

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

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

جامعة محمد الصديق بن يحيى جيجل

Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département : Sciences de la Terre et de l'Univers



كلية علوم الطبيعة و الحياة
قسم: علوم الأرض و الكون

Mémoire de Master

Filière : Géologie

Option : Hydrogéologie

Thème

**Les eaux géothermales de la nappe du Continental Intercalaire
de la région d'Oued Righ (SE Algérien) : problèmes et intérêt.**

Membres de Jury

Président : Debieche Taha-Hocine

Examineur: Djorfi Samir

Encadreur: Zahi Faouzi

Co-Encadreur: Drouiche Abdelmalek

Présenté par:

Rezaiki Abdelhafid

Zagad leila Nor el houda

Année Universitaire 2018-2019

Numéro d'ordre (bibliothèque) :

Remerciements

*Nous remercions d'abord Allah qui nous garde
et nous donne la force et la volonté pour réaliser et achever ce modeste
travail.*

*Nous exprimons notre profonde reconnaissance à notre encadreur Zahi
Faouzi et Co-encadreur monsieur Drouiche Abdelmalek d'avoir accepté de
diriger ce travail et pour leurs précieux conseils et leurs encouragements
durant le déroulement de ce travail.*

*Nous vifs remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger et
évaluer ce travail.*

*Nous remercions également tous le corps enseignant du département de la
géologie qui nous nous ont encadrés durant toutes nos années d'études.*

*Enfin, nous remercions toutes les personnes qui de près ou de loin ont
contribué à la réalisation de cette modeste étude*

Merci



Dédicace

« ...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 mes très chers parents : zagad Farid et salem razika 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 grandes parents : Ibrahim zagad et remdane salem ;

A mes chers oncles : Samir et noureldinne zagad ;

A toute ma famille ;

A mes formateurs depuis l'école élémentaire à ce jour ;

A mon binôme abdelhafid et toute sa famille

A mes collègues de travail ;

A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.

Leila Nor el Houda



Dédicace

Au cœur vaillant rien d'impossible

A conscience tranquille tout est accessible

Quand il y a la soif d'apprendre

Tout vient à point à qui sait attendre

Quand il y a le souci de réaliser un dessein

Tout devient facile pour arriver à nos fins.

Je dédie ce travail :

A ma chère mère A mon cher père

A mes frères A mes sœurs

A ma binôme : Leila Nor el houda et toute sa famille

A mes amies

A tous qui m'aime.

Abd elhafid

Résumé

Dans la vallée d'Oued Righ (SE Algérien), les besoins en eau sont assurés à partir des nappes d'eaux souterraines à savoir les nappes du Complexe Terminal et de Continental Intercalaire. Cette dernière représente un énorme réservoir d'eaux souterraines avec une superficie de l'ordre de 600000 km², ses eaux sont caractérisées par une température élevée (> 60°C), et une dureté excessive (76 à 102°F) avec une forte minéralisation atteignant 1,8 g/l. L'utilisation de ces eaux chaudes nécessite leur refroidissement, ce qui engendre des dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

L'objectif de ce travail est de décrire les paramètres physico-chimiques de l'eau du Continental Intercalaire avant et après le refroidissement afin de déterminer son comportement chimique. Les résultats obtenus, en particulier après le refroidissement montre qu'il y a une diminution de température et une augmentation du pH, ainsi que l'apparition de concentrations importantes en ions carbonatés (CO₃⁻²), ce qui donne un comportement entartrant de l'eau, ce qui peut avoir des conséquences graves en réduisant le diamètre des canaux qui génère des frais supplémentaires pour la réhabilitation de ces canalisations.

Mots-clés : Eaux géothermales, Continental Intercalaire, Entartrage et Oued Righ.

Abstract

In Oued Righ valley (SE Algerian), water requirements are ensured from the groundwater aquifers, namely the aquifers of the Terminal Complex and Continental Intercalary. The latter represents a huge reservoir of groundwater with an area of about 600000 km²; its waters are characterized by a high temperature (> 60 °C), and an excessive hardness (76 to 10 °F) with a strong mineralization up to 1.8 g/l. The use of these hot waters requires their cooling which generates deposits of encrustations and obstructions, scaling, canals, structures and hydraulic equipment.

The objective of this work is to describe the physicochemical parameters of Continental Intercalary waters before and after cooling to determine its chemical behavior. The results obtained, especially after cooling; show that there is a decrease in temperature and an increase in pH, as well as the appearance of large concentrations of carbonate ions (CO₃⁻²), which gives a scaling behavior to the water. , which can have serious consequences in reducing the diameter of the canals that generates additional costs for the rehabilitation of these pipes

Key words: geothermal waters, Oued Righ, continental intercalary, scaling.

ملخص

في سهل واد ريغ (جنوب شرق الجزائر) يتم ضمان متطلبات المياه من طبقات المياه الجوفية و المتمثلة في المركب النهائي و المتداخل القاري. يمثل هذا الأخير خزناً ضخماً للمياه الجوفية تبلغ مساحته حوالي 600000 كم²، وتتميز مياهه بدرجة حرارة عالية (> 60 درجة مئوية) وعسرة مفرطة (76 إلى 102 درجة فرنسية) مع قوة تمعدن تصل إلى 1.8 مغ / ل . يتطلب استخدام هذه المياه الساخنة تبريدها مما يولد رواسب في القنوات والهياكل والمعدات الهيدروليكية.

يهدف هذا العمل إلى الوصف الفيزيوكيميائي لمياه المتداخل القاري قبل وبعد عملية التبريد لمعرفة سلوكها الكيميائي. أظهرت النتائج المتحصل عليها خاصة بعد عملية التبريد و المتمثلة في انخفاض درجة الحرارة و ارتفاع قيمة pH وكذلك ظهور تراكيز معتبرة لأيونات الكربونات (CO_3^{2-}) كل هذه العوامل أعطت طابع ترسبي للمياه، هذه الأخيرة قد تؤدي إلى عواقب وخيمة من خلال إنقاص أقطار الأنابيب عن طريق التحجيم ، مما يولد نفقات زائدة لإعادة تأهيل هذه الأنابيب.

الكلمات المفتاحية: المياه الساخنة ، وادي ريغ ، المتداخل القاري ، التحجيم.

Table des Matières

Remerciement

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale	01
<i>Chapitre I : Présentation de la région d'étude</i>	
1. Introduction	03
2. Situation géographique de la région d'étude	03
3. Occupation des Sols	03
3.1 Population	03
3.2 Les sols de la vallée	05
3.3 Activités Agricoles	05
4. Aperçu socio-économique	06
5. Conclusion	07
<i>Chapitre II : Caractéristiques Hydroclimatiques</i>	
1. Introduction	08
2. Paramètres climatiques	08
2.1. Les précipitations	08
2.1.1. Précipitations moyennes mensuelles	08
2.1.2. Précipitations moyennes saisonnières	09
2.2. Température	10
3. Type de climat	11
4. Le bilan hydrique	12
4.1. Evapotranspiration	12
4.2. Evapotranspiration potentielle (ETP)	13
5. Bilan hydrologique de Thornthwaite	13
5.1. Evapotranspiration réelle (ETR)	14
6. Irrigation et drainage	15
7. Conclusion	16
<i>Chapitre III : Géologie et Hydrogéologie</i>	
1. Introduction	17
2. Géologie régionale	17
2.1. La structure synclinale du Bas Sahara	17
2.2. La sédimentation continentale	17
2.3. La sédimentation laguno-marine	19
3. Géologie locale	21
3.1. Description stratigraphique	21
3.1.1. Secondaire	21
3.1.2. Tertiaire	22
3.1.3. Quaternaire	23
4. Evolution tectonique	23
5. Hydrogéologie	24
5.1. La nappe du quaternaire (nappe phréatique)	25
5.2. La nappe du Complexe Terminal	26
5.3. La nappe du Continental Intercalaire	28

5.4.	Exploitation des nappes souterraines dans la vallée d'oued Righ	30
6.	Conclusion	32
Chapitre IV : Hydrochimie		
1.	Introduction	34
2.	Faciès hydrochimique	36
3.	Etude des paramètres physico-chimique.....	39
3.1	Température	39
3.2	Le potentiel hydrogène (pH)	40
3.3	La minéralisation	40
4.	Les cations	41
4.1	Calcium (Ca^{2+})	41
4.2	Magnésium(Mg^{2+})	42
4.3	Sodium (Na^{+})	43
4.4	Potassium (K^{+})	44
5.	Les anions	45
5.1	Chlorurs (Cl^{-})	45
5.2	Sulfates (SO_4^{2-})	45
5.3	Bicarbonates (HCO_3^{-}) :.....	46
5.4	Les carbonates (CO_3^{-2}).....	47
6.	Dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)	48
7.	Entartrage	49
7.1	Les indices d'entartrage	49
7.1.1	L'indice de Langelier	49
7.1.2	Indice de Ryznar ou indice de stabilité.....	50
8.	Aptitude des eaux à l'irrigation.....	52
9.	Conclusion.....	54
Chapitre V : Avantages et inconvénients des eaux thermales		
1.	Introduction	55
2.	Les eaux géothermales	55
2.1.	La géothermie haute énergie.....	55
2.2.	La géothermie basse énergie.....	55
2.3.	La géothermie très basse énergie	56
3.	Domaines d'application des eaux géothermales de la nappe Albienne.....	56
3.1.	Chauffage des serres	56
3.1.1	Chauffage des serres en Algérie.....	57
3.1.2	Chauffage des serres en Tunisie.....	58
3.2.	Utilisation des eaux du Continental Intercalaire dans l'alimentation en eau potable et l'irrigation	59
4.	Le refroidissement des eaux du Continental Intercalaire.....	59
5.	Adoucissement de l'eau.....	60
6.	Entartrage.....	61
7.	Les procédés de lutte contre l'entartrage.....	63
7.1.	Diminution de la concentration en calcium.....	63
7.2.	Complexion du calcium	63
7.3.	Diminution ou maintien de la teneur en carbonates	63
7.4.	Inhibiteurs d'entartrage	64
8.	Les avantages et les inconvénients des eaux géothermales.....	64
9.	Conclusion	65
	Conclusion Générale & Recommandations.....	66

Liste des abréviations

Liste des figures

Fig. 1	Localisation de la vallée d'Oued Righ (Ballais, 2010).....	04
Fig. 2	Occupation de sol de la vallée d'Oued Righ (Marc Côte, 1991).....	07
Fig. 3	Précipitations moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).....	09
Fig. 4	Précipitations moyennes saisonnières en % de la station de Touggourt	10
Fig. 5	Températures moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).....	11
Fig. 6	Diagramme Ombrothermique de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).....	12
Fig. 7	Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1975).....	18
Fig. 8	Coupe schématique Nord-Sud partielle du Bas Sahara (Cornet, 1964).....	19
Fig. 9	Carte géologique du Sahara d'après G. Busson (1967)	24
Fig. 10	Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO 1972).....	25
Fig. 11	Coupe hydrogéologique Nord- Sud du Complexe Terminal du Bas Sahara(Unesco, 1972).....	27
Fig. 12	carte hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes (Etude ERESS modifiée par Guendouz et Al, 2003).....	27
Fig. 13	Carte des nappes aquifères du Sahara Algérien (Kouzmine 2009 in Boussaada, 2017)	28
Fig. 14	Carte piézométrique du Continental Intercalaire (OSS, 2003 in Bettahar, 2013).....	29
Fig. 15	Evolution du comportement de la nappe phréatique (Marc Côte,1991).....	30
Fig. 16	Remontée des eaux de la nappe phréatique.....	31
Fig. 17	Canal de drainage d'oued Righ.....	32
Fig.18	inventaire des points de prélèvement dans la vallée d'Oued Righ.....	35
Fig.19	faciès chimique des eaux du Continntal Intercalaire avant et après le refroidissement.....	38
Fig.20	la température des eaux du Continental Intercalaire(vallée d'oued Righ).....	39
Fig.21	le potentiel hydrogène des eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ).....	40
Fig.22	Salinité des eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ).....	41
Fig.23	Conductivité électrique des eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ).....	41
Fig.24	Concentrations de calcium dans les eaux du continental Intercalaire (vallée d'oued Righ)	42
Fig.25	Concentrations de magnésium dans les eaux du Continental Intercalaire	43
Fig.26	Concentrations de sodium dans les eaux du Continental Intercalaire	43
Fig.27	Concentrations de potassium dans les eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ)	44
Fig.28	Concentrations des Chlorures dans les eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ)	45
Fig.29	Concentrations des sulfates dans les eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ)...	46
Fig.30	Concentrations de Bicarbonates dans les eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ).....	47
Fig.31	Concentrations des carbonates dans les eaux du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ)	47
Fig.32	Dureté des eaux du Continental Intercalaire (vallée d'Oued Righ).....	48
Fig.33	Diagramme de Richards des eaux de la nappe du Continental Intercalaire (vallée d'oued Righ).....	53
Fig.34	Tours de refroidissement.....	60
Fig.35	Conséquences de l'entartrage sur les installations à Touggourt.....	62

Liste des tableaux

Tab. 1	Population et surface de chaque commune de la région de Touggourt.....	05
Tab.2	Les cultures pratiquées dans la vallée de l'Oued Righ.....	06
Tab. 3	Coordonnées de la station météorologique de Touggourt	08
Tab. 4	Précipitations moyennes saisonnières de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).....	09
Tab. 5	Bilan hydrique selon Thornthwaite de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).....	14
Tab.6	ETR selon Turc à la station de Touggourt (1975/76-2015/16).....	15
Tab.7	Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952, in Medjani, 2016).....	23
Tab.8	Classification hydrochimique des eaux du CI selon la formule ionique.....	37
Tab.9	Classification des eaux de la nappe Albienne selon l'indice Langelier.....	50
Tab.10	La tendance entartrante ou corrosive de l'eau selon l'indice de Ryznar (zahi et al, 2011).....	50
Tab.11	Classification des eaux du Continental Intercalaire selon l'Indice de Ryznar.....	51
Tab.12	Les possibilités d'utilisation des eaux chaudes de l'aquifère Albien (Kedaid, 2004).....	57
Tab.13	Les phases du projet d'utilisation de la géothermie dans la production agricole.....	58

Liste des abréviations.

AEP : Alimentation en eaux potable

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydraulique

CI : Continental Intercalaire

CT : Complexe Terminal

DSA : Direction de services Agricoles

ERESS : Etude Des Ressources en Eau du Sahara Septentrional

ONID : Office National d'irrigation et de Drainage

ONS : Office National de Statistique

OSS : Organisation du Sahara Septentrional

SASS : Système aquifère du Sahara Septentrional

m : mètre

Km : kilomètre

méq/l : milliéquivalent par litre

mg/l : milligramme par Litre

°C : Degré Celsius

°F : Degré Français

Introduction générale

Introduction Générale

L'énergie géothermique est l'une des plus importantes sources d'énergies renouvelables dans le monde, ses utilisations sont multiples. Elles varient entre utilisations directes telles que la pisciculture, le chauffage des serres et la balnéothérapie, comme elles peuvent être utilisées dans l'industrie telle que la production d'électricité (*Ouali, 2006*).

L'Algérie, de part sa situation géographique (zone à forte activité tectonique) est considérée parmi les pays riches en eaux thermo-minérales. La région d'Oued Righ, qui fait partie du Sahara Septentrional, connu par son climat hyper-aride et des ressources en eaux souterraines qui sont essentiellement fossiles, peu ou relativement renouvelables ; à savoir le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire (*Zerrouki, 2017*). Vu la température élevée des eaux de la nappe du Continental Intercalaire ($>60^{\circ}\text{C}$), qui sont classées dans la catégorie des eaux géothermales à basse énergie. Leur utilisation nécessite un refroidissement avant toutes utilisations. L'exploitation de ces eaux géothermales tant pour l'irrigation que pour les besoins domestiques, a générée d'énormes problèmes par suite de dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

L'objectif de ce mémoire est de faire une caractérisation géochimique des eaux de la nappe du Continental Intercalaire en faisant sortir les avantages et les inconvénients de l'utilisation des eaux géothermales de la région d'Oued Righ dans les différents domaines. Pour mener bien ce travail nous avons adopté le plan de travail suivant :

- ❖ Un premier chapitre pour présenter le cadre physique et naturel de la zone d'étude.
- ❖ Un deuxième chapitre pour discuter les caractéristiques hydro-climatiques et calculer les paramètres du bilan hydrique.
- ❖ Un troisième chapitre dans le quel nous avons essayé de synthétiser les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de la région de Oued Righ en se basant beaucoup plus sur les caractéristiques hydrogéologiques du Continental Intercalaire.
- ❖ Un quatrième chapitre pour l'objectif de faire une étude hydro-chimique des eaux de la nappe albienne en déterminant leurs faciès chimiques, la variation des concentrations des

différents éléments physico-chimique ainsi que leur comportement vis-à-vis de phénomène d'entartrage et enfin leur aptitude à l'irrigation.

- ❖ Un cinquième chapitre consacré à la détermination de la géothermie avec son utilisation dans les différents domaines (AEP, irrigation et industrie) et les différentes procédés de traitement tel que l'adoucissement après l'étape de refroidissement de l'eau qui engendre le problème d'entartrage, en exposant à la fin les avantages et inconvénient de l'utilisation de ces eaux.
- ❖ En fin, notre humble travail se termine par une conclusion générale avec quelques recommandations.

Chapitre I

Présentation de la

région d'étude

1. Introduction

La région de l'Oued Righ est située à une distance de 600 km au sud-est de la capitale, elle fait partie de l'une des zones sahariennes du pays et se présente comme l'une des plus importantes régions phoenicicoles en Algérie (*Ben Ziouch et al, 2006*). Dans ce chapitre nous allons essayer de décrire le contexte général de la région et de présenter les principaux aspects décrivant l'écosystème naturel. En commençant par le cadre général de la région d'étude, caractérisation du milieu naturel (Occupation-utilisation du sol et activités agricoles) et en fin un aperçu socio-économique.

2. Situation géographique de la région d'étude

La vallée Righ est une entité géographique située dans le Sud-est Algérien entre la latitude 32°54' et 34°09' nord et la longitude de 05°50' et 05°75' Est .Elle commence au Sud par le village d'El Goug (Touggourt, Ouargla) et se termine au Nord par le village d'Oum-Thiours (Oued Souf). Elle est limitée au Nord par le plateau de Still, à l'Est par l'Erg Oriental, au Sud par l'extension de l'Erg oriental et à l'Ouest par le plateau gréseux (*fig.1*).

Cette vallée est caractérisée par une dépression large de 20 km, allongée du sud au nord sur 150 km, vers Chott Marouane, l'altitude passe progressivement de +100 m dans El-Goug en Amont (la côte la plus haute) à – 30 m à Chott Marouane en aval avec une pente générale de l'ordre de 1‰ à Djamaa (*Dubost, 1992*). La vallée est traversée par un canal principal (canal d'oued Righ), qui joue un rôle très important dans la vallée car, il assure l'évacuation des eaux d'irrigation excédentaires (drainage) ; et celles d'assainissement des zones urbaines.

3. Occupation des Sols

3.1 Population : La population de l'Oued-Righ représente en 2008 environ 11% de la population du Sahara Algérien. Elle se répartie sur vingt-huit agglomérations dont cinq occupent 76 % de la population totale (Touggourt, Témacine, Méggarine, Djamâa et Meghaier). La ville de Touggourt abrite à elle seule 40 % de la population de la région (*tab.1*).

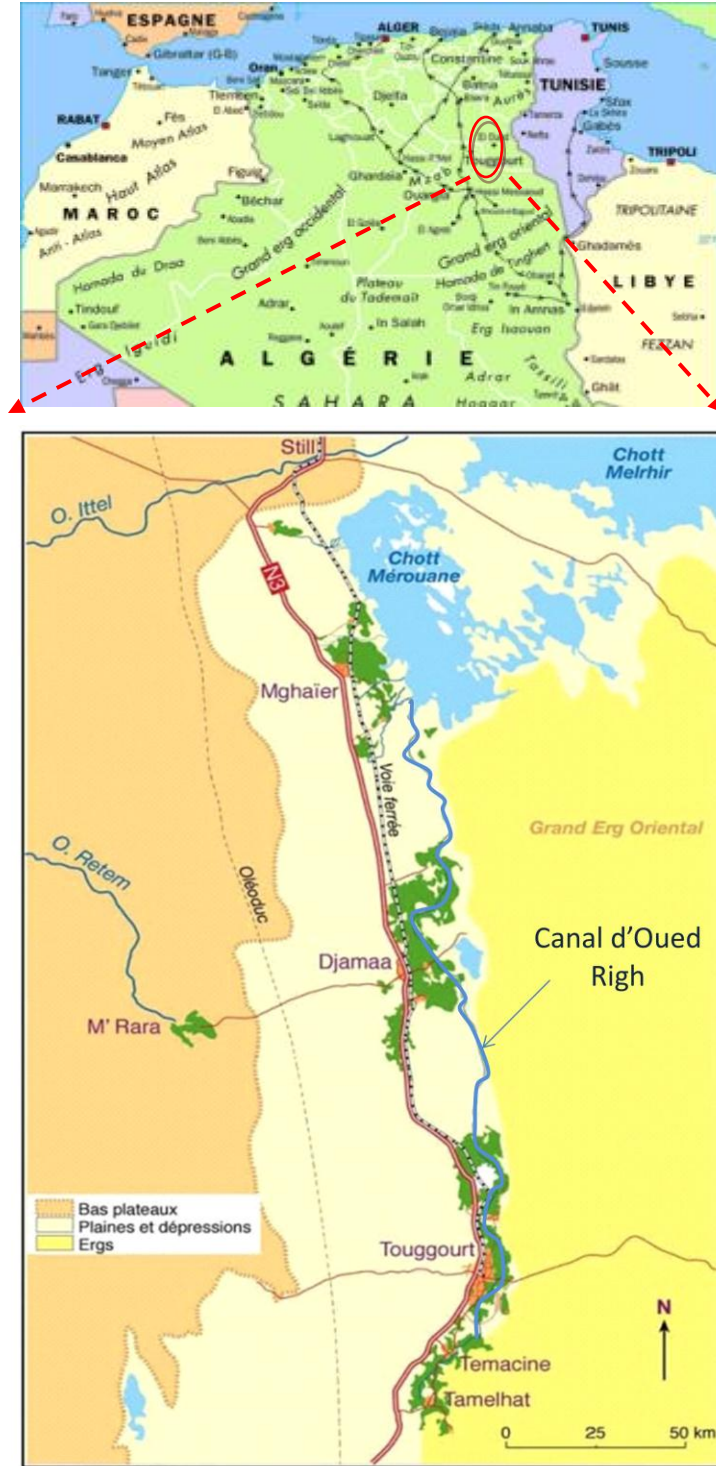


Figure1: Localisation de la vallée d'Oued Righ (Ballais, 2010).

Tableau 1 : Population et surface de chaque commune de la région de Touggourt.

Commune	Surface en Km²	Population 2008
Touggourt	216	41699
Z. Sidi El Abed	30	21087
Tebesbest	26	41294
Nezla	132	53467
Temacine	300	19994
Belidatamar	250	15414
Megarine	285	13965
Sidi Sliman	635	8392
Total	1874	215312

Source: ONS (office national de statistique), 2008

3.2 Les sols de la vallée : Les sols de la région sont caractérisés essentiellement à la surface par des apports éoliens sableux. Ce sont des sols généralement meubles et bien aérés en surface, en majorités salés ou très salés. La couverture pédologique au Sahara présente une grande hétérogénéité et elle se compose de sols minéraux, sols peu évolués, sols halomorphes et sols hydro morphes (*Dubost, 1991*). Généralement le sol de la région présente une texture sableuse à sablo-limoneuse avec une forte perméabilité, structure particulière, un fort degré de salinité et un taux faible de matière organique. Il est caractérisé également par la présence de nappe phréatique proche de la surface (*Khadraoui, 2007*).

La texture des sols est très grossière par endroits et la teneur en sable fin et grossier peut dépasser les 90%. La détermination de la composition granulométrique des agrégats de certains profils a été perturbée par la présence importante de gypse.

3.3 Activités Agricoles : La principale culture pratiquée dans la vallée de l'Oued Righ, est le palmier dattier, occupe entre 10 % à 15 % de la superficie de la région. Souvent, on lui associe des cultures sous-jacentes : maraîchères (Tomate, Piment, Ail, Oignon), fourragères (Luzerne, Orge, Chou Fourrager), Condimentaires (Menthe, Coriandre, Anis -Vert) et quelques arbres fruitiers disséminés dans les palmeraies (Grenadier, Abricotier, Figuier...). A l'exception des fourrages, les autres cultures sous-jacentes sont destinées dans une large proportion à

l'autoconsommation. Le tableau ci-dessous résume les différentes cultures pratiquées dans la région de l'Oued Righ ;

Tableau2 : Les cultures pratiquées dans la vallée de l'Oued Righ (DSA ; El Oued et Ouargla).

Cultures pratiquées		Nombres ou Quantité	Superficie	Année
Palmier dattier		2.484.515 pieds	20.000 ha	1998
Cultures maraichères		235.167 qx	/	1994/1995
		42.400 qx	/	1996
Cultures sous serres		/	1 et 3 ha	1982/1983
		/	0.28 ha	1996
Cultures fourragères	Luzerne	58000 qx	/	1996
	Chou fourrager	1300 qx		
	L'orge en vert	20800 qx		

4. Aperçu socio-économique

Le domaine agricole qui était jadis la principale activité est un peu délaissé actuellement à cause du faible rendement des palmiers dû aux effets néfastes de la salinisation des eaux et des sols, de la remontée de la nappe phréatique, du vieillissement des palmiers »...etc.

Le palmier dattier est la principale culture dans la région, la variété "Déglet Noir" domine suivie par le "Ghars" et "Dégla Beidha". Les cultures hors palmiers sont peu développées et occupent 10 à 15 % de la superficie dont l'Orge et la luzerne sont les cultures fourragères les plus importantes. Les cultures maraichères, surtout l'Ail, l'Oignon, Carottes et Navets sont également produites pour une consommation locale. Les variétés des cultures maraichères en Eté sont (Piment et Pastèque) dont la superficie est limitée.

Dans le domaine de l'industrie, il existe plusieurs petites usines, principalement des briqueteries implantées à proximité de la source de matière primaire, ainsi que des complexes de transformations hydrocarbures (DTP), transformation des plastiques ; fabriques d'aluminium ainsi que des entreprises de conditionnement de dattes. Le tourisme existe aussi, d'abord, l'existence de quelques niches touristiques comme les oasis, le lac de Temacine, les anciennes

Medinas, les tombeaux des rois, etc. Et surtout la Zaouïa Tidjania qui accueille de nombreux visiteurs chaque année.

