



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA

FACULTÉ DES HYDROCARBURES, ÉNERGIES RENOUVELABLE
ET SCIENCE DE LA TERRE

DÉPARTEMENT DE SCIENCE DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

THÈSE

Présenté pour l'obtention du diplôme de doctorat des sciences

Spécialité : Géologie.

Option : Géochimie de surface.

Présenté par :

Mr. LAMINI Abdellah

THÈME

Étude géochimique et minéralogique
comparative sebkha de N'goussa et chott
Baghdad d'El Hadjira (Ouargla).

Devant le jury d'examen :

Mr. DJIDEL Mohamed	Pr.Univ.de Ouargla	Président.
Mr. HACINI Messaoud	Pr.Univ.de Ouargla	Directeur de la thèse
Mr. CHETTIH Mohamed	Pr. Univ. de Laghouat	Examineur.
Mr. CHERIF Amine	MCA. Univ. de Ouargla	Examineur
Mr. BRINIS Nafea	MCA. Univ. de Batna	Examineur.
Mr. HAMZAOUI Ahmed Hichem	Pr. CNRSM – LVMU- Tunisie	Examineur

Année Universitaire: 2019 / 2020

Dédicaces

C'est avec l'aide de dieu que j'ai pu arriver au terme de ce travail (Thèse de doctorat), que je tiens à dédier le fruit de mes études. Merci Dieu le tout puissant qui m'a éclairé le chemin de la réussite et du savoir.

A mes très chères et adorables parents que dieu les gardent, que m'ont bien encouragé pour atteindre mon but et je les remercie surtout pour leur soutien moral, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leurs prières tout au long de mes études,

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

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

A Mon épouse qui a souffert sans me laisser souffrir, qui a partagé avec moi des moments difficiles au profit de cette thèse.

A mon petit prince Mohamed Wael

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A mes très chers frères

A mes très chères sœurs

Je vous remercie pour votre inquiétude et tendresse.

A tous mes amies intimes

A celles et ceux que je garde enfouie dans mon cœur et mes pensées.

.....Abdellah.....

Remerciements

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

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués à l'université Kasdi Merbah-de Ouargla, faculté des hydrocarbures, énergies renouvelable et science de la terre par le Professeur M. Hacini et directeur de laboratoire géologie de sahara.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma plus profonde gratitude à Mr Hacini Messaud pour la confiance qu'il m'a accordée, pour sa constante disponibilité, pour son soutien et enfin pour la fidélité à son engagement de diriger cette 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.

A Monsieur M. Doubi Abdelmadjid, doyen de faculté des hydrocarbures, énergies renouvelable et science de la terre de l'université Kasdi Merbah – Ouargla.

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 doctorat.

Je remercie Mme Bensaci de m'avoir sollicité pour les analyses physico-chimiques une année de recherches menées dans laboratoire recherche de Géologie de Sahara à l'université de Kasdi Merbah-Ouargla sur la thématique des éléments majeurs, sans lesquels la partie analytique de cette thèse n'aurait pas été achevée. Merci tout autant aux ingénieurs au laboratoire de recherche Mr, Gadjja Omar et tous les techniciens pour leur contribution et leur motivation dans le cadre de ce projet.

A notre très sympathique Ingénieur du laboratoire de recherche CRAPC expertise bousmail-Tipaza et technicien de laboratoire de cartothèque CRD de Hassi Messaoud Sans oublier Mr, Berrabh Mohamed technicien en chef de laboratoire DRX de l'université de M'silla. Sans oublier Mr Benhamida sofiane docteur en physique quantique et analyse physique à l'université Kasdi Merbah Ouargla.

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

J'adresse mes sincères remerciements au nom de Monsieur Chaibi sami et Bouchrit salah Eddine, pour avoir relu et corrigé mon Thèse. Ses conseils de rédaction ont été très précieux,

Je remercie également Bounacer Ismail, Mekhloufi isamil responsable et directeur laboratoire de l'ONA Ouargla pour son aide et m'orienté pour réaliser cette thèse.

Un merci tout spécial à mon camarade Anba EL Hadj 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, sans ablier, Mr Benhamida slimane chef service de l'ANRAH de Ouargla. 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 aissa, Mr Nezlî Imad Eddine, Mr Djidel Mohamed, Mr, Zedouri, Mr Bellaoueur 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 étriquée 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.

J'aimerais dédier ce travail...

A mes amis, auprès desquels je ne peux que m'excuser pour 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

C'est avec la première guerre mondiale que commence l'étude scientifique sur les sels à titre d'exemple la Sebkhah d'El Melah en Tunisie. Il s'agit surtout de travaux scientifiques en liaison avec la production des saumures utilisée comme engrais, Tirés des saumures concentrées du bassin.

A cette époque la présence d'une importante couche de sel était reconnue ainsi que celle d'aïoun légèrement artésiens, sortes de puits naturels drainant les eaux-mères de la couche de sel, dans lesquels ces saumures étaient exploitées.

Sebkhah N'goussa et chott Baghdad sont des bassins endoréiques fermés situés dans le Sahara septentrional Algérien. Il est de 120 m au-dessus du niveau de la mer. Le climat dans cette zone a un changement remarquable avec une longue période de sécheresse et 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 sebkhah ce qui est considéré parmi les grands problèmes dans ces zones sèches et arides. La présence des roches évaporitiques est remarquable tel que le gypse, l'halite, sulfates, ... etc.

L'étude de ces deux zones a été basée sur le traitement de 21 piézomètres couvrant la cuvette endoréique de N'goussa et des échantillons mensuels des eaux salées de chott Baghdad. Les résultats de prospection ont montré que la nappe phréatique de notre zone d'étude est constituée de silts, d'argiles gypseuses, de gypse avec des lentilles de sable. La couverture de cette cuvette est environ de 10 m mais réellement elle n'est pas encore déterminée.

Les deux cuvettes sont en partie alimentées par une nappe phréatique très chargée de saumure qui ont été déposées dans la sebkhah, par évaporation. Ces ressources sont mal valorisées dans la majorité des bassins salins du Sahara septentrional. Ceux-ci se combleraient rapidement par la précipitation saline maintenant les eaux de cette nappe sous phréatique.

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

- Les formations géologiques de cette cuvette sont subdivisées en trois :
 1. Substratum du Miocène qui est mal repéré et peu étudié
 2. Roche de Mio-pliocène de nature conglomératique à gréseuse (Baten)
 3. Quaternaire : alluvion, sols de sebkhah, dunes de sable avec des croûtes calcaires et gypseuses.

Mots clés : Hydrochimie, Hydrogéologie, Sebkhah, Les évaporites.

Abstract

It is with the First World War that the scientific study on salts begins, for example the Sebkh el Melah in Tunisia. This is mainly scientific work in connection with the production of brines used as fertilizer, drawn from concentrated brines of the basin.

At that time the presence of a significant layer of salt was recognized as well as that of slightly artesian aïoun, kinds of natural wells draining the mother liquors of the salt layer, in which these brines were exploited.

Sebkh of N' goussa and Baghdad chott are tow closed basin located in northern Algerian Sahara. It is 120 m above sea level. The climate in this area has a remarkable change with long dry spell at the maximum temperature can reach 45 ° C. The drought influences in the characteristics of the water of the water table and the salty waters of sebkh which is considered among the big problems in these dry and arid zones. The presence of evaporitic rocks is remarkable such as gypsum, halite, sulphates, etc.

The N'goussa sebkh study was based on the treatment of 21 water well and 16 piezometers covering this closed basin, in addition one cycle of surface saline water was sampled from Baghdad chott. The results of prospecting have shown that the water table of those sebkh and chott consists of silts, gypseous clay, and gypsum with sand lenses. The cover of this bowl is about 10 m but really is not yet determined.

This Sebkh is partly feed by water table very full of brine which drains into the basin by the aïouns. These resources are poorly valued in the majorities of saline basins in northern Sahara. These are filled quickly by the saline precipitation now the waters of this water table.

The geological and geochemical characteristics of the evaporitic deposits of the N'goussa sebkh and Baghdad chott, reveal an evolution of the latter in a system of small closed lagoons, where are concentrated salt brines of Na^+ , Cl^- , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , and the effect of evaporation causes the precipitation of gypsum and rock salt.

- The geological formations of this basin are subdivided into three layers:
 1. Substratum of the Miocene who misidentified and my study.
 2. Mio-Pliocene rock of conglomerate nature with sandstone (Baten)
 3. Quaternary: alluvium, sebkh soils, sand dune with calcareous and gypseous crusts.

Key words: Hydrochemistry, Hydrogeology, Sebkh, Evaporates.

ملخص

مع بدء الحرب العالمية الأولى، بدأت الدراسات العلمية حول الأملاح، مثل سبخة الملح في تونس. هذا هو العمل العلمي في الأساس فيما يتعلق بإنتاج المحاليل الملحية المستخدمة كسماد، مستخرج من المحاليل الملحية المركزة في الاحواض. في ذلك الوقت تم التعرف على وجود طبقة كبيرة من الملح وكذلك وجود عيون ارتوازي، أنواع الآبار الطبيعية التي تساعد في حركة هذه المياه لتشكل لطبقة الملح، حيث تم استغلال هذه المحاليل الملحية.

تقع سبخة أنفوسة و شط بغداد في حوض ورقلة ضمن نطاق الصحراء الجزائرية الشمالية. يرتفع ب 120 متر فوق مستوى سطح البحر والمناخ في هذه المنطقة له تغير ملحوظ مع موجة جفاف طويلة عند أقصى درجة حرارة يمكن أن تصل إلى 45 درجة مئوية. يؤثر الجفاف في خصائص ماء المياه الجوفية القريبة من السطح والمياه المالحة في سبخة والتي تعد من بين المشكلات الكبيرة في هذه المناطق الجافة والقاحلة. وجود الصخور التبخيرية لاقت للنظر مثل الجبس والهاليت والكبريتات، الخ.

استندت دراسة سبخة أنفوسة على علاج 21 بئر ماء و 16 مقياس بيزومتري يغطي هذه المنطقة المنخفضة و المغلقة نسبيا وكذا عينات دورية للمياه السطحية لشط بغداد لمدة عام كدورة جيوكيميائي . أظهرت نتائج التقيب أن المجرى المائي لهذا السبخة يتكون من الطمي والطين الجبسي والجبس مع العدسات الرملية. يبلغ مستوى الرواسب السطحية لهذا الوعاء حوالي 10 أمتار ولكن لم يتم تحديده بعد.

تغذى هذه السبخة جزئياً بواسطة مياه مشبعة بالمحاليل الملحية الذي يصب في الحوض بواسطة العيون. هذه الموارد لم يتم دراستها في غالبية أحواض المياه المالحة في شمال الصحراء. تمتلئ هذه بسرعة من قبل ترسبات المياه المالحة و مياه الجداول.

تكشف الخصائص الجيولوجية والجيوكيميائية للرواسب التبخيرية لمنطقتي أنفوسة و الحجيرة عن تطور الأخير في نظام البحيرات المغلقة الصغيرة ، حيث توجد المحاليل الملحية المركزة Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} و تأثير التبخر يسبب توضع الرواسب الرسوبية الكيميائية المتبخرات الكلس، الجبس، ومختلف اصناف الاملاح مثل الهاليت

تنقسم التكوينات الجيولوجية لهذا الحوض إلى ثلاثة:

1. الطبقة التحتية للميوسين الذي لم يتم تحديده فعليا.
2. الصخور ميو - بليوسين ذات الطبيعة التكتلية بالحجر الرملي (باتن).
3. رباعي: الغريني ، التربة السبخة ، الكتبان الرملية مع القشور الجيرية والجبسية.

الكلمات المفتاحية: كيمياء مائية ، جيولوجيا مائية ، سبخة ، متبخرات.

Sommaire

Dédicaces	i
Remerciements	iii
Résumé	iii
Sommaire	iv
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vi

INTRODUCTION GENERALE

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

CHAPITRE I :

HYDROCLIMATOLOGIE

I.1 Introduction.....	4
I.2 Station Climatique de Ouargla.....	4
I.3 Situation géographique	5
I.4 Mécanismes climatiques généraux et données climatiques	7
I.5 Les différents diagrammes comme indice de climat.....	8
I.5.1 Diagramme Ombrothermique	8
I.5.2 Indice de De Martonne:.....	9
I.5.3 Indice d'aridité mensuel:.....	10
I.5.4 Climagramme de Louis Emberger :	12
I.5.5 Indice de Paul Moral :	13
I.5.6 Comparaison des indices climatiques :	14
I.6 Les facteurs climatiques.....	14
I.6.1 La Température	14
I.6.2 La pluviométrie	16
I.6.3 L'humidité de l'air	17
I.6.4 L'insolation	18
I.6.5 Le vent	18
I.7 Estimation de l'évapotranspiration	19
I.7.1 L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	19
I.7.2 D'ETP De Thornthwaite (1948)	19
I.7.3 D'ETP de Turc.....	20
I.7.4 D'ETP de la formule de Hargreaves	21
I.7.5 Comparaison des formules D'ETP	22

I.8 Bilan hydrologique.....	23
I.8.1 Calcul du bilan hydrologique par la méthode de Thornthwaite	24
I.8.2 Commentaire sur le bilan hydrologique	25
I.9 Conclusion	25

CHAPITRE II :

CONTEXTE GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

II.1 Introduction	27
II.2 Cadre géologique régional.....	27
II.3 Historique des études de plateforme saharien	28
II.4 Stratigraphie.....	29
II.4.1 Le Paléozoïque.....	30
II.4.1.1 Le cambrien	30
II.4.1.2 Ordovicien	31
II.4.1.3 Silurien.....	31
II.4.1.4 Dévonien.....	31
II.4.1.5 Périmo-Carbonifère	31
II.4.2 Le Mésozoïque.....	31
II.4.2.1 Trias	32
II.4.2.2 Le Jurassique	32
II.4.2.3 Crétacé	32
II.4.3 Le Cénozoïque	33
II.4.3.1 L'Eocène.....	33
II.4.3.2 Le Mio-Pliocène	33
II.4.4 Le Quaternaire	34
II.5 Reconstitution paléogéographique.....	34
II.6 Hydrogéologie	36
II.6.1 les ressources en eau superficielles.....	36
II.6.1.1 Oued M'Zab	37
II.6.1.2 Oued Mya	37
II.6.1.3 Oued N'sa.....	38
II.6.2 Les aquifères du Sahara septentrional	39
II.7 Géomorphologie et unités géomorphologiques	40
II.7.1 Les dépressions fermées les chotts et les sebkhas	41
II.7.2 Les regs.....	41
II.7.3 La hamada :	41
II.7.4 Les ergs (dunes) :.....	42

II.8 Les grands domaines sédimentaires des évaporites	42
II.8.1 domaine des formations détritiques	42
II.8.2 Le domaine algo-sédimentaire.....	43
II.8.3 Domaine des facies de gypse	43
II.8.4 Le domaine halitique (halite).....	43
II.9 Aperçu Tectonique	44
II.10 Conclusion.....	46

CHAPITRE III :

MATERIELS ET METHODES

III.1 Introduction.....	47
III.2 La campagne d'échantillonnage	47
III.3 Protocole d'échantillonnage des solutions	47
III.3.1 Echantillonnage des eaux souterraines	50
III.3.1.1 Généralités.....	50
III.3.1.2 Les piézomètres de sub-surface.....	50
III.3.1.3 Type d'échantillonnage	51
III.3.2 Conditionnement des échantillons en solution	52
III.3.2.1 La Filtration.....	52
III.3.2.2 Le stockage.....	52
III.3.2.3 Techniques de mesures et d'analyses	53
III.4 Protocole d'échantillonnage des sédiments et des roches	60
III.4.1 Préparation des échantillons solides.....	60
III.4.2 Tamisage des sédiments et séparation de la fraction inférieure à 2 mm	61
III.4.3 Broyage des échantillons pour analyse DRX et MEB.....	61
III.4.3.1 Diffraction en rayonnement X (DRX).....	62
III.4.3.2 Microscope électronique à balayage (MEB)	63
III.5 Logicielle et software	64
III.5.1 Phreeqc interactive	64
III.5.2 Diagramme de piper	65
III.5.3 surfer 9.....	65
III.5.4 X pert high-score Plus	65
III.6.Conclusion.....	66

CHAPITRE IV :

APERÇU GEOLOGIQUE SUR CHOTT ET SEBKHA DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1 Introduction.....	68
IV.2 Les chotts et sebkhas dans sahara septentrionale.	68

IV.2.1 Les évaporites de cuvette	69
IV.2.2 Les évaporites de plate-forme	69
IV.2.3 Le sel et ses multiples visages.....	69
IV.3 Voyage d'exploration de V. Almand Alger Ouargla passant par N'goussa.	70
IV.4 Présentation de la zone d'étude.....	70
IV.4.1 Sebkha de N'Goussa	71
IV.4.2 Chott Baghdad.....	73
IV.5 La couverture continental récent de la dépression	76
IV.5.1 Coupe géologique dans les affleurements du surface (Zone de N'goussa).....	76
IV.5.2 Corrélation géologique des carottes dans chott Baghdad.....	79
IV.6 Analyse sédimentologique et granulométrique.....	81
IV.6.1 Granulométrie des sédiments zone sebkha de N'goussa.....	81
IV.6.1.1 Discussion des analyses granulométrique	82
IV.6.1.2 Morphoscopie.....	84
IV.6.1.3 Mobilité du sable par le vent.....	87
IV.6.2 Granulométrie des sédiments dans Chott Baghdad.....	90
IV.6.2.1 Discussion des analyses granulométrique	90
IV.6.2.2 Morphoscopie des grains de quartz.....	91
IV.7 Géomorphologie et Pédologie.....	91
IV.7.1 Cadre géomorphologique dans sebkha de N'goussa.....	92
IV.7.1.1 Le contexte et structure épi-génique dans zone de N'goussa.....	93
IV.7.2 La morphologie de surface de sebkha Baghdad.....	94
IV.7.3 Contexte pédologique.....	96
IV.7.3.1 Etude macro et micro-morphologique de sol	96
IV.7.3.2 Les dunes de sable.....	97
IV.7.3.3 Terrain à motifs zone de contact et zone de drainance.....	98
IV.7.3.4 Effet de contact eau et sol salé	99
IV.7.4 La source des sels dans chott et sebkha continental.....	100
IV.7.4.1 Mécanisme de la salinisation des sols	102
IV.7.4.2 Le gypse et Halite dans les sols désertiques et les croûtes gypseuse souterraines	103
IV.7.4.3 Collecteur et réseaux de drainage.....	107
IV.8 Processus de formation du sol.....	107
IV.8.1 Salinisation.....	107
IV.8.2 Calcification et décalcification.....	108
IV.8.3 Gypsification.....	108
IV.9 L'origine de la dépression et cuvette allongé de l'Ouargla jusque d'El Hadjira	109

IV.9.1 L'origine de la dépression et cuvette allongé de l'Ouargla.....	109
IV.9.2 La reconstitution et l'origine de la dépression de chott Baghdad	111
IV.10 L'évolution de cuvette de Ouargla dans l'ère quaternaire	112
IV.11 Conclusion	114

CHAPITRE V :

HYDROCHIMIE ET MINERALOGIE DE CHOTT ET SEBKHA DE LA ZONE D'ETUDE

V.1 Introduction	115
V.2 Historique des études dans la zone de chott et sebkha	116
V.3 Les puits de la nappe de complexe terminal.....	117
V.3.1 Site d'échantillonnage de la nappe complexe terminal	117
V.3.2 Variation spatiale des paramètres physico-chimique	118
V.3.3 Présentation des éléments majeur dans la nappe de complexe terminal zone de N'goussa.	122
V.4 Hydrologie de surface	123
V.5 la nappe phréatique saline	124
V.5.1 Evaluation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques de l'eau de sebkha:	125
V.5.2 Variation temporelle des paramètres physico-chimiques.....	125
V.5.3 Variation spatiales des paramètres physico-chimique.....	126
V.5.3.1 Variation de température	126
V.5.3.2 Variation de potentiel hydrogène (Ph).....	128
V.5.3.3 Variation de Conductivité électrique.....	130
V.5.3.4 Variation de densité.....	132
V.5.3.5 Variation du niveau piézométrique.....	134
V.5.4 Répartition et variation des éléments majeur	136
V.5.4.1 Variation temporelle des cations et des anions.....	136
V.5.4.2 Interprétation des résultats d'analyses et des cartes d'isoteneurs des éléments chimiques et des rapports caractéristiques.....	138
V.5.4.3 Faciès chimiques des eaux.....	139
V.6 Evaporation isotherme des échantillons dans sebkha de N'goussa.....	140
V.6.1 Evaporation	140
V.6.2 Variation de pourcentage des éléments pendant l'évaporation isotherme.....	141
V.7 Equilibre entre minéraux et solutions.....	145
V.7.1 Concentration des eaux par évaporation.....	145
V.7.1.1 Réaction de dissolution.....	145
V.7.1.2 Réaction de précipitation.....	146
V.8 Diagrammes binaires des éléments chimiques dans sebkha de N'goussa.....	146
V.8.1 Les eaux de complexe terminale	146

V.8.2 les eaux de sebkha	147
V.8.3 les eaux d'évaporation isotherme	148
V.9 Diagrammes binaires des éléments chimiques dans chott Baghdad.....	149
V.9.1 Le diagramme binaire sodium-chlore (Na-Cl)	149
V.9.2 Le diagramme binaire (Ca-Cl) et (Mg-Cl)	151
V.9.3 Les diagrammes binaires (SO ₄ -Cl) et (K-Cl).....	152
V.10 Diagrammes d'équilibre des éléments chimiques	153
V.11 Indices de saturation	155
V.11.1 Indices de saturation les eaux de sebkha de N'goussa.	155
V.11.2 Indices de saturation les eaux de Chott Baghdad	157
V.11.3 Processus d'évaporation dans les systèmes fermés	159
V.12 Discussion résultats de DRX et de MEB.....	161
V.12.1 présence géologique et importance industrielle des évaporites	161
V.12.2 Analyses minéralogiques d'échantillons de sel par DRX dans sebkha de N'goussa	162
V.12.3 Analyses minéralogiques d'échantillons par MEB	163
V.12.4 Analyses minéralogiques d'échantillons de sel par DRX dans chott Baghdad.....	166
V.12.5 Description des espèces minérales	168
V.13 Interaction entre les eaux d'irrigation et eaux nappe superficielle	169
V.14 Conclusion.....	170
CONCLUSION GENERAL	
Conclusion générale	171

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

Liste des figures

Fig.1. 1 Carte représentatif des bassins du plate-forme saharienne en Algérie. Modifié	6
Fig.1. 2 Situation géographique cuvette de Ouargla et N'goussa.	7
Fig.1. 3 Situation d'N'goussa par rapport aux oasis nord-africaines. Les limites des zones telliennes, steppiques et sahariennes sont les isohyètes 400, et 100 mm. Modifié.....	7
Fig.1. 4 Courbe Ombrothermique de la station d'Ouargla.....	9
Fig.1. 5 Abaque de l'Indice d'aridité mensuel de De Martonne (1923).....	11
Fig.1. 6 Climagramme d'Emberger de la station d'Ouargla.	13
Fig.1. 7 Indices de Paul Moral (IM) à la station d'Ouargla.	14
Fig.1. 8 La carte mondiale des terres arides, Overblog, 2013.	14
Fig.1. 9 Evolution de la température moyenne annuelle à N'goussa entre 2005 et 2018.....	15
Fig.1. 10 Evolution des températures moyennes mensuelles à N'goussa entre 2005 et 2018.....	15
Fig.1. 11 Evolution des précipitations annuelles de N'goussa entre 2005 et 2018.	16
Fig.1. 12 Pluviosité moyenne mensuelle à N'goussa entre 2005 et 2018.	16
Fig.1. 13 Répartition des précipitations moyennes dans le Bassin méditerranéen.	17
Fig.1. 14 Variation de l'humidité moyenne mensuelle à N'goussa entre 2005 et 2018.	17
Fig.1. 15 Evolution de l'humidité mensuelle à Ouargla (2005-2018).	18
Fig.1. 16 Evolution de l'ETP mensuelle à N'goussa entre 2005 et 2018.	19
Fig.1. 17 L'ETP estimée par différentes méthodes.	22
Fig.1. 18 L'ETP estimée par différentes méthodes.	23
Fig.2. 1 Carte géologique du Bas-Sahara.	28
Fig.2. 2 Carte géologique du Zone d'étude (sahara septentrionale).	28
Fig.2. 3 Trajets des voyages de Conrad Kilian.....	29
Fig.2. 4 Coupe Nord-Sud montrant les principales unités structurales de l'Algérie.	29
Fig.2. 5 Colonne stratigraphique typique du Sahara septentrional.	30
Fig.2. 6 Coupe géologique du Sahara.	34
Fig.2. 7 Principales zone chott et sebkha de sahara septentrionale de Ouargla jusque chott Melghir (confins Algéro-tunisienne).	35
Fig.2. 8 Représentation schématique de la sédimentation Mio-pliocène en Tunisie et en Algérie lors de la crise messénienne.	36
Fig.2. 9 Oued Mya et origine des sable du continental intercalaire.	38
Fig.2. 10 Les oueds de la dorsale du M'Zab.	38
Fig.2. 11 Le différents zone des aquifères dans l'Afrique et Sahara septentrionale.....	39
Fig.2. 12 Les formations géologique et les aquifère du bas sahara algérien.	40
Fig.2. 13 La géomorphologie et milieux de dépôt dans milieux aride et saharienne.	41
Fig.2. 14 Coupe schématique représente paléo-vallée de la région d'Ouargla.	42
Fig.2. 15 Modèle simplifié d'un bassin à évaporites montrant différent domaines cuvettes salines.	43
Fig.2. 16 Processus de précipitation des évaporites et des sels.	44

Fig.2. 17 Image satellite des différents domaines tectonique représente l’Afrique de nord et sahara septentrional. ...	45
Fig.2. 18 Cadre tectonique de l’afrique de Nord et sahara septentrionale.....	45
Fig.3. 1 position des points d’échantillonnage sebkha de N’goussa	48
Fig.3. 2 Répartition des Piézomètre dans sebkha de N’goussa.	48
Fig.3. 3 Puits d’eau destiné pour l’irrigation.....	48
Fig.3. 4 Préparation des tubes des Piézomètre en PVC.....	50
Fig.3. 5 Photo de piézomètre NG_12 dans zone 03 sebkha de N’goussa	51
Fig.3. 6 Tarière creuse manuelle.....	51
Fig.3. 7 Méthode d’échantillonnage par quadrillage.....	52
Fig.3. 8 Principe de la filtration.	52
Fig.3. 9 Multi-paramètre a pailleasse.	53
Fig.3. 10 Multiparamètre PH et cond Hanna HI 9829	53
Fig.3. 11 Appareil à filtration sous vide en verre par raccord rodé.....	54
Fig.3. 12 Principe Emission de flamme (lois de Berr-Lambert).	55
Fig.3. 13 spectrophotomètre à émission de flamme type JENWAY PFP7.	55
Fig.3. 14 Courbe d’étalonnage du sodium.	56
Fig.3. 15 Courbe d’étalonnage du potassium.	56
Fig.3. 16 Courbe d’étalonnage du calcium.	56
Fig.3. 17 Mode typique d’un titrage.....	57
Fig.3. 18 Potentiomètre automatique avec Metrohm.	59
Fig.3. 19 Evolution du potentiel en fonction du volume ajouté de nitrate.	60
Fig.3. 20 Série de tamis utilisé dans le tamisage de sable région d’étude.....	61
Fig.3. 21 Géométrie Bragg- Brentano expliquant la loi de Bragg par analogie à la réflexion.	62
Fig.3. 22 Microscope électronique à balayage FEI Quanta 250.....	64
Fig.4. 1 Schéma des faciès du Lias, du Nord-Est de la plateforme saharienne et de la Tunisie atlasique d’après	69
Fig.4. 2 Localisation de l’oasis de N’goussa (sebkha), au milieu du Sahara Algérienne.	72
Fig.4. 3 : Situation géographique du chott Baghdad.....	74
Fig.4. 4 : Photos des différents niveaux de sebkha Baghdad.	75
Fig.4. 5 : Coupe simplifié des formations qui affleurement proche de sebkha Baghdad.	76
Fig.4. 6 Coupe géologique représente les formations de quaternaire dans la cuvette de N’goussa.	76
Fig.4. 7 Représentation morphologique des affleurements cuvette de N’goussa.	77
Fig.4. 8 Les séries de gypse et leur datation dans sebkha NO de Ouargla.	78
Fig.4. 9 Les affleurements des séries de gypse dans la région de N’goussa.	79
Fig.4. 10 Localisation des stations de prélèvements et lithologie des sédiments carottés].	80
Fig.4. 11 Corrélation lithologique des carottes de sebkha Baghdad.	81
Fig.4. 12 points d’échantillonnages de sable pour l’étude granulométrie.	82
Fig.4. 13 Diagramme cumulative.....	83
Fig.4. 14 Comparaison des courbes granulométrique entre différent type de sable et sable zone des zones étudiées.	84

Fig.4. 15 Micrographies MEB montrant la forme des particules de diamètre <45 µm à la surface et dans zone de dépôt de sebkha de N'goussa (NG_09 et NG_18)	86
Fig.4. 16 Photo satellite de sebkha de N'goussa.	87
Fig.4. 17 Morphoscopie de grains de sable éolien sebkha de N'goussa sous microscope binoculaire x4.	88
Fig.4. 18 Coupe schématique d'une sélection transversale des dépôts de dunes, inter-dunes et extra-dunes.	89
Fig.4. 19 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.	90
Fig.4. 20 Le Profile transversale et points le plus base dans sebkhas de N'goussa.	92
Fig.4. 21 Le Profile transversale et points le plus haute dans sebkhas de N'goussa.	92
Fig.4. 22 Structure de relief dans zone de N'goussa (structure tabulaire).	94
Fig.4. 23 Contact eau souterrain avec sebkha.	95
Fig.4. 24 Fente de dessiccation dans zone inondé de chott Baghdad.	96
Fig.4. 25 Dune d sable dans la terrasse	97
Fig.4. 26 Dune de sable s'allonge des grès	97
Fig.4. 27 La zone de contact entre nappe phréatique et surface de sebkha.	98
Fig.4. 28 Coupes transversales des principaux types de Gilgai.....	99
Fig.4. 29 photos des différents niveaux de sebkha N'goussa	100
Fig.4. 30 Principales caractéristiques hydrologiques des bassins hydrologiquement fermés.....	101
Fig.4. 31 Différents sources d'alimentation de la sebkha type sahara septentrionale par les eaux chargées des minéraux évaporitiques.	102
Fig.4. 32 Quelque figure sur la salinisation et remonté des eaux dans zone N'goussa.	102
Fig.4. 33 Cristaux de sel de gypse apparu dans zone d'étude.	104
Fig.4. 34 Différents forme de cristallisation de Gypse pendant évaporation isotherme.....	105
Fig.4. 35 Différents forme de cristallisation d'halite pendant évaporation isotherme.	106
Fig.4. 36 Collecteur et réseaux de drainage des eaux d'irrigation	107
Fig.4. 37 les croutes gypseuse dans partie est de sebkha de N'goussa.....	109
Fig.4. 38 Coupes transversales schématiques illustrant la manière dont les sables de dunes non consolidés peuvent être préservés dans cuvette qui forme chotte et sebkha.	111
Fig.4. 39 Différents types des bassins évaporitiques (chottes et sebkhas Ouargla).....	110
Fig.4. 40 Carte de répartition des principaux des paléo-lacs sahariens avec indication de leurs âges respectifs.	113
Fig.5. 1 Position des puits d'eau dans la cuvette de N'goussa.	118
Fig.5. 2 Diagramme de piper représente les facies chimique des eaux d'irrigations (Complexe terminal).	119
Fig.5. 3 Variation des paramètres physico-chimiques des puits complexe terminal cuvette de N'goussa.....	120
Fig.5. 4 représentation des éléments majeurs pour puits de complexe terminale (A et B).....	121
Fig.5. 5 Variation des éléments majeurs des puits de complexe terminal dans cuvette de N'goussa.	122
Fig.5. 6 Mares dans sebkha de N'goussa.	124
Fig.5. 7 forage dans nappe phréatique à utilisation pour l'irrigation	125
Fig.5. 8 Relation de la conductivité électrique en fonction de magnésium des eaux de la nappe phréatique.	126
Fig.5. 9 Variation de Température.	126
Fig.5. 10 Variation Temporelle de Température ou niveau des piézomètres.	127

Fig.5. 11 Cartes de variation spatiale de T°C à l'entour de sebkha N'goussa	127
Fig.5. 12 variation de potentiel Hydrogène (Ph).	128
Fig.5. 13 Variation Temporelle de Ph ou niveau des piézomètres.	128
Fig.5. 14 Cartes de variation spatiale de ph à l'ent de sebkha N'goussa.	129
Fig.5. 15 Variation de conductivité.	131
Fig.5. 16 Variation Temporelle de la conductivité ou niveau des piézomètres.	131
Fig.5. 17 Cartes de variation spatiale de conductivité à l'entour de sebkha N'goussa.	132
Fig.5. 18 Cartes de variation spatiale de densité à l'entour de sebkha N'goussa	133
Fig.5. 19 Variation Temporelle de la densité ou niveau des piézomètres.	134
Fig.5. 20 Différent systèmes de circulation pour la nappe phréatique	135
Fig.5. 21 Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla, période 1992-2002.	136
Fig.5. 22 Variations des éléments majeurs dans sebkha de N'goussa.	137
Fig.5. 23 Variations des éléments majeurs dans sebkha de N'goussa.	138
Fig.5. 24 Diagramme de piper représente les facies chimique des eaux d'sebkha de N'goussa.	140
Fig.5. 25 Conduite des essais d'évaporation.	142
Fig.5. 26 Variation des pourcentages des éléments majeurs au cours de l'évaporation	144
Fig.5. 27 Variation des pourcentages des éléments majeurs au cours de l'évaporation	144
Fig.5. 28 Variation des éléments chimique pendant évaporation de l'eau de mère noire.	144
Fig.5. 29 Variation des éléments chimique pendant évaporation isotherme de l'eau de sebkha de N'goussa	145
Fig.5. 30 Diagramme binaires avec corrélation et corrélation entre Na et Cl, Mg et Ca des eaux de la nappe CT... ..	147
Fig.5. 31 Diagramme binaires avec corrélation et corrélation entre SO ₄ /Cl et Cl, Mg/Cl et Cl des eaux de la nappe CT.....	147
Fig.5. 32 Diagramme binaires et corrélation pour les eux sebkha de N'goussa.	148
Fig.5. 33 Diagramme binaires et corrélation pour les eux sebkha de N'goussa piézomètres NG_09 et NG_18 après évaporation isotherme.....	149
Fig.5. 34 Variations de la concentration du chlorure et de sodium et en fonction du temps, de janvier au décembre 2011.	150
Fig.5. 35 Concentration des sodiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.....	151
Fig.5. 36 Concentration relation entre Ca/Cl et Mg/Cl (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.....	152
Fig.5. 37 Concentration relation entre SO ₄ /Cl et K/Cl (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions.	153
Fig.5. 38 Équilibre des saumures dans sebkha de N'goussa.	155
Fig.5. 39 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebkha N'goussa (janvier 2017)	156
Fig.5. 40 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebkha N'goussa (Avril 2017)	156
Fig.5. 41 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebkha N'goussa (juillet 2018).....	157
Fig.5. 42 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebkha N'goussa (Octobre 2018).....	157
Fig.5. 43 Les indices de saturation des minéraux carbonatés précipités	158
Fig.5. 44 Les indices de saturation des minéraux chlorurés précipités	158
Fig.5. 45 Les indices de saturation des minéraux sulfatés précipités	159

Fig.5. 46 Diagramme simplifié l'évolution d'évaporation d'un bassin fermé des saumure, avec une plus grande concentration par évaporation vers le bas de processus. 160

Fig.5. 47 DRX des sels dans zone d'étude à partir d'un échantillon de piézomètre au centre sebkha de N'goussa. 162

Fig.5. 48 Image par MEB de différents minéraux trouvés dans sebkha de notre zone d'étude. 164

Fig.5. 49 Images au MEB des particules de sel après l'évaporation isotherme point NG_09 dans sebkha de N'goussa. 165

Fig.5. 50 Images SEM de différents modèles de croissance de NaCl cristaux.. 166

Fig.5. 51 Les Spectres des sels d'échantillon N°1, 2 et 3 de chott Baghdad..... 167

Fig.5. 52 Les Spectres des sels d'échantillon N°7, 9 et 10 de chott Baghdad 167

Fig.5. 53 Mécanisme de remonté des eaux des aquifères de profondeur (drainance). 169

Liste des tableaux

Tab.1. 1 Les coordonnées de la station climatique de Ouargla.....	5
Tab.1. 2 Indices de De Martonne (I) à la station d'Ouargla.....	9
Tab.1. 3 Classification des climats selon l'indice de Martonne.....	10
Tab.1. 4 Indices d'aridités mensuelles (I) à la station d'Ouargla pour l'année 2016.....	11
Tab.1. 5 Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Thornthwaite.....	20
Tab.1. 6 Valeurs de l'ETP estimées par la méthode de Turc.....	21
Tab.1. 7 Valeurs de l'ETP estimées par la formule de Hargreaves.....	21
Tab.1. 8 Bilan hydrologique moyen (2005-2018) à la station d'Ouargla, par la méthode de Thornthwaite.....	24
Tab.1. 9 Bilan hydrologique moyen à la station d'Ouargla, par la méthode de Thornthwaite (2017).....	24
Tab.4. 1 Paramètres granulométriques par rapport à la moyenne.....	84
Tab.4. 2 Paramètres granulométriques par rapport à la moyenne.....	91
Tab.4. 3 Distribution granulométrique des quantiles.....	91
Tab.4. 4 Datation avec ^{14}C des différentes zones plateforme saharienne (Sebkha de N' goussa).....	113
Tab.5. 1 Statistiques élémentaires des différents paramètres physico-chimiques mesurés.....	123
Tab.5. 2 Récapitulatif des ressources de sel.....	141

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les lacs salins ont des caractéristiques environnementales importantes, avec des impacts géochimiques sur l'écologie, les ressources en eau et activité économique dans le monde. Les Précipités chimiques des ces lacs salins et des paléo-lacs fournissent un éventail de produits industriels? Ressources minérales, y compris le carbonate économiquement crucial, chlorure et minéraux de sulfate. La géochimie des lacs salins varie sur plusieurs échelles de temps et ils sont le produit d'un système complexe impliquant des précipitations, intempéries, eaux souterraines, évaporation, précipitations– réactions de dissolution et activité biologique

A ce regard, les oasis, de la zone d'étude les deux chotts N'goussa et Baghdad d'El Hadjira sont un bon exemple de systèmes à forte variabilité spatiale conjuguée en plus avec un isolement important du milieu extérieur. L'environnement climatique y est agressif, l'eau rare et le drainage souvent déficient. Les sols y sont quelquefois très salés et cependant ils sont cultivés depuis des siècles [1].

Des études anciennes ont été élaborées dans ces zones tel que les principales études qui ont ainsi été menées sur ces cuvettes endoréiques saline pendant plus de quarante à trente ans : fonctionnement général du salin et inventaire biologique général [2], hydrochimie des saumures libres [3], hydrochimie des saumures interstitielles, bactéries des saumures et des sédiments [4], sédimentologie générale [5], géochimie organique et minérale [6], palynologie [7]. Les études qui ont été faites par M Flamand ont décrit les grandes dépressions du Sud de Oranie, chotts et sebkhas, mekamens et mechereg [8]. L'étude que Madeleine Rouvillois-brigol consacre au pays de Ouargla (complexe de palmeraies et de ksour qui, sur 60 km, occupe le lit, étroit au Sud, dilaté jusqu'à 18 km au Nord, de l'Oued Mya, au Sahara algérien) a pour objectif d'éclairer les mutations récentes de cet espace rural, organisé autour de Ouargla [9].

Les oasis sont actuellement l'objet de soins attentifs des gouvernements, sociaux d'y fixer les populations nomades. De nombreux programmes de développement y -sont entrepris [1]. La formation des lacs salés chott et sebkha est généralement contrôlée en grande partie par les changements temporels et spatiaux des précipitations à l'intérieur du bassin. Ces précipitations des sels au sein de ces oasis (chott et sebkha) contiennent des richesses très importantes sur le plan économique, actuellement est mal valorisé. Au Sahara sud-est d'Algérie dans un climat désertique sèche, il y a

plusieurs Chotts et sebkha d'allongements Nord est sud-ouest. Dans le grand Erg Oriental, plusieurs lacs salés sont présents de point de vue superficiele tels que, chott Melghir, chott Merouane, chott Baghdad, sebkha Sefioune. Ces chotts constituent une vaste bande qui s'étale du sud tunisien jusqu'au mont d'Atlas au nord algérien [10]. Ces zones humides en milieu aride offrent aux populations humaines des ressources économiques considérables, dont l'exploitation est si ancienne que ces populations ont développé un savoir-faire, des cultures de valeur patrimoniale inestimable. Ces zones peu nombreuses par rapport aux régions humides traduisent une pression sur le développement car l'eau est rare dans cette région [10].

Ces ressources sont d'ordre de salinité entre les principaux types de dépôts s'établissent comme suit : salinité de l'eau de mer normale - faciès bio-détritiques - environ 60 g/l, faciès algo-sédimentaires - environ 150 g/l, faciès gypso-algaires environ 320 g/l, halite. Bien que ce marais salant, dont la production est de l'ordre de 1 million de tonnes/an, soit de taille très supérieure à la moyenne, la gamme complète des faciès s'étale sur une distance horizontale qui ne dépasse pas une quinzaine de kilomètres [11].

Actuellement, plusieurs méthodes analytiques sur terrain sont disponibles pour faciliter les tâches sur terrain (mesure sur place). Les outils sur le terrain se développent, des sondes électriques et électromagnétiques permettent des mesures répétées sur un espace plus vaste alors qu'en même temps se développe la théorie des variables régionalisées. L'utilisation de descripteurs pertinents permet alors d'élaborer des stratégies d'échantillonnage, utiles dans les systèmes à forte variabilité spatiale [1].

Dans cette étude nous allons déterminer l'effet condition extérieur tel que température, taux de précipitation, sur la nature des eaux de chott de notre zone d'étude en utilisant les résultats analytiques des éléments majeurs 'anion et cation', Le traitement est fait à l'aide du logiciel Phreeqc et en fin l'analyse en composante principale.

Donc, on s'est basé sur une étude hydrogéologique dans le sous bassin de la région dont le but est de classer les eaux de la nappe phréatique de la région, qui sont connues 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.

Les objectifs de ce projet s'articulent autour de quatre axes :

- 1) Identifier des occurrences d'eau surface et de sub-surface minéralisée autour de sebkha N'goussa et chott Baghdad,
- 2) évaluer les variations hydrogéochimiques spatiales et temporelles des occurrences,
- 3) Proposer une origine probable des eaux souterraines minéralisées,
- 4) corrélérer la géologie des secteurs échantillonnés avec la chimie de l'eau.

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

La présente étude est constituée de cinq Chapitres : Chapitre I : hydroclimatologie et chapitre II : géologie régionale et locale de la région d'étude, Chapitre III : Matériels et méthodes: consacrée à la présentation des stations de prélèvement, échantillonnages, prélèvement et les analyses physico-chimiques et Chapitre IV : la géologie de zone d'étude(Sebka de N'goussa et chott Baghdad) puis Chapitre V analyse hydrochimique de chott zone d'étude qui traite la qualité des paramètres physicochimiques de l'eau durant deux cycle géochimique pour sebkha de N'goussa et une cycle géochimique dans chott Baghdad.

La préservation de ces milieux (chotte et sebkha) y revêt d'une importance particulière du fait de la mobilisation de la quasi-totalité des ressources en eau [12]. Les moyens mis en œuvre, forages et extensions remettent en effet en question les équilibres entre les sols, les eaux et la végétation.

L'objectif de cette thèse est de contribuer à l'acquisition et la valorisation d'une base de données chimiques et piézométriques de la nappe phréatique et les aquifères afin d'identifier les processus hydrogéochimiques actuels et passés dans la région d'étude. Le sujet de la thèse a pour base scientifique le volet géochimique du programme "Impacts climatiques et anthropiques sur le fonctionnement hydrologique dans le bassin hydrographique de N'goussa et zone d'El Hadjira (Chott Baghdad).

CHAPITRE I :
HYDROCLIMATOLOGIE

I.1 Introduction

Les classifications efficaces du climat mondial et régional reposent principalement sur une évaluation complexe des relevés climatiques, parfois complétés par des informations hydro-climatique. En raison de bases de données insuffisantes, notamment le nombre de stations climatologiques et la durée de séries chronologiques disponibles pour les différents éléments climatiques dans différentes zones, ces les classifications ont divers degrés de faiblesse. De plus, les classifications imposent des frontières nettement dessinées sur les zones naturelles de transition climatique. De plus, le climat types analysé dans une étude souvent de manière crédible que le centre de la région et la fiabilité de cette la typification décroît avec l'éloignement de ce centre. En outre, efficace les classifications climatiques sont des systèmes statiques qui ne tiennent pas compte des fluctuations climatiques [13].

La région de N'goussa et d'El Hadjira sont située dans le prolongement du grand bassin de la partie nord Est du Sahara Algérien. Les études et les expériences faites sur le climat méditerranéen et saharien remontent à 1926 par De Martonne, Kipper 1936, L. Emberger 1941, Dubief 1953, Gaussen 1957. Pour mieux cerner la question climatique, nous devons, avant tout, d'exposer quelques notions sur les différents éléments de climat.

Dans un premier temps, nous présentons différents indices dits "bioclimatiques" qui, en combinant différents facteurs de l'atmosphère, donnent des indications quant aux conditions moyennes d'aridité ou de sécheresse "atmosphérique". Dans un second temps, trois méthodes simples d'estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP) sont présentées.

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 saumure des sebkhas. Les phénomènes de précipitation des évaporites et leur dissolution sont étroitement liés aux conditions climatiques de la zone d'étude[14]. Il est très important d'examiner et interpréter les principaux facteurs climatiques et leur influence dans le chimisme des eaux dans notre zone d'étude.

I.2 Station Climatique de Ouargla

La station pluviométrique se situe dans la wilaya d'Ouargla Sahara septentrionale d'Algérie. Il s'étend du 5° au 19° 22" de latitude nord et du 31° au 57° 17" de longitude est. Il occupe une superficie de près de 163230 km². Ses limites naturelles sont formées par une série des dunes de l'Erg Orientale. Les coordonnées de cette station sont mentionné dans **tableau.1.1**.

Tab.1. 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 Situation géographique

La région d'étude se situe dans Sud-Est du Sahara algérien au niveau de la plate-forme saharienne. Des ergs (massifs de dunes de sable) et des regs (plateaux caillouteux) constituent les paysages de la zone étudiée. Les affleurements se rencontrent dans le lit des oueds limités par des hamadas (plateaux). L'altitude moyenne de la zone est comprise entre 123 et 315 m celle de chef-lieu Ouargla (une zone presque plane).

La plate-forme saharienne qui occupe une très grande surface de la partie septentrionale du continent africain correspond à l'une des plus grandes plates-formes précambriennes au monde. Elle est aujourd'hui constituée de l'association de plusieurs bassins intra-cratoniques d'âge paléozoïque. On distingue bassin d'Oued Mya **figure.1.1**. C'est le bassin de notre zone d'étude.

Le pays d'Ouargla contient une zone humide qui longe sur une grande distance le lit quaternaire de l'Oued Mya. Il draine tout le versant Nord-Est du Tademaït et sa vallée suit une direction générale SSW-NNE pour se terminer dans la Sebkhia Safioune. C'est la direction d'ensemble de l'Oued Ouargla, comme l'appellent les nomades, si l'on excepte un tronçon central orienté Sud-Nord de Bour El-haïcha à Ngoussa.

La sebkhia de N'goussa c'est une cuvette endoréique saline de sahara septentrional orientale voir **figure.1.2**. Il est située dans Bassin de Oued Mya à proximité de la ville de N'goussa 20 km de la ville de Ouargla. La région d'Ouargla, oasis du sud-algérien, à 790 km d'Alger par la route. La population dépassent le nombre de 16581 habitants (recensement de 2008) entre Ouargla même et sa voisine N'goussa, à 20 km au nord-ouest.

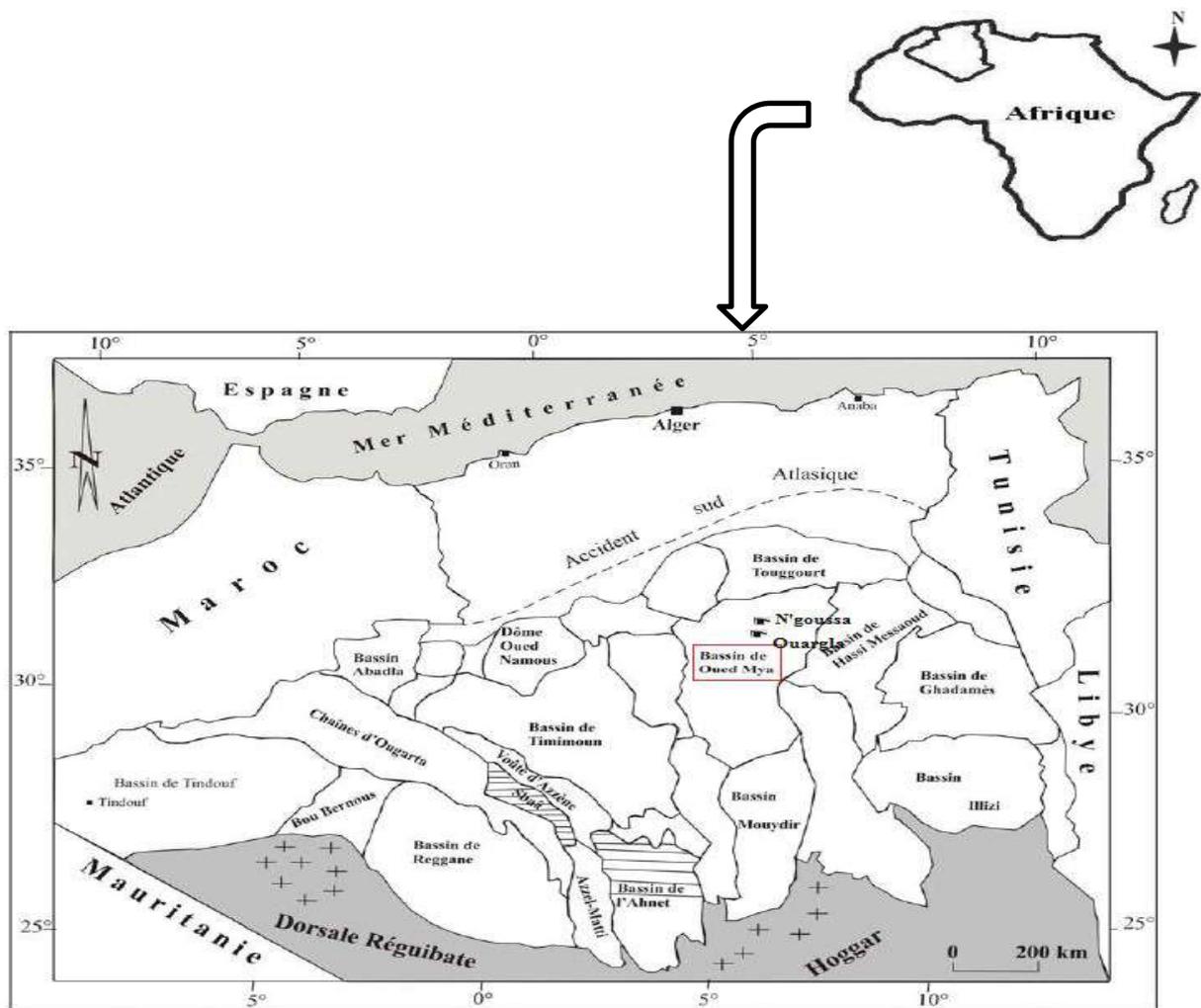


Fig.1. 1 Carte représentative des bassins du plate-forme saharienne en Algérie [15]. Modifié

Sebkhia de N'goussa reçoit en plus vers sebkhia Sefioune (exutoire principal de la région) du débit de deux oueds. Les deux oueds sont Oued N'sa et Oued M'zab, le premier est d'orientation Ouest est si la continuité de oued M'zab. Cette zone reçoit aussi les eaux de la station d'épuration qui est installée dans la partie Ouest de oasis de N'goussa.

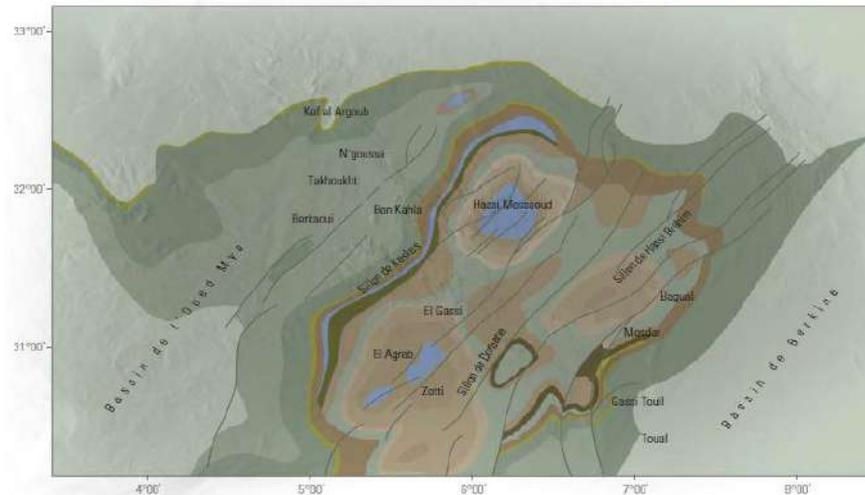


Fig.1. 2 Situation géographique cuvette de Ouargla et N'goussa [16].

I.4 Mécanismes climatiques généraux et données climatiques

L'Algérie présente des contrastes climatiques et paysagers qui se succèdent le long d'un gradient latitudinal. Cinq étages bioclimatiques y sont distingués (humide, subhumide, semi-aride, aride et saharien) [17].

Le climat dans notre zone d'étude s'insère dans le cadre régional de celui de la frange climats sahara septentrionale. Les phénomènes météorologiques sont régis par l'antagonisme dynamique et thermique des masses d'air qui y convergent : l'alizé continental chaud et sec. L'influence saharienne se fait sentir en été et en automne par des vents de sable [1] tandis que l'influence méditerranéenne se manifeste par un régime de pluies irrégulier **figure.1.3**.

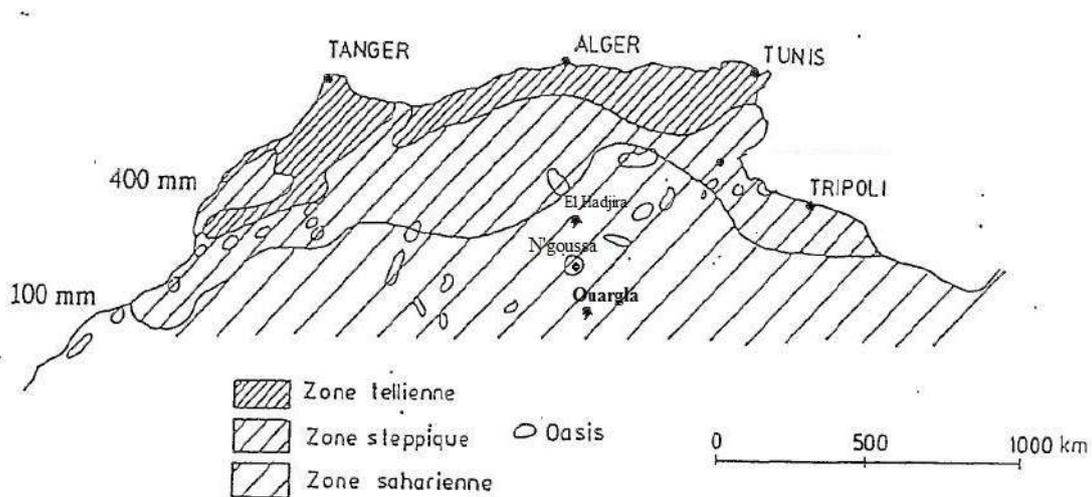


Fig.1. 3 Situation d'N'goussa et d'El hadjira par rapport aux oasis nord-africaines. Les limites des zones telliennes, steppiques et sahariennes sont les isohyètes 400, et 100 mm [1]. Modifié

I.5 Les différents diagrammes comme indice de climat

En effet, les indices climatiques qui seront appliqués sont des expressions empiriques plotés dans des diagrammes, traduisant des résultats approximatifs dans l'ensemble, vu les contraintes qui régissent le climat saharien. Cependant, la combinaison entre les différents indices et la recherche d'indices plus localisés peuvent nous donner des résultats plus logiques, applicables et proches de l'absolu.

Les indices climatiques qui sont utilisés dans notre étude, traitent, pour la plus part, de la pluviométrie, de l'aridité De Martonne et de la sécheresse indice d'aridité mensuel. D'autres indices se basent sur des représentations graphiques pour identifier les différents climats ainsi que les différentes zones climatiques (diagrammes Ombro-thermique de Gaussen et le quotient pluviométrique d'Emberger).

Pour caractériser les zonations climatiques, il faut définir des limites à partir desquels on passe d'une zone climatique à une autre. C'est l'intérêt et l'importance du calcul des indices climatiques.

I.5.1 Diagramme Ombrothermique

Ce mode de représentations consiste à suivre et comparer mois par mois le rapport entre les précipitations et la température. En abscisses (axe des X), on porte les mois (depuis janvier jusqu'à Décembre) ; en ordonnées, on a deux entrées (2 axes Y) : respectivement pour la température moyenne mensuelle et le total mensuel des précipitations.

C'est encore à l'heure actuelle un des indices les plus utilisés. Cet indice tient compte des moyennes mensuelles des précipitations (p en mm) et de la température (t en °C) et donne une expression relative de la sécheresse estivale en durée et en intensité [18]. Selon les résultats, on peut classer le climat de zone d'étude comme étant un climat désertique ERÉMIQUE. La courbe ombrique est toujours au-dessous de la thermique (Sahara). Le diagramme de Gaussen constate que la saison sèche est formée de plusieurs mois secs consécutifs.

Les stations d'étude sont sous l'influence d'un climat saharien aride. Une saison sèche qui s'étend de janvier jusqu'au mois de décembre avec quelque période pluvieuse de septembre jusqu'au mois d'octobre **figure.1.4**.

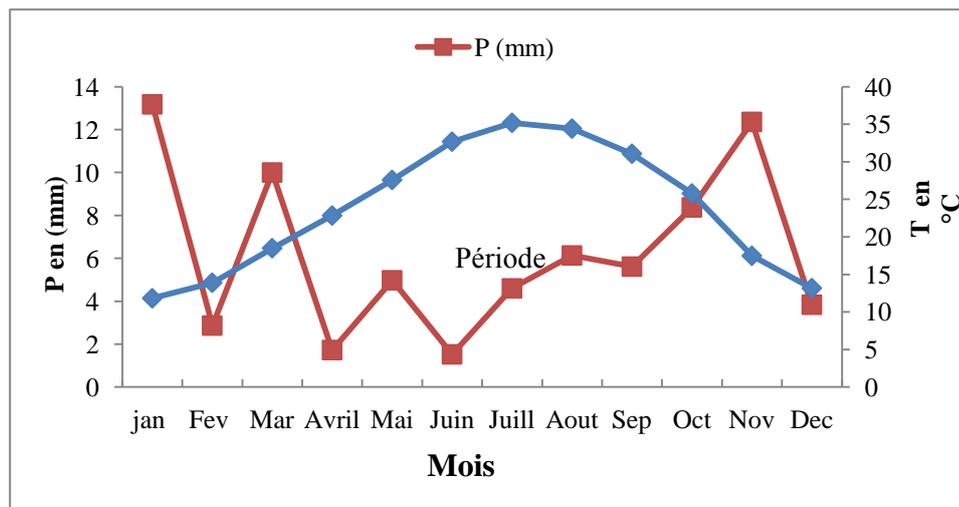


Fig.1. 4 Courbe Ombro-thermique de la station d'Ouargla.

I.5.2 Indice de De Martonne:

L'indice d'aridité de De Martonne a été tiré à partir de la modification du facteur de pluie de Lang en 1923. Cet indice permet de caractériser le pouvoir évaporant de l'air à partir de la température. Cet indice simple a été, largement, utilisé par les géographes. Il prend des valeurs d'autant plus élevées que le climat est plus humide et d'autant plus faibles que le climat est plus sec. De Martonne a proposé la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice comme présentés dans le tableau suivant [19] **tableau.1.2.**

Tab.1. 2 Indices Annuel de De Martonne (I) à la station d'Ouargla.

Mois	I
Septembre	0,21
Octobre	0,07
Novembre	0,10
Décembre	0,07
Janvier	0,06
Février	0,03
mars	0,01
Avril	0,01
Mai	0,10
Juin	0,10
Juillet	0,05
Aout	0,08

Selon **tableau.1.2**, et 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 proposé la classification des climats en fonction des valeurs de l'indice comme présentés dans le tableau suivant. Selon les paramètres enregistrés au niveau de station d'Ouargla. Cette zone bénéficie d'un climat hyperaride voir **tableau.1.3**, est caractérisées par des déserts absolus. Dans ces régions, les pluies sont exceptionnelles (10 à 50 mm en moyenne annuelle) et réparties inégalement, avec des interruptions de plus de 12 mois consécutifs. L'écoulement est rare, épisodique et inorganisé.

Tab.1. 3 Classification des climats selon l'indice de Martonne.

Indice	Type de Climat	Exemple de région
$0 < I < 5$	Hyper aride	Déserts absolus. Ex : Reg du Tanezrouft (Sahara), Atacama (Chili)...
$5 < I < 10$	aride	Régions désertiques. Ex : Le désert du Sahara, le désert du Thar (Inde)...
$10 < I < 20$	semi-aride	Le Sahel (Afrique), Chaco (Argentine), Nordeste (Brésil)...
$20 < I < 30$	semi-humide	La région méditerranéenne...
$30 < I < 55$	humide	

I.5.3 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 :

$$I = \frac{12 \times P}{T^{\circ} + 10} \dots\dots\dots(\text{Eq.1})$$

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 **tableau.1.4**.

Selon la classification précédente par De Martonne, tous les mois présentent un climat hyperaride avec des valeurs d'indice d'aridité moins que quatre (voir **figure.1.5**)

Tab.1. 4 Indices d'aridités mensuelles (I) à la station d'Ouargla pour l'année 2016.

Mois	I	Etage bioclimatique
Septembre	2,51	hyperaride
Octobre	0,88	hyperaride
Novembre	1,17	hyperaride
Décembre	0,81	hyperaride
Janvier	0,74	désertique
Février	0,33	hyperaride
mars	0,12	hyperaride
Avril	0,17	hyperaride
Mai	1,20	hyperaride
Juin	1,14	hyperaride
Juillet	0,65	hyperaride
Aout	0,96	hyperaride

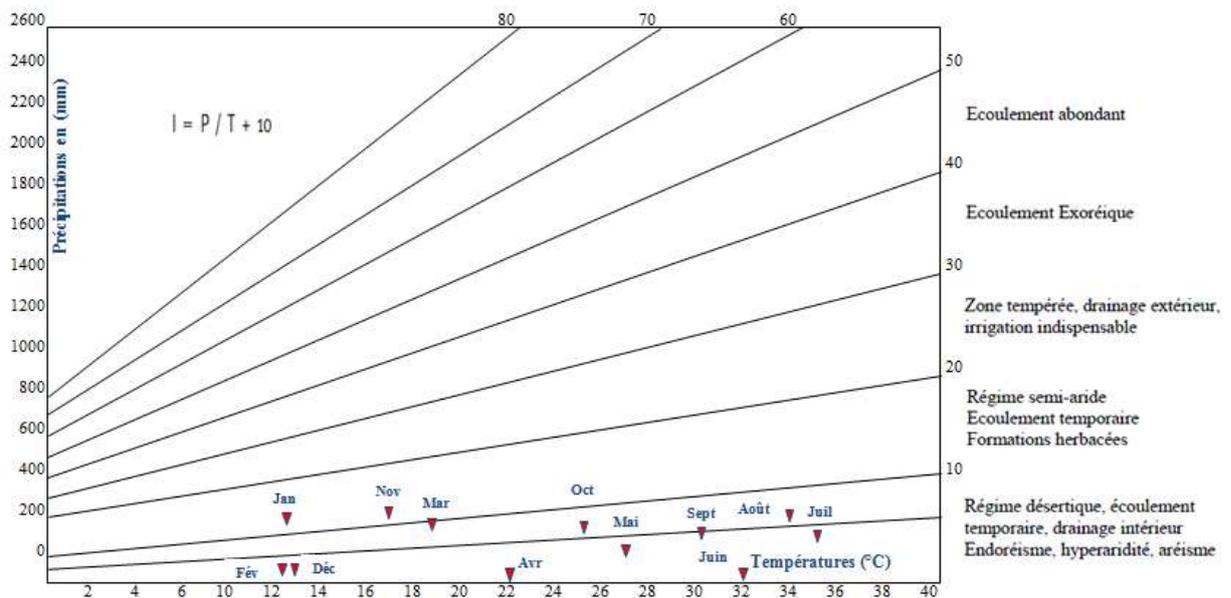


Fig.1. 5 Abaque de l'Index d'aridité mensuel de De Martonne (1923).

I.5.4 Climagramme de Louis Emberger :

C'est en 1939 qu'EMBERGER préconise, pour l'étude du climat méditerranéen, l'emploi du climat gramme de même nom. Ce climat gramme est une tentative de synthèse climatique. Dans un plan, défini par deux axes de coordonnées rectangulaires, sont portées les stations pour lesquelles on possède des données météorologiques. Le climat de ces stations est alors défini par deux valeurs :

- La première portée sur l'axe des ordonnées : le quotient pluvio-thérmiq ue Q_2 . Il s'obtient par la formule suivante :

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

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).

- Sur l'axe des abscisses, est portée la valeur de m prise isolément (valeur ayant une grande importance biologique).

L'application numérique donne les résultats suivants :

$$P = 6,01 \text{ mm}$$

$$M = 317,84 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$m = 279,27 \text{ }^\circ\text{K}$$

Ce qui donne :

$$Q_2 = 0,26$$

Emberger classer les zones climatiques en cinq domaines. Ces domaines sont les suivantes : Humide, subhumide, Semi-aride, aride et Désertique ou saharienne. Le rapport de notre station sur la **figure.1.6** permet de dire que le climat de la région d'étude est de type désertique saharien.

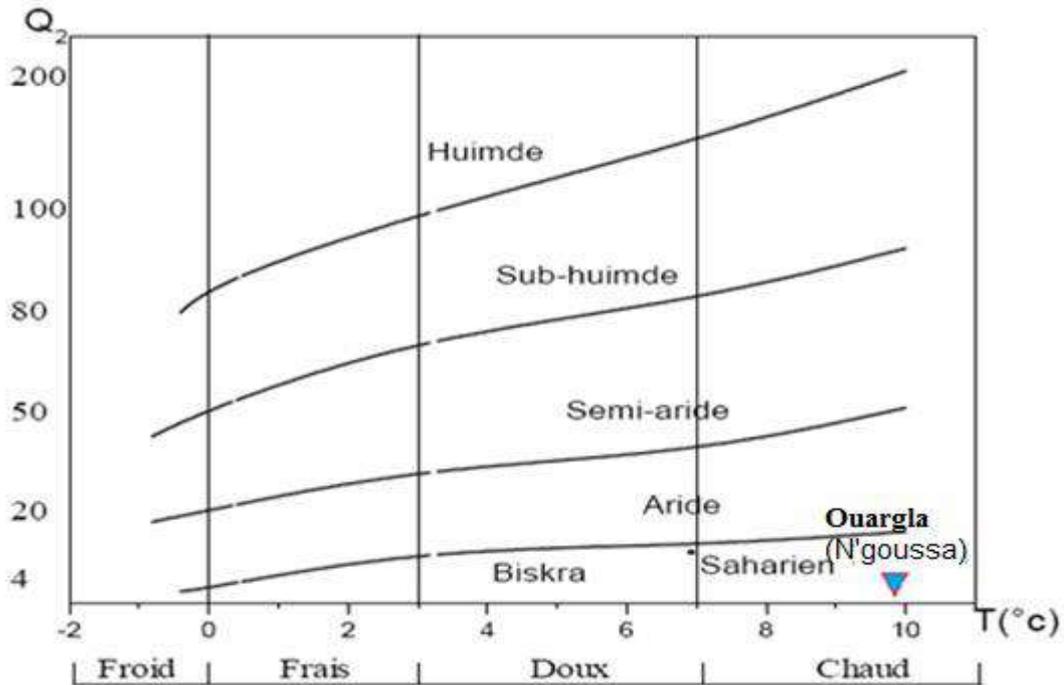


Fig.1. 6 Climagramme d'Emberger de la station d'Ouargla.

I.5.5 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 °C. Cet indice est calculé par la formule suivant :

$$IM = \frac{P}{T^2 - 10T + 200} \dots\dots\dots(Eq.3)$$

Si :

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

Calcule numérique :

P = 12.36 mm

T = 17.48 °C

Ce qui donne

IM = 0,03

On peut dire que le climat de Ouargla est à la limite aride, c'est-à-dire qu'il peut être qualifié hyperaride. Les indices d'aridité Paul Mural sont mentionnés dans le **figure.1.7**.

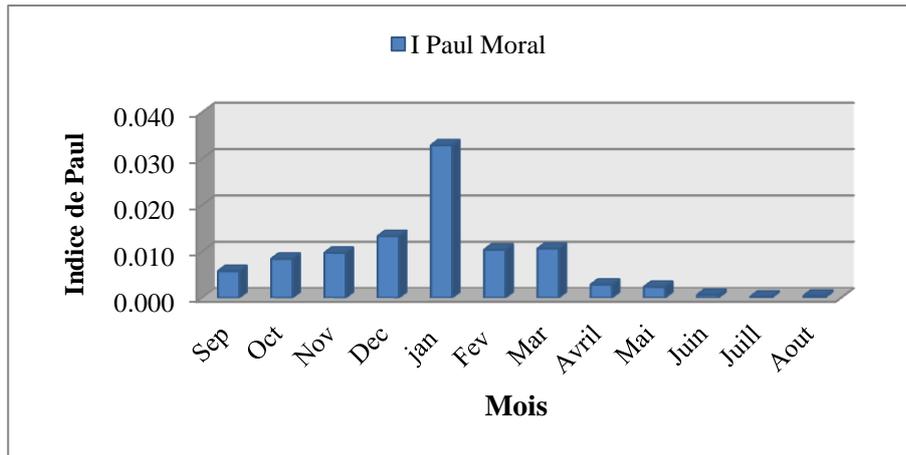


Fig.1. 7 Indices de Paul Moral (IM) à la station d’Ouargla.

I.5.6 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’étude comme étant aride à hyperaride, ce qui est en conformité avec la carte des étages bioclimatiques, établie par overblog, 2013 voir **Figure.1.8**.

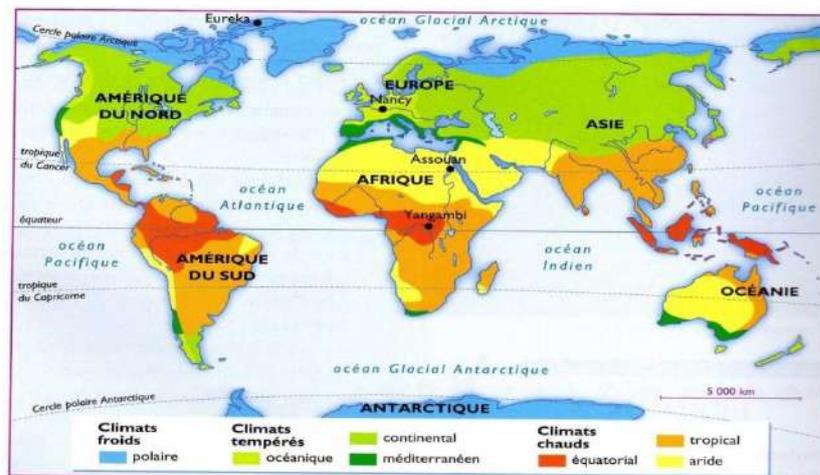


Fig.1. 8 La carte mondiale des terres arides, Overblog, 2013.

I.6 Les facteurs climatiques

I.6.1 La Température

La température est un élément fondamental du climat. La température de surface est, par convention, la température observée sous un abri météorologique dans lequel le volume est bien ventilé et où les thermomètres sont protégés du rayonnement direct et du contact avec les précipitations [19]. Pour caractériser ce paramètre, il faut définir plusieurs variables : la moyenne

mensuelle des maxima (M), la moyenne mensuelle des minima (m). Les températures moyennes interannuelles sont illustrées par stations climatiques situées dans les limites de la zone d'étude région d'Ouargla. Les chroniques disponibles ont été établies entre 2005 et 2018. Les résultats sont présentés dans des histogrammes. Les histogrammes représentant la variation annuelle de la température, sur une période de quatorze ans (2005-2018), montre que la température moyenne varie de 24,6 °C en 2007 plus tempéré et 22,2 °C en 2005 moins tempéré. En générale, La température moyenne annuelle est de 23.7 °C. L'analyse de la courbe de variation de la température mensuelle, sur une période de quatorze ans (2005-2018), montre que les valeurs de température maximale sont observées pendant l'été (juin- Juillet) avec des températures allant de 40,90 à 44,05 °C. Les valeurs de température minimales, qui varient de 5,71 à 10,17°C, sont observées durant la période hivernale (Décembre – mars), avec un minimum pendant le mois de janvier (4,53°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 **figure.1.9 et figure.1.10**.

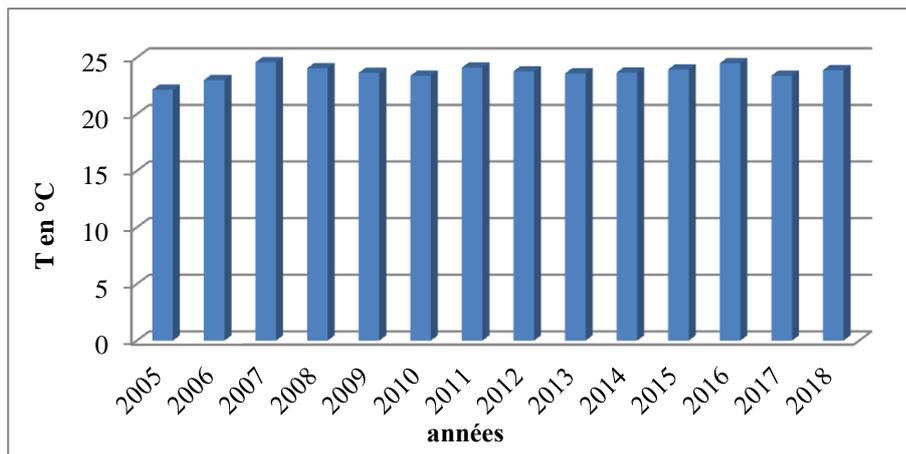


Fig.1. 9 Evolution de la température moyenne annuelle entre 2005 et 2018.

