réalisées durant l'année 2011 peuvent nous donner des interprétations suivant :

VI.2.1 La température (T°)

La température de l'eau joue un rôle important par exemple en ce qui concerne la solubilité des sels et des gaz dont, entre autres, l'oxygène nécessaire à l'équilibre de la vie aquatique. Par ailleurs, la température accroît les vitesses des réactions chimiques et biochimiques d'un facteur 2 à 3 pour une augmentation de température de 10 degrés Celsius (°C). La température doit être mesurée in situ.

L'évolution de la température d'un lac salé reste liée aux conditions locales telles que le climat régional, la topographie, la durée de l'ensoleillement, le débit et la profondeur (Mc Neely et al, 1980).

Les résultats de la fig. VI.1 montrent les variations temporelles d'une saison à l'autre pendant la période d'étude. L'amplitude de la variation entre les campagnes ne dépasse en aucun cas 30°C. La température des eaux sus-jacentes est comprise entre 25 et 30°C en été. Elle atteint 19°C en hiver. Les valeurs les plus basses sont toujours mesurées au période hiver (mois de décembre). Ceci reflète bien l'influence du climat régional. La température élevée des eaux favorise le développement des microorganismes et induit des odeurs désagréables.

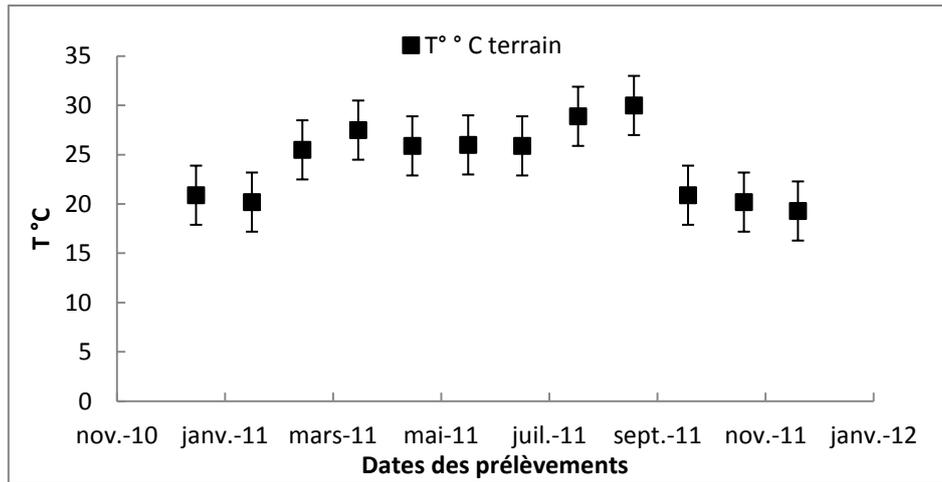


Figure. VI.1: Variations de la température de l'eau en fonction du temps pour la période d'observation de Janvier à Décembre 2011

VI.2.2 Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH mesure l'acidité de l'eau c'est -à-dire de la concentration en ions d'hydrogène (H^+). Il est mesuré avec une résolution de 0,1. Le pH est important à connaître ; car, connaissant les teneurs de CO_2 dissout, il permet indirectement l'évaluation de l'agressivité chimique des eaux. Les valeurs de pH de l'eau qui sont enregistrées au cours de la période d'étude, varient entre 6 et 7. Pendant la période des hautes eaux, le pH varie entre 6.6 et 7, alors qu'en période des basses eaux les valeurs oscillent entre 6,6 et 6.3, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles. Cette faible variation est attribuable à l'effet tampon des ions bicarbonates, indiquant bien l'ionisation intense d'eau (fig. VI.2).

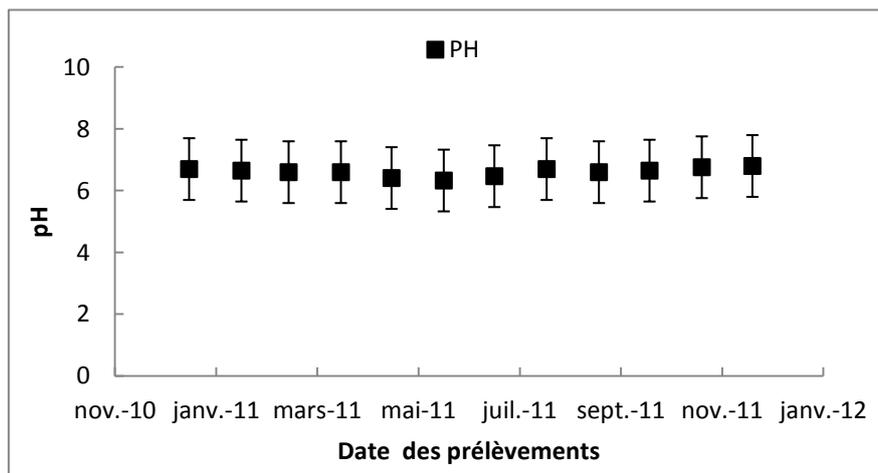


Figure. VI.2 : Variations du pH de l'eau en fonction du temps pour la période d'observation de Janvier à Décembre 2011

Les mesures du pH ont été effectuées deux fois : une fois sur le site et la deuxième au niveau du laboratoire. En général, les pH terrain" sont très différents de ceux mesurés au laboratoire, où ils tendent à s'acidifier. La dispersion des points permet d'établir une corrélation ou $\text{pH lab} = 0,8098 \text{ pH terrain} + 0,8503$ avec un coefficient de corrélation de 0,47 voire fig. VI.3, mais montre l'importance de la mesure in situ de ce paramètre, qui est souvent fortement modifiée par des conditions de transport et des temps de conservation. Ces variations de pH (diminution au laboratoire) pourraient s'expliquer par le rôle de micro-organismes prélevés en même temps que les solutions, et dont l'activité tendrait à augmenter la pression partielle de gaz carbonique. Une interprétation similaire avait été faite par (GUEDDARI, 1984) pour des phénomènes semblables qui avaient affecté ses échantillons d'eau provenant du lac Natron en Tanzanie.

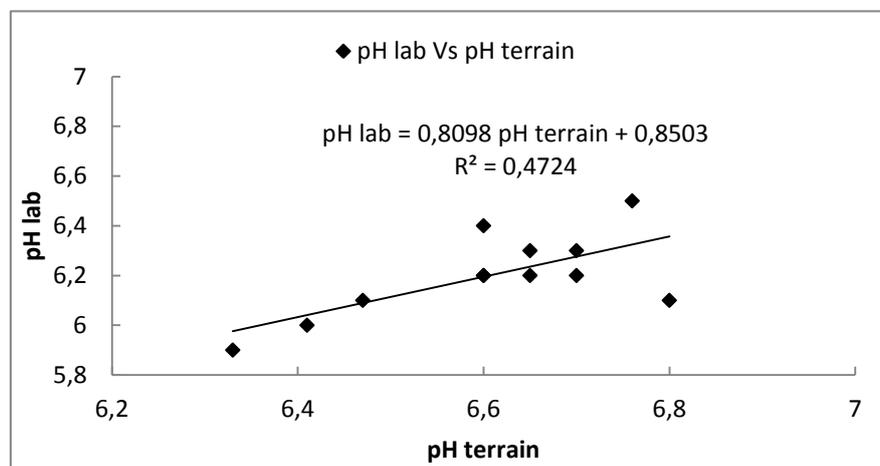


Figure. VI.3: Comparaison du pH mesuré in situ et au laboratoire mesurée in situ et au laboratoire

VI.2.3 La conductivité électrique (CE)

La conductivité électrique (CE) est une expression numérique de la capacité d'une solution à conduire le courant électrique. Elle est mesurée pour évaluer la minéralisation globale des eaux de la sebkha. La plupart des sels en solution sont de bons conducteurs. La conductivité électrique standard s'exprime généralement en mil-siemens par cm (mS/cm). La conductivité augmente avec la teneur de l'eau en sels dissous et avec la mobilité des ions.

Les résultats présentés dans notre étude montrent que les valeurs enregistrées oscillent entre 217 et 218 mS/cm en hiver et 218 à 219 mS/cm en été qualifiant ainsi l'eau de la sebkha comme inutilisable pour l'irrigation. Une conductivité élevée traduit soit des pH normaux, soit le plus souvent une salinité élevée (Bremond et Perrodon, 1979).

Comme celle de potentiel hydrogène, on a effectué de mesure de conductivité in situ et autre au laboratoire. Les conductivités labo ont tendance à être plus faibles que celles du terrain, La dispersion des points ne permet pas d'établir de corrélation. Ce fait pourrait s'expliquer par d'éventuelles précipitations salines au sein des échantillons durant leur stockage (fig. VI.4).

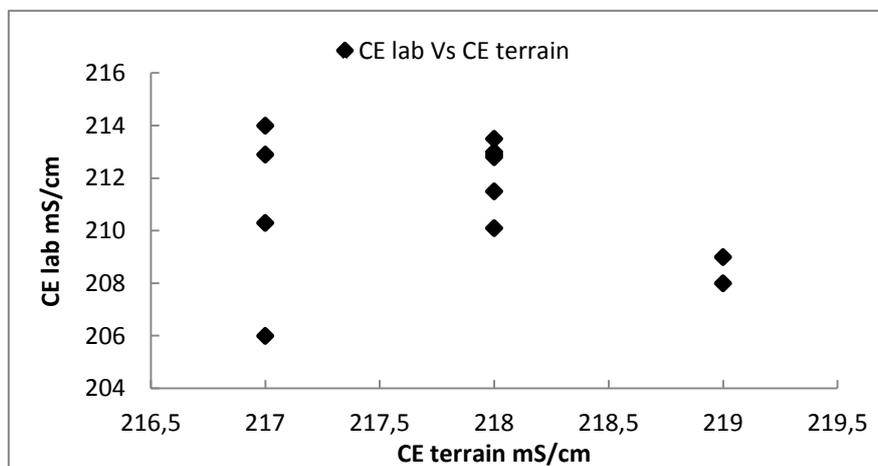


Figure. VI.4: Comparaison de la conductivité électrique mesurée in situ et au laboratoire

VI.3 Comportement des éléments majeurs

La salinité ou minéralisation totale (notée aussi TDS) se définit comme la somme des ions (majeurs et mineurs) dissous dans l'eau. L'analyse des éléments majeurs (Tab. VI.1) permet de se rendre compte dans un premier temps de la présence d'une salinisation qui se traduit par des fortes concentrations en certains ions comme les chlorures ou les sulfates.

L'étude des éléments majeurs (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ,) fournit des précieuses informations sur des paramètres comme le degré de minéralisation (TDS) et le faciès chimique des eaux.

Tableau. VI.1 : Les éléments majeurs des eaux superficielles.

Cation majeurs	Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ ,
Anion majeurs	HCO_3^- , CO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-

VI.3.1 Comportement du chlore (Cl⁻)

Les sources principales de chlorure dans les saumures des lacs sont les roches sédimentaires.

La fig. VI.5 représente la variation temporelle de chlore pendant le cycle géochimique 2101, de cette illustration on peut constater que :

Le chlorure est plus dominant par rapport aux autres éléments chimiques.

Au début de cycle géochimique, les concentrations de chlorure sont minimales de l'ordre de 176317,04 mg/l. Cette situation est de cette ordre jusqu'au mois de mars où on peut remarquer qu'il y a une importante augmentation des concentrations des chlorures. Au mois de juin, ils atteignent une valeur maximum de 229481,52 mg/l. À partir du mois d'août, une régression des concentrations des chlorures est remarquée jusqu'à la fin de cycle. Cette diminution est contrôlée par l'abaissement des températures durant la période d'automne.

La courbe de Cl⁻ en fonction du temps montre un coefficient de corrélation négatif ($r = 0,12$). Cela est dû à l'importance de la concentration du chlore dans les eaux du chott, et pour cette raison que nous pouvons utiliser le chlore comme un traceur du cycle géochimique et son comportement.

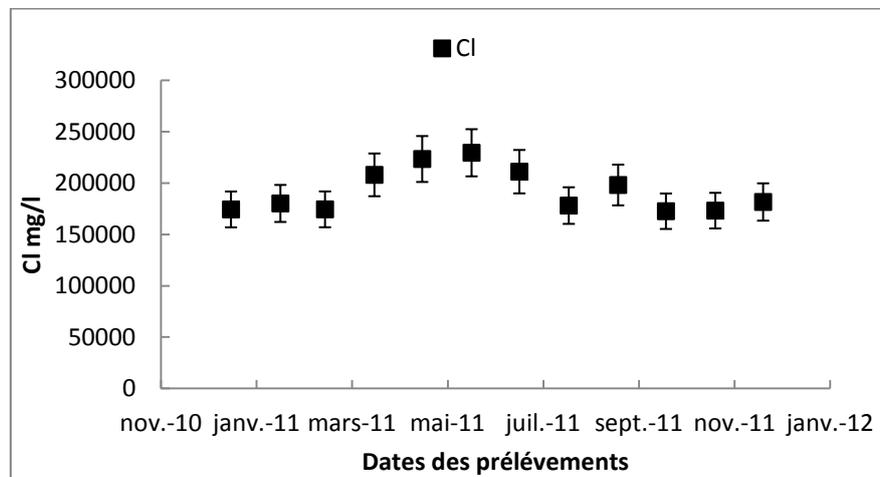


Figure. VI.5 : Variations de la concentration du chlore en fonction du temps, de janvier au décembre 2011

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile si pour cette raison les concentrations sont très élevées. Des valeurs des chlorures importantes sont enregistrées pendant tout le cycle géochimique, mais qui ne dépassent pas la norme enregistrée dans différents lacs salés (Tab. VI.2). Les chlorures

peuvent avoir plusieurs origines à titre d'exemple le lessivage des dépôts évaporitiques de sebkha l'or de remonté de niveau de la nappe phréatique.

Les teneurs des chlorures montrent un écart type de 20085,14 mg/l.

Tableau VI.2 : Les résultats des analyses pour les éléments majeurs des milieux salés au monde

	Atacama	Uyuni	Hombre Muerto	Del Rincon	Empexa	Astcotan	Merouane	El Melah
Cl	189500	191800	194800	191000	120000	70000	134696	210300
SO4	15900	13200	11100	13500	34100	25000	13164	29330
HCO3	230	592	-	-	430	2900	284	-
B2O3	1416	1136	1455	1570	702	2520	-	-
Li	1570	700	914	310	213	186	-	-
Na	103000	94900	121900	121800	67200	45000	83234	40320
K	23600	13500	9340	6260	3400	3500	2257	7650
Mg	6130	11800	268	2090	8480	5125	5574	50000
Ca	520	461	1000	480	259	920	575	400
TDS	370000	351000	340920	330000	239000	153600	-	-

VI.3.2 Comportement sodium (Na⁺) :

Le sodium est un élément constant de l'eau toutefois les concentrations peuvent être extrêmement variables de 500 mg/l et même au-delà surtout dans le cas des saumures. Indépendamment de la lixiviation des formations géologiques contenant du chlorure de sodium. Le sel peut provenir de la décomposition des formations évaporitiques comme l'halite même des silicates de sodium par substitution.

