

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

Caractérisation des paramètres hydrogéologiques pour identifier l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la commune d'El-Oued

Dirigé par :

➤ Mme : ZAIR Nadjjet

présenté par :

*BETTA Bachir

*GHANIA Fatah

Soutenu devant un jury composé :

M. KHCHANA .S

Président

M. MILOUDI . A

Examineur

Promotion: 2019/2020

REMERCIEMENTS

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

Nous voudrions tout d'abord exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur

Dr. ZAIR Nadjat , *Pour son soutien, ses conseils et sa grande bienveillance lors du développement
de ce projet.*

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

Pr. BACHIR SAHRAOUI ; Dr: MILOUDI .A ; Mr: Sghiri Mohamed El Amine

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

DEDICACE

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

A nos très chers pères -A nos très chères mères -A nos frères et sœurs

-A tous nos cousins sans exception - A toute notre famille. -A tous nos ami(e) s sans exception

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

FATAH - BACHIR

Sommaire

<i>Remerciements</i>	<i>I</i>
<i>DEDICACE</i>	<i>II</i>
<i>Sommaire</i>	<i>III</i>
<i>Liste des figures</i>	<i>VIII</i>
<i>Liste des tableaux</i>	<i>XI</i>
<i>Introduction générale</i> :	<i>1</i>

Chapitre I : Présentation général de la zone d'étude

<i>Introduction</i> :	<i>3</i>
<i>I.1. Situation géographique d'El Oued</i> :	<i>3</i>
<i>I.2. Aperçu sur la wilaya D'El – Oued</i> :	<i>5</i>
<i>I.2.1. Situation Economique</i> :	<i>5</i>
<i>I.2.2 Répartition administratif et démographique</i> :	<i>7</i>
<i>I.3. Topographie d 'El-Oued</i> :	<i>9</i>
<i>I.4 : Stratigraphie régionale</i> :	<i>10</i>
<i>I. 4.1 : Formation de l'ère Secondaire</i> :	<i>10</i>
<i>I.4.1.1 : Le Barrémien</i> :	<i>10</i>
<i>I.4.1.2 L'Aptien</i> :	<i>10</i>
<i>I.4.1.3 L'Albien</i> :	<i>10</i>
<i>I.4.1.4 Le Vraconien</i> :	<i>10</i>
<i>I.4.1.5 LE Cénomaniens</i> :	<i>10</i>
<i>I.4.1.6. Le Turonien</i>	<i>11</i>
<i>I.4.1.7 Sénonien</i> :	<i>11</i>
<i>I.4.1.7.1. Sénonien lagunaire</i> :	<i>12</i>
<i>I.4.1.7.2 Sénonien carbonaté</i> :	<i>12</i>
<i>I.4.2 Formation de l'ère Tertiaire</i> :	<i>12</i>
<i>I.4.2.1. L'Eocène</i> :	<i>12</i>
<i>I.4.2.2. LE Mio-Pliocène</i> :	<i>12</i>
<i>I.4.3 Formations du Quaternaire</i>	<i>13</i>
<i>I.5 Interprétation des coupes géologiques</i> :	<i>16</i>

<i>I.5.1 Coupe N°1 :</i>	<i>16</i>
<i>I.5.2 Coupe N°2 :</i>	<i>16</i>
<i>I.5.3 Coupe N°03 :</i>	<i>17</i>
<i>I.6. Tectonique :</i>	<i>18</i>
<i>I.7 Relief :</i>	<i>19</i>
<i>Conclusion:</i>	<i>20</i>

Chapitre II : Hydroclimatologie

<i>Introduction :</i>	<i>22</i>
<i>II.1.1. Température :</i>	<i>22</i>
<i>II.1.1.1. Températures moyennes mensuelles interannuelles.....</i>	<i>22</i>
<i>II.1.1.2.Températures moyennes annuelles :</i>	<i>23</i>
<i>II.1.2. Précipitation :</i>	<i>25</i>
<i>II.1.2.1. Précipitations moyennes mensuelles :</i>	<i>25</i>
<i>II.1.2.2. Précipitations moyennes annuelles :</i>	<i>26</i>
<i>II.1.3. Indice d'aridité :</i>	<i>27</i>
<i>II.1.4. Diagramme pluviothermique :</i>	<i>27</i>
<i>II.1.5. L'humidité :</i>	<i>29</i>
<i>II.1.6. Le vent :</i>	<i>30</i>
<i>II.1.7. Evaporation :</i>	<i>31</i>
<i>II.2. Calcul des paramètres de bilan hydrique :</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.L'évapotranspiration :</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)</i>	<i>32</i>
<i>II.2.1.2.L'évapotranspiration réelle (E.T.R).....</i>	<i>33</i>
<i>II.2.1.2.1.Méthode de Thorntwaite.....</i>	<i>33</i>
<i>II.3. Etablissement du bilan Hydrique :</i>	<i>33</i>
<i>II.3.1.Interprétation du bilan Hydrique :</i>	<i>34</i>
<i>Conclusion :</i>	<i>35</i>

Chapitre III : Hydrogéologie

<i>Introduction :</i>	<i>37</i>
<i>III.1. Inventaire des forages :</i>	<i>37</i>
<i>III.2. Cadre hydrogéologique :</i>	<i>38</i>
<i>III .2.1. Nappe Phréatique :</i>	<i>39</i>
<i>III .2.2.Nappe du Complexe Terminal :</i>	<i>39</i>

III.2.3.Nappe du Continent Intercalaire (CI) :	41
III .3. Aperçu historique :.....	42
III .4. Piézométrie:	44
III .4.1.Interprétation de la carte piézométrique (2010):.....	44
III .4.2.Interprétation de la carte piézométrique (2013):.....	44
III .5. Paramètres hydrodynamiques :	45
III .5.1.Essai de pompage à El-Oued centre :.....	46
III .5.1.1.Détermination de débit spécifique :	46
III .5.1.2.Interprétation de l'essai de longue durée :	47
III .5.2.Essai de pompage à Ain raach :	47
III .5.2.1.Détermination de débit spécifique :	47
III .5.2.2.Interprétation de l'essai de longue durée :	48
III .5.3.Détermination de débit spécifique :	48
III .5.4.Interprétation de l'essai de longue durée :	49
III.6.Essai de pompage à Blila :.....	49
III.6.1.Introduction :	49
III.6.1.Détermination de débit spécifique :	49
III.6.2..Interprétation de l'essai de longue durée :	50
III.7.Essai de pompage à Ourmes : IV.7.1.Introduction :.....	50
III.7.1.Détermination de débit spécifique :	50
III.7.2.Interprétation de l'essai de longue durée :	51
Conclusion :	52

Chapitre IV Caractérisation hydrochimiques des eaux souterraines de la commune d'El-Oued

Introduction :	54
IV.1. Echantillonnage et analyse hydrochimique :	54
IV.2. Description sommaires des paramètres physico chimiques :	55
IV.2.1. Paramètres physiques :	55
IV.2.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH) :	55
IV.2.1.2 .La conductivité électrique (CE):	55
IV.2.1.3 La température (T° C) :.....	55
IV.2.2. Les éléments chimiques majeurs:	55
IV.2.2 .1. Le calcium (Ca ²⁺) :.....	55
IV.2.2. 2. Le magnésium (Mg ²⁺) :.....	55

IV.2.2. 3. Le sodium (Na^+) :	55
IV.2.2. 4. Le potassium (K^+):	56
IV.2.2.5. Les chlorures (Cl^-) :	56
IV.2.2.6. Les sulfates (SO_4^{2-}):	56
IV.2.2.7. Les bicarbonates (HCO_3^-) :	56
IV.3. Représentation graphique des faciès hydrochimiques :	56
IV.3.1. Diagrammes,	56
IV.3.1.1. Diagramme de PIPER :	56
IV.4. Cartographie hydrochimique :	58
IV.4.1. Les chlorures (figures) :	58
IV.4.2. Les sulfates (figures) :	59
IV.4.3. Les bicarbonates (figures) :	59
IV.4.4. Le calcium (figures) :	60
IV.4.5. Le sodium (figures) :	61
IV.4.6. Le Magnésium :	62
IV.4.7. Le Potassium :	63
IV.5. Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines :	64
IV.5.1. Facies caractéristiques :	64
IV.5.2. Origine des éléments chimiques :	65
IV.5.2.1. Les éléments Ca^{+2} , SO_4^{2-} et HCO_3^- :	65
IV.5.2.2. Les éléments Na^+ , Cl^- :	66
IV.5.2.3. Les éléments HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- :	68
IV.5.2.4. Les éléments SO_4^{2-} , Cl^- :	69
IV.5.3. Etude de l'acquisition de la minéralisation de l'eau :	69
IV.6. Les principales sources de pollution :	70
IV.6.1. Répartition spatiale des nitrates :	71
IV.6.2. Relation nitrates - nitrites :	72
IV.6.3. Relation nitrates – chlorures :	72
Chapitre V : Evolution des teneurs en nitrates	
Introduction :	75
V.1. Evolution de l'occupation du sol de la ville d'El-Oued:	75
V.2. La nappe superficielle :	77
V.2.1. Caractérisation des données :	77

<i>V 2.2.Détermination de la courbe des teneurs en nitrates à chaque captage d'eau :</i>	79
<i>V .2.3.Calcul la moyenne des teneurs en nitrates en chaque captage par période de trois ans :</i>	82
<i>V .2.4.Causes probables de l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines :</i>	83
<i>V .2.4.1 Évolution des teneurs en nitrates en fonction de l'altitude des forages :</i>	83
<i>V .2.4.2 Évolution des teneurs en nitrates en fonction des profondeurs d'eau des forages: ..</i>	83
<i>V .3. Les nappes profondes :</i>	84
<i>V .3.1. Caractérisation des données :</i>	84
<i>V .3.2. Caractérisation des points d'eaux des nappes profondes :</i>	84
<i>V .3. 3. Détermination de la courbe des teneurs en nitrates à chaque captage d'eau :</i>	85
<i>V .3.4. Calcul la moyenne des teneurs en nitrates en chaque captage par période de trois ans :</i>	88
<i>V .3.5. Causes probables de l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines :</i>	89
<i>V .3.5.1 Évolution des teneurs en nitrates en fonction de l'altitude des forages :</i>	89
<i>V .3.5.2 Évolution des teneurs en nitrates en fonction des profondeurs d'eau des forages: ..</i>	90
<i>V .3.5.3 Évolution des teneurs en nitrates en fonction des volumes d'eau pompés :</i>	90
<i>V .3.5.4 Évolution des teneurs en nitrates en fonction du niveau piézométrique de la nappe :</i>	91
<i>V .4.Discussions des résultats :</i>	92
<i>Conclusion :</i>	93

