

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

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

Département Sciences de la Terre et de l'Univers

MEMOIRE

Présenté par

Fatima ZERROUKI § Abdallah SALHI.

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

En Hydrogéologie

Thème

**Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire
de la gouttière de l'oued Righ, Sahara septentrionale.**

Soutenu le 22 Juin 2017 devant le jury composé de :

Présidente	M ^{me} BOUANANI K.	M.C.A	Université de Tlemcen
Encadreur	M ^{me} BOUDJEMA S.	M.A.A	Université de Tlemcen
Examineur	M ^r KERZABI R.	M.A.A	Université de Tlemcen

Année Universitaire : 2016-2017

DEDICACES

« ...Pour avoir une première idée des choses, il faut voir ces choses ; pour avoir une idée sur un phénomène de la nature. Il faut d'abord l'observer... »
« ...le raisonnement sera toujours juste quand il s'exercera sur des notions exactes et sur des faits précis ; mais il ne pourra conduire qu'à l'erreur toutes les fois que les notions ou les faits sur lesquels il s'appuie seront primitivement entachés d'erreurs ou d'inexactitudes... » Claud Bernard, 1985.

Je dédie ce travail :

*A la mémoire de mon père,
A la mémoire de ma mère qui fut mon premier maître dans l'école de la vie,
Que Dieu ait leur âme,
A mon épouse,
A mon frère et mes sœurs, mes neveux et mes nièces,
A mes amis (es), du passé et d'aujourd'hui, vous êtes si nombreux ! âmes camarades et particulièrement à Fatima ZERROUKI.
A mes collègues de travail,
A mes formateurs depuis l'école élémentaire à ce jour et en particulier, le défunt professeur en géologie Larbi MEKAHLI.
A tous les scientifiques.*

Abdallah

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents en témoignage de l'amour, du respect et de la gratitude que je leur porte et leurs encouragements ;
A mes très chers frères et sœurs ;
A mes nièces et mes neveux ;
A toute ma famille ;
A tous mes ami(e)s ;
A mes collègues de travail ;
A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.*

FATIMA

REMERCIEMENTS

Parvenus au terme de ce travail, nous remercions Dieu de nous avoir donné la santé, la patience et les moyens, afin que nous terminions ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer en premier lieu nos sincères remerciements à notre directrice de recherche **M^{me} S. Boudjema** de nous avoir consacré son temps et son expérience, et surtout par ses conseils et son aide, durant la réalisation de ce travail.

Nous remercions également tous nos formateurs qui ont contribué à notre formation. La patience a été aussi, la vertu de tous ceux qui nous entourent et qui ont su nous tenir là quand il le fallait, surtout les plus proches.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **M^r. A. Boudjema** pour son sens de l'orientation et pour sa patience envers nous durant tout ce temps écoulé et qui fut difficile sans sa persévérance et ses encouragements.

Nos vives gratitude et nos sincères remerciements s'adressent également à Madame et Monsieur les membres du jury : **M^{me} K. Bouanani** pour l'honneur qu'elle nous a fait, en acceptant de présider notre jury de soutenance, **M^r. R. Kerzabi** de nous avoir fait l'honneur d'examiner ce travail.

Nos remerciements s'adressent aussi au personnel de l'A.N.R.H d'Ouargla, en particulier à **M. S. Ben Hamida** d'avoir mis à notre disposition la documentation nécessaire à l'élaboration de ce travail.

Enfin, nous nous saurions exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes, qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Au nom de Dieu le Clément le Miséricordieux

« Beni sois-tu ! firent les Anges. Nous ignorons toute science, hormis l'enseignement reçu de toi, car tu es l'omniscient, le sage » Le Coran, sourate El-Bakara ; verset 32.

Louange à Dieu.

Prière et salut pour son prophète Mohamed.

النوعية الهيدروجيوكيميائية للطبقة المائية للمتداخل القاري لوادي ريغ، الصحراء الشمالية الجزائرية

ملخص

تنتمي منطقة وادي ريغ إلى الصحراء الجنوبية، وبالضبط إلى الصحراء الدنيا المعروفة بطقسها الجاف. حيث أن الموارد المائية الجوفية تعتبر مستحاثه، قليلاً أو نسبياً متجددة: وهي المركب النهائي والمتداخل القاري، إذ نتج عن الاستغلال المفرط للطبقة المائية للمركب النهائي، والطبقة المائية السطحية انخفاض في مستوى منسوب المياه، ورداءتها من حيث النوعية، كما أن عدم وجود مخز للمياه أدى إلى تفاقم ظاهرة صعودها إلى السطح.

تهدف هذه الدراسة إلى تشخيص نوعي للطبقة المائية للمتداخل القاري للمنطقة الوسطى وادي ريغ، والتي تكونت في التشكيلات الصخرية للعصر الطباشيري السفلي. بصفة عامة تدفق هذه المياه يكون في اتجاهين: الأول من الشمال نحو الجنوب بالمنطقة الغربية، والثاني من الغرب نحو الشرق بالمنطقة الشرقية.

نتائج التحاليل الفيزيوكيميائية للحملتين 2012 و 2010 تبين التركيز الفلزّي المرتفع لعدة عناصر، والذي يفوق الحد المسموح به من طرف المعايير الوطنية، مما يفسر التركيز المعدني الكبير الموجود في هذه المياه. من الناحية الفيزيائية تصنف هذه المياه في خانة المياه الجيوحرارية ذات الطاقة الوسطية نظراً لحرارتها المرتفعة والتي تفوق أحياناً 60 درجة مئوية، كما تتميز بحموضة معتدلة وناقلية عالية نسبياً. أيضاً تحليل الرسومات البيانية (Scholler-Berkaloff، Piper) يظهر عدة تصانيف كيميائية مختلفة وكذلك بعض الحالات الشاذة المتمثلة في التغيير في التصانيف الكيميائية لبعض التنقيبات التي تعود إلى خلط مياه المتداخل القاري مع مياه والمركب النهائي ويمكن حتى المياه السطحية. التوزيع الفضائي للعناصر الكيميائية للطبقة المائية القارية يبين من جهة صحة الفرضية السالفة الذكر المتمثلة في صعود المياه من الطبقة المائية القارية إلى مياه المعقد النهائي والتي تليها ومن جهة أخرى أن أصل هذه التصانيف متعلق بطبيعة التكوينات الجيولوجية التي تحوي المياه. بصفة عامة نوعية المياه المدروسة هي من رديئة إلى صالحة للسقي، إلا أنه لا ينصح باستعمالها للشرب قبل المعالجة. وفي الأخير تمكنا من تسليط الضوء على بعض النصائح التي يجب اتباعها من أجل التخفيض من ظاهرة صعود المياه، وبالأحرى المحافظة على نوعية المياه الجوفية للمتداخل القاري من كل احتمال تلوث أو خلط مياه مختلف الطبقات المائية.

الكلمات المفتاحية: وادي ريغ، المتداخل القاري، الماء الصالح للشرب، السقي، تصنيفات كيميائية، صعود المياه.

CARACTERISATION HYDROGEOCHIMIQUE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE DE LA GOUTTIERE DE L'OUED RIGH, SAHARA ALGERIEN SEPTENTRIONALE.

Résumé :

La région de l'Oued Righ, fait partie du Sahara Septentrional, plus précisément du Bas Sahara connu par son climat hyper-aride. Les ressources en eaux souterraines sont essentiellement fossiles, peu ou relativement renouvelables ; à savoir le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Or, la surexploitation de la nappe du Complexe Terminal, ainsi que la nappe phréatique se traduit par une baisse des niveaux piézométriques, dégradation qualitative de la ressource et en l'absence d'un exutoire, le phénomène de remontée des eaux ne cesse de prendre l'ampleur.

Ce présent travail a pour but de donner un diagnostic qualitatif de la nappe profonde du Continental Intercalaire de la partie centre de la vallée de l'Oued Righ. Cette nappe est contenue dans les formations du Crétacé inférieur. L'écoulement s'effectue d'une manière générale selon deux directions : l'une du Nord vers le Sud, dans la partie occidentale et l'autre de l'Ouest vers l'Est, dans la partie orientale.

Les résultats des analyses physico-chimiques des deux campagnes 2010 et 2012, montrent des concentrations dépassant largement les normes algériennes pour la majorité des éléments chimiques, ce qui explique la forte minéralisation rencontrée, ainsi que la dureté élevée. Il a été constaté que ces eaux sont classées parmi les eaux géothermales à basse énergie, vu leurs températures élevées, qui dépassent parfois les 60°C, elles y sont caractérisées par un pH neutre et une conductivité relativement élevée. En outre, il en découle de l'analyse graphique des diagrammes de Piper et ceux de Schöeller – Berkaloff, plusieurs types de faciès chimiques distincts ainsi que des anomalies de changements des faciès chimiques de certains forages qui pourraient être expliquées par la contamination des eaux de la CI par celles du CT et probablement même de la nappe phréatique en faveur des tubages des forages affectés par le dépérissement.

La répartition spatiale des éléments chimiques de la nappe du Continental Intercalaire affirme d'une part l'hypothèse avancée d'une éventuelle drainante ascendante favorisant le contact franc entre les eaux de la CI et celles des nappes sus-jacentes, d'autres part que l'origine de ses faciès est fortement liée à la nature lithologique des formations, au sein de laquelle les eaux séjournent. Dans l'ensemble, ces eaux sont médiocres à admissibles pour des fins d'irrigation, leur utilisation pour la consommation humaine, avant traitement demeure déconseillée. Cela a permis d'en tirer des recommandations que nous avons finalement proposées et qui visent à atténuer le phénomène de la remontée des eaux, d'autant plus qu'à la préservation de la qualité des eaux de la nappe du continental intercalaire pour toute contamination éventuelle.

Mots clés : Oued Righ, Continental Intercalaire, potabilité, irrigation, faciès chimique, remontée des eaux.

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE GROUNDWATER OF CONTINENTAL INTERCALARY OF THE GUTTER OF THE OUED RIGH, NORTEHEN SAHARA ALGERIAN.

Abstract :

The region of Oued Righ, is part of the Northern Sahara, more precisely of the Low Sahara, known for its very-arid climate. Groundwater resources are predominantly fossil, somewhat, or relatively renewable; namely the Terminal Complex and the Continental Intercalary. However, the overexploitation of the aquifer of the Terminal Complex, and the unconfined aquifer, results in a decrease in piezometric levels, qualitative degradation of the resource and in the absence of an outlet, and the constant growth of the phenomenon of upwelling.

This work aims to give a qualitative diagnosis of the deep aquifer of the Continental Intercalary, of the central part. This aquifer is contained in the lower Cretaceous formations. The flow is generally in two directions: one from the North to the South, in the western part and the other from the West to the East, in the eastern part.

The results of the physicochemical analyses show concentrations far exceeding Algerian standards for most of the chemical elements, which explains the high mineralization encountered, as well as their high hardness. It has been found that these waters are classified as geothermal waters, because of their high temperatures, sometimes exceeding 60 ° C, characterized by a neutral pH and relatively high conductivity. Moreover, from the graphical analysis of the Piper diagrams and those of Schöeller - Berkloff, several types of distinct chemical facies have been found out. As well as anomalies of the chemical facies of certain drillings which could be explained by the contamination of waters of CI by those of the CT and potability even the groundwater in favor of the intubations of the drillings affected by the decay.

The spatial distribution of the chemical elements of the Continental Intercalary aquifer confirmed that the origin of its facies is strongly connected to the lithological nature of the formations, within which the waters stay. By and large, these waters are mediocre to be eligible for irrigation purposes, their use for human consumption before treatment is unadvisable. This made it possible to draw recommendations that we finally proposed and which aim to mitigate the phenomenon of upwelling, and especially to preserve water quality.

Keywords: Oued Righ, Continental Intercalary, potability, irrigation, chemical facies, upwelling.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION.....	1
--------------------------	----------

CHAPITRE I : GENERALITES

I.SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE :	2
II.APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE :	2
III. APPERCU MORPHOSTRUCTURALE ET HYDROGRAPHIQUE :.....	5

CHAPITRE II : CONTEXTE GEOLOGIQUE

I.CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL :	7
A.Limite du Continental Intercalaire :	7
B.Rétrospective tectonique :	9
II.CONTEXTE GEOLOGIQUE LOCAL :	10
A.Géologie de la gouttière d'Oued Righ :	10
B.Lithostratigraphie de la région d'étude :	12
1. Le Mésozoïque :	12
2. Le Cénozoïque :	12
3.Le Quaternaire :	13
CONCLUSION :	16

CHAPITRE III : CONTEXTE CLIMATIQUE

INTRODUCTION.....	17
I.PRECIPITATIONS :	17
A.Etude de la variabilité inter- annuelle des précipitations :	17
B.Etude des variations pluviométriques mensuelles :	18
C.Etude des variations pluviométriques saisonnières :	19
II.TEMPERATURES :	19
A. Températures moyennes annuelles	20
B.Températures moyennes mensuelles :	20
III.LA VITESSE DU VENT.....	21
IV.L'HUMIDITE	22
V.ETUDE DU CLIMAT.....	23
A.Méthode graphique de Bagnouls et Gausson :	23
B. Les indices climatiques :	24
1.Méthode de De Martonne.	24
CONCLUSION	26

CHAPITRE IV : CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

INTRODUCTION :	27
I.LES DIFFERENTES NAPPES DANS LA REGION :	28
A.La nappe phréatique :	29
B.La nappe du Complexe Terminal :	29
1.Caractéristique principales :	30
C.La nappe du Continental Intercalaire :	31
1.Caractéristiques principales de la nappe du CI :	31

2.Alimentation :	31
3.Ecoulement :	33
4.Les exutoires :	33
5.Estimation des réserves :	34
II.HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE :	35
A.Piézométrie :	35
B. Evolution piézométrique :	35
C.Paramètres hydrodynamiques de la nappe albienne CI :	37
CONCLUSION :	39

CHAPITRE V : HYDROGEOCHIMIE

INTRODUCTION.....	40
I.CONTROLE DES ANALYSES CHIMIQUES PAR LA BALANCE IONIQUE.....	40
II.INTERPRETATION DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES.....	41
A. Les normes de potabilité :	41
B. Les Paramètres physiques :	41
1.Température :	41
2.Potentiel d'hydrogène (pH) :	42
3.Conductivité électrique :	43
4.Minéralisation :	44
5.Dureté totale :	47
6.Résidu sec :	48
C. Les Paramètres chimiques.....	49
1. Calcium (Ca^{++}) :	49
2. Magnésium (Mg^{++}) :	51
3.Sodium (Na^+) :	53
4.Potassium (K^+) :	55
5.Chlorures (Cl^-) :	57
6.Sulfates (SO_4^{--}) :	59
7.Bicarbonate (HCO_3^-) :	61
D. Classification des eaux naturelles.....	63
1.Diagramme de Piper.....	63
2.Diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	65
3.Aptitude des eaux de la nappe du CI, à l'irrigation.....	68
a.Le taux d'absorption du sodium (SAR) :	68
b.Le coefficient du pourcentage de Sodium (Na^{++}) :	72
CONCLUSION :	74

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE.....	75
---------------------------------	-----------

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

LISTE DES FIGURES

Fig.1: Situation géographique de la vallée de l'Oued Righ (Google Earth., 2016).....	3
Fig.2 : Situation géographique du secteur d'étude.	3
Fig.3: Carte géologique du Sahara septentrionale (OSS, 2003)..	8
Fig.4 : Coupe synthétique géologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972).	9
Fig.5 : Coupe géologique synthétique N-S passant par la cuvette secondaire saharienne et par le bassin de l'Oued Righ ,l'échelle verticale n'est pas défini (CORNET A.1962, modifier).....	11
Fig.6 : Lithostratigraphie synthétique de la région d'étude (SCHLUMBERGER ,1990).....	14
Fig.7: Esquisse de la carte géologique de la région de l'Oued Righ, digitalisée par ce travail à partir du jeu de carte géologiques sud et nord constantinois 1.500.000 °.....	15
Fig.8 : Variations interannuelles des précipitations, à la station de Touggourt(1975-2016).....	17
Fig.9 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles	18
Fig.10 : Histogramme des précipitations saisonnières.....	19
Fig.11 : Courbe des variations des températures annuelles de la station de Touggourt (1975-2016)....	20
Fig.12 : Histogrammes des températures moyennes mensuelles station de Touggourt (1975-2016) ..	21
Fig.13 : Histogramme de distribution des vitesses moyennes mensuelles du vent de la station de Touggourt (1975-2016).....	22
Fig.14 : Histogramme des variations d'humidité moyennes mensuelles de la station de Touggourt(1975-2016).....	23
Fig.15 : Diagramme pluviothermique de la station de Touggourt (1975-2016).....	24
Fig.16 : Abaque pour le calcul de l'indice d'aridité de <i>de Martonne</i>	25
Fig.17 : Carte montrant l'étendu du SASS (J.O.PETERSEN, 2014)..	28
Fig.18 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)..	29
Fig.19 : Coupe hydrogéologique Nord- Sud du Complexe Terminal du Bas Sahara (UNESCO, 1972).....	30
Fig.20 : Carte des zones d'infiltrations et de ruissèlement du CI à partir des données de OUELD BABA SY, 2005 in J.O.PETERSEN, 2014.	33
Fig.21 : Carte piézométrique de référence en 1950 (données OSS, 2003) et principales directions d'écoulement, zones de recharges et d'exutoires majeurs, (in J.O.PETRESEN, 2014).	34
Fig.22 : Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional (UNESCO, 1972 modifiée)....	35
Fig.23 : Rabattement nets en 2050 (OSS, 2003).....	36
Fig.24 : Niveau piezometrique en 2050 (OSS,2003).....	36
Fig.25 : Conditions aux limites (OSS ,2003).....	38
Fig.26 : Histogrammes des températures de l'eau de la nappe du CI.....	42
Fig.27 : Histogrammes des pH de l'eau de la nappe du CI.	42
Fig.28 : Histogrammes des conductivités électriques des eaux de la nappe du CI.....	43
Fig.29 : Carte d'iso-conductivité.	44
Fig.30 : Carte d'iso-minéralisation	46
Fig.31 : Histogrammes des TH de la nappe du CI.....	48
Fig.32 : Histogrammes des TDS des eaux de la nappe du CI.....	48
Fig.33: Histogrammes des concentrations en Ca ⁺⁺ de la nappe du CI.....	49
Fig.34 : Carte d'iso-teneur en Calciums.	50
Fig.35 : Histogrammes des concentrations en Mg ⁺⁺ de la nappe du CI.	51
Fig.36 : Carte d'iso-teneur en Magnésium.	52
Fig.37 : Histogrammes des concentrations en Na ⁺ de la nappe du CI.....	53

Fig.38 : Carte d'iso-teneur en Sodiums.	54
Fig.39 : Histogrammes des concentrations en K^+ de la nappe du CI.....	55
Fig.40 : Carte d'iso-teneur en Potassiums.	56
Fig.41 : Histogrammes des concentrations en Cl^- de la nappe du CI.	57
Fig.42 : Carte d'iso-teneur en Chlorures.	58
Fig.43 : Histogrammes des concentrations en SO_4^{2-} de la nappe du CI.	59
Fig.44 : Carte d'iso-teneur en Sulfates.	60
Fig.45 : Histogrammes des concentrations en HCO_3^- de la nappe du CI.....	61
Fig.46 : Carte d'iso-teneur en Bicarbonates.	62
Fig.47 : Diagramme de Piper représentant le chimisme des eaux de la nappe du C.I64	64
Fig.48 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff représentant le chimisme des eaux de la nappe du C.I de la vallée d'Oued Righ moyen.	66
Fig.49 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff représentant le chimisme des eaux de la nappe du C.I de la vallée d'Oued Righ moyen.	67
Fig.50 : Diagramme de classification des eaux d'irrigation (Riverside).	71
Fig.51 : Diagramme de Wilcox.....	73

LISTE DES PHOTOS

Photo.1: Exemple de butte témoin isolée, au fond le chott Mérouane (Cliché BOUMARAF, 2012)....	4
Photo.2: Le Chott Mérouane(Cliché BOUMARAF,2012)	4
Photo.3: Traces de ravinement vers la Sebkha, (Cliché Boumara, 2012).....	5
Photo.4: Le canal de l'Oued Righ(CRSTRA, 2010).....	6

LISTE DES TABLEAUX

Tab.1 : Les étapes probables du tectonique dans le Sahara algérien (KARPOFF R., 1952).	10
Tab.2 : Coordonnées de la station de Touggourt.	17
Tab.3 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles (mm).	18
Tab.4 : Répartition des précipitations saisonnières (mm).	19
Tab.5 : Répartition des températures moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975-2016) .	20
Tab.6 : Les vitesses moyennes mensuelles du vent de la station de Touggourt (1975-2016).	21
Tab.7 : Valeurs moyennes mensuelles d'humidité de la station de Touggourt (1975-2016).	22
Tab.8 : Précipitations et températures moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975-2016)	23
Tab.9 : Valeurs des indices d'aridité mensuelle.	25
Tab.10 : Synthèse régionale des différents aquifère de la région d'étude, échelle arbitraire (ANRH/Ouargla).....	32
Tab.11 : Quelques données sur le grand bassin SASS, OSS (2003)	32
Tab.12 : Données générales sur la nappe du CI (BELKSIER M.S, 2009).	37
Tab.13 : Valeurs de la balance ionique en 2010 et 2012.	41
Tab.14 : Calcul de la minéralisation à partir de la conductivité électrique.....	45
Tab.15 : Relation entre la conductivité électrique et la minéralisation.....	45
Tab.16 : Valeurs de la minéralisation calculées à partir de la conductivité électrique.	45
Tab.17 : Valeurs calculées de la dureté totale.....	47
Tab.18 : Faciès chimiques des eaux de la nappe du CI de la région d'Oued Righ.	65
Tab.19 : Classement des eaux destiné à l'irrigation.	68
Tab.20 : Valeurs des SAR calculées.	69
Tab.21 : Classification des eaux d'irrigation d'après J. Servant, 1975, (U.S. Salinity L.A.B.).....	70
Tab.22 : Valeurs du pourcentage de sodium (Na^+) calculées.	72

ACRONYMES

ANRH :Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

BI :Balance Ionique.

CE: Conductivité électrique

CI :Continental Intercalaire.

CT :Complexe Terminal.

CRSTRA: Centre de Recherches Scientifiques et Techniques Sur les Régions Arides.

ERESS : Etude des ressources en eau du Sahara septentrional.

OSS :Observatoire du Sahara et du Sahel.

pH: potentiel Hydrogène.

r:Quantité en réaction.

SAR :Taux de Sodium Adsorbé.

SASS :Système Aquifère du Sahara Septentrional.

SONATRACH: Société Nationale de Transport et canalisation des hydrocarbures.

TH:La dureté Totale.

UNESCO: United Nation Education Science Culture and Organization.

USGS:Unated Sates Geologic Survey.

WEC :Well Evaluation Conference.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION

Face aux besoins en eau sans cesse grandissants, l'exploitation des nappes d'eau souterraines apparaît comme étant un moyen efficace pour établir une meilleure gestion des ressources en eau.

Sous la pression de ces besoins considérables, l'homme est passé à une utilisation de plus en plus poussées des eaux de surfaces vers, la recherche des eaux souterraines. Aujourd'hui, il suffit d'évoquer ce problème pour provoquer une immense inquiétude au sein de la population et plus particulièrement chez les cultivateurs. La seule alternative demeure dans la bonne exploitation des nappes d'eau souterraines pour combler le grand déficit en eau, tout en évitant une surexploitation et une dégradation de sa qualité et de l'environnement.

Ce travail, s'axe sur la région centrale de l'Oued Righ, qui fait partie du Sahara Septentrional, plus précisément du Bas Sahara, où les ressources en eaux souterraines, bien qu'importantes, sont essentiellement peu renouvelables, représentées par deux grands systèmes aquifères : le Continental Intercalaire et Le Complexe Terminal.

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés sur l'hydrogéochimie de la nappe albienne dite nappe du Continental Intercalaire, qui est à l'origine géothermale et qui connaît depuis plusieurs années une détérioration notable de sa qualité.

L'explosion démographique et la surexploitation de cette réserve hydrique à l'échelle locale et régionale a provoqué énormément de problèmes liés à la qualité des eaux, tels que la chute de l'artesianisme, la remontée des eaux de la nappe phréatique, ce qui a influencé négativement sur les écosystèmes dans la région.

Ces problèmes matérialisés par des impacts directes sur l'eau et l'écosystème dont la plus part sont liés principalement aux conditions naturelles de la région tel que : la morphologie du terrain, la forte évaporation et la salinité des eaux. Aussi, la mauvaise gestion de ces réserves hydriques s'attachent principalement à l'absence d'une stricte planification et aux mauvais suivi de la ressources.

Au titre de ces problèmes évoqués, nous avons jugé utile de donner d'une part, un diagnostic sur l'aspect qualitatif des eaux de la nappe albienne, afin de faciliter la détermination de choix de son utilisation pour des fins d'AEP et d'irrigation, d'autre part, de tenter à proposer des recommandations qui auront comme objectif l'atténuation des impacts d'ordre hydrodynamiques et chimiques affectant négativement la ressource.

Pour se faire, nous présenterons ce présent humble mémoire comme le suivant :

- **Le premier chapitre** : englobe la situation géographique de la région d'étude et en bref, les aspects relief, géomorphologie et topographie en mettant l'accent sur le phénomène de la remontée des eaux.

- **Le deuxième chapitre** : relate une synthèse des travaux antérieurs, portant sur les caractéristiques géologiques et structurales des formations susceptibles d'être aquifères, en se basant sur la description lithostratigraphique détaillée du Continental Intercalaire et de ses limites régionales.

- **Le troisième chapitre** : est consacré pour l'étude climatologique, à l'issue des données allant de 1975 à 2016, une mise au point qui permettra de comprendre l'évolution et la variation de la pluviométrie et de la température, au cours d'une période restreinte et aussi d'en déterminer le type du climat régnant la région.

- **Le quatrième chapitre** : essayer de faire ressortir les principales formations aquifères par le biais d'une synthèse hydrogéologiques et de faire le point sur les caractéristiques hydrodynamiques, à la lumière des travaux portés dans ce sens.

- **Le cinquième chapitre** : le traitement des résultats relatifs aux analyses physico-chimiques qui détermine les faciès chimiques, l'aptitude des eaux à l'irrigation et la qualité des eaux de la nappe albienne de notre région d'étude, selon leurs utilisations, ainsi que la répartition des éléments chimiques, en cherchons à comprendre l'interaction entre l'eau et l'encaissant.

Enfin, nous terminons ce travail par une **conclusion générale** qui englobe tous les résultats issus de chaque chapitre dans laquelle nous y rajouterons des recommandations.

CHAPITRE I
GENERALITES

I. SITUATION GEOGRAPHIQUE DE LA REGION D'ETUDE :

La vallée de l'Oued Righ se situe dans le Sahara septentrionale orientale de l'Algérie (**Fig.1**), sur la limite nord du grand Erg oriental et la bordure sud du massif des Aurès, elle couvre une superficie de 600.000Km².

Dans son extrémité Sud, on y trouve la localité d'El Goug (Touggourt), au Nord, le village d'Oum-Thiour (100 km de la wilaya de Biskra). Elle est située entre les latitudes Nord 32°54'et 34°9' et longitudes Est 5°30' et 6°20'.

Sur le plan administratif, la vallée de l'Oued Righ fait partie de deux wilayas : Ouargla et Oued Souf, elle est limitée : au Nord par la wilaya de Biskra et la commune de Tolga, au Sud-Ouest par les oasis de Ouargla et à l'Est par la vallée de l'Oued Souf.

Dans un souci purement qualitatif, diagnostic hydrogéochimiques des eaux du continental intercalaire, nous nous sommes intéressés dans ce modeste travail que sur la partie centrale de la vallée qui englobe les localités Sidi Slimane, El Mansourah, Sidi Amrane et Djamaa (**Fig.2**), et ce selon les données hydrochimiques disponibles des forages captant la nappe albienne, que nous avons pu les recueillir de l'A.N.R.H de Ouargla.

II. APERÇU GEOMORPHOLOGIQUE :

La géomorphologie est considérée comme une expression synthétique de l'interaction entre les facteurs climatiques et géologiques. Ainsi, les principaux cycles climatiques du Quaternaire ont donné à la région de l'Oued Righ une physionomie particulière en relation avec la nature du substrat géologique et la tectonique d'ensemble.

Les études antérieures ont montré que la morphologie de la vallée est quasiment homogène, elle se présente comme étant une dépression, ou encore un large fossé d'effondrement. Elle est orientée Sud-Nord et masquée par des dunes de sables qui occupent la quasi-totalité de la vallée, ainsi que des plaines constituées essentiellement de sables et des matériaux alluvionnaires. Les terrasses et les remplissages du Mio-Plio-Quaternaire sont les terrains les plus fréquents.

Nous nous sommes basés sur les travaux de **BOUMARAF B., (2013)** afin de distinguer d'une façon générale les principales unités géomorphologiques qui composent la vallée de l'Oued Righ. Spatialement elle est constituée par un ensemble d'unités différentes du point de vue de leur forme structurelle, leur genèse, leur lithologie et leur morphogenèse. Cependant, ces entités sont issues de l'interaction de processus physico-chimique, tels que la thermoclastie, l'action éolienne et le processus hydrique exercé sur les matériaux géologiques et lithologiques.

Les principales unités géomorphologiques de la région d'étude peuvent être énumérées comme suit :

II.1. Les versants :

Sur le long de la vallée de l'Oued Righ, les versants occupent d'immenses glacis modérément ondulés marquant des entablements tabulaires dominant la partie nord par des abrupts de plusieurs dizaines de mètres, des glacis d'épandage et des reliefs résiduels. Les falaises tertiaire continentales, du pliocènes sont pour la plus part érodés et n'affleurent que dans les bordures de la vallée de l'Oued Righ. Les cordons dunaires qui se prolongent vers le grand erg oriental masquent quasiment la vallée, parfois des buttes témoins submergent les dunes. **Photos 1.**

II.2. Les Chotts :

La présence d'importants chotts résulte certainement de la traversée des eaux de terrains salés et gypseux du plio-quaternaire et du miocène. Les chotts sont de dimensions assez importantes atteignant plusieurs kilomètres, à savoir le Chott Melghir et Merouane.

Les plantes halophytes qui longent la sebkha dans sa partie Sud-Est signalent le passage progressif vers les chotts. Tandis que vers le nord de la vallée de l'Oued Righ, on y trouve que des escarpement d'érosion taillés. Sa surface oscille d'une saison à l'autre suivant la variation des rares pluies et ces sols restent quasiment inexploitable**Photos2.**

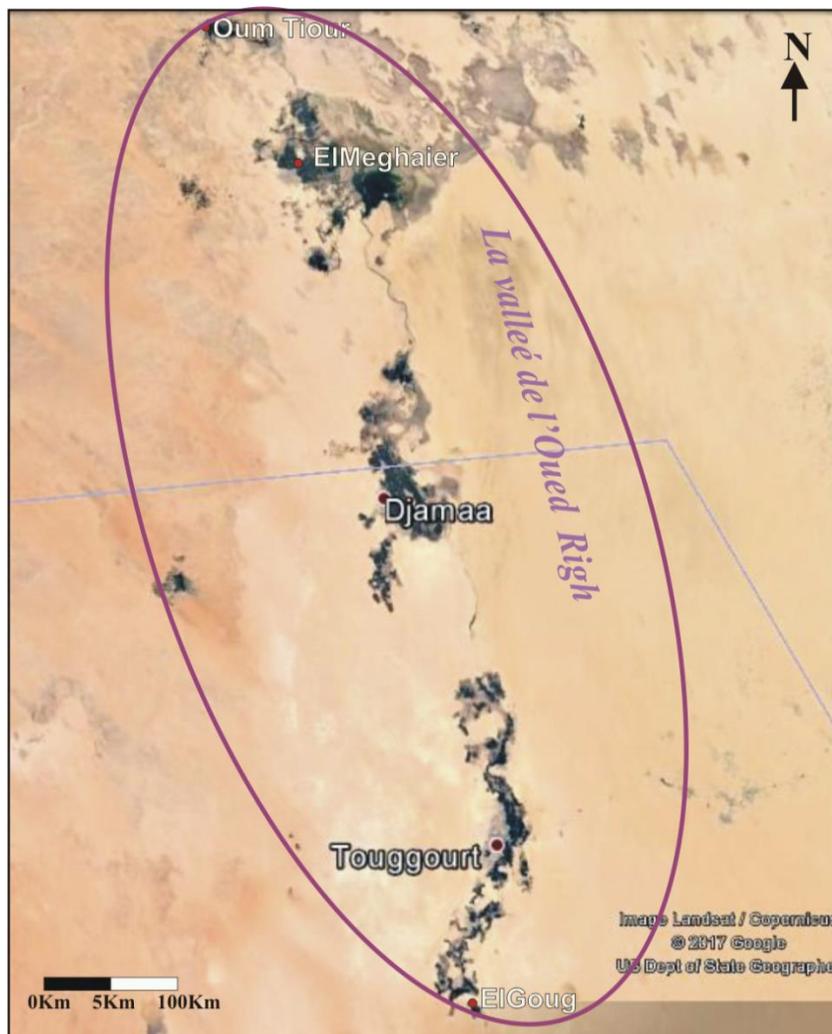


Fig.1: Situation géographique de la vallée de l'Oued Righ (Google Earth, 2017)

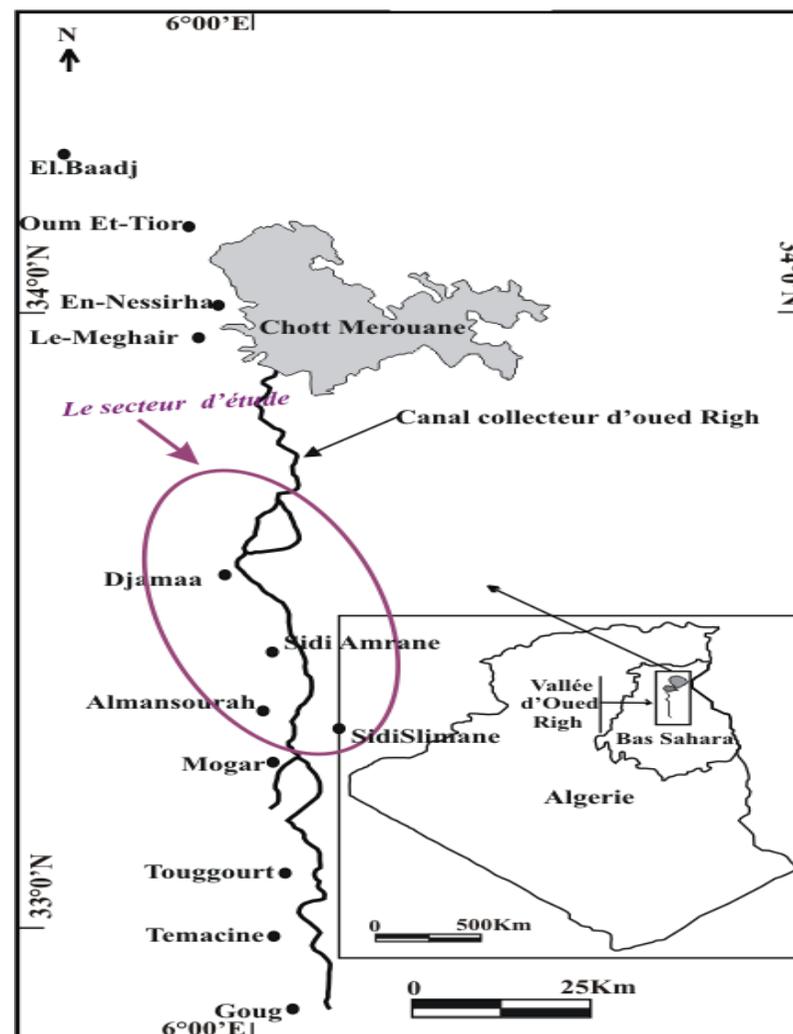


Fig.2 : Situation géographique de la région d'étude.



Photo .1 : Exemple de butte témoin isolée, au fond le chott Merouane (Cliché BOUMARAF, 2012)

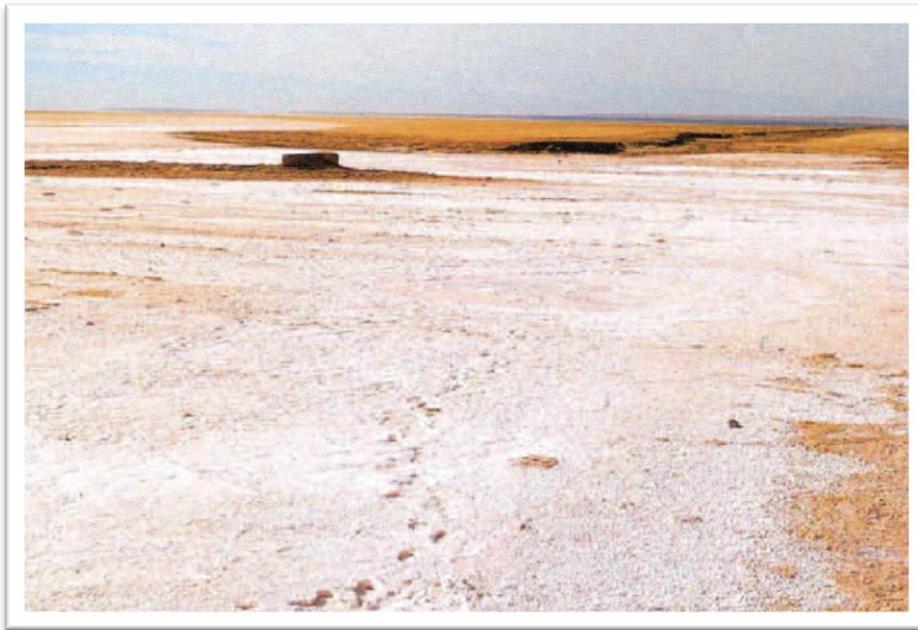


Photo .2 : Le Chott Mérouane (Cliché BOUMARAF, 2012)

II.3. Les sebkhas :

Les sebkhas représentent les cuvettes actuelles de décantation d'une superficie de 3375 Km² pour la sebkha de Merouane et 5515 Km² et pour la sebkha Mélgbir situées au nord et au Nord-Est de la vallée de l'Oued Righ. Elles constituent les cuvettes de transition qui séparent le système plissé de l'Atlas saharien et la plateforme saharienne. Agissant comme des exutoires naturels, comme nous le verrons dans le chapitre qui traite l'hydrogéologie elles y sont drainées soit par les rares précipitations ou les rares cours d'eau spasmodiques mineurs ou encore carrément par drainance ascendante depuis les nappes d'eau souterraines.

Les sebkhas sont le fruit d'une activité érosive hydro-éolienne qui se termine par le comblement par des matériaux essentiellement éolien suivi par une alimentation hydrique que ce soit des eaux de surface ou des nappes d'eau souterraines faisant intervenir sur les cristaux des sels à la surface. En

effet des terrasses autour des Sebkhhas témoignent de leur creusement et même la présence de buttes témoins au cœur du chott témoigne de ce creusement (BOUMARAF, 2013). **Photo.3**



Photo.3 : Traces de ravinement vers la Sebkhha, (Cliché BOUMARAF, 2012).

II.4. Les glacis :

Dans la vallée d’oued Righ, le niveau de base des chotts Melghir et Merouane est marqué par plusieurs glacis étendus. Le passage du versant au glacis se fait par une rupture de pente sensible qui décroît vers le niveau de base. Les glacis sont parallèles au front des falaises et offrent l’aspect de surfaces plus au moins uniformes.

II.5. Les formations éoliennes :

Les accumulations éoliennes les plus répandues sont le nappage sableux, le voile sableux, la nebka, le siff et les rides de sables (*Ripple-Mark*) localisées surtout vers l’aval en marge des chotts. Les dunes vives restent les plus répandues et les plus typiques dans cette région, où elles constituent le seul élément vraiment dynamique de la morphologie, on y note les Barkhanes surtout et les cordons dunaires.

III. APPERCU MORPHOSTRUCTURALE ET HYDROGRAPHIQUE :

La vallée de l’Oued Righ est une véritable gouttière aplatie, allongée de direction sud-nord, c’est une partie intégrante du Bas Sahara. Cette zone dépressionnaire est bordée à l’Ouest par le plateau mio-pliocène et à l’Est, par les grands alignements dunaires de l’Erg oriental (DUBOST, 1991).

