

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

**Apport des SIG dans l'étude de la qualité
des eaux souterraines par la méthode
d'analyse hiérarchique des Procédés (AHP)
dans la région Nord-ouest d'Elouad**

Dirigé par :

présenté par :

Encadreur : Dr Nabil MEGA

ATIA Med oussama

Co-encadreur : Dr Salim KHECHANA

ZINE Abdelkrim

Devant le membre jury :

M^{me}. ZAIR Nadjat

Université d'El Oued

Président

Mr. Dr Nabil MEGA

Université d'El Oued

Encadreur

Mr. MILOUDI Abdelmounem

Université d'El Oued

Examineur

REMERCIEMENTS

Toute notre parfait gratitude et remerciement à ALLAH le plus puissant qui nous a donné la force , le courage et la volonté pour élaborer ce travail .

C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que remercié l'encadreur Dr : MEGA Nabil et Co-encadreur KHECHANA Salim. Pour leur soutien, leur conseil et leur grande bienveillance durant l'élaboration de ce projet.

Ainsi nous exprime mes reconnaissance à tous les membres de jury d'avoir accepté de lire ce manuscrit et d'apporter les critiques nécessaires à la mise en forme de cet ouvrage .

Enfin , à tous ceux qui nous aidé de prés ou de loin pour la réalisation de ce projet de fin d'étude .

DÉDICACES

NOUS DÉDIONS CE TRAVAIL À :

CHERS PARENTS, QUI TRAVAILLE TOUJOURS SUR NOTRE

ENCOURAGEMENT ET NOUS AIDER À ÉTUDIER JUSQU'À ATTEINDRE

CE STADE DE FORMATION.

MES CHERS DEUX FRÈRES ET MES DEUX CHÈRES SŒURS.

ATIA MED OUSSAMA

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail:

- *Dans la mémoire de mon père, aucune sincérité ne peut exprimer l'amour, le respect, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien dans le monde ne vaut l'effort jour et nuit pour mon éducation et mon bien-être. Ce travail est le résultat de vos sacrifices pour l'éducation et la formation.*
- *A ma chère mère, mes frères et mes soeurs.*
- *A tous mes proches.*
- *A tous mes ami(e)s.*
- *A toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce travail*

ZINE Abdelkrim

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	I
DÉDICACES.....	II
SOMMAIRE.....	III
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DE FIGURES.....	VIII
LITES D'ABRÉVIATIONS.....	X
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
I. CHAPITRE I: PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE	3
I.1. INTRDUCTION.....	4
I.2. SITUATION GÉOGRAPHIQUE	4
I.3..RÉPARTITION ADMINISTRATIF ET DÉMOGRAPHIQUE :	6
I.4..GÉOLOGIE DE LA RÉGION D'ÉTUDE:.....	7
I.4.1..Stratigraphie régionale.....	7
I.4.1.1. Formation de l'ère Secondaire	7
I.4.1.2..Formations de l'ère Tertiaire	9
I.4.2..Géomorphologie	12
I.4.2.1..Tercha	12
I.4.2.2..Louss	12
I.4.2.3..Salsala ou Smida.....	12
I.4.2.4..Tefza	12
I.4.3..Interprétation des coupes	12
I.4.4..Tectonique	15
I.4.5..Relief.....	16
I.5..TOPOGRAPHIE.....	16
I.6..ETUDE DES PARAMETRES CLIMATIQUES	17
I.6.1..Précipitations.....	19
I.6.2..Humidité.....	19
I.6.3..Les vents.....	20
I.6.4..L'évaporation.....	20

I.6.5..Indice d'aridité.....	21
I.7..CONCLUSION	22
II..CHAPITRE II: HYDROGÉOLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE.....	23
II.1..INTRODUCTION	24
II.2..INVENTAIRE DES FORAGES	24
II.3..CADRE HYDROGÉOLOGIQUE GÉNÉRALE:	27
II.4..PRÉSENTATION DES NAPPES AQUIFÈRES DE LA RÉGION DU SOUF.	27
II.4.1. Nappe Phréatique.....	28
II.4.2. Nappe du Complexe Terminale (CT):.....	29
II.4.3. Nappe du Continent Intercalaire (CI)	30
II.5. ETUDE PIEZOMETRIQUE.....	32
II.5.1. La carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 :.....	32
II.6. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DU COMPLEXE TERMINAL.....	35
II.6.1. Essais des pompages	35
II.6.2. Interprétation des données des essais du pompage à longue durée.....	35
II.6.2.1. Forage F4 (El-Houd-commune de Guemar) :.....	35
II.7. CONCLUSION.....	38
III. CHAPITRE III : HYDROCHIMIE.....	40
III.1. INTRODUCTION.....	41
III.2. PARAMÈTRES PHYSICO-CHIMIQUES	41
III.2.1. Qualités physiques	41
III.3..LES ÉLÉMENTS CHIMIQUES	42
III.3.1. Les Cations	42
III.4. LE FACIÈS CHIMIQUE	45
III.4.1. Diagramme de PIPER	45
III.4.2. Digramme de Schoeller-Berkaloff.....	46
III.5. ETUDE DES RAPPORTS CARACTÉRISTIQUES ET ORIGINE DES ÉLÉMENTS DOMINANTS:....	47
III.5.1. Origine des éléments Na⁺ et Cl⁻	47
III.5.2. Origine du calcium	48
III.5.3. Le rapport Ca⁺²/ Mg⁺²	48
III.6. APTITUDE DES EAUX À LA POTABILITÉ	49
III.6. Selon l'O.M.S	49

III.6.2. Selon le degré hydrométrique total (D.H.T).....	51
III.7. APTITUDES DES EAUX À L'IRRIGATION:	51
III.8. CONCLUSION.....	54
IV. CHAPITRE IV.....	55
IV.1. INTRODUCTION.....	56
IV.2. DÉFINITION DE L'ANALYSE MULTICRITÈRES:.....	56
IV.3. LA MÉTHODE D'ANALYSE HIÉRARCHIQUE DES PROCÉDÉS (AHP).....	57
IV.3.1. Description de la méthode AHP.....	57
IV.3.2. Avantages de la méthode AHP.....	57
IV.3.3. Exécution de la méthode.....	58
IV.4. CONCLUSION	73
CONCLUSIONS GENERALES.....	75

Liste des Tableaux

Tab. I.1: Surface et population de la région d'étude par commune.	6
Tab. I.2. Caractéristiques géographiques de la station climatique.	18
Tab. I.3. Données climatiques de la région d'Oued Souf (1978-2013).	18
Tab. I.4 : Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De Martonne).	21
Tab. II.1. Forages du complexe terminal C.T choisis (A.D.E. 2018).	26
Tab. II.2: Log stratigraphique et l'hydrogéologie de forage Barrémien dans la région du Souf (D.W.H., 2004).	31
Tab. II. 3: Calcul de débit spécifique, valeurs débits /rabattements 87 (El-Houd)	35
Tab. III.1: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux du CT (Nov 2018).	46
Tab. III.2: Normes de potabilité de l'O.M.S	50
Tab. III.3 : Dureté des eaux en °F (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)	51
Tab. III.4: Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.	52
Tab. IV.1: Échelle de Saaty.	59
Tab. IV.2: Hiérarchie et rangs des critères et sous-critères de décision.	60
Tab. IV.3: Matrice normalisée des critères et le score d'évaluation.	62
Tab. IV.4: Scores des sous-critères du PH	68
Tab. IV.5 : Scores des sous-critères du k+	68
Tab. IV.6: Scores des sous-critères du Na+	68
Tab. IV.7: Scores des sous-critères du Mg+	68
Tab. IV.8 : Scores des sous-critères du HCo3-	68
Tab. IV.9: Scores des sous-critères du Ca+2	69
Tab. IV.10: Scores des sous-critères du Cl-	69
Tab. IV.11: Scores des sous-critères du So4-2.	69
Tab. IV.12: Scores des sous-critères du Cond	69
Tab. IV.13: Scores des sous-critères du T.	69
Tab. IV.14: Indice moyen de cohérence.	70
Tab. IV.15: Vérification de la cohérence des matrices	70

Liste des Figures

Fig. I.1: Situation géographique de la région d'El-Oued «P.D.A.U., 2005 ».....	5
Fig. I.2: Répartition administrative de la zone d'étude.....	6
Fig. I.3 : Carte géologique du Grand Erg Oriental, (Baba, 2005).....	9
Fig. I.4 : Log de forage F1 l'Albien (coupe d'après ANRH 1993).....	11
Fig. I.5: Coupe Géologique N° 1 (A.N.R.H, 1989) Extraite a partir des logs lithologiques des forages.....	13
Fig. I.6 : Coupe géologique N° 2 (A.N.R.H, 1989) Extraite a partir des logs lithologiques des forages.....	14
Fig. I.7: Coupe géologique N° 3 (A.N.R.H, 1989) Extraite a partir des logs lithologiques des forages.....	15
Fig. I.8. Carte topographie de la vallée du souf en 2011.....	17
Fig. I.9 : Températures moyennes mensuelles.....	18
Fig. I.10: Précipitations moyennes mensuelles.....	19
Fig. I.11: Humidités moyennes mensuelles.....	19
Fig. I.12: Vitesses moyennes mensuelles des vents.....	20
Fig. I.13 : Evaporations moyennes mensuelles.....	20
Fig. II.1: Carte d'inventaire de forage de CT sur la région d'Etude (2018).....	25
Fig. II.2: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO, 1972).....	28
Fig. II.3: Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006).....	29
Fig. II.4: Carte géologie avec le sens d'écoulement des aquifères CT et CI (UNESCO,1972)	32
Fig. II.5: Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 (Khechana, 2014).....	34
Fig. II.6: Courbe débit / Rabattement à F 87 (El-Houd) (Khechana,2014).....	36
Fig. II.7 : Essai de pompage à longue durée à F4 (EL-Houd) (Khechana,2014).....	37
Fig.III.1: Diagramme de Piper des eaux de la nappe du CT.....	45
Fig.III.2: Diagramme de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe du CT.....	47
(Région d'El Oued, novembre 2018).....	47
Fig.III. 3- Couple Na+ et Cl-.....	48
Fig.III. 4 - couple Ca++ et SO4- -.....	48
Fig.III. 5 - couple Ca++ et HCO3.....	49

Fig. III.6 - couple Ca ⁺⁺ et Mg ⁺⁺	49
Fig. III.7 : Diagramme de Richards: classification des eaux d'irrigation en fonction du S.A.R (nappe du CT de la région d'El Oued, novembre 2018).	53
Fig. IV.1: Structure hiérarchique de la vulnérabilité selon la méthode AHP.....	58
Fig. IV.2: Carte de PH.....	63
Fig. IV.3: Carte de potassium.....	63
Fig. IV.4: Carte De sodium	64
Fig. IV.5: Carte De magnésium	64
Fig. IV.6: Carte De bicarbonate	65
Fig. IV.7: Carte De calcium	65
Fig IV.8: Carte De chlorure.....	66
Fig. IV.9: Carte De sulfate	66
Fig. IV.10: Carte De conductivité électrique	67
Fig. IV.11: Carte de température	67
Fig. IV.12: Exécution de la méthode AHP sous ArcGIS	71
Fig. IV.13 : Carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux.....	72

Lites D'abréviation

AHP : Analyse Hiérarchique des procédés.

SIG : systèmes d'information géographique.

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

O.N.M: Office National Métrologique.

A.N.R. : Agence national des ressources hydraulique.

A.D.E : Algérienne des eaux.

C.I : Continental Intercalaire.

CT : Complexe Terminal.

O.N.S : Office National de Statistique.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

O.M.S : Organisation Mondial des Santé.

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

INRAA : Institut National de la Recherche Agronomique Alger.

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.

Dans cette étude, nous intéressons aux points suivants:

- 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 la méthode de l'Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP), sous un environnement des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Notre travail est structuré de la manière suivante:

- ✚ **Le premier chapitre** est consacré à l'étude des contextes géographiques et géologiques, et l'étude des paramètres climatiques de la vallée d'El Oued.
- ✚ **Dans le deuxième chapitre**, nous présentons les trois nappes : la nappe Phréatique, le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI), ainsi que l'étude hydrodynamique de la nappe du complexe Terminal.

- ✚ **Pour le troisième chapitre**, nous allons examiner les caractéristiques hydro-chimiques des 45 forages de la nappe (CT) dans la région d'étude, afin de déterminer la qualité des eaux et les éléments majeurs (physico-chimiques) qui la constituent, à travers le diagramme de PIPER.
 - ✚ **Finalement, le quatrième chapitre**, il sera consacré à l'étude et l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux souterraines, par la méthode AHP.
- A la fin, des conclusions et des recommandations seront présentées par la suite.

CHAPITRE I

Présentation de la zone d'étude

I.1. Introduction:

La wilaya de Oued Souf est une région aride, faisant partie du Sahara Septentrional partagé

par la Tunisie, la Libye et l'Algérie. Elle est située au Sud-Est du Sahara Algérien.

La wilaya répartie en trois zones bien distinguées qui sont les suivantes (D.P.A.T , 2009) :

- La vallée du Souf ;
- La vallée d'Oued Rhig;
- La zone frontalière (Taleb Larbi).

Dans ce premier chapitre, nous mettrons en évidence la localisation géographique et la région d'étude, puis des quelques informations sur ses différentes composantes climatiques et Géologiques.

I.2. Situation géographique :

La wilaya d'El Oued se trouve au Sud-est de l'Algérie. Elle devint une commune depuis 1957 et une wilaya depuis janvier 1984, sachant que ce découpage a pour but de faciliter les conditions de vie sociale, culturelle, professionnelle et de limiter les difficultés dues à l'isolement, aujourd'hui elle se repose sur une superficie égale à 44586 km²., divisé en 30 communes avec une population de 850840 habitants et 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 Tebessa
- Au Nord par la wilaya de Khenchla et Biskra
- Au Nord-Ouest par la wilaya de Biskra.
- A l'Ouest par la wilaya de Djelfa.
- Au Sud-ouest et sud 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 coupes et par ses palmeraies plantées dans les ghouts.

La vallée de Souf c'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 l'Oued Righ (fleuve de fossile) et par la ligne de palmeraie qui court de Biskra à Touggourt .

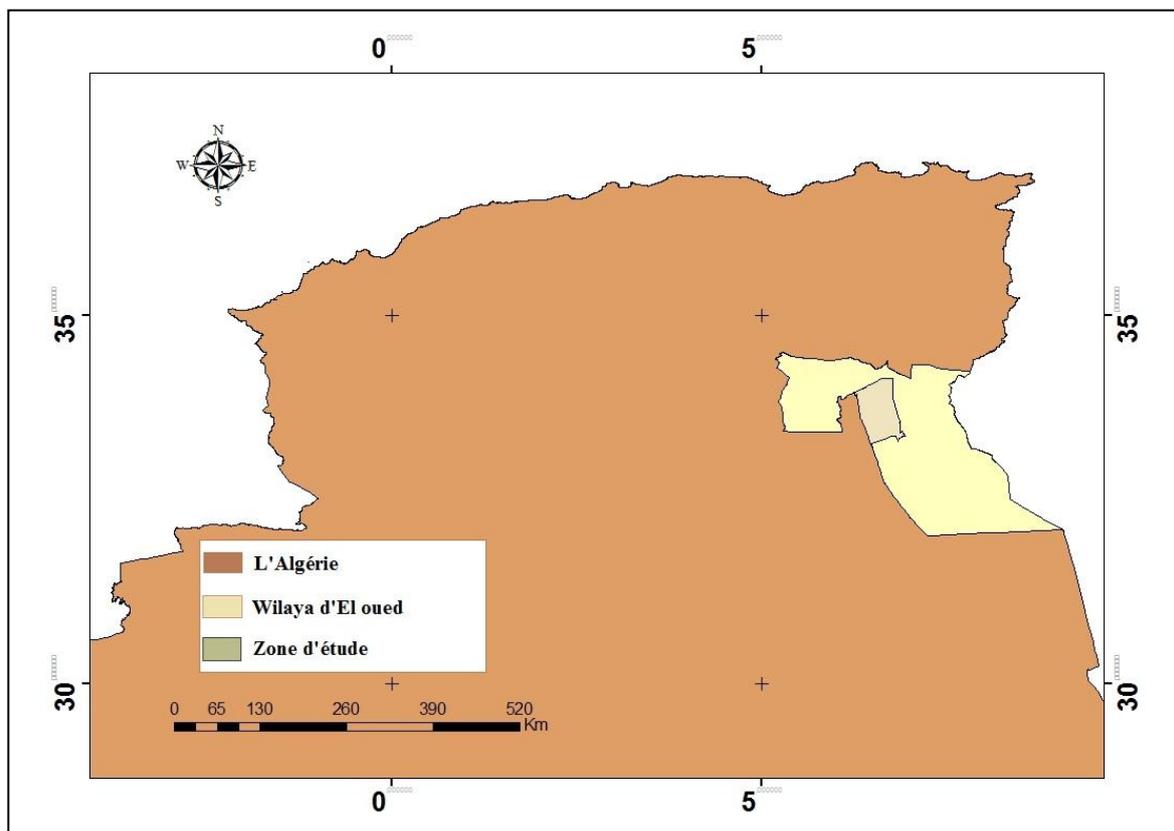


Figure I.1 Répartition administrative de la zone d'étude.

I.3. Répartition administratif et démographique :

La zone d'étude occupe une superficie de 4405 Km² qui représente 06 communes administrativement et englobe un nombre de population de 331930 habitants selon le recensement de 2017.

Selon le tableau I.1, nous constatons que la commune la plus peuplée est d'El-Oued (2124,09 hab/km²), suivi par la commune de Reguiba (25,67 hab/km²), sachant que la commune Ourmes a la moindre densité populaire (15,02 hab/km²).

Tab.I.1: Surface et population de la région d'étude par commune.

N°	Commune	Population(hab)	Superficie (km ²)	Densité populaire (hab/km ²)
01	Guemar	49 325	1264	39,02
02	Reguiba	50 460	1966	25,67
03	Taghzout	49 325	539	30,80
04	Ourmes	6 655	443	15,02
05	Kouinine	12 610	116	108,71
06	El-Oued	163 555	77	2124,09
TOTAL		331930	4405	2343.31

(ONS : 2017)

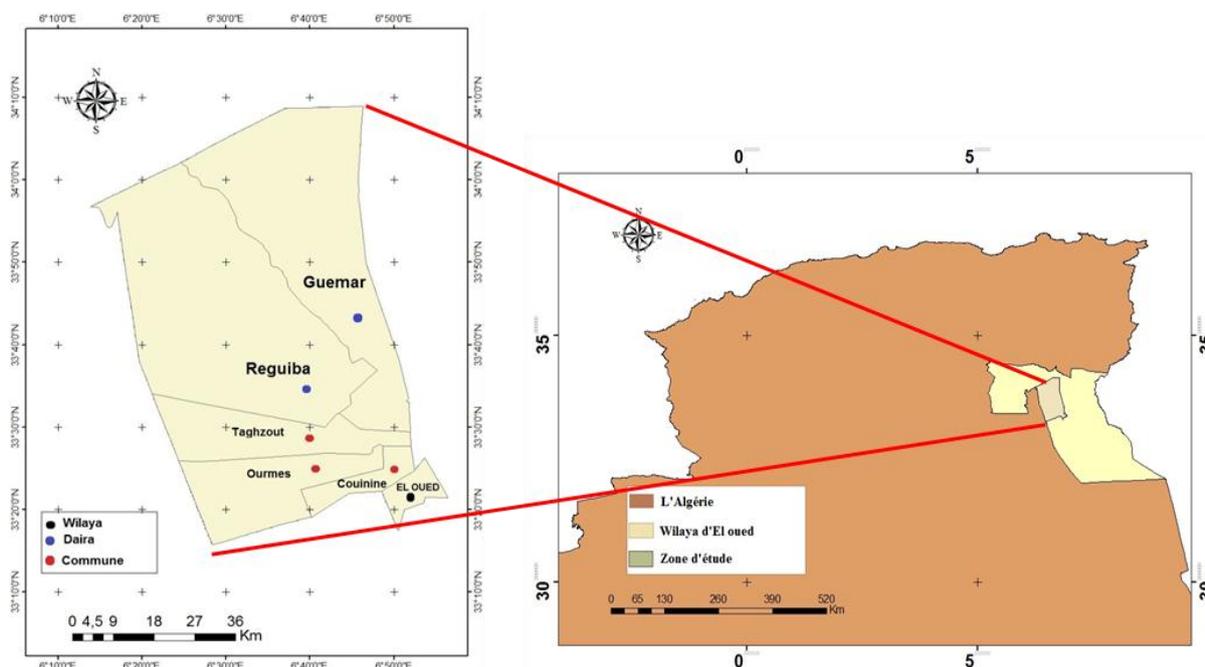


Fig.I.2: Répartition administrative de la zone d'étude.

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 d'être aquifères.

La région d'étude est exactement dans la partie Nord de la plate 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 fluvio-lacustres de tertiaire continental.

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 de Oued-Souf, nous citons les principales strates repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers la plus récente (Fig.I.4: Log de forage F1 de l'Albien):

I.4.1.1. Formation de l'ère Secondaire :

- **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.

- **Le 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 de grès 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.

- **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.

- **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 au sommet.

- **Sénonienlagunaire :**

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.

- **Le 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.

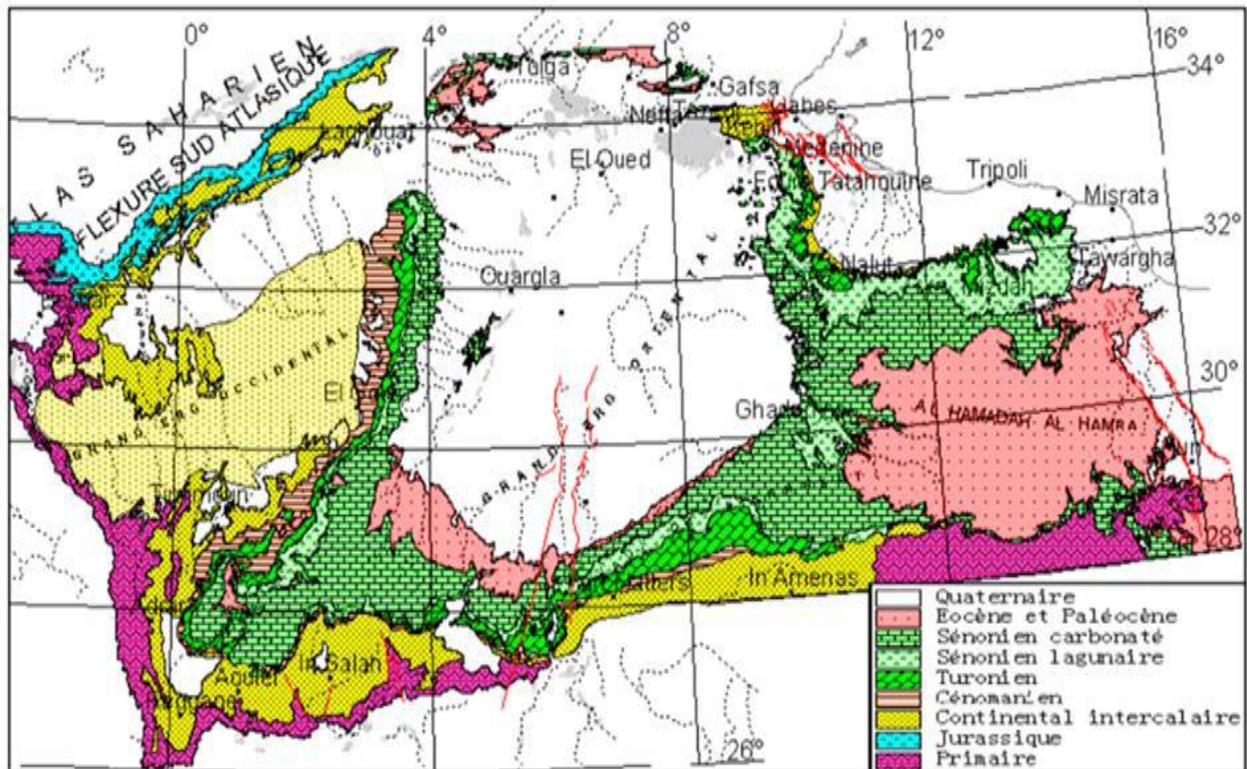


Fig. I.3 : Carte géologique du Grand Erg Oriental, (Baba, 2005)
I.4.1.2. Formations de l'ère Tertiaire :

- **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 Cénomanién 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 Mi pliocène 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 D'émarge 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 pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.