Liste des figures

Figure 1: Situation géographique de la région d'El-Oued (Dourouni/Touahri 2008)	4
Figure 2 : :Situation économique de la commune d'El Oued (DSA2018).....	6
Figure 3 : :Répartition administrative des communes d'Oued Souf	7
Figure 4 : :Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gousskov).....	11
Figure 5 : : <i>Plan géologique du Grand Erg Oriental, (Baba Sy, M., 2005)</i>	13
Figure 6 : :Log de forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993).	14
Figure 7 : :Carte géologique de la zone d'étude (extrait d'après la carte du Sahara Septentrional (G. Busson 1970) in Khechana, S. 2014.	15
Figure 8 :Coupe géologique N° 01(DROUICHE 2008)	16
Figure 9: Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989).....	17
Figure 10: Coupe géologique N° 03(DROUICHE 2008)	18
Figure 11: Histogramme de Températures moyennes mensuelles (1993-2018).....	23
Figure 12: Répartition moyenne annuelle des températures (2002/2018)	24
Figure 13: Histogramme de Précipitations moyennes mensuelles (1993-2018).....	25
Figure 14: Répartition des moyennes annuelles de précipitation (2002-2018).....	26
Figure 15: Diagramme pluviothermique de la station de Guemar durant la période (1993- 2018).....	28
Figure 16: Histogramme de l'humidité relative moyenne mensuelle (1993-2018).....	29
Figure 17: Histogramme des vitesses moyennes mensuelles du vent en Km/h (1993-2018) ...	30
Figure 18: Histogramme de l'évaporation moyenne mensuelle en mm (1993-2018)	31
Figure 19: Bilan hydrique d'après Thorntwaite (1993-2018)	34
Figure 20: Carte d'inventaire des points des eaux souterraines de la région d'El-Oued (2013)	38
Figure 21: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972).....	39
Figure 22: Coupe hydrogéologique de l'El-Oued.....	40
Figure 23: Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional.(Cornet, 1964)	43
Figure 24: Carte géologie avec le sens d'écoulement des aquifères CT et CI.....	43
Figure 25: Carte piézométrique des eaux souterraines de la région d'El-Oued (2010)	44
Figure 26: Carte piézométrique des eaux souterraines d'el-Oued (2013)	45
Figure 27: Essai de pompage longue durée à El-Oued centre interprété par la méthode de Cooper &-Jacob.....	47

Figure 28: Essai de pompage long duré à Ain raach Interprété par la méthode de Cooper &- Jacob.....	48
Figure 29: Essai de pompage longue durée à Nakhla ttghamaliya interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	49
Figure 30: Essai de pompage longue durée a magrane interprété par la méthode de Cooper &- Jacob.....	50
Figure 31: Essai de pompage longue durée à Ourmes interprété par la méthode de Cooper & Jacob.....	51
Figure 32: la carte de la répartition des points de prélèvement dans la commune d'El Oued 2020.....	54
Figure 33: Diagramme de Piper des eaux souterraines des aquifères profondes (2019).	57
Figure 34: Diagramme de Piper des eaux souterraines des aquifères profondes (2020).	57
Figure 35: Carte de chlorure des eaux souterraines de la région d'étude (2020).	58
Figure 36: Carte de sulfates des eaux souterraines de la région d'étude (2020).	59
Figure 37: Carte des bicarbonates des eaux souterraines de la région d'étude (2020).	60
Figure 38: Carte de calcium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).	61
Figure 39: Carte de sodium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).	62
Figure 40: Carte de magnésium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).....	63
Figure 41: Carte de potassium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).....	63
Figure 42: (A, B) : Evolution et distribution des faciès chimiques.....	65
Figure 43: (A, B) : Détermination l'origine de calcium.....	66
Figure 44: (A, B): Détermination l'origine de sodium.....	67
Figure 45: (A, B): Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.	68
Figure 46: Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique.	69
Figure 47: Variation de l'indice de saturation IS (2020).	70
Figure 48: Carte des nitrates en (mg /l) dans la région d'étude 2020.	71
Figure 49: Evolution du nitrate en fonction des nitrites de la zone d'etude (2020)	72
Figure 50: Concentration des nitrates et des chlorures de la zone d'etude (2020).....	72
Figure 51: Diagramme du nitrate versus des chlorures de la zone d'etude (2020).	73
Figure 52: photo satellite de la zone d'étude en 2000 (d'après Boussalssal 2016).....	76
Figure 53: photo satellite de la zone d'étude en 2009 (d'après Boussalssal 2016).....	76
Figure 54: Indicateur statistique pour les teneurs en nitrates (mg/l) de la nappe libre de la région d'étude.....	78

Figure 55: Carte de localisation des différents points d'eau de suivi pour la période de 2011 ,2016 et 2018 ;	79
Figure 56 : Courbes d'évolution des teneurs en nitrates (mg/l) pour la nappe libre	80
Figure 57: Carte de répartition spatiale de type d'évolution des teneurs en nitrates	81
Figure 578: Carte d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2011,2016 et 2018), (Nappe libre) ;	82
Figure 59: Évolution comparée de la côte de l'eau de la nappe libre et des teneurs moyenne annuelle en nitrates.	83
Figure 60: Répartition des teneurs en NO_3^- des eaux en fonction de la profondeur des points d'eaux.	83
Figure 61: Indicateur statistique pour les teneurs en nitrates (mg/l) pour les nappes profondes de la région d'étude	84
Figure 62: Carte de localisation des différents points d'eau de suivi pour la période de 2012 – 2020 ;	85
Figure 63: Courbes d'évolution des teneurs en nitrates (mg/l) ;	86
Figure 64: Carte de répartition spatiale de type d'évolution des teneurs en nitrates (Nappes profondes CT et CI)	87
Figure 65: Carte d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2012,2015 et 2017) ; (Nappes profondes CT et CI) ;	88
Figure 66: Carte d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2018,2019 et 2020) ; (Nappes profondes CT et CI) ;	89
Figure 67: Évolution comparée de la côte de l'eau de la nappe profonde (CT) et des teneurs moyenne annuelle en nitrates et en 2020.	90
Figure 68: Répartition des teneurs en NO_3^- des eaux en fonction de la profondeur des forages.	90
Figure 69: Évolution comparée en fonction des volumes pompés de la nappe profonde (CT) et des teneurs moyenne annuelle en nitrates et en 2020.	91
Figure 70: Évolution de la teneur moyenne en nitrates dans les stations en fonction du niveau piézométrique de la nappe.	92

Liste des tableaux

Tableau 1: Répartition de L'élevage dans la région d'étude (DSA/ 2018).....	5
Tableau 2: Production animale estimée dans la région d'étude	5
Tableau 1: Surface et population de la vallée du Souf par commune	8
Tableau 4: Altitude moyenne des communes d'Oued Souf.....	9
Tableau 5: Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gouskov)	11
Tableau 6: Coordonnées géographiques de la station météorologique de la région d'El- Oued	22
Tableau 7: Températures moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf	22
Tableau 8: Répartition des moyennes annuelles de température sur la période (2002-2018)..	24
Tableau 9: Précipitations moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf	25
Tableau 10: Répartition des précipitations moyennes annuelles (2002-2018)	26
Tableau 11: Classement en fonction de l'indice d'aridité(selon De Martonne)	27
Tableau 12: Couples température/ précipitation mensuelle interannuelle de la région d'Oued Souf (1993-2018)	28
Tableau 13: Humidités moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf (1993-2018).....	29
Tableau 14: Vitesses des vents moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf(1993-2018)	30
Tableau 15: Evaporation moyenne mensuelle à Oued Souf en (1993-2018).....	31
Tableau 16: Les valeurs mensuelles du coefficient de correction K dans la région d'étude	32
Tableau 17: Bilan hydrique d'après Thorntwaite (1993-2018).....	33
Tableau 18: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued.....	42
Tableau 19: Coordonnées UTM des sites des essais pompages.....	46
Tableau 20: Tableau récapitulatif des paramètres hydrodynamiques	51
Tableau 21: Type d'évolution des teneurs en nitrates.....	81
Tableau 22: Type d'évolution des teneurs en nitrates.....	87

Résumé :

Cette étude se propose de suivre l'évolution temporelle des teneurs en nitrates des eaux souterraines et de cartographier leur distribution spatiale. Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville d'El-Oued diffèrent un aquifère à l'autre. En effet, les eaux de la nappe du Quaternaire sont les plus riches en nitrates, avec des teneurs moyenne annuelle qui varient de 6 mg/l à 85 mg/l, pour une moyenne de 37 mg/l. Ces teneurs sont supérieures à la norme OMS (50 mg/l) pour une eau de consommation. Au niveau des eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT), les teneurs en nitrates moyenne annuelle varient de 14 mg/l à 37 mg/l, avec une moyenne de 18 mg/l. Dans le Complexe Terminal, les teneurs excessives en nitrates sont observées dans les localités centre de la zone d'étude. La distribution spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe du Quaternaire montre que la majorité des points de captage de cette nappe est soumise à une pollution nitratée. Cette étude montre que dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal, la pollution nitratée évolue selon deux grands foyers. Le premier foyer est Sud- Nord, suivant le sens d'écoulement souterraine. Le second est Ouest-Est, en progression vers la zone Est. La distribution temporelle des teneurs en nitrates des eaux de la nappe du Complexe Terminal dans la ville d'El-Oued a montré que depuis des décennies, les teneurs en nitrates ont subi une baisse après une augmentation. Cette évolution des teneurs en nitrates est en rapport avec la croissance démographique et l'urbanisation galopante de la ville d'El-Oued.

Mots clés : Activités anthropiques, eaux souterraines, environnement, nitrates, pollution, ville d'El-Oued.

Introduction générale

Introduction générale :

L'accès à l'eau potable constitue l'une des préoccupations de toute l'humanité. Pour cette raison, depuis des décennies, les États et les gouvernements d'Afrique en général et de l'Algérie en particulier, s'attellent à doter leur population d'infrastructures hydrauliques adéquates. A El-Oued, la croissance démographique et l'urbanisation de la ville ont contribué à rendre inefficaces les énormes efforts fournis par l'État. Ainsi, la quantité des ressources en eau fournie aux populations est restée insuffisante. Cela a provoqué l'augmentation des besoins en eau des populations, qui jusque-là n'avaient pas été comblés par les nombreux forages implantés par l'état, à El-Oued dans l'aquifère profondes (CT et CI). En effet, l'accroissement des besoins en eau des populations a entraîné l'augmentation des débits des forages, ce qui est à l'origine des nombreuses pannes des forages.

Les dernières études réalisées sur la qualité des eaux de la nappe phréatique de la région d'El-Oued ont relevé que ces eaux étaient confrontées à une pollution anthropique. En outre, des études montrent que les ressources en eau d'El-Oued sont confrontées à une pollution d'origine anthropique.

Le but de ce travail est d'identifier clairement d'une part les pratiques qui favorisent l'entraînement des fertilisants dans les eaux souterraines, et d'autre part celle qui ralentissent ou empêchent cette entraînement. Compte tenu de la forme d'évolution historique de ces teneurs en nitrates depuis 2011, 2012, l'étude de leur évolution, de leur classement, de leur localisation et leur croisement, d'une part avec les données techniques et structurelles de la direction Algérienne d'eau et la direction d'hydraulique de la wilaya d'El-Oued, et d'autre part les paramètres hydrogéologique, paraissent être des moyens privilèges et promoteurs pour définir et orienter des actions de prévention durables.

Plusieurs outils (géologique, hydrodynamique, chimique, statistique et informatique) ont été utilisés, afin de mieux interpréter les données acquises.

La première partie est consacrée à l'étude des contextes géographique et géologique de la région d'étude en présentant les caractéristiques géologiques et hydroclimatologique.

La deuxième partie traite de l'hydrogéologique des nappes aquifères de la région d'étude, en définissant les paramètres hydrodynamiques et interprétant sa piézométrie.

La troisième partie concerne l'étude de l'évolution des paramètres chimiques dans le temps et dans l'espace en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines. Dans cette partie il a été question de la détermination des différents polluants dégradant la qualité des eaux souterraines et de la vulnérabilité des nappes.

Chapitre I
Présentation général de la zone
d'étude

Introduction :

La wilaya d'El-Oued est une région aride, fait 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 :

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

Dans cette Partie, nous mettrons en évidence la localisation géographique et les principales activités de la population dans la région d'El-Oued, en exposant les paramètres climatiques importants et les différentes couches de formation géologique.

Nous vous présentons les trois types d'aquifères: la nappe phréatique, complexe terminal et le continental intercalaire dans la Région oued Souf.

I.1. Situation géographique d'El Oued:

La zone d'étude est située dans la wilaya d'El Oued, l'une des principales oasis du sahara septentrional algérien.