La morphologie de l’Oued Righ dont le point culminant de 105m se situe à Touggourt, et les basses altitudes atteignant des valeurs au-dessous du niveau de la mer, (-27m) au milieu de Chott Merouane et Melghir, extrémité nord de la région d’étude. En fait, la grande gouttière de l’Oued Righ est la partie aval d’un grand paléo-oued, enfouillé actuellement sous le sable, qui descendait au cours des périodes humides, depuis le massif du Hoggar. Ce paléo-système dénommé « mythique » prenait le nom de l’Oued Igharghar. Mis à part le plateau de Still, constitué par une carapace gypseuse du

Pliocène, les formations géologiques rencontrées le long de la vallée de l'Oued Righ sont majoritairement d'âge quaternaire, conséquence de l'érosion continentale des dépôts mio-pliocènes.

La dépression topographique de l'Oued Righ, semblerait bien trop immense 15 à 30 km de large (**BISSON, 2003**) pour être constituée par une vallée. La nature lithologique est essentiellement, par endroit, constituée de sables gypseux comportant à la base des intercalations d'argiles plus ou moins sableuses, rougeâtres et également gypseuses. Néanmoins dans la vallée proprement dite, « le Mio-Pliocène ne s'observe plus que sur quelques buttes-témoins, dont les bases sont actuellement le siège d'une intense accumulation éolienne » (**CRSTRA, 2010**).

Il nous a paru judicieux, d'aborder brièvement un aperçu sur le grand drain baptisé : canal de l'Oued Righ, il s'agit d'une œuvre anthropique, achevée depuis 1925. C'est le seul cours d'eau actuellement pérenne dans le bas Sahara, dont le débit peut attendre parfois 5 m³/s, selon les données de l'ANRH d'Ouargla, et une pente très faible de l'ordre de 1‰ suffisante pour assurer l'évacuation des eaux de drainage des oasis et d'assainissement.

D'une longueur de 136 Km, il traverse la vallée comme suite : Il commence à El Goug, en amont jusqu'à Sidi khelil, il reçoit directement les eaux usées et celles de toutes les oasis, par différents rejets installés de part et d'autre du canal (**CRSTRA, 2010**). Ce véritable canal artificiel, une fois atteint Sidi Khelil, il change de nom en « Oued Kherouf », il débouche enfin dans le Chott Mérouane.

A la place d'un Oued mythique, fonctionne maintenant une rivière réelle qui a bouleversé les écosystèmes de l'extrémité méridionale, fournissant ainsi l'un des modèles possibles pour résoudre les problèmes catastrophiques, posés par la remontée de la nappe phréatique d'El Oued (**BALLAIS, 2010**).

On comprend bien par ce qui précède que le canal d'Oued Righ joue un rôle primordiale dans la vallée, en assurant l'évacuation des eaux d'irrigation excédentaires et même celles d'assainissement ou d'effluents urbains. **Photo.4**.



Photo.4 : Le canal de l'Oued Righ, (**CRSTRA, 2010**).

CHAPITRE II
CONTEXTE GEOLOGIQUE

Tout physicien est mathématicien, tout hydrogéologue est géologue, la géologie est donc l'arme de l'hydrogéologue qui à travers, pourrait investiguer, explorer et déterminer les horizons susceptibles d'être aquifères. La région d'étude s'intègre dans la partie septentrionale de la plateforme saharienne, et elle fait part du Bas Sahara, plus précisément dans la province triasique.

I. CONTEXTE GEOLOGIQUE REGIONAL :

Avant de décrire localement la géologie de l'Oued Righ, nous aborderons brièvement un zoom sur le contexte géostructural régional du Bas Sahara, plus précisément le Continental Intercalaire, objet de notre thématique

On peut distinguer dans l'ensemble du bas Sahara, plus précisément de province triasique, des formations géologiques post-primaires constituées par des dépôts alternativement marins et continentaux (**fig.3**). Il s'agit bien d'un vaste bassin au fond modelé sur les dorsales primaires, qui parfois, ont interrompu la sédimentation (**UNESCO, 1972**).

Le mérite revient particulièrement aux travaux succincts qui en forment une référence de base, citons ceux de **G. BUSSON (1970 et 1972)**, **A. CORNET (1961)**, **CONRAD (1969)**, **BEL et DEMARGNE (1966)** et **J. FABRE (1976)** qui ont balayé par des études fondées le bassin oriental où s'intercale notre région d'étude. S'ajoute aussi l'essor de l'exploration pétrolière et gazière, qui n'a cessé de fournir des éléments clés et des réponses à plusieurs problématiques, d'ordre géologiques et structurales.

Outre que les travaux cités plus haut, le bassin oriental a connu historiquement plusieurs études et ce, depuis les années 50, citons la monographie intitulée "Données sur l'hydrogéologie algérienne, la géologie et les problèmes de l'eau en Algérie". L'assemblage des études ponctuels par **GAUTIER (1952)** qui a souligné l'existence de milliers de rapports traitants les puits et les sources. S'ensuit les travaux de synthèses de l'**UNESCO** intitulés "**Etude des Ressources en Eau du Sahara Septentrional**" (**1972**) et ceux de **ERESS (1972 a, b et c)** par leur modèle mathématique qui particulièrement s'intéresse à la partie tunisienne et une grande partie algérienne, ce modèle a été repris et développé dans le souci d'une meilleure gestion des ressources hydrogéologiques. Ainsi, ce flux d'informations a permis une consolidation du modèle SASS, en se basant sur la restitution des données piézométriques et d'en établir les scénarios futurs possibles (**OSS, 2003 a et b**) ou de se pencher carrément vers la paléo-recharge (**OULD BABA SY, 2005**).

La région de l'Oued Righ fait partie du Bas Sahara, limitée au Nord par l'accident sud atlasique et les premiers contreforts des Monts des Aurès, au Sud par la falaise méridionale du Tihert, à l'Est par Les affleurements crétacés du Dahar et enfin on y trouve la dorsale du Mzab, à l'Ouest.

Le grand système du Sahara septentrionale « SASS », tel qu'il a été définie par l'**ERESS (1972)** couvre une superficie d'un (1) million de km² (partie tunisienne et libyenne incluses) dont celle de la partie algérienne couvre 720 000 km². Dans cette dernière, se trouve le Bas Sahara qui est, en fait, un véritable bassin qui présente un vaste synclinal à topographie raide qui baisse progressivement vers la partie déprimée, matérialisée par l'axe SSW-NNE et parcourue par les Oueds Mya et Righ.

A. Limite du Continental Intercalaire :

Le concept du « Continental intercalaire », fut introduit par **C. KILIAN (1932)** et qui désigne un épisode continental, intercalé entre deux cycles sédimentaires, essentiellement marins :

- à la base, on y trouve le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne,
- au sommet, s'en suit le cycle du Crétacé supérieur.

Les affleurements du Continental Intercalaire (CI) s'articulent aux bordures du bassin, en formant des reliefs montagneux, tels que ceux de l'Atlas saharien et de plateaux, comme le Tihert.

A l'échelle régionale, visiblement les formations sous-jacentes et parmi eux le Continental Intercalaire sont masquées par la couverture tabulaire tertiaire et les dépôts détritiques quaternaires, le CI n'est alors connu qu'en vertu des forages profonds d'exploration pétrolière ou hydraulique (Fig.3).

Cependant, l'absence du Paléozoïque au niveau du bassin oriental où se situe la région d'étude, nous pousse à s'abstenir de les relater dans ce mémoire. Le Primaire, souvent érodé dans la province triasique forme le socle saharien et est constitué de terrains sédimentaires et éruptifs, très anciens affleurant dans les larges boucliers Reguibat à l'Ouest et Targui, au Sud. Il peut aller jusqu'à une profondeur qui dépasse les 3000m dans le bassin oriental, ce socle est surmonté par des grès primaires, plus au moins plissés et érodés, sur lesquels s'entassent les grès du Continental Intercalaire, captés à partir de 1450m de profondeur jusqu'à de plus 1600 m à Oued Righ.

Au-dessus de la discordance cénomanienne, reposent les dépôts également marins du Sénonien et de l'Eocène sur lesquelles se coiffent la couverture miopliocène, que nous verrons plus tard dans ce mémoire, sous le nom du CT (Complexe Terminal).

On peut schématiser le Bas Sahara comme étant un grand bassin sédimentaire, subdivisé en trois entités géologiques, correspondant aux grand Ergs (occidental et oriental), séparé par la dorsale du M'Zab et le plateau d'El Hamra qui marque des terrains hamadiens sensu stricto (Fig.3).

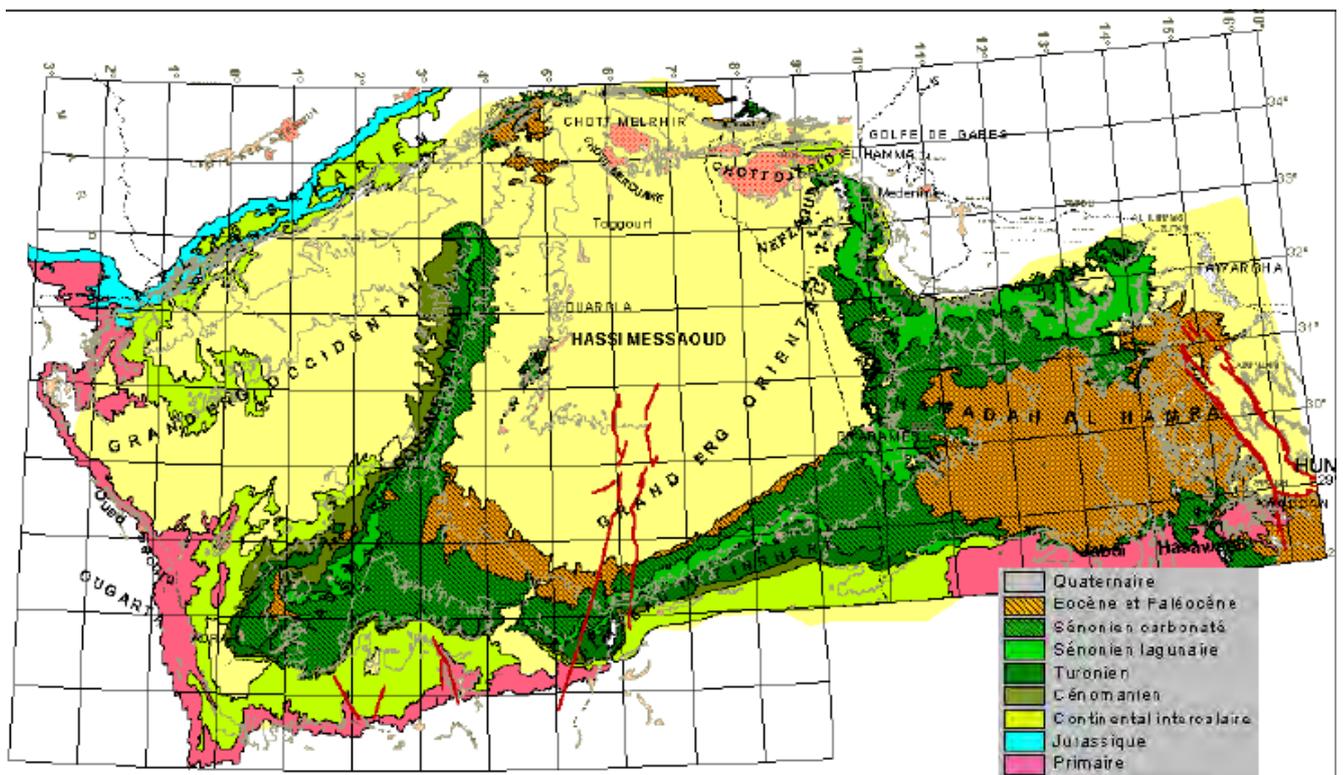


Fig. 3 : Carte géologique du Sahara septentrional, (OSS, 2003)

B. Rétrospective tectonique :

A l'échelle régionale et durant toute la phase mésozoïque, le Sahara algérien oriental subissait des mouvements verticaux d'ensemble. Pendant que de véritables chaînes de montagnes se formaient plus au Nord, dans le géosynclinal de l'Atlas saharien, la zone saharienne tendait plutôt à un effondrement progressif de sa partie centrale, suivant un axe passant sensiblement par la vallée de l'Oued Righ et par le tronçon supérieur de la vallée de l'Oued Mya. (FABRE, 1976).

L'orogénèse atlasique est à l'origine de l'apparition des déformations à grand rayon, les calcaires du M'Zab sont transformés en dorsale, ceux de Tadmaït en cuvette, au Sud l'axe d'Amguid -El-Biod (Fig.4), s'est effondré pour faire place à un axe synclinal méridien qui se poursuit jusqu'à l'Aurès (BEL et DEMARGNE, 1966).

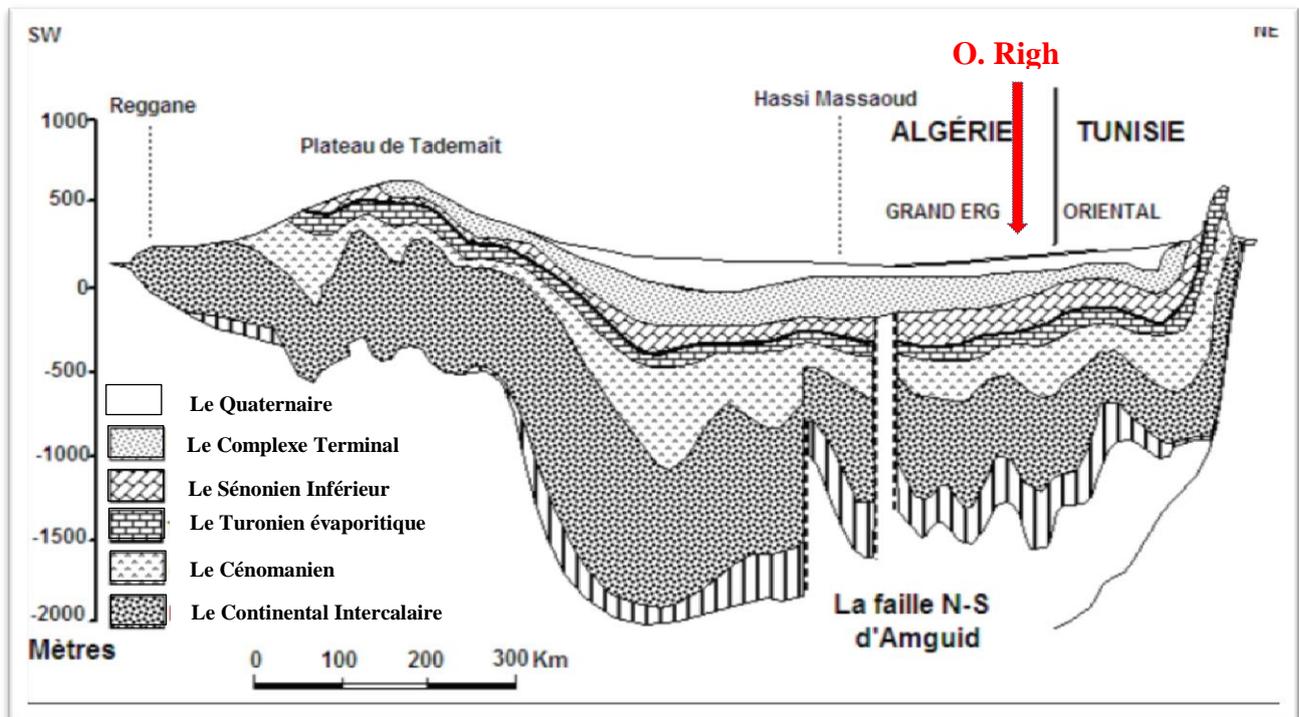


Fig.4 : Coupe synthétique géologique du Sahara Septentrional (UNESCO, 1972, modifiée).

Du point de vue tectonique régionale, nous résumons dans le tableau suivant les travaux de (KARPOFF R., 1952) qui relate avec imprudence les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien.

Tab.1 : Les étapes probables du tectonique dans le Sahara algérien (**KARPOFF R., 1952**).

AGE	STYLE
1- Antécambrien.	Plis très aigus, failles.
2- Paléozoïque.	Mouvements amples d'axe est-ouest. Formations de chaînes orientées N-S, NNE-SSW ou NW-SE sur des axes antécambriens
3- Post Eocène et anti-Miocène.	Rejoue des structures hercyniennes avec leur orientation ancienne.
4- Post Miocène.	Premiers plis d'axe NW-SE.
5- Post Pliocène.	Mouvements peuvent être dans la région nord. Seul plis en genoux de l'Aurès d'axe E-W.
6- Quaternaire ancien.	Plis affectant le Mio-Pliocène, seul ou accompagné du Quaternaire ancien, suivant deux axes orthogonaux, dont l'axe NW-SE est le principal.
7- Néolithique.	Mouvements de grande amplitude, à plis faibles et localisés.

A l'échelle du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal du Sahara, il est évident de noter l'absence d'importantes déformations tectoniques. Or, la chaîne des Maghrébines qui a hérité plusieurs styles orogéniques au Cénozoïque, va avoir des contrecoups sur la plate-forme des sahariennes :

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

II. CONTEXTE GEOLOGIQUE LOCAL :

A. Géologie de la gouttière d'Oued Righ :

Les formations géologiques du synclinal d'Oued Righ depuis le Cambrien jusqu'au Tertiaire sont dissimulés en grande partie par le grand Erg oriental. Ce synclinal s'étend sur des ensembles aplanis au début de l'Ere secondaire, il se comporte actuellement comme une vaste dalle rigide et stable (**CASTANY G., 1982**).

Cependant, quelques affleurements sont observés sur les bordures :

- Tel que nous l'avions vu précédemment, les terrains paléozoïques affleurent au Sud, entre les plateaux du Tademaït et Tinhert et le massif du Hoggar,
- Les terrains du Secondaire et du Tertiaire, constituent l'essentiel des affleurements des bordures du Bas Sahara et plus précisément de la gouttière d'Oued Righ (**Fig.5**),

- Des dépôts continentaux de la fin du Tertiaire et du Quaternaire prédominent le centre de la cuvette (Fig.6).

Une coupe géologique schématique ait été dressée, du sud vers le nord, par CORNET en 1964, débutant du primaire au quaternaire, le premier affleure aux bordures tandis-que le deuxième prédomine la vallée d'Oued Righ, la région d'étude est donc entre Touggourt et El Mghaier (Fig.5).

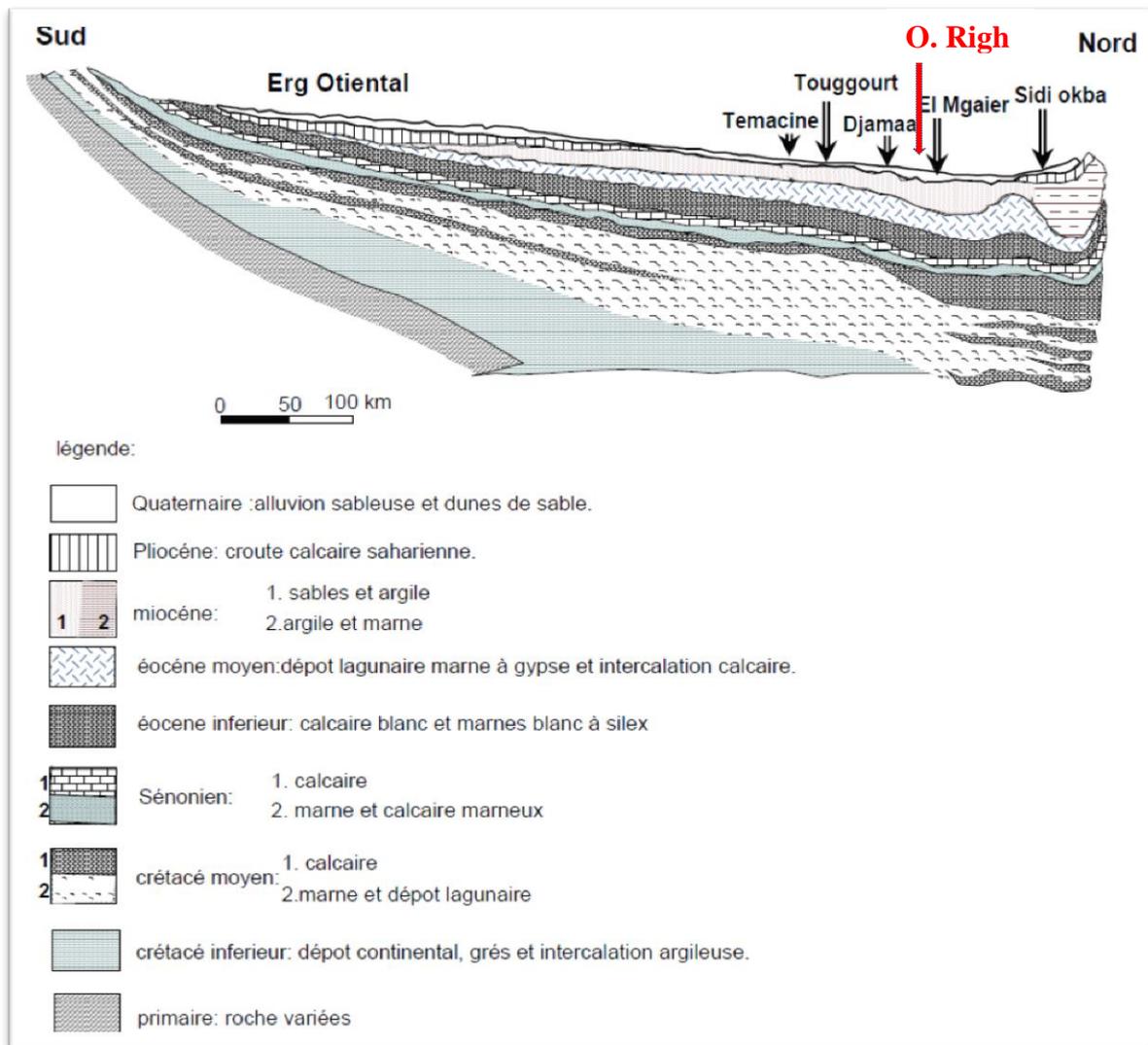


Fig.5 : Coupe géologique synthétique N-S passant par la cuvette secondaire saharienne et par le bassin de l'Oued Righ, l'échelle verticale n'est pas définit (CORNET A., 1964, modifiée).

A partir du jeu de deux cartes géologiques d'échelles 1. 500.000^e pour chacune, établies par le service géologique de l'Algérie en 1951 par M. G. BETIER et *all.*, dont la première couvre le nord constantinois et la deuxième le sud constantinois, d'ailleurs se sont les seules cartes existantes du Sahara Orientale. Nous avons tenté de digitaliser une portion en servant de ces deux cartes suscitées, après calage par le logiciel *Map-info*, encadrant géologiquement la gouttière de l'Oued Righ qui montre nettement une lithologie essentiellement constituée de sables, argiles et agiles gypsifère, encroutement gypso-salines, alluvions jalonnant le tracé de la vallée et dans la partie nord le Chott Merouane. La partie Est de la vallée renferme des dunes de sables et des cordons dunaires marquant le paysage du Grand Erg Orientale, tandis que la partie Ouest recèle des entablements tertiaires de type

plateaux (calcaires, grès et argiles) tel que le plateau de still, d'âge Pontien, équivalent du miocène supérieur dans la région d'étude (**Fig.5**).

B. Lithostratigraphie de la région d'étude :

Etant donné que la structure mésozoïque est masquée par la couverture récente, la série stratigraphique n'est connue qu'à partir des forages profonds. En se basant sur les travaux de (**KILIAN, 1932 et all**), du plus ancien au plus récent on y distingue ce qui suit, (**Fig.6**) :

1. Le Mésozoïque :

1.1. Le Crétacé inférieur :

- **Le Néocomien** : d'une puissance de 350m, essentiellement détritique, argiles, sables moyens et fins. Il est subdivisé en deux séries distinctes, la première à prédominance argileuse plus au moins pélitique à quelques intercalations des dolomies microcristallines et cristallines.
- **Le Barrémien** : d'une épaisseur qui varie entre 150 et 200m, essentiellement détritique, argiles, sables moyens et fins. Grès à ciment argileux, avec des passés de dragées de quartz blanc laiteux avec des intercalations de sables et de grès arkosique plus au moins grossiers.
- **L'Aptien** : son épaisseur varie entre 28 à 31 m, essentiellement carbonaté, calcaires dolomitiques à passage marneux. Les dolomies sont microcristallines à cristallines, parfois blanches et crayeuses.
- **L'Albien** : son épaisseur est croissante de l'Est en Ouest, il s'oscille entre 200 et 300m et il est constitué essentiellement d'une épaisse série formée d'une alternance de couches gréseuses friable avec des passées d'argiles sableuses comprise entre la barre abtienne et l'horizon argileux sus-jacent du Cénomaniens. Les grès et les sables sont fins à très fins passant parfois à des pélites, les argiles souvent pélitiques de couleur grise ou verdâtre. « On remarque que le changement de régime sédimentaire et l'arrivée en masse des sédiments détritiques s'est produit entre le Néocomien et le Barrémien et au cours de l'Albien », (Fabre, 1976).
- **Le Vraconien** : d'une puissance de 110m environ prédominé par une alternance irrégulière de niveaux argileux et dolomitiques, d'argiles sableuses et plus rarement de passées de grès à ciment calcaire. Le Vraconien est le terme de passage entre l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Il est souvent confondu dans les forages avec l'Albien ou le Cénomaniens.

1.2. Le Crétacé supérieur :

- **Le Cénomaniens** : de 200 à 250m d'épaisseur, il s'amincit progressivement vers le Nord. Il affleure dans la zone atlasique. Le Cénomaniens est composé essentiellement de dépôt lagunaire marneux où prédominent des couches d'anhydrites et parfois même de sel.
- **Le Turonien** : son épaisseur est relativement constante de 90 à 100m ; marin, calcaire-marneux, il est calcaire-dolomitique et marneux à la base et dolomitico-calcaire au sommet.
- **Le Sénonien** : L'ensemble du Sénonien se caractérise par une puissante épaisseur de 800-900m. Composé essentiellement de calcaire blanc avec une alternance de calcaire, de marne et de couche de gypse. Il est formé de deux ensembles distincts du point de vue lithologique dont le premier, à la base, est strictement lagunaire, surmonté par le Sénonien Carbonaté.

2. Le Cénozoïque :

2.1. L'Eocène : on distingue deux ensembles lithologiques ; à la base se trouve l'Eocène carbonaté et au sommet l'Eocène évaporitique.

- **L'Eocène inférieur carbonaté** : Dans la vallée de l'Oued Righ, il a 100 m d'épaisseur à Sidi Slimane et d'une manière générale dans le Bassin du Bas Sahar à une puissance qui varie entre 100 et 500m.
Pratiquement l'Eocène inférieur est lithologiquement identique au Sénonien carbonaté, la seule différence réside dans la présence ou pas des nummulites. Les calcaires prédominent sur les dolomies et les évaporites sont beaucoup plus rares que dans le Sénonien, voir absentes. Les calcaires à silex rencontrés au sommet du Sénonien carbonaté se poursuivent dans l'Eocène.
- **L'Eocène moyen évaporitique** : sa puissance atteint dans la vallée de l'Oued Righ une centaine de mètres sous les Chotts (100m), (**BEL et CUCHE, 1969**). Il est essentiellement constitué d'une alternance marno-calcaire et d'anhydrite. L'éocène livre une faune d'âge éocène à Nummulites et Globigérines. Il constitue le dernier épisode marin du Sahara algérien (**BUSSON, 1970**).

2.2. Le Mio-Pliocène : puissante série hétérogène dont l'épaisseur varie entre 140 m au Sud et 280 m au Nord, il correspond au complexe terminale, constitué de sables et d'argiles, discordant sur les formations anciennes sous-jacentes. Le Mio-Pliocène a été individualisé par **BEL et DEMARGNE (1966)** de bas en haut en quatre niveaux dans ces dépôts lenticulaires, valables sur l'ensemble du bassin oriental :

- ✓ **Niveau 01**: Argileux, peu épais, il existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental, suivant une bande nord-sud.
- ✓ **Niveau 02**: Grés-sableux, c'est le niveau le plus épais et le plus constant à sa base, on trouve parfois des graviers, alors que le sommet se charge progressivement en argiles pour passer au niveau 03.
- ✓ **Niveau 03**: C'est une formation argilo-sableuse, dont les limites inférieures et supérieures sont assez mal définies. Les argiles sableuses du niveau 3 séparent les sables des niveaux 2 et 4.
- ✓ **Niveau 04**: C'est le deuxième niveau sableux du Mio-pliocène. Parfois en continuité avec le niveau 02. Le sommet du niveau 04 affleure sur de grandes surfaces et souvent il est constitué par une croûte de calcaire gréseux, dite croûte amadienne. Son épaisseur est de l'ordre de 300 m. (**Fig.6**).

3. Le Quaternaire : Son épaisseur est variable et peu atteindre localement une dizaine de mètres (10m). Le Quaternaire est essentiellement à faciès sableux, séparé du Pliocène supérieur par des couches d'argiles et d'évaporites et souvent intercalé par des lentilles d'argiles sableuses et gypseuses qui s'édifient plus loin en d'importantes accumulations sableuses dans le Grand Erg Oriental. Il occupe la quasi-totalité du lit de la vallée de l'Oued Righ et en résulte du démantèlement de la falaise miopliocène situé dans limites de la vallée de l'Oued Righ. (**Fig.7**).

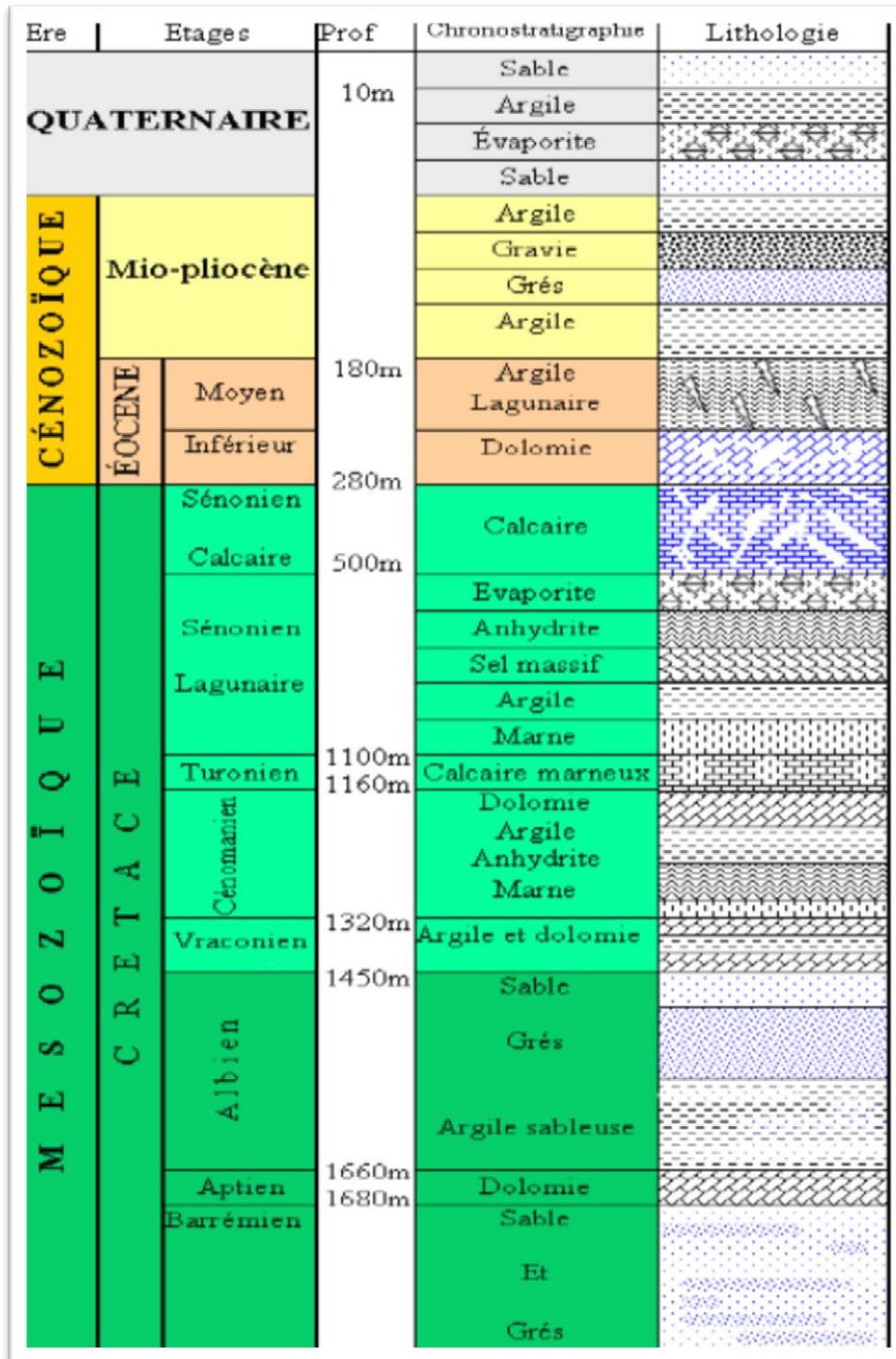


Fig.6 : Lithostratigraphie synthétique de la région d'étude (SCHLUMBERGER ,1990).

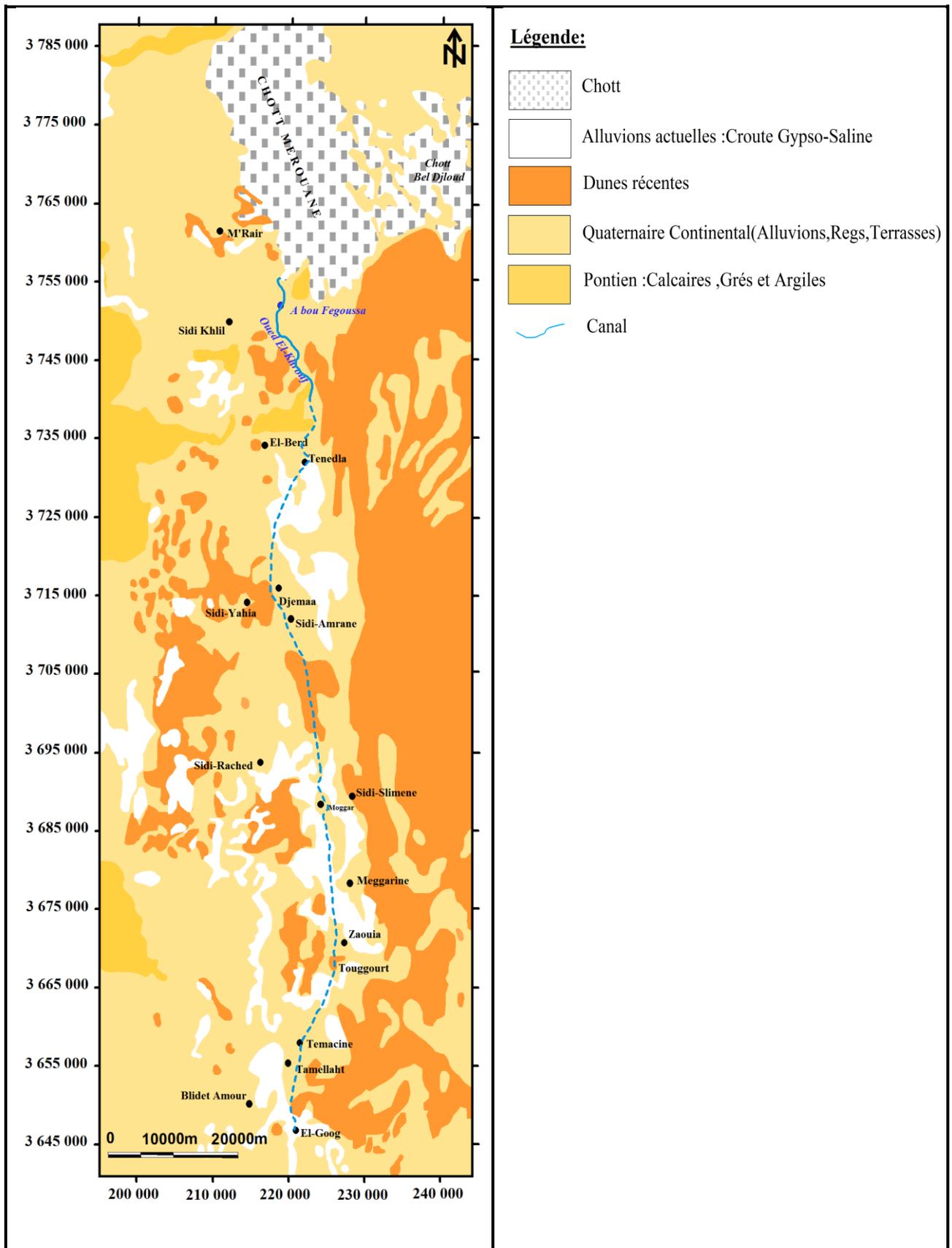


Fig.7 : Esquisse de la carte géologique de la région de l'Oued Righ, digitalisée par ce travail à partir du jeu de cartes géologiques sud et nord constantinois 1. 500.000^e.

CONCLUSION :

Il s'avère clairement à partir de ce bref survol géologique, que la région d'étude dite vallée de l'Oued Righ est une véritable gouttière aplatie, de direction sud-nord qui fait partie du Bas Sahara, plus précisément de la province triasique.

Du point de vue géologique, les terrains secondaires discordant sur le socle primaire souvent érodé, présentent une sédimentation tantôt marine, tantôt continentale, c'est cette dernière qui offre le nom du Continental Intercalaire, objet de ce mémoire.

La série stratigraphie très épaisse est caractérisée essentiellement par des formations allant du Crétacé inférieur au Quaternaire. Mise à part ce dernier ainsi que le Mio-pliocène, les autres formations sous-jacentes sont invisibles, seule l'exploration par forage peut les faire identifier.

Le Continental Intercalaire capté à Oued Righ de 1450m de profondeur jusqu'à de plus 1600 m affleure aux bordures du bassin, particulièrement aux confins de l'Atlas Saharien et à Tinhert.

Du point de vue structural, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal sont exemptes d'importants déformations tectoniques. Or, la chaîne des Maghrébines qui a hérité plusieurs styles orogéniques au secondaire, va avoir des contrecoups sur la plate-forme saharienne.

CHAPITRE III
CONTEXTE CLIMATIQUE

INTRODUCTION

Afin de mieux caractériser le climat de la région d'étude qui est l'objectif principal de ce chapitre, nous avons présenté l'évolution des paramètres climatologiques, relevés de l'unique station météorologique de Touggourt de 1975 à 2016 (précipitations, températures, humidités et vitesses du vent) (voir tableaux I, III, V, VI en Annexes).

Tab.2 : Coordonnées de la station de Touggourt.

Station	Altitude (m)	Coordonnées		Période d'observation (41 ans)
		Latitude	Longitude	
Touggourt	84	33°04'N	06°05'E	1975-2016

(Source : ANRH, Ouargla).

I. PRECIPITATIONS :

Les précipitations mensuelles et annuelles relevées dans la station de Touggourt sont reportées en annexes I et II.

