

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar El oued



Faculté de Technologie

Département : Hydraulique et Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option: ouvrage hydraulique

THEME

**Evaluation de la méthode AHP par la
méthode DRASTIC – Région du Souf
(Sud-Est de l'Algérie)**

Dirigé par :

Encadreur : Dr Nabil MEGA

Co-encadreur : Dr Salim kHECHANA

présenté par :

GUERFI Abdelbasset

BEN NADJI Mohammed

Promotion: 2020

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu Dieu tout puissant pour nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce modeste travail.

Nous voudrions tout d'abord exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur Dr. MEGA Nabil et à notre co-encadreur Dr. KHECHANA Salim, pour leur soutien, leur conseil et leur grande bienveillance durant l'élaboration de ce projet.

Nombreuses sont les personnes qui nous ont aidé durant l'acquisition des données et la préparation de ce travail, mais nous voudrions adresser nos remerciements plus particulièrement à:

- *BACHIR SAHRAOUI ;*
- *MAMOUNE CHAKER ;*
- *CHALBI ABDELRAHMANE.*

Et pour tous ceux qui ont apporté leur aide de près ou de loin à la réalisation de ce document, nous disons MERCI.

DEDICACE

En cet honorable lieu, d'un simple geste tracé par écrit, mais qui jaillie du profond sentiment de reconnaissance, permettez-nous de citer les noms comme un mémorandum pour ceux qui ont une place particulière:

A nos très chers pères

A nos très chères mères

A nos frères et sœurs

A tous nos cousins sans exception

A toute notre famille.

A tous nos ami(e) s sans exception

A tous; nous dédions cet ouvrage, qui est le sens de mes études supérieures, comme un Don du Cœur, en priant ALLAH tout puissant à le mettre au service de notre nation et du bien de l'humanité, et qu'il sera une lumière sur notre parcours professionnel.

A. BASSET @ MOHAMMED,

Sommaire

Remerciements	I
DEDICACE.....	II
Sommaire	III
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VIII
Liste des abréviations	IX
المخلص:	X
Introduction générale:	1

Chapitre I : Présentation de La zone d'étude

I.1. Introduction.....	4
I.2. Situation géographique	4
I.3. Répartition administratif et démographique	5
I.4. Géologie de la région d'étude	6
I.4.1. Stratigraphie régionale	7
I.4.1.1. Formation de l'ère Secondaire	7
I-4-1-3. Formations du Quaternaire	9

Chapitre II : Etude hydroclimatologique

II.1. Introduction	15
II.2. Les paramètres climatiques	15
II.2.1. Température.....	16
II.2.2. Précipitations	17
II.2.3. Le vent	17
II.2.4. Evaporation.....	18
II.2.5. Humidité	19
II.3. Diagramme pluviothermique	20
II.4. Le bilan hydrique.....	22
II.4.1. L'évapotranspiration.....	22
II.4.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP)	23
II.4.3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR).....	23
II.4.4. Estimation de la réserve facilement utilisable (RFU).....	24

II.5. Etablissement du bilan.....	25
II.6. Conclusion.....	26

Chapitre III : Etude Hydrogéologieet hydrodynamique

III.1. Introduction	28
III.2. Cadre hydrogéologique générale.....	28
III.3. Différentes nappes dans la région	29
III.3.1. La Nappe phréatique	29
III.3.2. Complexe Terminal CT.....	30
III.3.3. Nappe du Continent Intercalaire (CI).....	32
III.4. Inventaire des points d'eau.....	33
III.5. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du CT	33
III.5.1. Types des pompages d'essais	34
III.5.2. Essais de pompage	34
III.5.3. Interprétation des données des essais de pompage	34
III.5.3.1. Forage (Erg Essouari, commune de Guemar)	34
III.5.3.2. Forage (OuledRhouma) commune de Sidi Aoun	37
III.5.3.3. Forage (Pôle universitaire) commune d'El Oued.....	39
III.6. Etude piézométrique.....	40
III.6.1. La carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011	41
III.6.2. Aptitude des eaux à la potabilité	42
III.6.3. Aptitudes des eaux à l'irrigation	44
III.7. Conclusion.....	44

Chapitre IV La carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC

IV.1. Introduction.....	47
IV.2. Mécanisme de pollution.....	47
IV.2.1. Dans une nappe libre	47
IV.2.2. Dans une nappe captive	47
IV.2.3. Dans un aquifère fissuré.....	47
IV.3. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité	47
IV.4. Hypothèses de la méthode DRASTIC	48
IV.4.1. Paramètres DRASTIC.....	48
IV.4.2. Indexation ou Système de cotation numérique	49
IV.4.3. Calcul de l'indice « DRASTIC »	49

IV.4.4. Interprétation de l'indice « DRASTIC »	49
IV.5. Application de la méthode DRASTIC pour cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines de la vallée de Oued-Souf	50
IV.6. Présentation des paramètres et réalisation des cartes thématiques	50
IV.6.1. La profondeur de l'eau (D)	50
IV.6.2. La recharge nette (R)	51
IV.6.3. Nature du milieu aquifère (A)	52
IV.6.4. Type de sol (S)	53
IV.6.5. Topographie (T)	54
IV.6.6. Impact de la zone non saturée (I)	55
IV.6.7. Conductivité hydraulique (C)	56
IV.6.8. La Carte de vulnérabilité.....	58
IV.7. Conclusion	59

Chapitre V Etude comparative entre DRASTIC et AHP

V.1. Introduction	61
V.2. Définition de l'analyse multicritères.....	61
V.3 . La méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP).....	62
V.3.1. Description de la méthode AHP	62
V.3.2. Avantages de la méthode AHP.....	62
V.3.3. Exécution de la méthode	62
V.4. Etude comparative entre DRASTIC et AHP	70
V.4.1. Comparaison d'ordre général	70
V.4.2 .Comparaison statistique	70
V.5. Le degré de corrélation entre les deux cartes (DRASTIC et AHP)	71
V.6. Etude de l'histogramme bidimensionnel.....	71
V.7. Comparaison entre les concepts	72
V.8. Conclusion.....	72
Conclusion générale	74
Référence et bibliographique	77
Annexes.....	79

Liste des figures

Fig.I.01. Situation géographique de la zone d'étude.....	5
Fig.I.02. Répartition administrative de la zone d'étude.....	6
Fig.I.03. Log de forage F1 l'Albien (ANRH, 1993).....	10
Fig.I.04. Carte géologique de la zone d'étude (ANRH, 2010).....	11
Fig.I.05. Carte topographique de la région du Souf (ANRH, 2005).....	13
Fig.II.01. Température moyenne mensuelle.....	16
Fig.II.02. Le Précipitations moyennes mensuelles.....	17
Fig.II.03. Vitesses moyennes mensuelles des vents.....	18
Fig.II.04. Répartitions de l'évaporation.....	19
Fig.II.05. Humidité moyennes mensuelles durant la période.....	19
Fig.II.06. Diagramme Ombrothermique de la région d'Oued Souf (1978-2016).....	20
Fig.III.01. Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972).....	29
Fig.III.02. Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (CoteMarc,2006).....	30
Fig.III.03. Limites de l'aquifère du Complexe terminale avec les niveaux piézométrique et les sens d'écoulement (Baba SY et al.2006).....	32
Fig.III.04. Limite de l'aquifère du Continental Intercalaire avec les niveaux piézométrique et le sens d'écoulement (Baba SY et al.2006).....	32
Fig.III.05. Courbe débit / Rabattement à (Forage Erg Essouari).....	35
Fig.III.06. Essai de pompage à longue durée à(Forage Erg Essouari).....	36
Fig.III.07. Courbe débit / Rabattement à (Forage Ouled Rhouma).....	37
Fig.III.08. Essai de pompage à longue durée à (Forage Ouled Rhouma).....	38
Fig.III.09. Courbe débit / Rabattement à (Forage pôle universitaire).....	39
Fig.III.10. Essai de pompage à longue durée (Forage pôle universitaire).....	40
Fig.III.11. Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 (Khechana,2014).....	41
Fig.IV.01. Carte de la profondeur d'eau et des indices.....	52
Fig.IV.02. Carte de la recharge et des indices correspondants.....	53
Fig.IV.03. Carte de la nature de la zone saturée et des indices correspondants.....	54
Fig.IV.04. Carte de la nature du sol et des indices correspondants.....	55
Fig.IV.05. Carte de la pente et des indices correspondants.....	56
Fig.IV.06. Carte de la zone non saturée et des indices correspondants.....	57

Fig.IV.07. Carte de la perméabilité et des indices correspondants.....	58
Fig.IV.08. Carte de la vulnérabilité par DRASTIC.....	59
Fig.V.01. Structure hiérarchique de la vulnérabilité selon la méthode AHP.....	64
Fig.V.02. Carte De PH.....	65
Fig.V.03. Carte De potassium.....	65
Fig.V.04. Carte De sodium.....	66
Fig.V.05. Carte de magnésium.....	66
Fig.V.06. Carte De bicarbonate.....	67
Fig.V.07. Carte De calcium.....	67
Fig.V.08. Carte De chlorure.....	68
Fig.V.09. Carte De sulfate.....	68
Fig.V.10. Carte De conductivité électrique.....	69
Fig.V.11. Carte De température.....	69
Fig.V.12. Carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux (Oussama et Abdelkrim, 2019).....	70
Fig.V.13. Degré de corrélation entre DRASTIC et AHP.....	71
Fig.V.14. L’histogramme bidimensionnel entre DRASTIC et AHP.....	71

Liste des tableaux

Tab.I.01. Surface et population de la région d'étude par commune.....	5
Tab.II.01. Données climatiques de la région d'Oued Souf (2014).....	15
Tab.II.02. Température moyenne mensuelle.....	16
Tab.II.03. Les Précipitations moyennes mensuelles.....	17
Tab.II.04. Répartition moyenne mensuelle de la vitesse du vent	18
Tab.II.05. Répartitions de l'évaporation(2014).....	18
Tab.II.06. Répartition moyenne mensuelle de l'humidité.....	19
Tab.II.07. Couples température/ précipitation mensuelle interannuelle.....	20
Tab.II.08. Classement en fonction de l'indice d'aridité.....	21
Tab.II.09. Résultats de l'ETP obtenus par la formule de	23
Tab.II.10. Bilan hydrique d'après Thornthwaite (2014).....	25
Tab.III.01. Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued.....	33
Tab III.02. Calcul de débit spécifique : Valeurs débits /rabattements (Forage Erg Essouari- commune de Guemar)	35
Tab III.03. Calcul de débit spécifique : Valeurs débits /rabattements Forage Ouled Rhoma...37	
Tab.III.04. Calcul de débit spécifique : (Valeurs débits /rabattements) (Forage Pôle universitaire).....	39
Tab III.05. Récapitulatif des résultats des paramètres hydrodynamiques pour les 03 sites d'essai.....	40
Tab.III.06. Résultats des analyses physico-chimiques des eaux du Nappe phréatique (auot 2019).....	42
Tab.III.07. Normes de potabilité de l'O.M.S.....	43
Tab.IV.01. Les poids attribués aux paramètres DRASTIC.....	50
Tab.IV.02. Les classes de vulnérabilité (Engel et al., 1996).....	51
Tab IV.03. Notation et pondération selon la profondeur.....	51
Tab.IV.04. Notation et pondération selon la recharge efficace.....	53
Tab.IV.05. Notation et pondération selon la nature de la zone saturée.....	54
Tab.IV.06. Notation et pondération selon la nature de du sol.....	55
Tab.IV.07. Notation et pondération selon la topographie du terrain.....	56
Tab.IV.08. Notation et pondération selon la nature de la zone non saturée.....	57
Tab.IV.09. Notation et pondération selon la Conductivité hydraulique m/j	58
Tab.V.01. Comparaison générale entre DRASTIC et AHP.....	71

Liste des abréviations

A.H.P: Analyse Hiérarchique des procédés.

O.N.M: Office National Métrologique.

A.D.E : Algérienne des eaux.

A.E.P : Alimentation d'eau potable.

O.N.S : Office National de Statistique.

O.M.S : Organisation Mondial des Santé.

S.I.G : systèmes d'information géographique.

Z.N.S : Zone Non Saturée.

C.I : Continental Intercalaire.

C.T : Complexe Terminal.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

NWWA: National Water Well Association.

الملخص :

حاليا قيمة بيئية عالية تميز منطقة الوادي (الجنوب الشرقي الجزائري) تمثلها المياه السطحية والمياه الجوفية الأرضية. في السنوات الأخيرة حدثت طفرة اقتصادية خاصة منها زراعية وصناعية مما أدى من ناحية إلى زيادة الاحتياجات المائية وتسبب من ناحية أخرى في تدهور نوعية هاته المياه بعد تحليل الوضع الحالي لطبقة المياه الجوفية والبيئة المحيطة بها قمنا بإجراء جمع ومعالجة بيانات من عدة آبار وتمثيلها على شكل خرائط باستخدام أدوات حديثة مثل أنظمة الإعلام الجغرافي. من بين المشاكل التي صادفناها نذكر على سبيل المثال :

- الجودة الكيميائية للمياه التي ينتج عنها ملوحة عالية تتأثر بعمق المياه.

- وجود بعض الملوثات الناشئة عن الأنشطة الزراعية والصناعية الكثيفة.

- الاستخدام غير العقلاني للأسمدة في الممارسات الزراعية.

وعليه ولتقييم جودة هاته المياه قمنا بدراستها من خلال طريقتين : DRASTIC و AHP وهذا من أجل مقارنتهما وتحديد الطريقة التي تعبر بأكثر دقة عن حجم وتوسع التلوث الذي قد يكون أصاب مياهنا. و أخيرا العمل من هذه الدراسة هو إنشاء تشخيص لنوعية المياه الجوفية في منطقة الوادي بناء على نظام معلومات جغرافي. تضمن تحليل الجودة الفيزيائية و الكيميائية المأخوذة من فتحات طبقة المياه الجوفية الطرفية في منطقة الدراسة, المستخدمة للاستهلاك البشري. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن مياه الصفيحة المعنية لها نوعيات مختلفة من متوسطة أعلى فقيرة.

الكلمات المفتاحية : وادي سوف , التلوث , المياه الجوفية , DRASTIC و AHP

Introduction générale

Introduction générale:

L'eau douce, essentielle à nos besoins, ne représente que 1% du total des mers et des océans présents sur Terre. Elle est donc un capital limité et fragile car menacée par une consommation croissante et par de multiples pollutions. Elle est aussi une ressource naturelle indispensable, non renouvelable, qu'il faut impérativement préserver.

Le développement important de la région d'El Oued durant les 30 dernières années a exigé un besoin considérable en eau potable. Cette situation est due à une forte concentration de population, l'irrigation en agriculture (gros consommateurs) qui constitue à la fois l'activité principale dans cette région et un moyen de fixation des populations locales, l'industrie, le commerce, le tourisme et l'apparition de nouveaux modes de vie ont aboutis à la consommation excessive de l'eau.

Par ailleurs, diverses études entreprises depuis des années, les eaux de cette région sont caractérisées par une minéralisation totale excessive, en plus à la dégradation de la qualité des eaux locales due à l'augmentation alarmante des éléments physico-chimiques qui constituent cette eau.

- Etudiez les ressources en eaux souterraines de la région d'El Oued qui souffrent non seulement de la pénurie d'eau, mais également de la salinité et dégradation de qualité des eaux.
- L'évaluation qualitative des ressources pouvant être exploitées dans l'eau à usage domestique et agricole.
- Étudier la sensibilité des eaux souterraines à la dégradation de la qualité des eaux souterraines à travers l'élaboration d'une carte de vulnérabilité par deux méthodes: la méthode DRASTIC et la méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP).

Notre travail est structuré de la manière suivante:

- ✚ **Le premier chapitre:** commençant par un état de connaissance de la région d'Oued Souf à savoir la géographie et la géologie.
- ✚ **Le deuxième chapitre:** on fait ressortir le régime climatique et quantifier le bilan hydrique et ses paramètres.
- ✚ **Le troisième chapitre:** un aperçu hydrogéologique et hydrodynamique de la nappe du Complexe Phréatique.
- ✚ **Le quatrième chapitre:** consacré à l'étude et l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux souterraines, par la méthode DRASTIC.

- ✚ **Dans le dernier chapitre:** évaluation des deux méthodes (AHP et DRASTIC) par une étude comparative statistique.

A la fin, des conclusions et des recommandations seront présentées par la suite.

Chapitre I
Présentation de La zone d'étude

I.1. Introduction:

Le paysage traditionnel du Souf est marqué par une beauté spécifique, car l'originalité du Souf (établissement humain créé dans un erg) est grande. Mais sa splendeur n'est pas seulement dans le mouvement des dunes ocre ou blanches de l'erg, elle est aussi dans une création humaine inattendue.

El Oued: la ville aux mille coupoles, capitale du Souf, son architecture s'y distingue de celle des autres villes sahariennes. Au lieu des terrasses, ce sont des coupoles qui couvrent les maisons. Ses efforts ne sont pas vains car l'ensoleillement est maximum.

I.2. Situation géographique:

La région de Oued Souf appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de la faible altitude est située au Sud-Est du pays. Elle forme une wilaya depuis 1984 et couvre une superficie totale de 4 458 68 km², divisée en 30 communes avec une population de 990000 habitants, soit une densité de 22.20 hab/ km².

Les limites de la wilaya sont :

- ✓ A l'Est par la république Tunisienne.
- ✓ Au Nord-Est par la wilaya de Tébessa.
- ✓ Au Nord par les wilayas de Khenchla et de Biskra.
- ✓ Au Nord-Ouest par la wilaya de Biskra.
- ✓ A l'Ouest par la wilaya de Djelfa.
- ✓ Au Sud et au Sud-Ouest par la wilaya de Ouargla

Géographiquement la wilaya d'El Oued est limitée par les coordonnées suivantes:

Longitudes X1 = 05°30' et X2 = 07°00' Est

Latitudes Y1 = 35°30' et Y2 = 37°00' Nord.

Cette région tire son originalité de son architecture typique, caractérisée par les coupoles et par ses palmeraies plantées dans les Ghouts.

La vallée de Souf n'est pas un bassin versant mais une unité de ressource en eau qui est délimitée

- Au Sud par la mer de dunes du grand Erg oriental.
- A l'Est par une série de chotts.
- A l'Ouest par Oued Righ (fleuve de fossile) et par la ligne de palmeraie qui court de Biskra à Touggourt.

I.3. Répartition administratif et démographique:

La zone d'étude occupe une superficie de 4405 Km² qui représente 06 communes administratives et englobe un nombre de population de 310185 habitants selon le recensement de 2016 (D.P.S.B W. d'El Oued ,2016)

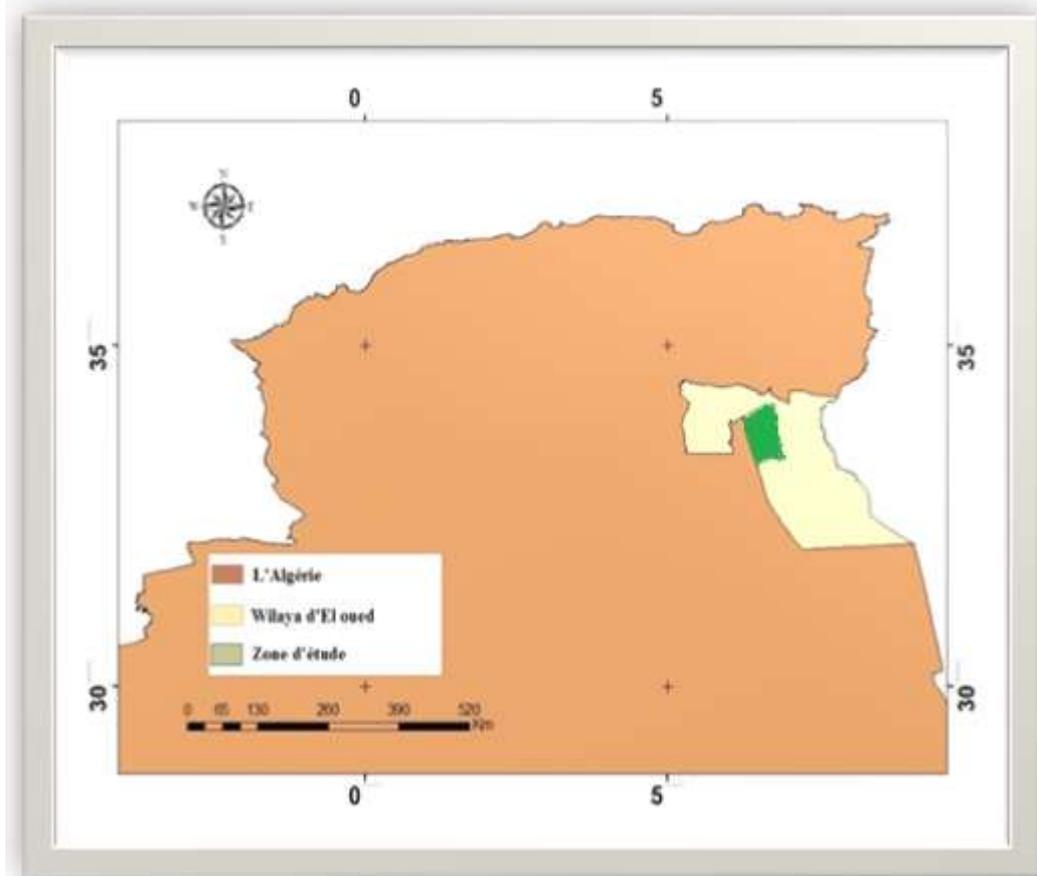


Fig.I.01: Situation géographique de la zone d'étude.

Tab.I.01: Surface et population de la région d'étude par commune.

N°	Commune	Population (hab)	Surface(km ²)	Densité populaire(hab/km ²)
1	Guemar	51315	1264	40,59
2	Reguiba	52445	1966	26,67
3	Taghzout	17145	539	31,80
4	Ourmes	6820	443	15,39
5	Kouinine	13115	116	113,06
6	El oued	169345	77	2199,28
TOTAL		310185	4405	2426,79

(D.P.S.B W. d'ElOued ,2016)

Selon le tableau I.1, nous constatons que la commune la plus peuplée est d'El Oued (2199,28hab/km²), suivie par la commune de Reguiba (26,67 hab/km²), sachant que la commune d'Ourmes a la moindre densité populaire (15,39hab/km²).

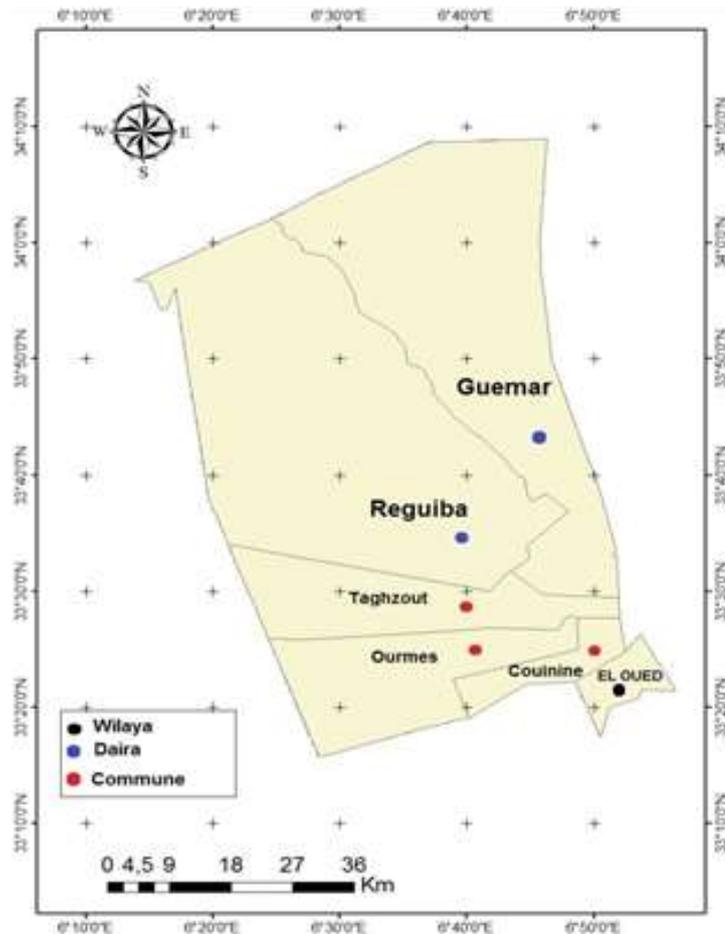


Fig.I.02: Répartition administrative de la zone d'étude

I.4.Géologie de la région d'étude:

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie car elle permet la détermination des horizons susceptibles être aquifères.

La région d'étude est exactement dans la partie Nord de la plat forme saharienne caractérisée par des formations détritiques particulièrement sableuses, elles apparaissent sous forme de dunes et anti dunes. Car le sous-sol de la région étant sableux et assurant l'infiltration et la circulation souterraines des eaux, est essentiellement représenté par des formations sablo-gréseuses du Continental Intercalaire, et des accumulations sableuses fluviolacustres de tertiaire continental.

Sur l'ensemble de la région d'EL-Oued, les formations Mio-pliocènes sont recouvertes par une considérable épaisseur de dépôts Quaternaires présentés sous forme de dunes donnant naissance à un immense erg qui lui-même fait partie de l'extension du grand erg oriental.

I.4.1. Stratigraphie régionale:

D'après (Cornet 1964, Bel 1968) et les coupes de sondages établies à partir des forages, les profondeurs des étages varient d'une région à l'autre. Sur la base des logs de forage de l'Albien faite par l'ANRH(1993) sur la région d'Oued Souf, nous citons les principales strates répétées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers la plus récente.

I.4.1.1. Formation de l'ère Secondaire:

a) Crétacé inférieur :

✚ Le Barrémien:

Cet étage est capté par tous les forages du Continental Intercalaire réalisés dans cette région ; il présente une lithologie d'alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 mètres

✚ L'Aptien:

Comme le Barrémien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région, l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres.

✚ L'Albien:

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres ; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres.

✚ Vraconien:

C'est en fait, une zone de transition entre l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo dolomitiques. On montre aussi des argiles sableuses et de rares passées degrés à ciment calcaire. Dans la zone d'étude, l'épaisseur de cet étage varie entre 250 et 300 mètres. En raison de l'importance de ses niveaux argileux, il constitue une importante couverture de l'Albien.

b) Crétacé moyen:

❖ Le Cénomaniens:

Tous les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Cet étage joue le rôle d'un écran imperméable.

Quant aux limites de cet étage, on peut dire que la limite inférieure est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui la distingue nettement, la limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspondants à la limite inférieure du Turonien.

❖ **Le Turonien:**

Cet étage représente la base du complexe terminale. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies micro cristallines compactes avec des intercalations de calcaires Turoniens et parfois de marnes. Les forages de la région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 mètres.

c) Crétacé supérieur:

➤ **Le Sénonien:**

La plupart des études géologiques effectuées à travers le Sahara algérien montrent que le Sénonien est formé de deux ensembles très différents du point de vue faciès : l'un correspond au Sénonien lagunaire situé à la base et l'autre au Sénonien carbonaté

- Sénonien lagunaire:

La limite de ce sous étage est bien distinguée. Le Sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporé avec des argiles où ces derniers sont aisément différenciés de ceux du Turonien. Il est constitué également d'anhydrites, de calcaires dolomitiques d'argiles et surtout les bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine 150 mètres. La limite supérieure de cette formation coïncide avec le toit de la dernière intercalation anhydride.