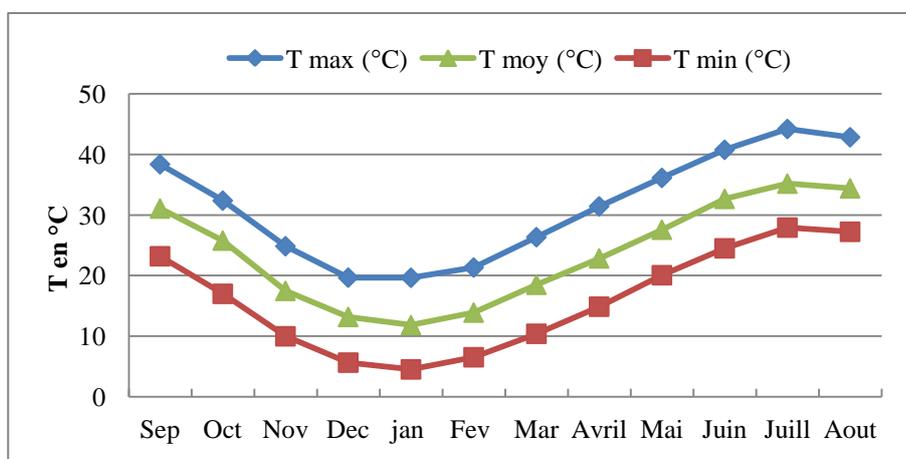


Fig.1. 10 Evolution des températures moyennes mensuelles entre 2005 et 2018.

I.6.2 La pluviométrie

La variabilité spatio-temporelle des précipitations est accentuée dans la zone saharienne, où la pluviométrie, en moyenne interannuelle est faible et où certaines années ne connaissent pas de pluie [20]. Le caractère principal de la pluviosité est sa grande variabilité dans le temps. En effet, L'analyse de la courbe des variations annuelles des précipitations sur une période de quatorze ans (2005-2018) montre que l'année 2009 et 2017 sont les plus arrosées voir **figure.1.11** avec une précipitation de 6,3 mm et l'année 2007 est la plus sèche avec 1,2 mm. Notons que les précipitations moyennes inter annuelles s'évaluent à 2,7mm.

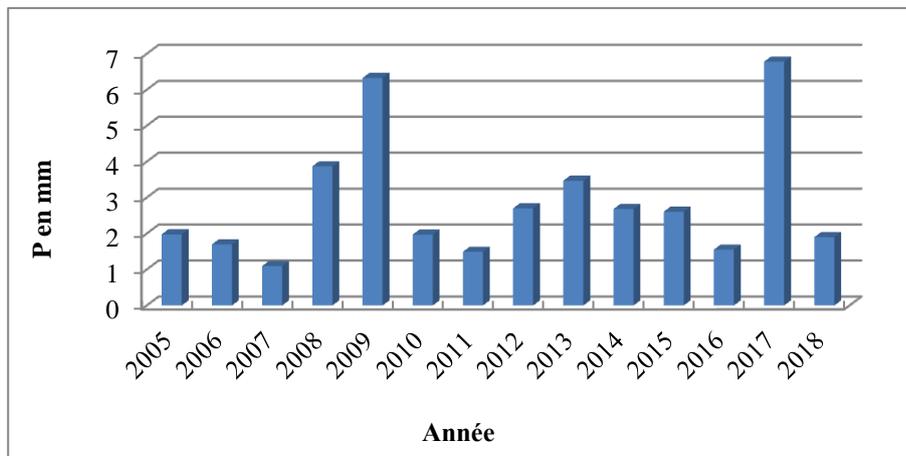


Fig.1. 11 Evolution des précipitations annuelles entre 2005 et 2018.

La courbe des variations des moyennes mensuelles des précipitations, sur une période de quatorze ans (2005-2018) montre que le mois de janvier est le plus pluvieux, avec une précipitation de 8,59 mm. A l'exception du mois de juillet pendant lequel aucune pluie n'a été enregistrée depuis 14 ans. Donc le mois de juillet est le plus sec voir **figure.1.12** et **figure.1.13** La variabilité des pluies affecte les mois secs comme les mois pluvieux.

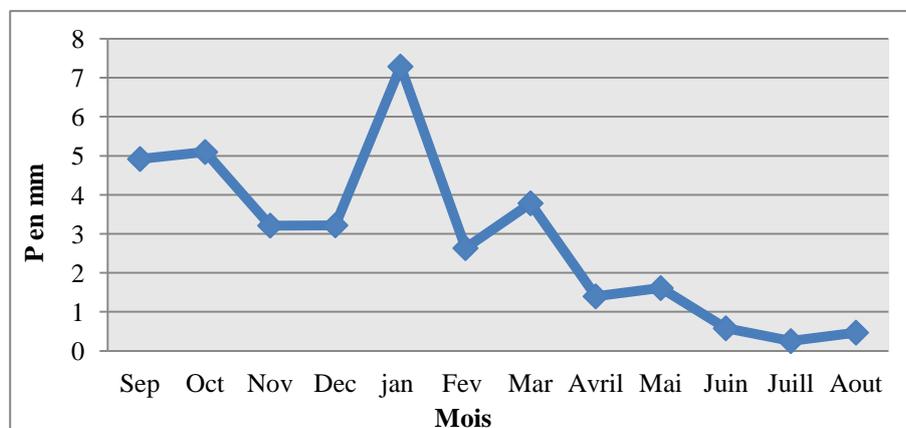


Fig.1. 12 Pluviosité moyenne mensuelle entre 2005 et 2018.

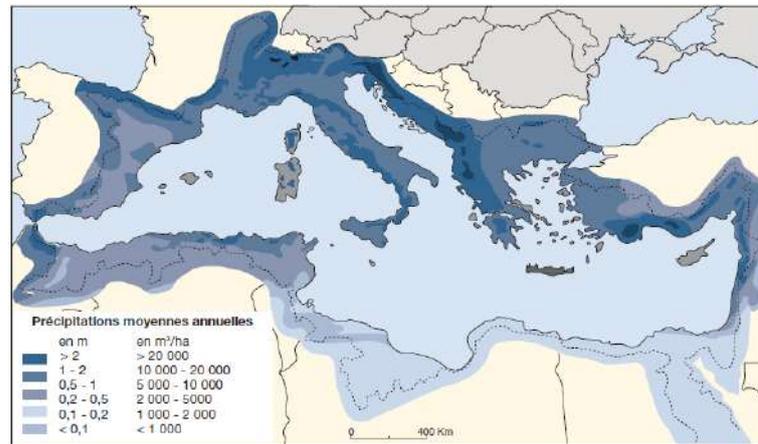


Fig.1. 13 Répartition des précipitations moyennes dans le Bassin méditerranéen [21].

I.6.3 L'humidité de l'air

L'air n'est jamais totalement sec. Il recèle de la vapeur d'eau émanant des plans d'eaux chauffés par la radiation solaire. Il existe deux mécanismes de production de vapeur d'eau :

- L'évaporation physique : toute évaporation qui se produit au-dessus des océans, mers, lacs, cours d'eau et sols humides.
- L'évapotranspiration physiologique du couvert végétal.

La chaleur du Sahara est d'ailleurs plus facile à supporter que celle des régions équatoriales, parce qu'elle est sèche [22]. L'humidité relative est à peine de 30 % ou 37% en hiver (janvier), et de 10 % à 13 % en été (juillet) (moyenne de la journée). En rapport avec celles des températures, des variations quotidiennes se produisent. L'humidité relative est généralement minimale vers 15 heures et maximale vers 6 heures, au lever du soleil. L'humidité enregistrée dans la cuvette d'Ouargla est cependant plus élevée que dans d'autre oasis, ce qui est particulièrement perceptible sous le couvert de la palmeraie en hiver et au printemps. Voir **figure.1.14** et **figure.1.15**.

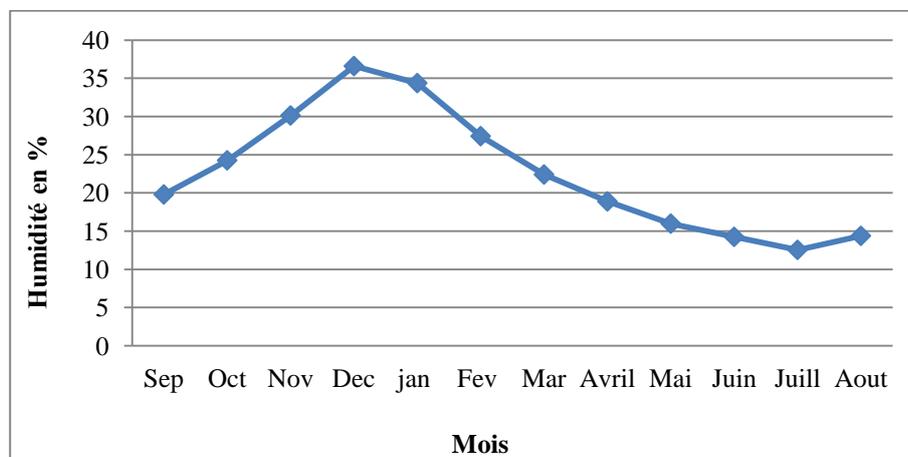


Fig.1. 14 Variation de l'humidité moyenne mensuelle entre 2005 et 2018.

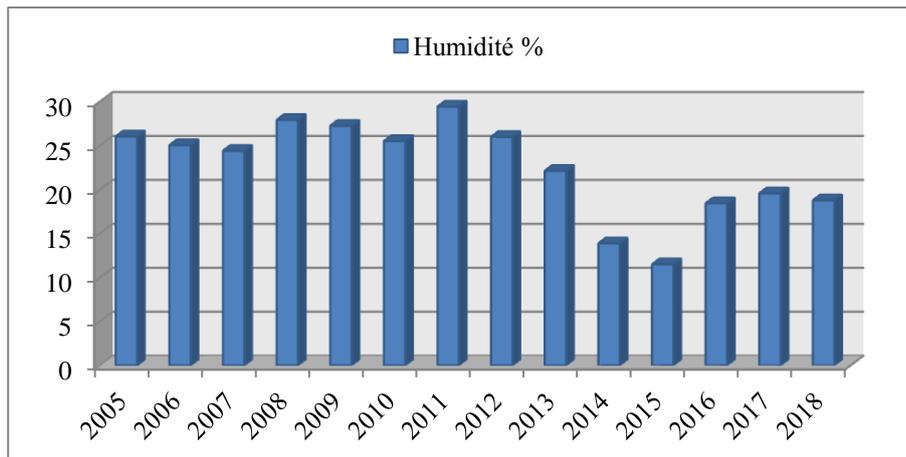


Fig.1. 15 Evolution de l'humidité annuelle (2005-2018).

I.6.4 L'insolation

Le palmier dattier est exigeant en chaleur et soleil. Le zéro végétatif se situe vers 10°C et la maturation, de mai à octobre, requiert une somme de maxima journaliers pendant cette période supérieure à 3000 h/ans, pour la variété noble Deglet Nour [1] .

L'isolation est un facteur important. La variation interannuelle de l'ensoleillement sur 14 ans est en moyenne entre 200 h/ans en hiver et peut atteindre à 300 h/ans en été surtout en juillet et août Jusque septembre. De tous les facteurs climatiques c'est le moins variable. Cela explique en partie le succès de la phoenici-culture diversifiée. Elle peut atteindre 136 jours en moyenne dans l'année ou le ciel est totalement clair.

I.6.5 Le vent

Lorsqu'on examine la rose des vents des principales oasis, on s'aperçoit que les souffles qui viennent du Nord et du Nord-Est prédominent aussi bien en hiver qu'en été. À Ouargla c'est le vent du Nord qui est le plus fréquent [22].

Le vent sable de sahara septentrionale, qui ressemble beaucoup au Cheheli, a été surnommé le vent des « cinquante jours » ; il souffle en réalité par périodes de deux ou trois jours, mais si rapprochées les unes des autres en mars, en avril et en mai qu'il paraît un vent continu.

Le Cheheli est en rapport avec l'arrivée d'aires cyclonales bien définies, qui voyagent d'Ouest en Est en suivant des directions légèrement obliques à la direction des parallèles.

Les vents, et notamment les vents de sable, jouent un rôle particulièrement desséchant. Les vents les plus forts sont supérieurs à 60 km /min 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.7 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 [14].

I.7.1 L’évapotranspiration potentielle (ETP)

Les températures élevées et les vents fréquents et violents provoquent une évapotranspiration potentielle considérable. L’évapotranspiration (ETP) est l’une des composantes du cycle hydrologique les plus difficiles à quantifier du fait de sa complexité dans le système sol-terre- plante [23]. Il est Mesurée par un évapore-mètre type Piche, le cumule dépasse largement 3000 mm/an, presque 150 fois celui de la pluviométrie. La période allant du mois de Mai au mois d’Août est la plus importante (plus de 371,8 mm/mois) ou le mois du juillet représente la maximum valeur d’évaporation de 417,91 mm voire **figure.1.16**.

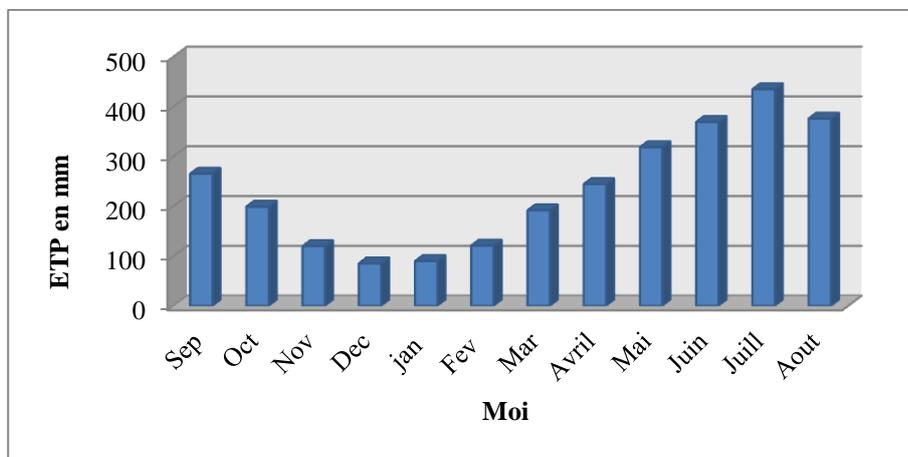


Fig.1. 16 Evolution de l'ETP mensuelle entre 2005 et 2018.

I.7.2 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 :

$$ETP_{(mm/mois)} = 16 \times \left[\left(\frac{10 \times t}{I} \right) \right]^a \times F \dots \dots \dots \text{(Eq.4)}$$

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

$$I = \sum_1^{12} l_j \dots\dots\dots(\text{Eq.5}), \text{ Avec } l_j = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514} \dots\dots\dots(\text{Eq.6})$$

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

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} (I^3) - 7,71 \cdot 10^{-5} (I^2) + 1,79 \cdot 10^{-2} (I) + 0,49239 \dots\dots\dots(\text{Eq.4})$$

- **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 **tableau.1.5**.

Tab.1. 5 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
I ²	252,66	143,57	44,28	18,80	13,55	22,07	52,47	99,48	176,12	294,15	368,25	344,23
I ³	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	1,03	0,98	0,88	0,87	0,89	0,86	1,03	1,08	1,19	1,19	1,21	1,15
ETP Th	158,06	131,86	102,87	95,90	98,48	96,45	122,20	138,25	168,30	189,93	205,86	191,80

I.7.3 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 [24].la formule est si dessus :

$$ETP_{(mm/n \text{ jours})} = n \times 0,013 \times (R_g + 50) \times \left(\frac{t}{t+15}\right) \dots\dots\dots (\text{Eq.8})$$

- **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.
- **Rg** = rayonnement global en cal/cm²/jour.

Une journée estivale dans le Sud correspond à des valeurs de rayonnement global Rg 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.

$$K = 1 + \frac{(50-Hr)}{70} \dots\dots\dots(\text{Eq.9})$$

Les résultats de l’application de cette formule sur la cuvette d’Ouargla sont présentés dans le **tableau.1.6.**

Tab.1. 6 Valeurs de l’ETP estimées par la méthode de Turc.

	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
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	1,43	1,37	1,28	1,19	1,22	1,32	1,39	1,44	1,49	1,51	1,54	1,51
ETP Turc co	188,28	168,63	134,76	108,66	105,17	124,01	150,12	170,05	187,72	201,93	209,91	204,94

I.7.4 D’ETP de la formule de Hargreaves

Cette formule est très bien adaptée aux zones tempérées pour estimer l’évapotranspiration potentielle journalière des systèmes agricoles [25]. 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 :

$$ETP_{(mm/jours)} = 0,0023 \times Ra \times (t + 17,8) \times \sqrt{\Delta t} \dots\dots\dots(\mathbf{Eq.10})$$

- **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.1.7** représente les valeurs ETP par la formule de Hargreaves.

Tab.1. 7 Valeurs de l’ETP estimées par la formule de Hargreaves.

	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T max (°C)	38,53	32,82	25,08	19,74	19,74	21,32	26,34	31,63	36,13	40,90	44,05	43,05
T min (°C)	23,18	17,08	10,00	5,71	4,53	6,32	10,17	14,72	19,82	24,43	27,78	27,28
Rg	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600	600
n	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
ΔT (Tmin-Tmax)	15,19	15,39	14,88	14,05	15,13	14,81	15,96	16,57	16,07	16,27	16,28	15,61
√ΔT	3,90	3,92	3,86	3,75	3,89	3,85	4,00	4,07	4,01	4,03	4,04	3,95
ETP	7,45	6,69	5,32	4,54	4,51	4,77	5,67	6,47	7,11	7,96	8,36	8,07
ETP Harg mm/mois	223,42	200,58	159,64	136,17	135,17	143,08	170,07	194,04	213,40	238,83	250,84	241,99

I.7.5 Comparaison des formules D'ETP

De 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 lys-métrique 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 moyen journaliers.

La comparaison des ETP moyennes (période 2005-2018) calculées de la cuvette de Ouargla 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) (**figure.1.17 et figure.1.18**, ci-dessous).

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 cuvette d'Ouargla.

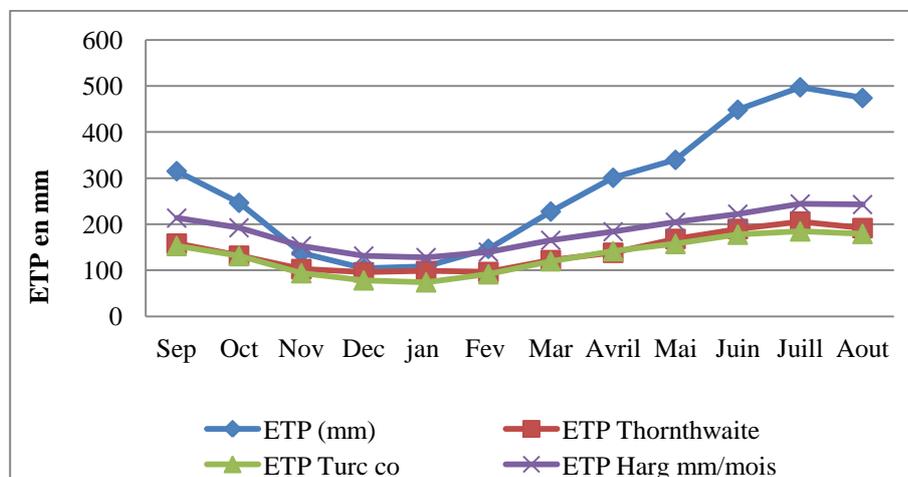


Fig.1. 17 L'ETP estimée par différentes méthodes.

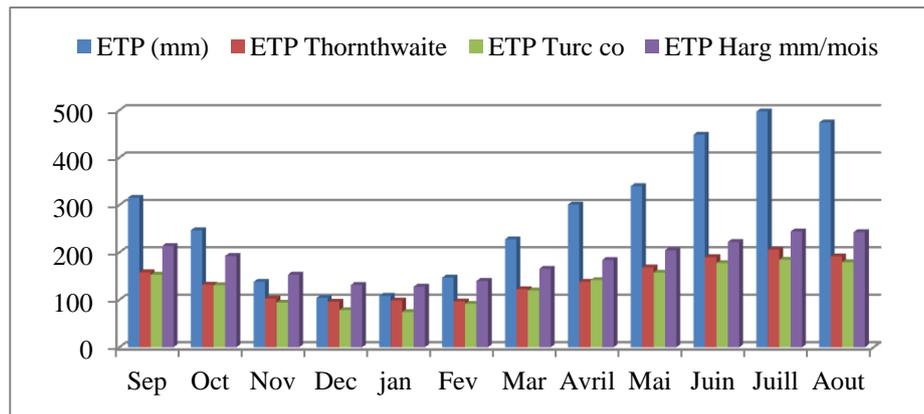


Fig.1. 18 L'ETP estimée par différentes méthodes.

I.8 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 :

Variation des réserves = Entrée – 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 dépression occasionelles,

Le calcul du bilan hydrologique est une 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 cinq fois plus importante que la précipitation (20mm). Donc le bilan hydrique pendant une année est en déficit, à l'exception pendant les crues.

I.8.1 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 Ouargla, 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 [26].

$$RFU = \frac{1}{3} \times Da \times He \times P \dots \dots \dots \text{(Eq.11)}$$

Ou

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 439,3 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 **tableaux 1.8, tableaux 1.9**.

Tab.1. 8 Bilan hydrologique moyen (2005-2018) à la station d'Ouargla, par la méthode 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
Evap (mm)	265,16	199,17	119,85	85,31	89,87	121,06	191,74	244,42	318,46	369,18	434,76	376,00
P (mm)	4,92	5,10	3,21	3,22	7,29	2,63	3,78	1,40	1,61	0,58	0,25	0,47
P-ETP (EXCIT)	-260,24	-194,07	-116,64	-82,09	-82,58	-118,42	-187,96	-243,02	-316,85	-368,60	-434,51	-375,53
RFU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03
ETR	4,92	5,10	3,21	3,22	7,29	2,63	3,78	1,40	1,61	0,58	0,25	0,47

Tab.1. 9 Bilan hydrologique moyen à la station d'Ouargla, par la méthode de Thornthwaite (Année plus pluvieux 2017).

	Sep	Oct	Nov	Déc	jan	Fév	Mar	Avril	Mai	Juin	Juill	Aout
T moy (°C)	29,26	22,75	16,13	11,79	10,42	15,82	18,82	22,54	30,18	32,92	35,17	35,03
Evap (mm)	270,40	187,20	129,20	80,30	110,70	172,60	239,20	283,90	464,90	433,30	505,10	439,30
P (mm)	12,80	22,60	14,60	2,60	0,30	0,00	20,70	0,80	0,00	0,20	0,00	0,00
P-ETP (EXCIT)	-257,60	-164,60	-114,60	-77,70	-110,40	-172,60	-218,50	-283,10	-464,90	-433,10	-505,10	-439,30
RFU	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ETR	12,80	22,60	14,60	2,60	0,30	0,00	20,70	0,80	0,00	0,20	0,00	0,00

I.8.2 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.

L'ETR ne couvre que 37% de l'ETP. Elle consomme 92% des précipitations. Ceci induit un faible excédent et par conséquent la recharge de la nappe est très limitée.

I.9 Conclusion

La région de N'goussa et d'El Hadjira se caractérisent comme l'ensemble du bas sahara par un climat de type désertique, dont les amplitudes thermiques entre les minima et les maxima sont importantes et par une pluviométrie très faible. Il est à souligner que ce type de climat se distingue par une forte insolation et une luminosité, dont la moyenne annuelle peut atteindre les 3000 heures. Quant à l'humidité de l'air, elle est très faible en hiver, elle peut dépasser légèrement les 50%. L'évapotranspiration annuelle est relativement faible en hiver, mais sa valeur peut doubler en été.

En effet, les oasis se développent en zone aride et saharienne sous des pluviométries le plus souvent inférieures à 150 mm. Il en résulte une forte opposition avec le milieu naturel qui apparaît sous deux aspects principaux:

- Le premier et le plus important, commun à toutes les zones arides, est la grande variabilité de la pluviométrie, avec comme corollaire la faiblesse chronique des précipitations et la grande violence des pluies exceptionnelles qui peuvent modifier sensiblement la répartition des sels dans notre système.
- Le deuxième, propre à notre objet, est lié au caractère continental du milieu et à la petitesse des surfaces cultivées par rapport au désert. Il se manifeste par une grande variabilité de l'ETR à l'intérieur de l'oasis due soit aux effets de bordure soit à l'hétérogénéité de l'insolation au sol d'un point à un autre. Il s'en suit une répartition des cultures en fonction des conditions d'ensoleillement qui n'est pas sans influence sur le régime salin des sols.

Notre zone d'étude est dans le domaine climatique désertique. Les régions semi-aride et aride sont caractérisées par un bilan hydrique négatif, l'évaporation de l'eau accumulée dans les zones basses, issues des nappes superficielles, conduit naturellement à une concentration des solutions et à une tendance à la salinisation. Cette région reçoit moins de 100 mm de pluies par an, il arrive qu'il ne pleuve pas pendant 12 mois consécutifs, les conditions climatiques y sont extrêmes. Les températures sont de plus en plus marquées par la continentalité et l'amplitude très forte. Dans la partie nord des déserts, les précipitations sont souvent des précipitations d'hiver ou de printemps, mais l'irrégularité saisonnière y domine. Près des basses latitudes (22° et en altitude), les pluies peuvent être d'été, traduisant ainsi la proximité avec la zone tropicale. Les territoires du Sahara, sont caractérisés par des précipitations rares, si irrégulières que les moyennes n'y ont guères de signification et de longues périodes (pouvant dépasser plusieurs années), sans aucune goutte de pluie. Mais tout le Sahara n'est pas désertique, entre le nord, « à rythme méditerranéen, et la zone du sud, à rythme tropical, s'installe un vaste territoire à rythme de pluviosité anarchique et à pluviosité aléatoire [27] qui, seul, est biologiquement un désert [28].

**CHAPITRE 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 Algérienne au 1/2.000. 000, (1967).

Ces travaux sur le bassin de Sahara septentrionale ont montré qu'il s'agit des terrains sédimentaires affleurements en surface qui offrent aux géo-scientifiques un magnifique pôle d'observations et de réflexions où de nombreuses questions ont trouvé des éléments de réponses même si de nos jours d'autres restent encore posées et continuent de susciter un intérêt scientifique et économique [14].

II.2 Cadre géologique régional

Le bassin oriental du Sahara, à couverture sédimentaire, d'âge paléozoïque au récent, est nettement mieux connu que sa contrepartie occidentale, grâce aux recherches pétrolières. Il est limité à l'Ouest par la dorsale du M'Zab et au Sud par les plateaux du Tademaït et du Tinrhert, se plonge vers l'est en Tunisie et en Libye. Il comporte à la base des sédiments Paléozoïques plissés, et pénéplaines par l'orogénèse hercynienne, surmontés en discordance par des sédiments variés (marins et continentaux) du Secondaire et du Tertiaire sur une épaisseur de 2000 mètres environ.

Le bassin oriental se présente également comme un vaste synclinal, ouvert vers le Nord. Dans sa moitié Sud, ce synclinal est traversé par un grand axe anticlinal Nord-Sud; siège de plusieurs gisements pétroliers. C'est le haut-fond d'Amguid-El Biod. Cet axe n'est plus apparent dans les formations du Mio-Pliocène ; il y a même inversion de relief puisque l'axe de l'actuel synclinal Mio-Pliocène se superpose à l'ancien haut-fond. Dans le bassin du Sahara septentrional, une seconde zone haute a existé, du Cénomaniens au Mio-Pliocène, entre Hassi-Messaoud et la frontière tunisienne. Cette structure est orientée est-ouest ; elle sépare la fosse des chotts, au nord, du reste du bassin. Il semble que cet axe joue un rôle important dans l'hydrogéologie de cette région.[14]

La plate-forme saharienne a peu évolué depuis la fin du Paléozoïque et correspond à un domaine cratonique relativement stable [29] voir **figure.2.1** et **figure.2.2**.

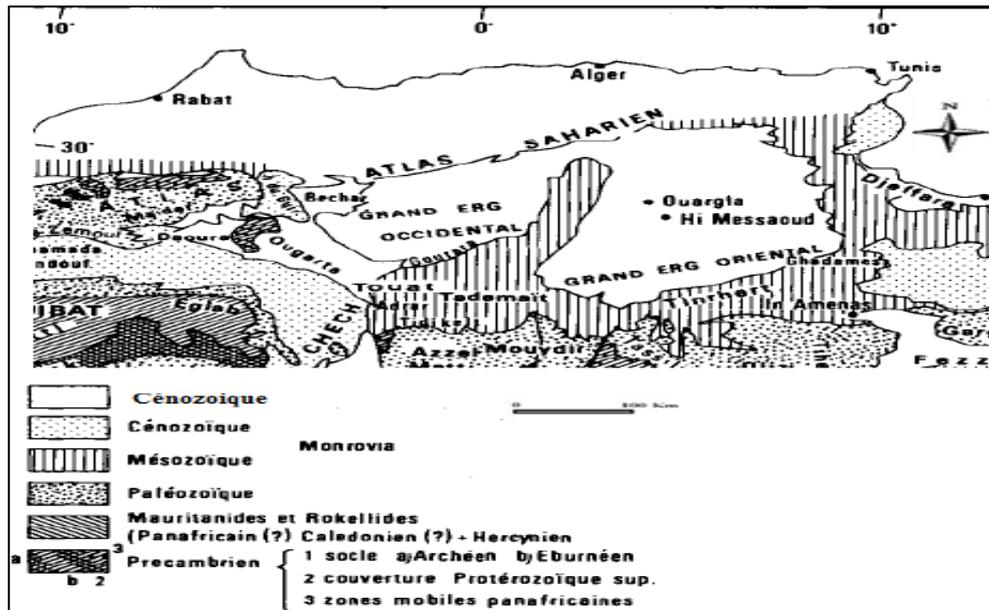


Fig.2. 1 Carte géologique du Bas-Sahara [30].

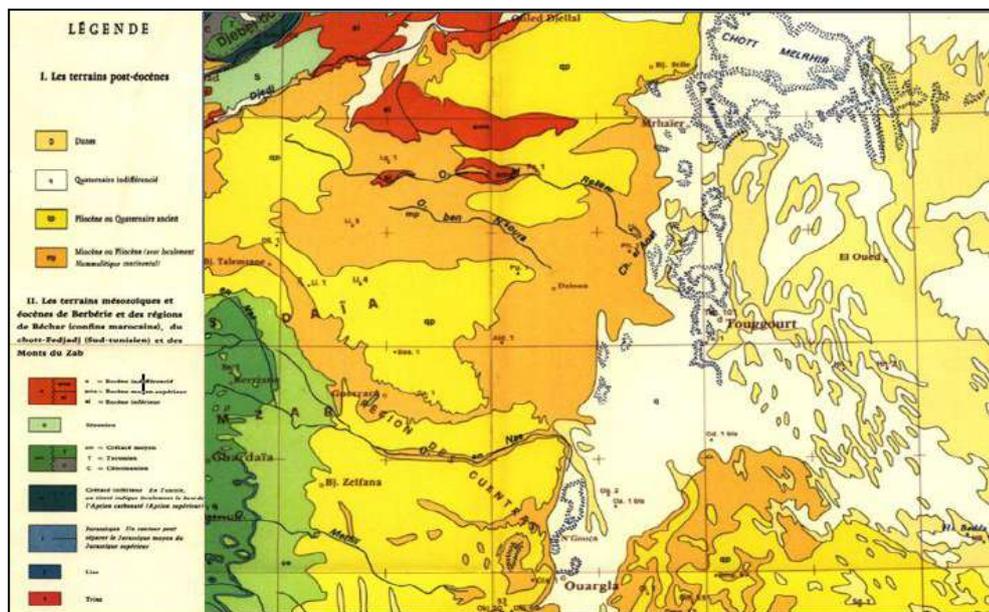


Fig.2. 2 Carte géologique du Zone d'étude (sahara septentrionale) [31].

II.3 Historique des études de plateforme saharien

Les premiers travaux de reconnaissance géologique dans la région remontent au XIX^e siècle. Ils firent l'objet d'une première synthèse géologique lors de l'excursion géologique organisée par Oscar Lenz en 1880, avec un itinéraire allant du Maroc au Mali, en traversant le Sahara algérien. Au cours de cette excursion, les premiers fossiles du Dévonien et du Carbonifère ont été déterminés. D'autres travaux de reconnaissance ont été conduits dès le début du XX^e siècle entre autres, ceux de Gautier, 1906 ; Conrad Kilian, colonel Flatters, 1921 voir **figure.2.3**; Menchikoff,

1924, 1930, 1949 ; Meyendorf, 1938 ; Pouyetto, 1952 ; Beuf *et al*, 1971. Dans le cadre de ces travaux, des cartes géologiques ont été levées à différentes échelles (Fabre *et al*, 1972 ; Fabre, 1978).

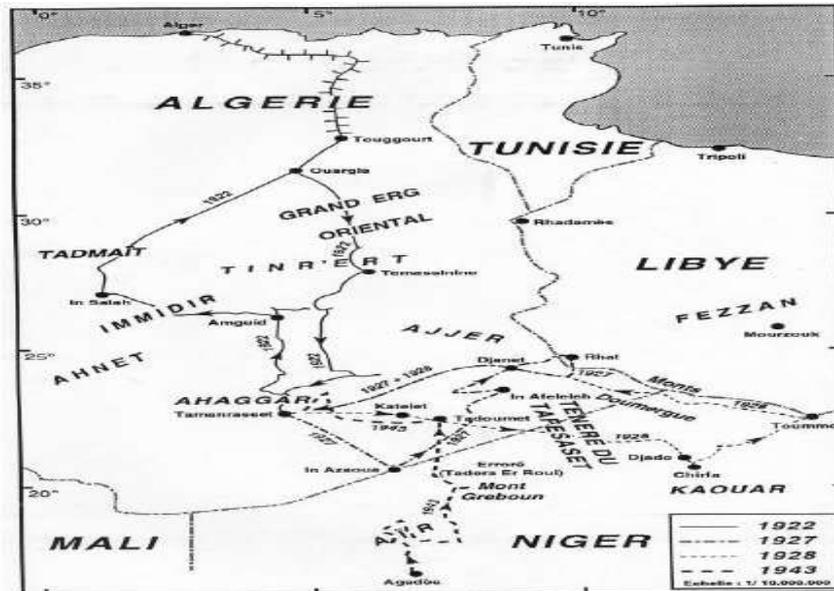


Fig.2. 3 Trajets des voyages de Conrad Kilian [32].

II.4 Stratigraphie

Le sahara est une énorme dalle, tantôt émergée tantôt inondée, où vont s'accumuler des sédiments continentaux et marin [29]. Dans la partie septentrionale de la plate-forme (Oued Mya), la série sédimentaire type dont l'épaisseur peut atteindre 6 000 mètres (**figure.2.4 et figure.2.5**), présente des dépôts paléozoïques souvent érodés jusqu' à l'Ordovicien et le Cambrien.

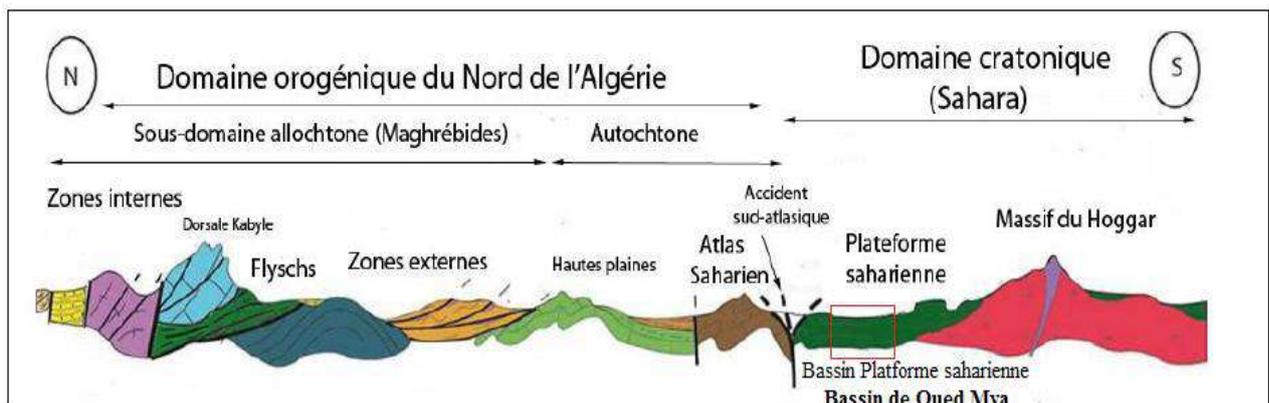


Fig.2. 4 Coupe Nord-Sud montrant les principales unités structurales de l'Algérie[33]. Le Mésozoïque, discordant sur le Paléozoïque, est présent du Trias au Crétacé. Le Cénozoïque est représenté par une mince série détritique du Mio-Pliocène. Les formations représentent dans la zone d'étude sont comme suite :

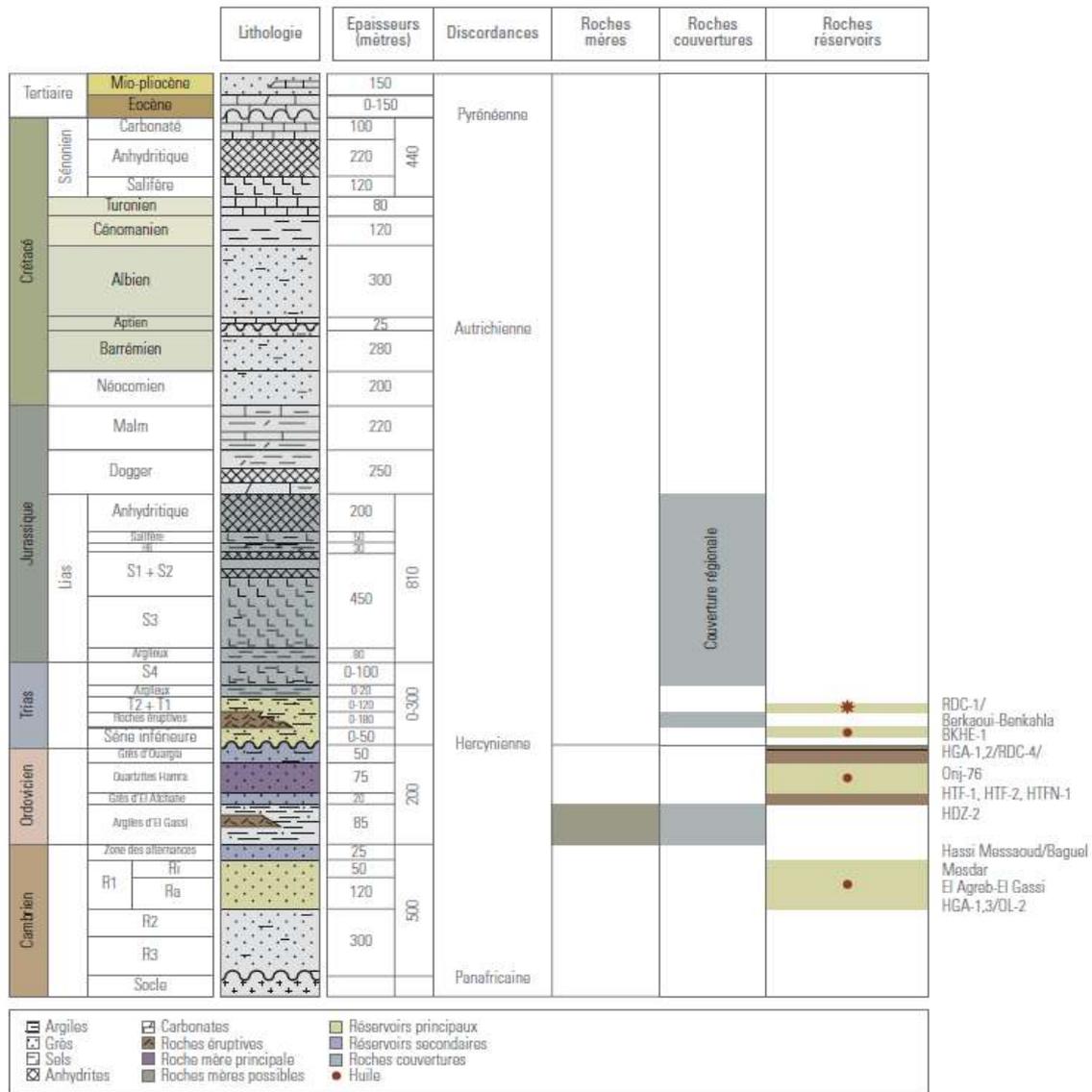


Fig.2. 5 Colonne stratigraphique typique du Sahara septentrional [16].

II.4.1 Le Paléozoïque

Les séries du Paléozoïque sont disposées en dessous de la discordance Hercynienne. Le Paléozoïque est constitué par des dépôts détritiques argilo-gréseux d'origine continentale et marine avec une épaisseur totale de 1200 m environ, allant du Cambrien jusqu'au Dévonien inférieur. L'érosion hercynienne a affecté une partie des dépôts paléozoïques. Cette érosion touche les séries allant du Silurien au Permien, elles sont absentes.

II.4.1.1 Le cambrien

Grâce aux forages pétroliers de la région, il a été rencontré sous l'Ordovicien inférieur [29] et avant d'atteindre le socle Précambrien. Les dépôts cambriens reposent sur le socle cristallin et sont représentés par des grès et des quartzites à passées conglomératiques. Ces grès sont généralement

hétérogènes, fins à grossiers, entrecoupés de passées de silt stones argilo-micacés. L'origine de ces ensembles est azoïque grés-conglomératique. Ce sont continentale fluviatile.

II.4.1.2 Ordovicien

Les sondages pétroliers ont traversé, sous le grand Erg orientale, un ordovicien « moyen » argileux ou argilo-gréseux. Ce sont les formations de grés d'Ouargla à la base, et ceux de l'Oued Saret au-dessus. Les superpositions des autres séries gréseuses telles que gré Hamra gré d'El Atchan contiennent de mince intercalations argileuses. L'ordovicien constitue un ensemble de 300 à 400 m.

II.4.1.3 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. De nombreux sondages pétroliers ont rencontrées sous une couverture de terrains méso-cénozoïques. les fossile caractéristique de silurien du sahara septentrionale sont des orthocères, quelques petits trilobites (Phacops), des lamellibranches (Cardiola) caractéristique du silurien, des débris de poissons cuirassés et des graptolites.

II.4.1.4 Dévonien

Le Dévonien du Sahara 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 grés de Zeilmet) à laquelle succède une sédimentation argileuse parfois interrompue par des dépôts calcaires

II.4.1.5 Périmo-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.4.2 Le Mésozoïque

Le Mésozoïque repose en discordance angulaire (discordance Hercynienne) sur les dépôts du Paléozoïque. Ces dépôts sont d'origines détritiques et lagunaires. Elles couvrent une épaisseur totale varie de 2300m à 3500m. Cette formation contient de riches réserves d'eau et de gaz.

II.4.2.1 Trias

Par suite des plissements hercyniens et des érosions qui leur ont fait suite, le Trias surmonte en discordance les différents termes du Paléozoïque ou même directement le socle antécambrien. Il débute par des grès épais d'environ 500 m, dont la perméabilité est variable mais rarement nulle, et se termine par une série salifère de même puissance [34]. Il repose en discordance sur les termes du Paléozoïque respectivement au centre et sur les flancs de la structure, sur le Cambrien et l'Ordovicien. Il est subdivisé en trois unités : Trias éruptif, le Trias argileux (Série inférieur, T1 et T2) et le Trias salifère :

II.4.2.2 Le Jurassique

Le jurassique est Essentiellement calcaire, surtout au niveau du Lias et du Jurassique moyen. Son épaisseur, à Berriane, est de 689 m [34]. Son épaisseur moyenne est de 844 m. C'est un ensemble argilo-gréseux à intercalations de calcaires au sommet (Malm) et à alternance de faciès lagunaires et marins à la base (Dogger et Lias).

II.4.2.3 Crétacé

Le Crétacé est présent partout sur la Plate-forme Saharienne. Il comporte des faciès grés-argileux à la base évoluant vers un pôle essentiellement carbonaté au sommet. Il est épais de 1620 m. De la base au sommet, on y distingue. Le crétacé est caractérisé par la grande transgression marine du Crétacé supérieur, dont les calcaires, parfois vernissés d'une patine presque noire, forment les plateaux du Sahara septentrional [35].

A. L'Albien

L'Albien est formé d'un dépôt gréseux continental d'épaisseur importante de 400 m environ dans le sillon de l'oued Mya. Ces dépôts sont est formées de grés fin et d'argiles contenant quelques intercalation carbonatées, et intercalation de sables grossiers et des passées d'argiles pélitiques et sableuses brun-rouge. L'Albien est considéré comme un horizon d'aquifère pour continent intercalaire.

B. 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 connu par des argiles, marnes dolomitique noirâtres et des éléments détritiques.

Dans d'autre région le Vraconien sont des dépôts de calcaires dolomitiques à intercalation d'argiles pélitiques et de marnes dolomitiques de couleur brune ou rouge.

C. Le Cénomanién

Le Cénomanién est constituée d'une série argilo-lagunaire. L'argile vert de Cénomanién est riche en bancs de gypse (évaaporites) et son épaisseur semble varier d'environ 100 à 200m d'épaisseur, représenté à la base par des argiles gypseuses et marnes grises, à passées de calcaires dolomitiques, au sommet par alternance d'argiles salifères à bancs métriques d'anhydrite et de marnes dolomitiques grises.

D. Le Turonien

Le Turonien est parmi toutes celles du bassin oriental du Sahara algérien, la formation sédimentaire la mieux caractérisée. Elle constitue donc un excellent niveau repère. D'une épaisseur de 70m environ, dans la région d'étude, il est représenté par du calcaire crayeux blanc à grisâtre à microfaunes (Globigérines, Fusulines, Ostracodes ...), calcaires dolomitiques fins à rares passées argileuses et dolomies cristallines vacuolaires.

E. Le Sénonien

Dans tout le bassin oriental du Sahara Algérien, le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées :

- le Sénonien lagunaire à la base
- le Sénonien carbonaté au sommet

II.4.3 Le Cénozoïque

Le Cénozoïque est discordant et incomplet. Il est constitué de calcaires dolomitiques à l'Eocène et d'un recouvrement sableux du Mio-Pliocène. Il est peu épais

II.4.3.1 L'Eocène

Eocène inférieur et moyen sont représentés dans la majeure partie du Bas-Sahara et jusque sur la bordure septentrionale du Tinrhert par des calcaires et des marno-calcaires à Nummulites et Operculines [34]. Dans l'Eocène, on distingue deux formations lithologiques, comme dans le Sénonien :

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

II.4.3.2 Le Mio-Pliocène

Les formations du Mio-Pliocène résultent du démantèlement de reliefs bordiers engendrés par l'orogénèse alpine, au cours d'une période pendant laquelle le Sahara était complètement exondé.

Le Mio-Pliocène est ensemble constitué de sables friable ou bien consolidé avec des argiles, qui repose, en discordance, sur diverses formations antérieures.

II.4.4 Le Quaternaire

Le quaternaire saharien se caractérise par des formations meubles et discontinues. Le paysage de surface reflète en place, dès lors les formations majeures se limitent à des glacis, terrasses, ergs et remblaiements. Cette période, d'abord nettement sub-aride atténuée, correspond vraisemblablement au Plio-Villafranchien [36]. Les épaisseurs de ce dépôt détritique augmentent considérablement du Sud au Nord du bassin de 10 mètres environ (voir **figure 2.6**).

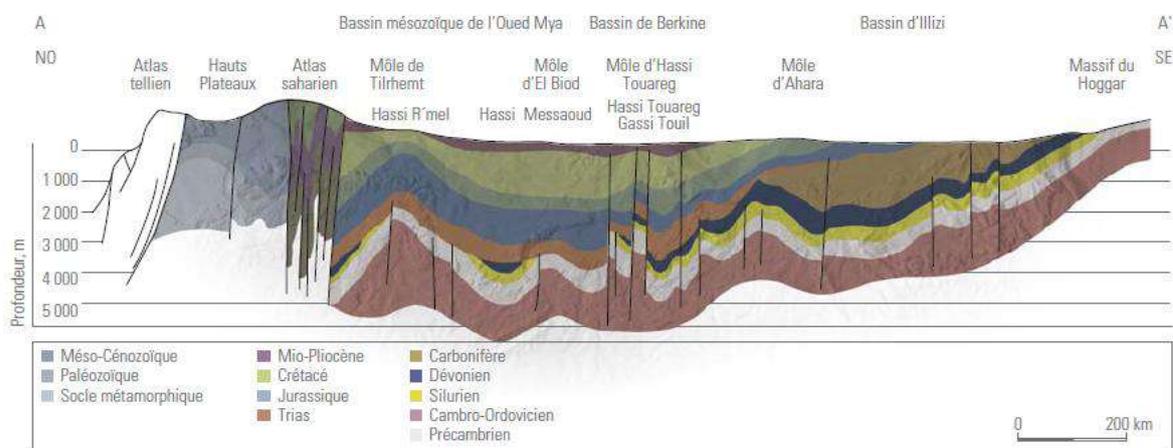


Fig.2. 6 Coupe géologique du Sahara [16].

II.5 Reconstitution paléogéographique

À l'époque paléozoïque, de l'ordovicien à l'époque Carbonifère moyen, sahara septentrionale était recouverte par la mer. Ensuite, surtout dans l'époque du Permien-Trias, elle a traversé alternativement continentale et phases lagunaires. En particulier, le dépôt en certains points de plus de cent mètres de sel; témoigne du régime lagunaire qui s'était établi sur le 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.

Un processus de sédimentation marine a commencé au début jurassique et a duré jusqu'à la fin de la période crétacée où les dépôts de turonien qui sont des séries de nature dolomitique et calcaire. Les rives de la mer ont été déplacées nord-sud et sud-nord, et les profondeurs de la mer a diminué du nord au sud, les processus de sédimentation dans l'ère cénozoïque a subi de nombreux changements.

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 [14].

Pour les dépressions dans la plateforme saharien (exemple sebka et les chotts) voir **figure.2.7**. L'évolution paléogéographique est connu par les transformations du système d'érosion depuis la fin du Villafranchien qui vit le façonnement des pédiments de l'Extrême Sud et l'apparition de la première lagune à Cardium jusqu'à la période actuelle en passant par les différents cycles, quatre au total, qui ont fait alterner planation latérale et érosion linéaire. Au travers de ces épisodes, tour à tour un peu plus froids et un peu plus chauds, se manifeste une tendance à l'accentuation de l'aridité interrompue par des reprises de pluviosité. Nous sommes loin de l'ampleur des variations thermiques et pluviométriques que révèlent les paléosols des montagnes du Sahara central.

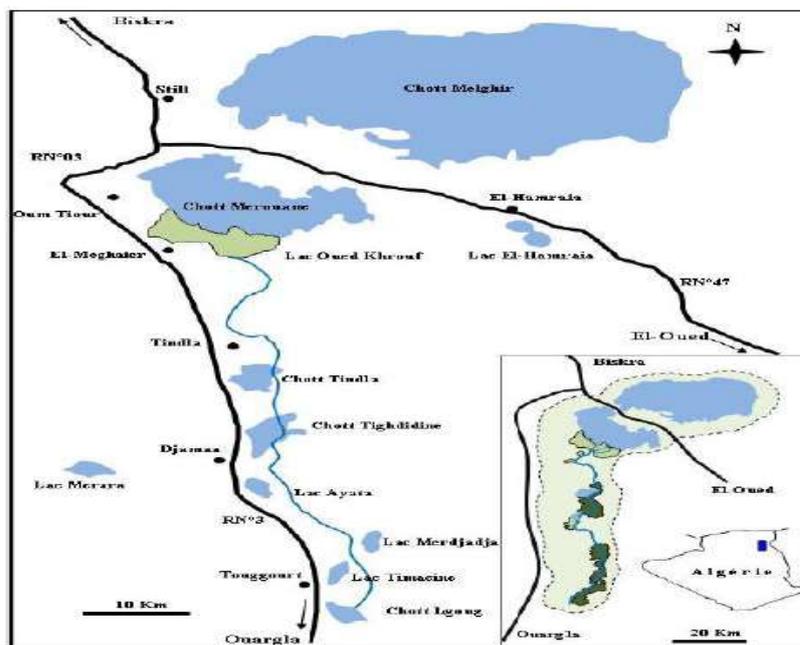


Fig.2. 7 Principales zones chott et sebka de sahara septentrionale de Ouargla jusque chott Melghir (confins Algéro-tunisienne) [37].

Ou Miocène et Plio-quadernaire, Partout au sahara des vallées, des cônes au bas des pentes, des lacs desséchés et des restes humains et animaux témoignent d'un passé plus humide ou les oueds coulaient, ou les steppes à acacias et les lacs s'étendaient à l'infini ; et ceci s'est reproduit plusieurs fois depuis trois millions d'années. Nous traiterons cette période comme un tout, ou dans

sa marge septentrionale, dans la région des grands chotts, l'apparition d'indices, comme des croutes gypseuses ou calcaires suggère une modification des climats voir **figure.2.8** [29].

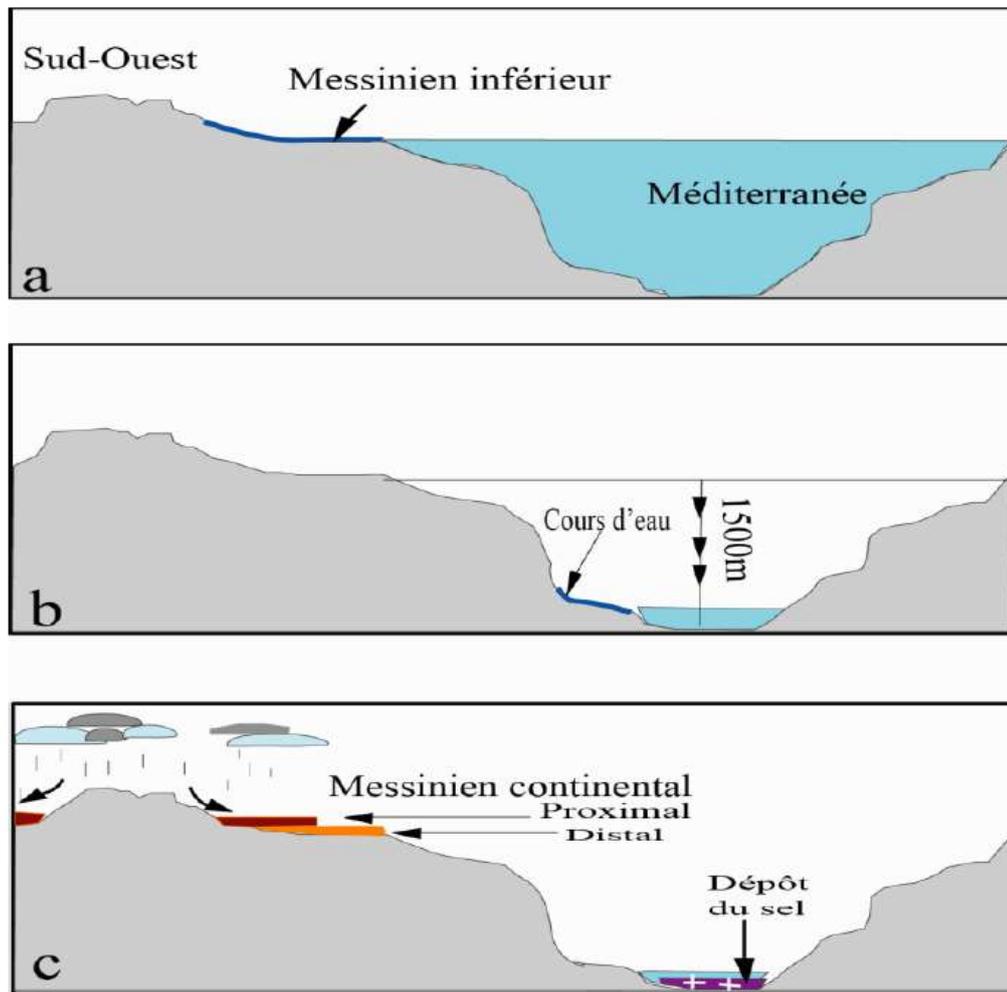


Fig.2. 8 Représentation schématique de la sédimentation Mio-pliocène en Tunisie et en Algérie lors de la crise messénienne [38].

II.6 Hydrogéologie

II.6.1 les ressources en eau superficielles

Les eaux superficielles sont intimement liées à la pluviométrie notamment dans les bassins versants. Au Sahara, elles sont relativement importantes principalement dans l'Atlas saharien (les oueds de la plateforme saharienne tel que oued M'zab, oued N'sa, Oued Mya etc.). Les crues sont généralement rares et proviennent surtout des montagnes de l'Atlas saharienne. De même que dans les régions de Laghouat, du M'zab et de Ouargla. Les informations sont tirées des études de Dubief (hydrologie au Sahara) et notamment celles de l'ANRH. Elles font ressortir un débit

annuel évalué à 250 hm³/an; en plus les pluies de fortes intensité provoquant des crues dans cette région de sahara septentrional.

II.6.1.1 Oued M'Zab

Le bassin versant de oued du M'zab s'étend sur une superficie de 19 500 Km². Il est constitué par deux versants, l'un septentrional se distinguant par des oscillations climatiques causant des averses orageuses, dont les eaux de ruissellement se jettent dans les principaux oueds du bassin, à titre d'exemple Oued M'zab. L'oued M'zab passe par la ville de Ghardaïa, est ainsi constitué par la confluence de trois importants oueds, à savoir : EL-Abiod et Ladira, et aregudane à quelques centaine de mètre de ceux-ci et ce, à l'amont ; et Noumérat à une dizaine de kilomètre en aval de Ghardaïa. Il prend naissance à la région de Botma Touila (cote 750 m), il coule sensiblement, d'ouest en Est sur 225km environ et il se termine à la sebkha Safioune (cote 110 m).

II.6.1.2 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, le Baten, 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 60-80 m, orienté nord-sud, la dépression de Ouargla, 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 Sebkha 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 **figure 2.9**.

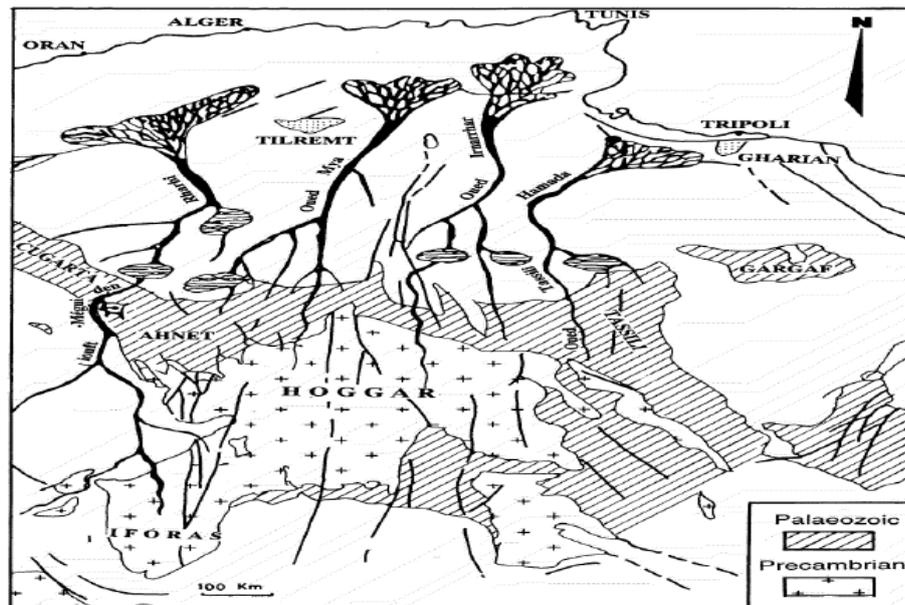


Fig.2. 9 Oued Mya et origine des sable du continental intercalaire [39].

II.6.1.3 Oued N'sa

Le bassin versant de l'oued N'sa s'étend sur une superficie d'environ 7000 km², il connaît souvent des perturbations pluvio-orageuse, qui provoque des crues parfois violentes, entraînant des inondations dans les zones agricoles situées à l'aval du bassin. Le sous bassin de l'oued N'sa, situé Nord de l'Oued M'zab voire **figure.2.10**. Il part de la région de Tilrempt vers (750 m d'altitude) coule sur environ 240 Km en direction Ouest Est puis Sud-Est pour atteindre à la sebkha Safioune à la cote 110m au Nord de Ouargla. L'oued en question se distingue par des crues soudaines et dévastatrices, l'écoulement concerne généralement les deux oueds (N'sa et M'zab). L'évaluation approximative effectuée en vue de déterminer le débit de la crue maximum et l'apport d'eau vers la sabkhas Sefioune. A cet effet, les résultats hydrologiques obtenus par les différents méthodes ont conclu que les apports moyens sont de l'ordre de 1,6 hm³ pour une crue décennale et de 2,6 hm³ pour la centennale, qui déversent dans la sebkha Sefioune.

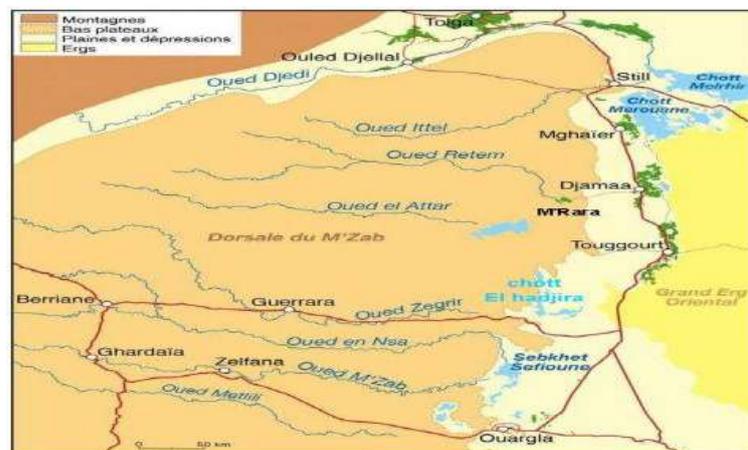


Fig.2. 10 Les oueds de la dorsale du M'Zab [40].

II.6.2 Les aquifères du Sahara septentrional

Tous les types d'aquifères se trouvent en Algérie en raison de la diversité des formations et des structures géologiques. La plateforme saharienne qui est composée de deux types principaux et des grands aquifères des formations continentales du Sahara. Les nappes aquifères du Sahara se localisent dans des formations géologiques variables et peuvent être d'âges différents. Les réservoirs aquifères se trouvant, en général à de très grandes profondeurs, sont souvent captifs [39] voir **figure.2.11**.

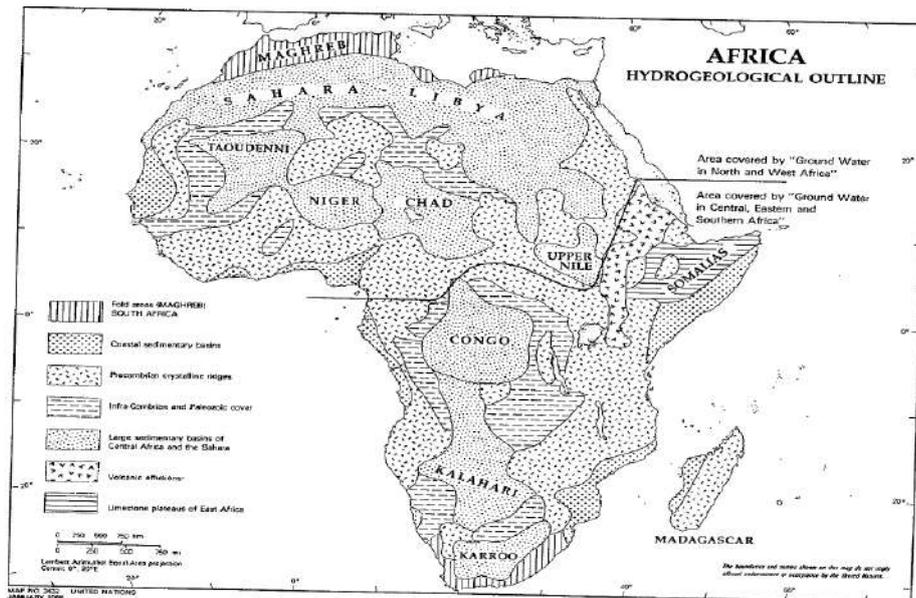


Fig.2. 11 Le différents zone des aquifères dans l'Afrique et Sahara septentrionale [41].

- Nappe phréatique du Quaternaire, et nappe des sables du Mio-Pliocène

Ce sont des petits aquifères isolés drainés par contact faible et adjacents sources avec leur source alluviale ou colluviale supérieure dépôts, généralement perchés et érodés, datant du pliocène ou les périodes quaternaires.

- Nappe des dolomies et calcaires de l'Eocène inférieur.

L'aquifère dolomitique, où toutes les ressources peuvent être exploitées à un endroit dans une zone favorable où l'aquifère est recouvert par une lentille de calcaire extrêmement perméable qui sert d'un drain pour l'ensemble de l'aquifère dolomitique.

- Nappe du gré du Continental Intercalaire et complexe terminal

Ce type d'aquifère est représenté par le "continental intercalé" et "complexe terminal" complexes. Ce sont des formations continentales du Sahara. Dans ce type d'aquifère, le seul réel problème de l'exploitation réside dans la gestion d'un stock très important comparaison avec le taux de recharge annuel et qui doivent être exploités de manière planifiée, et de manière à assurer une

utilisation économiquement acceptable en tout point. Une connaissance de la géométrie des réservoirs et des conditions économiques d'exploitation est indispensable pour la détermination des différents postes le bilan hydrique voir **figure.2.12**.

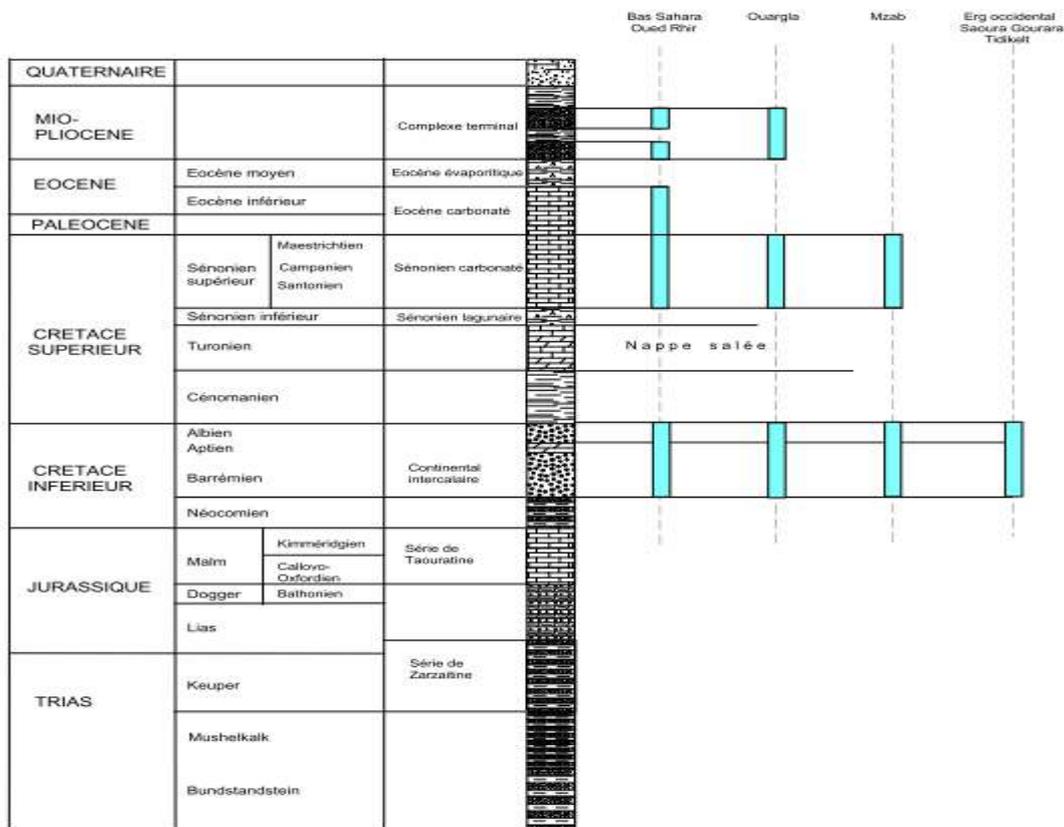


Fig.2. 12 Les formations géologique et les aquifère du bas sahara algérien [42].

II.7 Géomorphologie et unités géomorphologiques

Sur le plan géomorphologique, le Sahara possède plusieurs paysages caractéristiques. En matière de la géomorphologie dans le Sahara algérien, les études menées sont anciennes et descriptives. Notre connaissance de la morphologie saharienne se bornait jusqu'à ces dernières années à des vues générales, appuyées sur les observations des explorateurs et sur des cartes à petite échelle, l'emploi de véhicules tout terrain, la publication des photos aériennes, la généralisation des méthodes d'analyse en laboratoire ont permis de changer d'objectif et d'aborder l'étude de détail.

La **figure 2.13** représente la morphologie générale de la cuvette d'Ouargla qui se divise en quatre unités géomorphologique :

- Les dépressions fermées : Chotts et Sebkhass
- Les regs
- Les Hamadas
- Les ergs (dunes)
- Les oueds

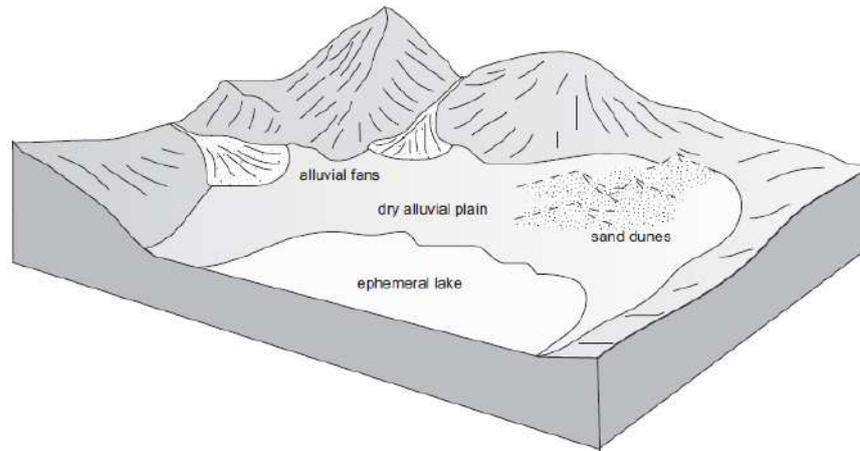


Fig.2. 13 La géomorphologie et milieux de dépôt dans milieux aride et saharien [43].

II.7.1 Les dépressions fermées les chotts et les sebkhas

Marécages salés, 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. Dans la zone aval de l'Ouargla, diverses sebkhas alternent avec des massifs dunaires jusqu'à Sebkha Safioune qui est à 103 m d'altitude point le plus bas de la région.

II.7.2 Les regs

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

II.7.3 La hamada :

Les hamadas sont des plateaux rocheux horizontaux et tabulaires limités par des falaises. Une hamada peut être parfois aussi appelée reg, bien que ce mot corresponde plus à une plaine rocailleuse des déserts plutôt qu'à un plateau rocailleux. Les hamadas sont recouvertes d'un reg éluvial de dissociation, cailloutis provenant de la désagrégation mécanique de la roche. Ces hamadas sont d'âge de 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 200m.

II.7.4 Les ergs (dunes) :

Les formes des dunes varient à l'infini selon l'ancienneté des ergs et les directions des vents dominants; dunes les élémentaires (bombements de sable et dunes en croissant) sont très rares. Plus caractéristiques sont les dunes en vagues transversales par rapport à la direction du vent, et surtout les chaînes de sable, parallèles à la direction du vent dominant (zemploul), au sommet plat, et qu'accompagnent des arêtes aiguës (siouf); ces chaînes, très répandues dans tous les ergs, sont séparées par de longs couloirs (feidjs ou gassis), d'autant plus larges que l'erg est plus ancien, et sont orientées du nord au sud en Libye, plus généralement dans le sens des alizés. Mais des dunes peuvent se rencontrer et leurs formes peuvent être déterminées par des vents de directions différentes [44] voir **figure 2.14**.

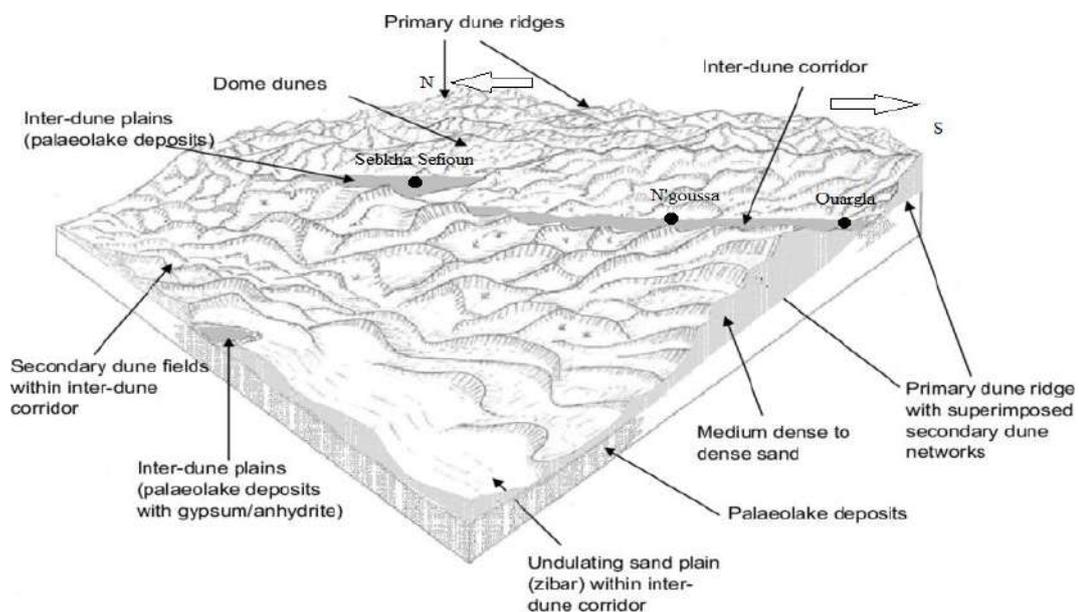


Fig.2. 14 Coupe schématique représente paléo-vallée de la région d'Ouargla.

II.8 Les grands domaines sédimentaires des évaporites

II.8.1 domaine des formations détritiques

Ce domaine s'étend jusqu'à des salinités de 50 à 55 g/l. Les formations dans ce domaine sont détritiques et les coquilles calcaires y sont principalement abondantes; les particules fines sont moins importantes qu'ailleurs. Le sédiment contient moins de matière organique que celui des bassins à salinité plus élevée. Dans cette aire, les laisses de coquilles et de fragments de coquilles de mollusques sont particulièrement remarquables. Les plantes ont un double rôle sédimentologique : apport de matière ligneuse et contribution à la fixation des silts et des coquilles. L'épaisseur des lamines détritiques et aragonitiques va de quelques dixièmes de millimètre à quelques millimètres.