Les terrains gypsifères de la région El Hadjira, qui constituent les affleurements de cette région (Djebel Ksar Baghdad), ainsi que les dépôts évaporitiques qui se localisent au Sud-est de la sebkha donnent des concentrations élevées en ions sodium et ceci par des phénomènes de lessivage, d'évaporation et par échange de base.

Les concentrations des saumures en sodium sont nettement supérieures à celle du calcium. Elles varient entre 63601,57 mg/l en mois décembre et 103926,94 mg/l en mois de juin (fig. VI.6). Donc, les concentrations les plus élevées sont enregistrées durant la période sèche. La moyenne de sodium qui est enregistrée dans les saumures résiduelles de sebkha Baghdad de

l'ordre de 85432,19 mg/l pendant la période des hautes eaux (hiver). Les valeurs des hautes eaux est inférieure à celle des basses eaux ou ces valeurs et de l'ordre de 94213,80 mg/l, ceci montre l'importance de la dilution par rapport à la concentration pour l'acquisition de cet élément. Les variations des concentrations de sodium est moyenne avec un écart type de 11872,61 mg/l. L'évolution du sodium est très différente par rapport à celle du Ca^{2+} , car le sodium possède des fortes teneurs.

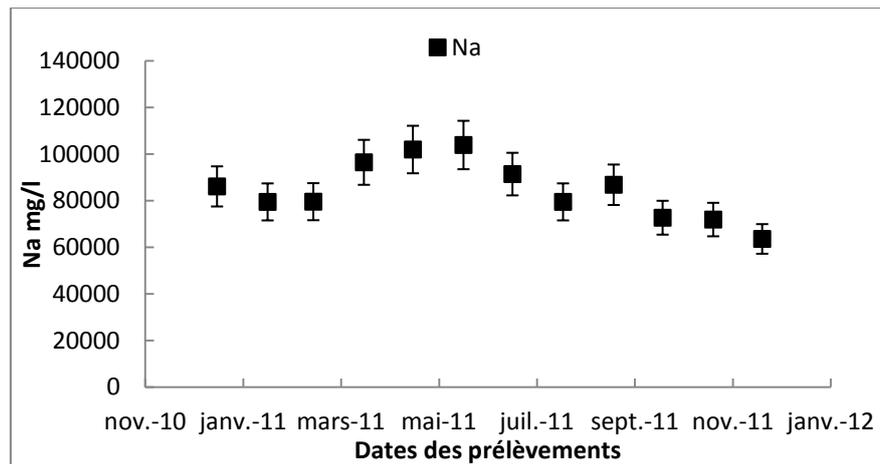


Figure. VI.6 : Variations de la concentration du sodium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011

VI.3.3 Comportement du Magnésium

Le magnésium est l'un des éléments les plus répandus dans la nature; il constitue environ 2,1 % de l'écorce terrestre. Les ions Mg^{2+} proviennent comme les ions de calcium, de la dissolution des formations carbonatées (calcaire) et par fois riches en magnésium (dolomie). En plus de ça, La plupart des sels magnésiens sont très solubles dans l'eau même les carbonates peut être dissous jusqu'à 300 mg/l, à 20 °C qui présente une portion de magnésium dissout dans les lacs salé. La teneur de magnésium dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (calcaires dolomitiques).

L'alimentation de sebkha par les eaux de ruissèlement à travers les effleurements gypsifère et dépôt évaporitique a favorisé lessivage de ces formations, car les eaux d'alimentation qui s'écoulent suivant la direction SW-NE se chargent progressivement au fur et à mesure que l'on se déplace vers la zone d'accumulation. Ceci explique les fortes concentrations, qui en moyenne à l'entourage de 20518,23 mg/l, et qui sont signalées dans cette zone.

Au mois de janvier, les plus faibles valeurs sont enregistré qui sont d'ordre de 16455,85 mg/l si pendant la période des hautes eaux. Les concentrations de Magnésium est pratiquement

stable fig. VI.7, ils ne varient pas beaucoup, à cause de, leurs différentes origines (écart type : 2828,62 mg/l).

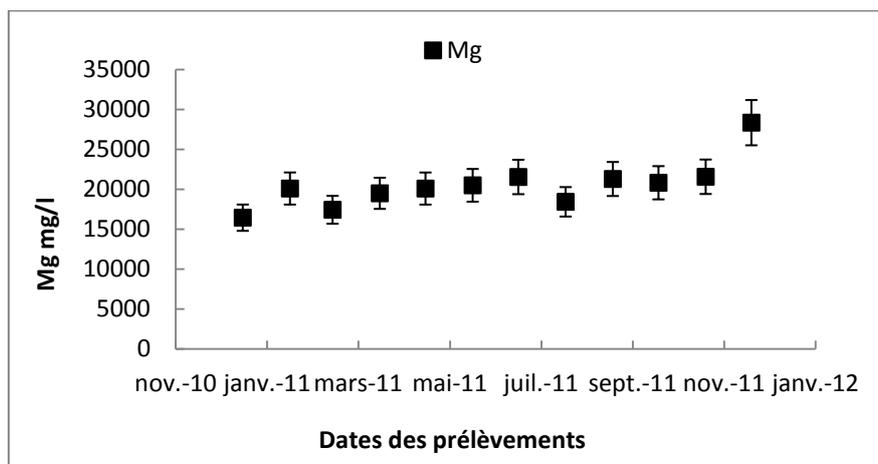


Figure. VI.7 : Variations de la concentration du Magnésium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011

La relation du magnésium en fonction du potassium, calcium et les bicarbonates montre une corrélation positive ($R^2 = 0,61$ pour le K, $R^2 = 0,46$ pour le calcium et $R^2 = 0,25$ pour les bicarbonates) voire fig. VI.8 à fig. VI.10, Cette corrélation positive peut être interprétée du fait de la précipitation de la calcite et l'halite en phase précoce de l'évolution géochimique du chott. En plus de ça, ils peuvent être interprétés minéralogiquement par la déposition des sels de magnésium exemple la kainite. Ces sels sont déposés lorsque la température augmente.

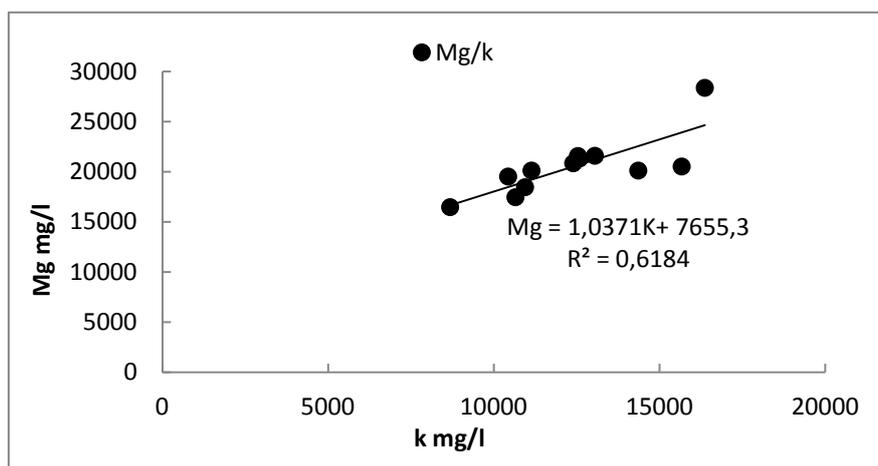


Figure. VI.8 : Variations des concentrations en Mg⁺ en fonction de celles de k⁺ dans les saumures de sebkha Baghdad.

La réaction d'échange Ca^{2+} et Mg^{2+} (dolomitisation) a été signalée comme cause principale de l'augmentation du rapport Mg/Ca dans les saumures. Cette augmentation est progressive selon le taux d'évaporation, contrôlée par l'équilibre entre calcite et dolomite et fortement dépendante de la température.

La réduction des sulfates favorise la dissolution des minéraux carbonatés. Ceci pourrait changer davantage le rapport Mg/Ca.

Dans les eaux des bassins fermés cas de notre zone d'étude, le rapport Mg/Ca est important en moyenne 98, donc l'évaporation empêche une augmentation aussi rapide de la concentration du Ca que de celle du Mg. Cela tient à la solubilité relativement faible du CaCO_3 et du CaSO_4 . On voit donc que le rapport Mg/Ca de l'eau, dépend des taux d'évaporation.

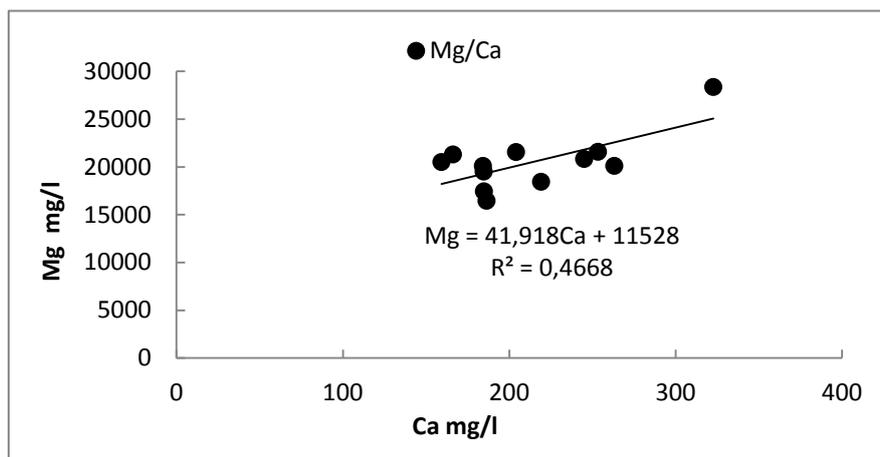


Figure. VI.9 : Variations des concentrations en Mg^+ en fonction de celles de Ca^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.

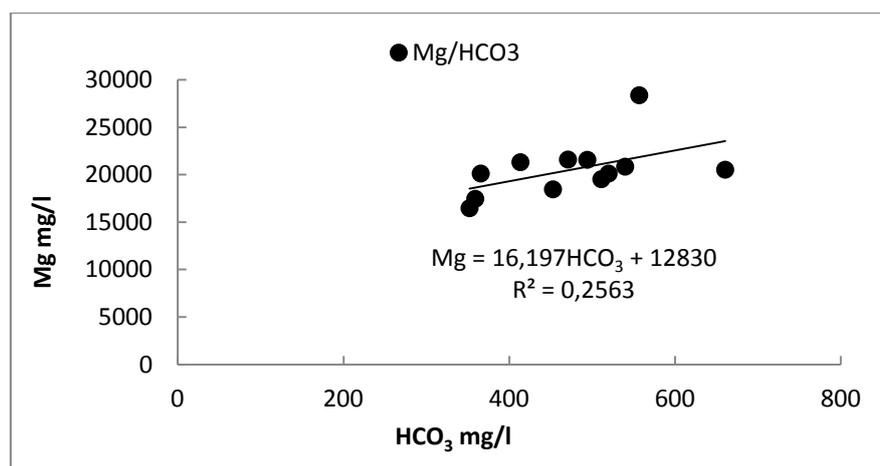


Figure. VI.10 : Variations des concentrations en Mg^+ en fonction de celles de HCO_3^- dans les saumures de sebkha Baghdad.

VI.3.4 Le comportement du Calcium Ca^{+2}

La plupart des prélèvements présentent des teneurs de calcium inférieures à la moyenne marquée dans les lacs étudiés autour de monde voir tableau ci dessus. Elle est semblable à celle Empexa ou la valeur est autour de 200mg /l.

Généralement, La concentration en calcium diminue au début de cycle, mais augmente régulièrement à partir du mois de mai (Fig. VI.11)

Au début du cycle géochimique, les concentrations des saumures en calcium a une allure rétrograde. Cette diminution est commencé dé le mois de février 263,21 mg/l jusque mois de juin avec une valeur de 159,3 mg/l. A partir de juillet, une autre phase d'évolution est remarqué ou il y une augmentation des concentrations de calcium jusque la valeur maximal. La valeur maximal est enregistré au mois de décembre 322,71 mg/l pendant la période des hautes eaux. Pendant la période des basses eaux, en peut voire une certaine diminution, avec une moyenne de 191,72 mg/l, alors qu'en période des hautes eaux la moyenne enregistrée est de 204,80 mg/l. La valeur de l'écart-type est de 46,10 mg/l, ce qui traduit une variation réduit des teneurs, car l'ion Ca^{2+} provient de deux origines naturelles différentes qui sont : la dissolution des formations carbonatées et la dissolution des formations gypseuses.

La diminution de la teneur en calcium traduit la précipitation de calcite. Sur nos sites d'étude, la formation de calcite se fait à partir de solutions sursaturées. Sur la sebkha en particulier, la sursaturation augmente lorsque la pCO_2 estimée diminue, ce phénomène a déjà été observé dans la littérature (DROUBI, 1976 ; DOSSO, 1980 ; GAC, 1980 et VALLES, 1987)

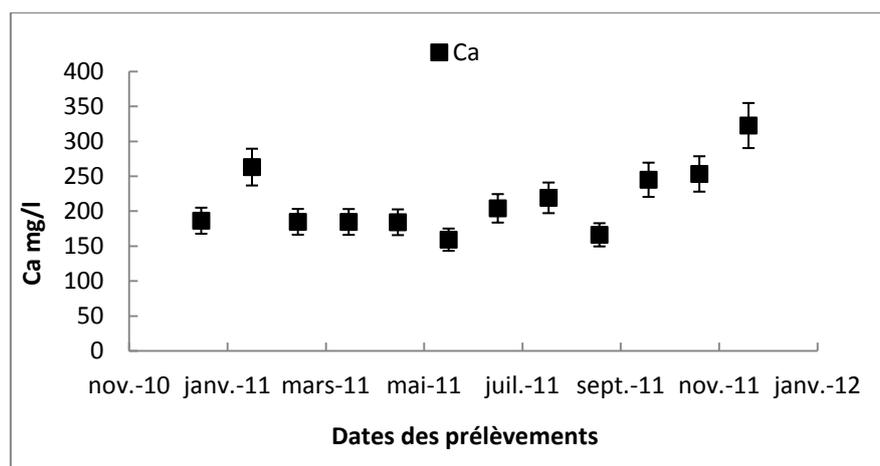
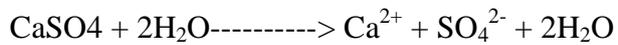


Figure. VI.11 : Variations de la concentration du Calcium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.