Elle est située au Sud-est de l'Algérie, à une distance de 650 km de la capitale.

Elle est administrativement limitée par les wilayas suivantes :(DRE/2019)

1. Biskra, Khenchela et Tébessa au Nord.
2. Djelfa au Nord-Ouest.
3. Ouargla au Sud et Sud-ouest.
4. La Tunisie à L'Est.

Géographiquement elle est limitée par les coordonnées suivantes :

Tableau N° 01 : Coordonnées géographiques de la commune d'El Oued

Longitudes	X₁ = 5° 30' X₂ = 07°00' EST
Latitudes	Y₁ = 35° 30' Y₂ = 37°00' NORD

Quant à la commune d'El Oued, elle est située au centre de la wilaya d'Oued Souf, elle est administrativement limitée par les communes suivantes :

1. Hassani Abdelkrim au Nord.
2. Kouinine Oued El Alenda au Nord-ouest.
3. Bayadha au Sud.
4. Trifaoui à L'Est.

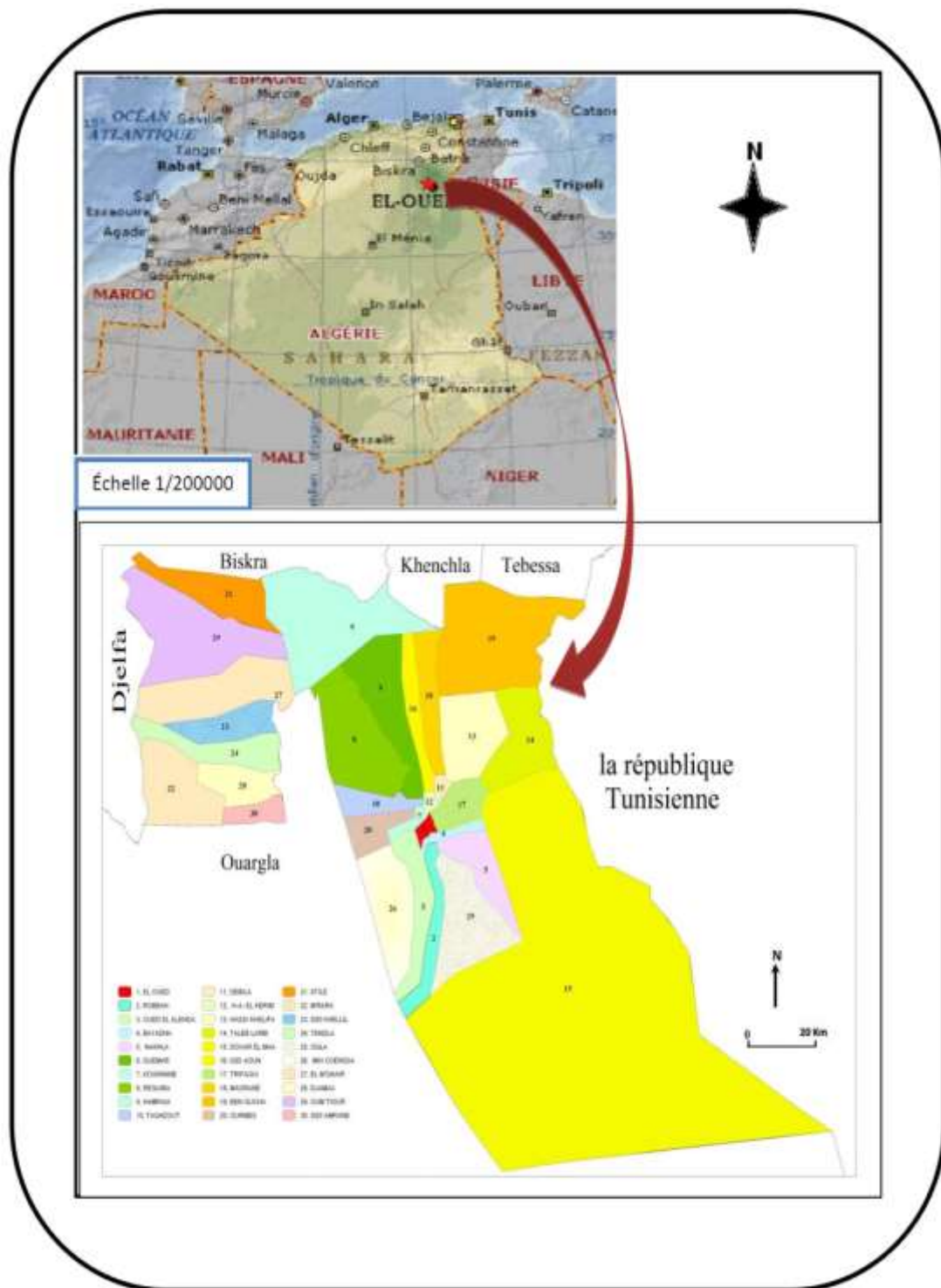


Figure 1: Situation géographique de la région d'El-Oued (Dourouni/Touahri 2008)

I.2. Aperçu sur la wilaya D'El – Oued :

La wilaya d'El-Oued occupe une superficie de 44586 km², divisé en 30 communes avec une population de 900000 habitants et une densité de 19.58 hab/km² habitants au kilomètre carré. (DBSP fin 2019).

Cette population est répartie à travers 30 communes regroupées dans 12 daïras.

I.2.1. Situation Economique :

L'activité agricole dans la région d'El-Oued se marque par l'exploitation des palmiers dattiers ; actuellement il existe près de 2500000 palmiers dattier dont 183000 seulement sont productifs. La moyenne d'exportation est de 40000 tonnes/an (DSA, 2018).

Ces activités agricoles se font dans le creux des dunes et sont ainsi appelés **Ghout**. L'agriculture se caractérise également par les cultures de tabac, des cacahuètes et les cultures maraichères et la pomme de terre.

Du point de vue industrie, la wilaya d'El-Oued se caractérise par les activités suivantes: les textiles, la cosmétique, l'industrie agro-alimentaire, la production de sel de table à partir des chotts et des sabkhats et la fabrication des matériaux de constructions, etc...

L'élevage des moutons, des chèvres et des chameaux se réparti comme suit :

Tableau 1: Répartition de L'élevage dans la région d'étude (DSA/ 2018)

Ovin	500 000 têtes
Caprin	153 000 têtes
Camelin	27300 têtes
Bovin	4700 têtes

Ces élevages correspondent à une production estimée dans le tableau 4 suivant :

Tableau 2: Production animale estimée dans la région d'étude

Production de viande rouge	4700 tonnes/an
Production de viande blanche	2240 tonnes/an
Production d'œufs	27561270 œufs/an
Production laitière	44 000000 litres/an

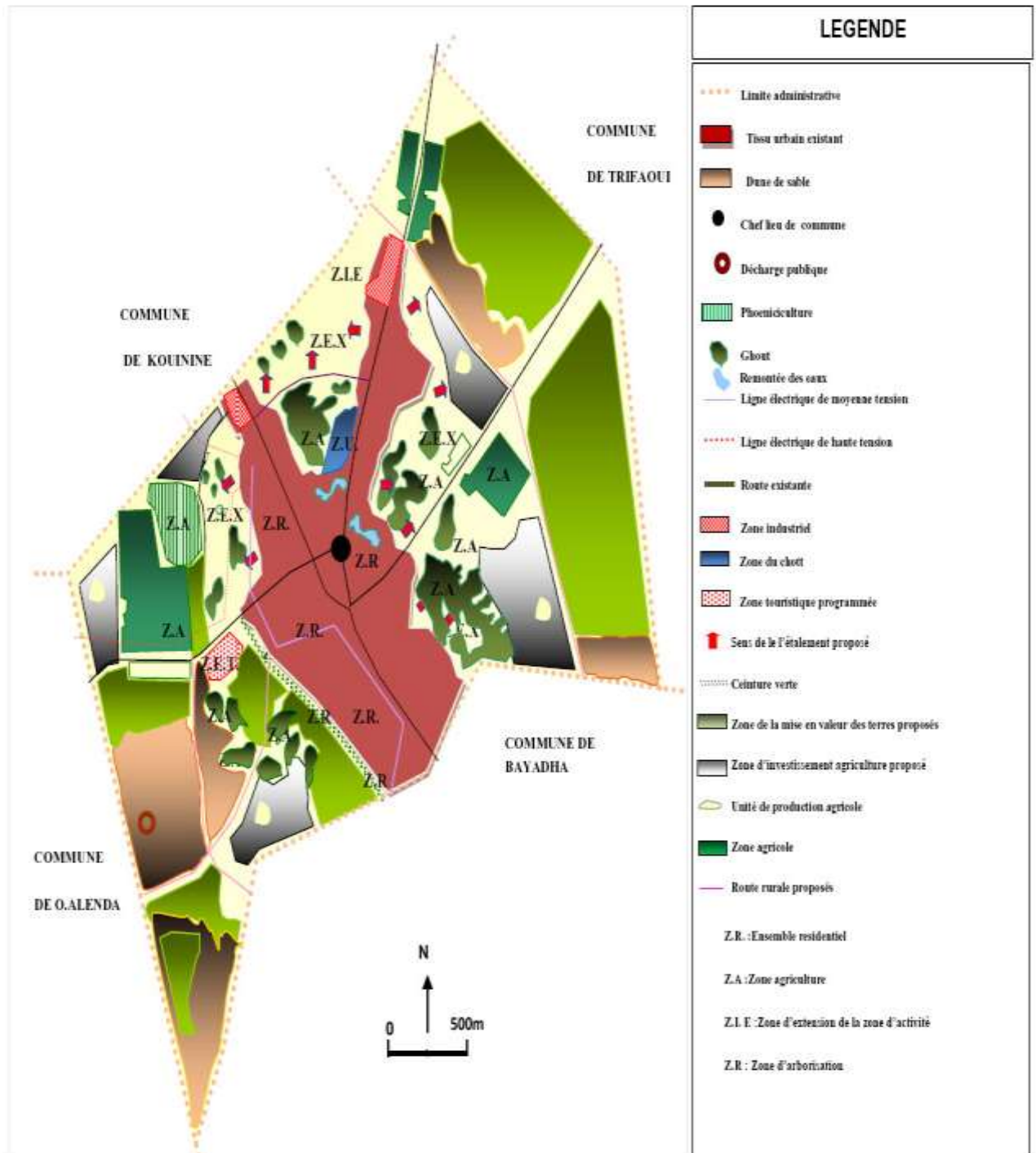


Figure 2 : Situation économique de la commune d'El Oued (DSA2018)

I.2.2 Répartition administratif et démographique :