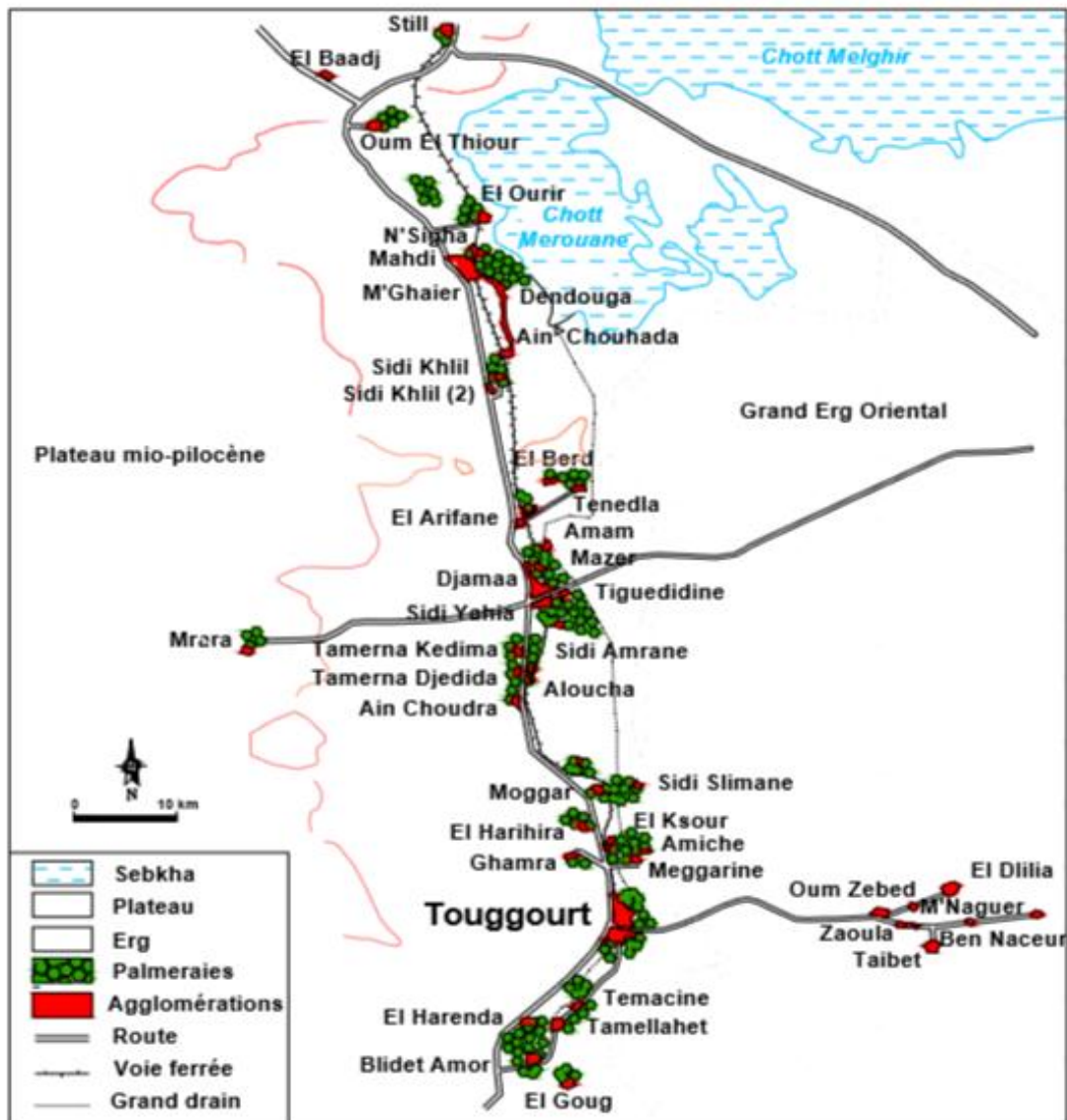


Figure2 : Occupation de sol de la vallée d'Oued Righ (Marc Côte, 1991, in Chaouche, 2008)

5. Conclusion

La zone d'étude, nommé par rapport au nom du son canal principal « la vallée d'oued Righ » appartenant du bas Sahara couvre une superficie de 3750 ha. Allongé sur environ 150km sur un axe Nord-Sud. Sa topographie est très plane, s'approchant de 1 ‰. Son étendue couvre plus d'une cinquantaine d'oasis ou la culture des dattiers reste la seule et unique ressource socio-économique pour la satisfaction des besoins de la population qui occupe la région ce qui équivaut

à environ 11% de la population du Sahara Algérienne. Les sols de la région ont une texture fine sableuse à sablo-limoneuse avec des teneurs élevées en sels au Nord et grossière à dominance sableuse au Sud.

Chapitre II
Caractéristiques
Hydroclimatiques

1. Introduction

L'étude du climat est importante, elle repose sur l'interprétation des données des paramètres climatiques mesurés durant une période bien définie, permettant ainsi d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique qui influent d'une façon directe et à long terme sur le comportement des nappes aquifères (Drouiche, 2014).

Ce chapitre sera consacré à l'étude des paramètres climatiques pour ressortir les caractéristiques climatiques de la région d'Oued Righ, et à l'estimation des différentes composantes du bilan hydrique afin de comprendre le fonctionnement du système hydrologique de la région. Les données climatiques (Précipitations et Température) sont fournies par la station météorologique de Touggourt sur une période d'observation de 41 ans (1975/1976 – 2015/2016) (tab. 3).

Tableau 3 : Coordonnées de la station météorologique de Touggourt.

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

ANRH ; Ouargla (in Zerrouki, 2017).

2. Paramètres climatiques

2.1. Les précipitations : Les précipitations jouent un rôle primordial dans l'alimentation des réseaux hydrographiques d'une région ainsi que son système aquifère en plus, elles forment un paramètre indispensable dans la réalisation d'un bilan hydrique (Rechadi, 2017), le régime d'écoulement est conditionné par la répartition mensuelle des précipitations dans l'année et ses variations, ainsi que celui des nappes aquifères. La connaissance des précipitations saisonnières fait ressortir la répartition de la pluie sur les saisons.

2.1.1. Précipitations moyennes mensuelles : Le régime de pluie du Sahara Septentrional se caractérise par des pluies apparaissant pendant la saison froide d'octobre à mars. Dans la région d'Oued Righ, les précipitations sont rares et irrégulières (fig. 3). La moyenne annuelle est de 61,54mm. Les pluies se produisent essentiellement en hiver avec un maximum de l'ordre de 11,82mm enregistré au mois de janvier.

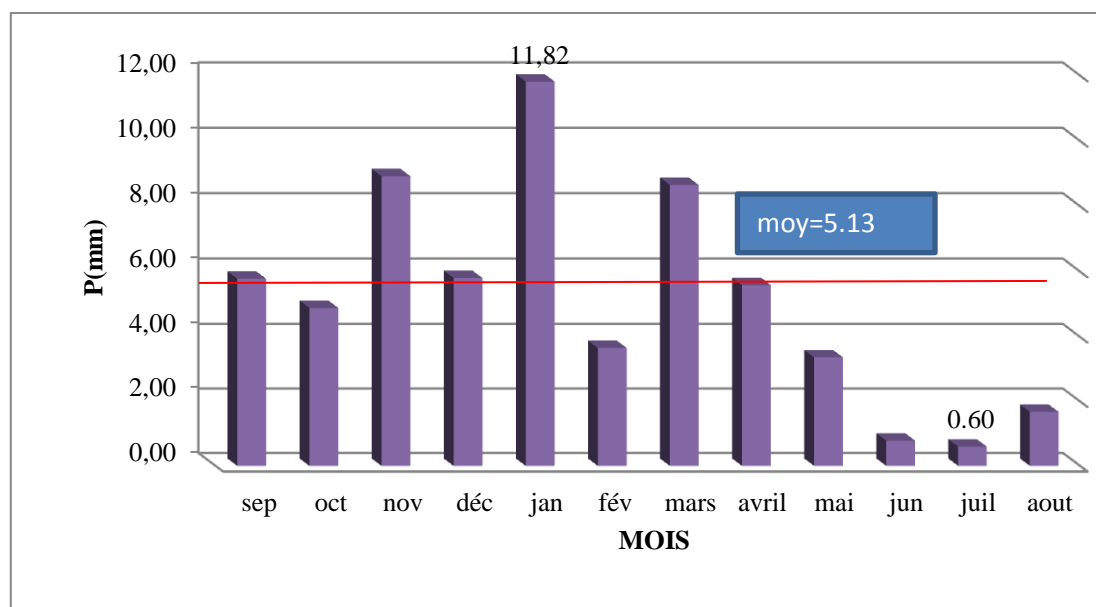


Figure 3 : Précipitations moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

2.1.2. Précipitations moyennes saisonnières : Pour distinguer les pluies saisonnières survenant dans des conditions de températures différentes (Bouzned, 2009), nous avons calculé le pourcentage des précipitations de chaque saison par rapport au total annuel. La subdivision des pluies de l'année pour chaque saison est faite suivant les quatre saisons agricoles :

- L'automne : Septembre, Octobre, Novembre.
- L'hiver : Décembre, Janvier, Février.
- Le printemps : Mars, Avril, Mai.
- L'été : Juin, Juillet, Aout.

Tableau 4: précipitations moyennes saisonnières de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

Saison	Automne			Hiver			Printemps			Eté		
Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A
P (mm)	19,59			21,28			17,61			3,06		
P (%)	31,83			34,58			28,62			4,97		

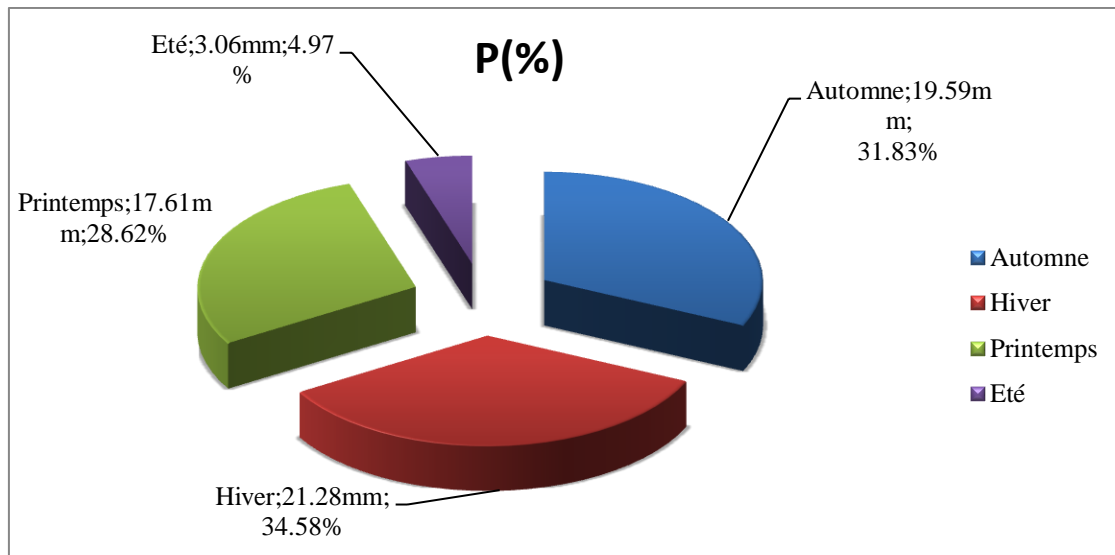


Figure 4 : Précipitations moyennes saisonnières en % la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

L'examen des résultats du *tableau 4* et la *figure 4* montre que la pluie se produit essentiellement en hiver et en automne, avec une quantité de 40,87 mm soit 66,41 des précipitations totales annuelles.

2.2. Température : La température est le second facteur après les précipitations qui conditionne le climat d'une région (*Boussaada, 2017*). Son influence sur les autres paramètres météorologiques est primordiale, ses effets directs sur l'évaporation, l'évapotranspiration et le déficit d'écoulement, d'une manière générale, lui donne une grande importance pour le calcul du bilan hydrique.

Le Sahara présente une température maximale de l'ordre de 40°C pendant la période critique (juillet et août), parfois peut aller au-delà de 50°C par contre en hiver on peut observer - 10°C (*Toutain, 1979 in Koul, 2014*). La température moyenne annuelle est de 22,25°C avec un maximum en juillet (34,27 °C), et un minimum en janvier avec 10,24 °C (*fig.5*).

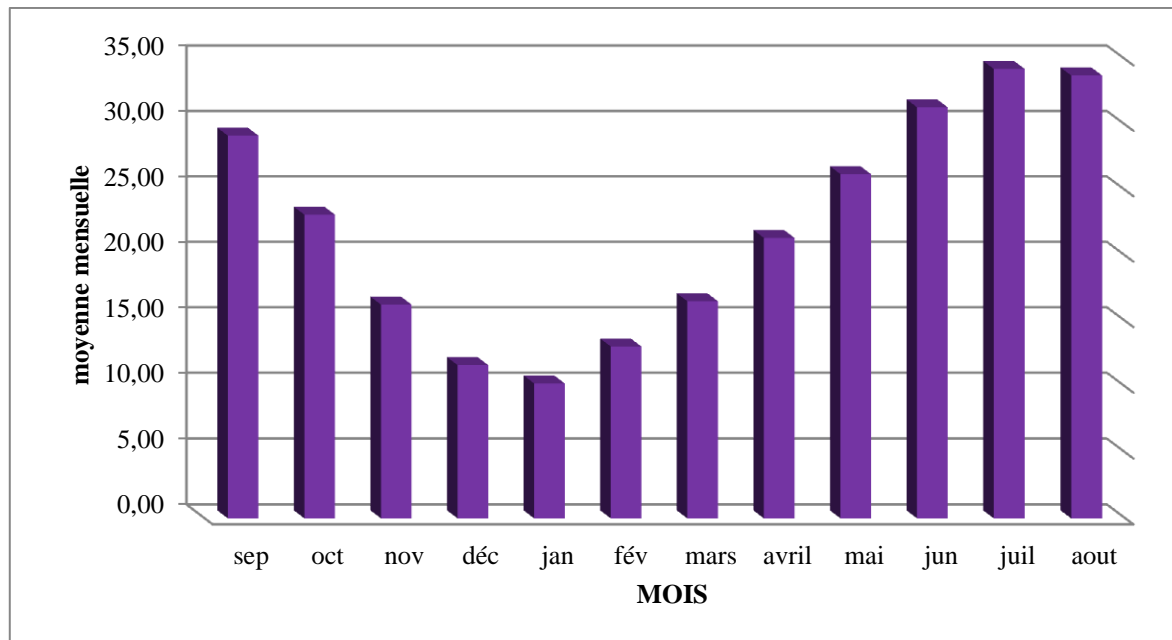


Figure 5 : Températures moyennes mensuelles de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

3. Type de climat

Le diagramme Pluviothermique (combinaison de deux paramètres climatiques ; la température et les précipitations), permet la détermination du type du climat régnant dans la région. Un mois sec se définit, selon (*Bagnouls et Gaussen, 1953*) comme celui ayant un total pluviométrique (moyenne en millimètres), égal ou inférieur au double de la température ($P \leq 2T$). Cette formule ($P \leq 2T$) permet de construire le diagramme Ombro-thermique traduisant la durée de la saison sèche d'après les intersections des deux courbes. L'aire comprise entre les deux courbes représente la période sèche dans la région d'Oued Righ ; cette période s'étale sur toute l'année.

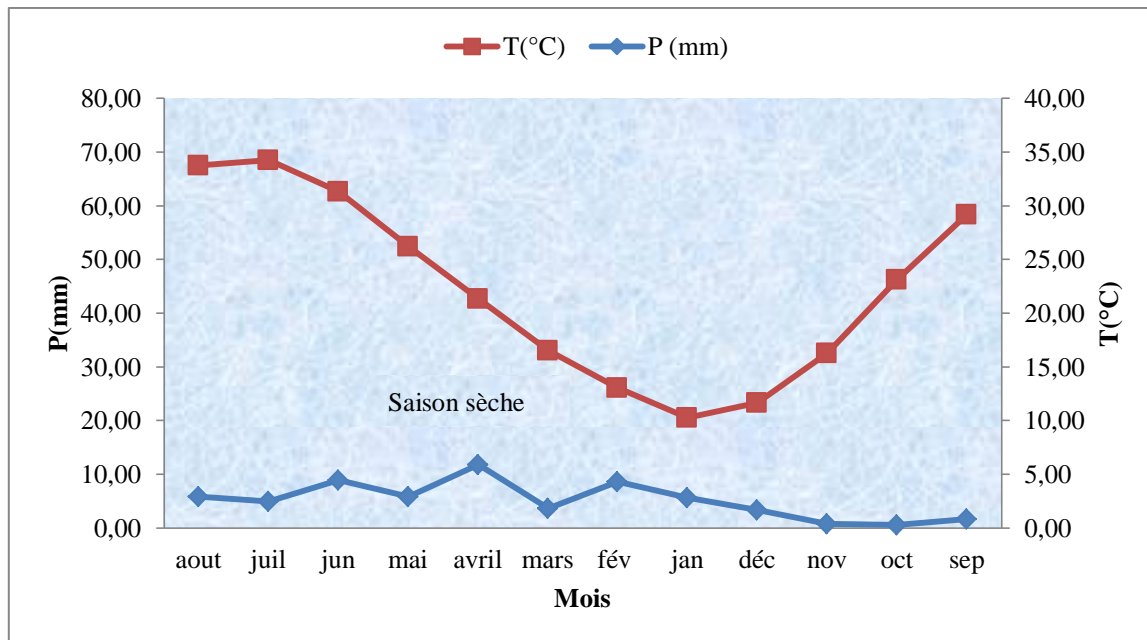


Figure 6 : Diagramme Ombrothermique de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

4. Le bilan hydrique

Dans cette étude nous allons évaluer la répartition des précipitations entre les différentes composantes du bilan hydrique, à savoir l'écoulement, l'infiltration et l'évapotranspiration pour un but d'établir une équation d'équilibre entre les apports et les pertes qui influent directement sur la variation des réserves, il est indispensable d'évaluer ses composantes (infiltration, écoulement et évapotranspiration). Le bilan hydrique est calculé par la formule suivante :

$$P = ETR + R + I$$

Avec ;

P : Précipitations moyennes annuelles (mm).

ETR : Evapotranspiration réelle moyenne annuelle (mm).

R : Ruissellement moyen annuel (mm).

I : Infiltration moyenne annuelle (mm).

4.1. Evapotranspiration

Ce paramètre englobe l'ensemble des phénomènes d'évaporation physique et biologique, il est considéré comme le plus important car il conditionne l'abondance ou le déficit de l'eau pour la végétation. Il est utile de distinguer entre la notion d'évapotranspiration potentielle (ETP) qui est employée lorsque la surface évaporant est convenablement alimentée en eau et la notion d'évapotranspiration réelle (ETR) qui distingue la quantité en eau perdue réellement par l'évapotranspiration.

4.2. Evapotranspiration potentielle (ETP) : L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité maximale d'eau pouvant s'évaporer par les sols, surfaces d'eaux libres et transpirer par les êtres vivants sur une surface limitée et pendant une période bien définie. Pour l'estimation de l'Evapotranspiration on a utilisé la formule proposée par C.W .Thornthwaite en 1948, elle est basée essentiellement sur la température de l'air :

$$ETP = 16[10T/I]^a k$$

Avec : $i = (T/5)^{1.514}$

$$I = \sum_{i=1}^{12} I = 121.37$$

$$a = 1.6 (I/100) + 0.5 = 2.44$$

ETP : évapotranspiration potentielle moyenne mensuelle (mm).

i : Indice thermique mensuel.

a : paramètre arbitraire lié à la température.

I : Somme des indices thermiques mensuels.

T : Température moyenne mensuelle (c°).

K : coefficient d'ajustement mensuel.

5. Bilan hydrologique de Thornthwaite

L'estimation de l'évapotranspiration réelle établie par la méthode de Thornthwaite est liée au volume de précipitations, trois cas peuvent se présenter :

1^{er} Cas : $P \geq ETP \Rightarrow ETR = ETP$: Il y a reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation (un sol saturé, quand il aura absorbé une lame d'eau équivalente à une précipitation de 100 mm), le surplus représentera l'écoulement superficiel.

2^{eme} Cas : $P < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$: Dans ce cas, on puisera dans les réserves du sol jusqu'à satisfaction de l'ETP.

3^{eme} Cas : $P < ETP$ et $RFU = 0 \Rightarrow ETR = P$: Dans ce cas, on aura un déficit qui représentera la quantité d'eau à apporter pour l'irrigation (déficit agricole). Le tableau ci-dessous résume les calculs du bilan hydrologique pour la station de Touggourt.

Tableau 5 : bilan hydrique selon Thornthwaite de la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Total
P (mm)	5,78	4,89	8,92	5,80	11,82	3,66	8,65	5,59	3,37	0,78	0,60	1,68	61,54
T (°C)	29,17	23,13	16,26	11,63	10,24	13,06	16,52	21,36	26,23	31,34	34,27	33,77	/
K	1,03	0,97	0,86	0,81	0,87	0,85	1,03	1,10	1,21	1,22	1,24	1,16	/
I	14,44	10,17	5,96	3,59	2,96	4,27	6,11	9,01	12,30	16,10	18,43	18,03	121,37
ETPc (mm)	140,01	74,86	28,09	11,68	9,19	16,26	34,97	69,90	126,92	197,57	249,75	225,40	1184,6
ETR (mm)	5,78	4,89	8,92	5,80	9,19	6,29	8,65	5,59	3,37	0,78	0,60	1,68	61,54
RFU (mm)	0	0	0	0	2,63	0	0	0	0	0	0	0	/
EXC (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DA (mm)	134,23	69,97	19,17	5,88	0	9,97	26,32	64,31	123,55	196,79	249,15	223,72	1123,06

D'après le bilan d'eau établis par la formule de Thornthwaite sur la période allant de 1975 au 2016 (*tab.5*), on remarque que l'ETP est supérieur à la précipitation durant toute l'année sauf le mois de janvier où les précipitations deviennent supérieures à l'ETP, L'évapotranspiration potentiel moyenne annuelle est de 1184,6 mm, il atteint son maximum au mois de juillet avec 249,75 mm.

Les précipitations sont égales à l'ETR durant presque toute l'année à l'exception des mois de janvier et février. L'ETR présente une moyenne annuelle de l'ordre de 61,54 mm. La constitution de la RFU ne s'effectue qu'au mois de Janvier avec une valeur de 2,63 mm sino il est nul sur le reste de l'année. Ceci a engendré un déficit agricole annuel d'ordre de 1123,06 mm, ce déficit observé sur toute l'année à l'exception du mois de Janvier, ce qui signifie que l'irrigation est indispensable presque sur toute l'année.

5.1. Evapotranspiration réelle (ETR) : par définition, on appel évapotranspiration réelle effective actuelle ou encore déficit d'écoulement, la somme de l'évapotranspiration et de transpiration réelle pour une surface donnée. Pour le calcul de l'ETR, on a utilisé la formule de Turc ; Cette formule tienne compte de la durée de l'insolation et applicable à tous les types de climat.

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}}$$

$$\text{Avec : } L = 300 + 25 T + 0.05 T^3$$

ETR : évapotranspiration réelle (mm). **P** : précipitation moyenne annuelle (mm).

L : paramètre arbitraire lié à la température. **T** : température moyenne annuelle (°C).

Tableau 6 : ETR selon Turc à la station de Touggourt (1975/76-2015/16).

Station	P (mm)	L	T (°C)	ETR (mm/an)
Touggourt	61,54	1407,01.	22,25	64,87

A partir de résultats obtenus par la formule de Turc (*tab.6*) et de Thornthwaite (*tab.5*), on constate que les facteurs climatiques dans notre région d'étude reflètent un bilan hydro-climatologique constamment déficitaire favorise une évaporation de toute la quantité précipitée ($ETR = P$), avec un déficit moyen de l'ordre de 1123,06 mm. Cet indice est l'expression d'une approximation des besoins en eau d'irrigation des cultures, étant donné que la formule de Thornthwaite a tendance à sous-estimer les fortes ETP, particulièrement en zone aride et semi-aride, où elle ne tient pas compte de l'accentuation de l'ETP due aux phénomènes adventifs (*Bouznad, 2009*).

6. Irrigation et drainage

Pendant très longtemps, l'implantation humaine au Sahara a été limitée par la difficulté d'accéder aux réserves souterraines et d'élever cette eau au-delà de quelques mètres pour irriguer. Les oasis dans ces conditions n'ont jamais représenté que quelques dizaines de km². Ces dernières se sont installées en captant de manière originale les couches superficielles des grands aquifères.

Dans la vallée de l'Oued Righ, la technique d'irrigation la plus utilisée est la submersion par planche. Quant aux dimensions de cette dernière, celles-ci diffèrent d'une exploitation à une autre et ne répondent pas aux normes techniques ; elles sont en général de 2 m de large sur 100 m de longueur dans les nouvelles plantations et de 3 à 5 m de large sur 20 m de longueur dans les anciennes palmeraies. Selon le type d'exploitation, les systèmes d'irrigation se varient et ne répondent pas aux besoins réels des cultures (Palmier dattier) mais restent souvent liées aux disponibilités en eau au niveau des parcelles. En général, la fréquence est d'une fois tous les 10 jours durant l'été et une fois tous les 8 jours durant l'hiver.

Par ailleurs, le débit mobilisé a été estimé à 10097 l/s soit une dose moyenne de 15380 m³/ha/an (*Acourene et al, 1992*), alors que les besoins du palmier sont estimés à 20,000 m³/ha/an pour une plantation régulière de 120 palmiers. Avec cette dose les besoins mensuels

en eau ne sont couverts que durant l'hiver (Nov, Dec et Janv). En revanche le déficit est plus accentué durant l'été où les besoins sont de l'ordre de $2200 \text{ m}^3 / \text{ha} / \text{mois}$ en moyenne.

Le réseau d'irrigation, est constitué de seguias en terres ; ce qui provoque une perte en eau par infiltration et évaporation importante, estimée à 30 % du débit total mobilisé (Acourene et al. 1992).

D'autre part, le drainage des eaux usées et d'irrigation est assuré par un réseau de drains à ciel ouvert mal entretenus et ayant une profondeur variée entre 0,50 et 1,50 m et un écartement compris entre 20 et 40 m. Les eaux de drainage sont collectées par un grand canal qui traverse les différentes palmeraies sur une distance de 150 km pour les déverser dans le chott " Merouane " (fig. 02).

Enfin, l'agriculture dans la région de l'Oued Righ est confrontée à un ensemble de contraintes qui freinent son développement à savoir ; la mauvaise gestion des ressources en eau, l'inefficacité du système de drainage, la remontée de la nappe, la dégradation et l'érosion génétique importante des sols.

7. Conclusion

La région de l'Oued Righ est caractérisée par un climat de type hyper-aride, caractérisée par un été chaud et sec et un hiver froid, elle est aussi caractérisée par l'irrégularité et la faiblesse de ses précipitations. Les précipitations moyennes annuelles pour la période (1975/76 – 2015/16) sont d'ordre de 5,13 mm. La température moyenne est de $22,25^\circ\text{C}$ avec un maximum de $34,27^\circ\text{C}$ au mois de juillet et un minimum au mois de janvier avec $10,24^\circ\text{C}$. Le bilan est déficitaire, l'excédent est nul et la RFU reste épuisée durant toute l'année malgré qu'elle présente uniquement une valeur de 2,63 mm pendant le mois de janvier.

Dans la vallée d'oued Righ, le canal collecteur constitue le nerf principal pour la vie, la coexistence des différents systèmes d'exploitation des ressources en eau qui a donné naissance à diverses façons de cultiver, et d'aménager les oasis (Marc Cote, 1995).

La mauvaise exploitation hydro-agricole (travaux culturaux et entretien, mode d'irrigation) cette contrainte conjuguée à une utilisation abusive des eaux profondes pour l'irrigation (submersion) s'est traduite par la remontée de la nappe phréatique.

Chapitre III
Géologie et
Hydrogéologie

1. Introduction

La vallée d'Oued Righ fait partie du bassin oriental du Sahara qui est nettement mieux étudiée que sa partie occidentale grâce aux recherches pétrolières. Il se présente également comme un vaste synclinal ouvert vers le Nord. Dans cette partie nous avons essayé de décrire la géologie régionale du Bas Sahara ensuite la géologie locale de la vallée l'Oued Righ, et plus précisément celle du Continental Intercalaire qui nous aboutit à une synthèse globale et locale des caractéristiques hydrogéologiques de cet aquifère.