VI.3.5 Comportement des Sulfates SO_4^{2-}

La présence des sulfates dans l'eau est liée à la dissolution du gypse contenu dans les formations gypsifères de surface et au lessivage des dépôts évaporitiques issus de Djebel Beghdad, selon la relation :



Comparativement avec les autres lacs salés, Les sulfates présentent des concentrations moyennes mais elle est proche avec celle d'Atacama dans chili (15900 mg/l). Le chott passe par une phase de fluctuation, voir la fig. VI.12.

Les concentrations des sulfates, dans la première phase ou les concentrations sont en régression les concentrations varient de 19643,71 à 5752,97 mg/l jusqu'au mois juillet, puis les concentrations prennent une deuxième phase d'évolution ascendant a partir de mois août de 11348,37 mg/l. Cette évolution rapide des teneurs atteint son maximum vers le mois de décembre, avec 19397,82 mg/l. l'écart type est de 4615,26 mg/l.

Le comportement des sulfates dans sebkha Baghdad est contrôlé par les deux scénarios dissolution et évaporation des eaux de sebkha. Au début, l'alimentation du chott par la nappe phréatique est continue qui favorise l'augmentation des teneurs en sulfates dans le bassin. Pour cela, nous pouvons déduire les éléments suivants :

- la décroissance des concentrations des sulfates pendant le cycle géochimique peut-être interprétée par une phase de précipitation des minéraux gypseuse ou les concentrations subit une diminution dans la solution aqueuse. Ce processus fait lorsque les sulfates deviennent saturés dans le milieu.
- Pour commencer une augmentation exceptionnelle des teneurs avec une dissolution des minéraux sulfatés. Ces comportements sont en relation avec les facteurs de température, de densité et d'évaporation.

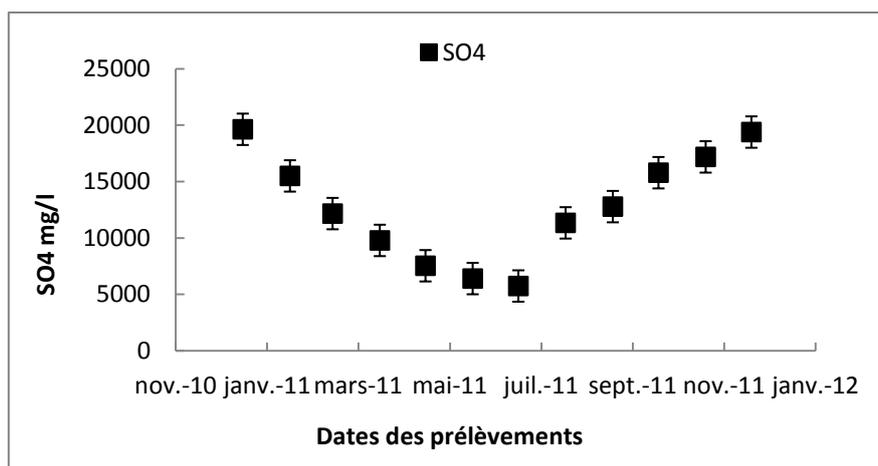


Figure. VI.12 : Variations de la concentration du sulfate en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.

Les sulfates montrent une corrélation positive avec magnésium et calcium ($R^2 = 0,03$ et $R^2=0,39$ respectivement), mais avec le potassium est négatif. Cela peut être interprété par la saturation tardive des saumures pour former le gypse l'anhydrite puis leur redissolution dans l'eau fig. VI.13 à fig. VI.15.

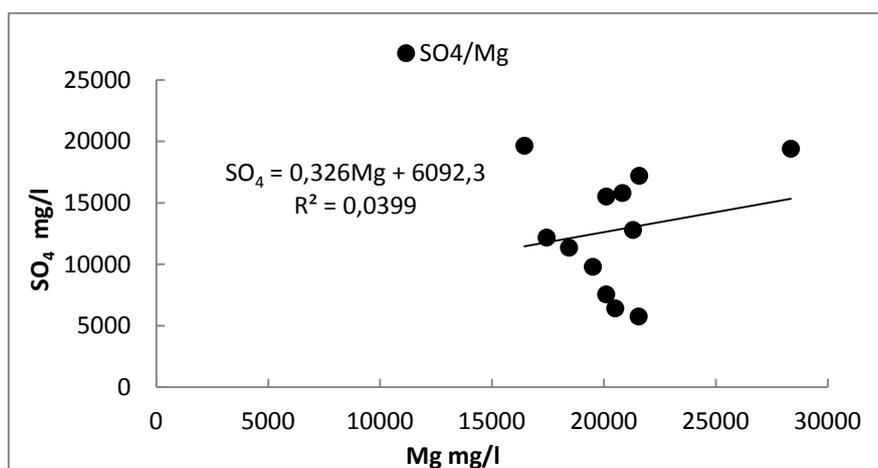


Figure. VI.13 : Variations des concentrations en SO_4^{2-} en fonction de celles de Mg^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.

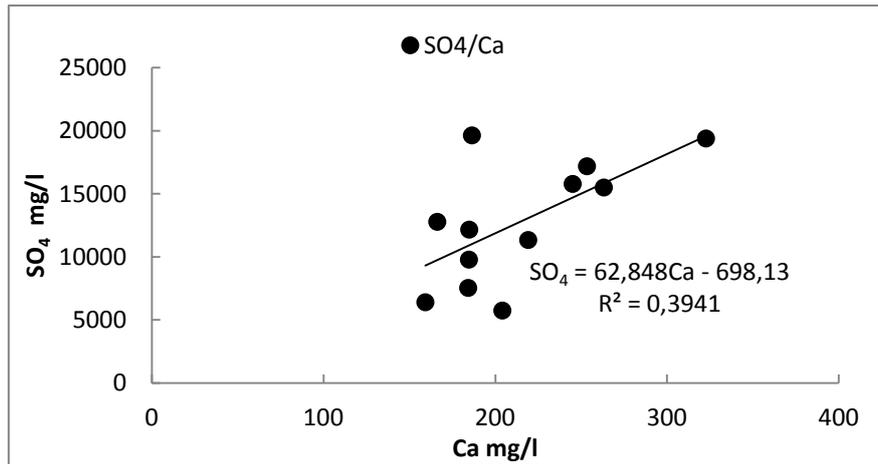


Figure. VI.14 : Variations des concentrations en SO_4^{2-} en fonction de celles de Ca^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.

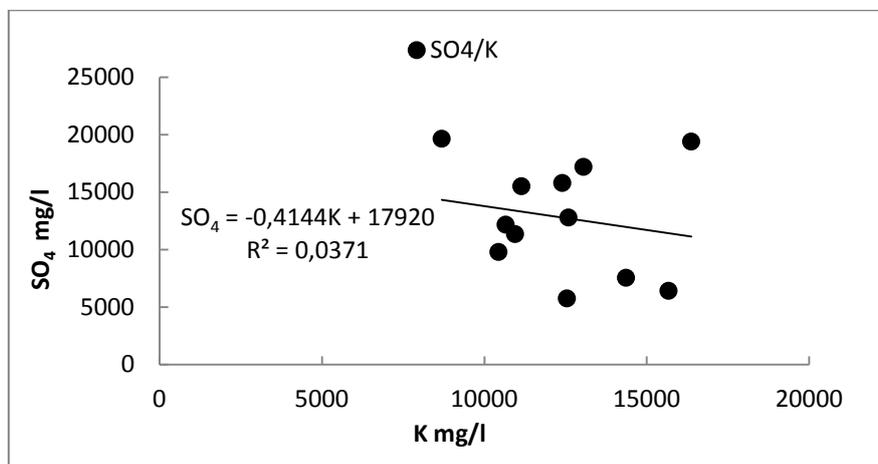


Figure. VI.15 : Variations des concentrations en SO_4^{2-} en fonction de celles de K^+ dans les saumures de sebkha Baghdad.

VI.3.6 Comportement du Potassium (K^+)

Le potassium résulte de l'altération des argiles potassiques (illite et montmorillonite). Les concentrations du potassium dans sebkha Baghdad varie de 8683,7 à 16367,77 mg/l. Au début du cycle, les concentrations de potassium augmente légèrement puis passe avec certaine stabilité jusque mois de mars. A partir de mois mars, les concentrations de potassium enregistrent une augmentation considérable vers les valeurs maximal 15670,58 mg/l qui sont enregistré au mois de juin. Après mois juin, une diminution qui est remarqué de concentration de potassium qui suivie une légère augmentation. Donc, Les valeurs les plus élevées sont observées pendant la période des hautes eaux avec une moyenne de 13378,36 mg/l fig. VI.16.

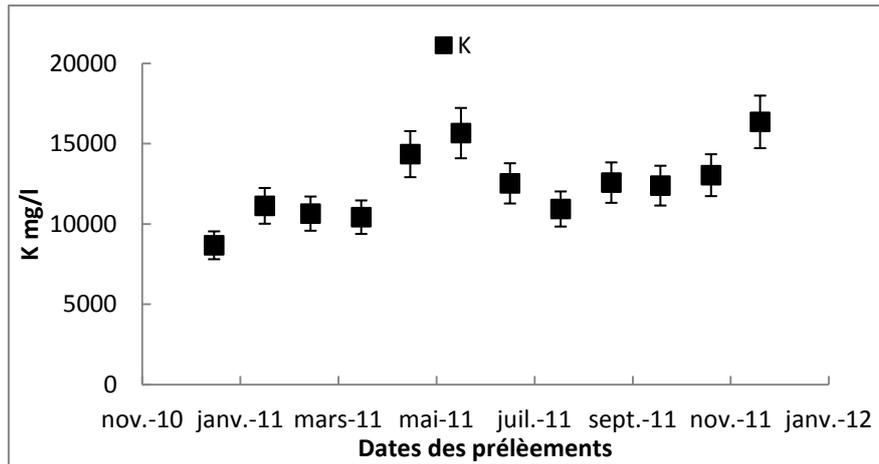


Figure. VI.16 : Variations de la concentration du potassium en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.

La corrélation du potassium est positive avec les bicarbonates et calcium ($R^2 = 0,60$ pour les bicarbonates et $R^2 = 0,08$ pour calcium), elle est négative avec le SO_4 , alors qu'avec les chlorures, la corrélation n'est pas claire fig. VI.17 et fig. VI.18. Le calcul du rapport K/Mg montre une certaine stabilité au cours de l'évolution de ces deux éléments. Le rapport varie entre 0,52 au début de cycle et 0,76 vers la fin du mois de juin. Cela signifie que la quantité de Mg est 2 fois supérieure aux concentrations de K dans cette dépression.

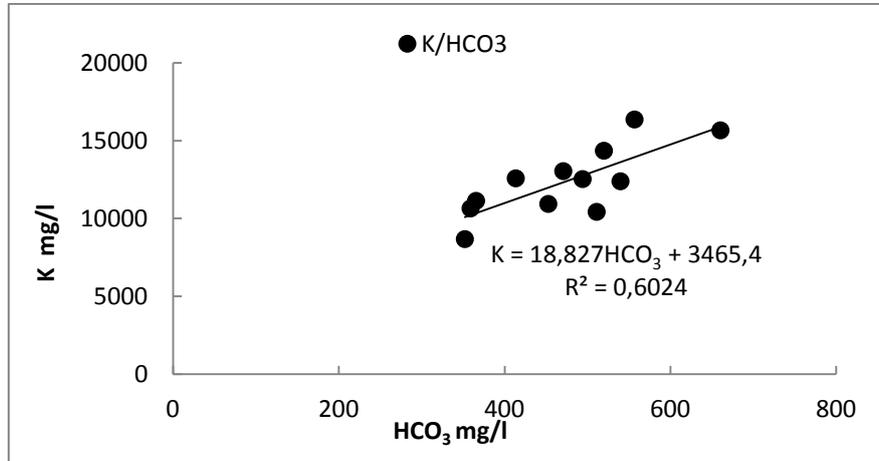


Figure. VI.17 : Variations des concentrations en K^+ en fonction de celles de HCO_3^- dans les saumures de sebkha Baghdad.

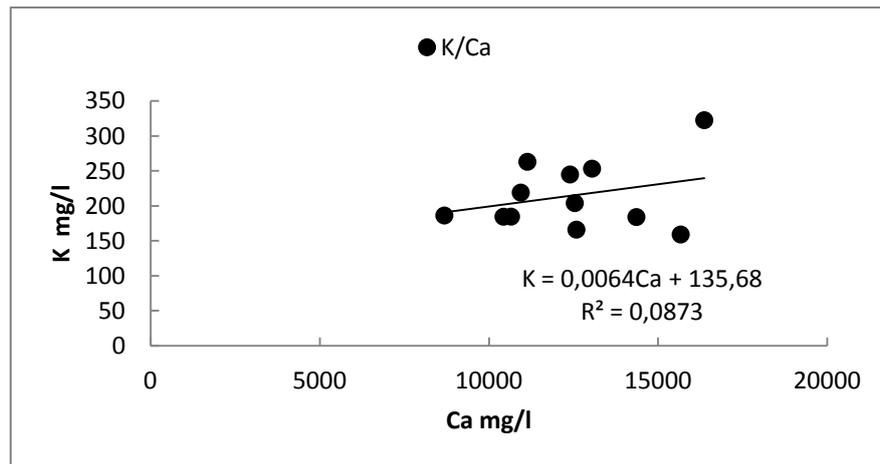
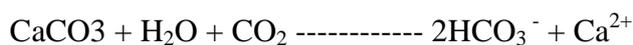


Figure. VI.18 : Variations des concentrations en K^+ en fonction de celles de Ca^{2+} dans les saumures de sebkha Baghdad.

VI.3.7 Comportement des Bicarbonates (HCO_3^-)

La présence des bicarbonates dans l'eau est due à la dissolution des formations carbonatées qui bordent notre zone d'étude (sebkha), selon la réaction suivante :



Les bicarbonates se présentent avec des teneurs plus ou moins faibles comparativement avec les autres éléments majeurs à l'exception pour le calcium. Les saumures de sebkha Baghdad (bassins fermés) à forte évaporation en particulier, les concentrations des bicarbonates oscillent entre 352,09 et 660,51 mg/l de HCO_3^- . Les teneurs sont faibles quand les eaux sont encore diluées ont peut voire ça pendant la période hivernal. Après mois avril, une légère augmentation des taux de HCO_3^- sont enregistrées qui suit jusque mois septembre pendant la période des hautes eaux avec une moyenne de 396,95 mg/l et 531,81 mg/l pendant la période estivale, suite à la dissolution des calcaires. Les concentrations varient faiblement (écart type : 88,41 mg/l) fig. VI.19.