II.2.3. 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.

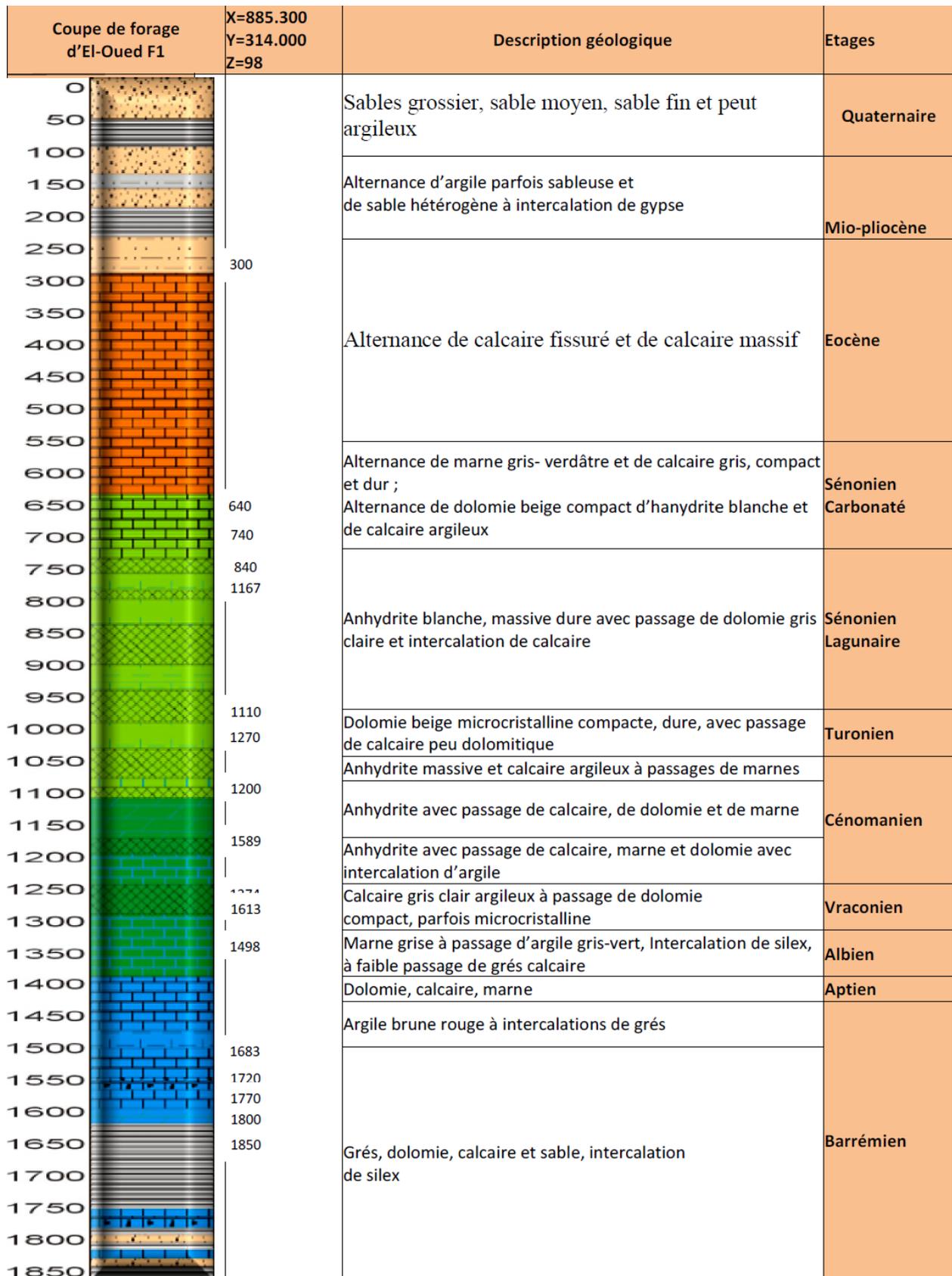


Fig. I.4 : Log de forage F1 l'Albien (coupe d'après ANRH 1993)

I.4.2. Géomorphologie :

Oued et jusqu'à El-Ogla, 24 Km plus loin, on remarque l'absence totale de « Tefza » (pierre à plâtre calcaire), tandis que sur un autre axe allant de El-Oued à Ghamra (en passant par Tiksebt, Kouinine et Guemar) la « Tefza » y occupe tous le terrain.

Ainsi deux bandes de terrains sédimentaires, de formations différentes, renfermant des roches dissemblables dont dépend de la qualité de la nappe aquifère, prolongent de part et d'autres sur les principaux axes du Souf.

Une coupe dans le sol, nous permet de distinguer :

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.4.3. Interprétation des coupes :

L'établissement des coupes a pour but, d'établir une corrélation lithologique du sous sol, ainsi que d'identifier l'extension géographique, l'épaisseur approximatif de la nappe et l'épaisseur utile des couches.

- **Coupe N° 1:**

Cette coupe orientée Nord – Sud, faite sous la base de coupes de forages, on remarque que l'épaisseur de formation miopliocène (constituée par des argiles sableuses, de sable et de calcaire) diminue du Nord vers le Sud. Au niveau du H11.104, on remarque l'absence des formations quaternaires correspondant aux formations sableuses ; ce manque ne peut être

expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, ces formations tendent à s'épaissir vers le Sud (voir H12.32 et H12.23).

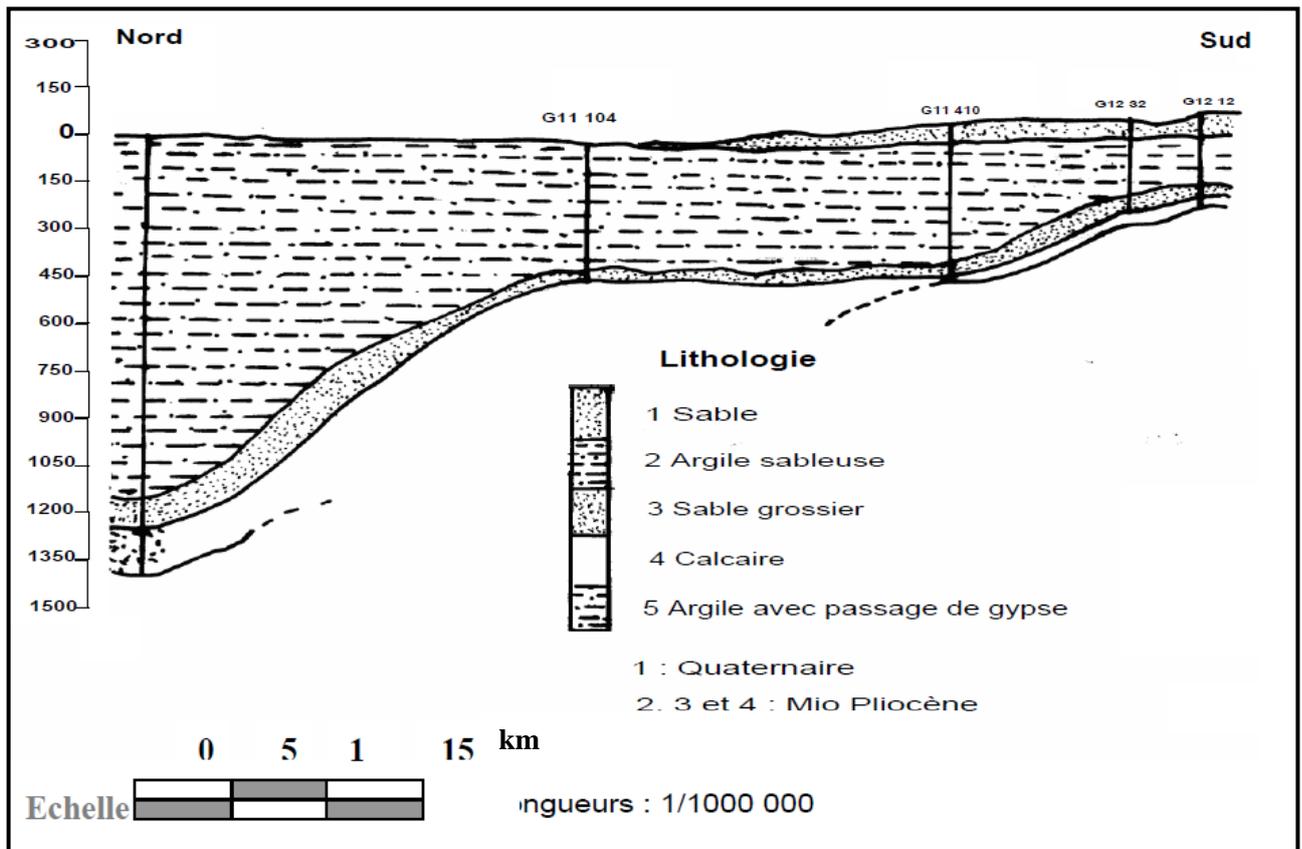


Fig. I.5: Coupe Géologique N° Extraite à partir des logs lithologiques des forages 1 (A.N.R.H, 1989)

- **Coupe N° 2**

La coupe N° 2 orientée NE-SW, en allant de la région dite Merzaga vers Ourmès, on remarque au niveau du forage (H12 52), l'absence du Quaternaire, ce qui ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne. Les formations miopliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable (plus de 200 m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région, au contraire de celle de Quaternaire qui est constituée par des sables qui changent d'une région à l'autre (par exemple, au niveau du forage H12 540 l'épaisseur présente presque la moitié de celle de H12 84) (Fig. I.6).

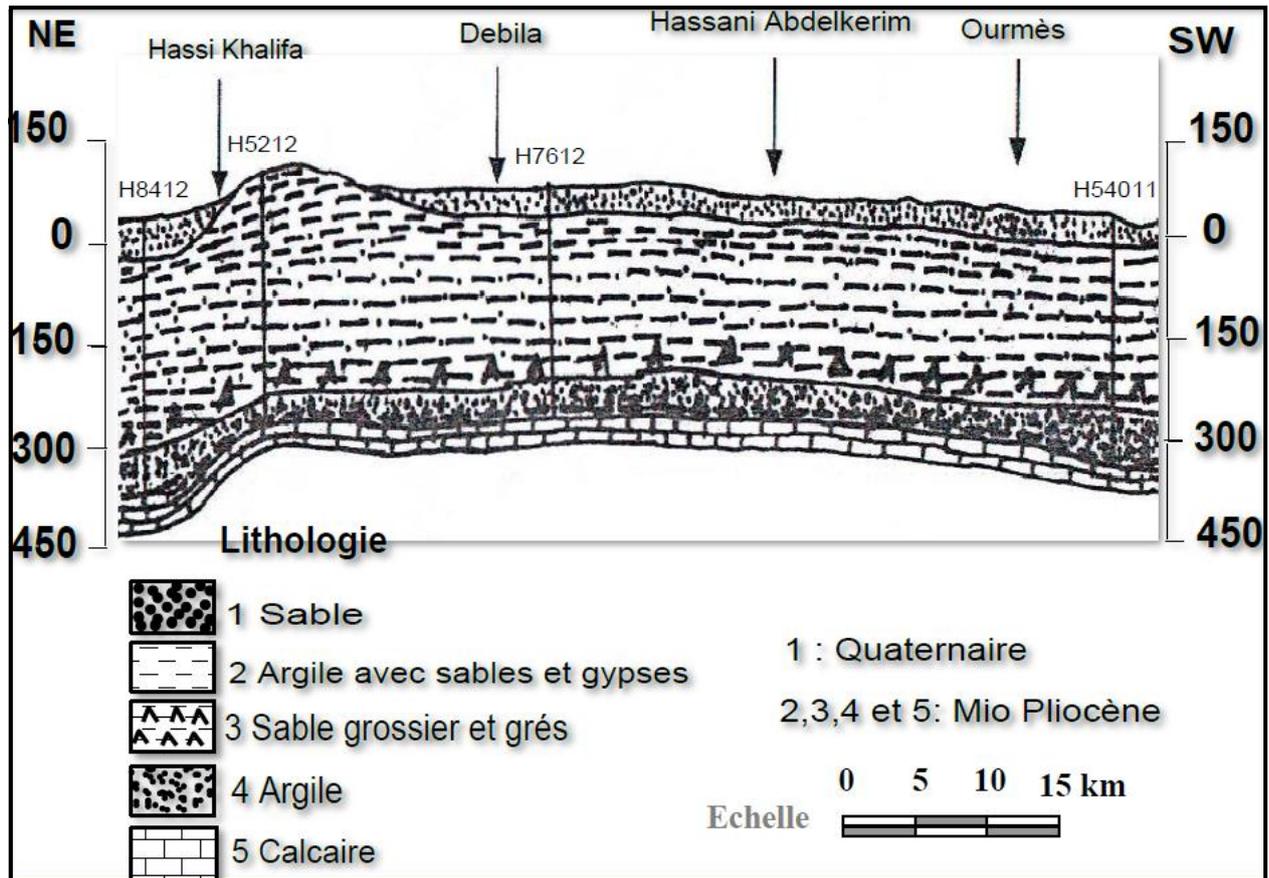


Fig. I.6 : Coupe géologique N° 2 Extraite a partir des logs lithologiques des forages(A.N.R.H, 1989)

- **Coupe N° 3:**

La coupe N° 3 est orientée du Nord-Ouest vers le Sud-Est, elle est différente des autres surtout du point de vue stratification; cette dernière entre croisée, ce qui donne naissance à des "biseautages". Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages. On constate que l'épaisseur des formations quaternaires, est plus importante au Nord-Ouest qu'au Sud-est. (Fig. I.7).

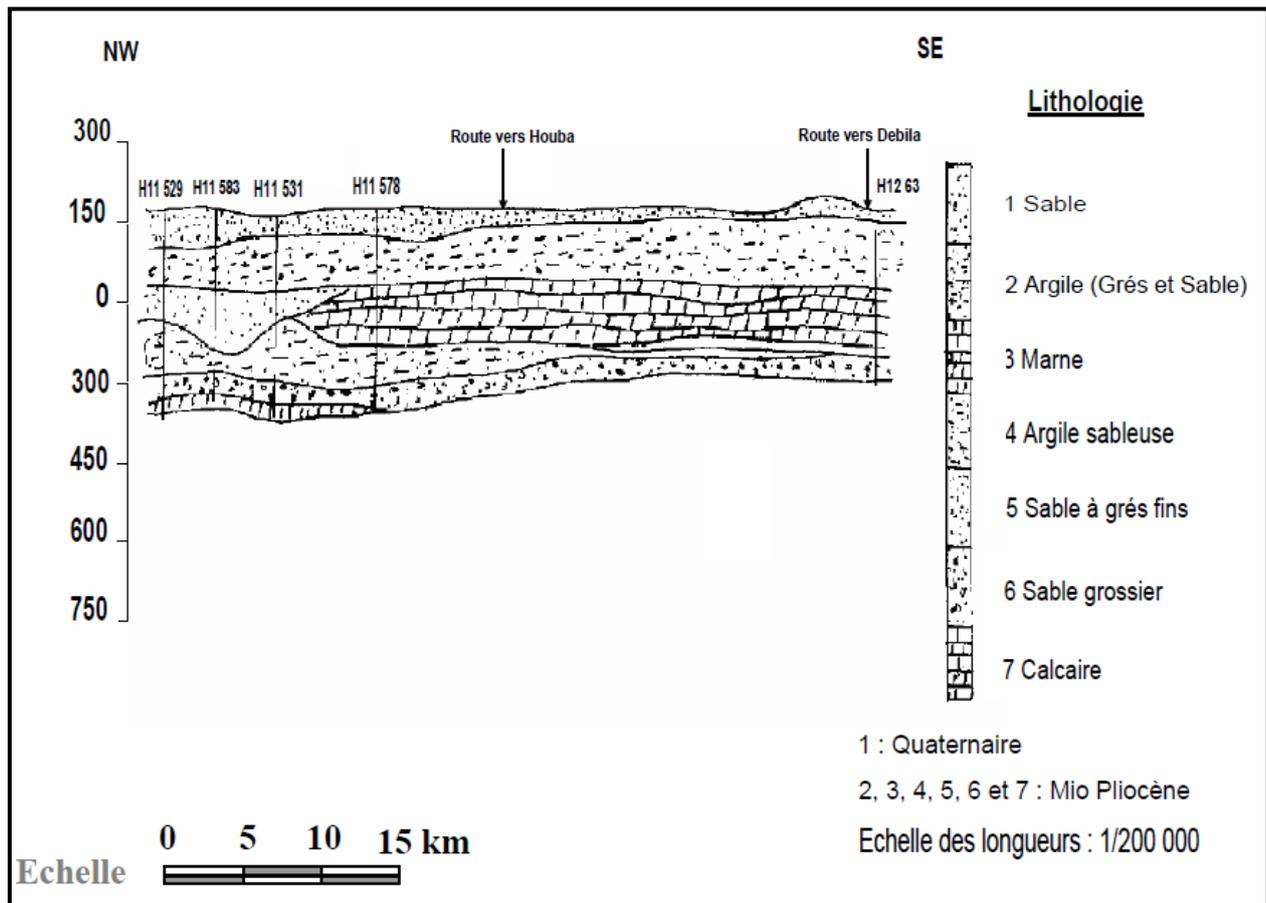


Fig. I.7: Coupe géologique N° 3 Extraite a partir des logs lithologiques des forages(A.N.R.H, 1989)

I.4.4. Tectonique :

Le bassin sédimentaire, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme créacé forme un vaste synclinal dont le fond a un très grand rayon de courbure. Les courbes sédimentaires semblent s'épaissir du Nord d'El-Oued vers le centre de cette dépression, ce qui montre que l'approfondissement suit de près la sédimentation. Donc, il faut noter qu'au cours de la jeunesse de l'immense dépression au début du Quaternaire et sous l'effet de la sédimentation, le centre de celle-ci (dépression) se déplace en fonction du temps vers le Nord tout en donnant naissance à des nouvelles dépressions correspondant actuellement à la zone des chotts, où leur naissance ne s'est effectuée qu'à la fin du Quaternaire.

Ces caractéristiques 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.

L'aquifère Quaternaire du Souf présente une épaisseur moyenne de 40 mètres. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au NO de la région de Foulia et se situe à moins de 10 mètres de profondeur aux extrémités NE de la région d'étude. La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacée forme un vaste synclinal dont le fond est doté d'un très grand rayon de courbure.

I.4.5. Relief:

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

- Une région sableuse : 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 dépression : 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.5. Topographie:

La région de 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 Essoualah, alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29mà 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.(A.N.R.H : 2005).

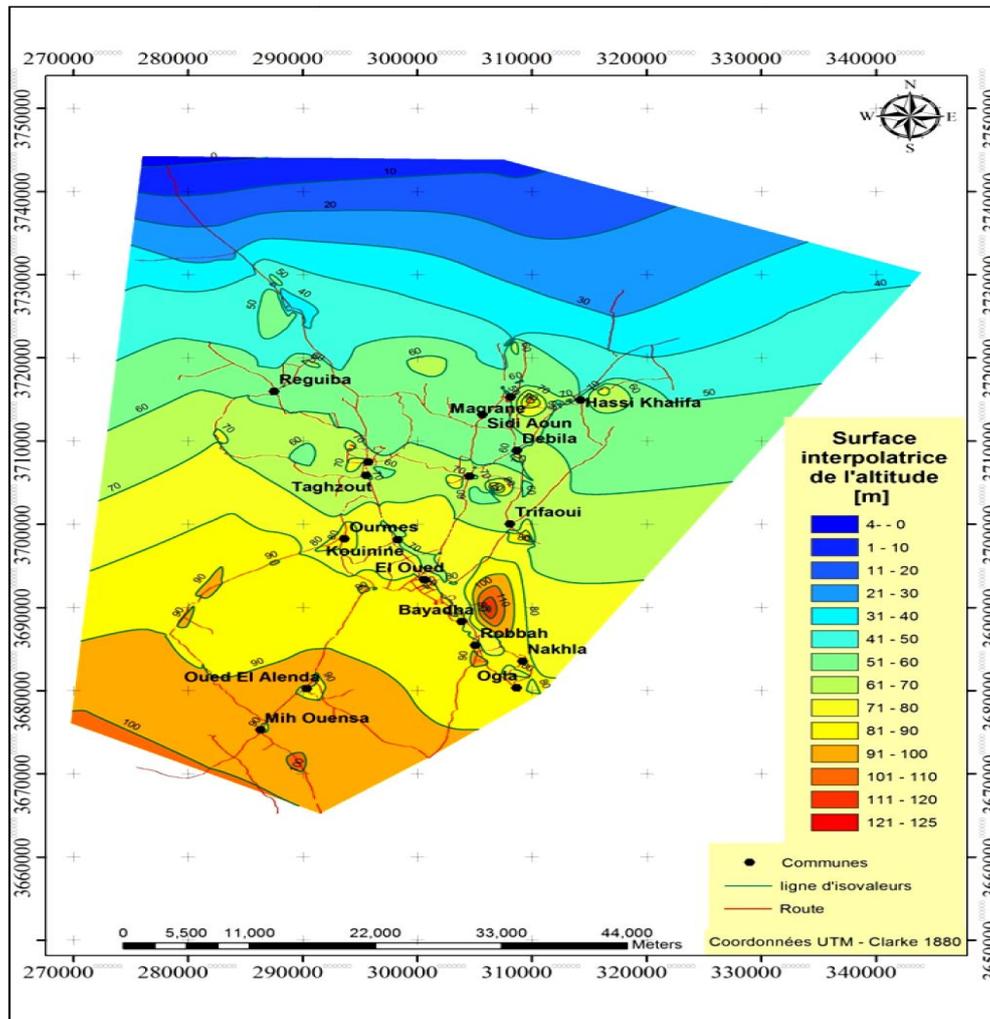


Fig I.8. Carte topographique de la vallée du Souf en 2011

I.6. ETUDE DES PARAMETRES CLIMATIQUES:

Le climat d'El-Oued est un climat saharien se caractérise par un faible taux des précipitations et des températures élevées, d'une évaporation importante et d'un rayonnement solaire excessif.

Comme référence-la en l'absence des stations climatiques couvrant toute la Wilaya.

Pour cette étude, les séries des données, qui sont à la base de la détermination des différents paramètres climatiques, ont été enregistrées à la station pluviométrique de Guemar (Tableau. I.2.).

Tab.I.2. Caractéristiques géographiques de station climatique.

Station	Coordonnées		Altitude (m)
	Longitude	Latitude	
Guemar	06°47' E	33°30' N	63

Tab. I.3. Données climatiques de la région d'Oued Souf (1978-2013).