2. Géologie régionale

La région du Bas Sahara se présente comme une vaste cuvette limitée à l'Ouest par la dorsale du M'Zab, au Sud par les Hamadas du Tademaït et de Tinghert, à l'Est par les plateaux du Dahar Tunisien et au Nord par les monts des Aurès et des Nememchas (*fig.7*). Ses bordures, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la partie déprimée matérialisée par l'axe SSW-NNE des oueds Mya et Righ. Vers le Nord au contraire, dressée au-dessus d'une dépression longitudinale occupée par des Chotts et dont le fond est inférieur au niveau de la mer. La région d'étude fait partie du bassin du Sahara Septentrional de l'Algérie ou plus précisément du bassin oriental.

2.1. La structure synclinale du Bas Sahara

Grâce aux travaux de certains auteurs : *Cornet (1961), Bel et Demargne (1966) cités par Nesson (1975)*. La région a connu, en effet, au cours de son histoire géologique de longues phases de sédimentation alternative entre marines et continentales. Les dépôts qui se sont constitués, ont été importants et ont permis l'apparition d'un immense bassin très tôt en cette partie du Sahara et qu'il a été presque constamment affecté par des mouvements de subsidence (*fig. 8*)

2.2. La sédimentation continentale

Après le dépôt des formations marines du Primaire, le Sahara subit des mouvements tectoniques hercyniens verticaux et horizontaux, puis des mouvements post-hercyniens. Ils ont soulevé des massifs (Hoggar), ondulé la couverture sédimentaire primaire et affaissé le Sahara Nord Oriental. L'érosion éolienne, alors très vive, a arraché du Hoggar et des Tassilis, des matériaux qui ont été, par la suite transportés par les eaux vers la cuvette au Nord. Avec l'abaissement des reliefs, l'érosion devenant moins vive et les écoulements moins puissants ; des masses considérables de sables et d'argiles sont alors abandonnées sur la cuvette, recouvrant cette dernière d'un matériau uniforme (Nesson, 1975).

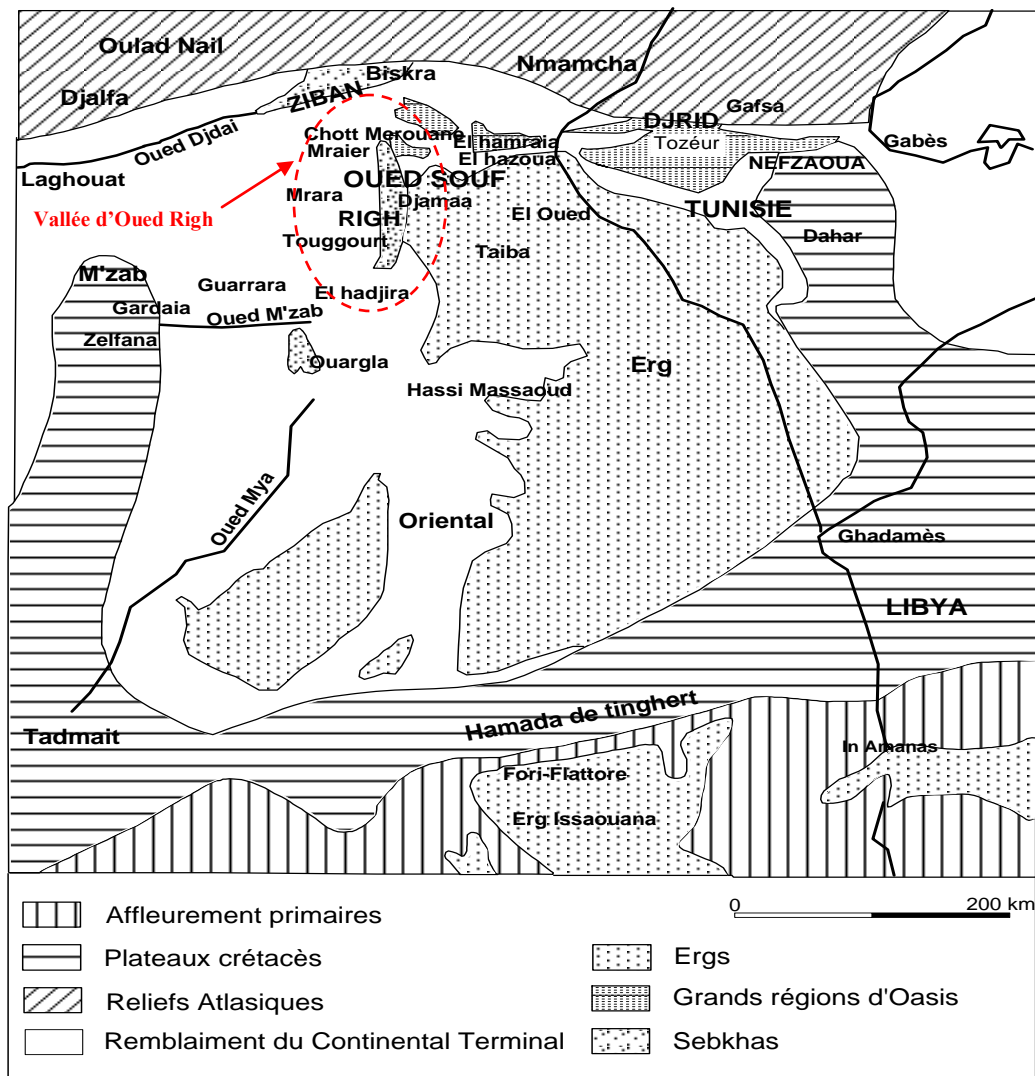


Figure 7 : Les grandes unités géologiques au Sahara (Nesson, 1975)

Peu épais au Sud, ces dépôts deviennent de plus en plus puissants vers le Nord pour atteindre environ 2000 m. Un tel entassement de sédiments traduit l'existence d'une zone de subsidence, située sur la bordure septentrionale du socle africain. Depuis, cette région, se produisent, à plusieurs reprises, des transgressions marines, au Jurassique et au Crétacé inférieur par exemple. Ces dernières sont de courte durée et l'essentiel des sédiments accumulés à cette époque sont des sables éoliens et fluviatiles et des argiles continentales. L'ensemble de ces dépôts, dont les sables ont été transformés en grès poreux est appelé : Continental Intercalaire, car il apparaît dans l'échelle stratigraphique après les formations, résultant d'une transgression marine d'époque Cénomaniennne (Nesson, 1975).

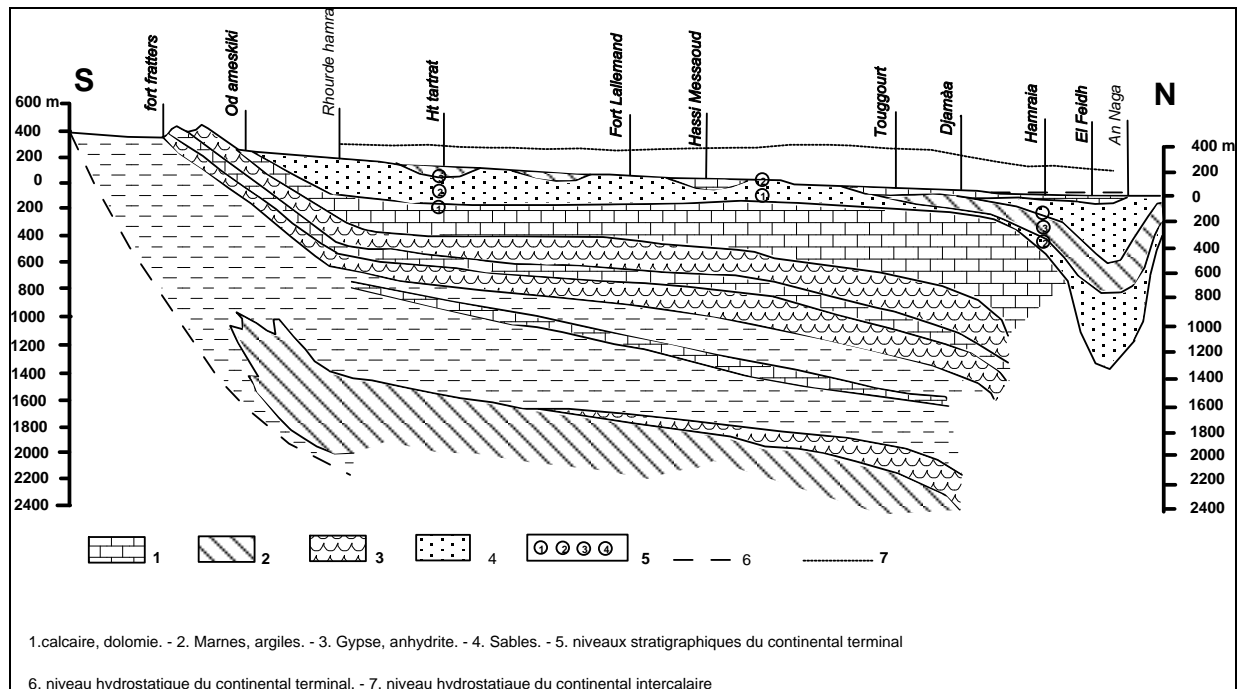


Figure 8 : Coupe schématique Nord-Sud partielle du Bas Sahara (Cornet, 1964).

2.3. La sédimentation laguno-marine

Sur les alluvions, uniformément épandues du Continental Intercalaire, apparaît au Vraconien un régime de lacs et de lagunes, plus au moins douces ou salés, résultant du retrait de la mer. Ce régime a engendré des dépôts alternés d'argiles, de dolomies, d'argiles sableuses, de grès à ciment calcaire. Avec le Cénomaniens inférieur, une mer peu profonde s'avance vers le Sud jusqu'aux Tassilis. Cependant, elle connaît plusieurs phases de régression. Ses dépôts se composent d'une alternance d'argile et d'anhydrite. Le Cénomaniens supérieur est plus franchement marin avec des dépôts de dolomie et de calcaire dolomitique, disposés en bancs de quelques mètres d'épaisseur, entre lesquels apparaissent encore de l'anhydrite et de l'argile. Faciès et épaisseur des dépôts varient vers le nord-est : les carbonates deviennent plus importants et la puissance des bancs s'accroît. Ils indiquent l'origine vraisemblable de la transgression Cénomaniens (Nesson, 1975).

Au Turonien, un régime marin franc responsable du dépôt des calcaires et des dolomies s'établit sur l'ensemble du Sahara algérien. Le banc carbonaté est homogène sur toute son étendue, par endroits, leur épaisseur peut dépasser les 100 m. Des variations de faciès peuvent être observées, légèrement lagunaire au sud, il devient plus franchement marin au centre et au nord (Nesson, 1975).

Ce changement de faciès s'accompagne d'un épaissement des sédiments qui montre que le rebord de la plateforme est toujours affecté par des mouvements de subsidence.

Dès la fin du Turonien, la mer est remplacée par des lagunes dont les eaux sont moins profondes et parfois disparaissent entièrement, provoquant des émergences momentanées. Les dépôts se présentent alors par une alternance irrégulière de bancs d'une puissance de quelques mètres seulement, constituent d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel. L'anhydrite et le sel peuvent constituer des couches de dix mètres et plus. L'ensemble de ces dépôts, dont l'épaisseur varie de 0 à 600 m, appartient au Sénonien inférieur lagunaire. Comme les dépôts précédents, celui-ci voit sa puissance s'accroître rapidement vers le nord (Nesson, 1975).

Une nouvelle transgression marine se manifeste au Sénonien supérieur. Elle est responsable du dépôt de dolomies, de calcaires dolomitiques et d'intercalations de marnes, d'argiles et quelques fois d'anhydrite. Leur faciès un peu varié, mais leur épaisseur augmente régulièrement vers le Nord. Tandis que, se produit la subsidence Nord-Orientale, révélée par un accroissement des épaisseurs des dépôts carbonatés du Sénonien et de l'Eocène, un mouvement d'exhaussement se manifeste au Nord-Ouest. Mais la sédimentation dans le Sahara Nord Oriental est peu affectée par ces mouvements. Les calcaires à silex, que l'on rencontre au sommet du Sénonien, se retrouvent dans l'Eocène ; seule la présence de nummulites les distingue. Pourtant les calcaires prédominent les dolomies et les évaporites qui deviennent rares (Nesson, 1975).

Après l'Eocène inférieur, la mer n'occupe plus qu'un golfe très réduit dans la partie septentrionale de la cuvette. Sa faible profondeur et son extension limitée, au Sud à l'embouchure de l'Oued M'Zab, en font une mer résiduelle où se déposent alternativement des calcaires, des argiles, des marnes et de l'anhydrite. Cet Eocène évaporitique achève d'ailleurs sa formation à l'Eocène moyen quand la mer se retire définitivement de la plateforme saharienne. Désormais, le modelé du Sahara sera, alors, le fait des agents atmosphériques, de l'eau et du vent qui enlèvent les sédiments d'ici pour les accumuler ailleurs (Nesson, 1975).

3. Géologie locale

La vallée de l'Oued Righ est limitée géologiquement par le plateau de Tadmâite et M'Zab à l'ouest qui sont constitués par les différentes formations du Tertiaire fluvio-lacustre continentales concrètement au sud, on retrouve des formations reliques du Mio-pliocène et à l'est, on a le grand Erg oriental, c'est une accumulation gigantesque de sable éolien à granulométrie relativement homogène, et enfin au nord, la limite est constituée par la dépression occupée par les chotts Marouane et Melghir situés juste au sud de l'accident Sud atlasique (*Castany, 1982*)

3.1. Description stratigraphique

Grace aux travaux de nombreux auteurs qui ont travaillé et publié des articles et des ouvrages sur la géologie du bassin sédimentaire du Sahara Septentrional, aussi bien dans le cadre de la géologie pétrolière, que par des chercheurs universitaires ; *Savornin, 1931 ; Karpoff, 1952 ; Cornet, 1964 ; Furon, 1964 ; Busson, 1967-1971 et Conrad, 1996*, et étant donné que la géologie permet la connaissance des formations susceptibles de constituer de bons aquifère.

Les formations géologiques de la zone étudiée seront décrites du plus ancien au plus récent.

3.1.1. Secondaire

a) L'albien : se présente comme une série très épaisse formée d'une alternance de couches gréseuses avec des passées d'argiles schisteuses.

b) Le Vraconien : c'est en fait un étage de transition entre l'Albien et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance de calcaires et de calcaires argileux. Nous rencontrons aussi quelques passages de dolomies compactes microcristallines avec des intercalations d'argiles.

c) Le Cénomaniens : Le Cénomaniens est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. L'épaisseur des bancs est de 1 à 5m environ. Dans la moitié Sud, le Cénomaniens est essentiellement constitué d'argiles et de marnes, avec de l'anhydrite et parfois même du sel, les carbonates sont rares.

d) Le Turonien : représenté par des dépôts marins. Dans l'ensemble, il est calcaire, dolomitique et marneux à la base et dolomitique ou calcaire au sommet. Son épaisseur varie d'un endroit à l'autre et dépasse parfois les 650 m.

e) Le Sénonien :

Le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées :

- **Le Sénonien lagunaire** : Le Sénonien lagunaire est constitué par une alternance irrégulière de bancs d'anhydrites, de dolomies, d'argile et de sel.
- **Le Sénonien carbonate** : Le Sénonien carbonate est formé de dolomies et de calcaires dolomitiques, avec intercalations de marnes et d'argiles, plus rarement d'anhydrites. Le sommet de la formation est souvent marqué par un petit banc à silex. La limite supérieure est toujours difficile à situer car il y a une continuité lithologique et identité de faciès entre le Sénonien carbonate et l'Eocène carbonate qui le recouvre.

3.1.2. Tertiaire

a) L'Eocène inférieur carbonate : L'Eocène carbonate a des caractéristiques lithologiques qui le rendent difficile à distinguer du Sénonien. Seule la présence ou l'absence de nummulites permet de faire la différence. Le Sénonien et l'Eocène carbonaté réunis, forment un puissant ensemble calcaire. Sa puissance peut atteindre 600 m dans la région des Chotts (Nesson, 1975).

b) L'Eocène moyen évaporitique : Au-dessus de l'Eocène carbonaté, on rencontre une formation constituée par une alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrite. L'Eocène évaporitique constitue un aquitard entre l'Eocène carbonate et les sables Mio-Pliocène. Il semble raisonnable de grouper en une seule unité hydrogéologique (aquitard) l'Eocène évaporitique et les argiles de base de Mio-Pliocène. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 m.

c) Mio-pliocène : est un ensemble puissant composé de sable et d'argile, il est caractérisé par une forte hétérogénéité que ce soit dans la direction verticale ou horizontale.

Selon Bel et Demargne 1966, le Mio-pliocène comporte deux niveaux à intérêt hydrogéologique :

- Niveaux inférieur grès-sableux : C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara Oriental.
- Niveau supérieur sableux : du point de vue hydrogéologique, ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. Ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.

3.1.3. Quaternaire : Son épaisseur est variable et peut atteindre localement une dizaine de mètres (10 m). 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 Mio-pliocène situé aux limites de la vallée de l'Oued Righ.

4. Evolution tectonique

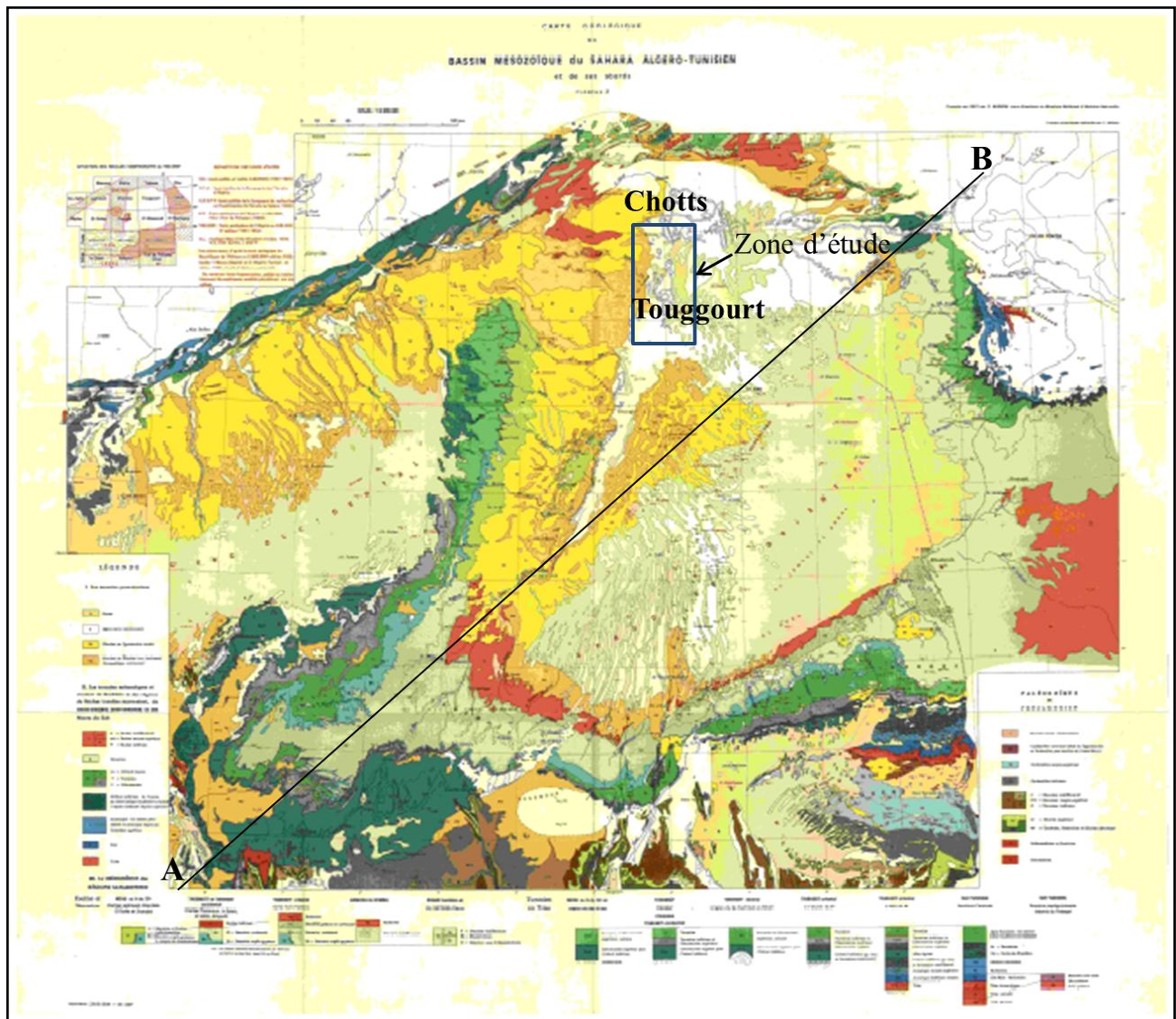
L'architecture actuelle de la plateforme saharienne est le résultat de plusieurs phases tectoniques intenses affectant la région au cours des temps géologiques. Dans le Sahara Occidental, les mouvements de l'orogénèse hercynienne sont les principaux responsables de la déformation et de la structuration. Dans le Sahara central et Nord Oriental les mouvements hercyniens et les mouvements de l'époque mésozoïque sont tous les deux responsables de la structuration. Les principales phases tectoniques qui ont modelé la plateforme saharienne sont données dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7 : Les étapes probables de la tectonique dans le Sahara algérien (Karpoff, 1952, in Medjani, 2016)

Âge	Style
Antécambrien	Des grandes failles subméridiennes résultants de la collision continentale entre le craton Ouest africain et le bloc Est africain
Paléozoïque	Mouvements amples d'axes Est-Ouest Formations de chaînes orientées N-S, NNE –SSW sur des axes antécambriens
Poste Eocène et Anti- Miocène	Rejeu des structures hercyniennes avec leur orientation ancienne
Post –Miocène	Premiers plis d'axe NW-SE
Post – Pliocène	Mouvements peut être dans la région Nord seule Plis en Genous de l'Aurès d'axe E-W
Fini Quaternaire Ancien	Plis affectant le Mio-Pliocène seul ou accompagne du Quaternaire ancien, suivant deux axes orthogonaux dont l'axe NW-SE est le principal.
Néolithique	Mouvements de grande amplitude à plis faibles et localisés.

5. Hydrogéologie

La zone d'étude (fig.9) fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780'000 km². Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques subverticaux.



AB = Coupe hydrogéologique. (Cf. fig. 10)

Figure 9 : Carte géologique du Sahara d'après G. Busson (1967)

Les pendages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au nord-est du bassin (fig.10). Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres.

Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique certain. Allant du Crétacé au Quaternaire, elle constitue une alternance de grès, sables, sables argileux et d'argiles, de calcaires, dolomies et de marnes, ainsi que d'évaporites. Cette série comporte trois grands ensembles perméables auxquels correspondent trois grands systèmes aquifères : la nappe phréatique, la nappe du Complexe Terminal et la nappe du Continental Intercalaire.

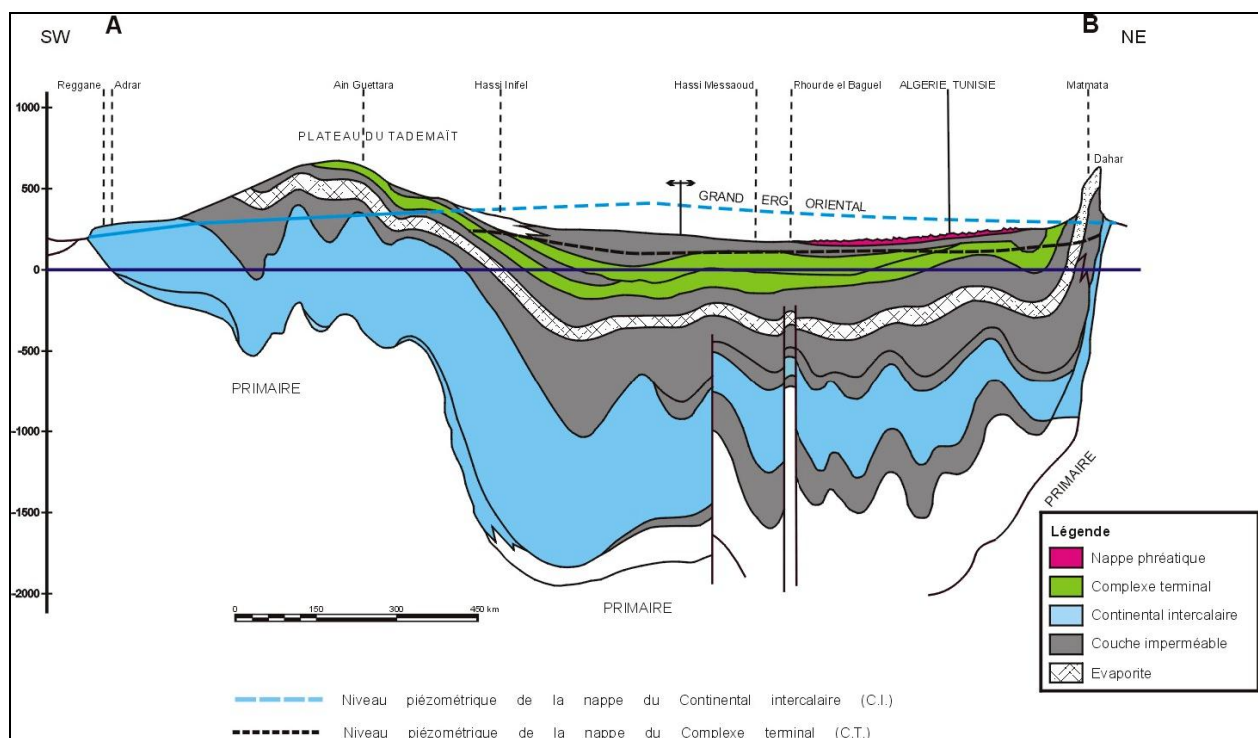


Figure 10 : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

5.1. La nappe du quaternaire (nappe phréatique) : constitue essentiellement du sable, à la base des couches d'argiles et d'évaporites semi-perméables qui la sépare du Pliocène supérieur. Cette nappe est alimentée principalement par l'infiltration des eaux des Oueds et surtout par percolation des eaux usées et celles de drainages lors des périodes d'irrigation.

5.2. La nappe du Complexe Terminal : Le Complexe Terminal représente des formations très hétérogènes. Elles englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène (*fig. 11*). Elle est constituée par la superposition de trois unités aquifères très hétérogènes séparées localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces unités situées dans des formations géologiques différentes subdivisées en deux ensembles : l'un continental au sommet et l'autre marin à la base (*in Medjani 2016*) :

Cette nappe couvre l'ensemble de la cuvette du Bas-Sahara ainsi que le sud-ouest tunisien Elle est exploitée depuis longtemps dans l'Oued Righ.

En allant en profondeur on peut distinguer trois horizons aquifères :

- Une première nappe, dite des sables : sa puissance varie entre 50 et 100 m 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 : son épaisseur est de 20 à 36 m, surmontée par la nappe précédente, 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 et beaucoup plus continues et perméables que les précédents.
- La nappe des calcaires du Sénonien carbonaté/Eocène inférieur : son épaisseur atteint les 200 m à Touggourt et 360 m à Meghaier. Elle est formée essentiellement de calcaires, calcaires dolomitiques avec passées de marne, d'anhydrite et de gypse.