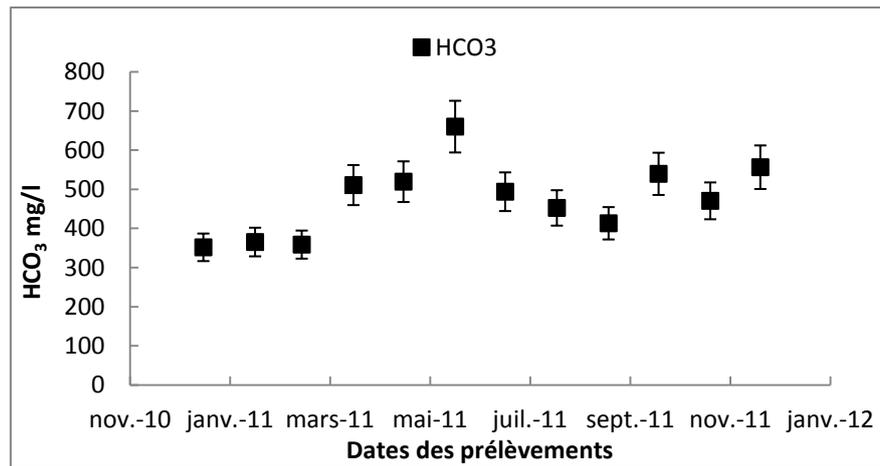


Figure. VI.19 : Variations de la concentration de bicarbonates en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.

VI.3.8 La salinité

En principe, la salinité devrait désigner la masse totale de substances solides dissoutes par Kg d'eau superficielle analysé. En pratique, cette masse est difficile à déterminer. L'analyse chimique complète d'un échantillon serait une opération trop longue et trop coûteuse pour que l'on puisse l'envisager.

Pour notre cas, on peut exprimer la salinité des saumures par la somme des concentrations des éléments majeurs d'eau analysé (la somme des anions et des cations).

La salinité varie dans le même sens de la minéralisation. Fig. VI.20, La variation mensuelle de la salinité montre que les teneurs en sels les plus élevées sont enregistrées en été. L'augmentation de la salinité en été est de l'ordre de 376822,54 mg/l et résulte d'une importante évaporation de l'eau due à la température élevée durant cette saison. Les teneurs minimales sont enregistrées en automne et en hiver et sont de l'ordre de 294839,68 mg/l en mois de mars. La diminution de la salinité à partir de l'automne est due principalement à la chute de la température et à l'arrivée des eaux douces continentales qui sont en liaison avec les pluies qui diluent l'eau de sebkha.

Les concentrations de la salinité trouvées dans notre étude sont élevées par rapport à celles obtenues dans les études antérieures, à titre d'exemple la salinité des lacs des Andes du Nord du Chili qui montre une salinité de 300 g/l (François R. et al. 2002) et lac du Sinaï, la salinité est de l'ordre de 140 g/l (Lévy 1977a).

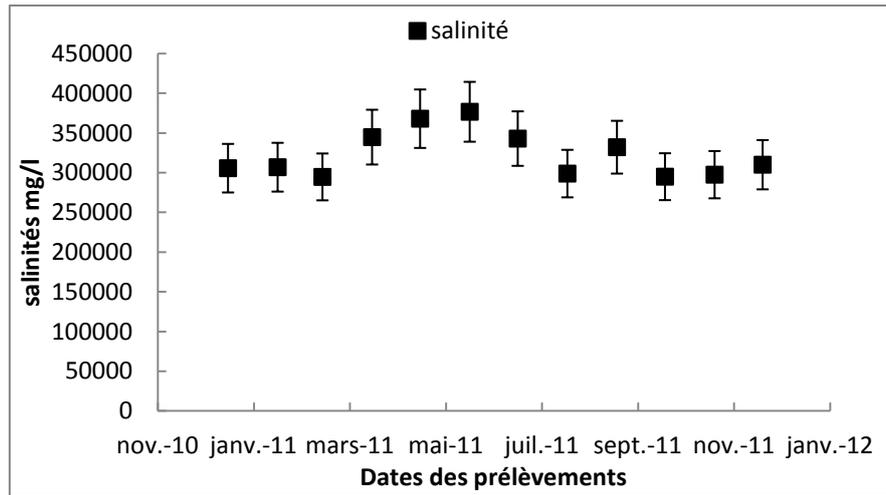


Figure. VI.20: Variations de la salinité de l'eau en fonction du temps pour la période d'observation de Janvier à Décembre 2011.

Il s'agit d'une salinité très élevée, ces valeurs de salinité très élevés peuvent être liées aux conditions de confinement qui favorisent la concentration des eaux. S'ajoute à cela le déficit hydrique et l'évaporation intense qui conduisent aussi à une salinisation des eaux.

La participation de chaque élément majeur en pourcentage est présentée dans la fig. VI.21. Les chlorures et le sodium occupe la grande part de cette salinité. Les pourcentages des chlorures sont plus élevés entre 60-70% et le sodium varie entre 16-22 % dans la sebkha durant toute l'année. Au Juill, les concentrations de sodium diminuent graduellement la moyenne de 20%, et par conséquent leurs apports dans la salinité deviennent moins importants ; 69% de moyenne pour les chlorures qui sont des valeurs plus élevées ou stade évolutives.

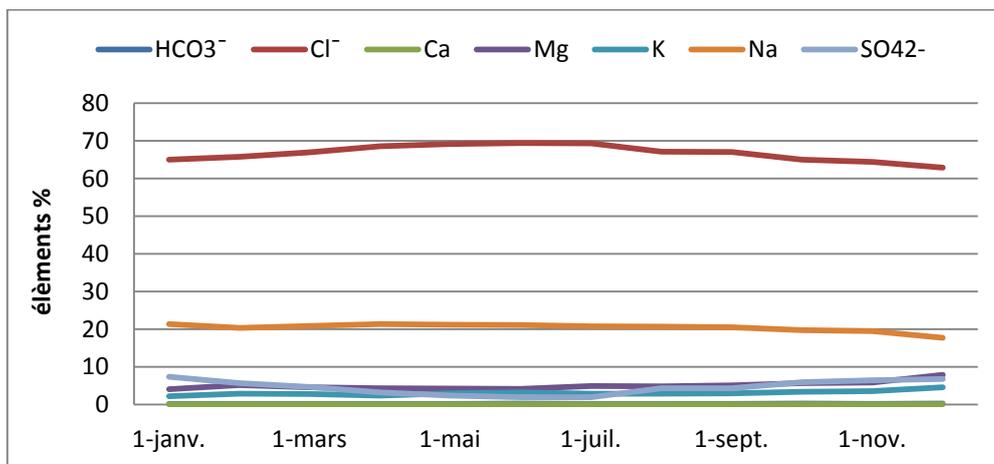


Figure. VI.21: Participation des éléments majeurs en pourcentages (%)

VI.3.9 Résidus secs

La détermination du résidu sur l'eau non filtrée permet d'évaluer la teneur en matières dissoutes et en suspension non volatiles. Ces valeurs peuvent être recoupées à partir de la mesure de la conductivité. Le résidu sec évolue comme celle de la salinité. Il est très important en période estival d'ordre 422114 mg/l, puis diminue graduellement en période automne et hivernal (fine de cycle) 351770 mg/l fig. VI.22. Les résultats analytiques sont influencés par la température et la durée de la dessiccation.

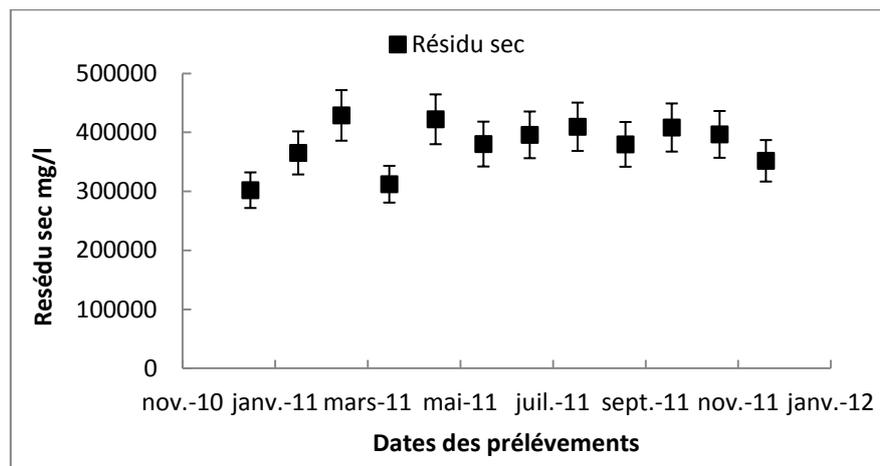


Figure. VI.22 : Variations de la concentration du résidu sec en fonction du temps, de janvier au décembre 2011

VI.4 Les représentations graphiques des analyses géochimiques

Plusieurs types des diagrammes existent pour représenter graphiquement les faciès chimiques d'une eau. Les représentations graphiques ont un intérêt majeur qui se traduit par une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution temporelle ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique. Les diagrammes les plus couramment utilisés sont ceux de Piper (combinaison de deux diagrammes triangulaires pour les cations et anions et un diagramme en losange combinant anions et cations), Schoeller (concentrations équivalentes sur échelle logarithmique).

VI.4.1 Le diagramme de Piper et Scholler Berkaloff

Le diagramme de Piper paraît plus approprié pour une lecture rapide du faciès chimique des eaux. Il 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 sur le triangle de gauche, anions sur 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 représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès chimique de l'eau concernée. Il ne fournit pas d'indication sur la concentration absolue des composantes, contrairement au diagramme de Scheller, d'où une certaine complémentarité des deux représentations.

L'utilisation des diagrammes de PIPER nous permet de classer les eaux dans de grandes familles géochimiques, et de déterminer les liaisons possibles entre chaque famille et, par exemple, les régions étudiées, les types de sols rencontrés.

A cette fin, nous avons étudiés l'ensemble de nos analyses, d'une part toutes saisons de notre station des prélèvements.

Les analyses de 12 échantillons au complet a été placé sur le diagramme de PIPER et Scheller Berkaloff la fig. VI.23. Les nuages de points des deux triangles, il montre une seule famille d'eau, chlorurée sodique et potassique ou sulfatée sodique, marquées essentiellement par la présence en très forte quantité de sodium et potassium. Le nuage du losange enseigne qu'elles ne sont en aucun cas bicarbonatées alcalines, mais plutôt chlorurée.

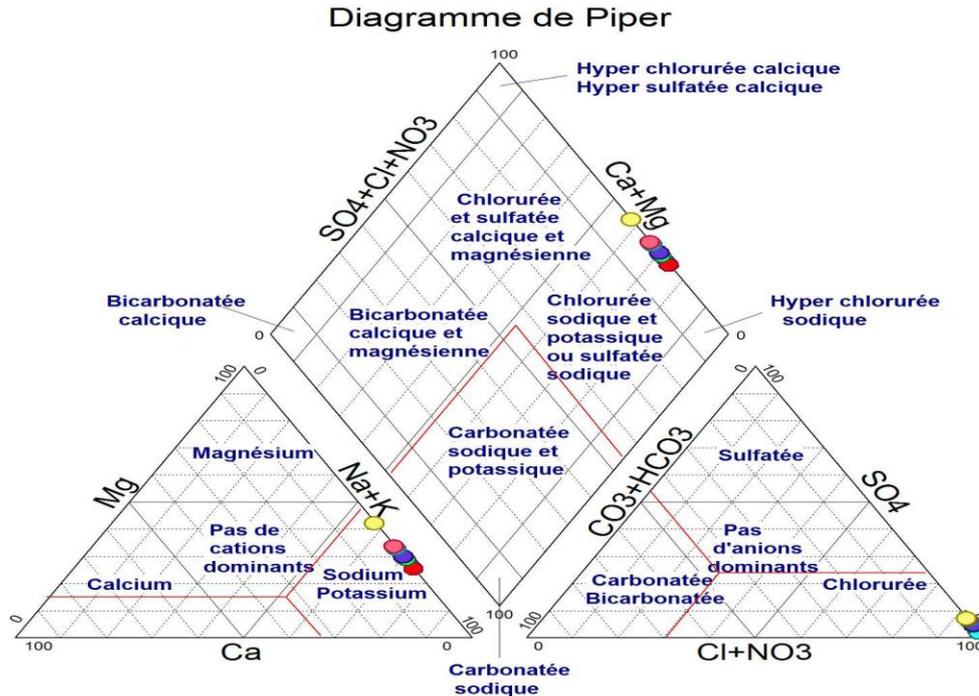


Figure. VI.23 : Représentation en diagramme de Piper des eaux analysées.

Selon le diagramme de PIPER on peut dire que les saumures dans sebkha Baghdad sont marquées par les chlorure et sodium avec potassium qui s'accompagnent tantôt de magnésium tantôt de sulfate, ce ci est en liaison directe avec la présence des formations gypseuses et des formations carbonatées notamment les calcaires et les dolomies de la région.

VI.4.2 Les diagrammes binaires

L'établissement des diagrammes binaires consiste à représenter sur un graphique 2D l'évolution d'un élément ou d'un rapport ionique en fonction d'un autre élément souvent supposé conservatif.

Les informations obtenues dans les graphes, peuvent renseigner l'origine de certains éléments dissous (Cl, HCO₃, Na, Ca, K, Mg) et peuvent être testées à l'aide des diagrammes binaires des éléments impliqués plus information sur l'évolution des éléments dans sebkha Baghdad. Le raisonnement qui suit est fondé sur une telle démarche et appliqué ici aux saumures échantillonnées pendant un cycle géochimique évolutif.

VI.4.2.1 Les diagrammes binaires ions-chlore

Ces genres de diagrammes permettent de visualiser l'évolution des teneurs en cations et anions majeurs en fonction des teneurs en chlore considéré comme élément conservatif. Les axes du graphique représentent les teneurs élémentaires souvent exprimées en mg/l. Cette approche permet d'illustrer plusieurs phénomènes géochimiques ayant lieu au sein de sebkha (zone fermée). Les cations et anions majeurs reflètent alors les interactions des eaux salines avec les formations géologique d'entourage et encaissante pour la nappe phréatique (échanges ioniques, dissolution, précipitation, sorption...). Les valeurs (points) en dehors d'une relation linéaire simple (dilution, évaporation sans précipitation de minéraux, mélange binaire...) peuvent attester de divers processus au sein de lac tels que la réduction bactérienne des sulfates et la précipitation de calcite ou calcite magnésienne (Vallet-Coulomb et al, 2009).