A. Etude de la variabilité interannuelle des précipitations de 1975 à 2016 :

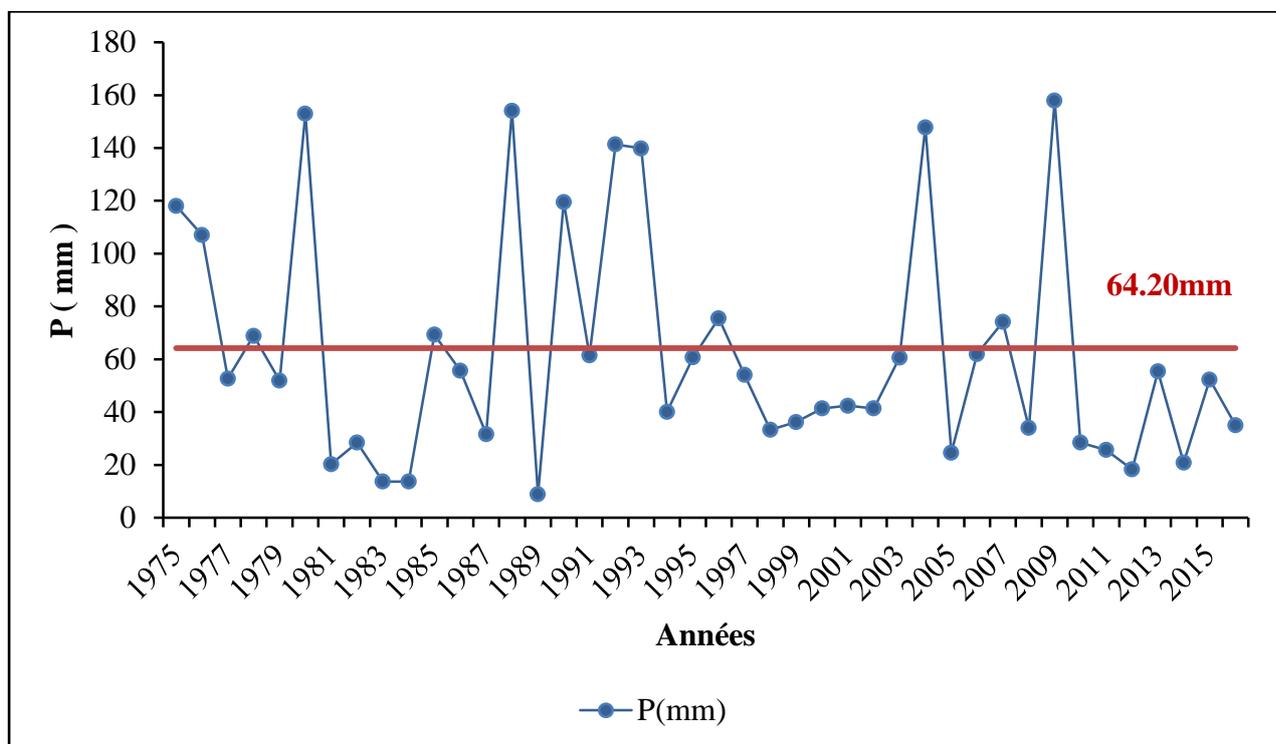


Fig.8 : Variations interannuelles des précipitations station de Touggourt (1975-2016).

La représentation graphique (**Fig.8**) montre une variabilité dans le temps de la distribution de la précipitation, nous pourrions résumer cette irrégularité comme suite :

-au-dessus de la moyenne : des périodes humides irrégulières sont enregistrées, avec une précipitation de 157.99 mm en 2009, ce sont les plus pluvieuses.

-au-dessous : des périodes sèches. L'année 1989 est la plus sèche, avec une valeur de 8,89mm.

-La moyenne interannuelle est de 64,20 mm que cette valeur ne permet pas de tirer des conclusions à cause des variations irrégulières de la pluie. Les fluctuations pluviométriques sont importantes et se situent dans la plus part des années au-dessous de la moyenne.

B. Etude des variations pluviométriques mensuelles :

Les valeurs des précipitations moyennes mensuelles sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tab.3 : Valeurs des précipitations moyennes mensuelles (mm).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann
P (mm)	13.04	3.97	8.65	6.54	3.26	0.77	0.60	1.68	5.90	4.89	8.96	5.95	64.20

La figure 9, représentant l'évolution des précipitations mensuelles relevées au niveau de la station d'étude, montre que le mois le plus humide est celui de janvier (13.04 mm) et le plus sec est celui de juillet (0.60 mm).

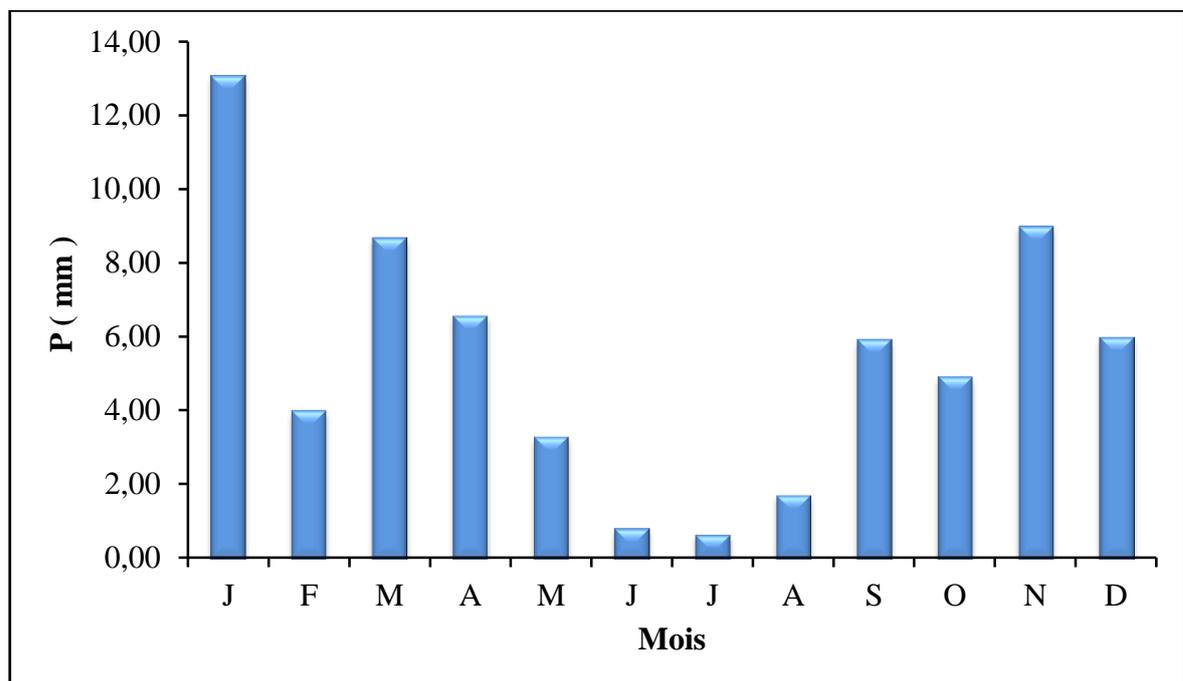


Fig.9 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles.

C. Etude des variations pluviométriques saisonnières :

Le tableau 4 représente les valeurs moyennes des précipitations saisonnières :

Tab.4 : Répartition des précipitations saisonnières (mm).

Saisons	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Août.
Moyenne Saisonnière (mm)	19.75			22.96			18.45			3.05		

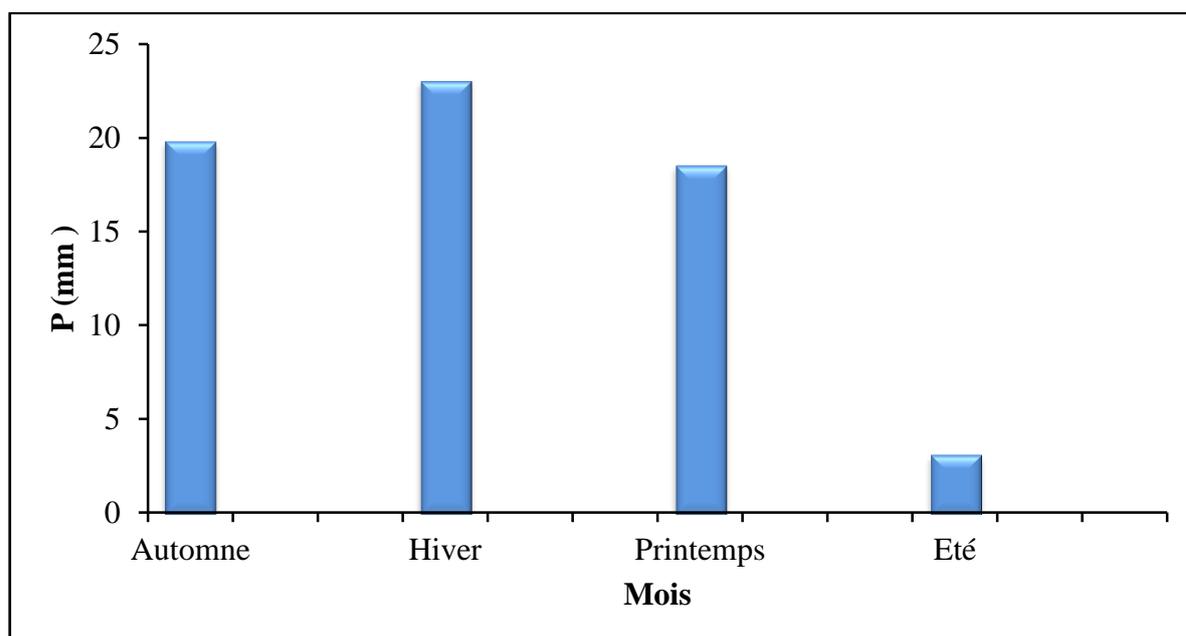


Fig.10 : Histogramme des précipitations saisonnières.

La figure 10 représente l'histogramme des précipitations saisonnières et montre que l'hiver est la saison la plus humide, avec une valeur de (22.96 mm) et que l'été correspond à la saison la plus sèche (3.05 mm).

II. TEMPERATURES :

Les températures moyennes mensuelles et annuelles de la station sont reportées en annexes III et IV.

A. Températures moyennes annuelles :

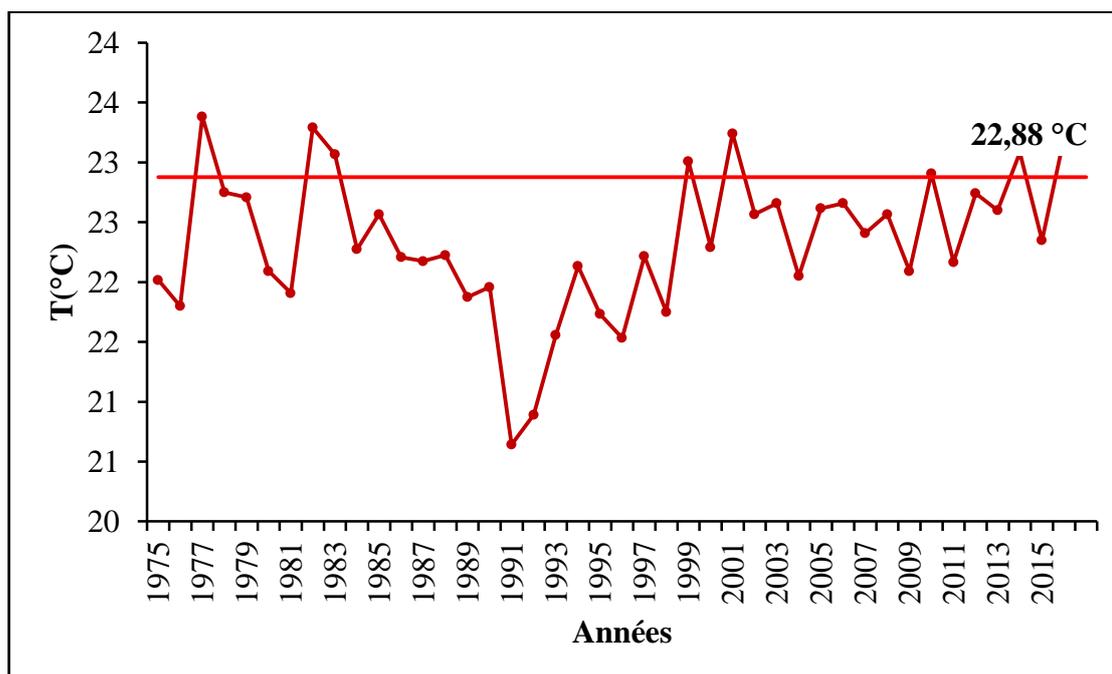


Fig.11 : Courbe de variation des températures moyennes annuelles, station de Touggourt (1975-2016).

La figure 11, montre que les températures moyennes annuelles durant cette période ne portent pas de grandes variations. Elles sont comprises entre 20.64°C en1991, comme valeur minimale à 23.38°C en 1977, comme valeur maximale, avec un écart entre l’année la plus chaude et la plus froide de 2,74°C.

B. Températures moyennes mensuelles :

Les températures moyennes mensuelles sont reportées au tableau n°5.

Tab.5 : Répartition des températures moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975-2016)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann
T (°C)	10.93	13.40	17.34	21.91	26.88	32.10	35.13	34.60	29.88	23.76	16.66	11.95	22.88

La figure 12, représente les variations des températures moyennes mensuelles et montre que le mois de janvier est le plus froid (10.93°C), et celui de juillet est le plus chaud (35.13°C).

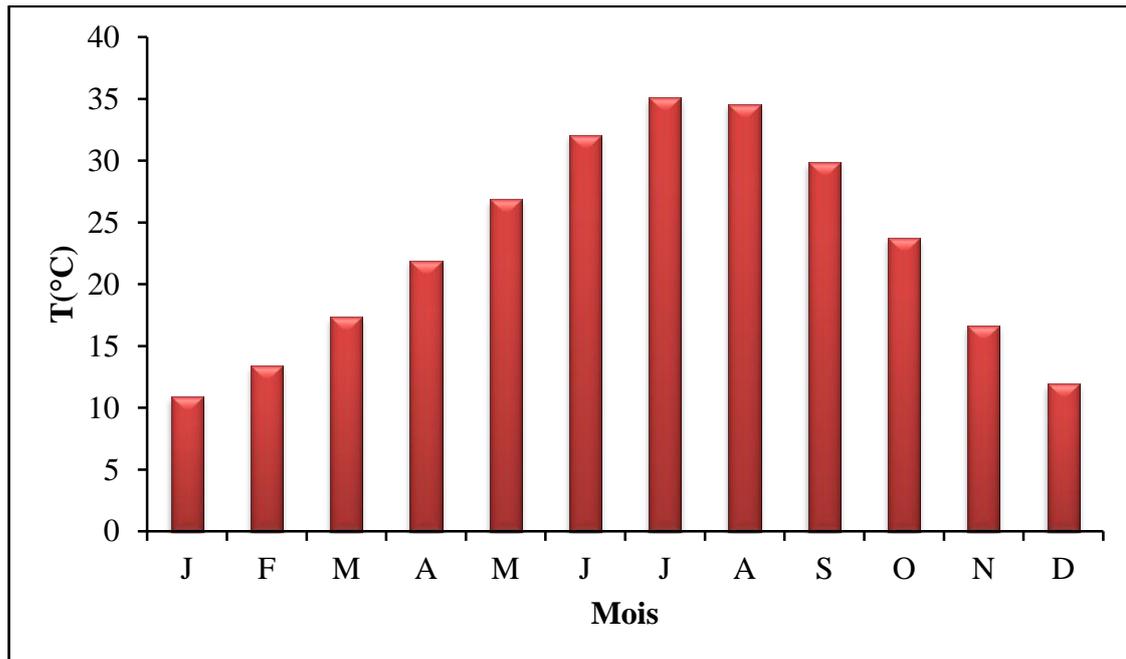


Fig.12 : Histogramme des températures moyennes mensuelles, station de Touggourt (1975-2016).

III. LA VITESSE DU VENT

Le vent assure le remplacement de l'air plus ou moins saturé, au contact de la surface, évaporant par de nouvelles couches, ayant une température et une humidité généralement plus faibles. Il favorise l'évaporation, d'autant plus que sa vitesse et sa turbulence sont grandes.

Les valeurs de la vitesse moyenne mensuelle du vent, relevées à la station de Touggourt sont reportées en annexes V.

Les moyennes mensuelles des vitesses du vent sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tab.6 : Les vitesses moyennes mensuelles du vent de la station de Touggourt (1975-2016).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
La vitesse du vent (Km/h)	11.41	10.77	13.20	15.14	14.92	13.50	12.04	11.23	10.63	10.37	10.30	8.75

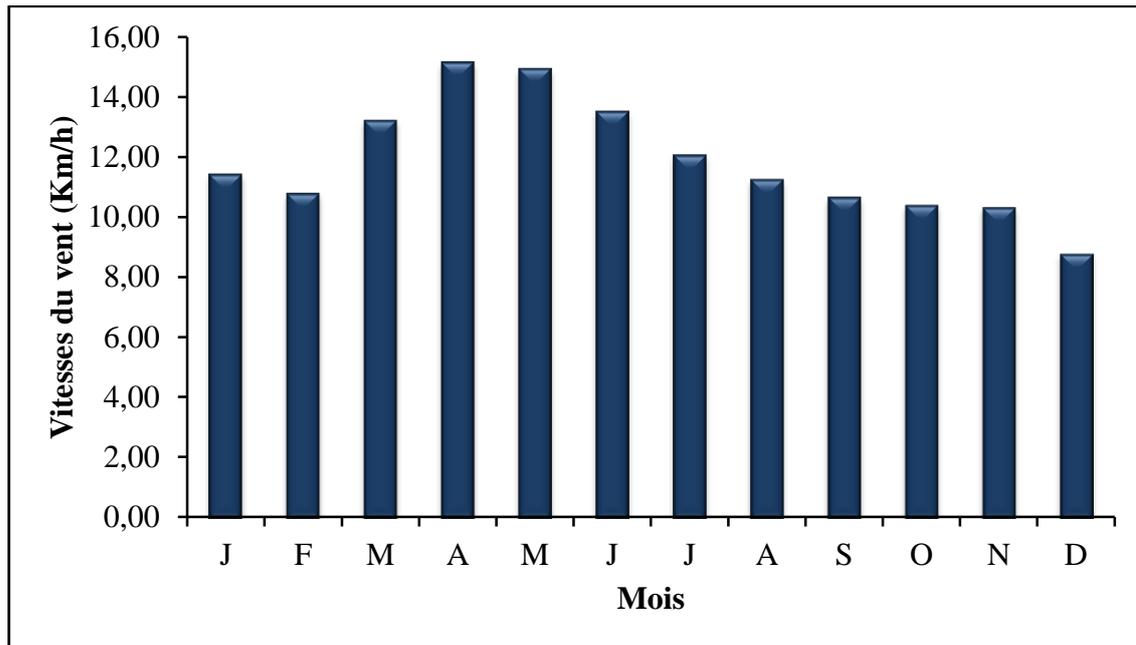


Fig.13 : Histogramme de distribution des vitesses moyennes mensuelles du vent à la station de Touggourt (1975-2016).

L'évolution des vitesses moyennes mensuelles du vent (**Fig.13**) montre que les vitesses les plus importantes s'observent au mois d'Avril (15.14Km/h) et les plus faibles sont enregistrées au mois de Décembre (8.75Km/h). La vitesse du vent importante favorise le processus de l'évaporation des marres d'eau, chotts et le nappes phréatiques et joue un rôle important dans les régions hyperarides.

IV. L'HUMIDITE

Les valeurs d'humidité mensuelles enregistrées à la station de Touggourt sont reportées en annexeVI.

Les moyennes mensuelles d'humidité sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Tab.7 : Valeurs moyennes mensuelles d'humidité de la station de Touggourt (1975-2016).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité (%)	60.57	50.66	46.03	40.95	37.44	32.74	30.23	31.93	41.09	47.78	57.50	62.21

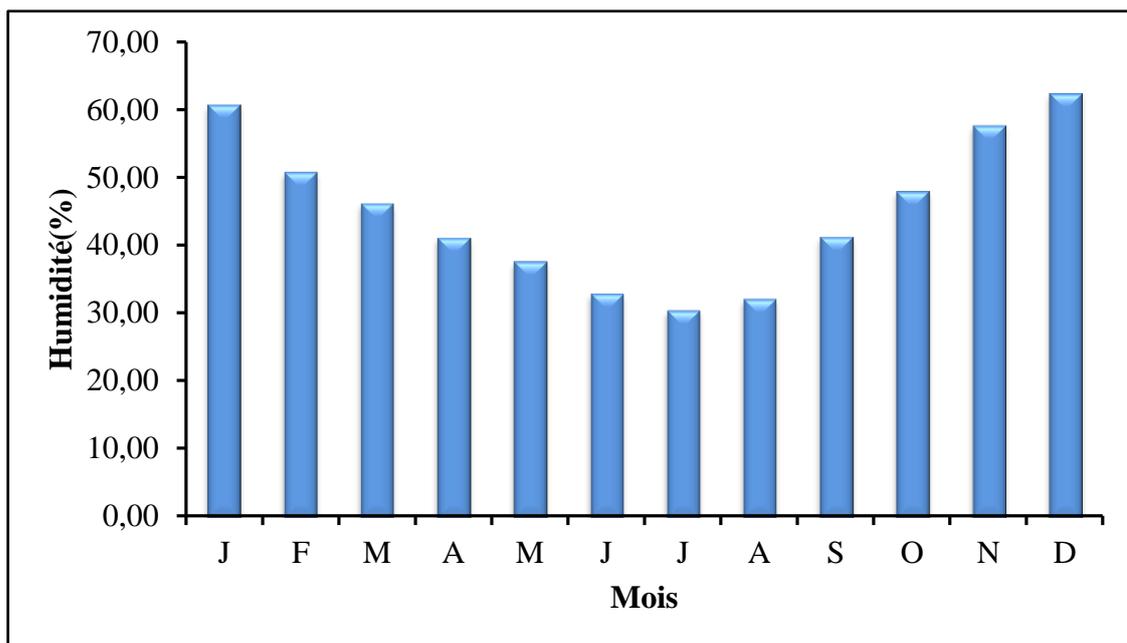


Fig.14 : Histogramme des variations d'humidité moyennes mensuelles, station de Touggourt(1975-2016).

D'après le graphe (**fig.14**), nous remarquons un maximum d'humidité enregistré pendant le mois de décembre (62.21%), et un minimum enregistré pendant le mois du juillet (30.23%).

V. ETUDE DU CLIMAT

A. Méthode graphique de *Bagnouls et Gaussen* :

La méthode graphique de **Bagnouls** et **Gaussen** montre qu'une période sèche est définie lorsque les précipitations moyennes du mois sont inférieures ou égales au double de la température moyenne du même mois ($p \leq 2 T$ °C).

* On définit une période sèche, quand la courbe des précipitations passe au-dessous de celle des températures.

*On définit une période humide, quand la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures.

Tab.8 : Précipitations et températures moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975-2016)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Ann
P (mm)	13.04	3.97	8.65	6.54	3.26	0.77	0.60	1.68	5.90	4.89	8.96	5.95	64.20
T (°C)	10.93	13.40	17.34	21.91	26.88	32.10	35.13	34.60	29.88	23.76	16.66	11.95	22.88

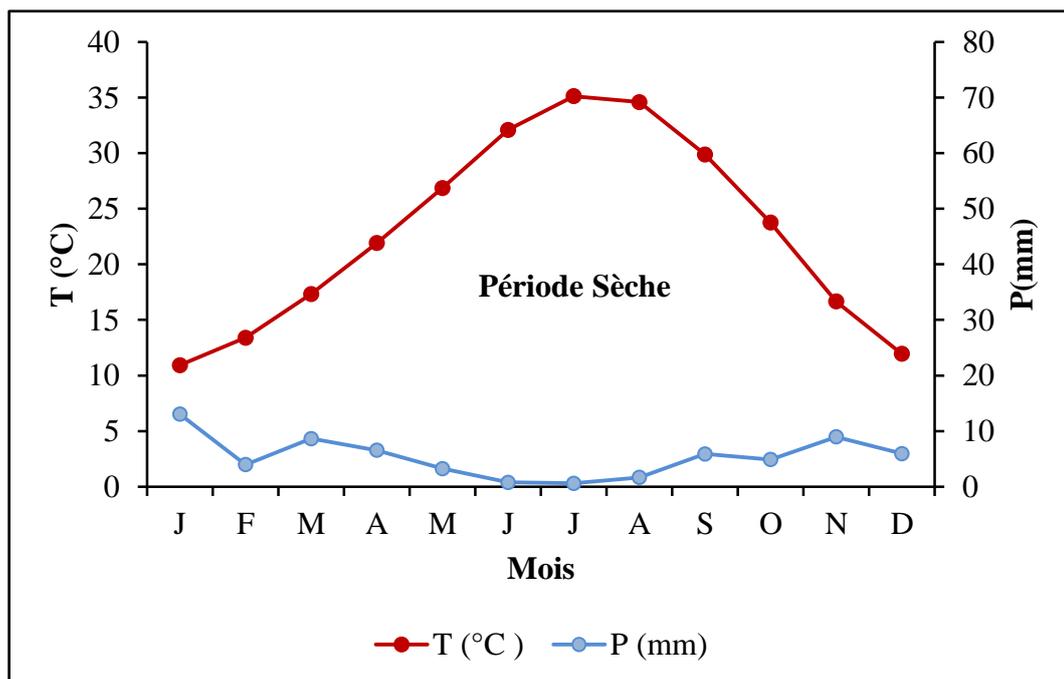


Fig.15 : Diagramme ombrothermique, station de Touggourt (1975-2016).

La figure **15** montre que la zone d'étude est caractérisée par une saison sèche, pendant toute l'année. Ce qui pourrait expliquer la forte évaporation qui ne laisse guère l'infiltration se produit dans la vallée de l'Oued Righ, aucun bilan hydrologique ne peut donc être effectué localement.

B. Les indices climatiques :

1. Méthode de de Martonne.

Le calcul de l'indice annuel de de Martonne, défini par l'équation 1 citée en annexes VII, donne une valeur de 1,95. Le report de cette dernière sur l'abaque d'aridité (**Fig.16**), nous permet de constater que le secteur d'étude est situé dans une région hyperaride.

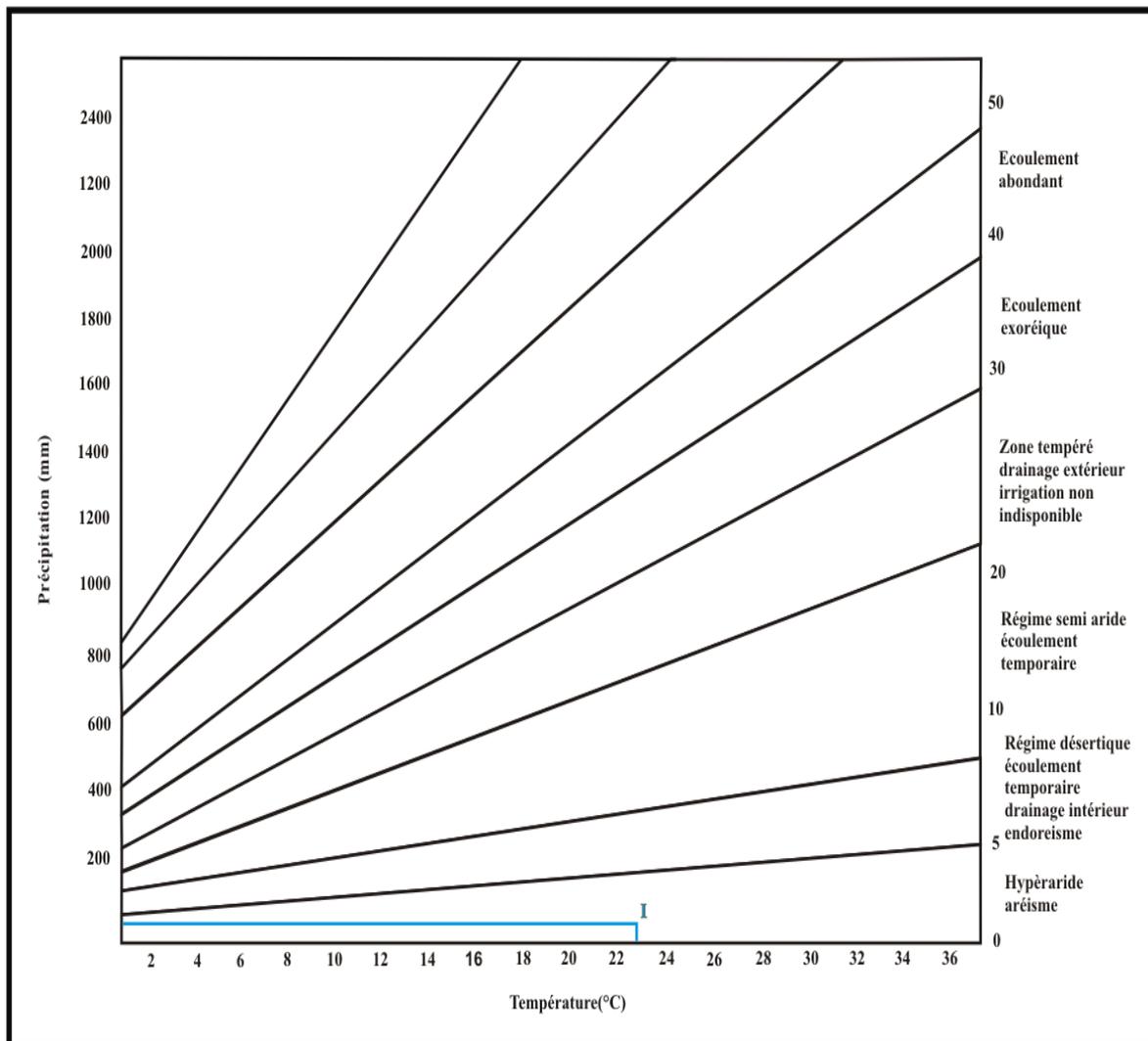


Fig.16 : Abaque pour le calcul de l'indice d'aridité de de Martonne.

Le calcul des indices d'aridité mensuelle (Tab.9) avec l'équation 2, donnée en annexe VII montre que le climat est :

- Hyperaride ($I < 5$) pour tous les mois de l'année ;
- Désertique ($5 < I < 7.5$) au mois de Janvier.

Tab.9: Valeurs des indices d'aridité mensuelle.

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
P (mm)	13.04	3.97	8.65	6.54	3.26	0.77	0.60	1.68	5.90	4.89	8.96	5.95
T (°C)	10.93	13.40	17.34	21.91	26.88	32.10	35.13	34.60	29.88	23.76	16.66	11.95
I	7.48	2.04	3.80	2.46	1.06	0.22	0.16	0.45	1.77	1.74	4.03	3.25
Type de climat	Désertique	Hyper-aride										

CONCLUSION

Il ressort à partir de ce bref aperçu climatique que la région d'Oued Righ est caractérisée par un climat hyperaride, les précipitations moyennes annuelles sont faibles et irrégulières et ont une moyenne de l'ordre de 64.20 mm/an. Les relevés thermiques analysés donnent une température moyenne annuelle élevée de 22.88°C à amplitude thermique fréquente, avec une période déficitaire qui perdure durant toute l'année.

Le mois le plus humide est décembre (62.21% d'humidité) et le plus sec est celui de juillet (30.23% d'humidité). L'hiver est la saison la plus humide et l'été correspond à la saison la plus sèche.

La faible pluviométrie qui est inférieure à 100 mm ne laisse pas possibilité à l'établissement d'un éventuel bilan hydrologique, puisque l'infiltration est quasiment déclinée dans ce type de région hyperaride.

D'autant plus que P. Verdeuil avait établi en 2009 un abaque spécifique et adéquat au climat de l'Algérie, cet abaque dont l'origine commence à 100mm, au-dessous de laquelle, il est inutile de faire appel à toute tentative de calcul de bilan. Nous avons même volontairement évité de le représenter dans ce bref analyse climatique.

Les faibles précipitations regagnent l'atmosphère par processus d'évaporation et évapotranspiration ainsi que la nature sablonneuse des sols qui couvre la quasi-totalité de la vallée de l'Oued Righ, très poreux, favorise aussi le processus de l'évaporation de la nappe phréatique dans la frange capillaire. Chose qui confirme encore le déficit d'écoulement où les infiltrations sont nulles.

CHAPITRE IV
CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

INTRODUCTION :

Dans ce chapitre de l'hydrogéologie, nous allons brièvement se référer aux travaux antérieurs, citons à priori ceux qui sont essentiellement pertinents, menés par le grand projet SASS (Système Aquifère du Sahara Septentrional), en outre des simples moutures de thèses et de mémoires de fin d'étude.

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS) (**Fig.17**), dit transfrontalier, s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye. Ce système par sa superficie globale qui dépasse les 1 millions Km², partagé entre l'Algérie, Tunisie et la Lybie.

Dans la partie algérienne, la superficie a été estimée à environ 700 000 Km² et d'une épaisseur de 4000 à 5000 mètres environ (**CORNET, 1964**), se subdivise en deux réservoirs distincts, le profond appelé communément le Continental Intercalaire, le second qui est moins profond, est le Complexe Terminal (CT). L'âge des eaux de la CI a été estimé par des études relativement récentes à plus d'un (1) millions d'années (**GUENDOUZ et MICHELOT, 2006**).

Le SASS bien qu'il recèle d'importantes potentialités en matière de ressources en eau, il est cependant paradoxalement menacé par plusieurs facteurs ; d'une part, anthropiques tels que la pollution des eaux souterraines, la prolifération des points d'eau, surexploitation, remontée des eaux, d'autre part, naturels, tels que la vulnérabilité des aquifères à la pollution, dégradation des sols, faible pluviométrie et recharge négligeable.

Le passage structural de l'Atlas saharien vers le plateau de Tademaït, matérialisé par l'anticlinal du M'Zab, met en évidence deux unités hydrogéologiques distinctes : La première occidentale de 280 000 Km², masquée partiellement par le grand Erg occidental, et la seconde, la plus étendue avec 500 000 Km², occupe une grande partie du grand Erg oriental.

En fait, le bassin de l'Oued Righ qui fait partie du SASS, au milieu du XIX^e siècle, fut le premier d'avoir connu l'implantation des forages jaillissants du Complexe Terminal. C'est dans ce bassin que nous allons aborder une synthèse hydrogéologique et hydrodynamique de l'aquifère, afin de caractériser localement la nappe du Continental Intercalaire (CI).

Le bassin d'Oued Righ se place dans un climat désertique hyperaride, typique de la région, il s'y intègre dans le bas Sahara, où la pluviométrie est très faible et irrégulière, voire négligeable. L'évaporation est très élevée et la recharge des nappes est quasi-négligeable, mise à part les quelques crues qui drainent minoritairement la nappe phréatique et celle du CT.

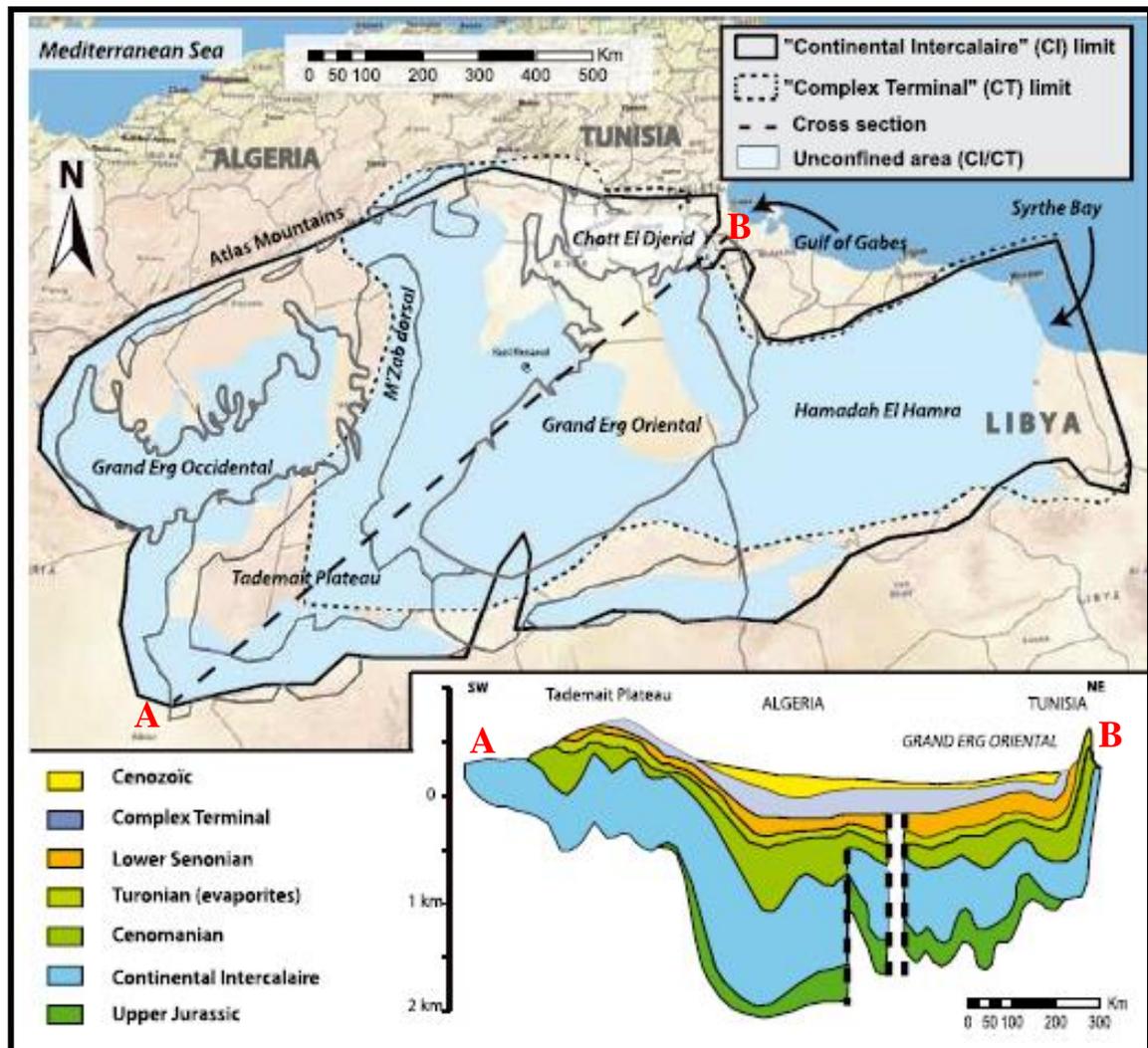


Fig.17 : Carte montrant l'étendue du SASS (J.O.PETERSEN, 2014).

I. LES DIFFERENTES NAPPES DANS LA REGION :

Les études antérieures ont montré que la région d'étude regroupe trois formations géologiques multicouches, réputées perméables et alternées par d'autres formations hétérogènes et imperméables. Dans la région d'étude, on y distingue trois aquifères qui sont respectivement de haut en bas :

- Nappe phréatique,
- Nappe ou système aquifère du Complexe Terminal (CT),
- Nappe ou système aquifère du Continental Intercalaire (CI) (Fig.18).

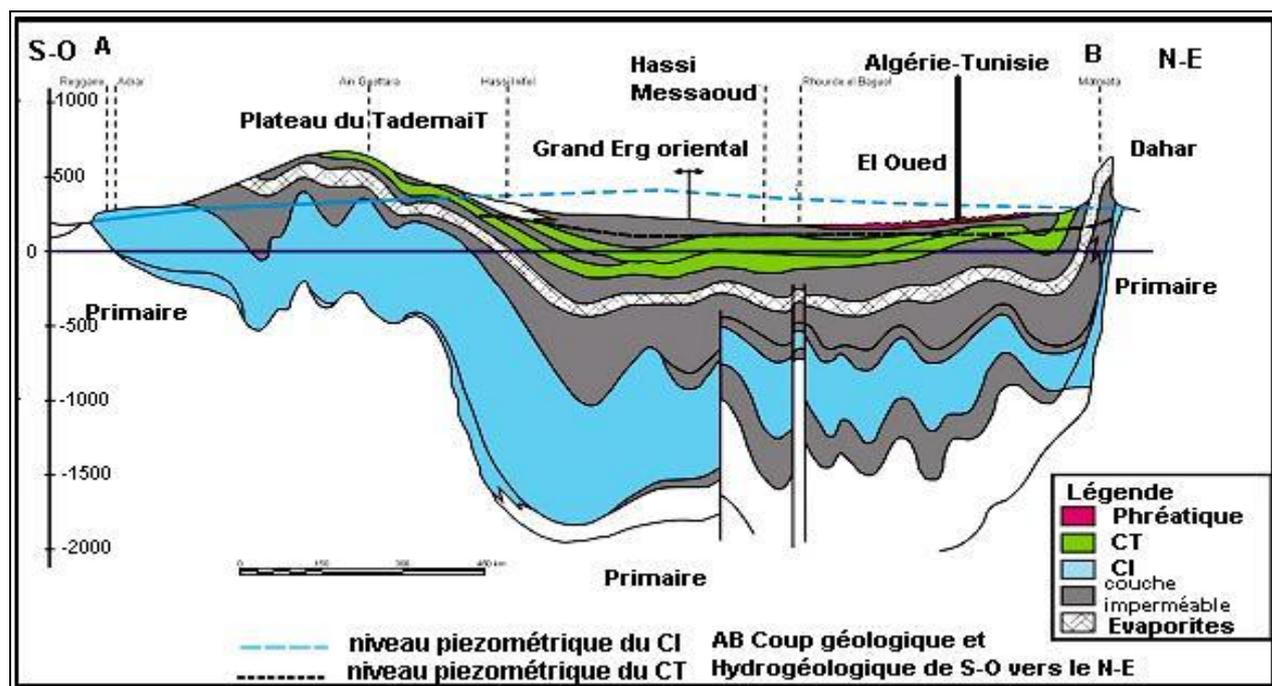


Fig.18 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972).