II.8.2 Le domaine algo-sédimentaire

Il correspond à la généralisation des tapis à Micro-coleus et s'étend jusqu'à 150 g/l environ. Les laminations très apparentes de ce tapis correspondent à la répétition des phénomènes suivants. Une lamine détritique, constituée de quartz en général très fin, argiles, carbonates, est déposée vraisemblablement lors de la remise en eau générale du salin.

II.8.3 Domaine des facies de gypse

La précipitation du gypse peut débuter avec des valeurs de salinité inférieures à la valeur théorique. On a émis l'hypothèse que cette avance en particulier par rapport au phénomène de l'évaporation expérimentale de l'eau de mer. Le gypse commence par des couches fines, superposées à un tapis à cyanophycées jaunâtre, déliquescents. A des salinités plus élevées apparaissent des croûtes beaucoup plus massives, ayant jusqu'à une dizaine de centimètres de puissance et d'aspect souvent mamelonné. Puis les dépôts gypseux redeviennent plus fins, dans une aire plus salée où la précipitation du gypse a lieu conjointement avec celle de l'halite.

II.8.4 Le domaine halitique (halite)

Il correspond aux tables salantes qui s'étendent sur environ 7,7 km² et qui n'ont pu, étant donné leur intérêt économique, faire l'objet que de recherches ponctuelles. Les données sur la cristallogénèse du sel, la nature des inclusions par rapport à l'hydrochimie des saumures, les teneurs en brome, etc., ont été développées par ailleurs. Quant aux "vases noires salifères", elles n'ont pu faire l'objet des investigations systématiques qui auraient eu tant d'intérêt dans la mesure où ce substratum du sel récolté fait l'objet de travaux préparatoires chaque année **figure.2.15** et **figure.2.16**.

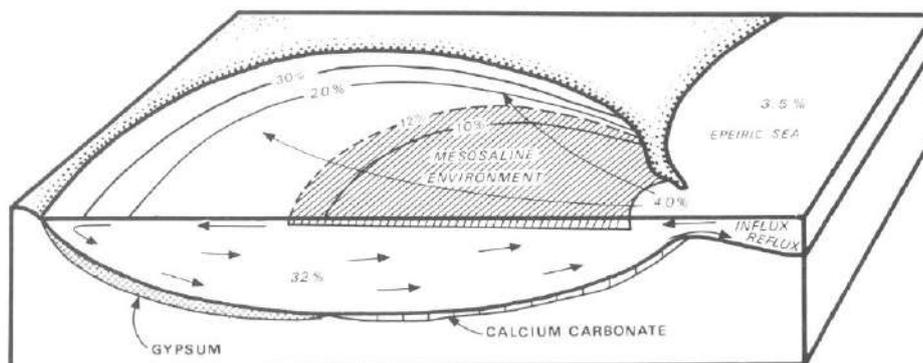


Fig.2. 15 Modèle simplifié d'un bassin à évaporites montrant différents domaines cuvettes salines[11].

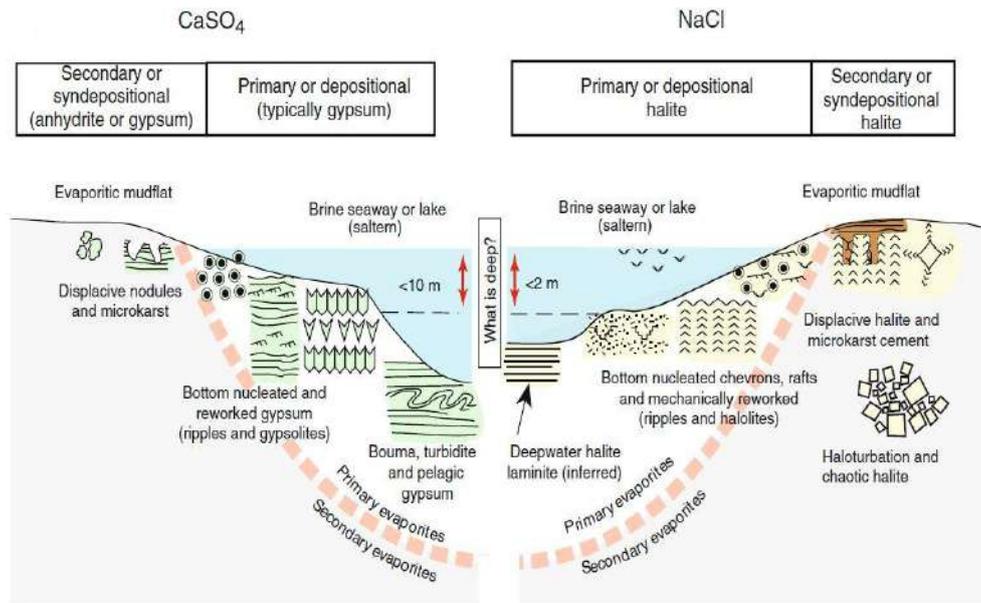


Fig.2. 16 Processus de précipitation des évaporites et des sels [45].

II.9 Aperçu Tectonique

La tectonique est traitée pareillement, en traits sobres et vigoureux. On notera quelques-unes des suggestions nouvelles. Dans le désert, le domaine des Saharides, ou chaînes antécambriennes nivelées, se prolongerait au Nord- Est, et bien au-delà de la frontière algérienne, par une plate-forme, plus déprimée que la mer des Syrtes actuelle, qui supporte non seulement le Tassili N'Ajjer et la hamada de carbonifère d'Issaouan, mais aussi les vastes hamadas crétacées parfaitement horizontales de Tinrert, El Homra, En Neïla [35].

Les bassins du sahara septentrionale est relativement stable. La plate-forme saharienne était le siège de 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 **figure 2.17** qui longent sensiblement les vallées de l'Oued Mya et de l'Oued Righ à marquer 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, 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.

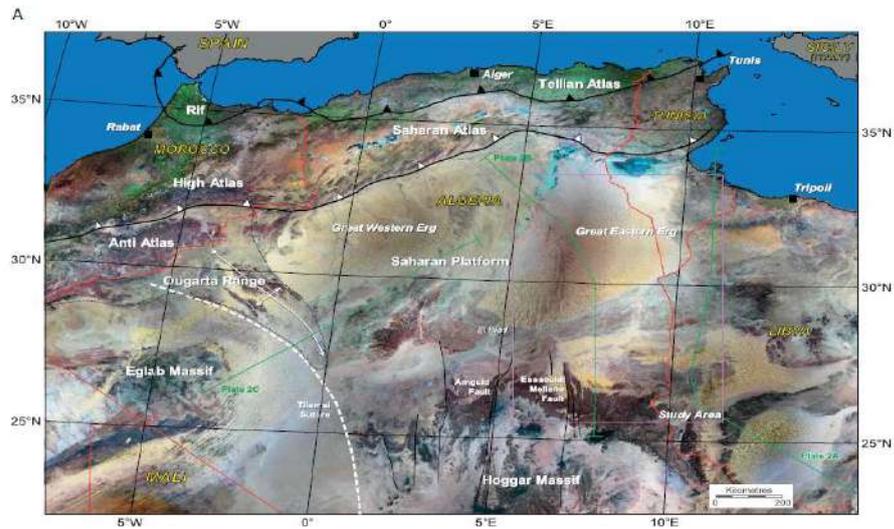


Fig.2. 17 Image satellite des différents domaines tectonique représente l’Afrique de nord et sahara septentrional [46].

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 [29]. 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 certains 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.2.18.

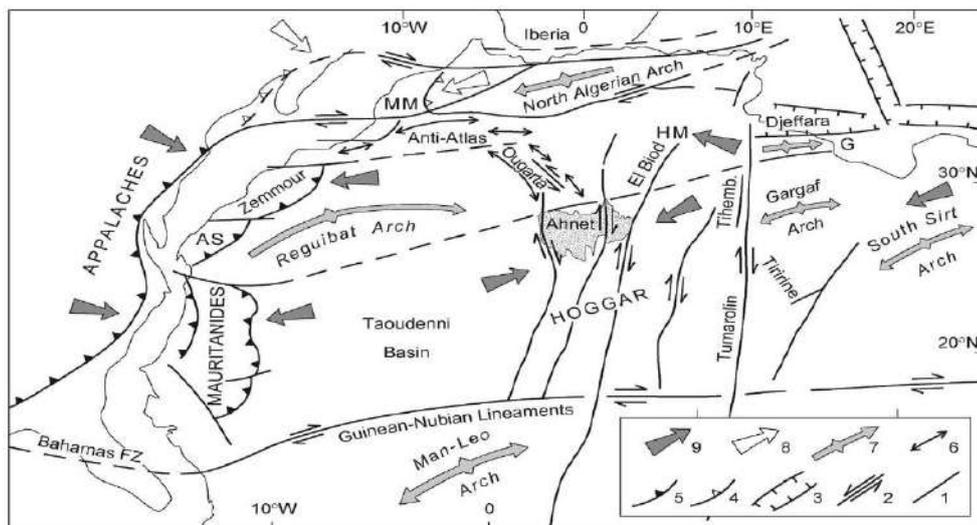


Fig.2. 18 Carte tectonique de l’afrique de Nord et sahara septentrionale [47].
 1: faille majeur, 2: majeur faille transformante, 3: Rift, 4,5,6: les chaines orogéniques
 7,8,9 chaines montagneuse

II.10 Conclusion

Les principaux traits de la stratigraphie saharienne sont l'énorme lacune sédimentaire, qui va de la fin du Carbonifère au Crétacé moyen, pendant laquelle tous les reliefs antérieurs ont été nivelés. Les deux séries épaisses de sédiments continentaux : les premiers, immédiatement antérieurs à la transgression cénomaniennne, sont les « grès à dragées », mêlés de volumineux troncs d'arbres silicifiés et de restes de poissons ou de reptiles ; ils constituent la base de la plupart des plateaux calcaires, mais s'étalent aussi, suppose-t-on, au Sud-Ouest, sous les Ergs et dans le Tanezrouft du Sahara occidental. Pour des raisons de position, confirme leur attribution à l'étage albien ; les seconds, plus localisés, concentrés au pied de l'Atlas dans sa partie médiane et dans le Sahara constantinois, où l'Erg Oriental les recouvre à moitié, nés du ruissellement, accumulés dans des lacs ou dans des chotts, vannés par le vent, offrent une étonnante diversité et se superposent parfois sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Leur dépôt paraît avoir commencé dans la deuxième moitié du Néogène, et les plus récents se confondent avec le Quaternaire [35].

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

- La région fait partie de plateforme saharienne et se localise dans la partie septentrionale du Sahara Algérienne. Elle est constituée cinq grands ensembles d'affleurement exogène :
- Dune de sable, Quaternaire indifférencié, Mio-Pliocène, Plio-Quaternaire, Sénonien et Eocène
- Avec des unités endogènes complète de Mésozoïque et de Cénozoïque (tertiaire et quaternaire).des lacune ou cours de paléozoïques.
- Les activités tectoniques ont produit des dépressions et des chotts de direction NE-SW, accompagnés
- Au Plio-Quaternaire enfin, les dépressions fermées ont vu s'accumuler des dépôts contenant d'importantes concentrations de sel gemme provenant du lessivage des niveaux salifères plus anciens.
- Du point de vue hydrogéologique, les calcaires d'âge Crétacé bordant la plaine, pourraient jouer le rôle d'importants aquifères d'eau. Les fractures pourraient constituer au sein de ces assises des réseaux prêts à emmagasiner ou faire circuler d'importantes quantités d'eau. Les assises marneuses constitueraient un substratum imperméable, que ce soit au niveau des bordures ou au centre de la plaine. A l'intérieur de la plaine, on a des formations alluvionnaires qui se composent de galets, de cailloutis, de graviers, de sables et de limons, qui pourraient avoir une porosité primaire et former des nappes alluviales.

CHAPITRE III :
MATERIELS ET METHODES

III.1 Introduction

L'échantillonnage est une étape incontournable des études hydrogéochimiques. Les caractéristiques de la méthodologie employée sont déterminées en fonction des objectifs de l'étude. Avant d'exposer les résultats des mesures et d'analyses physico-chimiques d'eau obtenus dans notre zone d'étude, 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 [14].

Dans ce chapitre, il est question dans un premier temps des divers aspects techniques de la campagne d'échantillonnage réalisée pour ce projet. Par la suite, les paramètres hydrogéochimiques mesurés sur le terrain et analysés en laboratoire sont présentés.

III.2 La campagne d'échantillonnage

Les caractéristiques géologiques décrites se rapportant aux stations d'échantillonnage, des caractéristiques techniques ont été définies pour permettre l'échantillonnage dans l'atteinte de nos objectifs. Il aura fallu définir des critères d'échantillonnage permettant d'évaluer la variabilité hydrogéochimique spatiale et temporelle, sélectionner du matériel de terrain adapté aux divers cas de figure et fixer des étapes de conditionnement des échantillons afin d'optimiser la qualité et la fiabilité des résultats d'analyse.

III.3 Protocole d'échantillonnage des solutions

En milieu saharien dans les oasis du sud d'Algérie, l'eau des nappes souterraines est la seule ressource permettant de faire face aux besoins de l'irrigation et de différents usages domestiques. Cette eau est assez chargée en sels et le devenir du milieu oasien s'avère largement conditionné par une bonne gestion de l'eau dont les ressources sont peu renouvelables [48]. Pour une étude dans cette région de sud d'Algérie la zone des oasis.

Dans chott Baghdad, 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.

D'une part, Les eaux d'irrigation dans l'oasis de N'goussa ont été prélevées au niveau de 20 forages qui alimentent actuellement tout le périmètre irrigué.

D'autre part, Un réseau de 16 piézomètres ont été installé dans sebkha de N'goussa. L'étude de la composition chimique des eaux de la nappe phréatique superficielle a été réalisée sur des échantillons prélevés à partir 16 piézomètres représentatifs de toute la superficie de cette sebkha qui est située à l'entour de oasis de N'goussa. Les eaux d'irrigation sont prélevées pour une seul compagne c'était en mois de mars 2018 tandis que les eaux de sebkha ont été prélevées au cours de deux saisons en 2017 et 2018. Les piézomètres sont installés dans la partie endoréique zone de sebkha pour voir et poursuivre la trajectoire des eaux voir **figure.3.1, figure.3.2** et **figure.3.3**.

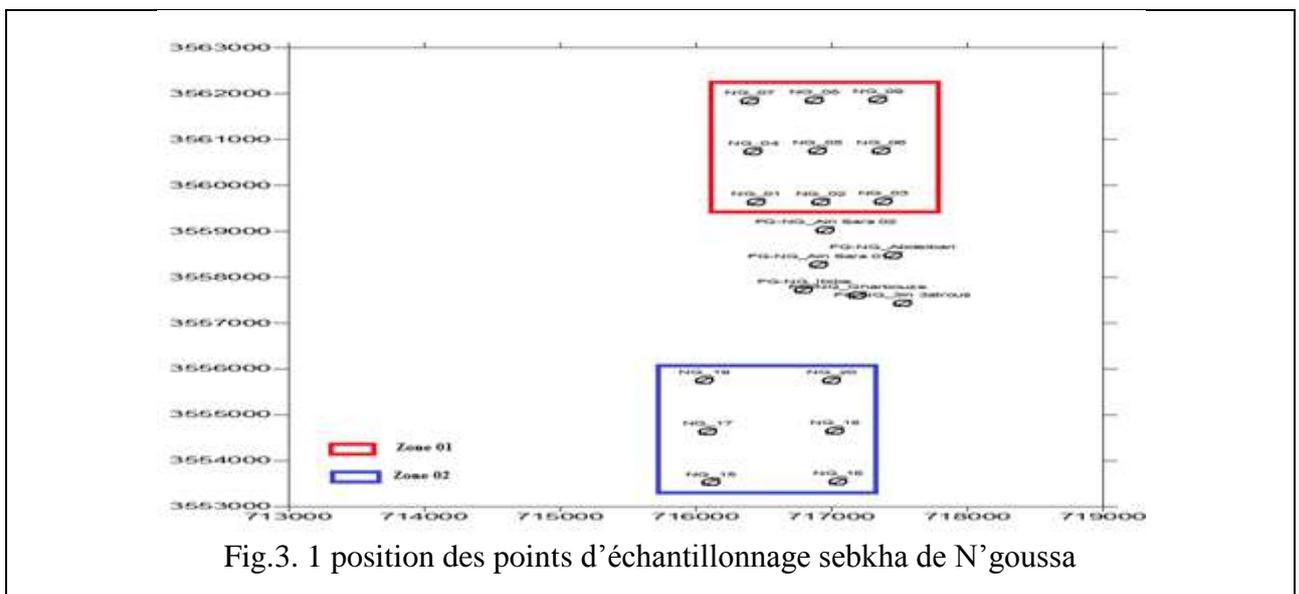


Fig.3. 1 position des points d'échantillonnage sebkha de N'goussa

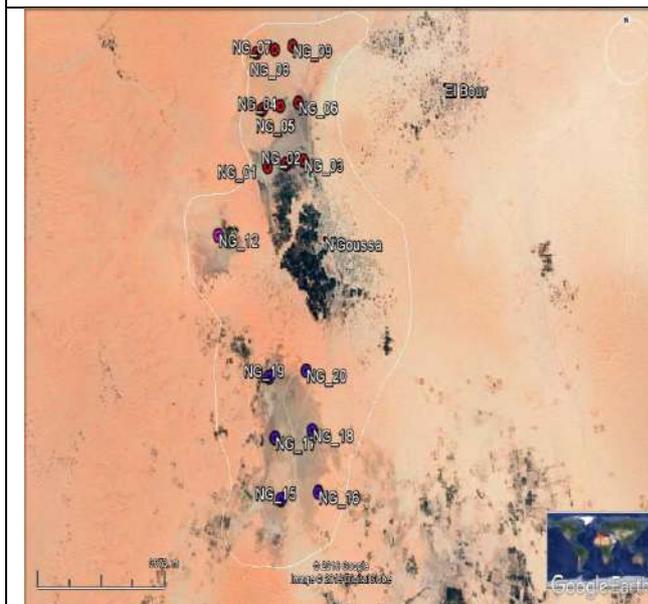


Fig.3. 2 Répartition des Piézomètre dans sebkha de N'goussa.

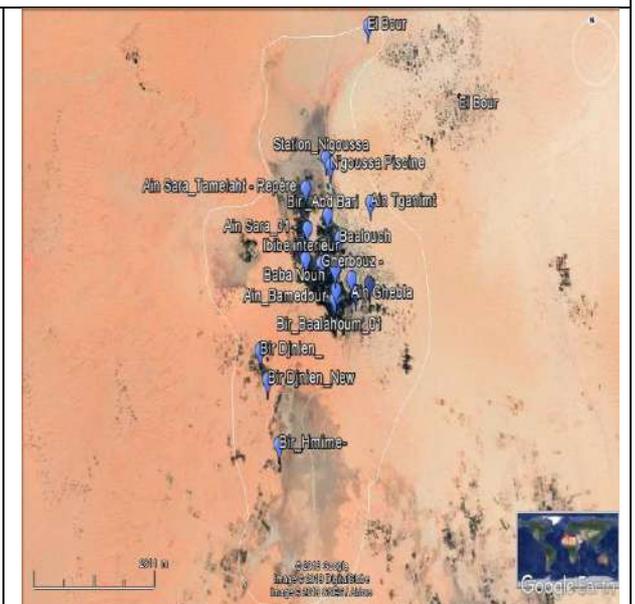


Fig.3. 3 Puits d'eaux destinées à l'irrigation.

L'étude de la composition chimique des eaux de sebkha a été réalisée sur des échantillons prélevés à partir des piézomètres représentatifs de tous les chotts. Ces piézomètres sont implantés ce forme d'une maille équidistances.

Pour la bon suivre de chimisme des eaux de la zone humide (chott et sebkha), Les eaux d'irrigation et les eaux de sebkha ont été prélevées (dans des bouteilles bien référenciées) saisonnièrement entre année 2017 et 2018. Pour toutes les eaux étudiées le pH et la conductivité électrique ont été mesurés sur place et des échantillons d'eau ont été prélevés pour analyse chimique au laboratoire. Les analyses ont été faites au laboratoire géologie de sahara à l'université de Kasdi Merbah. Ces analyses ont porté sur les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-).

Les résultats de ces analyses ont été traités et vérifiés pour la cartographie du niveau piézométrique et de la salinité des eaux de la nappe, nous avons utilisé les 16 piézomètres pour avoir un maillage assez représentatif de tout l'oasis de N'goussa.

Avant les prélèvements, une extraction et vidage de l'eau existe dans les piézomètres à l'aide d'une bouteille d'échantillonnage. Le plus souvent été effectué de manière à obtenir un échantillon représentatif de l'eau de la nappe phréatique.

Les mesures pratiquées sur le terrain concernent le niveau statique. La présence d'un réseau piézométrique dans la zone d'étude nous a permis de collecter suffisamment des données permettant de construire une carte piézométrique. Toutefois, les mesures de niveaux statiques ont été effectuées dans des piézomètres qui sont réparties dans toute notre zone d'étude afin de voir les variations des niveaux piézométriques dans le temps, et dans l'espace "spatio-temporelle.

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. Les flacons de prélèvement sont rincés 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 quarte prélèvements sont repartis comme suit ; les prélèvements pendant période d'une année (prélèvements saisonnières).

III.3.1 Echantillonnage des eaux souterraines

III.3.1.1 Généralités

L'échantillonnage des eaux souterraines nécessite le forage d'un puits susceptible de Permettre le prélèvement d'un échantillon d'eau représentatif. Il nécessite l'élaboration d'une Stratégie détaillée visant à déterminer les techniques de forages les plus appropriées, les différents types de puits, leur nombre et les équipements pouvant être utilisés.

Les méthodes d'installation de puits de surveillance et de collecte d'échantillons d'eau souterraines ont été développées dans le but spécifique d'obtenir des échantillons d'eau représentatifs de l'aquifère et eau sub-surface (nappe phréatique). Ces méthodes minimisent le risque d'introduction de polluants potentiels lors de l'installation des puits. Ces puits spécifiques se nomment des piézomètres.

III.3.1.2 Les piézomètres de sub-surface

Le piézomètre est à l'origine un dispositif qui a pour objet de permettre la mesure de la charge hydraulique d'un aquifère. Il est constitué par un forage de faible diamètre destiné à mesurer le niveau de l'eau dans un sol. Ces piézomètres (voire **figure.3.4** et **figure.3.5**) sont utilisés pour prélever des échantillons d'eau car ils sont en général équipés d'une crépine courte permettant le prélèvement stratifié d'une nappe et donc l'accès à un échantillon représentatif de l'aquifère. L'implantation sur un site, de plusieurs piézomètres à l'aide d'une tarière creuse manuelle (voir **figure.3.6**) en divers endroits permet de mieux cerner la composition réelle de la nappe et le cas échéant la présence, la concentration et la direction d'un panache de pollution.



Fig.3. 4 Préparation des tubes des Piézomètre en PVC.



Fig.3. 5 Photo de piézomètre NG_12 dans zone 03 sebka de N'goussa

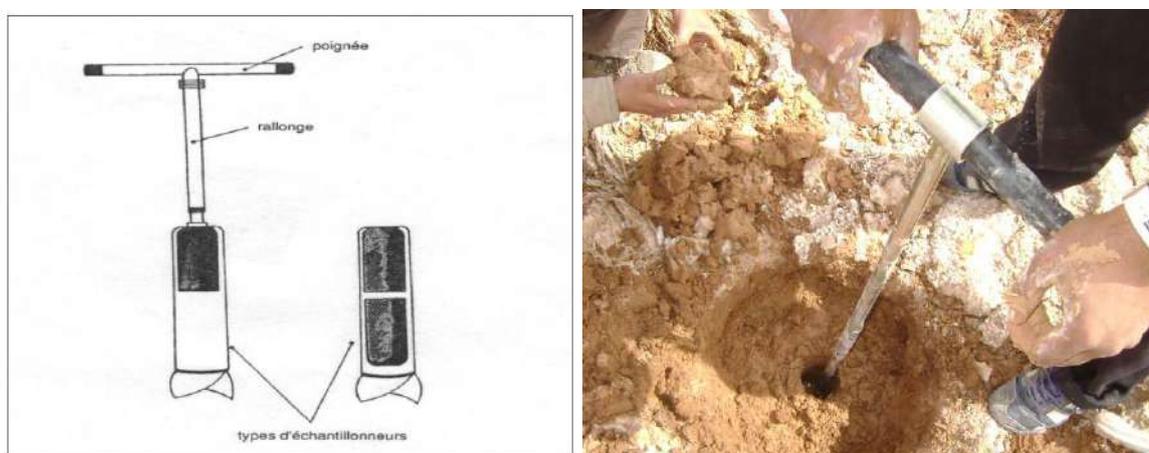


Fig.3. 6 Tarière creuse manuelle.

III.3.1.3 Type d'échantillonnage

Généralement dans notre étude qui est considéré comme un domaine des dépressions et des chottes, deux méthodes classiques d'échantillonnage ont été adoptées la méthode par quadrillage, la méthode par transects **figure.3.7**.

- Méthode par quadrillage : notre chott est subdivisé en de multiples mailles et l'échantillonnage s'effectue au centre de chaque cellule. Les points d'échantillonnage sont équidistants ;
- Méthode par transects : deux transects sont tracés, le premier longitudinalement au chott et la seconde perpendiculaire au premier. Les points d'échantillonnage sont placés à équidistance tout au long des deux transects. L'intersection des deux transects correspond au centre de la lagune (pour les études postérieures).

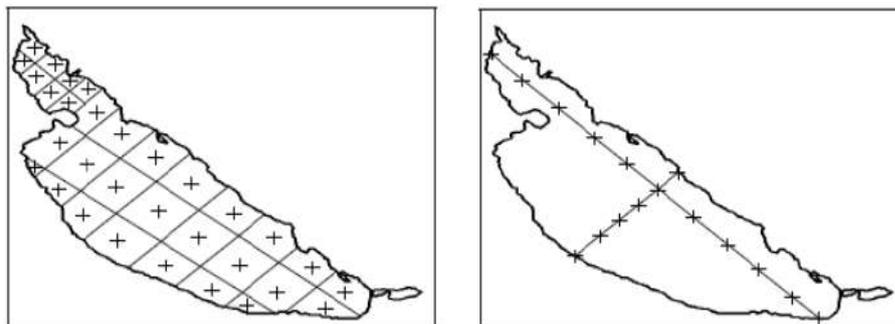


Fig.3. 7 Méthode d'échantillonnage par quadrillage.

III.3.2 Conditionnement des échantillons en solution

Pour l'échantillon d'une eau de surface au bien de sub-surface, un volume d'eau doit être prélevé celui-ci doit être parfois filtré, parfois il doit toujours être stocké adéquatement.

III.3.2.1 La Filtration

La filtration permet de retirer les particules solides en suspension dans l'eau et d'obtenir un liquide homogène voir **figure.3.8**. L'eau a été prélevée à travers un filtre de type double rings diamètre de $0,45\mu$. L'objectif de ce filtre retire la majorité des bactéries, la plupart des particules argileuses. Le liquide obtenu après l'opération de filtration, appelé filtrat, est limpide : il s'agit d'un liquide homogène puisqu'il ne contient plus de particules solides ou les résultats des analyse sera plus fiable.



Fig.3. 8 Principe de la filtration.

III.3.2.2 Le stockage

Le stockage des échantillons constitue la dernière étape de l'échantillonnage. Les échantillons ont été placés dans une glacière qui permettait de les maintenir au frais à l'aide de sac de glace et de les préserver totalement de lumière, des poussières et des salissures. Au laboratoire, les échantillons ont été conservés au réfrigérateur entre $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

III.3.2.3 Techniques de mesures et d'analyses

A. Mesures in situ (Analyse de terrain)

Les analyses dites de routine comprennent les mesures des variables suivantes d'eau sub-surface (nappe superficielle) et de l'eau des forages, ces eaux qui sont utilisées pour l'irrigation : la mesure in-situ sur terrain de température en °C, le pH, l'oxygène dissous (O₂) en mg/l, la conductivité en mS/cm (μs/m) se fait par multi-paramètre de terrain à sonde électronique. Les multi-paramètres sont des appareils permettant la mesure de différents paramètres chimiques comme la mesure de pH ou de conductivité. L'appareil change de mode en fonction de la sonde qui lui est connectée. Compact et portable, cet appareil permet des mesures rapides et fiables, en laboratoire comme à l'extérieur. Deux appareils sont utilisés multi-paramètre PH et cond Hanna HI 9829 **figure.3.9.**et **figure.3.10.**

Les mesures pour les eaux superficielles de chott ont été réalisées chaque saison à partir de Janvier 2017 jusqu' Aout 2018, mais pour les eaux de forage une seule campagne a été réalisée afin de voir le chimisme de nappe exploitée dans notre zone d'étude. Les variables de routine sont mesurées à généralement entre 10h00 -13h00 sur notre site d'étude.

Le niveau d'eau dans les puits et les piézomètres étaient mesuré à l'aide d'une sonde électrique du niveau piézométrique, laquelle émet un signal acoustique au contact de l'eau. Les mesures des paramètres sont effectuées avec des sondes électroniques appropriées pour chacun des paramètres.



Fig.3. 9 Multi-paramètre a paillasse Metrohm.

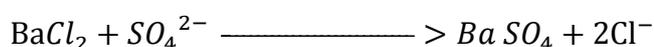


Fig.3. 10 Multiparamètre PH et cond Hanna HI 9829.

B. Analyses au laboratoire

B.1 Dosage gravimétrique des ions sulfates

La gravimétrie par précipitation est une méthode d'analyse quantitative qui permet de séparer les ions d'une solution grâce à une réaction de précipitation. L'espèce chimique qu'on ajoute pour induire la réaction de précipitation, est appelé précipitant ou réactif de précipitation. Le précipité formé est ensuite séparé des autres composants liquides par opération de filtration à l'aide d'un appareil à filtration sous vide **figure.3.11**, et on utilise la masse de ce solide, ainsi que l'équation-bilan de la réaction, pour calculer la quantité ou la concentration en composés ioniques dans la solution. Le dosage gravimétrique des ions sulfates (SO_4^{2-}) a lieu après acidification, chauffage et ajout d'un excès d'une solution de chlorure de baryum ($BaCl_2$) selon la réaction suivante:



La masse de sulfate de baryum précipité permet de calculer le taux en sulfate dans l'échantillon analysé. La teneur en sulfate, exprimée en $g L^{-1}$ est donnée par la relation suivante :

$$[SO_4^{2-}] = \frac{M_{BaSO_4} \times M_{SO_4^{2-}}}{M_{BaSO_4} \times V_p} \times 1000 \dots\dots\dots 1$$

V_p : Volume de la prise d'essai (en ml)

M_{BaSO_4} : masse de $BaSO_4$ formé.



Fig.3. 11 Appareil à filtration sous vide en verre par raccord rodé.

B.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 (**figure.3.12**). Pour les concentrations faibles (quelques mg/l en général), l'absorbance est proportionnelle à la concentration si la loi de Beer-Lambert est on obtient une droite. En revanche, pour les concentrations plus élevées les cas des eaux salées des chotts et les sebkhas. 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 le 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.

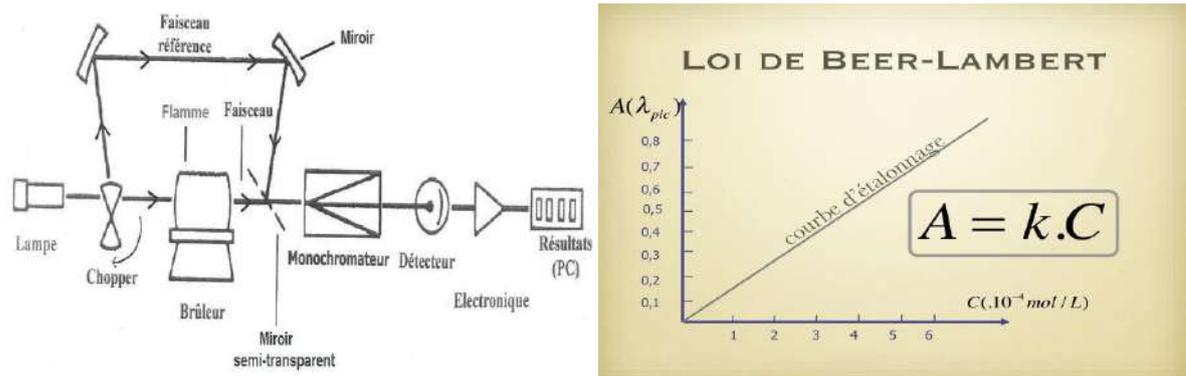


Fig.3. 12 Principe Emission de flamme (lois de Berr-Lambert).

Le sodium Na^+ , Calcium Ca^+ et le potassium K^+ : sont analysés par le photomètre à flamme, de marque Sherwood flamme photomètre. Photomètres de flamme Modèle JENWAY PFP7 voir **figure.3.13** de précision : < 0.2 ppms.



Fig.3. 13 spectrophotomètre à émission de flamme type JENWAY PFP7.

Les réactifs sont des solutions étalons de chaque élément, Qui sont préparé ou niveau de laboratoire géologie du sahara à l'université d'Ouargla (UKMO). Les courbes d'étalonnage correspondantes au dosage de ces éléments sont représentées dans la **figure 3.14**, **figure 3.15** et **figure.3.16**.

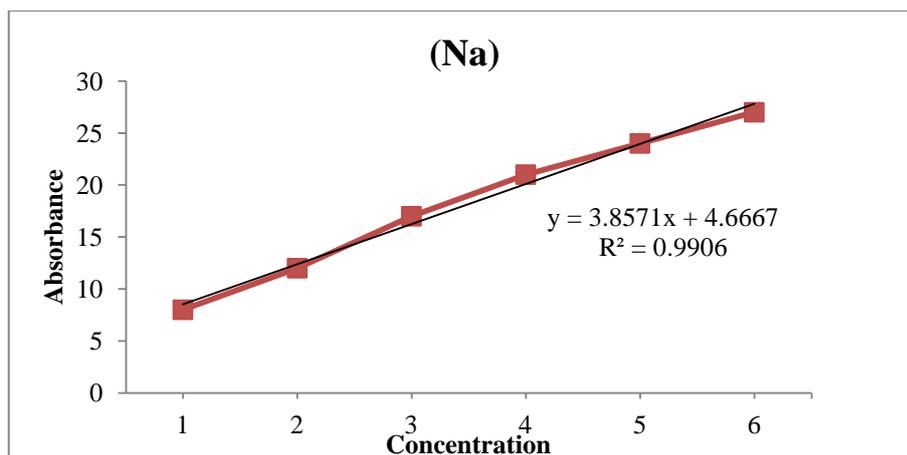


Fig.3. 14 Courbe d'étalonnage du sodium.

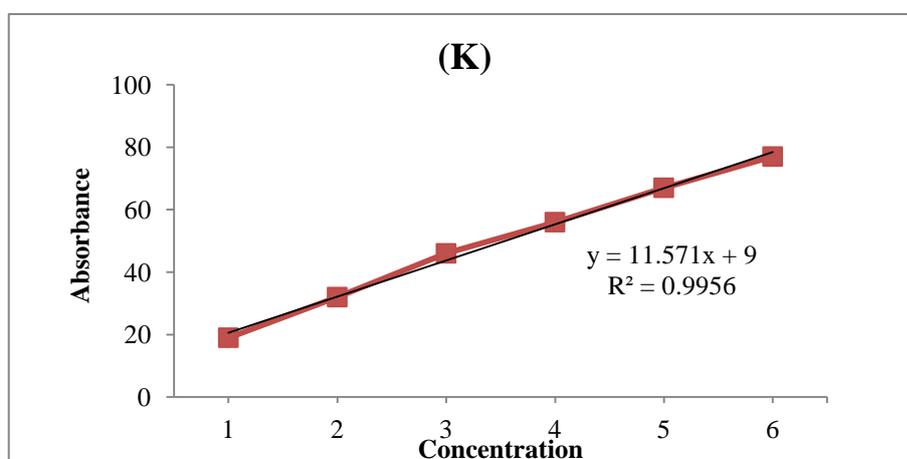


Fig.3. 15 Courbe d'étalonnage du potassium.

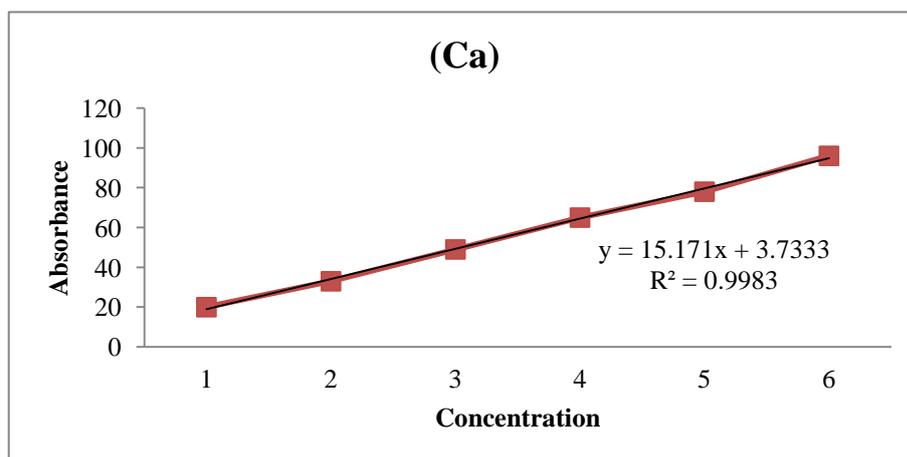


Fig.3. 16 Courbe d'étalonnage du calcium.

B.3 La titrimétrie

La titrimétrie c'est l'opération qui consiste à déterminer la concentration d'une espèce chimique (Mg et HCO_3) 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 bicarbonates HCO_3^- , ainsi que le magnésium ont été dosés par la méthode de titrimétrie.

- Protocole expérimental typique d'un titrage

- 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 **figure 3.17**.
- 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.

On mesure alors le volume équivalent V_{equiv} c'est dire le volume de solution titrant versé pour atteindre l'équivalence ; la détermination

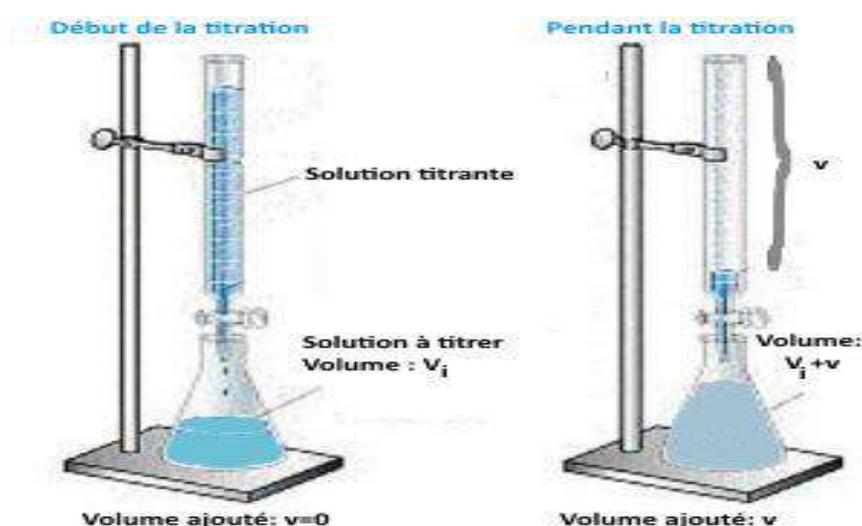


Fig.3. 17 Mode typique d'un titrage.

Expérimentale de $V_{\text{équiv}}$ permet de calculer la concentration inconnue C_A (cf plus loin (détermination de la concentration de l'espèce à titrer).

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

- Détermination du magnésium (Mg^{2+})

Préparation solution :

*solution tampon : 70 g de chlorure d'ammonium NH_4Cl + 500 mL d'eau distillé + agitation + 350 ml d'ammoniac 25 % puis on complète avec de d'eau distillé jusqu' à 1L.

*EDTA à (0,05 M)

Expérimentation :

- Prendre 10 ml échantillon dilution 200.
- Ajouter 3 ml de solution tampon NH_4 .
- Ajouter 40 ml d'eau distillée.
- Ajouter une pointe de spatule de noir d'ériochrome.
- Chauffer la solution à 60 °C pendant quelque minute.
- Titrer avec l'EDTA (0,05 M) jusqu' au virage du rose au bleu.

Résultats :

$$[Mg^{2+}] \text{ (g/l)} = \frac{V_{EDTAeq} \times [EDTA]}{V_p} \times M_{Mg} \dots\dots\dots 2$$

- Détermination du Bicarbonates (HCO_3^-)

Mode opératoire

- On prend un volume V_p de solution (dilution 100)
- On y ajoute 2 gouttes de méthylorange.
- Titration avec HCl (0,1M) jusqu' à virage de couleur.

Résultats :

$$[HCO_3^-] \left(\frac{\text{mol}}{l} \right) = \frac{[HCl] \times V_{eq}}{V_p} \dots\dots\dots 3$$

B.4 Détermination du Chlorure par titrage poten-tiométrique appareille type Metrohm

La Potentiomètre est une méthode électrochimique permettant la mesure de la force électromotrice d'une pile formée d'une électrode spécifique et d'une électrode de référence plongée dans une solution à doser [49].

Le titrage poten-tiométrique est suivi par mesurant l'évolution du potentiel en fonction du volume ajouté du titrant à l'aide d'un appareil à programme pour titration (nitrate d'argent AgNO₃) **figure.3.18** et **figure.3.19**.

Ce potentiel est directement lié à la concentration en Cl⁻ qui varie au cours de la réaction suivante :



Fig.3. 18 Potentiomètre automatique type Metrohm.

Mode opératoire :

- On prend un volume V_p de solution (dilution 200)
- On y ajoute 2 mL de HNO₃ (2M).
- On complète avec l'eau distillée jusqu'à émergence de l'électrode.
- La concentration en ions Cl⁻ est donnée directement par l'appareil de mesure.

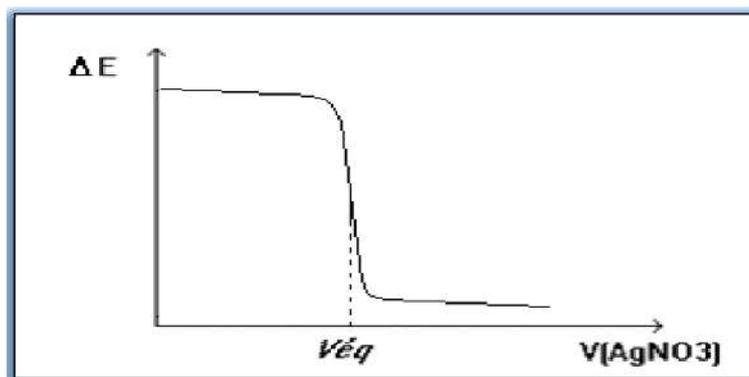


Fig.3. 19 Evolution du potentiel en fonction du volume ajouté de nitrate.

III.4 Protocole d'échantillonnage 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 la dizaine. 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 nommés et numérotés.

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

III.4.1 Préparation des échantillons solides

À 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 analyses diffraction de rayon X et MEB afin de voir une idée sur la minéralogie des sels précipités. 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.

III.4.2 Tamisage des sédiments et séparation de la fraction inférieure à 2 mm

Pour établir une sédimentologie, La granulométrie des sables est réalisée par tamisage à l'aide de la série de tamis normalisés AFNOR 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 $63 \mu\text{m}$, et $<63 \mu\text{m}$). Les tamis ont été bien nettoyés avant d'utilisation et après le tamisage de chaque échantillon voir **figure.3.20**.



Fig.3. 20 Série de tamis utilisé dans le tamisage de sable région d'étude

Les résultats ont servi à tracer des courbes cumulatives et des courbes de fréquences. Ces courbes ont permis de calculer certains indices granulométriques selon les formules de Folk & Ward (1957). Les analyses micro-granulométriques ont été effectuées à l'aide d'un Sédigraph 5000D sur des sédiments riches en fractions fines. Les carbonates sont déterminés par calcimétrie de Bernard confirmés par les analyses chimiques alors que les estimations quantitatives sont déterminées par la diffractométrie des rayons X. L'observation de la taille et de la forme des grains de sables des dunes, lavés et attaqués à l'HCl, est réalisée à l'aide d'une loupe binoculaire. Enfin, les minéraux lourds ont été séparés par la méthode densimétrique (Parfenoff, 1970).

III.4.3 Broyage des échantillons pour analyse DRX et MEB

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.

III.4.3.1 Diffraction en rayonnement X (DRX)

La cristallographie aux rayons X ou diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière. La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique. Cette méthode utilise un faisceau de rayons X qui rencontre le cristal provoquant la dispersion du faisceau lumineux dans des directions spécifiques. L'analyse DRX consiste à interpréter la relation de position d'intensités diffractées. Chaque phase cristalline à un diagramme de diffraction unique et, par conséquent, la diffraction XRD est la norme de référence pour l'identification des matériaux (minéraux dans le domaine de géologie)[50].

Dans la méthode à poudre pour les sels obtenus de notre zone d'étude on utilise un rayonnement Monochromatique, ce rayonnement sur un échantillon composé d'un grand nombre de micro cristaux de tailles de l'ordre de 0.01 à 0.001 mm. Pour chaque plan réticulaire (hkl) il se trouve forcément dans l'échantillon des micros cristaux en position de réflexion, alors ils donnent des faisceaux diffractés déviés de 2θ par rapport aux faisceaux primaires. L'ensemble de ces faisceaux réfléchis forme une d'ouverture 2θ tels que l'angle θ est défini par la relation de BRAGG $2d \sin \theta = n \cdot \lambda$ voir **figure.3.21**.

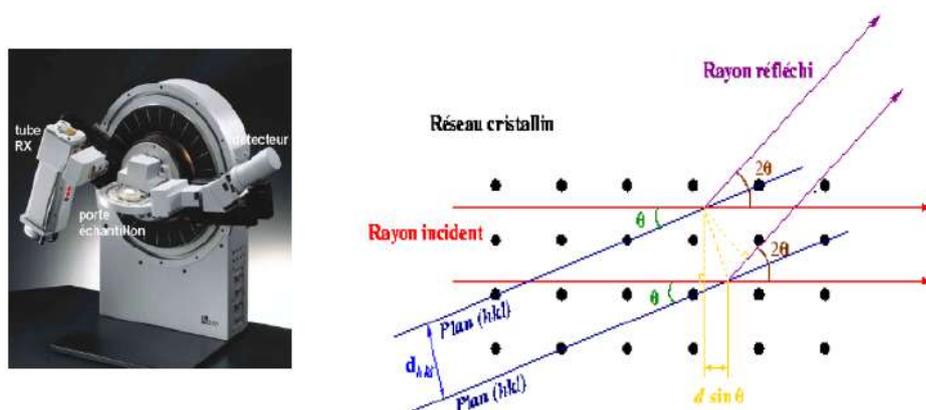


Fig.3. 21 Géométrie Bragg- Brentano expliquant la loi de Bragg par analogie à la réflexion[51].

Dans cette étude, la caractérisation des sels est effectuée par DRX qu'est une méthode expérimentale afin d'examiner toutes les caractéristiques pertinentes des évaporites et des sels. Patterns XRD des sels ont été obtenus par un modèle de poudre de Rigaku Diffractomètre à rayons X avec rayonnement Cu K alpha voir **figure.3.22**. Le DRX est utilisé pour déterminer la composition minéralogique des évaporites et des sels précipité dans les cuvette de sahara septentrionale et l'identification de leur composants ainsi que phase qualitative et quantitative analyse de mélanges.



Fig.3. 22 Diffractomètre de rayon X type Rigaku.

III.4.3.2 Microscope électronique à balayage (MEB)

Le microscope utilisé dans les analyses est un microscope de type FEI Quanta 250. Avec cet appareil, il n'est plus nécessaire, comme dans le cas du microscope électronique à balayage (MEB) classique, de traiter préalablement les échantillons (déshydratation et, dans le cas de matériaux isolants, utilisation d'une substance conductrice). Cela présente des avantages incontestables dans l'analyse des géomatériaux[52]. Cet appareil est un microscope électronique à balayage à canon à émission de champ (Field Emission Gun). Ce type de microscope permet d'observer des échantillons dans trois modes différents :

- Mode haut vide (HV) $<6 \times 10^{-4}$ Pa
- Mode faible vide (LV) de 10 à 130 Pa
- Mode environnemental (ESEM) de 10 à 4000 Pa

Ce microscope électronique à balayage environnemental (MEBE) offre la caractérisation à haute résolution, morphologique et chimique, d'une surface, quelque soit le matériau. Il s'est révélé être un puissant outil de caractérisation des matériaux voir **figure.3.23**. A cet effet, la surface est balayée par un faisceau d'électrons et une image détaillée est générée (détecteur SE). A l'aide de

différents détecteurs à titre d'exemple l'EDX qu'est l'analyse dispersive en énergie des rayons X. L'utilisation de cette technique permettant la caractérisation élémentaire chimique locale et la détermination de la composition chimique de l'échantillon analysé par cette méthode.



Fig.3. 23 Microscope électronique à balayage FEI Quanta 250.

III.5 Logicielle et software

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 effectuées dans des fichiers.

III.5.1 Phreeqc interactive

PHREEQC version 2 est un programme informatique écrit en langage de programmation C conçu pour une grande variété de calculs géochimiques aqueux à basse température. Cette version est un programme informatique permettant de simuler des réactions chimiques et des processus de transport en milieu naturel ou bien de l'eau saturés même les eaux polluées. Le programme repose sur la chimie à l'équilibre de solutions aqueuses en interaction avec des minéraux, gaz, solutions solides, échangeurs et surfaces de sorption, mais inclut également la possibilité de modéliser des réactions cinétiques avec des équations de taux qui sont complètement spécifiées par l'utilisateur sous la forme d'instructions de base [53]. Une base de données chimique extensible permet d'appliquer la réaction, le transport et capacités de modélisation inverse pour presque toutes les réactions chimiques dont l'influence est reconnue sur la pluie, le sol, le sol et qualité de l'eau de surface. PHREEQC est basé sur le programme fortran PHREEQE faite par

Parkhurst et autres en 1980, et il est en cours de développement. PHREEQE était capable de simuler diverses réactions géochimiques pour un système comprenant. L'un des choses les plus positives dans notre étude est que ce programme permet de calculer et de simuler différentes phases de dissolution et de précipitation pour les saumures afin d'atteindre l'équilibre avec la phase aqueuse et simuler le mélange d'eaux.

L'opportunité de ce programme est que on peut calculer les concentrations des éléments, la molalités et activités d'espèces aqueuses, pH, pe, saturation indices, et transferts molaires de phases pour atteindre l'équilibre en fonction de paramètres spécifiés réversibles et irréversibles des réactions géochimiques.

III.5.2 Diagramme de piper

Le diagramme a été établi par H. Schoeller en 1932, et révisé par Berkloff en 1952, il est composé de sept échelles logarithmiques verticales correspondant aux principaux ions analysés dans l'eau. Dans ce diagramme, qui composé de deux triangles avec un losange. Les résultats des analyses sont traduits en pourcents de milliéquivalents puis sont portés sur ce diagramme, l'un est réservé aux anions et l'autre aux cations.

A l'aide de ce logiciel, on peut ploter les résultats des analyse géochimique des eaux dans ce diagramme de Piper pour faire la différence entre les différents faciès chimiques des eaux, leurs aptitudes à l'alimentation en eau potable, et à l'irrigation.

III.5.3 surfer 9

Le logiciel Surfer 9, conçu par Golden Software, vous permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données que vous avez récoltées sur le terrain via DGPS. Le principe de Surfer est le suivant : le logiciel vous permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières de vos points x, y, z afin de les ordonner. C'est à partir de ces grilles que l'on pourra créer plusieurs types de cartes : base map, contour map, 3D surface, vecteur et bien d'autres [54].

III.5.4 X pert high-score Plus

High-Score avec l'option Plus est un outil d'analyse de poudre de modèle complet. Il unit l'identification de phase, l'analyse cristallographique, analyse typologique illimitée, des crises de profil et structure correspond à l'option Plus dans un logiciel sous une interface utilisateur commune. XRDML, formats ASCII et fichiers d'analyse binaire de tous les principaux fournisseurs sont pris en charge. Le programme High-Score a été utilisé. Dans tous les cas, les

coordonnées atomiques ont été obtenues à partir du fichier PDF-4 +. Base de données, qui a été obtenue à partir de la structure ab initio calculs. Dans High-Score Plus, les paramètres par défaut ont été utilisés tout au long du processus. L'utilisation de paramètres par défaut permet d'affiner la mise à l'échelle. Facteurs, paramètres de cellules unitaires, taille des cristallites et arrière-plan une fonction[55].

III.6.Conclusion

L'analyse au laboratoire pour la géochimie des eaux de surface et sub-surface met en évidence la sensibilité des eaux aux contaminations anthropiques, les fortes teneurs en nitrates, sulfates et chlorures rencontrées dans notre analyse sont les signes les plus évidents. Les mesures et prélèvements ont été faits, dans la mesure du possible, sur des chotts et sebkha, dans des puits destiné à l'irrigation lors de la période d'irrigation estivale et hivernale. Dans tous les cas un délai suffisant permettant le renouvellement complet de la colonne d'eau du forage a été respecté.

Les paramètres physico-chimiques ont été mesurés sur le terrain à l'aide d'un conductimètre et pH mètre de type cond Hanna HI 9829. qui donne la conductivité corrigée à 25°C, avec une précision de $\pm 1\%$ et la température de l'eau avec une précision de $\pm 0,1^\circ\text{C}$, d'un pH mètre à paillasse de type Methrom dont la précision est de $\pm 0,05$ unités pH. Le potentiel électrique (Eh) a été mesuré sur le terrain avec une reproductibilité de $\pm 5\%$.

Les ions majeurs (Na, Cl, K, Mg, Ca, SO₄,..) ont été dosés au Laboratoire de géologie du sahara de l'Université Kasdi Merbah Ouargla centre de recherche scientifique.

Les échantillons de type évaporites sont très solubles, elles se dissolvent si les échantillons sont exposés aux prétraitements normaux utilisés avant les analyses XRD. Par conséquent, d'autres techniques doivent être utilisées. La technique la plus évidente est d'utiliser de la poudre aléatoire XRD sur des échantillons secs et moulus de sol entier dans l'université de Msila. Cette méthode est bonne si le minéral évaporé constitue plus d'environ 5% de la masse totale de l'échantillon; sinon, les pics associés aux minéraux évaporitiques pourraient être perdus dans le bruit de fond. Si l'évaporite constitue une fraction plus petite, il est parfois possible de l'éliminer du sol à l'aide d'une cueillette à la main de cristaux macroscopiques, ce qui est souvent le cas. Cependant, cela ne fonctionne pas pour les cristaux à grains fins et d'autres méthodes doivent être utilisées. Il s'avère que l'un des moyens les plus simples d'identifier de nombreux minéraux évaporitiques consiste à utiliser la morphologie du SEM en association avec l'analyse par rayons X à dispersion d'énergie (EDX). les analyses de SEM on été faite au niveau de CRAPC Bou-ismail à Tipaza. La

jonction entre l'analyse de composition chimique et de la morphologie structurale est souvent concluante, bien que les minéraux carbonatés posent quelques problèmes, car l'élément de carbone "C" et celle de l'oxygène "O" ne sont pas détectables par la plupart des analyseurs EDX. Dans technique et les instruments modernes, l'analyse des poudres évaporitiques sont également possible de déterminer les paramètres de structure par les techniques de balancement à bascule "rocking beam techniques" et les motifs qui sont obtenus.

CHAPITRE IV :
APERÇU GEOLOGIQUE SUR CHOTT
ET SEBKHA DE LA ZONE D'ETUDE

IV.1 Introduction

L'étude et la datation des dépôts lacustres successifs ont été déterminantes pour la caractérisation des différentes phases humides à la fin du Quaternaire. Ceci dit, ça n'est pas toujours facile de distinguer, en ce qui concerne la source des dépôts lacustres, la part imputable aux pluies locales ou régionales et celle due à l'élévation de la nappe phréatique, un phénomène qui peut entraîner des afflux plus ou moins lointains. Les entrées de la nappe phréatique peut aussi parfois retarder ou neutraliser localement une manifestation de phase aride [13].

Les chotts et Sebkhas représentent 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 N'goussa et celle de chott Baghdad.

Les études géomorphologique et sédimentologique permettent d'identifier les dépôts de ces cuvettes (sebkha et chott) dépôts des glaciaires, dépôt des alluvions pendant période de l'ère quaternaire, et de préciser les conditions tectoniques nécessaires à l'élaboration des différentes terrasses. L'objectif de ce chapitre est comme étant un ouvrage pour comprendre le cadre structural, l'évolution des versants, l'histoire morphologique pendant l'ère de quaternaire.

IV.2 Les chotts et sebkhas dans sahara septentrionale.

Les chotts et les sebkhas peuvent s'étaler sur plus de 1000 ou 1500 km de long sur les plates-formes du passé ; elles se concentrent sur une longueur de l'ordre du kilomètre dans certains marais salants. En superficie, la différence entre ces salures peut atteindre de centaines de kilomètre. Les facies types de ces cuvettes sont détritiques, biocalcaréo-détritiques, gypse, halite, etc. voir **figure.4.1** Les accumulations évaporitiques sont subdivisées en deux classes. Les principaux caractères, la classification de ces cuvettes et les enseignements de quelques sites actuels de dépôts salins ont fait l'objet d'une littérature spécialisée non négligeable et de quelques articles de synthèse [11].

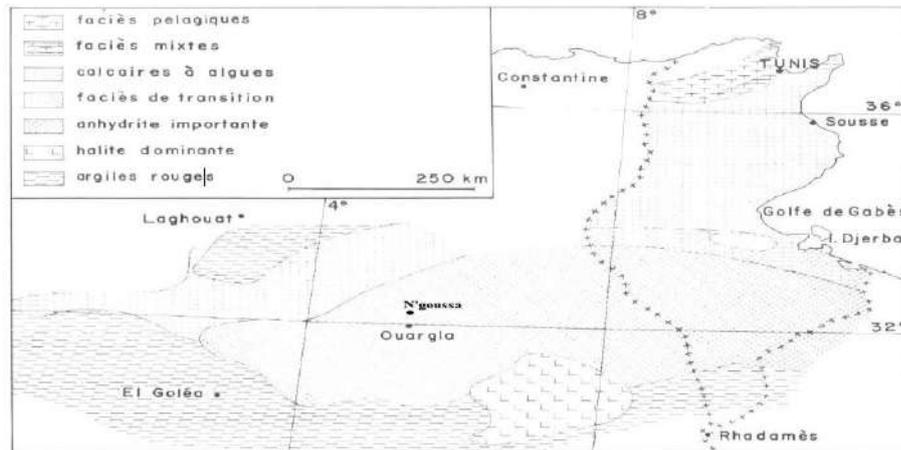


Fig.4. 1 Schéma des faciès du Lias, du Nord-Est de la plateforme saharienne et de la Tunisie atlasique d'après [11].

IV.2.1 Les évaporites de cuvette

Ces évaporites correspondent à des dépôts qui ont été caractérisés par le maintien prolongé d'une stratification de corps d'eau (et donc d'une tranche d'eau minimale) tout au long des premiers stades (dépôt des laminites, du sulfate de calcium, etc.). Cette stratification a été un élément très favorable à la conservation de la matière organique [11].

IV.2.2 Les évaporites de plate-forme

Les évaporites sont caractérisées par la ségrégation des zones de dépôt, synchrone et latérale qui n'implique a priori ni stratification des saumures, ni épaisseur minimale de celles-ci. Les évaporites de plate-forme et ses auteurs le fondent d'ailleurs sur certaines hypothèses peu vraisemblables. Ces fluctuations trop totales des interprétations des évaporites du passé soulignent la nécessité d'un retour aux phénomènes actuels.

IV.2.3 Le sel et ses multiples visages

Depuis les temps les plus reculés, le sel a fait l'objet d'une recherche et d'une exploitation active, étant indispensable à la consommation et surtout à la préservation des aliments. Mais chacun sait que l'excès de sel est parfois indésirable. Ainsi, la salinisation de certains sols, liée à des pratiques intensives incontrôlées peut stériliser progressivement des régions agricoles entières. De même, l'eau de consommation, pour être potable, ne doit pas être trop salée [56].

Certaines formations salines sont désormais exploitées non plus pour le sel, mais pour certains éléments stratégiques qu'elles ont pu concentrer. Ainsi, le lithium, ingrédient

essentiel de la transition énergétique pour le stockage d'électricité dans les batteries, provient pour moitié de l'exploitation de ces « salars » nichés au cœur des régions andines. Enfin, les solutions salines concentrées, et pour certaines si concentrées que l'on parle de liquides ioniques constituent un milieu réactionnel très favorable à certaines opérations de recyclage ou d'extraction. Leur utilisation va certainement se développer dans le contexte de l'économie circulaire qui a par ailleurs à gérer la nuisance de ses effluents salins au cours de ses cycles.

IV.3 Voyage d'exploration de V. Almand Alger Ouargla passant par N'goussa.

Le dernier jour de marche s'annonce bien; la route gravite immédiatement la berge Sud de l'Haoud Mellala ; nous la cherchons dans le sable à travers un dédale de cônes éclairés par la lune, dans d'étroits, couloirs où les ombres sont vigoureusement accentuées.

Voici la dernière guentra, puis au jour une nouvelle dépression ou plutôt une suite d'effondrements aux formes fantastiques. La région se nomme El Koum. A gauche, s'ouvre un débouché sur l'Oued Mya : une mer de dunes fuyant à perte de vue dans la direction du Nord-Est; on voit l'oasis de N'goussa comme l'ombre d'un nuage sur le sable.

Au bout d'un long couloir bordé de dômes, de cônes, de pyramides, un spectacle éblouissant apparaît à nos yeux. Le bassin d'Ouargla s'étend tout entier devant nous. Au centre, une masse d'un vert sombre, qui se ramifie dans toutes les directions est assiégée de tous côtés par des dunes dont les arêtes étincellent au soleil ; à gauche, du sable jusqu'aux limites du chott bordé de hauts mamelons; en face et au delà de l'oasis, une plaine, dont l'horizon se perd dans la brume [57].

IV.4 Présentation de la zone d'étude

La zone de Sebkha NE de Ouargla est disposée de direction NE-SW et sont sujettes à des variations hydrologiques saisonnières très nettes. Elle est située au plein 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 plupart de ces sebkhas du sahara septentrional saisonnières sont restées très peu connues, comme c'est le cas de la Sebkha de N'goussa, et chott Baghdad l'objet de cette étude. La position géographique du secteur d'étude est définie par les coordonnées Lambert suivantes :

N'goussa : X1 = 32°08'27''Nord ; Y1 = 5°18'30''Est

IV.4.1 Sebkha de N'Goussa

Les sebkhas sont le résultat de l'érosion hydro-éolienne et d'un déblaiement éolien. Ces cuvettes sont alimentées en eau de manière discontinue soit par l'écoulement des oueds en saison des pluies, soit par les eaux des nappes souterraines, qui remontent vers la surface, lors des saisons chaudes, en suivant des failles. À la surface les cristaux de sels sont soumis à l'action du vent, et à son processus de creusement [58].

En effet les sebkhas sont des dépressions fermées salées, à régime hydrologique superficiel sous la dépendance des fréquences et de l'ampleur des crues des oueds périphériques de dimensions variable (principalement les oueds N'ssa et M'zab au nord et le collecteur des eaux d'irrigation), Elles offrent toujours une topographie remarquable par leur platitude apparente caractérisée par un tapis de cristallisation salines.

N'goussa est située sur le bord méridional de la Sebkha Sefioune un petit Ksar berbérophone est édifié à la lisière orientale d'une palmeraie de 1769 hectares. Sa rivalité traditionnelle avec Ouargla s'est muée depuis le début du siècle en une étroite dépendance. Entre ces deux pôles sédentaires et au-delà de N'goussa, tout au long de la vallée, s'échelonnent de façon discontinue des plantations en creux de palmiers d'El Bour, dominés par des petits villages ou des hameaux de sédentarisation plus ou moins anciennes [59]. Le site d'étude se situe à 20 Km au Nord du chef-lieu de la wilaya de Ouargla administrativement chef-lieu de la Daïra N'goussa et commune de N'goussa. Daïra de N'goussa ce situe dans la route Willaya N°208 qui jalonne vers daïra d'El Hadjira. (Voir **figure 4.2**).

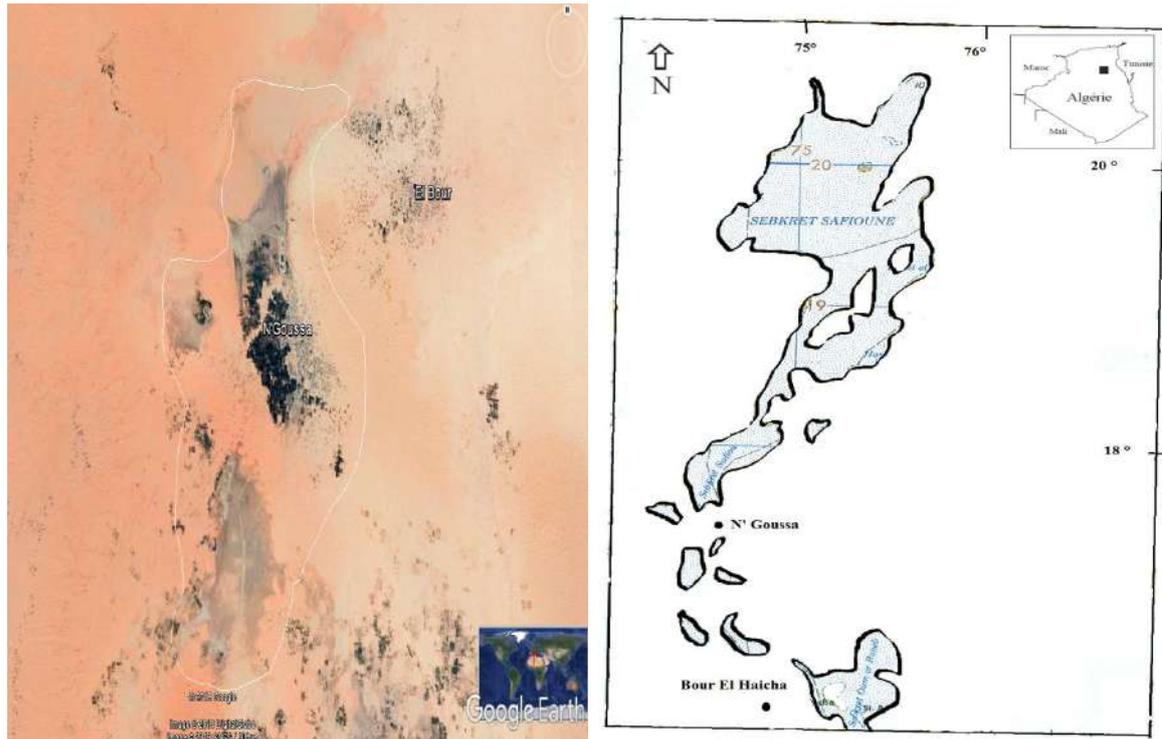


Fig.4. 2 Localisation de l'oasis de N'goussa (Sebkha), au milieu du Sahara Algérienne. Dans la région du N'goussa, les terrains du Mio-Pliocène, seuls visibles à l'affleurement, sont recouverts par endroits par une faible épaisseur de dépôts du Quaternaire sous forme des dunes et des cordons d'erg (zones sableuses par opposition au reg qui est rocailleux). La description lithologique des formations et leur succession a été établie grâce aux logs des forages d'eau existante dans la région et décrit ci-dessous.

Cette zone est une région subhorizontale sans relief, à l'exception de quelques reliefs des formations gréseux d'âge Mio-pliocène qui sont situés vers ouest. Ces formations affleurent en série continuent jusque les bordes sud de la région d'El Hadjira. L'écoulement de surface, qui est tributaire des précipitations, y est très diffus et le réseau hydrographique, à l'exception des deux oueds, Oued N'sa et Oued M'zab, sont marqués par des cours d'eau temporaires localement équivalents des oueds en Afrique du Nord.

Sebkha de N'goussa s'étend sur une superficie de 37km². Cette zone est limitée par :

- **Nord** : Par les limites sud de sebkha Sefioune.
- **Sud** : Zone agricole Ain Moussa.
- **Est** : La limite est, quant à elle moins élevée (160 mètres), est beaucoup plus diffuse. Elle est composée de formations dunaires (Erg Oriental) celle de l'Erg Ettouil, Erg Boukhzana et Erg Arifidji, d'importance relativement modeste. Les bas-fonds de la cuvette (119 m au centre de la cuvette) sont occupés par des

alluvions. À la berge de cette cuvette, Les jardins de l'oasis y sont implantés.' Zone agricole et Palmeraie et zone urbain de N'goussa'.

- **A l'Ouest** : cette vallée est dominée par une haute falaise, le Baten, rebord du plateau des Ganutra (altitude 200 à 230 m en moyenne) qui borne l'horizon de façon continu jusqu'aux confluences de l'Oued Mzab et de l'Oued Nssa et au-delà tout au long de l'Oued Righ. Ce plateau est composé essentiellement de formations grésocalcaires d'âge tertiaire couvertes de graviers ou de cailloux, associés à des sables siliceux rougeâtres [60]. 'Affleurement gréseux de Mio pliocène'.

IV.4.2 Chott Baghdad

Ces vastes dépressions endoréiques d'Afrique du Nord sont synonymes des Chotts, cependant en Afrique du Sud, aux Etats-Unis et en Australie c'est l'équivalent de Salt pans alors qu'en Amérique du Sud Salinas ou salures, au Mexique sont Playa, en Asie leur appellation diffère d'une région à une autre, à titre d'exemple en Iran sont appelés Kévin et en Mongolie Nor [61]. Les Chotts de sahara Nord d'Algérie sont des terrains fortement riche et couvert d'une croûte salines souvent à perte de vue en saison sèche ; alors qu'en saison de pluie saisonnières très intense ne se voit plus que la surface au moins salé, dont les bords ne sont que des kilomètres carrés de boue sodique. Malgré quelques divergences dans la définition de ces milieux.

Chott 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 (**Figure.4. 3**). 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 une zone agricole.

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

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

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



Fig.4. 3 : Situation géographique du chott Baghdad [14].

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 (voir **figure. 4.4**) 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 130 m, mais la montée sur le plateau est ce forme d'escaliers étagés jusque au sommet.

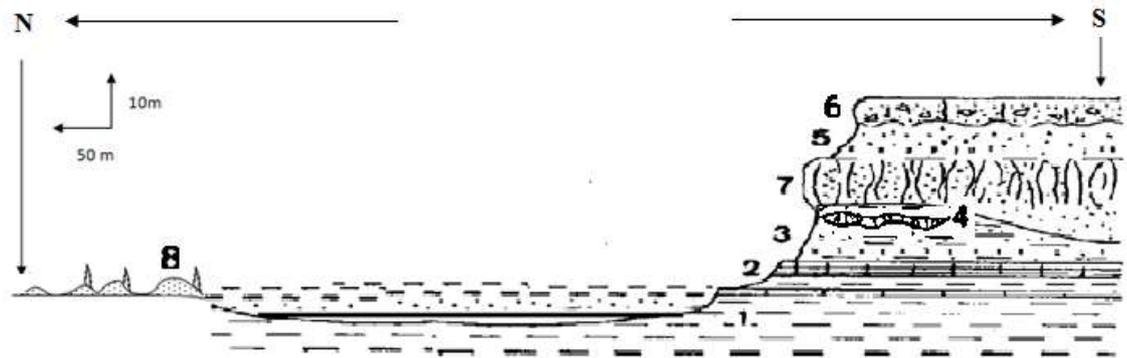


Fig.4. 4 : Photos des différents niveaux de sebkha Baghdad [14].

Les niveaux observés de bas en haut sont les suivants (**figure. 4.5**)

- 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 poéclitiques 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 homo-métrique, 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.



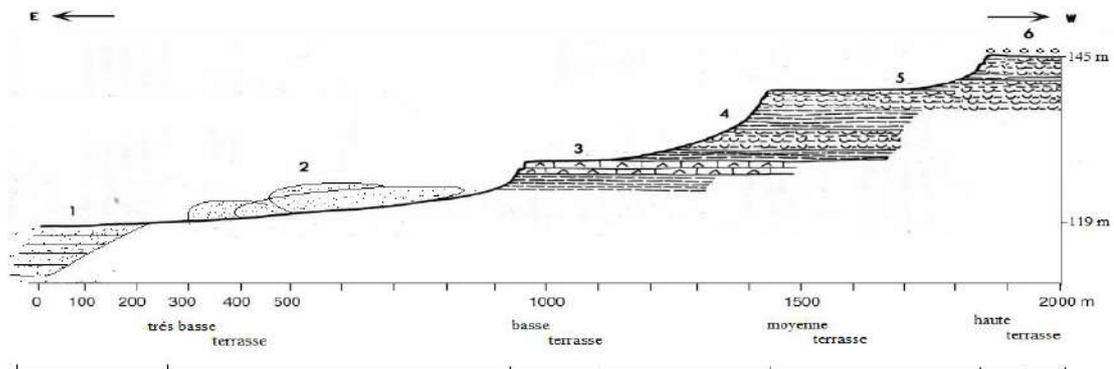
- 1 : Argiles brun
- 2 : Bancs de calcaire blanc
- 3 : Argilites sableuses verts.
- 4 : Lentilles de calcaire oolitique lacustre.
- 5 : Sable.
- 6 : Calcaire gréseux : sommet du plio-villafranchien avec croûte calcaro-gréseuse du villafranchien supérieur
- 7 : Gré à orgues.
- 8 : Dune de sable.

Fig.4. 5 : Coupe simplifié des formations qui affleurement proche de sebkha Baghdad [14].

IV.5 La couverture continental récent de la dépression

IV.5.1 Coupe géologique dans les affleurements du surface (Zone de N'goussa)

Cette coupe (**figure.4.6** et **figure.4.7**) va nous permettre également de mettre en évidence, de façon remarquable, les variations des paléo-milieus. En effet, les dépôts lagunaires qui recouvrent des sables très gypseux à stratification entrecroisé ou bien normal, témoins d'un ancien erg.



- 1 : sebkha, 2 : dune de sable, 3 : gypse en bancs, 4 : Argile salé, 5 : argile salé avec grés rouge à intercalation sablo graveleux, 6 : Pierre des galets à silex.

Fig.4. 6 Coupe géologique représente les formations de quaternaire dans la cuvette de N'goussa.

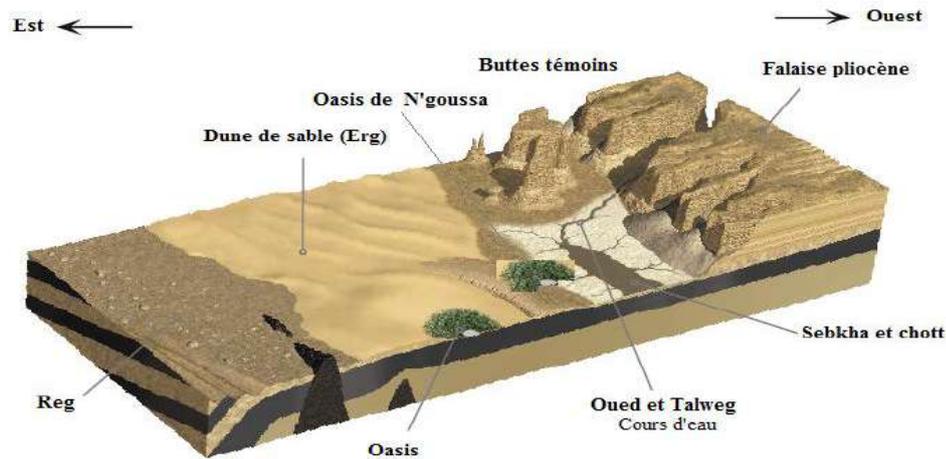


Fig.4. 7 Représentation morphologique des affleurements cuvette de N'goussa.