L'évolution des concentrations en Cl^- en cours d'année est exclusivement sous la dépendance des facteurs hydrologiques : apports fluviaux or pluvieux, prélèvements et évaporation. Cet élément peut donc être considéré comme conservatif, c'est-à-dire n'intervenant pas dans les phénomènes de la régulation chimique, géochimique et biologique, dans la colonne d'eau et le sédiment. Par contre les autres éléments risquent d'évoluer sous la dépendance simultanée des facteurs hydrologiques et biogéochimiques. Il est donc intéressant d'en étudier l'évolution par rapport à l'élément conservatif pris comme référence.

VI.4.2.1.1 Le diagramme binaire sodium-chlore (Na-Cl)

Sodium et chlorures sont les paramètres dissous les plus conservatifs. La relation lie les deux éléments si que les chlorures et le sodium évoluent de manière similaire. L'évaporation augmentant chacune des concentrations de sodium et chlorure mais avec légère modifie de rapport Na^+/Cl^- .

Or on observe des différences de comportement entre ces deux éléments qui déforment légèrement: c'est ainsi que Na^+/Cl^- est maximum 0,46 au période hivernal c'est-à-dire dans les eaux de ruissellement. Na^+/Cl^- diminue en période estival 0,44 ce qui témoigne de la participation croissante à l'exutoire d'eaux marquées par un temps de résidence plus élevé dans le sol, où a lieu une immobilisation préférentielle de Na^+ par adsorption de ce cation sur les argiles, et absorption par la végétation.

Les plus fortes teneurs s'expliquent donc par un temps de résidence élevé de la solution dans le sol. Pour les cations Na^+ cependant, l'adsorption sur le complexe argileux limite l'augmentation de leurs concentrations par rapport à celle du chlorure. En plus de ça, la précipitation de l'halite qui composé de sodium et chlorure, ayant un degré de solubilité

particulièrement important. Les concentration des chlorures et sodiums sont soumis à la dynamique des saumures. Ces fortes concentrations sont à mettre en relation avec l'altération des roches riche en éléments sodiques et le rôle du lessivage des eaux de nappe phréatique (remonté d'eau par pression capillaire).

L'évaporation est le processus le plus vraisemblable pour expliquer les variations de teneurs en ces deux éléments dans ces différentes familles d'eaux. C'est également l'effet de l'évaporation jouant simultanément sur Na^+ et Cl^- qui produit leur bonne corrélation générale ($\text{Na} = 0,5133 \text{ Cl} - 14100$) ou $R^2 = 0,75$. La corrélation positive entre le chlore et le sodium est plus ou moins nette dans la fig. VI.24. Cette corrélation est traduite généralement par la formation de l'halite au cours de cycle géochimique jusqu'à des phases avancées.

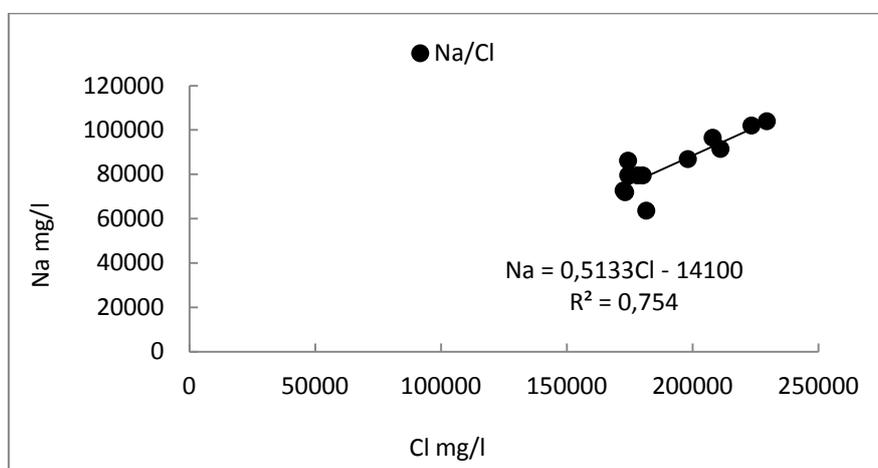


Figure. VI.24 : Concentration des sodiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.

La relation entre la teneur en chlorures et celle en sodium, exprimée en mg/L. les 12 échantillons ont un rapport Na/Cl moins que 0,86 qui correspond à celui de saumure primaire fig. VI.25.

Tableau. VI.3 : Caractéristiques géochimiques des sources de salinité (d'après Vengosh, 2003)

Source	TDS (g/L)	Na/Cl (rapport molaire)	SO4/Cl (10 ⁻³)	Br/Cl rapport molaire (10 ⁻³)	B/Cl rapport molaire (10 ⁻³)	δ11B(‰)	δ34S (‰)	36Cl/Cl (10 ⁻¹⁵)
eau de mer	35	0,86	0,05	1,5	0,8	39	21	<5
saumures primaires (résidus d'eau de mer évaporée)	> 35	< 0,86	> 0,05	> 1,5	< 0,8	> 39	> 21	< 5 à 100
dissolution d'évaporites	> 1	1 (halite)	>> 0,05	< 1,5	< 0,8	20 à 30	< 21	< 5
eaux hydrothermales	0,2 à > 1	> 1	>> 0,05	< 1,5	> 5	0 ± 5	<< 21	< 5
eaux usées domestiques	≈ 1	> 1	> 0,05	< 1,5		5	6 à 10	50 à > 100
eaux de retour d'irrigation	0,5 à 5	> 1	>> 0,05	< 1,5	> 0,8	20 à 30	-	50 à > 100

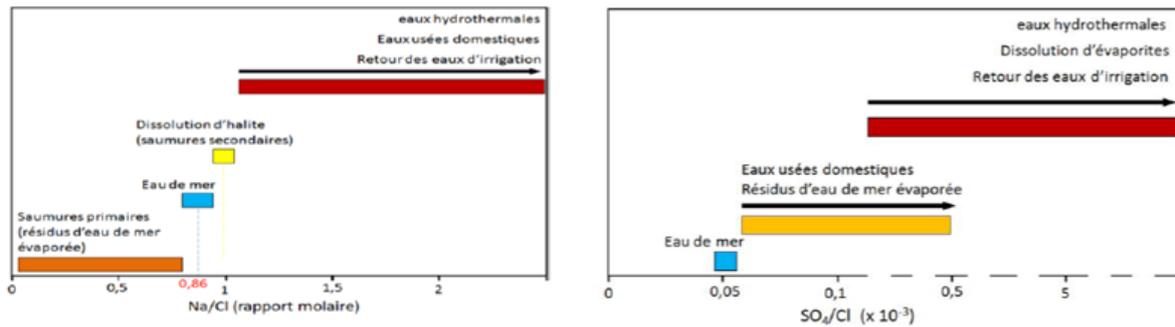


Figure. VI.25: Rapports molaires Na/Cl, SO₄/Cl, des principales sources de salinité (d'après Vengosh, 2003).

VI.4.2.1.2 Les diagrammes binaires (Ca-Cl)

La fig. VI.26 indique une consommation notable de l'élément de calcium, croissante au fur et à mesure de l'augmentation de la salinité exprimée par les teneurs en Cl⁻. Ce phénomène est normal si l'on se réfère à la précipitation de la calcite, qu'il explique une consommation en Ca⁺ moyenne interannuelle dans sebkha Baghdad. La station d'étude pendant toute l'année est en état de sursaturation vis-à-vis de la calcite. En plus de ça, d'autres réactions qui sont possibles si la néoformation argileuse, la voie biochimique expliquent aussi la disparition de l'élément de sodium, comme sa fixation dans les formations argileuses. Le cycle fixation-rédis-solution semble cependant rapide vu la sursaturation quasi générale des eaux en CO₂ et ce particulièrement dans les milieux confinés où la température est plus élevée.

La corrélation entre les deux éléments est négative d'ordre de $Ca = -0,0013 Cl + 455,12$ ou $R^2 = 0,29$.

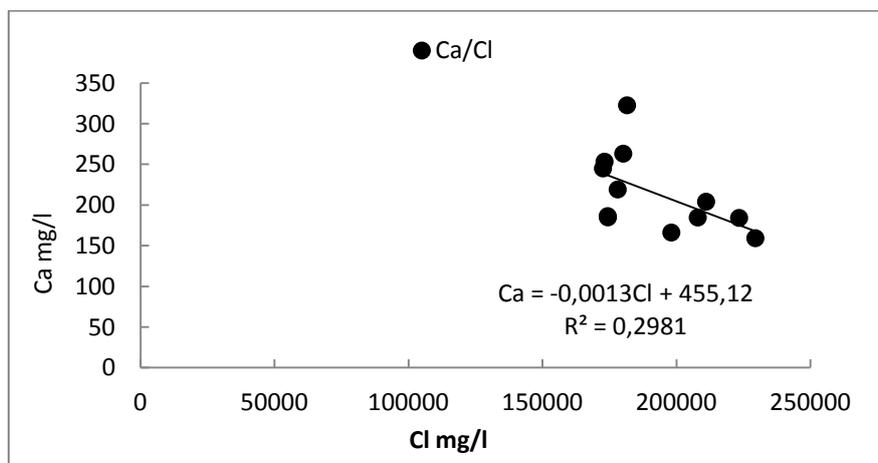


Figure. VI.26 : Concentration des calciums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.

VI.4.2.1.3 Les diagrammes binaires (Mg-Cl)

Les concentrations en Mg^{++} dissous évoluent conjointement avec celles des chlorures, du moins aux périodes à taux de dilution important des eaux lacustres. Aux plus fortes concentrations les points s'écartent de la droite d'évolution théorique de l'élément, prouvant ainsi son caractère non conservatif (fig. VI.27). Ce phénomène débute cependant à des concentrations en Cl^- plus élevées que dans le cas du calcium. Les processus biologiques n'interviennent sans doute que peu dans la régulation de l'élément de magnésium dissous.

D'une part, la formation de la sépiolite est la réaction sans doute la plus importante qui influence la variation des concentrations de magnésium. D'autre part les changements des taux de magnésium peuvent être due ou néoformation des argiles riche en magnésium exemple (glauconie, smectite et montmorillonites).

La relation entre Mg^{2+} et Cl^- montre une corrélation légèrement positif ou $Mg = 0,0097 Cl + 18657$ et $R^2 = 0,04$. Cette relation montre un enrichissement des échantillons d'eau analysé par rapport à la droite de mélange. Cet enrichissement peut être dû à la dissolution de la dolomite.

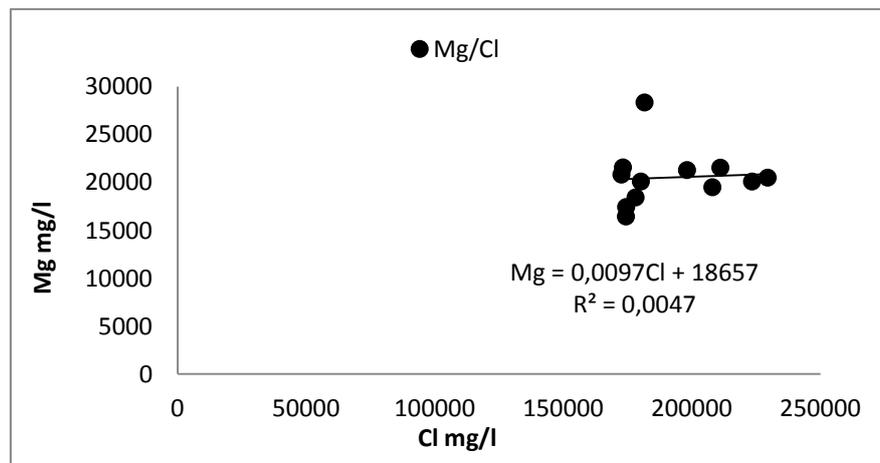
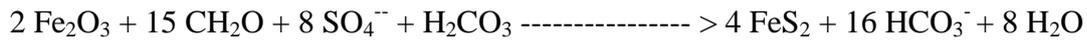


Figure. VI.27 : Concentration des magnésiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.

VI.4.2.1.4 Les diagrammes binaires (SO_4-Cl)

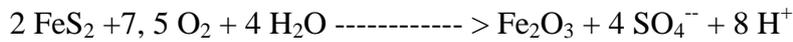
La régulation géochimique des sulfates est la plus complexe à interpréter. Le tracé de la droite d'évolution théorique des solutions est problématique puisque les Cl^- et les SO_4^{-2} ne sont pas simultanément à leur taux de dilution maximum. On peut penser dans ce cas à :

- Une sulfato-réduction au niveau des sédiments, confirmés d'ailleurs dans la région fait par les formations évaporitiques. Ce phénomène expliquerait l'énorme consommation annuelle de l'élément de sulfate dans sebkha. Cette consommation des sulfates s'accompagne donc d'une production de bicarbonates. L'équation générale s'écrit :



Fe₂O₃ : Argile rouge, résidu de la dissolution des calcaires, avec appauvrissement en SiO₂ et enrichissement en Fe₂O₃,

- Un régénération des SO₄⁻², mis en évidence dans la région au période hivernal au niveau de sebkha Baghdad. L'équation suivante est proposée :



L'enrichissement des points en sulfates est lié à la présence des évaporites sur les limites et dans le substratum gypsifère.

D'une manière générale, le rapport SO₄/Cl des eaux des lacs est faible (0,06 en moyenne) parce que le lessivage des terrains débarrasse plus facilement le Cl que le SO₄, de telle sorte qu'il en reste moins à dissoudre par les eaux superficielles. L'évaporation concentre le chlore plus que le SO₄ qui n'a qu'une solubilité relativement faible. De plus ce rapport ne semble pas dépendre de la nature des terrains si l'on fait exception des roches gypseuses et des roches salines. Il est surtout affecté par des phénomènes secondaires : La réduction des sulfates par les microorganismes associés à la matière organique. De même les concentrations par évaporation ou par dissolution. C'est pourquoi ce rapport a tendance à diminuer.

La relation entre les sulfates et les chlorure montrent une corrélation négative $\text{SO}_4 = -0,1897\text{Cl} + 49204$ ou $R^2 = 0,68$ (fig. VI.28).