Tous ces aquifères s'écoulent du Sud vers le Nord (*fig.12*) et les niveaux piézométriques passent de 80 m environ à El Goug à une quarantaine de mètres en bordure des chotts La surface piézométriques de la deuxième nappe captive est généralement plus élevée que celle de la première : dans le Nord du bassin la différence peut atteindre une quarantaine de mètres.

En 1970, le Complexe Terminal fournissait $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (*ERESS, 1972*) dont les deux tiers d'eaux jaillissantes et le reste étant pompé, l'essentiel de l'artésianisme est concentré dans la partie Nord du bassin entre Tinedla et El Meghaier, alors que le pompage domine plus au Sud : de Touggourt à Blidet Amor, bien qu'El Goug, la plus méridionale des palmeraies soit encore totalement alimentée par des eaux artésiennes.

Ce complexe à une profondeur oscillant entre 100 et 500 m. Les eaux de cet aquifère se caractérisent par une température peu élevée allant de 25 à 30°C. La transmissivité est de 4 à 300 x 10⁻³ m²/s et le coefficient d'emmagasinement de 0.5 à 150 x 10⁻³ (Tesco, 1986).

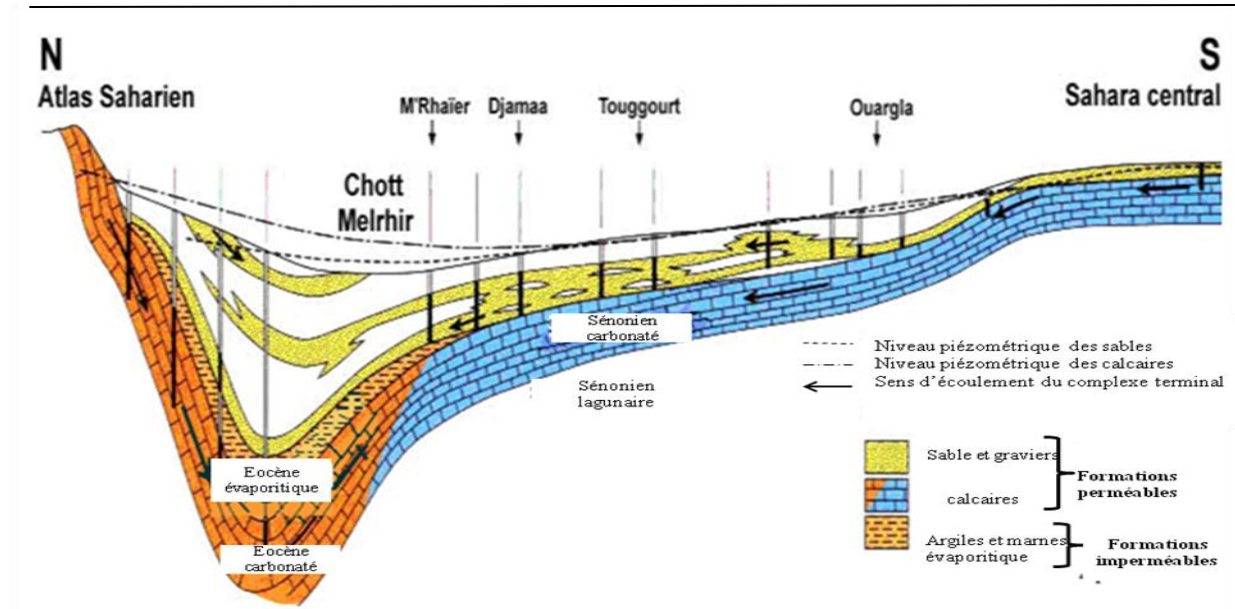


Figure 11 : Coupe hydrogéologique Nord- Sud du Complexe Terminal du Bas Sahara (Unesco, 1972).

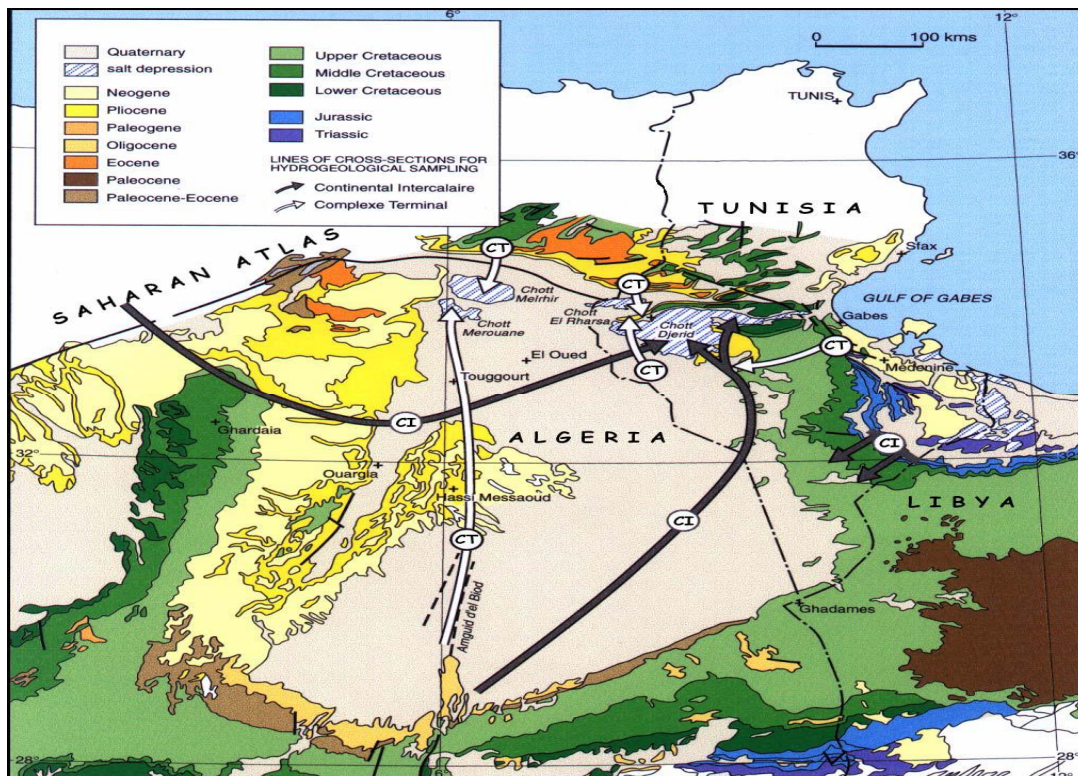


Figure 12: carte hydrogéologique des deux nappes du Sahara septentrional avec le sens d'écoulement des deux nappes (Etude ERESS modifiée par Guendouz et Al, 2003)

5.3. La nappe du Continental Intercalaire : Appelée souvent « nappe albienne » et constitue la plus grande réserve d'eau souterraine dans le Sahara algérien. Elle est constituée essentiellement par des sédiments post-paléozoïque qui vont du Trias à l'Albien et représenté par une alternance de couches grésosableuses et argileuses ou les niveaux perméables sont dominants présentant une épaisseur utile dépassant partout 250 m et atteignant parfois 1000 m par endroit, 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 (Conrad et al. 1969), soit seulement 1/6e, environ 10 000 milliards, sont exploitables (in Zerrouki, 2017). Le Continental Intercalaire 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 (fig. 13).

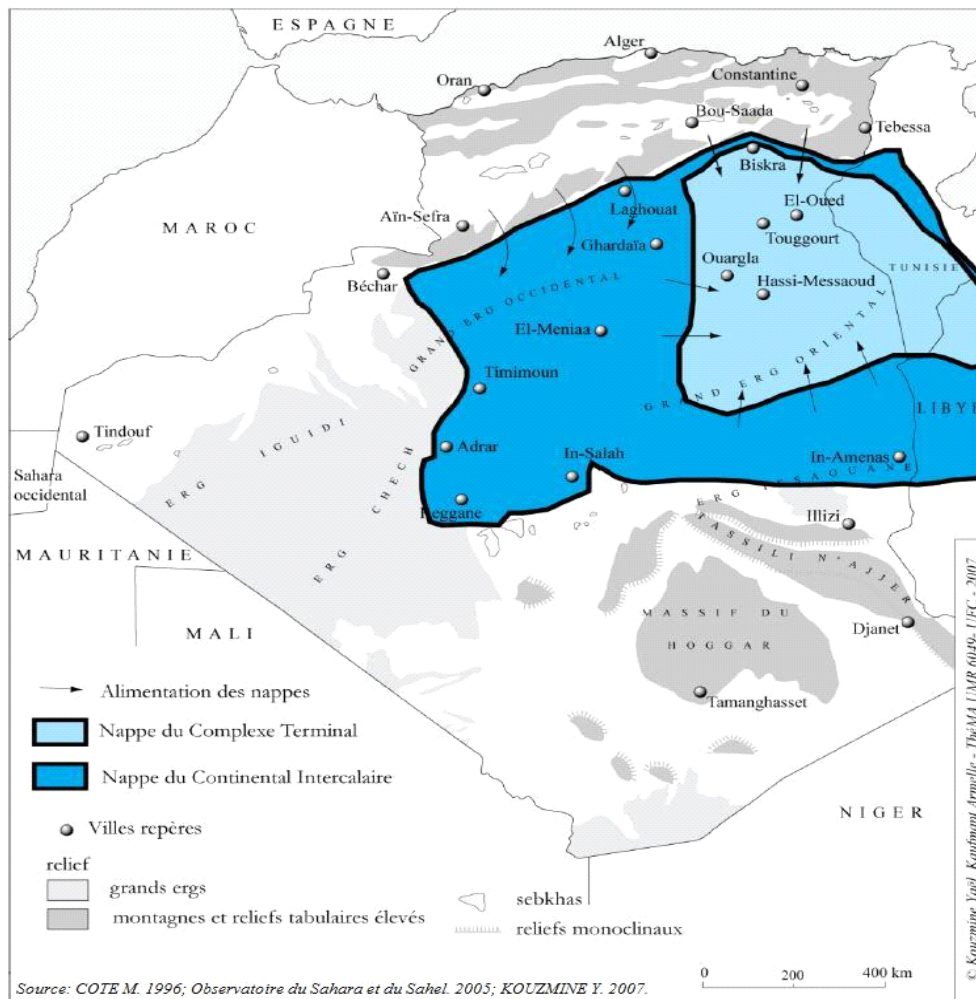


Figure 13: Carte montrant les nappes aquifères du Sahara Algérien (Kouzmine, 2009 in Boussaada, 2017)

Au 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 à une température élevée qui dépasse parfois les 60°C 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 (H_2SO_4 et CO_2) et la minéralisation qui s'oscille entre 1 et 2 g/l de résidu sec, parfois jusqu'à 5 g/l. À Oued Righ la porosité du grès et du sable du CI a été évaluée à 26 %, la perméabilité est de 10^{-3} m/s (Castany, 1968), la transmissivité est de l'ordre de 6 à $30 \cdot 10^{-3}$ m²/s et le coefficient d'emménagement de 1 à $50 \cdot 10^{-3}$ (Tesco, 1986).

Généralement, l'écoulement des eaux de la nappe du Continental Intercalaire provenant de l'Atlas saharien il se diverge sur la l'axe de la dorsale du M'Zab, suivant deux directions. Le premier se fait dans la partie occidentale du Nord vers le Sud et le deuxième, dans la partie orientale, de l'Ouest vers l'Est.

L'échelle du SASS montre qu'il y a trois zones d'exutoires naturels et artificiels : les foggaras du Touat-Gourara et du Tidikelt, la faille d'El-Hamma en Tunisie et Aïn Tawargha dans le domaine libyen. Dans la vallée d'Oued Righ l'exutoire est matérialisé par les zones de Chotts et les forages d'eau artésiens (fig. 14).

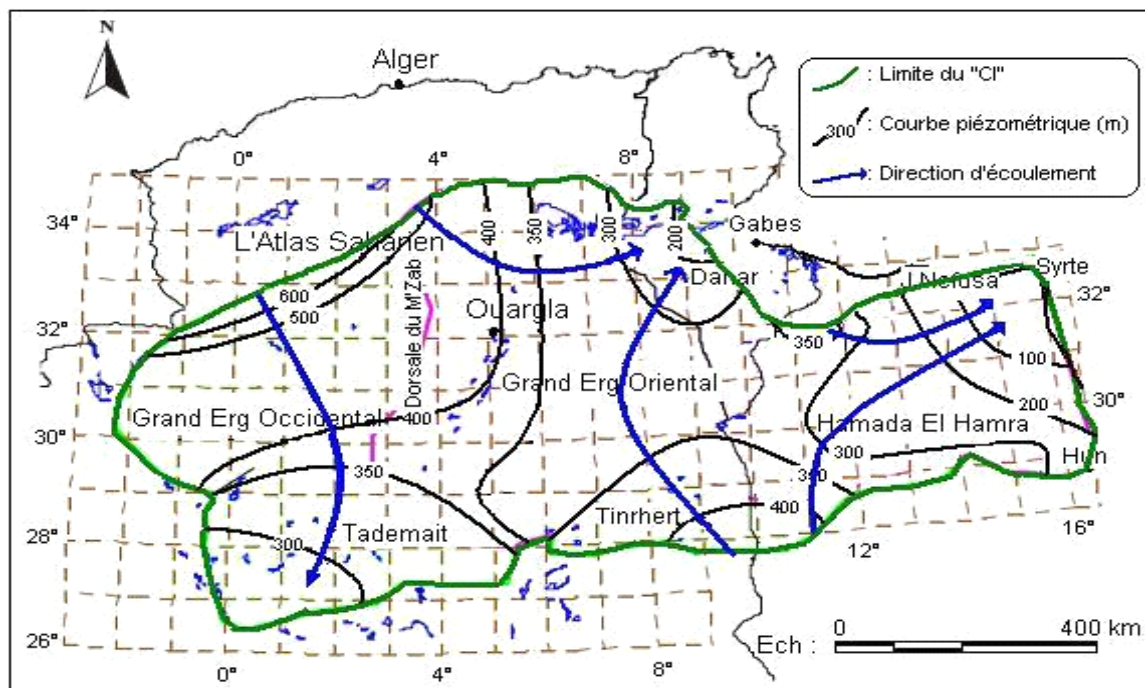


Figure 14 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire (OSS, 2003 in Bettahar, 2013)

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

5.4. Exploitation des nappes souterraines dans la vallée d'oued Righ

Dans notre région d'étude le bilan en eaux superficielles est très mince et de plus aléatoire, les habitants se sont inévitablement tournés vers l'exploitation des ressources du sous-sol par le biais des forages et des puits artésiens, qui sont, en volume, très importantes. La question de l'exploitation de ces nappes est un véritable pari pour l'avenir.

Au début les eaux mobilisées, provenant des nappes phréatiques puis rejetées dans la même nappe à l'aide des puits perdus après utilisation domestique ou agricole dans les zones d'épandage, donc une partie s'évaporée et le reste rejoint la nappe (fig.15). Entre volume apportée et volume rejeté un certain équilibre s'établi et la nappe reste stable.

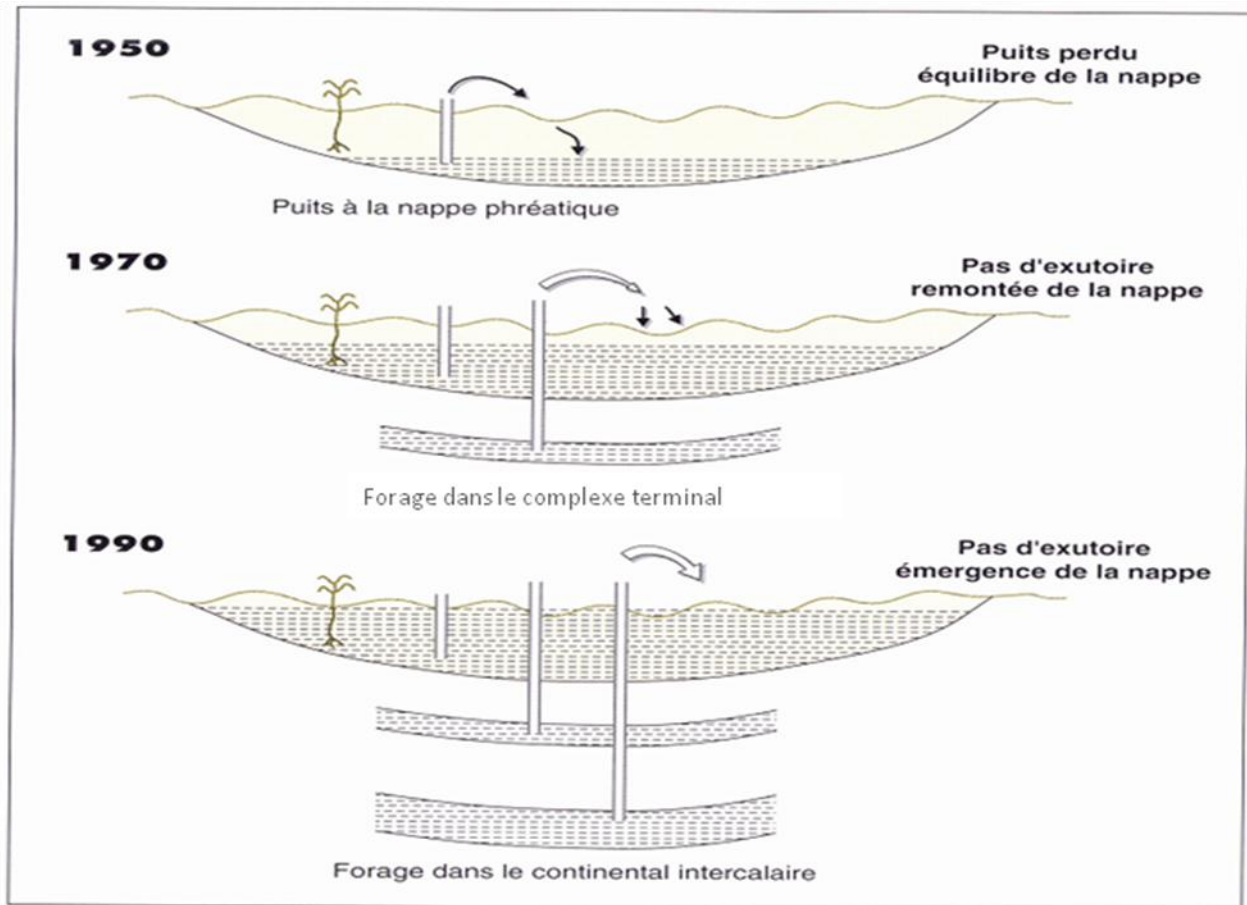


Figure 15 : Evolution du comportement de la nappe phréatique (Marc Côte, 1991)

Vu le développement économique dans la région qui induit une forte croissance démographique et vu le système d'irrigation traditionnel. Les autorités font appel aux ressources des nappes profondes (nappe du Complexe Terminal et du Continental Intercalaire), pour satisfaire les besoins en eaux domestique, agricole et industriel, ça génère un autre type de déséquilibre (*fig. 15*).

L'exploitation intensive des nappes souterraines profondes (CI et CT) avec une présence des fuites des réseaux d'AEP et d'assainissement et une insuffisance de réseaux d'évacuation des eaux usées et de drainage des eaux d'irrigation, et en l'absence d'un exutoire naturel, ces eaux vont rejoindre la nappe phréatique qu'ils gonflent d'autant. Ce qui provoque un phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique dans la période des années 1975 à 1980. Il est des cas où elle finit par affleurer, révélant au grand jour un déséquilibre écologique (*fig.16*).



a- Lac Tataouine (Touggourt)



b- Lac Ayata (Sidi Amrane)

Figure 16 : Remontée des eaux de la nappe phréatique (Zahi, 2011)

Afin d'évacuer les eaux excédentaires et de maintenir la nappe phréatique à un niveau acceptable et éviter sa remontée, ensuite la stagnation des eaux à la surface du sol, un grand drain a été achevé au 1984, d'une longueur estimée de 130 km, qui dirige les eaux de drainage vers le chott Merouane (cote -31m) sur une centaine de kilomètres de Blidet Amor au Sud (côte + 100m) à Meghaier au Nord. C'est le seul cours d'eau pérenne du Bas-Sahara avec un débit de 2 à 2,5 m³/s et même 5 m³/s (ANRH de Ouargla) à l'amont de l'embouchure dans le chott Mérouane. Sa pente

moyenne de 1 pour mille est suffisante pour évacuer correctement les eaux de collecteur des oasis et d'assainissement (*fig. 17*).

L'eau de drainage à la sortie du collecteur d'une plantation, dans l'Oued Righ, a une salinité sensiblement double de celle de l'eau d'irrigation, d'où l'idée d'utiliser celle-ci pour irriguer des plantations de cultivars rustiques. En principe, si l'eau de drainage n'a pas une salinité excessive, elle peut être recyclée (*Beggar, 2006*). Enfin, L'état actuel du canal connaît une dégradation continue, qui risque de remettre en cause le rôle important de cet exutoire principal de la vallée.



Figure 17 : Canal de drainage d'oued Righ

6. Conclusion

La vallée de l'Oued Righ est une véritable gouttière aplatée, allongée de direction sud-nord, c'est une partie intégrante du Bas Sahara, plus précisément de la province triasique.

Du point de vue géologique, la vallée est constituée par des formations allant du Cambrien au Tertiaire sont dissimulées en grande partie sous le Grand Erg Oriental, seuls quelques affleurements sont observés, sur les bordures. Les formations paléozoïques affleurent au Sud, entre les plateaux de Tadmaït et Tinhert et le massif du Hoggar. Les formations mésozoïques discordant sur le socle primaire souvent érodé, présentent une sédimentation tantôt marine, tantôt continental, c'est cette dernière qui offre le nom du Continental Intercalaire.

La série stratigraphique 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.

Dans la vallée, le Continental Intercalaire est capté à 1450 m jusqu'à 1600 m de profondeur, affleure aux bordures du bassin, particulièrement aux confins de l'Atlas Saharien et à Tihert.

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. Malgré les nombreux problèmes qui affectent la région (surexploitation, drainage, remontée des eaux...etc). Le canal est exactement le rein de la vallée, il joue un rôle très important dans la région, car il protège l'environnement en évacuant les eaux de drainage et d'assainissement.

Chapitre IV
Hydrochimie

1. Introduction

Dans le Sahara Algérien, la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande sur l'eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie, nécessite le recours des ressources en eaux profondes (CT et CI) qui présentent l'unique ressource en eau de la région de Sahara septentrionale (*Bouselsal et al, 2014*).

Le continentale intercalaire est l'aquifère le plus profond et le plus important avec une extension de 600000 Km² et une épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres, la profondeur de cette nappe passe progressivement de 800 m à Ouargla, à 1 300 m à Touggourt et 2 600 m à Biskra (*Bendaoui, 2012*), ses eaux se caractérisent par un gradient thermique variant entre 50-70°C. Certains forages débitent à 400l/s (*Chaib et al, 2013*), a une dureté excessive et une forte minéralisation atteinte 2 g/l (*Zahi et al, 2011*). L'utilisation de ces eaux se fait après refroidissement, ce qui génère des dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

L'objectif principal de cette partie est de faire une comparaison entre la qualité chimique des eaux avant et après le refroidissement. Dans la vallée d'oued Righ la nappe albienne est exploitée par 26 forages, dont 16 forages destinés à l'irrigation et équipés par des stations de refroidissement. Le prélèvement des échantillons a été effectué au mois de Novembre 2010 sur 13 forages équipés par des ouvrages de refroidissement soit d'un total de 27 échantillons (*fig.18*).

L'étude hydro-chimique est basée sur l'interprétation des résultats de mesures in-situ des paramètres physico-chimiques (pH, Salinité, CE, et la température) à l'aide d'une valise multi paramètres (*Multi 350i/SET*) et des analyses chimiques au laboratoire central du CRSTRA (Laboratoire Eau & Sol) (*Zahi et al, 2011*). Elles ont porté sur les éléments chimiques majeurs suivants :

- Les cations : Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺ et K⁺.
- Les anions : Cl⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻ et CO₃²⁻.

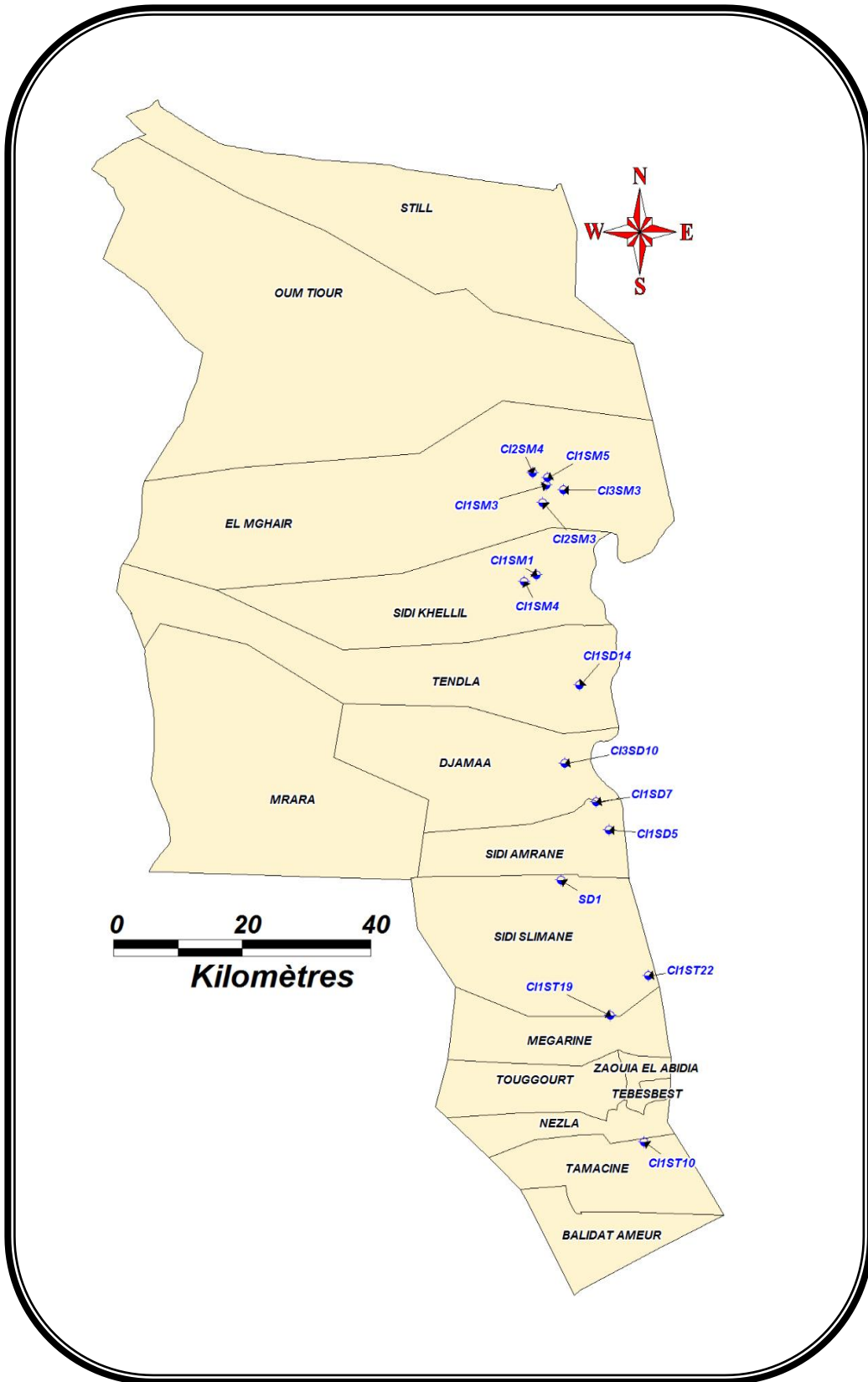


Figure18: Inventaire des points de prélèvement dans la vallée d'Oued Righ.