- Sénonien carbonaté:

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques avec des intercalations marno-argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés. Son épaisseur dépasse parfois les 300 mètres. Il faut mentionner par ailleurs l'existence d'une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène, qui présentent des calcaires de même nature avec présence de nummulites.

I.4.1.2. Formations de l'ère Tertiaire:

➤ **L'Eocène:**

Il est formé par des sables et des argiles, parfois on rencontre des gypses et des graviers. Dans cette région, l'Eocène est carbonaté à sa base, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaire. L'épaisseur de cet horizon varie entre 150 et 200 mètres.

➤ **Le Miopliocène:**

Il repose en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé

communément Complexe Terminale (C.T). La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Miopliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo argileux avec des intercalations gypseuses et des passées de grès. Sur toute l'étendue du Sahara oriental, Bel et Demargne séparent cet horizon en 4 niveaux :

- Niveau argileux:

Il est peu épais et existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Mi- pliocène constituent une barrière peu perméable entre les nappes du Sénono-Eocène carbonatées et celle du Pontien sableux.

- Niveau grès sableux:

C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara oriental. A sa base, on trouve parfois des graviers alors que le sommet se charge progressivement d'argiles. C'est à ce niveau que se rattache le principal horizon aquifère du Complexe Terminal.

- Niveau argileux:

Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique, ce niveau renferme des lentilles sableuses qui peuvent former le quatrième niveau (sableux) du Mi -pliocène.

- Niveau sableux:

Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du complexe terminal, du point de vue hydrogéologique, ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent à la nappe des sables du Complexe Terminal.

I-4-1-3. Formations du Quaternaire:

Elles se présentent sous forme des dunes de sable dont le dépôt se poursuit sans doute encore de nos jours. Les terrains quaternaires représentent la couverture superficielle qui se localisent surtout au niveau des dépressions et couvrent la plus grande extension au niveau du bas Sahara, ils sont formés d'un matériel alluvial et éolien d'où on trouve la formation des alluvions sableuses et argileuses.

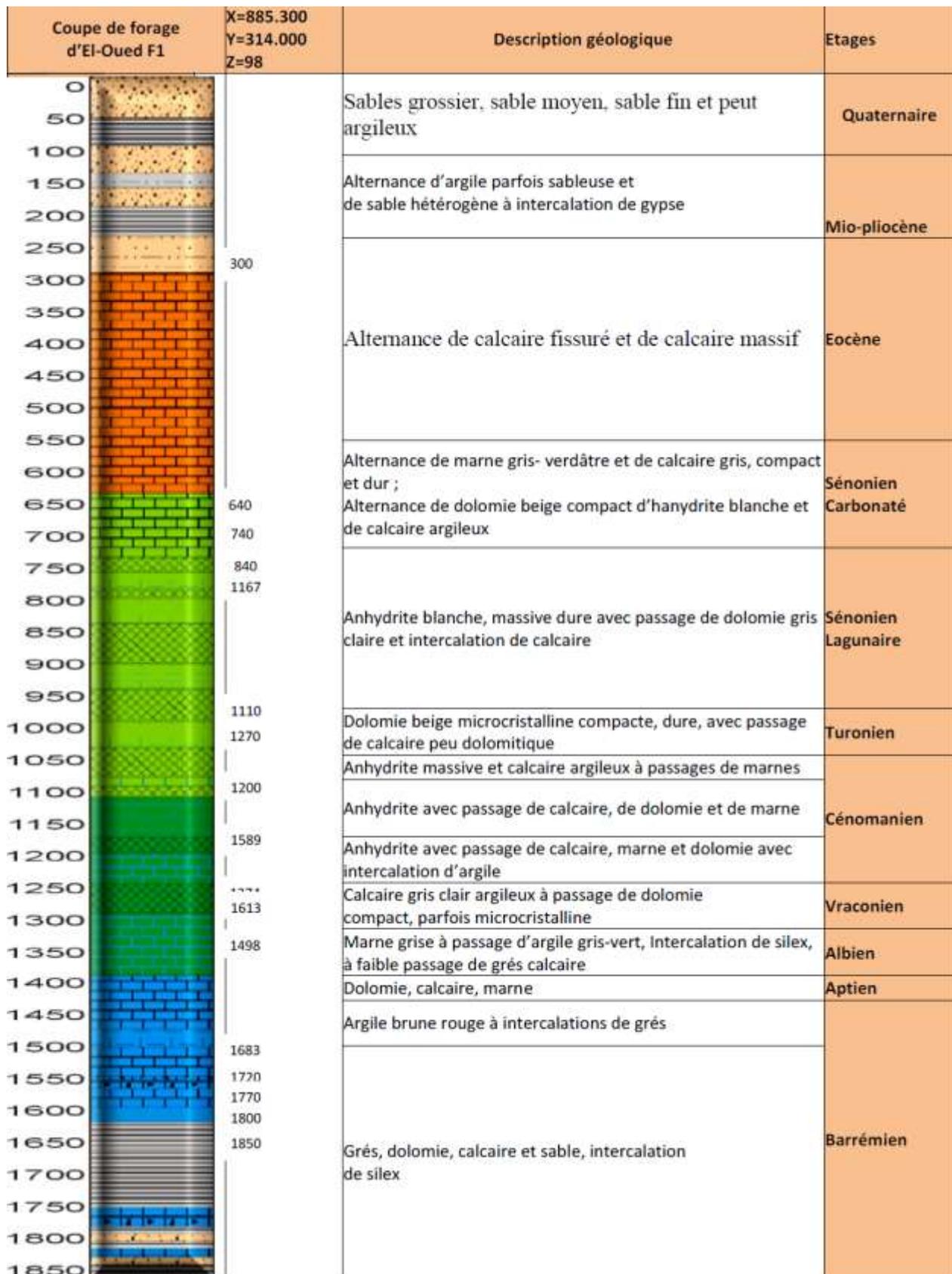


Fig.I.03: Log de forage F1 l'Albien (ANRH, 1993)

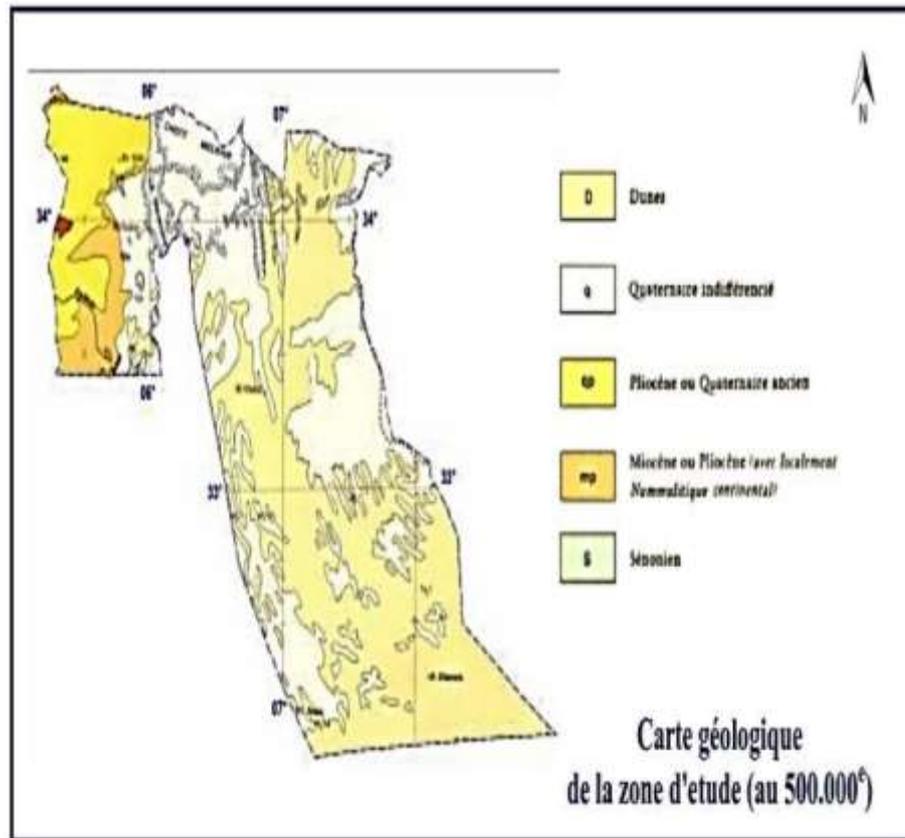


Fig.I.04: Carte géologique de la zone d'étude (ANRH, 2010)

I.4.2. Géomorphologie:

Le sous-sol présente des contrastes frappants. C'est ainsi qu'au Sud, à 6 kilomètres d'El-Oued et jusqu'à El-Ogla à 24 Km plus loin, on remarque l'absence totale de (Tefza), tandis que sur un autre axe allant de El-Oued à Ghamra (en passant par Tiksebt, Kouinine et Guemar) la « Tefza » y occupe tous les terrains. Ainsi deux bandes de terrains sédimentaires, de formations différentes, renfermant des roches dissemblables dont dépend la qualité de la nappe aquifère. Dunes Frontière algéro-tunisienne zone des chotts Quaternaire indifférencié Mio-pliocène Pliocène ou Quaternaire

I.4.2.1. Tercha:

Formé de fins cristaux qui lui donnent un aspect de grès se rencontre en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer.

I.4.2.2. Louss:

Le Louss est fait de cristaux de gypse en fer de lames imbriqués, il se rencontre sous forme de couches continues, très dures de réseaux mélangés au sable, de bancs isolés ou de colonnes qui semblent être constituées autour d'anciennes racines gypseuses.

I.4.2.3. Salsala ou Smida:

Se trouve en plaques continues ou en bancs extrêmement durs, il est composé de cristaux en fer comme le Louss, mais c'est plus fins et plus serrés.

I.4.2.4. Tefza:

C'est un grès blanc assez dur, et constitue la pierre à chauffer qui donnera le plâtre.(Tercha, Louss, Salsala, Smida et Tefza sont les appellations locales, utilisés pour les différentes couches géologiques).

I.5. Le relief:

Le relief de la wilaya d'El Oued est caractérisé par l'existence de trois principales formes:

Les accumulations sableuses: qui se présente sous un double aspect l'Erg et le Sahara.

❖ **Une forme de plateaux rocheux::** qui s'étend vers le Sud avec une alternance de dunes et de crêtes rocheuses

❖ **Une zone de dépressions :**

Caractérisée par la présence d'une multitude de chotts qui plongent vers l'Est. Il est à signaler que l'altitude diminue du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est pour devenir négative au niveau des chotts.

La variation de cote est relativement faible, le point le plus bas correspond à la cote 130m alors que le plus haut atteint la 60m.

I.6. Situation topographique:**I.6.1. Nature topographique de la région d'étude:**

La région d'El-Oued Souf appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de la faible altitude est située au Sud-Est du pays- Le point le haut se trouve à la cote 125m à la commune de Bayadha (Soualah) alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29m à la commune de Réguiba (Foulia).

L'altitude moyenne de la région est de 80 mètres et accuse une diminution notable du Sud vers le Nord pour être de 25 mètres au-dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts qui occupent le fond de l'immense bassin du bas Sahara. (ANRH 2005).

I.6.2. Pente de terrain:

Le pendage général de la zone d'étude est orienté Sud/Nord, avec une pente moyenne très faible (au mieux de l'ordre de 0,002 m/m à 0,003 m/m) et des incidents liés à la présence des dunes (ANRH, 2005).

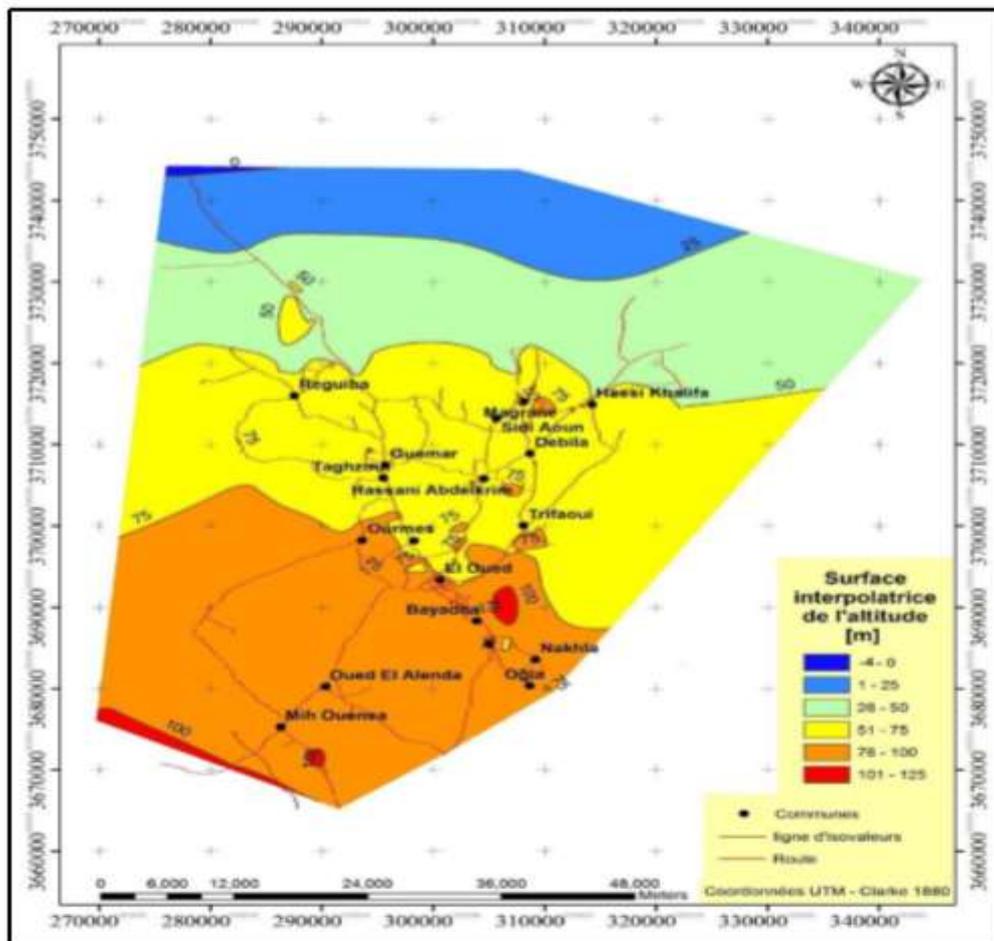


Fig.I.05: Carte topographique de la région du Souf (ANRH, 2005)

I.7. Conclusion:

A partir de cette étude, nous constatons que la région d'étude a une particularité spécifique de point de vue géologique, ainsi que les conditions paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, régulière et homogène dans l'espace.

Ces conditions ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement variable en fonction de leurs faciès. La stratigraphie de la région est caractérisé par des séries sédimentaires allant de Crétacé inférieur jusqu'aux dépôts de Quaternaire.

Les formations du Quaternaire récentes forment l'aquifère détritique de il est surtout sableux à gréseux avec parfois du gypse et des argiles localisées particulièrement dans la partie Nord-Est où il se termine par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

Chapitre II
Etude hydroclimatologique

II.1. Introduction:

Le climat joue un rôle essentiel dans la morphologie du relief, sur la végétation, la genèse et le type des sols et sur les activités agricoles.

L'objectif principale de toute étude climatologique est l'établissement pour une période donnée un bilan hydrique dont les paramètres principaux nécessaires à son établissement sont : la précipitation et la température.

Le climat algérien est caractérisé par sa grande variabilité de précipitations et des températures mensuelles, cette variation est due essentiellement aux irrégularités topographiques et aux influences opposées de la Méditerranée et du Sahara.

Pour analyser les paramètres climatiques, on a sélectionné la station Météorologique de l'ONM (Office National Météorologique) de l'aéroport de Guemar qui représente la seule station existante dans la zone d'étude. Ces données sont choisies durant une période de (10 ans).

Les caractéristiques géographiques de la station climatique sont:

- Altitude: 64m
- Longitude: 06°47' E
- Latitude: 33°30 ' N

II.2. Les paramètres climatiques:

Tableau II.01: Données climatiques de la région d'Oued Souf (2014).

Paramètre Mois	Température			Précipitation (mm)	Evaporation (mm)	Humidité (%)	Vent (m/s-)
	Tmin°C	Tmax°C	Tmoy°C				
Janvier	8.5	13.7	10,43	12.83	80.4	65.01	1.83
Février	10.8	15.6	12,81	6.93	93.1	57.35	2.3
Mars	10.25	18.9	16,38	7.14	167.6	49.53	2.91
Avril	10.9	29.9	20,19	7.95	203	42.92	3.11
Mai	22,00	28.7	25,28	4.15	288.2	38.36	3.03
Juin	20.3	39.3	30,09	1.84	337.8	33.61	2.96
Juillet	27.4	35.8	32,84	0.17	361.6	31.99	2.39
Août	30.8	34.7	32,78	1.69	321.4	33.54	2.14
Septembre	26.2	31.8	28,44	5.98	184.2	47.94	2.24
Octobre	18.6	24.8	22,27	6.43	143.7	53.22	1.69
Novembre	12.4	25.1	15,75	7.85	106.3	60.02	1.62
Décembre	8.5	14,00	11,03	12.82	87.3	66.83	1.54
moyenne	17.22	26.02	21,52	75.78	2374.6	48.36	2.31

(ONM, 2016)

II.2.1. Température:

L'étude hydrogéologique de la zone d'étude devrait comporter l'analyse du caractère thermique, car l'étude de l'évolution de la température est d'une grande importance dans l'estimation de l'évaporation et de l'évapotranspiration ce paramètre rend compte également de son apport d'énergie à la végétation au pouvoir évaporateur qu'il exerce sur les surfaces mouillées et enfin, il est à l'origine du fonctionnement du cycle de l'eau. Le Souf est caractérisé par des étés brûlants qui sont aussi durs que ceux qui s'observent dans le Sahara central.

Tableau II.02: Température moyenne mensuelle:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moy
T(°C)	10,42	12,83	16,50	20,35	25,23	29,95	32,74	32,28	27,94	22,65	15,74	11,45	21,47

(ONM, 2016)

Ce tableau montre une variabilité de température dans La période qui s'étale du mois de novembre au mois d'avril correspond à la période froide avec un minimum durant le mois de janvier 10,42°C alors que la période chaude commence à partir du mois de mai jusqu'au mois de septembre avec un maximum de température relevé pendant le mois de Juillet 32,28 °C la moyenne annuelle est de l'ordre de 21,47°C.

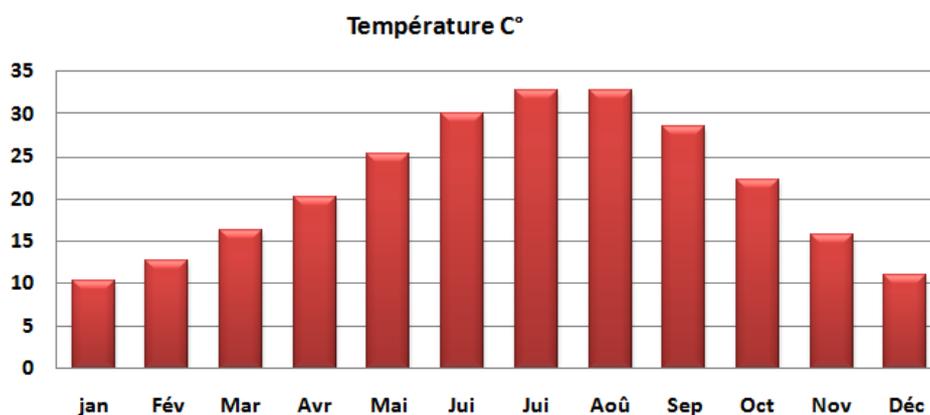


Fig.II.1: Température moyenne mensuelle (2007 – 2016)

II.2.2. Précipitations:

La précipitation est un facteur fondamental pour caractériser le climat d'une région. Ce terme précipitation désigne des cristaux de glace ou des gouttelettes d'eau qui, ayant été soumis à des processus de condensation et d'agrégation à l'intérieur des nuages, sont devenus trop lourds pour demeurer en suspension dans l'atmosphère et tombent au sol.:

Tableau II.03: Précipitations moyennes mensuelles:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P(mm)	12.83	6.93	7.14	7.95	4.15	1.84	0.17	1.69	5.98	6,43	7.85	12.83	75.78

(ONM 2016)

Nous observons que, une grande irrégularité des précipitations moyennes mensuelles avec un maximum de l'ordre de 12.83 mm enregistré pendant le mois de mars, un minimum de l'ordre de 0.17mm enregistré pendant le mois de juillet, et une précipitation moyenne mensuelle de 75.78mm (FigII.2).

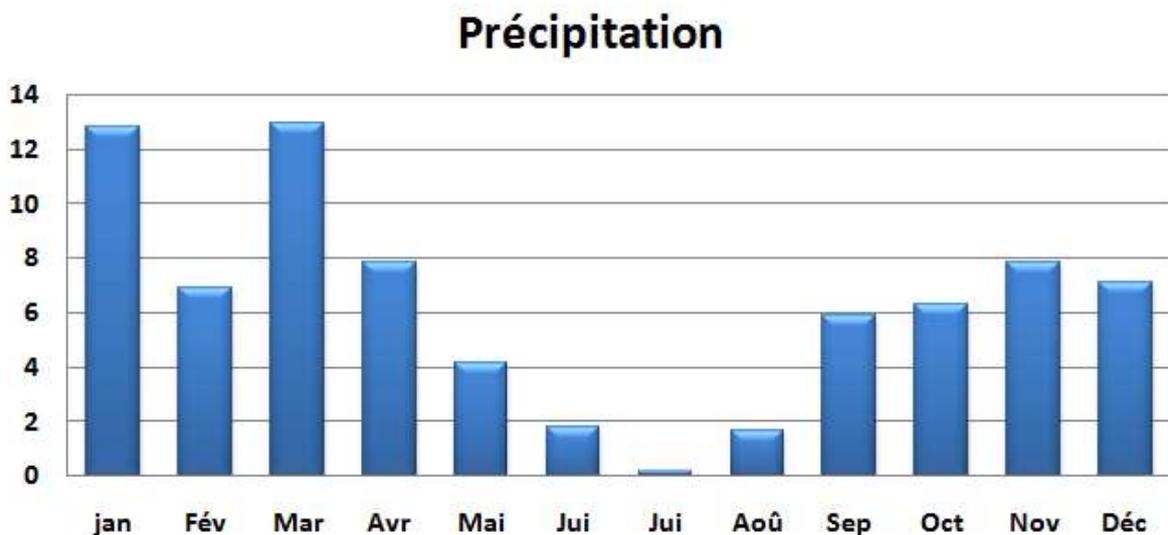


Fig.II.2. Précipitations moyennes mensuelles.(2007-2016)

II.2.3. Le vent:

Nous remarquons que les vents sont fréquents durant toute l'année. Les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période allant du mois de avril jusqu'au mois de juin, avec un maximum de 3.11m.s^{-1} durant le mois de avril. Les vents Est et Nord-Est prédominent, puis avec un degré moindre ceux de direction Ouest et Sud-Ouest (sirocco) caractérisés par une température élevée. Généralement, c'est au printemps que les vents

sont les plus forts (période de pollinisation des palmiers), ils sont chargés de sables éoliens donnant au ciel une teinte jaune et peuvent durer jusqu'à trois jours consécutifs avec une vitesse allant de 30 à 40 Km / h (Fig.II.3).

Tableau II.04: Répartition moyenne mensuelle de la vitesse du vent (ONM, 2016):

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Vmoy (m/s)	1.83	2.3	2.91	3.11	3.03	2.96	2.39	2.14	2.24	1.69	1.62	1.54	2.31

(ONM, 2016)

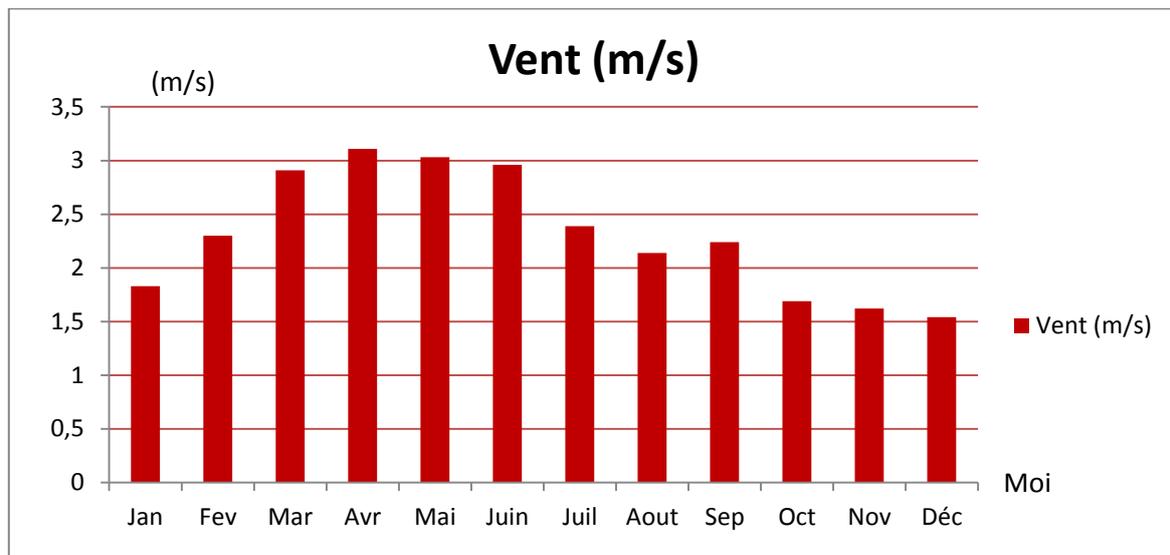


Fig.II.3: Vitesses moyennes mensuelles des vents

II.2.4. Evaporation:

Les plans d'eau (sebkhas et chotts) situés dans des zones arides présentent une forte évaporation puisque l'ensemble des facteurs se trouvent réunis; une température de l'air souvent élevée pendant les saisons sèches, une forte insolation presque continue durant toute l'année et une présence considérable de vents secs (grande vitesse) surtout durant l'automne et le printemps.

Tableau II.05: Répartitions de l'évaporation (ONM, 2016)

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
Eva (mm)	80.4	93.1	167.6	203	288.2	337.8	361.6	321.4	184.2	143.7	106.3	87.3	2374.6

Les volumes d'eau perdus par évaporation atteignent leur maximum au mois de Juillet avec 361.6 mm contre un minimum de 80.4mm au mois de Janvier (Fig.II.4).

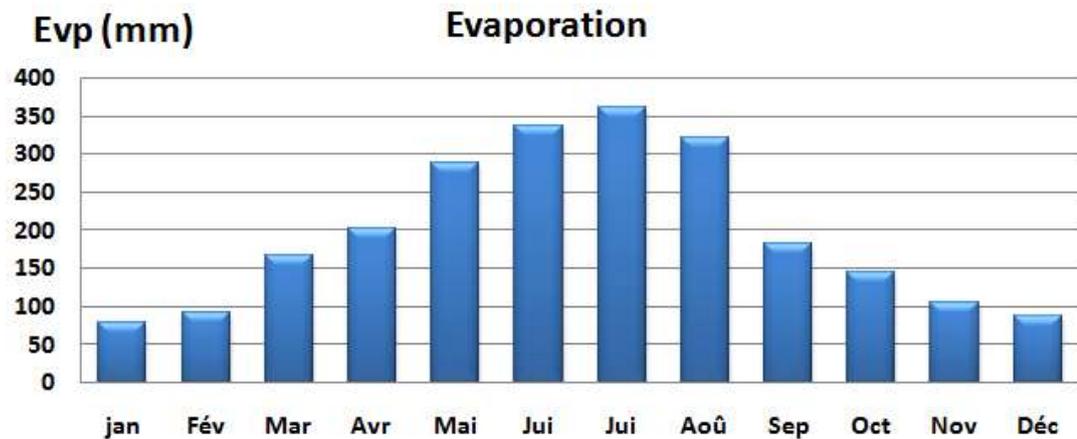


Fig.II.4. Répartition de l'évaporation

II.2.5. Humidité:

L'humidité est un état de climat qui représente le pourcentage de l'eau existant dans l'atmosphère, elle a des effets sur les altérations chimiques telles que l'oxydation.