De bas en haute en voire les terrasses suivante :

1 : Sebkha : c'est la partie le plus basse ou mince accumulations des sable et argile très salé avec des passages gypseuse.

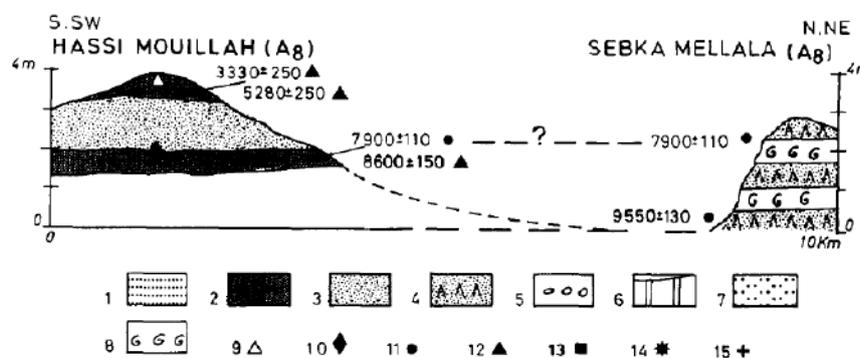
Le sol de sebkha qui couvre le fond de cette dépression n'est pas un reg, mais un limon homogène, ou il n'y a pas des débris anguleux, à l'exception de certains cailloux épars. Ce limon est formé par des variétés de sable (fin à moyenne jusque grossière), et pour une portion d'éléments calcaire et surtout des argiles et argilites entraînée dans les dépressions par la des éléments les plus fins du reg. La teneur en argile peut varier, et il en résulte des différences sensibles de la sebkha.

2 : Dune de sable : La transgression dunaire est tout de même un fait, mais elle n'a pu se réaliser par l'action unique et directe du vent. Si celui-là laissé sur ce plateau (terrasse haute) des traces moins insignifiantes celles qu'on a notées dans la région des dépressions (environnement favorable pour la sédimentation des éléments détritique ou bien les vestiges d'érosion), c'est qu'il y a trouvé des vallées déjà remplies d'alluvions, des passages fluviaux déjà obstrués par le sable. La Facies de cette terrasse est connue par des passes sur des sables fins à grossier par fois graveleux blanchâtres, à passage rubéfiés. Cette zone est connue essentiellement par une accumulation de sable dunaire vaste. Elle est constituée de 4 à 10 m de sables blancs, parfois concrétionnés, et émoussés, disposés parfois en lits horizontaux, parfois en lentilles un reg-mosaïque. La mise en place des dunes de sables qui s'allongent cordon au travers des hamadas ou qui assiègent les Gour Ouargla vallée plus bas de oued Mya s'est faite en deux temps [62].

- ils sont d'abord venus du Nord-Ouest par transport fluvial (Oued N'sa et Oued M'zab) ; puis, comme il se produit normalement une accumulation en amont des couloirs des goulets de percée, ils ont fait freiner au pied des cuestas orientales
- ce matériels détritique de sable et argile ...etc, ont été ramenés sur le plateau par le par les vents dominants de Nord-Est, alignés suivant une direction oblique à celle des vallées et finalement refoulés peu à peu vers l'est

3 : croute gypseuse pulvérulente, l'entaille sur son flanc, au-dessus de cette terrasse. Les variétés de gypse fibreuse pulvérulente, même cristallisée, composent les roches de ce terrain, qu'on désigne cependant souvent, d'une manière générale sous le nom de gypse fibreux parce que cette variété y est plus abondante liée que dans la formation détritique. Le tout est subordonné aux terrains d'argile et de psammite, qui composent la formation des grès. Dans l'argile gypse forme des amas irréguliers qui n'ont ensemble aucune liaison; dans le psammite, ces amas se suivent assez régulièrement et constituent presque des couches. L'accumulation de gypse se trouve à la surface ou à proximité de la surface de la terre dans certaines régions désertiques du Sahara [63].

Les croûtes gypseuses sont omniprésentes dans les zones de N'Goussa et El-Bour (Ouargla). On peut facilement les repérer surtout avec leur épaisseur importante et leur couleur blanchâtre. Le climat hyperaride de la région de Ouargla, caractérisé à la fois par un très fort ensoleillement et de faibles précipitations a permis la conservation et la non dissolution de ces croûtes gypseuses. Elles sont très dures et formées de gypse microcristallin [64]. La datation radiométrique des paléosols de gypse est problématique en raison de leur origine illuviale Néanmoins, des preuves suggèrent que les croûtes de gypse du sud de la Tunisie se sont développées au début de l'Holocène après la dessiccation du chott qui avait été inondé au cours du Pléistocène supérieur voir **figure.4.8** et **figure.4.9**.



Holocene arid period in the Northern Sahara: 1= alluvial silts; 2= paleosoil; 3= eolian sand; 4= gypsum; 5= pebble and gravel; 6= carbonate deposits; 7= reddish sandy silts; 8= terrestrial gastropods; archeological data: 9= Neolithic; 10= Epipaleolithic; ¹⁴C datings on: 11= gastropods; 12= charcoal; 13= organic matter; 14= ostrich egg; 15= carbonate.

Fig.4. 8 Les séries de gypse et leur datation dans sebkha NO de Ouargla [36] .



Fig.4. 9 Les affleurements des séries de gypse dans la région de N'goussa.

4 : argiles salés rouges : au-dessous d'une couche de gypses formés d'aiguilles accolées, Une boue d'argile sablonneuse jaune ou blanche.

5 : série de buttes témoins : c'est dans ce niveau qu'on peut observer une série de buttes témoins

6 : Une falaise abrupte pliocène: le Baten, dont les anciennes descriptions faisaient une sorte d'épine dorsale de tout le sahara algérien. Le sommet de ces terrasses est recouvert des galets bien roulés, surtout quartzeux, nombreuses dragées de quartz, auxquels se mêlent des silex peut ou non patinés, souvent cassés, et de nombreuses lame et lamelles en parle de l'existence au-dessus de la carapace, d'une couche de sable et de cailloux qui constitue un reg. Dans cette région, les indigènes n'emploient le terme de reg que là où la plaine est jonchée de dragées de quartz.

IV.5.2 Corrélation géologique des carottes dans chott Baghdad

L'étude des carottes du chott Salinas de Baghdad et des talus routiers environnants a permis de reconnaître plusieurs couches de retombées de produits pyroclastiques. Leur description macroscopique et la détermination de leurs composants à la loupe binoculaire, au microscope polarisant et à la microsonde ont permis de regrouper ces retombées en dix microfaciès dans cette cuvette endoréique. La description des litho-faciès basée sur la nature lithologique extrais de l'interprétation des carottes qui intersecté chott Baghdad 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 évaporitiques tel que anhydrite 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, **figure.4.10**.

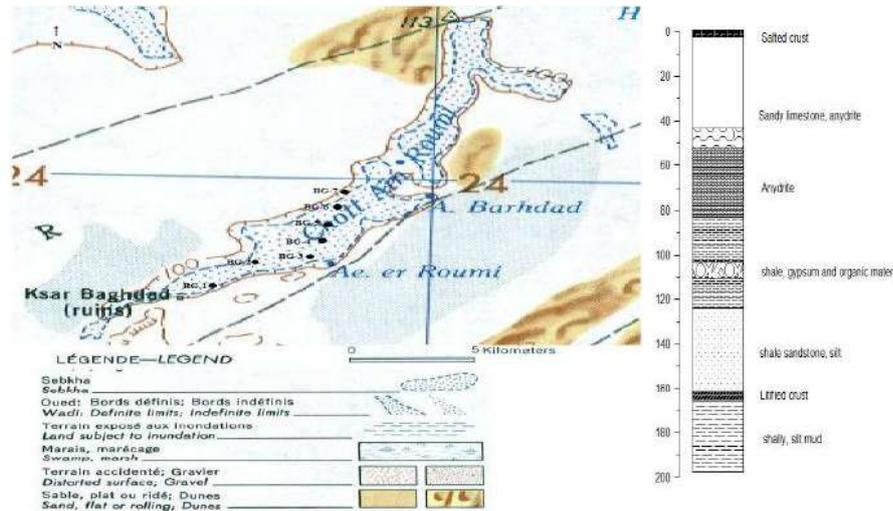


Fig.4. 10 Localisation des stations de prélèvements et lithologie des sédiments carottés [65].

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 grano-classement 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 de 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 **figure.4.11**.

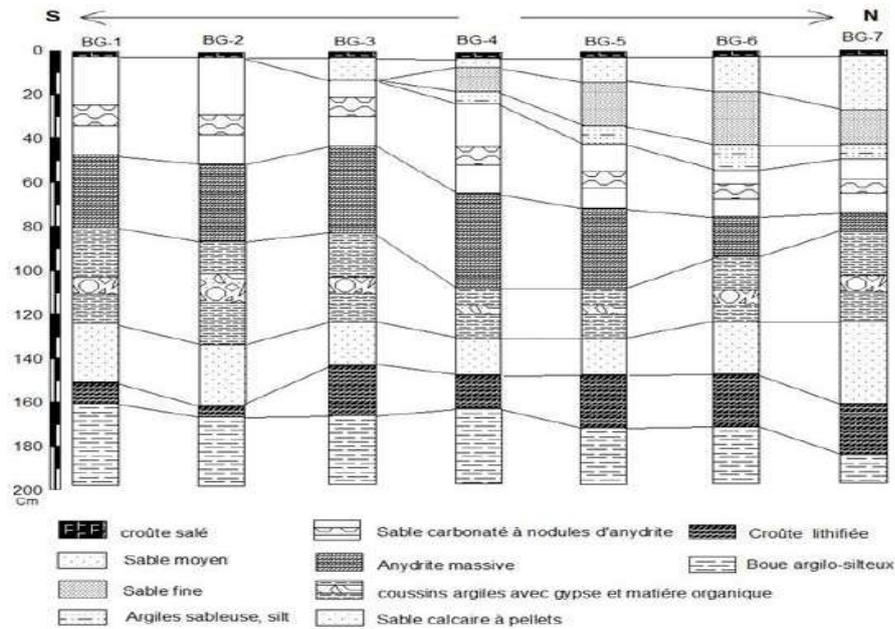


Fig.4. 11 Corrélation lithologique des carottes de sebkha Baghdad [65].

En général le sondage qui on été faite dans chott Baghdad a traversé un dépôt dont la texture est sablo-limoneuse. Son matériau consiste en cristaux de sels (notamment du sulfate de calcium et du chlorure de sodium) et en sable d'origine éolienne. Plusieurs couches de méga-cristaux de chlorure de sodium ont été observées ; les plus épaisses (1 à 2 cm) se trouvent vers 140cm et 160 cm de profondeur se forme de croûte lithifiée. Le sondage a été arrêté à 200 cm de profondeur en raison préséance d'une nappe superficielle qui rendre les sédiments sous forme des vasières. Il existe une lamine de matière organique noire d'environ 100 cm de profondeur.

IV.6 Analyse sédimentologique et granulométrique

IV.6.1 Granulométrie des sédiments zone sebkha de N'goussa

Les méthodes granulométrique présentent le grand intérêt d'apporter les données quantitatives. L'étude systématique des variations du paramètre obtenu par la granulométrie ont un grand intérêt paléogéographique. Les caractéristiques granulométriques d'un sable sont liées directement à l'histoire de la sédimentation de la roche plus que ne peut l'être un autre caractère. Ces courbes granulométrique sont en quelque sorte la photographie instantanée de l'état final du sédiment, avant qu'il ne devienne une roche. Les points de prélèvements sont répartie dans sebkha de N'goussa voir **figure.4.12**.

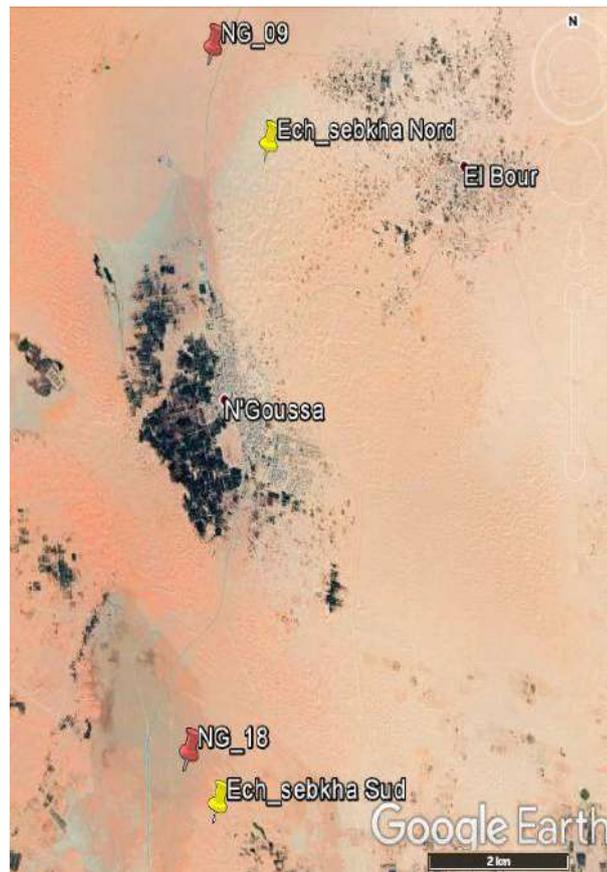
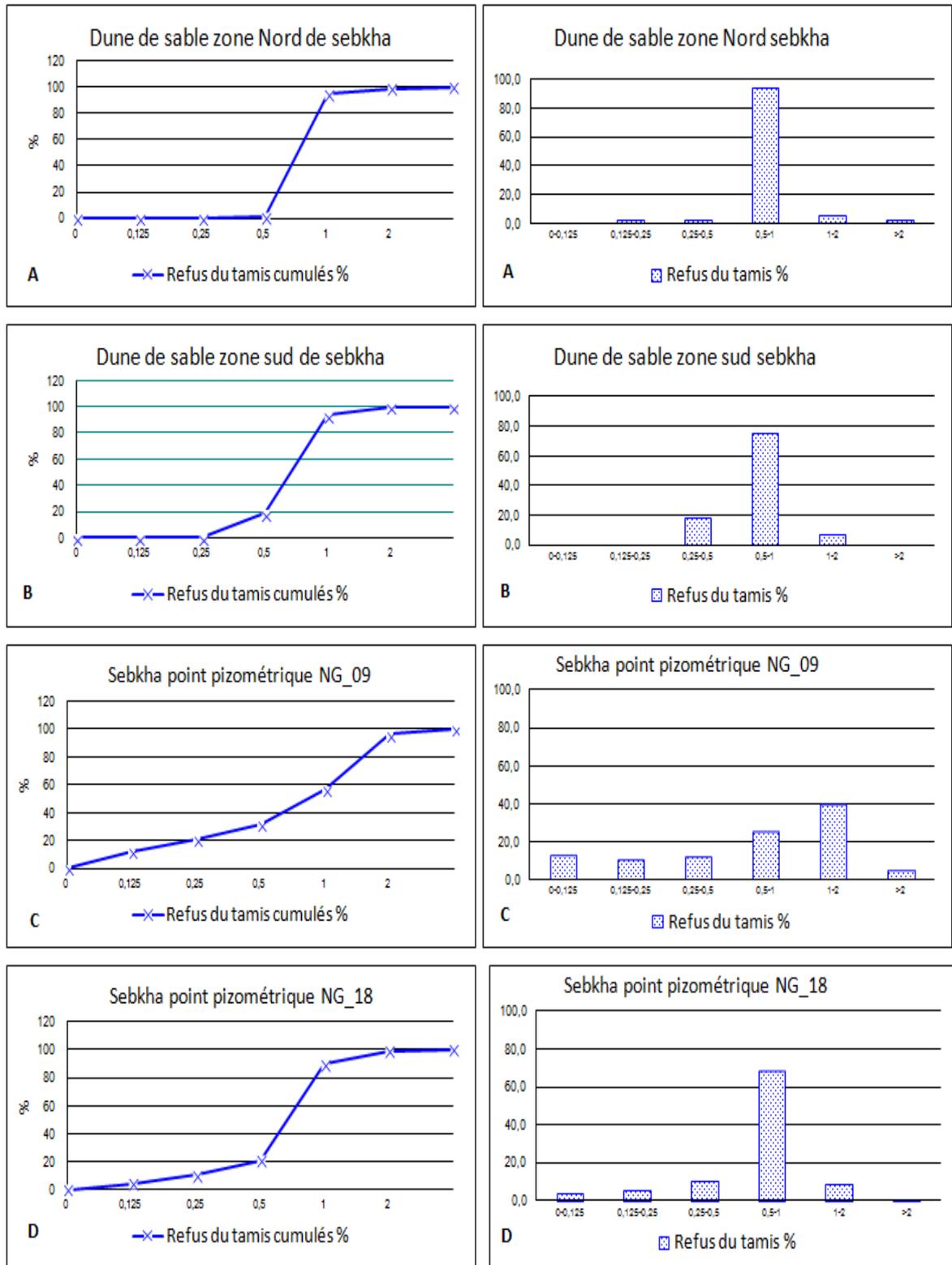


Fig.4. 12 points d'échantillonnages de sable pour l'étude granulométrique.

IV.6.1.1 Discussion des analyses granulométrique

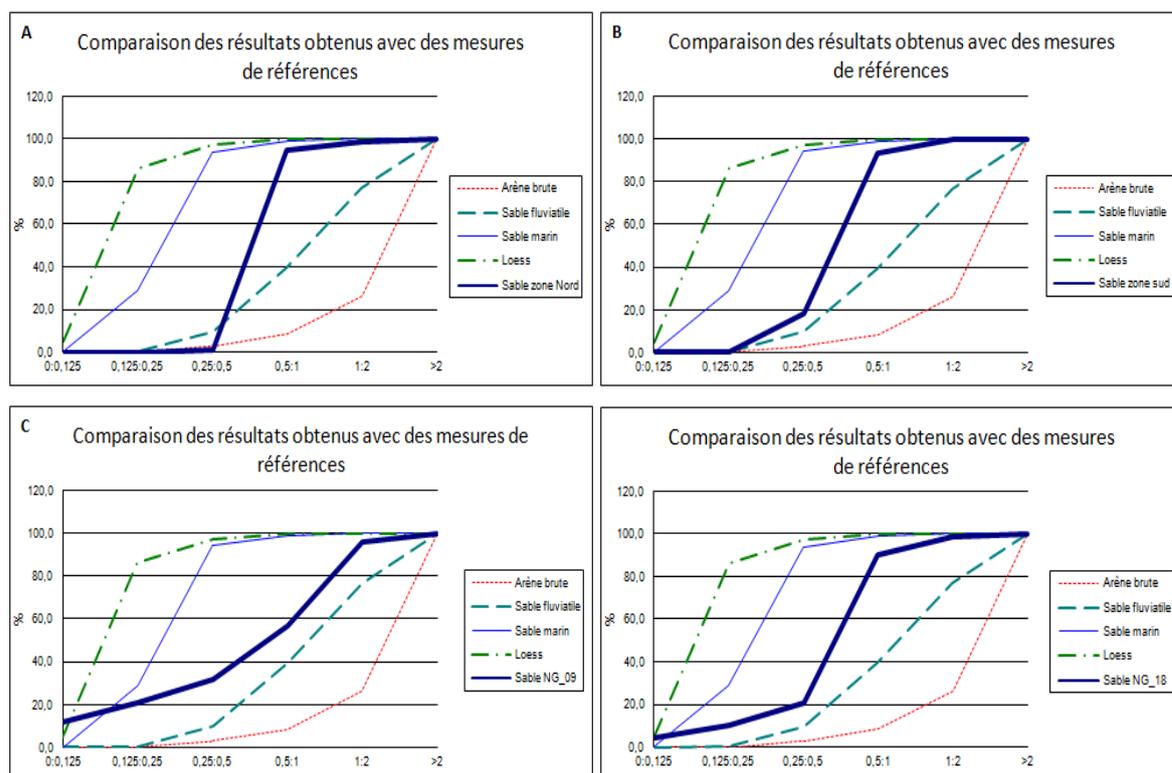
L'examen granulométrique des sédiments prélevé dans différent points dans la zone de N'goussa montre que dans les deux point située au centre de sebkha (NG_09 et NG_18) ont une courbe cumulative de matériel moyenne (Md : 0,83 et 0,67). Le grain moyen est de (0,84 et 0,68 mm) est accompagné d'un mode sableux (0,5 à 1 mm) **figure.4.13** et **figure.4.14**.

Le sédiment dans la partie plus bas (sebkha) est assez trié avec un mode mineur (1.2 % à 18%) vers moins de 0.250 mm et un mode majeur sableux (98 % à 82%) plus que 0,5 mm ou niveau des dunes de sable qui alimente sebkha de N'goussa. Cette structure suggère que le sédiment, mis en place par un agent de transport unique, a pour origine un matériel éolien. Le meilleur argument en est la ressemblance accentuée avec les poussières déposées déjà étudiées dans l'Atakor [66].



A)-zone Nord ; B)-Zone sud ; C)-Zone centre (NG_09) ; D)-Zone centre (NG_18)

Fig.4. 13 Diagramme cumulative.



A)-zone Nord ; B)-Zone sud ; C)-Zone centre (NG_09) ; D)-Zone centre (NG_18)

Fig.4. 14 Comparaison des courbes granulométrique entre différent type de sable et sable zone des zones étudiées.

Tab.4. 1 Paramètres granulométriques par rapport à la moyenne.

Résultats	Sebkha nord	NG_09	Sebkha sud	NG_18
TOTAL (g)	1000	1000	1000	1000
Médiane (mm)	0,72	0,83	0,67	0,67
Grain moyen	0,72	0,84	0,68	0,68
d25 (mm)	0,6	0,32	0,53	0,52
d75 (mm)	0,86	1,38	0,84	0,86
He = $d_{75}-d_{25}/2$	0,13	0,53	0,16	0,17

IV.6.1.2 Morphoscopie

Dans l'environnement aride d'un désert, l'eau qui coule ne joue qu'un petit rôle dans les processus d'érosion. Les effets des changements de température sont plus importants, qui aident à provoquer l'exfoliation de la surface rocheuse et la fragmentation de la roche et des fragments de roche [67]. Couplé à ces effets d'insolation avec l'action abrasive du sable vent-soufflé et poussière qui produise ces grains de sable forme la plus part des cuvettes saharien et les dunes de sable.

Sur déserts plats et la plateforme saharienne, les processus de déflation provoquent la suppression du plus fine fragment par le vent, laissant un décalage de galets plus grossiers et de rochers composés de roche plus résistante.

L'aspect morphoscopique d'un grain reflète un état de l'histoire de ce grain, mais il n'est pas du tout certain que cet état ait été le dernier. Il faut constater qu'il n'est pas toujours aisé par les études morphoscopique de distinguer certains sables fluviale de certains sables marins transportés par des courants.

Dans notre zone d'étude avant que les grains de sable puissent être enlevés par le vent, ils bien sûr, il doit d'abord y être déposé par un autre moyen, tel que de l'eau courante, ou être dérivé localement de plus gros rochers. La présence généralisée de cailloux angulaires peut, dans de nombreux cas, être considérée en tant qu'indicateur des conditions de désert.

L'analyse au MEB a porté sur les échantillons prélever de sebkha de N'goussa après passage à HCl. Les grains de quartz y sont assez nombreux, surtout de couleurs orange à jaune dans NG_09 et NG_18, avec de fréquentes traces d'éolisation mais sans remaniement hydrique voir **figure.4.15 et figure 4.16**.

Analyse de la taille des particules de sable obtenu de sebkha et dune des périphéries sous SEM. Ces échantillons montrent que la teneur en éléments d'échantillons de sebkha et de dunes aux zones de source et de dépôt indique que la dune mobile n'est pas un sable majeur contributeur. Les contributeurs importants à la fraction géogénique du sable seraient les sédiments alluviaux et lacustres, les oueds et les terres dégradées. La fraction non géogénique, qui contribue pour plus de la moitié du sable dans la région endoréique, à une dans une large mesure, provient de contributeurs tels que le déplacement de sable de dune pendant l'étendue de sable.

Il est très difficile de déterminer les principales zones sources de sable dans le Nord Sahara d' Algérie à présent. Dans cette étude, nous avons seulement identifié que le sable géogénique ne venait pas de la dune mobile seulement, mais les principaux types de sources tels que les terres dégradées, le désert du Sahara, les terres alluviales et les sédiments lacustres peuvent être identifiés grossièrement. Les avancées pour détecter les différents sources de sable dans le nord sahara algérien à besoin de méthodes récemment développées telles que spectromètre de cartographie totale de l'ozone (TOMS) [68].

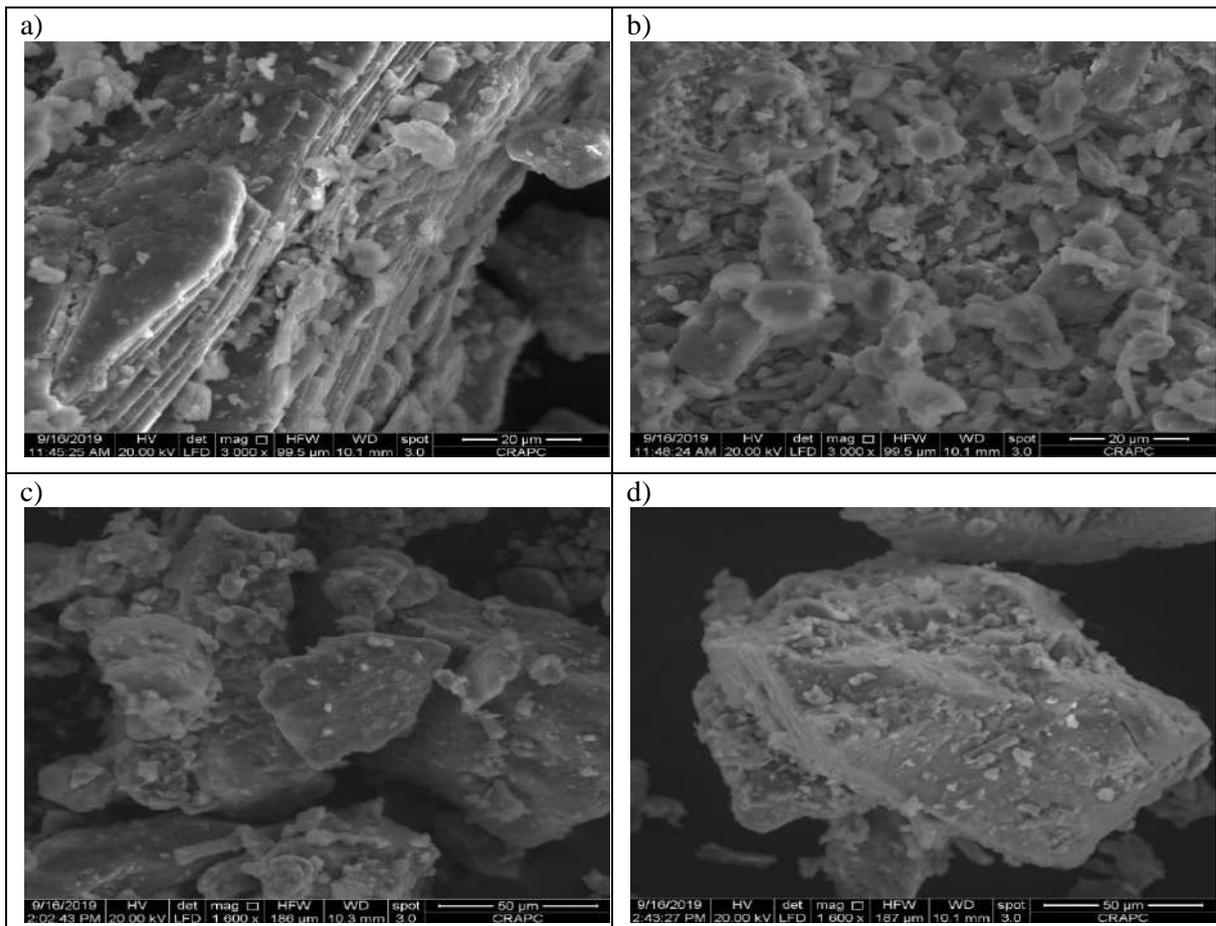


Fig.4. 15 Micrographies MEB montrant la forme des particules de diamètre $< 45 \mu\text{m}$ à la surface et dans zone de dépôt de sebkha de N'goussa (NG_09 et NG_18).

Les tailles des particules, souvent issues d'ancien sable grossiers saharien, tournent autour de 0,5 à 1 mm selon les analyses granulométriques qui sont effectuées dans cette région. Ces grains de quartz montrent une forte empreinte de pédogenèse post dé-positionnelle, car uniformément recouverts d'une pellicule argileuse à mélange Si, Fe (milieux favorable à l'oxydation). La reconstitution paléo-historique de ces grains peut ainsi se résumer :

- à subi une forte éolisation par roulement avec saltation.
- Le transport des particules génère des cassures et des retouches mécaniques avec des arêtes à la surface des grains.
- Stabilisation et pédogenèse.

Comme conclusion, D'après le cas d'ensemble des maaders des Canaries et du Sud-Marocain, cette type de sédimentations s'expliquer par la succession dans le temps d'une sédimentation éolienne carbonatée de période froide quand la plate-forme continentale était exondée, et d'une sédimentation éolienne siliceuse d'origine saharienne en période interglaciaire [66].

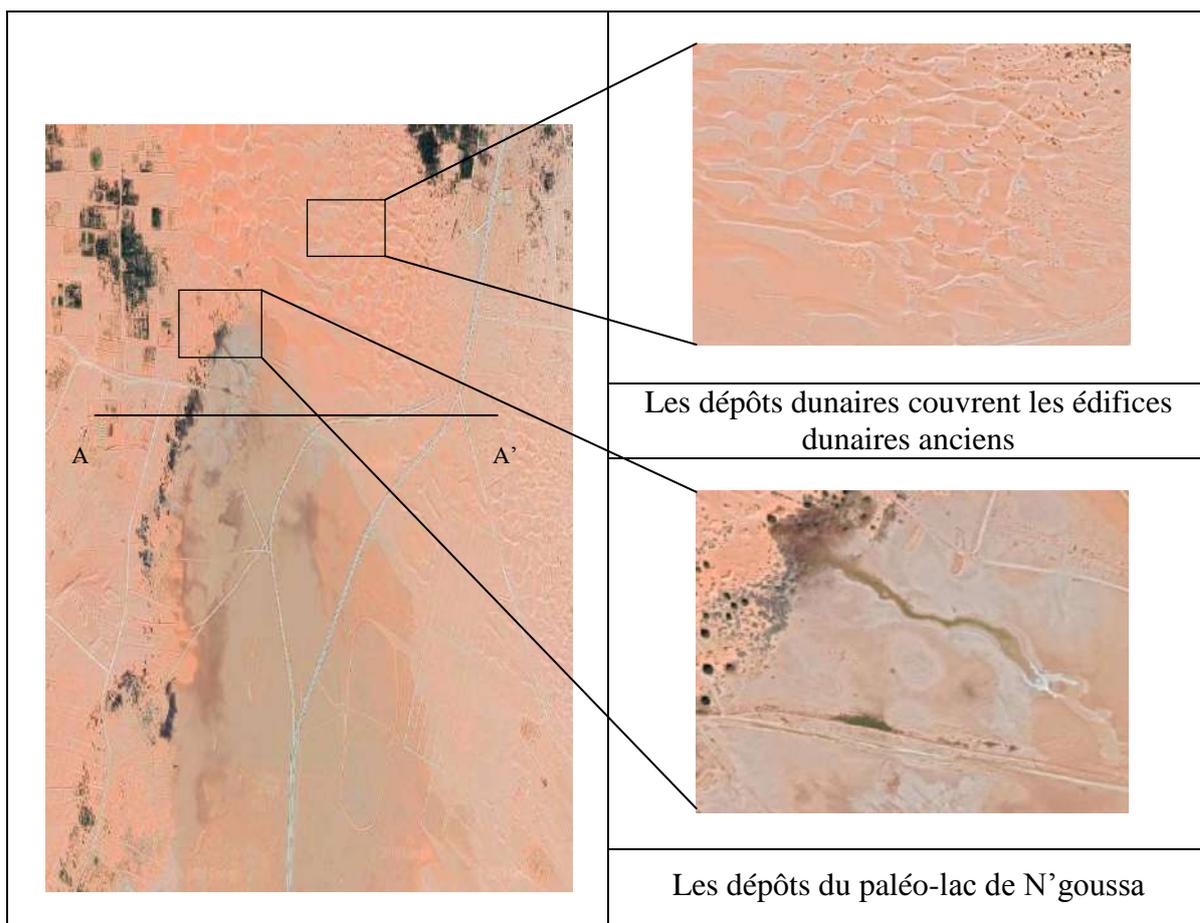


Fig.4. 16 Photo satellite (Google Earth) de sebkha de N'goussa.

IV.6.1.3 Mobilité du sable par le vent

La reconnaissance géologique du site et la série d'analyses de laboratoire révèlent que cette formation détritique de Mio-pliocène est de nature continentale. La série est composée principalement de séries de séquences. Le mode de transport dominant et les conditions de déposition révèlent une région lacustre (bassin). La prédominance des grains de quartz présentant des globules siliceux effacés par la dissolution postérieure témoigne d'un mode hydrique, la dissolution des grains de quartz de surface révèle la fluctuation des eaux souterraines entre zone envahit et zone saturée, les traces de chocs en croissant et les coups d'angle témoignent agent de transport de vent. Les grains de quartz ronds avec des traces de chocs multiples emballés par des oxydes de fer témoignent de la fin d'un cycle hydraté et de la mise en place de la condition de désert.

Lorsque le vent souffle avec suffisamment de force, il capte les particules de sable et les déplace, d'abord en roulant, puis près de la surface ou les particules fines sont restées suspension en nuage poussière. L'analyse de la Morphoscopie montre que des grains de quartz ronds sont présents à tous les niveaux, mais présentent une taille inférieure à

l'intérieur de la zone de bas niveau (sebkha et chott). Ces grains de sable révèlent la présence d'un fort pourcentage de grains émoussés, ou usés (U). Leur aspect indique que ces grains ont subi d'importants remaniements avant leur dépôt final. En plus de ça, On note également la présence de grains ronds mats (RM) toute la région dans dunes de sable ou bien dans les lits de sebkha. Ces grains, de type ronds mats, transportés par le vent sous un climat sec et aride présence de « croissants » et de « V » de choc à la surface, ont séjourné, par la suite, dans un milieu humide alternant avec des périodes sèches (présence de cassures fraîches en partie émoussées et de figures de précipitation de la silice [69] voir **figure.4.17**.

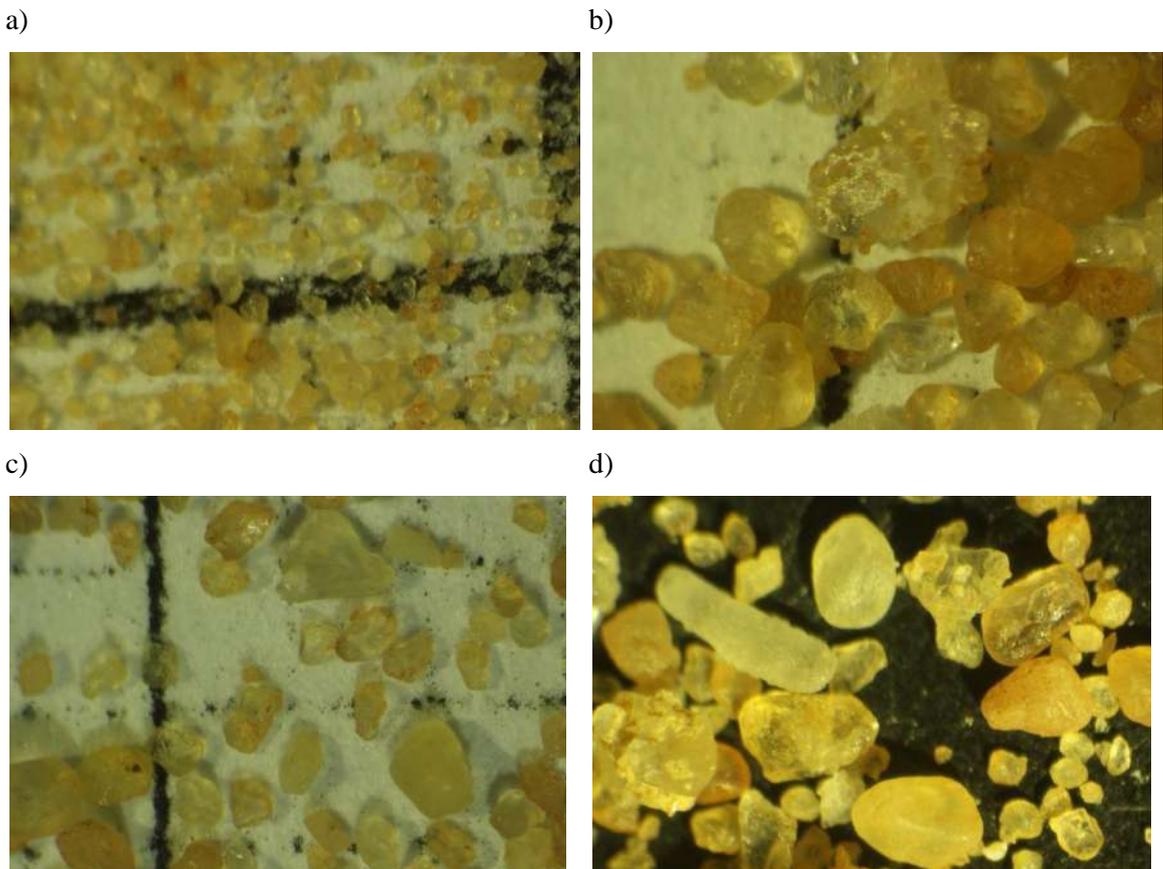
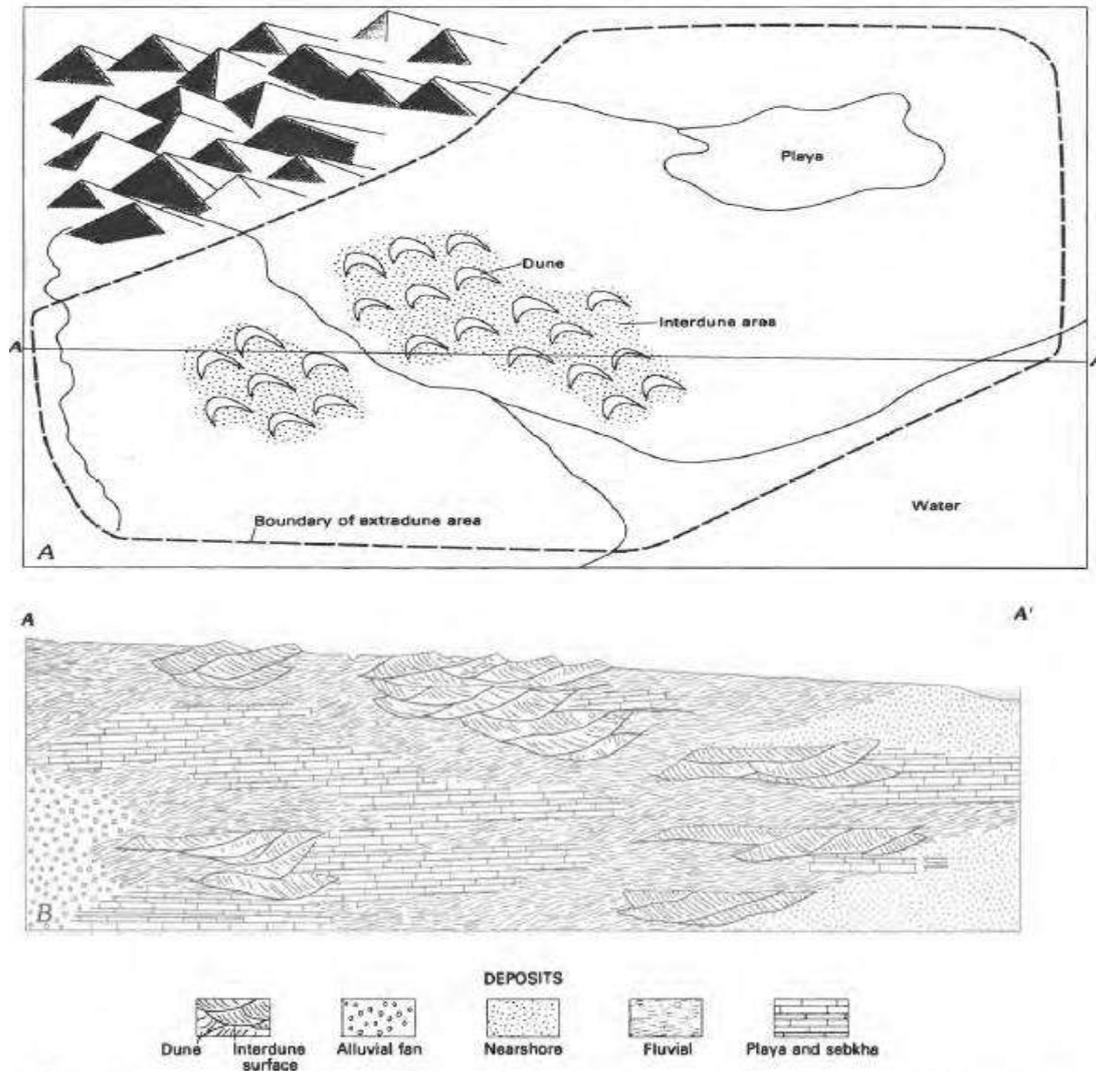


Fig.4. 17 Morphoscopie de grains de sable éolien sebkha de N'goussa sous microscope binoculaire x4.

Dans cette cuvette contient une couverture des formations continentales récentes qui masquent presque entièrement le substratum **figure.4.18**. Bien que ce manteau présente quelques analogies dans l'évolution géologique d'âge tertiaire et quaternaire du sahara septentrionale Algérienne. Cette couverture reste mal connue et mériterait une étude approfondie.

Ces formations sont de trois types :

- Des épandages argilo-sableux emballant parfois des éléments grossier dont certains se produisent encore actuellement.
- Des ergs sableux aux bords des vallées dont proviennent les éléments détritiques. Ces ergs sont très développés à l'est de N'goussa et en rendent l'accès très difficile à travers cet endroit.
- Des ergs caillouteux qui recouvrent le revers des affleurements de Djnien et de Hamraya.



A. Vue en plan de la distribution typique de dune, inter-dune et extra-dune. B. Coupe transversale illustrant l'évolution d'un système dune – extra-dune se terminant par la configuration géographique de A. Les sous-environnements du système migrent latéralement et verticalement, ce qui isole plus de sédiments de dunes poreuses et perméables.

Fig.4. 18 Coupe schématique d'une sélection transversale des dépôts de dunes, inter-dunes et extra-dunes [70].

IV.6.2 Granulométrie des sédiments dans Chott Baghdad

IV.6.2.1 Discussion des analyses granulométrique

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 silts et argiles en zone médiane $Mz > 4 \phi$ ($Mz < 63 \mu m$). Le coefficient d'asymétrie ($Ski < 1$) montre que l'asymétrie de sable de zone d'étude est positive « plus les sables sont fins, plus sont abondantes les particules fines » [71],[72].

L'indice de classement (σ), qui donne une idée sur le niveau d'énergie du milieu [73]. 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.4.2** et **Tab.4.3**. 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 (**figure. 4.19**). 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.

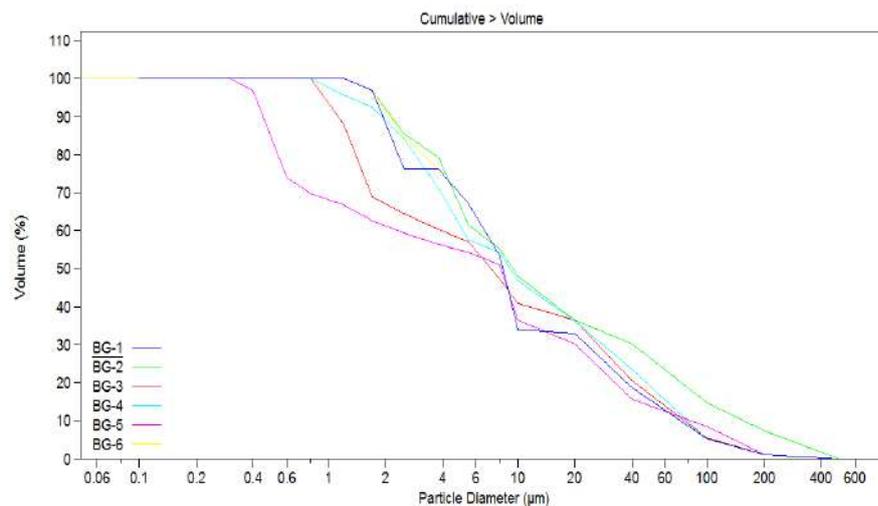


Fig.4. 19 Courbes granulométriques des échantillons ayant plus de 50 % de sables des carottes (BG-1, BG-2, BG-3, BG-4, BG-5 et BG-6) prélevées dans la sebkha de Baghdad[14].

Tab.4. 2 Paramètres granulométriques par rapport à la moyenne [14].

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

Tab.4. 3 Distribution granulométrique des quantiles [14].

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	-

IV.6.2.2 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. 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.

IV.7 Géomorphologie et Pédologie

En milieu semi-aride, la géomorphologie du paysage est donc importante pour caractériser la variabilité spatiale des formations de subsurface [74]. En parallèle, les sols, la végétation et l'hydrologie de surface influencent fortement dans la géochimie des eaux de surface et dans la nappe phréatique.

IV.7.1 Cadre géomorphologique dans sebkha de N'goussa

Le paysage dans la zone des Oasis celle de N'goussa présente l'aspect monotone d'une succession de plateaux et de vallées ensablées, avec des dénivelés qui n'excèdent pas 250 m (altitudes de 142 à 200 m sur les plateaux, et de 100 à 120 m dans l'axe des vallées). Cette morphologie apparaît largement héritée des épisodes arides et humides qui se sont succédés au cours du Quaternaire. La dalle rocheuse régionaux majeurs sont des fossiles hydrographiques de périodes plus humides que l'actuel, tandis que les dunes fixées près de N'goussa témoignent d'avancées du désert et désertification des oasis. (Voir **figure 4.20** et **figure.4.21**).



Fig.4. 20 Le Profile transversale et points le plus base dans sebkhas de N'goussa.



Fig.4. 21 Le Profile transversale et points le plus haute dans sebkhas de N'goussa.

Les recouvrements sableux des périodes arides occupent une superficie relativement vaste sur la zone des chotts et sebkha de N'goussa ; de plus, là où ils existent, ces dépôts éoliens

sont souvent indurés. Leur épaisseur est typiquement de l'ordre de quelques mètres, mais peut atteindre une dizaine de mètres au pied des plateaux latéritiques [75]. La sédimentation éolienne dans le Sahara septentrional s'est effectuée en plusieurs phases au cours du Pléistocène ; la plus récente est datée entre 20 000 et 12 000 ans B.P.

IV.7.1.1 Le contexte et structure épi-génique dans la zone de N'goussa

En géomorphologie, l'épigénie c'est un phénomène par lequel un cours d'eau qui coulait sur une surface plane le cas des zones saharienne et sub-saharienne, se trouve, du fait de l'érosion, à traverser des reliefs comportant des roches de diverses résistances, sans que leurs structures ne guident son trajet.

Observées près des zones d'affleurement, Notre zone d'étude est très connue par des structures tabulaires édifiées sur des couches horizontales et montrant des plateaux étagés limités par des escarpements voir **figure.4.22**.

Comme les niveaux gypseux qu'ils semblent relayer sur le bord des cuvettes de N'goussa. Ils ne sont observés que dans les faciès laguno-saumâtres du centre des cuvettes de type saharienne. Les faciès laguno-lacustres rencontrés dans les oasis sahariennes. Ainsi que les faciès exclusivement marins ou littoraux de d'âge précoce tel que calcaire de sénonien et Eocène.

Entre les deux périodes tertiaire quaternaire en plus d'après l'interprétation et reconstitutions paléogéographiques des colonnes stratigraphiques dans cette région. Les données minéralogiques et géochimiques démontrent que la sédimentation évaporitique s'est développée dans un golfe partiellement coupé des alimentations marines franches. Le confinement du milieu s'est traduit, au niveau minéralogique, par une paragenèse à dominante chimique, où les dolomies et les argiles magnésiennes coexistent avec les gypses de faciès saccharoïde. Les caractéristiques pétrographiques de ces derniers, et en particulier la fréquence des structures nodulaires ou maillées, ainsi que leur association avec des dolomicrites laminées affectées par des remaniements pédo-génétiques, semblent leur assigner une origine essentiellement diagénétique, dans un environnement inter à supratidale qui présente certaines analogies avec celui des sebkhas littorales actuelles des zones arides [76] .

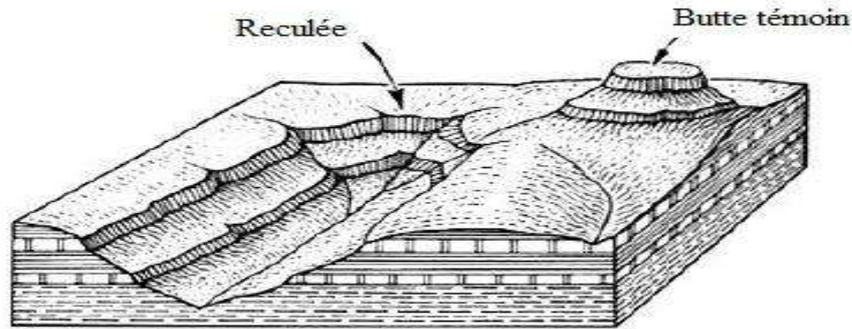


Fig.4. 22 Structure de relief dans zone de N'goussa (structure tabulaire).

IV.7.2 La morphologie de surface de sebkha Baghdad

Chott 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 **figure. 4.23**. Généralement, les sebkhas sont fonctionnelles sous 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 recharge de nappe ou de ruissellement.



Fig.4. 23 Contact eau souterrain avec sebkha [14].

Les apports de sel se font dans les sebkhas Baghdad par précipitation des eaux chargé ruissellement lessivant le bassin-versant surtout quand s'y trouvent des formations salifères; par sources des eaux souterraines où sont solubilisés des sels;[77] par voie éolienne après déflation sur des surfaces salées des formations gypsifères de la région; par rabattement sec ou humide (pluie) **figure. 4.24**. 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.

Au surface de sebkha, il y a des fissures qui s'ouvrant 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 on 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. Les particules argileuses se

trouvent rassemblés en mottes micropoly-édriques, 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.

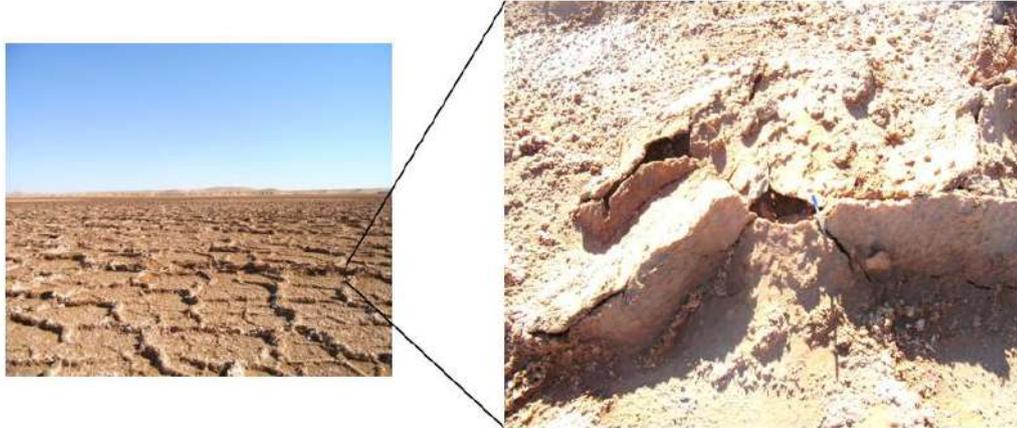


Fig.4. 24 Fente de dessiccation dans zone inondé de chott Baghdad [14].

Dans sebkha Baghdad est affecté par des inondations saisonnière, vers coté NW il ya des dunes de sable qui couvert 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.

IV.7.3 Contexte pédologique

IV.7.3.1 Etude macro et micro-morphologique de sol

Les sols des oasis septentrionales alluviale, colluviale et éolienne. Ils sont issus de l'altération des affleurements géologiques du quaternaire et du mio-pliocène. Les phases successives d'érosion et de transport ont installé sur le fond de sédimentation de la vallée une hétérogénéité texture des sols. On admettant que la période d'assèchement du Sahara est survenue après la dernière glaciation du quaternaire, la mise en place des sols serait alors liée à la période du Soltanien. Il existe trois types des sols dans zone des chotts et sebkhas.

- Une situation topographique déprimée, plaine de Piémont ou dépression plus ou moins fermée, assurant une dépendance par rapport aux dynamiques colluviales ou alluviales de versants.
- Une sédimentation très fine résultant à la fois d'apports éoliens et hydriques.
- Une dynamique éolienne comportant à la fois des apports et des départs de poussières. En effet, ces surfaces argile-limoneuses sont un réceptacle pour les

poussières, mais dénudées et asséchées une grande partie de l'année, elles sont aussi soumises à une intense déflation (zones-sources) [66].

IV.7.3.2 Les dunes de sable

C'est selon leur aspect que se distinguent les sables les uns des autres, dans la vallée de l'Oued Mya comme dans les Sebkha tel que Sefioune à une quinzaine de kilomètres à l'Ouest:

- Des sables ocre rouge, de teinte semblable à celle des grès dunaires pliocènes du Baten, à grains fins, localisés sur les bords de la vallée; ces dunes se présentent au pied du glacis inférieur, en massifs peu élevés, ordonnés en crêtes parallèles de direction générale NW-SE ou parfois N-S selon la direction du Baten **figure.4.25**.
- Des sables plus clairs, beige rosé, aux grains plus gros et contenant une forte proportion de gypse, occupant le centre de la vallée. Les sables sont plaqués sur le premier gradin qui marque les limites de la vallée, de longs Ergs se déploient selon une direction subméridienne, des Trois Pitons au Sud jusqu'au seuil d'El-Hadjira au Nord, dominant la vallée de 80 m parfois (Erg Ettouil), généralement de 20 à 30 mètres **figure.4.26**.



Fig.4. 25 Dune d sable dans la terrasse Dunaires Moi-pliocènes du Baten



Fig.4. 26 Dune de sable s'allonge des grès Moyenne de la cuvette N'goussa

L'étude morphologique des sols a montré la prédominance d'une texture sablo-limoneuse conférant aux sols un pouvoir filtrant très important. L'observation à la loupe binoculaire des mottes de sols orientées et sur lames minces au microscope optique révèle la présence de plusieurs formes d'accumulations gypseuses:

- (1) soit des formes de cristaux aciculaires, millimétriques. Il s'agit alors d'un mode de cristallisation originel qui se forme, généralement, dans les marais salants [78].
- (2) Soit sous forme des cristaux aplatis, en lentilles ou en polyèdre globuleux;
- (3) Enfin le gypse peut se trouver sous forme d'une pâte microcristalline claire, en pied

d'alouette de 0,1 à 0,2 mm au plus ou en lentille de gypse, en fer de lance de 2 à 5 mm de longueur.

Les sols, à N'goussa, sont légers à prédominance sableuse et à structure particulaire, caractérisés par une faible quantité en matière organique, avec un pH alcalin et une microporosité avec une aération efficace. D'une manière générale et à l'instar des autres régions sahariennes, la texture des sols dans la vallée de l'Oued Mya est souvent légère. Par conséquent, la plupart des sols ont besoin d'amendements argileux pour l'amélioration de leur fertilité et de leur résistance à l'érosion, mais il ya parfois nécessité d'alléger certains sols par des amendements sableux. Tous les sols sont alcalins ($7,5 < \text{pH} < 8,5$), calcaires, et souvent gypseux et salins comme dans la grande majorité des zones arides. Leur capacité d'échange cationique, rajoute, souvent très limitée, ne permet pas une bonne nutrition minérale de la plante qui devient plus sensible aux stress hydrique et salin [59].

IV.7.3.3 Terrain à motifs zone de contact et zone de drainage

Le motif (zone de contact) est un trait commun et répandu des surfaces désertiques. Il comprend une variété de formes, y compris gilgai, fissuration superficielle voir **figure.4.27**, microtopographie la formation de croûte superficielle et la structuration de la végétation. Le motif de sol associé à des déserts caillouteux et à des surfaces de chotte est un phénomène répandu dans les déserts chauds [79].



Fig.4. 27 La zone de contact entre nappe phréatique et surface de sebkha.

Gilgai est un mot aborigène australien qui signifie petit trou d'eau, et bien qu'appliqué à l'origine à de petites dépressions qui ont retenu l'eau, il est maintenant utilisé pour se référer à une grande variété de phénomènes de sol modelés par le sol. En plus de gilgai être fréquemment associé à des sols à fort potentiel de gonflement comme les verti-sols, c'est aussi une caractéristique commune dans des environnements arides et semi-arides l'exemple dans chott de N'goussa où la texture de sol est forte avec des contrastes existant dans les sols là où le climat se caractérise par une saisonnalité prononcée des précipitations. Ces motifs sont caractérisés par des formes moins de 3 m verticalement avec une longueur d'onde de 15 m voire **figure.4.28**.

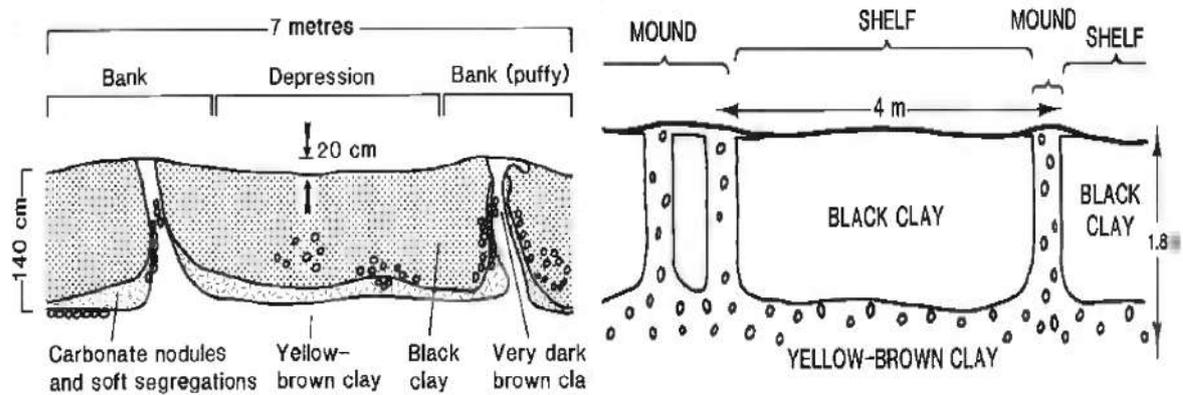


Fig.4. 28 Coupes transversales des principaux types de Gilgai [79].

IV.7.3.4 Effet de contact eau et sol salé

À côté de l'exploitation extensive des sols halomorphes améliorés pour les cultures pluviales, certaines plaines salées, particulièrement celles de la vallée de N'goussa, ont été exploitées d'une manière intensive par drainage et irrigation. Ces plaines drainées ont subi une évolution des caractéristiques hydrologiques de la nappe phréatique et les matériaux des sols, originellement salés et sodiques, ont été l'objet de modifications de leurs propriétés physicochimiques. Quelques cas de mise en valeur de sols salés sont présentés à titre d'exemples. Dans les régions semi-arides et arides l'exemple de notre zone d'étude, la pénurie et la variabilité de la pluie et la forte évaporation affectent l'eau et l'équilibre des sels dans le sol voir **figure.4.29**. Les facteurs climatiques sont très favorables à l'ascension des sels, à la concentration de la solution du sol et à la précipitation des sels dans la zone racinaire et l'horizon superficiel entraînant la salinisation. Cette salinisation peut être naturelle ou anthropogénique. La gestion des sols affectés par les sels requiert une combinaison de pratiques basée sur une bonne définition des caractéristiques hydro

pédologiques et hydrauliques et des conditions locales incluant le climat, la culture et l'environnement socioéconomique.



a) Niveau le plus bas (sebkhas).



b) Fentes de dessiccation et affaissements



c) Plant Halophyte sebkha N'goussa.



d) installation piézomètre intérieur sebkha.

Fig.4. 29 photos des différents niveaux de sebkha N'goussa.

IV.7.4 La source des sels dans chott et sebkha continental

Les sources d'eau et de solutés pour les saumures de lac salé sont principalement précipitation directe, écoulement de surface associé ou eau souterraine. Les eaux souterraines peuvent être dérivées de système météorique local ou régional, eau interstitielle des sédiments, ou fluides basaux ou hydrothermaux profonds voir **figure.5.30**. Les eaux interstitiels dans les sols des chotts et sebkha sont généralement plus concentrés que les eaux de surface en raison de la présence continue d'eau et l'interaction des minéraux et des roche avec la circulation des ces eaux qui par la suite peuvent avoir des chimies radicalement différentes de ceux des sources d'entrée.

Lorsque l'eau s'évapore, les minéraux qu'elle contient se concentrent pour former des roches, les évaporites. Si les formations salines actuelles sont dominées par les évaporites continentales, les temps géologiques ont vu l'accumulation de gigantesques volumes d'évaporites, qui se sont accumulés dans de très grands bassins et qui résultent de conditions de tectonique, d'eustatisme et d'hydrogéochimie particulière [56].

Les évaporites et les sels continentaux formés par des cours d'eau s'écoulant dans des dépressions fermées (bassins endoréiques), en particulier dans les régions sahariennes semi-arides à arides, provoquent des dépôts de borates, de nitrates et de carbonates de sodium. Dans les zones continentales, le gypse, l'anhydrite et l'halite sont les minéraux évaporitiques les plus courants.

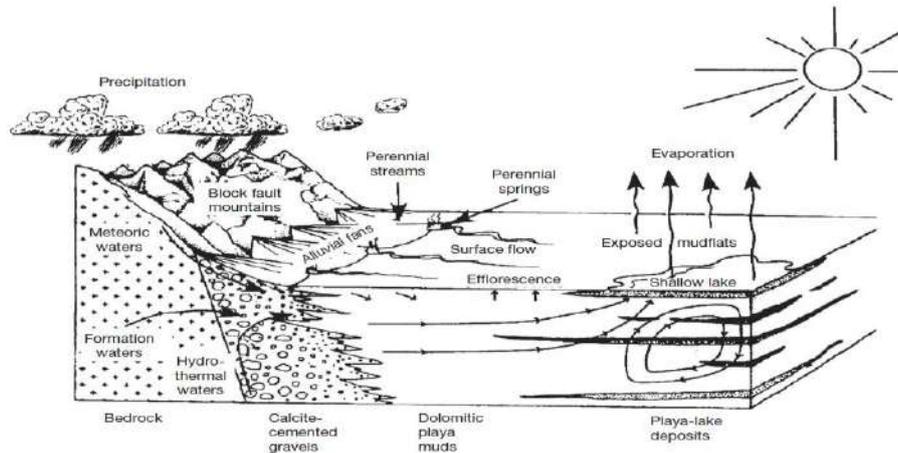


Fig.4. 30 Principales caractéristiques hydrologiques des bassins hydrologiquement fermés [80].

Plusieurs formations géologiques constituent des sources de sels solubles. Les eaux de ruissellement et de drainage, enrichies en éléments solubles, s'écoulent vers les parties basses des bassins-versants. À partir de là, deux cas de figure se présentent :

- Soit le bassin-versant possède un exutoire et les sels migrent alors plus bas, c'est le cas zone d'agriculture.
- Soit le bassin-versant est endoréique et une sebkha se forme dans la partie la plus basse exemple de sebkha N'goussa. Ces phénomènes se produisent toute l'année dans la partie aride et sèche des chotts sahariens septentrionaux d'Algérie comme celle de Chott Merouane, Chott Melghir, Chott Baghdad. Ils sont soit naturels, soit provoqués par l'irrigation. Sur le plan géochimique, les solutions (d'eaux de surface, souterraines ou de sol) évoluent, au cours de leur concentration, selon la voie saline neutre, ce qui signifie que l'on observe, avec l'augmentation du facteur de concentration, la précipitation de certains sels dans un ordre déterminé (calcite, gypse, etc.) avec celle du Na Cl en dernier lieu **figure.4.31**.

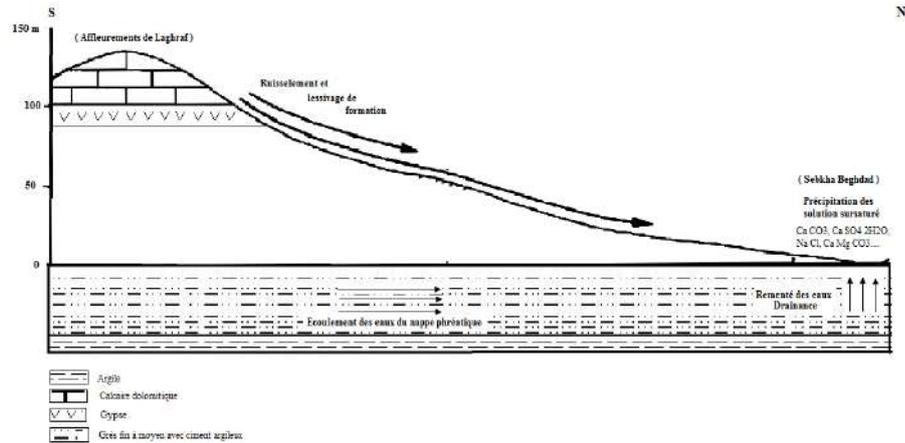


Fig.4. 31 Différents sources d'alimentation de la sebkha type sahara septentrionale par les eaux chargées des minéraux évaporitiques [65].

IV.7.4.1 Mécanisme de la salinisation des sols

Dans les régions arides ou semi-arides surtout zone des chotts et sebkhas, le lessivage et le transport en profondeur des sels dissous est minimal tandis que l'évapotranspiration importante favorise la concentration des sels dans le sol.

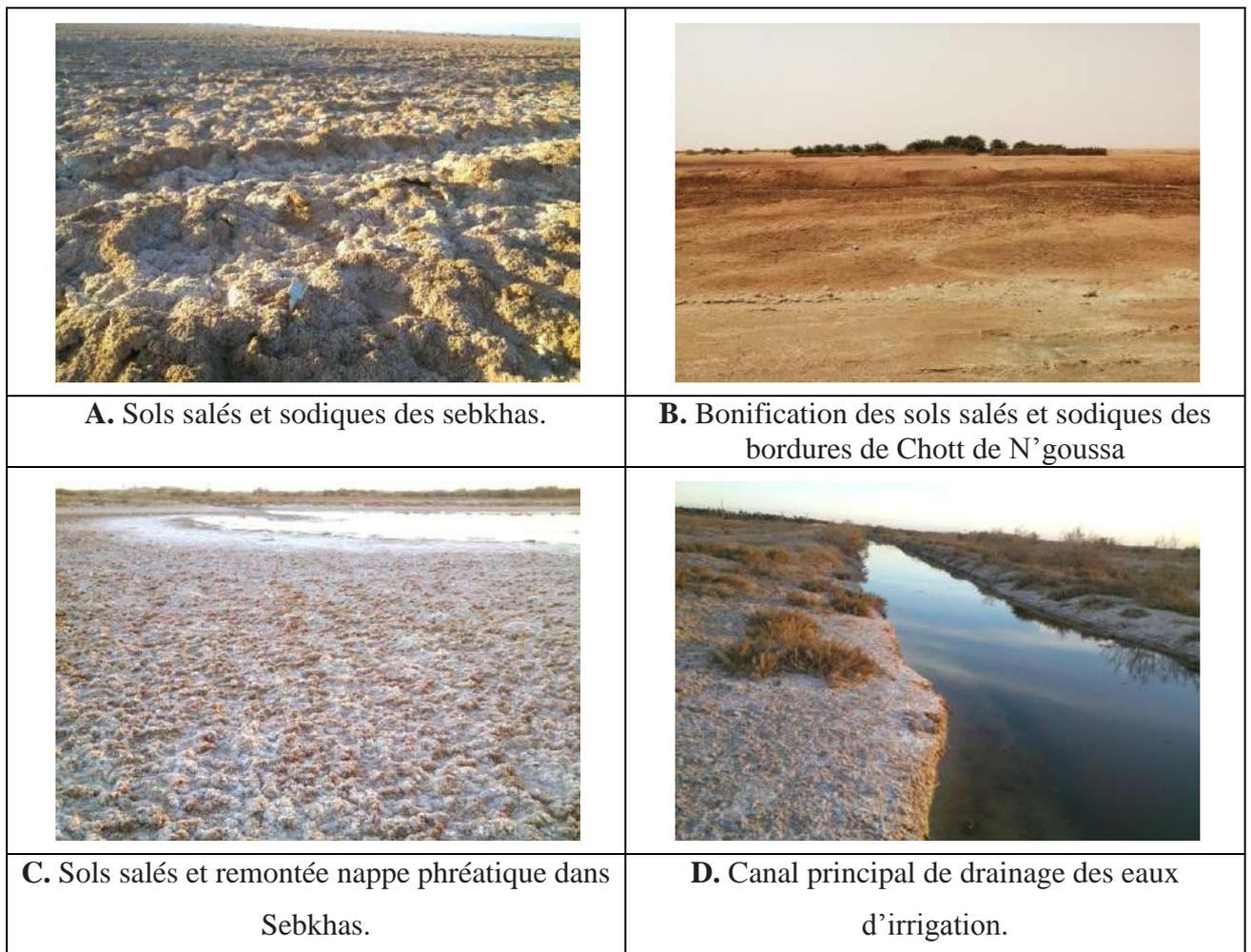


Fig.4. 32 Quelques figures sur la salinisation et remontée des eaux dans la zone N'goussa.

Des sols irrigués due à l'accumulation des sels soluble dans le sol. Elle résulte de divers facteurs dont l'irrigation avec des eaux de mauvis qualité, un lessivage insuffisant, un drainage inefficace, un taux important d'évaporation, des remontées du niveau des nappes. Lorsque les sols reçoivent un excès de sels solubles, il y a échange entre le Na^+ et les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} fixés sur les minéraux argileux. C'est un phénomène d'alcalinisation. Il faut une quantité notable de Na^+ pour qu'il y ait adsorption par les argiles. Les ions Ca^{2+} et Mg^{2+} échangés précipiteront quand le produit de solubilité de leurs sels sera dépassé par suite d'évaporation. Au-dessus d'un taux de 15% de Na^+ échangeable on parlera de sols à alcalis. Il apparaitre alors une dégradation des propriétés physique du sol voir **figure.4.32**.

IV.7.4.2 Le gypse et Halite dans les sols désertiques et les croûtes gypseuse souterraines

Les formations gypseuses du sahara septentrional (gypcrètes) sont rarement étudiées par rapport aux formations des calcaires (calc-rètes).

Les croûtes de gypse ont été définies comme des «accumulations à ou à moins de 10 m du sol épaisseur comprise entre 0,10 et 5,0 m contenant plus de 15% en poids de gypse et au moins de 5% en poids de plus de gypse que le substrat rocheux sous-jacent.

L'enrichissement en gypse des sols du désert, des croûtes souterraines et des sédiments hôtes formant des gypcrètes en poudre ou solides consolidées est lié à une interaction des plusieurs processus voir **figure.4.33**. Les études concernant la déposition de ces croûtes gypseuse qui sont fait par, Goudie, 1973et; Eckardt, 2006) décrivent différentes possibilités pour les sources de gypse et différents modèles de formation de gypcrète. Il est possible de les regrouper comme suit:

- 1)- Modèle d'évaporation des masses d'eau telles que les environnements des lacs, lagunes, cuvettes salines, playas ou sebkhas et accumulation de gypse sous forme de gypcrète.
- 2)- Modèle in situ : pendant la saison des pluies, la dissolution par percolation de l'eau de pluie prend lieu, pendant la saison sèche, il y a une nouvelle précipitation de l'eau descendant sur une très distance limitée vers la surface.
- 3)-Modèle fluvial: le dépôt de substances appropriées matériaux et leurs précipitations dans les vallées ou les canaux et ceux qui impliquent la dépôt ou altération de matériaux par l'action de la nappe.
- 4)-Modèle d'eau souterraine: La croûte est le résultat du flux capillaire ascendant d'eaux gypsifères induit par évaporation constante et rapide à la surface dans une région relativement sans pluie.

5)-Le modèle lessivage : les solutions contenant du gypse pourraient être lessivés des horizons supérieurs du sol pour s'accumuler en profondeur.

Ces processus ne peuvent pas être liés à l'environnement d'aujourd'hui, en particulier aux conditions climatiques récentes. Un climat plus humide est nécessaire lors du développement des gypcrètes.