Paramètre	Température			Précipitation (mm)	Evaporation (mm)	Humidité (%)	Vent (m/s ⁻¹)
	Tmin °C	Tmax °C	Tmoy°C				
Janvier	8.5	13.7	10,43	12,83	80,30	64,87	1,83
Février	10.8	15.6	12,81	6,93	93,10	56,22	2,34
Mars	10.25	18.9	16,38	12,97	167,70	49,49	2,85
Avril	10.9	29.9	20,19	7,90	203,00	43,43	3,08
Mai	22,00	28.7	25,28	4,14	288,50	38,50	3,07
Juin	20.3	39.3	30,09	1,84	337,70	34,74	2,92
Juillet	27.4	35.8	32,84	0,18	361,50	31,90	2,45
Août	30.8	34.7	32,78	1,71	321,30	34,63	2,17
Septembre	26.2	31.8	28,44	5,94	184,20	46,93	2,20
Octobre	18.6	24.8	22,27	6,35	144,80	52,72	1,69
Novembre	12.4	25.1	15,75	7,86	105,20	60,04	1,60
Décembre	8.5	14,00	11,03	7,13	87,30	66,81	1,56
Moyenne	17.22	26.02	21,52	75,78	2374,60	48,36	2,31

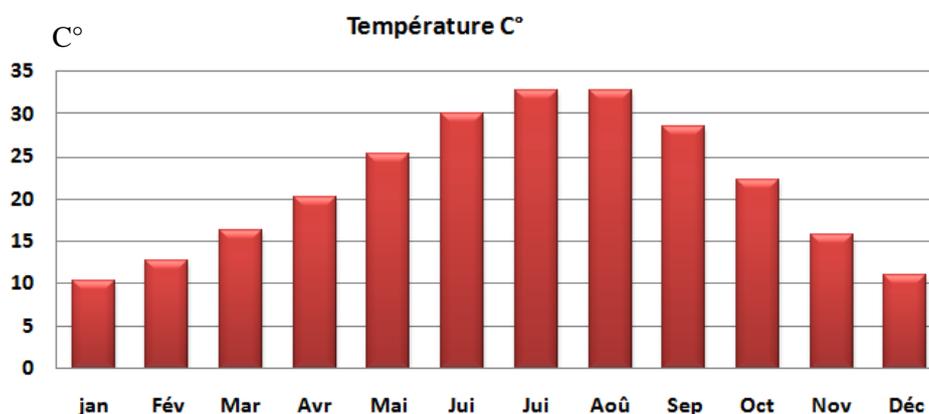
* Cumulé annuel

(O.N.M. El Oued Guemar, 2014)

I.6.1. Température :

En Souf ; le climat est caractérisé par des températures qui sont très élevées en été (39,3°C) (Chaud et sec en été) et peuvent descendre jusqu'à (8,5°C) en hiver (froid en hiver).

La distribution de la température durant l'année est présentée dans le tableau N° I.2:

**Fig I.9 : Températures moyennes mensuelles**

I.6.2. Précipitations :

Nous observons que tout au long de ces 35 ans, une grande irrégularité des précipitations moyennes mensuelles avec un maximum de l'ordre de 12.97 mm enregistré pendant le mois de mars, un minimum de l'ordre de 0.18 mm enregistré pendant le mois de juillet, et une précipitation moyenne annuelle de 75.78 mm.

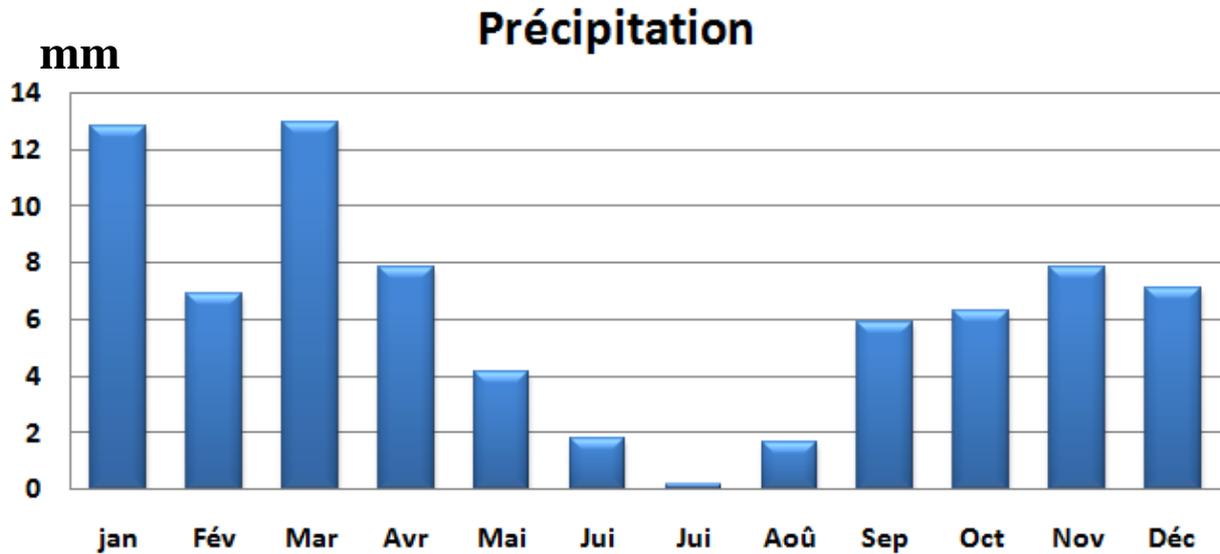


Fig I.10: Précipitations moyennes mensuelles

I.6.3. Humidité:

En souf ; L'humidité relative varie entre 31.9 et 66.81 %, selon les saisons.

L'humidité de l'air est donnée par le tableau N° I. 2:

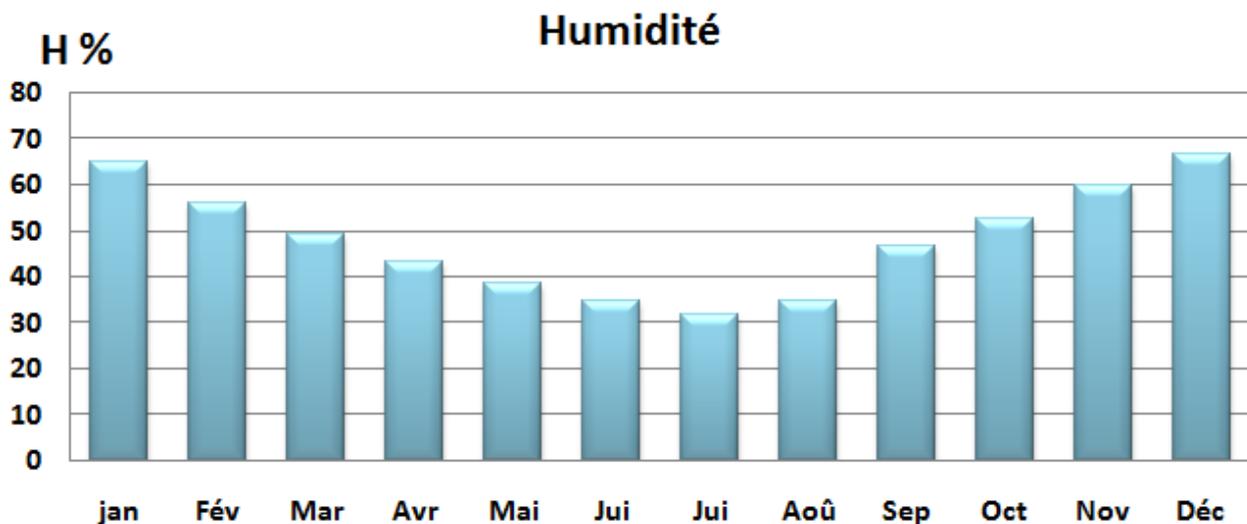


Fig I.11 : Humidités moyennes mensuelles

I.6.4. Les vents:

En Souf ; nous remarquons que les vents sont fréquents durant toute l'année les vitesses les plus élevées sont enregistrées durant la période du mois du Mars jusqu' à le mois d' Août, avec un maximum de 3,08 m/s durant le mois d' Avril.

Le chihili (ou sirocco) provoque des dégâts très sévères (dessèchement, déshydratation) ; Les vents de sable freinent considérablement l'activité socio-économique et envahissent les cultures.

La vitesse des vents est donnée par le tableau N° I. 2

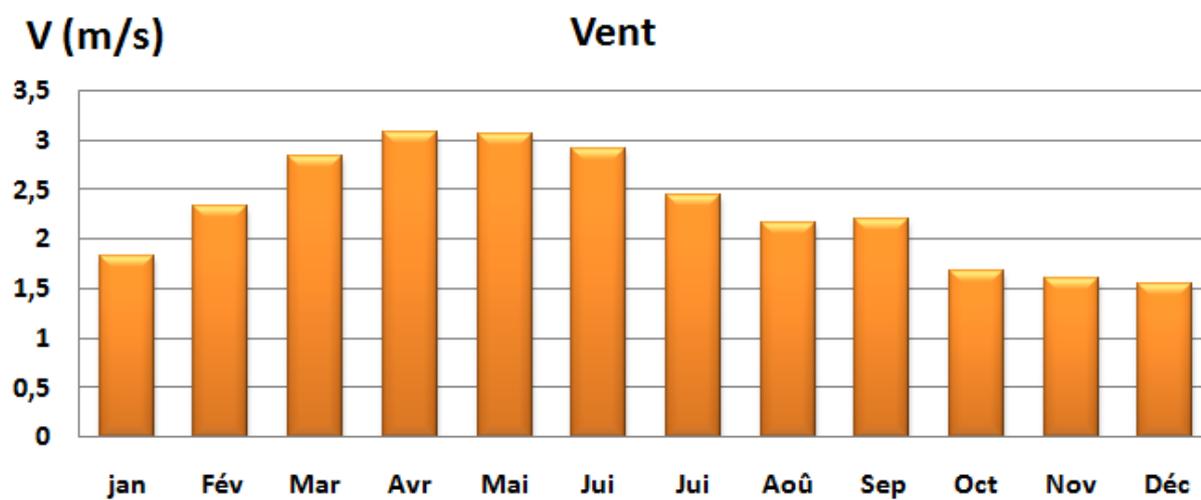


Fig I.12 : Vitesses moyennes mensuelles des vents

I.6.5. L'évaporation.

En zone aride, l'évaporation et la transpiration sont les mécanismes majeurs de perte en eau. Le tableau I.2 récapitulent les répartitions de l'évaporation dans la station sur une période de (35 ans).

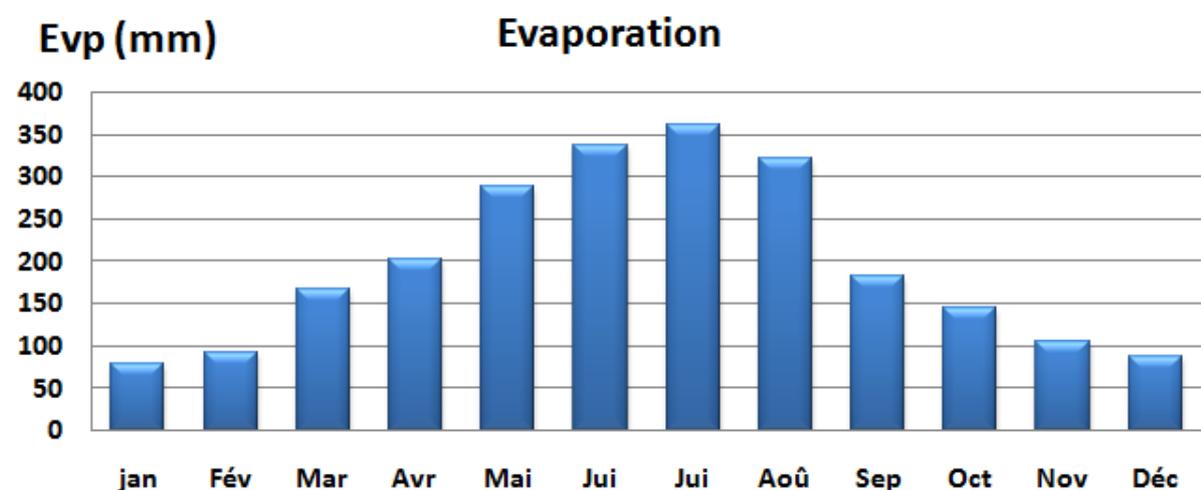


Fig I.13 : Evaporations moyennes mensuelles

I.6.6. Indice d'aridité :

Cet indice permet d'identifier le type de climat dans la région d'étude à l'aide de la formule de De Martonne :

$$I = P / (10 + T) \dots \dots \dots (I-1)$$

Avec :

I : indice d'aridité.

P : précipitation moyenne mensuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

▪ **Application numérique :**

P = 75.78 mm

T = 21.56 °C

Donc : I= 2.40

Tab. I.4 : Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De Martonne)

Valeur de l'indice d'aridité	Type de climat
I < 05	climat hyper aride.
05 < I < 07.5	Climat steppique
07.5 < I < 10	Climat semi-aride
10 < I < 20	Type de climat
20 < I < 30	Climat tempéré
30	Climat humide

I = 2.40 < 05, Ce qui confirme que la région de Souf est caractérisée par un climat hyper aride.

I.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la situation géographique et les caractéristiques géologiques et le relief et situation topographique de la région d'étude (Sud-Est de l'Algérie).

La zone d'étude est située à peu près au milieu de la vallée du Souf, elle occupe une superficie de 4405 km², avec une population de 331930 habitants.

La géologie d'El-Oued est masquée par une épaisse couche de terrains quaternaires. Leur description a été effectuée grâce à l'interprétation des logs stratigraphiques des forages d'eau.

Le relief d'El-Oued est caractérisé par l'existence de trois principales formes une région sableuse, Une forme de plateau rocheux, et une zone de dépression.

Le climat de la région de Oued-Souf est connu par son aridité marquée notamment par la faiblesse et l'irrégularité des précipitations d'une part, et par les amplitudes thermiques et les températures trop élevées d'autre part. Cette aridité n'est pas seulement due à la rareté de la pluie, mais aussi à la forte évaporation qui constitue l'un des facteurs climatiques majeurs actuels qui règnent dans la région.

CHAPITRE II

Hydrogéologie et hydrodynamique

II.1. Introduction :

L'étude hydrogéologique a pour objectif la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines, ceci après avoir une idée sur la structure et la géométrie de la nappe, les caractéristiques des réservoirs d'eaux souterraines, les modalités de leur écoulement et des conditions aux limites (entrées et sorties d'eau).

Cette étude hydrographique comprend les éléments de la réponse répartis en deux étapes fondamentales:

- Identification des différents aquifères de la région.
- Identification d'inventaire des points d'eau.
- Clarification des niveaux piézométriques grâce à la carte piézométrique.
- Détermination des paramètres hydrodynamiques des aquifères (perméabilité, transmissivité, etc.).

II.2. Inventaire des forages :

L'inventaire des points d'eau de notre système aquifère se définit par 45 forages en Complexe

Terminale selon l'inventaire de (A.D.E : Novembre 2018). Parmi toutes les activités de forage abandonnées et exploitées dans le domaine agricole, nous avons toujours les activités de forage exploitées pour l'eau potable dans la zone d'étude. (Fig. II.1).

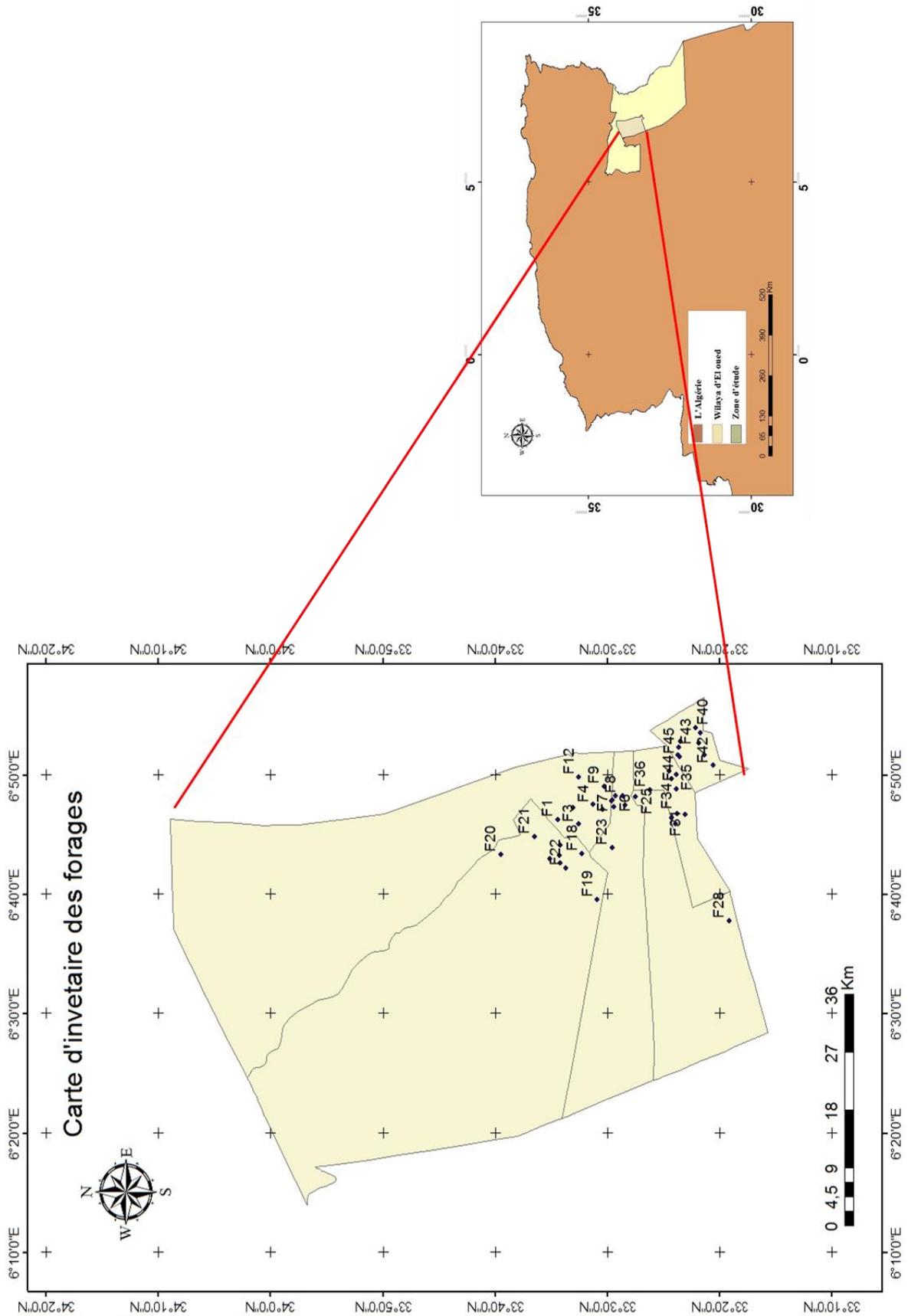


Fig. II.1: Carte d’inventaire de forage de CT sur la région d’Etude (2018)

Tab II.1. Forages du complexe terminal C.T choisis (A.D.E. 2018).

commune	N° fourage	nom de fourage	LAT DD	LONG DD
Guemar	f1	miha atia	33,57361	6,77138
	f2	ghammra	33,48805	6,80472
	f3	dmitha	33,54277	6,76499
	f4	elhoud	33,52111	6,79277
	f5	sife nacer	33,5075	6,78555
	f6	El-gharbia	33,49	6,78944
	f7	bab gharbi	33,49249	6,79888
	f8	bab charki	33,48805	6,80472
	f9	elgibadi	33,505	6,81777
	f10	20 aout	33,49361	6,7975
	f11	airk esoiri	33,55055	6,78749
	f12	miha salah	33,54222	6,83138
Rgueba	f13	20 aout	33,57166	6,72166
	f14	el-rradauin	33,585	6,71638
	f15	aoulad amor	33,57166	6,72138
	f15	18 février	33,56972	6,73611
	f16	rgueba centre	33,57	6,71111
	f17	khobna	33,53805	6,72416
	f18	el-aarvgi	33,515	6,66
	f19	Elfoulia	33,65805	6,7225
	f20	Houba	33,60861	6,74749
Taghzout	f21	chourfa	33,56166	6,70416
	f22	Bagousa	33,49305	6,73277
	f23	Cité Istiklal 500	33,47416	6,79194
	f24	Ben Djrou	33,45805	6,80305
Ourmes	f25	taghzout 02	33,47777	6,80444
	f26	Route Hadhoudi	33,40472	6,77416
	f27	Cité Hadhoudi	33,31944	6,63055
	f28	Cité Istiklal	33,39694	6,78
	f29	Abaidi Alhabib	33,39944	6,76555
Kuinine	f30	01 Nouvember	33,38416	6,77861
	f31	Guirir	33,40833	6,83861
	f32	Centre	33,40444	6,82805
	f34	1 Nouvember 500	33,3975	6,81416
	f35	BARK	33,39777	6,83444
El Oued	f36	Zone Industrielle	33,43666	6,81305
	f37	400 Logt	33,35555	6,86166
	f38	Sidi Messtour	33,36416	6,87805
	f39	Bouhmid 02	33,36249	6,8925
	f40	Bouhmid 01	33,36972	6,9
	f41	Nadour	33,39138	6,88083
	f42	19 Mars	33,34305	6,84694
	f43	Chott	33,39444	6,87249
f44	Universitaire	33,395	6,86138	
f45	pole universitair	33,39305	6,85944	

II.3. 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 Miopliocène (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.

II.4. Présentation des nappes aquifères de la région du Souf:

La wilaya d'El Oued présente des potentialités en eau assez importantes, représentées par trois types d'aquifères, l'un libre correspondant à la nappe phréatique, les deux autres sont captifs, correspondant aux nappes multicouche du complexe terminal et la nappe du continental intercalaire.

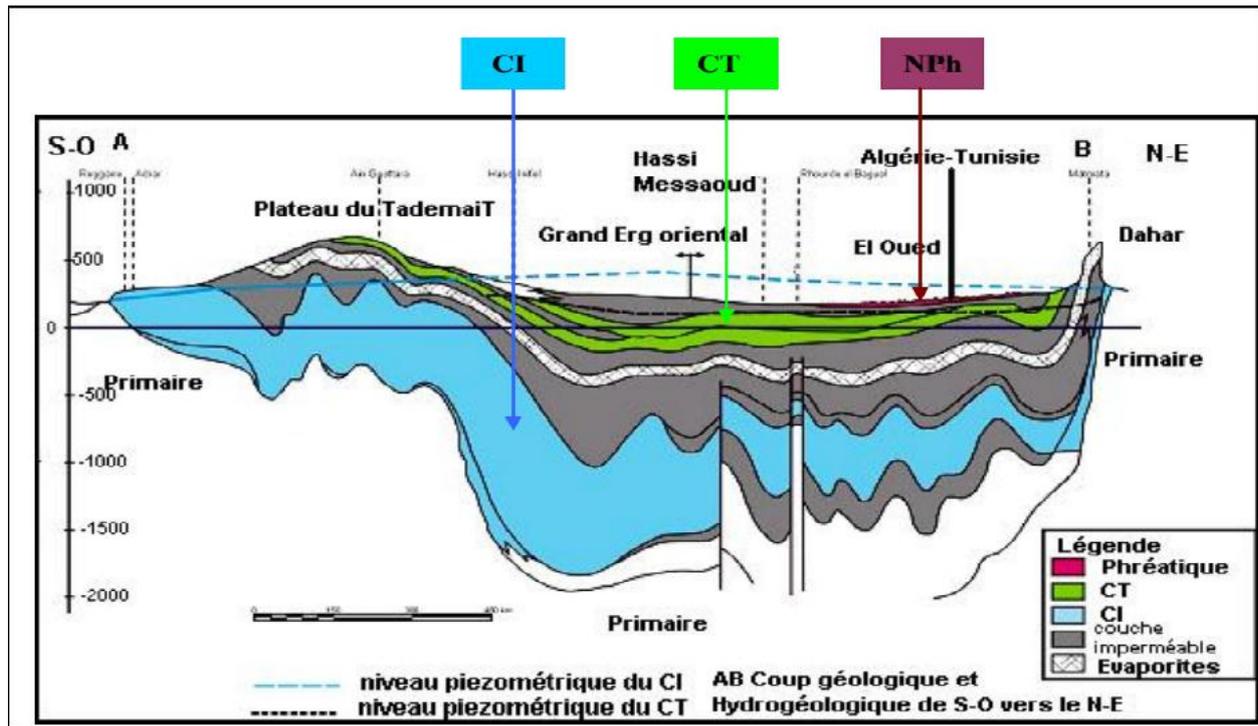


Fig II.2: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO, 1972)

II.4.1. Nappe Phréatique:

La nappe phréatique présente dans toute la région du Souf, correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire, elle se localise à des profondeurs variant entre 10 et 60 mètres. Vu sur son importance, cette nappe représente la source principale en eau des palmeraies, elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui selon les enquêtes sont en nombre de 31 000 (D.S.A, 2014).