Tableau II.06: Répartition moyenne mensuelle de l'humidité:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
H (%)	65.01	57.35	49.53	42.92	38.36	33.61	31.99	33.54	47.94	53.22	60.02	66.83	48.36

(ONM, 2016)

la moyenne mensuelle de l'humidité relative est de 48.36%. Cette humidité varie sensiblement en fonction des saisons. En effet, pendant l'été, elle chute jusqu'à 31.99% pendant le mois de Juillet et ceci sous l'action d'une forte évaporation et des vents chauds, alors qu'en hiver, elle s'élève et atteint une moyenne maximale de 66.83% au mois de Décembre (Fig.II.5).

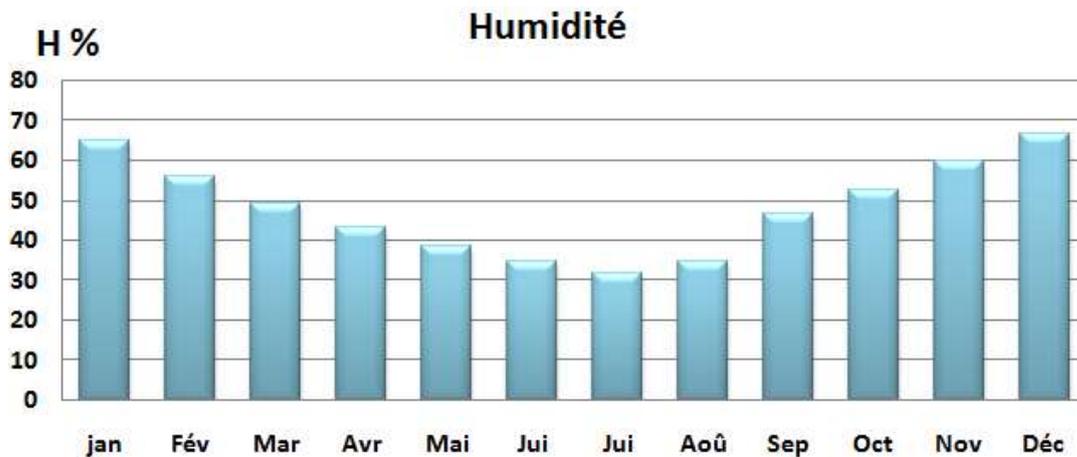


Fig.II.05: Humidité moyenne mensuelle

II.3. Diagramme pluviothermique:

En se basant sur les données des précipitations et des températures mensuelles sur la même période d'observation, on peut établir la courbe pluviothermique dont le but est de déterminer la période sèche et celle humide. Un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne (°C) du même mois. Cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations.

A partir de ce diagramme, on constate que l'année hydrologique de la région d'étude est caractérisée uniquement par une période sèche et l'absence total de la période humide, même pour le mois de janvier qui est marqué par la température la plus basse (10,43 °C) et la précipitation la plus élevée (12.83mm).(Fig.II.6).

Tableau II.07: Couple température/ précipitation mensuelle interannuelle:

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
T(°C)	10,43	21,81	16,38	20,19	25,28	30,09	32,84	32,78	28,44	22,27	15,75	11,03	21,52
P(mm)	12.83	6.93	7.14	7.95	4.15	1.84	0,17	1.69	5.98	6.43	7.85	12.83	75.78

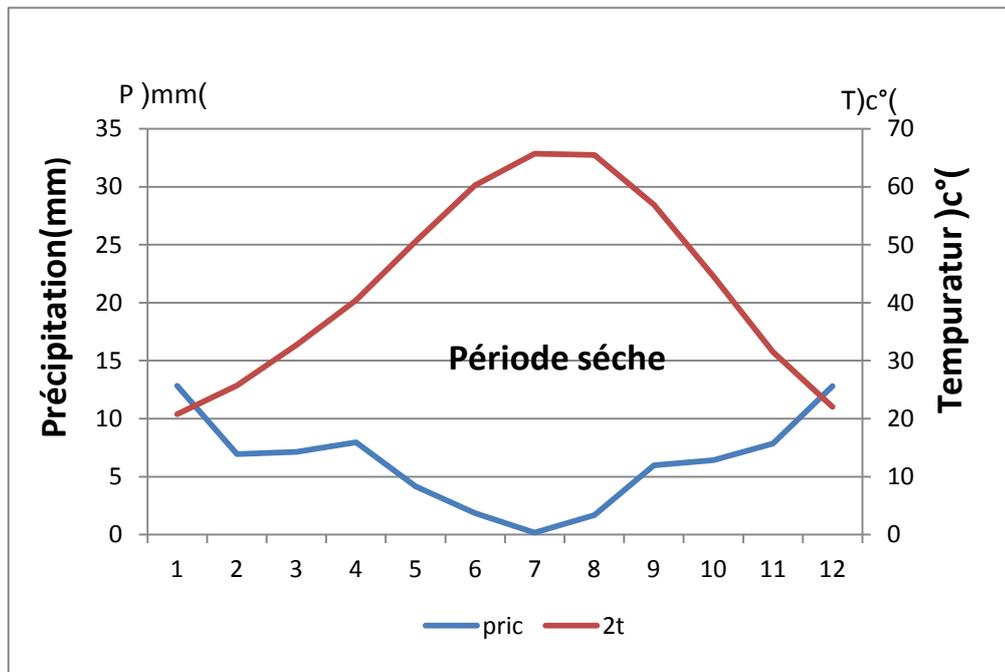


Fig.II.06: Diagramme Ombrothermique de la région d'Oued Souf (2007-2016).

➤ **L'indice d'aridité :**

Cet indice dépend essentiellement des précipitations moyennes mensuelles en (mm) et la température annuelle en (°C), en appliquant la formule suivante :

$$I = \frac{P}{T+10} \dots\dots\dots(II-1)$$

Avec :

I : indice d'aridité.

P : précipitation moyenne mensuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

▪ **Application numérique :**

P=75.78

T=21.52°C.

Donc : I= 2.40

Tab.II.08: Classement en fonction de l'indice d'aridité:

Classement de l'indice d'aridité	Type de climat
$I < 05$	Climat hyperaride
$05 < I < 07.5$	Climat bdésertique
$07.5 < I < 10$	Climat bstepgique
$10 < I < 20$	Climat semi-aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré
30	Climat humide

$I < 5$, Ce qui confirme que la région d'El-Oued est caractérisée par un climat hyper aride.

II.4. Le bilan hydrique:

Le bilan hydrique permet de connaître les deux périodes ; la période sèche ou le déficit en eau se fait sentir, c'est-à-dire durant la période où les précipitations sont inférieures aux quantités d'eau évapotranspirée et où la réserve facilement utilisable (RFU) est la période humide pendant laquelle les précipitations augmentent et interviennent dans la reconstitution des réserves..

II.4.1. L'évapotranspiration:

Le phénomène d'évapotranspiration intervient dans le cycle hydrogéologique dès le moment où les précipitations, sous forme liquide ou solide, atteignent la surface du sol.

De plus, l'humidité du sol, soit qu'elle provienne des pluies récentes infiltrées à faible profondeur, soit qu'elle remonte par capillarité de la nappe phréatique constituée directement ou par l'intermédiaire de la couverture végétale un aliment important pour l'évaporation.

En hydrologie, on désigne par évaporation l'ensemble des phénomènes .

Qui par un processus spécifiquement physique, transforment l'eau en vapeur

✓ On distingue, en fait, deux types d'évapotranspiration:

-L'évapotranspiration potentielle (ETP) employée lorsque la surface évaporante est convenablement alimentée.

- L'évapotranspiration réelle (ETR) qui représente une fraction de l'ETP, et ne tient compte de l'abondance de l'eau qu'à la surface évaporante.

Evapotranspiration est donc fonction de:

- ✓ Facteurs physiques (T° de l'air, degré d'insolation).
- ✓ Facteurs géographiques (état de surface évaporant du sol, l'humidité relative de l'air).
- ✓ Facteurs biologiques (espèces végétales, profondeur des racines).

II.4.2. Estimation de l'évapotranspiration potentielle (ETP):

L'évapotranspiration potentielle est la quantité maximale de vapeur d'eau susceptible d'être reprise par l'atmosphère ; si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

L'ETP est évaluée par plusieurs formules empiriques, et exprimée par la hauteur d'eau en mm .Nous utiliserons la formule de C-W-THORNTHWAITE:

$$ETP = 16 k \left[\frac{10T}{I} \right]^a \dots\dots\dots(II- 2)$$

ETP: Evapotranspiration potentielle corrigée (mm).

I : Indice thermique annuel qui représente la somme des indices mensuels i .

$$I = \sum i \text{ avec } \dot{i} = \left(\frac{T}{5} \right)^{1.514}$$

a: Exposant climatique avec $a = \left(\frac{1,6}{100} \right) I + 0,5$

k: coefficient de correction, qui dépend du temps et de la latitude.

Tableau II.09: Résultats de l'ETP obtenus par la formule de « C.W. Thornthwaite ».

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
I	3,04	9,30	6,02	8,27	11,62	15,13	17,28	17,23	13,89	9,59	5,68	5,31	122,36
K	0,88	0,66	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	0,97	0,88	0,66	-
ETP (mm))	9,59	42,27	33,18	58,04	108,64	166,41	208,69	195,85	124,75	65,32	25,80	8,16	1046,7

I= 122,36 a= 2,4

II.4.3. Estimation de l'évapotranspiration réelle (ETR):

C'est la somme de l'évapotranspiration et de la transpiration réelle pour une surface donnée et une période définie .On l'estime par la formule de (TURC) qui est basée sur la température et la précipitation moyenne mensuelles.

$$ETR \text{ (mm)} = P / \left(\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}} \right) \dots\dots\dots(II-3)$$

Avec:

ETR : évapotranspiration réelle en (mm) .

$$L = 0,05T^3 + 25 T + 300(\text{Pouvoir évaporant}).$$

P = Précipitations en (mm) .

T = température en °C.

Application:

P= 75.78mm

T = 21.52°C donc: $L = 300 + 25 * 21.52 + 0.05 * (21.52)^3$

$$L = 1336,30$$

Donc : ETR= 70,43mm.

L'estimation de l'évapotranspiration réelle ETR en (mm) est liée au volume de précipitation.

Trois cas peuvent se présenter :

1^{er} cas : $P \geq ETP \longrightarrow ETR = ETP$.

Il Ya une reconstitution des réserves du sol jusqu'à saturation, le surplus va représenter l'écoulement superficiel.

2^{ème} cas : $P < ETP \longrightarrow ETR = P + RFU$

Dans ce cas la RFU (réserve facilement utilisable) va s'épuiser jusqu'à satisfaction de l'ETP.

3^{ème} cas : $P \leq ETP$ et RFU .

Il aura un déficit agricole (DA) représenté par la quantité d'eau qui doit être apportée pour l'irrigation

II.4.4. Estimation de la réserve facilement utilisable (RFU):

Elle présente la quantité d'eau emmagasinée dans la couche pédologique (RFU) qui est facilement utilisable par les plantes et nécessaire pour leur bon fonctionnement physiologique.. Son degré de saturation dépend de plusieurs facteurs :

- ♣ La nature, la composition lithologique et l'épaisseur de la couche superficielle.
- ♣ La profondeur du niveau piézométrique de la nappe aquifère.
- ♣ Le climat de la région.
- ♣ Le type de la couverture végétale.

On peut calculer la RFU d'après la formule de Hallaire: $RFU = \frac{1}{3} Da \cdot He \cdot P$

RFU : réserve facilement utilisable en cm.

Da : Densité apparente du sol.

He : Humidité équivalente du sol.

P : profondeur de la couche de la terre parcourue par les racines en mm.

On prend RFU = 100, C'est la valeur maximale de la réserve facilement utilisable, mais seulement dans les régions sahariennes (d'après les agronomes de l'Institut National d'agronomie d'Alger).

II.5. Etablissement du bilan:

La formule générale du bilan d'eau donne l'égalité des apports et des pertes évaluées sur une grande période.

$$P = ETR + EX$$

Avec : P : Précipitation en (mm).

ETR : la lame d'eau évaporée réellement en (mm).

EX : Excédent(mm).

Lorsque les quantités d'eau provenant des pluies dépassent celles perdues par l'évapotranspiration, le surplus est stocker constituant ce qu'on appelle la réserve facilement utilisable (RFU). Si après le remplissage du stock, il reste un surplus qui s'écoulera (Excédent : $EXC = P - ETR$).

Dès que les pluies sont inférieures à l'ETP, il y a épuisement du stock.

Une fois la RFU est épuisée, c'est le déficit agricole ($DA = ETP - ETR$).

Tableau II.10: Bilan hydrique d'après Thorntwaite (2016).

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Total
P(mm)	12.83	6.93	7.14	7.95	4.15	1.84	0,17	1.69	5.98	6.43	7.85	12.82	75.78
T(C°)	10,43	21,81	16,38	20,19	25,28	30,09	32,84	32,78	28,44	22,27	15,75	11,03	21,52
K	0,88	0,66	1,03	1,09	1,19	1,20	1,22	1,15	1,03	0,97	0,88	0,66	-
I	3,04	9,30	6,02	8,27	11,62	15,13	17,28	17,23	13,89	9,59	5,68	5,31	122,36
ETP (mm)	9,59	42,27	33,18	58,04	108,64	166,41	208,69	195,85	124,75	65,32	25,80	8,16	1046,7
ETR (mm)	9,59	6,93	7,14	7,95	4,15	1,84	0,17	1,69	5,98	6,43	7,85	12,82	72,55
RFU (mm)	9,59	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	9,59
Exc. (mm)	3,24	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	00	3,24
Def (mm)	00	35,34	26,04	50,09	104,49	164,6	208,52	194,16	118,77	58,89	17,95	4,67	818,92

Formules de vérification:

1. $\Sigma P = \Sigma ETR + \Sigma EX$

On a $\Sigma ETR + \Sigma EX = 72.55 + 3.24 = 75.78$.

2. $\Sigma ETP = \Sigma ETR + \Sigma DA$

On a $\Sigma ETR + \Sigma DA = 72.55 + 987.98 = 1046,7$.

➤ Interprétation du bilan hydrique:

Au terme de ce bilan hydrique pour le selon Thorntwaite, nous pouvons dire que :

- ✓ La région d'étude reçoit des précipitations moyennes mensuelles de l'ordre de (75.78mm) et une température moyenne mensuelles de l'ordre de (21.52C°).
- ✓ l'ETP atteint le maximum au mois de Juillet (208,69 mm) et son minimum au mois de décembre (8,16 mm).
- ✓ L'Evapotranspiration réelle (ETR) totale est de (72.55 mm)
- ✓ La constitution de la RFU ne s'effectue qu'au mois de Janvier avec une valeur de 9,59 mm et le reste de l'année est épuisée.
- ✓ Il y a un déficit agricole durant toute l'année d'où la nécessité d'irriguer.
- ✓ L'excédent mensuelles est égal à 3.24 mm

II.6. Conclusion:

L'analyse climatique a permis de ressortir les résultats suivants :

- La précipitation moyenne mensuelle est de l'ordre de 75.78mm.
- La température moyenne mensuelle est de l'ordre 21.52 C°.
- La région de Souf a un climat hyper aride.
- Le mois le plus humide est Décembre (moyenne mensuelle 64,38%) d'un faible rayonnement solaire.
- Le mois le plus sec est Juillet caractérisé par une faible humidité (moyenne de 30,02 %). La brillance de soleil.
- L'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 72.55mm soit des précipitations mensuelle (selon la méthode de Thorntwaite).

Ces résultats montrent que les conditions climatiques (infiltration efficace) ne contribuent pas à la recharge de la nappe libre

Chapitre III
Etude Hydrogéologie
et hydrodynamique

III.1. Introduction:

L'étude hydrogéologique a pour finalité la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines, ce-ci après avoir une idée sur le comportement et l'évolution de la surface piézométrique, ainsi sur le comportement hydrodynamique et les conditions aux limites de ces ressources.

Le dimensionnement de la couche mouillée et l'estimation de volume de réservoir nécessitent la mise en évidence :

- ✓ Des niveaux piézométriques grâce à la carte piézométrique.
- ✓ De la carte de substratum de l'aquifère.
- ✓ Des paramètres hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, porosité).
- ✓ Identification d'inventaire des points d'eau.

III.2. Cadre hydrogéologique générale:

Dans le Sahara Septentrional, les nappes aquifères les plus sollicitées sont la nappe du Continental Intercalaire (CI) et celle de Complexe Terminale (CT). L'étude géologique du Sahara Septentrional montre que la dorsale du M'Zab orientée, Nord-Sud divise la plateforme en deux bassins hydrogéologiques:

- Le bassin Occidental (280 000 Km²) drainé vers le Sud.
- Le bassin Oriental (500 000 Km²) drainé vers le Nord (A.N.R.H, 2005).

Au niveau du bassin Oriental, le Continental Intercalaire et le Complexe Terminal sont séparés par la transgression Cénomaniennne alors qu'au niveau du bassin Occidental nous observons l'existence d'une relation directe entre les deux aquifères.

Le Continental Intercalaire s'étend sur une superficie de 600 000 Km² environ, il est limité à l'Ouest par la ligne (N-S) allant de Bechar au Touat, à l'Est il s'étage jusqu'à la Libye, au Sud il est limité par les affleurements du primaire et du socle, et au Nord par l'accident Sud Atlasique. Le Complexe Terminal (CT) s'étend sur une superficie de 350 000 Km².

Il regroupe les formations récentes déposées dans le bas de Sahara depuis le début du Tertiaire jusqu'au quaternaire; autrement dit, il comprend les formations de l'Eocène et du Mio-pliocène (D.H.W, 2005). Les études géologiques réalisées dans le passé n'ont décelé aucune relation (communication) entre les deux principaux aquifères présents dans la zone d'étude.

III.3. Différentes nappes dans la région:

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

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

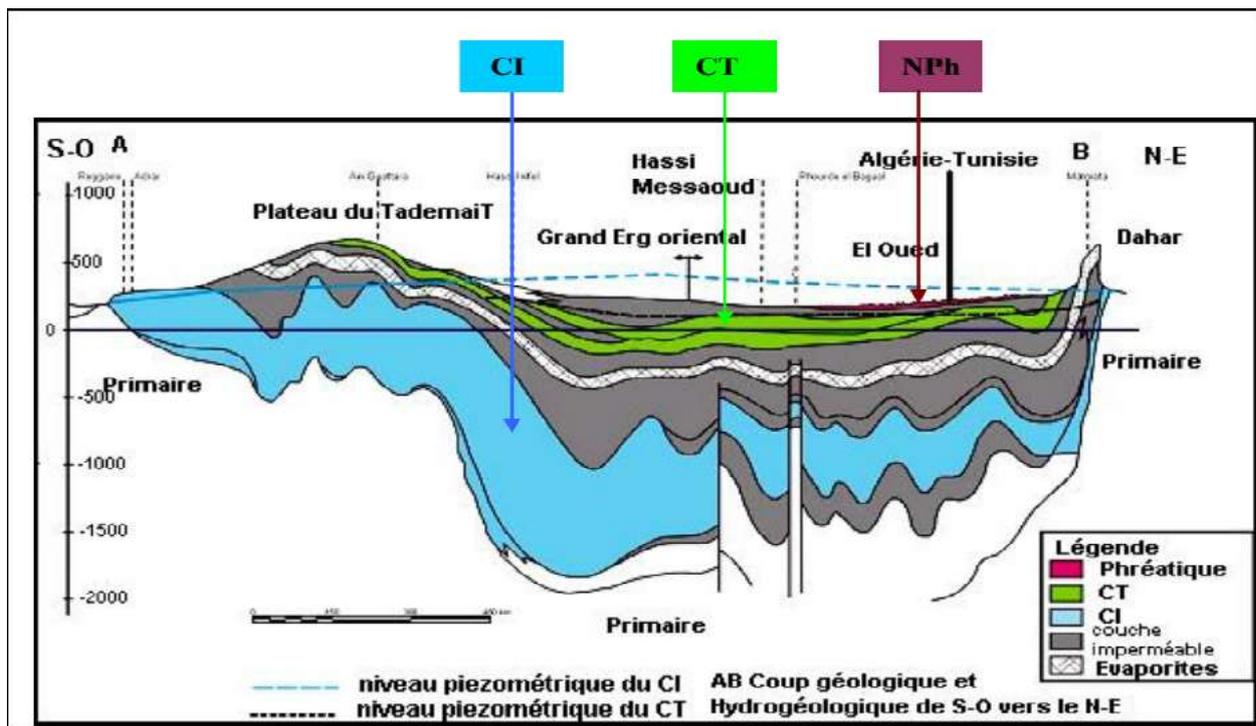


Fig.III.01: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)

III.3.1. La Nappe phréatique:

L'eau phréatique partout dans le Souf, repose sur le plancher argilo gypseux du Pontien supérieur. La zone d'aération qui sépare la surface de cette eau de la surface du sol, ne dépasse pas une profondeur moyenne de plus de 40 m de sable non aquifère (Voisin A.R, 2004).

L'alimentation de la nappe phréatique dans la zone d'étude est assurée par l'infiltration des eaux de forages profonds (CT et CI) et par les rares et faibles précipitations typiquement sahariennes.

Les études passées montrent d'une manière générale, comme d'ailleurs dans tout le Bas-Sahara que le sens de l'écoulement des eaux de la nappe libre est du Sud vers le Nord (Fig .01).

L'aquifère quaternaire du Souf présente une épaisseur moyenne de 40 m. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au Nord-ouest de la région de Foulia et se situe à moins de 10 m de profondeur à l'extrémité Nord-Est de la région d'étude. (Zaiz ; 2015). Cette nappe a engendré un problème néfaste pour l'environnement dans certaines zones de la région de la vallée.

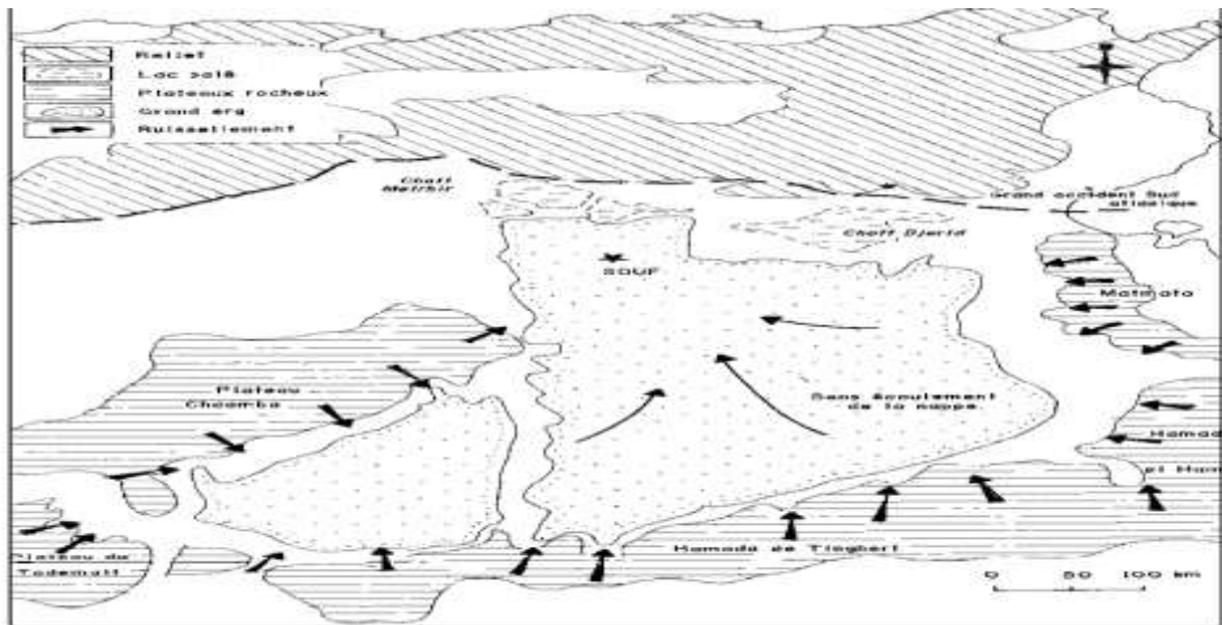


Fig.III.02. Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006).

III.3.2. Complexe Terminal CT:

Ce terme regroupe sous une même dénomination, un ensemble de nappes aquifères qui sont situés dans la formation géologique différentes : Sénonien carbonaté, Eocène et Miopliocène sableux.

D'après CORNET 1964, nous rappelons l'existence des 03 nappes dont les deux premières correspondent respectivement aux nappes de sables d'âge Miocène (Pontien) et Pliocène, alors que la dernière à l'Eocène inférieur.

a- Nappes des sables :

Au sein de ces niveaux sableux, vient s'engendrer deux nappes captives, dont la première correspond à la formation supérieure du Complexe Terminal appelée communément

réservoir du « Sub-Souf ». Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal mène progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud au résienne, dans la région d'étude elle se trouve à 280 mètres de profondeur.

Il faut mentionner également l'existence d'une deuxième nappe de sables d'âge Pontien. Au-dessus des bancs supérieurs de la nappe des calcaires en contact avec les marnes de l'Eocène inférieurs et des graviers siliceux constituant donc une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du Pontien du Sud Tunisien, la profondeur de cette nappe varie entre 400 et 450 mètres.

Dans la zone à fortes exploitations telle que la ville d'El-Oued, l'extraction des eaux se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Laarbi et Douar El Maa, la nappe est exploitée à ce jour artisanalement. C'est le cas de la nappe Pontienne.

b- Les nappes de calcaires:

Le Complexe Terminal possède une litho-stratigraphie plus complexe; les forages captant cette nappe nous montrent l'existence de deux niveaux servant de repère pour la classification des eaux souterraines ; du Sud au Nord, nous observons l'existence d'un premier niveau calcaire mieux individualisé, parfois il est purement calcaire, quelque fois il est formé par des calcaires gypseux. Il correspond au niveau inférieur.

Le niveau supérieur, principalement représenté par des calcaires siliceux, est considéré comme une zone de transition entre la nappe des calcaires et celle des sables. Dans l'ensemble, ces deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses avec des passées d'argile rouge.