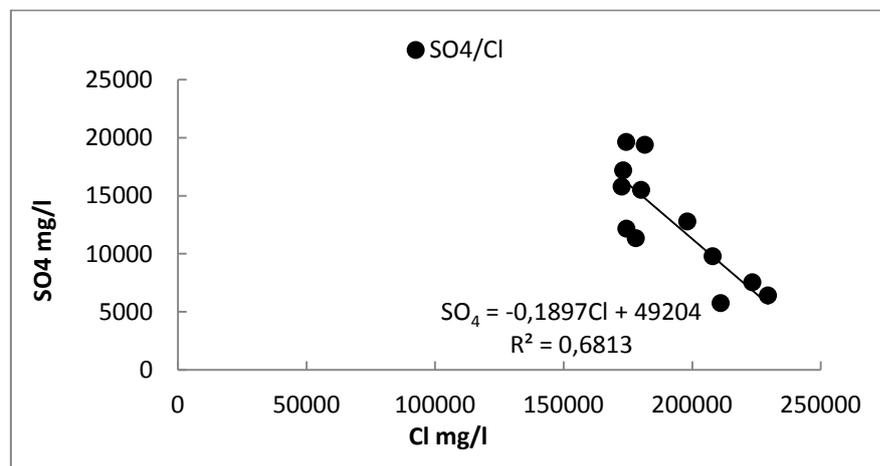


Figure. VI.28 : Concentration des sulfates dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.

VI.4.2.1.5 Les diagrammes binaires (K-Cl)

Le caractère non conservatif du potassium est mis en évidence à la Fig. VI.29. La perte nette moyenne annuelle de l'élément par autres voies qu'hydrologiques. Les processus géochimiques, tels que la formation de l'illite ($K_x Al_2 [Si_4 -x Al_x O_{10}] (OH)_2$) et surtout celle de montmorillonites potassiques à partir de montmorillonites calciques par simple échange Ca^{++} , K^+ , expliquent de la consommation de potassium. La fixation de l'élément par voie biologique est faible.

La relation entre le K^+ et le Cl^- indique une corrélation positive $K = 0,0484Cl + 3101,8$ avec $R^2=0,20$.

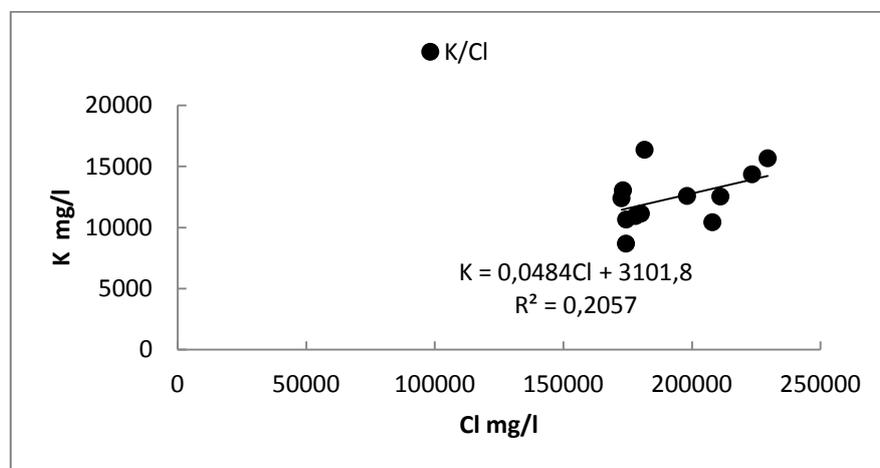


Figure. VI.29 : Concentration des potassiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.

VI.5 Cycle saisonnier des éléments majeurs

Le dosage saisonnier des eaux de sebkha Baghdad montre que les concentrations maximales et minimales en éléments sont enregistrées au cours de la saison estivale. Les eaux hivernales se situent entre les deux pôles. Les valeurs minimales sont liées à une perte des ions soit par précipitation ou par fixation biologique. Par contre les valeurs maximales pourraient être le résultat d'une concentration suite à l'évaporation estivale. Il y a compétition entre deux processus qui sont la production et la consommation ionique :

VI.5.1 Production ionique

Au cours de la saison hivernale, la cuvette de sebkha Baghdad reçoit non seulement les ions en solution issus de l'altération des formations géologiques qui constituent son bassin versant, mais aussi les ions des eaux de la nappe phréatique. Avec l'augmentation de la température, l'évaporation des eaux s'intensifie et on assiste à une concentration en ions dans la tranche d'eau superficielle, avec les taux d'évaporation sont beaucoup plus importants que celles des apports ($(E-P) > Q_{in}$). Ce processus indique que cette dépression endoréique est semblable ou lacs de type éphémère (Ephemeral lake, short term, J.P. Yan et al, 2002) ou l'évaporation est considérée comme un agent important dans l'évolution de ce type des lacs fig. VI. 30.

(a) CLOSED LAKE TYPES			
	A	B	C
<i>Lake type</i>	Ephemeral lake (short term)	Perennial lake (long term)	Large perennial lake (very long term)
<i>Water budget</i>	$Q_{in} \ll (E_1 - P_1) A_1$ decrease in V_1	$Q_{in} < (E_1 - P_1) A_1$ decrease in V_1	$Q_{in} \approx (E_1 - P_1) A_1$ $V_1 \approx \text{constant}$
<i>Concentration mechanisms</i>	Evaporation	Evaporation and dissolved matter influx	Dissolved matter influx

Figure. VI.30 : Types des lacs fermé (J.P. Yan et al, 2002)

VI.5.2 Etude de l'évolution des minéraux et des éléments dissous de sebkha Baghdad (Calculs thermodynamiques)

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans Sebkha Baghdad notre zone d'étude, pour cela la tendance des formes chimiques entre la phase dissoute et la phase minérale a été examinée. Les différents paramètres calculés basés sur les analyses chimiques des échantillons d'eau sont :

Le pH d'équilibre, la force ionique et les indices de saturation de quelques minéraux. L'indice de saturation exprime le degré d'équilibre chimique entre l'eau et le minéral dans la matrice de Sebkha et peut être considéré comme une mesure du processus de dissolution et/ou précipitation concernant l'interaction eau-roche.

Donc, pour l'indice de saturation :

Le calcul de l'indice de saturation SI, qui est le logarithme du rapport entre le produit de solubilité Q d'un minéral donné à sa constante d'équilibre K obtenue à partir des données thermodynamiques par la formule suivante :

$$SI : \log(Is) = \log (Q/K) = \log Q - \log K$$

Où

- Q : le produit d'activité ionique
- K: la constante d'équilibre

L'indice de saturation a été effectué pour tous les échantillons des saumures analysés. La solution est dite en équilibre par rapport à un certain minéral quand :

$$SI = \log (Q/ K) = \log Q - \log K = 0.$$

Le calcul de l'indice de saturation a pour but de donner une valeur chiffrée de l'état des éléments chimiques dissous dans les saumures vis à vis de tel ou tel minéral. L'expression de l'indice est une valeur relative qui est calculé par la formule suivante :

Lorsque $SI = 0$, l'eau est en équilibre avec le minéral correspondant, lorsque $SI > 0$ il y a sursaturation précipitation de minéral correspondant et quand $SI < 0$, il y a sous-saturation de l'eau vis à vis de le minéral.

NB : Le calcul de (SI) a été mené en utilisant la loi de Debye &-Hückel (1923) à l'aide du logiciel Phreeqc (Version 2 démo Parkhurst and Appelo, 1999). On considère que l'équilibre est atteint zéro (0).

La majorité des échantillons sont sursaturés vis-à-vis les carbonates (fig. VI.31) ayant un indice de saturation moyenne (SI) comme suit :

Dolomite ($\text{Ca Mg} (\text{CO}_3)_2$) : la valeur moyenne est de l'ordre 3,8;

Magnésite (Mg CO_3) : la valeur moyenne est de l'ordre 2,6;

Calcite (Ca CO_3) : la valeur moyenne est de l'ordre 0,5;

Aragonite (Ca CO_3) : la valeur moyenne est de l'ordre 0,3;

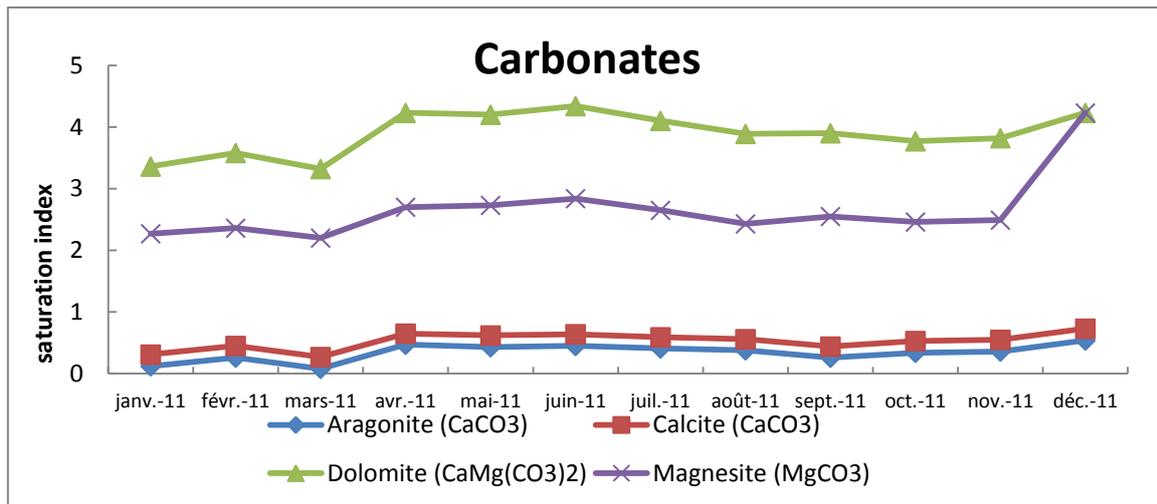


Figure. VI.31 : Les indices de saturation des minéraux carbonatés précipités

La majorité des échantillons sont sursaturés vis-à-vis de la Halite (NaCl) en peut voir fig. VI.32 que les (SI) varient entre 0,17 et 0,97, cette dernière valeur comme une valeur maximale est enregistré en mois de juin. Cependant en période hiver et automne est proche à l'équilibre (SI = 0).

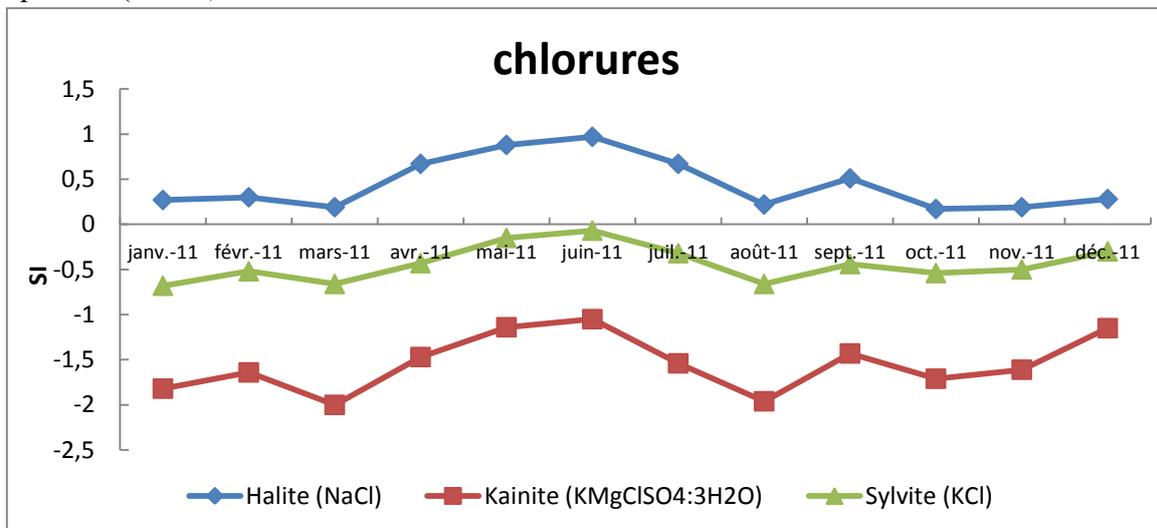


Figure. VI.32 : Les indices de saturation des minéraux chlorures précipités

Alors que ces mêmes saumures sont sous-saturés vis-à-vis de Epsomite (MgSO₄:7H₂O), Bloedite (Na₂Mg(SO₄)₂:4H₂O), Hexahydrate (MgSO₄:6H₂O) et Mirabilite (Na₂SO₄:10H₂O) ou l'indice de saturation varie entre (-1,38 et -0,67), (-1,25 et -0,48), (-1,39 et -0,74), (-2,13 et -0,96) respectivement.

Pour le groupe des évaporites nous avons :

Le Gypse (CaSO₄.2H₂O) est sur saturé avec d'indice de saturation (SI) qui sont oscillant

entre (0 et 0,31), mais il est parfois légèrement sous saturé avec indice de saturation en moyenne égale (-0,12). Pour l'Anhydrite (CaSO_4) et Glauberite ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$) sont sur saturé avec indice de saturation (0,1 et 0,43), (0,05 et 0,8) respectivement fig. VI.33.

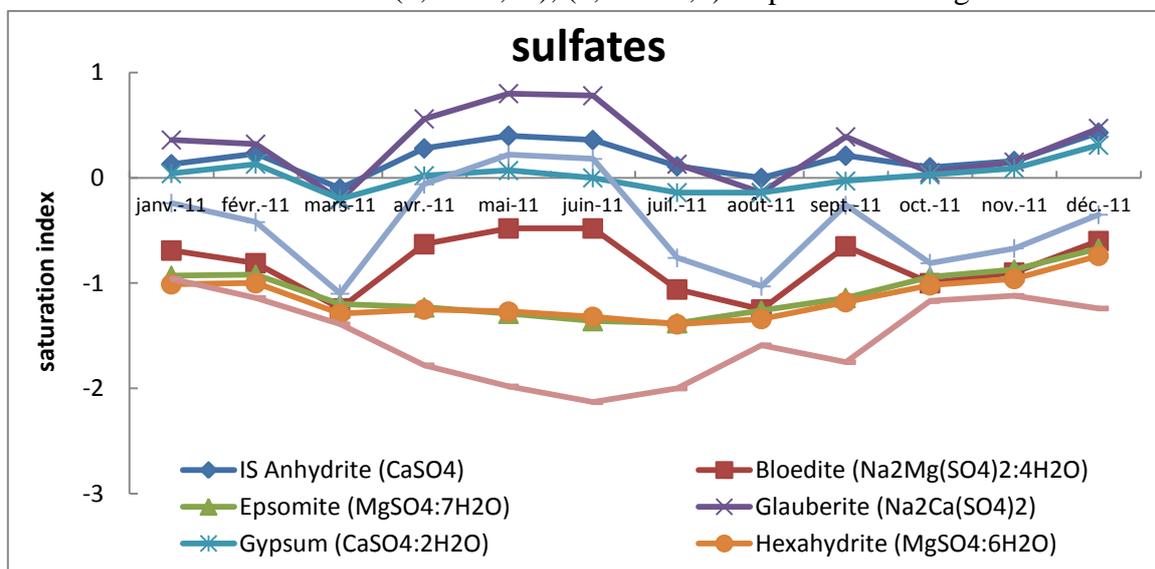


Figure. VI.33 : Les indices de saturation des minéraux sulfates précipités

Chott Beghdad est particulièrement remarquable dans période hivernal. La tranche d'eau superficielle présente un appauvrissement en ions par rapport au période estivale. Cet appauvrissement coïncide avec le confinement de cette zone. Les conditions qui y règnent permettent la précipitation de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite et du gypse. Les calculs d'indices de saturations pour les espèces minérales ont été effectués à l'aide d'un programme informatique appelé Phreeqc. Ces calculs montrent que les saumures dans la période hivernal et estival se situent dans des champs de sursaturation de la calcite, de l'aragonite, de la dolomite et du gypse. Ces précipitations appauvrissent la tranche d'eau en Ca, Mg et en alcalinité. La présence de la matière organique favorise la précipitation (Perthuisot, 1975). Les argiles, et surtout les smectites peuvent par ailleurs aussi adsorber le calcium. La diminution des teneurs en sulfates peut être due à l'activité intense des bactéries sulfato-réductrices dans ce secteur mais aussi à la précipitation du gypse (Perthuisot, 1975).