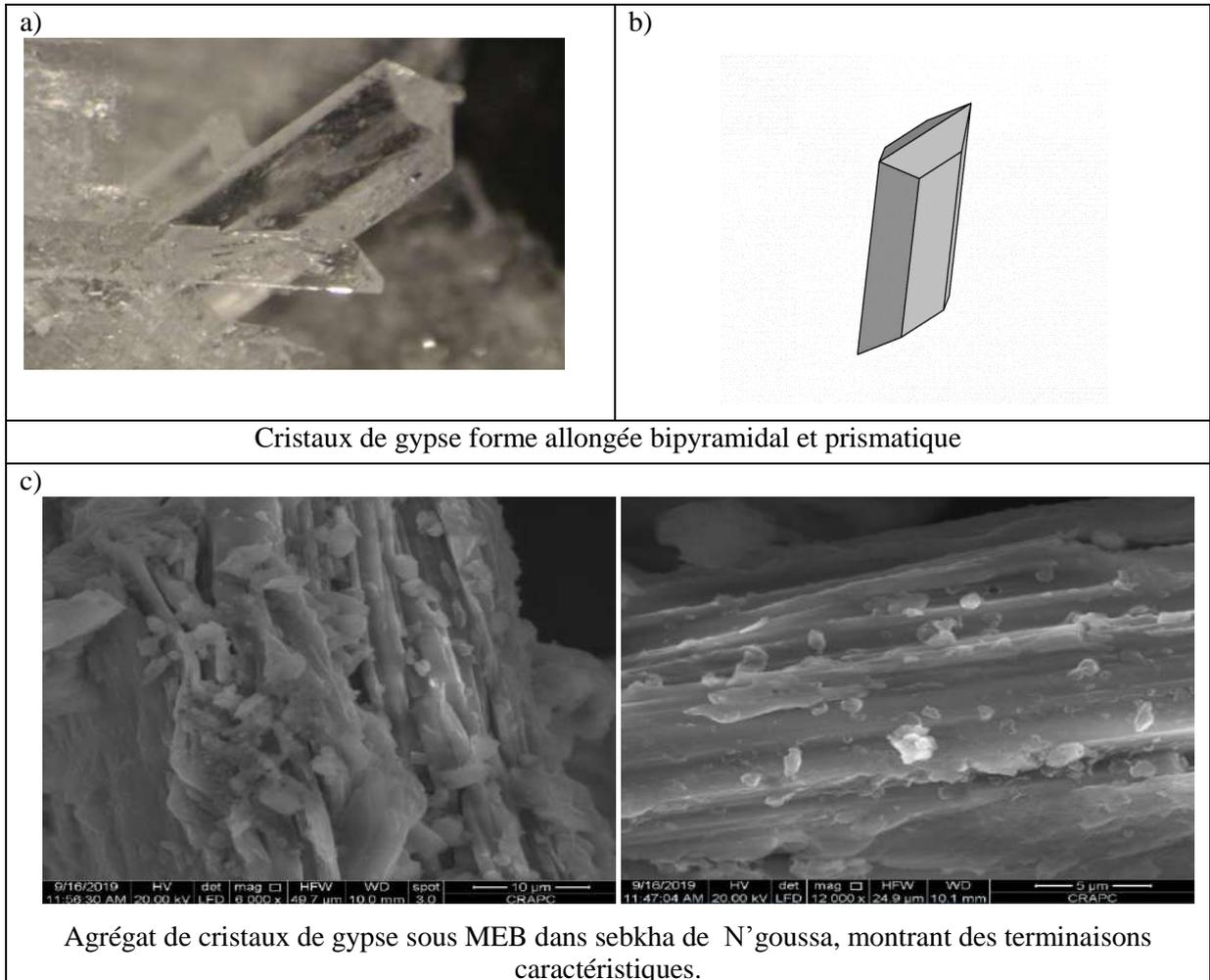


Fig.4. 33 Cristaux de sel de gypse apparu dans zone d'étude.

Les modèles 1 à 4 peuvent être exclus. Dans le domaine des études de terrain, les affleurements de gypse se trouvent dans des positions géomorphologiques qui ne permettent pas une reconstruction des bassins d'évaporation (modèle 1). Le modèle 2 ne peuvent être prouvés car il a besoin des roches gypsifères à la surface; ils n'existent pas. La position géomorphologique de la croûte refuse le modèle 3. Il est impossible que les eaux souterraines ascendantes et évaporées (modèle 4) est responsable de l'enrichissement du gypse à la surface ou près de la surface, car dans la plupart des cas, la roche sous-jacente est libre ou presque exempte de gypse **figure.4.34**. C'est prouvé au moyen des séquences décrites, des analyses et des conclusions.

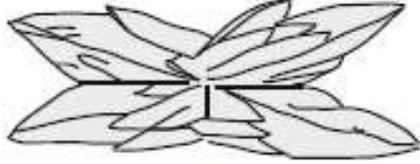
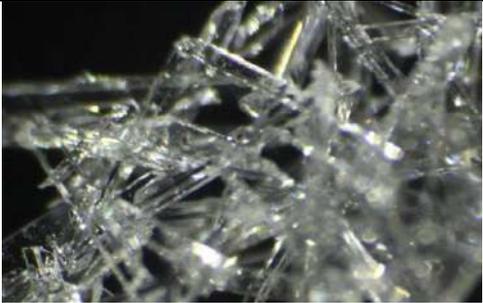
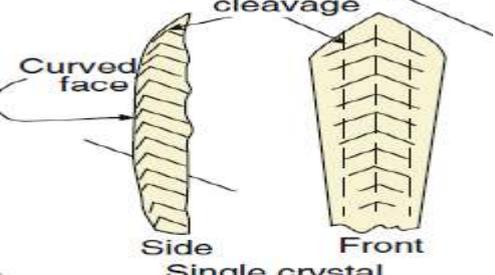
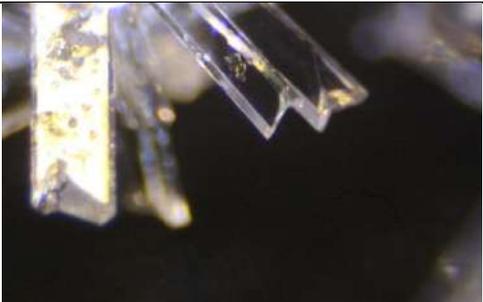
 <p>Lenticular twin complex</p> <p>Cristallisation de gypse en forme lenticulaire</p>	 <p>Photo gypse sous loupe binoculaire X2</p>
 <p>Hemi-bipyramidal</p> <p>Cristallisation de gypse en Hemi-bipyramidale</p>	 <p>Photo gypse sous loupe binoculaire X2</p>
 <p>Cristallisation gypse en Zig zag</p>	 <p>Photo gypse sous loupe binoculaire X2</p>
<p>Cristaux de Gypse</p>	

Fig.4. 34 Différents forme de cristallisation de Gypse pendant évaporation isotherme.

Halite est trouvée dans les analyses SEM / EDS dans les analyses DRX de la croûte de surface dans les deux cuvettes de N'goussa et Baghdad. Halite se présente sous forme de masses anhydrite cubique, et formes squelettiques (hopper) **figure.4.35** intimement mélangées au sulfate minéraux. Bien que des études antérieures aient rapporté que les halites présentent ce forme des cubes parfaits dans les sols en raison de sa tendance à se dissoudre dans l'eau, il attire dans cette étude, le cube parfait et les formes squelettiques de l'halite sont assez communs dans les deux horizons, la majorité des formes cubiques sont squelettiques (hopper), ce qui suggère une précipitation sursaturée conditions. Cependant, tous les minéraux solubles trouvés dans cette étude sont au minimum deux ordres de grandeur soluble que le gypse dans de l'eau pure. Donc, les deux cuvettes contenant des

sels solubles qui ne pouvaient être formé que par évaporation le long de la frange capillaire de l'eau précédente.

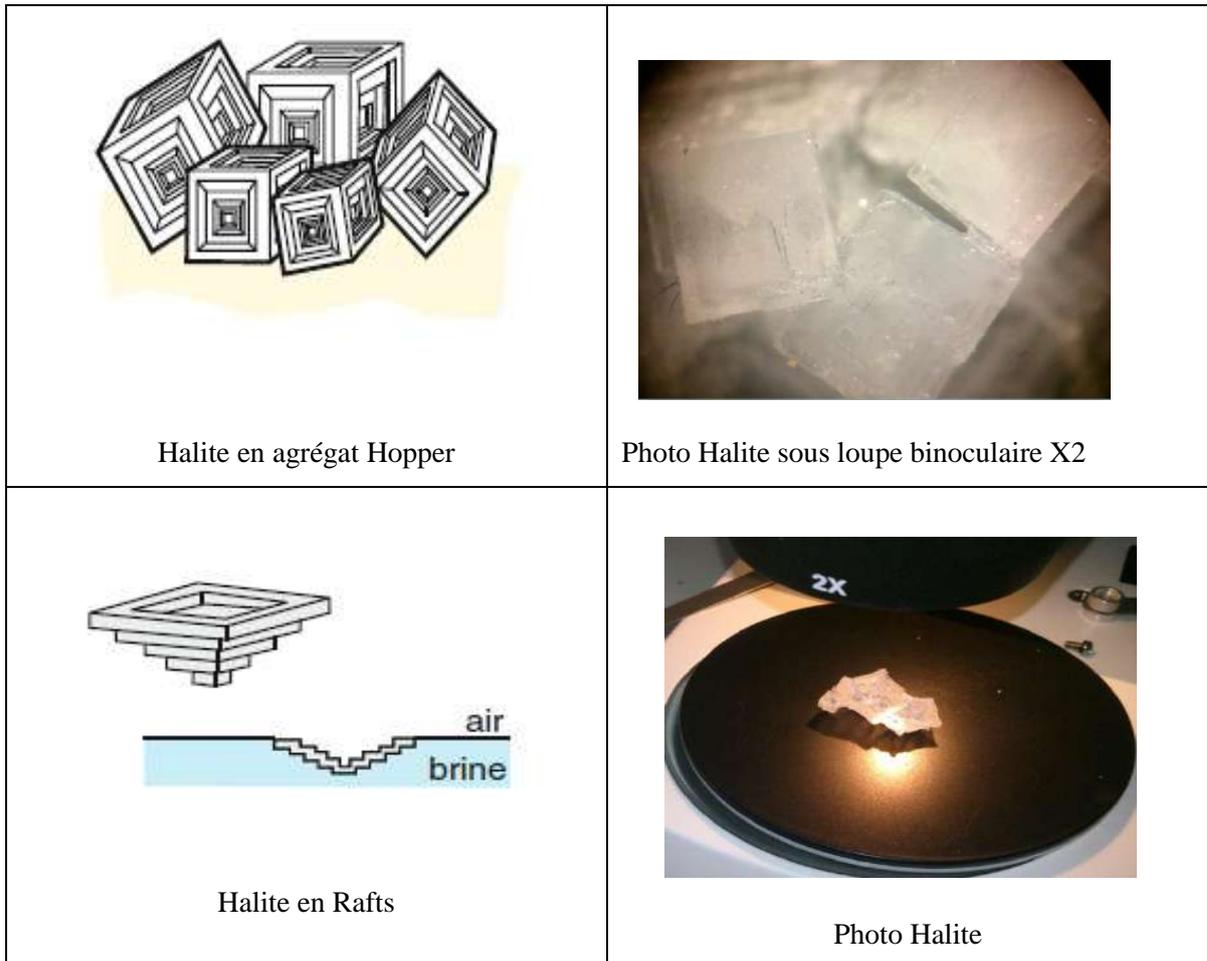
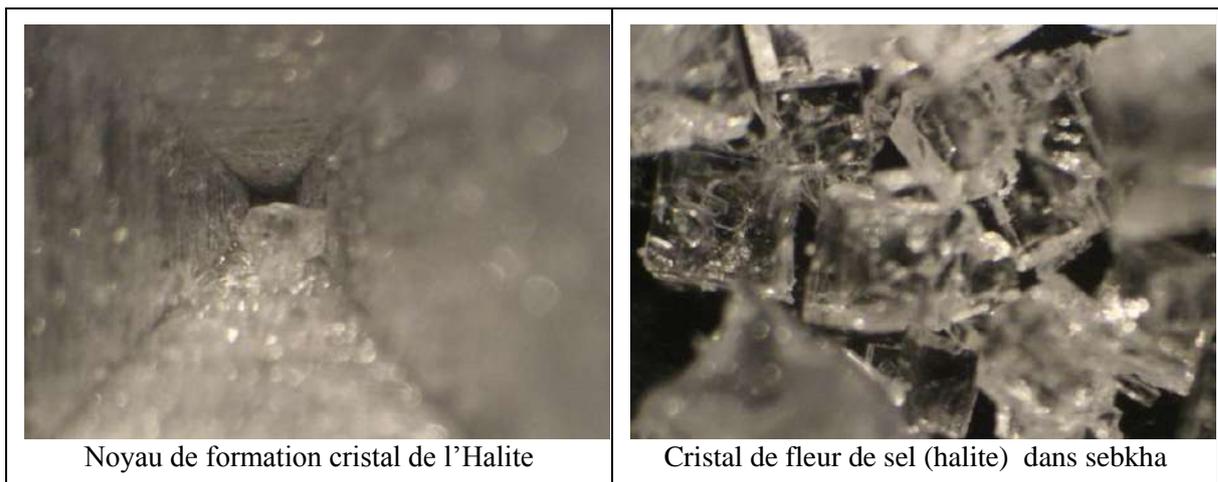


Fig.4. 35 Différents forme de cristallisation d'halite pendant évaporation isotherme.



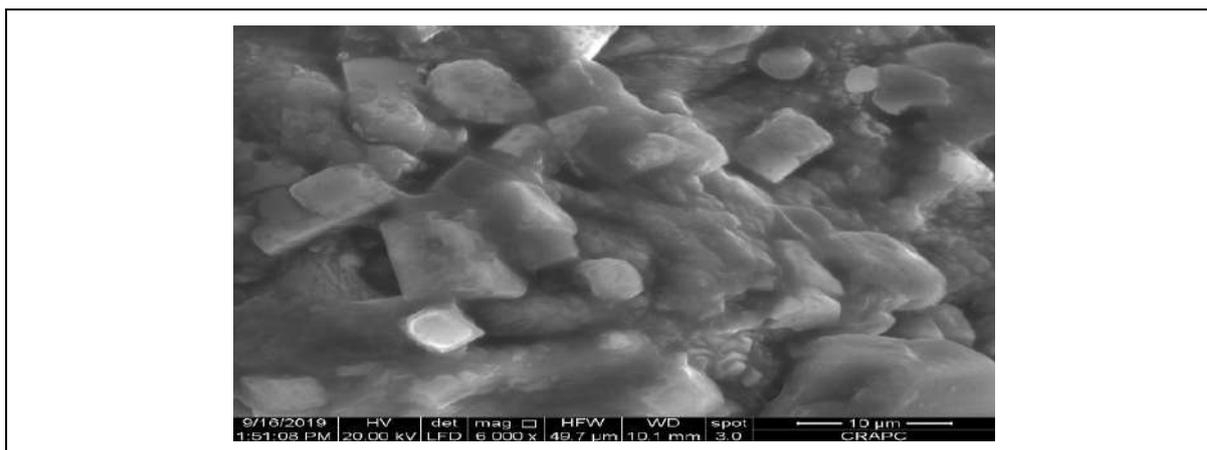


Fig.4. 36 Cristaux de sel d'halite apparu dans zone d'étude.

IV.7.4.3 Collecteur et réseaux de drainage

Le réseau de drainage comprend des drains enterrés, des collecteurs et des émissaires à ciel ouvert et une station de pompage qui refoule l'eau vers l'exutoire naturelle qui situé dans l'ouest de N'goussa (exutoire naturelle, station de pompage).

Enfin, la situation globalement endoréique des dépressions (chotts et sebkhas), la quantité totale de sels en mouvement dans le paysage augmente avec le temps. La salinisation des sols est à craindre dans les terres basses. Des prémices de ces nouvelles sebkhas sont perceptibles dans certaines dépressions de sahara septentrionale.



Fig.4. 37 Collecteur et réseaux de drainage des eaux d'irrigation

IV.8 Processus de formation du sol

Dans les bassins endoréiques du Sahara septentrional d'Algérie, les processus de formation du sol ont été mis en œuvre comme suite

IV.8.1 Salinisation

La salinisation constitue le processus majeur sur les deux cuvettes de N'goussa et celle d'El Hadjira. Le processus était reconnu par la présence de croûte de sel de surface sous

différentes formes; polygonale motifs hexagonaux, surfaces scellées et flocons de sel renversés, associés à nappe phréatique élevée avec une conductivité électrique (EC) souvent supérieure à 200 mS/cm voir chapitre V. La nappe phréatique reste dans le 2-3 mètre supérieur et à travers les eaux de remontée capillaire se déplacent à la surface et les sels cristallisent par évaporation. L'analyse par diffraction aux rayons X a permis d'identifier l'halite comme principal sel minéral accompagné avec du gypse, de l'anhydrite et de la calcite (donné inclu dans chapitre V).

IV.8.2 Calcification et décalcification

Presque tous les sols de chott et de sebkha sont calcaires au premier mètre de la surface à étendue variable. La source directe de carbonate de calcium est le parent calcaire Matériel. Cependant, au sommet de la Baten (roche de Moi-pliocène) dans coté Ouest de notre région d'étude, la source la plus probable en plus à la matière mère est sablo-calcaire. Dans ces sols, les carbonates étaient dissous ou finement dispersés dans la matrice du sol, de sorte que certaines caractéristiques carbonatées ne soient pas visible. Dans certains profils, les carbonates sont précipités ou cimentés en un calcaire croûte (Petrocalcids). Le calcium L'accumulation de carbonates est associé à son retrait des horizons superposés (décalcification). Le processus d'accumulation de carbonate s'appelle calcification et où enlevé s'appelle décalcification.

IV.8.3 Gypsification

Le gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est une roche évaporitiques qui se forme par l'accumulation de calcium, de sulfate et évaporation de l'eau. Le soufre étant l'élément limitant, la création de gypse est fortement couplé au cycle biogéochimique du soufre [81]. Le soufre est largement répandu dans la lithosphère, la biosphère, l'hydrosphère et atmosphère et sujet au transfert en cours. Les sources potentielles de soufre de gypse peuvent être soit locale, sous forme de substrat rocheux et d'eau de mer, ou distante sous forme d'aérosols atmosphériques. Les aérosols peuvent être dérivés de composés organiques et inorganiques d'origine terrestre ou marine. Gypse formes principalement avec le mouvement par ascendant ou bien descendant des eaux souterraines ou la remobilisation de gypse précédemment déposé et redistribution latérale ultérieure par le vent et l'eau.

Le gypse est le deuxième minéral le plus fréquent des groupes de carbonates et s'évapore dans la zone d'étude. Les cristaux de gypse sont identifiés en différentes tailles et formes, à

savoir flocons, aciculaire, lenticulaire, rosettes, etc. Les sols gypsiques sont cartographiés comme haplosalides gypsiques, aquisalidés gypsiques, haplogypsiques leptiques et haplogypsiques typiques [82]. Le gypse a également été cartographié comme affleurement de gypse voir **figure.4.38**.



Fig.4. 38 les croûtes gypseuse dans partie est de sebkha de N'goussa.

L'étude morphologique et analytique de quelques profils de sol à croûte gypseuse de surface réalisée au niveau de la région de Ouargla (N'Goussa et El Bour), a pu montrer que les croûtes gypseuses étudiées ont des épaisseurs importantes, et leur formation a certainement nécessité une grande quantité d'eau et de ce fait des conditions climatiques plus humides que les conditions d'hyperaridité actuelle qui règnent dans la région. L'aridité qui a suivie cette période humide a permis la consolidation et la préservation des croûtes gypseuses à la surface [64].

IV.9 L'origine de la dépression et cuvette allongé de l'Ouargla jusque d'El Hadjira

IV.9.1 L'origine de la dépression et cuvette allongé de l'Ouargla

L'origine de cette dépression est encore mal connue de celle de la dépression de sahara septentrionale. Ces cuvettes ou bassins fermés situés à l'intérieur ou à proximité plateforme saharienne. Ils se sont formés à la suite de la construction de la montagne tertiaire. Depuis l'eau de la rivière de ces régions n'atteint jamais la mer. Évaporation de ces milieux leur

superficie diminuée d'un lac en 1^{er} stade puis devenu un marais entraîne une augmentation constante de la concentration de sels qui étaient porté en solution.

L'ablation éolienne a dû jouer un rôle à cause des vents de sable dans cette région saharienne. Des recherches récentes montrent que cette dépression à commencer à se créer après le dépôt du crétacé, et que sa subsidence a repris après celui des formations lacustres de l'Oligo-Miocène [29]. Elle se serait accentuée au quaternaire. L'étude de ces dépôts peut donc servir de modèle, non seulement pour l'évolution des climats depuis 2 ou 3 million d'années (le Plio-Quaternaire) mais aussi des déformations récentes et actuelles du craton, réputé figé, qu'est l'Ouest-Africain. Il en est sans doute de même pour la zone déprimée analogue, d'altitude semblable dans la zone de N'goussa, où les altitudes peuvent atteindre 150 à 200 m, pour les mouvements néotectoniques récents, L'oued Igharghar et l'oued Mya sont déterminés par le soulèvement du Massif Central au Sud et l'affaissement des grands chotts algéro-tunisiens au Nord. Les cours d'eau dans cette région est peut être plus ancien, daté de Tertiaire (les périodes humides affectent cette région). Ces mouvements néotectoniques sont traités par les études de Rognon, 1967. Morel, 1985 à cause de l'importance du soulèvement variable des terrasses dans ces régions. Enfin la subsidence récente a joué un rôle primordial dans l'existence de ces dépressions N-S ou NE-SW de chott Melghir passe par chott Merouane jusqu'à sebkha de N'goussa dans la cuvette de Ouargla (sebkha Sefioune comme étant un exutoire naturel **figure.4.39**).

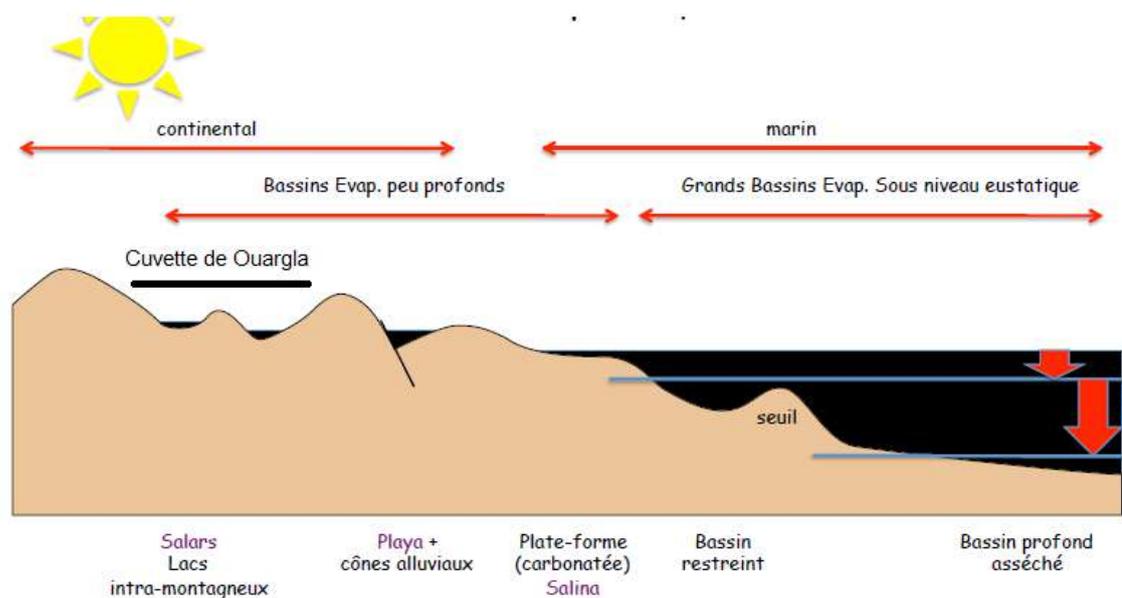


Fig.4. 39 Différents types des bassins évaporitiques (chottes et sebkhas Ouargla)[83].

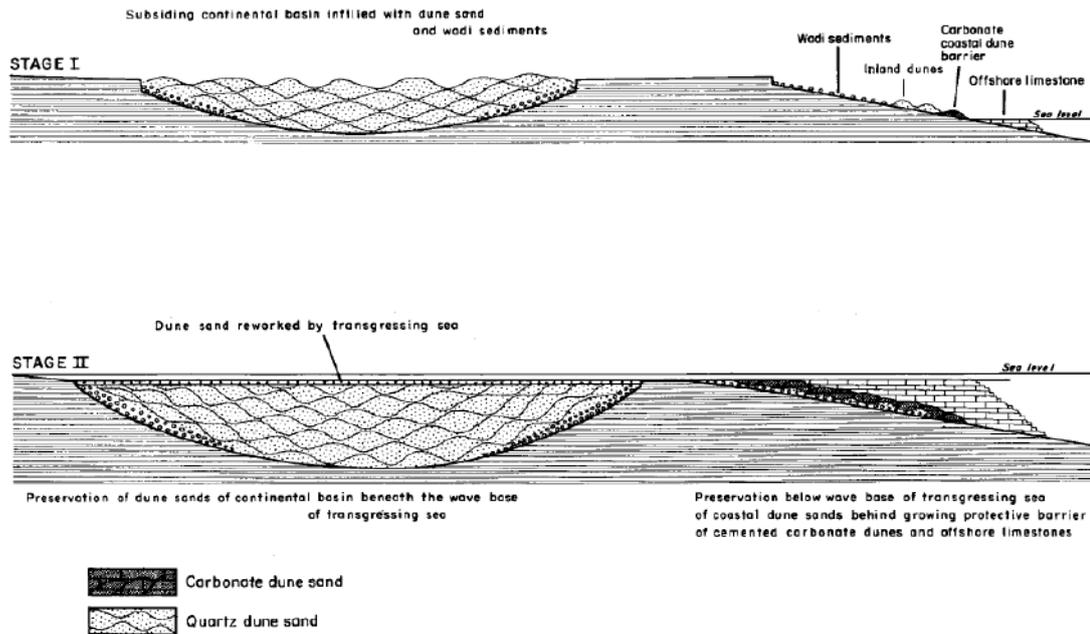


Fig.4. 40 Coupes transversales schématiques illustrant la manière dont les sables de dunes non consolidés peuvent être préservés dans cuvette qui forme chotte et sebkha [67].

L'assèchement du climat au post-glaciaire et à l'Holocène inférieur tend à se confirmer d'après ses effets, enfoncement des oueds, forte activité éolienne, moindre alimentation des aquifères sahariens [84].

IV.9.2 La reconstitution et l'origine de la dépression de chott 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 hydro-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 hydro-éoliennes 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 [14].

IV.10 L'évolution de cuvette de Ouargla dans l'ère quaternaire

Une bonne chronologie relative des formes du relief a pu être établie en plusieurs points de la bordure septentrionale du Sahara ou plusieurs formes géomorphologique. Il faut pouvoir replacer cette évolution géomorphologique dans un contexte paléo-climatique précis. La période des 40 derniers millénaires est la plus favorable pour ce type de recherches [84]. En effet les formations géologiques de quaternaire les plus récentes ont eu le temps de se développer sur une telle durée et, mieux conservées, elles sont souvent en relation avec des dépôts dans lesquels la succession des climats peut-être reconstituée. De plus les datations au carbone 14 fournissent des données plus précises sur la durée de chaque épisode et facilitent les corrélations à longue datations disponibles sont encore très peu nombreuses et très dispersées. Dans les dernières années, les datations absolu avec C^{14} ont été utilisées intensivement dans les vestiges dans les régions sub-sahariennes et ont permis de progresser dans la compréhension des rapports entre géomorphologie et paléoclimats. En Afrique du Nord, où les recherches géomorphologiques ont été pourtant plus précoces et plus poussées. La datation obtenu montrer que cuvette et Sebkha NW de la cuvette d'Ouargla celle de N'goussa et d'âge 10 000 BP Pléistocène (Holocène alpin) voir **tableau.4.4.**

R. Coque a montré que, dès 16000 BP et jusqu'à 8000 BP, le climat de la bordure nord-saharienne s'était asséché voir **figure.4.41**. Ses conclusions étaient fondées sur deux arguments géomorphologiques : l'entaille des piedmonts sur 10-15 mètres parfois et le creusement des chotts par déflation éolienne [84].

Ces cuvettes ont été évoluées pendant la période d'holocène. On peut classer l'Holocène dans sahara septentrionale et présaharienne en quatre sous-périodes.

- **L'Holocène inférieur** (10 000 B.P. à 7 000 B.P.) est caractérisé par la croissance de l'humidité (apparition des dunes grand erg oriental, réapparition de lacs, accumulation de la basse terrasse et élaboration du glaciaire holocène). Il se termine peut-être par une courte phase sèche vers 7 500 - 7 000 B.P.

- **L'Holocène moyen** (7 000 - 3 500 B.P.?) est probablement la sous-période de l'optimum climatique (fin de l'accumulation de la basse terrasse, épanouissement de la pédogenèse et de l'hydrographie).
- **A l'Holocène supérieur** préhistorique commence l'assèchement climatique progressif (entaille de la basse terrasse, développement de la déflation). L'Holocène supérieur historique, après une possible courte phase humide vers 2 400 B.P., se caractérise par l'accumulation de la très basse terrasse, puis son entaille et enfin par la désertification qui remobilise les sables éoliens.

Tab.4. 4 Datation avec ¹⁴C des différentes zones plateforme saharienne (Sebkha de N'goussa) [84].

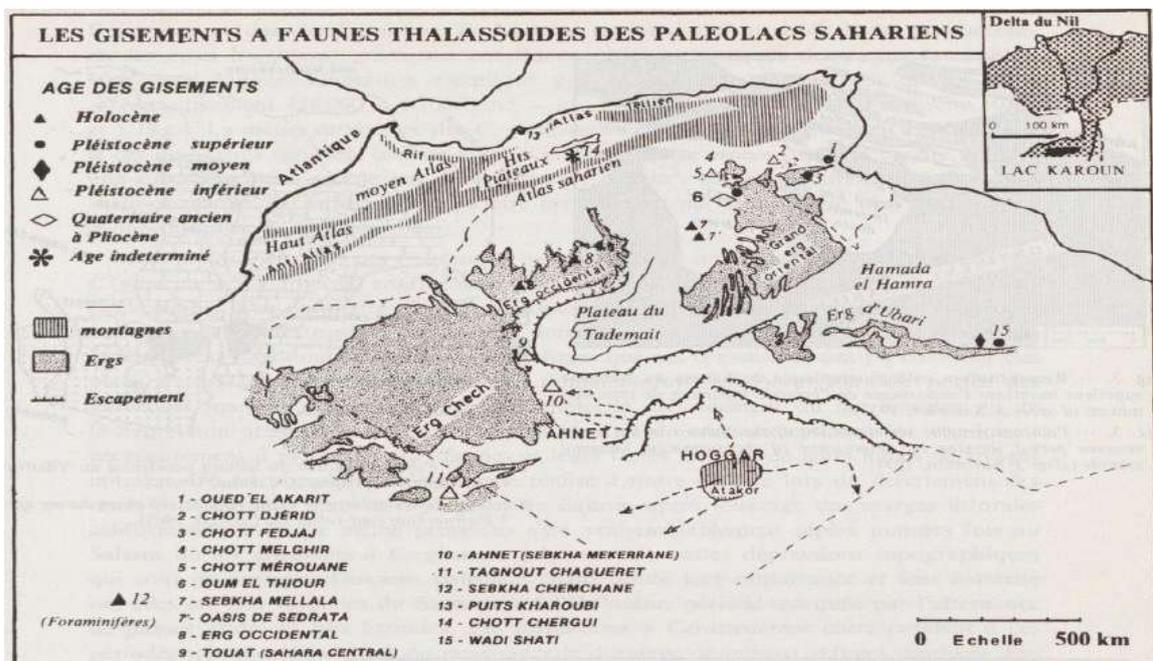
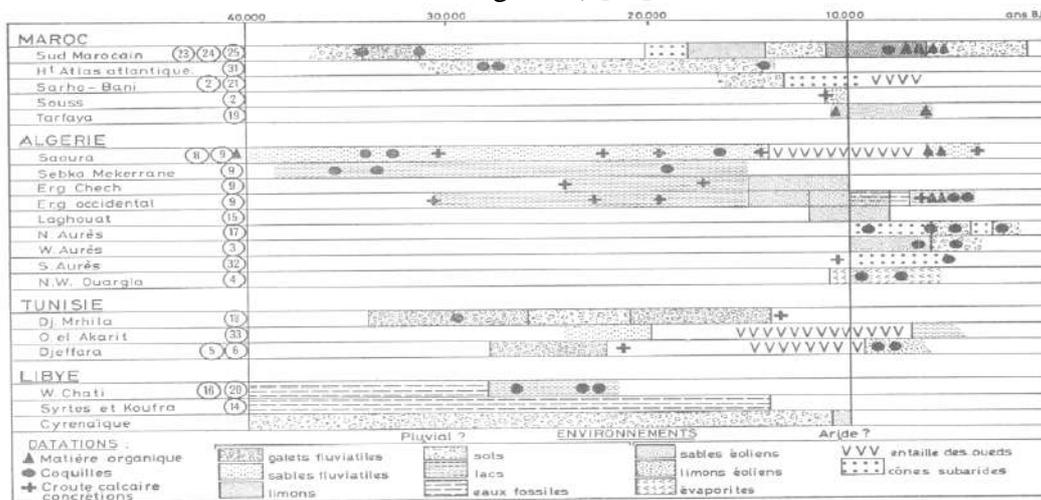


Fig.4. 41 Carte de répartition des principaux des paléo-lacs sahariens avec indication de leurs âges respectifs [85].

IV.11 Conclusion

Le Sahara est une vaste plateforme s'étendant à une altitude faible à moyenne et caractérisée par six ensembles émergeant au centre et au Sud. Parmi ces ensembles la zone des chotts et sebkhas qui sont dominé et repartis dans sahara septentrional d'Algérie[86].

Le Sahara n'a pas toujours été aussi de climats désertique, et des fluctuations climatiques humides ont, à plusieurs reprises, totalement changé son visage physionomie au cours du l'ère de quaternaire. Ainsi, à l ' Holocène inférieur, le Sahara était occupé par de vastes lacs d'eau douce dont ne subsistent plus aujourd'hui que des mares salées résiduelles, des sebkha desséchées, des chotts salés ou des gueltas isolées et alimentées par des sources ou les rares eaux de pluie.

Dans un milieu aride à subaride tel que celui-ci, les lacs très dispersés aujourd'hui se situent principalement dans des dépressions alimentées par des eaux souterraines, dans des régions géographiquement très éloignées l'une de l'autre. En parle des lacs salés semipermanents et saisonniers, approvisionnés temporairement par une nappe, les pluies locales, ou les apports de rivières. Un cas particulier est celui des bassins endoréiques dans lesquels viennent se perdre les rivières, tel que l'oued N'sa et l'oued M'Zab, drainait les eaux de l'Atlas saharien vers les sebkhas terminales de Sefioune et valle de Oued Mya.

CHAPITRE V :
HYDROCHIMIE ET MINERALOGIE DE
CHOTT ET SEBKHA DE LA ZONE
D'ETUDE

V.1 Introduction

Si le sel a toujours eu un usage purificateur dans notre culture (contre le mauvais œil, pour résoudre des problèmes...), sûrement parce qu'il a toujours existé dans et sur le sol algérien.

La rareté du sel dans certaines portions de l'Afrique le fait estimer presque à l'égal de l'or. En faut-il conclure que l'Afrique est dépourvue de sel ?

Les sels précipités dans les chottes et sebkha sont des minéraux très demandés dans le monde pour ces diverses utilisations telles que l'alimentation du bétail, la fabrication de verre, les détergents, etc. dans notre étude, les sebkhas de saharas septentrionale, située dans le sud Est de l'Algérie, loge une nappe de saumure très riche en minéraux salins tel que halite, sulfate de soude...etc. cette étude constitue une évaluation hydrogéologique approfondie de ces sebkhas en vue d'une exploitation optimale des réserves de ces minéraux salins.

L'étude a été réalisée au niveau de sebkha de N'goussa et chott Baghdad. Ces études sont basées sur le traitement de 16 piézomètres de profondeur de 2 m comme étude préliminaire qui couvrant la totalité de sebkha de N'goussa. L'objectif c'est de voir et explorer de ressources de cette cuvette endoréique. Il s'agit d'une nappe libre de saumures reposant sur un écran d'argile.

Cette étude par ce que la qualité naturelle de l'eau de sub-surface sont très peu documentée dans la région ces deux régions. L'étude hydrochimique a porté sur l'analyse et l'interprétation des différentes compositions hydro-chimiques pendant deux cycles géochimiques.

Les eaux d'irrigation dans l'oasis de N'goussa ont été prélevées au niveau de 20 forages qui alimentent actuellement tout le périmètre irrigué. Un réseau de 16 piézomètres a été installé au même endroit que les profils pédologiques. Les piézomètres sont installés dans la partie endoréique zone de sebkha pour voir et poursuivre la trajectoire des eaux de la nappe phréatique.

L'étude de la composition chimique des eaux de sebkha a été réalisée sur des échantillons prélevés à partir des piézomètres représentatifs dans toute la chotte. Ces piézomètres sont implantés de forme d'une maille équidistante.

Les eaux de sebkha ont été prélevées au cours de saisons en 2017 et 2018. Pour toutes les eaux étudiées le pH et la conductivité électrique ont été mesurés sur place et des échantillons d'eau ont été prélevés pour analyse chimique au laboratoire. Pour les besoins de la cartographie du niveau piézométrique et de la salinité des eaux, nous avons utilisé les piézomètres qui ont été installés pour voir un maillage assez représentatif de toute l'oasis.

L'objectif de ce chapitre est d'identifier, à partir de l'étude des éléments majeurs, les principaux processus de minéralisation des eaux des chotts et sebkha. En plus de ça, ce chapitre décrit les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux existe dans cette région (surface et sub-surface "sebkha" et les nappes profonds). 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.

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer des modèles de l'évolution géochimique des eaux mettant en relation les données hydrogéochimiques obtenues et l'environnement géologique d'où provient cette eau. Cette relation doit tenir compte le suivi géochimique de l'eau, ainsi que de son évolution le long de son parcours surface ou bien souterrain (interaction roche-eau). Ce chapitre traite premièrement des faciès hydrochimique des échantillons (section, puis l'origine des ions en solution. Finalement, pour voir la répartition spatio-temporelle des faciès permet de reconstituer l'évolution récente de ce système : d'un milieu ouvert à un milieu fermé qui évolue progressivement vers un pôle évaporitiques. Ce système évolutif a été observé dans d'autres zones de sahara septentrional tel que chotte Merouane et chotte Melrhir ou les études ont été faites par Hacini, et al [87]. En plus de ça cette étude est de présenter les principales caractéristiques physico-chimiques des eaux nappe phréatique du zone de cuvette endoréiques dans sahara septentrional oriental algérien. Ces eaux sont apparues comme très minéralisées et excessivement salé, avec de fortes teneurs en chlorures et en sulfates.

V.2 Historique des études dans la zone de chott et sebkha

Jusqu'à récemment, peu d'études avaient été effectuées sur la minéralogie, chimisme et l'hydrogéologie dans cuvettes endoréiques saline nord de sahara à titre d'exemples les deux nôtres zone d'études la région de N'goussa et d'El Hadjira. De plus, parmi l'ensemble des travaux, rares étaient les études qui ont été faites par le français (Revilois brigole), système aquifère bassin algérienne, les études précipitation des sels dans chotte Merouane par Hacini 2008 [87] avec les études géochimique et minéralogique sur chott Baghdad [65] et suivre l'évolution géochimique de la salinité des eaux de la nappe phréatique Ouargla par Nezli 2007[88]. Les étude qui on été fait par Zatout sur Géochimie et potentiel minier du Lithium dans les chotts Sud Algériens Cuvette de Ouargla, Melghir et Merouane [89]. Ces études sont en cours pour évaluation et pour être documentés, une grande partie des documents n'est que la compilation de rapports anciens maintes fois recopiés. Au mieux, les sources sont

convenablement citées, mais sont parfois aussi déformées, ou mal comprises. À titre d'exemple, (la géologie de Ouargla et zone des oasis) de même, des coupes géologiques de Busson (1966-a) de sahara de l'est d'Algérie; finalement, des autres coupes géologique, certaines études sérieuses et bien documentées sont restées jusqu'à présent ignorées en raison d'une diffusion trop restreinte, ou par perte des informations annexées sur des feuilles volantes dans certains rapports. Les travaux de recherche ont porté principalement sur les aspects hydrogéologiques et minéralogiques de ces cites nord sahara en se basant sur un nombre réduit d'investigation de chimisme et géochimie des eaux de surface et sub-surface. Ainsi, les études disponibles restent fragmentaires et constituent une description sommaire et limitée. La réalisation d'une étude hydrogéologique approfondie basée sur une couverture totale de ces zones est nécessaire pour valoriser ces régions.

V.3 Les puits de la nappe de complexe terminal

V.3.1 Site d'échantillonnage de la nappe complexe terminal

Sur le territoire Algérien, il existe en effet deux formations aquifères distinctes dans ce complexe terminal ; La première est constituée dans les sables du Mio pliocène, tandis que la seconde se trouve dans le sénonien supérieur et L'Eocène inférieur (sénonien pour Ouargla principalement) [90]. A Ouargla, la nappe de Mio pliocène se trouve à une profondeur qui varie environ entre 30 et 100m alors que celle du sénonien est située à une profondeur moyenne de 200m environ.

Un réseau d'échantillonnage a été choisi pour permettre d'acquérir des données représentatives de la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de la nappe du Continental Terminal. Cette réseau se compose de 20 puits d'eau (**figure.5.1**) et couvre une grande partie de la cuvette de N'goussa. La répartition des puits sont comme suite:

- Puits proches de la sebkha sud de la cuvette pour étudier les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines; 9, 12, 6.
- Puits et forages centre de la cuvette; 1, 2, 3, 7, 10
- Puits et forages au bord Nord de la cuvette de N'goussa vers l'extrémité sud de sebkha Sefioune l'exutoire naturelle.

Le prélèvement d'eau a été effectué une seul fois pendant l'année 2018. Pour étudier plus finement la variation spatiale de la nappe de complexe terminal destiné à l'irrigation. Des

paramètres physico-chimiques et du niveau piézométrique de la nappe a été effectué pour une vingtaine de puits situé dans la cuvette de N'goussa.

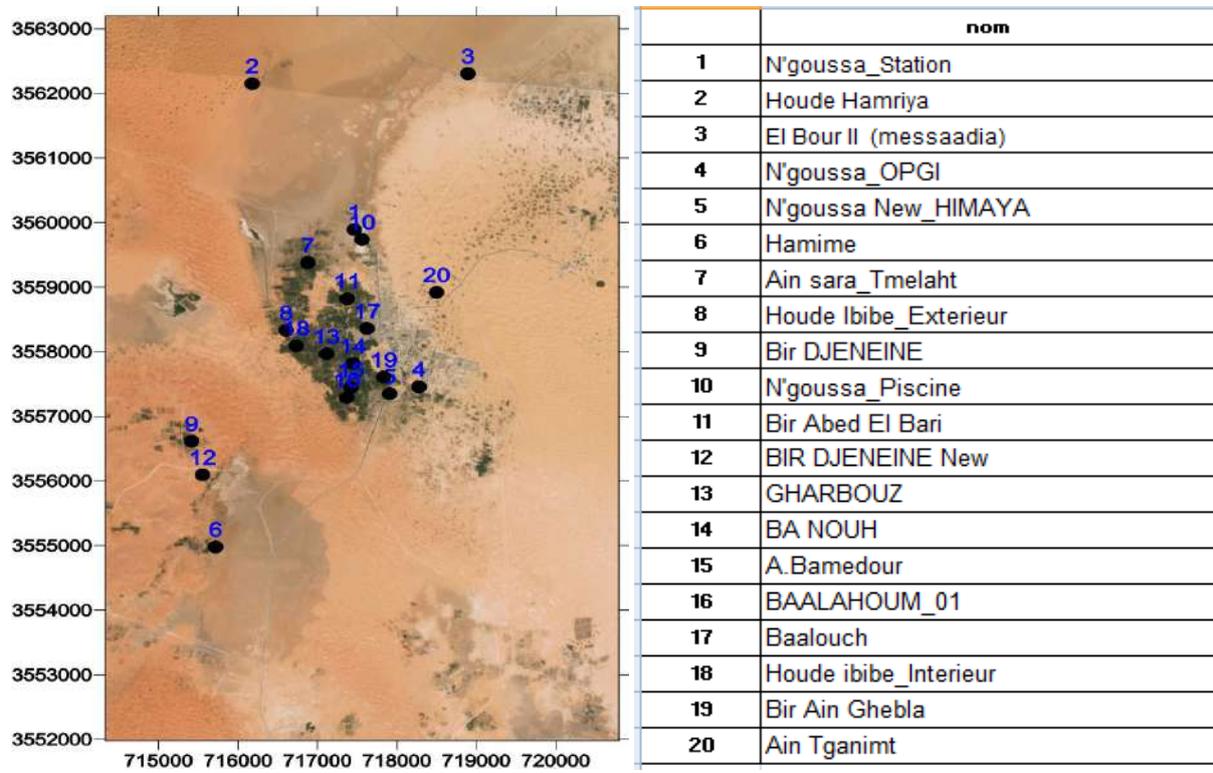


Fig.5. 1 Position des puits d'eau dans la cuvette de N'goussa.

V.3.2 Variation spatiale des paramètres physico-chimique

L'utilisation de l'hydrogéologie a conduit à remettre en question la cause des grandes profondeurs des niveaux statiques des deux nappes dans oasis de N'goussa dans les dépressions piézométriques des deux nappes qui ont existé dans cette région d'étude (nappe de surface d'origine eau salé et nappe peut profond à profond "eau des forages").

La confirmation de ces deux nappes est apparue claire dans les données géologiques et hydrogéologiques mettent en évidence dans la zone déprimée de la surface piézométrique deux nappes superposées (superficielles et profondes). L'équilibre de ce système aquifère est lié à la pluie. Une diminution de celle-ci, qui se traduit par un déficit de pluie efficace annuelle, peut provoquer un abaissement de la surface piézométrique. La fluctuation annuelle de la surface piézométrique est plus forte dans les nappes superficielles que dans les nappes profondes.

Des paramètres physico-chimiques et des méthodes hydrochimique ont été utilisés en vue de caractériser la qualité des eaux souterraines de la cuvette de N'goussa utilisées en irrigation. L'étude a été basée sur 20 échantillons d'eau de puits. Les résultats ont dévoilé des

caractéristiques physico-chimiques, relativement, variables. Le diagramme de Piper a permis d'identifier deux faciès chimiques voir **figure.5.2**.

Un faciès mixte chloruré et sulfaté calcique et magnésien, et tendance à un faciès chloruré sodique. Les résultats de l'analyse des paramètres physico-chimiques des échantillons prélevés de cette zone humide du notre zone d'étude qui sont exposés **figure.5.3** et **figure.5.4** 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 conductivités moyenne 1,5 à 7,5 ms/cm² à élevées peut atteindre 9 ms/cm².

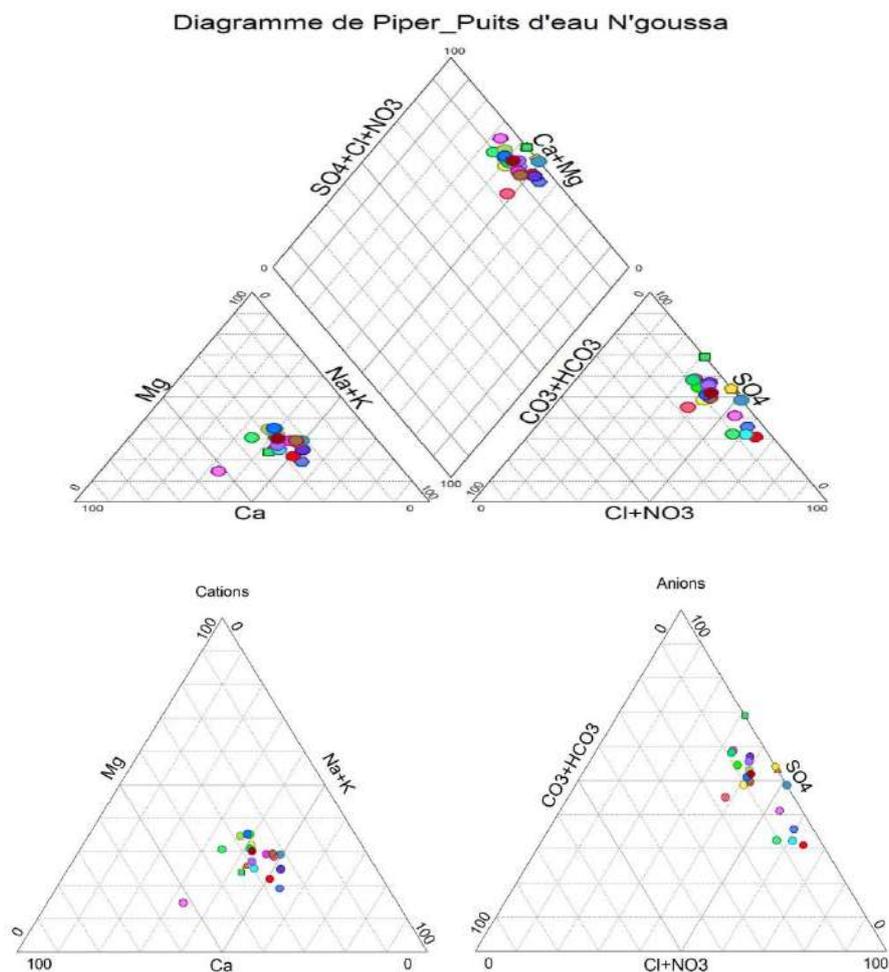


Fig.5. 2 Diagramme de piper représente les faciès chimique des eaux d'irrigations (Complexe terminal).

Les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de nappe profonde qui sont exploitée à l'irrigation présentent des variations spatiales 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 couvrir une grande superficie de notre zone d'étude.

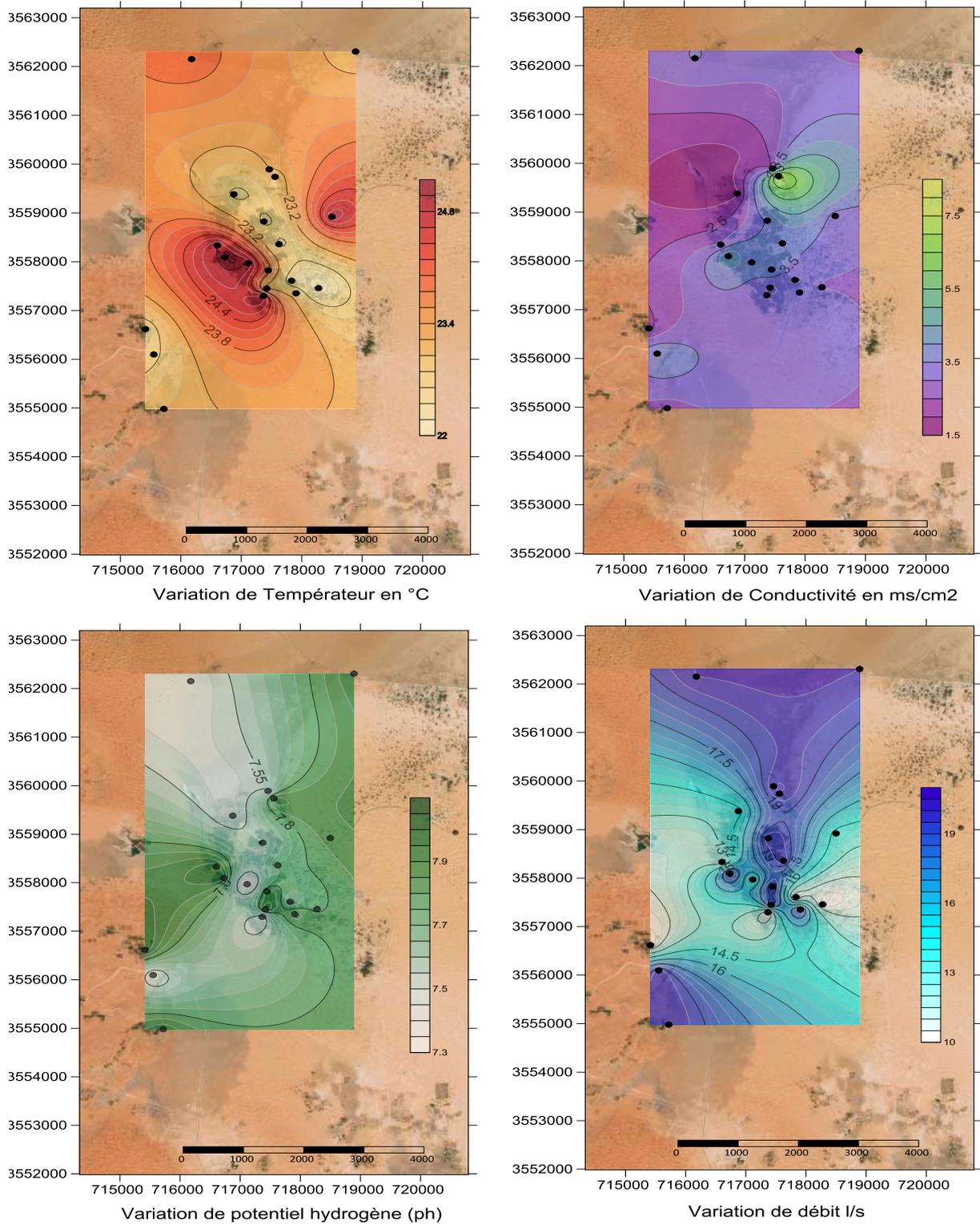


Fig.5. 3 Variation des paramètres physico-chimiques des puits complexe terminal cuvette de N'goussa.

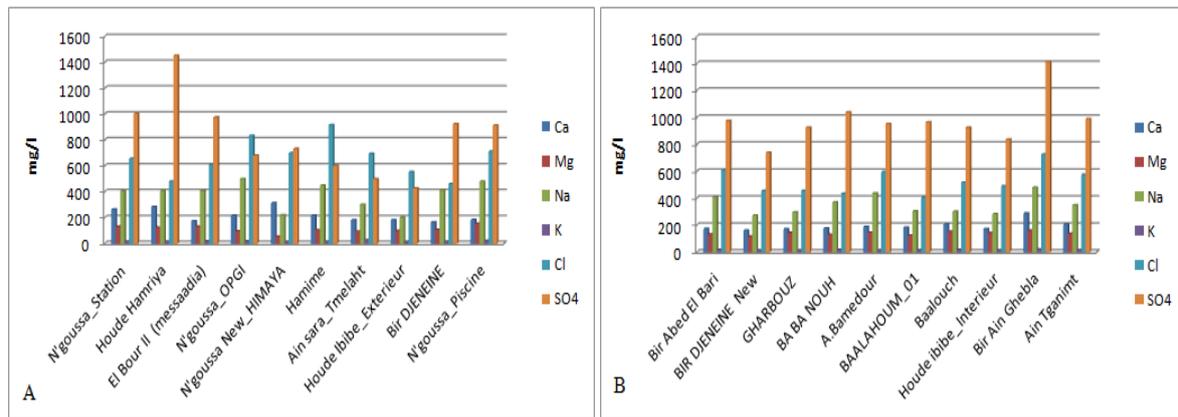


Fig.5. 4 Représentation des éléments majeurs pour les puits de complexe terminale. Néanmoins, ces résultats constituent une étape dans l'étude du fonctionnement géochimique de cette région. L'échelle du petit bassin versant est indispensable à la compréhension des bilans géochimiques sur des zones plus 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 du centre vers les périphéries 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 la rendant inutilisable pour l'irrigation mais à l'origine d'une couche gypse et parfois de l'halite très épaisse.

Cette problématique de la gestion des ressources en eau et de la salinité dans les oasis a été abordée sur l'oasis de N'goussa. Parmi notre objectif, nous nous attacherons plus particulièrement à analyser les processus de salinisation. Les mécanismes géochimiques de précipitation et de dissolution de minéraux sont étudiés. Le fonctionnement hydrologique est ensuite évalué à partir de la concentration des eaux de la nappe et des eaux de drainage. Nous tenterons enfin d'en tirer quelques enseignements pour la gestion de l'irrigation, du drainage et de la salinité sur le périmètre de N'goussa.

V.3.3 Présentation des éléments majeure dans la nappe de complexe terminal zone de N'goussa.

Les eaux d'irrigation par leur composition peuvent avoir une influence sur le sol [91]. Dans la cuvette de N'goussa, les eaux utilisés à l'irrigation sont les eaux captés de la nappe du complexe terminal qui présente une salinité assez remarquable, leur influence de salinisation ne peut être que négative pour les sols et par conséquent sur la plus part des cultures.

La salinité totale d'une eau correspond au totale des cations et des anions présents exprimés en mg/l. Les données sont présentées dans la **figure.5.5** et **tableau.5.1**. Les chlorures sont très réponsus dans ces eaux d'irrigation ou la valeur peut atteindre 916 mg/l. la zone la plus concentrée c'est au centre de la cuvette et au niveau de côté Est ou la concentration sont très élevés (650 mg/l à 700 mg/l).

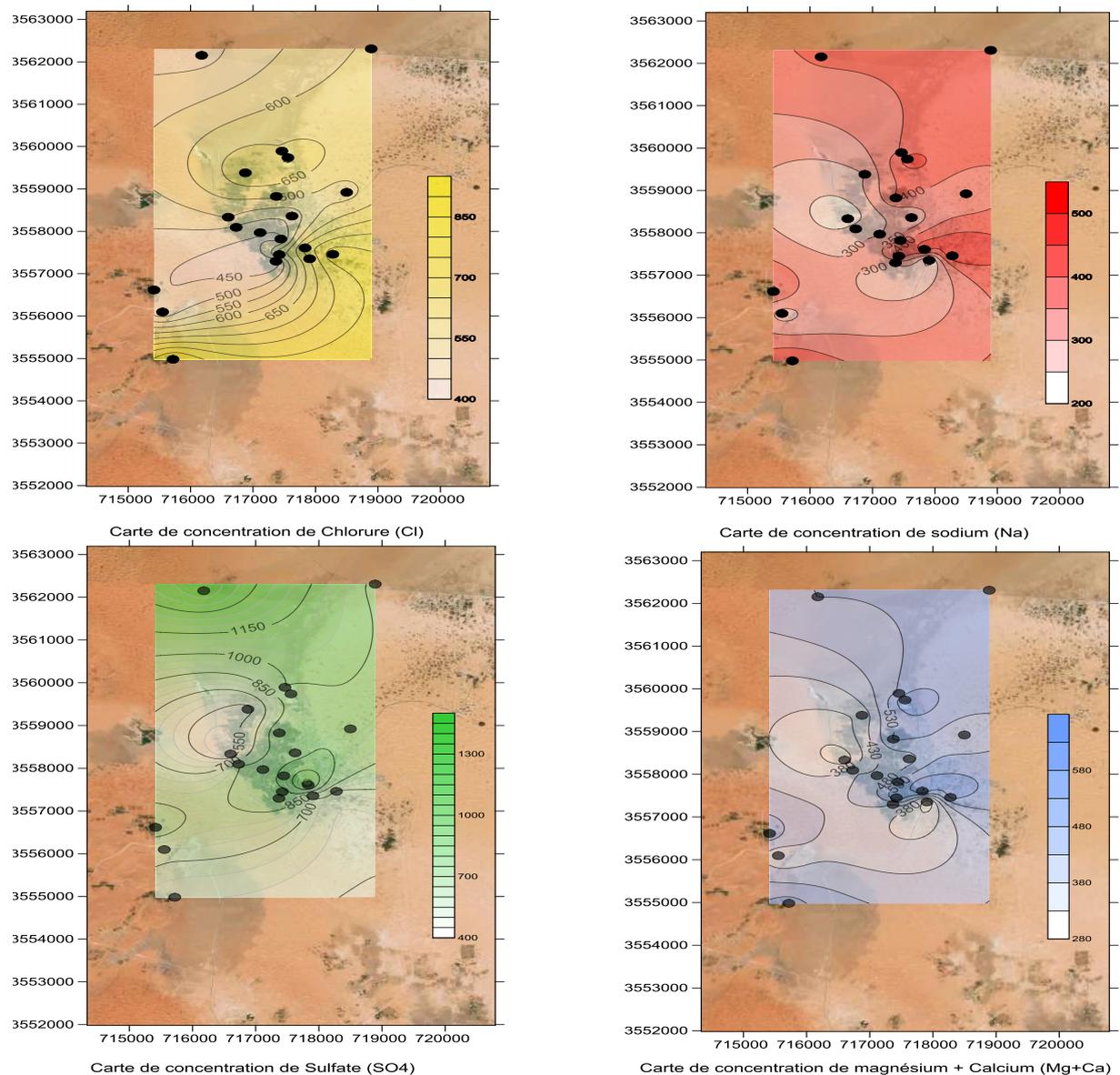


Fig.5. 5 Variation des éléments majeurs des puits de complexe terminal dans cuvette de N'goussa.

Pour le Sodium (Na) qui, considéré comme un élément très soluble et très fréquent dans les eaux ; il peut provenir à partir de plusieurs origines.

Le plus fréquent c'est la dissolution des roches salines tel que l'halite 'l'interaction roche solution'. Les concentrations de sodium sont de l'ordre de 200 mg/l à 500 mg/l moins en comparaison avec les chlorures. D'autre part magnésium et calcium qui provient des argiles et des roches volcanique. Les concentrations sont de l'ordre de 280 mg/l à 600 mg/l. les sulfates peuvent être, d'origine naturelle à partir de la dissolution de gypse ou pyrite.

Tab.5. 1 Statistiques élémentaires des différents paramètres physico-chimiques mesurés Pour les eaux de complexe terminale.

Paramètre	N.ALG	N.OMS	Min	Max	Moy	Ecart-type
Ca ⁺² (mg/l)	200	200	160	313	205	45
Mg ⁺² (mg/l)	150	150	53,47	161,3	123,23	26,05
Na ⁺ (mg/l)	200	200	200	500	363,97	88,09
K ⁺ (mg/l)	20	12	11	26	15,96	3,41
Cl ⁻ (mg/l)	500	250	405	915,91	593,7	139,09
SO ₄ ⁻² (mg/l)	400	250	427	1450	897,67	251,55
HCO ³⁻	-	300	98	204,35	148,8	31,75
Cond ms/cm	2,800	1,000	1,89	8,03	3,45	1,24
PH	6,5 - 8,5	6,5 - 8,5	7,27	8,01	7,74	0,23

V.4 Hydrologie de surface

L'hydrologie de surface de la région étudiée se caractérise par un endoréisme généralisé. Le réseau hydrographique s'organise autour d'une multitude de petits bassins versants, de l'ordre du 10 à 15 km², séparés par des seuils sableux d'origine éolienne ou colluviale. L'aquifère de la nappe phréatique est constituée principalement de sables fins et de silts, passant progressivement en profondeur à deux couches de gypse qui peut être subdivisé cette nappe en deux couche qui donne l'allure d'une nappe phréatique de type bicouche. À la base de cette sebkha on se trouve des argiles imperméables comme lits de nappe phréatique.

Pendant la courte saison des pluies, le ruissellement de type Hortonien est provoquée lorsque l'intensité de la pluie est supérieure au taux d'infiltration du sol ; la pluie arrive à une vitesse plus importante et ne peut être absorbée par le sol, ces eaux de ruissellements va se concentrer dans des ravines ; celles-ci naissent sur les zones la plus basse des chotts, dans de vastes zones d'épandage, pour se rejoindre éventuellement plus à l'aval, et créer des mares de bas-fonds. Du fait de l'existence de ces épandages intermédiaires, la superficie des bassins versants des mares peut varier en fonction de l'intensité des événements pluvieux [92] voir **figure.5.6**.

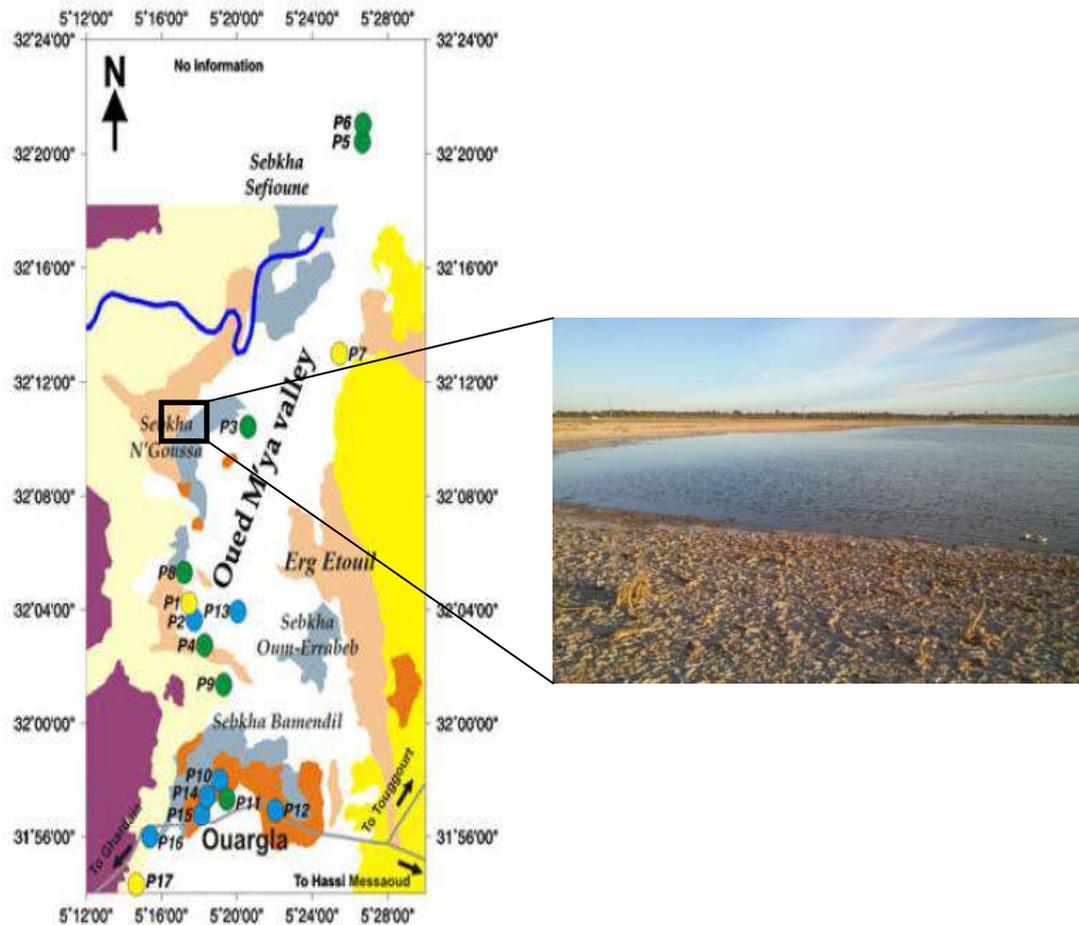


Fig.5. 6 Mares dans sebkha de N'goussa.

V.5 la nappe phréatique saline

La nappe phréatique de la région de N'goussa a fait l'objet d'une multitude d'études hydrogéologiques dont la plupart se sont intéressées à la composante quantité (pour l'irrigation) estimation de ressources, évolution piézométrique, modélisation hydrodynamique. L'étude de la qualité et de la caractérisation géochimique des eaux souterraines n'a été tentée que récemment par différentes équipes de recherche dont principalement, étude réalisé par le bureau d'études BG (Bonnard et Gardel) ,2004. Des études récentes en cour de réalisation par Laboratoire de Géologie de sahara à l'université de kadi Merbah Ouargla. Pour atteindre notre objectif d'étude, un ensemble des analyses des teneurs en ions majeurs ont été effectuées entre 2017 et 2018, de la nappe phréatique, répartis en 16 piézomètres (**figure.5.7**). Les ions majeurs systématiquement analysés sont Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ pour les cations et Cl^- , SO_4^{2-} pour les anions.

V.5.1 Evaluation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques de l'eau de sebkha:

Elle est contenue dans les sables alluviaux de la vallée ; on peut la suivre de façon régulière tout au long de la voie de ligne le plus basse (cuvette endoréique) par les puits sahariens qui s'y alimentent à une profondeur variant de 1 à 8 mètres selon les lieux et la saison. Elle s'écoule du Sud vers le Nord suivant la pente de la vallée; ce mouvement très lent a pu être estimé récemment à 0,4 I/s/km de front de nappe en amont de la palmeraie de Ouargla et à 0,6 I/s/km de front en aval vers chotte N'goussa jusque sebkha Sefioune selon l'étude de BG 2004. Les résultats des analyses réalisées durant l'année 2017 et 2018 sont représentés pour un suivi spatial et temporel.



Fig.5. 7 forage dans nappe phréatique à utilisation pour l'irrigation

V.5.2 Variation temporelle des paramètres physico-chimiques

La composition chimique des eaux varie dans le temps, c'est-à-dire en fonction des données climatiques. Les teneurs en potassium, trop faibles pour que des variations significatives apparaissent, n'ont pas été prises en considération. Deux paramètres sont sensiblement constants, le pH, toujours voisin de 7 à 8, et la teneur en sodium, qui diminue toutefois un peu en saison fraîche. Le comportement de ce dernier élément est donc voisin de celui du chlore, et le sodium 500 mg/l comme valeur maximal, très important dans les roches du bassin, est d'origine lessivage des roches évaporitiques préexistant comme l'halite. Les variations du calcium sont trop faibles, par rapport à la sensibilité du dosage, pour qu'une interprétation se dégage du graphique. La conductivité montre une corrélation positive très nette avec le magnésium **figure.5.8**. En définitive, les deux éléments dont la géochimie est la plus intéressante dans les eaux de la nappe de N'goussa sont la Chlorure et le sodium, En période de basses eaux (saisons sèches), le magnésium est donc plus rapidement exporté que les

chlorures, alors qu'en période de hautes eaux le phénomène s'inverse, et l'exportation de chlorure est prépondérante.

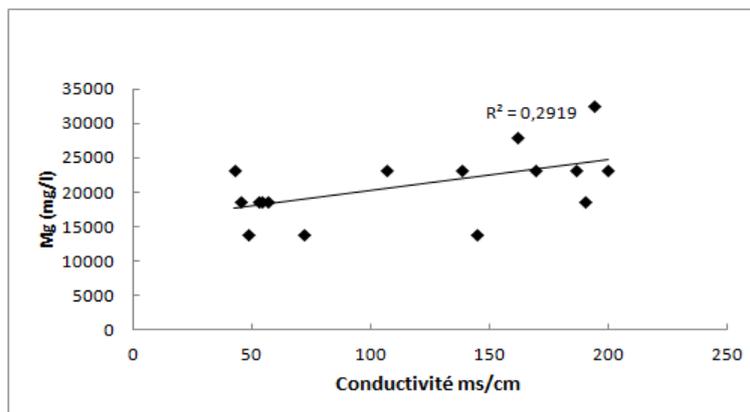


Fig.5. 8 Relation de la conductivité électrique en fonction de magnésium des eaux de la nappe phréatique.

V.5.3 Variation spatiales des paramètres physico-chimique

V.5.3.1 Variation de température

Les eaux prélevées à partir des piézomètres installés dans sebkha de N'goussa sont très variés mensuellement. La variation de la température des eaux de nappe phréatique de sebkha de N'goussa suit étroitement celle de la température atmosphérique. Elle varie comme moyenne annuelle des stations piézométriques 17°C à 20°C à marée haute (période hivernale) et de 27°C à 34°C à marée basse voir **figure.5.9** et **figure.5.10**.

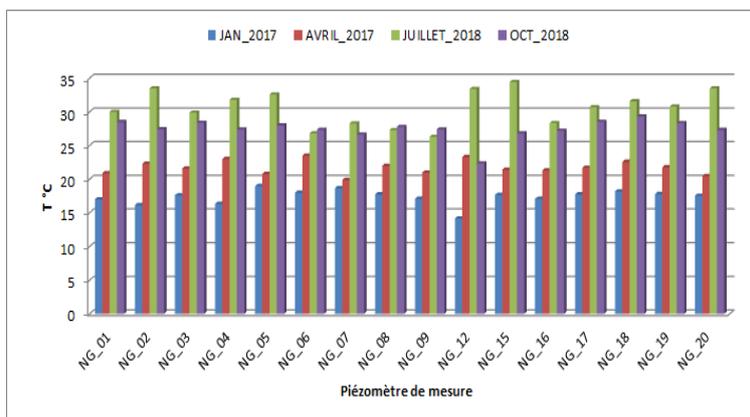


Fig.5. 9 Variation de Température.

Pendant la période de basse eau, les températures les plus élevées sont mesurées sur le piézomètre NG_15 de 34°C à et NG_02 de 33,5°C. Les températures les plus basses pendant période de haute eau se rencontrent dans le piézomètre NG_02 de 16,33°C et à NG_01 de 17,02°C.

Les courbes de l'évolution saisonnière de la température, tant à marée haute qu'à marée basse, ont montré des allures très différent entre marée haute (janvier 2017) et période marée basse (juillet 2018). L'amplitude de la variation entre les points de prélèvement dépasse 10°C. La

température sur l'ensemble du bassin est relativement hétérogène, tant à marée haute qu'à marée basse peut-être à cause de l'effet de la continentalité dans cette région aride désertique; elle fluctue respectivement entre 17 à 31°C comme valeur maximale voir **figure.5.11**.

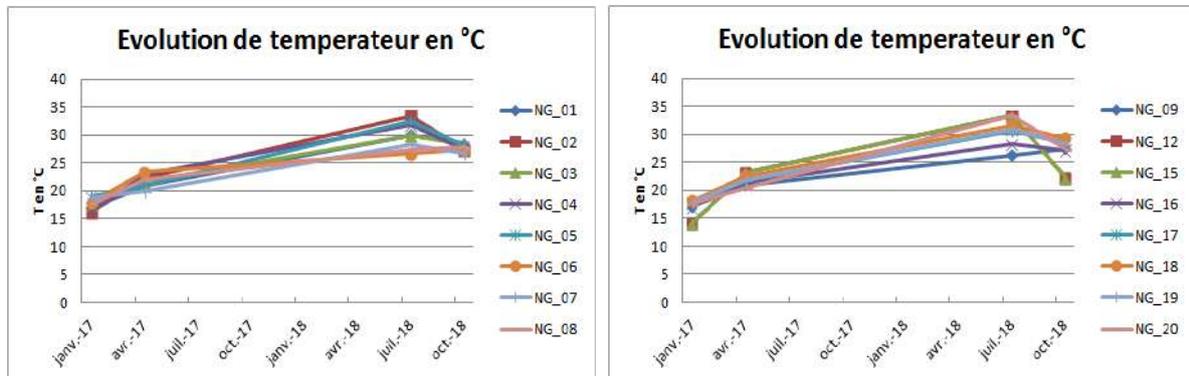


Fig.5. 10 Variation Temporelle de Température ou niveau des piézomètres.