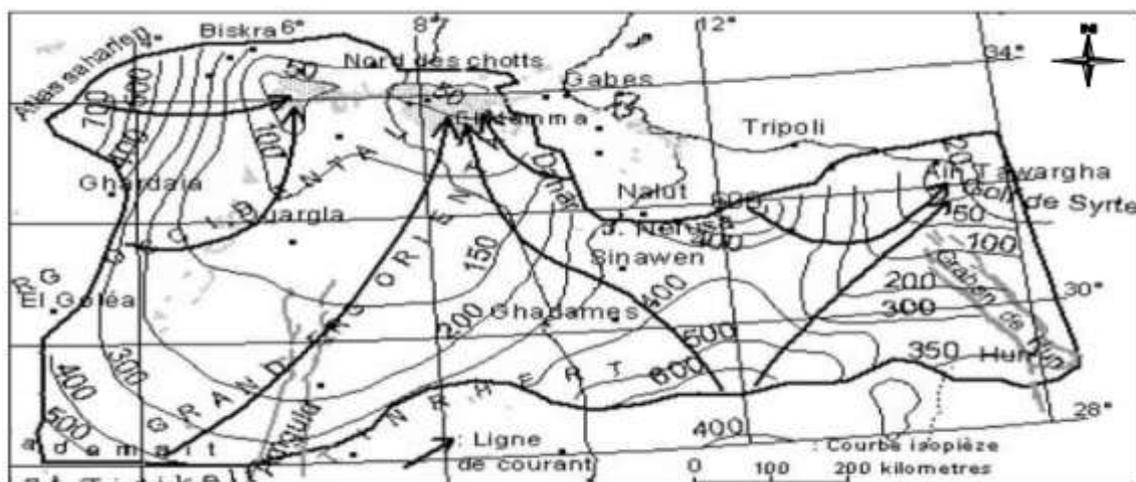


Fig.III.03: Limites de l'aquifère du Complexe terminale avec les niveaux piézométrique et les sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)

III.3.3. Nappe du Continent Intercalaire (CI):

Le terme « C.I » correspond ainsi aux formations continentales du Crétacé inférieur cette période se situe entre deux cycles sédimentaires régité par une régression marine suivit d'une transgression du Crétacé supérieur.

Le Continent Intercalaire occupe l'intervalle stratigraphique compris entre la base Trias et le sommet de l'Albien.

Le traitement manquant du réservoir aquifère du Continental Intercalaire est son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600 000 Km² et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Bien que l'intérêt majeur de ce système aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eaux qui ont été stockées au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et qui peuvent maintenant être exploitées ; il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoire.

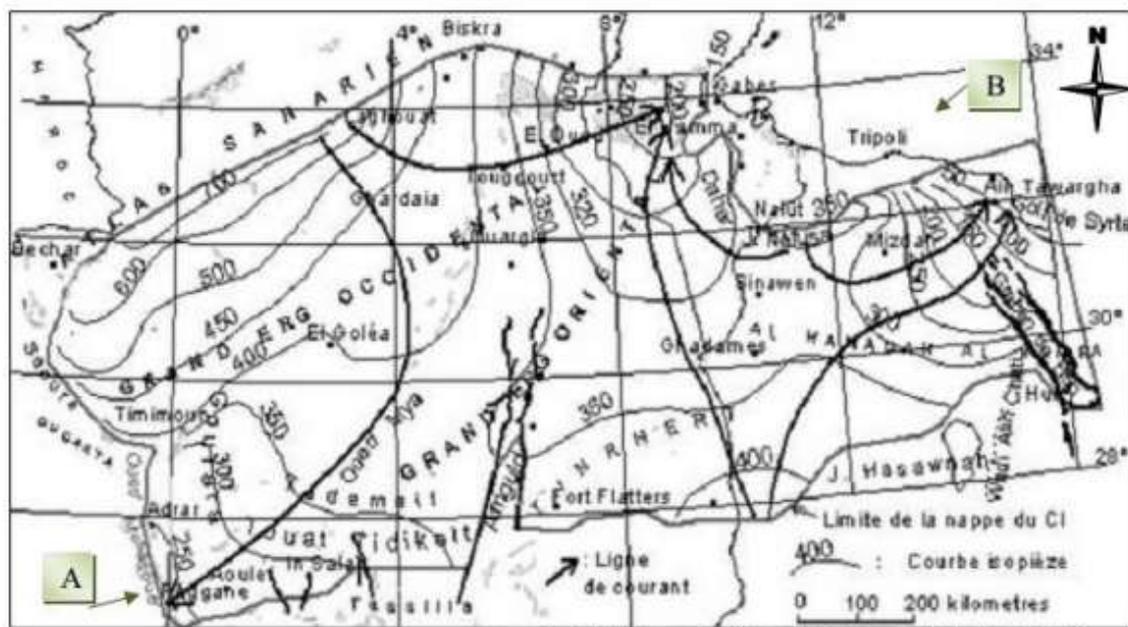


Fig.III.04: Limite de l'aquifère du Continental Intercalaire avec les niveaux piézométrique et le sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)

Tableau III.01: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El Oued

COUPE	NATURE HYDROGEOLOGIQUE	NATURE LITHOLOGIQUE	ETAGE		ERE
	Nappe Phréatique	Sables			Quaternaire
	niveau imperméable	Argiles			
	1 ^{ère} nappe des sables	Sables	Pliocène		Tertiaire
	Semi-perméable	Argiles gypseuses			
	2 ^{ème} nappe des sables	sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	
	niveau imperméable	Argiles lagunaires, Marnes	Moyen	Eocène	
	nappes des calcaires (perméables)	calcaire fissuré	Inferieur		
	semi-perméable	Evaporites, Argiles	Sénonien carbonaté	crétacé	Secondaire
	niveau imperméable	argiles, marne	Cenomanien		
	Nappe de Continental Intercalaire	Sables et Grés	Albien		

(Bousalsal B, 2007)

III.4. Inventaire des points d'eau:

La nappe du complexe terminal (CT) dans la vallée d'El-Oued-Souf est très sollicitée notamment pour l'AEP, d'après l'inventaire 2012 on a montré que les 106 forages sont utilisés pour l'alimentation en eau potable et 24 forages sont utilisés pour l'irrigation.

III.5. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du CT:

La détermination des caractéristiques hydrauliques de la nappe de complexe terminal se fait par des pompages d'essai.

Cette méthode consiste à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage.

L'étude de ces graphiques permet :

- D'analyser l'évolution du cône de dépression de la surface piézométrique .
- De préciser les principales caractéristiques hydrauliques de la nappe .
- De voir en temps réel l'effet de l'exploitation de l'aquifère.

III.5.1. Types des pompages d'essais:

• **Essais de puits:** Cet essai consiste en l'exécution de pompage par palier de débit de courte durée avec la mesure du niveau d'eau dans le puits. Cet essai permet de déterminer les caractéristiques du complexe : aquifère / ouvrage de captage. La manière la plus rentable sans très solliciter la nappe, est de n'extraire que la réserve régulatrice afin d'éviter une surexploitation minière de la ressource. Cela n'est possible que si le débit d'exploitation est inférieur au débit critique en respectant le nombre d'heure de pompage par jour.

• **Essais de nappe:** Cet essai est réalisé en un seul palier de débit de longue durée, avec la mesure des niveaux d'eau dans le forage (rabattement) et dans des piézomètres si c'est possible. Ce type d'essai est utilisé dans le but de déterminer les paramètres hydrodynamiques de l'aquifère (transmissivité, coefficient d'emménagement...). Il faut noter que l'interprétation n'est possible que si le type d'aquifère est identifié.

III.5.2. Essais de pompage:

Des essais de pompage par paliers et de longue durée ont été réalisés sur 03 sites répartis dans la zone d'étude de la vallée d'El Oued, à Guemar (Erg Essouari), Sidi Aoun (Ouled Rhouma), El Oued (Pôle universitaire).

L'essai par paliers est composé de quatre paliers de 24 heures chacun à débit constant, séparés par un intervalle d'au moins 12 heures. L'essai de longue durée a consisté en un pompage à débit constant de 72 heures suivi de 24 heures de remontée. Son interprétation a permis de calculer (la transmissivité (T), le coefficient de perméabilité (K), le coefficient de perméabilité verticale (Kv) et la porosité efficace (Sy).

L'interprétation des pompages d'essais repose sur des méthodes graphiques d'approximation. Après l'utilisation du logiciel (Aquifère Test), ces méthodes sont toutes basées sur les hypothèses suivantes :

- Le débit est supposé constant pendant toute la durée de pompage .
- La surface de la nappe est supposée horizontale .
- le forage capture la nappe sur la totalité de son épaisseur .
- L'écoulement est supposé laminaire .
- L'aquifère est illimité .

III.5.3. Interprétation des données des essais de pompage:

III.5.3.1. Forage (Erg Essouari, commune de Guemar):

Ce forage est implanté dans la partie Nord-Ouest de la ville de Guemar à proximité de la route RN 48 entre Guemar–Réguiba Wilaya d'El Oued, de 364 m de profondeur. L'essai à

longue durée qui a été réalisé a une durée de 72 heures pour vérifier la descente et la stabilité de niveau d'eau avec un débit constant de 40 l/s

Tableau III.02: Calcul de débit spécifique: Valeurs débits /rabattements

(Forage Erg Essouari, commune de Guemar)

Palier	Niveau dynamique (m)	Rabattement $\Delta s(m)$	Débit (l/s)
01	44.24	7.24	20
02	47.93	10.93	30
03	52.78	15.78	40
04	53.48	16.48	40

a. Débits spécifiques:

Après l'utilisation du logiciel (aquifère Test), le débit spécifique est déterminé à partir de la droite débits- rabattement à un temps de 240 minutes (4h). Les rabattements correspondants aux différents paliers sont respectivement : 7.24m, 10.93m, 15.78m et 16.48m

(Tableau III.02). Débits spécifiques (m^2 /s) = débit (m^3 /s) / rabattement (m)

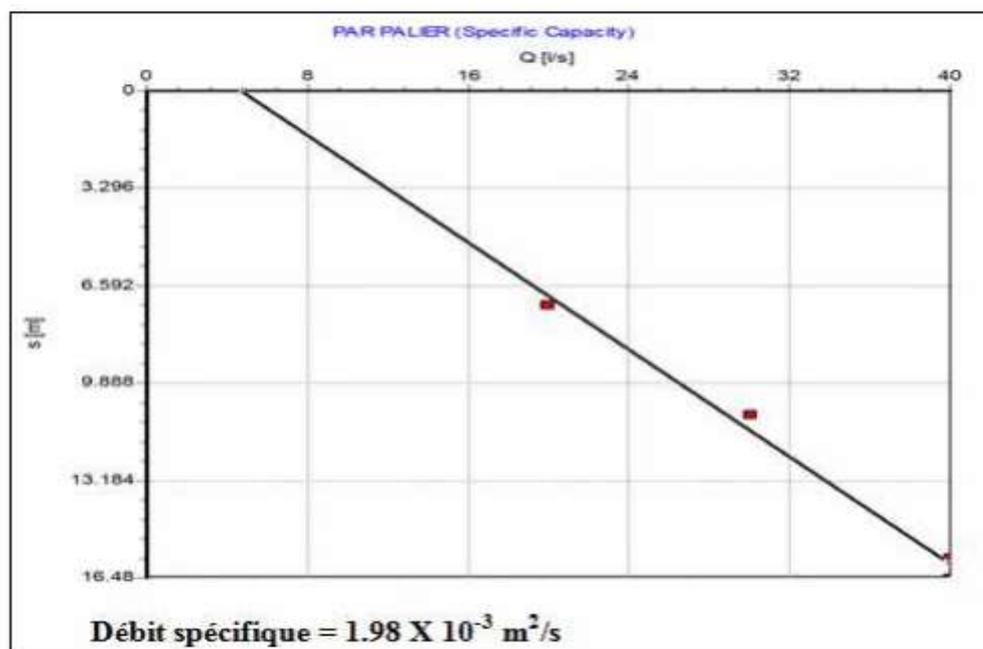


Fig III.05: Courbe débit / Rabattement à (Forage Erg Essouari)

b. Perméabilité:

"La perméabilité est l'aptitude d'un réservoir à se laisser traverser par l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique" (G. CASTANY). Elle est mesurée notamment par le coefficient de perméabilité K défini par la loi de Darcy comme le volume d'eau gravitaire traversant une

unité de section perpendiculaire à l'écoulement en 1 seconde sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. En prenant comme unités le m^2 et le m^3 , K est exprimé en m/s.

Coefficient de perméabilité (K):

Le coefficient de perméabilité dépend à la fois des caractéristiques du réservoir (granulométrie, porosité efficace) et des caractéristique du fluide (viscosité, donc température, et masse volumique).

Le coefficient de perméabilité d'un sol est un coefficient important dépendant de :

- La granulométrie du sol.
- La nature du sol.
- Les caractéristiques physiques du liquide, viscosité (eau).
- Degré de consolidation du sol.

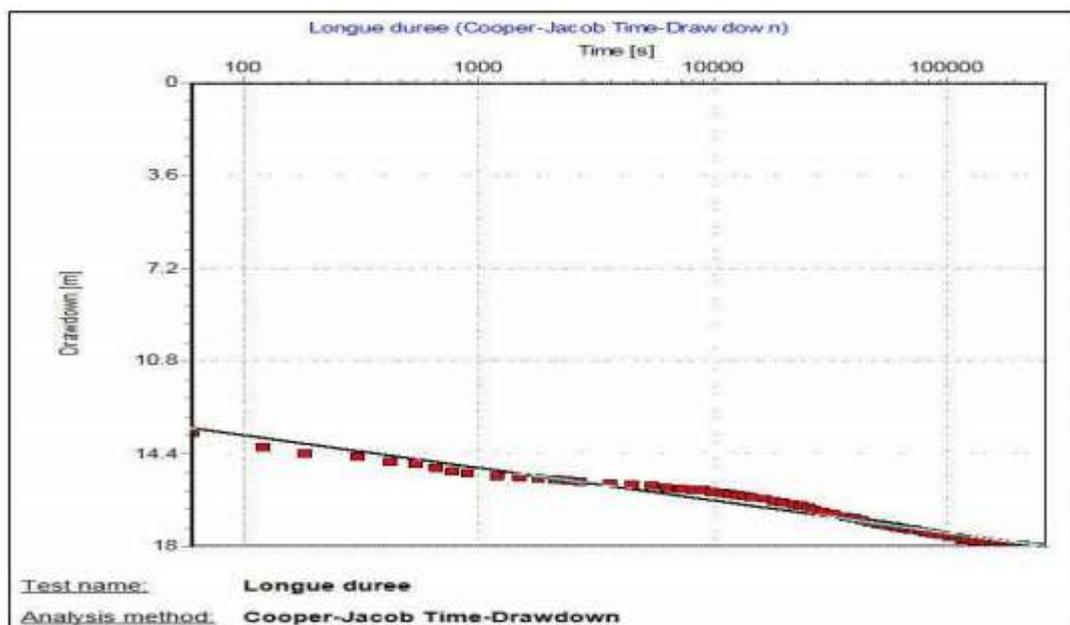


Fig III.06: Essai de pompage à longue durée au forage Erg Essouari

$$\text{Transmissivité} = 5.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$\text{Perméabilité} = 8.78 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

a- Calcul du coefficient d'emmagasinement

La storativité S d'un aquifère, ou coefficient d'emmagasinement, est le volume d'eau libéré ou stocké par l'aquifère par unité d'aire horizontale de l'aquifère par unité de variation du gradient hydraulique. La storativité dépend en général des propriétés élastiques de l'eau et du milieu.

Le coefficient d'emmagasinement est obtenu par calcul numérique dans le deuxième terme de l'expression de Jacob. Ou, plus simplement, avec t_0 , lorsqu'il peut être déterminé,

par l'expression suivante : $S = 2.25T t_0 / r^2$

Il faut noter que ce paramètre ne peut être calculé correctement que si on a des mesures au niveau d'un piézomètre ce qui n'est pas le cas pour les présents essais.

III.5.3.2. Forage (OuledRhouma) commune de Sidi Aoun :

Ce forage est implanté dans la partie Nord-Ouest de la ville de Sidi Aoun wilaya d'EL-Oued, de 354m de profondeur. L'essai qui a été réalisé a une durée de 72 heures pour vérifier la descente et la stabilité du niveau d'eau avec un débit constant de 40 l/s.

**Tableau III.03: Calcul de débit spécifique: Valeurs débits /rabattements
(Forage Ouled Rhouma)**

Palier	Niveau dynamique (m)	Rabattement $\Delta s(m)$	Débit (l/s)
01	37.57	3.16	20
02	39.68	5.27	30
03	42.32	7.91	40
04	42.41	08	40

a. Débits spécifiques:

Le débit spécifique est déterminé à partir de la droite débits- rabattement à un temps de 240 minutes (4h). Le rabattement à 20 l/s est de 3.16 m, celui à 30 l/s est de 5.27m, celui à 40 l/s est de 7.91m et celui à 40 l/s (essai longue durée) est de 8 m.

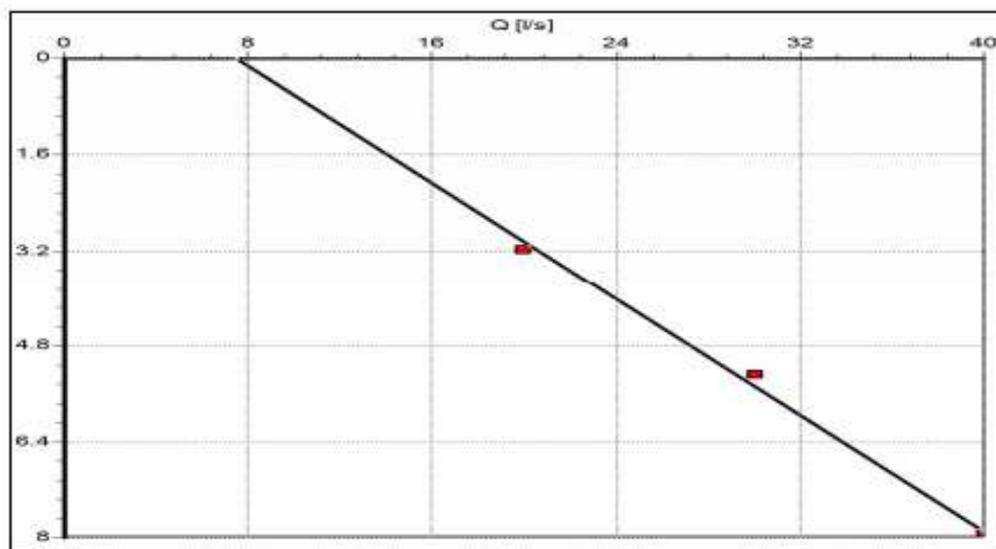


Fig III.07: Courbe débit / Rabattement à (Forage Ouled Rhouma)

Débits spécifiques (m^2 / s) = débit (m^3 / s) / rabattement (m).

Débit spécifique = $4.12 \times 10^{-3} m^2 / s$

b. La transmissivité:

La transmissivité est le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur d'un aquifère sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique. Elle représente la capacité de l'aquifère à transmettre l'eau à travers une unité de surface. Elle peut donc nous situer sur la perméabilité du milieu.

Selon que cette valeur est élevée ou faible l'aquifère peut être jugé bon ou mauvais. Pour sa détermination plusieurs méthodes empiriques ont été établies (Théis, Cooper-Jacob, Banton- Bangoy).

Dans le cadre de notre étude, la méthode utilisée est celle de Cooper- Jacob.

✓ **L'approximation logarithmique de Cooper-Jacob:**

La transmissivité est calculée par la pente de la droite représentative l'échelle des coordonnées n'étant pas homogène, la pente est déterminée par l'accroissement des rabattements (ou des profondeurs des niveaux d'eau) au cours d'un module logarithmique.

$$T = \frac{0.183Q}{C} \dots\dots\dots$$

T : La transmissivité en (m² /s).

Q : Le débit (longue durée) en (m³ /s).

C : La pente moyenne (‰)

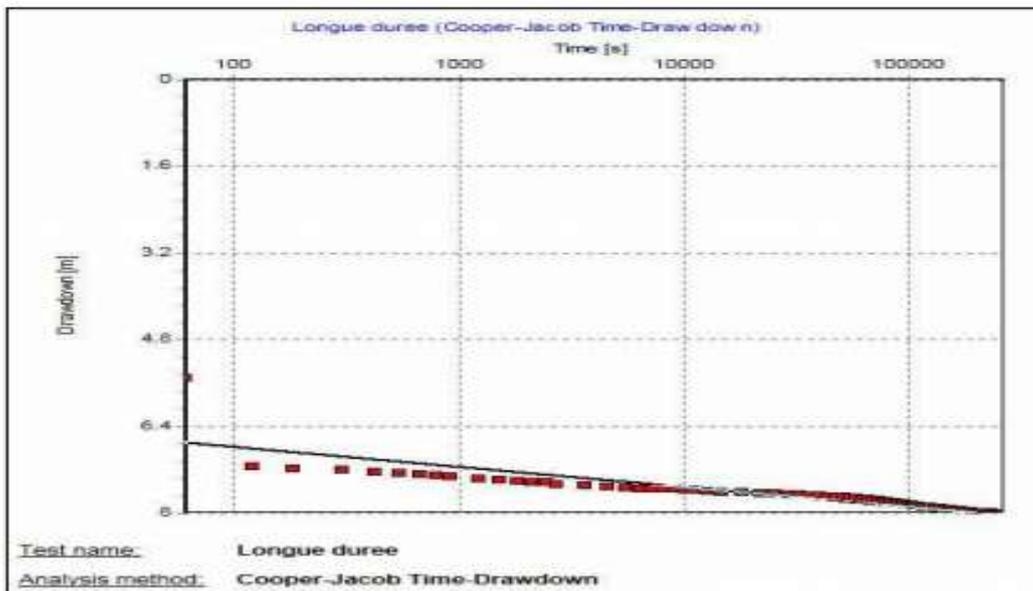


Fig III.08: Essai de pompage à longue durée à (Forage Ouled Rhouma)

Transmissivité = $1.98 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$

Perméabilité = $4.13 \times 10^{-4} \text{ m/s}$

III.5.3.3. Forage (Pôle universitaire) commune d'El Oued:

Ce forage est implanté dans la partie Nord de la ville d'El Oued près aux résidences de 284m de profondeur.

L'essai qui a été réalisé a une durée de 72 heures pour vérifier la descente et la stabilité de niveau d'eau avec un débit constant de 37 l/s.

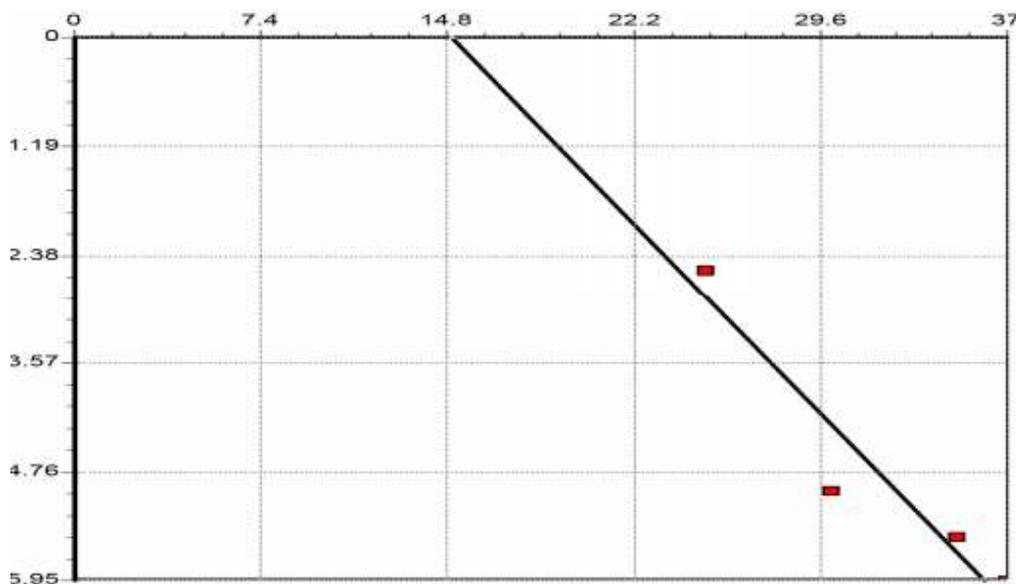
Tableau III.04: Calcul de débit spécifique: Valeurs débits /rabattements (Forage Pôle universitaire)

Palier	Niveau dynamique (m)	Rabattement $\Delta s(m)$	Débit (l/s)
01	47.78	2.54	25
02	50.20	4.96	30
03	50.71	5.47	35
04	51.19	5.95	37

a. Débits spécifiques:

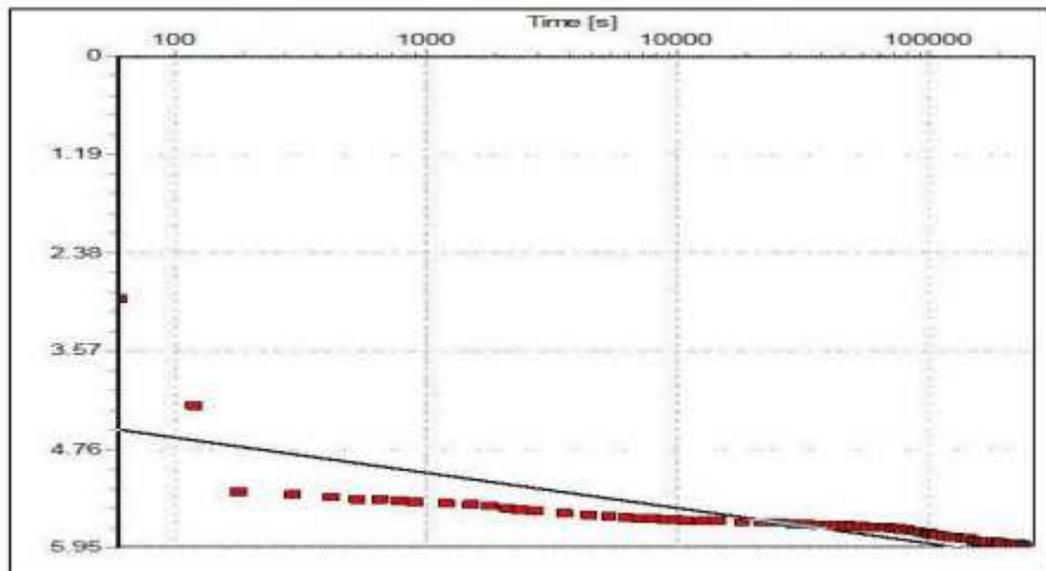
Le débit spécifique est déterminé à partir de la droite débits- rabattement à un temps de 240 s (4h). Le rabattement à 25 l/s est de 2.54m, celui à 30 l/s est de 4.96m, celui à 35 l/s est de 5.47m et celui à 37 l/s (essai longue durée) est de 5.95m.

Débits spécifiques (m^2 /s) = débit (m^3 /s) / rabattement (m).



Débit spécifique = $3.55 \times 10^{-3} m^2 /s$

Fig.III.09: Courbe débit / Rabattement à (Forage pôle universitaire)

b- La Perméabilité et la transmissivité**Fig. III.10: Essai de pompage à longue durée (Forage pôle universitaire)**

$$\text{Transmissivité} = 1.59 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$$

$$\text{Perméabilité} = 4.42 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Tableau III.05: Récapitulatif des résultats des paramètres hydrodynamiques pour les 03 sites d'essai.