2. Faciès hydrochimique

L'interprétation des résultats d'analyses chimiques des éléments majeurs : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^- était nécessaire pour bien identifier les faciès hydrochimiques et avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines de la nappe albienne. Pour atteindre cet objectif, on a eu recours à la formule ionique pour le calcul des quantités en réaction puis la classification des ions et au diagramme de Piper pour la représentation graphique des résultats.

2.1 Classification selon la formule ionique

Cette formule a pour but de classer par ordre décroissant les quantités en réaction (en méq/l) des groupes anions et cations et permet de définir les caractéristique physico-chimique des eaux et les classer selon la même origine, elle consiste à calculer le pourcentage de chaque ion (r%) par rapport à la somme des autres ions (C) :

$$r \% = (c * 100) / C.$$

Avec ; c : concentration de l'ion considéré en méq/l,

C : somme des ions en méq/l.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau suivant (tab.8), il représente les faciès des eaux chaudes et après leurs refroidissement .

Tableau 8 : Classification hydrochimique des eaux du CI selon la formule ionique.

Echantillon	Formule ionique	Faciès		%			
CI1ST22 F	$r\% \text{SO}_4^{-2} > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{CO}_3^-$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Mg}^+ > r\% \text{Ca}^+ > r\% \text{K}^+$	Sodique		29,62%			
CI3SD10 F							
CI1ST19 F							
SD1 F							
CI1SD14 F							
CI1ST22 S							
CI1SD5 S							
CI3SD10 S							
CS1SD7 F	$r\% \text{SO}_4^{-2} > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{CO}_3^-$ $r\% \text{Ca}^+ > r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Mg}^+ > r\% \text{K}^+$				Calcique		55,55%
CI2SM3 F							
CI3SM3 F							
CI1SM3 F							
CI2SM4 F							
CI1SM4 F							
CI1SD14 S							
CI1SD7 S							
CI2SM3 S							
CI1SM4 S							
CI1SM5 F	$r\% \text{SO}_4^{-2} > r\% \text{Cl}^- > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{CO}_3^-$ $r\% \text{Ca}^+ > r\% \text{Mg}^+ > r\% \text{Na}^+ > r\% \text{K}^+$						
CI1SM5 S							
CI1SM3 S							
CI2SM4 S							
CI1SM4 S							
CI1SD5 F	$r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{-2} > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{CO}_3^-$ $r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Ca}^+ > r\% \text{Mg}^+ > r\% \text{K}^+$	Sodique	Chloruré	7,40			
CI1ST19 S							
CI2SM4 F	$r\% \text{Cl}^- > r\% \text{SO}_4^{-2} > r\% \text{HCO}_3^- > r\% \text{CO}_3^-$ $r\% \text{Ca}^+ > r\% \text{Na}^+ > r\% \text{Mg}^+ > r\% \text{K}^+$	Calcique		7,40			
CI1ST10 S							

A partir du tableau 8, on constate qu'il y a une existence de deux (02) familles de faciès :

- Faciès sulfaté sodique et sulfaté calcique avec respectivement 29,6 et 55,55%.
- Faciès chloruré sodique et chloruré calcique avec un pourcentage de 7,40%.

2.2 Classification selon le diagramme de piper

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite) il a permis d'avoir une idée sur les faciès chimiques des eaux souterraines de notre zone

d'étude, leur évolution dans l'espace, ainsi que sur les conditions naturelles qui sont à l'origine de ces faciès (fig.19).

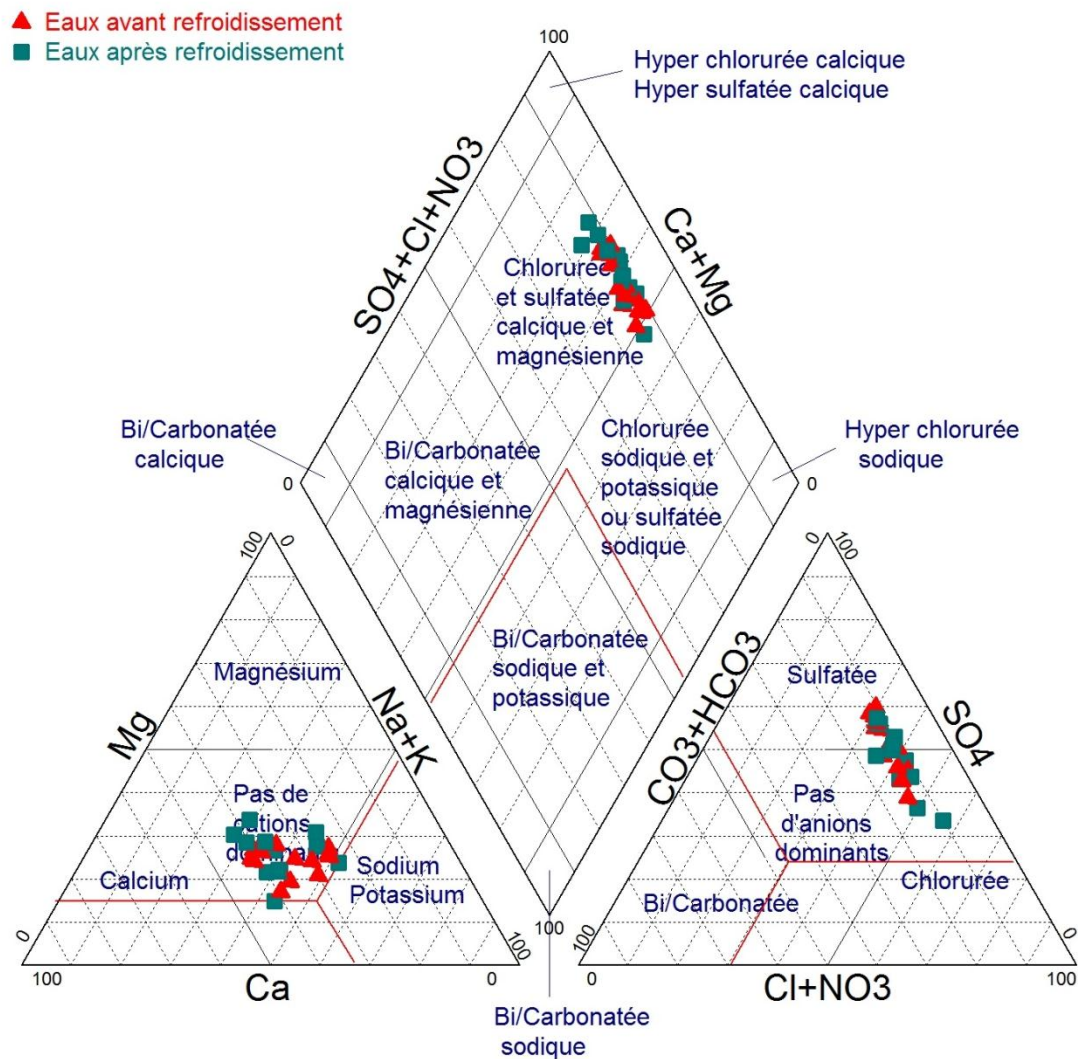


Figure 19 :Faciès chimique des eaux du Continental Intercalaire avant et après le refroidissement.

Le diagramme de Piper, permet d'avoir une approche globale de la composition chimique de ses eaux, et la répartition des différents faciès chimiques.

Le report des données d'analyse physico-chimiques des eaux souterraines du Continental Intercalaire (fig.19) montre l'existence de plusieurs faciès :

Chloruré calcique, sulfaté calcique, chloruré sodique et sulfaté sodique pour les eaux chaudes (avant refroidissement). Alors que, après le refroidissement les eaux tiennent une tendance vers un faciès sulfaté calcique, ceci dû à la température relativement élevée des eaux qui favorise la dissolution de certains sels tels que le CaCl_2 , le Na_2CO_3 . Elle n'a que peu d'effet sur la solubilité des autres sels (NaCl , NaHCO_3 , CaSO_4), ce qui explique le caractère sulfaté sodique et calcique des eaux.

2. Etude des paramètres physico-chimiques

La qualité de l'eau de consommation est appréciée sur la base des normes de potabilité, définies par la réglementation algérienne en 2011.

3.1 Température : La température de l'eau varie en fonction de la température de l'air et des saisons pour les nappes peu profondes et de la profondeur du niveau d'eau par rapport à la surface du sol pour les nappes profondes. Le Sud algérien est caractérisé dans son ensemble par un gradient géothermique moyen $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (Ouali et al, 2007). Cela signifie que les eaux souterraines sont d'autant plus chaudes qu'elles sont profondes (Fennich, 2016).

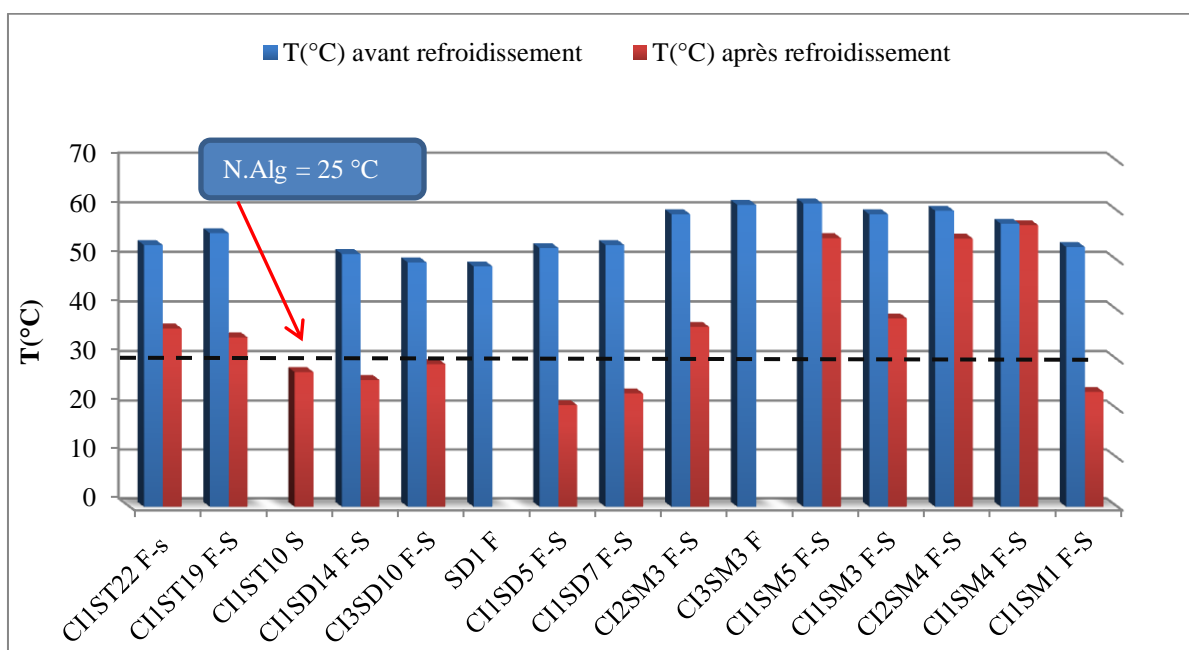


Figure 20: Température des eaux du Continental Intercalaire (la vallée d'oued Righ).

Les eaux de la nappe du Continental Intercalaire se caractérisent par des températures très élevées (eaux thermales), où la température oscille entre 48.8 et 61.5°C (supérieure à la norme 25°C). Les eaux qui ont une température dépassant 58°C sont situées dans la région d'El Meghaier où la profondeur de la nappe atteint 1300m . Ces eaux sont classées dans la catégorie de la géothermie de basse énergie, elles peuvent convenir pour le chauffage urbain et pour des usages agricoles (chauffage des serres et séchage des produits agricoles).

Pour une utilisation de ces eaux à l'irrigation et pour qu'elles soient accessibles par les palmiers dattier, il implique la nécessité d'un refroidissement avant distribution, où les températures enregistrées à la sortie des stations de refroidissement oscillent en 20 et 38°C , à l'exception des deux stations CI2SM4S et CI1SM4S où les températures restent supérieures à 50°C puisque les mesures ont été effectuées à l'entrée de la station avant le refroidissement.

3.2 Le potentiel hydrogène (pH) : Le pH de l'eau est défini selon la concentration des ions H^+ contenus dans la solution, il exprime l'alcalinité ou l'acidité du milieu. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques entre l'eau, le gaz carbonique dissous, les carbonates et les bicarbonates qui constituent des solutions tamponnées conférant à la vie aquatique un développement favorable (Djouadi, 2015 in Hadeif, 2018).

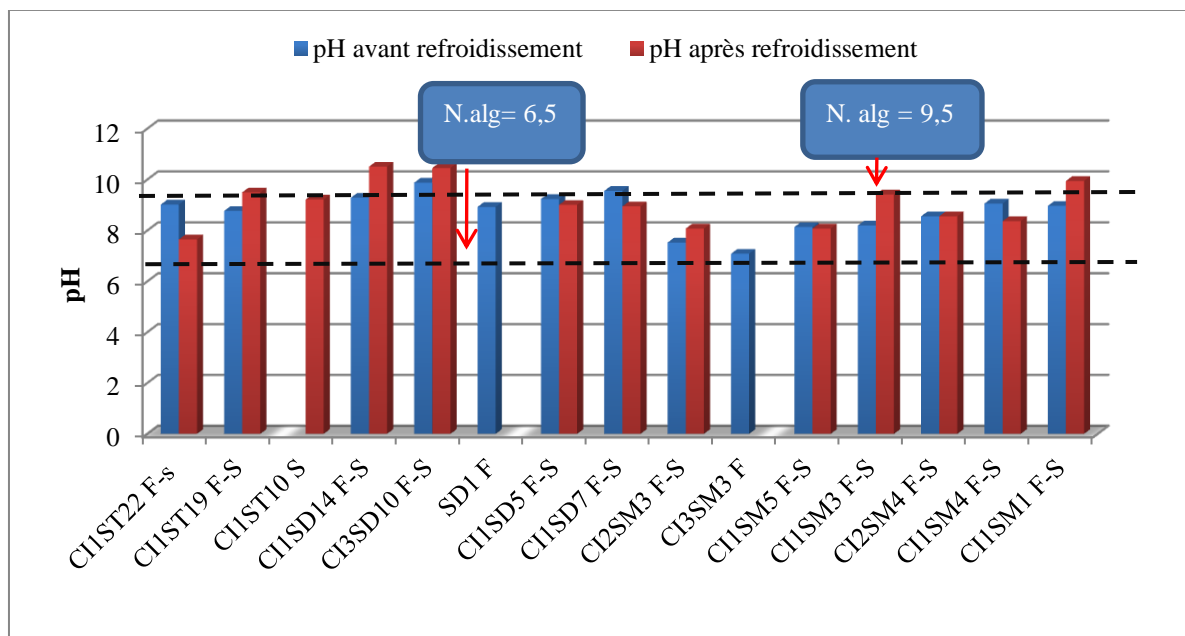


Figure 21: Potentiel d'hydrogène des eaux du Continental Intercalaire (la vallée d'oued Righ).

D'après la figure 21, on remarque que les valeurs du pH obtenues pour les différents forages du Continental Intercalaire oscillent entre 7 à 9.8, ce sont des eaux neutres avec une tendance basique. Après le refroidissement, on observe une légère augmentation du pH atteignant 10.5, probablement due à la variation des conditions de milieu (oxygène dissous). Cette augmentation du pH explique l'apparition ou bien l'augmentation des ions carbonatés (CO_3^{2-}), donc on assiste à la transformation des bicarbonates en carbonates.

3.3 La minéralisation : La qualité chimique des eaux du CI est définie principalement par la lithologie des terrains traversés par ces eaux lors de son écoulement en profondeur (Zahi et al, 2011). Les eaux géothermales de la région d'Oued Righ sont souvent fortement minéralisées. Les valeurs de la salinité ne montre pas une grande variation, elles varient entre 1100 et 1800mg/l (fig.22), ces dernières correspondent à des conductivités électriques oscillant entre 2110 et 2850 μ s/cm (fig.23).

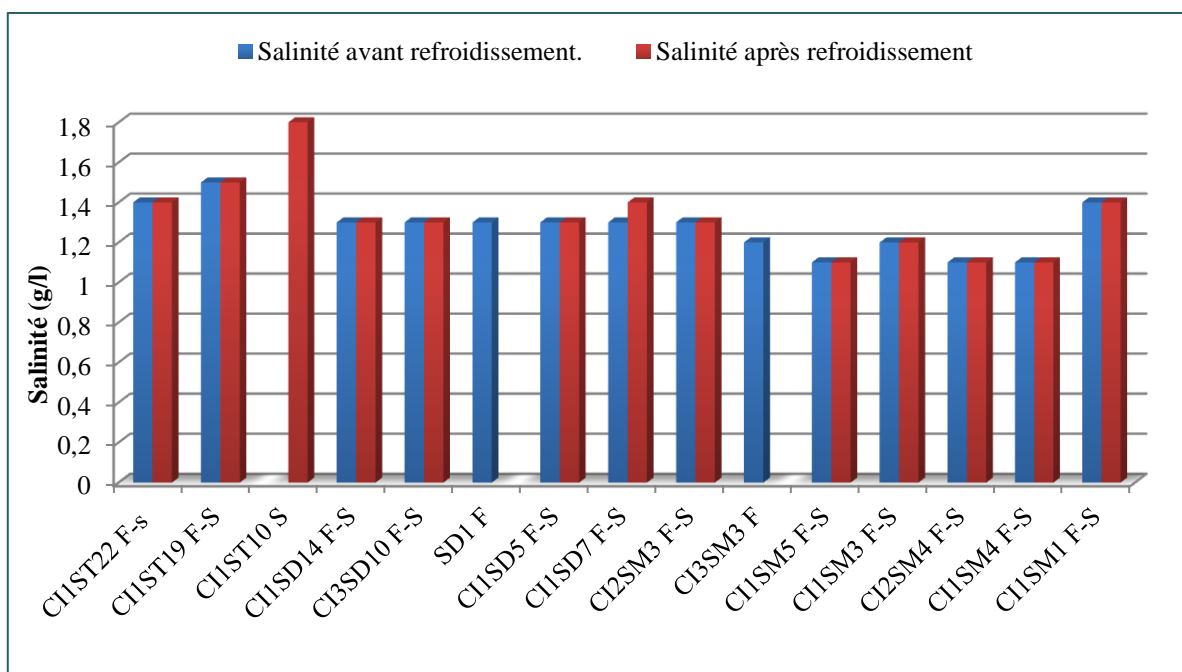


Figure 22: Salinité des eaux du Continental Intercalaire (la vallée d'oued Righ).

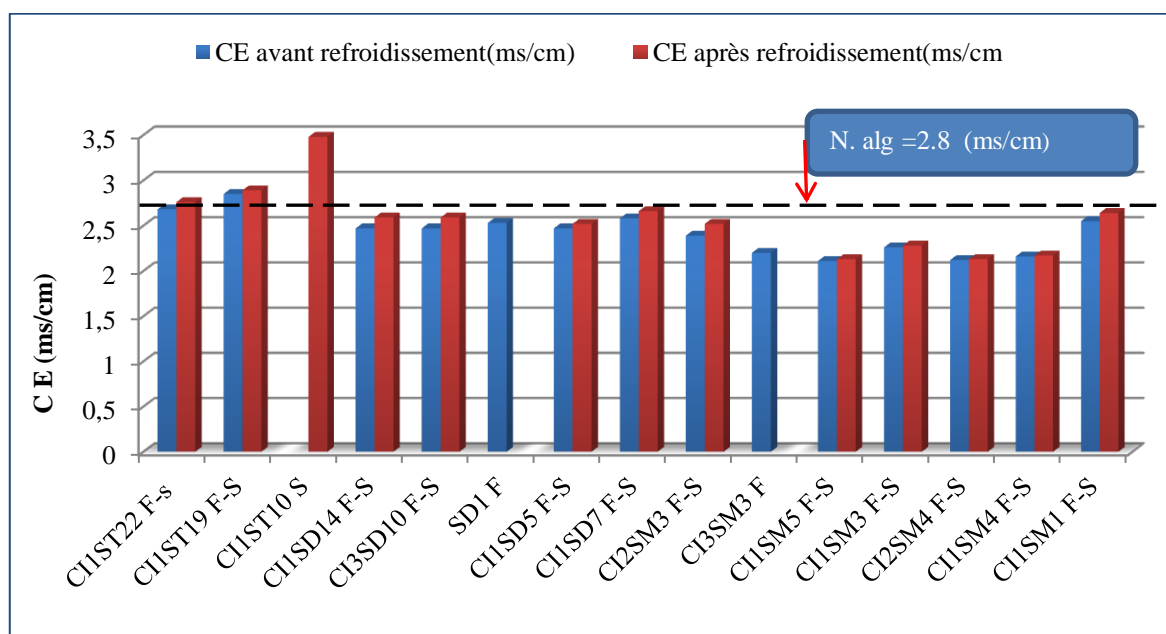


Figure 23: Conductivité électrique des eaux du Continental Intercalaire (la vallée d'oued Righ).

4. Les cations

4.1 Calcium (Ca^{2+}) : Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature (Djouadi, 2015), leur présence dans l'eau est liée principalement à deux origines naturelles soit la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3), soit la dissolution des formations gypseuses ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Hidaoui, 2015). Il est considéré comme un composant majeur de la dureté de l'eau.

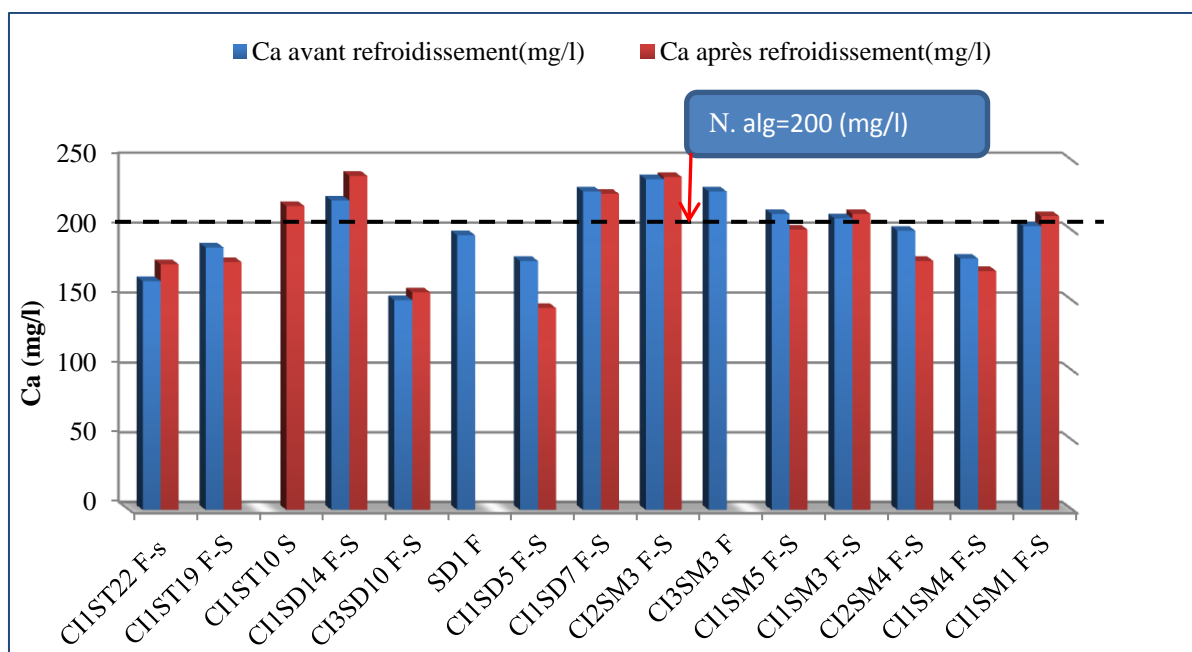


Figure 24: Concentrations du Calcium dans les eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'oued Righ).

L'histogramme de variation des teneurs en calcium (fig.24) montre que la concentration en calcium varie entre 150 et 237mg/l (forages CI3SD10 et CI2SM3), la majorité des forages ne répond pas aux normes établis par la réglementation algérienne (200 mg/l). L'origine de ces teneurs élevées dans la nappe du CI semble liées à la dissolution des calcaires et de certains évaporites (Zerrouki, 2017).

Après le refroidissement, on constate une diminution des concentrations dans la plupart des stations à l'exception de quelques forages qui ont subis une augmentation des teneurs en calcium sous l'effet de la variation de température et du pH.

4.2 Magnésium (Mg^{2+}) : C'est un élément qui accompagne souvent le calcium, il provient de la dissolution des dolomies, des calcaires dolomitique et des minéraux ferromagnésiens. La variation des concentrations du magnésium est presque similaire à celle du calcium (Gaagai, 2009). La dureté manganésienne de l'eau représente ordinairement le tiers de la dureté totale (Sari, 2014).

La figure 25 montre que les concentrations en magnésium dans toutes les forages et les stations sont au-dessous de la norme algérienne (150 mg/l), elles sont comprises entre 60mg/l au forage CI1SD7 et 109mg/l au forage CI1ST22.

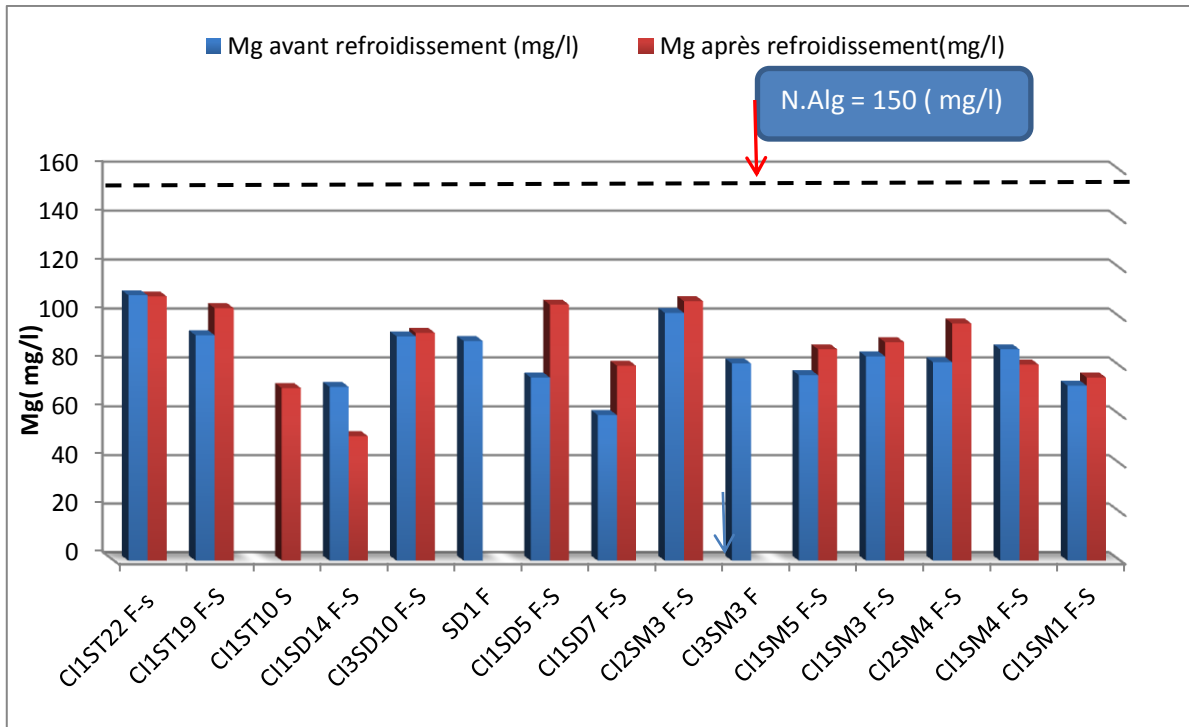


Figure 25 : Concentrations du magnésium dans les eaux du Continental Intercalaire (Vallée d’oued Righ).