A. La nappe phréatique :

D'où son nom, cette nappe libre ou d'inféro-flux, encaissée dans les sables quaternaires à cristaux de gypse par endroit, coiffe la nappe du CT, qui elle-même repose sur le CI, son substratum est constitué essentiellement par des argiles, sables et évaporites. Elle est prédominante sur l'ensemble des oasis de la vallée d'Oued Righ, sa puissance est en moyenne environ une vingtaine de mètres s'amincit du Nord vers le Sud, par endroits. (tab. 10). Des études ont montré que la salinité de la nappe phréatique est très forte dépassant largement les 7mg/l. (OSS, 2003)

Ainsi, la vallée d'Oued Righ est affectée par le phénomène de la remontée des eaux, causée essentiellement par la prolifération des forages d'eau, captant le CT et le CI et leur exploitation irrationnelle, pertes de charges hydrauliques ascendantes favorisées au fur et à mesure par le dépérissement des tubages, notamment que les nappes profondes sont artésiennes et chimiquement agressives, outre que l'excès des eaux de l'irrigation. Pour y faire face et lutter contre cette remontée des eaux qui ne cessent de nuire le sol, la nappe et la flore, un réseau de drainage a été artificiellement mis en œuvre, par lequel l'excès des eaux est drainé vers le Nord de la vallée.

Du point de vue recharge de la nappe phréatique, l'aridité du climat amène à supposer que la recharge s'effectue que par les rares précipitations et l'infiltration des eaux usées et celles d'excès d'irrigation, d'autant plus qu'on peut avancer l'hypothèse d'une recherche profonde par le biais des tubages corrodés et usés du CI et CT ; percolation par perte de charge hydraulique par drainance ascendante.

B. La nappe du Complexe Terminal :

La nappe du CT est encaissée dans les divers horizons perméables du Crétacé supérieur et du Tertiaire, selon l'étude menée par l'UNESCO en 1972, ces horizons sont essentiellement :

- Le Sénonien supérieur carbonaté (surtout le Maestrichtien),

- L'Eocène inférieur également carbonaté,
- Le Mio-pliocène sableux. (tab. 10).

Ainsi, ces trois ensembles aquifères en étroite communication, ont été regroupés en un seul réservoir qui intègre également les formations carbonatées du Turonien dans les zones de bordures (UNESCO, 1972), (Fig.19).

Le bassin oriental a fait l'objet de plusieurs travaux qui ont tenté de comprendre le comportement hydrodynamique du CT, qui couvre une superficie de 350 000Km².

1. Caractéristique principales :

La nappe du Complexe Terminal est en charge à l'intérieur de la limite d'extension des argiles du Mio-pliocène. Elle est donc jaillissante dans le centre du bassin et libre sur les bordures Dahar-M'Zab (UNESCO, 1972) (Fig.19).

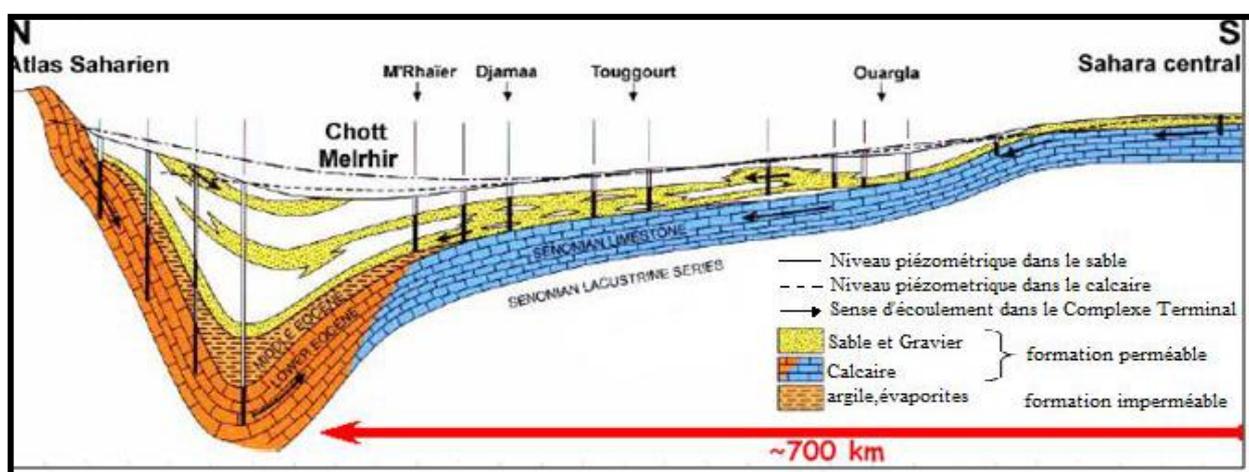


Fig.19 : Coupe hydrogéologique Nord- Sud du Complexe Terminal du Bas Sahara (UNESCO, 1972).

La profondeur de la CT varie entre 100 et 500 m. la température des eaux peu élevée et l'eau est moins chargée en sels sur les bordures et relativement plus chargée au centre (**plus de 3g/l**).

La nappe du CT regroupe trois aquifères, situés dans des formations géologiques différentes subdivisées en deux ensembles : l'un continental au sommet (CT1 et CT2) et l'autre marin à la base (CT3) :

- **La première nappe des sables CT1** : sa puissance varie entre 50 et 100m par endroits, il s'agit d'une nappe semi-captive moins profonde, elle est constituée de sable fin à moyen, sable argileux et grès, du Mio-pliocène. Limitée par des formations semi-perméables.
- **La deuxième nappe CT2** : son épaisseur est de 20 à 36m, surmontée par la nappe du CT1, elle est constituée par des formations d'âge mio-pliocène, essentiellement formée par des grès, gravier et sable avec la présence de quelques lentilles argileuses.
- **La nappe des calcaires du Sénonien carbonaté/Eocène inférieur CT3** : son épaisseur atteint les 200m à Touggourt et 360m à Meghaier. elle est formée essentiellement de calcaires, calcaires dolomitiques avec passées de marne, d'anhydrite et de gypse.

2. Evolution piézométrique :

Selon les travaux du projet **OSS (2002)**, il a été démontré que dans l'ensemble du Bas Sahara, le niveau piézométrique de la CT accuse une diminution sensible, elle est de l'ordre de 32m en 43 ans dans la vallée d'Oued Righ.

C. La nappe du Continental Intercalaire :

La nappe du CI est contenue dans des formations continentales du Crétacé inférieur, sablo-gréseuses, dolomitiques et calcaire-marneuses. Il s'agit bien d'un immense réservoir aquifère qui contient un volume considérable d'eau douce, dû à la fois à son extension sur tout le Sahara Septentrional sur plus de 600.000 Km² et son importante épaisseur qui dépasse les 1000m par endroit.

La réserve théorique estimée par le projet OSS et ERESS extrapolée des anciens travaux de **CONRAD et al. (1969)**, à 60 000 milliards de m³, soit seulement 1/6^e, environ 10 000 milliards, sont exploitables. Le CI s'étend du Nord au Sud, depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili du Hoggar et d'Ouest en Est, depuis la vallée du Guir et de la Saoura jusqu'au désert libyen.

1. Caractéristiques principales de la nappe du CI :

Dans le centre du bassin, plus précisément dans la gouttière d'Oued Righ, où les captages ont une profondeur de 1760m au Nord de la vallée, la nappe est fortement artésienne et l'eau d'exhaure a une température élevée qui dépasse parfois les 60C° et une pression de 26 bars, à la sortie des forages. Les eaux de la nappe du CI sont caractérisées d'une part, par le caractère corrosif (H₂ SO₄ et CO₂) et la minéralisation qui s'oscille entre 1 et 2 g/l de résidu sec, parfois jusqu'à 5g/l.

La porosité du grès et du sable du CI a été évaluée à 26%, la transmissivité est de l'ordre de 6. 10³ m²/s à Oued Righ, la perméabilité est de 10⁻³ m/s, (**CASTANY G., 1968**).

2. Alimentation :

Les anciens auteurs ont cru que les aquifères du Sahara septentrional étaient fossiles et ne se rechargeaient pas ! Alors que les travaux récents montrent le contraire s'appuyant sur des méthodes plus modernes telles que la géochimie isotopique. Citons les travaux effectués par **OUELD BABA SY, 2005**, qui dans un cadre de projet **OSS 2006** a suivi l'évolution géochimique des eaux souterraines, pendant une quinzaine d'années en s'appuyant sur les mesures de tritium, le carbone-14 et le chlore-36 dans les forages et les puits. L'auteur situait cette recharge à environ **1 milliard m³** par an sur l'ensemble du système SASS (**Fig.20**), (**tab. 11**).

Cette recharge s'effectue d'une part par infiltration des eaux de ruissellement, tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux dans les périphéries là où le CI affleure, notamment l'Atlas saharien, mais aussi parfois dans le plateau de Tadmait, d'autre part des pluies d'années exceptionnelles, sur le grand Erg occidental, plus loin cette recharge s'effectue sur le Dakar en Tunisie et sur le Dj- Nefoussa en Libye (**UNESCO, 1972**).

La nappe du Continental Intercalaire possède la durée de renouvellement la plus longue (**OUELD BABA SY, 2005**). Elle proviendrait d'un pluvial datant du Pléistocène inférieur et de l'Holocène.

L'âge des eaux des différentes nappes du SASS, déterminé au C14, montre qu'aux zones de recharge, les eaux sont jeunes et attestent d'une recharge actuelle de l'ordre de 500 ans près des zones d'alimentation possible, et arrivent jusqu'à 40000 ans dans les parties confinées des nappes et des zones d'exhaures, situées à 500 km des zones de recharge (**CONRAD et al, 1968**).

Le débit d'alimentation du CI provenant du piémont de l'Atlas saharien a été estimé par les travaux anciens à 4 m³/s (CORNET, 1961) et 8.5 m³/s (MARGAT, 1990), plus récemment OUELD BABA SY en 2005 le situait à 7.7 m³/s.

Tab.10 : Synthèse régionale des différents aquifère de la région d'étude, échelle arbitraire (ANRH/Ouargla).

ERE	Etage		Lithologie	Intérêt Hydrogéologique
Quaternaire			Sables.	Nappe superficielle (la nappe phréatique)
			Argiles, évaporites, Sables.	(semi-perméable)
Tertiaire	Mio-Pliocène		Sables.	1 ^{ère} nappe des sables (Complexe Terminal).
			Argiles gypseuses, Sables.	(semi-perméable)
	Pontien		Sables, graviers et grès	2 ^{ème} nappe des sables (Complexe terminal).
	Eocène	Moyen	Argiles lagunaires	Substratum (imperméable)
		Inférieur		Nappe des calcaires (Complexe Terminal).
Secondaire	Crétacé	Sénonien calcaire	Dolomies et calcaires	Substratum (imperméable)
		Sénonien lagunaire	Evaporites, argiles	Substratum (imperméable)
		Cénomanién	Argiles, marnes	Substratum (imperméable)
		Albien		Nappe albienne
		Barrémien	Sables et grès	(Continental Intercalaire).

Tab. 11 : Quelques données sur le grand bassin SASS, OSS (2003) .

Surface	1.000.000 km ²		
Réserves théoriques	60.000 milliards de m ³ dont 10 000 milliards/m ³ exploitables		
Recharge	1 milliard de m ³ /an		
Besoins (m ³ /an)	1970	2000	2030
	600 millions	2,2 milliards	8 milliards
Population (en millions)	1,0	4.0	8
Surfaces irriguées prévisionnelles	50 000 ha	170 000 ha	400 000 ha
Pays	Algérie + Libye + Tunisie		

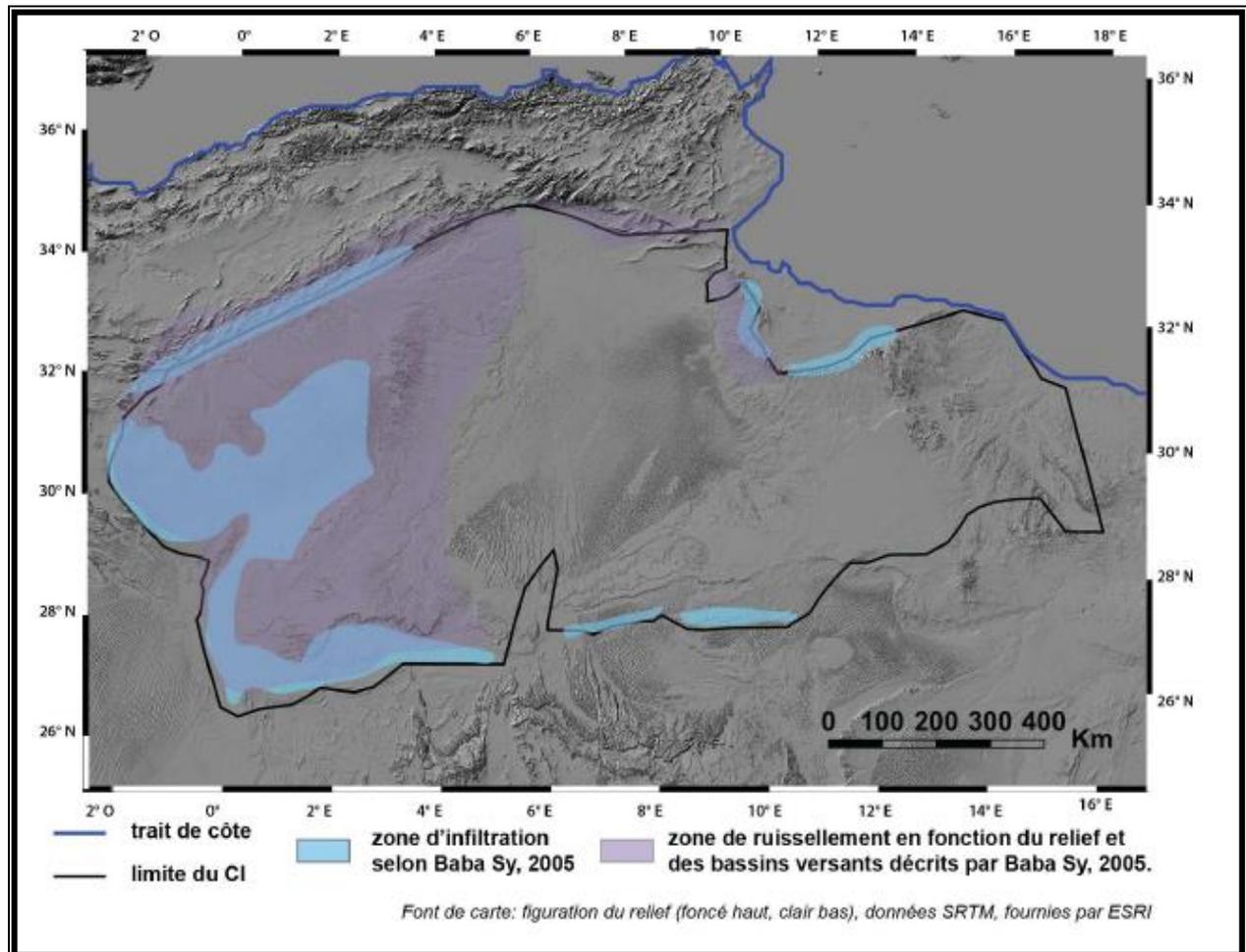


Fig.20 : Carte des zones d'infiltrations et de ruissellement du CI à partir des données de OUELD BABA SY, 2005 in J.O.PETERSEN, 2014.

3. Ecoulement :

D'une manière générale, l'écoulement des eaux de la nappe du CI provenant de l'Atlas saharien, se diverge sur la l'axe de la dorsale du M'Zab, suivant deux directions. Le premier se fait dans la patrie occidentale du Nord vers le Sud et le deuxième, dans la partie orientale, de l'Ouest vers l'Est (**Fig.22**).

4. Les exutoires :

On peut y distinguer trois zones d'exutoires naturels et artificiels, à l'échelle du SASS ; les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt, la faille d'El-Hamma en Tunisie et AinTawargha dans le domaine libyen (**Fig.21**). Dans la vallée d'Oued Righ l'exutoire est matérialisé par les zones de Chotts et les forages d'eau artésiens.

On peut admettre qu'une drainance ascendante est possible depuis la CI vers la CT en faveur de la dorsale d'Amguid, (**GUENDOUIZ, 1985, EDMUNDS et al, 2003 ; MOULLA et al, 2002 ; GUENDOUIZ et al, 2003**), cette drainance verticale constitue également un exutoire naturel (**Fig.22**).

5. Estimation des réserves :

Les réserves théoriques des deux aquifères CI et CT ont été estimés entre 30.000 et 60.000 milliards de m³ (CORNET, 1961 ; 1964), (UNESCO, 1972), (MARGAT ,1992) et (OUELD BABA SY, 2005).

Les réserves du CI ont été revisitées par OUELD BABA SY en 2005, en se basant sur une approche statistique, faisant intervenir la profondeur moyenne des forages pétroliers qui l'a situé à 358m et un coefficient d'emménagement entre 5 et 10% ,d'après les travaux du projet SASS (OSS, 2003). Ainsi que la superficie globale du SASS a été revue à la hausse à 1100 000 km². Cette approche fixe les réserves à 31 000 km³, entre environ 20 000 km³ pour le CI et 11000 km³ pour le CT.

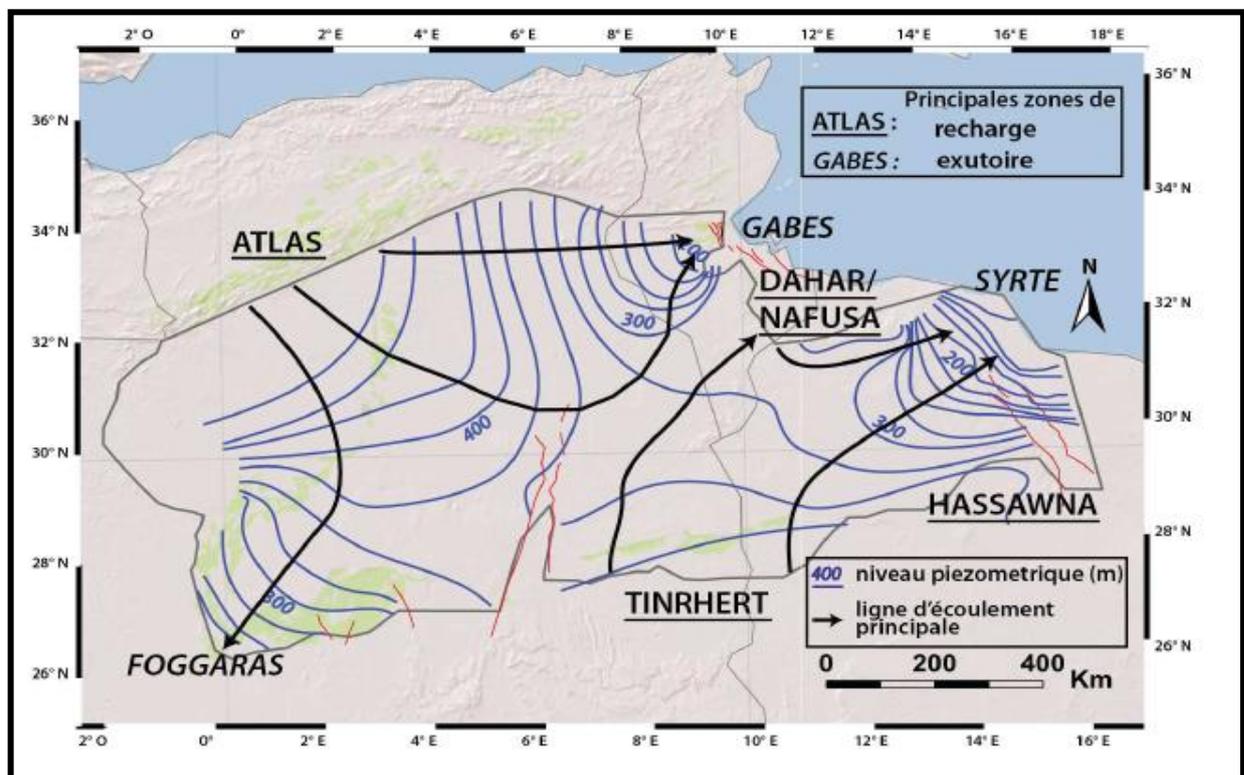


Fig.21: Carte piézométrique de référence en 1950 (données OSS, 2003) et principales directions d'écoulement, zones de recharges et d'exutoires majeurs, (in J.O.PETRESEN, 2014).

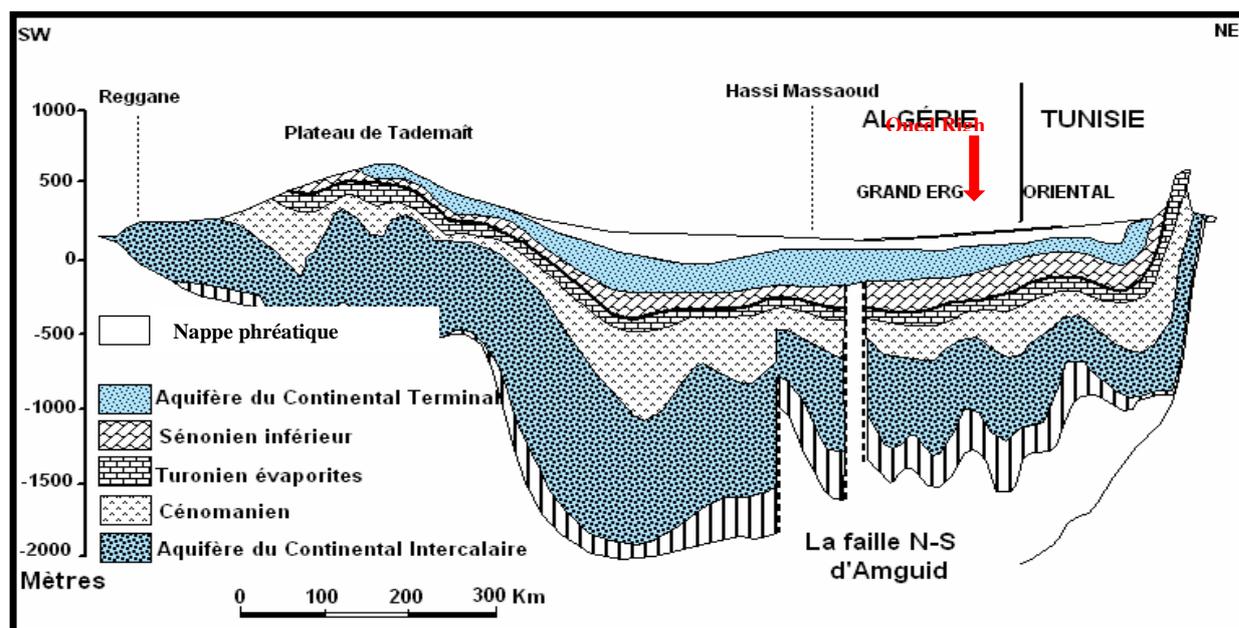


Fig.22 : Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional (UNESCO, 1972 modifiée).

II. HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE :

A. Piézométrie :

Nous ne disposons que des données régionales des relevés et cartes piézométriques établies antérieurement dans le cadre du projet SASS. Néanmoins, la piézométrie au niveau local de la nappe du CI de l'entité hydrogéologique de la vallée de l'Oued Righ est quasiment absente, du point de vue documentation. L'absence de cette dernière est liée principalement aux difficultés techniques de mesures dont nous exposerons rapidement la genèse ci-dessous :

L'absence de véritables piézomètres destinés spécifiquement aux mesures des niveaux hydrostatiques, obligeant ainsi de faire appels aux forages de consommations, déjà existants. Cette opération se heurte aux réticences des usagers qui se trouvent ainsi privés d'eau, durant un certain temps.

Outre, les forages artésiens qui captent la nappe profonde du CI, situés dans la vallée de l'Oued Righ se heurtent par le fait que les mesures hydrostatiques ne sont, hélas possibles, faute d'équipement de vannes qui servent aux branchements des manomètres.

S'ajoute la contrainte de la température élevée qui impose une correction, pour tenir compte de la réduction du poids spécifique de l'eau, avec la température.

B. Evolution piézométrique :

Selon les travaux du projet OSS (2002), la vallée d'Oued Righ a connu une prolifération intense des forages profonds captant la nappe du CI, ce qui a provoqué une baisse piézométrique non négligeable depuis les années 80, cette baisse piézométrique dépasse souvent 2m/an.

Des simulations exploratoire ont été réalisées à partir d'une hypothèse de rabattement zéro par le projet OSS, et ont montré qu'en 2050 les rabattements attendront plus les 300 à 400m dans la gouttière de l'Oued Righ ! avec disparition total de l'athésianisme dans tout le bas Sahara ce qui va engendré une situation critique dans l'Oued Righ où les profondeurs de pompage arriveront selon le model entre 100 et 300m. Les fig. 23 et 24 montrent clairement l'ampleur de la situation à O.Righ.

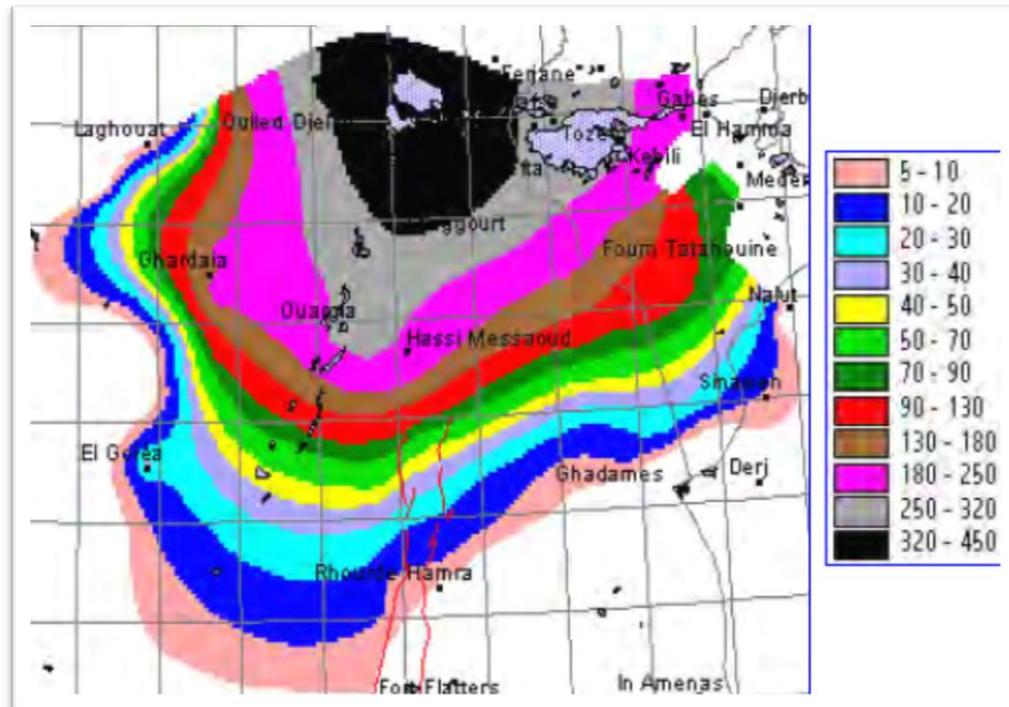


Fig.23: Rabattement nets en 2050 (OSS, 2003).

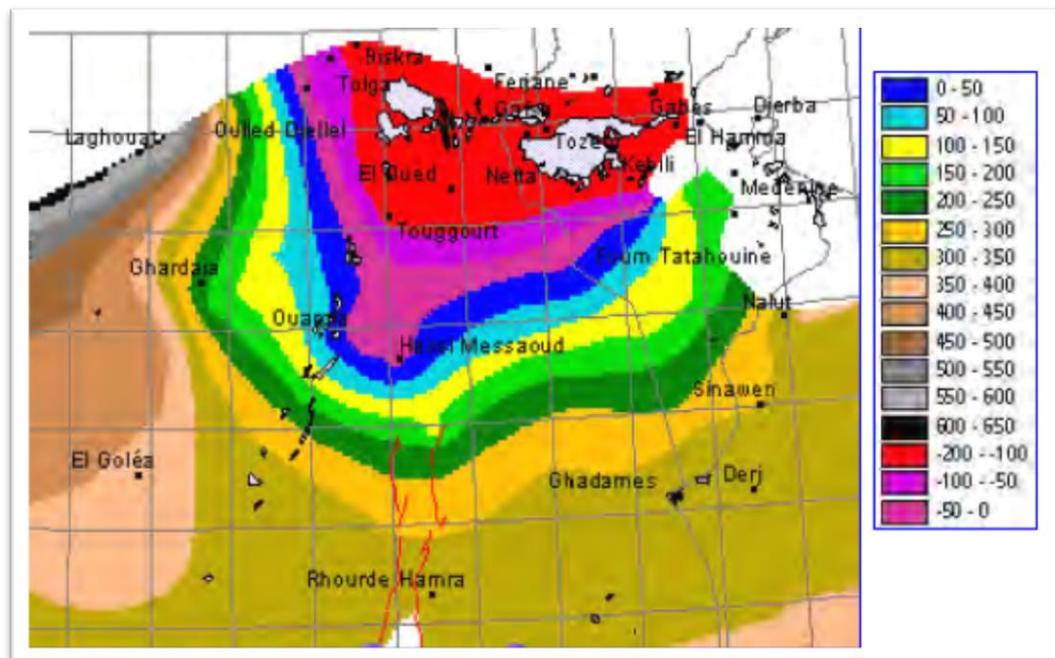


Fig.24: Niveau piézométrique en 2050 (OSS, 2003).

C. Paramètres hydrodynamiques de la nappe albienne CI :

Les paramètres hydrodynamiques, fruits des essais de pompage à longue durée sont paradoxalement confrontés aux problèmes techniques de mesures évoqués plus haut. Nous contentons par la synthèse ci-dessous, présentée sous forme de tableau (Tab.12).

Tab.12 : Données générales sur la nappe du CI (BELKSIER M.S, 2009 légèrement modifié).

Etendue	600 000 km ²
Epaisseur totale (m)	50 à 1000
Profondeur (m)	60 à 2400
Profondeur au toit (m)	20 à 2000
Epaisseur de la couche utile productrice (m)	150 à 200
Débit (l/s)	50 à 400
Niveau statique par rapport au sol (m) (Menaia)	Artésien (25 bars)
Rabatement par apport au N.S (m) (toute la région)	Artésien
Transmissive (10 ⁻³ m ² / s)	10 à 30
Coefficient d'emmagasinement (10 ⁻⁴)	6 à 1200
Alimentation moyenne (h.m ³ /an)	270
Reserve théorique calculée (m ³)	50000 x10 ⁹
Température (°C)	25 à 70
Salinité des eaux (g/l)	0,5à6

D. Condition aux limites de la nappe albienne CI :

Nous nous contenterons des travaux de G. CASTANY (1998) pour relater les conditions aux limites de la nappe du CI à l'échelle régionale. Car, dans la gouttière de l'Oued Righ, qui est en fait une zone de transition, nous n'avons trouvé aucune donnée précise qui met en évidence les conditions aux limites de la gouttière.

Deux zones hydrogéologiques ont été mises en évidence, la première à l'Ouest du Grand Erg Occidental-Tademaït, la deuxième à l'Est dont la gouttière de l'Oued Righ en fait partie est l'unité du Grand Erg Oriental-Tinhert-Chotts. Nous nous intéressons dans ce mémoire que par cette dernière avec la grande zone d'exutoire de la dépression fermée, vastes cuvettes d'évaporation des grands chotts du Sud algérien et tunisien, dans la région d'étude il s'agit des Chotts Merouane et Melghigh. Mais l'exutoire principal de l'ensemble de l'aquifère est l'écoulement de l'eau vers le golf du Gabes (Tunisie) qui se matérialise par un aquifère côtier. Les zones d'alimentation dans cette unité hydrogéologique orientale sont au sud ; les affleurements de Tinhert, à l'Est, l'apport latéral de l'aquifère de Lybie et, au N-E, l'alimentation par Dahar. Les grands axes de flux, dans cette zone de transition (gouttière de l'Oued Righ), sont orientés W-E. dans la dépression des chotts, au Nord et subméridiens, au Sud. Les failles subméridiennes d'El-Abiod, au centre, provoquent des fuites au toit de la formation. Nous renvoyons aux fig.21 et 22 ainsi qu'à la fig.25 ci-dessous.

Selon **CASTANY, 1989** ; L'étude hydrogéologique affinée par calage du modèle mathématique de simulation hydrodynamique en régime permanent a défini les conditions aux limites ; nous nous basons que sur l'unité hydrogéologique du bassin oriental ; limite à potentiel imposé au S et au S-E du bassin orientale (Plateau de Tinhert) et Dahar en Tunisie.

Limite à débit imposé entrant et sortant ; l'aquifère latéral du Lybie et Tinhert et enfin limite à débit nul ; au niveau des failles subméridiennes d'El-Abiod.

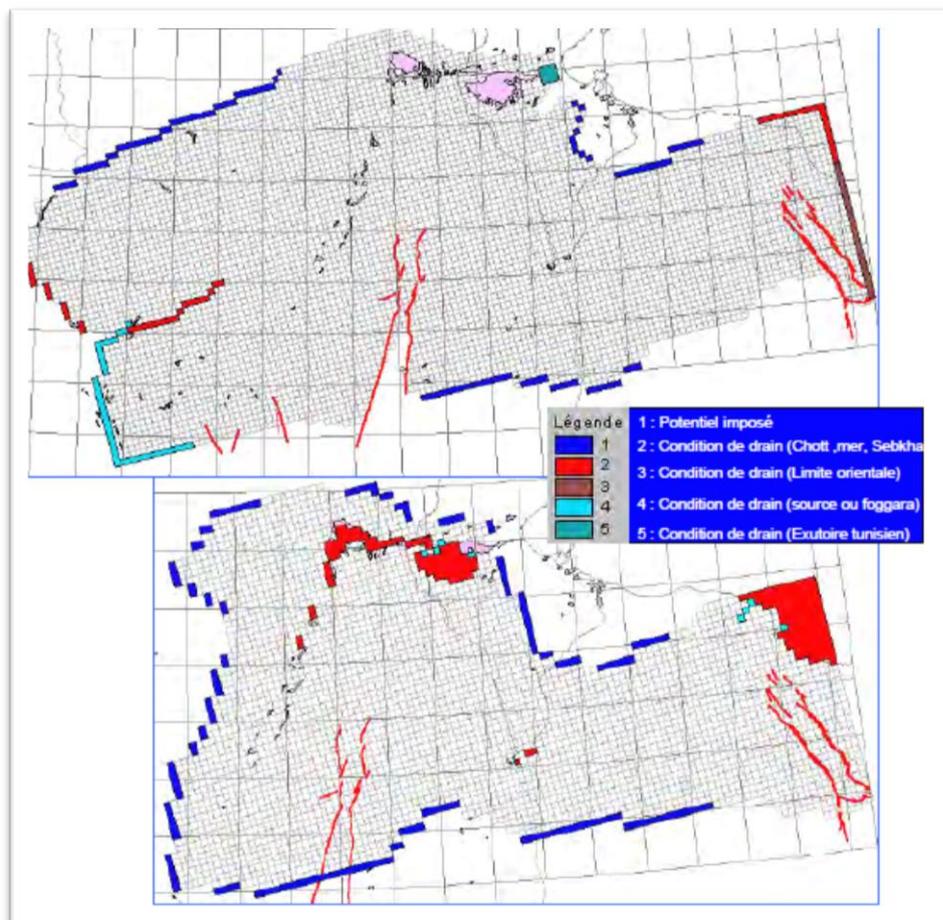


Fig.25: Conditions aux limites (OSS, 2003).

Il ressort de ce tableau que la nappe albienne est essentiellement perméable, de nature lithologique détritique, surmontée par un toit argilo-marneux qui constitue le substratum du Complexe Terminal basal (CT3) du Sénonien et d'Eocène carbonatés. Cette nappe objet de ce mémoire constitue un immense réservoir d'eau souterrain qui se classe parmi les plus importants du monde.

CONCLUSION :

Il ressort à travers cette synthèse hydrogéologique que la nappe albienne, dite aussi nappe du Continental Intercalaire dont la gouttière de l'Oued Righ en fait partie, si nous nous permettons de l'appeler ou du moins de l'assimiler à une sorte de synclinorium, est une entité hydrogéologique intégrante du SASS. Surmontée par la nappe tertiaire multicouche du Complexe Terminal « CT » qui elle-même est coiffée par la nappe phréatique du Plio-Quaternaire.

Le caractère gréseux et argileux du CI ainsi que son extension verticale et horizontale, lui confère la faculté d'être le réservoir d'eau souterrain le plus important.

Dans la gouttière d'Oued Righ, les captages peuvent atteindre une profondeur de 1760m au Nord de la vallée, la nappe est fortement artésienne et l'eau d'exhaure a une température élevée qui dépasse les 60C° et une pression de 26 bars, à la sortie des forages. Les eaux de cette nappe se caractérisent d'une part, par le caractère corrosif et la forte minéralisation.

La recharge de la nappe du CI fossile est négligeable, cette recharge relativement faible s'effectue d'une part, par infiltration des eaux de ruissèlement tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux dans les périphéries, notamment l'Atlas Saharien, mais aussi parfois du plateau de Tadmaït, d'autre part des pluies d'années exceptionnelles sur le grand Erg occidental. Les études modernes ont réévaluées les évaluations des réserves, ont été fixées à 20 000 km³, pour seulement la nappe du CI et en revanche une recharge annuelle de l'ordre de 1 milliard de m³.

D'une manière générale, l'écoulement des eaux de la nappe du CI provenait de l'Atlas saharien, se diverge sur la l'axe de la dorsale du M'Zab suivant deux directions. La première se fait dans la patrie occidentale du Nord vers le Sud et la deuxième, dans la partie orientale, d'Ouest vers l'Est.

L'exutoire est matérialisé par les zones des Chotts et les forages d'eau artésiens dans la région d'étude, ainsi on peut leur y rajouter les exutoires naturels, en avançant l'hypothèse d'une éventuelle drainance ascendante ou percolation depuis la nappe profonde CI vers les nappes sus-jacentes du Complexe Terminal. Cette drainance ascendante dont nous avançons l'hypothèse de dépérissements des tubages des forages qui par perte de charges hydrauliques, l'eau de la nappe captive albienne remonte vers les nappes sus-jacentes, à savoir le CT et voir même la nappe phréatique. Nous efforcerons dans le chapitre qui suit, hydrogéochimie, de démontrer s'il y a lieu d'une éventuelle contamination des eaux profondes CI avec celles du CT et la nappe phréatique et ainsi confirmer ou infirmer notre hypothèse avancée.

Des méthodes extrapolatives de simulation du devenir de la nappe du CI ont démontré une situation dramatique, si la mobilisation et l'exploitation de la ressource continue de la même cadence d'aujourd'hui, un rabattement de 300 à 400m au niveau de la gouttière de l'Oued Righ, il y aura même une absence total de l'arthésianisme des forages avec des profondeurs de pompages de l'ordre de 100 à 300m !

CHAPITRE V
HYDROGEOCHIMIE

INTRODUCTION

Quand on parle d'eau dans les couches géologiques, il s'agit en réalité d'une phase aqueuse dont la composition peut être très complexe, étant donné le contact très intime entre la roche et l'eau qui l'accompagne, on pourrait s'attendre à ce que l'eau soit saturée par rapport à chacun des corps existants dans le terrain imbibé, (M. DETAY, 1993).

A cette optique, l'étude hydrogéochimique a donc un but de déterminer la qualité des eaux, en référence aux normes de potabilité et d'irrigation et d'essayer de comprendre la genèse des échanges ioniques entre le complexe Roche-Eau.

Bien entendu, la présente étude s'est consacrée sur les échantillons prélevés des forages captant la nappe du Continental Intercalaire (CI), plus précisément dans la gouttière d'Oued Righ. Pour se faire, deux campagnes d'analyses physico-chimiques durant deux périodes différentes : novembre 2010 et avril 2012 ont été réalisées par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (A.N.R.H/Ouargla) dont nous avons tiré profit. Ces analyses concernent sur les paramètres suivants : le pH, la température, la conductivité, la salinité, TDS et les teneurs en composants chimiques majeurs :

Les cations : Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , K^+

Les anions: HCO_3^- , SO_4^{--} , Cl^- , NO_3^-

Bien entendu, nous avons précédemment avancé l'hypothèse d'une drainante ascendante éventuelle depuis la nappe captive albienne vers la nappe du CT et même la nappe phréatique par percolation à travers les tubages usées et corrodés. Nous allons alors dans ce chapitre affirmer ou infirmer cette hypothèse par la comparaison du chimisme des deux campagnes.