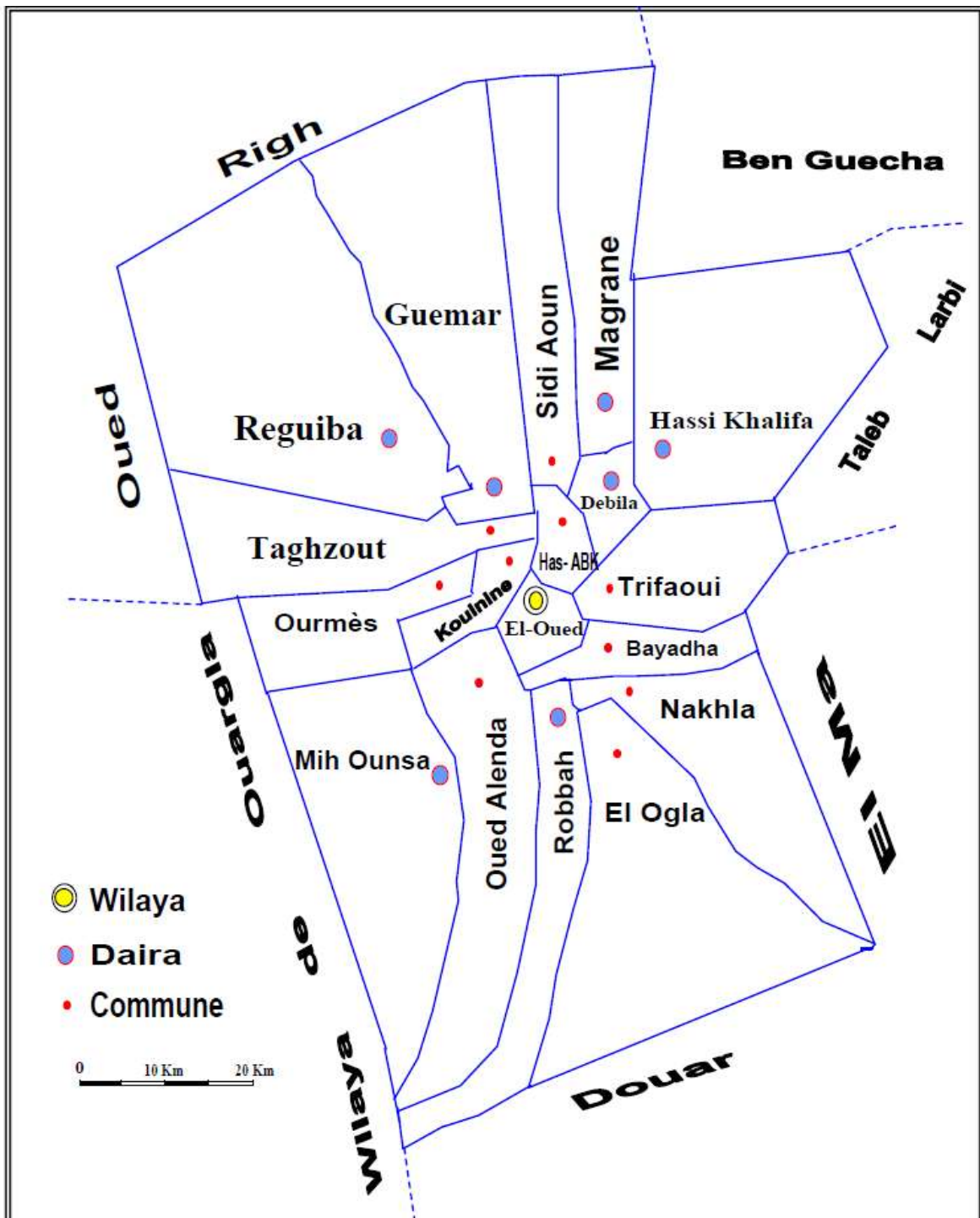


Figure 3 : Répartition administrative des communes d'Oued Souf

(DRE d'El-Oued 2019)

Tableau 3: Surface et population de la vallée du Souf par commune

N°	Commune	Population (hab.)	Superficie (Km ²)	Densité populaire (hab/km ²)
1	Hassi Khalifa	43255	1112	38.89
2	El-Ogla	8620	1352	6.37
3	MihOuansa	23885	1111	21.49
4	El-Oued	185615	77	2410.58
5	Robbah	29685	499	59.48
6	Oued Allenda	8545	712	12.00
7	Bayadha	43720	139	314.53
8	Nakhla	18040	700	25.77
9	Guemar	57220	1264	45.26
10	Sidi Aoun	15950	480	33.22
11	Trifaoui	11375	474	23.99
12	Magrane	32115	618	51.96
13	Ourmes	7540	443	17.02
14	Kouinine	14395	116	124.09
15	Reguiba	58610	1966	29.81
16	Taghzout	18560	539	34.43
17	Debila	33960	78	435.38
18	Hassani Abdelkerim	32030	58	552.24
19	Hamraia	7370	2444	3.01
20	Taleb Larbi	14905	1110	13.42
21	Douar El-Maa	9395	17813	0.52
22	Ben Guecha	6390	2646	2,41
23	Still	7540	904	8,34
24	M'rara	11710	1132	10,34
25	Sidi Khalil	8550	840	10.17
26	Tendla	11515	978	11,77
27	El-Meghaier	66905	1532	43.67
28	Djamaa	71905	780	92.18
29	Oum Tiour	13430	2116	6.34
30	Sidi Amrane	27265	552	49.39
	Totaux	900000	44586	21.88

Source : (DBSP d'El-Oued, FIN2019)

D'après le tableau 5, notons que :

- ❖ la commune la plus peuplée est El-Oued avec une densité de l'ordre de (2337.07hab. /km²)
- ❖ la commune de Hassani Abdelkrim se classe après l'oued avec une densité de (537.06hab. /km²),
- ❖ la commune El-Ogla a la moindre densité populaire égale à (6.20hab. /km²).

I.3. Topographie d 'El-Oued :

La région d'Oued Souf appelée aussi région du Bas-Sahara caractérisée par une faible altitude au Sud-est du pays.

- Le point le plus haut se trouve à la côte 125m dans la commune d'Essoualah,
- Le point le plus bas se trouve à la cote -4 m dans la commune de Réguibia (Foulia), (ANRH, 2019).

L'altitude moyenne de la région est de 61 mètres et marque une diminution 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.

Tableau 4: Altitude moyenne des communes d'Oued Souf

N°	N° Commune	Altitude Moyenne (m)	N°	N° Commune	Altitude Moyenne (m)
1	Hassi Khalifa	77	10	Sidi Aoun	54
2	El-Ogla	91	11	Trifaoui	81
3	MihOuansa	91	12	Magrane	60
4	El-Oued	77	13	Ourmes	85
5	Robbah	93	14	Kouinine	75
6	Oued Allenda	83	15	Reguibia	57
7	Bayadha	90	16	Taghzout	78.5
8	Nakhla	85	17	Debila	62
9	Guemar	64	18	Hassan Abdelkerim	66

Source : (DRE d'El-Oued, 2019)

I.4 : Stratigraphie régionale :

D'après (Cornet 1964, Bel 1968) et les coupes de sondages établies à partir des forages, les profondeurs des étages varient d'une région à l'autre.

Sur la base des logs de forage de l'Albien faite par l'ANRH (1993) sur la région d'Oued-Souf, nous citons les principales strates repérées dans cette région, en allant de la plus ancienne vers la plus récente.

I. 4.1 : Formation de l'ère Secondaire :**I.4.1.1 : 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.

I.4.1.2 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.

I.4.1.3 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.

I.4.1.4 Le Vraconien :

C'est une zone de transition en tire l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques. On rencontre aussi des sables avec passages des grés à ciment calcaires. Cet étage constitue la couverture de l'albien par des niveaux argileux. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude varie entre 250 m et 300 m.

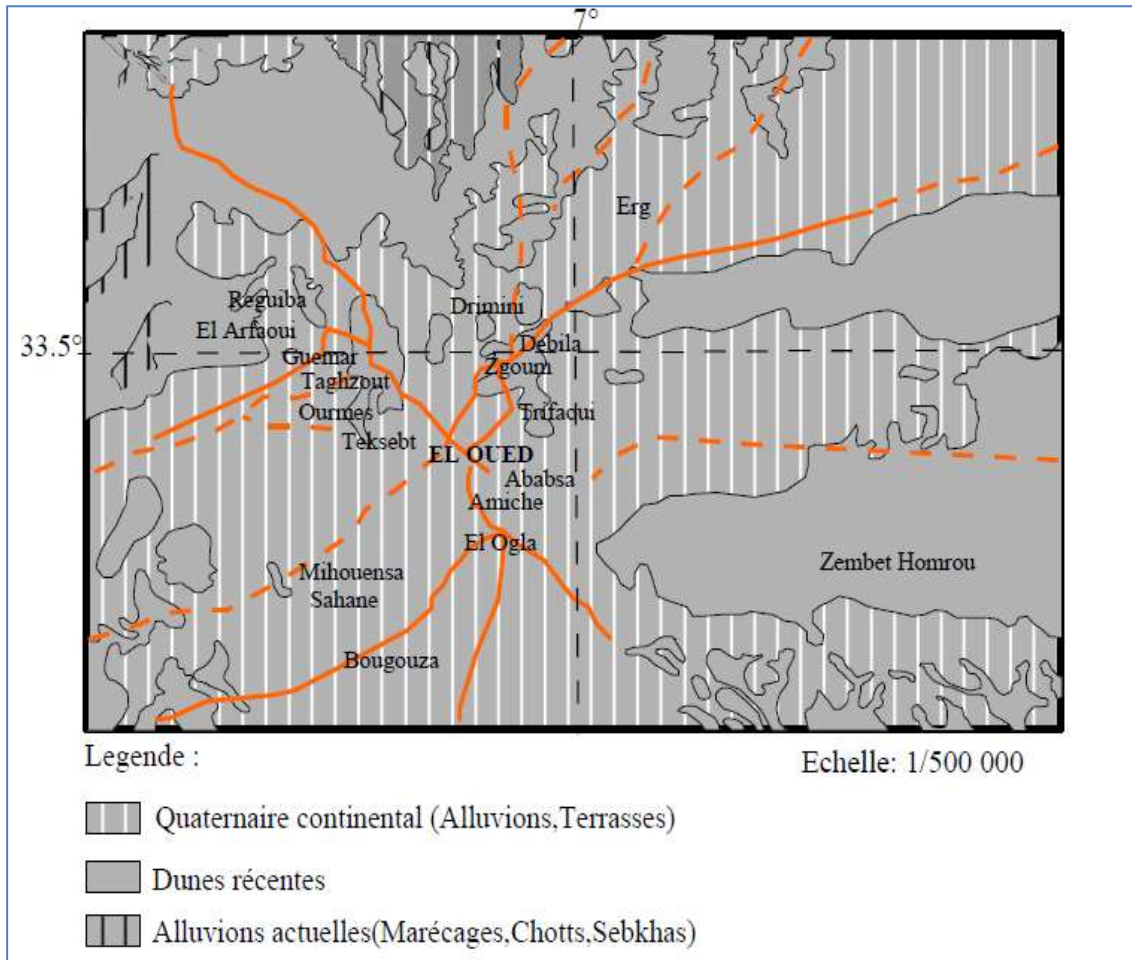
I.4.1.5 LE Cénomaniens :

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 de d'Anhydrites. Cet étage joue le rôle d'un écran imperméable. La limite inférieure de cet étage est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui le distingue nettement. La

limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspond à la base du Turonien.

I.4.1.6. Le Turonien

Cet étage représente la base du complexe terminal. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies microcristallines compactes avec des intercalations de calcaires et parfois de marnes. Les forages de la région montrent que sa épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 m.



Bensaddik / Aouadi (2014)

Figure 4 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gouskov)

I.4.1.7 Sénonien :

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

I.4.1.7.1. Sénonien lagunaire :

Le sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporitique avec des argiles ou ces dernières sont aisément différenciables de celles du Turonien. Il est constitué également d'anhydrite, de calcaires dolomitiques, d'argiles et surtout de bancs de sel massif dont l'épaisseur avoisine les 150 mètres.

La limite supérieure de cette formation coïncide avec le Turonien de la dernière intercalation anhydritique.

I.4.1.7.2 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 et de dolomies vacuolaires. Son épaisseur dépasse parfois 300 mètres. Il faut mentionner par ailleurs l'existence d'une continuité lithologique entre le Sénonien carbonaté et l'Eocène qui présentent tous les deux des calcaires de même nature avec la présence de nummulites.

I.4.2 Formation de l'ère Tertiaire :

I.4.2.1. L'Eocène :

Cet étage est formé par des sables et des argiles parfois. Nous rencontrons du gypse et des graviers. Dans la région d'El-Oued cet étage est carbonaté à sa partie inférieure, alors que sa partie supérieure est marquée par des argiles de types lagunaires. L'épaisseur de cet étage varie entre 150 m et 200 m.