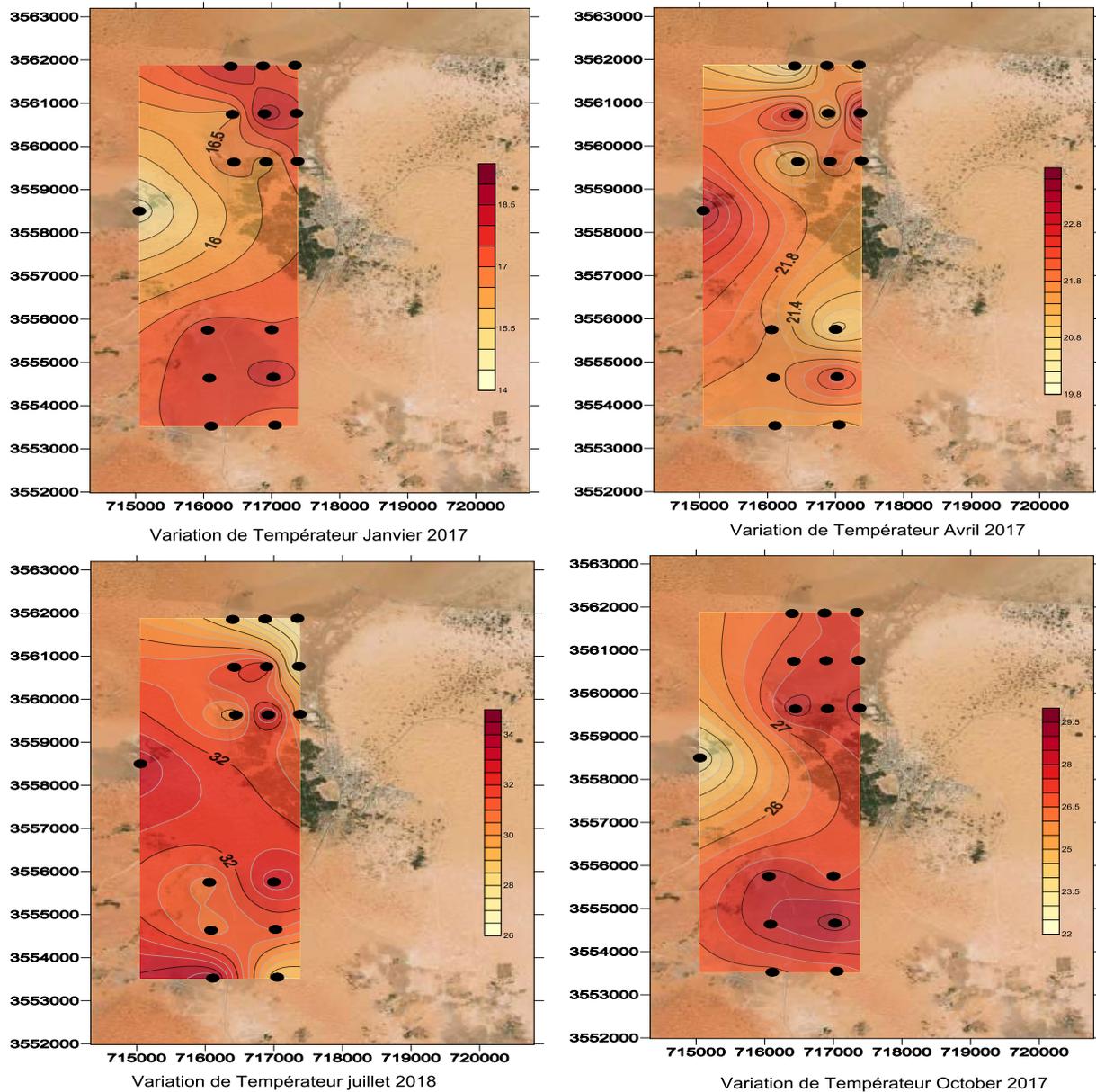


Fig.5. 11 Cartes de variation spatiale de T°C à l'entour de sebkha N'goussa.

V.5.3.2 Variation de potentiel hydrogène (Ph)

Les mesures du pH présentent des variations proches à la neutralité, entre 6,62 et 8,48. Les médianes des différentes campagnes se situent autour de la neutralité 7. Le pH le plus bas est mesuré dans piézomètre NG_18 en saison pluvieux (janvier 2017) et la valeur proche d'être basique dans un piézomètre NG_15. La majorité (75 %) des eaux a néanmoins un pH proche de la neutralité compris entre 7,2 et 7,8.

Au cours de période d'observation, le pH a été relativement élevé à marée haute (7,07–8,39) en comparaison avec celui déterminé à marée basse (7,29–8,05). L'allure des courbes de variation temporelle est très proche. A l'échelle spatiale, le pH est relativement stable et alcalin voir **figure.5.12** et **figure.5.13**. Donc les variations du pH sont faibles.

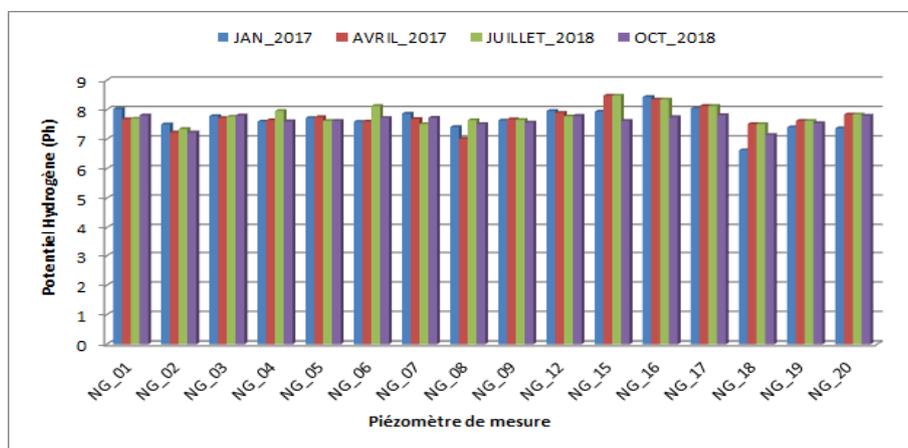


Fig.5. 12 variation de potentiel Hydrogène (Ph).

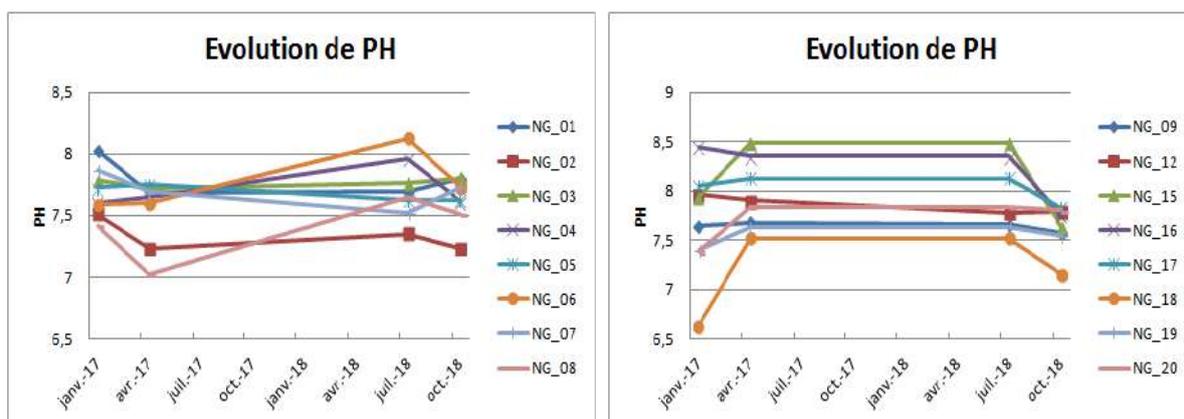


Fig.5. 13 Variation Temporelle de Ph ou niveau des piézomètres.

Les valeurs les plus élevées du pH supérieur à $ph = 8$. Ces valeurs peuvent résulter d'une consommation du CO_2 ou un dégazage qui entraînent une augmentation relative de l'ion CO_3^{2-} par rapport à l'ion HCO_3^- . En effet, la réaction d'hydratation du CO_2 libère de l'acide carbonique qui attaque les roches. L'altération des minéraux conduit à une consommation de CO_2 et induit par conséquent une augmentation du pH [93].

L'acidité de certaines eaux peut trouver son origine par le lessivage des acides organiques provenant de la végétation en décomposition et de la présence d'anhydride carbonique dissous. Les pH les plus acides sont échantillonnées dans la vallée proche au zone de palmeraie et zone cultivée voir **figure.5.14**.

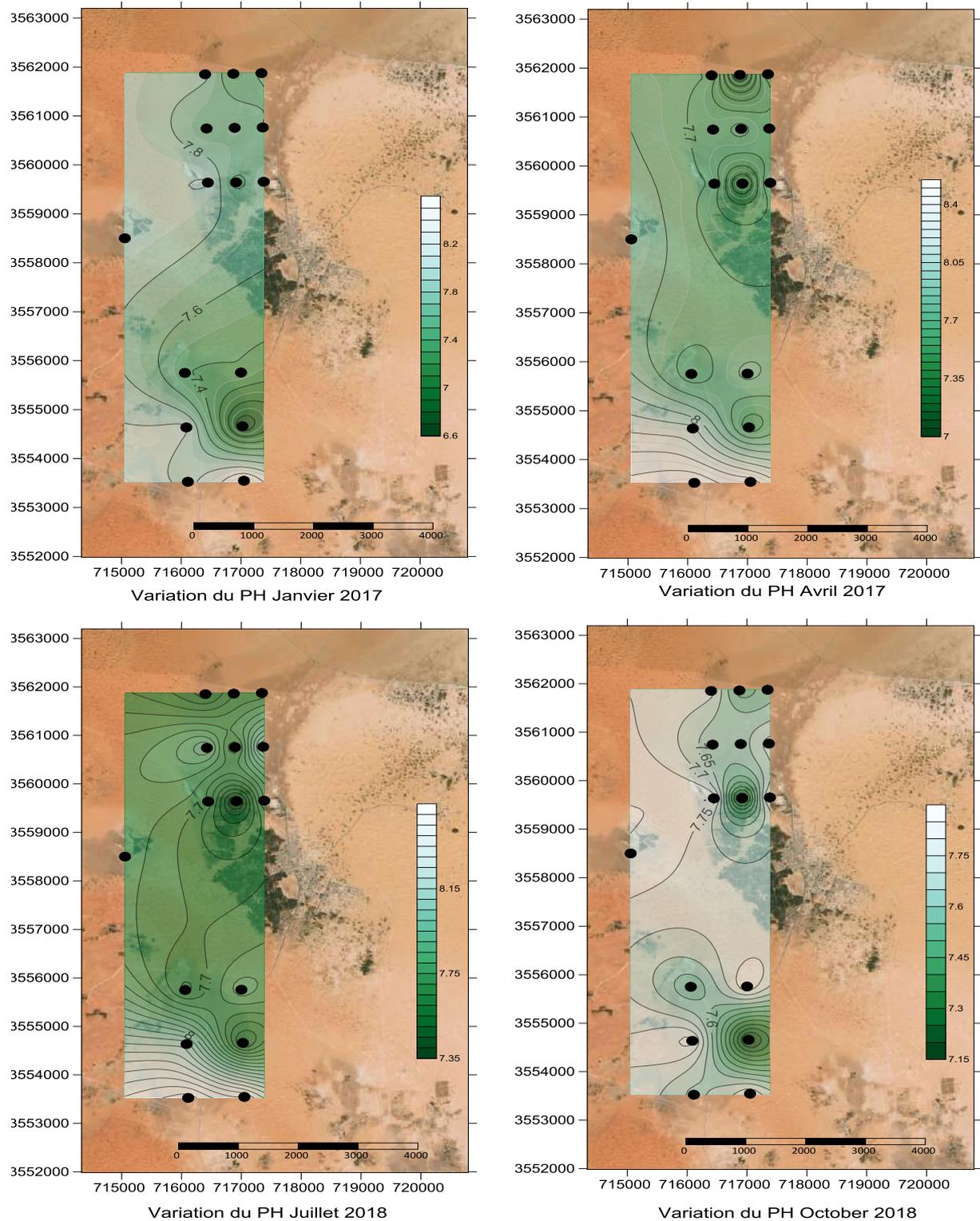


Fig.5. 14 Cartes de variation spatiale de ph à l'entour de sebkha N'goussa.

V.5.3.3 Variation de Conductivité électrique

La conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant électrique. L'unité de mesure communément utilisée est le Siemens (S/cm) exprimé souvent en micro Siemens/cm ($\mu\text{S/cm}$) ou milli Siemens (mS/cm). Donc, La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de sels dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en sels sera importante, plus la conductivité sera élevée.

Au cours de la période 2017-2018, la plus parts des points de mesure a connu des variations de la conductivité à la hausse comme à la baisse. Lors de nos visites après la saison pluvieuse et en saison sèche, nous avons constaté trois types des réactions de la minéralisation.

Les variations spatiales de la conductivité lors des cycles des marées montrent des allures légèrement différentes pour toute la période d'observation. En effet, à marée haute, la conductivité diminue pendant la saison d'hiver (Janvier 2017), et (Avril 2017). Tandis que pendant la période de basse haut, ces valeurs de conductivité augmentent pendant la saison d'été (juillet 2018) et au (Octobre 2018). Cette augmentation à cause de l'influence d'élévation de la température augmente la mobilité des ions dans l'eau, la valeur mesurée est alors plus élevée. Le résultat de la mesure doit toujours comporter l'indication de la température à laquelle elle a été faite voir **figure.5.15**, **figure.5.16** et **figure.5.17** Donc les variations de conductivité sont comme suite :

- Diminution de la conductivité, cette évolution a été observée généralement partout dans les piézomètres installés dans notre zone d'étude entre janvier 2017 et octobre 2018.
- Augmentation de la minéralisation, l'augmentation de la minéralisation est généralement observée entre la campagne de juillet 2018 et d'octobre 2018. Cette augmentation est bien marquée dans le piézomètre suivant : NG_01, NG_03, NG_06 et NG_20. Cette réaction positive est due au retour de la minéralisation à la valeur habituelle (avant la pluie).
- Des valeurs de conductivité sont stabilisées. Trois points sont bien marqués dans piézomètres NG_04, NG_05 et NG_18. Ces trois points n'ont pas connu des fluctuations sensibles de la minéralisation entre deux saisons.

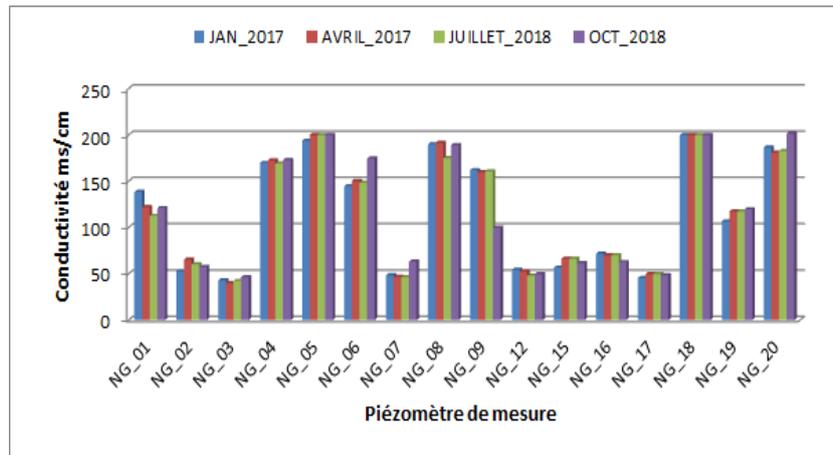


Fig.5. 15 Variation de conductivité.

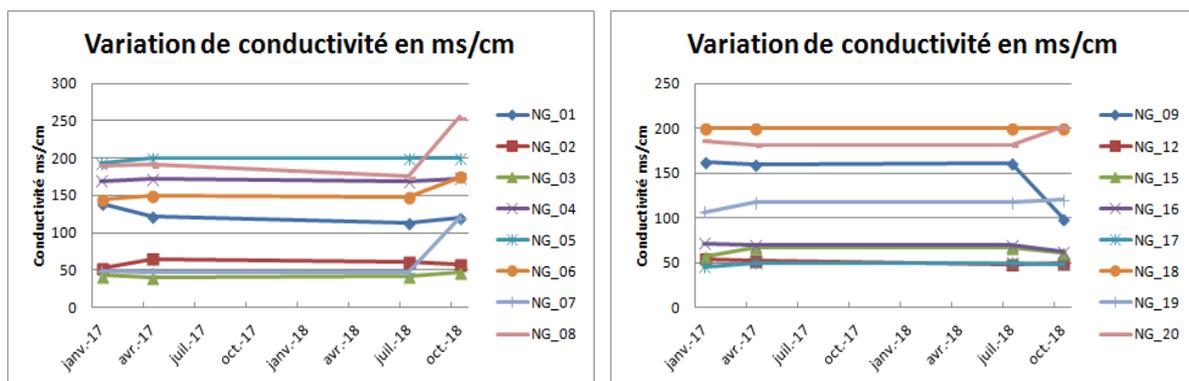
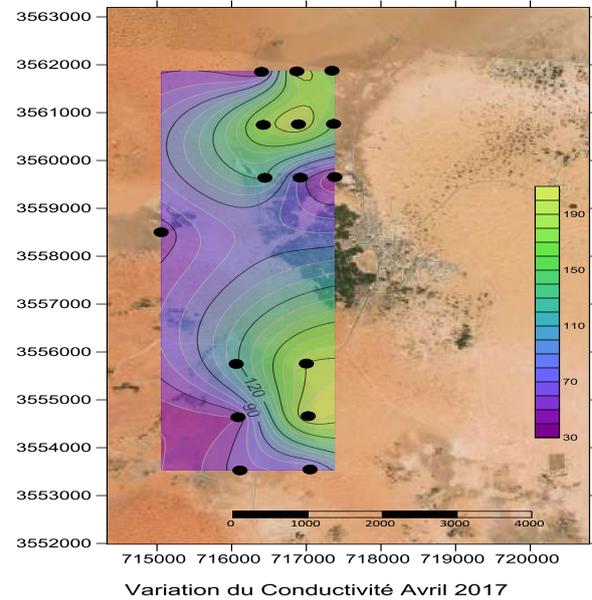
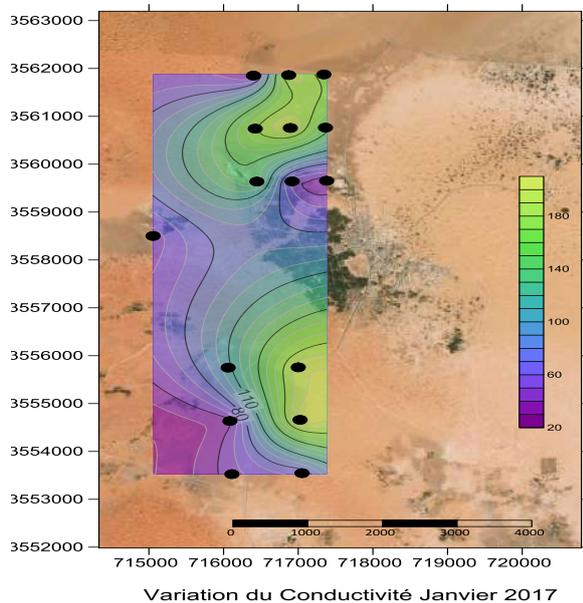


Fig.5. 16 Variation Temporelle de la conductivité ou niveau des piézomètres.



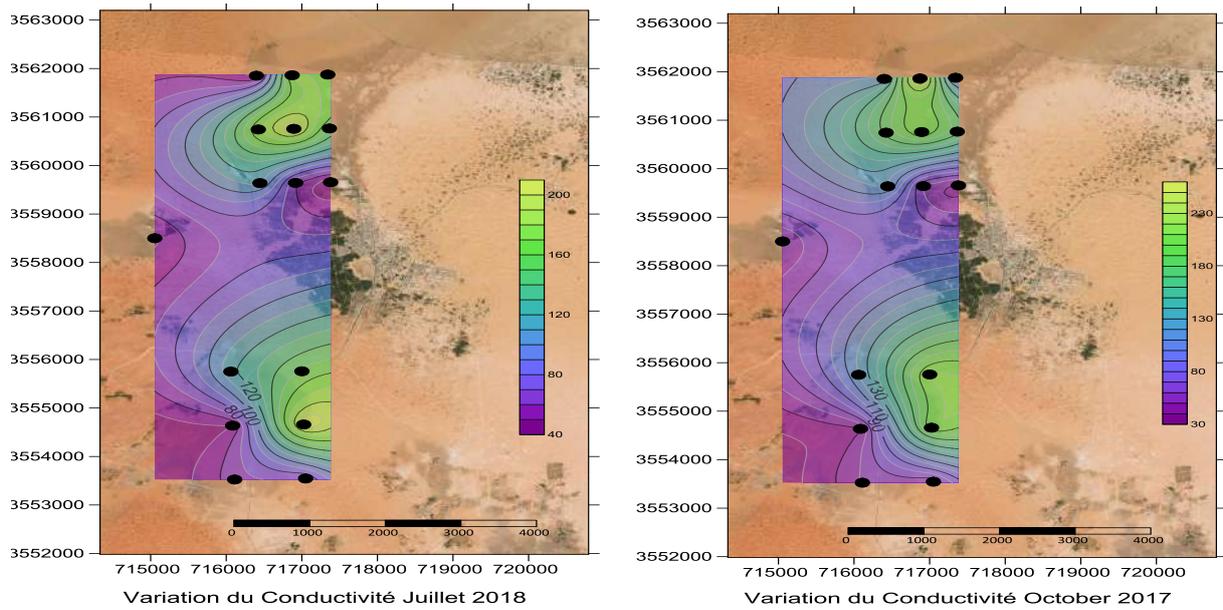


Fig.5. 17 Cartes de variation spatiale de conductivité à l'entour de sebkha N'goussa.

V.5.3.4 Variation de densité

La densité d'eau ou bien la masse volumique est une grandeur physique qui caractérise la masse d'un matériau par unité de volume. Elle est déterminée par le rapport $\rho = m/V$ où m est la masse de la substance homogène occupant un volume V .

Ce paramètre de l'eau peuvent être considérés variante à l'échelle du temps, mais d'autres sont varient très rapidement. Cette mesure permet de définir les caractéristiques fondamentales de l'eau. Ce paramètre a été mesuré au laboratoire. Les résultats de ces mesures sont cartographie selon station de prélèvements voir **figure.5.18** et **figure.5.19**.

Une évolution de la densité des eaux de sebkha depuis l'amont vers l'aval est observée. Nous remarquons que les piézomètres situés zone Nord à proximité de zone d'irrigation NG_01, NG_02 et NG_03 (palmeraies) renferment des eaux moins saline en plus dans la zone sud qui sont les piézomètres NG_15, NG_16, NG_17 et NG_20 moins saline, le reste des piézomètres au centre de la nappe (amont piézométrique) étant de salinité fortement salines. Cette région présente la zone de la nappe où s'effectue d'une dilution par le drainage des eaux d'irrigation. La carte de salinité montre alors une similitude assez étroite avec celle de la piézométrie.

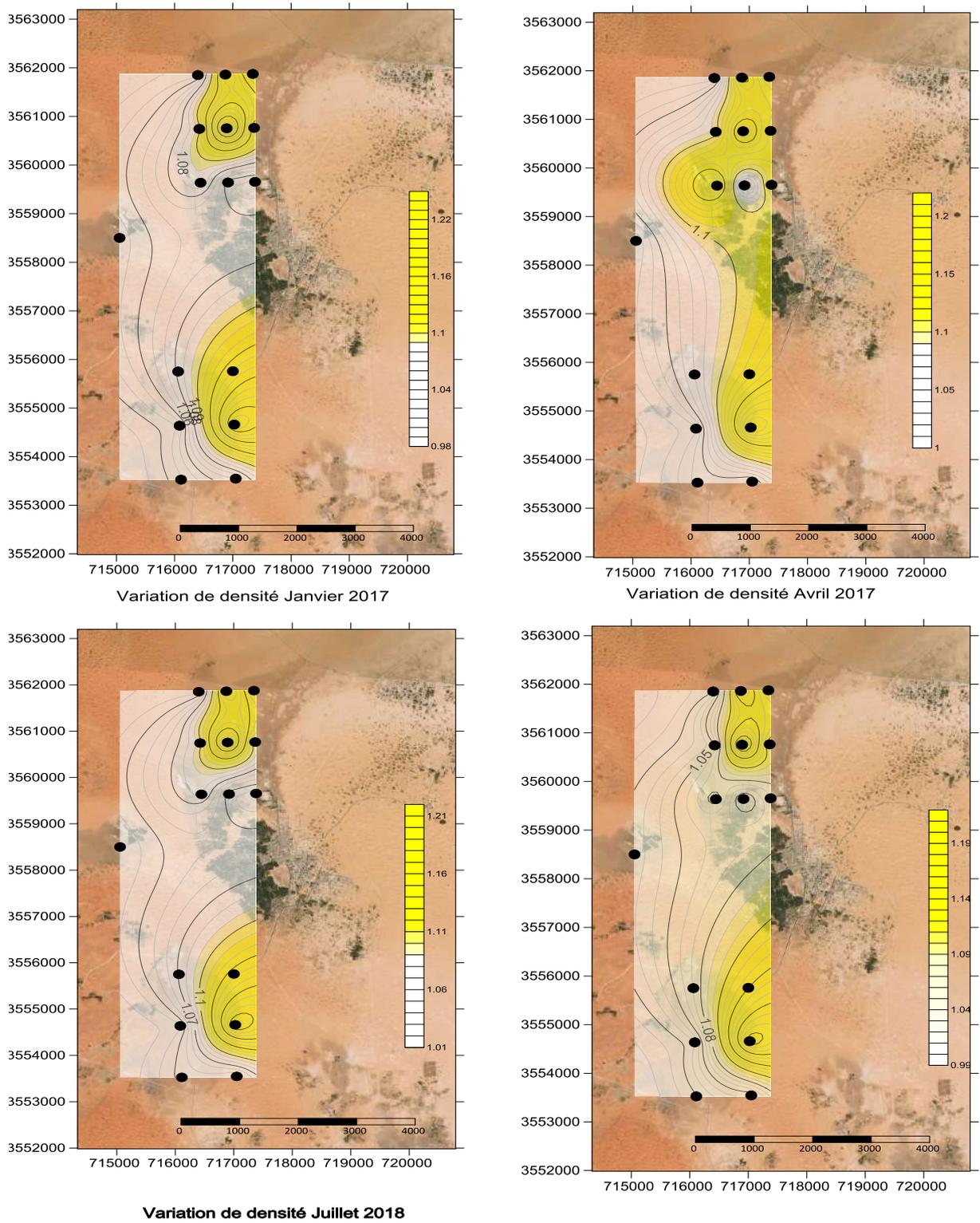


Fig.5. 18 Cartes de variation spatiale de densité à l'entour de sebkha N'goussa

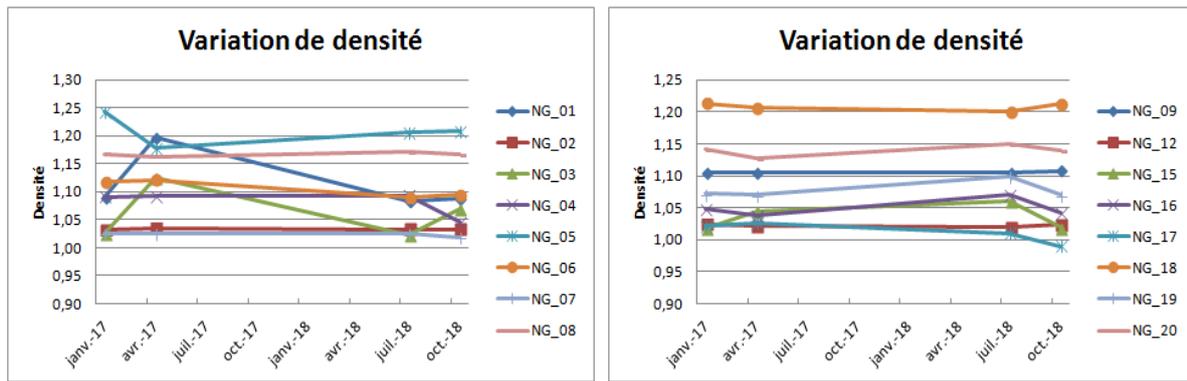


Fig.5. 19 Variation Temporelle de la densité ou niveau des piézomètres.

V.5.3.5 Variation du niveau piézométrique

Le paysage hydrologique est constitué par une multitude de petits bassins versants endoréiques, de l'ordre du km^2 . Pendant la saison des pluies, le ruissellement consécutif aux intenses précipitations se concentre dans les bas-fonds ou se trouve généralement une mare temporaire, toujours en position perchée par rapport à la nappe. La vidange rapide des mares par infiltration représente l'essentiel de la recharge de la nappe phréatique [94].

Une nappe phréatique de N'goussa considéré comme une nappe uniforme produit un système d'écoulement unique. La ligne de partage des eaux se trouve sur le mur de la grande vallée; L'ensemble du plateau dans l'ouest est une zone de recharge. La topographie vallonnée produit de nombreux sous-systèmes d'écoulement local en plus d'un écoulement régional. L'eau qui s'infiltré en zone de recharge peut être à la fois déchargée vers les vallées locales ou rejoindre l'écoulement régional au fond de la vallée principale [95]. Dans la plupart des réseaux d'écoulement et dans la plupart des terrains, on peut différencier les systèmes locaux d'écoulement, les systèmes intermédiaires d'écoulement et les systèmes régionaux d'écoulement des eaux souterraines, tel qu'illustré à la **figure.5.20**. Cette mouvement est proportionnel ou topographie de la région.

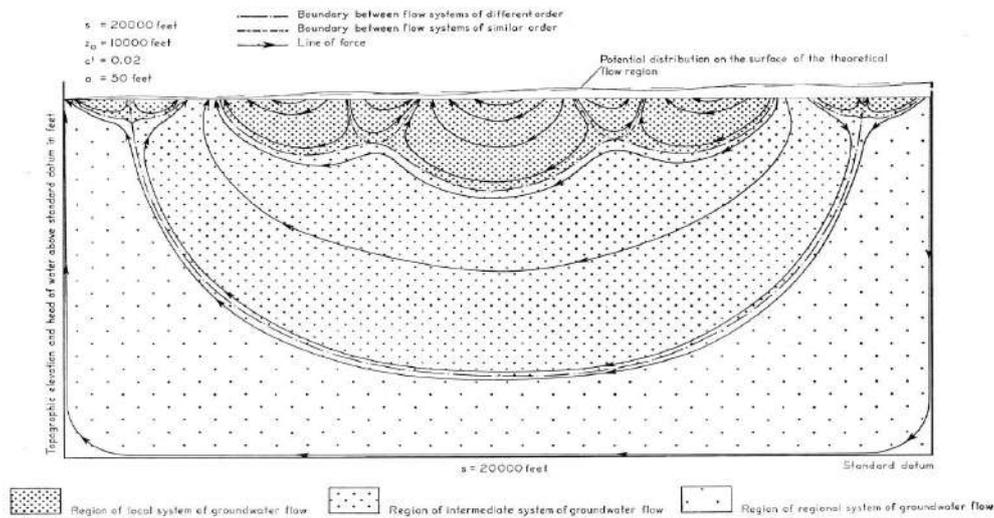


Fig.5. 20 Différent systèmes de circulation pour la nappe phréatique [95].

Le niveau piézométrique est situé à une profondeur de l'ordre de -0,4 à -1,5 m. le suivi périodique pendant deux cycle de suivi montre qu'il y a pas de fluctuation très importantes dans cuvette de N'goussa (fluctuation de 4 à 8 cm) entre le matin et le fin de journée. Par contre, les variation saisonnières sont très importantes et sont directement liées à la balance de précipitation et le taux de l'évaporation. L'écoulement à l'échelle du bassin se fait du Sud-Nord et de Sud-Ouest vers Nord-Est. Il s'effectue vers la dépression les plus basses du cette cuvette (vers sebkha Sefioune exutoire naturelle)

La carte piézométrique de la nappe du N'goussa met en évidence des anomalies piézométriques interprétées comme des « nappes superficielle saline ». Les informations de l'hydrogéologie de l'environnement conduisent à remettre en question profondeurs des niveaux statiques observées dans ces dépressions piézométriques. Les données hydrogéologiques démontrent que dans la zone déprimée de la surface piézométrique, nappe superficielle est de type bicouche.

A partir des profondeurs de la nappe libre mesurées et recensées, et des données topographiques, l'étude par BG ont servi pour le traçage de la carte piézométrique (**figure.5.21**). Ils sont relativement bien répartis sur toute la zone étudiée. La carte a été tracée initialement par krigeage (Surfer©) et retravaillée pour corriger les interpolations abusives (effet de bordure). Des variations saisonnières des niveaux piézométriques ont été rapportées dans sebkha de N'goussa, qui présente une analyse qualitative du fonctionnement hydrologique de cette cuvettes. Il s'agit d'un endroit où l'eau affleurant et l'autre où l'eau est à plus de 1,5m de profondeur. Le suivi des niveaux piézométriques montre la différenciation de 2 phases distinctes de l'évolution piézométrique à l'échelle annuelle au sein de la cuvette de N'goussa.

- Une première phase de remontée importante qui s'amorce dès le début de la saison des pluies et s'achève vers le mois de septembre octobre jusque Novembre.
- une deuxième phase de mai à juin jusque à mois d'Aout où le niveau baisse en concordance avec la faible hygrométrie et la forte évapotranspiration de saison d'été.

L'amplitude des fluctuations piézométriques varie d'une année à l'autre en fonction de taux de pluviométries des cuvettes.

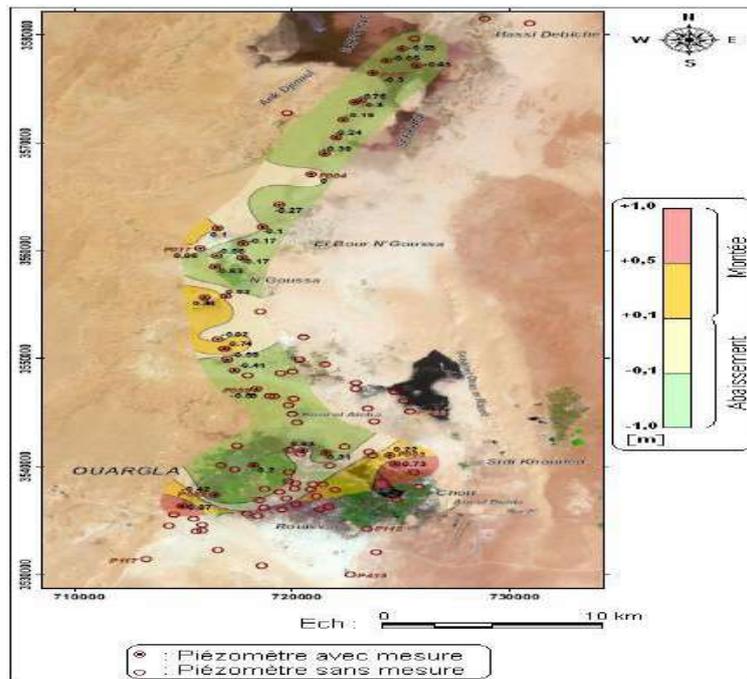


Fig.5. 21 Carte de variation piézométrique de la nappe phréatique dans la cuvette d'Ouargla, période 1992-2002[96].

V.5.4 Répartition et variation des éléments majeur

V.5.4.1 Variation temporelle des cations et des anions

Par ailleurs, la distribution des teneurs en élément majeur (Cl^- , Na^+ , k^+ , Mg^+ ). Entre 2017 et 2018. Ces mesures ont permis de dresser des courbes de répartition des éléments chimique de la nappe dans sebkha de N'goussa en fonction de temps (compagne d'échantillonnage) voir **figure.5.22** et **figure.5.23**. Le sodium est le seul élément dont la teneur reste à peu près constante: tous les autres cations voient leur teneur augmenter avec la variation de temps, à l'exception du calcium qui diminue dans les eaux des sebkhas. L'origine du sodium, apporté par le vent et l'eau de pluie, est donc confirmée. Les teneurs en magnésium augmentent très régulièrement dans la zone sud sebkha de N'goussa en comparaison avec la zone Nord. Il est de l'ordre de 15000 à 40000 mg/l dans zone sud et la zone Nord, ce qui montre que la

libération de cet élément se produit de manière analogue dans tout le bassin, quelle que soit la morphologie, donc l'intensité du drainage.

Les teneurs en chlorure augmentent aussi au centre de la cuvette, mais cet accroissement est nettement très élevé de l'ordre de 160000 mg/l comme valeur maximal qui est marquée dans point NG_18 le plus concentré. Celui du sodium et magnésium et semble dépendre de la morphologie. Ce point du comportement relatif du magnésium est précisé plus loin.

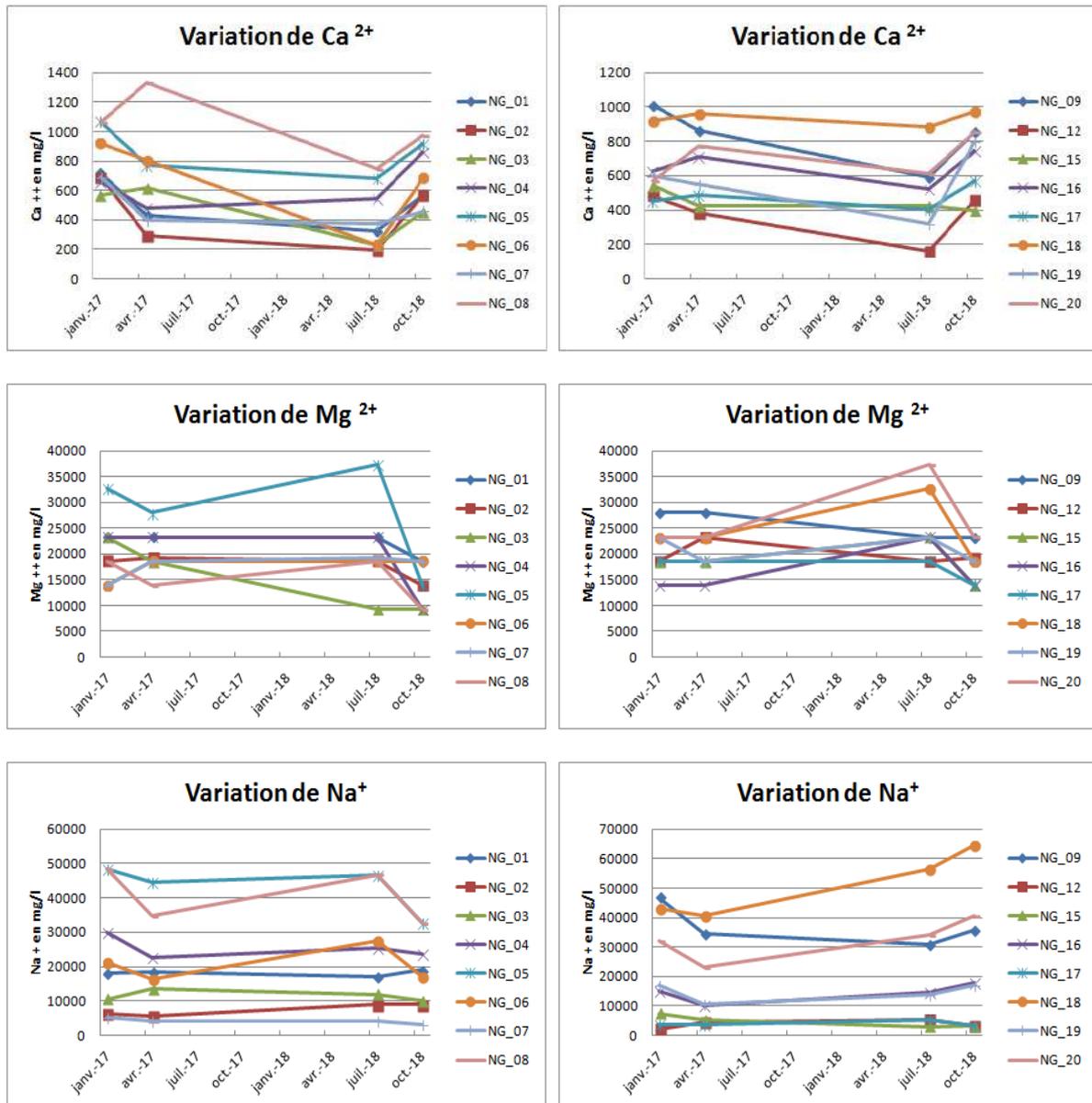


Fig.5. 22 Variations des éléments majeurs dans sebkha de N'goussa.

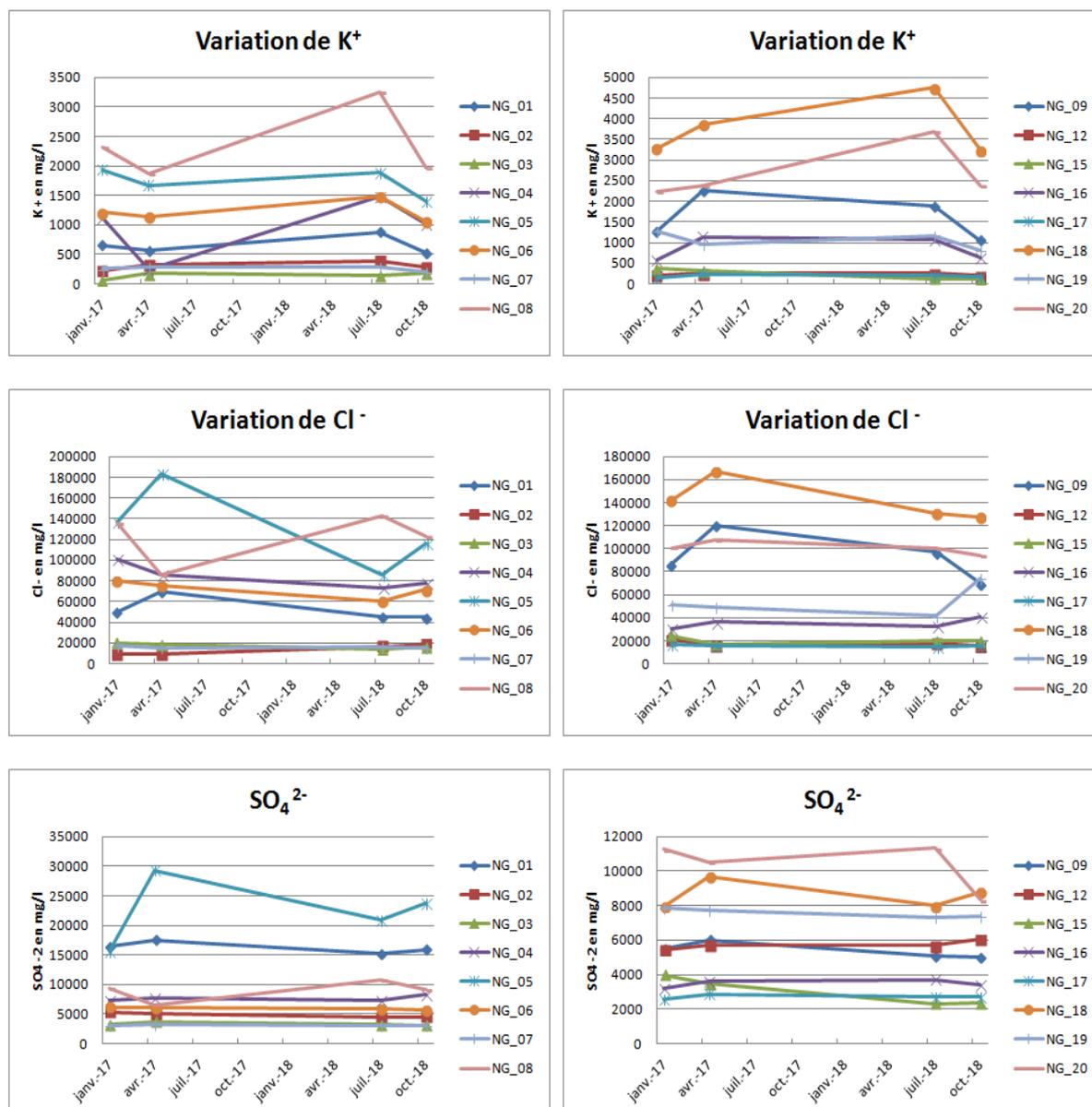


Fig.5. 23 Variations des éléments majeurs dans sebkha de N'goussa.

Dans ce qui suit, nous allons nous intéresser à suivre dans le temps tous les éléments chimiques analysés en traçant des cartes d'iso-valeurs des concentrations en différents ions majeurs et de certains rapports caractéristiques (Mg/Ca et SO₄/Cl) afin d'apporter de précieux renseignements pour l'étude du chimisme de la nappe.

V.5.4.2 Interprétation des résultats d'analyses et des cartes d'isoteneurs des éléments chimiques et des rapports caractéristiques

L'objectif de cartographie et répartition des éléments chimique dans notre sebkha c'est de voire l'origine possible de salinisation peut-être représentée cartographiquement par le resserrement des courbes d'isoteneurs d'un élément particulier (Cl⁻, Na⁺, Mg²⁺ ...) dans la zone de sa concentration la plus élevée. Ces mesures ont permis de dresser des carte de

répartition des éléments chimiques de la nappe dans sebkha de N'goussa. Cette carte met en évidence des zones des dépressions fermées. De nombreux points d'eau ont été fait l'objet de mesures périodiques de niveau statique par plusieurs sorties d'étude dans le cadre des travaux de cartographie des nappes de notre région d'étude.

A travers ces cartes hydrochimiques nous pourrions déterminer la répartition spatiale des zones à concentrations élevées de certains éléments chimiques et celles à faibles concentrations, et essayer d'interpréter les causes possibles de leurs dispersions[97]. Cette cartographie est faite à l'aide d'un logiciel de cartographie numérique sur Arc 8.

V.5.4.3 Faciès chimiques des eaux

À l'aide du logiciel « Diagramme », nous avons déterminé les faciès chimiques des eaux de la nappe phréatique de Sebkha de N'goussa à partir des résultats des analyses des cations et anions majeurs.

A -Diagramme de Piper

Dans ce diagramme, qui est composé de deux triangles avec un losange. Les résultats des analyses sont traduits en pourcents de milliéquivalents puis sont portés sur ce diagramme, l'un est réservé aux anions et l'autre aux cations.

Après vérification des analyses, on les porte sur un losange pour la détermination du faciès chimique. L'interprétation des résultats après plot dans ce diagramme losangique permet de déduire que les faciès chimiques des eaux de sub-surface de la nappe de N'goussa sont de deux types voire **figure.5.24** :

- Chloruré et sulfaté calcique et magnésium pour les eaux les moins minéralisées.
- Chloruré sodique Potassique pour les eaux les plus minéralisées.

Dans le diagramme des anions, les points forment un nuage relativement proche de pôle chlore, à l'exception de quelques points qui ont tendance à s'en éloigner vers le pôle mixte.

Dans le diagramme des cations, la plupart des points se situent dans la ligne sodium potassium avec une tendance remarquable vers le pôle magnésium.

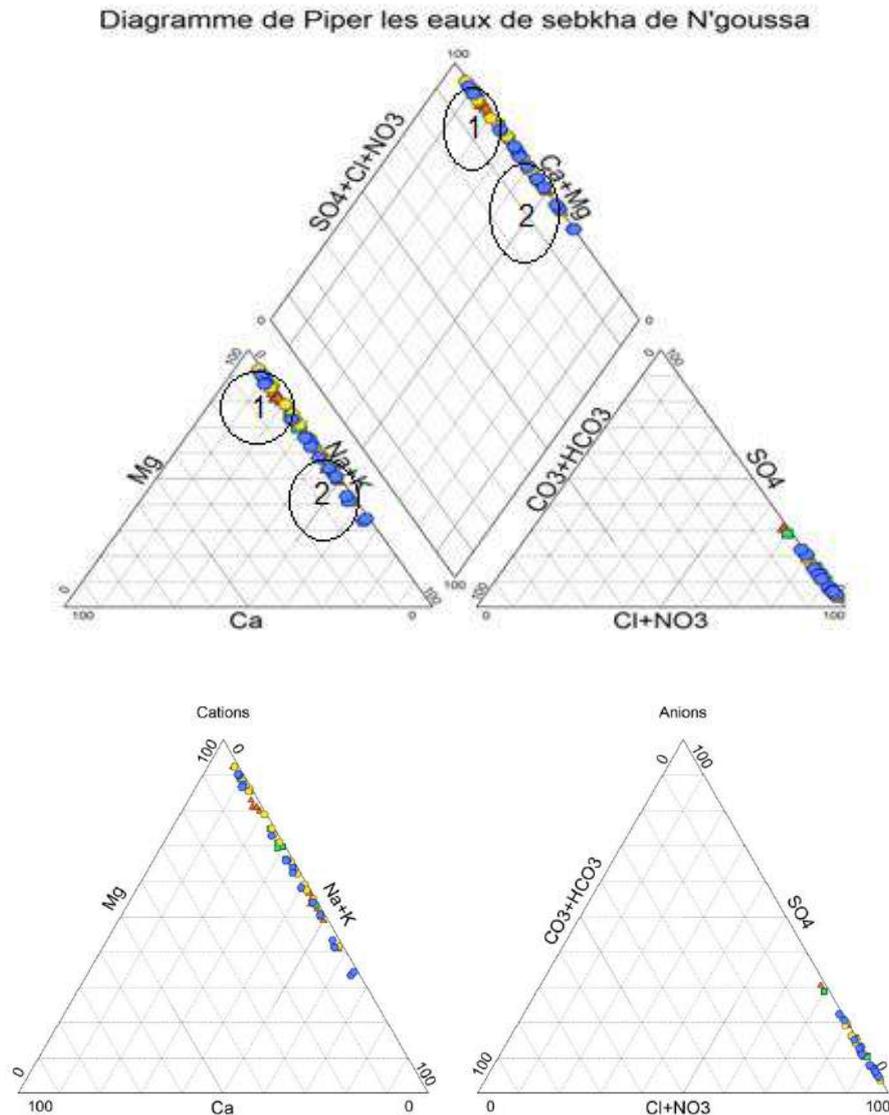


Fig.5. 24 Diagramme de piper représente les facies chimique des eaux d'sebkha de N'goussa.

V.6 Evaporation isotherme des échantillons dans sebkha de N'goussa

V.6.1 Evaporation

L'évaporation n'est souvent pas définie dans les textes chimiques et physiques purs. En effet, l'évaporation est une interprétation non technique de plus processus physiques fondamentaux. L'évaporation ou la condensation se produit quand un liquide n'est pas dans équilibre avec sa phase vapeur ou gazeuse. Par conséquent, l'évaporation peut être définie comme l'effet physique procédé dans lequel un liquide est transformé en gaz par transfert moléculaire [98]. La condensation est le processus inverse.

Quelques paramètres affectent le taux de l'évaporation, ces paramètres sont soit physiques ou bien chimiques. L'absence de circulation d'air, une zone de captage pluviométrique

supérieure à la zone d'évaporation et une réduction de l'énergie solaire incidente à la surface de l'eau réduira l'évaporation effective d'une fosse. L'évaporation effective sera également réduite par les facteurs suivants, que le produit soit ou non l'évaporation a lieu dans une fosse; pression de vapeur réduite en raison de la salinité et augmentation de la concentration locale humidité.

Il a été estimé que l'évaporation effective d'une masse d'eau saline à la surface serait en moyenne 1400 mm par an. Si la saumure a été pulvérisée sur une fosse pleine, l'évaporation effective serait d'environ 1800 mm par an (128%). Si la saumure a été pulvérisée sur une fosse vide l'évaporation effective serait d'environ 900 mm par an (61%). Ce chiffre est conservateur, car la vaporisation capterait plus d'énergie des roches chauffées sur le mur de la fosse. L'évaporation effective à partir d'une fosse presque vide serait d'environ 600 mm par an (43%).

Tab.5. 2 Récapitulatif des ressources de sel

Superficie de sebkha de N'goussa.....	37 Km 2
Epaisseur moyenne des terrains peut exploitables.....	10 m (investigation)
Volume des terrains exploitables.....	370.000 m3
Volume de saumure contenue	Investigation
Volume de saumure drainable.....	Investigation

V.6.2 Variation de pourcentage des éléments pendant l'évaporation isotherme

Evaporation isotherme est une contribution aux études de vaporisation sur des échantillons eaux salé traitant de l'extraction de séries de sel hexa-hydraté de chlorure de sodium avec chlorure de magnésium de la saumure naturelle Sebkha de N' goussa. Pour effectuer cela tâche, un processus en quatre étapes basé sur l'évaporation isothermique et précipitation chimique a été réalisé.

Les essais d'évaporation isotherme en salins expérimentaux dans deux points piézométriques de la nappe phréatique (NG_09 et NG_18), montrèrent que, compte tenu de la nécessité de suivi de l'évolution de production des sels pendant l'évaporation isotherme et valorisation des ces sels, le rendement optimum des salins était obtenu pour une lame liquide de cinquante centimètres de profondeur, l'évaporation journalière était pour une période de 30 jour pour une saumure de densité 1,10 (NG_09) et de saumure de densité 1,21 (NG_18).

L'étude des conditions même de la cristallisation et des sels que l'on pourrait obtenir en salin, firent l'objet de cet essai, en laboratoire de géologie de Sahara dans des conditions fixe tel que température au 1^{er} temps. Les résultats obtenus après 30 jours de suivit d'évaporation isotherme. Les conditions d'évaporation sont comme suite : Ou cours de l'évaporation isotherme, le constituant qui disparaît, est l'eau, qui part sous forme de vapeur à pression et température constantes 35 °C.

L'opération d'évaporation isotherme ce faite sur place (laboratoire) furent-ils fort incomplets du fait de l'irrégularité de la saison, et les résultats les plus intéressants furent obtenus en laboratoire, en reproduisant autant que possible les conditions d'une évaporation réelle dans notre champs d'étude (sebkha de N'goussa). Avant d'exposer les résultats obtenus.

Il est bon de développer quelques considérations théoriques sur le problème posée. Les sels que l'on peut obtenir par cristallisation d'une solution contenant, en proportions diverses, les mêmes éléments que la saumure de la Sebkha sont extrêmement complexes [99].

L'évaporation isotherme a été suivie périodiquement étape par étapes. A la fin de chaque étape sont effectuées des mesures de densité, ainsi que des d'échantillons solide et liquide sont prélevés pour la détermination physico-chimiques des éléments chimiques. L'opération est conduite conformément au schéma de la **figure.5.25** et **figure.5.26**. Les points 1, 2,.. n, marquent respectivement la fin des étapes 1, 2,.. n [100].



Fig.5. 25 Motif de l'évaporation isotherme dans NG_09 et NG_18.

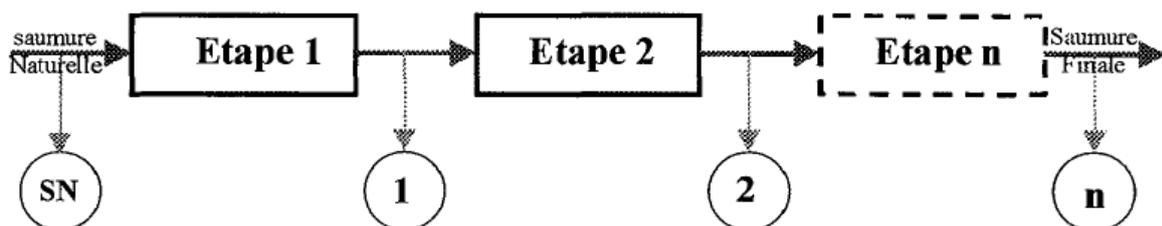
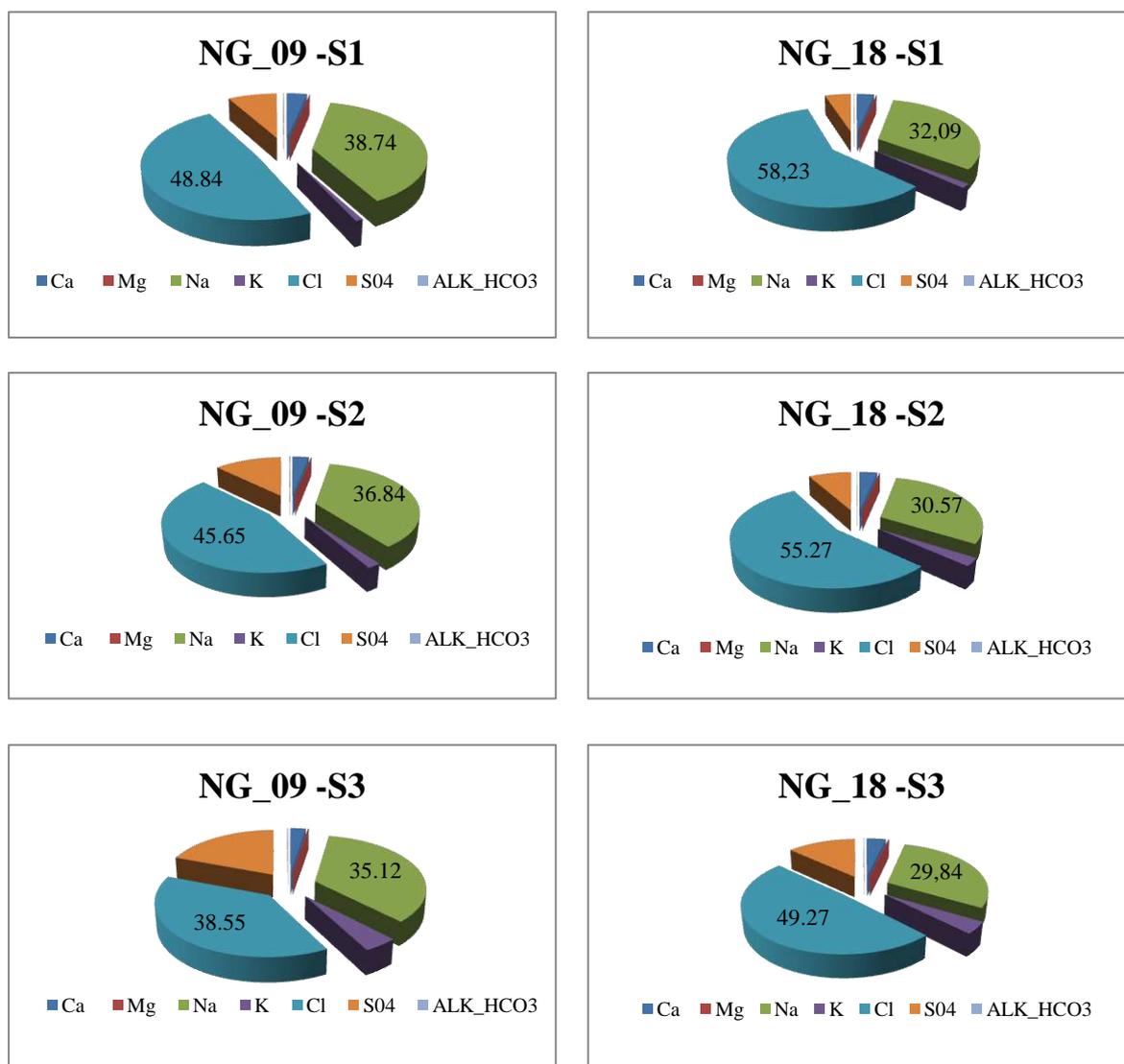


Fig.5. 26 Conduite des essais d'évaporation [100].

Nous avons suivi l'évolution de concentration des éléments majeure en fonction de la variation des densités des saumures sur des échantillons provenant de 2 piézomètres NG_09 et NG_18 dans sebkha de N'goussa, étudiés.

Il apparaît que pendant l'évolution des saumures, on observe une diminution apparente des chlorures et sodiums. Cette diminution est pour les deux échantillons. Les cause de cette diminution est interprété par la cristallisation de l'halite au cours de l'évaporation, jusqu'à ce que le stade finale S3. Au départ de processus la concentration des chlorure et plus que 50% puis diminue progressivement jusque 38 % dans Echantillon NG_09, et atteindre 49% dans l'échantillon NG_18. Pour le sodium la variation presque le même mais le taux de variation et moins. Elle est entre dans NG_09 de 38% pour stade 1 à 38% pour stade 4 stade finale. Tandis que cette diminution est entre 32 % S1 à 30 % au stade 4. On a porté sur les **figures 5.27** et **figures 5.28** la représentation de l'évolution de ces concentrations.



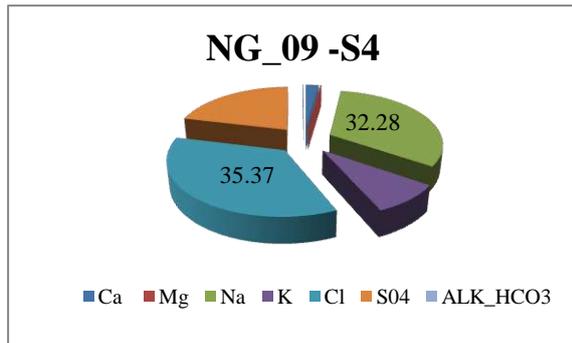


Fig.5. 27 Variation des pourcentages des éléments majeurs au cours de l'évaporation isotherme NG_09

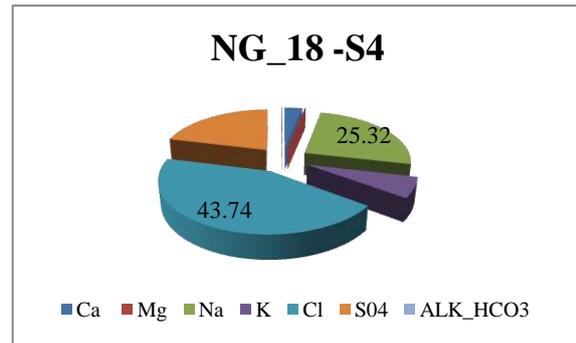


Fig.5. 28 Variation des pourcentages des éléments majeurs au cours de l'évaporation isotherme NG_18

Pour la composition minéralogique des eaux de mère et les eaux salines, Qui sont des solutions concentrées, il a été démontré que la structure de l'eau était complètement détruite. Les effets de l'association ionique et de la concurrence entre les ions chargés de manière opposée pour les molécules d'eau dans leurs molécules d'hydratation sont intensifiés voire **figure.5.29** et **figure.5.30**.

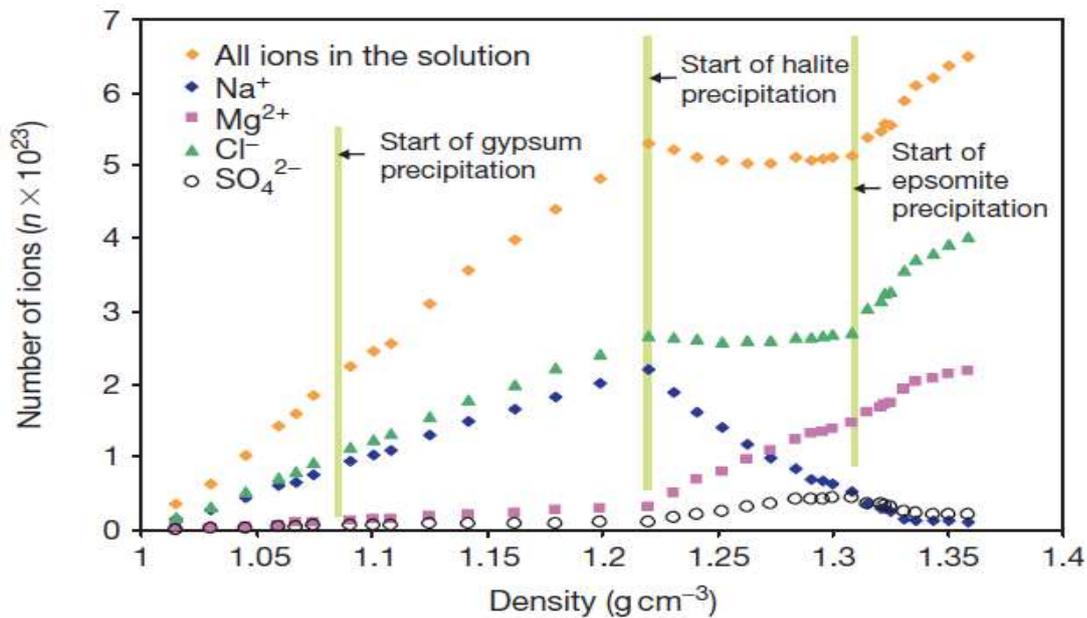


Fig.5. 29 Variation des éléments chimique pendant évaporation de l'eau de mère noire[101].

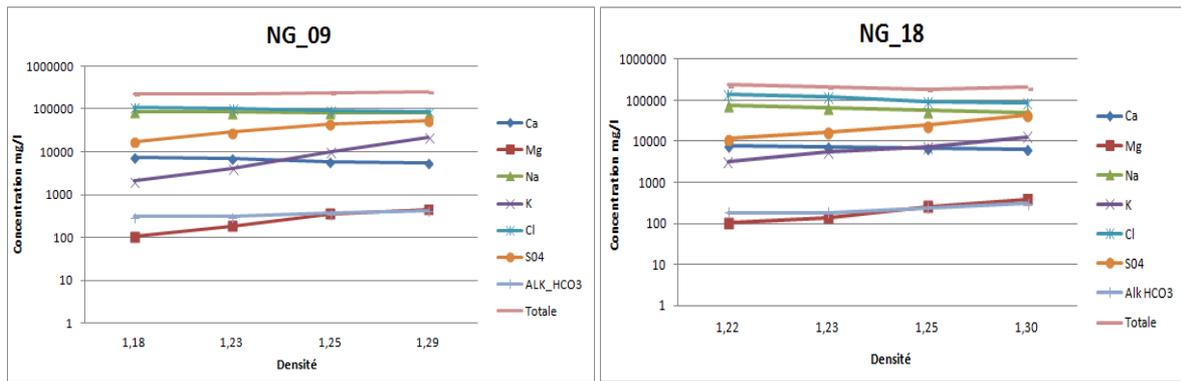


Fig.5. 30 Variation des éléments chimique pendant évaporation isotherme de l'eau de sebkha de N'goussa

V.7 Equilibre entre minéraux et solutions

La thermodynamique, science décrivant et/ou quantifiant les échanges et les transformations entre un système donné et son environnement, permet de prévoir le comportement géochimique complexe des saumures en fonction de leur environnement. Elle constitue un outil précieux pour améliorer l'exploitation de ces substances porteuses d'éléments valorisables ou au contraire polluants [56].

V.7.1 Concentration des eaux par évaporation

Une eau de composition chimique donnée se concentre par évaporation. Si aucune précipitation ou dissolution n'intervient au cours de cet événement, la molalité totale de chacun des éléments en solution augment proportionnellement au facteur de concentration. La force ionique de la solution augmente les coefficients d'activité changent, le PH change et la distribution des espèces aqueuses simples ou complexes change. L'augmentation des concentrations des espèces aqueuses n'est pas proportionnelle

V.7.1.1 Réaction de dissolution

Lorsqu' un minéral se trouve au contact d'une solution sous –saturée par rapport à ce minéral, ($\log Q < \log Kps$) il se dissout jusque' à ce que l'équilibre soit atteint. La composition chimique de la solution change au cours de la dissolution. Mais il faut considérer qu'à l'intérieur de la solution les équilibres entre différentes espèces aqueuses simple ou complexes sont respectés. On considère par exemple la dissolution de la calcite en présence de gaz carbonique, en réserve infinie et à fugacité constante,

V.7.1.2 Réaction de précipitation

La dissolution d'un assemblage minéral ou la concentration d'une solution par évaporation aboutit à une augmentation de la quantité des éléments fournis ou présents dans la solution. A partir du moment où la solution en question devient saturée par rapport à un minéral, la précipitation de ce minéral se produit et les éléments qui le constituent sont extraits de la solution. Un compromis s'établit entre l'augmentation de la concentration des éléments due à la dissolution ou l'évaporation et la diminution de la concentration des éléments impliqués dans la précipitation. La concentration de ces éléments en solution peut cesser d'augmenter, diminuer ou augmenter moins rapidement qu'auparavant, au fur et à mesure que la précipitation s'accroît. On maintient toujours l'équilibre entre la solution et le minéral qui précipite et l'équilibre entre les espèces aqueuses présentes dans la solution. Ainsi, par exemple, une solution qui se concentre par évaporation, en étant en contact avec une atmosphère infinie de gaz carbonique à pression partielle constante, peut parvenir à saturation vis-à-vis de la calcite.

V.8 Diagrammes binaires des éléments chimiques dans sebkha de N'goussa

Les chotts et les sebkhas (lacs hélio-thermiques) apparaissent aux zones à fort angle d'incidence des radiations solaires. Ils sont le produit de l'énergie solaire emprisonnée dans les bas-fonds et cuvette fermée comme celle de la cuvette d'Ouargla avec une hyper-saline lac recouvert d'eaux peu salées. Ces lacs Continental hélio-thermiques naturels (sulfate et chlorure) sont connus dans les régions semi-arides et arides.

Pour étudier l'origine de la salinisation des eaux de complexe terminale et la nappe phréatique de bassin et cuvette de N'goussa, une première approche consiste à présenter les relations entre les principaux éléments majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^-)

V.8.1 Les eaux de complexe terminale

La corrélation entre les deux éléments chimiques Na^+ et Cl^- (**figure 5.31**) montre un premier groupe, dont les points sont situés au-dessous de la droite de pente 1, influencé par la dissolution de la halite, et un deuxième groupe, dont les teneurs en chlorures dépassent 650 g/l, les valeurs des rapports Na^+/Cl^- sont inférieures à 1. Cette tendance suggère une influence par un phénomène de mélange avec les eaux des autres nappes qui pourrait être favorisée par l'existence de niveaux piézométriques inférieurs à celui de la CT. Ce processus de mixage ou de salinisation pourrait être couplé à des réactions d'interaction de base avec les minéraux

argileux par lesquels les ions Ca^{2+} et/ou Mg^{2+} seront libérés dans l'eau contre une fixation des ions Na^+ [102]. Les totalités des points sont situés au dessus de la droite de pente égale à 1 traduisent un déficit en Na^+ par rapport au Cl^- . Ce déficit pourrait être expliqué par l'échange ionique dans le système d'aquifère.

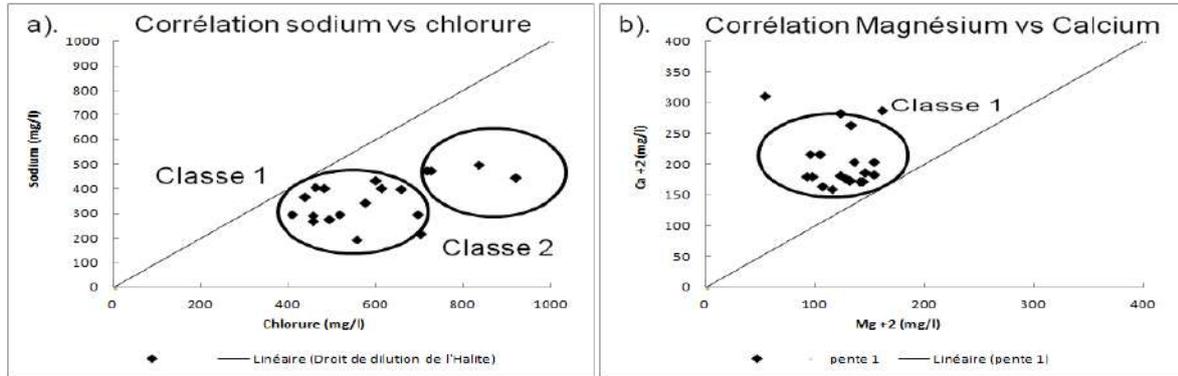


Fig.5. 31 Diagramme binaires avec corrélation et corrélation entre Na et Cl, Mg et Ca des eaux de la nappe CT

La corrélation entre Mg^{2+} et Ca^{2+} (**figure 5.32**) permet de classer les points d'eau en une seule classe. Cette classe, où les points montrent des rapports plus que 1, indiquant que ces deux ions sont soumis à un effet de dissolution de gypse et/ou de dolomie.

De plus, les eaux CT montrent un excès des cations Ca^{2+} en comparaison avec Mg^{2+} , suggérant que le processus du mélange avec l'eau hyper-salée pourrait se dérouler simultanément avec la réaction d'échange cationique selon les études qui ont été faites par Capaccioni et al., 2005; [103].

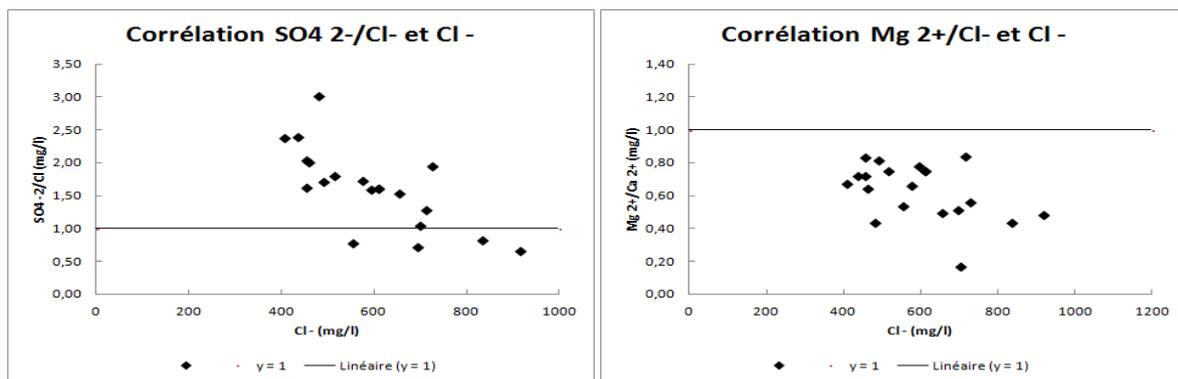


Fig.5. 32 Diagramme binaires avec corrélation et corrélation entre SO_4/Cl^- et Cl^- , Mg/Cl^- et Cl^- des eaux de la nappe CT

V.8.2 les eaux de sebkha

L'exploitation intensive des ressources en eaux souterraines dans la cuvette de bassin N'goussa a largement influencé le fonctionnement hydrodynamique de la nappe phréatique et

les eaux de sebkha. Elle a provoqué une inversion du gradient hydraulique et une invasion des eaux minéralisées en provenance de la nappe de cette Sebkha.

Selon AMRHEIN (1981), les eaux de la Sebkha de l'Afrique de nord ont été rechargées par les eaux de pluie au cours du Quaternaire. La forte salinité pourrait être expliquée par un enrichissement par évaporation au cours d'une période aride de l'Holocène. L'évolution de la Sebkha est complexe, elle dépend des conditions climatiques, hydrologiques et hydrogéologiques [104].

L'analyse des résultats des eaux sebkha montre que Na^+ , Cl^- sont les éléments conservateurs donnant la corrélation la plus élevée **figure.5.33**, c'est-à-dire qu'ils ne sont pas retirés de la saumure par précipitation, adsorption ou réaction. Par contre, Na^+ et Cl^- sont enlevés chaque année à des portions inconnu, mais probablement légèrement par précipitation de halite pendant la saison sèche, qui est ensuite récoltée par habitants locaux.