I. CONTROLE DES ANALYSES CHIMIQUES PAR LA BALANCE IONIQUE

Les résultats des analyses physico-chimiques sont présentés dans les tableaux IV et X, en annexes. D'après Rodier J. (2009) les analyses chimiques peuvent être contrôlées par la balance ionique, par la formule suivante :

$$BI = \left| \frac{\sum \mathbf{r}^+ - \sum \mathbf{r}^-}{\sum \mathbf{r}^+ + \sum \mathbf{r}^-} \right| \times 100$$

"BI": Balance ionique en (%).

" r " : Quantité en réaction, avec $r = [\text{Cp}/m] \times Z$ (méq/L).

"Cp": Concentration pondérale (mg/L).

"m": Masse atomique.

"Z": Numéro atomique.

Si $BI > 5\%$ il y a une erreur dans l'analyse.

Si $BI < 2\%$ c'est une bonne analyse.

Si $2\% < BI < 5\%$ une analyse acceptable.

Les valeurs de la balance ionique, calculées pour les deux campagnes sont reportées au tableau ci-dessous:

Tab.13 : Valeurs de la balance ionique en 2010 et 2012.

N° des forages(2010)	BI (%)	Classement	N° des forages(2012)	BI (%)	Classement
F1	2.32	Acceptable	F1	2.84	Acceptable
F2	0.6	Bonne	F2	4.41	Acceptable
F3	3.53	Acceptable	F3	0.38	Bonne
F4	4.26	Acceptable	F4	0.88	Bonne
F5	1.93	Bonne	F5	0.36	Bonne
F6	3.44	Acceptable	F6	1.62	Bonne
F7	2.56	Acceptable	F7	4.69	Acceptable
F8	3.07	Acceptable	F8	0.54	Bonne
F9	1.69	Bonne	F9	3.86	Acceptable
F10	0.6	Bonne	F10	1.58	Bonne
F11	0.14	Bonne	F11	4.63	Acceptable
F12	16.19	Erreur	F12	4.6	Acceptable
F13	6.22	Erreur	F13	1.29	Bonne
			F14	1.93	Bonne

1. La série de Novembre 2010 :

Selon la balance ionique (BI), on peut dire que les résultats obtenus pour :

- les forages F₂, F₅, F₉, F₁₀, F₁₁ sont bons (BI < 2%) ;
- les forages F₁, F₃, F₄, F₆, F₇, F₈ sont acceptables (2% < BI < 5%) ;
- tandis que pour les forages F₁₂ et F₁₃, la balance ionique montre un pourcentage d'erreur supérieure à 5%.

2. La série d'Avril 2012 :

La balance ionique montre un pourcentage inférieur à 2% pour les forages F₃, F₄, F₅, F₆, F₈, F₁₀, F₁₃, F₁₄ (bonne analyse), à l'exception des forages F₁, F₂, F₇, F₉, F₁₁, F₁₂ qui présentent un pourcentage compris entre 2% et 5% (analyse acceptable).

II. INTERPRETATION DES ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES

A. Les normes de potabilité :

La qualité de l'eau de consommation est appréciée sur la base des normes de potabilité, définies par la réglementation algérienne (N.A.) 6360 en 1991 (tableau N°XI, en annexes).

B. Les Paramètres physiques :

1. Température :

Les valeurs des températures des eaux de la région d'étude varient entre 47.5 °C et 60.40°C, pour la campagne de 2010 et 40.5°C à 61.30°C, pour celle de 2012, ce qui est la caractéristique des eaux géothermales.

On peut admettre que l'eau de la nappe albienne, sous l'effet de la température élevée facilite la dissolution des minéraux des couches géologiques, traversées en profondeur.

Ces eaux à basse géothermie sont utilisées pour l'AEP et l'irrigation, leur exploitation nécessite un abaissement de température (refroidissement), afin d'éviter le problème d'entartrage des canalisations, du transport ainsi l'inefficacité des accessoires des réseaux qui augmente avec le temps.

Les normes algériennes fixent la température de l'eau destinée à la consommation humaine à 25 °C (Fig.26).

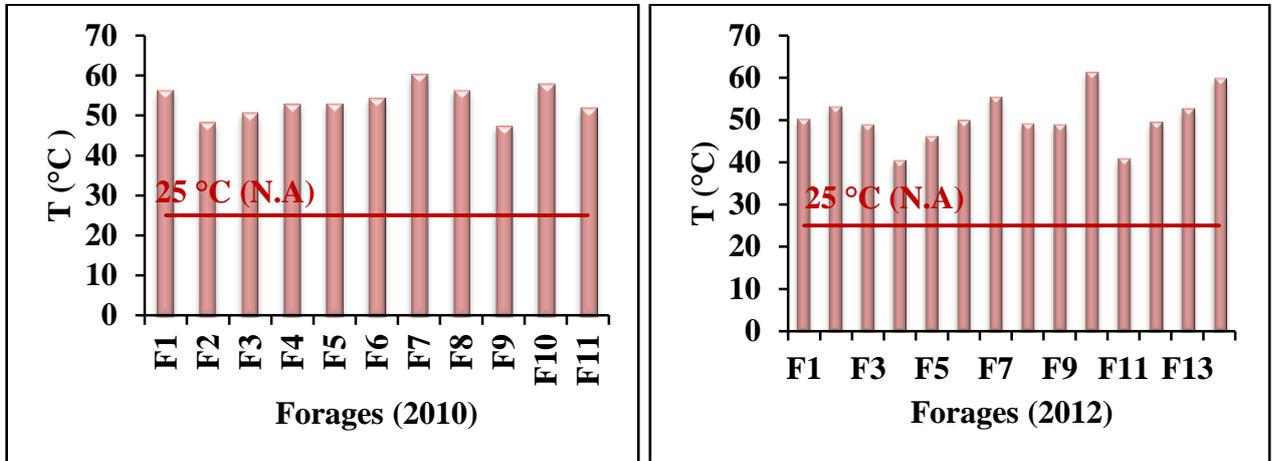


Fig.26 : Histogrammes des températures de l'eau de la nappe du CI.

2. Potentiel d'hydrogène (pH) :

Le pH est un paramètre qui sert à définir l'acidité et la basicité d'une solution (eau), ses valeurs sont liées à la concentration en ions (H⁺) contenue dans l'eau et à la nature des terrains traversés (RODIER J., 2009).

Pour les deux campagnes, la plupart des forages présentent des valeurs de pH allant de 7.23 à 9.1 (Fig.27), ces valeurs répondent aux normes algériennes qui sont comprises entre 6.5 et 8.50, à l'exception des forages F₁, F₂, F₄, F₅, F₇, F₈, F₉, F₁₀ (campagne 2010) qui présentent des valeurs hors intervalle des normes fixées. La (Fig.27) montre également une diminution du pH en 2012, cela pourrait être expliqué par une dilution qui s'est manifestée et que l'hypothèse avancée de l'éventuelle percolation par le biais des forages affectés par le dépérissement. Il s'agit probablement d'un mélange des eaux de la CI par celles de la CT, voir même par celle de la nappe phréatique. Lors de l'échantillonnage, l'eau n'était probablement pas propre à la CI.

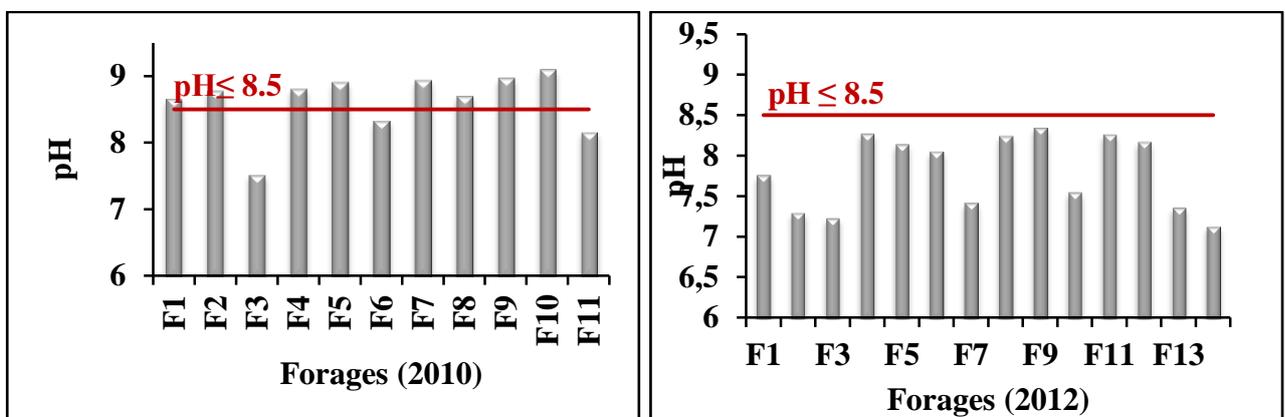


Fig.27 : Histogrammes des pH de l'eau de la nappe du CI.

3. Conductivité électrique :

La conductivité électrique augmente lorsque la teneur en sels dissous augmente "forte minéralisation", et cela est dû à la présence excessive de cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+) et d'anions (HCO_3^- , CO_3^{2-}) et permet l'estimation de la minéralisation (RODIER J., 2009).

Les valeurs de la conductivité sont comprises entre 2110 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2720 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour les deux campagnes, elles répondent aux normes algériennes, qui la fixent à 2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$, à l'exception des forages F₁ (2010) et F₁, F₆ (2012) qui présentent des valeurs élevées : 3300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 3370 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2860 $\mu\text{S}/\text{cm}$ respectivement (Fig.28).

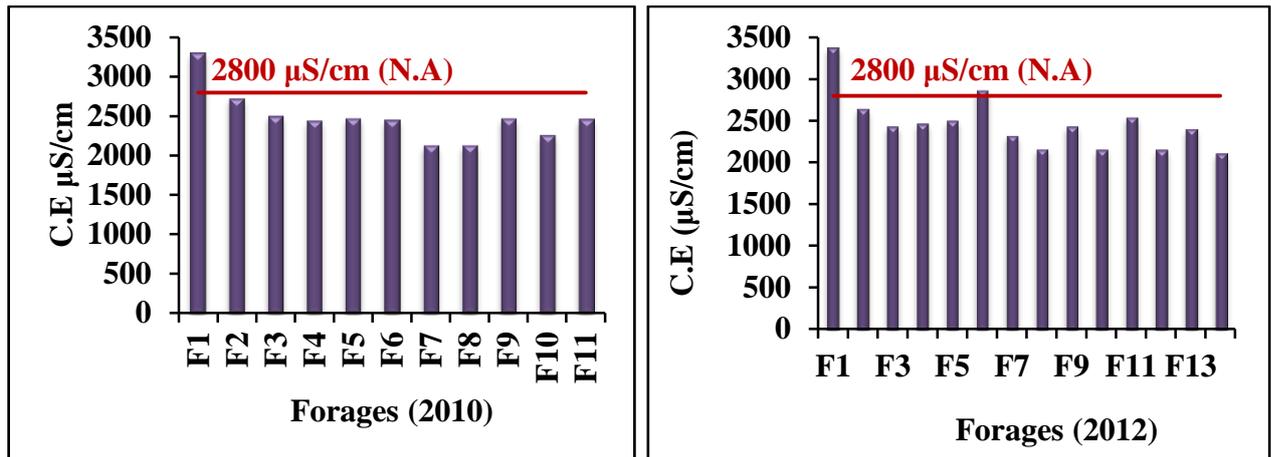


Fig.28 : Histogrammes des conductivités électriques des eaux de la nappe du CI.

La figure 29, représente les variations spatiales de la conductivité électriques, nous remarquons que les zones de fortes conductivités sont essentiellement situées au Sud et au centre du secteur d'étude, pour les deux campagnes et ont tendance à diminuer vers le Nord. Par conséquent la conductivité électrique renseigne sur le degré de minéralisation avec des valeurs qui dépassent totalement les normes algériennes. Cette élévation est due au temps de séjour de ces eaux dans l'encaissant représenté par le réservoir gréseux. Pus que l'eau est ancienne plus qu'elle est riche en minéraux.

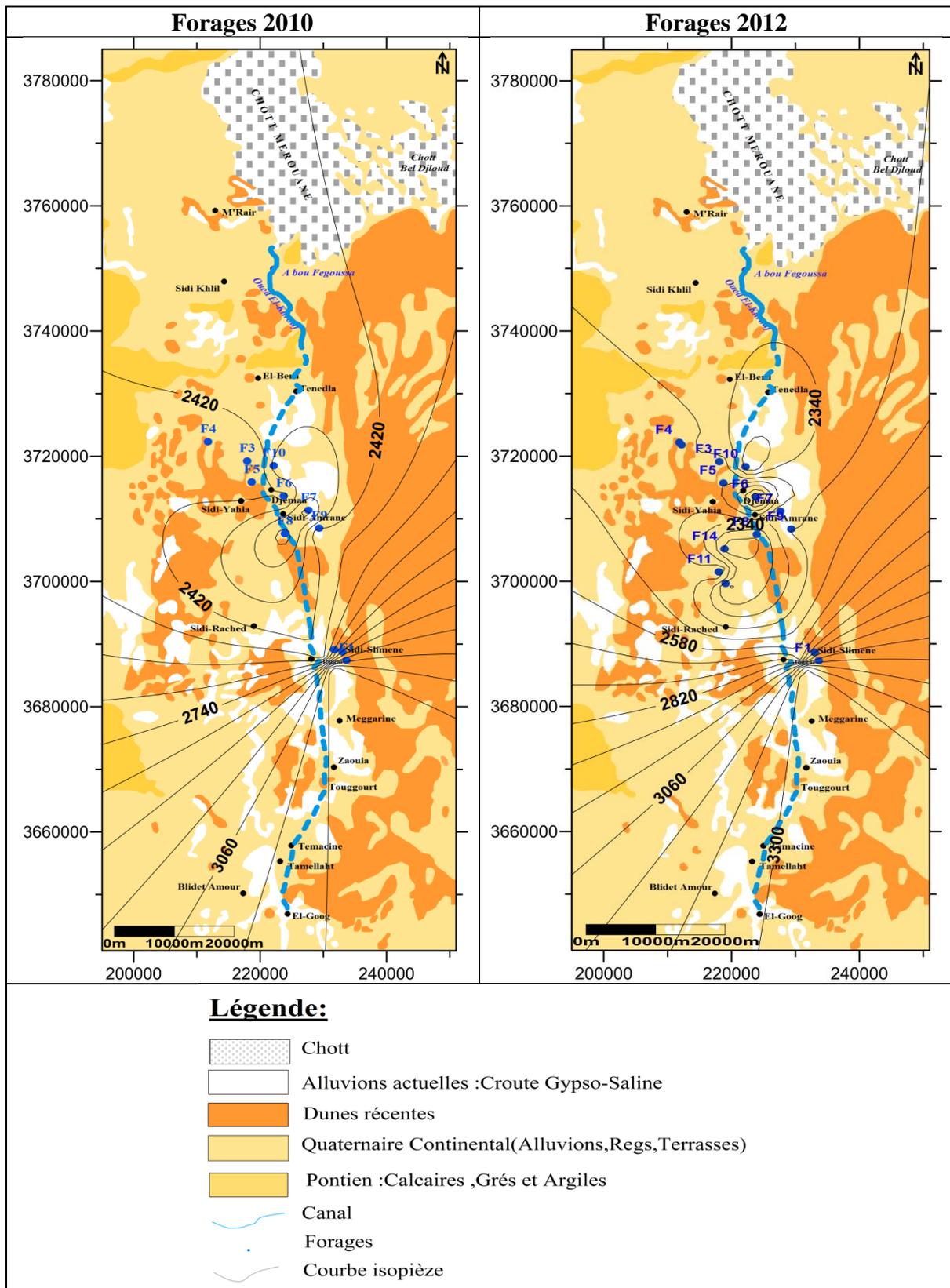


Fig.29 : Carte d'iso-conductivité.

4. Minéralisation :

La minéralisation est fonction de la géologie des terrains traversés. D'une façon générale, elle est plus élevée dans les eaux souterraines que dans les eaux superficielles (RODIER J., 2009).

D'après Rodier J. (2009), la minéralisation globale déterminée au moyen des formules est présentée dans le tableau ci-dessous :

Tab.14 : Calcul de la minéralisation, à partir de la conductivité électrique.

Conductivité (µS/cm)	Minéralisation (mg/L)
Conductivité < 50 µS/cm	1.365079. conductivité
Conductivité [50 à 166] µS/cm	0.947658. conductivité
Conductivité [166-333] µS/cm	0.769574. conductivité
Conductivité [333-833] µS/cm	0.715920. conductivité
Conductivité [833-10000] µS/cm	0.758544. conductivité
Conductivité > 10000 µS/cm	0.850432. conductivité

Le tableau ci-dessous donne quelques indications sur la relation qui existe entre la minéralisation et la conductivité électrique (RODIER J., 2009).

Tab.15 : Relation entre la conductivité électrique et la minéralisation.

Conductivité électrique	Minéralisation
Conductivité < 100 µS/cm .	Minéralisation très faible
100 µS/cm < Conductivité < 200 µS/cm .	Minéralisation faible
200 µS/cm < Conductivité < 333 µS/cm .	Minéralisation moyenne
333 µS/cm < Conductivité < 666 µS/cm .	Minéralisation moyenne accentuée
666 µS/cm < Conductivité < 1 000 µS/cm .	Minéralisation importante
Conductivité >1000 µS/cm .	Minéralisation élevée

Les valeurs de la minéralisation calculées à partir de la conductivité électrique, pour les deux compagnes sont reportées au tableau n°16 :

Tab.16 : Valeurs de la minéralisation calculées à partir de la conductivité électrique.

N° des Forages (2010)	C.E. (µS/cm)	Minéralisation (mg/l)	Classification	N° des Forages (2012)	C.E. (µS/cm)	Minéralisation (mg/l)	Classification
F1	3300	2503.20	élevée	F1	3370	2556.29	élevée
F2	2720	2063.24	élevée	F2	2640	2002.56	élevée
F3	2500	1896.36	élevée	F3	2430	1843.26	élevée
F4	2440	1850.85	élevée	F4	2460	1866.02	élevée
F5	2470	1873.60	élevée	F5	2500	1896.36	élevée
F6	2450	1858.43	élevée	F6	2860	2169.44	élevée
F7	2130	1615.70	élevée	F7	2320	1759.82	élevée
F8	2130	1615.70	élevée	F8	2160	1638.46	élevée
F9	2470	1873.60	élevée	F9	2430	1843.26	élevée
F10	2260	1714.31	élevée	F10	2150	1630.87	élevée
F11	2460	1866.02	élevée	F11	2540	1926.70	élevée
				F12	2150	1630.87	élevée
				F13	2400	1820.51	élevée
				F14	2110	1600.53	élevée

Tous les forages de la zone d'étude présentent une minéralisation élevée, Elle varie entre 1600.53 mg/L (F₁₄ en 2012) et 2556.29 mg/L (F₁ en 2012). Cette élévation correspond d'une part à la teneur en sels dissous au sein de la nappe albienne favorisée par la température très élevée et d'autre par le temps de séjour de ces eaux dans l'encaissant, d'autant plus de l'hétérogénéité des faciès (grès, sable, argile et marne). Ces eaux sont classées parmi les eaux fortement minéralisées. L'évolution spatiale de ce paramètre est similaire à celle de la conductivité électrique (Fig.30).

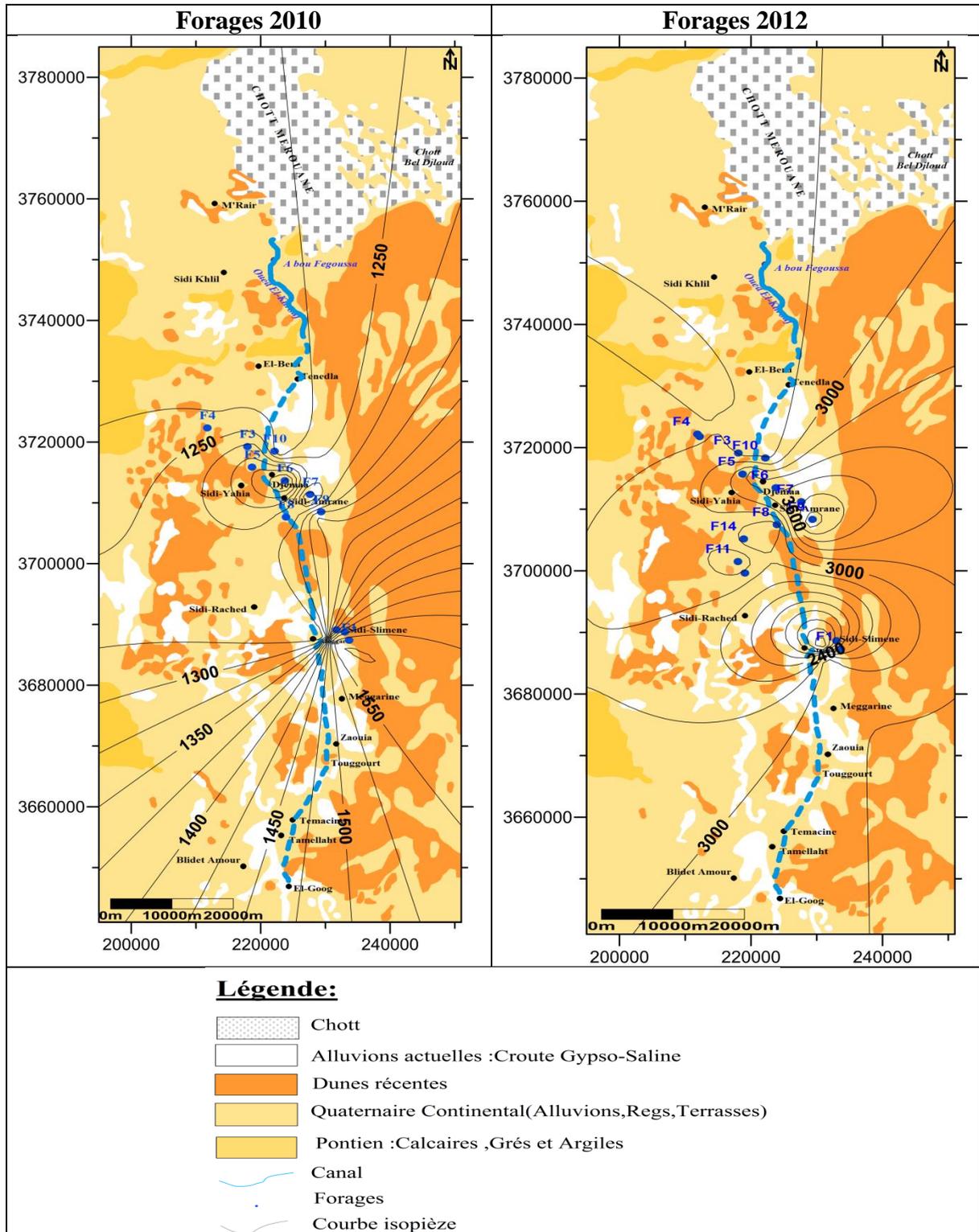


Fig.30 : Carte d'iso-minéralisation.

5. Dureté totale :

La dureté a un caractère naturel lié au lessivage des terrains traversés, elle est rattachée principalement à la quantité de calcium et de magnésium dans l'eau. Du point de vue domestique, une dureté élevée contribue également à accroître la consommation de savon ainsi que le temps de cuisson des légumes (RODIER J., 2009).

Dans l'ensemble, nous remarquons que toutes les valeurs de la dureté totale dépassent la valeur fixée par la réglementation nationale (500 mg /L_{CaCO3}), allant de 592 à 990mg/L_{CaCO3} (Fig.31), ce qui indique des valeurs très élevées de la dureté.

La dureté totale est composée généralement par la dureté calcique, en raison de la teneur élevée des ions de calcium et de magnésium. Cela est dû à la présence du faciès géologique carbonaté, probablement à proximité ou en contact avec l'Aptien. La Une augmentation de la dureté est constatée en 2012, ce qui laisse penser également qu'il s'agissait d'un contact entre les eaux profondes du CI avec celles du CT et probablement même de la nappe phréatique. Il s'agissait d'une contamination de l'échantillonnage lors des prélèvements qui confirme notre hypothèse précédemment annoncée de drainance ascendante (Fig.31).

Les valeurs de la dureté totale calculées pour les deux campagnes sont reportées dans le tableau ci-dessous :

Tab.17 : Valeurs calculées de la dureté totale.

Forages (2010)	TH (meq/L)	TH (°F)	TH (mg/L CaCO ₃)	Qualité de l'eau	Forages (2012)	TH (meq/L)	TH (°F)	TH (mg/L CaCO ₃)	Qualité de l'eau
F1	17.28	86.40	864	Elevée	F1	19.30	96.50	965	Elevée
F2	14.80	74.00	740	Elevée	F2	19.10	95.50	955	Elevée
F3	11.96	59.80	598	Elevée	F3	15.88	79.40	794	Elevée
F4	11.84	59.20	592	Elevée	F4	15.46	77.30	773	Elevée
F5	13.24	66.20	662	Elevée	F5	18.24	91.20	912	Elevée
F6	19.12	95.60	956	Elevée	F6	19.80	99.00	990	Elevée
F7	14.20	71.00	710	Elevée	F7	19.64	98.20	982	Elevée
F8	14.20	71.00	710	Elevée	F8	16.84	84.20	842	Elevée
F9	16.96	84.80	848	Elevée	F9	19.42	97.10	971	Elevée
F10	15.80	79.00	790	Elevée	F10	18.16	90.80	908	Elevée
F11	13.60	68.00	680	Elevée	F11	19.14	95.70	957	Elevée
					F12	17.76	88.80	888	Elevée
					F13	14.44	72.20	722	Elevée
					F14	18.20	91.00	910	Elevée

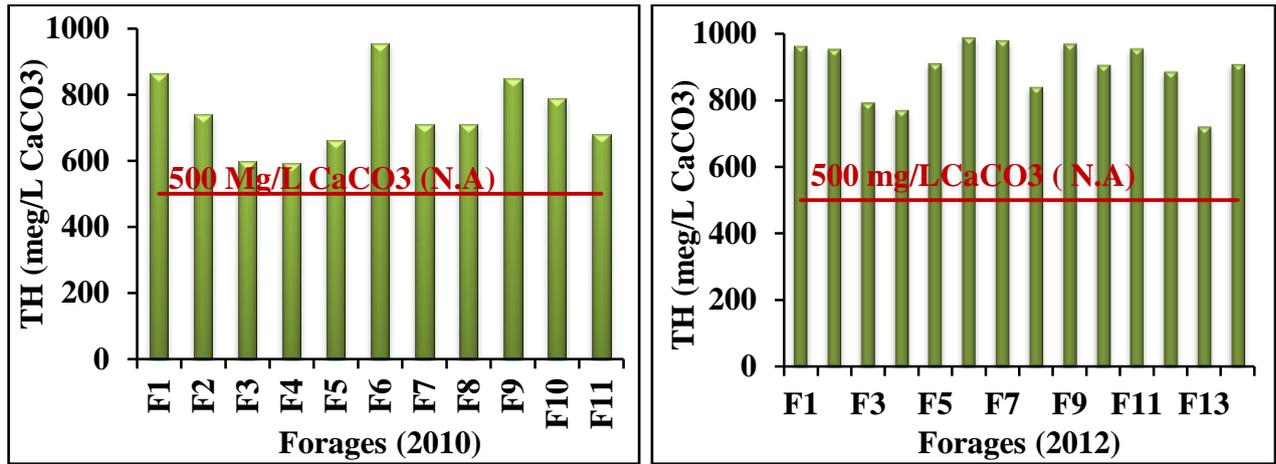


Fig.31 : Histogrammes des TH de la nappe du CI.

6. Résidu sec :

Sa détermination permet de l'estimer essentiellement en matières dissoutes (RODIER J., 2009).

A l'exception des forages F₃, F₄, F₅, F₆, F₇, F₈, F₉, F₁₀, F₁₁ (2010) et F₂ (2012), toutes les valeurs dépassent le taux indiqué par les normes nationales 2000 mg/L (Fig.32).

La figure 32 ci-dessous fait apparaître nettement que la TDS grimpe au double en 2012, ce qui confirme encore l'hypothèse d'une éventuelle contamination des eaux de la nappe albienne par celles du CT et probablement de la nappe phréatique. L'état vétuste des tubages qui sont fort possible érodés laisse passer une perte de charge hydraulique, drainante ascendante, et que les eaux analysées n'appartenaient pas à la CI proprement dit, mais il s'agissait plutôt d'un mélange.

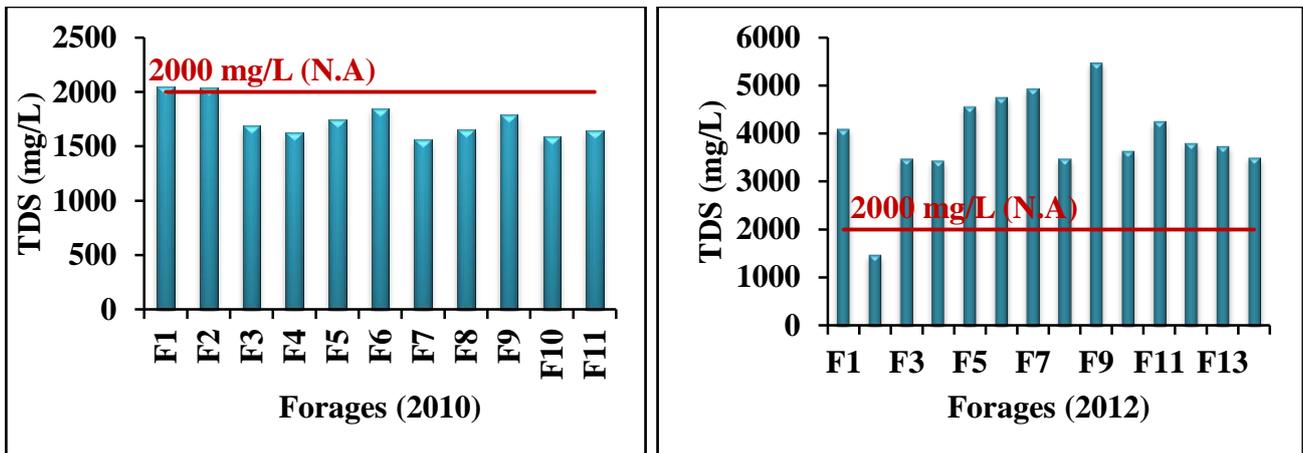


Fig.32 : Histogrammes des TDS des eaux de la nappe du CI.

C. Les Paramètres chimiques

1. Calcium (Ca^{++}) :

C'est un élément alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires, sous forme de carbonates, sa teneur varie essentiellement suivant la nature des terrains traversés (terrain calcaireux ou gypseux), composant majeur de la dureté de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables (RODIER J., 2009).

La plupart des forages présentent un taux qui varie entre 108 et 196.80 mg/L, ce qui reste dans l'intervalle des normes établis par la réglementation algérienne de 75-200 mg/L, comme concentration maximale (Fig.33), à l'exception des forages F₄,F₆ (2010) et F₆,F₇,F₉,F₁₁,F₁₄ (2012).

Pour la campagne 2010, l'examen de la carte (Fig.34) représentant l'évolution spatiale des ions Calciums indique que la valeur minimale de la concentration en calcium est atteinte au F₁₀ (108 mg/L) située au Nord. Ce paramètre s'accroît vers le centre pour atteindre un maximum de 265.60 mg/L au F₆ à Djemaa, tandis que pour celle de 2012, on note une concentration minimale de 132 mg/L au niveau du forage F₃ au Nord du secteur d'étude et une maximale de 216.80 mg/L au forage F₆ au centre. L'origine de ces teneurs élevées dans la nappe du CI semble liées à la dissolution des calcaires et de certains évaporites. On note également une légère augmentation des ions de calcium en 2012 (Fig.34), il s'agissait probablement d'un enrichissement dû au contact des eaux profondes les moins dures avec celles du CT les plus dures, voir aussi celle de la nappe phréatique. Ce contact est causé aussi par le dépérissement des forages qui engendre une remontée des eaux.

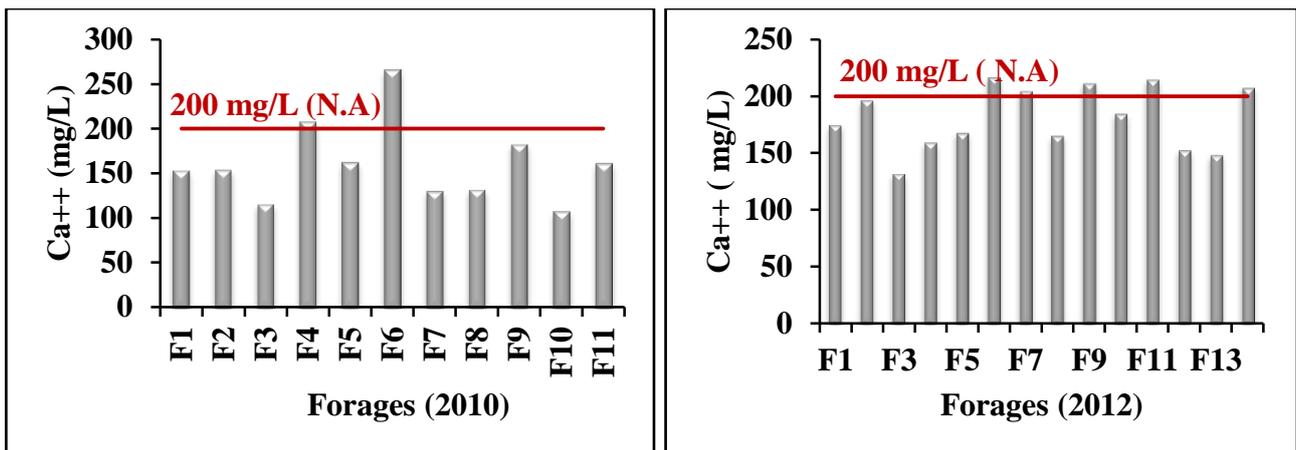


Fig.33 : Histogrammes des concentrations en Ca^{++} de la nappe du CI.

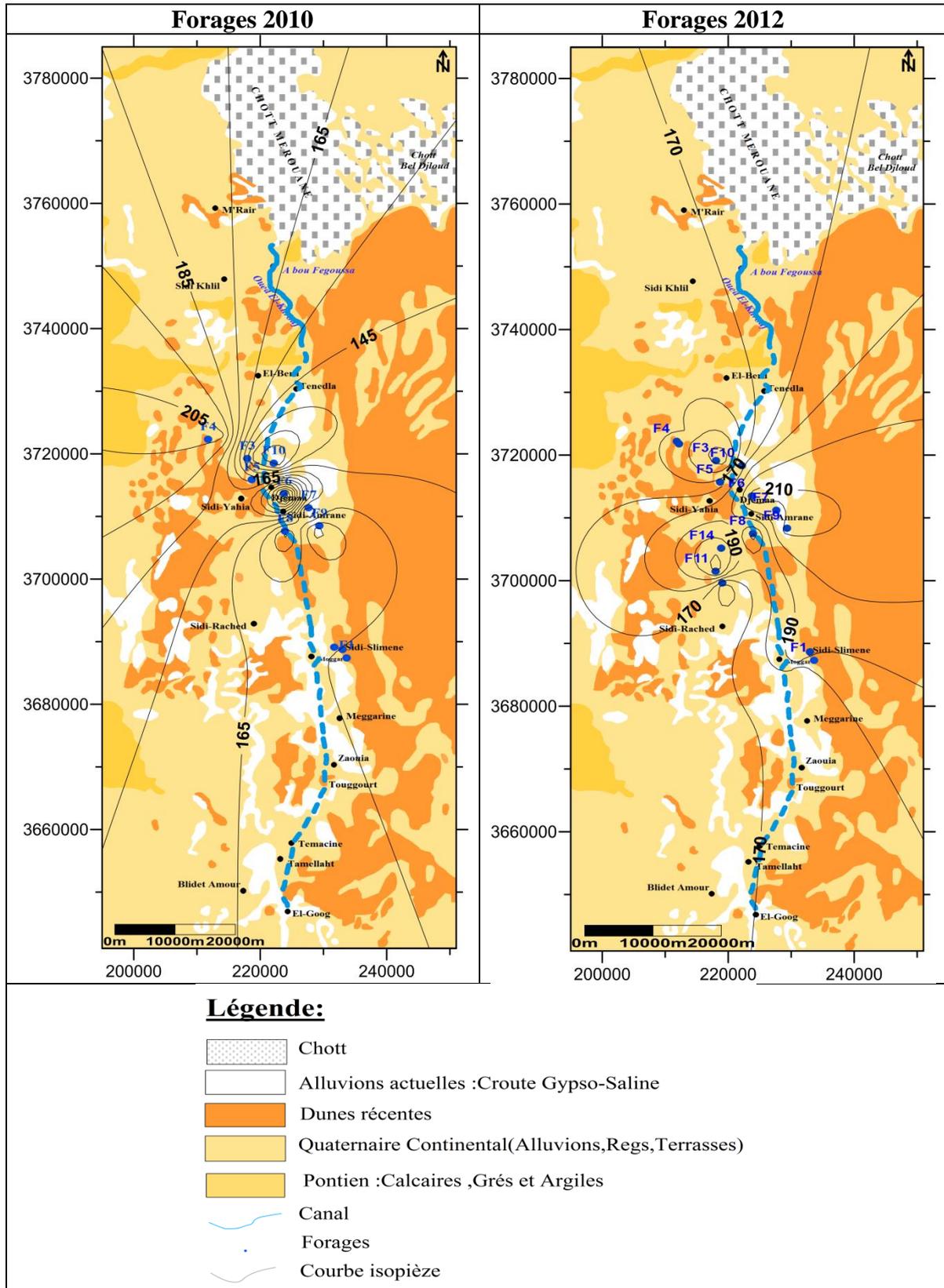


Fig.34 : Carte d'iso-teneur en Calcium.

2. Magnésium (Mg^{++}) :

Le magnésium est l'un des éléments les plus répandus dans la nature, sa teneur dépend de la composition des roches sédimentaires rencontrées (calcaires dolomitiques ou dolomies du Jurassique)(**RODIER J., 2009**).

Pour les deux campagnes, toutes les teneurs en magnésium sont au-dessous des normes nationales (150 mg/L), elles sont comprises entre 17.28mg/L au forage F₄ en 2010 et 126.72 mg/L ,au forage F₁ en 2012 (**Fig.35**).

L'établissement de la carte d'isoteneur en Mg^{++} (**Fig.36**), pour la campagne 2010, a permis de noter une concentration maximale de 124.80 mg/L au niveau du forage F₁₀ au Nord de la région d'étude et une minimale de 61.44 mg/L au forage F₅ située au centre, alors que celle de 2012 montre que le magnésium s'accroît vers le Sud pour atteindre une valeur de 126.22 mg/L au F₁ à Sidi Slimane. D'une façon globale, la répartition de ce paramètre s'élève vers le NE et tend à diminuer vers le SW ; ce qui nous amène à penser qu'il y a un échange entre les formations qui passe d'un niveau essentiellement gréseux à un autre carbonaté dolomitique (Aptien) ou probablement du niveau dolomitique de la nappe du CT (céno-mano-turonien). Car si l'on maintient notre hypothèse de drainante ascendante des eaux profonde en faveur des tubages d'effectués, cet enrichissement des eaux albiennes en ions magnésiens est accidentel.

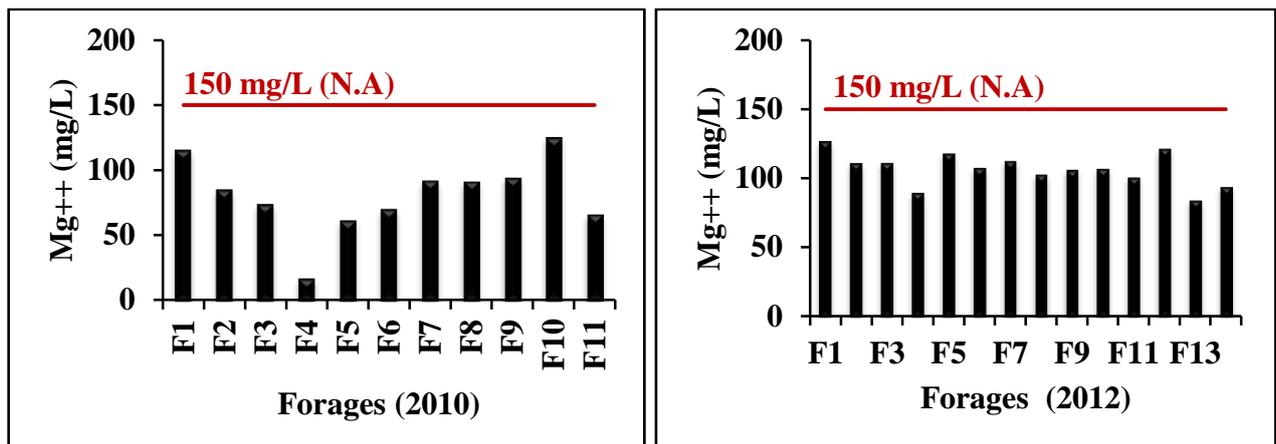


Fig.35 : Histogrammes des concentrations en Mg^{++} de la nappe du CI.