I.4.2.2. LE Mio-Pliocène :

Ce dernier repose en discordance indifféremment sur le primaire, d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part. Il appartient à l'ensemble appelé communément complexe terminal (CT). La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montre que le Mio-Pliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo-argileux avec des intercalations gypseuses, marneuses et des passages de grès. Sur toute *l'étendue* du Sahara oriental, Bel et De marne séparent cet horizon en quatre niveaux :

❖ a. NIVEAU ARGILEUX:

Il présente une faible épaisseur, son existence n'affecte que la partie centrale de Sahara oriental.

❖ b. NIVEAU GRESO-SABLEUX

C'est le plus puissant par rapport aux autres, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara. C'est en fait à ce niveau que se trouve le principal horizon aquifère- appelé aussi complexe terminal (CT).

❖ c.NIVEAU ARGILO-SABLEUX

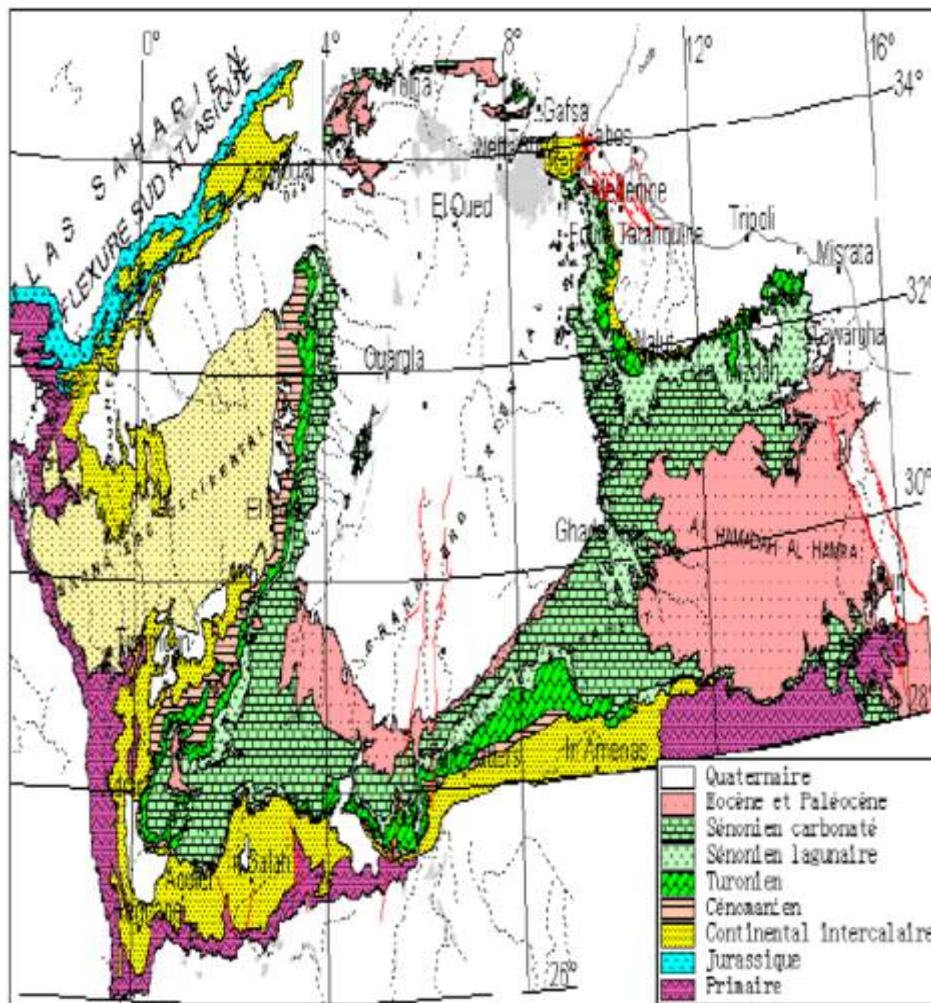
Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique ; ses limites demeurent toujours confondues

❖ d.NIVEAU SABLEUX

Ce niveau constitué le deuxième horizon aquifère du complexe terminal. Donc du point de vue hydrogéologique les deux niveaux sableux (b et d) présentent un grand intérêt. Ils correspondent à la nappe des sables du complexe terminal.

I.4.3 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.



(MIMOUNE /ZOUBEIDI 2014)

Figure 5 : Plan géologique du Grand Erg Oriental, (Baba Sy, M., 2005)

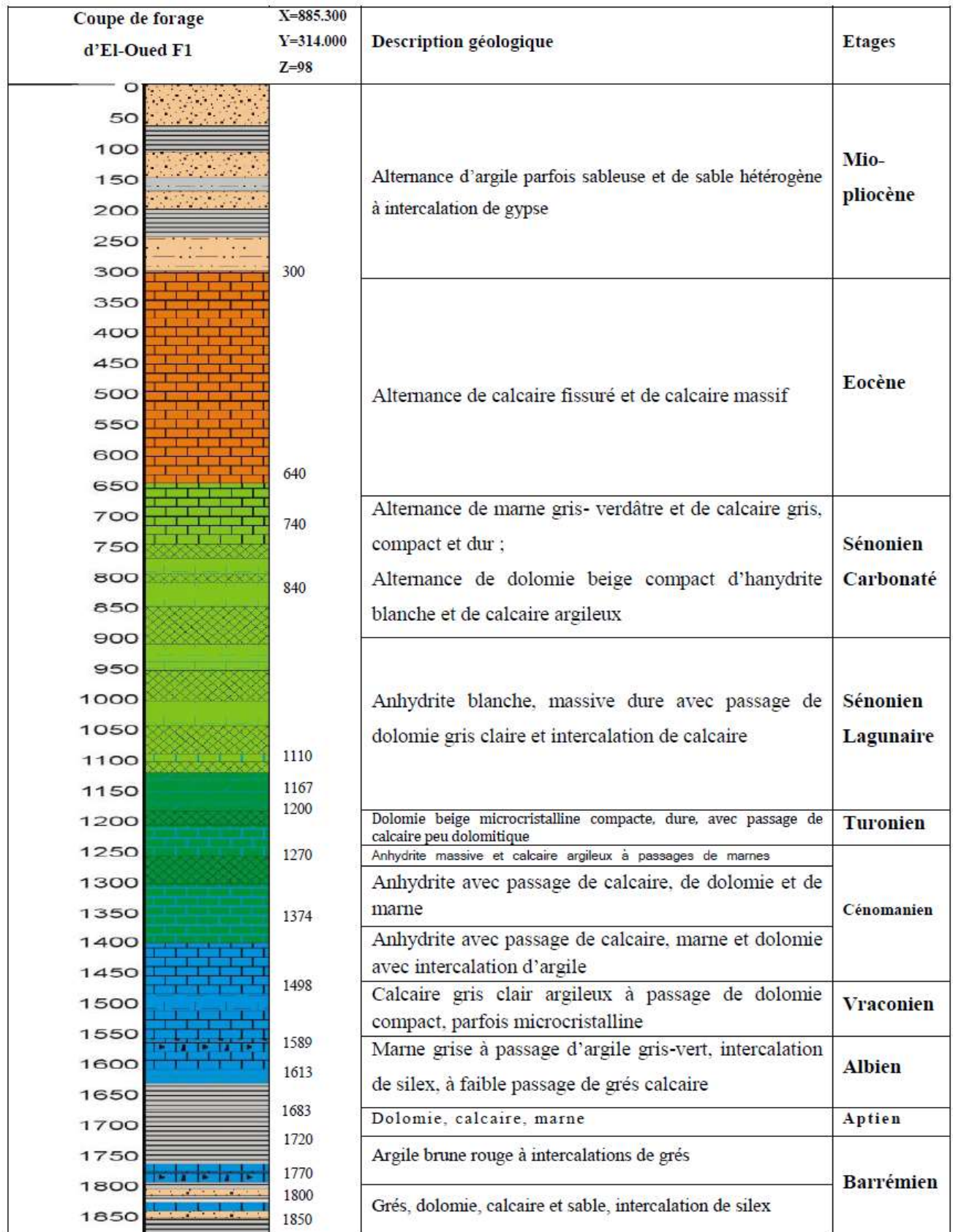


Figure 6 : Log de forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993).

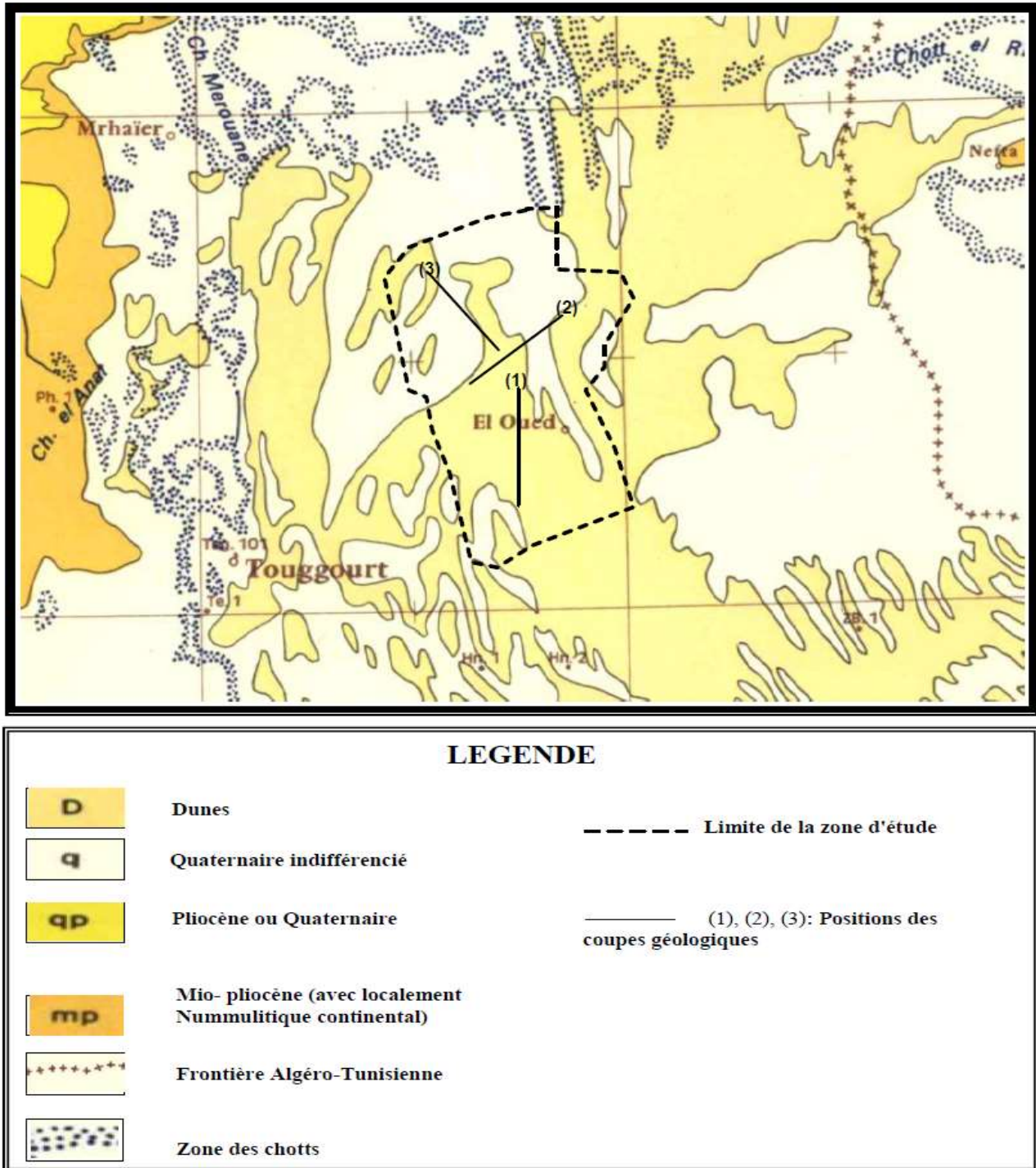


Figure 7 : Carte géologique de la zone d'étude (extrait d'après la carte du Sahara Septentrional (G. Busson 1970) in Khechana, S. 2014.