Essai (station)	Débit Spécifique (m ³ /s)	T (Cooper-Jacob) (m ² /s)	K(Cooper – Jacob) (m/s)
Guemar	1.98 x 10-3	5.79 x 10-3	8.78 x 10 –5
Sidi Aoun	4.12 x 10-3	1.98 x 10-2	4.13 x 10 –4
El-Oued	3.55 x 10-3	1.59 x 10-2	4.42 x 10 –4
Moyenne	3.21 x 10-3	1.38 x 10-2	3.14 x 10 –4

Les transmissivités sont homogènes sur les trois stations d'essai et les valeurs sont semblables, que ce soit en pompage ou après l'arrêt de celui-ci. D'une station à l'autre, les écarts sont peu importants, de l'ordre de 1 à 4 entre les extrêmes avec $5.79 \times 10^{-3} \text{ m}^2 / \text{s}$ à Guemar et $1.98 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$ à Sidi Aoun. La transmissivité moyenne est de $1.38 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$. La perméabilité moyenne est de $3.14 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

III.6. Etude piézométrique:

Le but de la carte piézométrique est la présentation de la configuration de l'aquifère et de schématiser la fonction conduite du réservoir et le comportement hydrodynamique de l'aquifère, elle traduit la morphologie de la surface d'eau de la nappe à une époque déterminée.

Une campagne piézométrique effectuée pendant les basses eaux a permis de suivre l'évolution de la piézométrie de la nappe.

III.6.1. La carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011:

La carte montre que la surface piézométrique n'est pas régulière, une zone basse située au Nord-Ouest à Hassi Khalifa où le niveau piézométrique est compris entre 21 et 25 m, on remarque aussi que le niveau piézométrique dans la commune d'El Oued varie entre 70 et 75 m. Les hauts niveaux piézométriques de la nappe sont situés à Robbah 81.9 m et Trifaoui qui marque une valeur de 80 m, On doit tirer la valeur de gradient hydraulique à partir la carte piézométrique et multiplier cette valeur par la perméabilité.

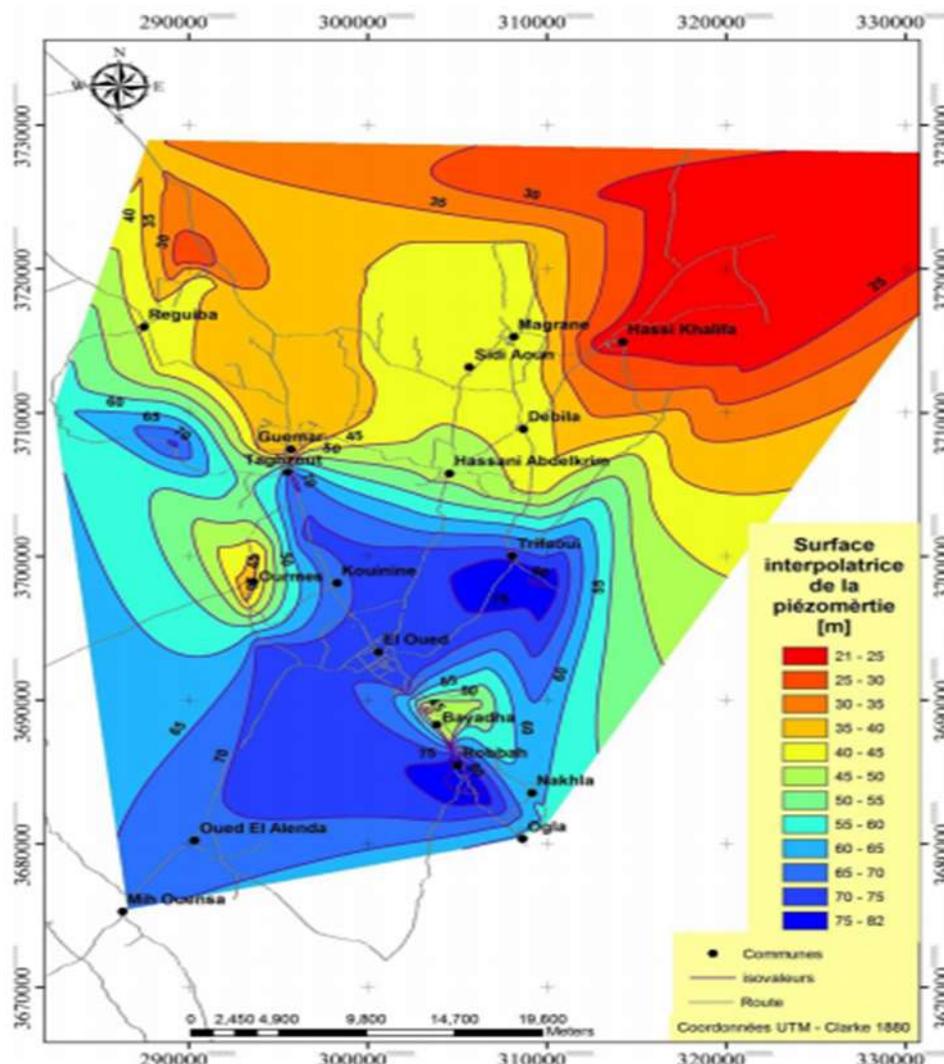


Fig. III.11: Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 (Khechana, 2014)

• **Le gradient hydraulique:**

ΔH : la différence de charge entre deux points alignés aux lignes de courants.

L : la distance entre ces deux points.

La valeur moyenne de gradient hydraulique est 2.5×10^{-3} (i_{ab} et i_{cd}).

• **La vitesse d'écoulement:**

La vitesse d'écoulement des eaux demeure variable d'une région à une autre. La légère variation constatée au niveau des équipotentiels :

$$V = K \times i \dots\dots\dots$$

Avec :

K : la conductivité hydraulique ou coefficient de perméabilité (m/s)

i : Le gradient hydraulique.

On remarque que cette valeur est très faible, indiquant une faible pente de la surface piézométrique et par conséquent une faible vitesse d'écoulement.

Tableau III.06: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux du nappe phréatique (AOUT 2019)

Nom	pH	CE (ms/cm)	HCO ³⁻ (mg/l)	F- (mg/l)	Cl- (mg/l)	Br- (mg/l)	NO ³⁻ (mg/l)	PO ₄ ³⁻ (mg/l)	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	K ⁺ mg/l	Ca ²⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)	TDS (mg/l)
CH1	7.36	4,48	87,925	0,241	1201	0,362	28.06	14.63	482.61	26,5	251	137	2716
CH2	7.51	2,51	71,269	0,122	1009	0,211	19.69	9.86	390.26	17,2	176	89.0	2169
CH3	7.39	5,36	88,267	0,251	1314	0,368	28.66	14.93	536.27	26,9	260	141	2915
CH4	7.40	4.37	179.34	0.275	8012	0.425	38.52	13.85	695.51	25.0	296.5	70.84	2340
CH5	7.31	4.37	190.32	0.190	7728	0.352	48.30	11.54	821.22	37.0	272.5	155.5	2478
CH6	7.40	4.39	196.42	0.175	8012	0.275	32.86	12.89	789.74	36.0	292.8	106.91	2251

III.6.2. Aptitude des eaux à la potabilité:

Afin de définir la potabilité des eaux souterraines, nous allons baser sur deux types de normes; Ceux de l'O.M.S et ceux basé sur le D.H.T.

a. Selon l'O.M.S :

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (Tableau III.15) qui traduisent les limites de potabilité. On distingue :

- Une concentration maximale acceptable à partir de la quelle une eau provoque une certaine réticence chez le consommateur.
- Une concentration maximale admissible qui correspond à la quantité maximale de substance à tolérer et dont la teneur supérieure peut être dangereuse à la santé.

Tableau III.07: Normes de potabilité de l'O.M.S

Eléments Chimiques	Concentration maximal acceptable (mg/l)	Concentration maximal admissible (mg/l)	Pourcentage des Echantillons ayant une concentration inférieure à la Concentration maximale admissible
Calcium	75	200	00
Magnésium	50	150	50
Sodium	150	250	00
Sulfates	200	500	00
Chlorures	200	400	00

L'examen du tableau III.06 montre que tous les échantillons analysés ont des teneurs en SO_4^{2-} , Ca^{+2} et Cl^- supérieures aux normes maximales admissibles. Pour le magnésium 82 % des eaux ont des teneurs inférieures aux normes. Cependant pour les nitrates elles restent tous inférieures aux normes maximales admissibles.

En résumé que d'après les analyses physicochimiques réalisées au laboratoire de en(aout 2019) pour de la nappe du phréatique alimentant la ville d'Oued Souf. On constate ce qui suit :

- ✓ Le PH varie entre 7 et 7.7. Il est conforme aux normes (6.5 - 8.5).
- ✓ Les valeurs de la conductivité électrique varient entre 3403.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 5099.5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, elles dépassent la norme admise (200 à 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), pour toute la région d'étude.
- ✓ Les teneurs en calcium (Ca^{+2}) varient entre 212.4 mg/l et 364.7 mg/l dépassant la norme qui est de 100 à 140 mg/l. Par contre pour le magnésium 82% des teneurs conformes à la norme
- ✓ Les concentrations en chlorure (Cl^-) dans les forages varient entre 522.8 mg/l et 1126.5 mg/l dépassant la norme (500 mg/l).
- ✓ Les concentrations en sulfate (SO_4^{2-}) oscillent entre 194.7 et 1313.9 mg/l dépassant la norme préconisée qui est de 400 mg/l.
- ✓ Les concentrations en potassium (K^+) varient entre 3.1 et 49.9 mg/l dépassant largement la norme qui est 12 mg/l.

b. Selon le degré hydrométrique total (D.H.T):

Le degré hydrométrique ou la dureté d'une eau correspond à la somme des concentrations en calcium et en magnésium.

- $\text{DHT} = r \text{Ca}^{+2} + r \text{Mg}^{+2}$ (en méq/l)
- $\text{DHT} = (r \text{Ca}^{+2} + r \text{Mg}^{+2}) * 5$ (en degré Français °F).

Montre que la totalité des eaux analysées (100%) sont très dures, dont le D.T.H est supérieur à 100 °F. Cette dureté a des conséquences plus ou moins néfastes telle que la consommation excessive du savon et la mauvaise cuisson des légumes secs et le goût inacceptable, ce qui oblige les citoyens à acheter l'eau à des propriétaires.

III.6.3. Aptitudes des eaux à l'irrigation:

L'abondance de sodium dans l'eau d'irrigation peut provoquer également la dispersion et la destruction de la structure du sol, si la teneur en sodium est au moins trois fois supérieure à celle du calcium, dans de telles conditions, il peut devenir extrêmement difficile à satisfaire les besoins en eau de la culture. Le risque est déterminé à partir de la valeur du sodium absorbable «Sodium Absorption Ratio » (S.A.R) pour une même conductivité, le risque est d'autant plus grand que le coefficient est plus élevé.

Le S.A.R est donné par la formule ci-dessous, il est utilisé en combinaisons avec la conductivité électrique de l'eau.

$$SAR = \frac{Mg+2}{\sqrt{\frac{Ca+2+Mg+2}{2}}}, \text{ , où tous les éléments sont exprimés en méq/l}$$

Par sa qualité bactériologique, l'eau souterraine doit être destinée prioritairement à l'AEP, malheureusement ce n'est pas le cas pour la nappe du Complexe Terminal d'Oued Souf à cause de sa qualité impropre. Afin d'estimer l'influence de ces eaux sur le sol et sur certaines cultures pratiquées dans la région, nous allons essayer d'évaluer leur aptitude à l'irrigation

III.7. Conclusion

A partir de cette étude, nous constatons que la région à une particularité spécifique de point de vue géologique, ainsi que les conditions tectoniques et paléogéographiques ont permis la mise en place d'une série sédimentaire avec une lithologie variée dans le temps, régulière et homogène dans l'espace.

Ces conditions ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès. La stratigraphie de la région est caractérisé par des séries sédimentaires allant de Crétacé inférieur jusqu'aux dépôts de Quaternaire

Les formations du Quaternaire récentes forment l'aquifère détritique de la nappe phréatique, il est surtout sableux à gréseux avec parfois du gypse et des argiles localisées

particulièrement dans la partie Nord-Est où il se termine par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

Le système aquifère est constitué de trois nappes : nappe libre (phréatique), et deux nappes captives (nappe de complexe terminal et nappe de continentale intercalaire). L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui a été effectué au niveau des 03 stations nous permet de définir les paramètres hydrodynamiques de la nappe du complexe terminal :

- Le débit soutiré oscille entre 10 l/s à 55.5 l/s
- Transivité moyenne de la nappe du CT est $1.38 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / \text{s}$
- La perméabilité de CT dans la région du Souf est comprise entre 10^{-3} et 10^{-4} m/s

pour la nappe la plus exploitée du mio-pliocène, ce qui nous donne une valeur moyenne de coefficient de perméabilité $K = 3.14 \times 10^{-4}$ m/s.

- La porosité efficace estimée à 5%

La piézométrie de CT selon l'inventaire (2011) dans la région du Souf varie entre 21m.

à Hassi Khalifa et 81,90 m dans la région de Rabah. Nous remarquons par ailleurs l'existence de l'artésianisme à Douar El Ma et Hamraia

La profondeur moyenne de la nappe du CT varie entre 200 et 600 mètres. Quant à l'épaisseur Utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ. (ANRH ,DRE 2016).

L'étude hydro-chimique de la région montre la prédominance des éléments chimiques (Cl^- , HCO_3^- et Ca^{+2}) et des faciès sulfaté sodique, chlorure sodique, sulfaté calcique, chloruré calcique et faciès sulfaté magnésien. Au cours de ce travail, on a pu définir la qualité des eaux de la nappe du phréatique , du point de vu potabilité et aptitude à l'irrigation. D'après l'interprétation des analyses physico- chimiques, ces eaux sont trop salées et la concentration des éléments majeurs dépasse de loin les normes de potabilité de l'OMS, ce qui nous laisse parler à des eaux de mauvaise qualité pour la consommation humaine.

Chapitre IV

La carte de vulnérabilité par la méthode DRASTIC

IV.1. Introduction:

L'eau souterraine est considérée comme polluée lorsqu'elle contient des substances autres que celles liés aux structures naturelles des terrains où elle a séjourné, en particulier lorsque les concentrations des constituants dissous ou en suspension dépassent les concentrations maximales admissibles fixées par les standards nationaux ou internationaux.

Le but de l'établissement de la carte de vulnérabilité est de montrer quelles sont, suivant les terrains rencontrés en surface, les possibilités de pénétration et de propagation des polluants dans le terrain, de mieux apprécier la fragilité des captages d'eau potable existants, de mieux cerner les zones à risque lors du choix de nouveaux sites des captages, et de prévoir les mesures compensatoires à mettre en œuvre sur les infrastructures existantes ou à créer pour limiter les risques de pollution chronique ou accidentelle, diffuse ou ponctuelle.

IV.2. Mécanisme de pollution:

si on considère une pollution se produisant à la surface du sol, elle peut s'infiltrer jusqu'à la surface de la nappe selon les manières :

IV.2.1. Dans une nappe libre: on distingue:

- *Une zone non saturée (ZNS)* : comprise entre le sol et la surface de nappe. De nature très diverse suivant le type de roches concernées et d'épaisseur variable, elle conditionne en grande partie les temps de transfert vers la nappe. Suivant que la roche est à perméabilité interstices (sables, grès) ou de fissures (calcaires), les circulations seront plus ou moins rapides. Dans le milieu non saturé les transferts se font sous l'influence d'une composante verticale.

- *Une zone saturée (ZS)* : dont les transferts sont essentiellement latéraux (composante horizontale), selon la direction générale d'écoulement de la nappe.

IV.2.2. Dans une nappe captive:

la pollution ne peut provenir que d'injections volontaires de déchets liquides par forages ou de mise en communication de nappes par des ouvrages non étanches (forages profonds d'eau, hydrocarbure, forages «sauvages »)

IV.2.3. Dans un aquifère fissuré:

La pollution est introduite par les avens et puits par l'intermédiaire de la zone non saturée.

IV.3. Méthodes d'évaluation de la vulnérabilité:

Les méthodes d'estimation de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution sont très nombreuses. Chacun élaborant sa méthode selon ses besoins. La multiplicité des

méthodes provient aussi bien des objectifs recherchés (la réglementation, les activités humaines, les polluants), que du nombre d'organismes qui développent leur propre méthode pour une utilisation spécifique à leur pays.

Le but consiste à proposer un outil de caractérisation simple et efficace, répondant aux aspirations des gestionnaires de l'eau souterraine et de réaliser la synthèse de quelques paramètres ayant une description majeure dans la vulnérabilité des aquifères. Les différentes méthodes sont groupées comme suit:

- Les méthodes fondées sur les documents cartographiques,
- Les méthodes basées sur un système de cotation numérique,
- Les méthodes fondées sur la caractérisation des rejets.

La réalisation de ses cartes repose essentiellement sur la classification des sites en fonction des propriétés et de la géométrie des aquifères, en catégorisant la vulnérabilité à partir des divers paramètres de terrain. Ces cartes sont devenues des documents nécessaires aux études d'impact.

Dans ce travail, on a choisi la méthode DRASTIC.

IV.4. Hypothèses de la méthode DRASTIC:

La méthode DRASTIC est d'origine américaine, développée par NWWA (National Water Well Association), entre 1983 et 1987 comme base pour l'évaluation du potentiel des eaux souterraines. Elle est basée sur un système de cotation numérique et permet l'établissement des cartes de vulnérabilité, qui sont la synthèse des connaissances lithologique, pédologique et hydrogéologique d'une région. Elle repose sur quatre hypothèses fondamentales.

- ❖ Elle s'applique à des unités de surface supérieure à 40 hectares ;
- ❖ La source de pollution potentielle est localisée à la surface du sol ;
- ❖ Les polluants sont entraînés depuis la surface du sol jusqu'à l'aquifère par l'infiltration efficace
- ❖ Dans le cas où la source de pollution est située en profondeur dans le sol, la méthode reste valable à condition de modifier les paramètres affectés par la position de la source de pollution.

IV.4.1. Paramètres DRASTIC:

Le terme DRASTIC est en fait un acronyme formé par l'abréviation de sept (7) paramètres hydrogéologiques plus ou moins faciles à évaluer, à savoir :

D-Depth to water, (Distance à la nappe, épaisseur de la zone non saturée.

R- Recharge, (La recharge nette ou infiltration efficace).

A-Aquifer media, (Le type de l'aquifère).

S- Soil media, (Le type de sol).

T- Topography, (La topographie).

I- Impact of the vadose zone, (L'impact de la zone non saturée).

C- Conductivity, (La conductivité hydraulique ou perméabilité de l'aquifère).

IV.4.2. Indexation ou Système de cotation numérique:

A chaque paramètre DRASTIC, est assigné d'un poids (P) dont la valeur est comprise entre 1 et 5. Cette valeur est relative et tient compte de l'importance du rôle joué par chacun des sept (07) paramètres dans le processus de transport et d'atténuation des polluants.

Un paramètre prépondérant se voit assigner un poids (5), alors qu'un paramètre ayant un faible impact sur l'évolution du polluant se voit affecter un poids 1

Tableau IV.01: Les poids attribués aux paramètres DRASTIC

Paramètres	Poids (général)
D- Profondeur de la nappe	5
R- Recharge nette	4
A- Milieu Aquifère	3
S- Type de Sol	2
T- Topographie	1
I- Impacte de zone non saturée	5
C- Conductivitéhydraulique	3

Chaque paramètre se voit ensuite attribuer une cote (c) pouvant varier entre 1 et 10, laquelle est en fonction des conditions locales propres à l'unité hydrogéologique. Une cote de 1 correspond aux conditions de moindre vulnérabilité alors qu'une cote 10 reflète des conditions très propices à la migration et la propagation du polluant dans le milieu aquifère.

IV.4.3. Calcul de l'indice « DRASTIC » :

L'indice DRASTIC partiel propre à chaque paramètre correspond aux produits du poids par la cote:

$$\text{Poids} \cdot \text{Note} = \text{Indice Partie}$$

IV.4.4. Interprétation de l'indice « DRASTIC » :

L'indice DRASTIC général d'un site donné permet d'exprimer son degré de vulnérabilité. Mais, l'appréciation de cet indice numérique de vulnérabilité n'est possible que par l'analyse comparative entre différents sites ou unités hydrogéologiques. En 1987, le

Canadien R.Fréchette a réactualisé cette représentation, alors cinq classes de vulnérabilité ont été définies .

Tableau IV.02: Les classes de vulnérabilité (Engel et al., 1996)

Degré de vulnérabilité	Type de vulnérabilité
< 101	Faible
101 - 140	Moyen
141 - 200	Fort
> 200	Très fort

IV.5. Application de la méthode DRASTIC pour cartographier la vulnérabilité des eaux souterraines de la vallée de Oued-Souf:

Les principales étapes pour la réalisation des cartes de vulnérabilité sont les suivantes:

- Acquisition de données pour chaque paramètre DRASTIC;
- Préparation des différentes cartes thématiques relatives à chaque paramètre DRASTIC;
- Obtention d'une carte synthèse de vulnérabilité par superposition des différentes cartes thématiques l'aide d'un SIG;
- Classification des grandes unités hydrogéologiques et des sous unités correspondantes.

IV.6. Présentation des paramètres et réalisation des cartes thématiques:

IV.6.1. La profondeur de l'eau (D):

Elle constitue l'épaisseur des horizons traversés par un polluant pour atteindre la nappe.

Afin d'établir la carte des profondeurs du plan d'eau, on a utilisé les données relatives au niveau statique d'eau enregistrés pendant l'année 2016-2017(ADE,ANRH).

L'évaluation de ce paramètre a été faite à partir la superposition de la carte topographique avec la carte piézométrique.

La répartition des indices pour ce paramètre est reportée sur le tableau.

Tableau IV.03: Notation et pondération selon la profondeur

D-Profondeur de la nappe (m)			
Classe	Dn	Dp	Dn.DP
1.5- 4.5	9	5	45
4.5 – 09	7	5	35
09 – 15	5	5	25
15 – 22.5	3	5	15

Les indices ainsi calculés montrent que la profondeur de niveau statique varie de 1.5 à 22.5m, nous ont permis de dresser la carte correspondante (fig.III.11). Elle fait ressortir de forts indices au niveau de la zone frontière de la commune El Oued et Kouinine varie de 35 à 45 avec des profondeurs de 1.5 et 9m. La majorité de la zone d'étude à un indice de vulnérabilité de 25, On note l'existence de certaines zones qui présentent des faibles indices 15 situées dans le centre, avec des profondeurs qui varient entre 15 et 22.5 m.

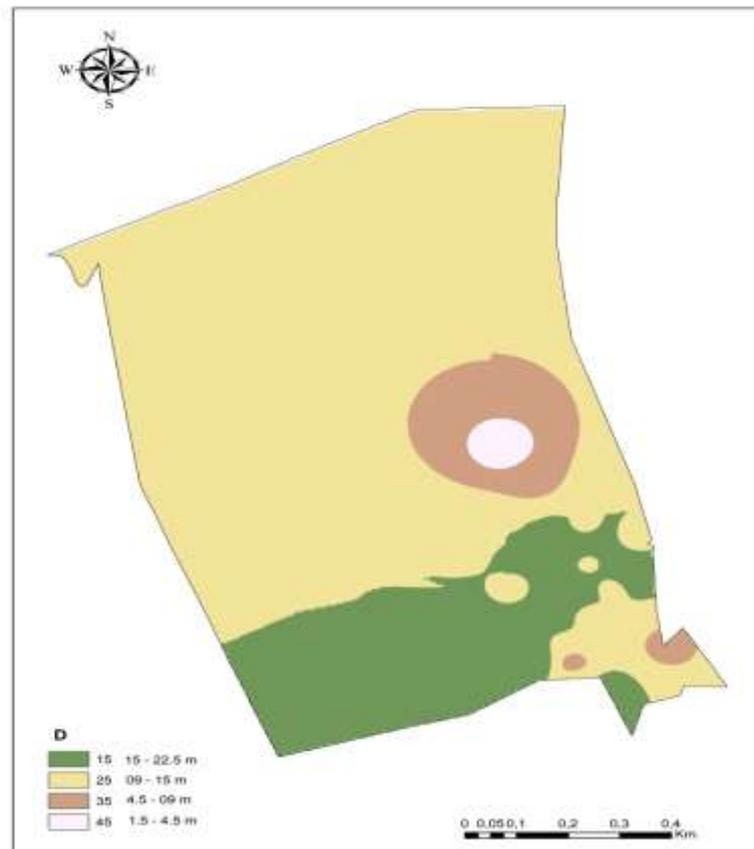


Fig. IV.01: Carte de la profondeur d'eau.

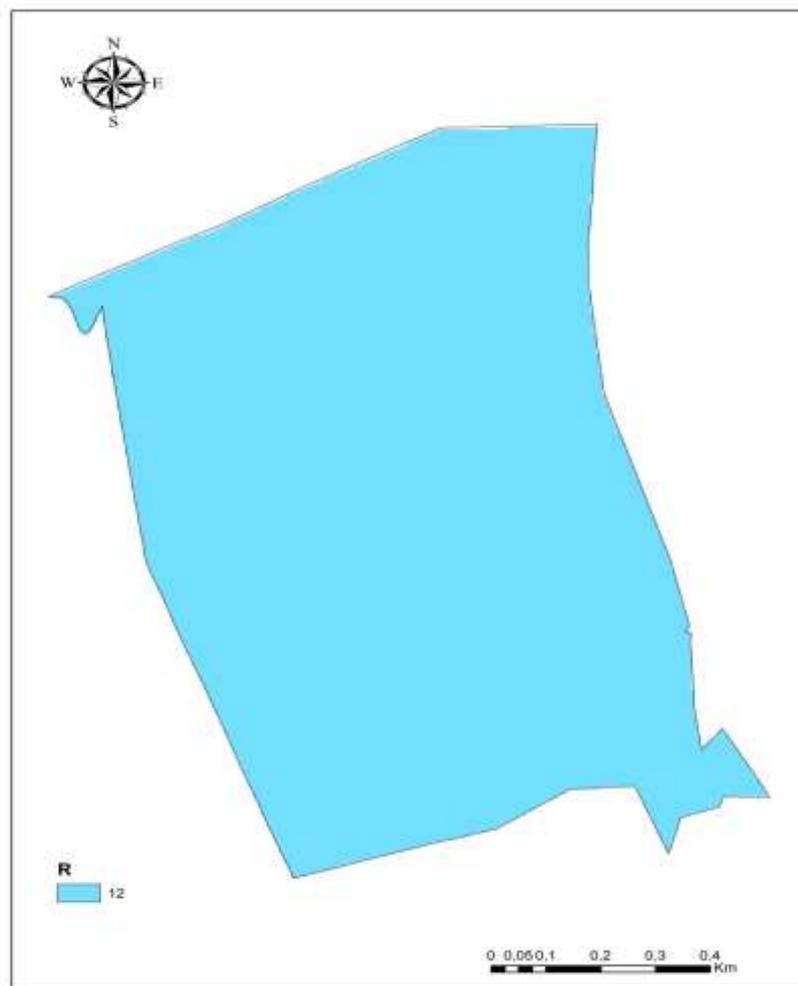
IV.6.2. La recharge nette (R):

Elle concerne la quantité d'eau franchissant la surface du sol pour atteignant le niveau saturé d'une formation aquifère, et contribuant ainsi à l'augmentation du stock d'eau dans cet aquifère. Pour la présente étude, et compte tenu des données climatologiques, cette quantité est estimée à 75.78mm sur l'ensemble de la région d'étude.

Tableau IV.04: Notation et pondération selon la recharge efficace

R- Recharge annuelle en (mm)			
Classe	Rn	Rp	Rn*Rp
50 - 100	3	4	12

La carte met en évidence la même répartition de la recharge sur tout le territoire de la zone d'étude (Fig.IV.02).