La circulation des eaux dans cette nappe est relativement rapide sur toute la région du Souf et particulièrement dans les zones caractérisées par l'existence de lentilles argileuses qui influent sur la perméabilité des sables.

Excepté la région des Chotts, la nappe libre est présente sur toute la zone d'étude. La nappe phréatique dans la région du Souf est principalement alimentée par les eaux utilisées par les populations (les eaux d'irrigation, industrielles et domestiques) et la source absolue de ces derniers est des nappes profondes du Complexe Terminale et Continentale Intercalaire (Marc Cote, 1998).

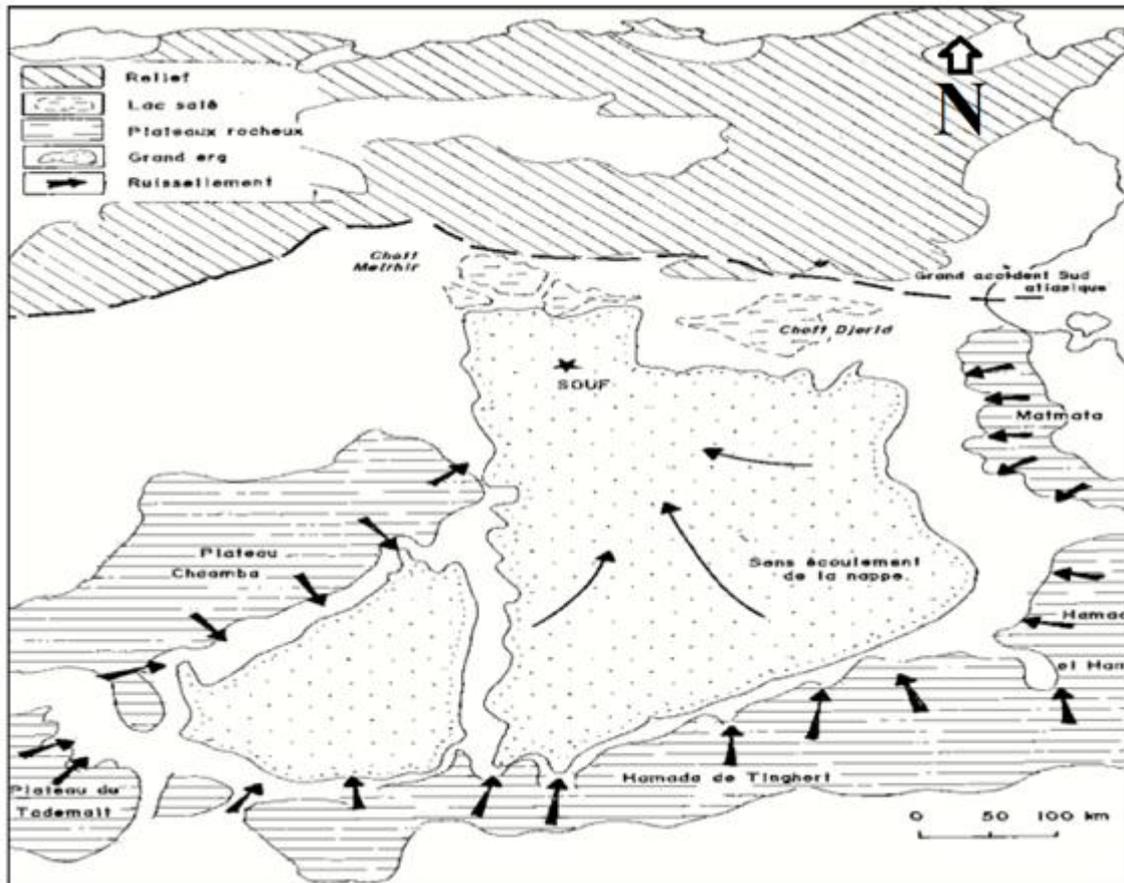


Fig. II. 3 : Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe (Cote Marc, 2006)

II.4.2. Nappe du Complexe Terminale (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 aurésienne, 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. Quant à l'épaisseur utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ. L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-Ouest vers le Nord-Est, autrement dit vers la zone des chotts (Melghir et Merouane).

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 Larbi 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.

II.4.3. 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 régit 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.

Tab II.2: Log stratigraphique et l'hydrogéologie de forage Barrémien dans la région du Souf (D.W.H., 2004).

Nature hydrogéologique		Nature lithologique	Étage	Ère	
Niveau perméable	Nappe phréatique	Sables	Quaternaire		
Niveau Imperméable		Argiles			
nappe des sables	Nappe Complexe Terminale	Sables	Pliocène		Tertiaire
Semi – perméable		Argiles gypseuses			
nappes des sables		Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	
Niveau imperméable		Argiles lagunaires, marnes	Moyen	Éocène	
Nappe des calcaires (perméables)		Calcaire fissuré	Inférieur		
Semi-perméable	Évaporites, argiles		Sénonien lagunaire	Crétacé	Secondaire
Niveau imperméable	Argiles, marne	Cénomaniens			
Niveau perméable	Sables et Grés	Albien			
Semi-perméable	calcaire, marne	Aptien			
Niveau perméable	calcaire, sable	Barrémien			

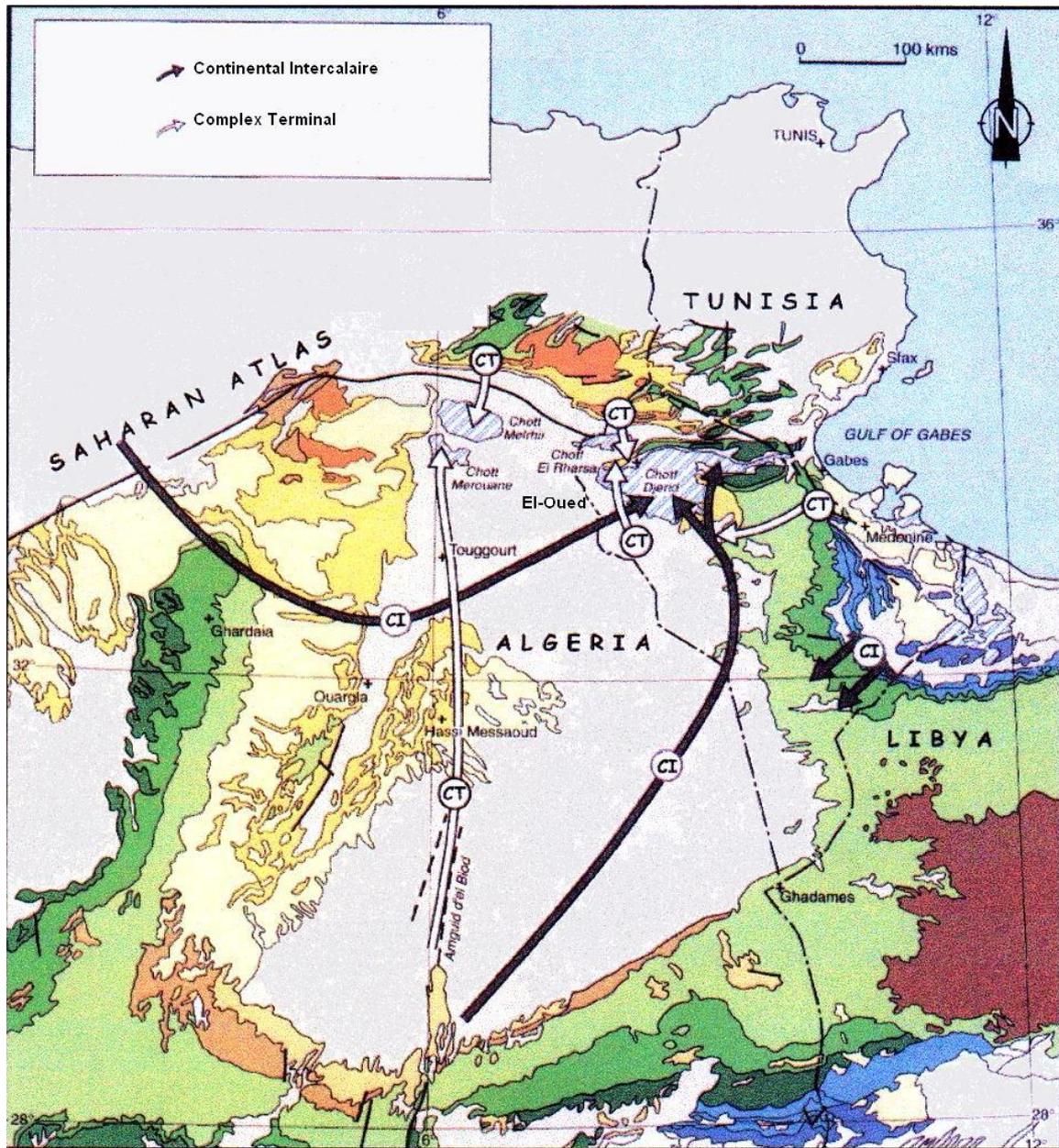


Fig. II.4 Carte géologie avec le sens d'écoulement des aquifères CT et CI (UNESCO,1972)

II.5. ETUDE PIEZOMETRIQUE :

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.

II.5.1. 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.

• **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 :

$$V = K \times i \dots\dots(1)$$

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.

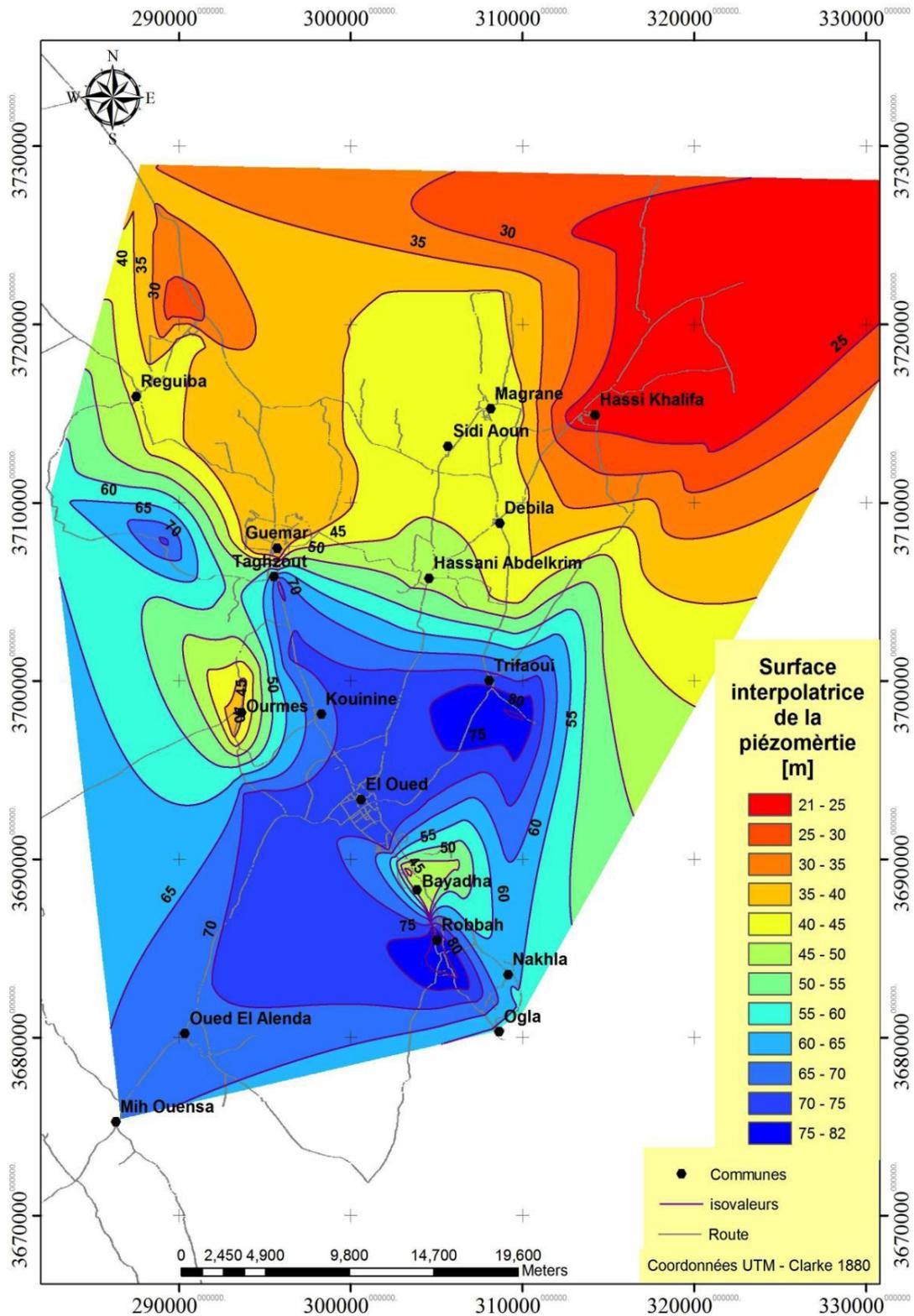


Fig. II. 5 : Carte piézométrique de la nappe CT de la vallée du Souf en 2011 (Khechana, 2014)

II.6. CARACTERISATION HYDRODYNAMIQUE DE LA NAPPE DU COMPLEXE TERMINAL :

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

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.

II.6.1. Essais des pompages :

Des essais de pompage par paliers et de longue durée ont été réalisés sur un site réparti dans la zone d'étude de la vallée d'Oued- Souf, à Guemar (F 4- EL-Houd).

L'essai par paliers est composé de quatre paliers de 6 heures chacun à débit constant, séparés par un intervalle d'au moins 12 heures. Quant à l'essai de longue durée, il 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, le coefficient de perméabilité, le coefficient de perméabilité verticale et la porosité efficace.

L'interprétation des pompages d'essais repose sur des méthodes d'approximation graphique.

II.6.2. Interprétation des données des essais du pompage à longue durée :

II.6.2.1. Forage F4 (El-Houd-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 au coordonnées Lambert (X=881,700 m, Y = 327,900 m) de 363 m de profondeur.

L'essai qui a été réalisé a duré 72 heures pour la descente et avec un débit constant de 45 l/s.

Tab. II. 3 : Calcul de débit spécifique, valeurs débits /rabattements 87 (El-Houd)

Palier	Niveau dynamique (m)	Rabattement Δs (m)	Débit (l/s)
1	27.28	03.32	20
2	29.75	05.79	30
3	32.20	08.24	40
4	33.45	09.49	45

a. Débits spécifiques :

Après l'utilisation du logiciel (Aquifer Test), le débit spécifique est déterminé à partir de la droite débits- rabattement à un temps de 360 minutes (6h). Les rabattements correspondant aux différents paliers sont respectivement : 3.32m, 05.79 m, 8.24m et 9.49m (Tableau II. 3).

$$Q = \frac{Q}{\Delta s} \dots\dots\dots(II-1)$$

Avec :

q : Débits spécifiques (m²/s) ;

Q : Débit (m³/s) ;

Δs : rabattement (m).

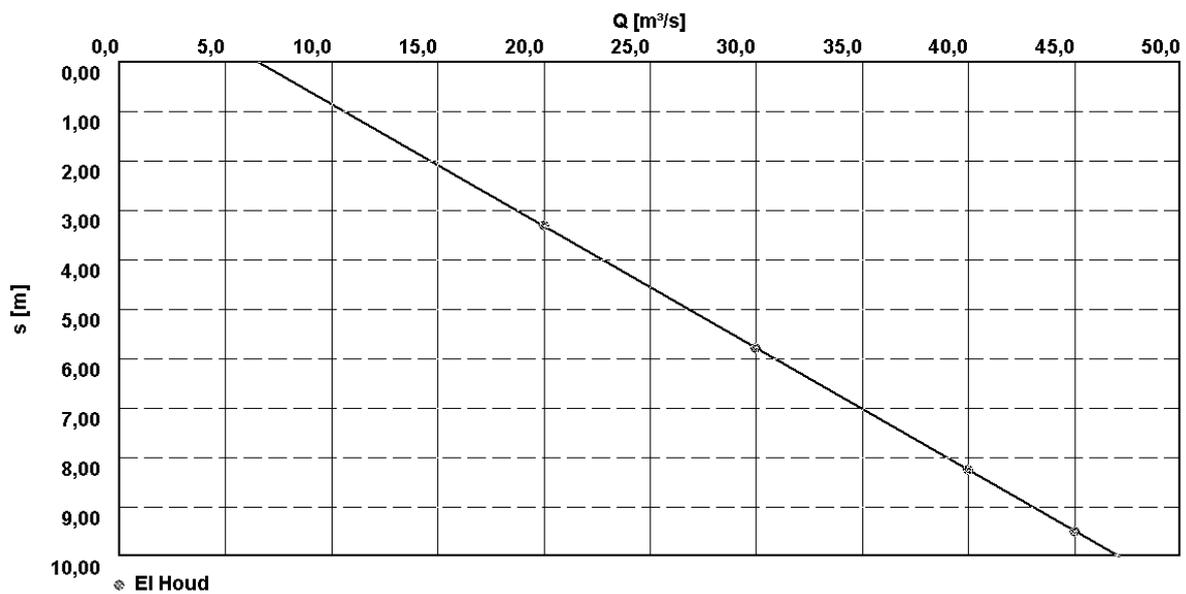


Fig. II. 6: Courbe débit / Rabattement à F 87 (El-Houd) (Khechana,2014)

Donc: Le débit spécifique est 4.05×10^{-3} m²/s.

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 m² et le m³, 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 caractéristiques du fluide (viscosité, donc température, et masse volumique). Le coefficient de perméabilité d'un sol est un coefficient important dépendant de :

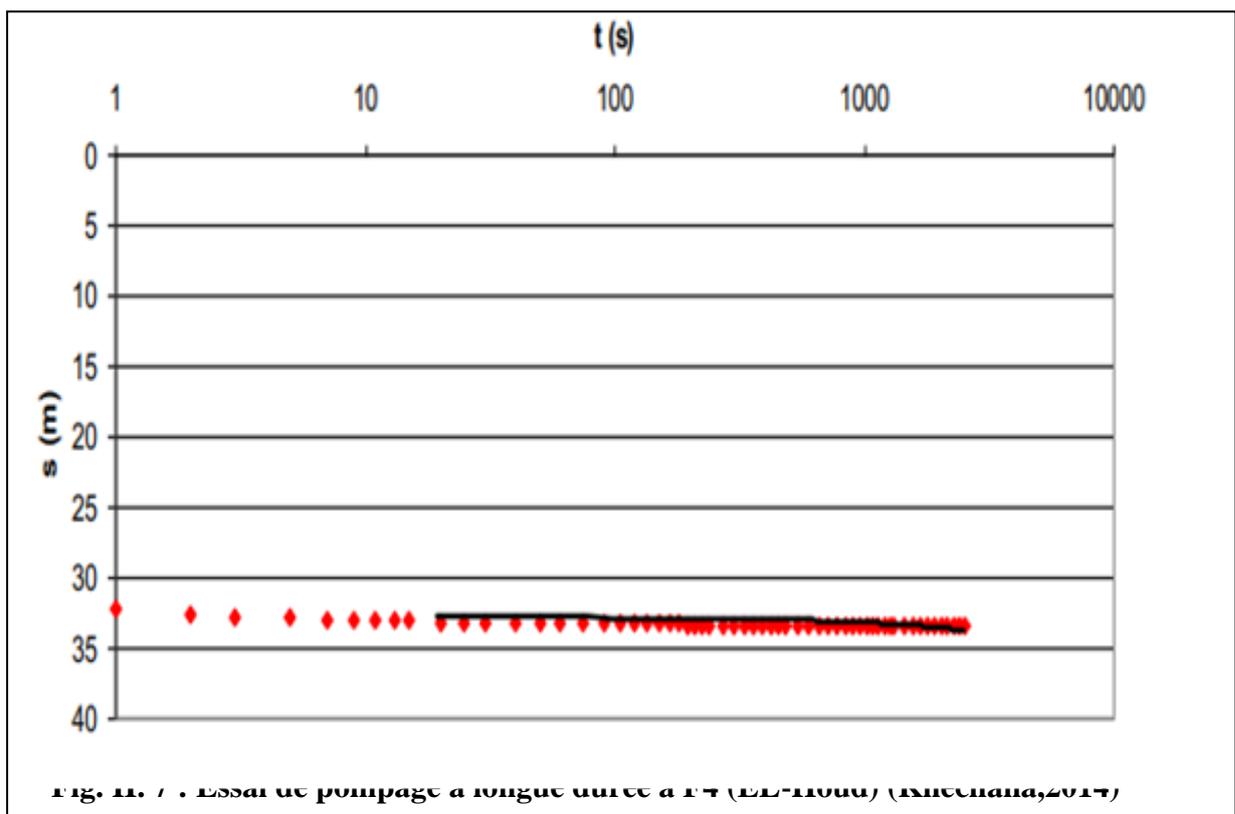
- La granulométrie du sol.
- La nature du sol.
- Les caractéristiques physiques du liquide, viscosité (eau).
- Degré de consolidation du sol.

D'après les calculs, le coefficient de la perméabilité K est : 4.73×10^{-4} m/s.

c. Calcul du coefficient d'emmagasinement :

La storativité S d'un aquifère, ou coefficient d'emmagasinement, est le volume d'eau libérée ou stockée 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



Donc: La transmissivité est 3.12×10^{-3} m²/s.

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).

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.

$$T = \frac{0.183 Q}{C} \dots\dots\dots(\text{II-2})$$

T : La transmissivité en (m^2/s).

Q : Le débit (longue durée) en (m^3/s).

C : La pente moyenne (‰).

- **Par la méthode de Théis :**

L'équation de la remontée, après arrêt du pompage est la suivante :

$$R = \frac{Q}{4\pi T} \log \left(\frac{t+t'}{t'} \right) \Rightarrow R = \frac{Q}{4\pi s} \log \left(1 + \frac{t}{t'} \right) \dots\dots\dots(\text{II-3})$$

T : La transmissivité en (m^2/s).

Q : Le débit (longue durée) en (m^3/s).

R : Le rabattement (moyen) en tout point, à partir de l'arrêt du pompage en (m).

t : Le temps écoulé depuis le début du pompage en (s).

t' : Le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps de remontée) en (s).

E : L'épaisseur de l'aquifère (m).

Les transmissivités sont homogènes sur la même station 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 $3.12 \times 10^{-3} m^2/s$ à Guemar. La transmissivité est de $3.12 \times 10^{-3} m^2/s$. La perméabilité est de $4.73 \times 10^{-4} m/s$ est du même ordre que la perméabilité mesurée lors des essais d'infiltration ($1.6 \times 10^{-4} m/s$).

II.7. CONCLUSION :

Le système aquifère d'El-Oued est constitué de trois nappes : nappe libre (phréatique), et deux nappes captives (nappe de complexe terminal CT et nappe de continentale intercalaire CI).

L'étude hydrodynamique et les cartes piézométriques nous a permis de constater que le sens d'écoulement des eaux de la nappe du complexe terminal est orienté suivant une direction générale Sud-Ouest vers le Nord-Est de la région d'étude.

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.

L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui ont été effectués au niveau de station (El-Houd-commune de Guemar) nous a permis de constater que :

- Le débit soutiré oscille entre 20 l/s à 45 l/s
- Le débit spécifique est $4.05 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.
- La transmissivité est $3.12 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.
- La perméabilité est de $4.73 \times 10^{-4} \text{ m/s}$.

L'examen des coupes hydrogéologiques et l'interprétation des essais de pompage montrent bien la zone favorable à l'implantation des forages.

CHAPITRE III
Hydrochimie

III.1. Introduction :

La composition chimique d'une eau est importante dans la détermination de sa qualité, donc la possibilité de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou d'autres usages (irrigation, industrie...Etc.) et visualiser à l'aide de cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous.

Ce chapitre sera consacré à l'interprétation des analyses physico-chimiques d'échantillons d'eau que nous avons pris a (ADE) au niveau de la nappe CT du Souf, où nous avons sélectionné 45 points d'eau .

III.2. Paramètres physico-chimiques :

III.2.1. Qualités physiques :

a) La température:

Il est important de connaître la température de l'eau parce qu'elle joue un rôle dans la solubilité des sels, la mesure de la température s'effectue dans le terrain.