I.5 Interprétation des coupes géologiques :

L'objectif de ces coupes géologiques est d'établir une corrélation lithologique du sous-sol, d'identifier l'extension géographique, l'épaisseur approximative des couches ainsi que l'épaisseur utile de la nappe phréatique dans la région d'El-Oued. Ces coupes sont vérifiées ensuite par les sondages électriques verticaux) (BOUSALSAL /B 2009)

I.5.1 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**). (Figure N°19). (BENSEDIK AOUADI 2014).

Coupe corrélatrice extraite à partir des logs lithologiques des forages

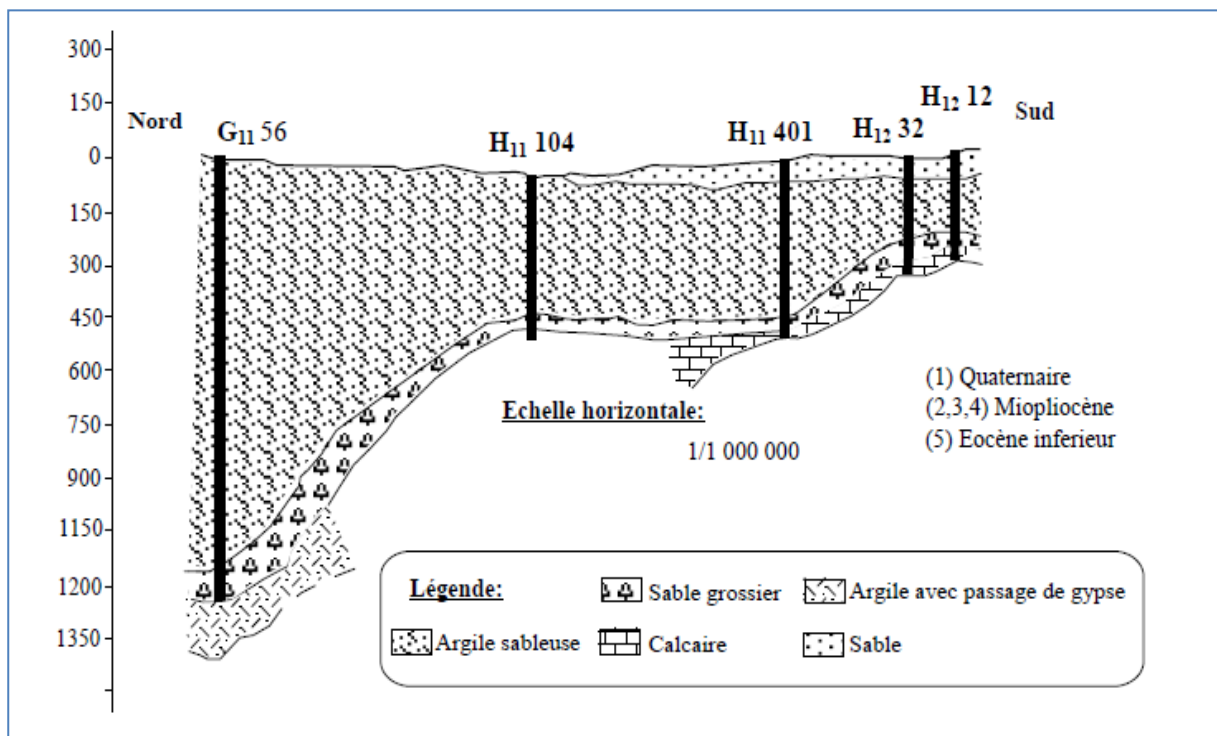


Figure 8 : Coupe géologique N° 01 (DROUCHE 2008)

I.5.2 Coupe N°2 :

La coupe N° 2 orientée NE-SW, en allant de la région dite Merzaga vers Ouermès, on remarque au niveau du forage (**H12-52**), l'absence du Quaternaire, ce ci 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**) (Figure N°20). (MIMOUNE / ZOUBEIDI 2014).

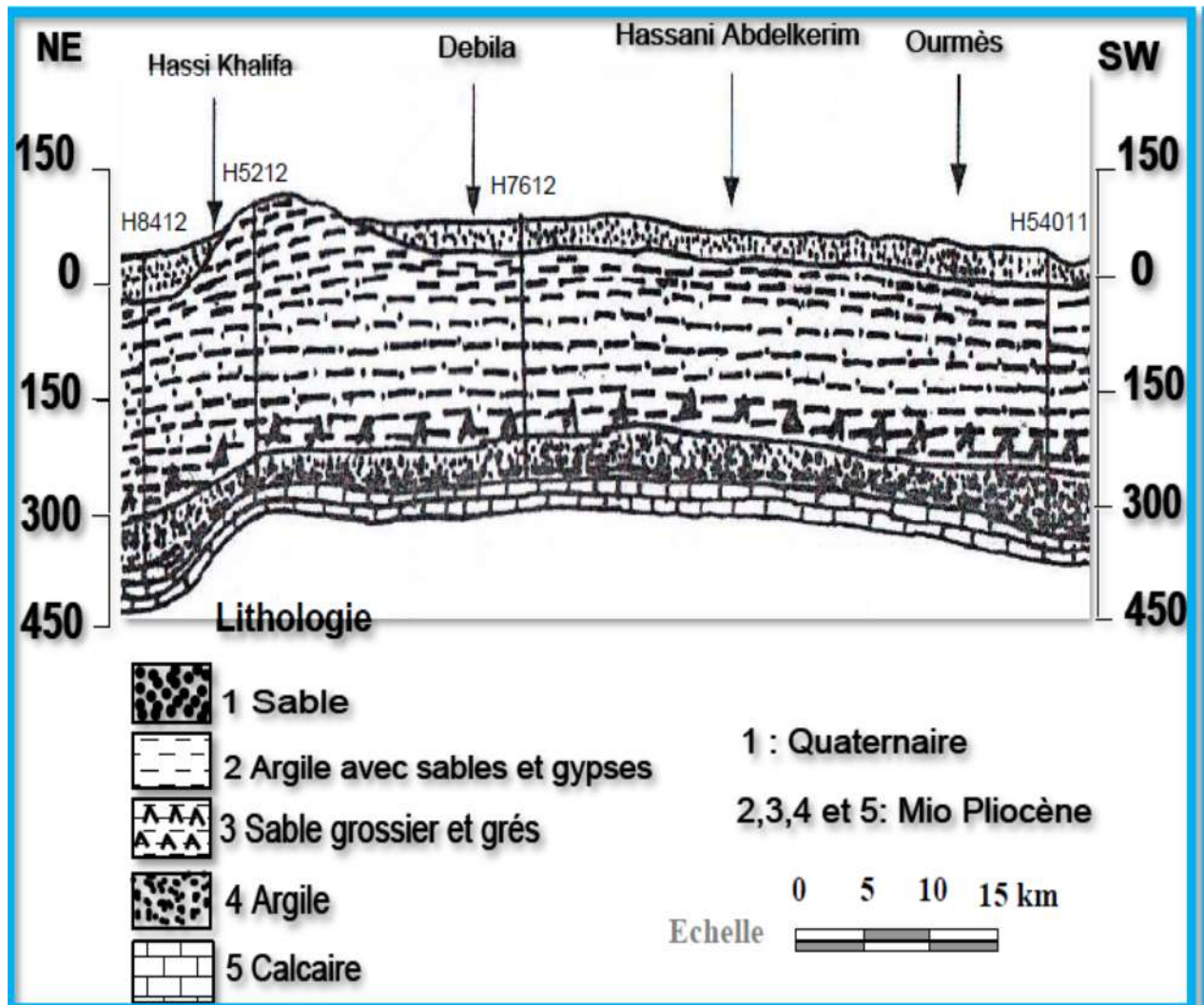


Figure 9: Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)

I.5.3 Coupe N°03 :

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**.(Figure N°21). (MIMOUNE/ZOUBEIDI 2014).

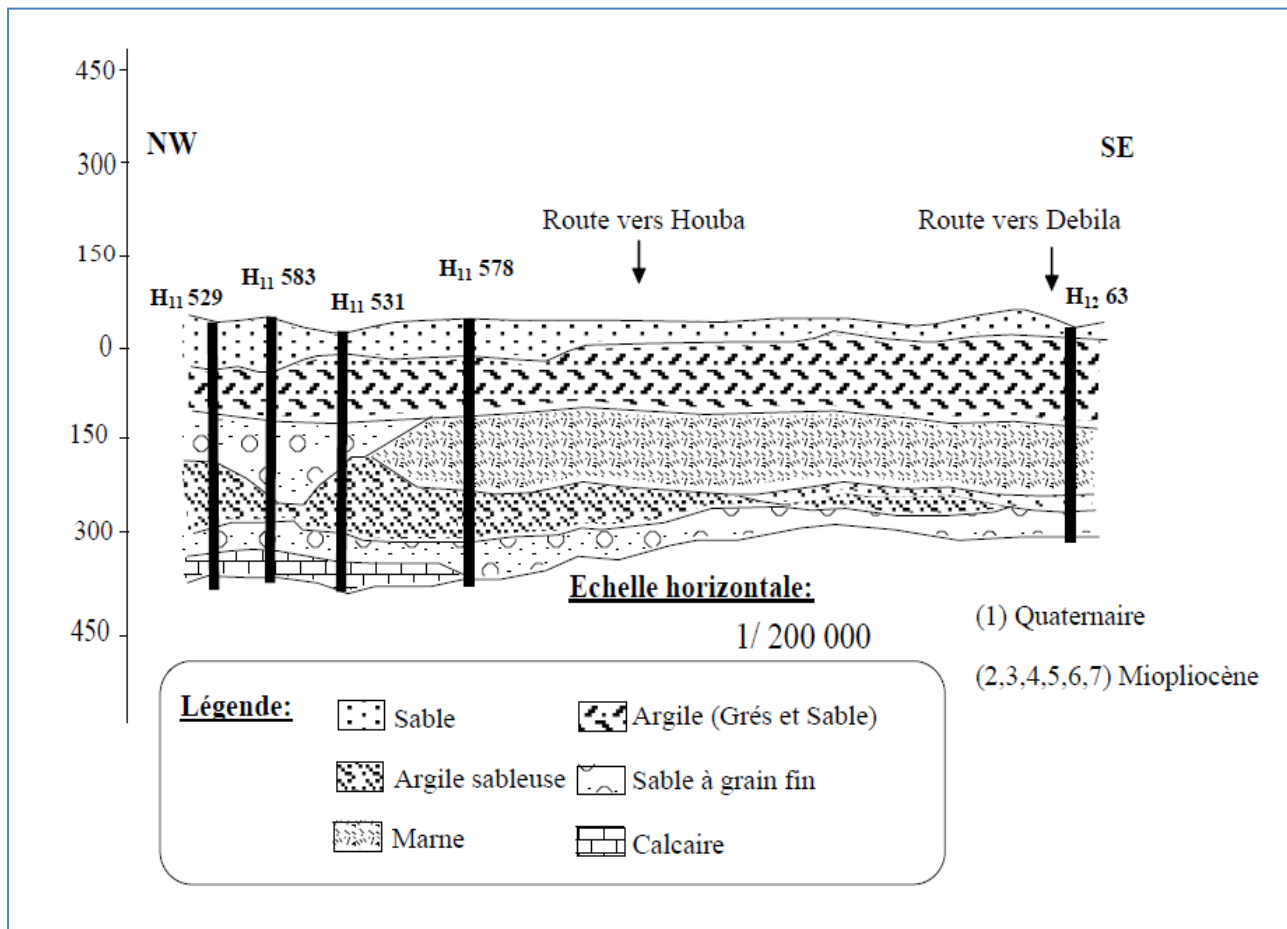


Figure 10: Coupe géologique N° 03(DROUCHE 2008)

I.6. Tectonique :

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

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacé 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 si nous désirons retracer l'évènement paléogéographique du Souf, 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 Nord-Ouest de la région de Foulia et se situe à moins de 10 mètres de profondeur aux extrémités Nord-est 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.(MIMOUNE / ZOUBEIDI2014 _ KHECHNA /S 2014).