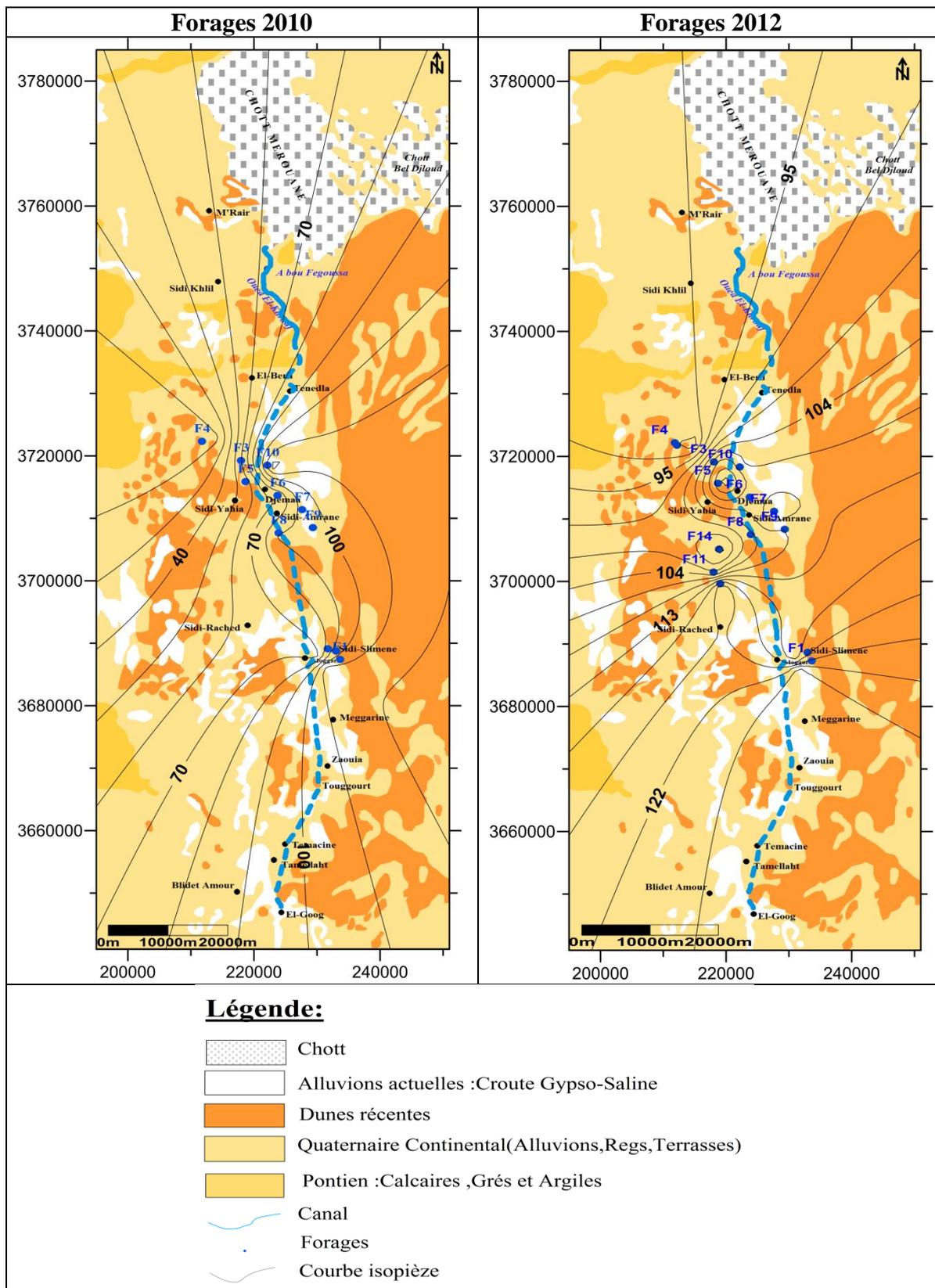


Fig.36 : Carte d'iso-teneur en Magnésium.

3. Sodium (Na⁺) :

Le sodium est un élément constant de l'eau. Il provient géologiquement de la lixiviation des dépôts en surface et en sous-sols, tels que le chlore de sodium (RODIER J., 2009).

Tous les forages analysés en 2010, ainsi que le forage F₆ en 2012 présentent des concentrations au-dessus de la valeur recommandée par les normes algériennes (200 mg/L) (Fig.37), à l'exception des forages F₁, F₂, F₃, F₄, F₅, F₇, F₈, F₉, F₁₀, F₁₁, F₁₂, F₁₃, F₁₄ (2012) qui sont au-dessous de la norme.

Il ressort de la carte d'isoteneur en sodium (Fig.38) campagne 2010, des concentrations maximales au Sud 316,56 mg/L, 370.20 mg/L signalées respectivement au F₁, F₂, au Nord l'augmentation atteinte est de 330,46 mg/L au F₃, 303,97 mg/L au F₄, une minimale au centre au niveau du forage F₅ (211.26 mg/L), alors que celle de 2012 montre des concentrations élevées 217.50 mg/L au forage F₆ situé au centre et un minimum de 117.5 mg/L au niveau du forage F₈. On pourrait expliquer cette augmentation soit par la dissolution des formations géologiques, ou par les échanges de base des argiles qui peuvent libérer des ions de Na⁺, après avoir fixé le Ca²⁺, soit encore, accidentellement, par l'enrichissement des eaux albiennes par les ions de sodium ayant origine des eaux sus-jacentes, à savoir la CT et la nappe phréatique si l'on maintien notre hypothèse précédemment avancée.

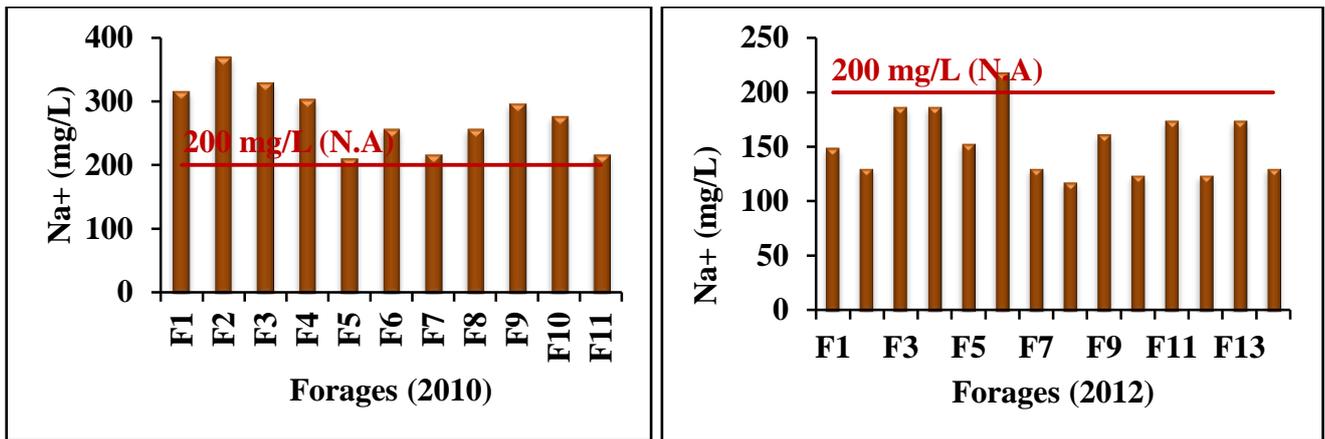


Fig.37 : Histogrammes des concentrations en Na⁺ de la nappe du CI.

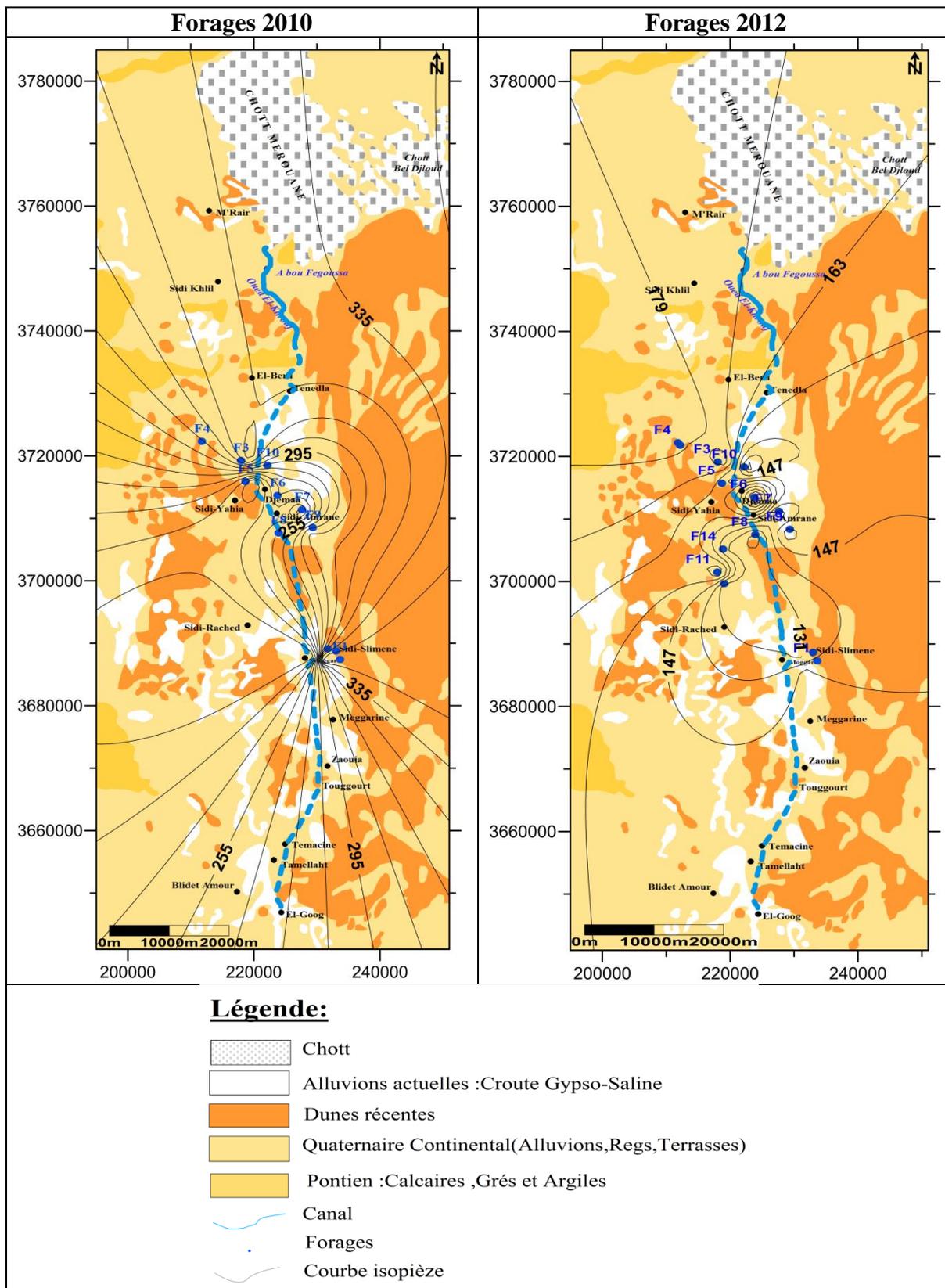


Fig.38 : Carte d'iso-teneur en Sodium.

4. Potassium (K^+) :

Dans les roches ignées, la teneur en potassium soit presque aussi importante que celle du sodium, sa présence à peu près constante, par exemple dans les eaux naturelles, certains rejets industriels en particulier de mines de potasse et d'usines d'engrais, peuvent entraîner dans l'eau des quantités de potassium, relativement importantes (RODIER J., 2009).

Les valeurs du potassium obtenues pour les deux campagnes varient entre 12.61 mg/L au forage F₄ (2012) et 51.60 mg/L aux forages F₂ et F₉ (2010). Les concentrations dans tous les forages dépassent les normes algériennes (20 mg/L), sauf le forage F₄ de la campagne 2012 (Fig.39).

Pour les deux campagnes, l'examen de la carte d'isoteneur en potassium (Fig.40) montre que l'évolution des teneurs de ce dernier s'effectue du Nord vers le centre. Ces teneurs élevées proviennent essentiellement des évaporites ou probablement des évaporite du cénomaniens.

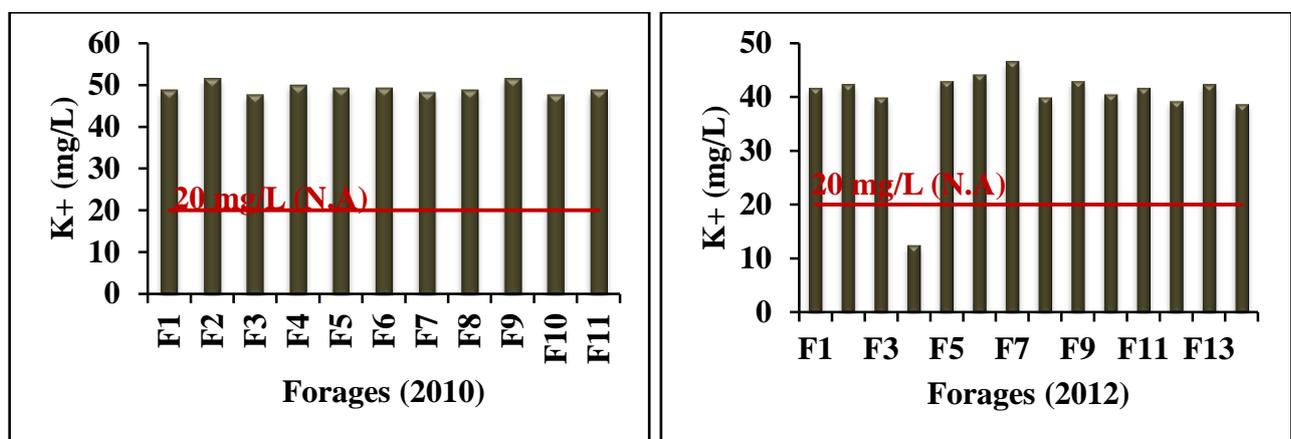


Fig.39 : Histogrammes des concentrations en K^+ de la nappe du CI.

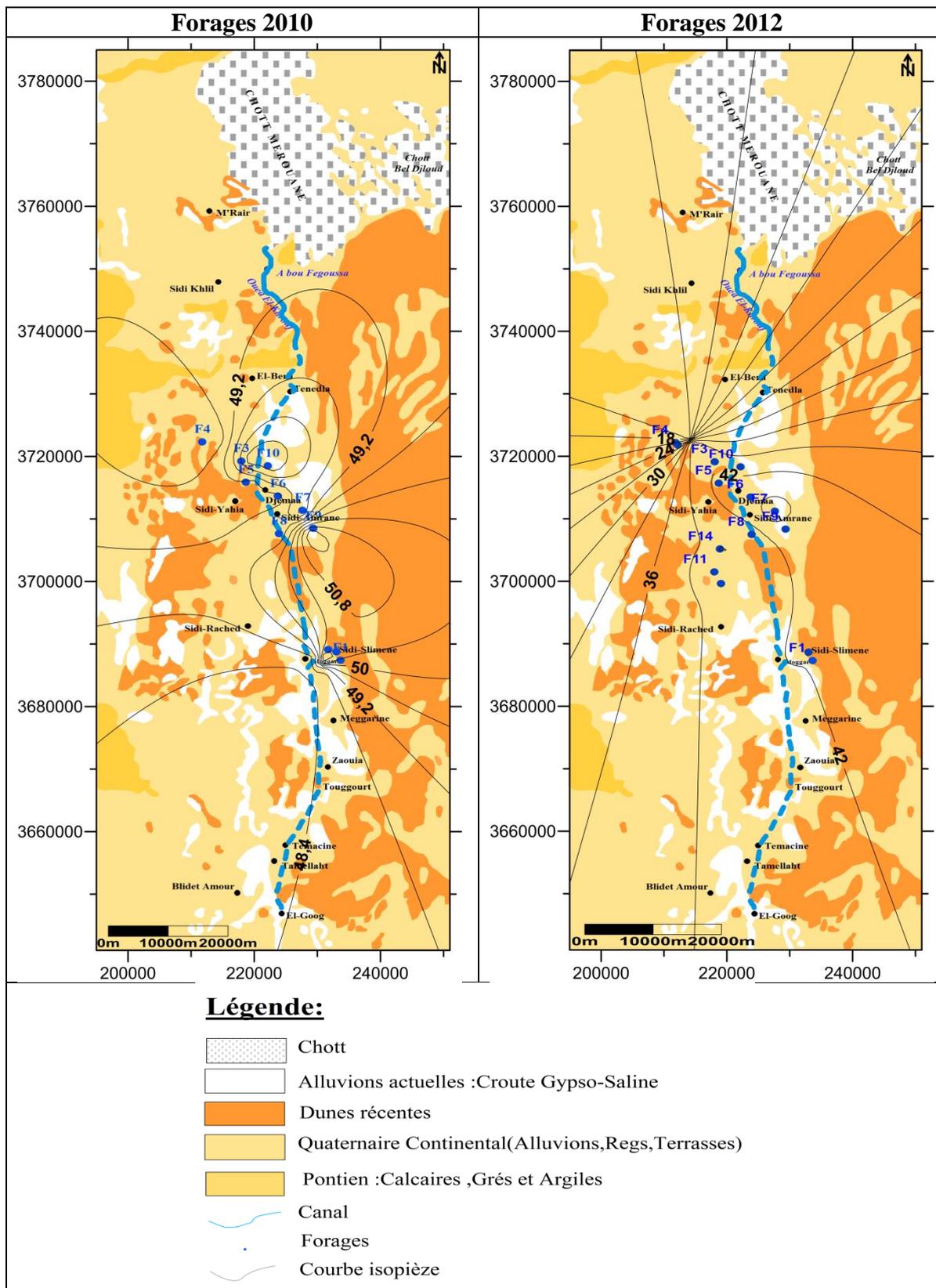


Fig.40 : Carte d'iso-teneur en Potassium.

5. Chlorures (Cl⁻) :

La teneur en Cl⁻ des eaux souterraines est essentiellement fonction de la nature des terrains traversés (RODIER J., 2009).

A l'exception des forages F₃, F₄, F₅, F₆, F₇, F₈ et F₁₁ (2010), le reste présente des valeurs qui dépassent l'intervalle des normes établies par la réglementation algérienne (500 mg/L) (Fig.41).

L'observation de la carte d'isoteneur en chlorures (Fig.42) de la campagne 2010 indique que leurs concentrations évoluent du centre 211.80 mg/L au F₅ vers le Sud 695.80 mg/L au F₁, il en est de même pour la campagne 2012, on remarque une concentration importante au Sud atteinte jusqu'à 828.95 mg/L au niveau du forage F₂ à Sidi Slimane et une minimale de 611.20 mg/L au forage F₄ au Nord, on note un dépassement des normes pour toute la campagne.

L'augmentation de ces valeurs provient essentiellement de la dissolution des sels naturels, par lessivage des terrains salifères et argilo-salifères (évaaporites) ou fort possible des eaux sus-jacentes par contact accidentel dû aux déchirures des tubages si l'on voudrait bien maintenir notre hypothèse avancée.

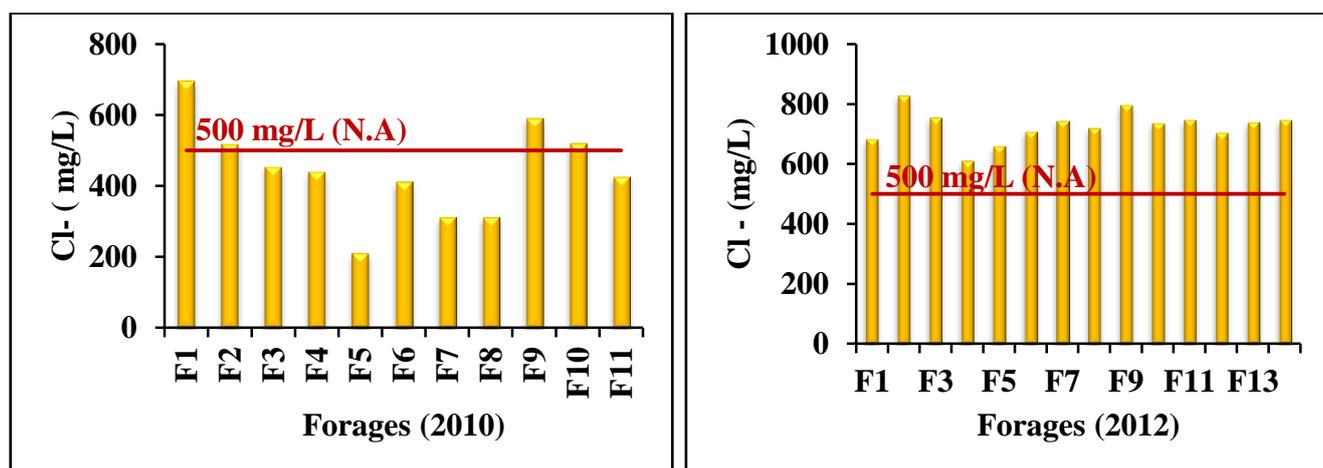


Fig.41 : Histogrammes des concentrations en Cl⁻ de la nappe du Cl.

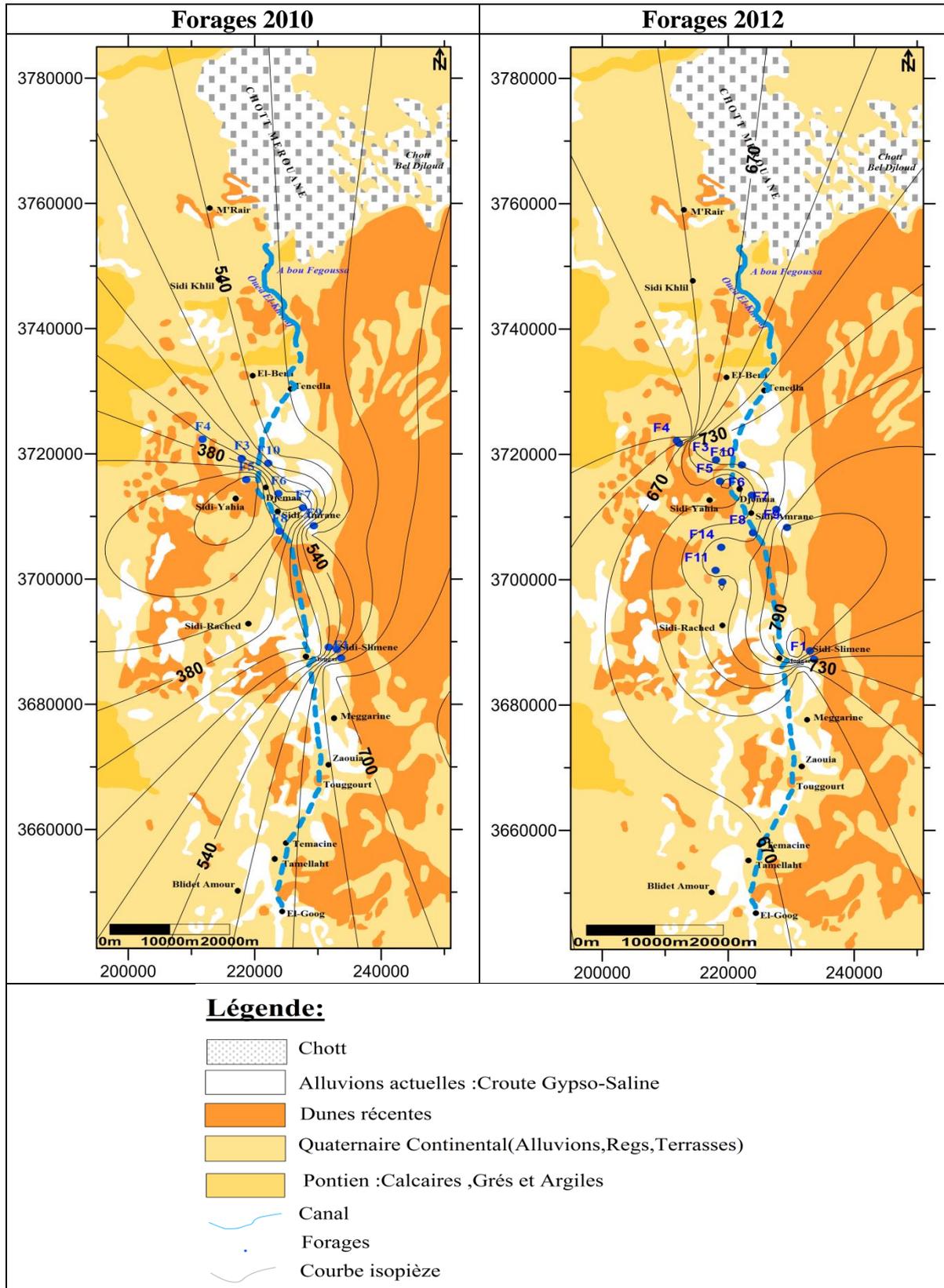


Fig.42 : Carte d'iso-teneur en Chlorures.

6. Sulfates (SO_4^-) :

La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalinoterreux de la minéralisation (RODIER J., 2009).

Pour la campagne 2010, les concentrations en sulfates trouvées au niveau des forages dépassent les normes algériennes (400 mg/L), tandis que celles de 2012 présentent des concentrations conformes à la norme, à l'exception du forage F₆(Fig.43).

D'après la carte d'isoteneurs en sulfates (Fig.44) campagne 2010, on constate que l'évolution de la teneur en sulfates s'effectue du Nord vers le centre, avec un minimum de 410 mg/L au F₄ et un maximum de 714.54 mg/L au F₆ ; il en est de même pour la carte d'isoteneurs en sulfates, campagne 2012 qui indique que l'évolution des concentrations est similaire à celle de 2010, la faible teneur en sulfates est remarquée au F₁₃(84.24 mg/L) , alors que le maximum est au F₆(407mg/L) .

Les valeurs élevées des ions sulfatés dans ces eaux proviennent essentiellement de la dégradation des roches gypseuses (CaSO_4 , H_2O), l'anhydrite et des évaporites. Cependant on y note une diminution brutale, dans un temps de deux ans, des ions des sulfates, cela peut être expliqué qu'une dilution s'est produite en 2012 par des eaux de différentes natures. Nous pourrions également maintenir notre hypothèse d'une éventuelle perte de charge hydraulique ascendante qui accidentellement affecte les eaux analysées. Il ne s'agissait pas bien évidemment de la nappe CI proprement dite, mais il s'agissait probablement d'un mélange des CT et la nappe phréatique.

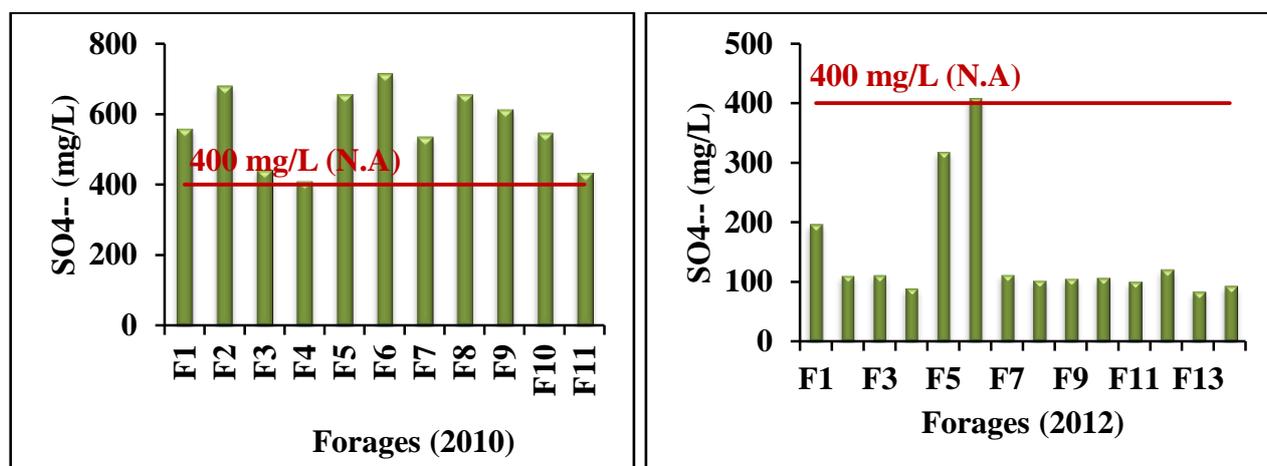


Fig.43 : Histogrammes des concentrations en SO_4^- de la nappe du CI.

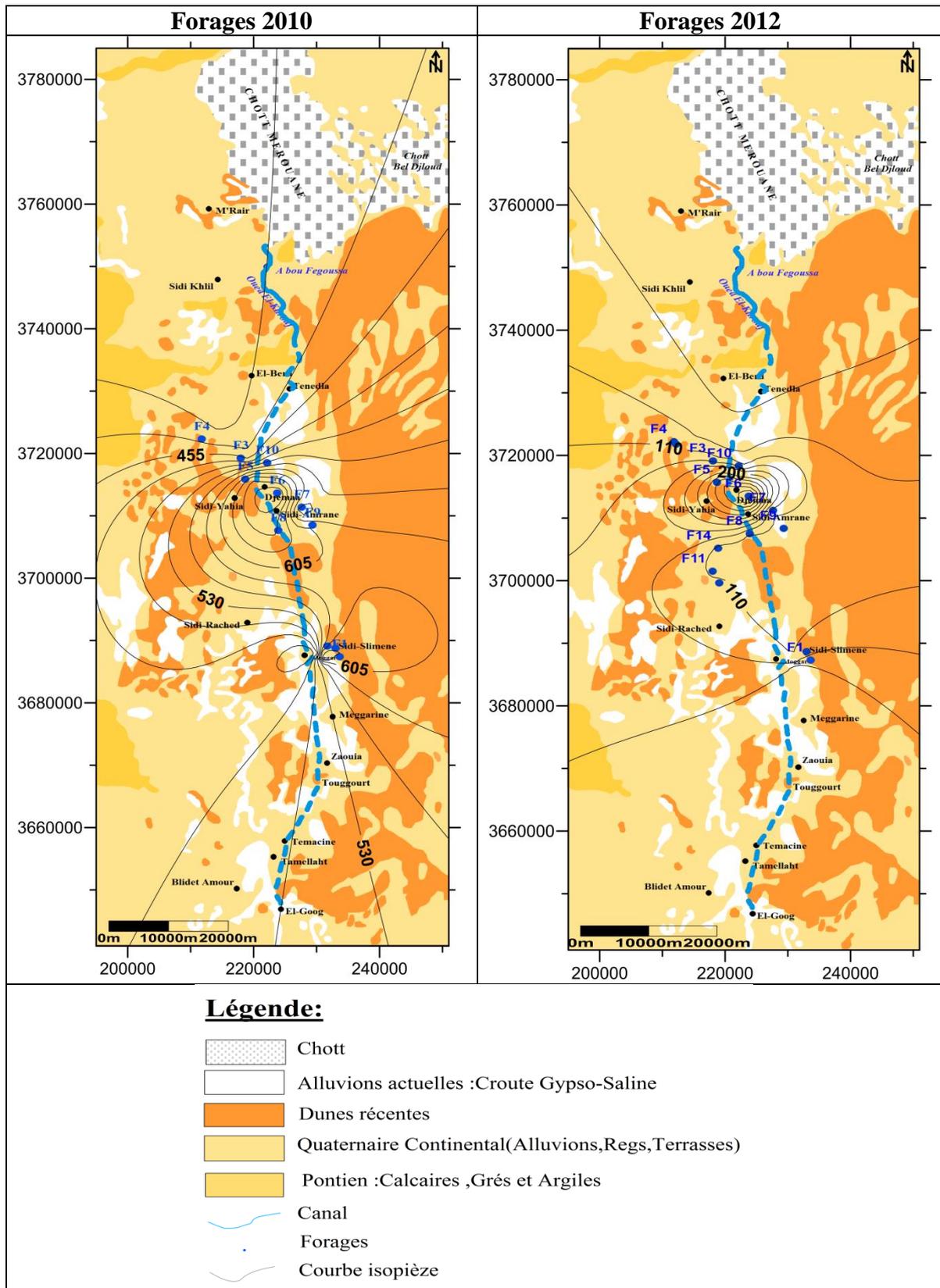


Fig.44 : Carte d'iso-teneur en Sulfates.

7. Bicarbonate (HCO_3^-) :

Dépendant surtout de la nature des terrains traversés (**RODIER J., 2009**). Les valeurs enregistrées pour les deux campagnes varient entre 45.72 mg/L relevée aux forages F₈ et F₉ (2012) et 226.92 mg/L au forage F₇ (2010), (**Fig.45**), les normes algériennes ne fixent aucune valeur pour ce paramètre.

Pour la campagne 2010, la carte d'iso-teneur en Bicarbonates (**Fig.46**) montre que ce paramètre s'accroît du Sud vers le centre pour atteindre un maximum de 226.92 mg/L au F₇ à Sidi Amrane, tandis que l'observation de celle de la campagne 2012 indique que l'évolution des teneurs de ce dernier s'effectue du centre vers le Nord.

Les valeurs élevées sont dues à la circulation de ces eaux dans les niveaux carbonatés intercalés dans le réservoir du CI, à savoir les dolomies, les calcaires et les marnes. Cependant, une diminution brutale des carbonates est constatée en 2012, ce qui laisse penser aussi qu'une dilution s'est produite brutalement, car le temps est très court pour admettre un lessivage ou une origine géologique. Cette forte dilution confirme notre hypothèse avancée de la drainance ascendante par le biais des tubages corrodés, il s'agissait également d'un mélange d'eau CI, CT et probablement de la nappe phréatique.

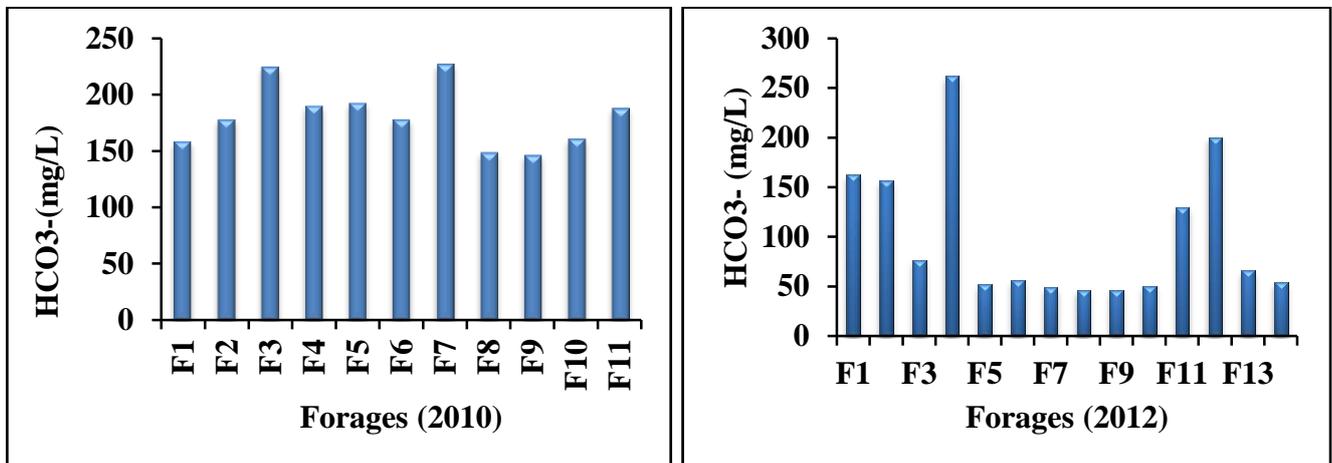


Fig.45 : Histogrammes des concentrations en HCO_3^- de la nappe du CI.

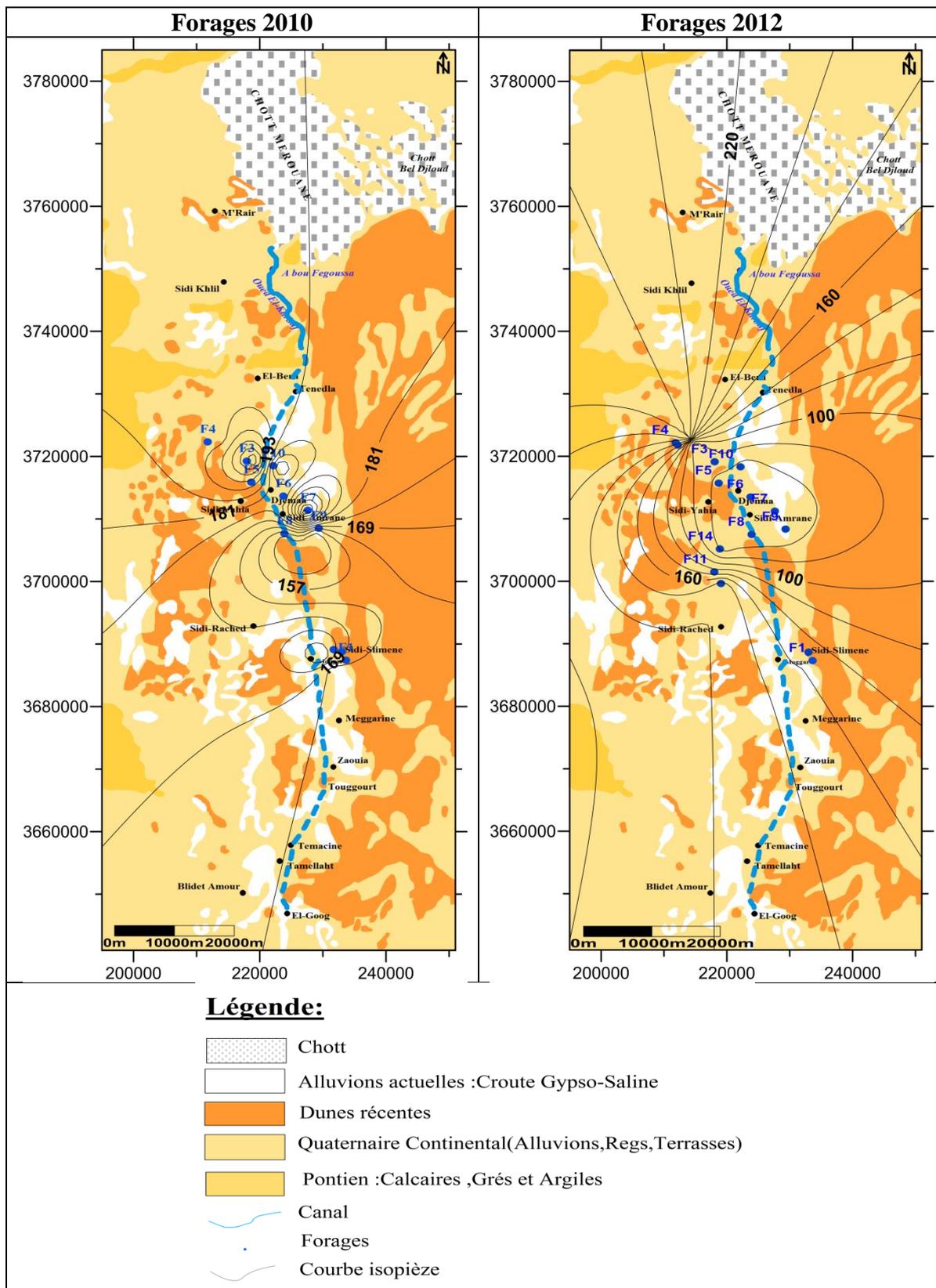


Fig.46 : Carte d'iso-teneur en Bicarbonates.

D. Classification des eaux naturelles

Il existe plusieurs classifications des eaux naturelles, on y distingue deux grands critères de classification fondamentaux : la classification chimique et la classification selon l'origine de gisement des eaux. Ces principales classifications, basées sur la composition chimique des eaux naturelles sont celles de Piper, Shoeller-Berkaloff...etc.

1. Diagramme de Piper.

Le diagramme de piper permet de donner une approche globale sur la lithologie, à partir des analyses chimiques et de suivre leur évolution.