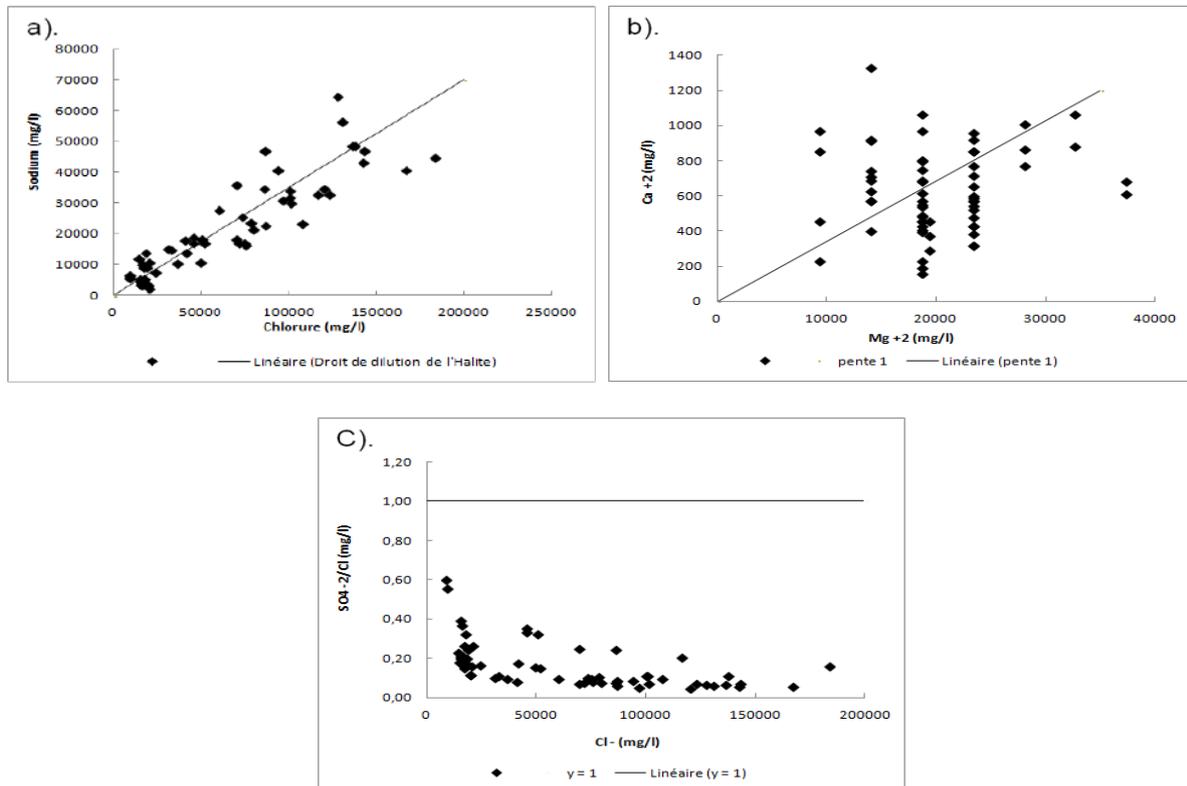


Fig.5. 33 Diagramme binaires et corrélation pour les eux sebkha de N'goussa.

V.8.3 les eaux d'évaporation isotherme

Deux points piézométriques (NG_09 et NG_18 au centre de sebkha) ont été échantillonnés. Ces deux échantillons soumis à une évaporation isotherme au niveau de laboratoire de géologie de sahara. Pendant l'opération d'évaporation isotherme, le constituant qui disparaît, est l'eau (H_2O), qui part sous forme de vapeur à pression et température constantes 35°C .

La représentation graphique et variation pendant cette opération permet la représentation sur le diagramme binaire. Les bilans de matière permettent de quantifier les phases d'un équilibre. La matrice de corrélation a été déterminée pour les résultats obtenus pour chaque stade de l'évaporation isotherme et pour certaines combinaisons de cations et anions. Les corrélations significatives ou mieux sont présentées dans **figure.5.34**

L'analyse et la comparaison des courbes obtenues ont été faites en se basant sur l'examen du bilan ionique avant et après imprégnation, et en utilisant des paramètres ioniques tels que les rapports suivant Na/Cl ; Ca/Mg , $(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)/\text{Cl}^-$, $(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})/\text{Cl}^-$.

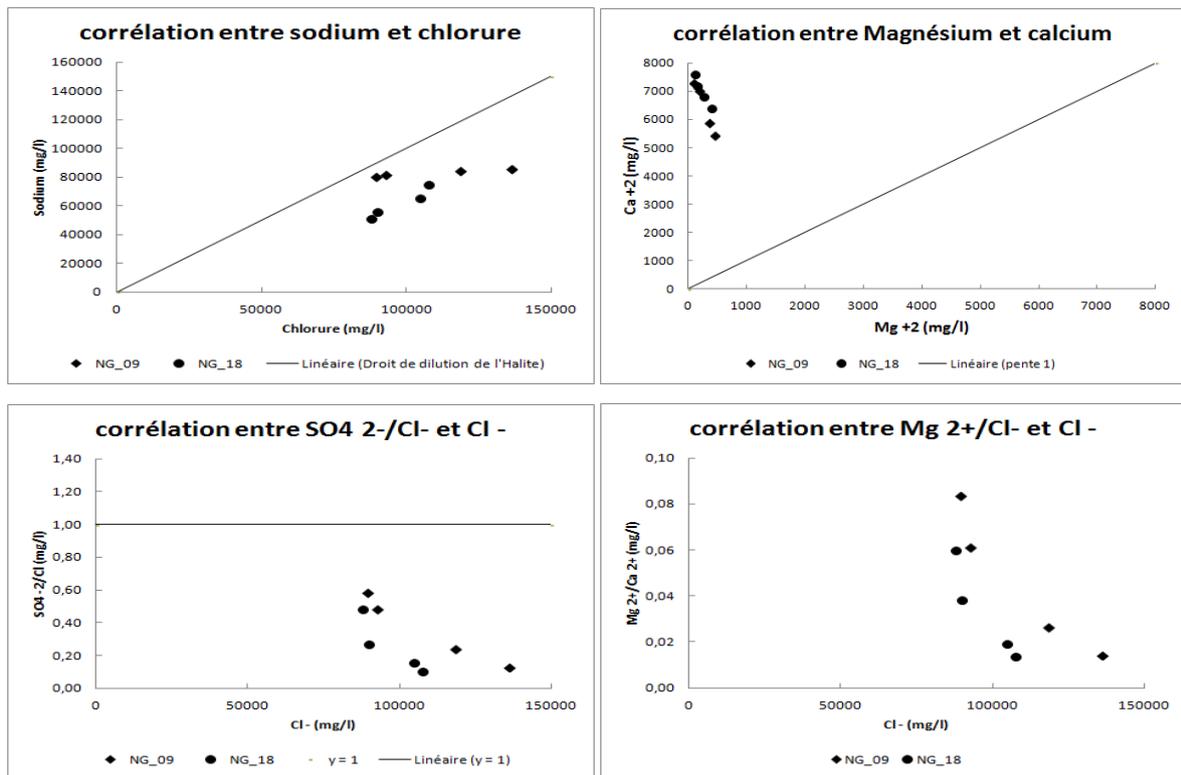


Fig.5. 34 Diagramme binaires et corrélation pour les eux sebkha de N'goussa piézomètres NG_09 et NG_18 après évaporation isotherme.

V.9 Diagrammes binaires des éléments chimiques dans chott Baghdad

V.9.1 Le diagramme binaire sodium-chlore (Na-Cl)

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.

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

La **figure 5.35** représente la variation temporelle de chlore pendant le cycle géochimique 2011, de cette illustration en peut constat que :

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

Au débit de cycle géochimique, les concentrations de chlorure sont minimales de l'ordre de 176317,04 mg/l. cette situation est de cette ordre jusque mois de mars ou en peut remarquer qui' il y a une important augmentation des concentrations des chlorures. Au mois de juin, Ils atteignent une valeur maximum 229481,52 mg/l. A partir de mois août, une régression des concentrations des chlorures sont remarqué jusque la fin de cycle. Cette diminution est contrôlé par la l'abaissement des températures durant la période d'automne.

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 évaporitique comme l'halite mêmes 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 évaporitique 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. Donc, les concentrations les plus élevées sont enregistré 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 inférieur 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.

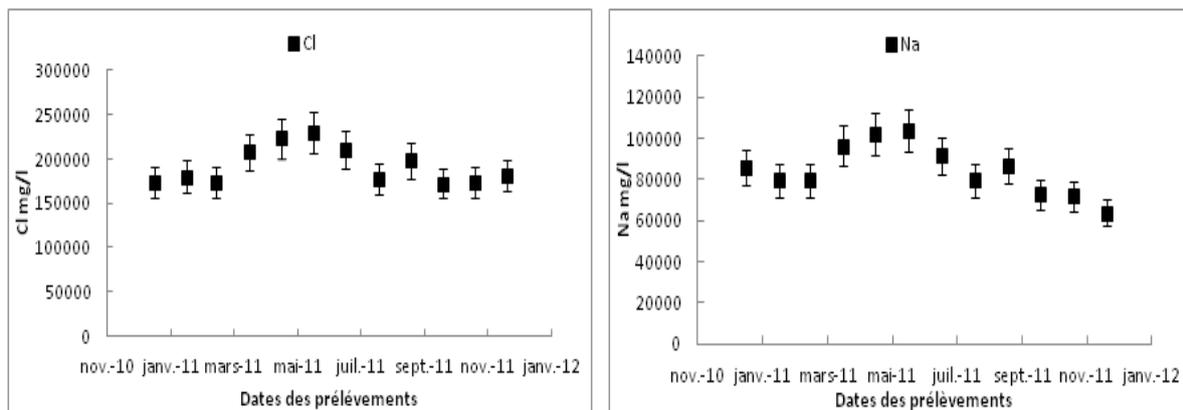


Fig.5. 35 Variations de la concentration du chlorure et de sodium et en fonction du temps, de janvier au décembre 2011 [65].

Sodium et chlorures sont les paramètres dissous les plus conservatifs. La relation lie les deux éléments c'est 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. 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.

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 **figure.5.36**. Cette corrélation est traduite généralement par la formation de l'halite au cours de cycle géochimique jusqu'à des phases avancées.

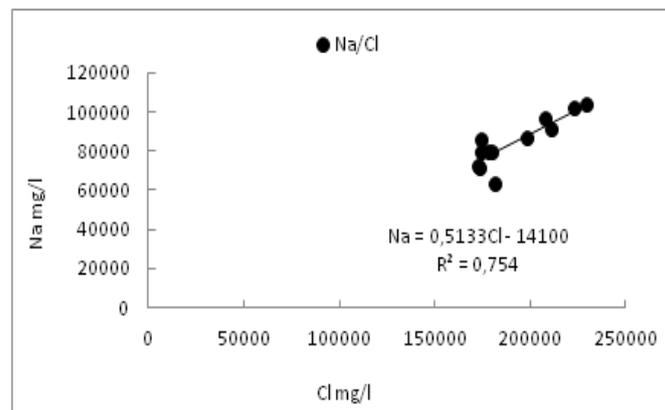


Fig.5. 36 Concentration des sodiums dissous en fonction des chlorures (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions[65].

V.9.2 Le diagramme binaire (Ca-Cl) et (Mg-Cl)

La **figure.5.37** 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-ré-

dissolution 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 $R^2 = 0,29$.

Les concentrations en Mg⁺⁺ dissous évoluent conjointement avec celles des chlorures, du moins aux périodes à taux de dilution importants 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. 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 dus à la néoformation des argiles riches en magnésium (exemple : glauconie, smectite et montmorillonites). La relation entre Mg²⁺ et Cl⁻ montre une corrélation légèrement positive ou $Mg = 0,0097 Cl + 18657$ et $R^2 = 0,04$. Cette relation montre un enrichissement des échantillons d'eau analysés par rapport à la droite de mélange. Cet enrichissement peut être dû à la dissolution de la dolomite

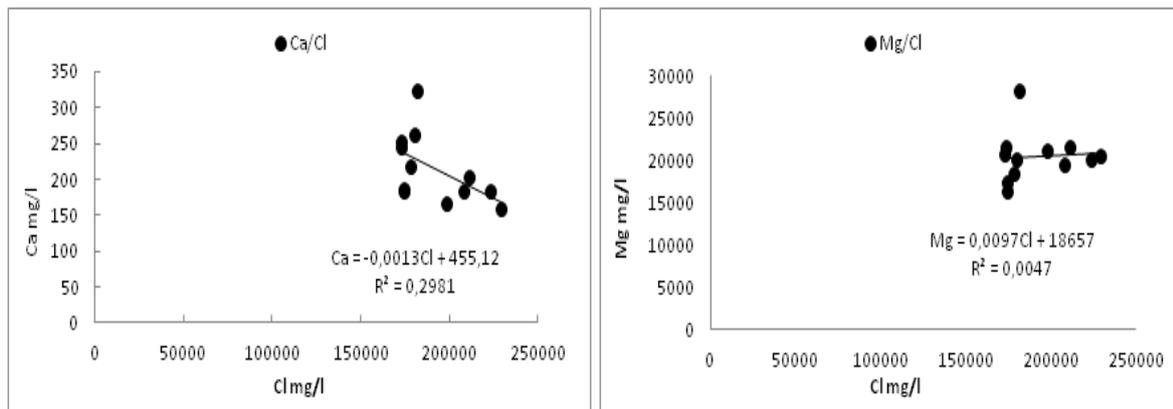


Fig.5. 37 Concentration relation entre Ca/Cl et Mg/Cl (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions [65].

V.9.3 Les diagrammes binaires (SO₄-Cl) et (K-Cl)

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 $SO_4 = -0,1897Cl + 49204$ ou $R^2 = 0,68$.

Le caractère non conservatif du potassium est mis en évidence à la **figure. 5.38**. La perte nette moyenne annuelle de l'élément par autres voies qu'hydrologiques. Les processus géochimiques, tels que la formation de l'illite ($K \times Al_2 [Si_4 - x Al \times O_{10}] (OH)_2$) 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 $R^2=0,20$.

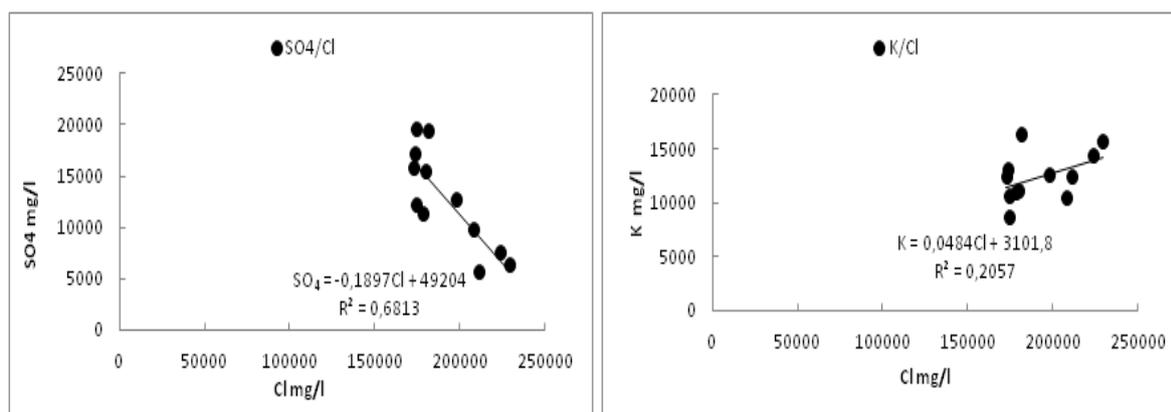


Fig.5. 38 Concentration relation entre SO_4/Cl et K/Cl (en mg/l) et droite d'évolution théorique des solutions [14].

V.10 Diagrammes d'équilibre des éléments chimiques

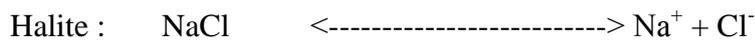
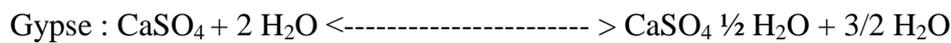
Après les résultats obtenus à partir des eaux complexe terminal et saumure de sebkha. Ces résultats des cations et des anions on été simulé avec logiciel Phreeqc pour voire la tendance de précipitation dans ce type de système. Il sera présenté et ploté successivement sur des diagrammes d'équilibre. Pour comprendre l'évolution chimique des eaux de notre zone d'étude on fera appel aux notions d'équilibre chimique et d'alcalinité résiduelle dont nous allons faire un rappel. Lorsqu'un minéral de composition chimique A_α et B_β est mis en contact avec une solution et qu'il se dissout suivant la réaction $A_\alpha + B_\beta \text{ -----} \rightarrow \alpha A + \beta B$, on détermine le produit ionique Q de la solution par :

$Q = [A]^\alpha \times [B]^\beta / [A_\alpha \times B_\beta]$ ou [] désigne l'activité de l'espèce.

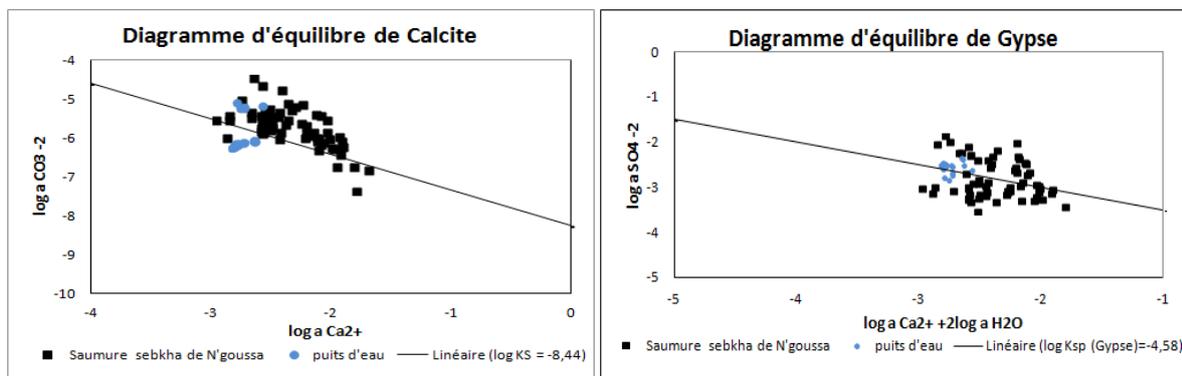
Pour les minéraux purs, on suppose que l'activité du minéral est égale à 1. Le produit ionique s'écrit alors : $Q = [A]^\alpha \times [B]^\beta$ ou en $\log Q = \alpha \cdot \log [A] + \beta \cdot \log [B]$

Lorsque Q est supérieur au produit de solubilité K, constante thermodynamique, définie à température et pression constante, la solution est sursaturée par rapport au minéral et aura tendance à précipiter jusqu'à obtention de l'équilibre $Q = K$. Dans le cas contraire la solution sera sous-saturée et aura tendance à dissoudre le minéral jusqu'à l'obtention de l'équilibre $Q = K$ [105]. Lorsque la solution est à l'équilibre avec le minéral, les activités des espèces A et B vérifient la relation : $\alpha \cdot \log [A] + \beta \cdot \log [B] = \log K$

Lors de l'évaporation d'une eau, les minéraux peu soluble tels que les minéraux suivant le Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la calcite (CaCO_3) et Halite (NaCl). Les réactions sont comme suite



Dans notre zone le système de précipitation conceptuellement, ce qui définit les sédiments évaporitiques est large, dans le thème général que la roche a été précipitée initialement lors du chauffage solaire d'une saumure. Le chauffage entraîne la perte d'eau sous forme de vapeur et de concentrés de la saumure résiduelle jusqu'à des salinités élevées où une suite de sels d'évaporite précipite. Dans cette cuvette de quaternaire alimentée les eaux pluviométrique de Holocène, la séquence de précipitation évolue de carbonate à travers le gypse, en halite, puis dans les différents sels de rongeur voir **figure.5.39**.



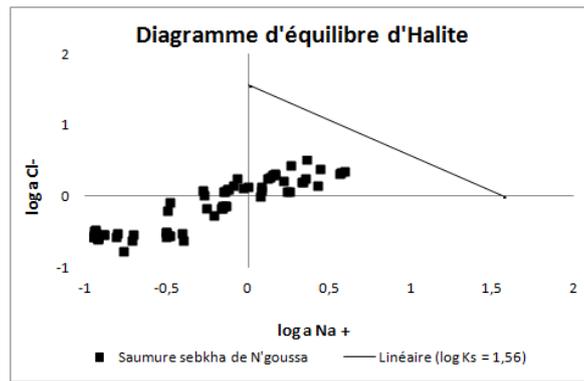


Fig.5. 39 Équilibre des saumures dans sebkha de N'goussa.

V.11 Indices de saturation

Pour déterminer l'influence des éléments chimiques, nous avons utilisé logiciel thermodynamique phreeqi par le calcul de l'indice de saturation. D'après la loi d'action de masse, pour une solution aqueuse en équilibre avec un minéral, le produit d'activité ionique (IAP) du minéral est égal à la constante d'équilibre (K_{sp}) thermodynamique. Le degré de saturation d'une eau peut être représenté par la formule suivante [106].

La séquence théorique de la cristallisation fractionnée Henricus vant'Hoff (1900) a été développé à partir de la détermination de la solubilité ainsi que les points de saturation en sel. Calcul de Pitzer de l'équilibre liquide-solide était basé sur le modèle d'interaction ionique qui avait été bien développé par Marion et al [107].

V.11.1 Indices de saturation les eaux de sebkha de N'goussa.

L'équilibre liquide-solide de l'eau de sebkha de N'goussa a été évalué par interaction thermodynamique des ions Modèle Pitzer utilisant le logiciel Phreeqi, à l'état ambiant (25°C, 40°C) en considérant uniquement les six éléments majeurs de eau salée (Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- et SO_4^{-2}). La précipitation minérale a été simulée en utilisant le Pitzer modèle. En raison de la complexité du système, l'indice de saturation (IS) du solide précipité phases, dans des conditions expérimentales, a été calculé selon la formule suivante:

$$SI = \log_{10} (IAP/K_{sp})$$

- IAP : c'est le produit de l'activité ionique.
- K : c'est le produit de solubilité.

L'indice de saturation est utilisé pour déterminer si l'eau est saturée, sous-saturée ou sursaturée en respect de l'état du minéral, pour le calcul des activités et en considérant que l'état d'équilibre se fait dans l'intervalle -0,5 à +0,5.

Lorsque :

- $IS > 0,5$, l'échantillon est sursature vis-à-vis du minéral (ré-précipitation possible du minéral, sous réserve de cinétique);
- $IS < -0,5$, l'échantillon est sous-saturé (eau agressive si le minéral est présent) ;
- $-0,5 < IS < 0,5$: l'échantillon est a saturation (en équilibre).

Basé sur ces notions, L'étude thermodynamique quantifie l'effet de la composition ionique et de la salinité de l'eau saline de sebkha de N'goussa sur les phases minérales précipitées en fonction de la concentration en eau évaporé au niveau différents points de l'échantillon.

Le processus et la prédiction par logiciel phreeqci qui montrent que l'ordre de sels précipités de manière quantitative ou le suivi des étapes d'évaporation est caractérisée par la précipitation des carbonates (Dolomite et calcite) suivie par Gypse et d'Anhydrite et d'halite et terminée par les sels de K-Mg pour les concentrations élevées de saumure.

La majorité des eaux sont à l'équilibre ou saturées vis-à-vis des minéraux carbonates a savoir : la calcite et la dolomite. Les eaux les plus minéralisées sont sursaturées voir **figure.5.40, figure.5.41, figure.5.42 et figure.5.43.**

La plupart des eaux de sebkha de N'goussa sont sursaturées vis-à-vis des minéraux sulfates (gypse et anhydrite). Seulement les eaux les plus minéralisées montrent une saturation par rapport à ces minéraux. Tous les échantillons présentent une large tendance à l'équilibre sous-vis-à-vis de l'halite.

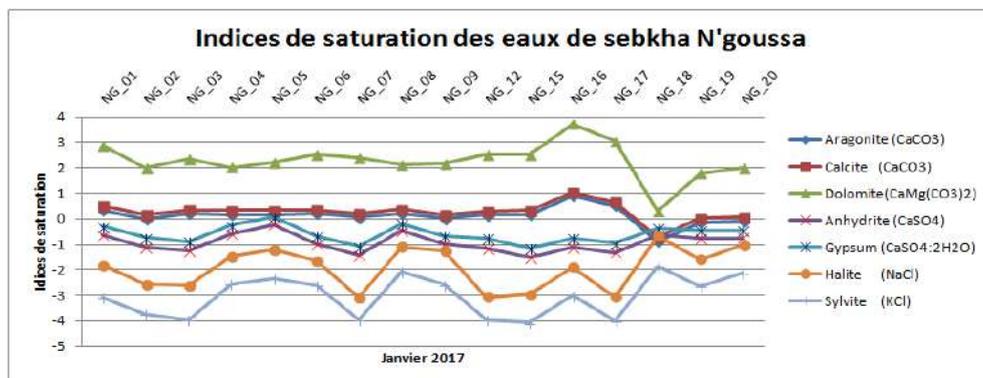


Fig.5. 40 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebkha N'goussa (janvier 2017)

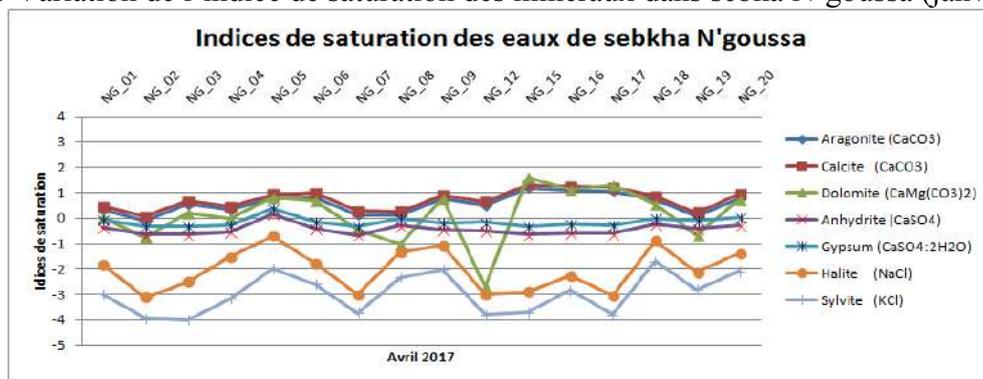


Fig.5. 41 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebkha N'goussa (Avril 2017)

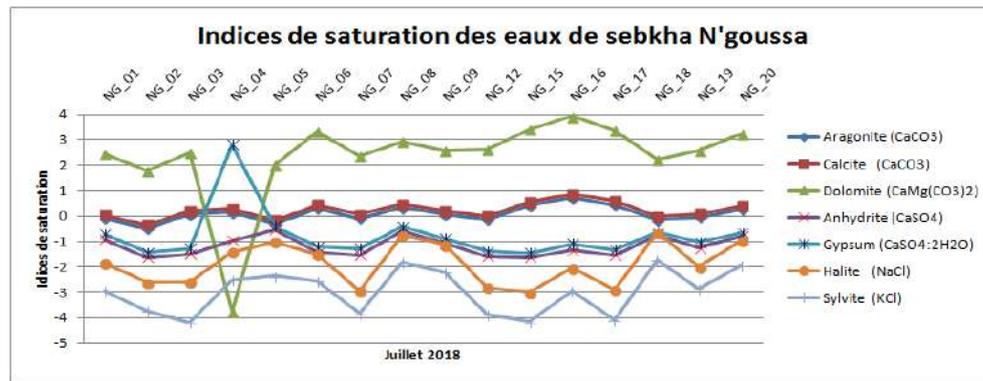


Fig.5. 42 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebka N'goussa (juillet 2018)

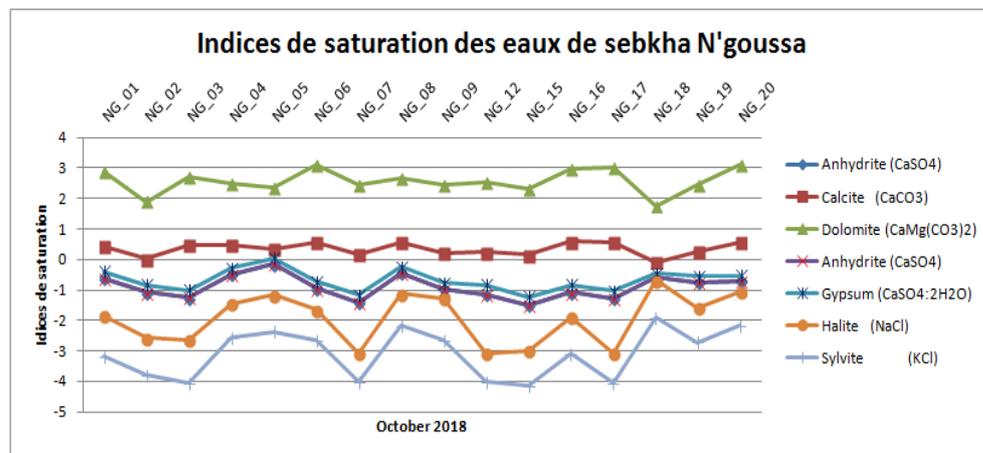


Fig.5. 43 Variation de l'indice de saturation des minéraux dans sebka N'goussa (Octobre 2018)

V.11.2 Indices de saturation les eaux de Chott Baghdad

Sur la base des équilibres thermodynamiques, il est possible de définir une évolution chimique dans Sebka 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 :

Selon les analyses effectuées sur chott Baghdad, 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;

La majorité des échantillons sont sursaturés vis-à-vis de la Halite (NaCl) en peut voire **figure. 5.44** 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). Alors que ces mêmes saumures sont sous-saturés vis-à-vis de Epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$), Bloedite ($Na_2Mg(SO_4)_2 \cdot 4H_2O$), Hexahydrate ($MgSO_4 \cdot 6H_2O$) et Mirabilite ($Na_2SO_4 \cdot 10H_2O$) 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 voir **figure. 5.45**.

Pour le groupe des évaporites nous avons :

Le Gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 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 Glaubérite ($Na_2Ca(SO_4)_2$) sont sur saturé avec indice de saturation (0,1 et 0,43), (0,05 et 0,8) respectivement **figure. 5.46**.

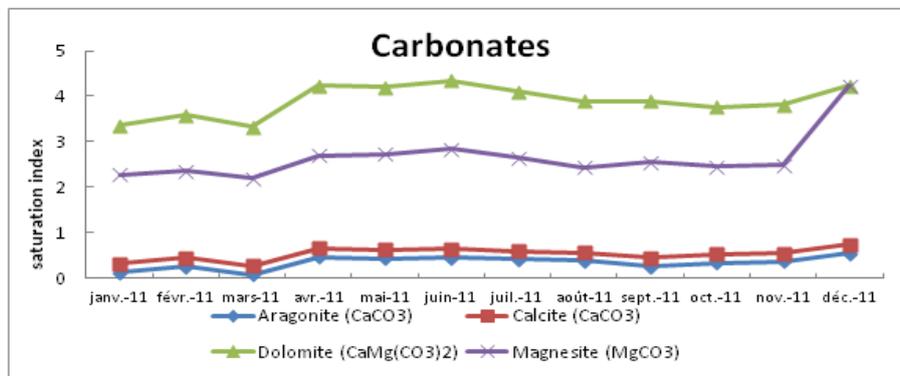


Fig.5. 44 Les indices de saturation des minéraux carbonatés précipités

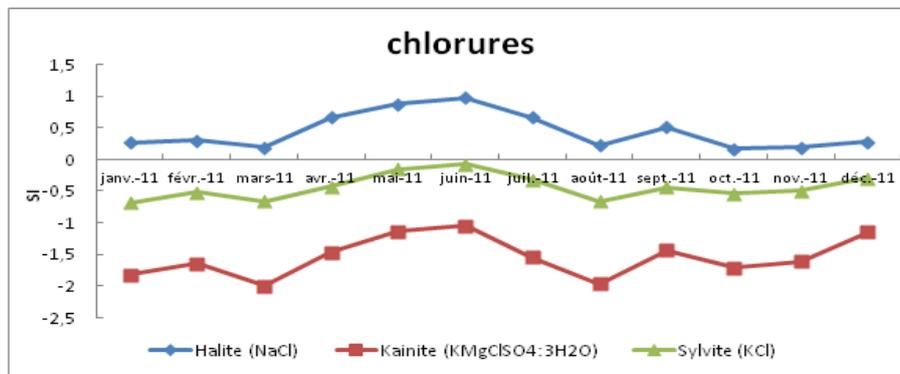


Fig.5. 45 Les indices de saturation des minéraux chlorurés précipités

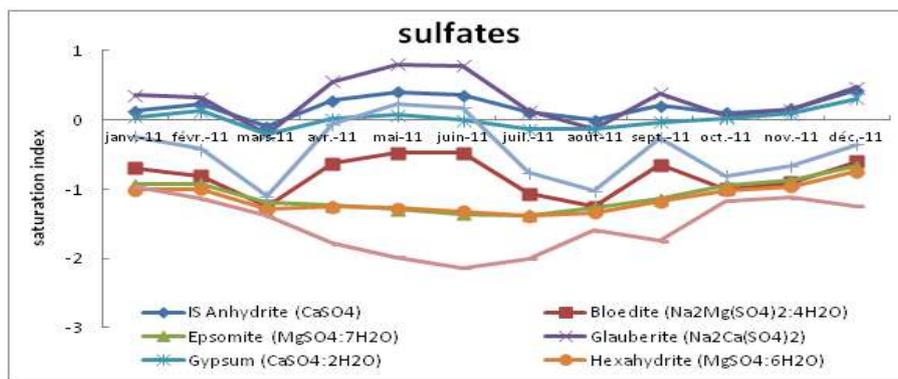


Fig.5. 46 Les indices de saturation des minéraux sulfatés précipités

V.11.3 Processus d'évaporation dans les systèmes fermés

Les eaux souterraines ré-circulées se déchargent à la surface comme source à faible enthalpie pour les périodes hivernale (chaude) avec les températures moins que 35°C ou comme sources à plus haute enthalpie pour les périodes estivale avec des températures maximal allant jusqu'à 60°C. Les eaux des chotts et les sebkhas pendant périodes chaudes sont relativement diluées, Eaux Na-HCO₃ ou Na-Ca-HCO₃. Pendant période estivale c'est l'inverse qui va ce passe la plus haute température les fluides sont plus salés et fortement chargé en élément chimiques. Les solutions sur saturé et saturé Commencez le processus de décharge et précipitation se forme des sels et des évaporites général. Une fois acquis, solutés en surface et sous la surface les eaux qui coulent vers les lacs subissent un fractionnement processus qui changent progressivement la composition globale et rapports ioniques dans le flux entrant les eaux. La salinité des eaux augmente généralement à moins que dilué par les pluies.

L'eau devient moins chargé ou bien complètement dilué de certains ions, tandis que d'autres augmentent en abondance relative ou rester en solution jusqu'à ce que les fluides atteignent leur seuil de précipitation (Saturation index). L'Alcalinité en général augmente avec la concentration d'évaporation progressive dans les bassins hydrologiquement fermés. Donc pour l'interaction entre les cations et les anions,

L'alcalinité est considérée comme un excès de conservateur charge cationique sur anion conservateur charge, il s'ensuit simplement que si l'évaporation est le seul processus au travail, alors l'excès de cation où la charge des cations augmentera en fonction de la concentration par évaporation[80]. A cause que les eaux devenir plus concentré par évaporation vers le centre du bassin, l'absolu la concentration des espèces de carbonate augmente d'une manière remarquable ou niveau des bassins fermé les précipitations des calcites, aragonites avec dolomies. Lors de la concentration par évaporation, la précipitation

des carbonates alcalino-terreux est généralement la première minéralisation à entraînement thermodynamique en parle de processus abiotique ce processus pour affecter la géochimie des chotts et sebkhas voir **figure.5.47**. Cela peut se produire à relativement dilué les concentrations et est souvent associé soit à les marges physiques des alcalins lors de déficit en calcium qui forme des saumures riche en Calcium ou, dans les zone central des chotts et sebkhas, avec un afflux de eau douce contenant du Ca dans le bassin, telle que pendant les pluies ou bien dans contact avec les drains de drainage. Plus tard dans l'évolution évaporative des eaux, et quand la salinité augmente, d'autres fractures chimiques viennent en jeu, tels que le gypse (une fracture entre Ca et SO_4), la magnésite (MgCO_3 une fracture entre Mg et CO_3) et autres

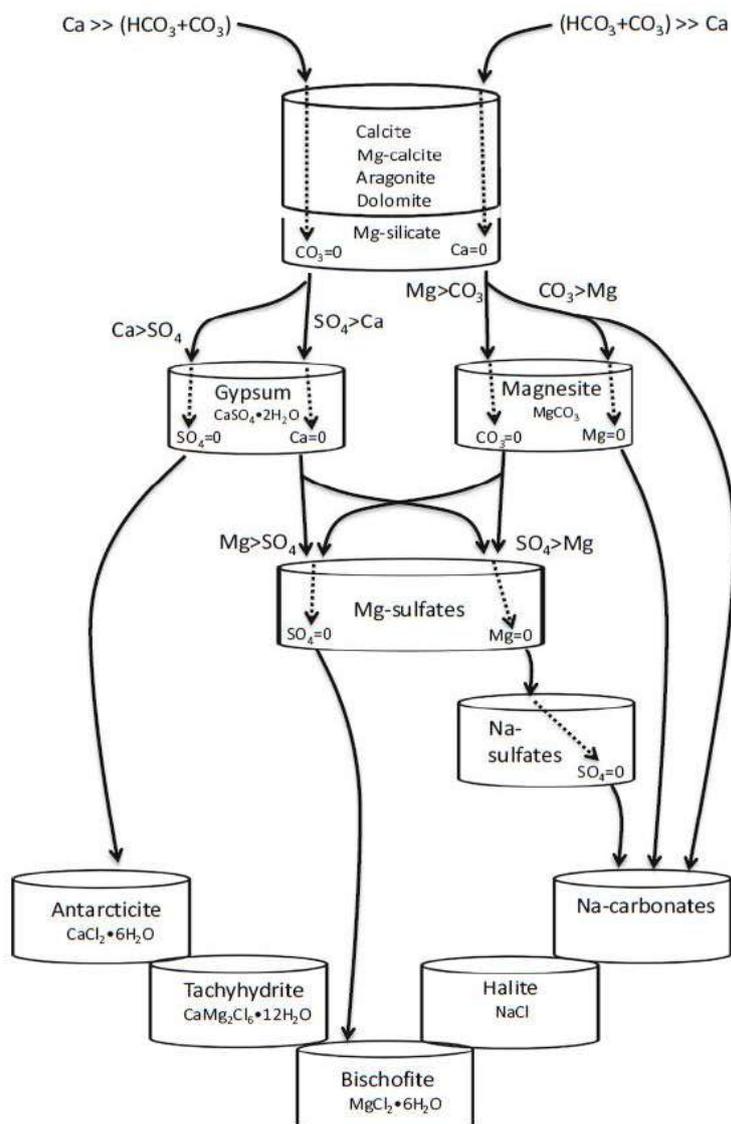


Fig.5. 47 Diagramme simplifié l'évolution d'évaporation d'un bassin fermé des saumure, avec une plus grande concentration par évaporation vers le bas de processus[80].

V.12 Discussion résultats de DRX et de MEB

V.12.1 présence géologique et importance industrielle des évaporites

L'Halite ou bien le chlorure de sodium chimiquement (NaCl), l'halite est le minéral communément appelé sel. Dans le domaine de Géologie, l'halite est un minéral évaporitiques qui se forme par évaporation dans les climats arides. Sur le plant cristallographique, La morphologie de l'halite naturelle est largement dominée par le cube $\{100\}$; les formes $\{110\}$ et $\{111\}$ sont rarement présentes. Lorsque les cristaux se développent par évaporation de solution aqueuse la perfection des faces du cube est généralement perdu; en raison des valeurs élevées de la sursaturation, Les faces en forme de trémie $\{100\}$ apparaissent avec le dendritique branches en développement dans les « 111 » directions [108].

La calcite est le principal minéral formant des roches calcaires (une roche contenant au moins 50% en poids de calcium carbonate sous forme de calcite). En général, la calcite est le minéral carbonate le plus répandu dans les roches sédimentaire carbonaté. Tous les calcaires contiennent au moins quelques pour cent de minéraux terrigènes comme le quartz, le feldspath, et minéraux argileux. Ils peuvent également contenir des minéraux authentiques comme le gypse, l'anhydrite, la pyrite ou la sidérite. Les minéraux carbonatés précipitent des eaux saline sursaturés par des processus de précipitation biochimiques ou directs, et s'accumulent comme des précipités marins ou bien même terrestres ou peu profonds ou niveau des chotts et sebkha. En fonction de pureté et produit chimique de calcite, la matière première obtenue à partir de roches carbonatées peut être utilisé dans une grande variété d'applications. La valeur économique de calcite est diverse soit chimique et industriel de la construction, agriculture et environnement. Par exemple, il peut être utilisé comme source de chaux (CaO) pour produits chimiques. Il est également appliqué au traitement des sols et de l'eau. En plus en peut les utilisé à la fusion des métaux et comme charge dans de nombreux produits (papier, plastique et peinture). Le calcaire est largement utilisé pour produire du ciment Portland et des agrégats dans du béton et asphalte ou comme pierre de construction dans l'industrie du bâtiment. Sur le plant cristallographique. La structure de la calcite est polymorphe stable de CaCO_3 à température et pression ambiantes, est rhomboédrique.

Le gypse (sulfate de calcium di-hydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) est le sulfate naturel le plus abondant. Il est largement présent dans la croûte terrestre et joue un rôle important dans diverses activités géologiques. (Par exemple, dynamique de la déformation de la croûte) et environnementale (par exemple la distribution mondiale de Ca^{2+} et SO_4^{2-}) processus. Le gypse est également très utilisé dans l'industrie, comme matériau de construction (plâtre,

mortier, blocs, additif au ciment Portland, etc.). Dans domaine de l'agriculture, Le Ca +2 et SO4 -2 sont des composants d'engrais et des conditionneurs de sol pour les sols riches en sodium, et même dans le cosmétique. La structure cristalline du gypse se cristallise dans le système monoclinique consiste en de couches de SO₄²⁻ tétraèdres, qui sont liés ensemble par les cations Ca²⁺. Les molécules d'eau sont arrangées entre ces couches.

V.12.2 Analyses minéralogiques d'échantillons de sel par DRX dans sebkha de N'goussa

La minéralogie des sels récoltés de notre zone d'étude soit de terrain ou bien fruits de l'évaporation isotherme. Les minéraux qui sont identifiées par DRX, était la suivante: Halite, calcite, Gypse, et de petites quantités d'illite, kaolinite-chlorite.

La minéralogie référence pour les compositions de sels et évaporitiques de ces cuvettes de saharienne septentrionale révèlent une abondance élevée de Halite, Gypse et avec une très faible quantité de la Sylvine. Ces minéraux évaporitiques saline sont associés avec des grains de quartz et d'argiles. La composition minéralogique référence pour les compositions de sol sahariennes dans les cuvettes endoréique révèlent une abondance élevée de grains de quartz avec une faible quantité d'argiles. Ces roches sédimentaires détritiques terrigènes sont associés par des roche évaporitiques talque l'halite, calcite et gypse comme il a été identifié par DRX voir **figure.5.48**.

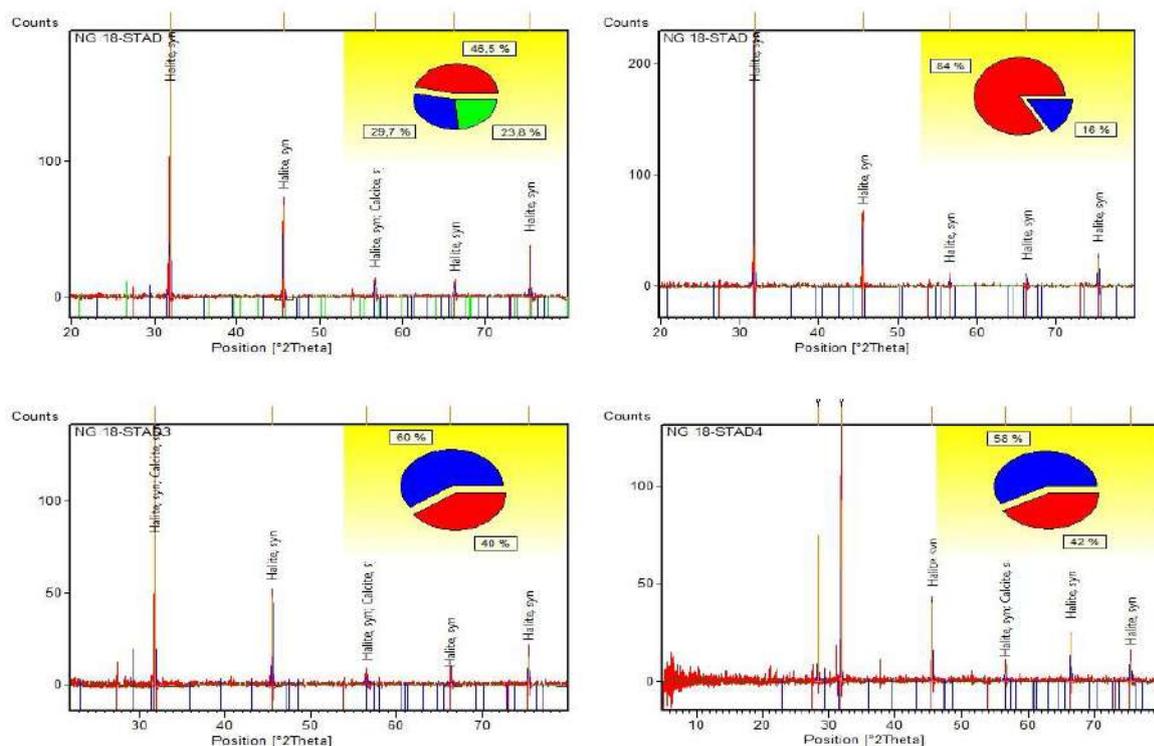


Fig.5. 48 DRX des sels dans zone d'étude à partir d'un échantillon de piézomètre au centre sebkha de N'goussa.

En particulier, les chlorure de sodium peuvent être facilement distingués par leurs diagrammes de diffraction de rayons X. En fonction de leur abondance dans les eaux fortement chargés en chlorure et de sodium qui favorisent leur cristallisation.

La minéralogie des sels analysés et observés était la suivante : halite (53%), carbonates 'calcite' (32%), quartz (15%), avec de très faibles quantités d'argile avec ces variétés d'illite, kaolinite-chlorite.

V.12.3 Analyses minéralogiques d'échantillons par MEB

L'appareil utilisé est la microscopie électronique à balayage environnemental. Le MEBE ou SEM pour Scanning Electron Microscopy en anglais est une technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière. S'appuyant sur les travaux de Max Knoll et Manfred von Ardenne dans les années 1930 [109], le MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface. Les minéraux qui forment les sels présentent de nombreux systèmes cristallins (c'est à dire la taille et la forme des cristaux) [110]. Les cristaux des sels peuvent varier considérablement et sont contrôlés par les caractéristiques environnementales se produisant au moment de la formation de ces minéraux. Cette variation de forme est due aux changements de température, l'eau du sol, la présence de matière organique et la quantité et les types d'ions en solution et pH. Les minéraux les plus susceptibles de réagir rapidement aux changements des conditions environnementales sont les minéraux hydratés / anhydres. Dans notre zone d'étude ces minéraux sont la Thénardite, Mirabilite, Glauberite, Gypse, Anhydrite, Bloedite. L'anhydrite est généralement très répandue dans les chotts et sebkhas de notre zone d'étude parce que sa stabilité exige des températures élevées et de faibles humidités relatives. Ou dans ces régions les deux conditions sont présentes. Le gypse est très répandu dans notre zone d'étude, aussi généralement instable. Généralement, de tels changements minéralogiques ne peuvent être mesurés par XRD seule car il est extrêmement difficile de séparer physiquement ces croûtes de sel friables et molles. De plus, l'analyse XRD est généralement incapable d'identifier les minéraux qui composent <5% d'un échantillon [110].

Le couplage entre les deux méthodes microscopie électronique à balayage avec analyses par spectrométrie à rayons X à dispersion d'énergie, cependant, ont été utilisés pour distinguer la minéralogie, les habitudes de cristal, et morphologie de surface dans les croûtes de sel en

couches. Bien que les analyses SEM-EDS ne permettent pas de distinguer directement entre minéraux hydratés et anhydres, le port de minéraux peut parfois être utilisé pour faire cette distinction. Par conséquent, la combinaison entre XRD et SEM-EDS est actuellement la plus efficace méthode à la fois pour déterminer la minéralogie du sel et pour l'apprentissage sur les caractéristiques physiques de ces surfaces. Plusieurs analyses SEM-EDS ont montré des résultats cohérents pour chaque site: minéralogie similaire, tailles et habitudes du cristal, composition et la taille des agrégats minéraux salés, la douceur de la surface, et degré de cimentation voir **figure.5.49**, **figure.5.50** et **figure.5.51**.

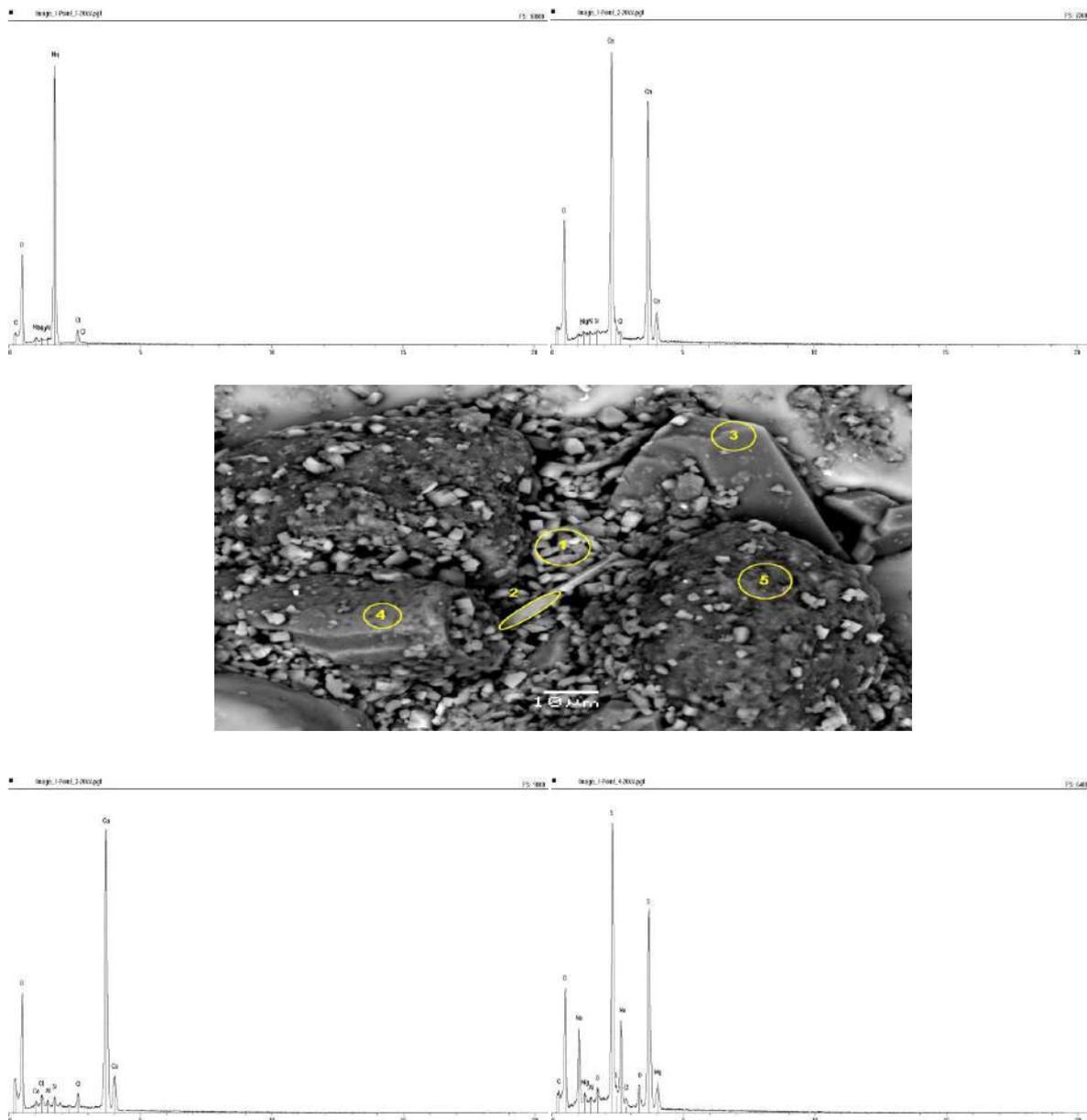


Fig.5. 49 Image par MEB de différents minéraux trouvés dans sebkha de notre zone d'étude.
1) Halite, 2) Tachyhydrite qui se développe sur le gypse cristaux, 3) Antarcticite, 4) cristaux de Blodite.

La méthode SEM et la radiographie l'examen a montré que les sels recueillis des échantillons NG_09 et NG_18 de sebkha N'goussa et consistent en associations d'un plus grand nombre de minéraux évaporite.

La composition minérale des particules de sels était complexe mais uniforme dans toute la zone étudiée. Les minéraux les plus communs étaient la halite, la dolomite, le gypse l'anhydrite et calcite qui ont été confirmé par rayons X diffraction de la poudre, alors que les autres minéraux étaient moins fréquent.

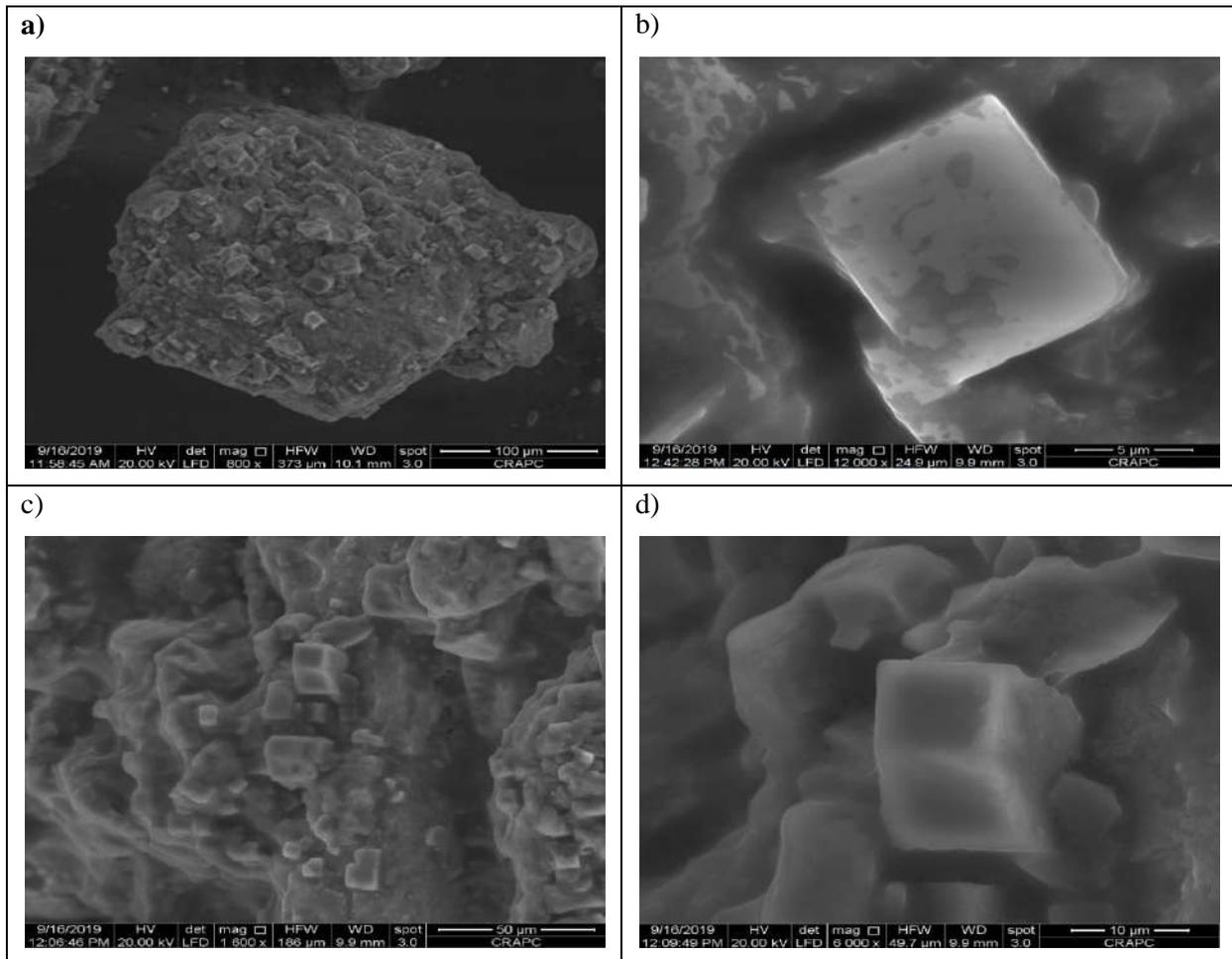


Fig.5. 50 Images au MEB des particules de sel après l'évaporation isotherme point NG_09 dans sebkha de N'goussa. a) Vue générale d'un échantillon de sel de la région de sebkha à N'goussa montrant des débris de la taille de limon de fragments de minéraux angulaires et agrégats de gypse et de calcite. b) Halite. c) fragments de minéraux, tels que dolomite et mica et agrégats cristallins de gypse. d) Gypse.

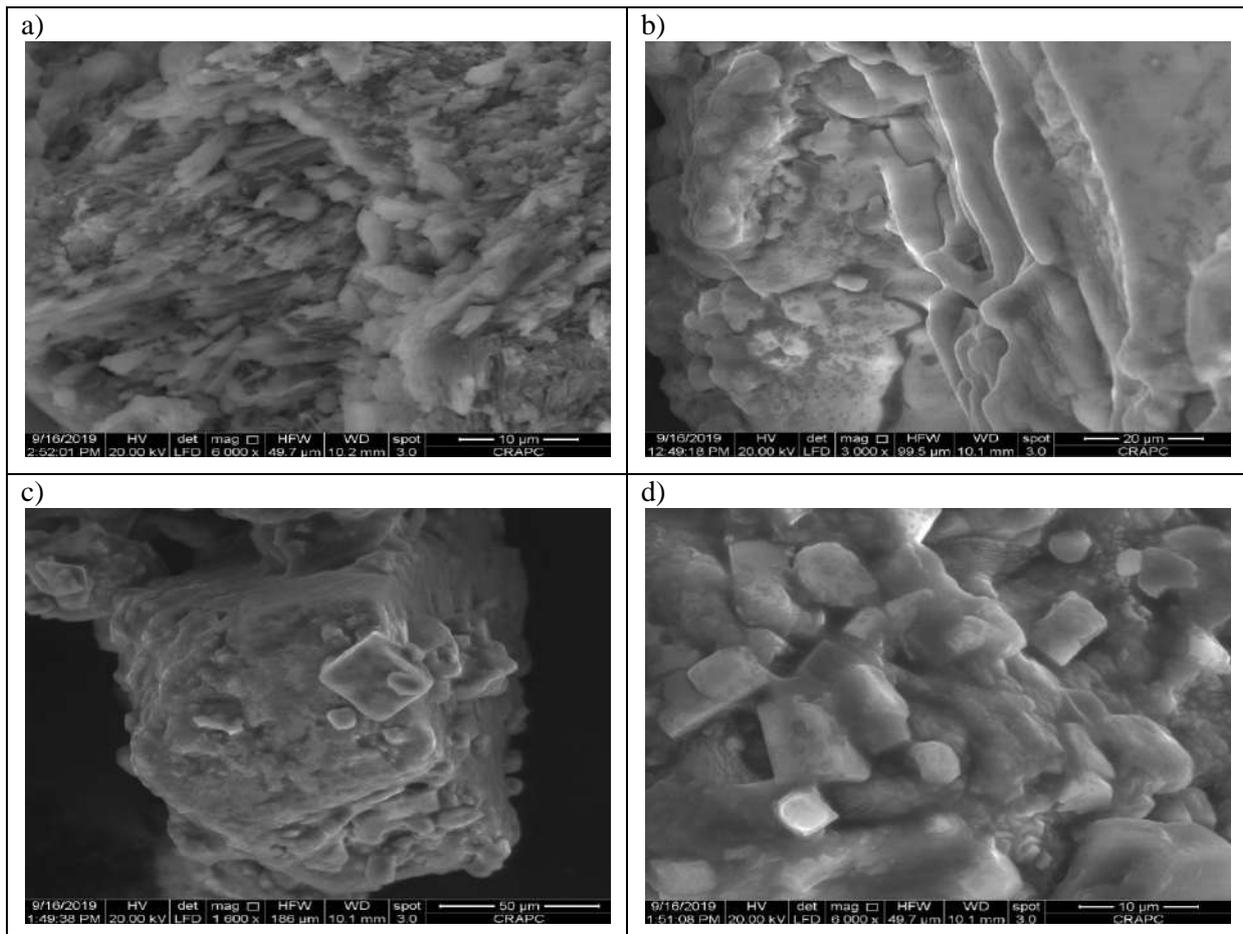


Fig.5. 51 Images SEM de différents modèles de croissance de NaCl cristaux. a-b) croissance de cristaux colonnaires de NaCl. c-d) Croissance de cristaux isométriques de NaCl.

V.12.4 Analyses minéralogiques d'échantillons de sel par DRX dans chott Baghdad

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 (**figure.5.52**) 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.

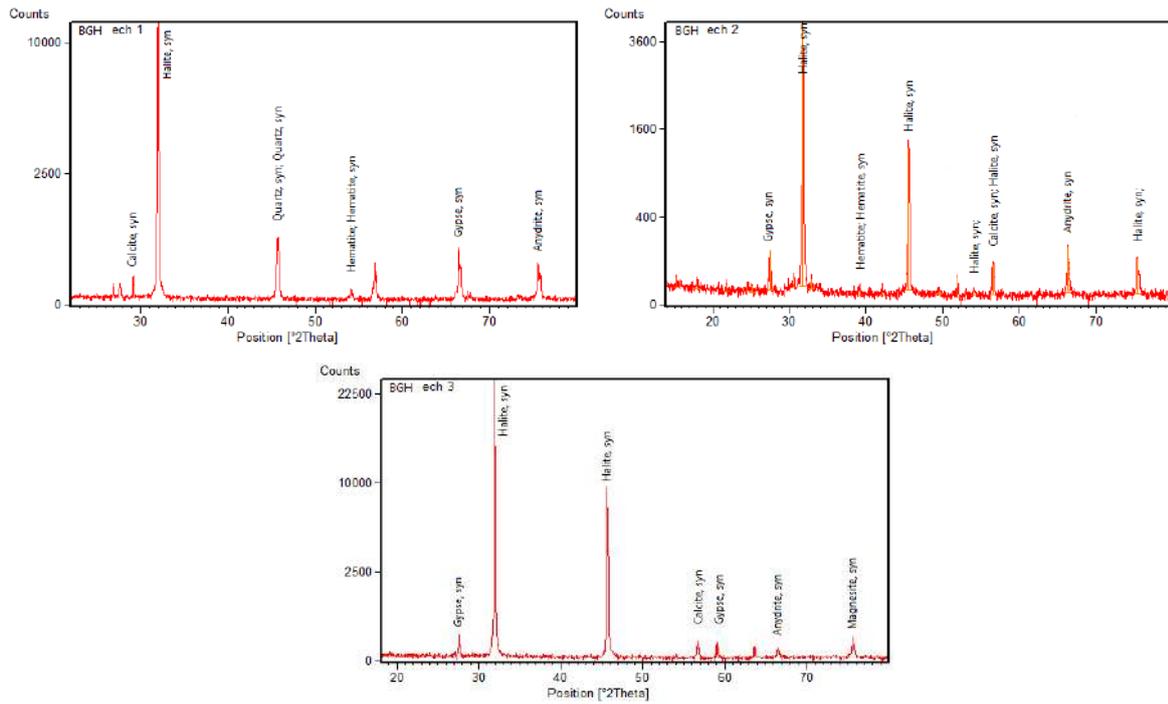


Fig.5. 52 Les Spectres des sels d'échantillon N°1, 2 et 3 de chott Baghdad. Le spectre de diffraction des rayons X des échantillons N°7, N°9 et N°10 montrent la présence de l'Hexahydrate, la Bloéidite, l'epsomite et Glaubérite **figure.5.53**. En général, L'analyse par diffractométrie de Rayon X confirme la cristallisation des séquences évaporitiques caractéristique de l'halite , gypse, et de calcite avec des autre minéraux évaporitiques qui sont moins important Glaubérite, epsomite, hexahydrate.

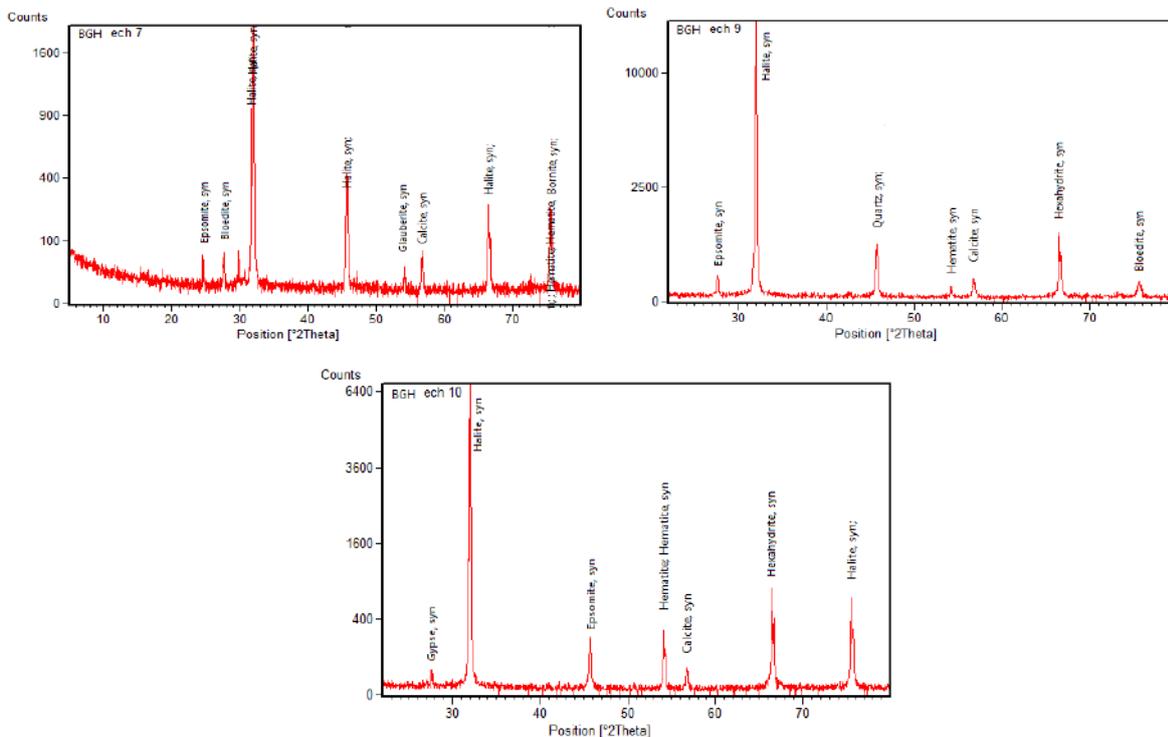


Fig.5. 53 Les Spectres des sels d'échantillon N°7, 9 et 10 de chott Baghdad

V.12.5 Description des espèces minérales

Les minéraux observés dans les différents types de roches évaporitiques des chotts et sebkha se répartissent en deux ensembles principaux :

Les produits directs de la cuisson des roches, que l'on retrouve en général comme constituants de la roche finale mais aussi en cristaux automorphes dans les remplissages des cuvettes (chott et sebkha). Il s'agit de minéraux de haute température, essentiellement des silicates riches essentiellement de quartz ce forme des grains de sable (pouvant provenir de sédiments argileux), calcium (issu des calcaires) et fer (souvent contenu dans pyrite et marcassite dans les niveaux sédimentaires).

Des minéraux postérieurs, de basse température, apparemment déposés par l'action de fluides sur les roches. Il s'agit essentiellement des dépôts évaporitiques. Ces dépôts sont des carbonates (calcite et aragonite..), sulfates (gypse, Anhydrite, Thenardite et Epsomite...) et une Chlorides, (Halite, sylvite, Bischofite...). Les dépôts d'évaporite sont une partie importante des sédiments de lacs salins. Ils décrivent ici les conclusions d'analyse de la géochimie et de la minéralogie des sédiments lacustres. La minéralogie est un outil fiable pour l'étude de s'évapore; par conséquent, les sous-échantillons sont analysés dans cette étude par SEM. Selon la croissance radiale des minéraux d'Halite et Gypse, il est évident que ces minéraux se forment sur le fond du lac ou bien dans les pores interstitiels lors des circulations des eaux fortement chargé des ions, tandis que la forme rhombique des cristaux de calcite indique l'origine des détritiques de la calcite.

Une étude sur l'évolution récente de l'hydrochimie de ces deux cuvettes N'goussa et Baghdad indique que sa chimie de l'eau a changé d'un type Mg – SO₄ – Cl à un type Na – Cl — (SO₄). Ce genre de variation est apparu dans la précipitation d'Halite et de Gypse. Cela signifie que compte tenu de la persistance des eaux d'entrée actuelles avec la chimie de HCO₃ << Ca + Mg, l'évolution de la saumure des eaux de sub-surface conduire à une saumure de type Ca – Na – Cl ou Na – SO₄ – Cl à l'avenir. Les caractéristiques des sédiments qui forment chott et sebkha sont contrôlées par les processus sédimentaires agissant sur ces cuvettes endoréiques.

V.13 Interaction entre les eaux d'irrigation et eaux nappe superficielle

A partir des données d'analyse chimique des eaux d'irrigation dans la région de N'goussa et à l'aide d'une approche morphologique et géochimique, complétée par une analyse micro-morphologique, nous avons analysé la relation entre les eaux d'irrigation, et les eaux de nappe superficielle, pouvant être responsable des accumulations gypseuses dans les sols de l'oasis de N'goussa. Les eaux d'irrigation provenant des forages et exploitées dans l'oasis de N'goussa depuis plusieurs années, ont gardé globalement le même faciès chimique mixte sulfaté. Ces eaux sont classées avec un risque de salinisation élevé et un risque d'alcalinisation moyen. Nous avons constaté une nette augmentation de la concentration des cations (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}) et des anions (Cl^- et SO_4^{2-}). Dans l'oasis, la nappe superficielle est située à faible profondeur et la composition chimique des eaux varie en fonction des saisons. Ainsi l'irrigation, à partir des eaux de forages ayant gardé le même faciès mixte sulfaté depuis plusieurs années, a eu un impact manifeste sur la typologie des sols dans l'oasis où les différentes formes d'accumulations gypseuses dominent le profil pédologique avec un gradient d'accumulation croissant de la surface vers la profondeur. Les croûtes et les encroûtements gypseux surmontant la nappe superficielle sont localisés à des profondeurs variables selon la topographie et les conditions de drainage local **figure.5.54**.

La minéralisation des eaux souterraines reste largement influencée par les résidus des transgressions quaternaires. L'évaporation marque fortement les eaux de surface avant et durant leur infiltration. Des calculs encore très préliminaires faits par différentes méthodes indépendantes suggèrent une recharge annuelle inférieure ou égale à 5 % des précipitations, soit de 5 à 10mm.

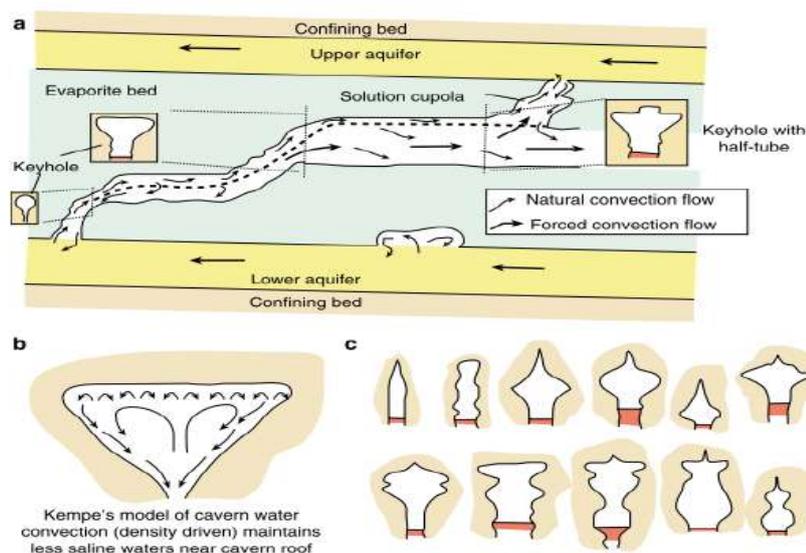


Fig.5. 54 Mécanisme de remonté des eaux des aquifères de profondeur (drainance) [111].

V.14 Conclusion

Les dépôts d'évaporites saline or non saline ou niveau des environnements continental se produisent dans des cuvettes fermés, c'est-à-dire sans point de décharge, dans les régions saharien arides et semi-arides. Ces bassins endoréiques se forment dans des bassins intra-cratonique fermés ou des dépressions peu profondes de l'ordre de 120 m dans la région de Ouargla à – 30 m sous niveau de la mère ou niveau de chott Melghir.

La qualité des eaux du complexe terminal ont présenté des teneurs remarquables en élément majeur dans zone d'étude, conformes aux normes. Dans cette région, les ressources superficielles sont représentées essentiellement par les eaux des chottes et sebkha qui sont très salé et frottements chargés. Elles sont plus salées que les eaux souterraines et leur charge organique est essentiellement de nature humique.

L'existence et la circulation des ces eaux trop chargé dans ces bassin fermée (chott et sebkha) favorise la précipitation de tous les variétés des roches évaporitiques, qui sont des quantités d'une fréquence variable dans les régions arides. La nappe phréatique, de sub-surface, serait capable à subir des pertes très remarquable par évapotranspiration lors d'épisodes de sécheresse prolonges (exemple année 2007 plus sèche dans dernières 15 années. Les hausses les plus fortes depuis les années 2009 se rencontrent sur la bordure de sebkha de N'goussa, là ou actuellement la nappe monte le plus rapidement. Ces constatations tendent à confirmer que le phénomène responsable de la hausse actuelle n'est pas conjoncturel, mais s'inscrit dans une modification à long terme du bilan hydrologique de la nappe phréatique (l'utilisation excessive des nappes profond dans l'irrigation).

Dans le but de faire une suivi d'évolution et variation des paramètres physico-chimique de l'eau de sebkha de N'goussa, une combinaison de méthodes d'analyses les données de la variabilité spatio-temporelle de la qualité de l'eau de cette cuvette endoréique a été faite. Les résultats de cette combinaison montrent l'existence de trois familles d'eaux :

Les conclusions retenues au terme du ce chapitre, nous ont permis d'établir dans un premier temps un constat de la qualité des eaux superficielles de sebkha N'goussa et chott Baghdad qui considérée comme des sebkhas septentrional algérienne, par le suivi et l'analyse temporelle d'un certains nombres de traceurs physicochimique. Les valeurs moyennes s'étendent sur deux cycles annuels 2017 à 2018 couvrant une longue période de sécheresse et deux crues qui a lieu pendant les mois de février et mars 2017. 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.

CONCLUSION GENERAL

Conclusion générale

Les lacs salés sont présents dans des zones de climat sec sur tous les continents. La plupart de ces lacs se trouvent dans des climats semi-arides et subhumides. Ils ont tendance à se produire dans les bassins de drainage endoréiques où l'évaporation est supérieure aux précipitations. Une évaporation excessive conduit à une concentration de sels entraînant la formation de lacs salés. De nombreux lacs salés se trouvent dans les régions continentales et sous les ombres de pluie des montagnes. Les lacs de la région endoréique ont tendance à être fermés et un écoulement est rare.