4.3 Sodium (Na⁺) : Le sodium est le sixième élément le plus abondant dans la croûte terrestre, il représente 2,83% sous toutes ses formes. Il provient essentiellement de la dissolution de l’Halite. Le sodium est nécessaire pour le fonctionnement des muscles et des nerfs, mais trop de sodium peut augmenter le risque d’hypertension artérielle. On note aussi les eaux trop chargées en sodium devient saumâtre prennent un goût désagréable. Pour des considérations liées à des critères gustatifs (in Fennich, 2016).

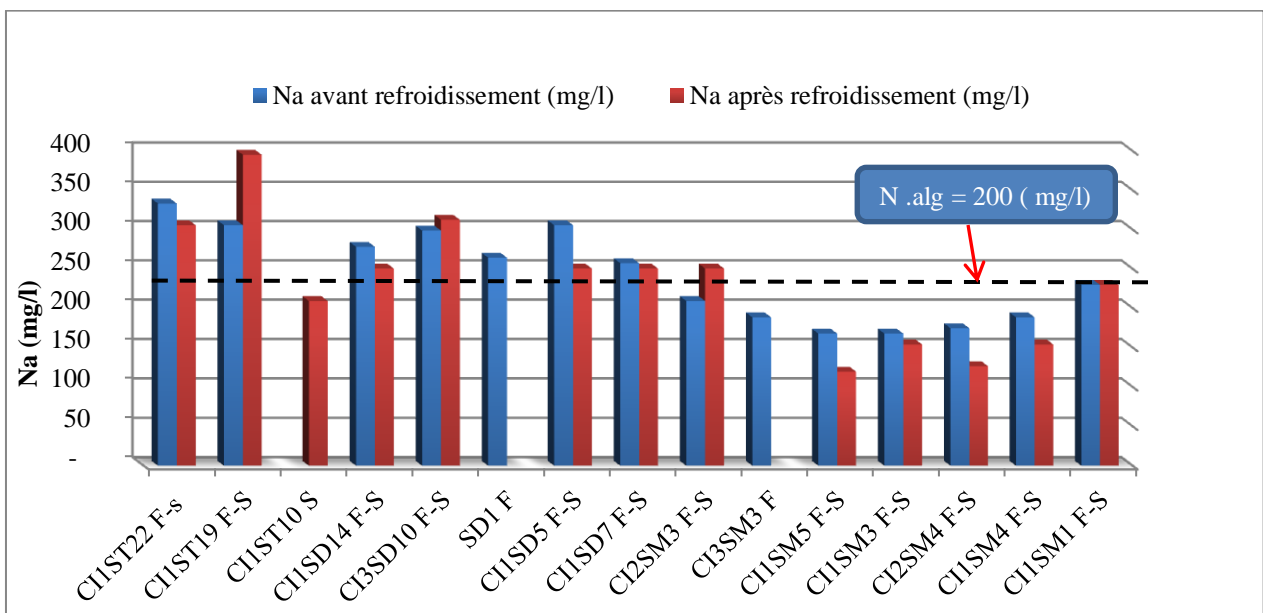


Figure 26 : Concentrations en sodium dans les eaux du Continental Intercalaire (Vallée d’oued Righ).

Les eaux du Continental Intercalaire (fig.26) renferment les concentrations en sodium dépassant la norme algérienne de l'eau potable (200mg/l) sauf pour les forages (CI1SM5, CI1SM3, CI2SM4, CI1SM4). La teneur maximale est de l'ordre de 333 mg/l enregistrée au forage CI1ST22, alors que la valeur minimale est de 167mg/l observée au CI1SM3 et CI1SM5.

Après le refroidissement, on remarque une augmentation des teneurs en sodium dans les stations suivantes : CI1ST19 S, CI3SD10S et CI2SM3S, avec respectivement des concentrations de 395mg/l, 312mg/l et 250mg/l. Cette augmentation des teneurs en Na^+ due au phénomène d'échange cationique (Chaib, 2013).

4.4 Potassium (K^+) : Le potassium est assez abondant sur la terre, mais peu fréquent dans les eaux. En effet, il est facilement adsorbé et recombinaé dans les sols notamment sur les argiles. Les sources principales de potassium sont les roches cristallines, mais dans des minéraux moins altérables comme ceux qui contiennent du sodium, les évaporites (sylvinite), les argiles potassiques et de la dissolution des engrais chimique (NPK) (Zahi, 2014).

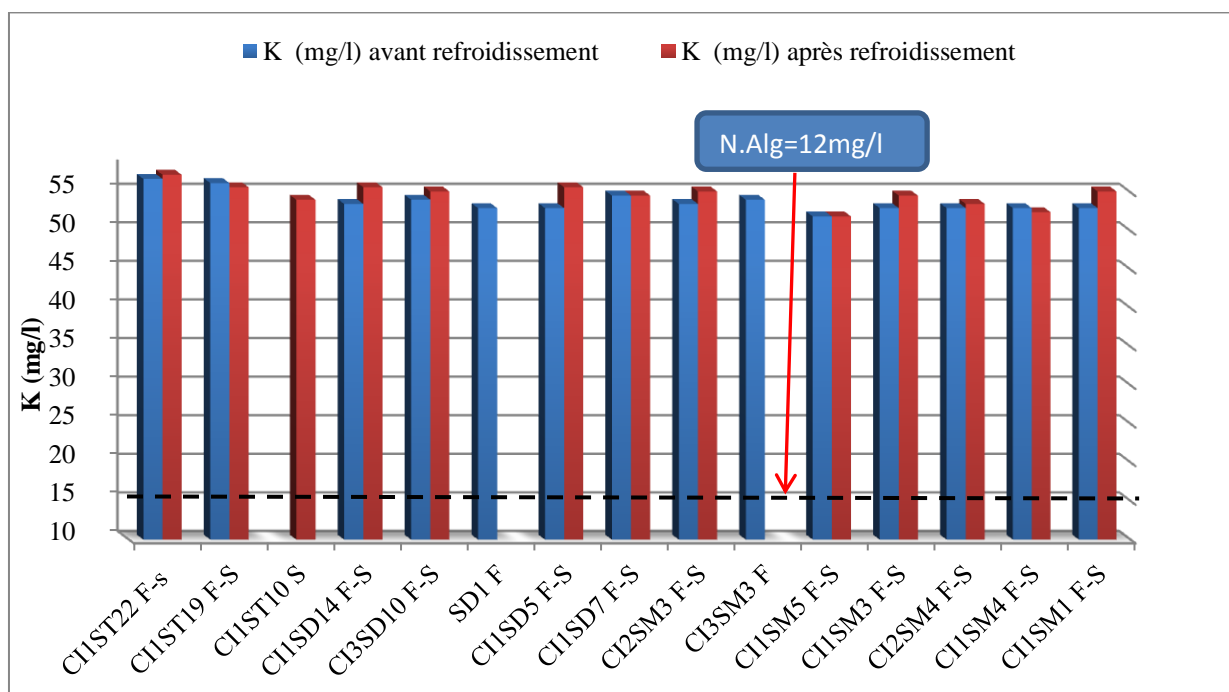


Figure 27: Concentrations du potassium dans les eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'oued Righ).

Les valeurs du potassium sont presque stables dans les eaux du Continental Intercalaire, elles varient entre 51 et 56mg/l, elles dépassent largement les normes algériennes (12mg/l), correspondant à un échange entre les formations qui passe d'un niveau essentiellement gréseux à un autre carbonaté dolomitique (Aptien) (Zerrouki, 2017).

5. Les anions

5.1 Chlorures (Cl⁻) : Les chlorures peuvent avoir une origine multiple, soit l'intrusion des eaux marines, ou la contamination par des eaux usées, soit la dissolution des sels par lessivage des terrains salifères. La dissolution de ces sels étant très facile d'où leur présence en fortes concentrations dans les eaux ayant traversées les formations argilo-sableuses ou argileuses (Zahi,2014).

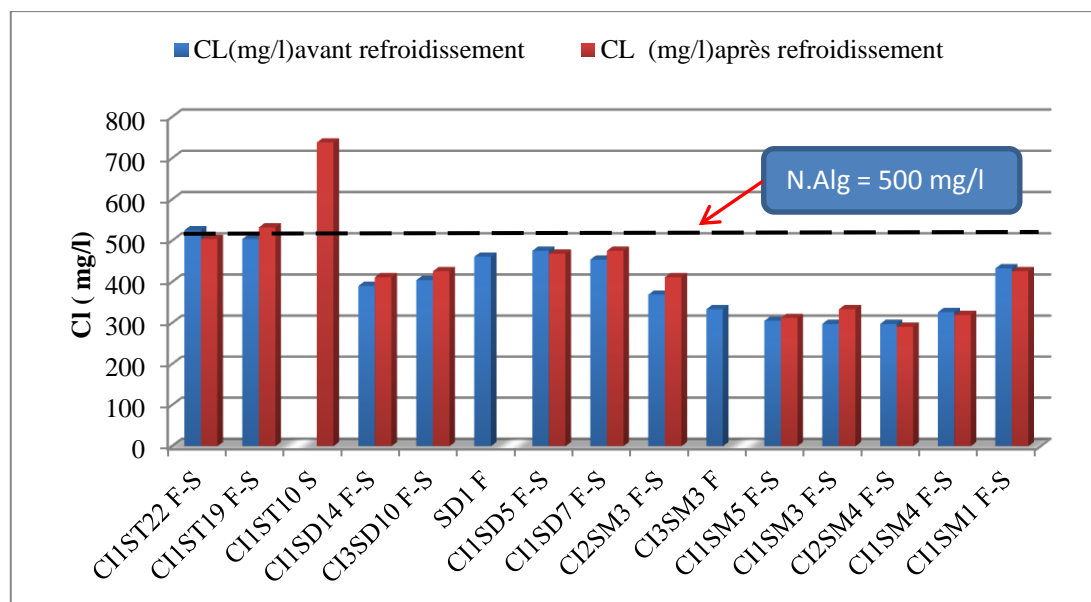


Figure 28: Concentrations des Chlorures dans les eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'oued Righ).

L'histogramme des teneurs en chlorures (fig.28), montre que les teneurs en Cl⁻ oscillent entre 298mg/l au forages (CI1SM3 et CI2SM4) à El Meghair et 525mg/l au forage (CI1ST22) qui se situe à Sidi Slimane. Elles dépassent la norme algérienne (500mg/l) au niveau de deux forages (CI1ST19 et CI1ST22), respectivement avec 504 et 525 mg/l. Ces valeurs élevées des teneurs en Cl⁻ sont attribuées à la dissolution de l'halite contenue dans les évaporites (Chaib et al, 2013).

5.2 Sulfates (SO₄²⁻) : Les origines des sulfates dans les eaux sont variées, elles sont liées à l'eau de pluie (évaporation d'eau de mer) et à la mise en solution des roches sédimentaires évaporitiques, notamment les formations gypseuses, selon la relation :



La figure 29 montre que les teneurs en sulfates de tous les forages dépassent la norme Algérienne (400 mg/l), avec un maximum de 900 mg/l à El Meghair (forages CI3SM3) et un minimum de 534mg/l à Sidi Amrane (forage CI1SD7). Ces fortes teneurs en sulfates dans les eaux proviennent essentiellement de la dissolution des formations gypseuses (CaSO₄, H₂O), l'anhydrite et des évaporites.

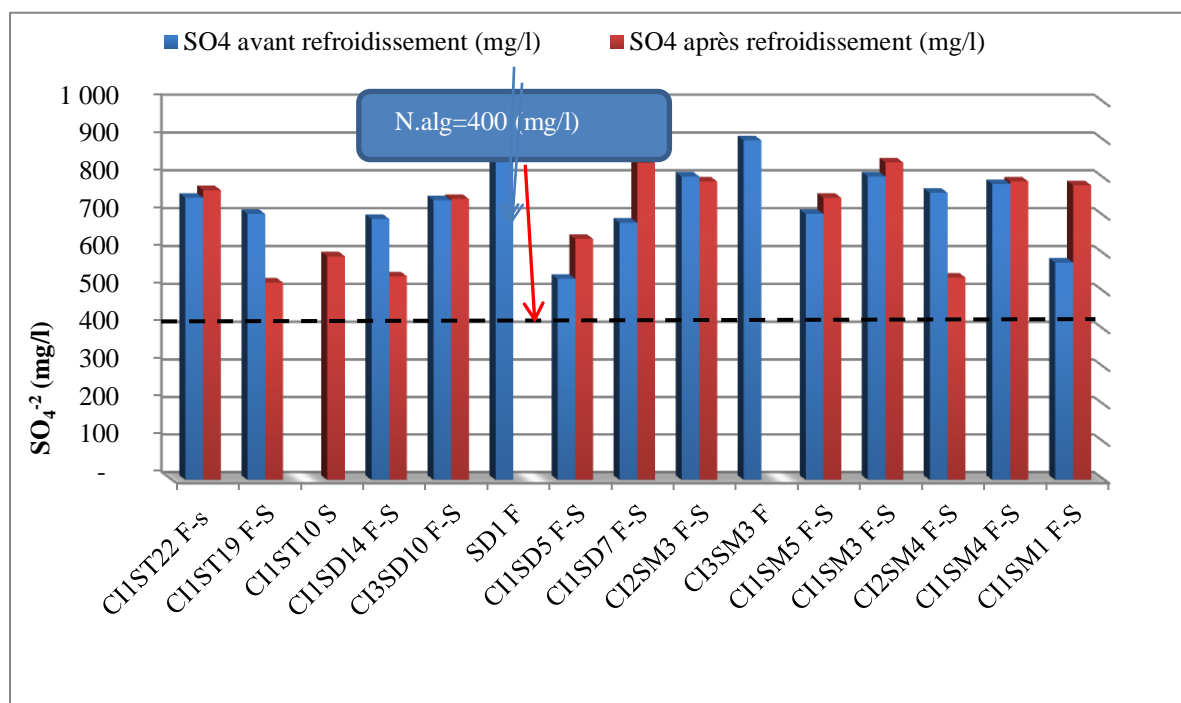


Figure 29: Concentrations des sulfates dans les eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'oued Righ).

5.3 Bicarbonates (HCO_3^-): Les bicarbonates résultent de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique (Hadeif, 2018), leur origine principale est la dissolution des roches carbonatées gypsifères selon l'équation suivante :



L'histogramme des bicarbonates (fig.30) montre que les teneurs en bicarbonates varient entre 195 et 263mg/l, avec une légère diminution des concentrations après refroidissements, cette diminution est suivie par une augmentation des valeurs du pH qui dépassent la valeur de 10 après le refroidissement des eaux. Cette dernière conjuguée à la forte pression des eaux provoque la transformation des bicarbonates au carbonate et la libération du CO_2 selon la formule précédente.

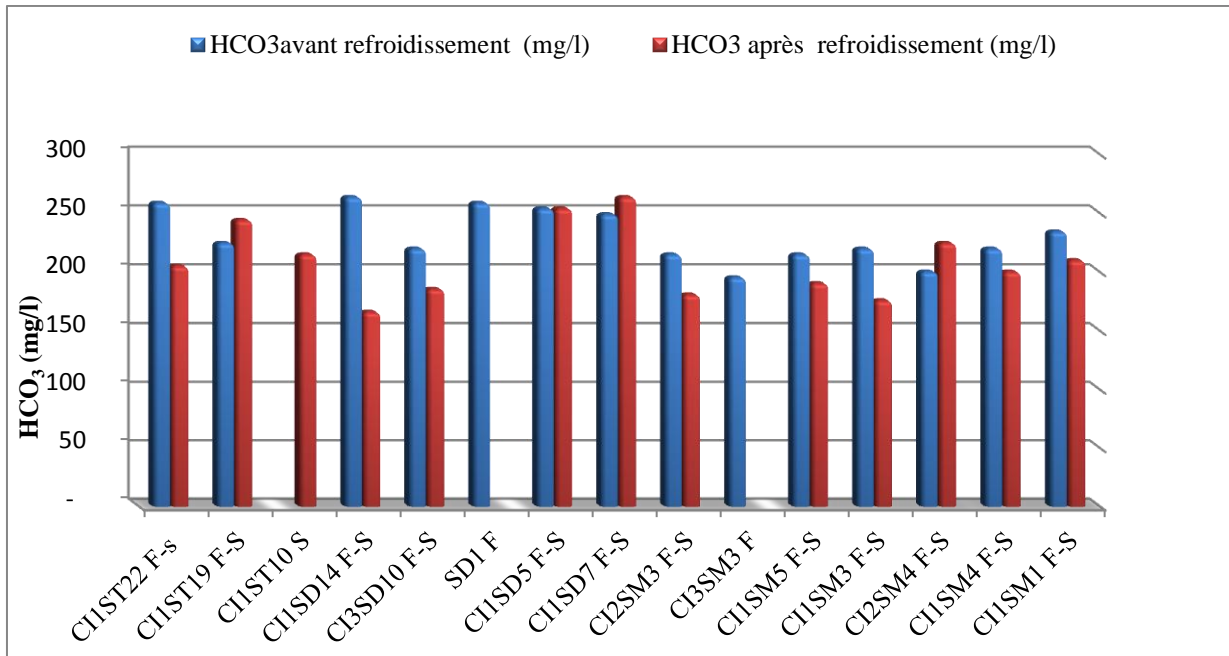


Figure 30: Concentrations des Bicarbonates dans eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'oued Righ).

5.4 Les carbonates (CO₃²⁻) : Les carbonates de calcium est peu soluble, la solubilité apparente des carbonates de calcium varie en fonction du pH, il commence à précipiter à des pH = 8.3 à partir de l'anion hydrogénocarbonate :

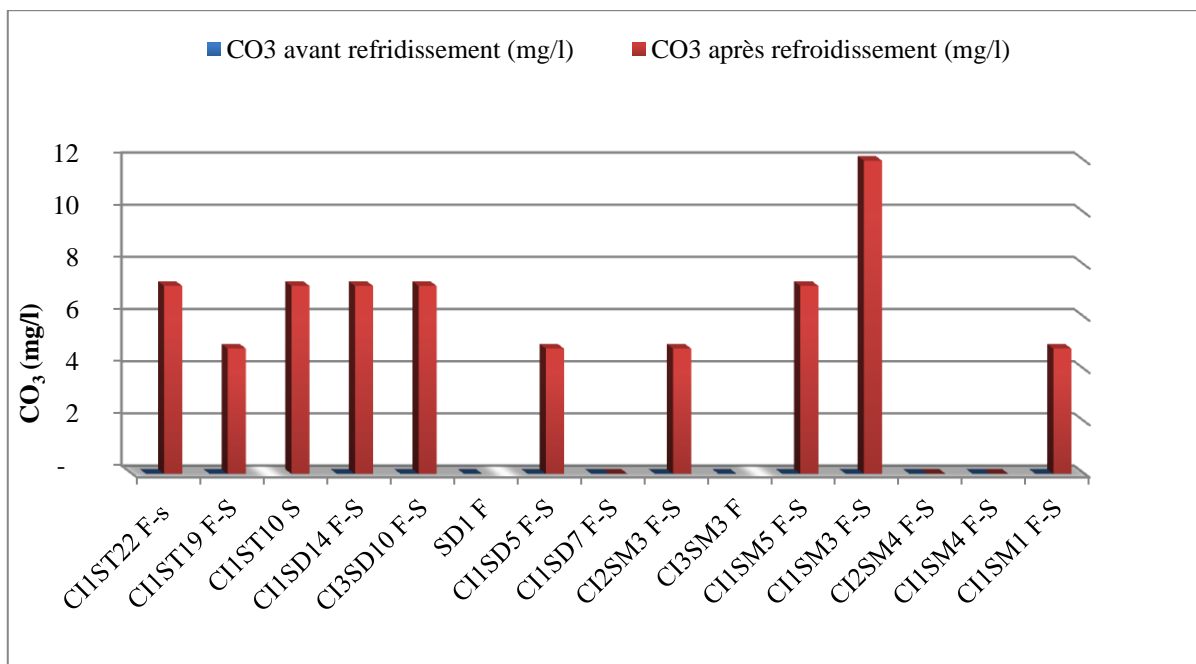
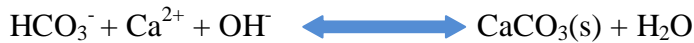
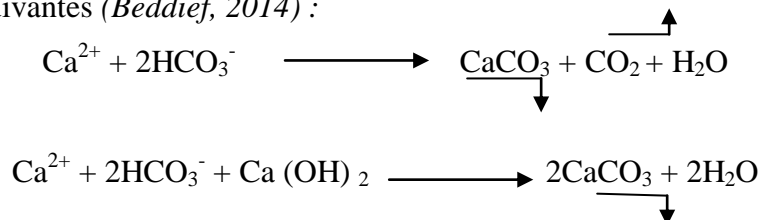


Figure 31 : Concentrations des carbonates des eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'oued Righ).

D'après la figure 31, on remarque la présence des ions carbonatés est en relation directe avec la température et le pH des eaux, car les ions carbonatés n'apparus qu'après

l'abaissement de température (refroidissement) et l'augmentation du pH pour atteindre 12 mg/l après, cependant les teneurs sont nuls avant refroidissement.

Les ions bicarbonates ont une certaine importance, puisqu'ils constituent une source d'ions carbonates, lesquels favorisent la précipitation de Ca^{2+} sous la forme de $CaCO_3$ lorsque la température est diminuée. Cette précipitation, qui a lieu dans des bouilloires est régie par les équations suivantes (Beddief, 2014) :



6. Dureté ou Titre Hydrotimétrique (TH)

La qualité d'une eau est caractérisée par sa dureté ou le titre hydrotimétrique (TH), qu'est directement liée à la nature des terrains traversés. Elle est mesurée par rapport aux teneurs en carbonate de calcium et de magnésium, elles proviennent des roches calcaires ou dolomitique et la présence du CO_2 favorise cette dissolution (Hadeif, 2018). Le titre hydrotimétrique est donné par la formule suivante :

$$TH = (r Ca^{+2} + r Mg^{+2}) * 5 \text{ (}^\circ F\text{)}$$

Avec : r Ca : quantité en réaction du calcium exprimée en méq/l.

r Mg : quantité en réaction du magnésium exprimé en méq/l.

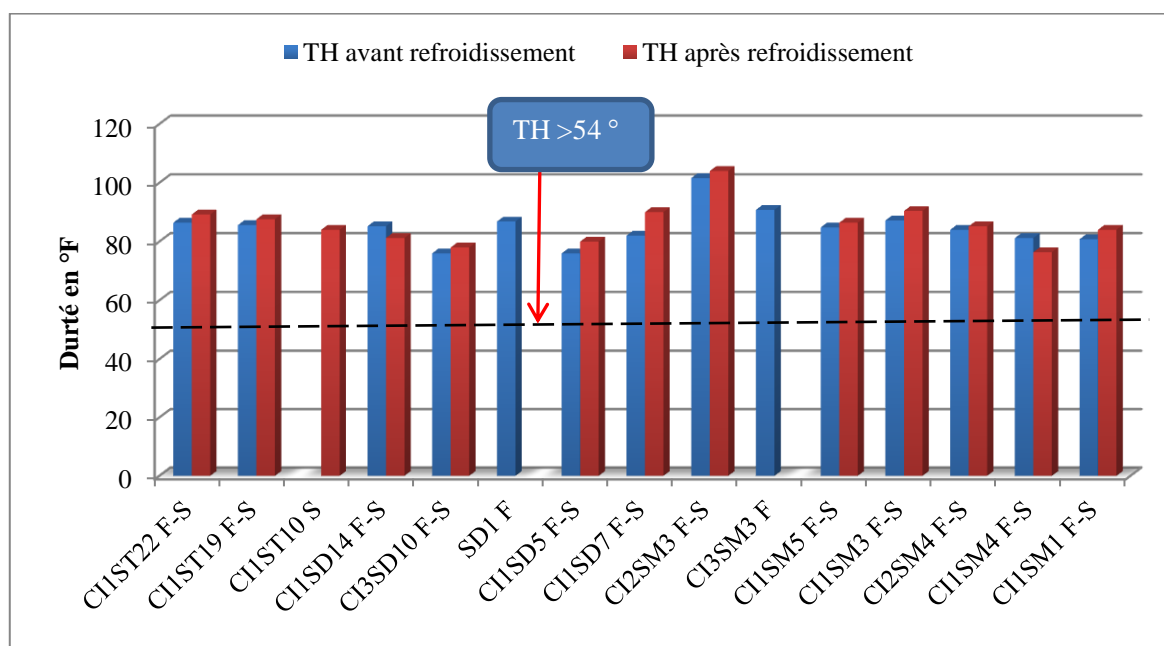


Figure 32 : Dureté des eaux du Continental Intercalaire (Vallée d'Oued Righ).

D'après la figure 32, on constate que les eaux de la nappe continental intercalaire de la région d'oued Righ ont une classe « très dure » ($TH > 54^\circ F$) où les valeurs de la dureté oscillent entre 76 et $102^\circ F$, ces fortes valeurs dues probablement à la température élevée des eaux, qui accélère et favorise la dissolution de certains sels, tels que le $CaSO_4$, le $CaCO_3$ et le $(Mg,Ca)CO_3$.

7. Entartrage

L'entartrage est défini comme étant la production d'un solide cristallin dure à partir d'une solution liquide (Chevolet, 1996). Les dépôts incrustants appelés communément tartres sont constitués essentiellement de sels alcalino-terreux (Calcium et magnésium). La forte température des eaux entraîne des problèmes de tartres au niveau des conduites, lorsqu'il y a détente (baisse de pression) ou refroidissement de l'eau, les sels minéraux (sulfates de calcium ou carbonates de calcium) précipitent et forment des dépôts adhérents aux parois. Ce problème d'entartrage entraîne l'augmentation de la dépense énergétique ainsi que l'inefficacité de la canalisation de l'eau avec le temps. Sur le plan économique le phénomène d'entartrage des conduites génère des dépenses excessives pour leur réhabilitation. Il est possible de déterminer indirectement si une eau est agressive, incrustante ou corrosive grâce à différents indices, à savoir l'indice de Ryznar et l'indice de Langelier (Zahi et al, 2011).

7.1 Les indices d'entartrage : Les eaux de distribution ont des compositions très différentes suivant leur origine. Plusieurs facteurs peuvent aussi avoir une influence sur le pouvoir entartrant de l'eau ; la dureté en calcium, l'alcalinité, la température, le pH, et la qualité de l'eau qui peut être déterminée à partir de certains indices, parmi lesquelles:

7.1.1 L'indice de Langelier : C'est l'indice le plus utilisé pour apprécier le caractère agressif ou entartrant (incrustant) d'une eau, Cet indice est défini de la façon suivante (Zahi et al, 2011) :

$$I_L = pH - pH_s.$$

Avec : I_L : indice de Langelier

pH: pH mesuré in-situ

pH_s : pH de saturation en calcite

Si : $I_L > 0$: l'eau est incrustante. Il y a formation d'une couche de carbonate de calcium.