**Fig.IV.02: Carte de la recharge.**

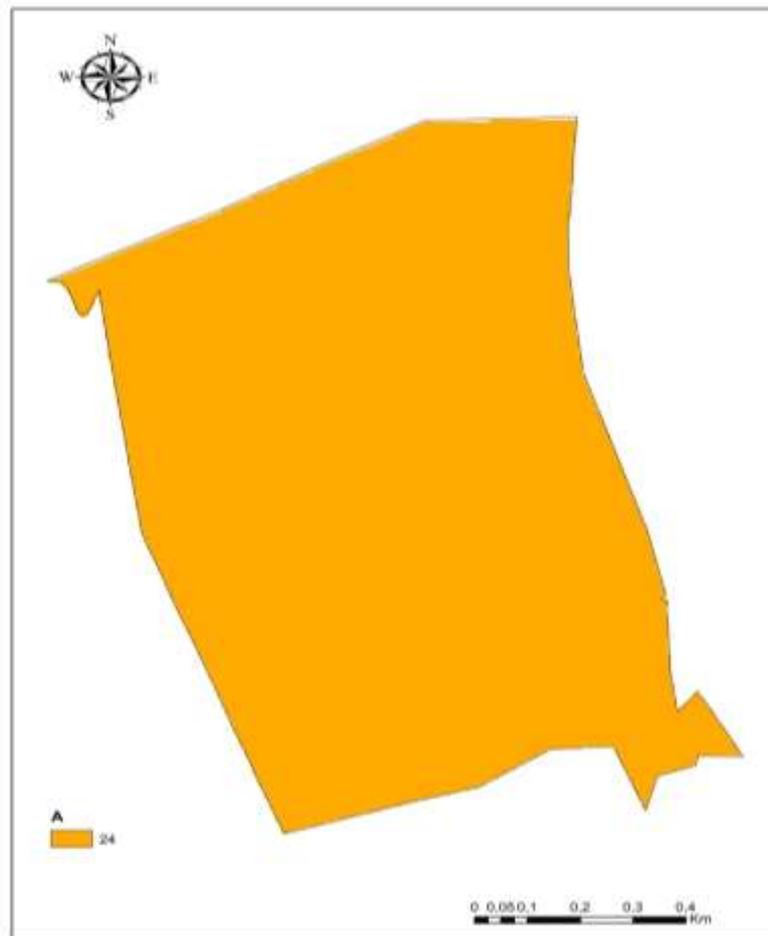
IV.6.3. Nature du milieu aquifère (A):

Elle désigne le matériau de l'aquifère, pour cela nous avons utilisé les logs des forages, le matériau de l'aquifère formé essentiellement de sables et par endroit sable.

Tableau IV.05: Notation et pondération selon la nature de la zone saturée

A- Nature de la zone saturée			
classe	An	Ap	An*Ap
Sable	8	3	24

Les forts indices caractérisent presque toute l'étendue du système à part les sableux (Fig.IV.03).

**Fig. IV.03. Carte de la nature de la zone saturée.**

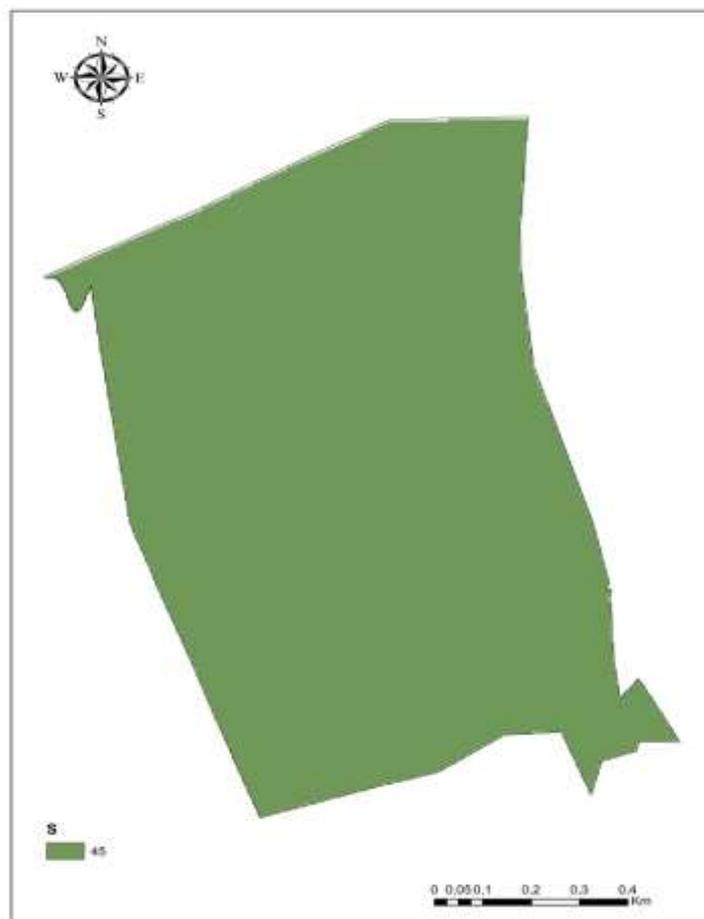
IV.6.4. Type de sol (S):

La texture du sol, par sa nature perméable ou imperméable, peut entraîner les polluants vers l'aquifère, à partir de la carte pédologique et nos observations lors des campagnes de terrain, le sol est d'origine sableux.

Tableau IV.06 :Notation et pondération selon la nature de du sol.

S- Nature du sol			
Classe	Sn	Sp	Sn*Sp
Sable	9	5	45

La carte met en évidence la même répartition de la nature du sol sur toute la zone d'étude (Fig.IV.04).

**Fig.IV.04: Carte de la nature du sol.**

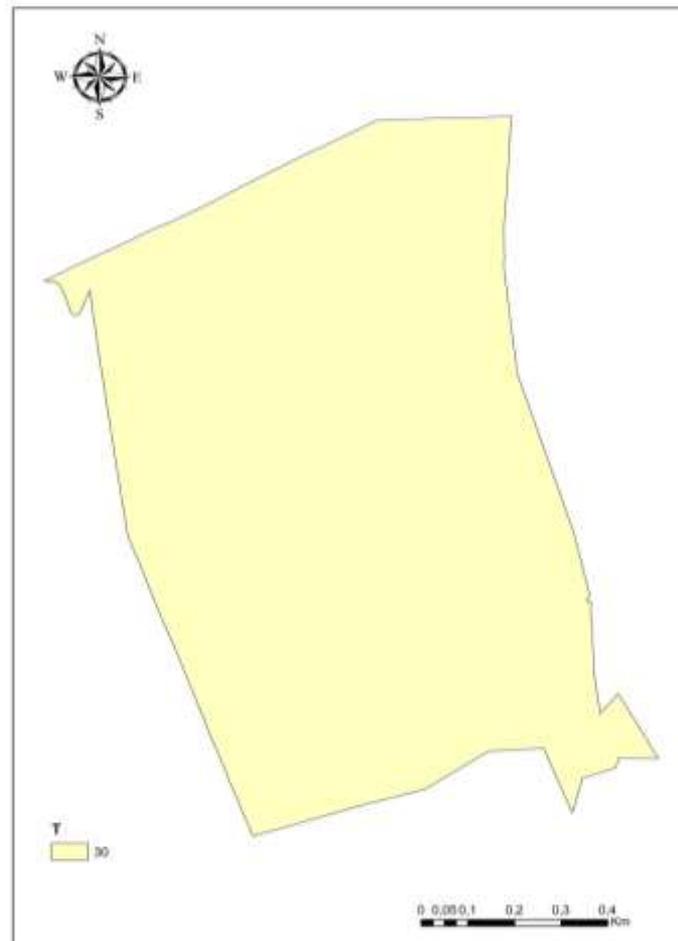
IV.6.5. Topographie (T):

La pente du terrain influence directement sur le temps de concentration des polluants, elle contrôle certains paramètres tels que l'infiltration. L'examen de la carte topographique de la région ne révèle qu'une seule plage où la pente est comprise entre 0 et 2 degrés.

Tableau IV.07: Notation et pondération selon la topographie du terrain

T- Topographie du terrain			
classe	Tn	Tp	Tn*Tp
0 – 2%	10	3	30

La carte montre la même répartition de la Topographie du terrain (Fig.IV.05).

**Fig.IV.05: Carte de la pente.**

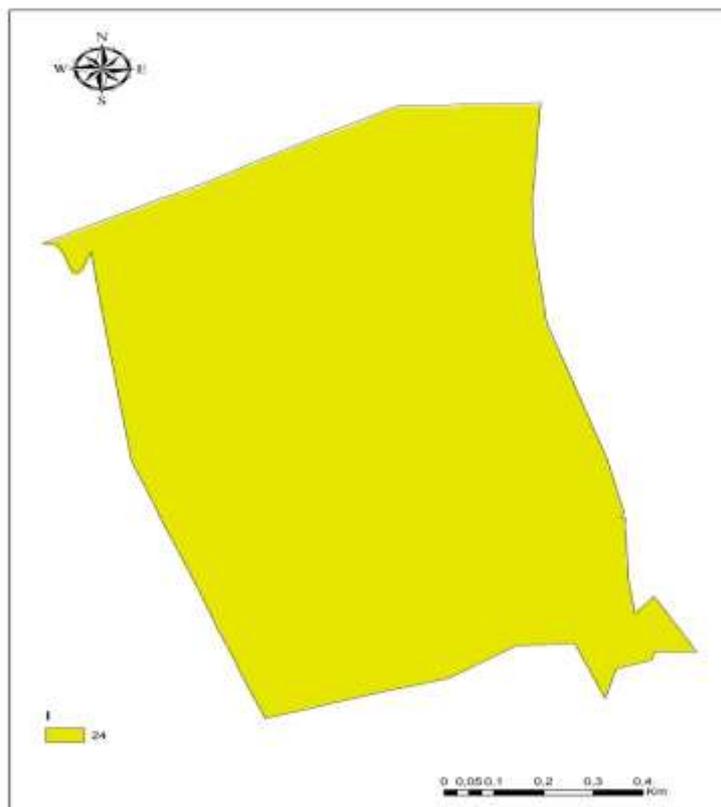
IV.6.6. Impact de la zone non saturée (I):

La nature et l'épaisseur de la zone non saturée, contrôlent dans une certaine mesure la vulnérabilité à la pollution des réservoirs. Cette zone ne contient pas l'eau, mais dans certains cas, elle est caractérisée par une bonne perméabilité facilitant ainsi l'infiltration des eaux polluantes qui vont percoler vers la nappe.

Tableau IV.08: Notation et pondération selon la nature de la zone non saturée

I- Nature de la zone non saturée			
classe	I_n	I_p	$I_n * I_p$
sable	6	4	24

la couche non saturée est homogène formé du sable perméable dans toute la région d'étude (Fig.IV.06).

**Fig.IV:06. Carte de la zone non saturée.**

IV.6.7. Conductivité hydraulique (C):

La perméabilité traduit la vitesse à laquelle l'eau, transportant le polluant par dispersion sous l'effet d'un gradient hydraulique, Ce paramètre est étroitement lié à la granulométrie des formations lithologiques de l'aquifère, Cette carte est évaluée par des résultats de l'interprétation des essais de pompages réalisés dans les forages.

Tableau IV.09: Notation et pondération selon la conductivité hydraulique m/j (perméabilité)

C- Conductivité hydraulique m/j (perméabilité)			
classe	Cn	Cp	Cn*Cp
4 - 12	10	2	20
12 - 29	8	2	16
29 - 41	6	2	12
41 -82	4	2	8
82 et plus	2	2	4

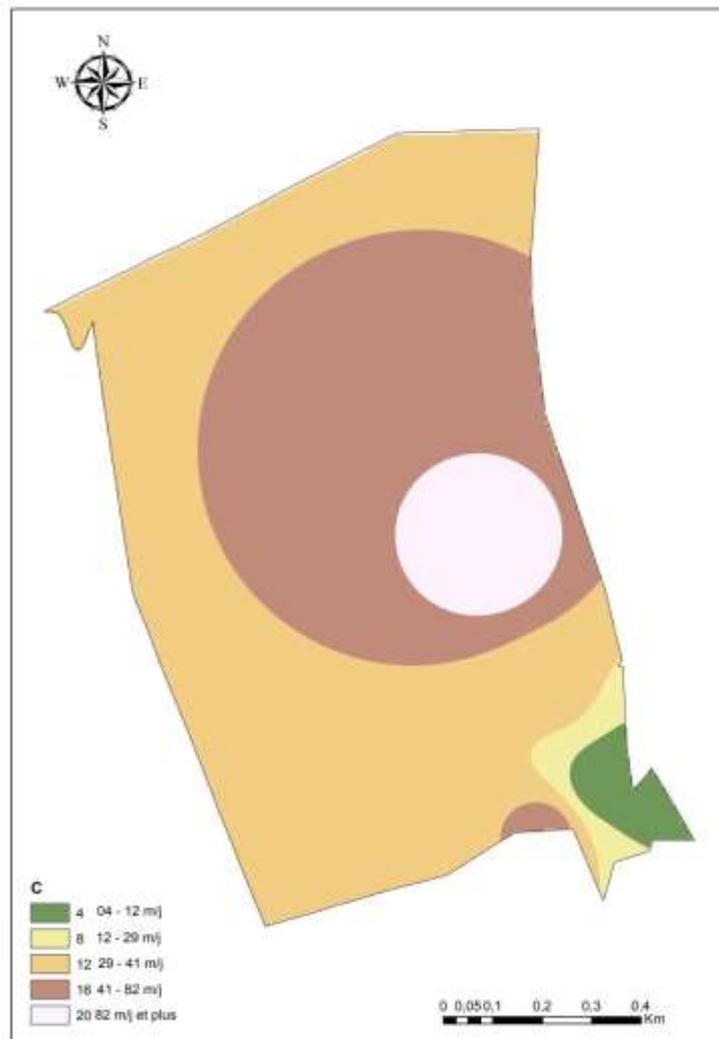


Fig.IV.07: Carte de la perméabilité.

Les perméabilités varient il existe cinq classes de conductivité hydraulique (Fig. 07). La partie majeure de la zone d'étude a une perméabilité comprise entre 29m/j et 41m/j, avec un indice de vulnérabilité partiel égal à 12, On remarque l'existence de certaines zones qui présentent des fortes indices égale à 20 situées dans la commune de à l'Est de Reguiba, avec des perméabilité supérieure à 82m/j.

IV.6.8. La Carte de vulnérabilité:

La carte de vulnérabilité de la nappe phréatique d'El-oued est obtenue donc par la superposition spatiale des différentes couches caractérisant les paramètres de la méthode DRASTIC.

Cette carte nous a permis de bien cibler les zones à risque de pollution. La pollution touche pratiquement toute la région d'étude (pollution forte, suivant la classification de Engel et al. (1996)), où le degré de pollution est compris entre 141 et 200 (Fig.IV.08).

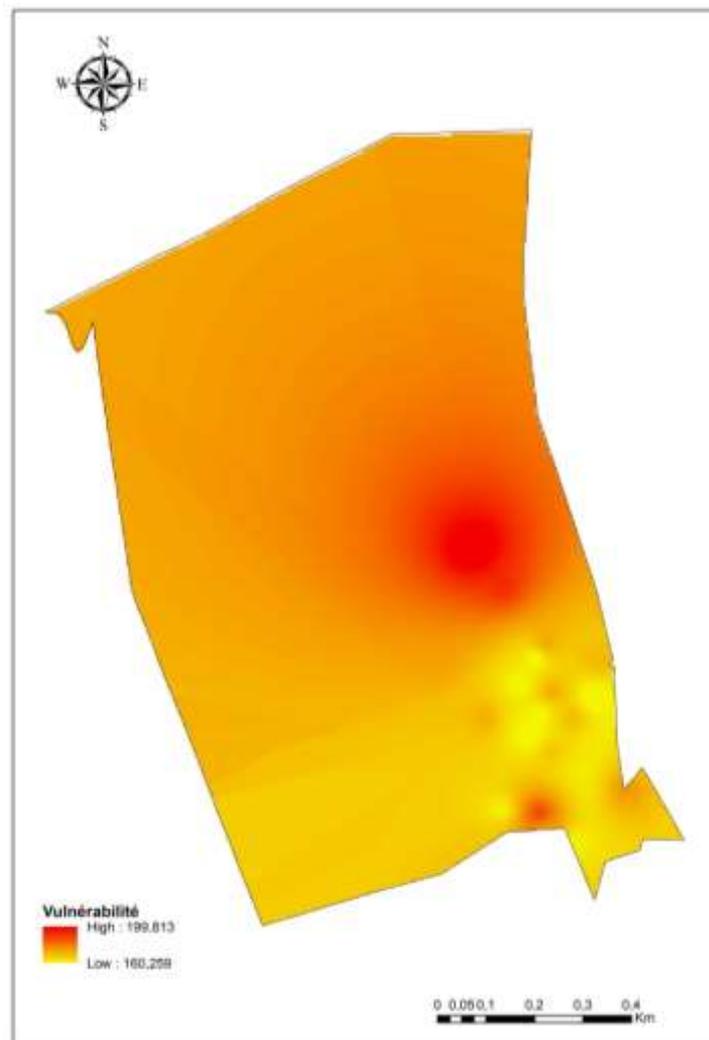


Fig.IV.08: Carte de la vulnérabilité par DRASTIC.

On peut constater que l'intervalle de degré de pollution de la carte obtenue par la méthode DRASTIC est compris entre 160 et 199 (tous compris dans la catégorie degré de pollution forte de Engel et al. (1996)), mais deux régions souffrent de pollutions plus ou moins importantes: la première c'est la région est de la commune de Ourmes et la deuxième c'est une partie commune entre les communes de Guemar et Reguiba (taches rouges). C'est deux régions sont connues par une forte activité agricole. Cela justifie probablement le degré élevé de la pollution de l'eau souterraine due à l'utilisation intense des engrais et produits chimiques.

IV.7. Conclusion:

Notre zone d'étude présente une zone à forte vulnérabilité ($200 > Di \geq 140$) dominant la majeure partie du terrain cela est justifié par le fait que dans ces zones les eaux sont très proches à la surface du sol, les niveaux statiques sont généralement compris entre 0 m et 15 m, les pentes sont faibles et inférieures à 2%, la zone non saturée est essentiellement constituée de sable et forte perméabilité supérieure à 82 m/j. Les deux régions de Ourmes et Guemar-Reguiba, à caractère agricole, révèlent des vulnérabilités importantes et favorisent l'infiltration de tout polluant présent à la surface.

Dans le chapitre suivant, nous présentons une étude comparative entre la carte de vulnérabilité obtenue par la méthode DRASTIC et celle obtenue par la méthode AHP (méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés), élaborée l'année passée dans le cadre de mémoire de fin d'étude de Master.

Chapitre V
Etude comparative entre
DRASTIC et AHP

V.1. Introduction:

Au cours des dernières années en Algérie, notamment dans la Wilaya d'El Oued, l'eau souterraine potable est exposée à des intoxications moyennes et parfois graves, y compris le secteur agricole, et l'utilisation de cette eau provoque une dégradation de la qualité du produit agricole, soulignant que l'économie de l'État dépend fortement de l'activité agricole, et la répétitivité de ces situations entraîneront des graves conséquences politiques, sociales et économiques, que le gouvernement doit considérer de manière objective pour trouver des solutions appropriées (lutte, stratégie d'adaptation, études de vulnérabilité et d'impact) afin d'atténuer les dommages potentiels liés à la limitation des sources d'eau potable, à la détérioration du secteur agricole, le coté humain et ainsi de suite.

Gardant cela à l'esprit, le présent chapitre tente d'élaborer une étude comparative entre le résultat obtenu par la méthode d'analyse multicritères AHP (Analyse Hiérarchique des Procédés), une étude réalisée dans le cadre de mémoire de fin d'études de l'année précédente (Oussama et Abdelkrim, 2019), et la carte de vulnérabilité élaborée par la méthode DRASTIC, dans le chapitre IV.

V.2. Définition de l'analyse multicritères:

L'analyse multicritères est une technique d'analyse qui vise à évaluer une famille cohérente de critères, pour éclairer un processus de décision. Le caractère multicritère tient à la prise en compte de plusieurs objectifs, variés et éventuellement contradictoires. Elle permet donc, de regrouper des problématiques incluant plusieurs dimensions, caractérisées par des indicateurs mesurables ou qualitatifs. Grâce à un résultat unique et structuré, différents scénarios peuvent donc être évalués sur la même base, permettant une comparaison entre eux (SOFIES, 2009).

Afin d'étudier et de caractériser les régions les plus touchées par la pollution, notre choix s'est porté sur l'application de la méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP), pour les raisons de sa popularité (Saaty et Peniwati, 2008), suivantes:

- ✚ Unités de mesure : qualitatives et quantitatives, valeurs relatives ou absolues pour établir de priorités;
- ✚ Structure hiérarchique: trie des éléments d'un système dans différents niveaux et dans de groupes à caractéristiques similaires;
- ✚ Interdépendance: permet de considérer l'interdépendance des éléments d'un système sans insister dans le raisonnement linéaire;

- ✚ Consistance: permet de garder une consistance logique des jugements utilisés pour déterminer les priorités.

V.3 . La méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP):

V.3.1. Description de la méthode AHP

La méthode AHP, développée en 1971 par Thomas L. Saaty (1991), se distingue par sa façon de déterminer les poids des critères, elle procède par des combinaisons binaires de chaque niveau de la hiérarchie, par rapport aux éléments du niveau supérieur. La méthode AHP consiste à représenter un problème de décision par une structure hiérarchique, reflétant les interactions entre les divers éléments du problème, à procéder ensuite à des comparaisons par paires des éléments de la hiérarchie, et enfin à déterminer les priorités des actions. Cette méthode a été utilisée dans des domaines aussi variés: la planification du transport, gestion de l'urbanisme, fixation des prix, l'achat d'un véhicule, le choix de systèmes de production dans des industries et plusieurs autres.

V.3.2. Avantages de la méthode AHP

- Sa capacité de structurer un problème complexe, multicritère, multi personne et multi période de façon hiérarchique;
- La comparaison binaire des éléments (alternatives, critères et sous critères);
- La facilité de son implémentation informatique (Guesdon, 2011).

V.3.3. Exécution de la méthode

Phase 1: Décomposer le problème en une hiérarchie d'éléments inter-reliés. Au sommet de cette hiérarchie, on trouve l'objectif principal, et dans les niveaux inférieurs, les éléments contribuant à atteindre cet objectif. Le dernier niveau est celui des alternatives (les actions) (Fig V.1). Nous présentons par la suite un bref aperçu de la méthode AHP et les résultats obtenus.

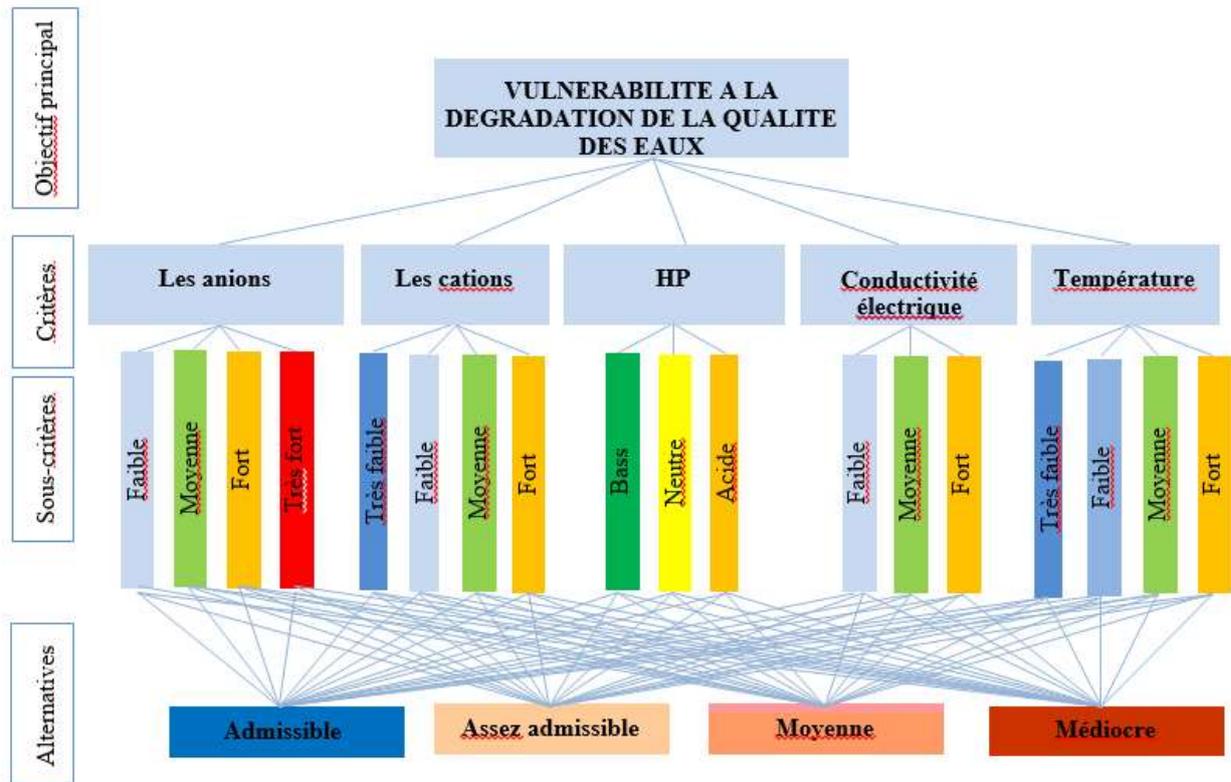


Fig. V.01: Structure hiérarchique de la vulnérabilité selon la méthode AHP

Les figures 01, 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 et 10 présentent les classifications effectuées, sur les critères sélectionnés (PH, K⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻, Ca²⁺, Cl⁻, T, Cond, So₄²⁻), suivant les alternatives sélectionnées.