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux dans l'eau indique que seul les minéraux carbonatés tendent à précipiter surtout sous la forme de dolomite. Par contre les minéraux évaporitiques sont soit à l'état de sous-saturation (epsomite, hexahydrate et Bloedite) ou bien à l'état de la saturation (gypses, anhydrite et glauberite), cela est expliqué par l'effet des valeurs élevées de la constante d'équilibre des minéraux évaporitiques.

Donc, la succession de formation des minéraux évaporitiques proposés est comme suite :

- Minéraux de 1^{er} stade : les carbonates (dolomie, calcite, aragonite)
- Minéraux de 2^{ème} stade : les minéraux évaporitiques (gypse, halite, anhydrite, glauberite)
- Minéraux de 3^{ème} stade : (Epsomite, hexahydrate et Bloedite)

VI.6 Interprétations des analyses de DRX

Douze campagnes d'échantillonnage des sels ont été prélevées mensuellement au cours de cette étude, pour deux objectifs principaux, à savoir :

- la répartition chimique des éléments majeurs dans les sels prélevés.
- Analyses minéralogiques par Rayon X afin de mettre en évidence les différentes phases minérales qui se précipitent dans sebkha Baghdad.

Les analyses par diffractométrie de Rayon X peuvent nous donner les résultats suivants :

Le spectre de diffraction des rayons X des échantillons N°1, N°02, N°3 (fig. VI.34 à fig. VI.36) prélevés successivement de mois de janvier à mars, a montré la présence de l'halite avec le gypse et de l'anhydrite. La présence de cette dernière est le résultat de la déshydratation du gypse et sa transformation en anhydrite.

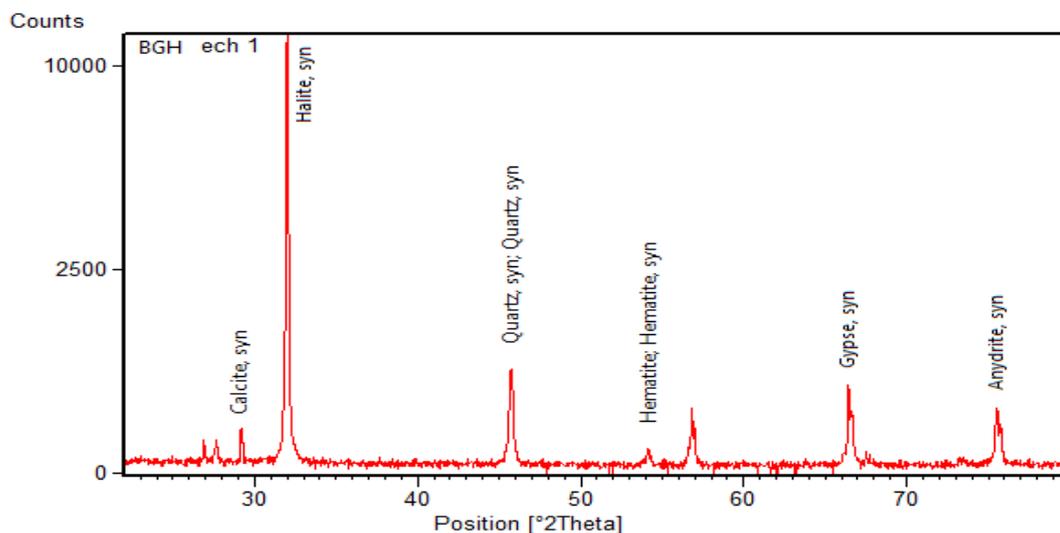


Figure. VI.34 Les Spectres des sels d'échantillon N°1 de chott Baghdad

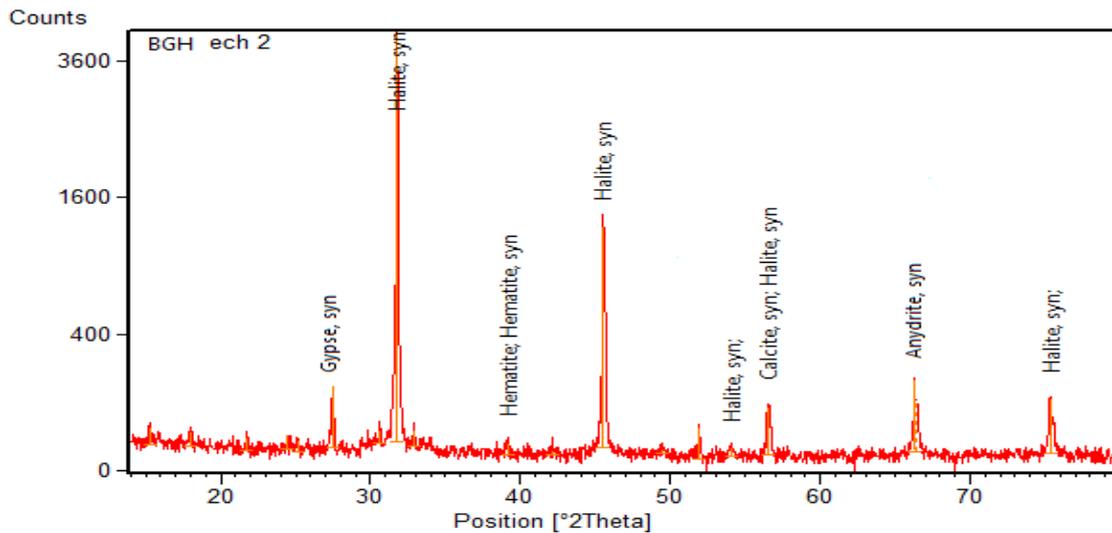


Figure. VI.35 Les Spectres des sels d'échantillon N°2 de chott Baghdad

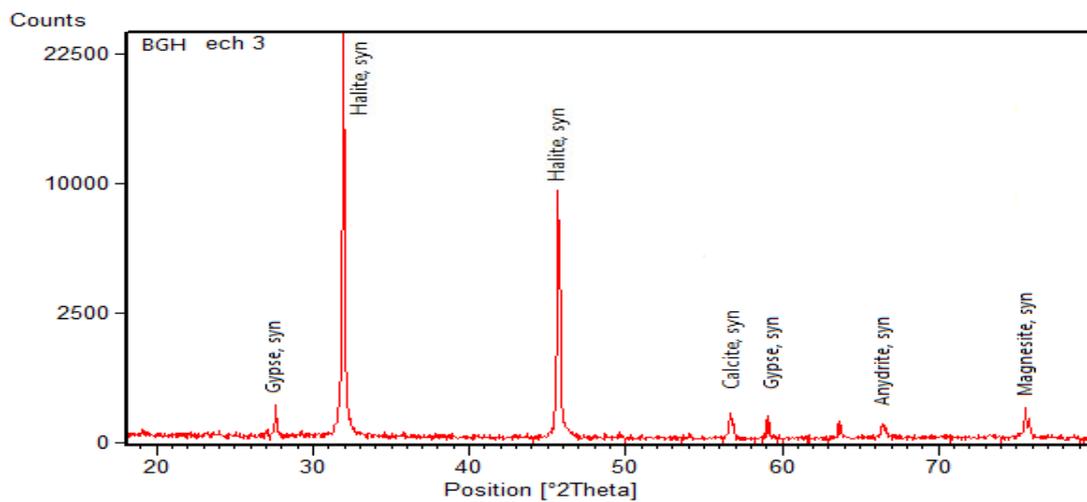


Figure. VI.36 Les Spectres des sels d'échantillon N°3 de chott Baghdad

Le spectre de diffraction des rayons X des échantillons N°7, N°9 et N°10 montrent la présence de l'Hexahydrate, la Bloéidite, l'epsomite et Glaubérite fig. VI.37 à fig. VI.39.

En général, L'analyse par diffractométrie de Rayon X confirme la cristallisation des séquences évaporitiques caractéristique de l'halite , gypse, et de calcite avec des autre minéraux évaporitique qui sont moins important Glaubérite, epsomite, hexahydrate.

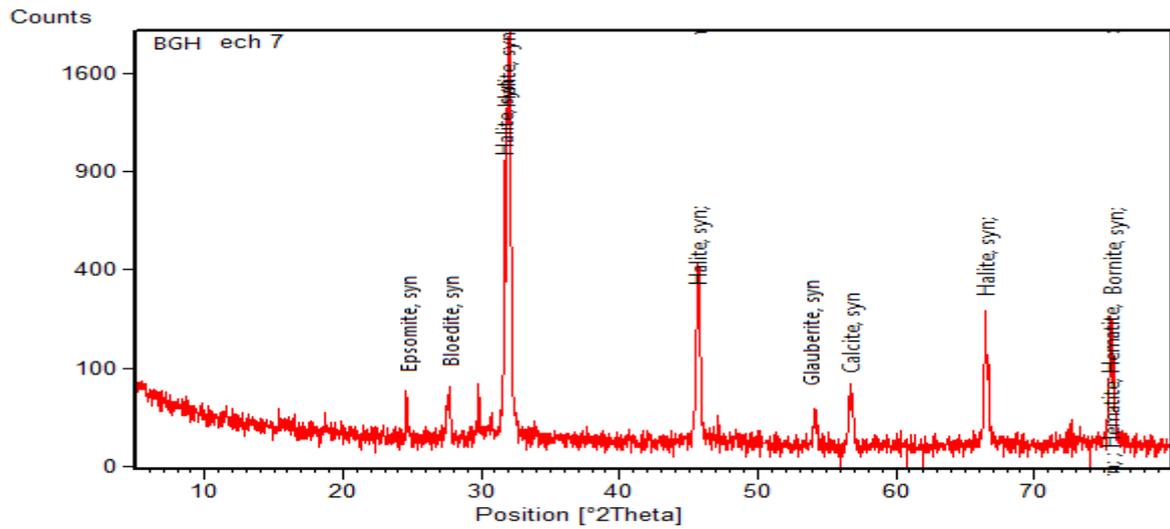


Figure. VI.37 Les Spectres des sels d'échantillon N°7 de chott Baghdad

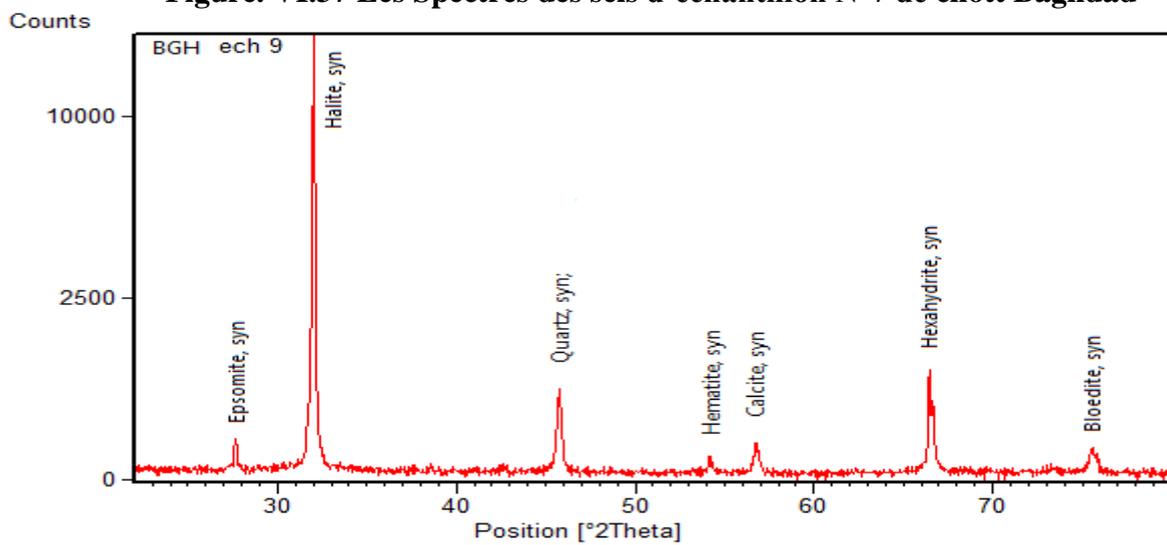


Figure. VI.38 Les Spectres des sels d'échantillon N°9 de chott Baghdad

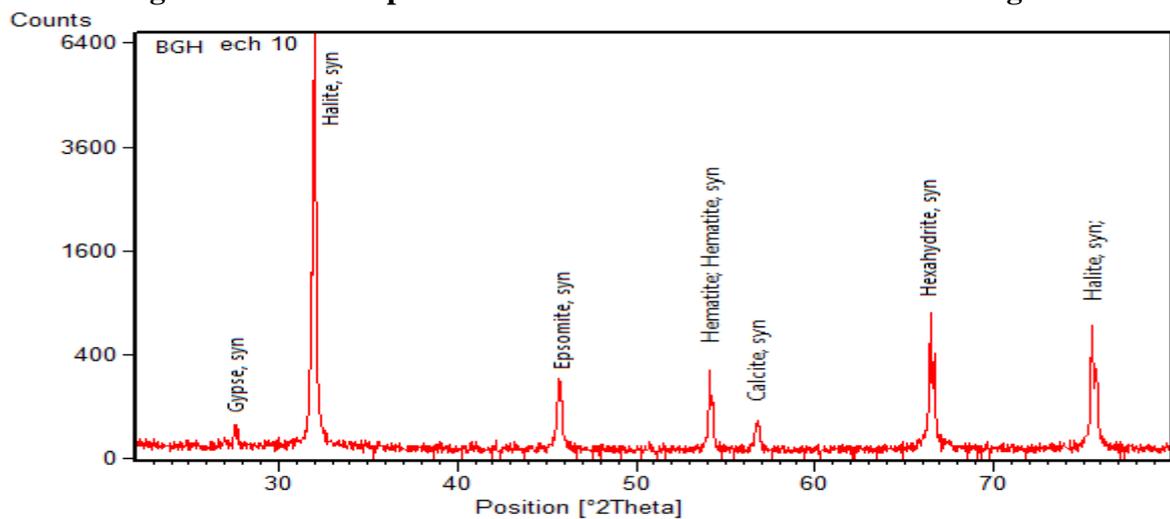


Figure. VI.39 Les Spectres des sels d'échantillon N°10 de chott Baghdad

VI.7 Discussion et conclusions

Les conclusions retenues au terme de ce chapitre, nous ont permis d'établir dans un premier temps un constat de la qualité des saumures superficielles de sebkha Beghdad de l'un des sebkhas septentrional algérienne (El Hadjira), par le suivi et l'analyse temporelle d'un certains nombres de traceurs physicochimique. Les valeurs moyennes s'étendent sur un des cycles annuels 2011 couvrant une longue période de sécheresse et deux crues qui a lieu pendant les mois de février et mars 2011.