Si : $I_L < 0$: l'eau est agressive, sous saturée en $CaCO_3$, dissout le calcaire sous l'action du CO_2 agressif

Tableau 9 : Classification des eaux de la nappe Albienne selon l'indice de Langelier.

Forage	pH	pHs	I _L	Observation	Après refroidissement	pH	pHs	I _L	Observation
CI1ST22	9.02	6.58	2.44	L'eau est entartrante et fait précipiter le carbonate de calcium.	CI1ST22 S	7.65	6.90	0.75	L'eau est entartrante et fait précipiter le carbonate de calcium
CI1ST19	8.77	6.54	2.23		CI1ST19 S	9.5	6.84	2.66	
					CI1ST10 S	9.22	6.91	2.31	
CI1SD14	9.29	6.46	2.83		CI1SD14 S	10.51	6.99	3.52	
CI3SD10	9.88	6.73	3.15		CI3SD10 S	10.46	7.09	3.37	
SD1	8.93	6.56	2.37						
CI1SD5	9.24	6.54	2.70		CI1SD5 S	9.01	7.12	1.89	
CI1SD7	9.56	6.44	3.12		CI1SD7 S	8.95	6.89	2.06	
CI2SM3	7.53	6.41	1.12		CI2SM3 S	8.08	6.82	1.26	
CI3SM3	7.09	6.44	0.65						
CI1SM5	8.14	6.41	1.73		CI1SM5 S	8.08	6.58	1.50	
CI1SM3	8.2	6.44	1.76		CI1SM3 S	9.42	6.84	2.58	
CI2SM4	8.56	6.49	2.07		CI2SM4 S	8.56	6.55	2.01	
CI1SM4	9.06	6.53	2.53		CI1SM4 S	8.37	6.59	1.78	
CI1SM1	8.97	6.51	2.46		CI1SM1 S	9.95	7.00	2.95	

Le tableau ci-dessus (tab.9), illustre les résultats de mesures de l'indice de Langelier des eaux du continental intercalaire avant et après le refroidissement, il montre que toutes les valeurs de l'indice de Langelier sont supérieures à zéro ($I_L > 0$), donc les eaux de la nappe du continentale intercalaire sont des eaux incrustantes. Ce comportement favorise la précipitation et la formation d'une couche de carbonate de calcium (entartrage).

7.1.2 Indice de Ryznar ou indice de stabilité : C'est un indice empirique destiné pour déterminer le caractère corrosif ou entartrant des eaux (Zahi et al, 2011).

L'indice de Ryznar est donné par la relation suivante : $I_R = 2pHs - pH$

Avec pHs est le pH de saturation de calcite calculé par le logiciel Diagramme.

Tableau 10: La tendance entartrant ou corrosive de l'eau selon l'indice de Ryznar.

Indice de Ryznar	Tendance
$I_R < 5.4$	Eau fortement entartrante
$5.4 < I_R < 6.2$	Eau faiblement entartrante
$6.2 < I_R < 7$	Eau en équilibre
$7 < I_R < 8.7$	Eau légèrement corrosive
$I_R < 8.7$	Eau fortement corrosive

Tableau 11 : Classification des eaux du Continental Intercalaire selon l'Indice de Ryznar.

Forage	pH	pHs	I _R	Observation	Après refroidissement	pH	pHs	I _R	Observation
CI1ST22	9.02	6.58	4.14	Fortement Entartrante	CI1ST22 S	7.65	6.90	6.14	Faiblement Entartrante
CI1ST19	8.77	6.54	4.32		CI1ST19 S	9.5	6.84	4.18	Fortement Entartrante
					CI1ST10 S	9.22	6.91	4.60	
CI1SD14	9.29	6.46	3.63		CI1SD14 S	10.51	6.99	3.47	
CI3SD10	9.88	6.73	3.58		CI3SD10 S	10.46	7.09	3.72	
SD1	8.93	6.56	4.19						
CI1SD5	9.24	6.54	3.84		CI1SD5 S	9.01	7.12	5.23	
CI1SD7	9.56	6.44	3.32		CI1SD7 S	8.95	6.89	4.83	
CI2SM3	7.53	6.41	5.29			CI2SM3 S	8.08	6.82	5.56
CI3SM3	7.09	6.44	5.79	Faiblement Entartrante					
CI1SM5	8.14	6.41	4.68	Fortement Entartrante	CI1SM5 S	8.08	6.58	5.08	Fortement Entartrante
CI1SM3	8.2	6.44	4.68		CI1SM3 S	9.42	6.84	4.26	
CI2SM4	8.56	6.49	4.42		CI2SM4 S	8.56	6.55	4.54	
CI1SM4	9.06	6.53	4.00		CI1SM4 S	8.37	6.59	4.81	
CI1SM1	8.97	6.51	4.05		CI1SM1 S	9.95	7.00	4.05	

D'après tableau précédent (*tab.11*), on constate que les valeurs de l'indice de Ryznar calculer avant le refroidissement sont inférieures à 5,4 indiquant que les eaux de la nappe albienne ont un caractère fortement entartrant à l'exception du forage CI3SM3 ($I_R = 5,79$) qui se caractérise par des eaux faiblement entartrante. Après le refroidissement, on remarque toujours l'indice de Ryznar inférieure à 5,4 malgré la légère augmentation du pHs. Concernant les forages CI1ST22 et CI2SM3, ont subi un changement de comportement (faiblement entartrant), probablement lié à la variation de la température et le pH ou aux échanges de bases après le refroidissement.

Dans une eau qui initialement ne dépose pas de tartre carbonaté on aura une précipitation si :

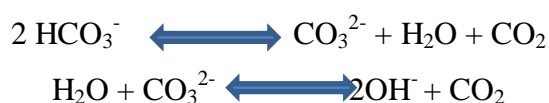
- La présence de calcaire dans l'eau : La présence de sels de calcium et, dans une moindre mesure, de magnésium dans l'eau est le premier facteur qui contribue au caractère entartrant de l'eau. Ainsi, plus la dureté de l'eau est élevée, plus il y a prédisposition au dépôt de calcaire (*Beddief, 2014*). Mais la présence de sels de calcium dans l'eau n'est pas à elle seule

suffisante pour provoquer l'entartrage, par exemple les forages CI1ST22 et CI2SM3 (la dureté est élevée mais les conditions ne sont pas favorables à l'entartrage).

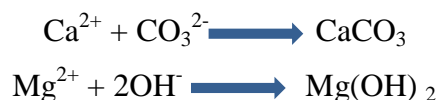


- A une température donnée : La réaction chimique qui provoque la précipitation du carbonate de calcium est largement favorisée par l'élévation de la température qui, en libérant du gaz carbonique, accélère la précipitation du tartre (*Beddief, 2014*).
- la concentration en carbonates vient à augmenter : comme nous le verrons plus loin si on a par exemple augmentation du pH qui entraînera une augmentation de la concentration en carbonates (*Melkia, 2010*).
- dégazage de CO_2 : l'échange de CO_2 est le principal moteur de tout entartrage

Le tartre alcalin est dû principalement à la présence de carbonate et d'hydroxydes, résultant de la décomposition thermique de l'ion bicarbonate (HCO_3^{-}).



L'élévation de la température provoque l'élimination du CO_2 donc obligatoirement la formation d'ion CO_3^{2-} , lorsque les ions de calcium, de magnésium et les ions de carbonates et hydroxyde contenus dans l'eau nous donnent respectivement :



La dissolution de ce tartre est réduite au cours de l'augmentation de la température. Donc le degré de formation de ces deux précipités dépend du bicarbonate et de la température (*Ghettas, 2010*).

8. Aptitude des eaux à l'irrigation

La qualité des eaux d'irrigation est un paramètre important à considérer, non seulement dans l'étude de l'impact direct sur les produits agricoles, mais aussi dans celle de l'impact indirect sur les sols par modification de leurs propriétés physiques et chimiques (*Suarez et al., 2006*).

Dans le but d'étudier la qualité des eaux de l'aquifère à l'irrigation, on a fait recours à la méthode de Richards. Il met en évidence différentes classes d'eau qui ont été définies sur la base du sodium absorbable (SAR) (*Chaib et al, 2013*). Le SAR est défini par la relation suivante :

$$SAR = \frac{Na^+}{\sqrt{\frac{Ca^{++} + Mg^{++}}{2}}} ; \text{ les ions sont exprimés en méq/l}$$

Après avoir reporté tous les points d'eau sur le diagramme de Richards (*fig.33*), on a pu dégager la présence de classes suivantes :

- *La qualité Admissible C3S1* : cette classe est représentée par un seul échantillon. C'est une eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes aux sel sur des sols bien drainés. l'évolution de la salinité doit être cependant contrôlée.
- *La qualité médiocre (C4S1 et C4S2)* : 96 % des échantillons sont contenu dans cette classe. L'eau est fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces bien tolérantes au sel et sur des sols bien drainés et lessivés.

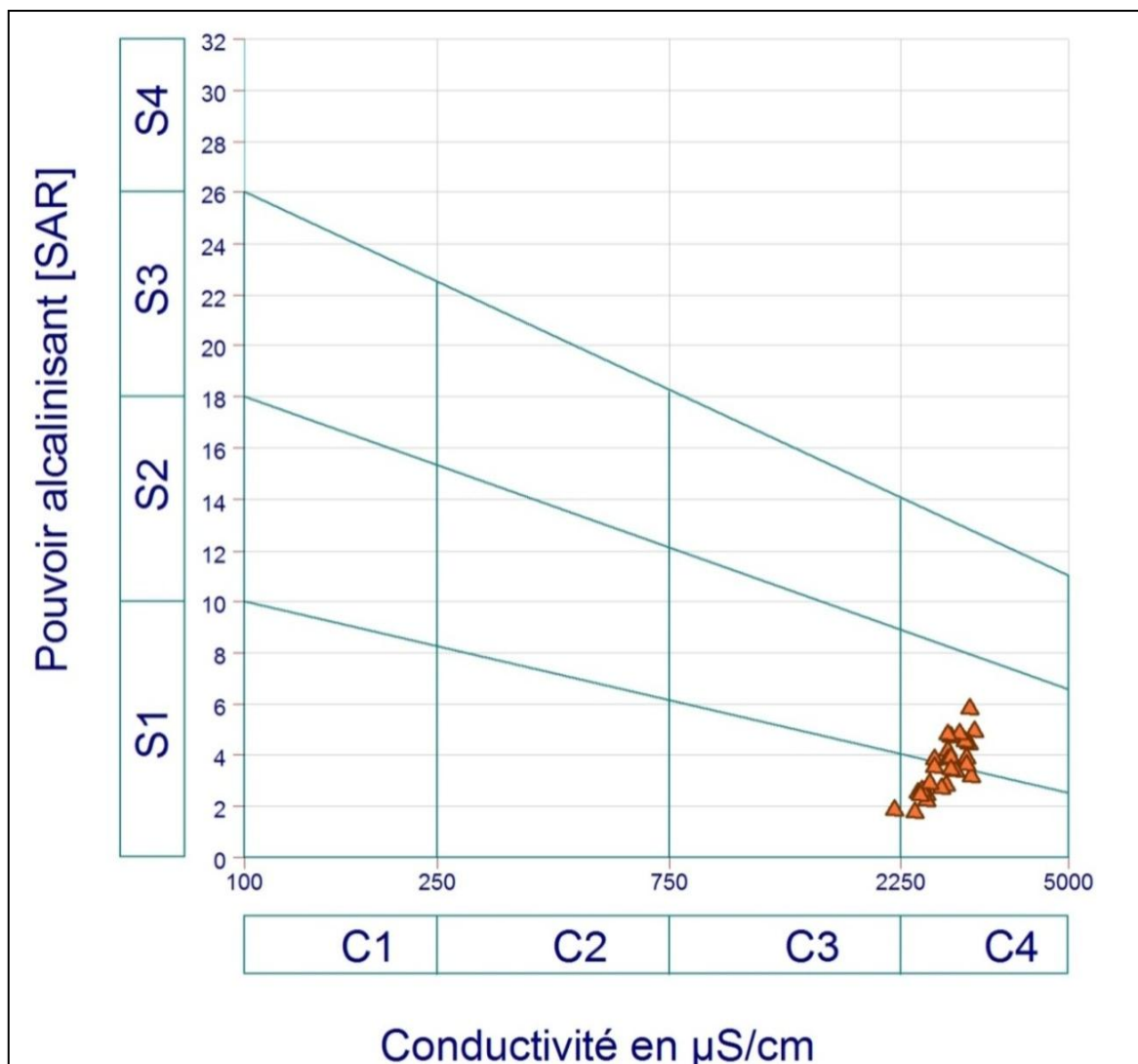


Figure 33 : Diagramme de Richards des eaux de la nappe du Continental Intercalaire(Vallée d'Oued Righ).

9. Conclusion

L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, a montré que les eaux géothermales de la nappe albienne dans la vallée de Oued Righ sont caractérisées par des températures (48,8 à 65,5 °C), un pH assez proche de la neutralité avec une tendance vers la basicité après le refroidissement, une dureté excessive (varie entre 76 et 102°F) et une forte minéralisation atteint 1,8g/l, avec la dominance de deux faciès chimiques, l'un sulfaté et chloruré sodique et l'autre sulfaté calcique.

La projection des eaux sur le diagramme de Richards montre que les eaux ont une qualité admissible et parfois médiocre, donc elles ne se prêtent pas à l'irrigation (conductivité élevée) sans contrôle et suivi. Les indices de Langelier et Ryznar montre que les eaux des forages ont un caractère faiblement à fortement entartrant et devient pratiquement fortement entartrant après le refroidissement. L'exploitation de ces eaux tant pour l'irrigation que pour les besoins domestiques, a générée d'énormes problèmes par suite de dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques. De ce fait, il est impératif de définir les procédés les plus adéquats qui permettent d'éliminer la dureté de l'eau et de réduits les risques de formation de tartre.

Chapitre V

Avantages et

Inconvénients des

eaux thermales

1. Introduction

Aujourd'hui, la géothermie est la troisième énergie renouvelable effectivement exploitée dans le monde après la biomasse et l'hydraulique. L'utilisation de l'énergie géothermique est en pleine expansion, elle est développée dans une soixantaine de pays, comme par exemple les Etats-Unis, le Japon, l'Islande, la Nouvelle-Zélande, les Antilles françaises et la Suisse (*Ouali et al, 2007*).

En Algérie, dans le domaine de la géothermie, plusieurs études ont été menées principalement sur le Nord algérien (*Dib, 1985 ; Abouriche et al, 1988 ; Rezig, 1991 et 1992...etc*). Ces études montrent que le Nord de l'Algérie compte trois zones à fort gradient géothermique sont mises en évidence ; au Nord-Ouest, au Nord-est et au Centre du Nord d'Algérie(*Ouali, 2006 ; Fekraoui, 2007*).Concernant le Sud algérien plusieurs études (*Oussedik, 2000 ; Kedaid, 2004 ; Ouali, 2006 et Ouali et al, 2007 ; Messaitfa et al, 2007*)ont été menées principalement sur les eaux du Continentale Intercalaire, est un réservoir qui représente la principale source des eaux thermales, ces eaux sont destinées à l'AEP, chauffage des serres et l'irrigation après leur refroidissement. Dans cette partie, nous allons essayer de synthétiser les différents domaines utilisateurs des eaux géothermales du Continentale Intercalaire ainsi que ses avantages et ses inconvénients.

2. Les eaux géothermales

Une eau thermale est une eau souterraine naturellement chaude à son émergence (source, puits jaillissant) et utilisable de ce fait à des fins particulières tel que : thermalisme, hydrothérapie, chauffage...etc. L'exploitation de la géothermie dépend du type de gisements et du fluide géothermique existant, ainsi, se distingue trois types de géothermie dans le monde.

2.1. La géothermie haute énergie

La géothermie haute énergie, exploite les gisements de vapeur sèche ou humide (mélange eau et vapeur). Ces gisements se caractérisent par des températures supérieures à 150°C. On rencontre cette géothermie haute énergie dans les régions volcaniques (volcans) et sismiques (frontières de plaques) ou le gradient géothermique est particulièrement élevé (*Ouali et al, 2007*).

La géothermie haute énergie est destinée principalement à la production d'électricité. La vapeur, qui est puisée dans le réservoir géothermique, est déchargée dans une turbine, reliée à un alternateur pour la production d'électricité. La vapeur sèche est directement utilisée alors que la vapeur humide qui est plus fréquente nécessite l'utilisation d'un séparateur. Un

exemple de ce type de géothermie est donné par la centrale de Bouillante en Guadeloupe-France (Ouali et al, 2007).

2.2. La géothermie basse énergie

La géothermie basse énergie se caractérise par une température comprise entre 30°C et 150°C, elle est rencontrée à une profondeur moyenne de 1000 à 2500 m, dans les formations perméables remplies d'eau situées principalement dans les bassins sédimentaires de grandes dimensions. Elle est destinée principalement au chauffage urbain et au chauffage de serres.

2.3. La géothermie très basse énergie

La géothermie très basse énergie est rencontrée à de faibles profondeurs (nappes phréatiques) où la température est de l'ordre de 10 à 30°C. Elle est utilisée entre autres pour la pisciculture, l'horticulture et le séchage de produits agricoles.

3. Domaines d'application des eaux géothermales de la nappe Albienne

3.1. Chauffage des serres

Les eaux chaudes de la nappe Albienne sont utilisées essentiellement pour la balnéologie. Une place particulière doit être accordée à ces ressources qui présentent des réserves importantes et des températures non négligeables, atteignant dans la partie Est les 70°C.

Les domaines d'applications sont variés, ces eaux peuvent convenir pour le chauffage urbain et pour des usages agricoles plus précisément pour le chauffage des serres qui offrent aux maraîchers et aux horticulteurs la possibilité de maîtriser le climat (température, humidité et lumière) et de produire, au moment où ils le souhaitent, légumes, fruits, et plantes vertes (tab.12).

Le chauffage des serres est une pratique qui a vu le jour dans les années soixante. La méthode traditionnelle consiste à s'équiper d'une chaudière à l'huile, au gaz ou au charbon produisant de l'eau chaude à haute température (80°C) qui circule à l'intérieur des serres dans des tubes métalliques aériens. Les eaux géothermiques constituent une nouvelle source d'énergie pour le chauffage des cultures sous serre. Cette technique est utilisée dans plusieurs pays.

Tableau 12. Les possibilités d'utilisation des eaux chaudes de l'aquifère Albien (Kedaid, 2004)

Température de l'eau (°C)	Possibilités d'utilisations
70	Réfrigération (limite inférieure)
60	Elevage d'animaux
50	Culture de champignons, Chauffage de serre par tuyau aérien
40	Chauffage urbain limite inférieure
30	Fermentation Chauffage de serre par paillages radiant
20	Pisciculture

3.1.1 Chauffage des serres en Algérie

La première serre géothermique expérimentale a été installée en 1984 à Hammam Meskhoutine. Le système de chauffage est constitué de deux circuits pour éviter tout entartrage dans les conduites de chauffage. Plus tard, entre 1993 et 1997 une expérience a été faite par le Centre de Développement des Energies Renouvelables. Deux projets ont été réalisés respectivement à Ouargla et Touggourt : il s'agit de 18 serres agricoles couvrant une surface chauffée de près de 7200 m². Malheureusement cette expérience n'a pas été généralisée à l'instar de la Tunisie qui a commencé en 1986 par 1 ha et actuellement elle chauffe plus de 104 ha de serre (Kedaid;2004).

En 2010, un projet d'utilisation de la géothermie dans la production agricole, est initié par l'Office National d'Irrigation et de Drainage (ONID) dans le périmètre d'irrigation d'oued Righ. Ce projet consiste à la promotion et l'accompagnement d'opération économique nationale désireuse investir dans la création d'exploitation agricole de production de primeurs utilisant la géothermie et la création d'un site de démonstration. Cette technique, au coût quasi nul, permet d'obtenir les conditions environnementales idéales pour la production de primeur.

En 2011, l'ONID a décidé de créer une serre multichappelle de démonstration économique chauffée à partir des eaux de forage Albien situé à El Meghaier dans la vallée d'oued Righ (W. d'El Oued). Ce complexe, qui est le premier Algérie, utilisera la géothermie produite par les forages profonds pour la production agricole a rendement optimal et à très haute valeur ajoutée. Le projet en question s'étalera sur une superficie globale de 250 ha, dont 40 ha de serre multi chapelle pour la production de primeurs avec des techniques de culture hydroponique. Au nombre de 16, les serres seront installées en trois phases (4 serres pour 10 ha) (tab.13).

Tableau. 13: Les phases du projet d'utilisation de la géothermie dans la production agricole

Phase	1	2	3	Total
Investissement	1. serre multi chapelle 10 ha 2. Pépinière d'un hectare 3. Centrale de manipulation	1. serre multi chapelle 20 ha	1. serre multi chapelle 10 ha 2. 200 ha de culture plein champ y compris centrale	240 ha
Production minimum cumulée de serres	2 500 T	7 500 T	10 000 T	
Création d'emploi direct	100	200	200	500

Impact socio-économique et environnemental du projet :

- Gestion rationnelle de la consommation d'eau par le recours aux techniques d'irrigation localités et exploitation de l'énergie naturelle (Géothermie).
- Intensification de la production qui contribuera à combler le déficit accusé par le marché local.
- Création d'emplois environ 10 emploi/ha de serre et promotion du travail féminin.
- Sédentarisation des communautés du sud et réduction de l'exode rural.
- Valorisation de la qualité gustative des produits due au chauffage et au programme de fertilisation adapté.
- Réduction du risque de contamination du sol et de la nappe d'eau par la culture hors sol.
- Utilisation raisonnée des pesticides et des produits phytosanitaires.

3.1.2 Chauffage des serres en Tunisie

La Tunisie occupe la troisième place dans le monde en termes de superficie plus de 100 ha (après les Etats-Unis : 180 ha et l'Hongrie : 160 ha). Elle exploite la même nappe du Continental Intercalaire que l'Algérie, mais les Tunisiens sont est très avancé dans le domaine du chauffage de serres par la chaleur d'origine géothermique. Des bénéfices importants sont réalisés à travers cette exploitation qui permet de cultiver hors saison toutes sortes de fruits et légumes qui sont principalement destinés à l'exportation (Ouali, 2006).

Les cultures maraîchères sous serres chauffées par les eaux géothermales sont installées dans les zones oasiennes au sud du pays et réparties sur trois gouvernorats comme suit :

- ✓ Le gouvernorat de Gabès avec 37 ha s'est spécialisé dans la culture de tomate (30 ha) destinée principalement à l'exportation,

- ✓ Le gouvernorat de Kébili avec 41 ha s'est par contre spécialisé dans la culture du «Fakous» qui occupe 40% de la superficie suivi par la tomate 28,5% et le melon 22%,
- ✓ A Tozeur et avec 22 ha, c'est le melon qui domine la géoserriculture (30 % de la superficie), suivi par le concombre (19%) et le gombo (18%) (Tlili, 2006).

En fin, on peut récapituler l'impact de cette technique sur l'économie tunisienne par un aperçu en chiffres : 334 exploitations agricoles, 1050 emplois permanent, 110 000 jours de travail occasionnel, 12800 tonnes de primeurs (Tomates, melon, concombre...etc.) et 2200 tonnes d'exportation.

3.2. Utilisation des eaux du Continental Intercalaire à l'alimentation en eau potable et l'irrigation

Vu le problème de forte salinité des eaux de la nappe phréatique et celles du Complexe Terminal, l'exploitation de la nappe Albienne était la seule solution pour répondre aux besoins d'AEP dans la région, notamment les forages de Sidi Mahdi et Sidi Slimane. La qualité de ces eaux (chaudes et minéralisées) pose des problèmes techniques à partir de sa sortie jusqu'à son rejet, notamment le dépôt de tartre, qui touche les réseaux d'irrigation, d'AEP et les ouvrages de refroidissement (*fig.34*).

Auparavant le traitement de ce phénomène se fait soit manuellement par le détartrage des réseaux soit par le traitement chimique à l'origine (l'injection de l'Héxamétaphosphate à grade alimentaire). Actuellement la résolution du problème surtout au niveau des réseaux d'AEP se fait par le remplacement des conduites tous les 4 à 5 années. Après la mise en service des réseaux d'irrigation des deux zones Djamaa et Meghaier réalisés dans le cadre du projet Oued Righ, presque 50% des conduites étaient partiellement entartrées et les tours de refroidissement étaient à l'arrêt.

4. Le refroidissement des eaux du Continental Intercalaire

L'utilisation des eaux chaudes du Continental Intercalaire à l'AEP et l'irrigation, nécessite un abaissement de température (refroidissement), pour cela une tour de refroidissement est un échangeur d'un type particulier qui permet de rejeter de la chaleur dans l'air environnant sous forme à la fois de chaleur sensible et de chaleur latente du fait de l'augmentation de son humidité.

Pour refroidir cette eau, on utilise les tours de refroidissement dans lesquelles l'eau géothermale circule sur des systèmes de planches pour augmenter la surface de contact entre

l'eau et l'atmosphère. L'air étant renouvelé par un ventilateur de grande taille entraîné par un moteur électrique. L'eau émergeant du forage sous pression est transportée en haut de la tour sans qu'il soit nécessaire de la pomper (fig.34). Mais, du fait de la baisse brutale de pression en haut de la tour et de la division de l'eau en pluie dans celle-ci, le dioxyde de carbone se dégage, le pH de l'eau augmente et le carbonate de calcium se précipite selon la réaction :



a) Tour de refroidissement en fonctionnement.

b) Tour de refroidissement en arrêt.

Figure 34 : (a et b) Tours de refroidissement.

5. Adoucissement de l'eau

Les eaux de la Nappe Albienne de la vallée d'Oued Righ, sont fortement minéralisées (1,8 à 2,5 g/l), et ont une dureté très élevée (102°F). Cette dureté est suffisante, dans les conditions de température (55 à 60°C) et de pH (7,3 à 7,5), d'entraîner la formation de tartre. Ce dernier est le problème majeur qui menace de nos jours le devenir des ouvrages hydrauliques (conduites, refroidisseur, vannes, ...) dans la région d'étude. Ce problème a fait l'objet de plusieurs études (Oussedik, 2000 ; Messaitfa et al, 2007 ; Fartas et al, 2011). Ils ont basé sur plusieurs méthodes de déminéralisation et d'adoucissement (Procédé à la chaux, l'électrodialyse....etc).

Les techniques d'adoucissement font appel à trois procédés, à savoir la décarbonatation qui n'élimine que les ions calcium et magnésium liés aux bicarbonates, il s'agit alors d'un

adoucissement partiel, et l'adoucissement total qui élimine l'ensemble des ions calcium et magnésium, mais sans modifier l'alcalinité de l'eau. Le troisième procédé est représenté par la nano filtration qui élimine partiellement les ions calcium, magnésium et bicarbonates. Parmi les procédés de décarbonatation, on trouve : la décarbonatation à la chaux ; la décarbonatation à la soude ; la décarbonatation sur résines échangeuses d'ions du type carboxylique, régénérée par un acide ; et enfin, l'électro-décarbonatation.

6. Entartrage

L'exploitation des eaux de la nappe albienne après leur refroidissement tant pour l'irrigation que pour les besoins domestiques, a générée d'énormes problèmes par suite de dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques (*fig.35*).