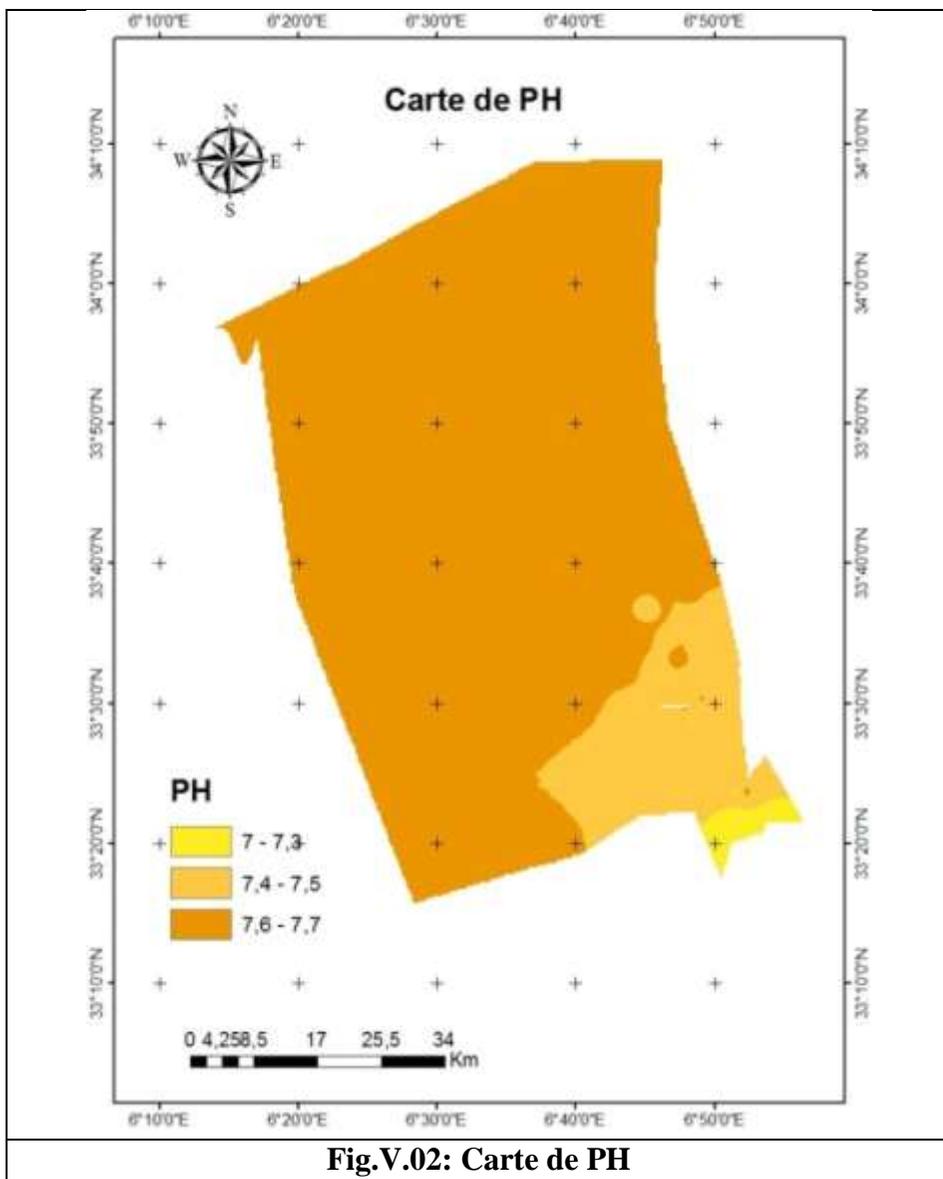


Fig.V.02: Carte de PH

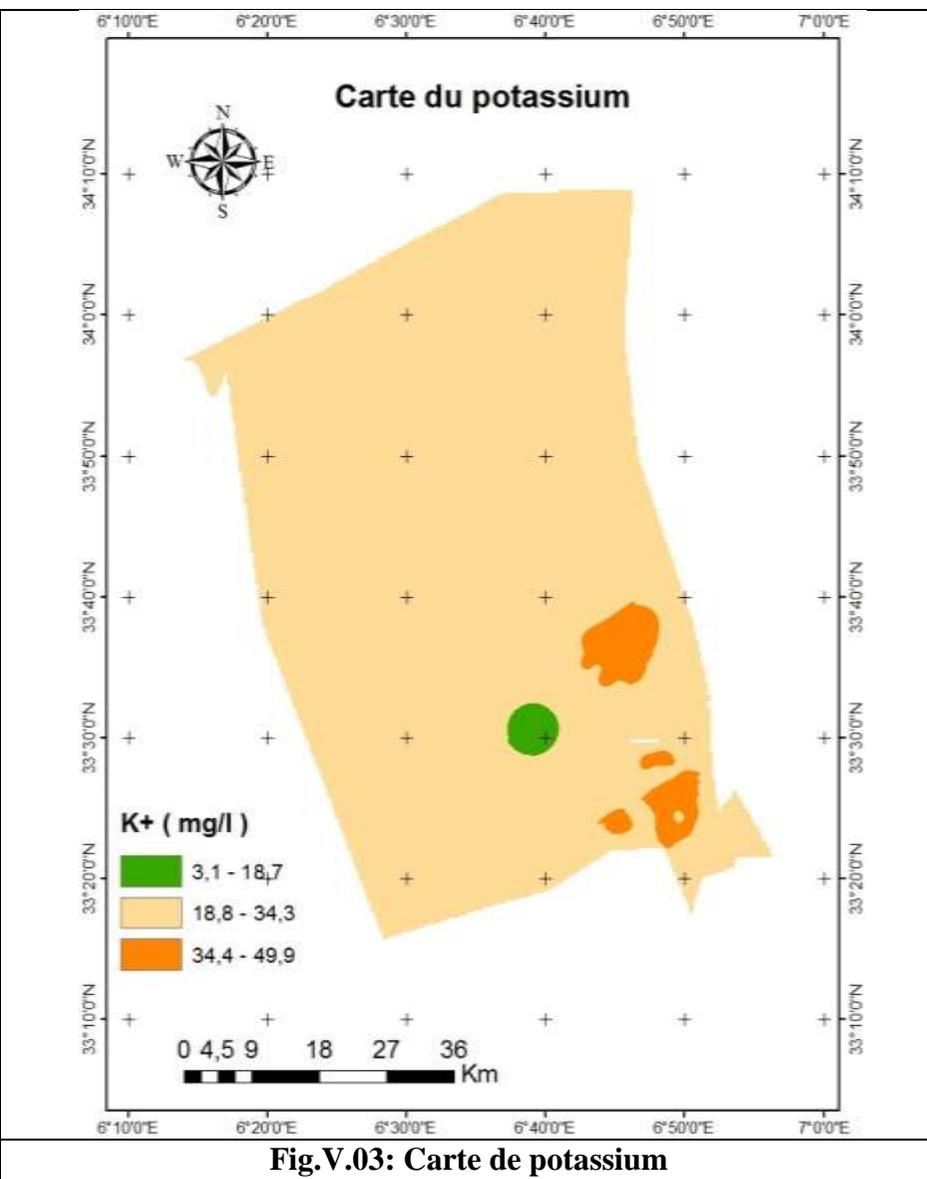


Fig.V.03: Carte de potassium

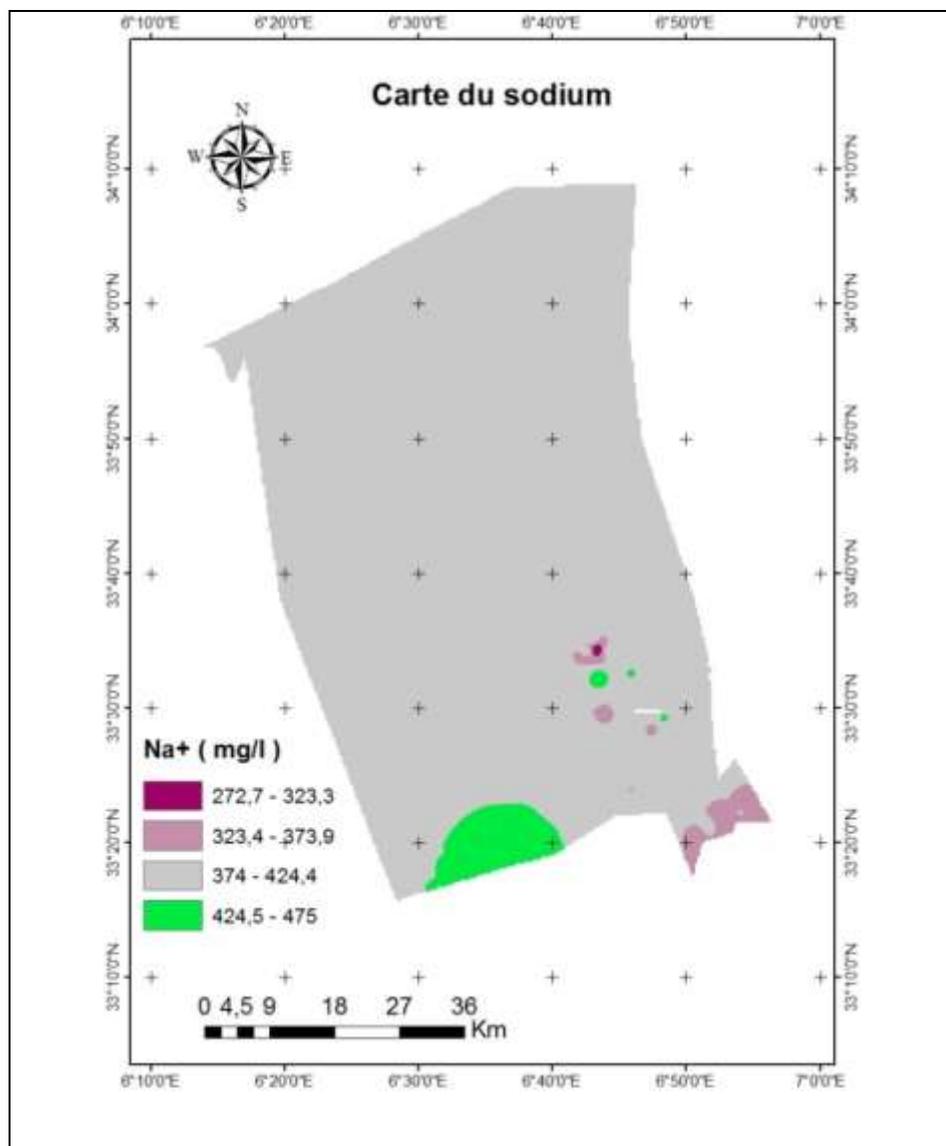


Fig.V.04. Carte de sodium

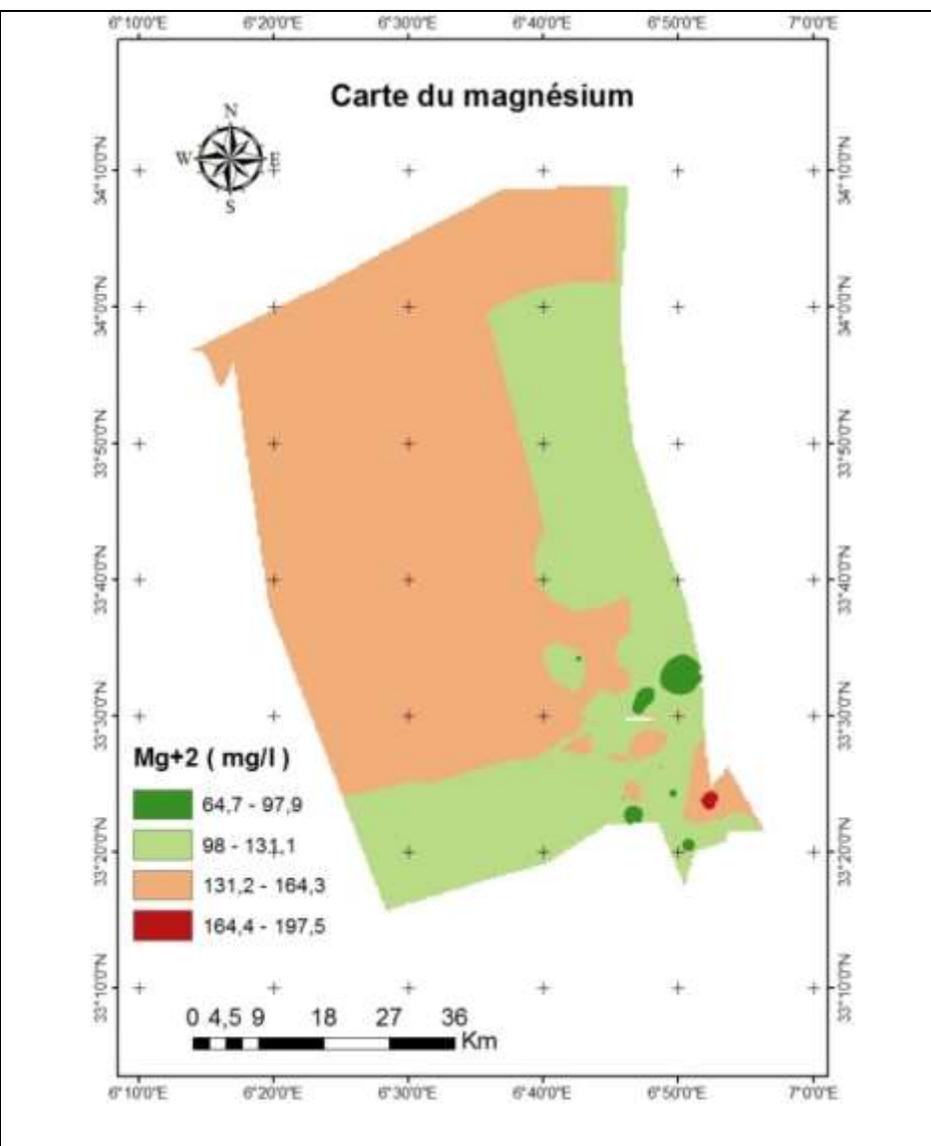
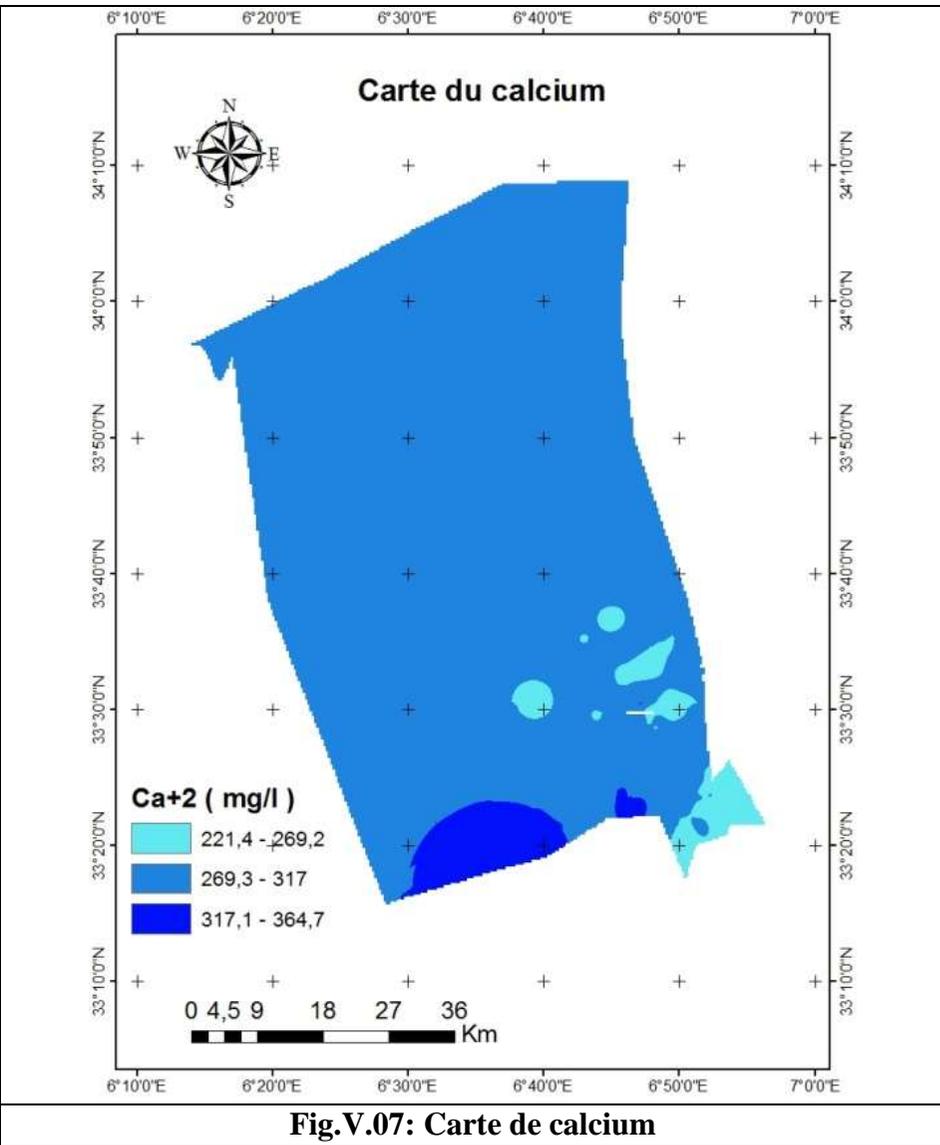
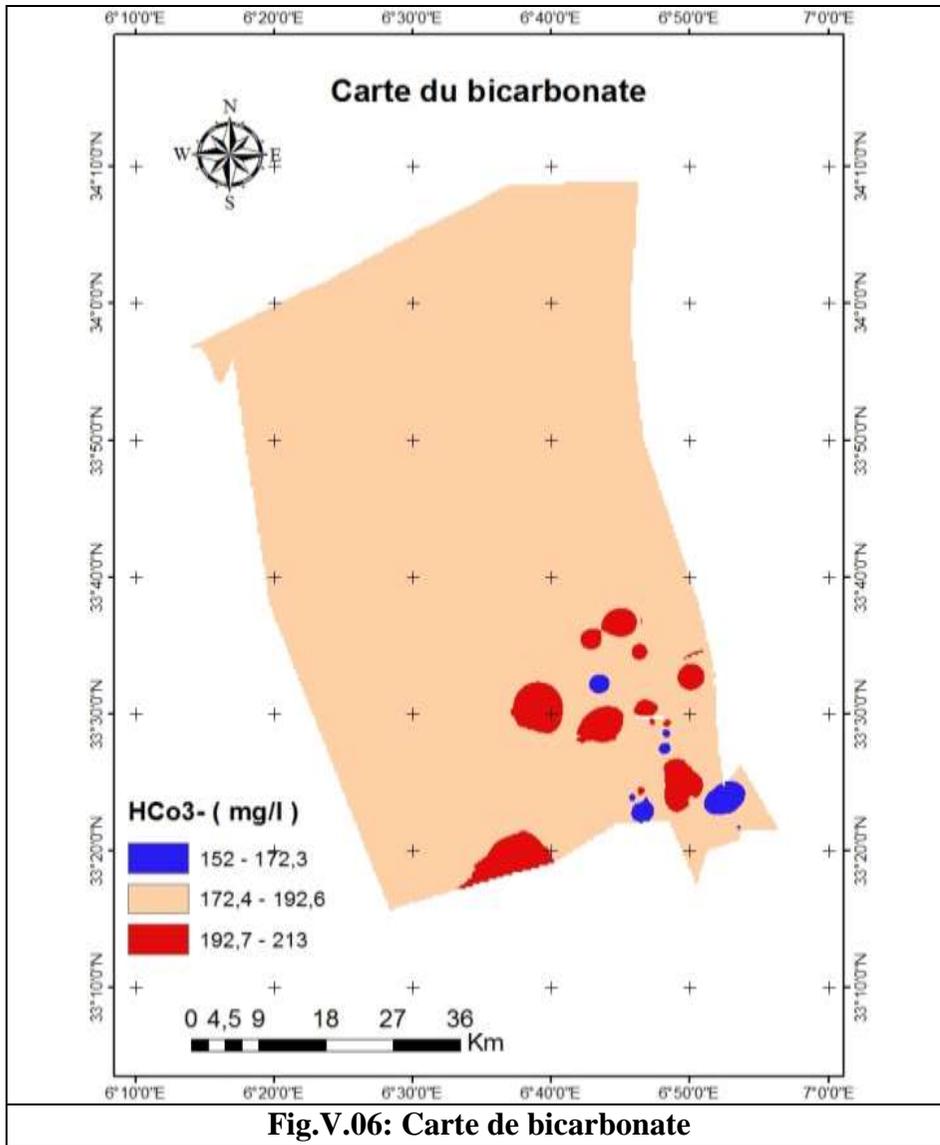