Le report des résultats des analyses chimiques des eaux pour les deux campagnes 2010 et 2012 (**Fig.45**) montre que les eaux de la nappe du CI de la région d'Oued Righ sont regroupées dans le faciès **chloruré et sulfaté calcique et magnésien**, à l'exception des forages F₂, F₃, F₄(2010) qui présentent une tendance vers **le pôle chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique**. L'existence de ces faciès est due au contact de l'eau avec les formations géologiques encaissantes.

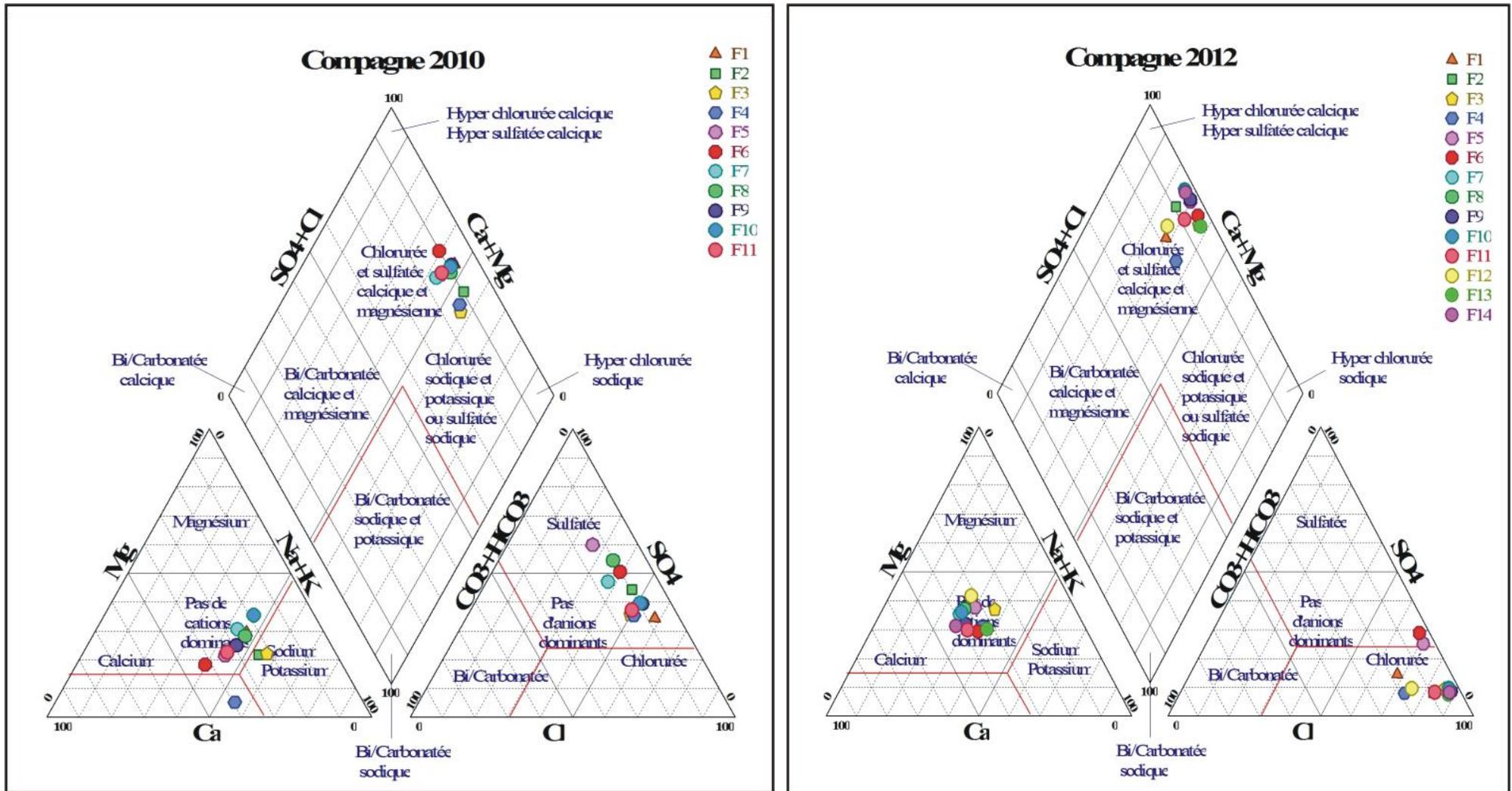


Fig.47: Diagramme de Piper représentant le chimisme des eaux de la nappe du C.I .

2. Diagramme de Schöeller-Berkaloff.

Utilisé pour classer et déterminer le faciès chimique d'une eau naturelle.

La projection des résultats des analyses chimiques des eaux des deux campagnes (2010 et 2012) sur le diagramme de Schöeller – Berkaloff (**Fig.48 et Fig.49**) a permis d'obtenir cinq types de faciès des eaux de la nappe du CI (Tab.18).

Tab.18 : Faciès chimiques des eaux de la nappe du CI de la région d'Oued Righ.

Formules	Faciès	Forages
$r\%(Na^+ + K^+) > r\%Ca^{++} > r\%Mg^{++}$ $r\%Cl^- > r\%SO_4^{--} > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--})$ ou $r\%(Na^+ + K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$ $r\%Cl^- > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--}) > r\%SO_4^{--}$	Chloruré sodique	F ₁ , F ₃ , F ₄ , F ₉ , F ₁₀ , F ₁₁ (2010) F ₃ , F ₄ , F ₆ , F ₁₃ (2012)
$r\%Ca^{++} > r\%Mg^{++} > r\%(Na^+ + K^+)$ $r\%Cl^- > r\%SO_4^{--} > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--})$ ou $r\%Ca^{++} > r\%(Na^+ + K^+) > r\%Mg^{++}$ $r\%Cl^- > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--}) > r\%SO_4^{--}$	Chloruré calcique	F ₂ , F ₇ , F ₈ , F ₉ , F ₁₀ , F ₁₁ , F ₁₄ (2012)
$r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++} > r\%(Na^+ + K^+)$ $r\%Cl^- > r\%SO_4^{--} > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--})$ ou $r\%Mg^{++} > r\%(Na^+ + K^+) > r\%Ca^{++}$ $r\%Cl^- > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--}) > r\%SO_4^{--}$	Chloruré magnésien	F ₁ , F ₅ , F ₁₂ (2012)
$r\%(Na^+ + K^+) > r\%Ca^{++} > r\%Mg^{++}$ $r\%SO_4^{--} > r\%Cl^- > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--})$ ou $r\%(Na^+ + K^+) > r\%Mg^{++} > r\%Ca^{++}$ $r\%SO_4^{--} > r\%Cl^- > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--})$	Sulfaté sodique	F ₂ , F ₅ , F ₇ , F ₈ (2010)
$r\%Ca^{++} > r\%(Na^+ + K^+) > r\%Mg^{++}$ $r\%SO_4^{--} > r\%Cl^- > r\%(HCO_3^- + CO_3^{--})$	Sulfaté calcique	F ₆ (2010)

Il ressort de cette classification que les eaux analysées changent complètement de faciès chimique en seulement deux ans ! campagnes 2010 et 2012 ; les exemples sont nombreux ci-dessus ; par exemple le F1 qui était chloruré sodique en 2010 change carrément de faciès en 2012 pour devenir chloruré magnésien et vice versa. Cette brutalité de changement anormale de faciès confirme avec plus de certitude notre hypothèse avancée. Les eaux analysées ne sont hélas des eaux exclusivement à provenance de la nappe du CI mais d'un mélange de CI, CT et voir même celles de la nappe phréatique.

Cela revient aux dépérissements des tubages des forages d'eau captant la CI qui favorisent la perte de charge hydraulique ascendante et par conséquent la contamination des eaux échantillonnées.

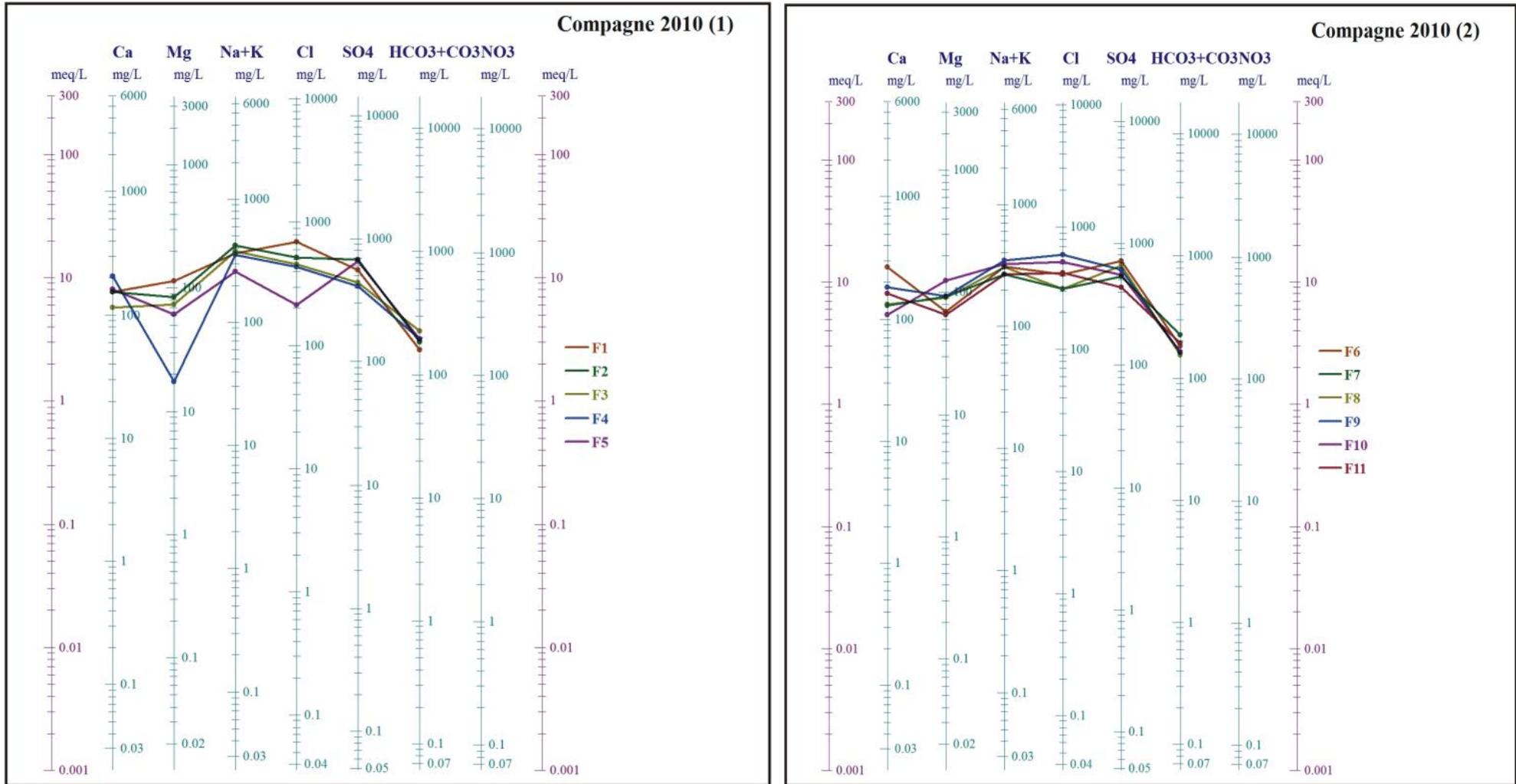


Fig.48 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff représentant le chimisme des eaux de la nappe du C.I de la vallée d'Oued Righ moyen.

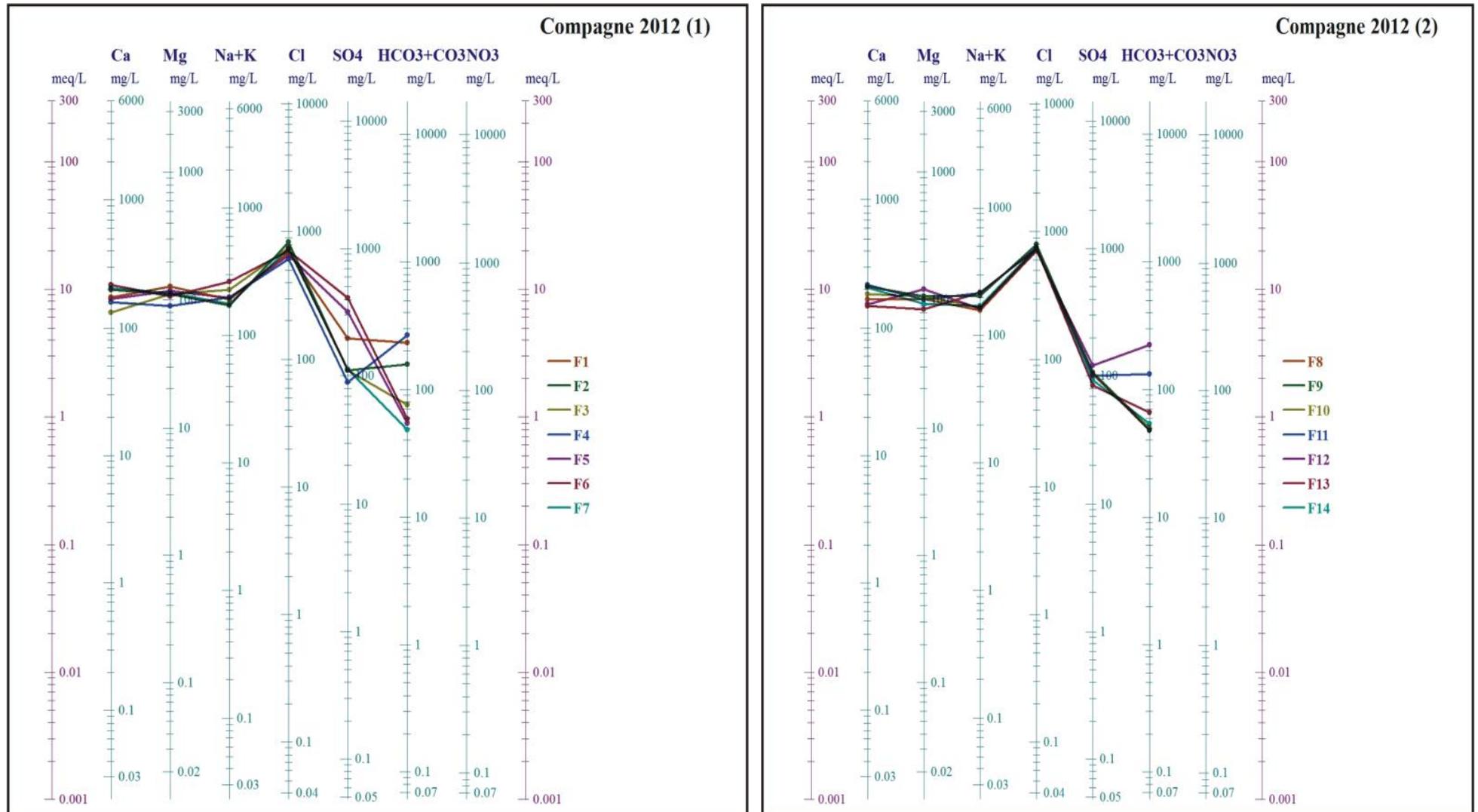


Fig.49 : Diagramme de Schöeller-Berkaloff représentant le chimisme des eaux de la nappe du C.I de la vallée d'Oued Righ moyen.

3. Aptitude des eaux de la nappe du CI, à l'irrigation.

Sur le plan d'utilisation, les eaux de la nappe du CI ont deux destinations : l'alimentation en eau de la population (consommation et usage domestique) ainsi que l'utilisation de ces eaux dans l'irrigation des terres agricoles de la région. Par les sels qu'elle contient, l'eau destinée à l'irrigation a un effet sur la croissance des plantes.

Des changements dans la structure des sols avec modification de la perméabilité des terrains et de l'aération, peuvent également apparaître, s'ils sont irrigués par les eaux riches en sels minéraux. Afin de déterminer ces changements, Riverside (1984) a établi une classification qui fait intervenir la salinité (la conductivité électrique exprimée en $\mu\text{s/cm}$) et le risque d'alcalinisation des sols (le taux d'absorption du sodium S.A.R).

a. Le taux d'absorption du sodium (SAR) :

Le taux d'absorption du sodium est donné par la formule suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}}$$

Avec, les concentrations en $[Na^+]$, $[Ca^{++}]$, $[Mg^{++}]$ en méq/L.

Le tableau ci-dessous donne le classement des eaux destinées à l'irrigation, selon la valeur du S.A.R.

Tab.19 : Classement des eaux destinées à l'irrigation.

S.A.R	Classement
S.A.R < 10	Eau excellente : eau à faible danger d'alcalinisation des sols.
10 < S.A.R < 18	Eau bonne : danger d'alcalinisation assez appréciable.
18 < S.A.R < 26	Eau convenable : danger d'alcalinisation important.
S.A.R > 26	Eau médiocre

Les valeurs du S.A.R sont reportées dans le tableau n°20 :

Les valeurs du S.A.R calculées (**Tab.20**) et celles de la conductivité électrique permettent de classer l'eau, du point de vue aptitude pour l'irrigation, selon le diagramme de Riverside qui présente différentes classes, suivant les qualités des eaux pour l'irrigation. L'aptitude des eaux analysées à l'irrigation est selon cette SAR excellentes dans tous les forages des deux compagnes 2010 et 2012. (S.A.R < 10).

Tab.20 : Valeurs du S.A.R calculées.

Novembre 2010			Avril 2012		
N° des forages	S.A.R	Qualité de l'eau	N° des forages	S.A.R	Qualité de l'eau
F1	4.70	Excellente	F1	2.09	Excellente
F2	5.92	Excellente	F2	1.83	Excellente
F3	5.89	Excellente	F3	2.88	Excellente
F4	5.44	Excellente	F4	2.91	Excellente
F5	3.58	Excellente	F5	2.20	Excellente
F6	3.62	Excellente	F6	3.01	Excellente
F7	3.56	Excellente	F7	1.81	Excellente
F8	4.21	Excellente	F8	1.76	Excellente
F9	4.44	Excellente	F9	2.25	Excellente
F10	4.29	Excellente	F10	1.79	Excellente
F11	3.63	Excellente	F11	2.44	Excellente
			F12	1.81	Excellente
			F13	2.82	Excellente
			F14	1.88	Excellente

La figure.50 montre que la plupart des forages se situent dans les deux classes ($C_4 - S_1$) ($C_4 - S_2$), qui sont en général de qualité **Médiocre**, avec une tendance vers la classe ($C_3 - S_1$) qui est de qualité **admissible** et qui regroupe les forages F₇, F₈ (2010) et F₁₂ F₁₄(2012).

D'après cette représentation graphique, nous pouvons conclure que les eaux de la nappe du CI de la région d'Oued Righ sont fortement minéralisées, elles ne conviennent pas à l'irrigation, sauf pour certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés (**Tab.21**).

Tab.21 : Classification des eaux d'irrigation d'après J. Servant, 1975, (U.S. Salinity L.A.B.)

Degré	Qualité	Classes	Description
1	Excellente	C1 – S1	Eau utilisable sans danger pour l'irrigation de la plupart des cultures, sur la plupart des sols
2	Bonne	C2 – S1 C2 – S2	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes au sel, sur sols ayant une bonne perméabilité. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à fortes capacités d'échange d'ions (sols argileux)
3	Admissible	C3 – S1	En général, eau convenant à l'irrigation de cultures tolérantes au sel, sur des sols bien drainés. L'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée. Principaux problèmes dus aux plantes trop sensibles, au sodium et aux sols à faible perméabilité.
4	Médiocre	C4 – S1 C4 – S2 C3 – S3	En général, eau fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.
5	Mauvaise	C3 – S4 C4 – S3 C4 – S4	Eau ne convenant généralement pas à l'irrigation, mais pouvant être utilisée sous certaines conditions : sols très perméables, bon lessivage, plantes tolérant très bien le sel.

Il ressort, cette contradiction avec des deux méthodes SAR est Riverside nous laisse à penser que les eaux analysées ne sont pas de la même source, les contradictions conformes qu'il s'agissait d'un mélange des eaux CI, CT et même la nappe phréatique. Nous pourrions encore maintenir notre hypothèse avancée d'une éventuelle contamination accidentelle due aux dépérissements des forages qui favorise la perte de charge hydraulique.

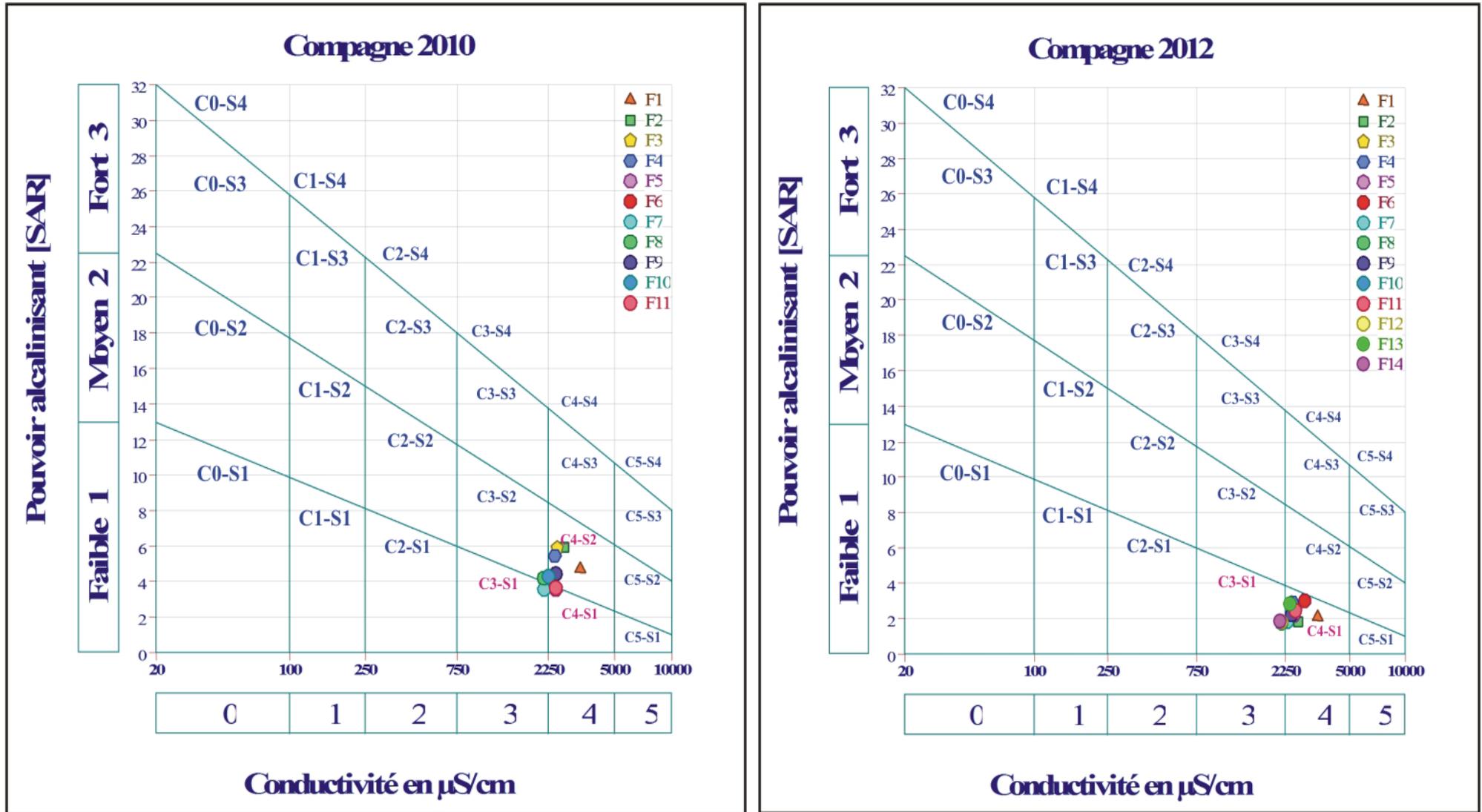


Fig.50:Diagramme de classification des eaux d'irrigation (Riverside).

b. Le coefficient du pourcentage de Sodium (Na^{++}) :

Du point de vue agricole, le sodium est un élément des bases alcalines et alcalinoterreuses, jouant un rôle dans le maintien de la perméabilité des sols pour l'irrigation. On utilise assez souvent un coefficient correspondant au pourcentage de sodium, celui-ci est donné par la formule suivante :

$$\% \text{Na}^+ = \frac{(\text{Na}^+ + \text{K}^+)}{\text{Ca}^{++} + \text{Mg}^{++} + (\text{Na}^+ + \text{K}^+)} * 100$$

La limite maximale pour les usages agricoles est de 60 % (**RODIER J., 2009**).

Les valeurs du pourcentage de sodium (Na^+) calculées sont reportées dans le tableau ci-dessous :

Le classement des eaux selon le % **Na**, est reporté dans le tableau XII en annexe .

Tab.22 : Valeurs du pourcentage de sodium (Na^+) calculées.

N° des Forages (2010)	%Na	Classement	N° des Forages (2012)	%Na	Classement
F1	46.48	Admissible	F1	28.09	Bonne
F2	54.07	Admissible	F2	26.08	Bonne
F3	56.59	Admissible	F3	36.48	Bonne
F4	55.05	Admissible	F4	35.26	Bonne
F5	44.14	Admissible	F5	29.77	Bonne
F6	39.47	Bonne	F6	34.85	Bonne
F7	42.99	Admissible	F7	25.86	Bonne
F8	46.72	Admissible	F8	26.69	Bonne
F9	45.66	Admissible	F9	29.46	Bonne
F10	45.67	Admissible	F10	26.12	Bonne
F11	44.01	Admissible	F11	31.05	Bonne
			F12	26.46	Bonne
			F13	37.44	Bonne
			F14	26.73	Bonne

Cette classification selon le % Na^+ , nous a permis de déduire que tous les forages de la campagne 2010 sont admissibles pour l'irrigation. Ceux de la campagne 2012 sont bonnes.

Wilcox (1954) a élaboré une classification, en se basant sur les deux paramètres, à savoir le Na en % et la conductivité électrique en $\mu\text{s}/\text{cm}$.

D'après ce diagramme (**Fig.51**), nous constatons que les eaux de la nappe du CI de la région d'étude pour les deux campagnes (2010 et 2012) appartiennent à la classe **médiocre**, donc ces eaux conviennent peu à l'irrigation, sous certaines conditions qui dépendent de certains types de plantes et de la nature des sols.

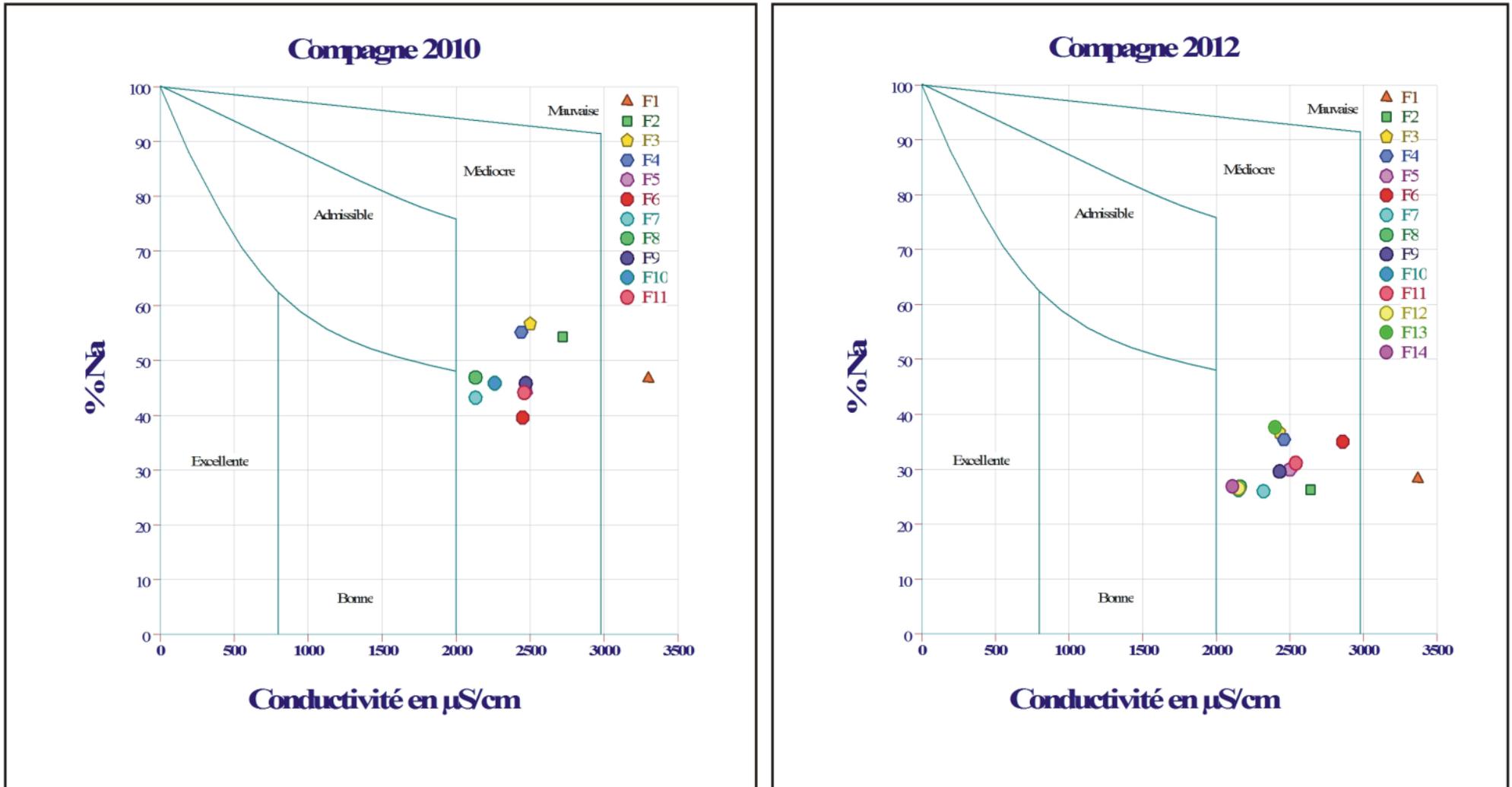


Fig.51:Diagramme de Wilcox.

CONCLUSION :

Les analyses physico-chimiques effectuées ont montré que les eaux de la nappe du CI dans la région d'Oued Righ moyen sont caractérisées par :

- Une température très élevée, oscillant entre 40.05°C et 61.30 °C, typique des eaux géothermales de basse géothermie, cette contrainte nécessite préalablement un refroidissement, avant leur distribution urbaine ainsi qu'une réhabilitation des installations systématiquement, afin d'atténuer les phénomènes de corrosion et d'incrustation des ouvrages outre que les installations hydrauliques.
- Un pH neutre.
- Une forte minéralisation, allant jusqu'à 2556.29µS/cm.
- Une dureté totale élevée qui varie entre 592mg/L CaCO_3 et 990 mg/L CaCO_3 .

Sur les 14 forages étudiés, 11 mêmes forages ont été étudiés dans les deux compagnes d'où il est intéressant de faire des comparaisons. Les paramètres pH, minéralisation, dureté totale fluctuent en diminution ou en augmentation selon les cas, parfois les paramètres grimpent au double.

La TDS, calcium, Magnésium, Chlorures augmentent en 2012, tandis que les carbonates et les sulfates diminuent. Cette brutalité de changement témoigne que les eaux analysées ne sont, hélas propres à la nappe du CI mais, un mélange de tout ; CI, CT et la nappe phréatique.

- Deux faciès chimiques : Chloruré et sulfaté calcique et magnésien et chloruré sodique et potassique ou sulfaté sodique (**d'après la classification de Piper**) et cinq faciès qui sont respectivement, Chloruré sodique, Chloruré calcique, Chloruré magnésien, Sulfaté sodique, Sulfaté calcique (**d'après la classification de Schöeller – Berkloff**).

On y observe une instabilité dans les faciès chimiques qui changent brutalement de 2010 à 2012 ; chose qui peut être expliquée par une contamination accidentelle. Cette dernière est causée par le dépérissement des forages qui favorise le passage et le mélange des eaux de la CI par celles de la CT et voir même celle de la nappe phréatique.

- La répartition spatiale des éléments chimiques confirme que l'origine de ces faciès est fortement liée à la nature lithologique des formations au sein desquelles les eaux séjournent, car l'interaction eau/roche provoque une dissolution, entraînant ainsi un enrichissement des eaux en éléments chimiques. Cependant la variation chimique dans notre cas est due principalement à l'hypothèse avancée, il ne s'agissait pas uniquement des eaux échantillonnées et analysées propre à la nappe CI, mais en réalité, il s'agissait d'un mélange de tout ; CI, CT et aussi nappe phréatique qui n'est pas exclue.

Du point de vue agricole, les eaux du Continental Intercalaire sont des eaux médiocres à admissibles, pour l'irrigation. Or, la SAR démontre que ces eaux sont excellentes pour l'irrigation, cette contradiction confirme encore notre hypothèse avancée. Une perte de charge hydraulique ascendante qui fausse le résultat et qui laisse l'interprétation assez difficile.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Au terme de cet humble mémoire, la région d'étude encadrée par la vallée d'Oued Righ moyen est une véritable entité géographiquement et géologiquement intégrante du Bas Sahara. Limitée au Nord par l'accident sud atlasique et les premiers contreforts des Monts des Aurès, au Sud par la falaise méridionale du Tinhert, à l'Est par les affleurements crétacés du Dahar et enfin on y trouve la dorsale du Mزاب, à l'Ouest.

Cette région est connue par son climat hyperaride, caractéristique généralisée du Bas Sahara, ce qui nous a confirmé l'analyse fondamentale de la climatologie, les précipitations sont très rares et irrégulières, avec une moyenne de 64.20mm, Les relevés thermiques ont donné une température moyenne annuelle de l'ordre de 22.88°C, ce qui se traduit par une période déficitaire le long de l'année ce qui nous a poussé à délaissé toute tentative de bilan hydrologique.

Du point de vue géologique, les terrains secondaires discordant sur le socle primaire souvent érodé, présentent une sédimentation tantôt marine, tantôt continentale, la série stratigraphique très épaisse est caractérisée essentiellement par des formations, allant du Crétacé inférieur au Quaternaire.

Le système aquifère de l'Oued Righ présente trois nappes principales : l'une superficielle caractérisée par des eaux fortement minéralisées et salées, la deuxième multicouches, constituée de formations très hétérogènes médiocres et la troisième plus profonde, formant le Continental Intercalaire, connue sous la dénomination de nappe albiennaise, objet de notre étude. L'exploitation excessive des nappes du Continental Intercalaire et du Complexe Terminal ont engendré un phénomène de remontée des eaux qui ne cesse de s'aggraver et qui constitue une menace sérieuse pour le sol, la flore et la qualité des eaux pour l'irrigation et la consommation humaine.

L'étude des caractéristiques physico-chimiques de deux campagnes distinctes (2010 et 2012), nous a permis de donner un diagnostic sur la qualité chimique des eaux du Continental Intercalaire dans la région d'étude. Les résultats ainsi obtenus par l'interprétation des analyses chimiques ont montré que les concentrations en Ca^{++} , Mg^{++} et Na^+ se situaient dans l'intervalle des valeurs limites, tandis que les teneurs en ions K^+ , Cl^- , SO_4^- dépassaient les normes algériennes pour une eau potable, ce qui explique la forte minéralisation rencontrée dans ces eaux géothermales. L'augmentation de ces teneurs dans l'eau pourrait être néfaste à la santé humaine. Dans l'ensemble, ces eaux sont caractérisées par une dureté élevée, due généralement à une dureté calcique en raison de la teneur élevée des ions de calcium ainsi par rapport aux ions de magnésium, une température allant de 40 à 61.30°C, un pH neutre et une conductivité dans la plupart des échantillons reste dans les normes algériennes, à l'exception de quelques forages, où les valeurs sont relativement élevées, dépassant parfois les normes.

Sur les 14 forages étudiés, 11 mêmes forages ont été étudiés dans les deux campagnes d'où il nous est paru intéressant de faire des comparaisons. Les paramètres pH, minéralisation, dureté totale fluctuent en diminution ou en augmentation selon les cas, parfois les paramètres grimpent au double.

La TDS, le calcium, le Magnésium, les Chlorures augmentent en 2012, tandis que les carbonates et les sulfates diminuent. Cette brutalité de changement témoignent que les eaux analysées ne sont, hélas propres à la nappe du CI mais, un mélange de tout ; CI, CT et la nappe phréatique.

L'analyse graphique par le diagramme de Piper montre que la majorité des échantillons sont groupés dans le faciès chloruré, sulfaté calcique et magnésien. Les deux classifications de Risverde et de Wilcox montrent que ces eaux ne conviendraient pas à l'irrigation, hormis certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

Il a été remarqué une instabilité dans les faciès chimiques qui changent brutalement de 2010 à 2012 : chose qui peut être expliquée par une contamination accidentelle. Cette dernière est causée par le dépérissement des forages qui favorise le passage et le mélange des eaux de la CI par celles de la CT et voir même celle de la nappe phréatique.

La répartition spatiale des éléments chimiques a montré que l'origine de ces faciès est liée directement à la nature lithologique des formations aquifères, car l'interaction eau /roche provoque une dissolution, entraînant ainsi un enrichissement des eaux en éléments chimiques. Cependant cette origine est à exclure si l'on accepte notre hypothèse dument avancée de la perte de charge hydraulique qui est fort possible la cause principale de toutes ces variations et anomalies chimiques.

Du point de vue agricole, les eaux du Continental Intercalaire sont des eaux médiocres à admissibles, pour l'irrigation. Or, la SAR démontre que ces eaux sont excellentes pour l'irrigation, cette contradiction confirme encore notre hypothèse avancée. Une perte de charge hydraulique ascendante qui fausse le résultat et qui laisse l'interprétation assez difficile.

Il en découle à travers ces résultats que les eaux souterraines géothermales de la nappe du Continental Intercalaire ne sont pas recommandées pour la consommation humaine, d'autant plus que leurs usages en agriculture nécessitent des refroidissements.

A l'issue de ce travail, nous avons jugé utile de formuler quelques recommandations qui ne seront que bénéfiques, face au phénomène de la remontée des eaux et afin de préserver la ressource hydrique et l'écosystème, à savoir :

- La fermeture des forages et puits abandonnés,
- L'arrêt de réalisation de nouveaux forages dans les régions surexploitées, par la mise en place d'une procédure légale ferme ainsi que sa stricte application,
- La réhabilitation des forages affectés par le dépérissement, par la mise en place d'équipements adéquats et la cimentation des parois usées,
- Mise en place d'un réseau dense de piézomètres, en tenant compte du choix de matériaux de tubage anticorrosifs,
- Un suivi continué qualitatif et quantitatif des ressources, par la mise en place d'un modèle mathématique, l'intégration d'une gestion durable aux réserves hydriques du CI, par la mise en place d'un système informatisé « le Système d'Information géographique SIG » .

Une attention doit être prêtée aux soutirages des débits des nappes du Complexe Terminal et ceux de la nappe phréatique par l'alternative de la nappe albiennaise profonde. Des prospections hydrogéologiques détaillées au niveau de la gouttière d'Oued Righ seront souhaitables.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BELKSIER M. S. (2009)** –Hydrogéologie et hydrochimie de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et l'évaluation de sa vulnérabilité. Mém. Master, Univ. Badji Mokhtar Annaba., 145 p. 124 fig., 42 tab.
- BETTAHAR A. (2013)** – Aspects qualitatifs des eaux de la région de Touggourt (Nappe du Complexe Terminal et Continental Intercalaire) Sud –Est de l'Algérie. Mém. Master, Univ. KasdiMerbah., 67 p. 39 fig., 15 tab.
- BOUZNAD I E. (2009)** –Ressources en eau et Essai de la gestion intégrée dans la vallée Sud d'Oued Righ (W. Ouargla)(Sahara septentrional algérien)Mém. Master, Univ. Badji Mokhtar Annaba., 150 p. 84 fig., 57 tab.
- BOUMARAF B. (2013)** –Caractéristiques et fonctionnement des sols dans la vallées d'Oued Righ, Shara nord oriental, Akgérie. Thèses. Doc., Univ. REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE., 97 p. 10 fig., 13 tab.
- BEL F. & CUCHE D. (1969)** -Mise au point des connaissances sur la nappe du Complexe Terminal, ERESS, Ouargla, Algérie, 20p.
- BEL F. & DERMAGNE F. (1966)**-Etude géologique du Continental Terminal, ANRH Alger, Algérie, 22p.
- BISSON, 2003**
- BUSSON. G (1970)**- Le mésozoïque Saharien. 2eme partie : Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Edit., Paris, «Centre Rech. Zones Arides », Géol., 11, Ed. C.N.R.S. 811p.
- BUSSON G. (1972)**- Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du Mésozoïque saharien. Thèse.Doct.,Paris, 464p.
- BALLAIS J.L. (2010)**- Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du bas Sahara algérien. Géographie physique et environnement. Vol IV, 127 p.
- CASTANY G. (1963)** – Traité pratique des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris,France. 657p.
- CASTANY G. (1967)** - Principes d'établissement de bilan. Bull. BRGM 3, Paris XV,France.
- CASTANY G. (1968)** – Prospection des eaux souterraines. Ed. Dunod, Paris,France. 717p.
- CASTANY G. (1982)** - Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris,France. 238p.
- CASTANY G. (1998)** – Hydrogéologie-Principes et méthodes. Ed. Dunod, Paris,France. 237p.
- CORNET A, (1961)**- La géologie de l'Oued Righ .Terres et eaux .Alger. n°37 pp18-24.
- CORNET A. (1964)**- Introduction à l'hydrogéologie saharienne. SNED, Alger Algérie, 572p.
- CORNET A. (1964)**-Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Revue de Géographie. Physique et Géologie Dynamique. Paris. Ed Masson pp5-72.