Le tartre, est le nom donné à un dépôt cristallin adhérent, est formé principalement par la précipitation du carbonate de calcium, environ 90 % du précipité global. Il est soit alcalin, principalement des carbonates de calcium (CaCO_3) et d'hydroxyde de magnésium ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) ou non alcalin, principalement le sulfate de calcium qui existe sous trois formes: CaSO_4 , $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Ces trois formes sont beaucoup plus solubles que le carbonate de calcium et l'hydroxyde de magnésium. Donc, ces tartres ne se forment que dans le cas où la solution serait sursaturée en sulfate de calcium à des températures élevées. Pour qu'il ait entartrage, deux conditions doivent être réunies :

- La limite de la solubilité doit être dépassée : c'est l'aspect thermodynamique.
- La vitesse de déposition doit être suffisamment rapide : c'est l'aspect cinétique.

6.1 Conséquences de l'entartrage

- Conséquence Hydrauliques : l'accumulation d'une couche de tartre dans les équipements conduit automatiquement à une diminution des sections de passage et une dégradation des états de surface. En réduisant les sections et en dégradant l'état des surfaces, ces tartres fortement adhérents, augmentent, à débit constant, les pertes de charge et par conséquent les dépenses énergétiques liées à la circulation des fluides. Déjà gênantes dans le cas de tuyauteries démontables et nettoyables, ces formations deviennent catastrophiques quand elles affectent les conduites enterrées (*BanNoud, 1993 in Medfouni, 2007*).



Fig. 35: Conséquence de l'entartrage des installations à Touggourt.

- Conséquence Thermiques et Energétiques : l'augmentation de fortes proportions de dépôts entraînent une augmentation de la résistance thermique des parois ce qui diminue le coefficient de conductibilité thermique. Celui-ci influe considérablement sur les performances thermiques des tours de réfrigération et l'efficacité thermique de la tour pouvait chuter de 30 à 50 % pour une masse de dépôts de 240 Kg/m^3 .
- Conséquence Mécaniques : ils sont généralement matérialisés par l'alourdissement des sections porteuses des tours de refroidissement, des réservoirs et des équipements internes qui rendent plus difficile leur manutention.
- Conséquence Bactériologiques : les pommes de douches entartrées ont une section de passage plus faible et l'eau a pour le même débit une vitesse de sortie plus élevée : la production d'aérosols est augmentée et par conséquent le risque d'inhalation est augmenté.
- Conséquences technologiques : on peut citer l'alourdissement des structures porteuses des tours de refroidissement, réservoirs, etc., mais aussi l'alourdissement des équipements internes qui rendent plus difficile leur manutention : les épaisseurs de tartre peuvent même amener à ne plus pouvoir sortir les épingles de réchauffage de ballons de production d'eau chaude.

L'entartrage peut aussi avoir pour conséquences :

- Le blocage des organes de manœuvre des robinetteries,
- L'impossibilité d'obtenir l'étanchéité siège - clapet des robinetteries,
- Le blocage des soupapes de sécurité,
- La diminution du volume utile des réservoirs,
- Des dégradations des états de surface des appareils.
- L'entraînement de particules en suspension qui peuvent être abrasives, de plus l'amorce de corrosions sous dépôts est possible (Melkia, 2010).

7. Les procédés de lutte contre l'entartrage

Il existe un certain nombre de traitements permettant d'arriver à ce résultat parmi lesquels :

- La précipitation chimique.
- La déminéralisation sur échangeurs d'ions.
- La vaccination acide.
- L'inhibition.

Plusieurs voies issues des considérations précédentes permettent de déduire les moyens de lutte contre l'entartrage :

- Empêcher la germination des cristaux par diminution de la concentration en calcium, complexion du calcium, diminution ou le maintien de la teneur en carbonates
- Empêcher la croissance des cristaux par l'utilisation de produits inhibiteurs.

7.1. Diminution de la concentration en calcium

- *Adoucissement ou décarbonatation sur résines* : Utilisation de résines cationiques en cycle sodium ou en cycle hydrogène : le calcium est fixé sur une résine qui lui cède soit du sodium en cas d'adoucissement soit des protons H^+ en décarbonatation.
- *Précipitation homogène* : Par utilisation de réactifs basiques (chaux, carbonate de sodium, soude caustique) on peut éliminer les bicarbonates en les transformant en carbonates qui entraînent la précipitation du calcium et magnésium à concurrence du TAC de l'eau brute. Cette opération (décarbonatation à la chaux, soude, ...) permet d'éliminer la dureté carbonatée : l'eau contient une concentration résiduelle en calcium si le TH est supérieur au TAC. La décarbonatation à la chaux permet de plus de flocculer les colloïdes de l'eau brute.

7.2. Complexion du calcium

Des molécules organiques ont la capacité de former avec les ions métalliques des composés très stables au sein de l'eau appelés complexes. Certaines sont naturellement présentes dans les eaux de surface mais pour les réseaux on utilise des produits tels que les sels de l'EDTA qui permettent non la diminution de la concentration en calcium mais sa mise en solution stable. Ces produits peuvent être aussi utilisés comme moyen de destruction de tartres déjà formés : méthode de détartrage dite "douce".

7.3. Diminution ou maintien de la teneur en carbonates

Vacciner l'eau par ajout d'acide afin de favoriser la forme bicarbonates : Ce traitement ne peut être réalisé que sur de grosses unités lorsque le personnel est bien formé et quand il est possible de manipuler des acides.

Puisqu'une eau entartrant est une eau dont le CO₂ libre est inférieure au CO₂ équilibrant. On peut envisager l'introduction de dioxyde de carbone dans l'eau : cette solution est utilisée dans les traitements de potabilisation (souvent employée de plus, pour minéraliser l'eau : introduction de gaz puis percolation sur lit de carbonates).

7.4. Inhibiteurs d'entartrage : Certains produits permettent :

- De créer des solutions colloïdales qui resteront en suspension (en potabilisation - épuration c'est l'inverse que l'on souhaite) : ce sont les dispersants ;
- De bloquer la formation de tartre en empêchant la croissance du cristal : ce sont les séquestrant (*Melkia, 2010*).

8. Les avantages et les inconvénients des eaux géothermales

8.1. Les avantages des eaux géothermales

- C'est une énergie fiable et stable dans le temps, car elle ne dépend pas des conditions atmosphériques ou conditions climatiques.
- Elle est respectueuse de l'environnement, elle n'engendre, en effet, pratiquement pas de substances polluantes, très peu de gaz carbonique et seulement un peu d'hydrogène sulfuré.
- Les forages géothermiques ont un impact visuel très limité. Un forage est totalement invisible une fois réalisé, la tête du puits étant enterrée.
- utilisation des eaux thermales dans le domaine de la médecine (thérapeutique) : Les rhumatismes, les névralgies sciatiques...

8.2. Les inconvénients des eaux géothermales

- L'eau géothermique est souvent très salée, très chargée en sels minéraux, Elle ne peut alors être utilisée qu'à travers un circuit parallèle de l'eau douce.
- Les eaux géothermales sont presque toujours corrosives. Cette corrosion augmente le coût de maintenance.
- L'épuisement de la ressource est possible. Les stocks d'eau chaude souterraine sont certes considérés comme renouvelables, mais le rythme d'exploitation ne doit pas excéder celui de leur renouvellement.
- L'entartrage : L'entartrage est défini comme étant la production d'un solide cristallin dure à partir d'une solution liquide. Les dépôts incrustants appelés communément tartres sont constitués essentiellement de sels alcalino-terreux (Calcium et magnésium).

9. Conclusion

L'exploitation des eaux géothermales en Algérie et précisément dans la vallée d'Oued Righ tant pour l'irrigation que pour les besoins domestiques, a générée d'énormes problèmes par suite de dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques. De ce fait il est impératif de définir les procédés les plus adéquats qui permettent d'éliminer la dureté de l'eau et de réduire les risques de formation de tartre.

Les études antérieures de traitement de la dureté des eaux de la vallée de l'Oued Righ montrent que le phénomène d'entartrage des conduites, est essentiellement dû aux conditions de température (55 à 60 °C) très favorables. Cette dernière conjuguée à la forte pression des eaux provoque la transformation des bicarbonates au carbonate et la libération du CO₂ et non à la teneur en calcium et en magnésium.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Au terme de ce modeste travail, la région d'étude encadrée par la vallée d'Oued Righ qui fait partie du Sahara Septentrional, couvre une superficie de 3750 ha. Allongé sur environ 150 km sur un axe Nord-Sud. Avec une topographie très plane, l'analyse fondamentale de la climatologie montre que le climat est hyperaride, les précipitations sont très rares et irrégulières, avec une moyenne de 61,54mm, Les relevés thermiques ont donné une température moyenne annuelle de l'ordre de 22,25°C, ce qui se traduit par une période déficitaire durant toute l'année.

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, 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, la deuxième multicouches (CT) et la troisième plus profonde, formant le Continental Intercalaire, connue sous la dénomination de nappe albienne, objet de notre étude.

L'interprétation des données analytiques par les différentes méthodes, a montré que les eaux géothermales de la nappe albienne dans la vallée d'Oued Righ sont caractérisées par des températures élevées (48,8 à 65,5 °C), un pH assez proche de la neutralité avec une tendance vers la basicité après le refroidissement, une dureté excessive (varie entre 76,4 et 101,6°F) et une forte minéralisation atteinte 1,8 g/l, ce qui traduit leur comportement entartrant après le refroidissement.

L'exploitation des eaux géothermales en Algérie et précisément dans la vallée d'Oued Righ tant pour l'irrigation que pour les besoins domestiques, a générée d'énormes problèmes par suite de dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques. De ce fait, il est impératif de définir les procédés les plus adéquats qui permettent d'éliminer la dureté de l'eau et de réduire les risques de formation de tartre.

Les études antérieures de traitement de la dureté des eaux de la vallée de l'Oued Righ montrent que le phénomène d'entartrage des conduites, est essentiellement dû aux conditions de température (55 à 60 °C) très favorables. Cette dernière conjuguée à la forte pression des

eaux provoque la transformation des bicarbonates au carbonate et la libération du CO₂ et non à la teneur en calcium et en magnésium.

Recommandations :

A l'issue de ce travail, nous avons jugé utile de formuler quelques recommandations, face aux contraintes d'utilisation des eaux du Continental Intercalaire, notamment le refroidissement de ces eaux ainsi que le phénomène d'entartrage, à savoir :

- ✓ L'arrêt de réalisation de nouveaux forages, par la mise en place d'une procédure légale ferme ainsi que sa stricte application.
- ✓ Définir les procédés les plus adéquats qui permettent d'éliminer la dureté de l'eau et de réduire les risques de formation de tartre.
- ✓ Étude des possibilités de faire un double usage des eaux ; chauffage des serres et la production de l'énergie électrique avant le refroidissement. Ainsi que pour l'irrigation après le refroidissement et l'adoucissement.
- ✓ L'installation des stations d'épuration des eaux usées afin de diminuer les rejets des eaux dans la nature, par le biais de la réutilisation de ces eaux épurées dans l'agriculture et préserver les eaux fossiles du Continental Intercalaire.
- ✓ Mélanger les eaux du complexe terminal (7 g/l de salinité) avec les eaux du continental intercalaire (1.2 g/l de salinité et 65 °C de température) afin de diminuer la salinité par dilution du premier aquifère, et d'une part pour abaisser la température du seconde.
- ✓ Transférer les eaux chaudes directement vers les agriculteurs, ensuite le refroidissement sur place par des propres bassins afin d'éviter le dépôt d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

*Références
bibliographiques*

Références Bibliographiques

Abouriche M., Fekraoui A., Kedaïd F.Z., Rezig M., 1988. Atlas des Ressources Géothermiques du Nord de l'Algérie, *Rapport Interne CDER*.

Acrouene., 1992. Caractérisations physicochimique des principaux cultivars de datte de la région des ziban. *Revue Recherche Agronomique, Ed. INRAA, n° 1, pp59-66*

Bagnouls F., Gaussen H., 1953. Saison sèche et indice xérothermique. *Bulletin de la Société d'Histoire Naturelle de Toulouse, 88, pp193-240.*

Ballais J.L., 2010. Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du bas Sahara algérien. *Géographie physique et environnement. Vol IV, 127 p.*

Ban nouid A H, (1993). Desalination, pp 93-545.

Beggar H., 2006. La biomasse phoenicole : un savoir-faire local à promoteur « cas de la région de l'oued Righ ». *mémoire de master. Département des sciences agronomique. Univ, Ouargla.126p*

Bel F., Dermagne F., 1966. Etude géologique du Continental Terminal, *Dossier de la direction de l'énergie et des carburants (Ministère de l'industrie et de l'énergie).Alger, 22p.*

Beddief H., 2014. La Qualité Des Eaux Sur Les Conduites De Réseau d'AEP Des régions (HMD-Touggourt). *Mémoire de master. Univ, Ouargla.109p.*

Bendaoui H., 2012. Diagnostic sur la conduite d'irrigation de palmiers dattiers dans la région d'Oued Righ. *Mémoire de Magister, Univ, Ouargla.107p.*

Ben Ziouch S., 2006. L'agriculture dans la vallée de Oued-Righ ; Quelques éléments d'analyse, *Sciences Humaine. Univ, Biskra, N°10. pp19-34*

Benyazza A., 2014. Évaluation des facies hydro-chimique des eaux souterraines de la région d'in-salah (wilaya de tamanrasset). *Mémoire master. Univ. Ouargla, 80p.*

Bettahar A., 2013. Aspects qualitatifs des eaux de la région de Touggourt (Nappe du Complexe Terminal et Continental Intercalaire) Sud –Est de l'Algérie. *Mémoire de Master, Univ. Ouargla, 67 p.*

Boukhrissa M.L, 2015. Collecte des rejets et système d'épuration des eaux usées de la commune d'Oum Toub wilaya de Skikda. *Mémoire de master, Univ. Bejaia, 91p.*

Boussadaa N., 2017. La télédétection au service des ressources en eaux, application à la gestion des ressources en eaux dans la vallée d'oued Righ. *Thèse de doctorat, Univ. Annaba, 190 p.*

Bouselsal B., Kherici N., Hadj-said S., Belksier M S., 2014. Qualité des eaux des aquifères de sahara septentrionale cas des eaux des aquifères d'el-oued (SE Algérie). pp 21-31.

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. de Magister, Univ. Annaba, 155p*

Busson G., 1967. Le Mésozoïque Saharien, 1^{ère} partie : l'extrême Sud Tunisien. Ed ., Paris, « Centre Rech .Zone Arides », *Géol.*, 8, Ed. CNRS. 194p

Busson G ., 1971. Principes, méthodes et résultats d'une étude stratigraphique du mésozoïque saharien. *Thèse Paris, 464p*

Dib.H., 1985. Le thermalisme de l'Est Algérien. Thèse de Doctorat 3ème cycle, USTHB, Alger. 281p.

Drouiche A., 2014. Impact de la remontée des eaux sur la qualité des eaux de la nappe phréatique et sur l'environnement dans la Vallée du Souf sud-est algérien. *Thèse de Doctorat, Univ. Annaba, 201 p.*

Djoudi A., Oubelaid A ., 2015. Etude hydrochimique des eaux de la région de Gourara (Timimoune) *Algérie. Mémoire de master, Univ . Khemis Miliana .82p.*

Dubost D., 1991. Ecologie, aménagement des oasis algérienne, Thèse Doctorat de Géographie, université François Rebellais, Tours, 548P.

Dubost D., 1992. Ecologie, Aménagement et développement Agricole des Oasis Algériennes. *Ed.2002, N°Dépôt légal, 1092-2002.*

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.

Cornet A ., 1961. Géologie de l'Oued R'Hir. *Terre et eaux, Alger , n°37 ,3^e et 4^e trim.pp18-24.*

Cornet A., 1964. Introduction à l'hydrogéologie Saharienne. *Rev. Géog phys.et géoldyn., Paris, Masson, Vol.VI, fasc. I, p 5-72-28.*

Conrad G ., 1969. L'évolution continentale post-hercynienne du Sahara algérien (Saoura, erg Chech-Tanezrouft, Ahnet-Mouydir). *Centre de recherche sur les zones arides. géologie, n° 10, CNRS, Paris, 527p.*

Chaouch B ,2008. Touggourt ou la dynamique d'une ville aux sept ksour. Sciences et technologie, Univ. Constantine, N°28.pp 9-18.

Chaib w., Bouchahm N ., Harrat N., Zahi F., Bougherira N., Djabri L., 2013. Caractérisation hydrogéochimique des eaux géothermales de la nappe du continental intercalaire de la région de l'oued righ. *pp 55-65.*

Chevolet H., 1996. Processus unitaires de traitement de l'eau potable. Adoucissement et minéralisation. *Edition CEBEDOC Paris. 457p.*

Edmunds W. M., Guendouz A., Mamou A., Moulla A., Shand P. et Zouari K., 2003 Groundwater evolution in the Continental Intercalaire aquifer of southern Algeria and Tunisia: trace element and isotopic indicators. *Appl. Geochem. 18, pp 805–822.*

- ERESS 1972c.**Nappe du Complexe terminal. *Appendices , Tunisie.* 59p.
- Fartas T ., Boutaoutaou D ., Zeggan H ., 2011.**Etude de l'évolution de l'entartrage dans les conduites de distribution d'eau de la vallée de l'oued'r'hir, *Laboratoire Exploitation et Valorisation des Ressources Naturelles en Zones Arides.*08p.
- Fekraoui A., 2007.**Caractéristiques géochimiques des eaux géothermales de la région d'Oran. *Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda.* pp75 - 80.
- Fennich A ,2016.**Qualité chimique des ressources hydriques de la région du M'Zab.*Mémoire de master . Univ,Ouargla.*71p.
- Furon R ., 1964.**Le Sahara : Géologie ; Ressources minérales. *Paris. Payot,2^e éd,313p.*
- Gaagi A.,2009.**Etude hydrogéologique et hydrochimique du bassin versant du barrage sur Oued et Arab region Est de l'Algérie.*Mémoire de master,Univ.Batna,130p*
- Ghettas B., 2010.**Contribution à l'étude qualitative et quantitative des phénomènes de corrosion et d'entartrage causés par les eaux géothermales dans les conduites d'AEP. *Mémoire de master, Univ. Ouargla,* 62p.
- Guendouz A., 1985.** Contribution à l'étude géochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara nord-est septentrional, Algérie. *Thèse de Doctorat, 3^{ème} cycle, Univ. Paris Sud, Centre d'Orsay, France, 11.* pp483-495.
- Guendouz A., Moulla A., Edmunds W.M., Sliand P., 2003,** Hydrochemical and isotopic evolution in the Algerian Sahara, *Hydrogeology J. 11.* pp483-495.
- Hadef S, Hizir F ,2018.**La qualité des eaux superficielles du bassin versant de Guenitra, Wilaya de Skikda ,N-E Algérien .*Mémoire de master,Univ,Jijel.*60p.
- Hidaoui A et Louannas A., 2015.**Etude du système traditionnel d'irrigation au Sahara,exemple des foggaras de la région d'Adrar (Touat).*Mémoire de master,Univ.Tlemcen,132p.*
- Khadraoui A., 2007.**Eau et impact environnementale dans le sahara algérien. « *Définition – evaluation et perspective de développement* ».299p.
- Karpoff R., 1952.**Observation préliminaire sur l'hydrologie du Bas Sahara, in l'hydrologie des régions arides et subarides, *C.R. DU XIX^o Congrès géol .Intern .Alger, sect. VIII, Fasc. VIII.*
- Kedaid F-Z, 2004.**Les perspectives d'utilisation de l'énergie géothermique au sud de l'Algérie.02 p.
- Koull N., Kherraze M E., Ben ZaouiT., 2014.**Paléo-hydrologie de la région de l'Oued Righ, *Centre de Recherches Scientifiques et Technique sur les Régions Arides, Touggourt.*15p.
- Kouzmine Y ., 2009.** L'action publique et les réseaux de transport au sahara Algérien, étapes d'une intégration territoriale pour un développement régionale ; *HAL archive ouvertes..Id : halshs-00389861, pp1-13.*

Medfouni S., 2007. Adoucissement des eaux géothermales de l'oued r'hir. étude comparative de deux types de chaux (CaO et Ca (OH)₂).*Mémoire de magister. Univ, Ouargla, 62p.*

Medjani F., 2016. Variation des paramètres physicochimiques des eaux des sebkhass de la région Ouargla - Touggourt (sud - est algérien). *Thèse de doctorat, Univ. Annaba, 131 p.*

Melkia CH, 2010. Etude de phénomène d'entartrage et de corrosion des installations de refroidissement dans la wilaya de tebessa (cimentrie d'elmalabiod). *Mémoire de magister. Univ, Tesseba, 124p.*

Messaitfa A., Baouia K., Meghezzi A., Saidi M, 2007. Geothermal water quality in oued R'hir valley (Southeast Algeria). Scaling problem and Hardness treatment. *Research journal of agronomy 1 (2), pp 80-83.*

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.*

Nesson., 1975. L'évolution des ressources hydrauliques des oasis du Bas Sahara Algérien. *In recherche sur l'Algérie. Ed, CNRS, Paris, pp 7-100.*

Ouali S., 2006. Etude géothermique du sud de l'Algérie. *Mémoire de magister. Univ, Boumerdes, 84p.*

Ouali S., Khellaf A., Baddari K, 2007. Etude des ressources géothermiques du sud algérien. *Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10 N°3. 407 – 414pp.*

Oussedik S.M., 2000. Déminéralisation de l'eau saumâtre du forage Albien "Ain Sahara" pour l'alimentation en eau potable de la ville de Touggourt. *Desalination 137, pp 103-111.*

Rezig M., 1991. Etude Géothermique du Nord-Est de l'Algérie, DEA, Université des Sciences et des Techniques du Languedoc, Montpellier.

Rezig M., 1992. Etude Géothermique de l'Extrémité Est de l'Atlas Saharien, Rapport Interne, CDER.

Rosset R., Les procédés physiques antitartre : mythe ou réalité ? ; L'actualité chimique – Janvier – février 1992, p 125 – 148.

Rechadi M Z., 2017. Impact de la qualité des eaux d'irrigation sur la salinisation des sols en régions arides et semi arides : cas de la région du Ziban. *Thèse de doctorat, Univ. Biskra, 25 p.*

Sari H., 2014. Contribution à l'étude de la qualité physico-chimique et bactériologique de l'eau de la source «Attar» (Tlemcen). *Mémoire de master, Univ. Tlemcen, 92p*

Savernin J., 1931. La Géologie Algérienne et Nord-Africaine, Paris, Masson.

Tlili A., 2006. La géothermie: L'énergie verte des primeurs, 36p.

Toutain.G., 1979. Eléments d'agronomie saharienne de la recherche au développement. Ed :INRA, Paris, 276p.

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

Zahi F., Chaïb W., Bougherira N., Harrat N., Rezeg A., Bouchahm N., Djabri L., 2011. Caractéristiques chimiques des eaux géothermales de la nappe albienne dans la vallée d'oued Righ. 2^{ème} *Séminaire Maghrébin sur la gestion des ressources naturelles et le développement durable (GRN2D) .UNIV. Sidi Bel Abbés-Algérie.*

Zahi F ., 2014.Contribution à l'étude hydrochimique du bassin versant du lac fetzara (Nord-Est Algérien),approche géochimique et fonctionnement des sols et des eaux.*Thèse de doctorat,Univ. Annaba,193p.*

Zerrouki F ., Salhi A., 2017. Caractérisation hydrogéochimique de la nappe du Continental Intercalaire de la gouttière de l'oued Righ, Sahara septentrionale. *Mém .Master, Univ. Tlemcen, 111 p.*

ONS , office national de statistique.2008.

Les sites web :

www.ONID .Com.Dz

Résumé

Dans la vallée d'Oued Righ (SE Algérien), les besoins en eau sont assurés à partir des nappes d'eaux souterraines à savoir les nappes du Complexe Terminal et de Continental Intercalaire. Cette dernière représente un énorme réservoir d'eaux souterraines avec une superficie de l'ordre de 600000 km², ses eaux sont caractérisées par une température élevée (> 60°C), et une dureté excessive (76 à 102°F) avec une forte minéralisation atteignant 1,8 g/l. L'utilisation de ces eaux chaudes nécessite leur refroidissement, ce qui engendre des dépôts d'incrustations et d'obstructions, par entartrage, des canaux, des ouvrages et des équipements hydrauliques.

L'objectif de ce travail est de décrire les paramètres physico-chimiques de l'eau du Continental Intercalaire avant et après le refroidissement afin de déterminer son comportement chimique. Les résultats obtenus, en particulier après le refroidissement montre qu'il y a une diminution de température et une augmentation du pH, ainsi que l'apparition de concentrations importantes en ions carbonatés (CO₃⁻²), ce qui donne un comportement entartrant de l'eau, ce qui peut avoir des conséquences graves en réduisant le diamètre des canaux qui génère des frais supplémentaires pour la réhabilitation de ces canalisations.

Mots-clés : Eaux géothermales, Continental Intercalaire, Entartrage et Oued Righ.

Abstract

In Oued Righ valley (SE Algerian), water requirements are ensured from the groundwater aquifers, namely the aquifers of the Terminal Complex and Continental Intercalary. The latter represents a huge reservoir of groundwater with an area of about 600000 km²; its waters are characterized by a high temperature (> 60 °C), and an excessive hardness (76 to 10 °F) with a strong mineralization up to 1.8 g/l. The use of these hot waters requires their cooling which generates deposits of encrustations and obstructions, scaling, canals, structures and hydraulic equipment.

The objective of this work is to describe the physicochemical parameters of Continental Intercalary waters before and after cooling to determine its chemical behavior. The results obtained, especially after cooling; show that there is a decrease in temperature and an increase in pH, as well as the appearance of large concentrations of carbonate ions (CO₃⁻²), which gives a scaling behavior to the water. , which can have serious consequences in reducing the diameter of the canals that generates additional costs for the rehabilitation of these pipes

Key words: geothermal waters, Oued Righ, continental intercalary, scaling.

ملخص

في سهل واد ريف (جنوب شرق الجزائر) يتم ضمان متطلبات المياه من طبقات المياه الجوفية و المتمثلة في المركب النهائي و المتداخل القاري. يمثل هذا الأخير خزناً ضخماً للمياه الجوفية تبلغ مساحته حوالي 600000 كم²، وتتميز مياهه بدرجة حرارة عالية (> 60 درجة مئوية) وعسرة مفرطة (76 إلى 102 درجة فرنسية) مع قوة تمعدن تصل إلى 1.8 مغ / ل . يتطلب استخدام هذه المياه الساخنة تبريدها مما يولد رواسب في القنوات والهيكل والمعدات الهيدروليكية.

يهدف هذا العمل إلى الوصف الفيزيوكيميائي لمياه المتداخل القاري قبل وبعد عملية التبريد لمعرفة سلوكها الكيميائي. أظهرت النتائج المتحصل عليها خاصة بعد عملية التبريد و المتمثلة في انخفاض درجة الحرارة و ارتفاع قيمة pH وكذلك ظهور تراكيز معتبرة لأيونات الكربونات (CO₃⁻²). كل هذه العوامل أعطت طابع ترسبي للمياه، هذه الأخيرة قد تؤدي إلى عواقب وخيمة من خلال إنقاص أقطار الأنابيب عن طريق التحجيم ، مما يولد نفقات زائدة لإعادة تأهيل هذه الأنابيب.

الكلمات المفتاحية: المياه الساخنة ، وادي ريف ، المتداخل القاري ، التحجيم.