La température d'une eau potable devrait être inférieure en été et supérieure en hiver à la température de l'air, donc l'eau potable a une température 10 à 20°C, voir même 25°C mais l'eau de boisson à une bonne fraîcheur sa température varie entre 9 et 12°C.

L'OMS ne recommande aucune valeur. Pratiquement, la température de l'eau n'a pas d'incidence directe sur la santé de l'homme. Cependant, une température supérieure à 15°C favorise le développement des micro-organismes dans les canalisations en même temps qu'elle peut intensifier les odeurs et les saveurs par contre, une température inférieure à 10°C ralentit les réactions dans les différents traitements des eaux. (RODIER, 1984).

b) Le pH (Potentiel d'hydrogène) :

Dans la plupart des eaux naturelles, il dépend de l'équilibre carbonate-bicarbonate anhydrique carbonique. Il est inférieur ou supérieur à sept, suivant que l'eau est acide ou basique. Le pH est un élément important pour définir le caractère agressif ou incrustant d'une eau :

- Si le pH inférieur à 7 peut conduire à corrosion du ciment ou des métaux des canalisations avec entraînement de plomb par exemple.
- Si le pH élevé peut conduire à des dépôts incrustant dans les circuits de distribution, pour cela les normes préconisent un pH compris entre 6.5 et 8.5 (RODIER, 1984).

c) La conductivité électrique (CE):

Elle exprime la capacité de conduction de courant électrique d'une eau, toute eau est plus ou moins conductrice. Cette conductivité électrique est liée à la présence des ions dans l'eau, de ce fait il existe une relation entre la teneur des sels dissous d'une eau et sa conductivité.

La mesure de la conductivité électrique permet d'évaluer rapidement mais très approximativement la minéralisation globale de l'eau. C'est-à-dire la conductivité électrique constitue de ce fait un critère d'appréciation de la minéralisation.

Une conductivité électrique élevée traduit soit une température élevée, soit le plus souvent une salinité élevée comme elle peut conduire à un entartrage des conduites. Les normes fixent la conductivité électrique entre 200 et 1000 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (RODIER, 1984 ; DENTELLE, 2001).

III.3..Les éléments chimiques :

III.3.1.Les Cations :

Les cations analysés sont le calcium, le magnésium, le sodium et le potassium.

a) Le Calcium (Ca^{+2}):

Le calcium est un métal alcalino-terreux, extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates.

Composant majeure de la dureté de l'eau, le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Il existe surtout à l'état d'hydrogénocarbonates et en quantité moindre, sous forme de sulfate, chlorure, etc.

Le calcium est composant essentiel pour les os du corps humain. Il aide aussi le fonctionnement des nerfs et des muscles. Le manque de calcium est l'un des principales causes de l'ostéoporose.

L'ostéoporose est une maladie dont les sujets ont des os extrêmement poreux, sont sujets à des facteurs qui guérissent lentement. Elle touche essentiellement les femmes après la ménopause et conduit souvent à une courbure de la colonne vertébrale et à un tassement des vertèbres de la colonne.

Les eaux potables de bonne qualité renferment de 100 à 140 mg/l de calcium, les eaux qui dépassent 200 mg/l de calcium présentent de nombreux inconvénients pour les usages domestiques et pour l'alimentation chaudières (l'installation de chauffage) (RODIER, 1984).

b) Le Magnésium (Mg^{+2}) :

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature, il constitue 2.1% de l'écorce terrestre, son abondance géologique, sa grande solubilités, sa large utilisation industrielle (réducteur chimique, batteries sèches...) font que les teneurs dans l'eau peuvent être importantes. Le magnésium est par ordre d'importance le deuxième cation contenu dans les cellules après le potassium, il joue le rôle de stabilisateur de la membrane cellulaire en protégeant la cellule contre une rétention de sodium.

Le magnésium est un élément indispensable pour la croissance ; il intervient comme élément

plastique dans l'os et plus de 50% du magnésium de l'organisme appartient au squelette.

Il constitue un élément activateur pour les systèmes enzymatiques, (phosphatase, catalase) pour la synthèse des protéines et pour le métabolisme des lipides. L'insuffisance magnésique entraîne des troubles neuromusculaires, l'intérêt du magnésium dans thérapeutique de la spasmophilie est bien connu.

A partir d'une concentration de 100 mg/l et pour des sujets sensibles, le magnésium donne un goût désagréable à l'eau, s'ils ne provoquent pas des phénomènes toxiques, les sels de magnésium et surtout les sulfates ont un effet laxatif à partir de 400 à 500 mg/l (taux de magnésium dans l'eau doit se faire en liaison avec les sulfates).

Elément essentiel de la nutrition chez l'homme et l'animale, la concentration maximale admissible est 50 mg/l (RODIER, 1984).

c) Le potassium (K^+) :

La teneur en potassium soit presque aussi important que celle du sodium, sa présence à peu près constante dans les eaux naturelles ne dépasse pas habituellement 10 à 15 mg/l. La concentration maximale admissible de 12 mg/l (selon les normes l'OMS).

Le potassium à faibles doses ne présente pas de risque significatif. Mais il est à signaler que l'excès du potassium dans le corps humain provoque une hyperkaliémie. Ses symptômes sont principalement une défaillance du cœur et du système nerveux central qui finit par un arrêt cardiaque.

Le potassium joue un rôle dans l'osmolarité des cellules et dans la transmission de l'influx nerveux. Des concentrations sensiblement plus élevées que la norme peuvent être acceptées car cet élément sous contrôle de l'hémostasie, même des variations important de la teneur de l'eau n'auraient que des effets négligeables sur la concentration de l'organisme et son excès est éliminé par transpiration, par les urines et par les selles. (RODIER, 1984).

d) Le Sodium (Na^+) :

Le Sodium est un élément dont la concentration dans l'eau varie d'une région du globe à une autre. Le sodium dans l'eau provient des formations géologiques. Il est nécessaire à l'homme pour maintenir l'équilibre hydrique de l'organisme. Le sodium est aussi nécessaire pour le fonctionnement des muscles et des nerfs. Mais trop de sodium peut augmenter le risque d'hypertension artérielle. Pour les doses admissibles de sodium dans l'eau, il n'a pas de valeur limite standard, cependant les eaux trop chargées en sodium devient saumâtre prennent un goût désagréables. (RODIER, 1984).

III.3.2. Les Anions :

Le anions analysés sont les chlorures, les sulfates et les bicarbonates.

a) Les Chlorures (Cl^-) :

Les teneurs en chlorures dans l'eau sont extrêmement variées et liées principalement à la nature des terrains traversés. Une surcharge en chlorure dans l'eau peut être à l'origine d'une saveur désagréable, surtout lorsqu'il s'agit de chlorure de sodium et considère comme un gros inconvénient.

Les chlorures ne présentent pas de risque sur la santé, sauf pour les personnes devant suivre un régime hyposodé. Cependant, les chlorures sont susceptibles d'amener une corrosion dans les canalisations et les réservoirs, en particulier les éléments en acier inoxydable pour lesquels le risque s'accroît à partir de 50 mg/l.

La norme d'OMS recommande que la teneur en chlorure (Cl^-) des eaux ne dépasse pas 250 mg/l. (RODIER, 1984 et al ; BOUZIANI, 2000).

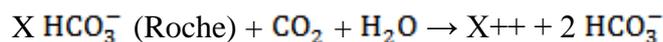
b) Les Sulfates (SO_4^{2-}):

La concentration en ion sulfate des eaux naturelles est variables, leur présence résulte de légère dissolution des sulfates de calcium des roches gypseuses, de l'oxydation des sulfures dans les roches (pyrites), des matières organiques par l'origine animale.

La teneur en sulfates des eaux doit être reliée aux éléments alcalins et alcalino-terreux de la minéralisation suivant ceux-ci, et selon l'intolérance des consommateurs, l'excès de sulfate dans l'eau peut entraîner des troubles gastro-intestinaux en particulier chez l'enfant. La propriété principale des sulfates sur la santé est une action laxative est plus importante en présence de magnésium et de sodium, utilisées d'ailleurs dans le thermalisme. Les concentrations maximales admissibles en sulfates sont de l'ordre de 400mg/l selon la norme d'OMS ; (RODIER, 1984).

c) Les Bicarbonates (HCO_3^-) :

Les bicarbonates sont le résultat de l'équilibre physicochimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique, selon l'équation générale suivante :



La concentration des bicarbonates dans l'eau est fonction des paramètres suivants :

- Température de l'eau,
- Tension du CO_2 dissous,
- Concentration de l'eau en sels et nature lithologique des terrains traversés.

Tab.III.1: Résultats des analyses physico-chimiques des eaux du CT (Nov 2018).

Nom	T °C	pH	CE (ms/cm)	Ca ⁺² (mg/l)	Mg ⁺² (mg/l)	Na ⁺ (mg/l)	K ⁺ (mg/l)	HCO ₃ ⁻ (mg/l)	Cl ⁻ (mg/l)	So ₄ ⁻² (mg/l)
CH1	21,1	7,48	4390	292,584	106,912	415	36	196,42	801,237	789,741
CH2	21,2	7,4	4330	284,568	99,65	450	32	204,96	943,049	616,091
CH3	21,3	7,32	4530	260,52	162,843	430	31	176,9	914,687	822,44
CH4	21,3	7,4	4370	296,592	70,484	405	25	179,34	801,237	695,517
CH5	21,1	7,63	4350	304,608	162,843	137	32	193,98	787,056	997,411
CH6	21,2	7,6	4300	260,52	160,413	420	37	204,96	815,419	897,141
CH7	21,3	7,66	4350	268,536	153,121	415	32	179,34	843,781	347,113
CH8	21,4	7,56	4470	272,544	165,274	420	37	174,46	914,687	833,96
CH9	26,6	7,33	4500	268,536	131,247	360	32	207,4	815,419	702,261
CH10	25,8	7,31	4730	272,544	155,552	340	37	190,32	772,875	821,225
CH11	27	7,32	5100	284,568	133,677	385	30	163,48	985,593	590,247
CH12	27,2	7,23	4320	268,536	153,121	420	41	159,82	843,781	893,35
CH13	24,4	7,32	4440	288,576	165,274	415	32	203	815,419	984,501
CH14	24,8	7,75	4370	364,728	119,094	475	32	196,42	985,593	912,807
CH15	26,6	7,36	4380	300,6	140,969	390	32	170,34	787,06	923,191
CH16	26,9	7,34	4340	324,648	94,789	370	37	168,36	744,513	828,854
CH17	24	7,42	3560	284,568	126,386	400	37	213,58	928,868	616,593
CH18	25,3	7,32	3670	316,632	80,206	405	32	213,5	1028,157	462,615
CH19	25,9	7,43	3800	276,552	116,664	410	37,5	202,52	999,774	510,592
CH20	25,3	7,26	3640	280,56	126,386	385	37,5	189,1	886,325	673,58

III.4.2. Digramme de Schoeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet la représentation de plusieurs analyses sur le même graphique. Si les concentrations sont identiques, on trouve une superposition des droites obtenues et dans le cas contraire, on remarque un décalage relatif des droites les unes au-dessus des autres.

D'après la figure III.2 (a et b) on constate toujours l'existence d'une même famille d'eau qui est celle des eaux sulfatées, avec la prédominance du faciès sulfaté sodique.

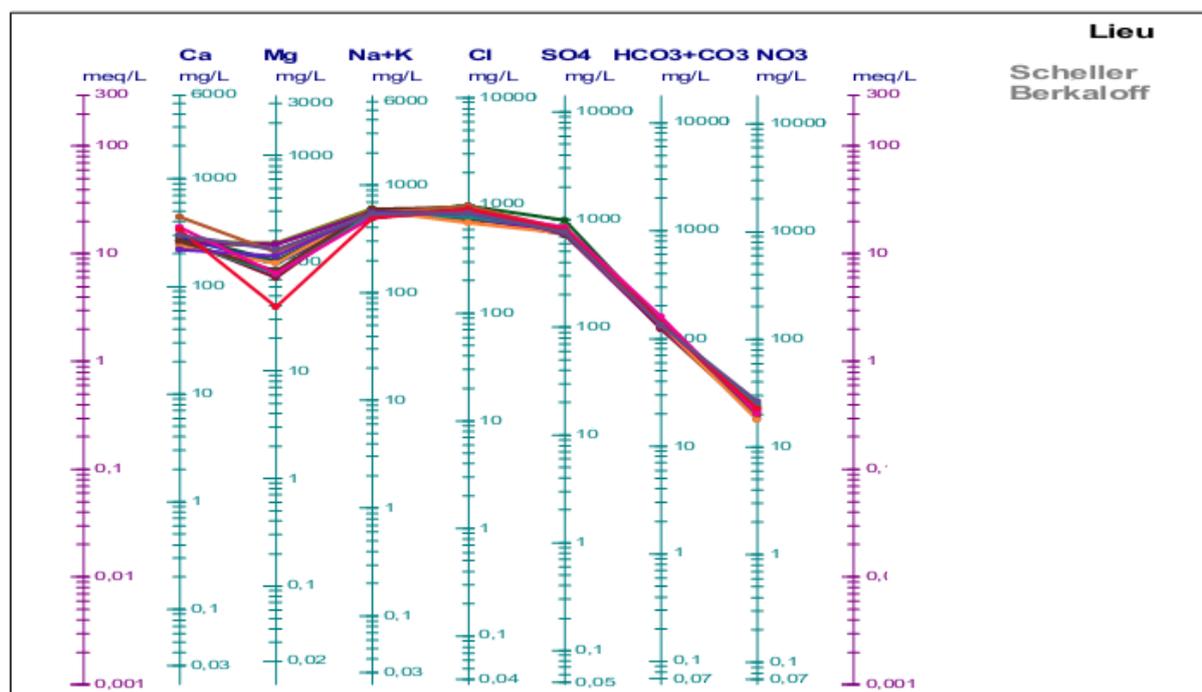


Fig.III.2: Diagramme de Schoeller Berkaloff des eaux de la nappe du CT

(Région d'El Oued, novembre 2018)

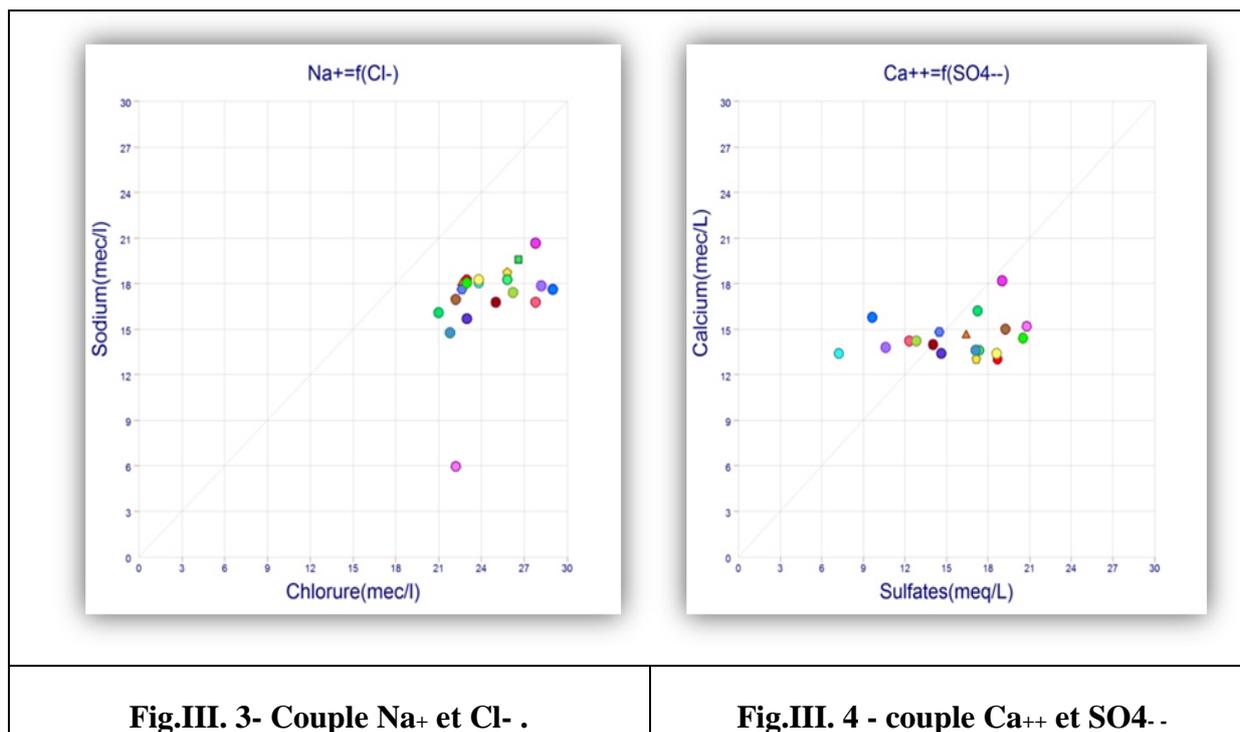
III.5. Etude des rapports caractéristiques et origine des éléments

dominants:

III.5.1. Origine des éléments Na^+ et Cl^- :

Pour avoir une idée sur les éléments dominants, nous avons fait une représentation graphique sur une échelle arithmétique, avec en abscisses la teneur exprimée en milliéquivalents des chlorures, et en ordonnées celle du sodium.

L'examen de la Fig.III.03.a permis de remarquer que la majorité des points d'eau se trouve au-dessous de la droite d'une pente égale à 1. Dans ce cas, ce sont les chlorures qui l'emportent sur le sodium à cause d'un excès de dissolution de cet élément due à l'écoulement souterraine importante et à la température élevée des ces eaux.

Fig.III. 3- Couple Na⁺ et Cl⁻.Fig.III. 4 - couple Ca⁺⁺ et SO₄⁻.

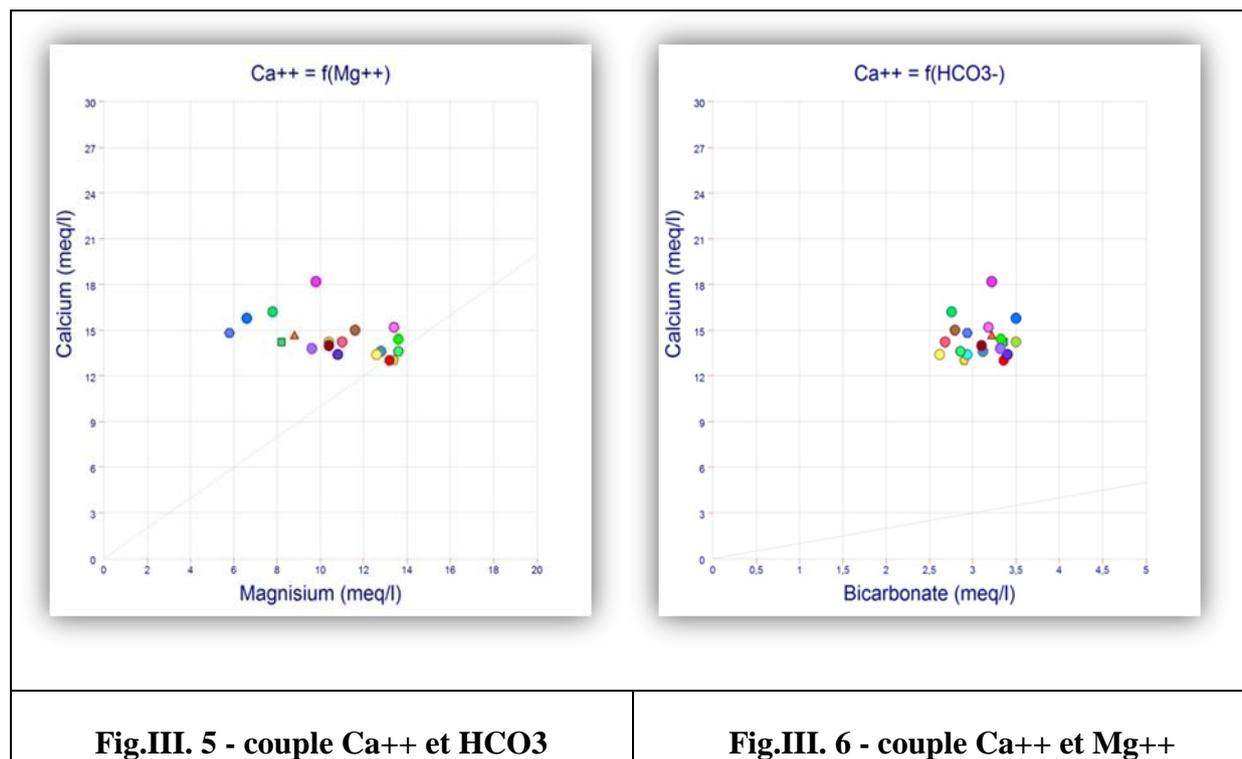
III.5.2. Origine du calcium :

Le faciès calcique a été étudié à l'aide de deux diagrammes, à cause de sa double origine : carbonatée et évaporitique. Fig.III.04 et Fig.III.05 montrent que l'ensemble des points se trouve dans le domaine évaporitique, ce qui vérifie que l'élément **Ca⁺²** provient de la dissolution des calcaires fissurés et des évaporites d'âge Sénonien.

III.5.3. Le rapport Ca⁺²/Mg⁺² :

Fig.III.06 montre l'existence de deux ensembles de points :

Un ensemble où le rapport est supérieur à 1, donc le calcium prédomine, c'est le cas de la plupart des points d'eau analysés, cela est dû à la dissolution des formations gypseuses. Un ensemble où le rapport est inférieur à 1, le magnésium prédomine, il concerne quelques échantillons analysés. Le faciès magnésien indique la présence d'argiles ou de dolomies riches en magnésium.



III.6. 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 :

III.6.1. Selon l'O.M.S :

Ces normes définissent deux types de concentrations maximales (Tableau III.01) 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.

Tab.III.2 - Normes de potabilité de l'O.M.S

Eléments Chimiques	Concentration maximale acceptable (mg/l)	Concentration maximale admissible (mg/l)	Pourcentage des échantillons 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.01 montre que tous les échantillons analysés ont des teneurs en So_4^{-2} , Ca^{+2} , Na^+ 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 toutes inférieures aux normes maximales admissibles.

En résumé que d'après les analyses physicochimiques réalisées au laboratoire de l'ADE d'El Oued en novembre 2018 pour les 45 forages de la nappe du Complexe Terminal alimentant la ville d'Oued Souf.

On constate ce qui suit :

- ✓ La température varie entre 11.5°C et 27.4°C Elle est 33% dépassant la norme (20°C-25°C).
- ✓ 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 forages ont des teneurs conformes à la norme.
- ✓ Les concentrations en chlorure (Cl^-) dans les forages varient entre 522.8mg/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 En ce qui concerne le sodium (Na^+), les concentrations oscillent entre 272.7 et 475 mg/l dépassent la norme (200 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.

III.6.2. 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.

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

Le Tableau III.02 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.

Tableau.III.3 - Dureté des eaux en °F (W. THEOBALD et A. GAMA, 1969)

D.H.T (en °F)	0 -7	7 – 22	22 – 32	32 - 54	> 54
Qualification de l'eau	Douce	Modérément Douce	Assez Douce	Dure	Très dure
Pourcentage des Points	0	0	0	0	100

Nous pouvons dire sans doute que les eaux souterraines de la nappe complexe terminal d'El Oued sont de qualité chimique médiocre à mauvaise et donc impropre à la consommation selon le degré hydrométrique total (D.H.T).

III.7. 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.

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

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.

Pour classer ces eaux, nous avons utilisé la méthode de Richards. Le **Tab.III.03** récapitule les résultats obtenus après l'interprétation du diagramme de Richards (Fig.IV.5).

Tab.III.4: Résultats obtenus après interprétation du diagramme de Richards.