I.7 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 côte est relativement faible, le point le plus bas correspond à la cote 130m alors que le plus haut atteint la 60m (MIMOUNE / ZOUBEIDI 2014 _ KHECHNA /S 2014)

Conclusion:

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. Du point de vue topographique l'altitude diminue du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est pour atteindre des valeurs négatives au niveau des chotts.

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

Ces conditions ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès.

La stratigraphie de la région est caractérisé par des séries sédimentaires allant de Crétacé inférieur jusqu'aux dépôts de Quaternaire

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

Chapitre II
Hydroclimatologie

Introduction :

La connaissance des caractéristiques hydro climatologiques est nécessaire pour l'étude hydrogéologique, elle est indispensable pour évaluer l'alimentation de réservoir souterrain (nappe phréatique) par infiltration, et pour l'établissement d'un bilan hydrique.

Dans ce chapitre, nous allons travailler avec une série de données climatologiques de la répartition des précipitations et températures moyennes mensuelles interannuelles enregistrées sur une période de 25 ans (1993-2018);

Et la répartition des précipitations et températures moyennes annuelles enregistrées sur une période de 16 ans (2002-2018); Fournies par l'Office National de Météorologie (ONM) à Guemar au nord de la ville d'Oued Souf.

Tableau 5: Coordonnées géographiques de la station météorologique de la région d'El- Oued

Station	Code A.N.R.H	Altitude (m)	Longitude	Latitude
Guemar	13 04 09	64	06°47'E	33°30'N

II.1.1. Température :

La température atteint parfois 46°C en été, alors qu'elle peut atteindre 5°C et 21°C en hiver. Dans les oasis règne un microclimat non aride créé par la densité de la palmeraie dans les ghouts.

II.1.1.1. Températures moyennes mensuelles interannuelles

Le tableau ci-dessous montre les valeurs des températures mensuelles interannuelles dans la région d'étude sur la période 1993/2018.

Tableau 6: Températures moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf (1993-2018)

Températures (°C)	MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	T°C Moyenne annuelle
	Min	22,63	17,65	10,21	6,05	5,23	6,30	10,52	14,69	18,81	23,57	26,64	27,09	15,78
	Max	35,47	30,61	22,97	17,92	17,61	19,32	24,05	28,62	33,33	38,54	41,06	41,15	29,30
	Moy	29,05	24,13	16,59	11,98	11,42	12,81	17,28	21,65	26,07	31,06	33, 85	34,62	22,54

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

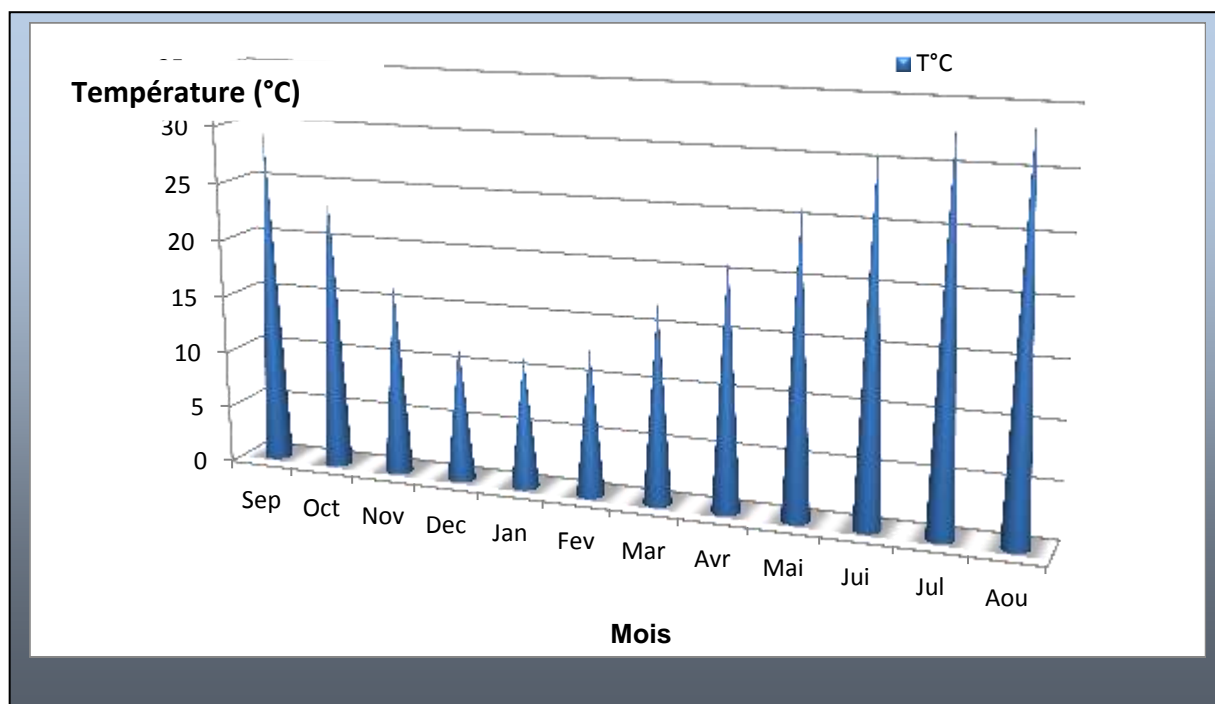


Figure 11: Histogramme de Températures moyennes mensuelles (1993-2018)

Selon le tableau (07) et comme le montre le graphe (06) nous avons les résultats suivants:

- le maximum des moyennes mensuelles est enregistré au mois d'Août (34.62°C),
- le minimum est observé au mois de Janvier (11.42°C).

Deux périodes climatiques se distinguent:

- ❖ une période froide qui dure de Novembre à Avril avec un minimum durant le mois de janvier 11.42°C
- ❖ une période chaude qui va du mois de Mai jusqu'au mois de Septembre avec un maximum de température relevé pendant le mois d'Août 34.62 °C.
- ❖ la moyenne annuelle est de l'ordre de 22,54°C

II.1.1.2. Températures moyennes annuelles :

Le tableau II-3 montre la répartition moyenne annuelle de température durant la période (2002-2018).

Tableau 7: Répartition des moyennes annuelles de température sur la période (2002-2018)

Année	T(C°)	Année	T(C°)
2002/2003	22.75	2010/2011	21.45
2003/2004	23.4	2011/2012	21.2
2004/2005	22.7	2012/2013	22.8
2005/2006	22.4	2013/2014	22.7
2006/2007	22.35	2014/2015	22.8
2007/2008	22.6	2015/2016	23
2008/2009	22.45	2016/2017	22.9
2009/2010	22.0	2017/2018	23.2
		Moyenne annuelle	22.45

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

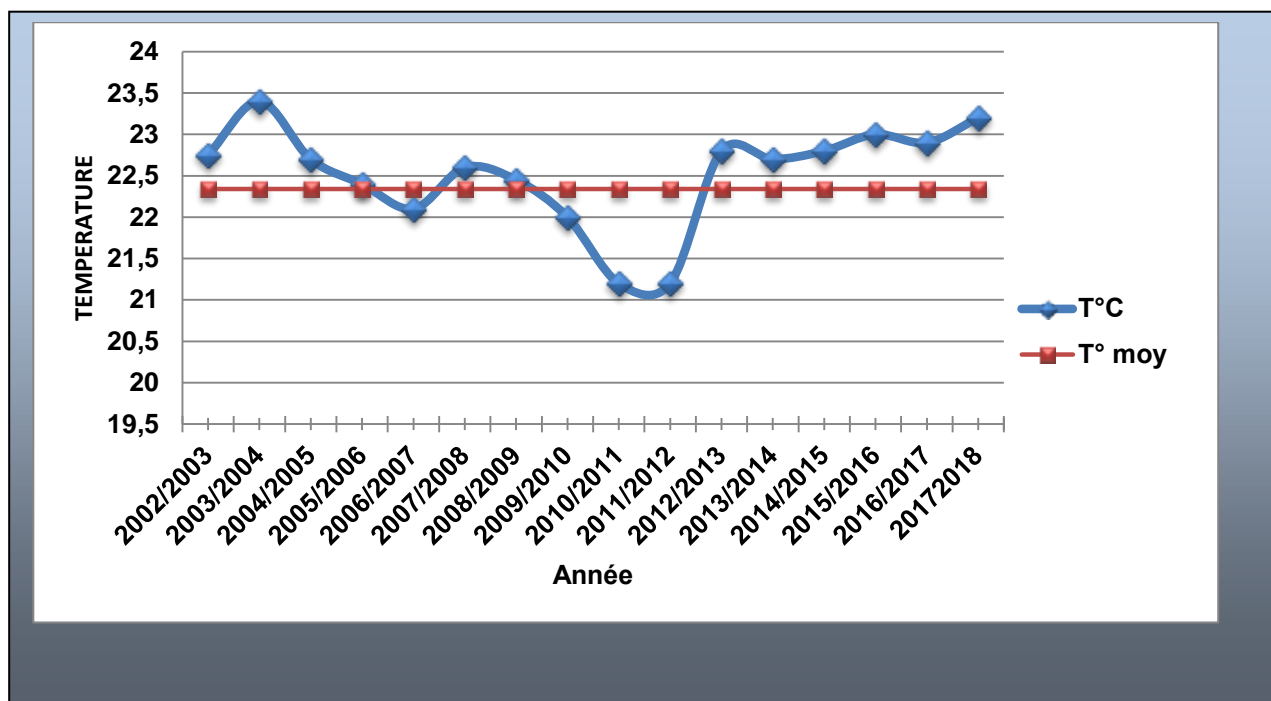


Figure 12: Répartition moyenne annuelle des températures (2002/2018)

La figure 07 montre la répartition des températures moyennes annuelles :

- L'année la plus chaude est 2003/2004 avec une température moyenne $T=23.4^{\circ}\text{C}$
- L'année la plus froide est l'année 2011/2012 avec une moyenne de température égale à 21.2°C .