Le diagnostic a révélé la présence d'une charge minérale importante au niveau de cette zone d'étude. Il donne l'image classique d'un changement intense qui traduit l'impact plus claire d'un climat semi-aride dans la région. Cependant cette charge totale n'est pas constante, elle fluctue dans le temps et dans l'espace.

Les résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques des échantillons prélevés de cette zone humide du région d'Elhadjira qui sont exposés dans ce chapitre nous ont permis d'évaluer la qualité des eaux salé ainsi que de leur évolution temporelle. Ces résultats ont montré globalement que les paramètres de salinité enregistrée au niveau des prélèvements sont d'une minéralisation forte avec des teneurs élevées en chlorures.

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de sebkha présentent des variations saisonnières assez marquées, ceci a été mis en évidence par le comportement des éléments majeur et l'ensemble des données de la détermination des paramètres physicochimiques des eaux pour un cycle géochimique.

Néanmoins, ces résultats constituent une étape dans l'étude du fonctionnement géochimique la sebkha de cette région. L'échelle du petit bassin versant est indispensable à la compréhension des bilans géochimiques sur des zones plus vastes. Elle doit permettre également de réaliser la synthèse entre des recherches sur ce même site concernant :

- l'organisation morphologique détaillée de la couverture pédologique,
- les conditions de la circulation de l'eau, dans les différents volumes pédologiques, qui conduit au fonctionnement hydrologique des sebkhas.
- la composition chimique des eaux dans les différents volumes d'eau et le bilan de l'érosion sous forme dissoute à l'exutoire du bassin versant.

Un gradient de concentration de salinité croissant de la périphérie vers le centre se dégage de la situation de l'été et du printemps. L'élévation de la température au cours de la saison estivale est le principal facteur d'une évaporation intense qui, par conséquent, est l'agent principal de l'augmentation des concentrations de sel dans les eaux de la sebkha.



CONCLUSION GENERAL

Conclusion générale

L'étude hydroclimatique et hydrogéochimique du Sebkhah Baghdad au berger Nord de Oued N'ssa, nous a permis d'avoir un aperçu sur l'état quantitatif et qualitatif sur l'évolution géochimique des eaux de la région. Ainsi, cette étude a permis de dire que d'après:

❖ L'étude géomorphologique de la région, le bassin versant a une superficie de 50 km² et une forme Allongé de direction NE-SW .La morphologie général de cette région qui se divise en quatre unités géomorphologique hamada, les glacis, les sebkhas et les dunes

❖ L'étude géologique, les formations prédominantes sont d'âge Quaternaire avec une épaisseur assez limitée. Ceci nous permet de dire que la zone d'étude a des formations de surface de nature détritique et évaporitique mais l'action de l'érosion reste importante sur la majorité de la surface du bassin surtout sur la zone à forte pente et dépourvue de végétation.

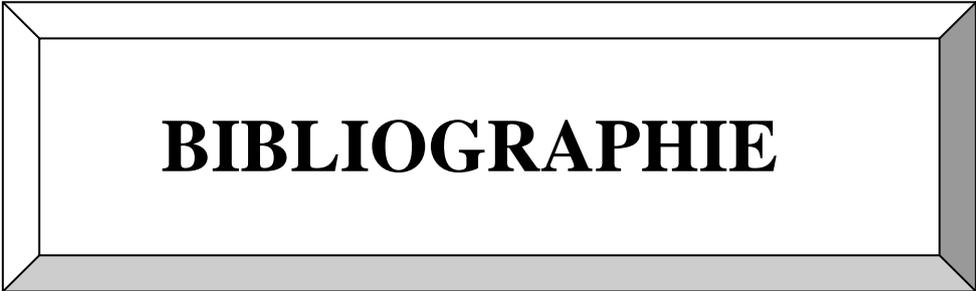
❖ Les données climatiques de la région étudiée, cette dernière a un climat semi-aride. Les précipitations moyennes inter annuelles s'évaluent à 6,3 mm pour une température moyenne annuelle est de 23.6 °C. L'évolution annuelle de ces deux paramètres permet de distinguer une période chaude et sèche et une période froide et humide. L'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 300 mm. Le déficit agricole est de l'ordre de 400 mm en moyenne pour la région d'El Hadjira.

❖ Le suivi du chimisme des saumures de surface pendant la période allant du mois d'janvier jusqu'au mois décembre pour l'année 2011, a permis de dire que les eaux du sebkha restent très salé du moment que les concentrations de certain éléments chimiques dépassent les normes admissibles.

❖ L'interprétation des différents diagrammes a montré que dans la région étudiée les chlorure dominant et s'accompagnent soit de calcium soit de magnésium au niveau tous le cycle géochimique de prélèvement. L'évolution des éléments chimiques en fonction de temps fait ressortir que de fortes concentrations de sulfate et de calcium sont liées au formations évaporitiques ou salifères comme le gypse. Les eaux sebkha Baghdad ont des teneurs supérieures aux certaines sebkhas à travers le monde pour SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- , Ca^{2+} et Mg^{2+} .

❖ L'étude du système évaporitique du Chott Baghdad permet la mise en évidence d'une séquence de minéraux qui commence par la calcite pour arriver aux minéraux de magnésium qui se précipitent à la fin de la série évaporitique. Les rayons X prouvent la présence de quelques minéraux évaporitiques, avec une fréquence plus ou moins différente. Il faut noter également l'abondance dans tous les échantillons du minéral de l'halite, avec une fréquence moins importante de gypse.

❖ le manque d'étude des éléments trace de la région étudiée, ils peuvent nous donner plus de détails tel que la pollution de la région.



BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- **Abderrazak, K (2005)** : Eaux et sols en Algérie gestion et impact sur l'environnement.
- **Aumassip, G. (2001)** : L'Algérie des premiers hommes. Édit. Maison des Sciences de l'Homme, Ibis Press,.
- **B. Faouzi, (2004)** : Etude géologique des dépôts évaporitiques du bassin de Guelma
- **BG (2004)** : Projet de protection de la cuvette de Ouargla contre la remontée des eaux, études de reconnaissance et rapports internes.
- **Bloundi, M. (2005)** : Etude géochimique de la lagune de Nador (Maroc oriental): Impacts des facteurs anthropiques –Université Mohamed V- Agdal
- **Bourhane A., sous la direction de Kloppmann W. (2010)** : Discrimination de l'origine de la salinité dans les eaux souterraines : (contexte hydrogéologique et méthodes d'étude) – Stage de Master 2 – Université de La Réunion, 109 p., 34 ill., 9 ann.
- **Busson G. (1969)** : Sédimentation, transgression et paléogéographie sur les grandes plate- formes du Mésozoïque : l'exemple du Cénomaniens- Turonien du NE de la plate forme saharienne et de Berberie. Bull. Soc géol, pp. 701.
- **Busson, G, (1972):** Etude des ressources en eau du Sahara septentrional par UNESCO Utilisation des modèles pour l'établissement des programmes d'exploitation.VOL 5.
- **Can, j., Earth, S. (1983):** Sédimentology of playa lakes of the northern Great Plains. Vol 21. 107-125
- **Casanova, J., Brach, M., Millot, R., Négrel, Ph. et Petelet-Giraud, E., (2004)** : Project PALEOHYD II- Paléohydrologie et géoprospective : modèle conceptuels et processus d'acquisition de la chimie des eaux dans les massifs granitiques. Rapport d'avancement. Rapport BRGM/RRP-52880-FR. 66 p., 33 fig., 3tab.
- **Chairi, R. (2005)** : Géochimie organique des eaux de surface de la zone septentrionale de la sebkha de Moknine, Tunisie orientale.
- **Cornet, A (1961):** Initiation à l'hydrogéologie Saharienne. Cours ronéoté destiné aux officiers du cours préparatoire aux Affaires Sahariennes. service des études scientifiques. Birmandreis, Alger, 1961,
- **Coulibaly, K. (2005)** : Etude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau des puits de certains quartiers du district de bamako.
- **Dubief, J. (1953)** : Essai sur l'hydrologie superficiel au Sahara . Inst. De Métor.et de physique du globe de l'Algérie .dir .du sce de la colon. Et de l'hydraulique., clairbois
- Elément de pétrologie et sédimentologie, <http://WWW.Ulg.ac.be/géopéto>, pp.32-37.
- Encyclopédie Microsoft ® Encarta ®. 2009.

Bibliographie

- **Fabre, J. (1976)** : Introduction à la géologie du Sahara d'Algérie et des régions voisines. SNED, Alger, 421p.
- **Farhat, B. et Ben Mammou, A. (2010)** : Etude du remplissage sédimentaire d'une sebkha côtière tunisienne au cours du Quaternaire récent: la Sebkha Bou Zid (Nord-Est du Cap Bon). *Geo-Eco-Trop.*, 2010, 34: 97 – 102
- **Fezei, R., Hammi, H. and M'nif, A. (2009)**: Selective recovery of bischofite from sebkha el Melah natural brine (Tunisie) *Latin American Applied Research* 39:375-380
- **François-Xavier, C., Jean-Yves, G. (1986)** : Étude chimie des eaux du lac de Guiers en Sénégal et de leur évolution annuelle Approche des mécanismes de la régulation hydrogéochimique. *Chemical Geology*, 90 (1991) 211-231
- **Gaagai, A. (2009)** : Etude hydrologique et hydrochimique du bassin versant du barrage de Babar sur oued El Arab région est de l'Algérie –Université de Batna.
- **Geoidd, B. (1999)** : Etude de gestion de la zone sensible de Sebkhet Halk El Menjel (Tunisie), Phase 1 Caractérisation du milieu naturel
- **Gueddari, M. (1980)** : Géochimie des sels et des saumures du chott El Jerid (Sud Tunisien). Thèse de doctorat 3eme cycle (131p).
- **Guendouz A. et All (2003)**: Hydrogeochemical and isotopic évolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara. *Hydrogéologie journal* (20003) 11: 483-495.
- **Guyot, J.-L., Corbin, D., Quintanilla, J., Calle, H. (1991)**: Hydrochimie des lacs dans la région de Trinidad (Amazonie bolivienne). *R-U. Hydrobiol. trop.* 24 (1) : 3-12 (1991).
- **Hacini, M. (2006)** : Géochimie des sels et des saumures du chott Merouane et calcule des vitesses de précipitation de quelques minéraux évaporitiques, thèse de doctorat, 190 page.
- **Hacini, M., Oelkers, E. H., and Kherici , N. (2006)**: Retrieval and interpretation of precipitation rates generated from the composition of the Merouane Chott ephemeral lake. *J. Geohem. Exploration* .
- **Hamdi-Aïssa, B. (2001)** : Le fonctionnement actuel et passé de sols du Nord-Sahara (Cuvette de Ouargla). Approches micromorphologique, géochimique, minéralogique et organisation spatiale. Thè, Doct, Institut National Agronomique, Paris-Grignon, 283p
- **Hammi, H. et al. (2003)**: Tunisian salt lakes evaporation studied by the DPAO method based on solubility phase diagrams. *Desalination* 158 (2003) 2 15-220
- **Hammi, H. M'nif, A. et Rokban, R. (2001)** : Étude de l'évaporation d'une saumure naturelle. Corrélation conductivité-concentrations ioniques. Pr10-64

Bibliographie

- **Kloppmann, W., P. Negrel, et al. (2001)** : "Halite dissolution derived brines in the vicinity of a Permian salt dome (N-German Basin). Evidence from boron, strontium, oxygen, and hydrogen isotopes." *Geochimica Et Cosmochimica Acta* 65(22): 4087-4101.
- **Maglione, G. et Carn, M. (1978)** : Donnes géochimiques préliminaires sur la sebkha de NORHAMCHA » (mauritanie)
- **Modelein, R B (1975)** : les pays de Ouargla sahara Algérien, paris
- **NEZLI. IE. (2004)** : Mécanismes d'acquisition de la salinité et de la fluoruration des eaux de la nappe phréatique de la basse vallée de l'oued M'ya (Ouargla), Mémoire de Magistère, univ, Annaba, 152p
- **Ng, S.L., King, R.H. (2003)**: Geochemistry of Lake Sediments as a Record of Environmental Change in a High Arctic Watershed, *Chemie der Erde* 64 (2004) 257–275.
- **ONM (2010)** : Bulletin climatologique de la station de Ouargla. Service archives. Ouargla, Algérie.
- **Pomel, S. et al, (2004)** : La signification paléo-impluviométrique des sédiments de la sebkha MHABEUL (Tunisie).
- **Rodier, J. (1984)** : L'analyse de l'eau, 9ème éd, 1353p
- **Tesfaye, C. et al. (2000)**: mechanism of degradation of the quality of natural water in the lakes region of the Ethiopian rift valley. *Wat. Res.* Vol. 35, No. 12, pp. 2819–2832, 2001
- **Tesson et Gensous, (1981)** : La répartition de la fraction argileuse à l'échelle lagunaire et lacs salé.
- **UNESCO (1972)** : Etude des ressources en eau du Sahara Septentrional. Nappe du Continental Intercalaire, Proj. ERESS. Rapport final.
- **UNESCO (1983)**: Actualisation de l'étude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final. 490 p.
- **Yan, J.P. et al., (2001)**: Geochemical evolution of closed-basin lakes: general model and application to Lakes Qinghai and Turkana (Chine), *Sedimentary Geology* 148 (2002) 105–122.