CLASSES		% DES POINTS D'EAU
Admissible	S ₁ C ₃	00
	S ₂ C ₃	00
Médiocre	S ₁ C ₄	00
	S ₂ C ₄	00
Mauvaise	S ₂ C ₄	82.35
Très mauvaise	S ₃ C ₄	17.64

Les eaux de la région d'étude appartiennent à deux classes selon le diagramme de Richards:

- La classe **S₂ C₄** avec un pourcentage de 38,46%. Celle-ci est caractérisée par des eaux de mauvaise qualité. L'eau est fortement minéralisée pouvant convenir à l'irrigation de certaines espèces (concombre) bien tolérantes au sel, sur des sols bien drainés et lessivés.
- La classe **S₃ C₄** avec un pourcentage de 61,54, caractérisée par des eaux de très mauvaise qualité, parce que le SAR et la conductivité sont à leur maximum.

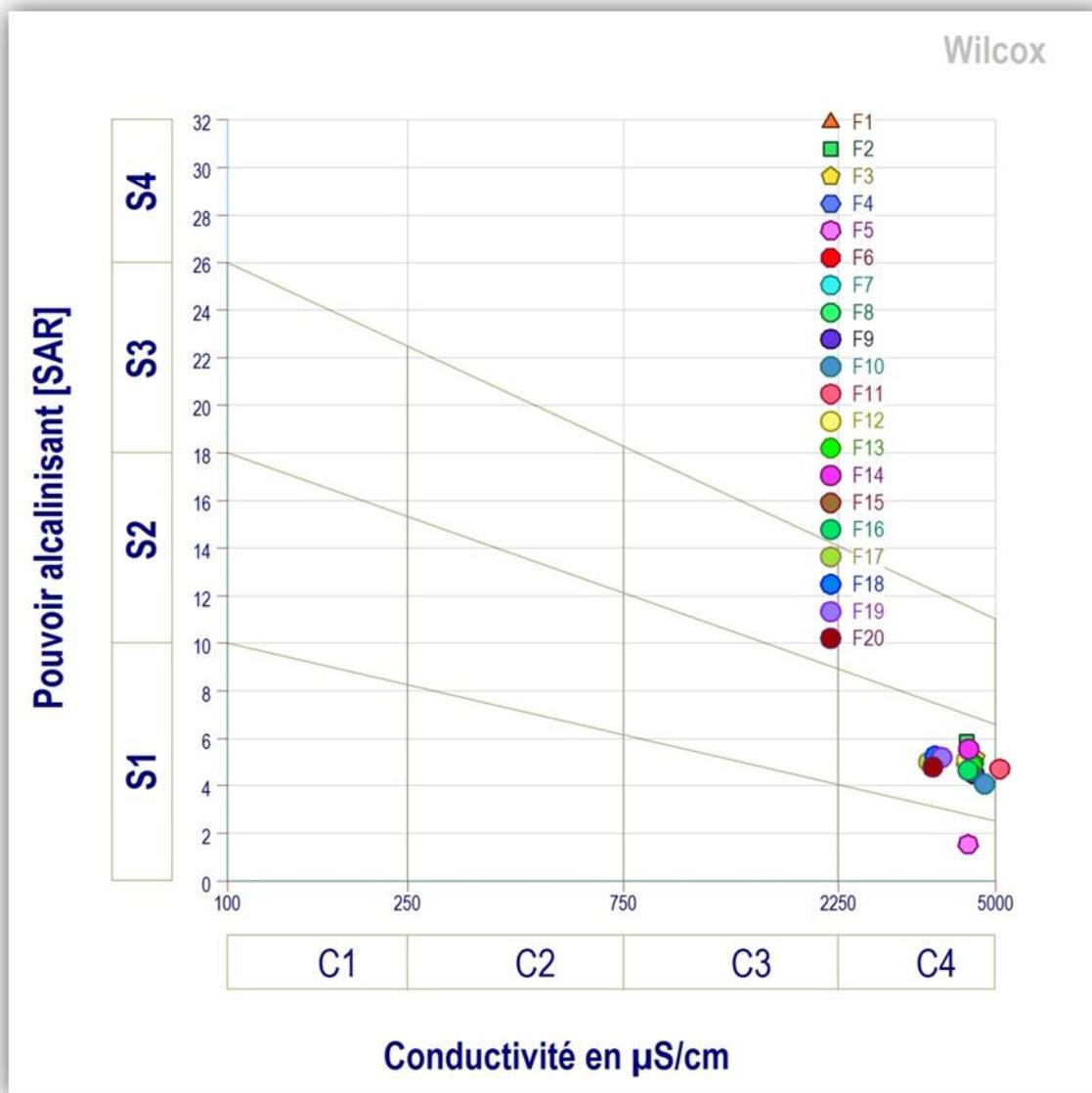


Fig. III.7 : Diagramme de Richards: classification des eaux d’irrigation en fonction du S.A.R (nappe du CT de la région d’El Oued, novembre 2018).

III.8. CONCLUSION:

L'étude hydro-chimique de la région montre la prédominance des éléments chimiques (Na^{+2} 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 CT, du point de vue 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.

La classification des eaux du CT selon le diagramme de Richards montre qu'elles ont des conductivités très fortes et sont impropres pour les utilisations agricoles.

Dans le chapitre suivant, le chapitre quatre, nous intéressons à l'élaboration de la carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux souterraines, par la méthode AHP.

Chapitre IV

La carte de vulnérabilité

IV.1. Introduction :

Au cours des dernières années en Algérie, notamment dans la Wilayat 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 feuille de route pour élaborer une carte de vulnérabilité à la pollution, qui exposera les zones les plus vulnérables à ce phénomène et qui nécessitera une intervention gouvernementale optimale.

L'étude de la vulnérabilité est réalisée selon une méthode d'analyse multicritères, la méthode d'analyse hiérarchique des processus (AHP), c'est une méthode de prise de décision multicritères, qui prend en compte plusieurs critères pour prendre la meilleure décision.

Critères d'élaboration d'une carte d'exposition à la pollution: les paramètres physico-chimique (la concentration ionique de potassium k^+ , sodium Na^+ , magnésium Mg^{2+} , bicarbonate HCO_3^- , calcium Ca^{2+} , chlorures Cl^- , sulfate SO_4^{2-} / potentiel hydrogène Ph, conductivité et température).

IV.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).

Les méthodes les plus connues, sont:

- WSM (méthode des sommes pondérées, *Weight Sum Method*).
- WPM (méthode des produits pondérés, *Weight Product Method*).
- AHP (analyse hiérarchique des procédés, *Analytic Hierarchy Process*).
- ELECTRE (ELimination Et Choix TRaduisant la REalité).

- PROMETHEE (méthode d'organisation des classements préférentiels pour les évaluations d'enrichissement, *Preference Ranking Organisation METHod for Enrichment Evaluations*).
- TOPSIS (technique pour la préférence d'ordre par similitude à la solution idéale, *Technic for Order Performance by Similarity to Ideal Solution*).

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.

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

IV.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.

IV.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).

IV.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 IV.1).

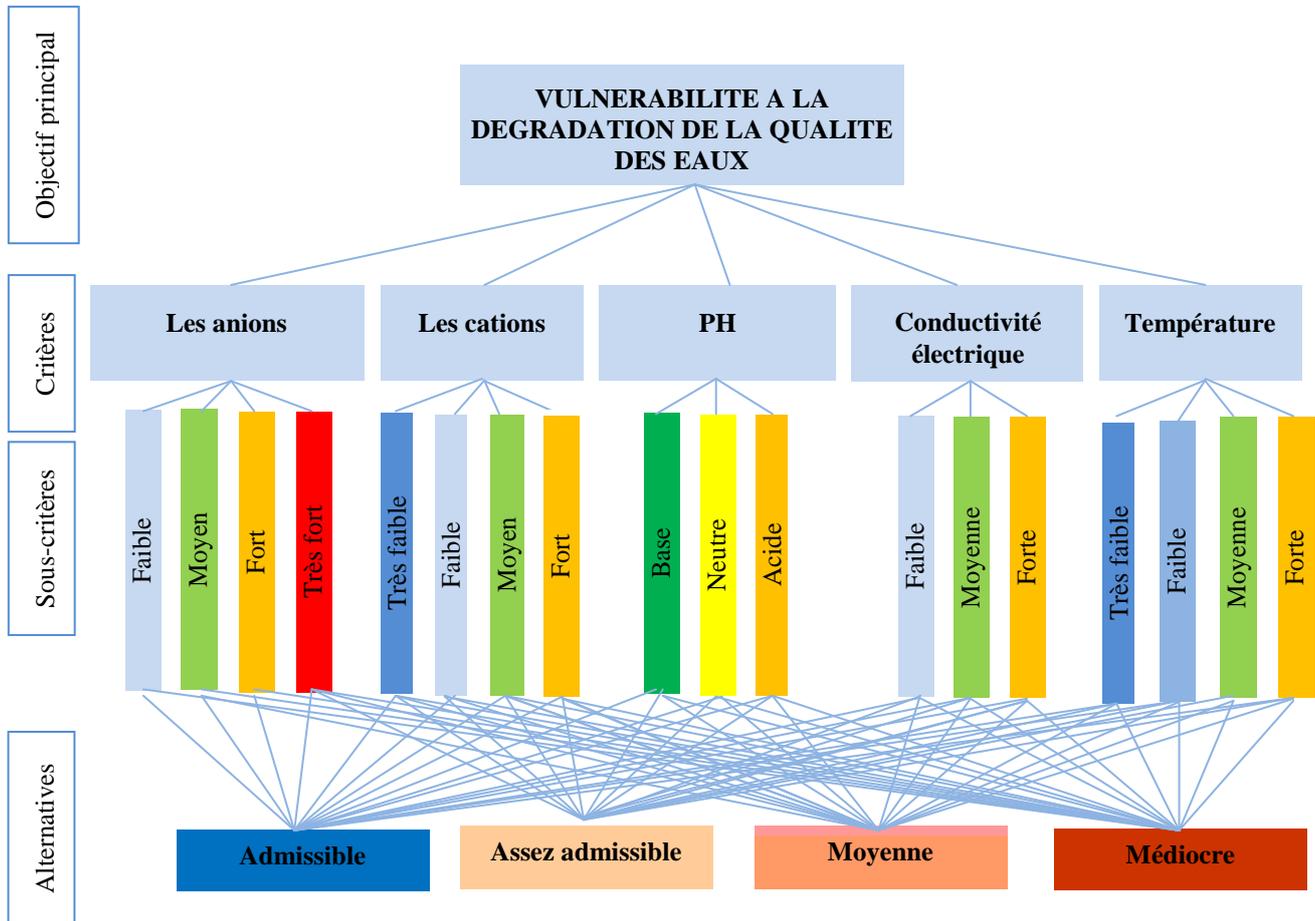


Fig IV.1: Structure hiérarchique de la vulnérabilité selon la méthode AHP

Fig IV.1: Structure hiérarchique de la vulnérabilité selon la méthode AHP

- **Phase 2:** Procéder à des comparaisons par paires, des éléments de chaque niveau hiérarchique, par rapport à un élément du niveau hiérarchique supérieur. Cette étape permet de construire des matrices de comparaisons. Les valeurs de ces matrices sont obtenues par la transformation des jugements en valeurs numériques selon l'échelle de Saaty (échelle de comparaisons binaires) (Tableau . IV.1), tout en respectant le principe de réciprocity (Équation . IV.1):

$$P_c(E_A, E_B) = \frac{1}{P_c(E_B, E_A)} \dots\dots\dots(IV-1)$$

- **Tab . IV.1: Échelle de Saaty.**

Jugement verbal	Evaluation numérique
Extrêmement plus important	9
	8
Très fortement plus important	7
	6
Fortement plus important	5
	4
Modérément plus important	3
	2
Importance égale	1

Source: Saaty, 1991.

- La réciprocité, veut dire que si l'élément A se voit attribué par l'un des chiffres du tableau IV.1, lorsqu'il est comparé à l'élément B, B aura donc la valeur inverse lorsqu'on le compare à A. À chaque nœud éclaté en n éléments, il faut réaliser $\frac{n(n-1)}{2}$ comparaisons par paire. Le tableau. IV.2, montre l'organisation hiérarchique adoptée des critères et sous-critères, ainsi que les rangs et les justifications de chaque sous-critère.

Tab . IV.2: Hiérarchie et rangs des critères et sous-critères de décision

Critères	Sous-critères	Rang	Justification
PH	Potentiel hydrogène	1	Faible (7-7,3)
		2	Moyen (7,4-7,5)
		3	Fort (7,6-7,7)
K+	Potassium	1	Faible (3,1-18,7mg)
		2	Moyen (18,8-43,3mg)
		3	Fort (34,4-49,9mg)
Na+	Sodium	1	Faible (272,7-323,3mg)
		2	Moyen (323,4-373,9mg)
		3	Fort (374-424,4mg)
		4	Très fort (424,5-475mg)
Mg+2	Magnésium	1	Faible (64,7-97,9mg)
		2	Moyen (98-131,1mg)
		3	Fort (131,2-146,3mg)
		4	Très fort (146,4-197,5mg)
HCO₃⁻	Bicarbonate	1	Faible (152-172,3mg)
		2	Moyen (172,4-192,6mg)
		3	Fort (192,7-213mg)
Ca+2	Calcium	1	Faible (212,4-269,2mg)
		2	Moyen (269,3-317mg)
		3	Fort (317,1-364,7mg)
Cl⁻	Chlorures	1	Faible (522,8-724mg mg)
		2	Moyen (724,1-925,3mg)
		3	Fort (925,4-1126,5mg)
So₄⁻²	Sulfate	1	Très faible (194,7-418,6mg)
		2	Faible (418,7-642,4mg)
		3	Moyen (642,5-866,2mg)
		4	Fort (>866,3mg)
Cond	Conductivité électrique	1	Faible (3403,2-3968,8us/cm)
		2	Moyenne (3968,9-4534,3us/cm)
		3	Forte (4534,4-5099,9us/cm
T	Température	1	Très faible (11,5-14,7C°)
		2	Faible (17,5-17,9C°)
		3	Moyenne (18-21C°)
		4	Forte (>21,1C°)

- **Phase 3:** Déterminer l'importance relative des éléments, en calculant les vecteurs propres correspondant aux valeurs propres maximales des matrices de comparaisons.

Les critères sont comparés sur une échelle allant de 1 à 9, comme le recommandent Saaty & Vargas (1991) ; où 1 implique qu'il n'y a pas de préférence entre les deux critères et 9 signifie qu'un facteur est extrêmement favorisé par rapport à un autre. Cela produit une matrice carrée dans laquelle les lignes et les colonnes sont les critères. Le tableau . IV.3, présente la matrice normalisée des critères, ainsi que le score d'évaluation global (C), attaché à chacune des solutions alternatives identifiées.

Tab . IV.3: Matrice normalisée des critères et le score d'évaluation

	PH	k+	Na+	Mg+2	Hco3-	Ca+2	Cl-	So4-2	Cond	T	∑ Rangs	[C]	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
PH	0,184211	0,184211	0,184211	0,184211	0,193548	0,193548	0,193548	0,142857	0,142857	0,142857	1,746059	0,174606	0,184004	1,053826
k+	0,184211	0,184211	0,184211	0,184211	0,193548	0,193548	0,193548	0,142857	0,142857	0,142857	1,746059	0,174606	0,184004	1,053826
Na+	0,184211	0,184211	0,184211	0,184211	0,193548	0,193548	0,193548	0,142857	0,142857	0,142857	1,746059	0,174606	0,184004	1,053826
Mg+2	0,184211	0,184211	0,184211	0,184211	0,193548	0,193548	0,193548	0,142857	0,142857	0,142857	1,746059	0,174606	0,184004	1,053826
Hco3-	0,061404	0,061404	0,061404	0,061404	0,064516	0,064516	0,064516	0,122449	0,122449	0,122449	0,806509	0,080651	0,065796	0,815817
Ca+2	0,061404	0,061404	0,061404	0,061404	0,064516	0,064516	0,064516	0,122449	0,122449	0,122449	0,806509	0,080651	0,065796	0,815817
Cl-	0,061404	0,061404	0,061404	0,061404	0,064516	0,064516	0,064516	0,122449	0,122449	0,122449	0,806509	0,080651	0,065796	0,815817
So4-2	0,026316	0,026316	0,026316	0,026316	0,010753	0,010753	0,010753	0,020408	0,020408	0,020408	0,198746	0,019875	0,022198	1,116906
Cond	0,026316	0,026316	0,026316	0,026316	0,010753	0,010753	0,010753	0,020408	0,020408	0,020408	0,198746	0,019875	0,022198	1,116906
T	0,026316	0,026316	0,026316	0,026316	0,010753	0,010753	0,010753	0,020408	0,020408	0,020408	0,198746	0,019875	0,022198	1,116906
<i>Somme</i>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	10	1		10,01347

Le vecteur [D] est le produit de la matrice normalisée avec le vecteur de priorité [C]. Le vecteur [E] sert pour le calcul de la cohérence des matrices, à travers le calcul de la valeur propre maximale (λ_{max}). Le tableau . IV.3, présente l'impact le plus élevé de la pollution (Ph . K+ . Mg+2 . Na+), ont le même poids (0.17), suivi par la (HCo3- . Ca+2 . Cl-) ont le même poids (0.080). suivi par (T . Cond . So4-2) présente le faible poids avec une valeur (0.019). Les figures . IV.2. IV.3 IV..4. IV.5. IV.6. IV.7 IV.8 IV.9. IV.10 et IV.11 présentent les classifications effectuées, sur les critères sélectionnés (PH. K+. Mg+2. Na+. HCo3-. Ca+2. Cl-. T. Cond. So4-2), suivant les alternatives du tableau . IV.2