- CONRAD G. (1969)**- L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien. Centre de recherche sur les zones arides. Série géologie n°10, CNRS, Paris, 527p.
- CRSTRA. (2008)**- Centre de Recherche Scientifique et sur les Régions Arides,mission : étude régional de la vallée d'oued Righ.
- DETAY M. (1993)** –Le forage d'eau ; réalisation, entretien et réhabilitation. Edit. Masson. Paris, 379p.
- DUBIEF J. (1953)** -Essai sur l'hydrologie superficielle au Sahara. S.E.S., Alger, 457p.
- DUBIEF J. (1963)** -Le climat du Sahara. Mém. Hors série. Ins. Rech. Sahar, 2275p.
- DUBOST (1992)**- Ecologie, Aménagement et développement Agricole des Oasis Algériennes. Edition 2002, N° Dépôt légal ; 1092-2002. 36.
- EDMUNDS W.M. et al (2002)** –Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. Applied Geochemistry, Pub., elsevier (2003), Netherlands.
- ERESS (1972a)**- Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final, 78p.
- ERESS (1972b)**- Nappe du Continental intercalaire. Plaquette 2, Tunisie. 46p.
- ERESS (1972c)**- Nappe du Complexe terminal. Appendices, Tunisie. 59p.
- FABRE J. (1976)**- Introduction à la géologie du Sahara Algérien. SNED, Alger Algérie,422p.
- GAUTIER, M., CIAIR, A., et all (1952)** -La géologie et le problème de l'eau en Algérie. Tome II. Données sur l'hydrogéologie algérienne). XIX^e congrès géologique international.
- GUENDOOUZ A. (1985)**- Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara Nord-Est Septentrional (Algérie). Thèse 3^{ème} cycle. Université de Paris- Sud, 243p.
- GUENDOOUZ A. et al (2003)** – Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the Complexe Terminal aquifer in the Algerian Sahara, Hydrogeology Journal (2003). Algeria.
- GUENDOOUZ A. et MICHELOT J. L. (2006)** - Chlorine-36 dating of deep groundwater from northern sahara. Journal of Hydrology, 328 (3-4), pp572–580, Paris.
- NESSON C. (1978)**- L'évolution des ressources hydrauliques dans les oasis du Bas Sahara algérien. In : Recherche sur l'Algérie, (ed. CNRS), pp 7-100, Paris.
- KILIAN C. (1932)**- Les principaux complexes continentaux du Sahara. C.R. Soc. Géol. Fr.Paris
- MAAMRI O. et GHOUALEM E. (2014)** –Utilisation des logs de forages pour la cartographie de la lithologie et la répartition spatiale du Complexe Terminale à travers la vallée d'Oued Righ.Mém. Master, Univ. Kasdi Merbah., 59 p. 22 fig., 17 tab.
- MARGAT J. (1990)** –Les gisements d'eau souterraine. La Recherche, Edit. Masson, Paris, France.596 p

MOULLA A.S et al (2002)- Contribution des isotopes à l'étude des ressources en eaux souterraines transfrontalières en Algérie. Atelier international sur la gestion partagée des ressources des systèmes aquifères en Afrique. PHI, UNESCO, Tripoli, Libye, 02-04 juin 2002.

MOULAY LAKBIRE Z.E. et YAHAOUI Z. ,2016 – Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région d'El-Oued ,Sud-Est algerien . Mém. Master, Univ. Abou Bekr Belkaid - Tlemcen., 105 p. 60 fig., 24 tab.

PETERSEN J.O. (2014) –Traçage isotopique (^{36}Cl , ^4He , ^{234}U) et modélisation hydrogéologique du Système Aquifère du Sahara Septentrional.Thèse.Doc.,Univ.Aix-Marseille France. ,329p.,74 fig.,11Tab.

RODIER J. (1984) -Analyse des eaux. Ed., BORDAS Paris (France), 1365p.

RODIER J.et al.(2009)-L'analyse de l'eau, 9e édition. DUNOD , Paris, France.1579p.

SASS. (2002) -Hydrogéologie, T2. OSS, 275p.

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

OULD BABASY M. (2005) - Recharge et paléorecharge du Système Aquifère du Sahara Septentrional. Thèse.Doc., Univ. de Tunis El Manar, 261p.

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

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

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

VERDEUIL P. (1969) –utilisation pratique de la méthode de Thornthwaite dans l'étude du bilan hydrique des bassain. Congrès National d'Hydrogéologie. –Journées H. SCHOEILLER- Bordeaux, 13p., 6tab.

VERDEUIL P. (1989) –Abaque pour le calcul du déficit d'écoulement en Algérie. Séminaires des sciences de la terre, Alger.

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

Les liens :

WWW.tutiempo.org.nj

ANNEXES

Années Mois	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
1975	50.2	12.9	0	39	0	0	0	0	1.4	0	12.7	1.9
1976	19.7	16.5	34.5	0	1.6	0	0	0	7	5.3	21.4	1
1977	16	0	11.8	0.6	5.6	0	0	0	0.3	0	10.4	8
1978	12.6	18	0	32	1.8	0	0	3	0	1.5	0	0
1979	7.9	22.8	1.8	3.5	0.8	0	0	0	4.8	8	2.3	0
1980	10.1	14	64.7	10	0	0	0	0	0	0	50.2	4
1981	0	1.02	5.08	6.1	0.51	0	0	0	0	0	6.6	1.02
1982	0	2.03	7.11	0	2.03	1.02	0	0	0	0.25	2.03	13.97
1983	0	0	5.59	0.51	0	0	0	0	0	0	6.09	1.53
1984	0	0	5.59	0.51	0	0	0	0	0	0	6.09	1.53
1985	57.6	0	1.02	3.05	1.53	0	0	0	0	0	0	6.1
1986	1.02	0.25	19.3	9.91	3.3	0	0	0	0.51	6.09	6.1	9.15
1987	4.06	1.27	1.53	0	2.04	5.207	2.03	0	0	13.97	0	1.53
1988	0	0	2.03	0	1.78	4.57	0	0	5.04	6.096	83.32	51.3
1989	1.52	0	0	2.04	0	0	0	0	0	0	5.33	0
1990	56.13	0	6.61	10.42	30.21	0	0	16.15	0	0	0	0
1991	0	0	12.96	0	20.06	2.03	0	0	4.58	16	5.59	0.25
1992	34.7	0	48.01	12.95	22.35	0	11.41	0	0	0	2.03	9.91
1993	0	14.99	6.1	0	1.02	0	0	1.02	62.7	32.7	17.27	4.06
1994	0	0	16.51	3.05	0.51	1.02	0	0	8.89	10.16	0	0
1995	3.05	0	0	0	0	0	0	0.51	29	1.02	2.04	25.15
1996	40.39	12.45	17.28	0	0	0	1.09	0	4.07	0.25	0	0
1997	0	0	0	18.03	0	1.02	0	0	14	0	12.95	8.13
1998	0	0	1.02	0	0	7.87	0	0	3.05	19.3	2.03	0
1999	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	35	1.25
2000	0	0	1.25	1.52	14.99	1.02	0	0	1.52	19.31	0	1.78
2001	4.07	0	2.04	1.02	0	0	0	0	5.08	1.02	2.03	27.17
2002	5.08	0	0	0	4.06	0	9.39	3.55	3.56	7.11	8.65	0
2003	18.28	4.57	11.94	0	0	0	0	5.08	0	12.7	4.06	4.07
2004	59.94	0.76	16.52	11.94	0	1.53	0	0	10.9	0	39.12	7.12
2005	0	3.56	0.76	0	0	3.05	0	6.1	6.1	3.05	0	2.03
2006	19.82	1.02	0	2.03	0	0	0	2.04	15	13.97	2.03	6.1
2007	0	1.02	0.76	40.13	0	0	0	20.07	0	1.02	0	11.18
2008	7.11	1.02	0	0	1.02	2.79	0	0	4.07	8.89	3.05	6.1
2009	89.66	0	25.66	11.94	5.33	0	0	0	23.4	1.02	0	1.02
2010	7.12	0.76	0	10.16	2.03	0	0	0	5.08	1.27	2.03	0
2011	1.02	0	7.87	2.04	6.09	0	0	2.03	0	6.1	0	0.51
2012	2.04	0	0	7.87	0	0	0	0	3.3	3.05	2.04	0
2013	3.56	1.53	0	16	0	0	0.51	8.13	0	0.25	6.1	19.31
2014	2.03	0	4.06	0	0.25	0.25	0	0	5.33	0	7.12	1.78
2015	0	29.97	12.19	0	0	0	0	1.02	8.13	1.02	0	0
2016	0	2.54	3.05	11.68	4.57	0.25	0	0	5.08	0	1.78	6.1

Annexe I: Hauteurs des précipitations mensuelles à la station de Touggourt (mm).

Années	Précipitations moyennes annuelles	Années	Précipitations moyennes annuelles
1975	118.1	1996	75.53
1976	107	1997	54.1
1977	52.7	1998	33.27
1978	68.9	1999	36.25
1979	51.9	2000	41.39
1980	153	2001	42.43
1981	20.33	2002	41.4
1982	28.44	2003	60.7
1983	13.72	2004	147.85
1984	13.72	2005	24.65
1985	69.3	2006	61.99
1986	55.63	2007	74.18
1987	31.637	2008	34.05
1988	154.136	2009	157.99
1989	8.89	2010	28.45
1990	119.52	2011	25.66
1991	61.47	2012	18.3
1992	141.355	2013	55.39
1993	139.86	2014	20.82
1994	40.14	2015	52.33
1995	60.72	2016	35.05
		La moyenne	64.20

Annexe II: Hauteurs des précipitations moyennes annuelles.

Mois Années	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
1975	9.2	11.7	15.9	22.8	25.3	31.4	35.1	33.8	30.4	21.4	14.4	12.8
1976	10.1	13.7	14.7	21.2	25.6	29.8	34.4	32.9	29.1	22.6	14	13.5
1977	13.1	16.8	19.3	22.7	24.9	31.4	36.4	32.5	29.1	23.4	18	13
1978	10.8	18.9	17.8	22.1	26.5	31.8	34.3	31.9	29.6	20.1	14.6	14.6
1979	15	12.5	18.9	20.4	25.5	31.4	33.3	36.1	26.2	26.6	14.5	12.1
1980	12.1	14.2	17.7	20	25.4	31.6	33.4	34.2	30	20.5	17.3	8.7
1981	7.9	10.2	18.9	22.8	27.1	31.6	31.4	30.1	28.1	23.3	16.6	14.9
1982	12.5	14.3	15.9	20.9	25.9	35	37.4	35.4	30	23.9	16.9	11.4
1983	9.3	12.6	17.3	23.6	28	32.2	35.6	35.3	29.4	23.3	18.9	11.3
1984	11.5	13	16.7	22.7	26.4	31	33.8	33.7	29.5	22.1	16.7	10.2
1985	9.6	15.2	14.6	21.8	24.9	31.8	35.1	34.1	29.4	22.8	19.1	12.4
1986	10.2	13	15	19.5	26.5	29.8	34.3	35.5	30.5	24.6	15.7	11.9
1987	9.7	13	15.7	21.8	24.8	31.6	33.9	34	29.8	23.8	15.1	12.9
1988	12.1	13	16	21.8	28.2	30.4	34.7	33.5	26.8	23.7	16.6	9.9
1989	9.2	12.6	17.3	20.1	25.2	28.8	32.5	34.5	29.8	21.9	17.1	13.5
1990	11.5	14	16.3	19.9	23.4	31.8	32.9	31.4	31.9	24.2	16.1	10.1
1991	8.9	11.5	17.2	18.6	21.9	29.1	33.4	32.7	28.5	22.2	14	9.7
1992	8.6	11.4	15.2	19.5	24	28.9	31.2	32.9	29.3	22.9	15.8	11
1993	8.7	11.1	14.9	20.6	26.2	32.5	33.8	33.2	28.2	23.1	15.9	10.5
1994	11.3	14.5	16.9	18.6	27.9	31.2	33.6	33.8	28.7	22.1	16.5	10.5
1995	9.6	14.6	15.9	18.7	26.5	30.4	33.8	33	27.1	22.2	15.8	13.2
1996	12.9	11.8	16.4	20.6	25.5	28.4	32	34.5	27.2	20	16.1	13
1997	11.8	13.8	15.3	18.8	26.1	33.4	35.1	33.2	27.9	22.6	16.1	12.5
1998	10.7	13.3	15.9	21.7	25.4	31.1	33.8	33.4	30.3	20.4	15.1	9.9
1999	10.5	11.3	16.9	22.1	29.4	33.9	34.3	36.4	30.5	25.3	15.1	10.4
2000	7.9	12.5	17.6	22.9	28.7	30.8	34.2	32.9	29.6	21.4	16.4	12.6
2001	11.3	12.5	21.2	21.4	26.7	32.4	36.2	34.2	30	26.7	15.9	10.4
2002	9.2	13.5	18.5	22.3	26	31.6	34.6	33.8	28.8	22.5	17.1	12.9
2003	11.8	11.6	16.2	22.4	27.2	31.7	36.1	33.6	28.7	25.4	16.2	11
2004	10.9	14.3	17.6	21	23.7	30.4	33.1	35	27.8	24.8	14.3	11.7
2005	8.4	10.4	17.7	21.3	28.2	31.6	35.8	33.5	28.6	23.8	21.9	10.2
2006	8.7	12.3	18.5	24	28.5	32.1	34.4	33.7	27	24.4	16.2	12.1
2007	11.2	15	16.3	20.4	26.8	32.9	32.9	34.1	30.5	23.7	14.6	10.5
2008	10.9	12.9	17.6	23.1	27.4	30.5	35.9	34.2	30	23	14.8	10.5
2009	11.3	12.5	16.6	19.3	26	31.5	35.2	34.4	27.3	21.8	15.6	13.6
2010	12.2	15.9	18.8	22.5	24.9	32.1	34.7	34.4	28.6	22.2	16.3	12.3
2011	11.1	12	16.1	22.2	25.4	30.1	34.9	33.8	31.2	21.4	16.3	11.5
2012	10	9.7	16.6	21.5	27	34.3	36.3	34.7	29.3	24.4	18.3	10.8
2013	11.5	11.5	19.9	22.5	26.1	30.1	34.5	32.3	29.8	26.3	15.9	10.8
2014	11.9	14.4	16.3	22.5	27	30.6	34.5	34.6	31.6	24	18.2	11.4
2015	10.1	11.7	16.1	22.6	28.1	31.1	33.5	34.1	29.7	23.8	16.6	10.8
2016	12.8	14.6	16.7	23.3	27.7	32.1	33.9	33.1	29.3	25.5	16.4	13

Annexe III: Les valeurs des températures mensuelles à la station de Touggourt (°C).

Années	Température moyenne annuelle	Années	Température moyenne annuelle
1975	22.02	1996	21.53
1976	21.80	1997	22.22
1977	23.38	1998	21.75
1978	22.75	1999	23.01
1979	22.71	2000	22.29
1980	22.09	2001	23.24
1981	21.91	2002	22.57
1982	23.29	2003	22.66
1983	23.07	2004	22.05
1984	22.28	2005	22.62
1985	22.57	2006	22.66
1986	22.21	2007	22.41
1987	22.18	2008	22.57
1988	22.23	2009	22.09
1989	21.88	2010	22.91
1990	21.96	2011	22.17
1991	20.64	2012	22.74
1992	20.89	2013	22.60
1993	21.56	2014	23.08
1994	22.13	2015	22.35
1995	21.73	2016	23.20
		La moyenne	22.88

Annexe IV: Températures moyennes annuelles.

Mois Année	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
1975	0	0	25.7	34	11.8	11.8	15.7	15.7	13.7	13.3	16	13.6
1976	14	16.7	17.9	20.5	17	16	14.6	15.7	13.8	20	13.7	11.3
1977	15.2	16.9	13.7	14.1	16.1	17.8	17.2	20.1	14.5	10.4	10.4	10
1978	11.5	12.1	13.9	17.4	20.3	18.5	13.4	9.4	11.1	5.2	6.7	7.6
1979	14	9.4	10.4	13.1	10.8	4.3	11.9	10.3		17.2	22.1	7.7
1980	11.1	6.3	13	13.8	15.3	15.3	9.8	6.6	8.3	8.8	11	4.1
1981	4.5	9.4	9.4	13.2	13.9	12.4	16.8	11.5	9.5	7	6.9	12.2
1982	9.1	10.3	12.6	14.2	14.2	10.6	8.4	11.2	8	10.9	10.1	11.7
1983	2.8	8	14.2	12.1	12.7	11.7	10.4	10.3	7.8	8.1	7.5	3.6
1984	8.9	12.3	11.4	15.2	19.7	12.4	5.6	11.2	9	10.8	7.5	6.7
1985	12.4	10.7	12.3	17.1	17.1	15.3	10.4	10.7	9.7	13.2	22.1	8.2
1986	10.6	13.7	12.9	14.5	11.5	13.5	16.4	11.2	14.3	12.2	12.2	15.3
1987	12.4	13.6	13.1	14.2	18.6	19	20.1	14.6	10.3	11.4	13.5	9.6
1988	14.2	13.6	13.1	16.3	19.8	22.2	14.4	13.2	13	14	10.2	10.2
1989	11.9	14.5	15	19.2	17.2	18.6	14.4	13.4	15	10.6	12	7.8
1990	13.5	6.8	11.9	16.5	16.6	12.3	11.1	10.7	11.9	8.9	8	7.8
1991	4.9	9.9	14.4	12.6	15.2	15.3	10.6	9.7	10.2	11.6	9.3	4.9
1992	4.4	7.1	11.3	13.4	10.5	11.7	11.5	7	7	12.3	11.1	10.2
1993	6.8	15.5	12.1	14.6	19.6	17.9	16.8	11.7	15.3	13.4	13.6	5.9
1994	8.1	7.5	12.6	13.7	8	9.7	5.1	5.8	7.3	6.2	3.1	5
1995	8.9	7.5	12.4	10.7	9.6	10.9	9.9	10.7	10.2	7.7	8.6	9.8
1996	10.1	14.8	8.5	11.3	12.5	9.9	8.2	8.5	8.5	5.8	5	8.4
1997	5.4	2.7	5.8	11.8	11.9	10.6	9.9	7	7.3	6	8.7	8.1
1998	6.9	5.7	9.4	11.4	13.5	10.4	7.1	7.7	10.6	10	9.5	6.6
1999	9.3	11.9	14.3	15.1	15.5	13.8	12.7	13.6	14.3	13.2	12.7	11.1
2000	7.7	9.6	13.3	18.4	14.5	11.3	11.9	9.1	12.2	10	9.1	12.4
2001	11.4	10.8	14.6	13.3	17.3	15.2	15.6	12.6	12.5	11.5	12.1	10.5
2002	7.9	8.8	10.1	14.3	16.2	12.8	15.3	12.7	10.5	6.1	14.7	10.5
2003	14.5	12.3	8.6	15.5	14.6	8	7	6.6	7.4	12.3	7.5	11.6
2004	13.7	11.1	13.8	15.4	17.3	15.2	10.2	13.4	8.2	8.9	9	12
2005	8.2	12.2	15	14.4	13.1	12.4	12	12.4	11.6	8.9	5.2	8.2
2006	8.4	10.8	13.6	12.3	13.1	12.9	10.7	10.1	9.8	9.3	5.4	7.6
2007	3.9	9.3	13.3	14.9	10.9	12.5	11	14.2	11.8	11.9	5.8	6.7
2008	6.3	4.1	11.9	12	17.1	14.4	13.9	11	13.5	11.6	9.2	6.4
2009	89.66	11.3	16.1	15.3	15.4	9.9	8.7	11.2	10	6.5	8.5	12.5
2010	12.7	15.2	12.2	10.8	12	13	8.6	8.1	7.6	8.5	11	12.7
2011	5.1	10.1	12.3	13.9	12	9	12.8	10.2	9.4	6.4	9	6.5
2012	7.3	9.7	8.6	14	13.3	10.4	10.6	8.4	8.2	6.2	7.8	6.1
2013	9.5	11.2	13.2	15.2	14.2	13.9	9.4	9.7	12.2	8.2	9.5	6.8
2014	9.6	11.2	14.5	11.5	13	13.9	11.5	9.7	9.9	10.6	10.1	7.7
2015	9.7	15.3	14.9	14.1	13.1	12.7	10.3	10.6	8.6	9.9	7.9	3.9
2016	11.2	11.5	14.1	15.4	15.8	14.2	11.6	12.8	12	10.2	9	10.4

Annexe V:La vitesse du vent mensuelle à la station de Touggourt (Km/h).

Mois Années	Jan.	Fév.	Mars.	Avr.	Mai.	Jun.	Juil.	Aout.	Sep	Oct.	Nov.	Déc.
1975	0	0	42	46.3	36.6	31.9	30.6	30.3	49.7	45.4	57.9	57
1976	60.2	52.4	57.8	40.5	43.6	41.3	29.5	30.1	41.9	49.2	64.5	59.3
1977	69.3	51.2	40.4	33.6	42.4	31.4	29.6	36.1	40.4	37.1	50.6	57.8
1978	55.4	36.3	34.4	37.9	42.2	36.1	33.7	39	44.6	36.2	55.4	44
1979	45.7	63.3	35.5	36.4	33.8	37.6	36.7	25	0	44.5	49.7	54.2
1980	55.1	44.1	38.3	43.5	34.4	30.6	32.4	29.6	40.8	47.1	55.2	62.9
1981	61.4	48	38.9	40.1	37.2	24.5	43.7	34	41.4	40.2	49.7	49.5
1982	48.8	42.6	42.8	53.1	29.7	24.5	22.9	35.9	45.2	42.9	60.7	62
1983	48.2	44.8	41.3	33.7	32.1	27.8	21	25.4	29.4	39.7	42.6	52.5
1984	50	41.3	40.6	36.4	33.2	30	28.3	34.8	36.2	46.6	51.4	61
1985	55.7	46.4	48.7	30.7	32.6	27.6	23.1	27	34.8	45.5	43.7	51.2
1986	50.5	44.3	50.4	41.8	36.6	35	29.5	27.3	40	50.1	66	65.1
1987	61.1	52.5	54.7	39.6	39.7	29.8	27.9	29.5	35.8	45.4	51.3	62.4
1988	49.9	46.8	35.9	34.8	37.1	44.7	29.7	34.8	42.2	49.5	65.3	73.7
1989	68.1	49.2	42.9	41.6	41.1	37.2	35.1	36.4	46.3	60.6	57.8	68
1990	74.7	60.3	50.9	48.4	54.6	34	33.3	43.8	27.8	43.5	65.7	67.3
1991	56.3	50.5	46.1	39.9	39	33	28	30.6	44.3	50.2	54.5	66.9
1992	70.7	54.4	56.6	45.9	43.8	31.9	31	26.9	33.6	37.7	62.6	65.2
1993	61.5	63.4	51.2	39.8	36.1	25.5	25.9	26	39.5	43.1	71.2	72.8
1994	62.8	47.1	51.4	40.5	33.6	39.5	30.7	32.2	47.9	57.4	65.4	66.3
1995	61.5	57.6	47.7	44.1	36	34.8	33.5	35.7	47.8	52.3	52	71.6
1996	67.4	55.6	51.7	42.4	36.7	39	33.6	31.7	40.6	49.1	52.4	48.3
1997	56.4	44	48.4	48.2	41.3	34.4	30.8	33.8	48	53.5	58.2	62
1998	62.3	56.8	40.4	35.2	37.2	30.5	27.5	35.1	42.1	56.3	57.6	60.4
1999	71.7	53.9	44.6	31.9	27.9	28.2	29.9	29.6	41.2	44.9	61.9	73
2000	70	52.6	42.4	34.8	42.2	34.6	29.8	31.7	38.9	54.5	52.9	58.8
2001	59.3	45.4	40.4	40.2	37.6	29.2	26.2	30.7	45.5	42.7	56.7	67.5
2002	66.4	51.6	43.4	37.9	36.8	28	31.2	32.7	38.8	45.1	51.8	56.7
2003	60.7	53.3	48.6	36.8	34.2	31.3	27.4	29.3	39.4	48.9	58.4	63.2
2004	67	52.1	46.1	43.5	38.6	32	29.3	34.6	42.2	41.5	70.4	75.8
2005	66.7	55.9	45.4	37	29.9	33.2	27.1	33.5	44	51.8	46.2	61.8
2006	64.4	53.9	36.8	34.8	30.6	23.5	27.6	32.9	42.3	43.7	55.5	69.9
2007	61.6	50.1	41.5	52.4	29.8	25	29.7	29.2	38.4	45.5	49	60.9
2008	62.8	50.2	41.4	29.3	32.3	38.1	28.6	34	44	61.2	64.6	69.7
2009	74.7	49.2	50.4	41.3	33.8	30.1	29.9	29.8	51.4	45.9	51.2	54.6
2010	60.1	45.3	41.7	42	35.2	26.3	27.4	31	44.4	46	52	53.2
2011	59.9	57.5	55.1	47.1	45.6	38.7	28.3	30.3	36.6	54.2	55.3	62.8
2012	57.5	50.3	42.6	39.3	35.6	26.7	22.9	24.7	32.4	41.5	51	53.2
2013	50.2	48.6	40.4	34.8	33.4	29.3	27	35	39.7	38.7	53.4	68.3
2014	63.6	53.9	54.7	42	36.7	33	30.9	33.5	38.1	39.8	52.2	63,,5
2015	59.5	52.2	44.9	36.8	34	31.5	26.2	3.4	43.5	47.1	60.4	68.7
2016	54.3	48.2	38	42.6	30.2	31.1	32.1	32.1	43.5	42.9	53	66.8

Annexe VI : Les valeurs d'humidités mensuelles à la station de Touggourt (en %)

N°de l'équation	Nom	L'équation	Paramètres
1	Indice de De Martone annuel	$I=P/(T+10)$	P: précipitations moyennes annuelles (mm). T : température moyenne annuelle (°C).
2	Indice de De Martone mensuel	$i=12p/(t+10)$	p : précipitations moyennes mensuelles (mm). t : température moyenne mensuelle (°C).

Annexe VII : Indices climatiques.

I	Type du climat
$20 < I < 30$	Climat tempéré
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$7.5 < I < 10$	Climat steppique
$5 < I < 7.5$	Climat désertique
$I < 5$	Climat hyperaride

Annexe VIII : Classification des climats, en fonction des indices d'aridité.

N des forages	X	Y	T (°C)	pH	C.E. (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	TDS (mg/l)
F1	6° 06' 58"	33° 16' 57"	56.4	8.66	3300	153.6	115.2	316.56	48.85	695.80	558.41	158.6	2047
F2	6° 06' 38"	33° 17' 43"	48.4	8.78	2720	154.4	84.96	370.20	51.60	518.30	679.41	178.12	2042
F3	5° 58' 34"	33° 34' 47"	50.8	7.52	2500	116	73.92	330.46	47.75	454.40	441.32	224.48	1688
F4	5° 55' 06"	33° 36' 34"	53	8.81	2440	208	17.28	303.97	49.95	440.20	410.10	190.32	1624
F5	5° 58' 55"	33° 32' 54"	53.1	8.91	2470	162.4	61.44	211.26	49.40	211.80	655.99	192.76	1745
F6	6°01'44"	33°31'36"	54.4	8.33	2450	265.6	70.08	257.62	49.40	411.80	714.54	178.12	1850
F7	6° 03' 55"	33° 30' 17"	60.4	8.94	2130	130.40	92.16	217.88	48.30	312.40	534.99	226.92	1563
F8	6° 01' 45"	33° 28' 17"	56.4	8.7	2130	132	91.2	257.62	48.85	312.40	655.99	148.84	1652
F9	6° 04' 50"	33° 28' 40"	47.5	8.97	2470	182.4	94.08	297.35	51.60	590.50	613.06	146.4	1790
F10	6° 00' 55"	33° 34' 17"	58	9.1	2260	108	124.8	277.48	47.75	519.50	546.70	161.04	1588
F11	6° 05' 54"	33° 17' 55"	52	8.16	2460	161.6	66.24	217.22	48.85	426.00	433.41	187.88	1645
F12	5° 58' 20"	33° 25' 03"	50	9.33	2670	192	89.76	290.73	48.85	254.40	624.77	131.76	1840
F13	6° 04' 28"	33° 17' 43"	54.7	8.7	2780	160	76.8	270.86	49.95	525.40	636.47	185.44	1905

Annexe IX: Les résultats des analyses physico-chimiques (Novembre 2010).

N des forages	X	Y	T (°C)	pH	C.E. (µS/cm)	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	K (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	TDS (mg/l)
F1	6° 06' 58"	33° 16' 57"	50.3	7.76	3370	174.80	126.72	148.75	41.77	683.375	196.72	162.2	4101
F2	6° 06' 38"	33° 17' 43"	53.2	7.3	2640	196.80	111.12	130	42.39	828.95	111.12	156.12	1488
F3	5° 58' 34"	33° 34' 47"	49	7.23	2430	132	111.36	186.25	39.94	754.4	111.36	75.64	3480
F4	5° 55' 06"	33° 36' 34"	40.5	8.27	2460	159.60	89.76	186.25	12.61	611.2	89.76	262.2	3447
F5	5° 58' 55"	33° 32' 54"	46.2	8.14	2500	168	118.08	152.5	43	659.725	318.08	51.8	4573
F6	6°01'44"	33°31'36"	50	8.05	2860	216.80	107.52	217.5	44.22	707.65	407.52	56.08	4762
F7	6° 00' 55"	33° 34' 17"	55.5	7.42	2320	204.80	112.8	130	46.67	744.35	112.8	48.8	4945
F8	6° 01' 45"	33° 28' 17"	49.2	8.24	2160	165.20	102.96	117.5	39.94	719.5	102.96	45.72	3491
F9	6° 04' 50"	33° 28' 40"	49	8.34	2430	211.60	106.08	161.25	43	797.6	106.08	45.72	5480
F10	6° 03' 55"	33° 30' 17"	61.3	7.55	2150	184.80	107.04	123.75	40.55	737.25	107.04	50.02	3651
F11	5° 58' 20"	33° 25' 03"	41	8.26	2540	214.96	100.704	173.75	41.77	747.3	100.704	129.28	4267
F12	5° 58' 53"	33° 24' 00"	49.5	8.17	2150	152.80	121.44	123.75	39.33	705.3	121.44	200.1	3813
F13	5° 55' 17"	33° 36' 22"	52.7	7.36	2400	148.40	84.24	173.75	42.39	740.2	84.24	65.88	3752
F14	5° 58' 53"	33° 27' 04"	59.9	7.13	2110	207.60	93.84	130	38.72	747.9	93.84	53.68	3509

Annexe X : Les résultats des analyses physico-chimiques (Avril 2012).

Groupe de paramètres	Paramètres	Les normes algériennes		
		Unités	N.G	C.M.A
Physiques	pH	-	6,5-8,5	-
	T	C°	<25	-
	Conductivité	µS/cm a 20C°	-	2800
	Résidu sec à 100°C	mg /l	500	2000
	Dureté totale	CaCO ₃ mg /l	100	500
Chimiques	Ca ²⁺	mg/l	75	200
	Mg ²⁺	mg/l	50	150
	K ⁺	mg/l	-	20
	Na ⁺	mg/l	-	200
	SO ₄ ²⁻	mg/l	200	400
	Cl ⁻	mg/l	200	500
	HCO ₃ ⁻	-	-	-

Annexe XI : Les normes algériennes de potabilité 6360 en 1991, pour certains paramètres.

تنتهي منطقة وادي ريف إلى الصحراء الجنوبية، وبالضبط إلى الصحراء الدنيا المعروفة بطقسها الجاف. حيث أن الموارد المائية الجوفية تعتبر مستحاثات، قليلا أو نسبيا متجددة؛ وهي المركب النهائي والمتداخل القاري، إذ نتج عن الاستغلال المفرط للطبقة المائية للمركب النهائي، والطبقة المائية السطحية انخفاض في مستوى منسوب المياه، ووداءتها من حيث النوعية، كما أن عدم وجود مخرج للمياه أدى إلى تقادم ظاهرة صعودها إلى السطح. تهدف هذه الدراسة إلى تشخيص نوعي للطبقة المائية للمتداخل القاري للمنطقة الوسطى وادي ريف، والتي تكونت فسي التشكيلات الصخرية للعصر الطباشيري السفلي. بصفة عامة تدفق هذه المياه يكون في اتجاهين: الأول من الشمال نحو الجنوب بالمنطقة الغربية، والثاني من الغرب نحو الشرق بالمنطقة الشرقية.

نتائج التحليل الفيزيوكيميائية للحملتين 2012 و 2010 تبين التركيز الفلزّي المرتفع لعدة عناصر، والذي يفوق الحد المسموح به من طرف المعايير الوطنية، مما يفسر التركيز المعدني الكبير الموجود في هذه المياه. من الناحية الفيزيائية تصنف هذه المياه في خانة المياه الجيو حرارية ذات الطاقة الوسطية نظرا لحرارتها المرتفعة والتي تتفوق أحيانا 60 درجة مئوية، كما تتميز بحموضة معتدلة ونساقلية عالية نسبيا. أيضا تحليل الرسوميات البيانية (Scholler-Berkaloff, Piper) يظهر عدة تصانيف كيميائية مختلفة وكذلك بعض الحالات الشاذة المتمثلة فسي التغيير في التصانيف الكيميائية لبعض التنقيبات التي تعود إلى خلط مياه المتداخل القاري مع مياه والمركب النهائي ويمكن حتى المياه السطحية.

التوزيع الفضائي للعناصر الكيميائية للطبقة المائية القارية يبين من جهة صحة الفرضية السالفة الذكر المتمثلة في صعود المياه من الطبقة المائية القارية إلى مياه المعقد النهائي والتي تليها ومن جهة أخرى أن أصل هذه التصانيف متعلق بطبيعة التكوينات الجيولوجية التي تحوي المياه. بصفة عامة نوعية المياه المدروسة هي من رديئة إلى صالحة للسقي، إلا أنه لا ينصح باستعمالها للشرب قبل المعالجة. وفي الأخير تمكنا من تسليط الضوء على بعض النواحي التي يجب اتباعها من أجل التخفيض من ظاهرة صعود المياه، وبالأحرى المحافظة على نوعية المياه الجوفية للمتداخل القاري من كل احتمال تلوث أو خلط مياه مختلف الطبقات المائية.

الكلمات المفتاحية: وادي ريف، المتداخل القاري، المياه الصالحة للشرب، السقي، تصانيف كيميائية، صعود المياه.

CARACTERISATION HYDROGEOCHIMIQUE DE LA NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE DE LA GOUTTIERE DE L'OUED RIGH, SAHARA ALGERIEN SEPTENTRIONALE.

Résumé :

La région de l'Oued Righ, fait partie du Sahara Septentrional, plus précisément du Bas Sahara connu par son climat hyper-aride. Les ressources en eaux souterraines sont essentiellement fossiles, peu ou relativement renouvelables ; à savoir le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Or, la surexploitation de la nappe du Complexe Terminal, ainsi que la nappe phréatique se traduit par une baisse des niveaux piézométriques, dégradation qualitative de la ressource et en l'absence d'un exutoire, le phénomène de remontée des eaux ne cesse de prendre l'ampleur.

Ce présent travail a pour but de donner un diagnostic qualitatif de la nappe profonde du Continental Intercalaire de la partie centre de la vallée de l'Oued Righ. Cette nappe est contenue dans les formations du Crétacé inférieur. L'écoulement s'effectue d'une manière générale selon deux directions : l'une du Nord vers le Sud, dans la partie occidentale et l'autre de l'Ouest vers l'Est, dans la partie orientale.

Les résultats des analyses physico-chimiques des deux campagnes 2010 et 2012, montrent des concentrations dépassant largement les normes algériennes pour la majorité des éléments chimiques, ce qui explique la forte minéralisation rencontrée, ainsi que la dureté élevée. Il a été constaté que ces eaux sont classées parmi les eaux géothermales à basse énergie, vu leurs températures élevées, qui dépassent parfois les 60°C, elles y sont caractérisées par un pH neutre et une conductivité relativement élevée. En outre, il en découle de l'analyse graphique des diagrammes de Piper et ceux de Schöeller – Berkaloff, plusieurs types de faciès chimiques distincts ainsi que des anomalies de changements des faciès chimiques de certains forages qui pourraient être expliquées par la contamination des eaux de la CI par celles du CT et probablement même de la nappe phréatique en faveur des tubages des forages affectés par le dépérissement.

La répartition spatiale des éléments chimiques de la nappe du Continental Intercalaire affirme d'une part l'hypothèse avancée d'une éventuelle drainante ascendante favorisant le contact franc entre les eaux de la CI et celles des nappes sus-jacentes, d'autres part que l'origine de ses faciès est fortement liée à la nature lithologique des formations, au sein de laquelle les eaux séjournent. Dans l'ensemble, ces eaux sont médiocres à admissibles pour des fins d'irrigation, leur utilisation pour la consommation humaine, avant traitement demeure déconseillée. Cela a permis d'en tirer des recommandations que nous avons finalement proposées et qui visent à atténuer le phénomène de la remontée des eaux, d'autant plus qu'à la préservation de la qualité des eaux de la nappe du continental intercalaire pour toute contamination éventuelle.

Mots clés : Oued Righ, Continental Intercalaire, potabilité, irrigation, faciès chimique, remontée des eaux.

HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERIZATION OF THE GROUNDWATER OF CONTINENTAL INTERCALARY OF THE GUTTER OF THE OUED RIGH, NORTEHEN SAHARA ALGERIAN.

Abstract :

The region of Oued Righ, is part of the Northern Sahara, more precisely of the Low Sahara, known for its very-arid climate. Groundwater resources are predominantly fossil, somewhat, or relatively renewable; namely the Terminal Complex and the Continental Intercalary. However, the overexploitation of the aquifer of the Terminal Complex, and the unconfined aquifer, results in a decrease in piezometric levels, qualitative degradation of the resource and in the absence of an outlet, and the constant growth of the phenomenon of upwelling.

This work aims to give a qualitative diagnosis of the deep aquifer of the Continental Intercalary, of the central part. This aquifer is contained in the lower Cretaceous formations. The flow is generally in two directions: one from the North to the South, in the western part and the other from the West to the East, in the eastern part.

The results of the physicochemical analyses show concentrations far exceeding algerian standards for most of the chemical elements, which explains the high mineralization encountered, as well as their high hardness. It has been found that these waters are classified as geothermal waters, because of their high temperatures, sometimes exceeding 60 ° C, characterized by a neutral pH and relatively high conductivity. Moreover, from the graphical analysis of the Piper diagrams and those of Schöeller - Berkaloff, several types of distinct chemical facies have been found out. As well as anomalies of the chemical facies of certain drillings which could be explained by the contamination of waters of CI by those of the CT and potability even the groundwater in favor of the intubations of the drillings affected by the decay.

The spatial distribution of the chemical elements of the Continental Intercalary aquifer confirmed that the origin of its facies is strongly connected to the lithological nature of the formations, within which the waters stay. By and large, these waters are mediocre to be eligible for irrigation purposes, their use for human consumption before treatment is unadvisable. This made it possible to draw recommendations that we finally proposed and which aim to mitigate the phenomenon of upwelling, and especially to preserve water quality.

Keywords: Oued Righ, Continental Intercalary, potability, irrigation, chemical facies, upwelling.