Cette étude est consacrée aux lacs salés du sud-est de l'Algérie, qui comprennent une ligne des lacs réputés du sud-est et orientés NE-SO. Il couvre l'ensemble des problèmes, de l'origine des lacs à la vie historique à l'intérieur et autour de ces masses d'eau uniques, à l'utilisation, aux menaces et aux considérations de gestion. Notre étude résume les recherches effectuées jusqu'à présent, met en évidence des découvertes importantes et nouvelles et fournit des perspectives pour l'avenir. Notre étude est divisée en trois sections principales: «Géologie, milieu physique chimie et la géochimie», qui traite du développement des chotts et sebkha de la physico-chimie étonnante de ceux-ci. Lorsque de notre objectif est de connaître les interactions et les adaptations aux conditions de vie extrêmes. Utilisation, gestion et perspectives s'attaquent aux menaces telles que l'exploitation des lacs et la pollution, mais prend également en compte les utilisations potentielles.

L'étude hydro-climatique et hydrogéochimique des chotts et sebkhas ou berge sud de l'Algérie, 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:

- ❖ Sebkha de N'goussa, couvrant une surface de 30 km², représente une dépression continentale résultante d'un ancien bassin endoréique qui est installé dans une gouttière synclinale à tendance subsidente et remplie au cours du Quaternaire.
- ❖ L'étude géomorphologique de la région, le bassin versant a une superficie de 30 km² et une forme Allongé de direction NE-SW. La morphologie générale de cette région qui se divise en quatre unités géomorphologique hamada, les glacis, les sebkhas et les dunes.
- ❖ L'étude géologique montre que 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 évaporitiques 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. Actuellement, cet sebkha est presque complètement remplie par les alluvions de quaternaire récentes et ne déborde qu'après les fortes crues.

Conclusion générale

- ❖ 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 23.7 °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 de N'goussa.
- ❖ Le suivi du chimisme des saumures de surface pendant deux années janvier 2017 jusque octobre 2018 sur quatre campagnes d'échantillonnage, a permis de dire que les eaux du sebkha restent très salé au centre et dilué légèrement au niveau des abords de sebkha (zone d'irrigation) ou du moment que les zones concentrent leurs concentrations de certains éléments chimiques dépassent les normes admissibles.
- ❖ L'interprétation des différents diagrammes a montré que dans la région étudiée le chlorure domine et s'accompagne soit de calcium soit de magnésium au niveau de tous les points de prélèvement. L'évolution des éléments chimiques en fonction de temps fait ressortir que de fortes concentrations de sulfate et de calcium sont liées aux formations évaporitiques ou salifères comme le gypse. Les eaux sebkha et chott de la zone d'étude 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 évaporitiques du Chott et sebkha de cette région permet la mise en évidence d'une séquence de minéraux qui commence par le gypse pour arriver aux minéraux de halite qui se précipitent à la fin de la série évaporitiques. Les rayons X prouvent la présence de quelques minéraux évaporitiques, avec une fréquence plus ou moins différente. Il faut noter que les résultats de l'analyse DRX ont indiqué que toutes les croûtes de sel étaient composées d'un mélange complexe de plusieurs sels minéraux, mais tous contenus de l'halite (NaCl) et Gypse [$\text{Ca SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] avec quantité de carbonates de calcium (Ca CO_3)
- ❖ L'étude hydrochimique des eaux de sebkha a montré que le faciès des eaux de sebkha évolue entre un pôle chloruré sulfaté calcique et chloruré sodique potassique. Les principaux phénomènes géochimiques intervenant dans l'acquisition de la charge saline sont liés à l'interaction eau-roche (dissolution des minéraux évaporitiques) et à l'échange cationique.
- ❖ Le Sud de la Algérie est marqué par de nombreuses dépressions, de superficie variable, dont le remplissage alluvionnaire récent est imbibé de plusieurs variétés de saumures relativement riches en chlorure de sodium mais sont mal explorées. On pouvait penser que, dans un pays aussi peu industrialisé dans ce domaine, il serait intéressant d'exploiter cette richesse naturelle.
- ❖ Le manque d'étude des éléments traces de la région étudiée, ils peuvent nous donner plus de détails tels que la pollution de la région.

Conclusion générale

- ❖ L'abondance de l'halite dans ces cuvettes endoréiques à une valeur économique ou tant que minéral renouvelable. il est également très important que l'utilisation d'halite dans l'industrie du chlor-alcali ainsi que dans le déglacage pour l'hiver entretien des routes, et comme composante principale du dessalement des usines.
- ❖ Analyses SEM / EDS des sels et de sol dans chott et sebkha trouvé les éléments suivants: zones distinctes de sub-surface accumulations de sels solubles que nous attribuons à l'évaporation des nappes phréatiques de sub-surface. Cette variation de niveau de la nappe phréatique de la surface a aidé à former des zones d'accumulation de sel soluble plus faibles qui peut être important en tant que proxy pour les zones de la concentration en Halite et Gypse, Anhydrite, Calcite.....
- ❖ Avantage sur énergie renouvelable, c'est que les eaux salines sur-saturé de sub-surface sont théoriquement opaques aux rayons infrarouges; radiations de corps froids constitués des longueurs d'onde très élevé ne peut pas du tout traverser les eaux de même quelques centimètres d'épaisseur. La couche superficielle de 1m à 2 m les plus hauts de la bande d'eau retiennent le rayonnement entrant longueurs d'onde supérieures à 900 nm, ne laissant que 1,2% de l'effet thermique disponible au surface (Dzens-Litovskii, 1953), c'est le cas de ces cuvettes endoréiques de sahara septentrionale inondé par des nappes phréatiques hyper-salines (en parle ici de lacs Héliothermale).



REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références Bibliographiques

- [1] Jean , O., 1992. Les sols salés de l'oasis d'el Guetiar (Tunisie). Thèse de doctorat: Bases de la Production Végétale : l'Université Montpellier II, 151.
- [2] Perthuisot, J., 1976 . Une Sebkhia sulfatée sodique en pays sédimentaire . La Sebkhia Oum el Krialate (Sud tunisien). In: *Géologie Méditerranéenne*. Tome 3, numéro 4, 1976. pp. 265-274.
- [3] Landry, J., Jaccard, J., 1982. Chimie des eaux libres des marais salants de Salin-de-Giraud (Sud de la France). In: *Géologie Méditerranéenne*. Tome 9, numéro 4, 1982. Nature et genèse des faciès confinés. pp. 329-348.
- [4] France, S., Cornée, A., 1982. Bactéries des saumures et des sédiments des marais salants de-Giraud (Sud de la France). In: *Géologie Méditerranéenne*. Tome 9, numéro 4, 1982. Nature et genèse des faciès confinés. pp. 369-389; 369-89.
- [5] Dulau, N., Trauth, N., 1982 . Etude des dépôts superficiels des marais salants de Salin de Giraud . Relation avec le soubassement , minéralogie et dynamique sédimentaire. *Géologie Méditerranéenne*, 501-20.
- [6] Thomas, M., 1982. Approche géochimique du système sédimentaire des marais salants de Salin-de-Giraud. *Géologie Méditerranéenne*, (Sud de la France) 9(4) 487-500.
- [7] Barry, J.C., et al., 1982. Palynologie et palynofaciès des sédiments récents des marais salants de Salin-de-Giraud. In: *Géologie Méditerranéenne*. Tome 9, numéro 4, 1982. Nature et genèse des faciès confinés. pp. 551-562;
- [8] Alger, G., 1899. Le congrès géographique d ' Alger. In: *Annales de Géographie*, t. 8, n°39, 1899. pp. 277-279.
- [9] Joannon, M., 1980. Le Pays de Ouargla . M . Rouvillois-Brigol - Le pays de Ouargla. Variations et organisation d'un espace rural en milieu désertique. In: *Méditerranée*, troisième série, tome 38, 1-1980. pp. 83-84; 83-4.
- [10] Demnati, F., 2013. Biodiversité et Enjeux Socio-économiques des lacs salés (Chotts et Sebkhias) d'Algérie, Cas du Chott Merouane et Melghir. thèse de doctorat : Sciences Agronomiques : Université Mohamed khider- biskra, 143.
- [11] Busson, G., 1982. Transposition des données sur les marais salants aux grandes accumulations évaporitiques du passé. In: *Géologie Méditerranéenne*. Tome 9, numéro 4, 1982. Nature et genèse des faciès confinés. pp. 563-591.
- [12] National, O., 2006. Compendium National sur les statistiques de l'environnement. *Office National des Statistiques*, p 89.
- [13] Runge, J., 2010. African palaeoenvironments and geomorphic landscape evolution. *Annales de Géographie* vol 107 343-345.
- [14] Lamini, A., Hacini, M., 2012. Étude géochimique et minéralogique des chotts de la région d'El hadjira. Thèse de magistère : Géologie : Université kasdi merbah Ouargla, 121.
- [15] Akkouche, M., 2007. Application de la datation par traces de fission à l'analyse de la thermicité de bassins à potentialités pétrolières. Exemple de la cuvette de Sbaâ et du bassin de l'Ahnet-Nord (plate-forme saharienne occidentale, Algérie). Thèse de doctorat : Marges continentales et bassins : L'université bordeaux-1, 282.
- [16] Arslane Lerar, M., Torre, A.J., 2007. Well evaluation conference Algérie. *Sonatrach et Schlumberge*, 536.
- [17] Daget, P., Emberger, L., Postale, B., Montpellier, F., 1977. Le bioclimat mediterraneen : Caracteres generaux , modes de caracterisation Author (s): Philippe Daget Published by : Springer Stable URL : <https://www.jstor.org/stable/20036991> 34 1-20.
- [18] Gaussen, H., Bagnouls, F., 1952. L ' indice xéothermique. In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, N°222-223, 29e année, Janvier-février 1952. pp. 10-16.

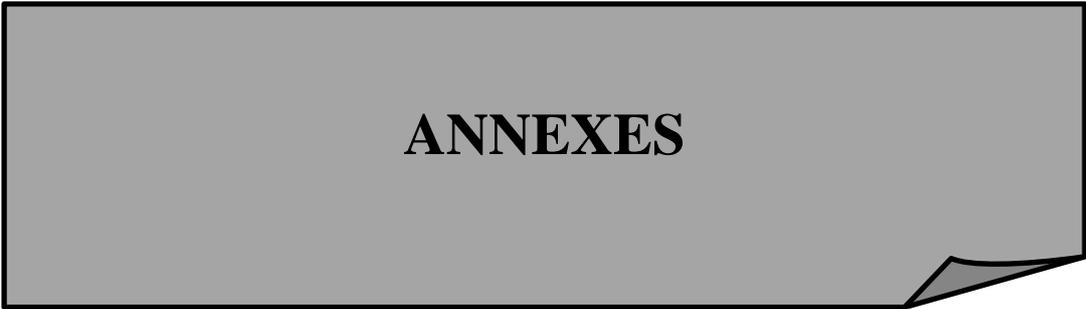
- [19] Martonne, D., 1957. Définition de la problématique.
- [20] Zairi, R., 2008. Etude géochimique et hydrodynamique de la nappe libre du Bassin du Lac Tchad dans les régions de Diffa (Niger oriental) et du Bornou (nord-est du Nigeria). Thèse de doctorat : science de la terre : Université Montpellier II, 208.
- [21] Éric Servat, G.M., 2009. Eau et zones arides.
- [22] Perret, R., 1935. Le climat du Sahara. In: *Annales de Géographie*, t. 44, n°248, 1935. pp. 162-186; doi : <https://doi.org/10.3406/geo.1935.10846> 162–86.
- [23] Ndiaye, P., Bodian, A., Diop, L., et al., 2017. Physio-Géo Évaluation de vingt méthodes d'estimation de l'évapotranspiration journalière de référence au Burkina Faso. *Géographie physique et environnement*. vol.11 1–21.
- [24] Calvet, C., 1979. Interprétation hydrique de la notion d'étage de végétation selon L. Emberger : application au Maroc (Meteoric water and Emberger ' s vegetation levels in Morocco). In: *Bulletin de l'Association de géographes français*, N°464, 56e année, novembre 1979. pp. 331-339; 331–9.
- [25] Hargreaves, G.H., Allen, R.G., 2003. History and Evaluation of Hargreaves Evapotranspiration Equation *J. Irrig. Drain. Eng.* vol.129 53–63.
- [26] Lecarpentier, C., 1975. L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques. In: *Annales de Géographie*, t. 84, n°464, 1975. pp. 385-414; 385–414. doi : <https://doi.org/10.3406/geo.1975.18972>.
- [27] Emberger, L., Marres, P., 1972. Louis Emberger. In: *Méditerranée*, deuxième série, tome 9, 1-1972. pp. 1-4; 1897-1969 1–4.
- [28] Barry, J. Celles., et al., 1975. La cartographie de la végétation à petite échelle en région désertique. *U.E.R. Domaine méditerranéen*, 55–64.
- [29] Fabre, J., 2005. Géologie du Sahara occidental et central. *Tervuren African Geosci. Collect.* 108 1–606.
- [30] Faber, J., 1983. Afrique de l'Ouest. *International Union of Geological sciences*, Nouvelle série n° 1
- [31] Busson, G., 1967. Carte géologique du Bassin Mésozoïque du Sahara Algero-Tunisien et de ses abords. *Muséum national d'histoire naturelle*. planche 2.
- [32] Lelubre, M., Kilian, C., Français, C., et al., 2014. Conrad Kilian géologue et explorateur saharien. Travaux du Comité français d'Histoire de la Géologie, Comité français d'Histoire de la Géologie, 1992, 3ème série (tome 6), pp.75- 85. HAL Id : hal-00938777.
- [33] Chabou, M., 2018. 2ème Colloque International sur la géologie de la Chaîne des Maghrébides et des régions voisines. (*CIGCM 2018*), Université Ferhat Abbas - Sétif 1.
- [34] Flandrin, J., 1957. Le pétrole et l'eau dans le Sahara septentrional algérien. *Revue de géographie de Lyon*, vol.32 293–306.
- [35] Scanlon, et al., 2006. Géologie de l'Afrique du nord 81–5.
- [36] Rognon, P., 1987. Late quaternary climatic reconstruction for the Maghreb (North Africa) *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 58 11–34.
- [37] Saheb, M., Bensaci, E., Nouidjem, Y., Houhamdi, M., 2013. Ecologie de la Sarcelle Marbrée *Marmaronetta angustirostris* (Ménétries, 1832) dans l'éco-complexe de zones humides de la vallée de l'Oued Righ (Sahara Algérie). *Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat*, Section Sciences de la Vie, 2013, n° 35, 141-149.
- [38] Sghari, A., 2016. Le Pliocène, une période de façonnement géomorphologique en Tunisie. Une fin très bouleversée de la crise messinienne de salinité et une morphogénèse intense. *Universitaire européenne*, 239.
- [39] Ould baba sy, M., 2005. Recharge et paléo-recharge du système aquifère du Sahara septentrional. Thèse de doctorat : géologie : Université de Tunis EL Manar, 217.
- [40] Boumaraf, B., Bensaid, R., Marre, A., 2014. Paysages et sols dans la vallée de l'Oued Righ, Sahara Nord Oriental. *Courrier du Savoir – N°18*, Algérie 103–10.

- [41] Youk, N., 1988. Ground water in north and west africa. *Natural resources/water series No.18*, 36.
- [42] Fezzani, Cs., 2003. Système aquifère du sahara septentrional une conscience de bassin. *Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS)*, vol.II 130.
- [43] Gary, N., 2009. Sedimentology and Stratigraphy. *Wiley-Blackwell*, UK, 397.
- [44] Dresch, J., 1939. Structure et relief du Sahara. *In: L'information géographique*, volume 3, n°3, 1939. pp. 111-114 doi : <https://doi.org/10.3406/ingeo.1939.4909>.
- [45] Warren, J.K., 2016. 2016 Evaporites.
- [46] Guiraud, R., Bosworth, W., 2016. Regional Geology and Tectonics : Phanerozoic Passive Margins.
- [47] Guiraud, R., Bosworth, W., 2005. Phanerozoic geological evolution of Northern and Central Africa : An overview 43 83–143.
- [48] Hachicha, M., 2007. Les sols salés et leur mise en valeur en Tunisie. *Sécheresse*, vol.18 45-50. doi: 10.1684/sec.2007.0063 Sécheresse.
- [49] Valorisation, L., 2012. Fascicule de laboratoire.Tunisie : laboratoire CNRSM – LVMU.
- [50] Bishop, L., Fenton, L. K., 2014. Mineralogical characterization by xrd of gypsum dunes at white sands national monument and application to gypsum detection on mars. *Lunar and Planetary Science Conference*, 4–5.
- [51] Bounar, N., 2000. Cours de Microanalyse. 1^{er} Edition : Université de Jijel : Algeria,1–56.
- [52] Sorigi, C., De gennaro, V., 2007. ESEM analysis of chalk microstructure submitted to hydromechanical loading. *Comptes Rendus - Geosci*, 339 468–81.
- [53] Parkhurst, D., L and Appelo, C.A ., 1999. User ' s guide to phreeqc (version 2)- a computer program for speciation , and inverse geochemical calculations. *U.S. Geological survey*, 312.
- [54] Samy, A., Caribsat, S., 2011. Tutoriel d ' utilisation de Surfer 9. *Centre IRD Martinique* 3, France 23
- [55] Fawcett, T.G., Crowder, C.E., Kabekkodu, S.N., Needham, F., Kaduk, J.A., Blanton, T. N., Petkov, V., Bucher , E., 2013. Reference materials for the study of polymorphism and crystallinity in cellulose. *Powder Diffraction*, Vol.28, No. 1 28 18–31.
- [56] Tremblay, D., Barraud , R., Carcaud, N., Davodeau, H., Montembault, D., 2007. Le sel pour une Terre Durable. *La revue du BRGM*,
- [57] Almand, V., 1890. D'Alger à Ouargla. *Adolphe Jourdan, Libr.* 43.
- [58] Boumaraf , B., 2012. Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallée d'oued righ, sahara Nord oriental, Algérie. Thèse de doctorat: Algeria, 121.
- [59] Senoussi, A., 1999. Gestion de l' Espace Saharien en Algérie: Symbiose ou Confrontation entre systèmes Productifs en Milieu Agricole et Pastoral. Thèse de doctorat:
- [60] Aumassip, G., et al., 1991. Bas-Sahara. *in Gabriel Camps (dir.), Baal – Ben Yasla*, Aix-en Provence, Edisud Vol.9.
- [61] Theodore Hammer, U.T., 1987. Saline Lake Ecosystems of the World. *J. Ecol*, 75 580.
- [62] Robert, C. R., 1939. Pays du mzab et région des dayas, étude sur le relief de la dorsale saharienne, 271 41–62.
- [63] Watson, A., 1982. Desert gypsum crusts as palaeoenvironmental indicators. *Unpublished D.Phil Dissertation, University of Oxford*, vol.2 669.
- [64] Youcef, F., Hamdi-aïssa, B., Lamini, K., BOUHADJA, M., 2014. Sur l ' origine des croûtes gypseuses du sahara septentrional algerien : cas de la region de ouargla. *Algerian journal of arid environment*, 4 42–9.
- [65] Lamini, A., Hacini, M., 2018. Geology and geochemistry of endorhoic basin case of Baghdad chott southern of Algeria. *AIP Conf. Proc.* 1968.
- [66] Rognon, P., 1970. Les sols et sédiments hydro-éoliens. 333-358.

- [67] Glennie, K.W., 1970. Desert sedimentary environments. Elsevier publishing company: The Netherlands, 243.
- [68] Xunming ,W., Dong, Z., Yan, P., Yang , Z., Hu, Z., 2005. Surface sample collection and dust source analysis in northwestern China. *Catena* vol.59 (2005) 35–53.
- [69] Djerrab, A., Zedam, R., Defaflia, N., Triki, D., Djelailia, S., Camps, P., Abdessadok, S., Bahra, N., 2012. Sedimentological and magnetic study of an alluvial sequence of the upper pleistocene and holocene of adaila wadi (el ma labiod,tebessa, algeria) and palaeoenvironmental indications. *Quaternaire* vol.23 227–40.
- [70] Edwin, D.M., 1979. Study of Global Sand-Seas. first Edition. USA Washington.D.c, 448.
- [71] Lewis, D.W., McConchie, D., 1994. Practicalal Sedimentology. Second dition, P214.
- [72] Chamley, H., 1989. Clay Sedimentology. *springer*, P623.
- [73] Reineck, H. E., Bir singh, I., 1980. Depositional Sedimentary Environments. Second Edition: New York, 551.
- [74] Scanlon, B.R., Keese, K.E., Flint, A.L., Flint, L.E., Gaye, C.B., Edmunds, W.M., Simmers, I., 2006. Global synthesis of groundwater recharge in semiarid and arid regions. *springer*. 3370 3335–70.
- [75] Courault, D., 1990. Caractéristiques spectrales des principales organisations de la surface des sols du niger 39–47
- [76] Toulemont, M., 1982. Les épigénies siliceuses du gypse lutétien du Bassin de Paris. *In Sciences Géologiques. Bulletin*, tome 35, n°1-2, 1982. Géochimie de la silice. pp. 3-16; 3–16.
- [77] Haddane, A., Hacini, M., Bellaoueur, A., Hamzaoui, A.H., M’Nif, A., 2017. Effect of evaporite paleo-lacustrine facies on the brines geochemistry, economy implication. Case of chott Bagdad El Hadjira Ouargla, South-Eastern Algeria. *Energy Procedia* 119 228–35.
- [78] Perthuisot, J.P., 1981. Les vicissitudes conceptuelles sur la genèse d ’ un bassin salin : la Sebkh el Melah (Tunisie). *HAL Id*: hal-00951448
- [79] Cooke, U., Warrent, A., 1973. Geomorphology in Deserts, P 394 pdf
- [80] Schagerl, M., 2016. Soda lakes of East Africa. *springer*, 408.
- [81] Watson, A., 1987. Desert gypsum crusts as palaeoenvironmental indicators. *Journal of arid environments*. vol 15- P-19-42.
- [82] Abdelfattah, M.A., Shahid, S. A., 2007. A comparative characterization and classification of soils in Abu Dhabi coastal area in relation to arid and semi-arid conditions using USDA and FAO soil classification systems. *Arid L. Res. Manag.* 21 245–71
- [83] Séranne, M., 2009. Les bassins évaporitiques.
- [84] Rognon , P., 1979. Evolution du relief et paléoclimats depuis 40 000 ans sur la bordure nord du Sahara. *In: Bulletin de l'Association de géographes français*, N°462-463, 56e année, Mai-octobre 1979. pp. 205-214.
- [85] Alain Levy, J.A., 1985. Paléo-écologie une nouvelle conception de l’ origine énigmatique des Cerastoderma glaucum quaternaires du Sahara. Note de Alain Levy, presentee par Jean Aubouin. *C. R. Acad. Se. Paris*, vol.30 P21–6.
- [86] Davices, B., Gasse, F., 1988. African wetlands and shallow water bodies humides Zones d’Afrique et lacs peu profonds. Paris : Éditions de l’ORSTOI, 525.
- [87] Hacini, M., Kherici, N., Oelkers, E.H., 2008. Mineral precipitation rates during the complete evaporation of the Merouane Chott ephemeral lake. *Geochim. Cosmochim. Acta* vol.72 1583–97.
- [88] Nezli, I.E., Achor, S., Djabri, L., 2007. Approche géochimique des processus d’acquisition de la salinité des eaux de la nappe phreatique de la basse vallée de l’oued M’ya (Ouargla). *Larhyss J.* 6 121–34.

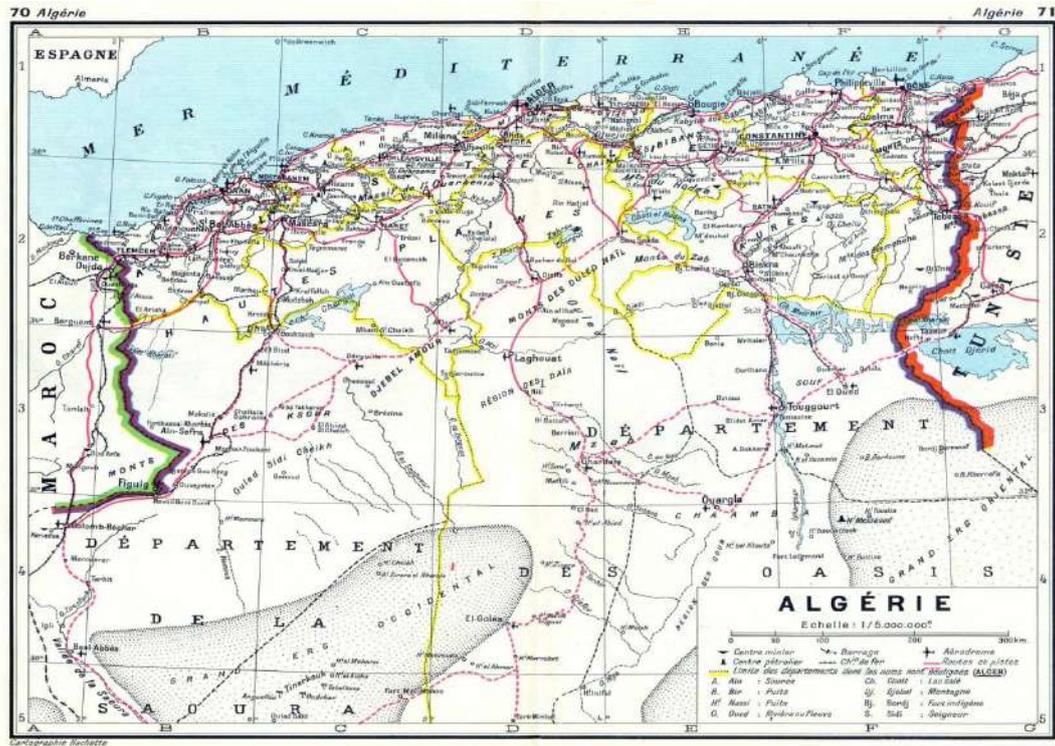
- [89] Merzouk, Z., 2018. Géochimie et potentiel minier du Lithium dans les chotts Sud Algériens : Cuvette de Ouargla, Melghir et Merouane. Thèse de Doctorat : géochimie de surface : université kasdi Merbah Oargla, 138.
- [90] Rouvillois, B., 1980. Le Pays de Ouargla. M. *Méditerranée* vol.38 83–4.
- [91] Didier de Sant Amand, R., 1965. les points d'appui proposés pour l'expérimentation agricole en République du Niger. Paris : IRAT, 76 p. multigr.
- [92] Emmanuel, I., Andrieu, H., Leblois, E., Janey, N., 2016. Influence de la variabilité spatiale des champs pluvieux pour la modélisation pluie-débit de petits bassins versants: une approche par simulation. *La Houille Blanche* 47–55
- [93] Mohamed, A.S., 2012. Approches hydrodynamique et géochimique de la recharge de la nappe du Trarza, sud-ouest de la Mauritanie. Sciences de la Terre. Université Paris Sud - Paris XI, 2012.
- [94] Favreau, G., Leduc, C., 1998. Fluctuations à long terme de la nappe phréatique du Continental Terminal près de Niamey (Niger) entre 1956 et 1997. *Water Resources Variability in Africa during the XXth Century* (proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998), 253–8.
- [95] Toth, J., 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins, *Journal of Geophysical Research*, vol.68, 4795–4812.
- [96] Bekhouche, H., 2004. Rapport final vallée de Ouargla par BG. *Rev. Int. droit comparé* 41 919–26
- [97] Ferchichi, H., 2007. Évaluation des impacts et valorisation de la recharge artificielle et caractérisation géochimique des eaux de la nappe de tébolba (Tunisie orientale). Thèse de master (Tunisie): géologie, 125.
- [98] Coleman, M., 2000. Review and Discussion on the Evaporation Rate of Brines. *Actis Environnemental Services*, 12.
- [99] Rastoul, H., 1954. Modalités et résultats des études sur les gisements de sels de potasse du sud Tunisien. Bulletin économique et social de la Tunisie. *Bulletin économique et social de la Tunisie*, 46-63.
- [100] Hammi, H., 2001. Étude de l'évaporation d'une saumure naturelle : corrélation conductivité-concentrations ioniques (Na⁺ K⁺ Mg²⁺ Cl⁻ SO₄²⁻). *J. Phys. IV France*, vol. 11, 63-70.
- [101] Babel, M., Schreibe, B.C., 2014. Geochemistry of Evaporites and Evolution of Seawater, *Treatise on Geochemistry. Elsevier, 2nd Edition*, 484-548.
- [102] Farid, I., Zouari, K., Kallali, A., 2012. Origine de la salinité des eaux du bassin chougafiya (Tunisie). *Revue des sciences de l'eau Origine*, Vol. 25, 255-74.
- [103] Stigter, K., 2008. Coping with climate risk in agriculture needs farmer oriented research and extension policies, *Agric. Piracicaba, Braz*, vol.65 108–15.
- [104] Intissar, F., Zouari, K., Kallali, A., 2012. Origine de la salinité des eaux du bassin Chougafiya (Tunisie). *Revue des sciences de l'eau Origine*, 25(3), 255–274.
- [105] Valles, V., 1987. Modélisation des transferts d'eau et de sels dans un sol argileux ; application au calcul des doses d'irrigation. *Sci géologiques Mémoire*, vol.79 148.
- [106] Chaib, W., Bouchahm, N., Harrat, N., 2013. Caractérisation hydrogéochimique des eaux géothermales de la nappe du Continental intercalaire de la région d'oued Righ. *Journal Algérien des Régions Arides*, 55–64.
- [107] Karmil, F.Z., Mountadar, S., Rich, A., Siniti, M., 2019. Study of the Effect of Evaporation Temperature on the Qualitative and Quantitative Separation of Marine Mineral Salts : Prediction and Application on the Seawaters of the Atlantic Sea, Morocco, M. *Ezziyyani (Ed.): AI2SD 2018, AISC 913*, pp. 147–161, 2019.

- [108] Aquilano, D., Otálora, F., Pastero, L., García-ruiz, J. M., 2016. Three study cases of growth morphology in minerals : Halite , calcite and gypsum *Prog. Cryst. Growth Charact. Material.* doi: 10.1016/j.pcrysgrow.2016.04.012.
- [109] Peter, H., Erwin, K.,2018. Principles of Electron Optics, Basic Geometrical Optics, *Elsevier*, 1–12.
- [110] Buck , B., King, J., Etyemezian, V., 2011. Effects of Salt Mineralogy on Dust Emissions. *SSSAJ Salton Sea, California*, vol.75, 1958-1973.
- [111] Warren, J.K., Warren, J.K., 2016. Sabkhas, Saline Mudflats and Pans. Springer, Berlin, Heidelberg

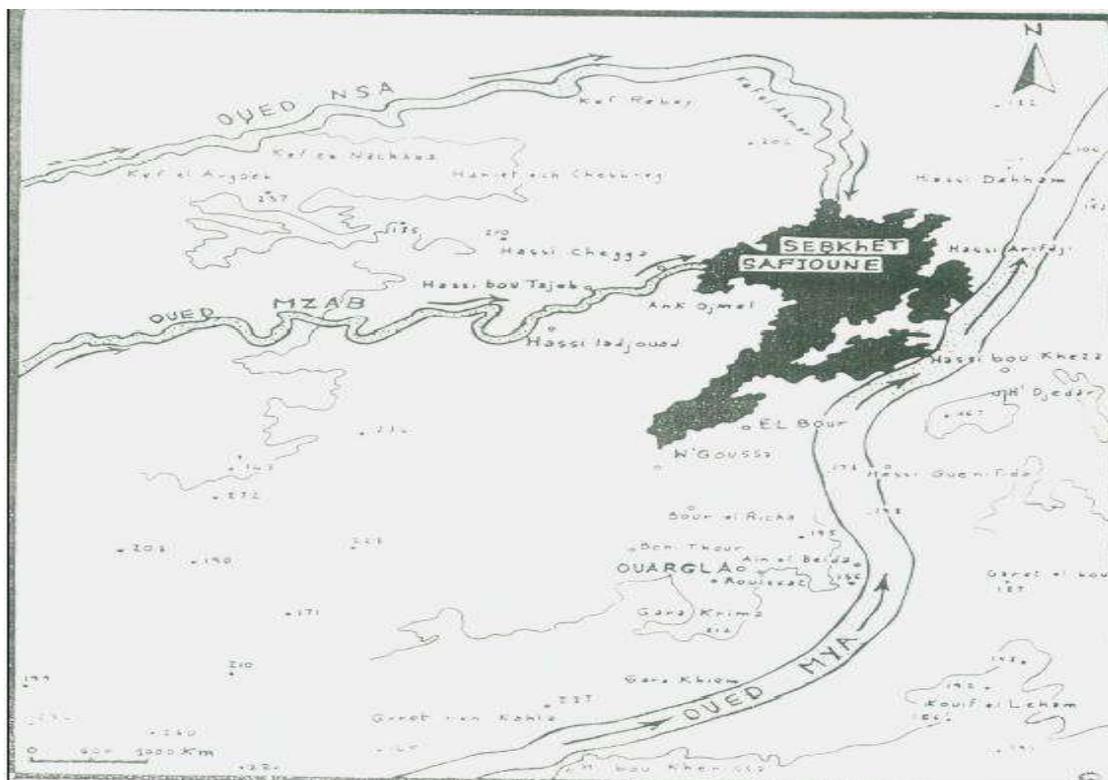


ANNEXES

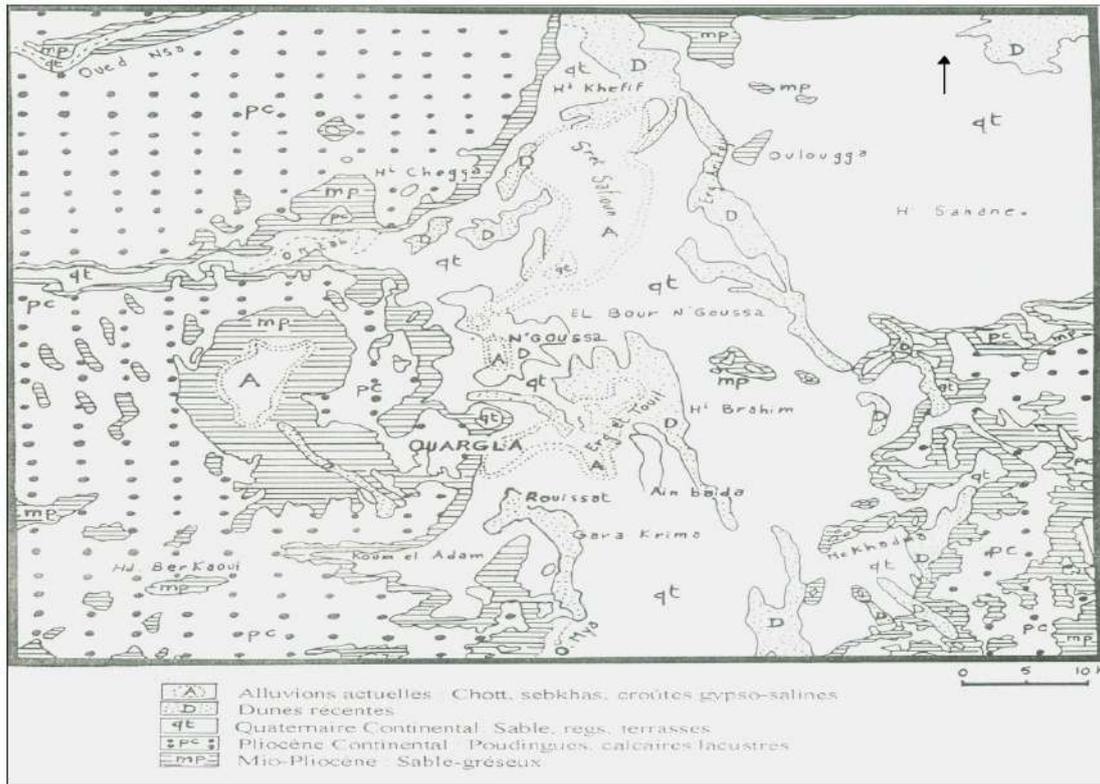
LISTE DES ANNEXES



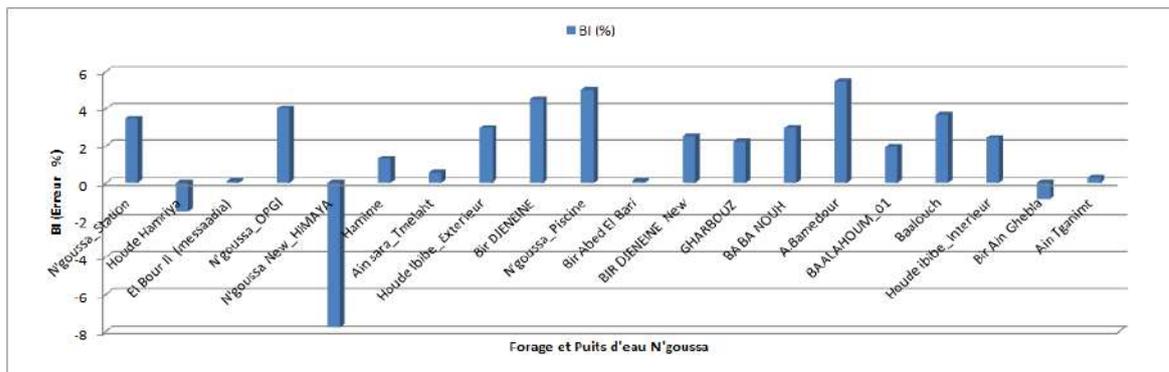
Annexe 01 : Carte géographique de la région de Ouargla.



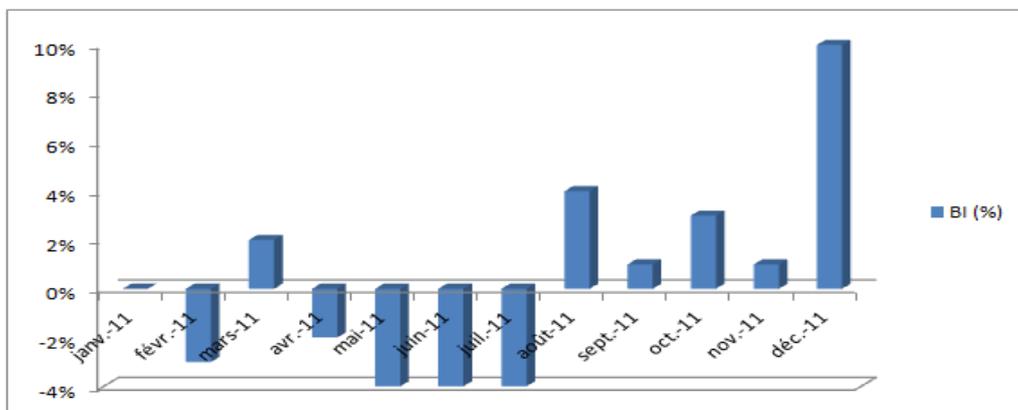
Annexe 02 : Carte Hydrographique de la région d’Ouargla par Abdrahmane 1997.



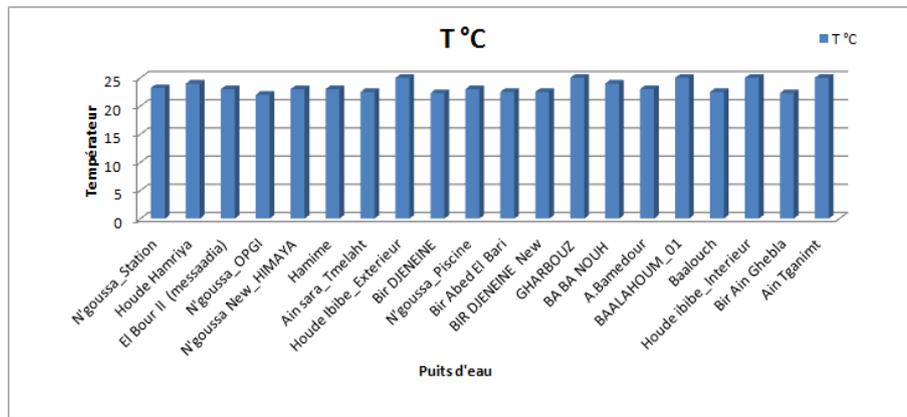
Annexe 03 : Carte géologique de la région d’Ouargla.



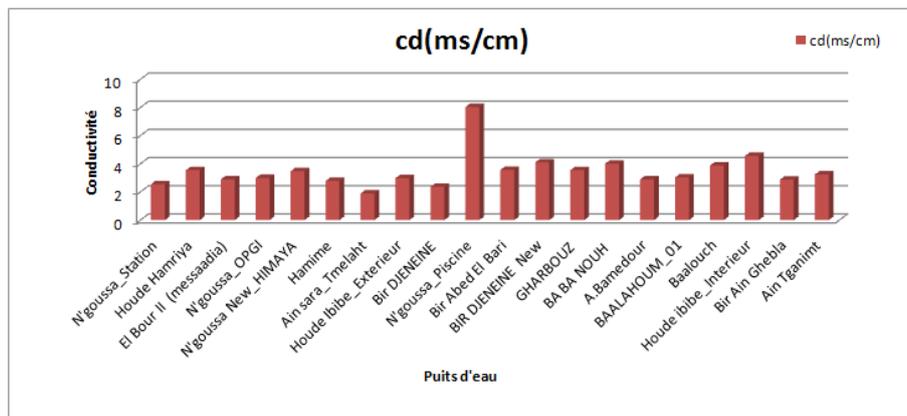
Annexe 04: Balance ionique des puits du complexe terminale N’goussa.



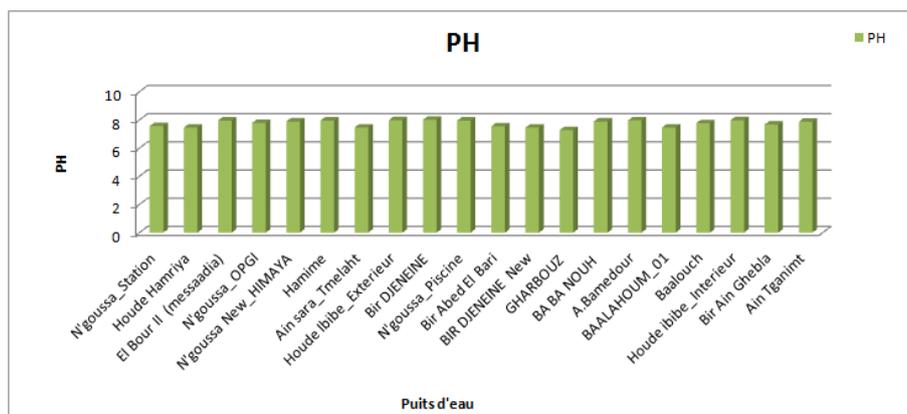
Annexe 05: Balance ionique des échantillons de chott Baghdad.



Annexe 06 : Variation de mesures de température dans les puits de complexe terminale.



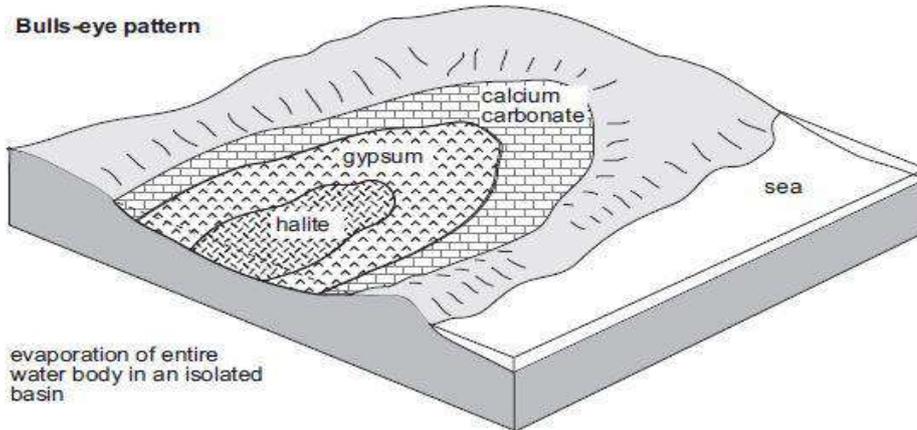
Annexe 07 : Variation de mesures de conductivité électrique en ms/cm dans les puits de complexe terminale.



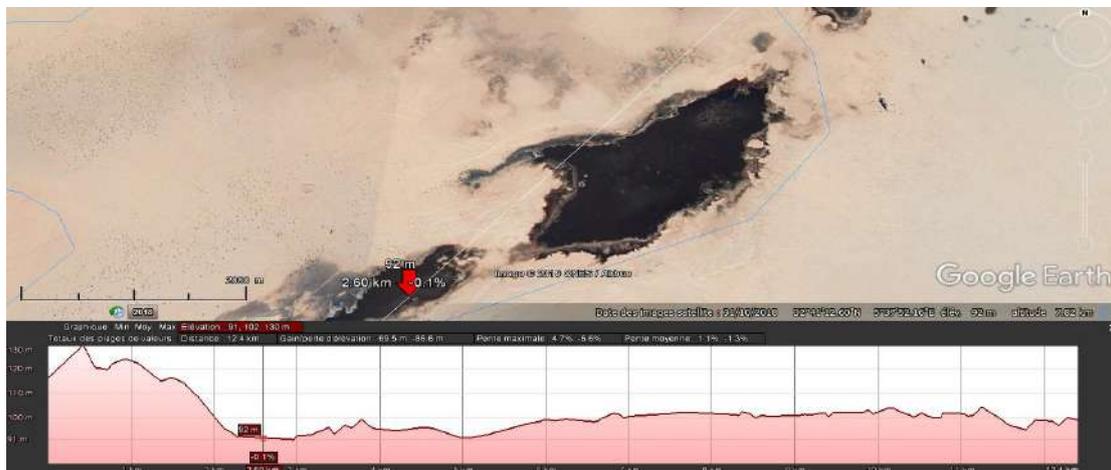
ANNEXE 08: Variation de mesures de PH dans les puits de complexe terminale.

Annexe 09: Différents nappe et aquifère dans sahara Algérienne Tunisie et la Libye

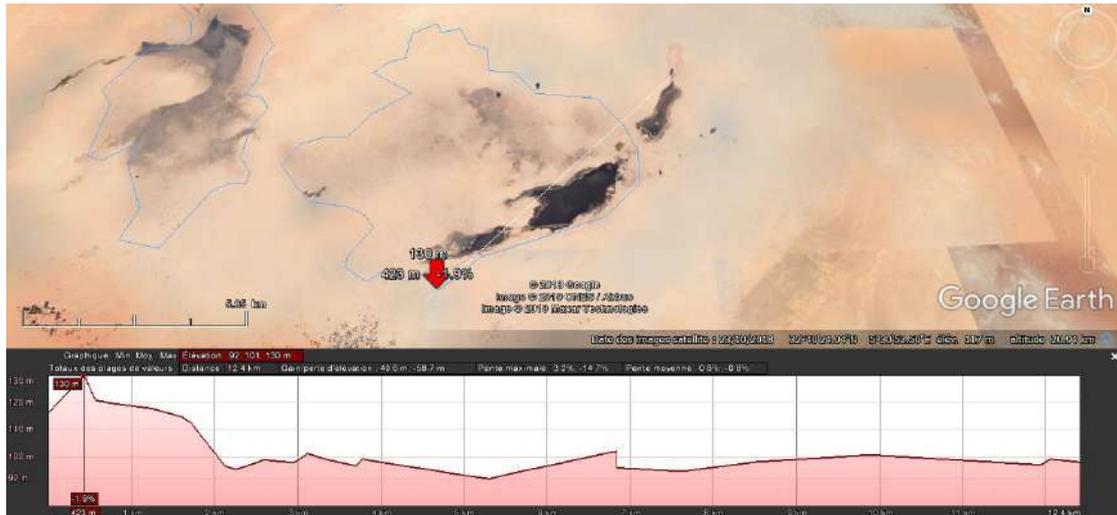
Unité stratigraphique		Aquifères & Aquitards		
		ALGERIE	TUNISIE	LIBYE
Pliocène	Mio-Pliocène	2ème nappe des sables semiperméable	Toit imperméable	aquifère local semiperméable
Miocène		1ère nappe des SABLES semiperméable	Nappe des SABLES du Djerid	aquifère local
Aquitarien		Semi perméable	aquifère non reconnu	aquifère médiocre
Oligocène			Semi perméable	
Eocène Moyen		Nappe des CALCAIRES	Nappe des Calcaires Sup de Nefzaoua	Upper Cretaceous- Paleocene : MIZDA Aquifer
Eocène Inférieur			Semi perméable	
Paléocène			Semi perméable	
			Semi perméable	
Maestrichtien		Imperméable	Nappe Calcaires Inf/Nefzaoua	semiperméable
Campanien			Semi perméable	
Santonien			Semi perméable	
Senonien Inférieur		Nappe du TURONIEN	Nappe du TURONIEN	NALUT Aquifer
Turonien		Imperméable	Imperméable	imperméable
Cénomanién		Nappe du CONTINENTAL INTERCALAIRE	Nappe du CONTINENTAL INTERCALAIRE	Jurassic - Lower Cretaceous : KIKLAH Aquifer
Albien				
Aptien				
Barremien				
Néocomien		eau salée	semi-perméable	
Kimmeridgien		Nappe du Jurassique	Nappe du JURASSIQUE	imperméable
Callovio-Oxfordien				
Bathonien				
Lias		Toit imperméable	Imperméable	
Keuper		Nappe salée du Trias	Nappe du TRIAS	Trias : AZIZIA Aquifer
Muschelkalk				
Bundstandstein				



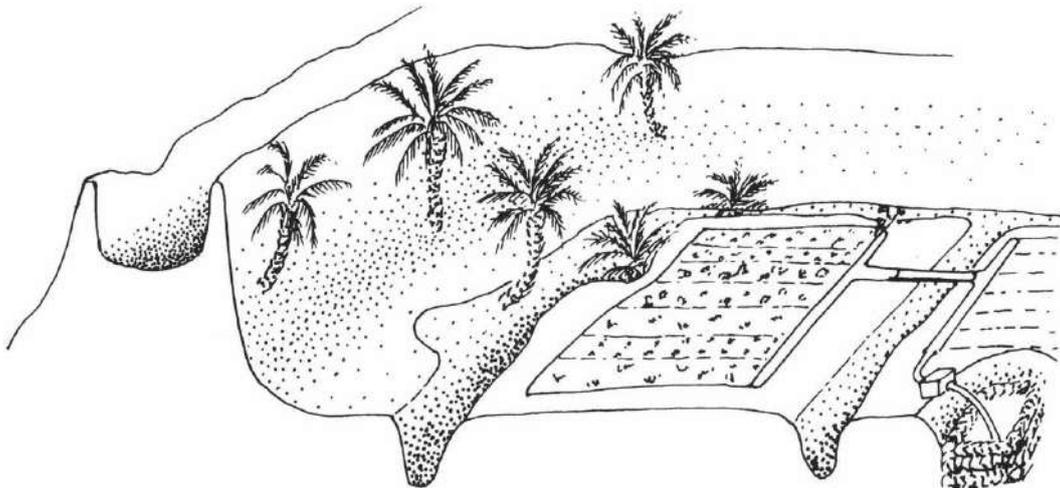
Annexe 10 : Cristallisations des saumures dans les cuvettes fermées.



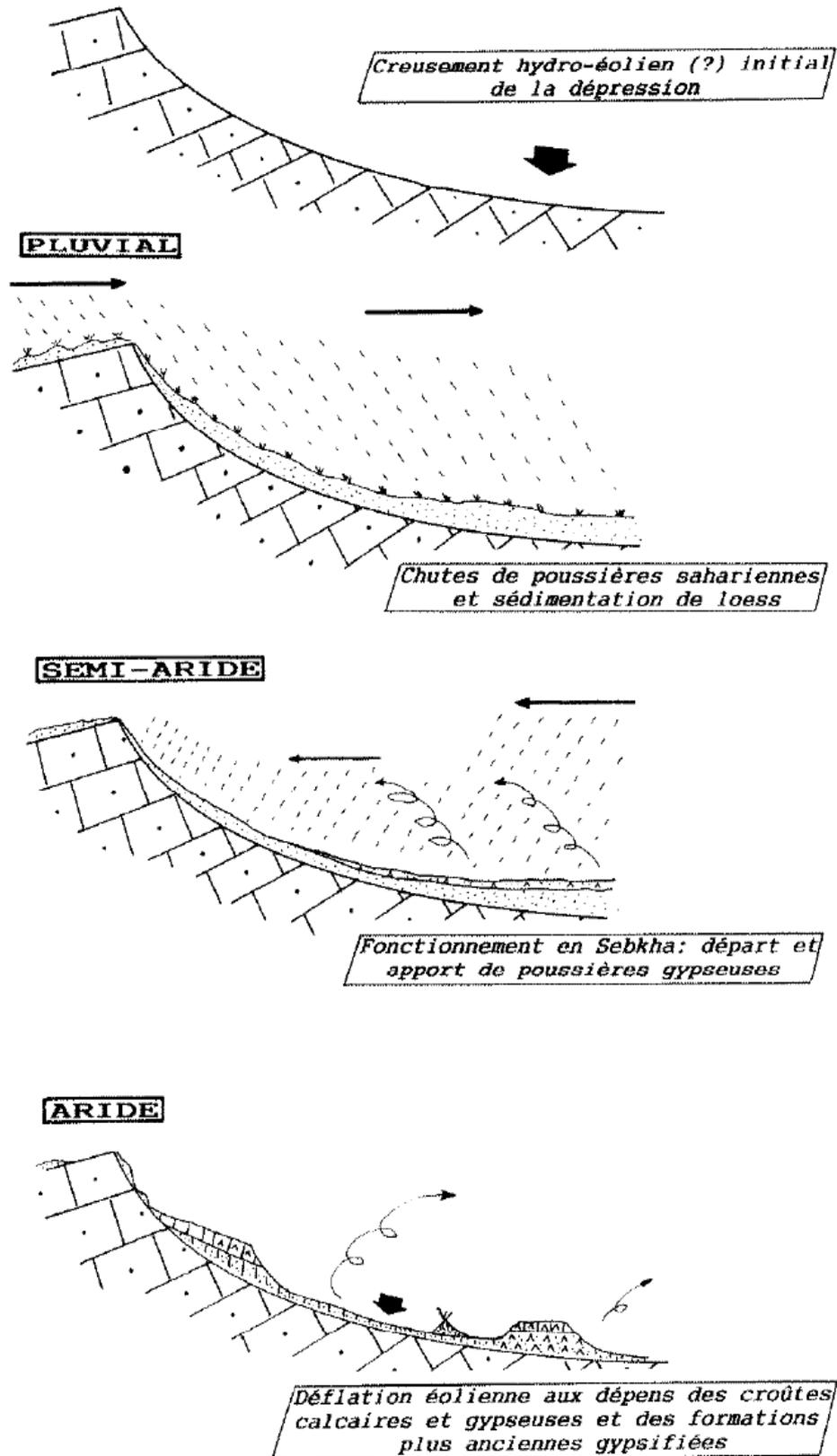
Annexe 11: Le Profile transversale et points le plus base dans chott Baghdad.



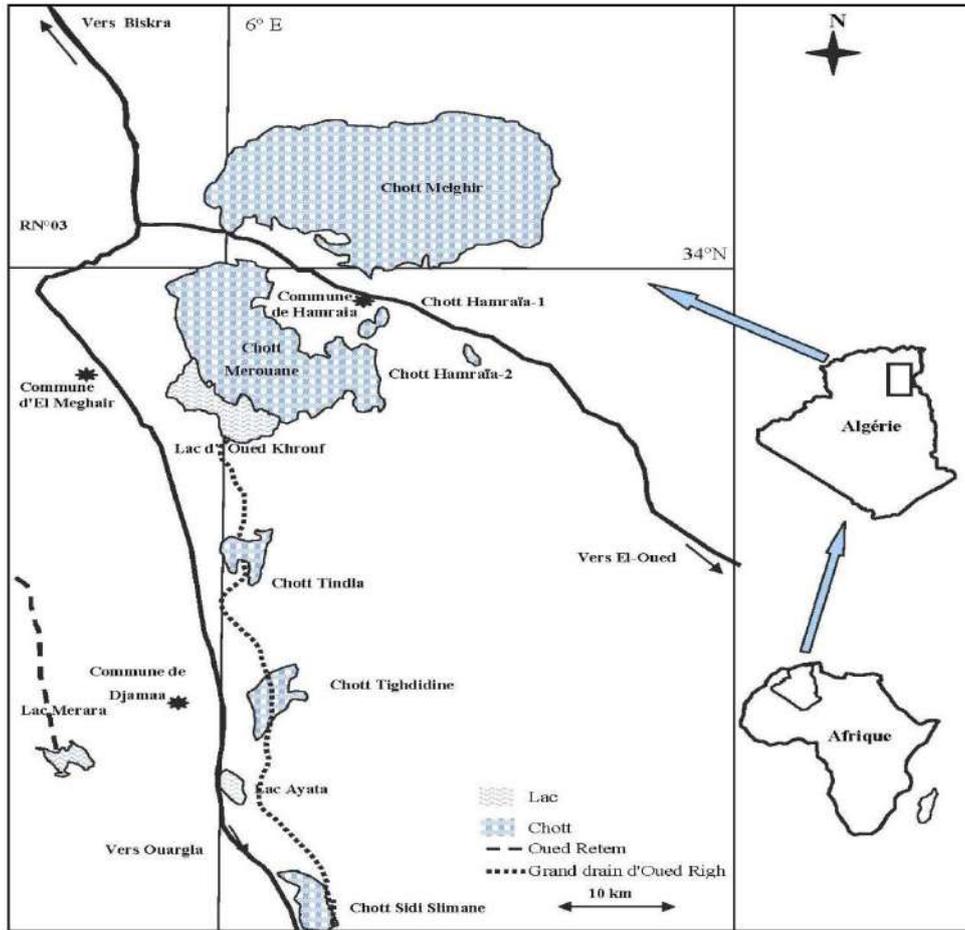
Annexe 11: Le Profile transversale et points le plus haut dans chott Baghdad.



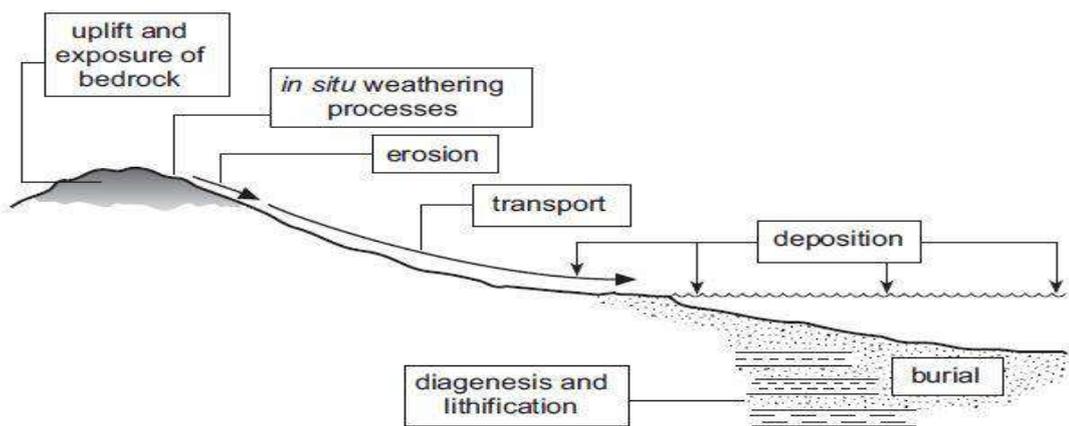
Annexe 12 : L'ancienne système d'irrigation dans la zone de N'goussa.



Annexe 13 : Reconstitution de l'évolution de la sebkha dans les zones aride désertique selon P,Rognon .réf les soles et les sédiment éolien.



Annexe 14 : Principales zones chott et sebkha de sahara septentrionale de Ouargla jusque chott Melghir.



Annexe 15 : Processus de déposition de gypse dans sebkha par déflation



A) - Partie de transition entre Baten et cuvette d'Oued Mya. À l'arrière-plan, de chebka de M'zab et à l'avant, une plaine surpâturée;

B)- Partie septentrionale de cuvette d'Oued Mya. La steppe herbeuse d'esparto est dégradée par une forte action anthropique. Le sol sableux disparaît, dénudant le substrat de grès;

C)- Canal des eaux d'irrigation vers zone de collecte des eaux.

D)- Les fentes de dessiccation dans sebkha de N'goussa

E)- Zone d'agriculture à la berge de sebkha de N'goussa.

F)- Installation de piézomètre et reconnaissance de sole de la région.

Annexe 16 : Principaux paysages de la région étudiée (Photos A. LAMINI)



Annexe 17 : Carottage avec une tarière électrique au centre de sebkha de N'goussa.

Annexes

Annexe 18 : Résultats granulométrique dune sable zone Nord de sebkh N'goussa

Maille du tamis	Diamètre du grain	Refus du tamis			Résultats_Zone Nord
mm	mm	Pesée (g)	Refus du tamis %	Refus du tamis cumulés %	
0	0-0,125	0	0,0	0,0	TOTAL (g) : 1000
0,125	0,125-0,25	0,02	0,0	0,0	Médiane (mm) : 0,72
0,25	0,25-0,5	12,12	1,2	1,2	Grain moyen : 0,72
0,5	0,5-1	934,77	93,5	94,7	d25 (mm) : 0,60
1	1-2	41,75	4,2	98,9	d75 (mm) : 0,86
2	>2	11,34	1,1	100,0	He = d75-d25/2: 0,13

Annexe 19 : Résultats granulométrique dune sable zone sud de sebkh N'goussa

Maille du tamis	Diamètre du grain	Refus du tamis			Résultats_zone sud
mm	mm	Pesée (g)	Refus du tamis %	Refus du tamis cumulés %	
0	0-0,125	0,89	0,1	0,1	TOTAL (g) : 1000
0,125	0,125-0,25	1,85	0,2	0,3	Médiane (mm) : 0,67
0,25	0,25-0,5	183	18,3	18,6	Grain moyen : 0,68
0,5	0,5-1	748	74,8	93,4	d25 (mm) : 0,53
1	1-2	63,11	6,3	99,7	d75 (mm) : 0,84
2	>2	3,15	0,3	100,0	He=d75-d25/2 : 0,16

Annexe 19 : Résultats granulométrique point piézométrique NG_09 dans sebkh N'goussa

Maille du tamis	Diamètre du grain	Refus du tamis			Résultats_NG_09
mm	mm	Pesée (g)	Refus du tamis %	Refus du tamis cumulés %	
0	0-0,125	117,13	11,7	11,7	TOTAL (g) : 1000
0,125	0,125-0,25	91,89	9,2	20,9	Médiane (mm) : 0,83
0,25	0,25-0,5	110,4	11,0	31,9	Grain moyen : 0,84
0,5	0,5-1	247,56	24,8	56,7	d25 (mm) : 0,32
1	1-2	391,5	39,2	95,8	d75 (mm) : 1,38
2	>2	41,52	4,2	100,0	He = d75-d25/2 : 0,53

Annexe 20 : Résultats granulométrique point piézométrique NG_18 dans sebkha

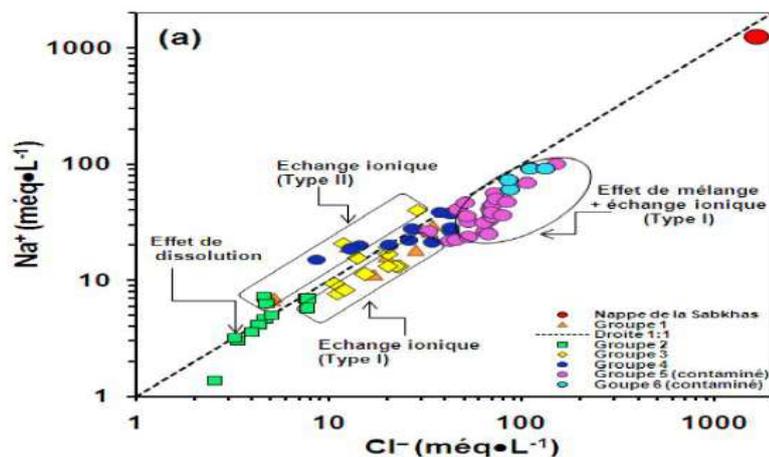
N° goussa

Maille du tamis	Diamètre du grain	Refus du tamis			Résultats_NG_18	
		Pesée (g)	Refus du tamis %	Refus du tamis cumulés %		
mm	mm				TOTAL (g) :	1000
0	0-0,125	44,77	4,5	4,5	Médiane (mm) :	0,67
0,125	0,125-0,25	58,34	5,8	10,3	Grain moyen :	0,68
0,25	0,25-0,5	105	10,5	20,8	d25 (mm) :	0,52
0,5	0,5-1	690	69,0	89,8	d75 (mm) :	0,86
1	1-2	91,09	9,1	98,9	He = d75-d25/2 :	0,17
2	>2	10,8	1,1	100,0		

Annexe 21: Principal processes of chemical weathering

Most important processes	Examples	Principal kinds of rock materials affected
Simple (congruent) Solution —Dissolution of soluble minerals in H ₂ O (direct solution) or in H ₂ O + CO ₂ (carbonation) to yield cations and anions in solution	SiO ₂ + 2H ₂ O → H ₄ SiO ₄ (direct solution) (quartz) (silicic acid) aq CaCO ₃ + H ₂ O + CO ₂ ↔ Ca ²⁺ + 2HCO ₃ ⁻ (Carbonation) (calcite) aq aq	Highly soluble minerals (e.g., gypsum, halite), quartz Carbonate rocks
Hydrolysis (incongruent dissolution) —Reaction between H ⁺ and OH ⁻ ions of water and the ions of silicate minerals, yielding soluble cations, silicic acid, and clay minerals (if Al present)	2KAlSi ₃ O ₈ + 2H ⁺ + 9H ₂ O → H ₄ Al ₂ Si ₂ O ₇ + 4H ₂ SiO ₄ + 2K ⁺ (orthoclase) aq (kaolinite) (silicic acid) aq 2NaAlSi ₃ O ₈ + 2H ⁺ + 9H ₂ O → H ₄ Al ₂ Si ₂ O ₇ + 4H ₂ SiO ₄ + 2Na ⁺ (albite) aq (kaolinite) (silicic acid) aq	Silicate minerals
Oxidation —Loss of an electron from an element (commonly Fe or Mn) in a mineral, resulting in the formation of oxides or hydroxides (if water present)	2FeS ₂ + 15/2O ₂ + 4H ₂ O → Fe ₂ O ₃ + 4SO ₄ ²⁻ + 8H ⁺ (pyrite) (hematite) aq aq MnSiO ₃ + 1/2O ₂ + 2H ₂ O → MnO ₂ + H ₄ SiO ₄ (rhodonite) (pyrolusite) (silicic acid)	Iron- and manganese-bearing silicate minerals, iron sulfides
Other Processes		
Hydration and Dehydration —Gain (hydration) or loss (dehydration) of water molecules from a mineral, resulting in formation of a new mineral	Fe ₂ O ₃ + H ₂ O ↔ 2FeOOH (hydration) (hematite) (goethite) CaSO ₄ · 2H ₂ O ↔ CaSO ₄ + 2H ₂ O (dehydration) (gypsum) (anhydrite)	Ferric oxides Evaporites
Ion Exchange —Exchange of ions, principally cations, between solutions and minerals	K-clay + Mg ²⁺ ↔ Mg-clay + K ⁺ Ca-zeolite + Na ⁺ ↔ Na-zeolite + Ca ²⁺	Clay minerals and zeolites
Chelation —Bonding of metal ions to organic molecules having ring structures	Metal ions (cations) + chelating agent (e.g., secreted by lichens) → H ⁺ ions + chelate (metal ions/organic molecules in solution)	Silicate minerals

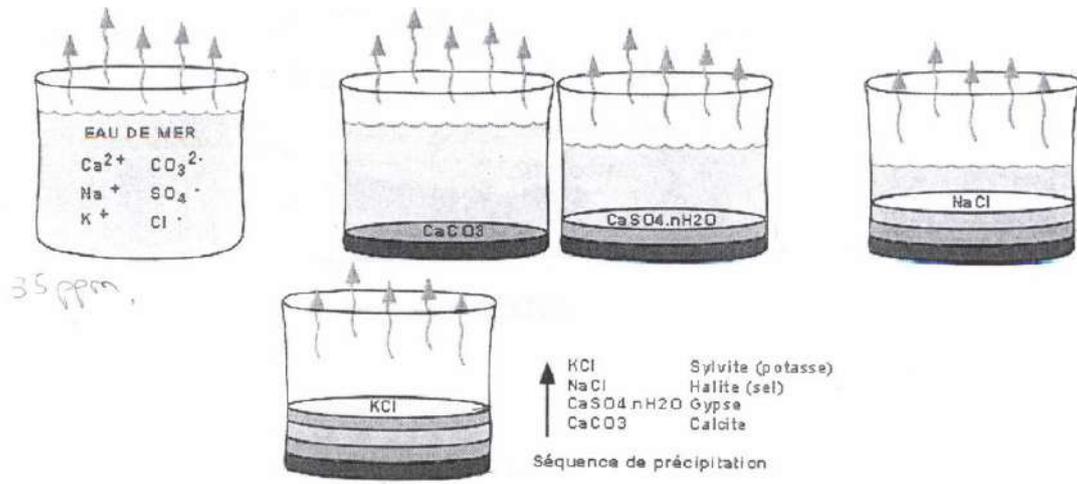
Note: aq = aqueous



Annexe 22 : Concept de représentation des diagrammes triangulaire.

Annexe 23: Liste des minéraux évaporitiques et leurs formules chimiques.

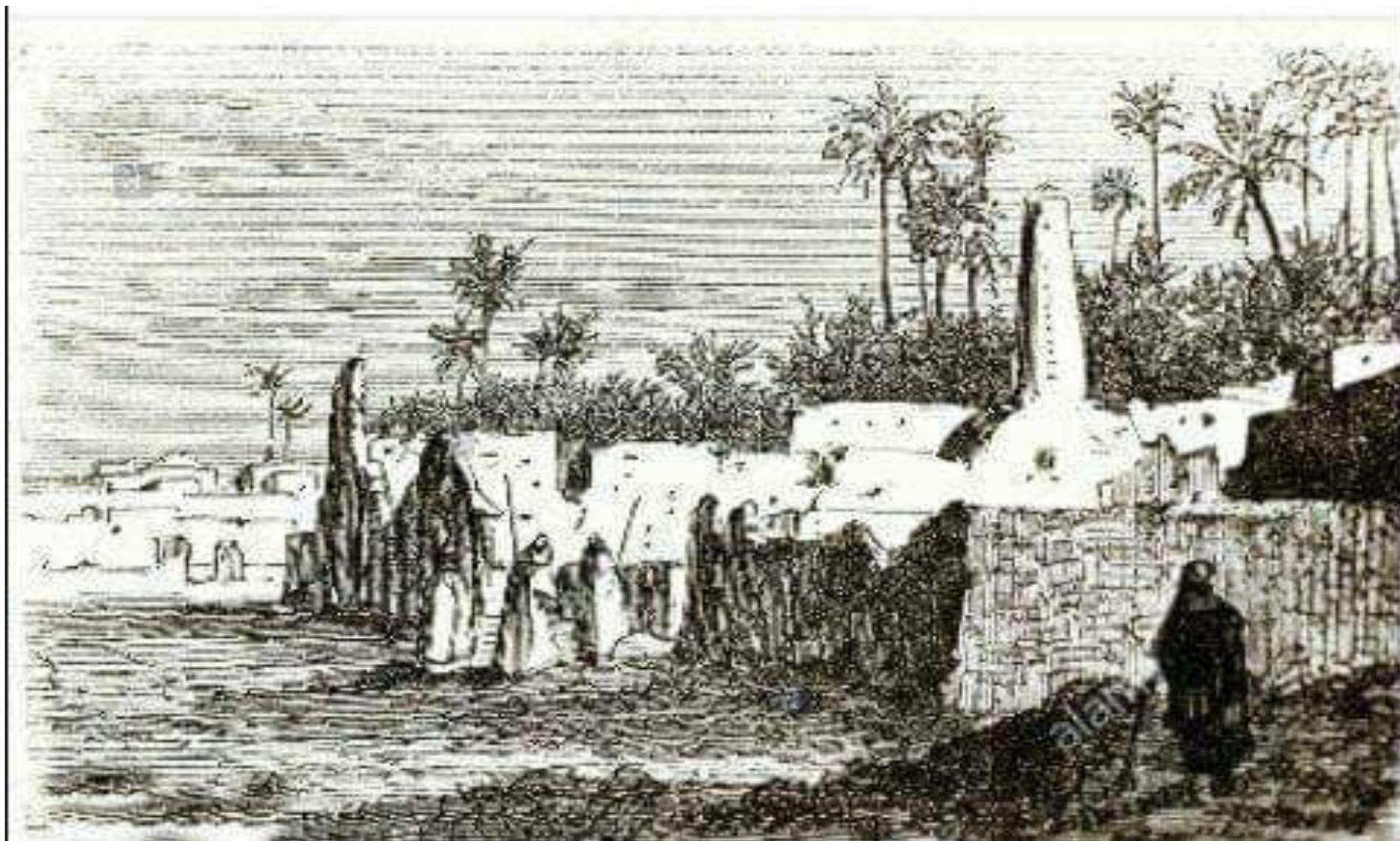
Carbonates	Calcite	CaCO_3	
	Aragonite	CaCO_3	
	Dolomite	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	
	Huntite	$\text{CaMg}_3(\text{CO}_3)_4$	
	Magnesite	MgCO_3	
	Hydromagnesite	$4(\text{MgCO}_3) \cdot \text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
	Nesquehonite	$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
	Pirssonite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
	Gaylussite	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	
	Trona	$\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
	Thermonatrite	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
	Nahcolite	NaHCO_3	
	Natron	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	
	Sulfates	Gypsum	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
		Anhydrite	CaSO_4
		Mirabilite	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
		Thenardite	Na_2SO_4
Epsomite		$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	
Hexahydrate		$\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Starkeyite		$\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Kieserite		$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	
Bloedite		$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Glauberite		$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$	
Kainite		$\text{KCl} \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
Schoenite		$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Leonite		$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Polyhalite		$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
Chlorides	Burkeite	$\text{Na}_6(\text{SO}_4)_2\text{CO}_3$	
	Halite	NaCl	
	Hydrohalite	$\text{NaCl} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	
	Sylvite	KCl	
	Antarcticite	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	Bischofite	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
	Tachyhydrite	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	
Carnallite	$\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$		



Annexe 24 : Ordre de cristallisation des sels dans la nature

Annexe 25 : le paramètre sédimentologique de sable de zone d'étude

	Distribution de diamètre des grains						Paramètre sédimentologique							
	0 - 0.125 mm	0.125 - 0.250 mm	0.25 - 0.5 mm	0.5- 1 mm	1-2 mm	>2 mm	Médiane	Grain moyen	d25	d50	d75	Arrondisse- ment	Skewnes	Kurtosis
	%	%	%	%	%	%	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			
Dune sud	0,1	0,2	18,3	74,8	6,3	0,3	0,67	0,68	0,53	1,06	0,84	0,79	-0,37	
Dune Nord	0,0	0,0	1,2	93,5	4,2	1,1	0,72	0,72	0,60	1,19	0,86	0,83	-0,46	
NG_09	11,7	9,2	11,0	24,8	39,2	4,2	0,83	0,84	0,32	0,65	1,38	0,48	0,21	
NG_18	4,5	4,5	10,5	69,0	9,1	1,1	0,67	0,68	0,52	1,04	0,86	0,78	-0,35	



Ksar de N'goussa.



La ville d'El Hadjira.