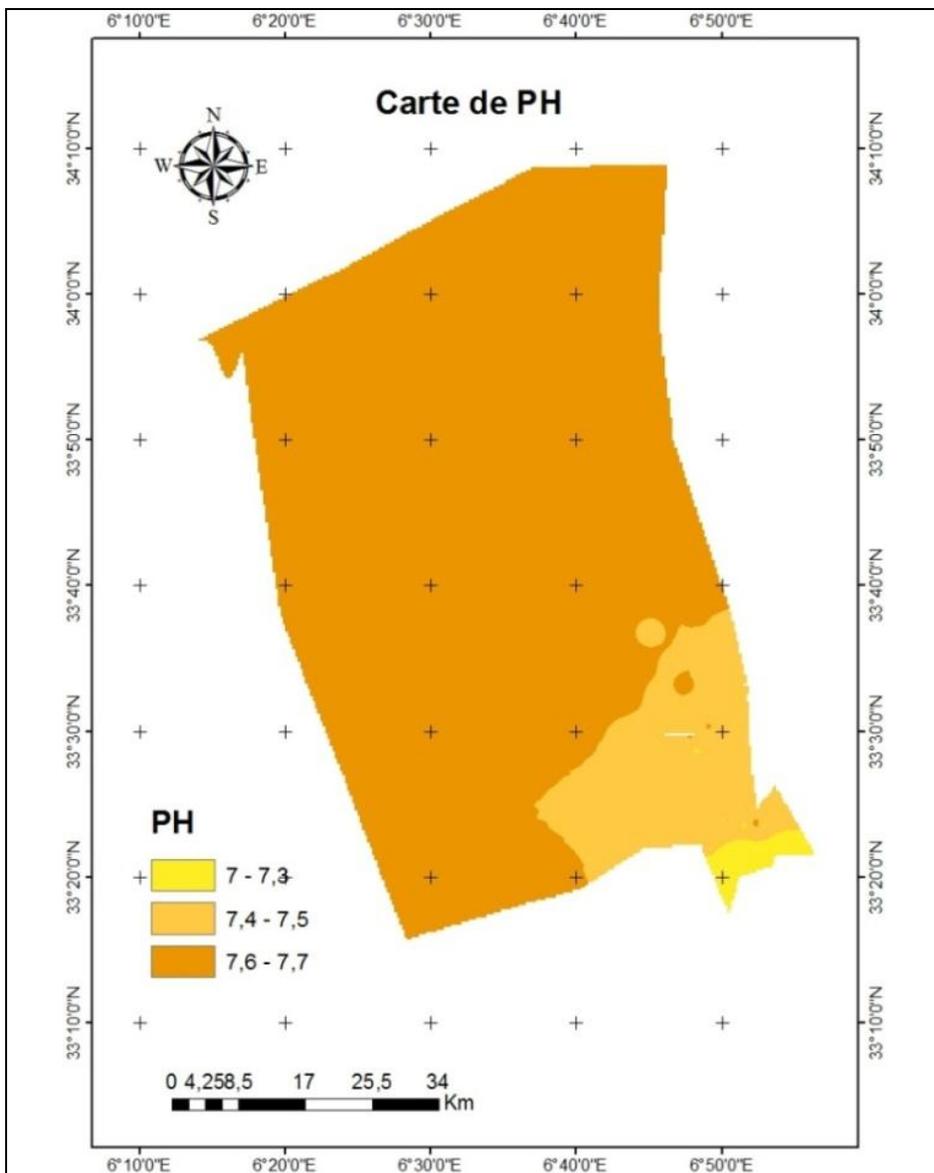


Fig. IV.2: Carte de PH

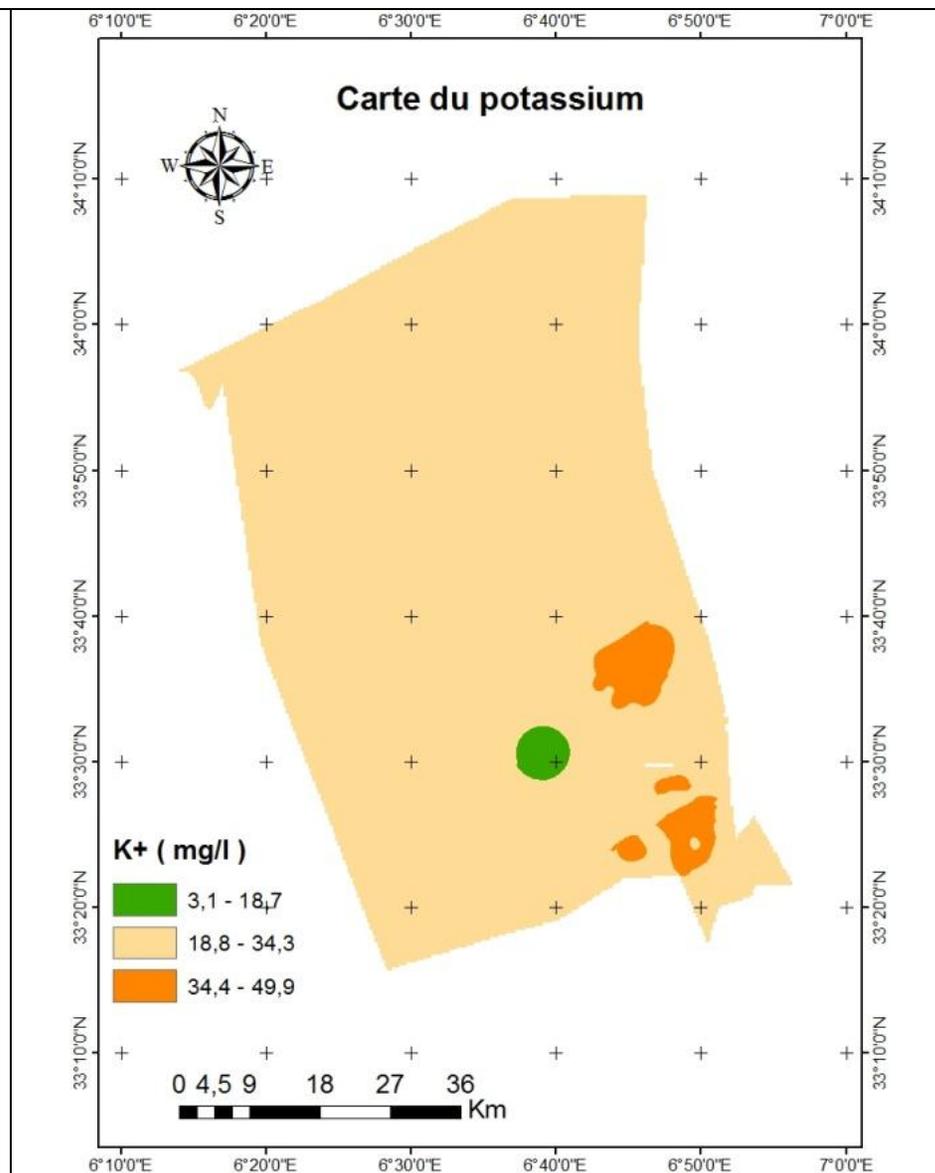


Fig. IV.3: Carte de potassium

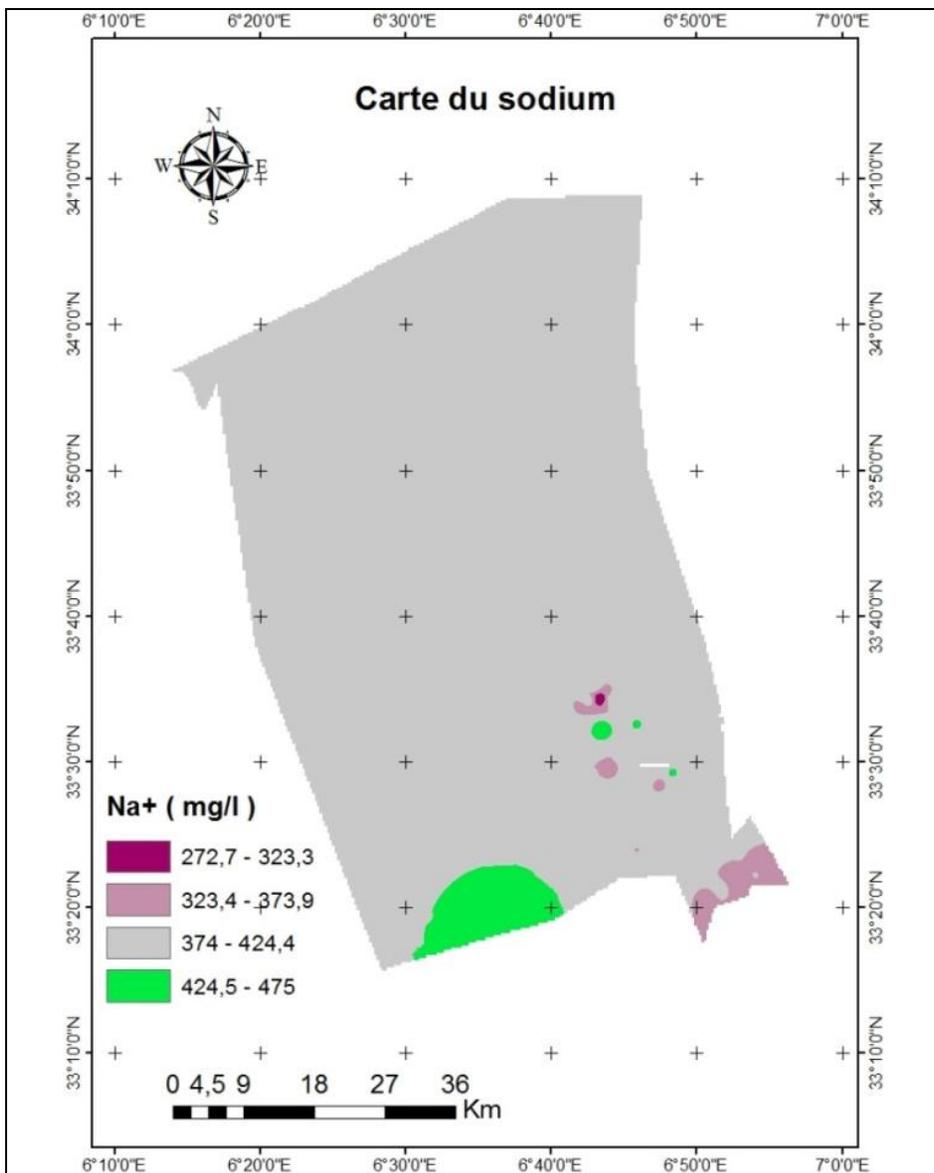


Fig. IV.4: Carte de sodium

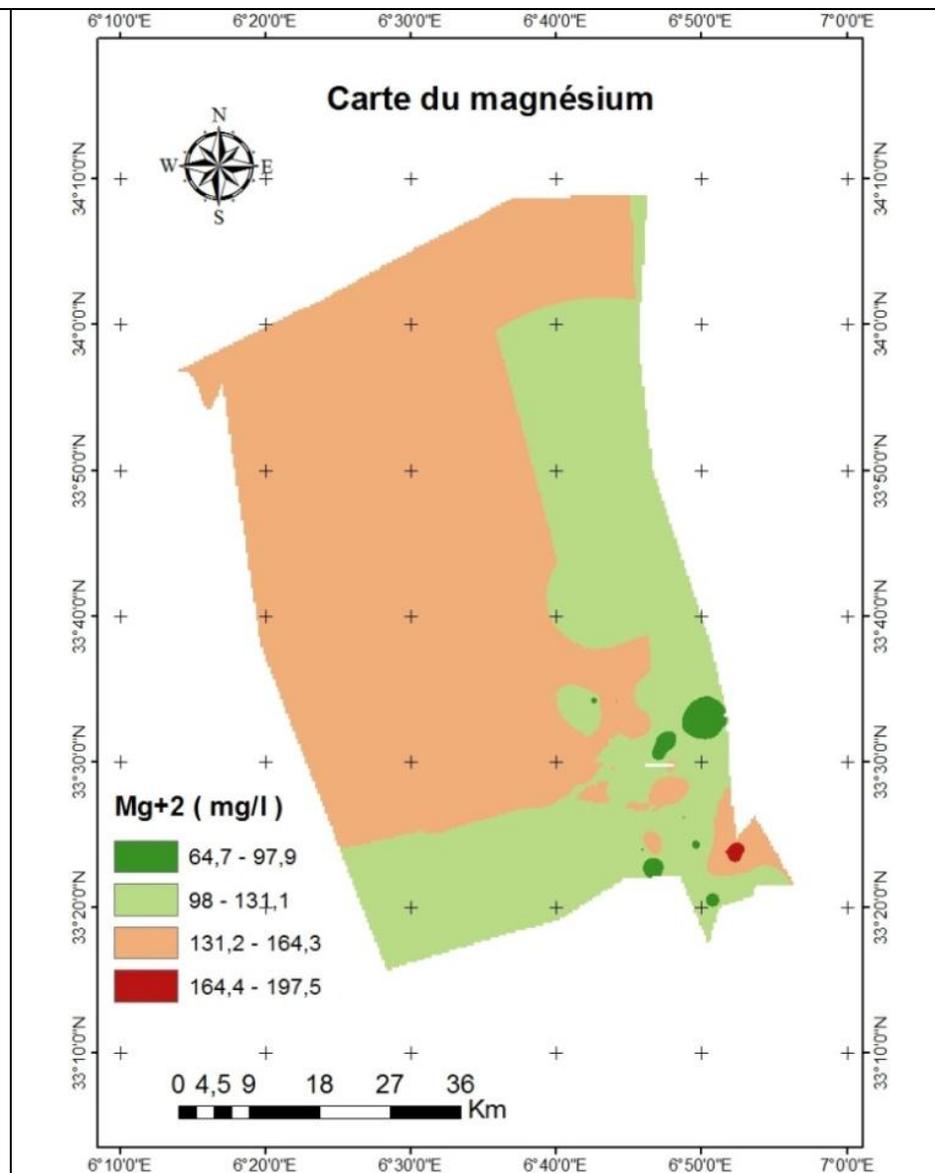


Fig. IV.5: Carte de magnésium

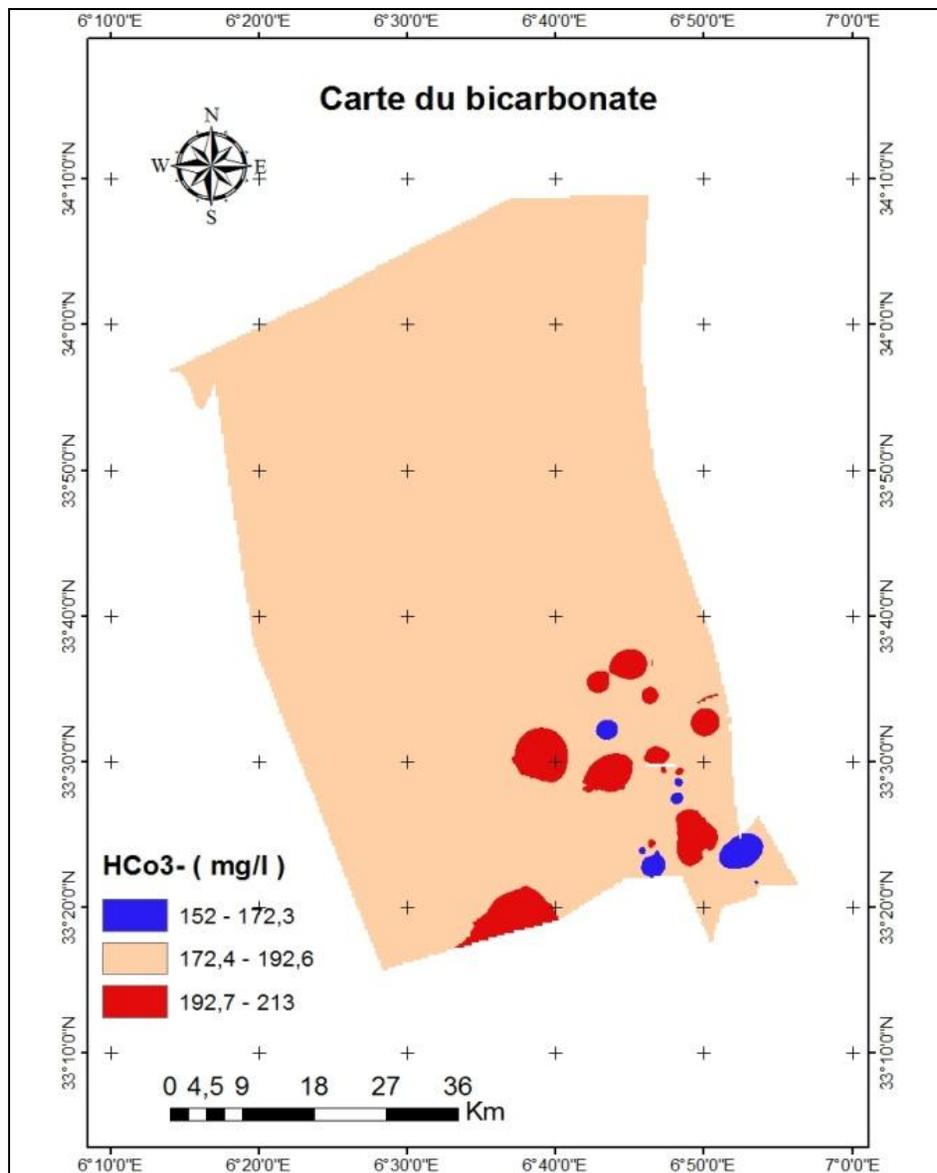


Fig. IV.6: Carte de bicarbonate

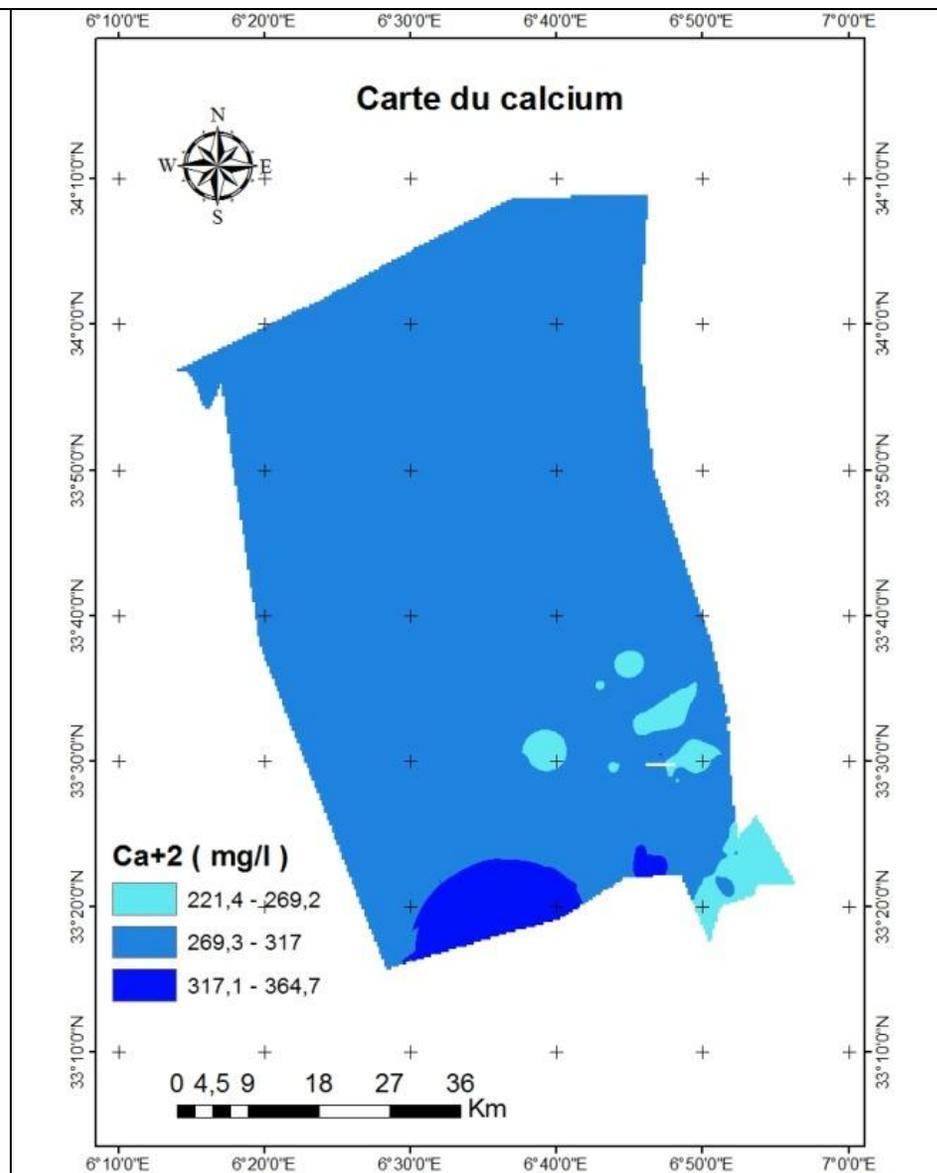


Fig. IV.7: Carte de calcium

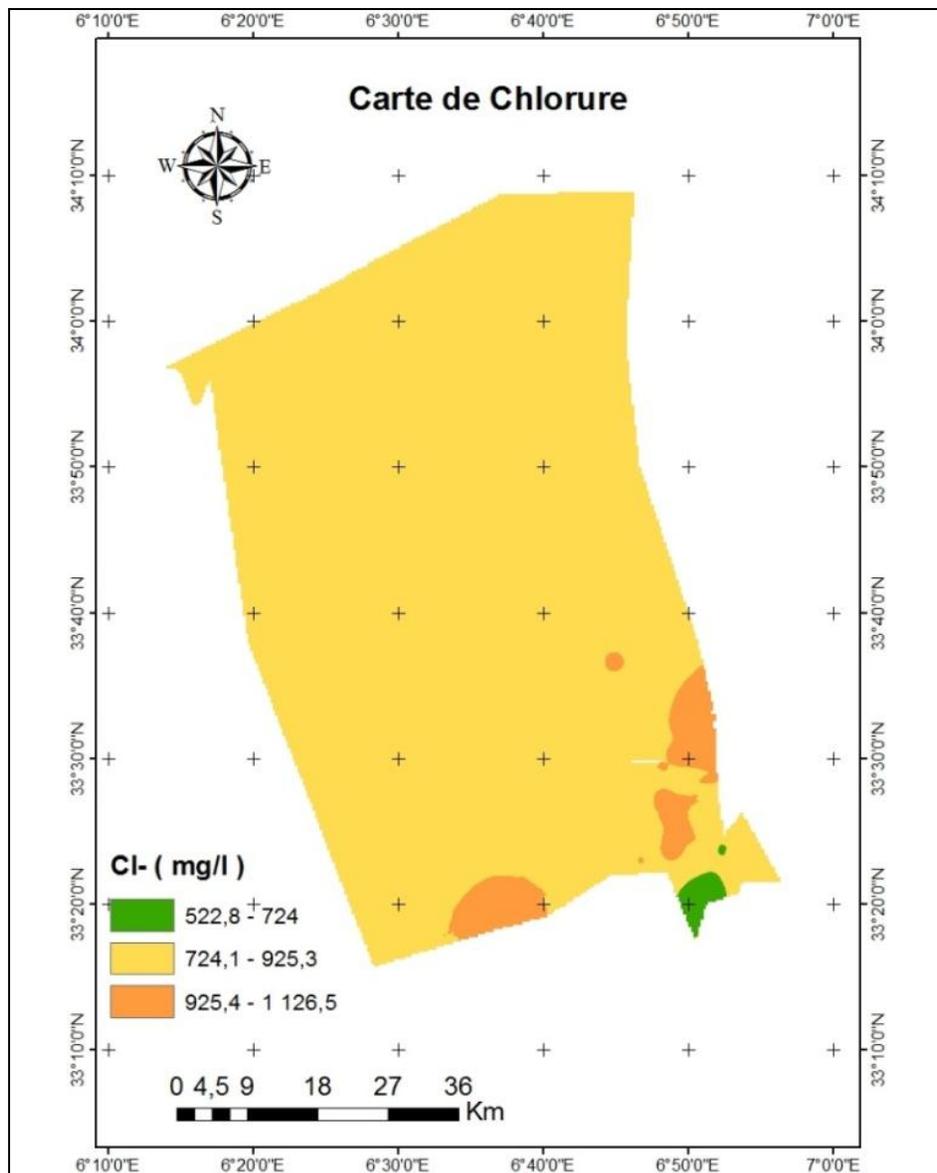


Fig. IV.8: Carte de chlorure

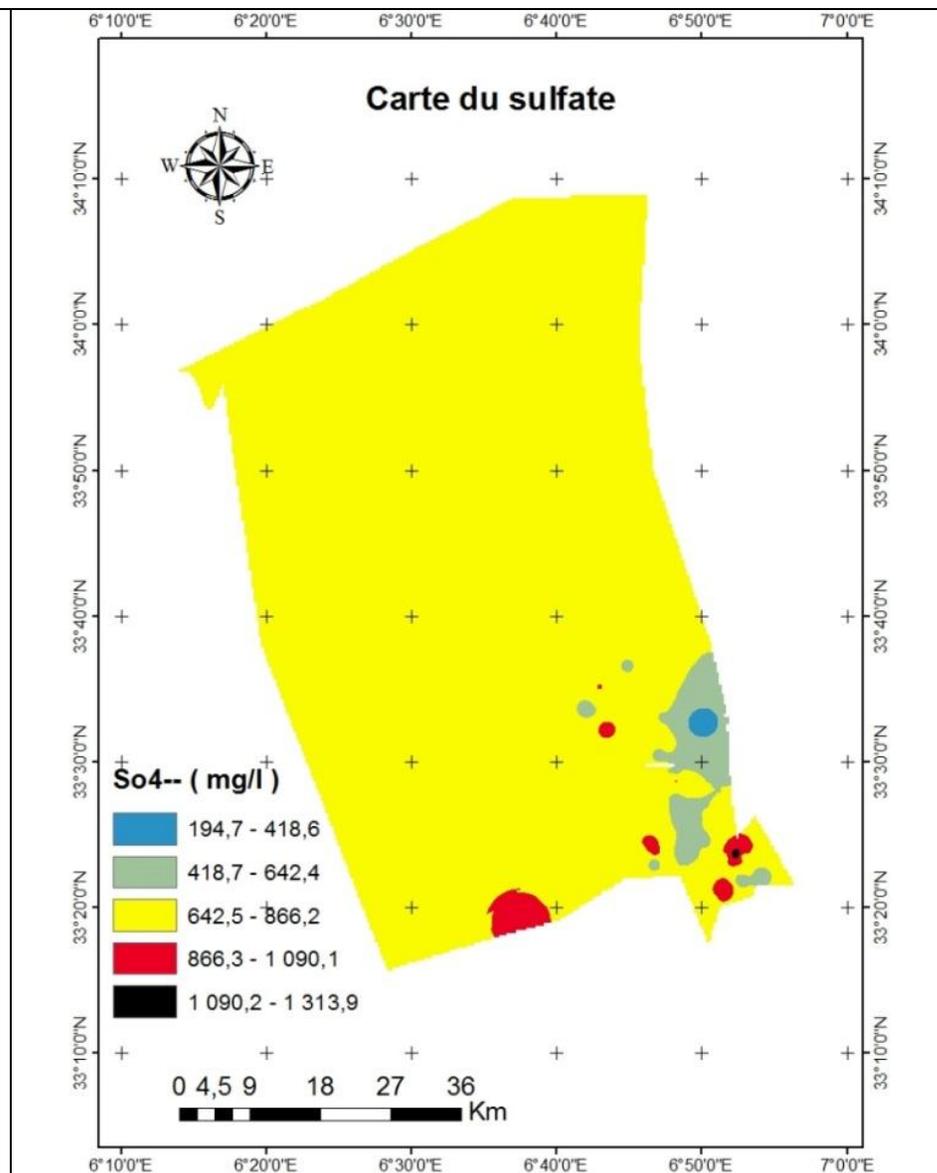


Fig. IV.9: Carte de sulfate

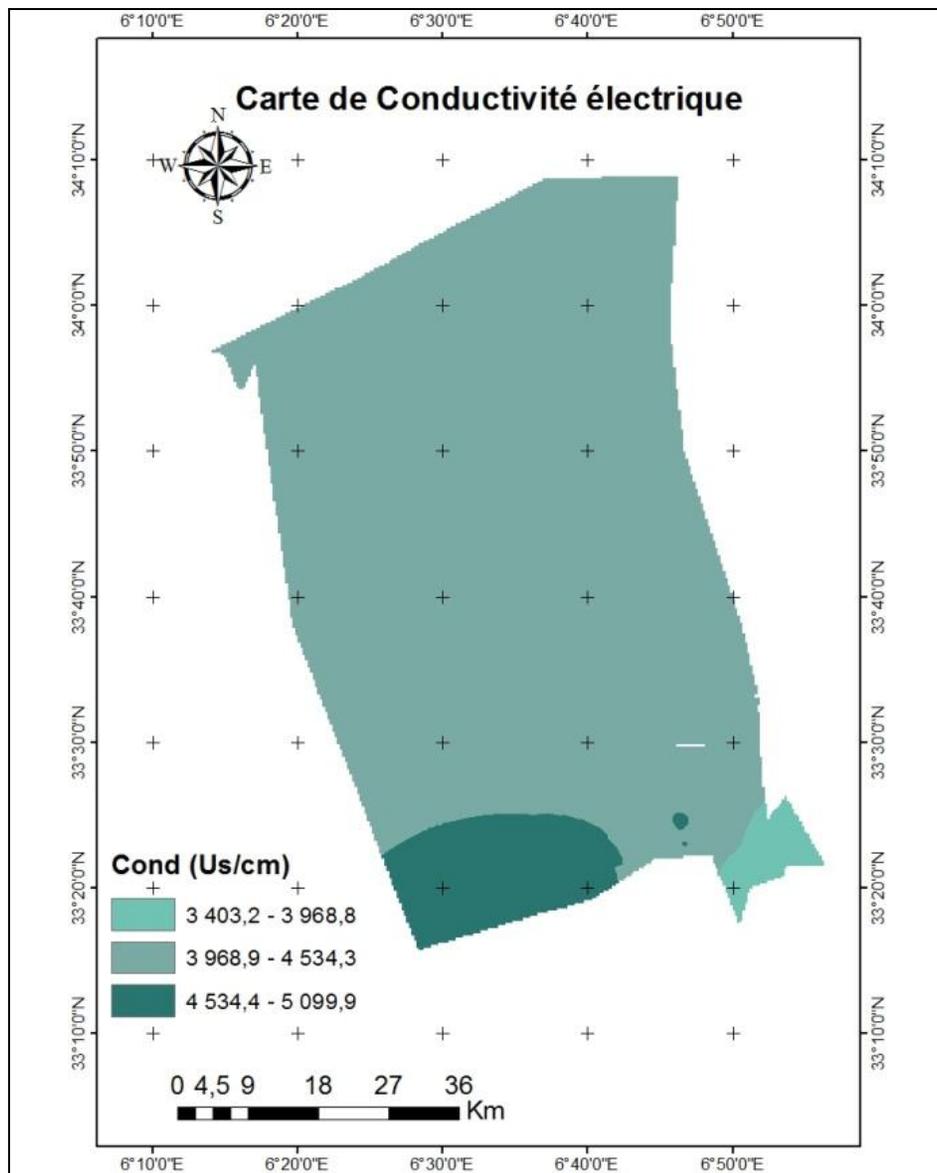


Fig. IV.10: Carte de conductivité électrique

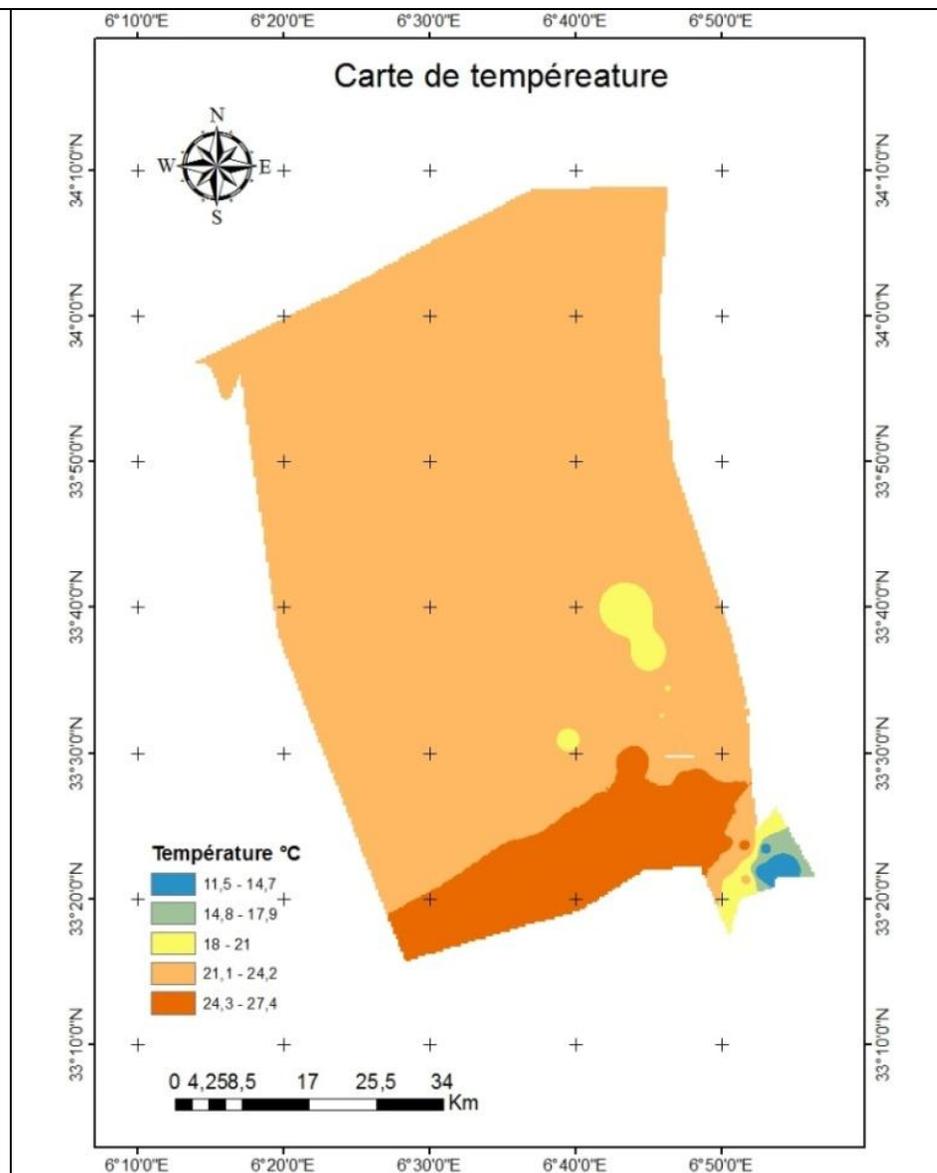


Fig. IV.11: Carte de température

Les scores d'évaluation de chaque sous-critère (les poids)

Les tableaux (IV.4.IV.5 .IV.6.IV.7.IV.8 .IV.9.IV.10.IV.13.IV.12.IV.11) présentent les matrices de chaque sous-critère (PH. K+. Mg+2. Na+. HCo3-. Ca+2. Cl-. T. Cond. So4-2), avec les vecteurs de priorité (C), qui définissent l'avantage de chaque alternative par rapport à l'autre. Nous rappelons que les vecteurs D et E, servent pour le calcul de la cohérence des matrices, dans la phase 4.

Tab IV.4: Scores des sous-critères du PH

	Bass	Neutre	Acide	\sum Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Bass	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Neutre	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Acide	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.5 : Scores des sous-critères du k+

	Faible	Moyen	Elevé	Extrême	\sum Rangs	[C]	saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,596591	0,661765	0,535714	0,4375	2,23157	0,557892	5,021032	0,597284	1,070608
Moyen	0,198864	0,220588	0,321429	0,3125	1,05338	0,263345	2,370106	0,225987	0,858139
Elevé	0,119318	0,073529	0,107143	0,1875	0,48749	0,121873	1,096854	0,109655	0,899751
Extrême	0,085227	0,044118	0,035714	0,0625	0,227559	0,05689	0,512008	0,067074	1,179017
Somme	1	1	1	1	4	1			4,007515

Tab IV.6: Scores des sous-critères du Na+

	Faible	Moyen	Elevé	\sum Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.7: Scores des sous-critères du Mg+

	Faible	Moyen	Elevé	\sum Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.8 : Scores des sous-critères du HCo3-

	Faible	Moyen	Elevé	\sum Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.9: Scores des sous-critères du Ca+2

	Faible	Moyen	Elevé	Σ Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.10: Scores des sous-critères du Cl-

	Faible	Moyen	Elevé	Σ Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.11: Scores des sous-critères du So4-2

	Faible	Moyen	Elevé	Extrême	Σ Rangs	[C]	saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,596591	0,661765	0,535714	0,4375	2,23157	0,557892	5,021032	0,597284	1,070608
Moyen	0,198864	0,220588	0,321429	0,3125	1,05338	0,263345	2,370106	0,225987	0,858139
Elevé	0,119318	0,073529	0,107143	0,1875	0,48749	0,121873	1,096854	0,109655	0,899751
Extrême	0,085227	0,044118	0,035714	0,0625	0,227559	0,05689	0,512008	0,067074	1,179017
Somme	1	1	1	1	4	1			4,007515

Tab IV.12: Scores des sous-critères du Cond

	Faible	Moyen	Elevé	Σ Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

Tab IV.13: Scores des sous-critères du T

	Faible	Moyen	Elevé	Σ Rangs	[C]	Saaty	[D]=[A]*[C]	[E]=[D]/[C]
Faible	0,6522	0,6923	0,5556	1,9000	0,6333	5,7001	0,6524	1,0300
Moyen	0,2174	0,2308	0,3333	0,7815	0,2605	2,3445	0,2332	0,8951
Elevé	0,1304	0,0769	0,1111	0,3185	0,1062	0,9554	0,1144	1,0781
Somme	1,0000	1,0000	1,0000	3,0000	1,0000			3,0033

- **Phase 4** : Vérifier la cohérence des jugements. On calcule, tout d’abord, l’indice de cohérence IC, donnée par l’équation IV-2:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n-1} \dots\dots\dots (IV-2)$$

Où: λ_{max} est la valeur propre maximale correspondant à la matrice des comparaisons par paires et n est le nombre d’éléments comparés. On calcule le ratio de cohérence (RC) défini par l’équation . IV-3:

$$RC = 100 \frac{IC}{ACI} \dots\dots\dots (IV-3)$$

Avec: ACI est l’indice moyen de cohérence, obtenu en générant aléatoirement des matrices de jugement de même taille. Les valeurs de l'ACI, sont exposées dans le tableau IV.14.

Tab IV.14: Indice moyen de cohérence.

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ACI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.53

Source: Saaty & Vargas, 1991

Une valeur de RC (Tableau IV.15), inférieure à 0.10 (<10% d'erreurs) (Saaty & Vargas, 1991), est généralement acceptable, sinon, les comparaisons par paires doivent être révisées pour réduire les incohérences. Le tableau . IV.15, présente les valeurs expliquant une bonne cohérence pour les matrices des critères et les matrices de sous-critères.

Tab IV.15: Vérification de la cohérence des matrices

	Matrice générale normalisée	PH	K+	Na+	Mg+2	HCo3-	Ca+2	Cl-	So4-2	Cond	T
λ_{max}	1,00135	1.0011	1.00188	1.00011	1.0011	1,0011	1,0011	1,0011	1,00188	1,0011	1,0011
IC =											
$(\lambda_{max} - n)/(n-1)$	-0,99985	0,9995	0,99937	-0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,9995	0,99937	0,9995	0,9995
RC=IC/IA	-0,67104	1,7232	1,11042	-1,7232	1,7232	1,7232	1,7232	1,7232	1,11042	1,7232	1,7232

Après avoir obtenu les poids de chaque critère et sous-critère, on passe à l'exécution des différents poids sur les cartes classées. L'exécution s'est réalisée avec le logiciel ArcGIS, moyennant le module *ModelBuilder* (Fig. IV.12).

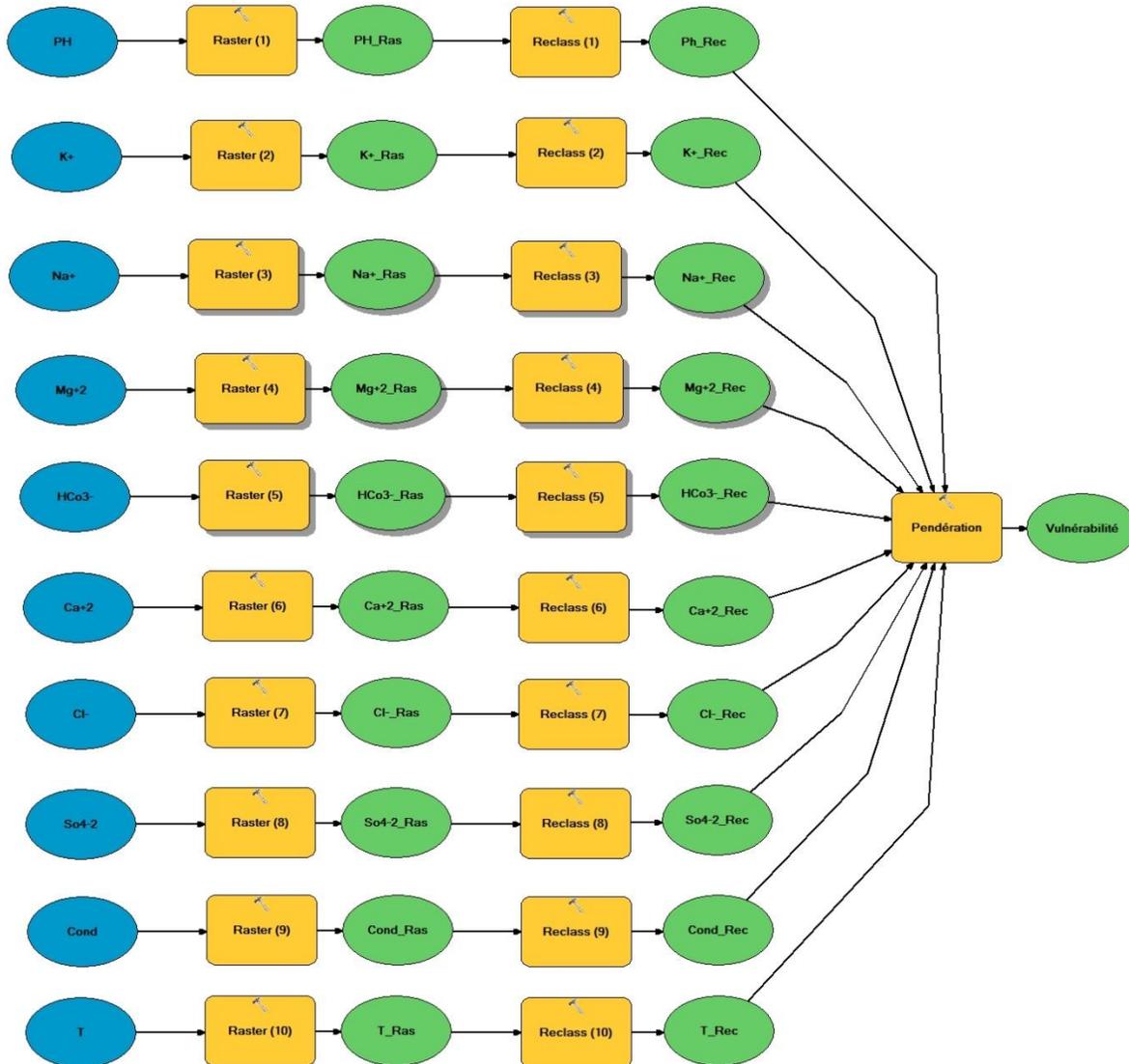


Fig IV.12: Exécution de la méthode AHP sous ArcGIS

Afin d'aboutir à un résultat spatial optimal, les règles suivantes ont été respectées:

- Organiser toutes les cartes sous une même résolution spatiale ;
- Rastériser les cartes vectorielles ;
- Les différentes cartes possèdent le même étendu géographique.

Le résultat de la carte de la vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux est présenté dans la figure IV.13.

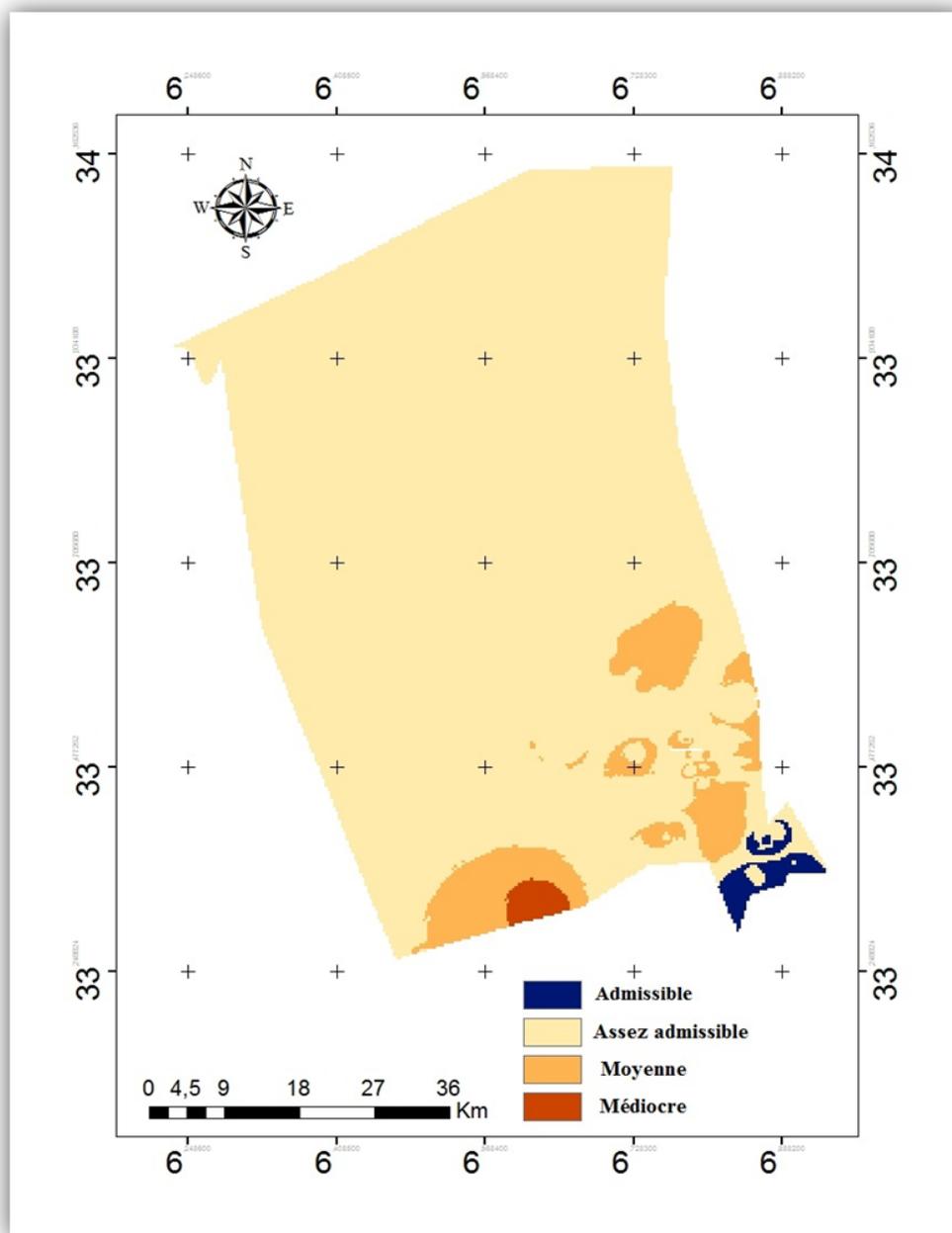


Fig IV.13 : Carte de vulnérabilité à la dégradation de la qualité des eaux.

La figure IV.13 caractérise le résultat de la vulnérabilité sur la qualité des eaux souterraines de la zone d'étude. On peut dire que la carte résultante présente quatre degrés de vulnérabilité: admissible, assez admissible, moyenne et médiocre. On remarque que la région touchée par les eaux admissibles est la commune d'El Oued. Pour les régions qui caractérisent les degrés assez admissible et moyenne 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.