Fig.V.05: Carte de magnésium



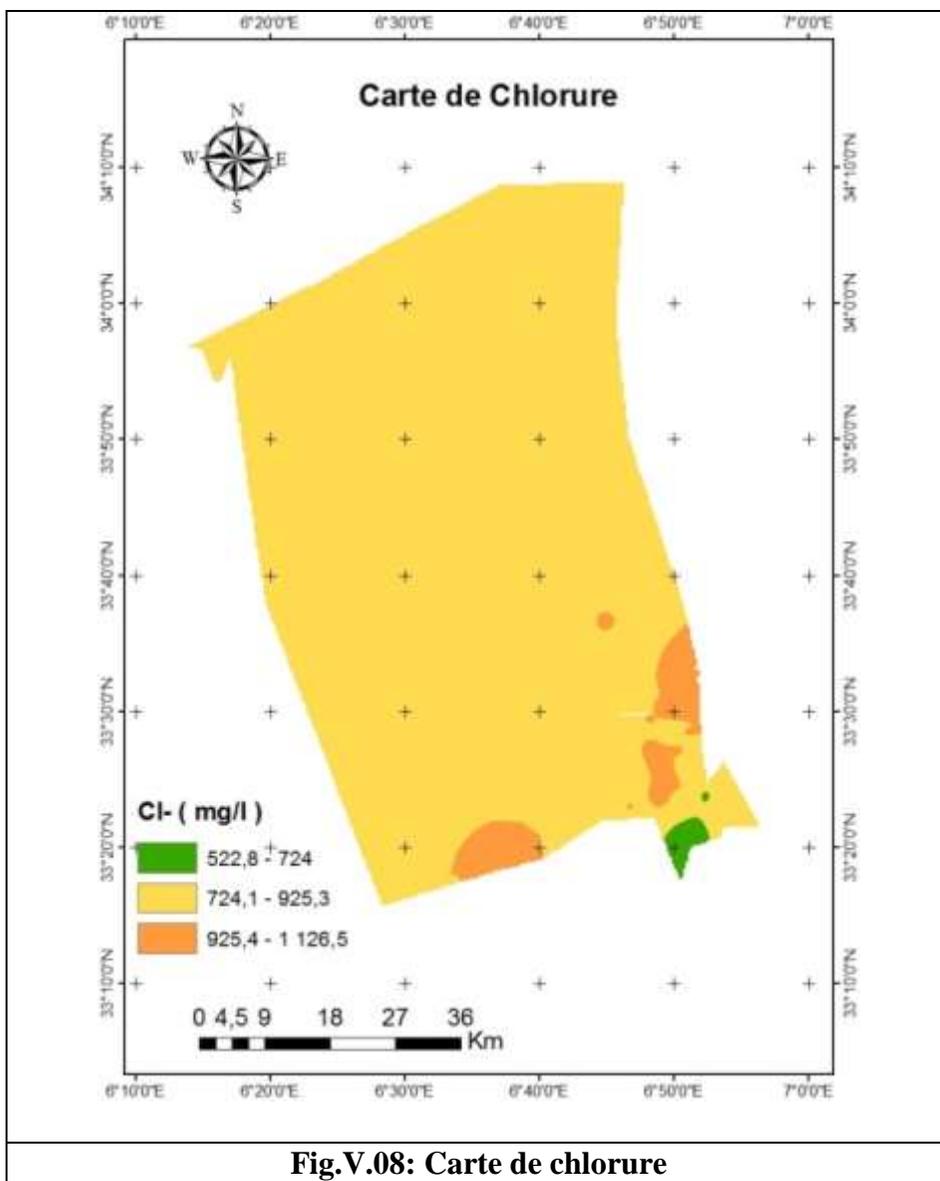


Fig.V.08: Carte de chlorure

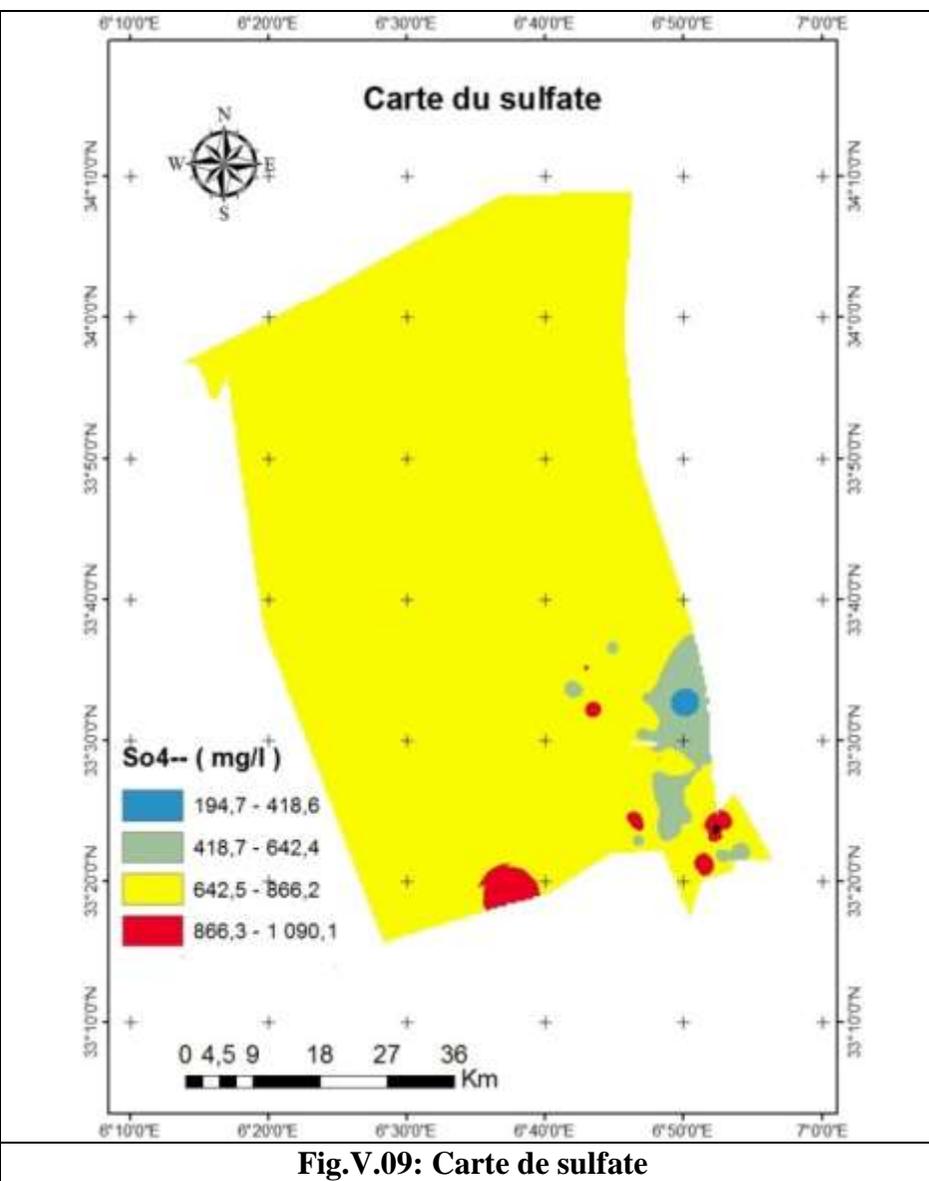


Fig.V.09: Carte de sulfate

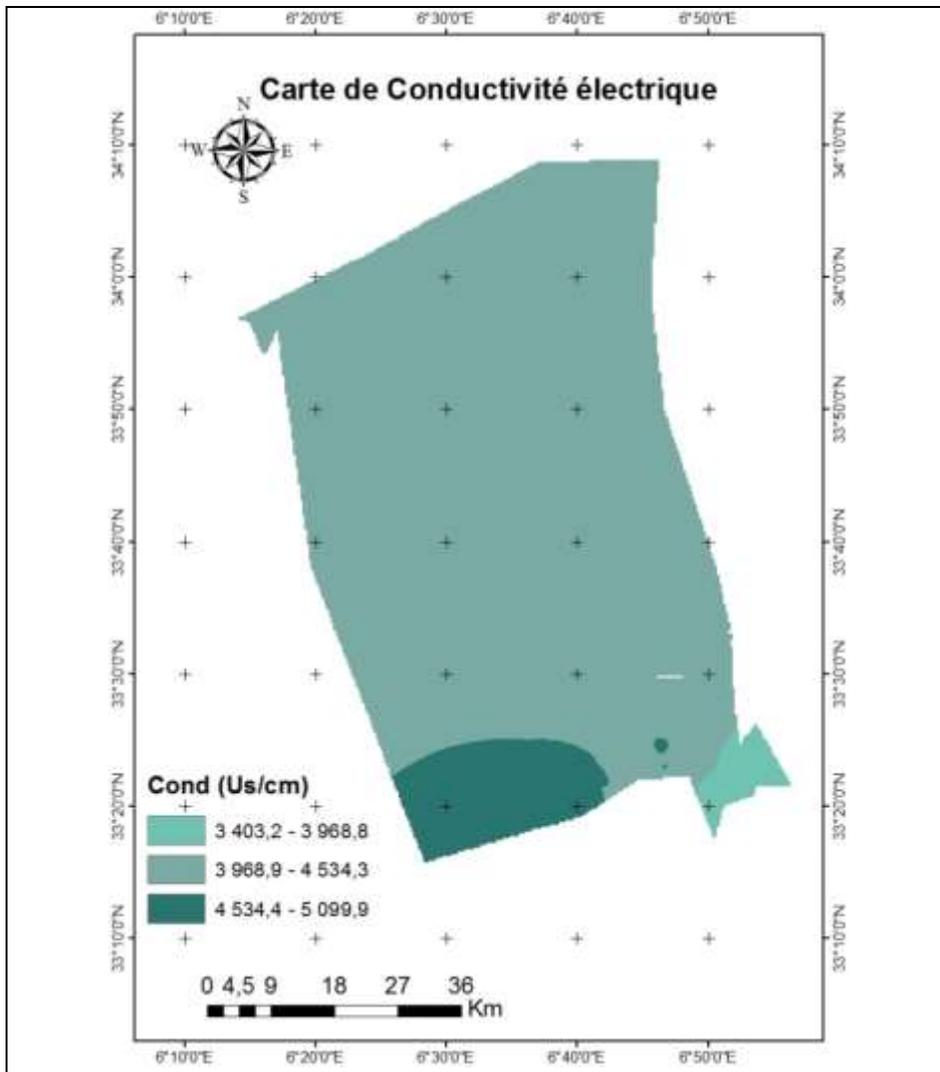


Fig.V.10: Carte de conductivité électrique

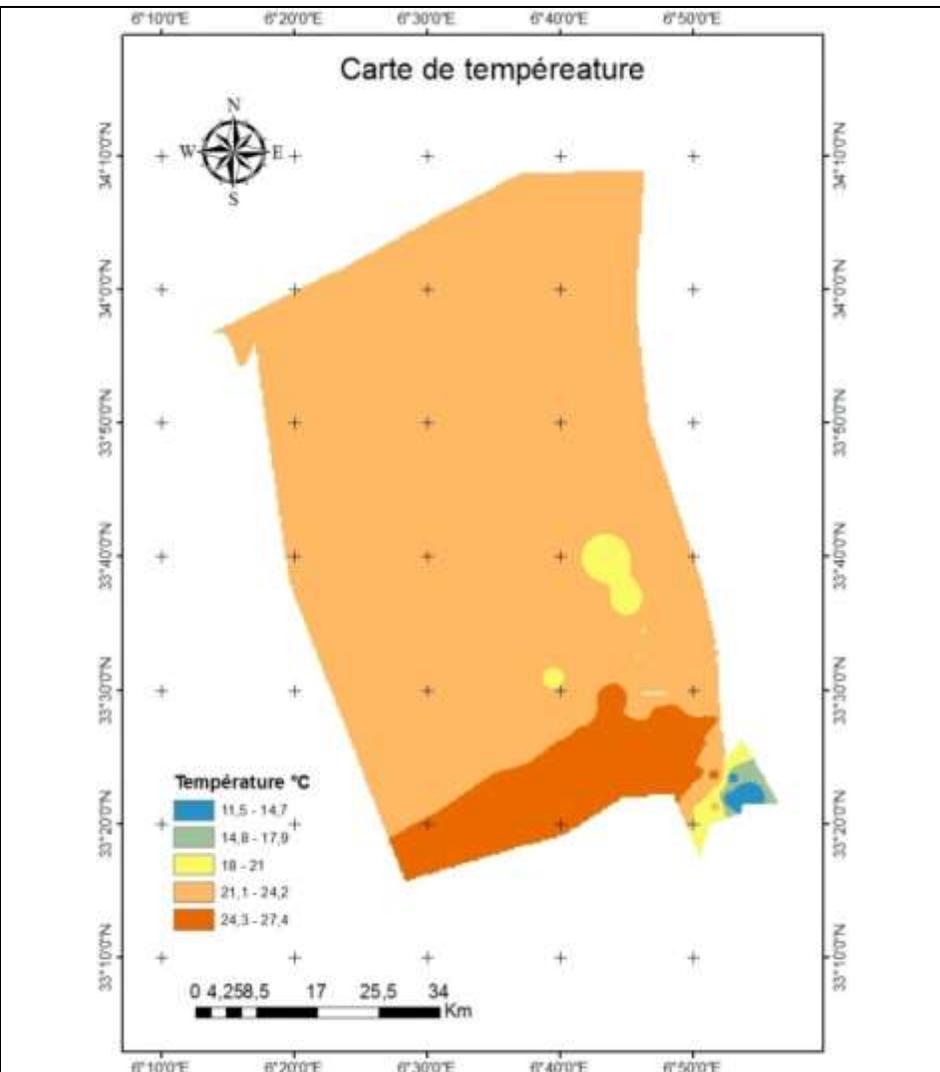


Fig. V.11: Carte de température

Passant par le calcul des scores d'évaluation de chaque sous-critère (les poids), puis par la vérification de la cohérence des jugements (cohérence des matrices), l'exécution de la méthode AHP a été effectuée sous un environnement SIG (ArcGIS 10.5). Le résultat de la carte de la vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux souterraines est présenté dans la figure (V.12).

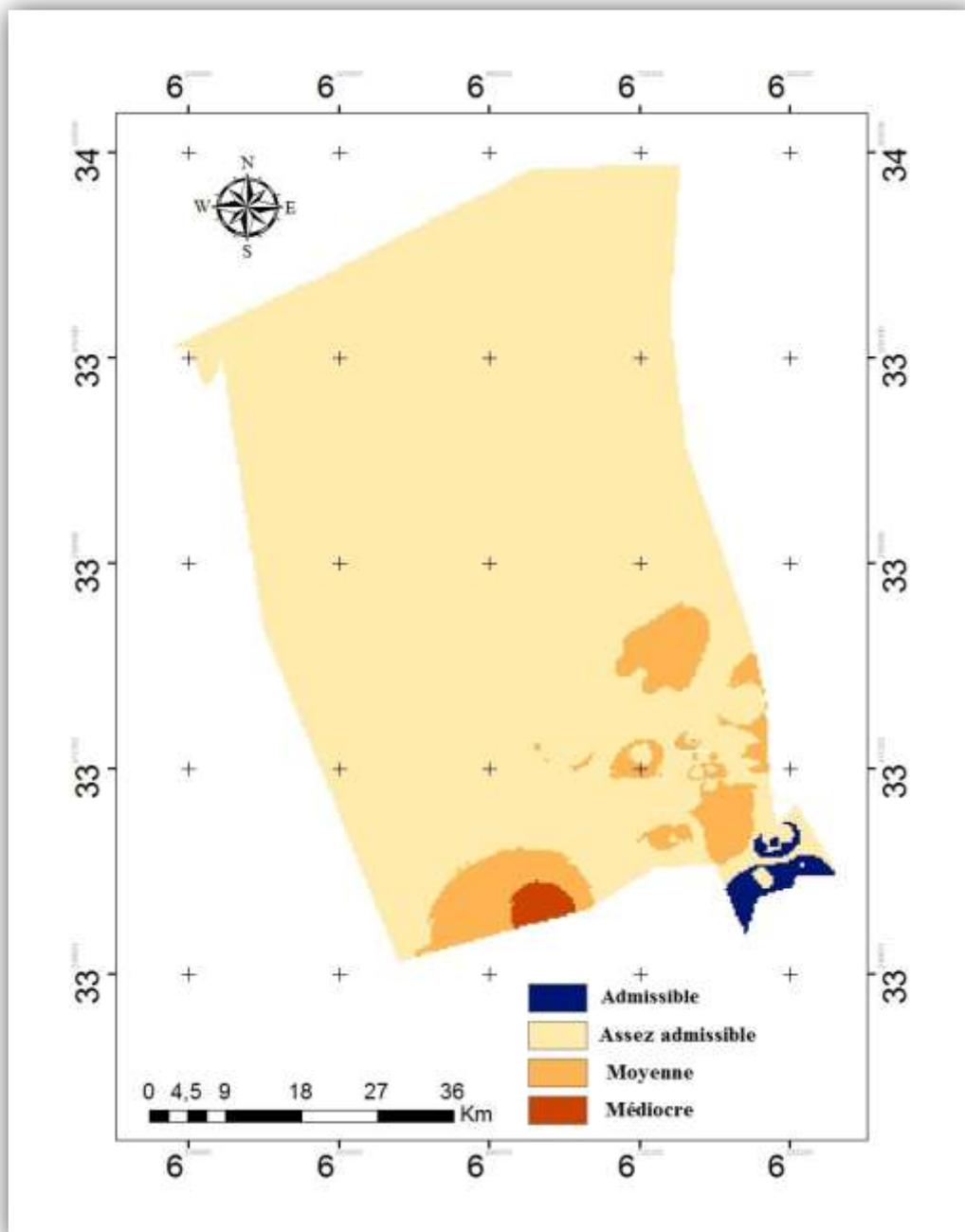


Fig.V.12: Carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux (Oussama et Abdelkrim, 2019).

La figure (V.12) caractérise le résultat de la vulnérabilité sur la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude. On peut dire que la carte résultant représente quatre degrés de vulnérabilité: admissible, assez admissible, moyenne et médiocre. On remarque que la région touchée par les eaux admissibles c'est la commune d'El Oued. Pour les régions qui caractérisent les degrés assez admissibles et moyennes sont les communes de Guemar, Reguiba, Taghzout et Kouinine. Par contre, la commune de Ourmes présente le degré médiocre de la qualité des eaux. On peut justifier ce résultat par l'activité agricole intense dans cette région.

V.4. Etude comparative entre DRASTIC et AHP:

La comparaison entre les deux cartes de vulnérabilité à la pollution souterraines DRASTIC et AHP passe par les étapes suivantes:

- Comparaison d'ordre général;
- Comparaison statistique;
- Comparaison entre les concepts.

V.4.1. Comparaison d'ordre général:

Cette comparaison s'intéresse à l'aspect visuel apparent que présente chaque carte de vulnérabilité. Le tableau suivant (tableau V.01) résume cette comparaison.

Tableau V.01: Comparaison générale entre DRASTIC et AHP

	DRASTIC	AHP
Nombre de classes	1	4
Communes à risque	6	1
Répartition	Généralisée	Précise

On comprend d'après le tableau V.01 que la méthode AHP reflète la répartition spatiale de la pollution des eaux souterraines d'une manière assez précise, par contre la méthode DRASTIC représente le phénomène d'une manière généralisée.

V.4.2. Comparaison statistique:

La deuxième méthode de comparaison repose sur:

- Le degré de corrélation entre les deux cartes (DRASTIC et AHP),
- Etude de l'histogramme bidimensionnel entre ces deux cartes.

V.5. Le degré de corrélation entre les deux cartes (DRASTIC et AHP):

La figure (V.13) illustre le degré de corrélation entre les deux cartes DRASTIC et AHP.

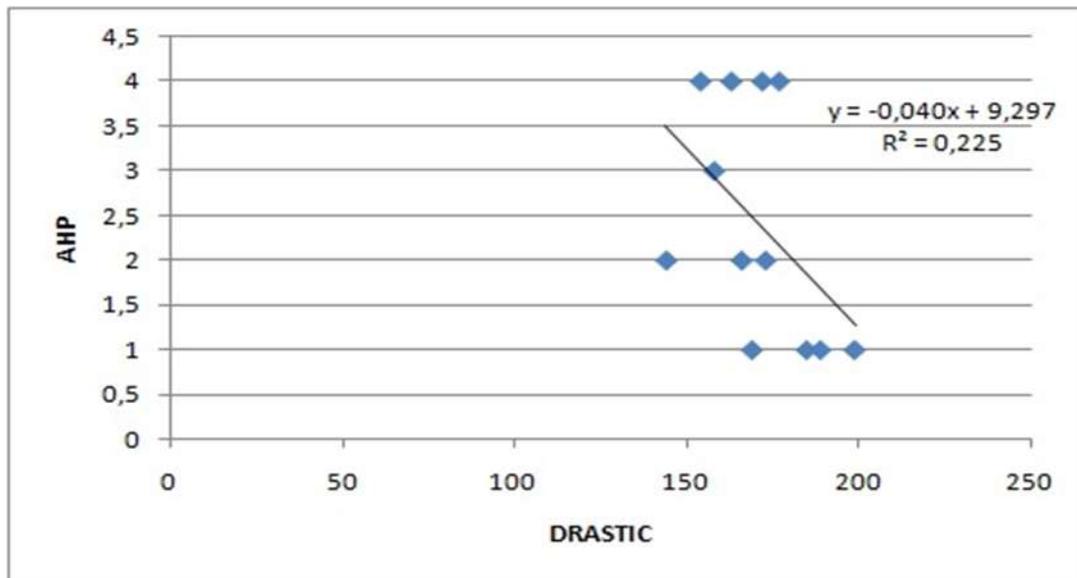


Fig. V.13. Degré de corrélation entre DRASTIC et AHP.

La figure (V.13) montre un degré faible de corrélation entre les deux cartes, avec un degré de détermination de 0.225.

V.6. Etude de l'histogramme bidimensionnel:

La réalisation de l'histogramme bidimensionnel a été effectuée sous un logiciel de traitement d'images satellitaires ENVI 4.2. L'objet escompté derrière cet histogramme bidimensionnel est d'étudier d'une manière exhaustive la corrélation entre deux images ou cartes (figure V.13).

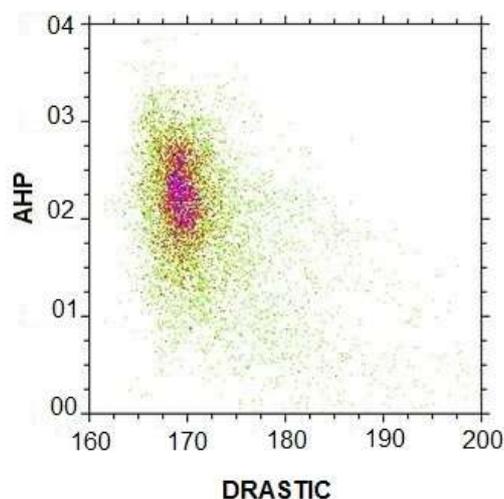


Fig. IV.14: L'histogramme bidimensionnel entre DRASTIC et AHP.

La figure (V.14) montre également une faible corrélation entre les deux cartes établies par DRASTIC et AHP. Une bonne corrélation pour les valeurs de 170 (DRASTIC) et 2 AHP. Par contre elles se divergent pour le reste des valeurs.

V.7. Comparaison entre les concepts:

Cette étude comparative au niveau des concepts de chaque méthode nous permet de signaler quelques points (faibles et forts) pour la caractérisation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Pour la méthode DRASTIC, on a remarqué que le résultat a montré que les cartes de recharge, nature de la zone saturée, nature du sol, la pente et la carte de la zone non saturée présentent des indices uniques. Cela est dû au caractère morphologique de la région d'étude. D'une autre partie, avoir cinq cartes sur sept avec des indices uniques, va certainement influencer sur la qualité du résultat. La chose qui justifie que toute la région d'étude avec ces six communes, se trouvant dans une classe de degré de vulnérabilité (degré fort), un résultat en quelque sorte généralisé.

Pour celle obtenue par la méthode AHP, les poids attribués au départ pour chaque paramètre, notamment avec la vérification de la matrice de cohérence, a montré que ces poids ont été bien sélectionnés. Le résultat de la carte a donné plus de précision sur le degré et la répartition spatiale de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

V.8. Conclusion:

Dans ce chapitre, on a présenté une étude comparative entre la méthode DRASTIC et la méthode d'analyse multicritères, Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP). Cette comparaison a montré que la méthode AHP donne de résultats assez précis que ceux obtenus par la méthode DRASTIC. La répartition spatiale des prélèvements joue un rôle primordiale dans la qualité des résultats obtenus, surtout pour la méthode DRASTIC. Les résultats obtenus par DRASTIC et AHP montrent ensemble que la région de Ourmes présente un cas alarmant en ce qui concerne la qualité des eaux. Cela est dû probablement à l'activité agricole intense et l'utilisation non rationnelle des engrais et produits chimiques. En plus de ça, les manœuvres non légales des agriculteurs dans les opérations des forages qui touchent la nappe du Complexe Terminal (CT) augmentent le risque de dégradation de la qualité des eaux dans cette région.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans un environnement socio-économique en pleine mutation, caractérisé par des conditions climatiques particulièrement difficiles, l'eau au Sahara demeure un facteur primordial de tout développement des activités humaines. Pour la quantité, l'eau au Sahara est généralement disponible, se distingue par d'importantes ressources en eau souterraines et ça grâce à d'importants aquifères, surtout au bas Sahara (Sahara Septentrional). La porosité et la structure du terrain définies et déterminent le type de nappe et le mode circulation de l'eau. Pour la qualité des eaux destinées pour l'alimentation en eau potable et même pour l'irrigation se pose avec finesse dans l'ensemble des régions sahariennes et particulièrement dans la région du Souf. Du point de vu qualité physico-chimique est le plus souvent médiocre. Cette qualité des eaux, dont une partie est d'origine géologique (primaire) s'accroît continuellement par une mauvaise gestion de la ressource en eau, notamment souterraine. La minéralisation de l'eau varie entre 1 et 2g/l de résidu sec et peut atteindre les 5g/l. La qualité médiocre de la ressource en eau est aggravée dans certains cas par une pollution d'origine anthropique, le plus souvent domestique, qu'industrielle ou agricole, ce qui rend l'eau le plus souvent presque impropre à la consommation et des fois même à l'irrigation. Les eaux des forages (CT) sont des eaux très dures, fortement minéralisées, chargées en chlorures (Cl⁻), en sulfates (So⁴⁻⁻), calcium (Ca⁺⁺), le Manganèse (Mg⁺⁺), en bicarbonates (HCO³⁻) et présentes des dépassements des normes de potabilité très importante.

Cette étude comparative au niveau des concepts de chaque méthode nous permet de signaler quelques points (faibles et forts) pour la caractérisation de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines. Pour la méthode DRASTIC, on a remarqué que le résultat a montré que les cartes de recharge, nature de la zone saturée, nature du sol, la pente et la carte de la zone non saturée présentent des indices uniques. Cela est du au caractère morphologique de la région d'étude. D'une autre partie, avoir cinq cartes sur sept avec des indices uniques, va certainement influencer sur la qualité du résultat. La chose qui justifie que toute la région d'étude avec ces six communes, se trouvant dans une classe de degré de vulnérabilité (degré fort), un résultat en quelque sorte généralisé.

Pour celle obtenue par la méthode AHP, les poids attribués au départ pour chaque paramètre, notamment avec la vérification de la matrice de cohérence, a montré que ces poids ont été bien sélectionnés. Le résultat de la carte a donné plus de précision sur le degré et la répartition spatiale de la vulnérabilité à la pollution des eaux souterraines.

La méthode d'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP) qui compte parmi d'autres méthodes d'analyse multicritères, nous a permis de rendre compte aux régions touchées par les différents degrés de vulnérabilité (admissible, assez admissible, moyenne et médiocre). Les résultats obtenus montrent que la région de Ourmes présente un cas alarmant, en ce qui concerne la qualité des eaux. Cela est du probablement à l'activité agricole intense et l'utilisation non rationnelle des engrais et produits chimiques. En plus de ça, les manœuvres non légales des agriculteurs dans les opérations des forages, qui touchent la nappe du Complexe Terminal (CT) font augmenter le risque de dégradation de la qualité des eaux dans cette région.

Dans ces conditions, nous proposons quelques recommandations pouvant diminuer la dégradation des la qualité des eaux souterraines, résumées dans les points suivants :

- Rationaliser l'utilisation des engrais agricoles ;
- Contrôler les anciens forages et assurer le suivi et le contrôle les travaux des futurs forages ;
- Vérifier les sources de pollution industrielle, comme les déchets solides et les rejets liquides, qui peuvent toucher d'une manière directe les réserves souterraines en eau (traiter les déchets solides et les rejets liquides avant de se débarrasser dans la nature).

Référence et bibliographique

Référence et bibliographique

- 1) **A.N.R.H** : (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de d'El oued).
- 2) **A.N.R.H 1993** : Log de forage F1 à l'Albien
- 3) **O.N.M** :(Office National Météorologique) Station de Guemar données climatiques.
- 4) **khechana salim 2014** : thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de doctorat en sciènes. Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper aride application sur la vallée dé Oued-Souf.(sud est algérien).
- 5) **Atia Mohamed Oussama et Zine Abdelkrim (2019)** Elaboration de la carte de vulnérabilité dans la région du Souf par la méthode AHP. Mémoire de Master obtenu à l'Université Hamma Lakhdar d'El Oued, Promotion 2019.
- 6) **G. Guesdon (2011)** : Méthodes et Outils d'Aide Multicritères à la Décision-Comparaison de Saaty. Québec - Canada, Faculté des sciences et de génie - Université Laval, 15 Mars 2011.
- 7) **Thomas L. Saaty et Kirti Peniwati, (2008)** Group Decision Making: Drawing out and Reconciling Differences, Pittsburgh, Pennsylvania, RWS Publications, 2008. ISBN 978-1-888603-08-8.
- 8) **Saaty, T. L. (1991)** Méthodes d'Analyse Hiérarchique. São Paulo, McGraw-Hill, Makron. 367p.
- 9) **SOFIES Sàrl (2009)** Analyse Multicritères de Scénarios de Production de Tomate pour le Consommateur Genevois. Rapport SOFIES, Direction Générale de l'Agriculture, Plan-les-Ouates, Genève, Suisse, juillet 2009.
- 10) **Behir Amer et Dou Salem (2017)** Vulnérabilité et risque à la pollution des ressources en eaux souterraines dans la région de Skikda (Nord-est-Algérien)

Annexes

Annexes

Tables ou systèmes de cotation numérique

<i>Profondeur (D)</i>	
<i>Classe (m)</i>	<i>Note</i>
0 – 1.5	10
1.5 – 4.5	9
4.5 - 9	7
9.0 – 15.0	5
15 - 23	3
23 - 30	2
> 30	1

<i>Recharge annuelle (R)</i>	
<i>Classe (mm)</i>	<i>Note</i>
0 – 50	1
50 - 100	3
100 - 175	6
175 - 225	8
> 225	9

<i>Perméabilité (c)</i>	
<i>Plage de la perméabilité (en m/s)</i>	<i>Note</i>
$4.7*10^{-7} - 4.7*10^{-5}$	1
$4.7*10^{-5} - 14.7*10^{-5}$	2
$14.7*10^{-5} - 32.9*10^{-5}$	4
$32.9*10^{-5} - 4.7*10^{-4}$	6
$4.7*10^{-4} - 9.4*10^{-4}$	8
> $9.4*10^{-4}$	10

<i>Topographie (T)</i>	
<i>Plage de la pente(en degré)</i>	<i>classe</i>
0 à 2	10
2 à 6	9
6 à 12	5
12 à 18	3
> 18	1

<i>Type de sol (S)</i>	
<i>Classe</i>	<i>Note</i>
Mince ou absent	10
Graviers	10
Sables	9
Limons sableux	6
Limons	4
Limons silt eux	3
Argiles	1

<i>Milieux Aquifère (A)</i>		
<i>Milieux Aquifère</i>	<i>Note</i>	<i>Note typique</i>
Massive shale	1 à 3	2
Métamorphique	2 à 5	3
Métamorphique Altéré – grès	3 à 5	6
Calcaire massif	4 à 9	8
Grès massif	4 à 9	6
Sable et gravier	4 à 9	8
Basalte	2 à 10	9
Calcaire Karstique	9 à 10	10

<i>Impacte de la zone non saturée (I)</i>		
<i>Nature lithologique</i>	<i>Note</i>	<i>Note typique</i>
Silt et argile	2 à 6	3
Shale	2 à 6	3
Calcaire	2 à 5	3
Grès	2 à 7	6
Sable et gravier avec passage silt et argile	4 à 8	6
Sable et gravier	4 à 8	8
Basalte	2 à 10	9
Calcaire Karstique	8 à 10	10

Résumé :

Actuellement, une valeur élevée caractérise la région de la vallée (sud-est de Algérie) représentée par les eaux de surface et souterraines. Ces dernières années, il y a eu un boom éc de la qualité de eau.

Après avoir analysé état actuel de aquifère et du milieu environnant, le traitement et la représentation des données ont été effectués à aide outils modernes tels que les systèmes information géographique. Parmi les problèmes que nous avons rencontrés, nous mentionnons par exemple:

- La qualité chimique eau qui produit une salinité élevée est affectée par la profondeur de eau.
- La présence de certains polluants issus des activités agricoles et industrielles intensives.
- Utilisation irrationnelle des engrais dans les pratiques agricoles.

Ainsi, et pour évaluer la qualité de cette eau, nous avons étudiée à travers deux méthodes DRASTIC et AHP. Ceci afin de les comparer et de déterminer la méthode qui exprime plus précisément la taille et expansion de la pollution qui a pu frapper nos eaux souterraines.

Le principal objectif de cette étude est de mettre en place un diagnostic de la qualité d'eaux souterraines de la région d'El Oued, sur la base d'un système d'information géographique (SIG). L'analyse de la qualité physico-chimique a porté prélevés des forages de la nappe du complexe terminal dans la région d'étude, utilisés pour la consommation humaine. Les résultats obtenus ont montré que l'eau de la nappe en question a une qualité variée de moyenne à médiocre.

Mots clés : Oued- Souf , pollution , Eau Souterrain , DRASTIC et AHP

Summary:

Currently, a high environmental value characterizes El-Oued region (southeastern Algeria) represented by surface water and underground water. In recent years, a special economic boom occurred, including agricultural and industrial fields, which on the one hand, increased water needs and on the other hand, caused a deterioration in the quality of this water.

After analyzing the current condition of the aquifer and the surrounding environment, we performed data collection and processing from several wells, and represented it in the form of maps . using modern tools such as : geographic information systems Among the problems that we encountered, we mention, for example :

- The chemical quality of water that results in high salinity is affected by the depth of the water.
- The presence of some pollutants arising from the intensive agricultural and industrial activities.
- Irrational use of fertilizers in agricultural practices.

Therefore, and to assess the quality of this water, we studied it through two methods: DRASTIC and AHP. This is in order to compare them and determine the method that more accurately expresses the size and expansion of pollution that may have affected our underground water.

The main objective of this study is to establish a diagnosis of groundwater quality in the El Oued region, based on a geographical information system (GIS). The physico-chemical quality analysis included taken from the holes of the terminal aquifer in the study area, used for human consumption. The results obtained showed that the water of the sheet in question has a varied quality of medium to poor.

Key words: Oued- Souf, underground water pollution, AHP and .DRASTIC.