IV.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté la méthode d'analyse multicritères, Analyse Hiérarchique des Procédés (AHP), moyennant le logiciel ArcGIS. Cette méthode 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) 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.

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 ;

Conclusion générale

- 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

- 1) **A.D.E** : (Algérienne Des Eaux Wilaya d'El-Oued).donné de 45 forrage (novembre 2018).
- 2) **A.N.R.H** : (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques de d'El oued).
- 3) **O.N.M** :(Office National Météorologique) Station de Guemar données climatiques.
- 4) **MIMOUN saliha et ZOUBEIDI basma(2014)** : Problème de vulnérabilité des eaux souterraines de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérien).
- 5) **TAHRAOUI Belal et OBEIDI Mohammed (2014)** : THEME :Potabilité et aptitude à l'irrigation des eaux des nappes prof ondes cas du CT et CI de la vallée d'El Oued.
- 6) **O.N.S** : Officénational de statistique.
- 7) **Baba, 2005** : Carte géologique du Grand Erg Oriental.
- 8) **A.N.R.H 1993** : Log de forage F1 à l'Albien.
- 9) **Dr.Nabil MEGA 2018** : étude et suivi de la sécheresse climatique dans les haut plateaux de l'Algérie par deux approches.
- 10) **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 déoued-souf.(sud est algérien).

Résumé :

Pendant longtemps, l'eau était un produit naturel et le don du Dieu était gratuit et facile à utiliser. Pour ainsi dire, c'était d'une grande valeur.

La région d'El Oued (SE Algérie) est caractérisée par la superposition de trois couches aquifères; il s'agit de haut en bas, de l'aquifère superficiel, l'aquifère du complexe terminal (CT) et l'aquifère du continental intercalaire (CI). Vue la forte pollution et la forte minéralisation de la nappe phréatique, la population exploite largement les nappes du complexe terminal, pour satisfaire leurs besoins, mais sa qualité reste toujours en question.

L'étude de la qualité des eaux de l'aquifère du complexe terminal pour l'alimentation en eau potable (AEP) montre qu'elles sont non potables, en référence aux normes de l'organisation mondiale de la santé (OMS) et aux normes algériennes des eaux potables. Elles sont fortement minéralisées. Quant à sa qualité pour l'irrigation, basée sur les normes de Riverside, elles s'arrangent dans la classe des eaux médiocres.

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 sur 45 échantillons 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. Ceci concerne plus particulièrement le pH, la conductivité électrique (minéralisation), ainsi que la concentration des éléments majeurs. Cela peut probablement être dû à la proximité des terres agricoles et l'utilisation intensive des engrais dans les pratiques culturales (la région dépourvue d'activité industrielle intensive). À cet effet, l'évaluation continue de la qualité de l'eau est impérative et un traitement pour réduire la détérioration de la qualité des eaux et éliminer les problèmes de santé peut s'avérer nécessaire.

ملخص :

لفترة طويلة، كان الماء منتجا طبيعيا و هبة ألاهية مجانية سهلة الاستعمال. إن جاز التعبير، كان ذا قيمة عالية تتميز منطقة الوادي (الجنوب الشرقي للجزائر) بتراكب طبقات المياه الجوفية الثلاث، و هي من أعلى لأسفل، طبقة المياه الجوفية السطحية، طبقة المياه الجوفية للمجمع الطرقي، طبقة المياه الجوفية القاري- -- نظرا للتلوث المرتفع و التمعدن العالي للمياه الجوفية، يستغل السكان طبقات المياه الجوفية المجمع الطرقي لتلبية احتياجاتهم، لكن جودتها لا تزال موضع تساؤل.

تبين دراسة نوعية المياه في طبقة المياه الجوفية في المجمع النهائي لتزويد مياه الشرب أنها غير صالحة للشرب، بالاعتماد على معايير منظمة الصحة العالمية و المعايير الجزائرية لمياه الشرب و هي مألحة للغاية. بالنسبة لجودة الري، بناء على معايير ريفسايد، فإنها تستقر في فئة المياه المتواضعة.

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو إنشاء تشخيص لنوعية المياه الجوفية في منطقة الوادي بناء على نظام معلومات جغرافي. تضمن تحليل الجودة الفيزيائية و الكيميائية لـ45 عينة مأخوذ 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 على فقيرة.

هذا يتعلق بشكل خاص بالرقم الهيدروجيني، الموصلية الكهربائية (التمعدن)، و كذلك تركيز العناصر الرئيسية. ربما يرجع ذلك إلى قرب الأراضي الزراعية والاستخدام المكثف للأسمدة في الممارسات الزراعية (المنطقة خالية من النشاط الصناعي المكثف). تحقيقا لهذه الغاية، يعد التقييم المستمر لجودة المياه أمرا ضروريا و قد يكون العلاج ضروريا للحد من تدهور جودة المياه و القضاء على المشكلات الصحية.

الكلمات المفتاحية: نوعية المياه – طريق التحليل الهرمية – الطبقة النهائية المعقدة

Summary :

For a long time, water was a natural product and the gift of God was free and easy to use. So to speak, it was of great value.

The region of El Oued (SE Algeria) is characterized by the superposition of three aquifer layers; it is from top to bottom, the superficial aquifer, the aquifer of the terminal complex and the aquifer of the continental intercalary . Due to the high pollution and the high mineralization of the water table, the population exploits the aquifers of the terminal complex to meet their needs, but its quality is still in question.

The study of the water quality of the aquifer of the terminal complex for the supply of drinking water (AEP) shows that they are not drinkable, in reference to the standards of the World Health Organization (WHO) and the Algerian standards for drinking water. They are highly mineralized. As for its quality for irrigation, based on the Riverside standards, they settle in the class of mediocre waters.

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 45 samples 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. This concerns more particularly the pH, the electrical conductivity (mineralization), as well as the concentration of the major elements. This can probably be due to the proximity of agricultural land and the intensive use of fertilizers in farming practices (the region devoid of intensive industrial activity). To this end, continuous assessment of water quality is imperative and treatment to reduce deterioration of water quality and eliminate health problems may be necessary.

Keywords: Water quality - method OF Hierarchical analysis of prosses (AHP) - Complex final layer