II.1.2. Précipitation :

II.1.2.1. Précipitations moyennes mensuelles :

Tableau 8: Précipitations moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf (1993-2018)

MOIS	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Σp Annuelle (mm)
P(mm)	7,49	7,36	6,93	7,73	20,88	1,32	7,21	11,58	1,65	0,99	0,16	2,65	75,95

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

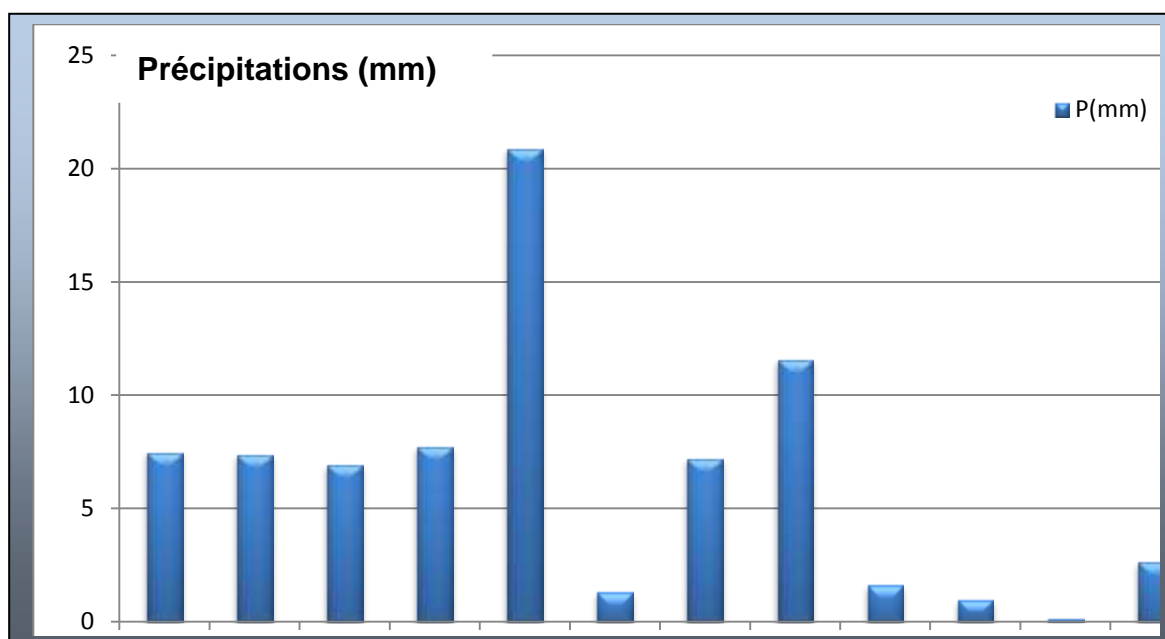


Figure 13: Histogramme de Précipitations moyennes mensuelles (1993-2018)

La courbe obtenue du tableau (II-2) montre une variabilité des précipitations dans le temps nous avons :

- ❖ Le maximum des moyennes mensuelles interannuelles est enregistré pendant le mois de janvier avec une valeur de 20.88 mm
- ❖ Le minimum est enregistré pendant le mois de juillet avec une valeur de 0,16 mm.
- ❖ La précipitation annuelle est de l'ordre de 75,95 mm.

II.1.2.2. Précipitations moyennes annuelles :

Le tableau II.5 montre la répartition moyenne annuelle de température durant la période (2002-2018).

Tableau 9: Répartition des précipitations moyennes annuelles (2002-2018)

Année	P(mm)	Année	P(mm)
2002/2003	47.12	2010/2011	102.78
2003/2004	48.91	2011/2012	197
2004/2005	74.44	2012/2013	40.51
2005/2006	97,9	2013/2014	27.2
2006/2007	142.7	2014/2015	21.1
2007/2008	57.94	2015/2016	23.5
2008/2009	68.72	2016/2017	28.4
2009/2010	44.46	2017/2018	43.85
		Moyenne annuelle	75.38 mm

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

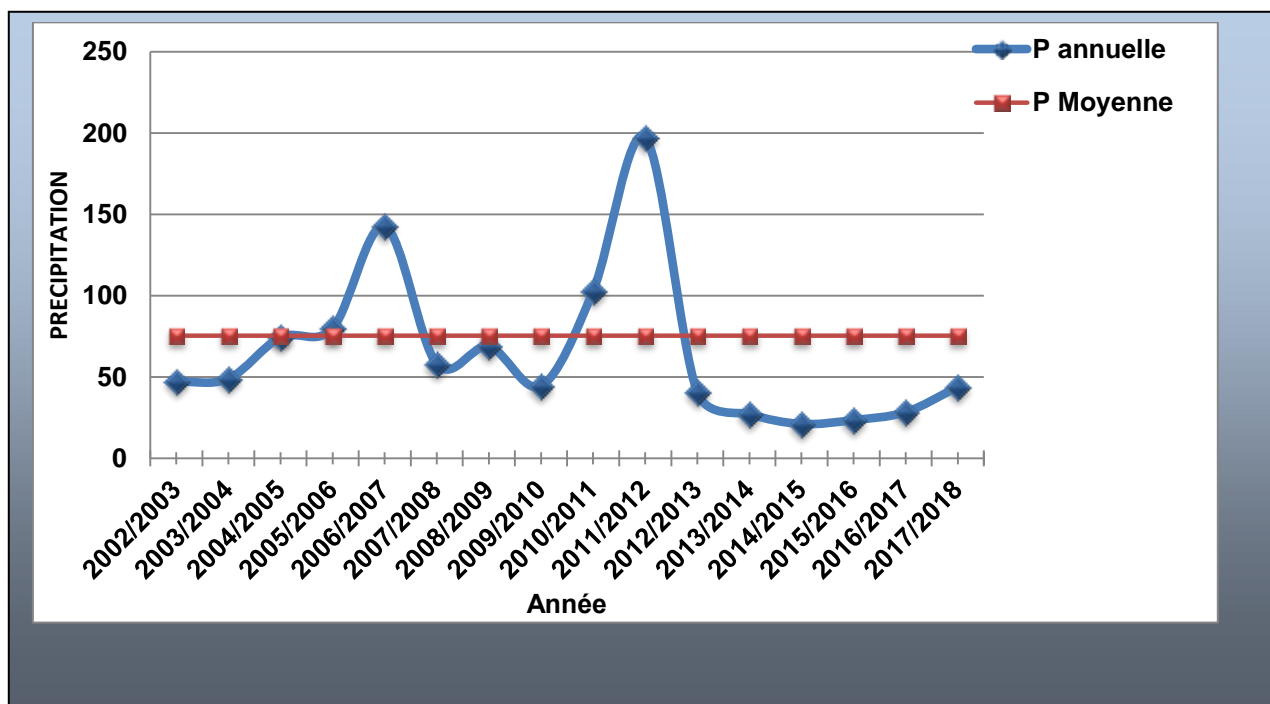


Figure 14: Répartition des moyennes annuelles de précipitation (2002-2018)

L'analyse des données pluviométriques enregistrées à la station météorologique de l'aéroport de Guemar sur la période allant de 2002 jusqu'à 2018 permet de dire que :

- l'année la plus pluvieuse était celle de (2011/2012) avec 197 mm/an
- l'année la plus sèche était celle de (2014/2015) avec 21.1 mm/an

II.1.3. Indice d'aridité :

Cet indice permet d'identifier le type de climat dans la région d'étude à l'aide de la formule de DEMARTONE.

$$I = P / (10 + T)$$

Avec :

I : indice d'aridité.

P : précipitation moyenne annuelle (mm).

T : température moyenne annuelle (°C).

Application numérique:

$$P = 75,95 \text{ mm}$$

$$T = 22,54^\circ\text{C} \quad \text{Donc } I = 2,33$$

Tableau 10: Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De Martonne)

Classement de l'indice d'aridité	Type de climat
$I < 5$	Climat hyper-aride
$5 < I < 7.5$	Climat steppique
$7.5 < I < 10$	Climat semi-aride
$10 < I < 20$	Climat hyper-aride
$20 < I < 30$	Climat tempéré
$= 30$	Climat humide

$I = 2,33 < 5$, Ce qui confirme que la région d'El-Oued est caractérisée par un climat hyper aride.

II.1.4. Diagramme pluviothermique :

En se basant sur les données des précipitations et des températures mensuelles sur la même période d'observation, on peut établir la courbe pluviothermique dont le but est de déterminer la période sèche et celle humide.

Un mois sec est celui où le total moyen des précipitations (mm) est inférieur ou égale au double de la température moyenne (°C) du même mois.

Cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double des précipitations (in Baygnons).

Lorsque les températures passent au-dessus de la courbe des précipitations, la période correspondante est déficitaire en eau; et lorsque la courbe des précipitations passe au-dessus de celle des températures, la période correspondante est humide.

Tableau 11: Couples température/ précipitation mensuelle interannuelle de la région d'Oued Souf (1993-2018)

MOIS	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2T °C	22.84	25.62	34.56	43.3	52.14	62.12	67.7	69.24	58.1	48.26	33.18	23.96
P(mm)	20,88	1,32	7,21	11,58	1,65	0,99	0,16	2,65	7,49	7,36	6,93	7,73

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

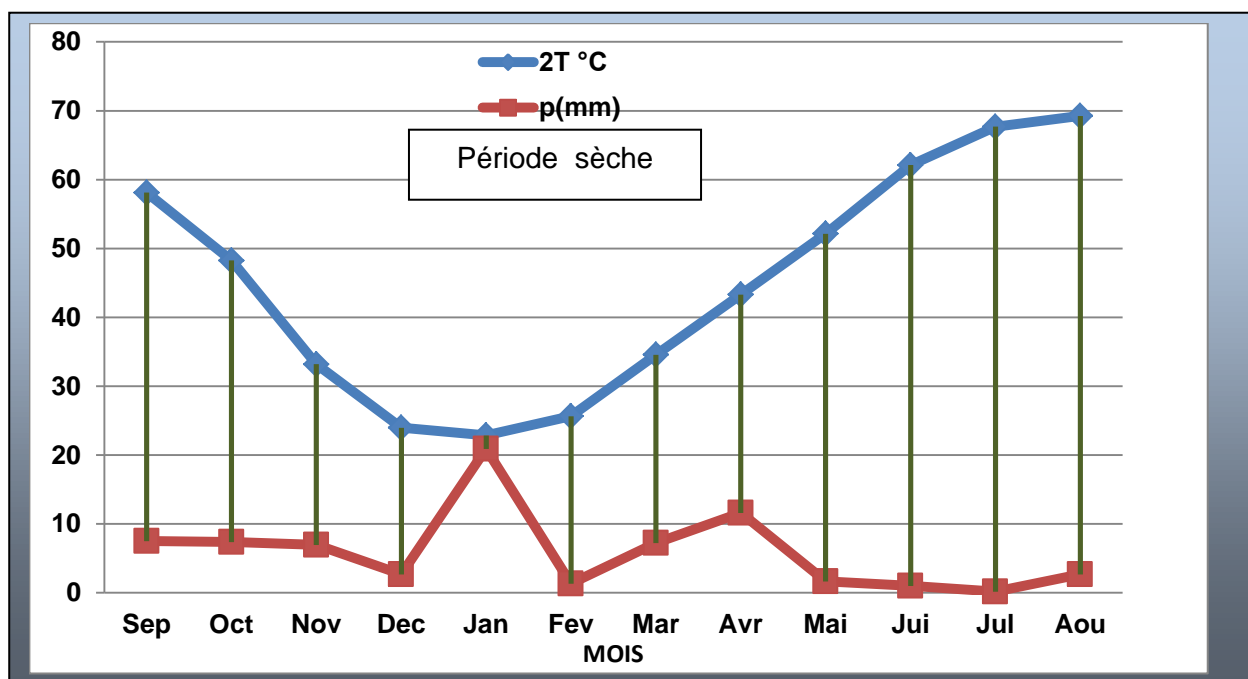


Figure 15: Diagramme pluviothermique de la station de Guemar durant la période (1993-2018)

D'après le diagramme, nous constatons que la sécheresse est permanente durant toute l'année ; à cause des faibles précipitations et des températures élevées et l'absence totale de la période humide, même pour le mois de janvier qui est marqué par la température la plus basse (11,42°C) et la précipitation la plus élevée (20,88 mm).

II.1.5. L'humidité :

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

Tableau 12: Humidités moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf (1993-2018)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Humidité %	47,56	53,60	57,78	63,42	62,44	54,08	48,58	45,85	40,52	36,29	33,42	37,35	48,41

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

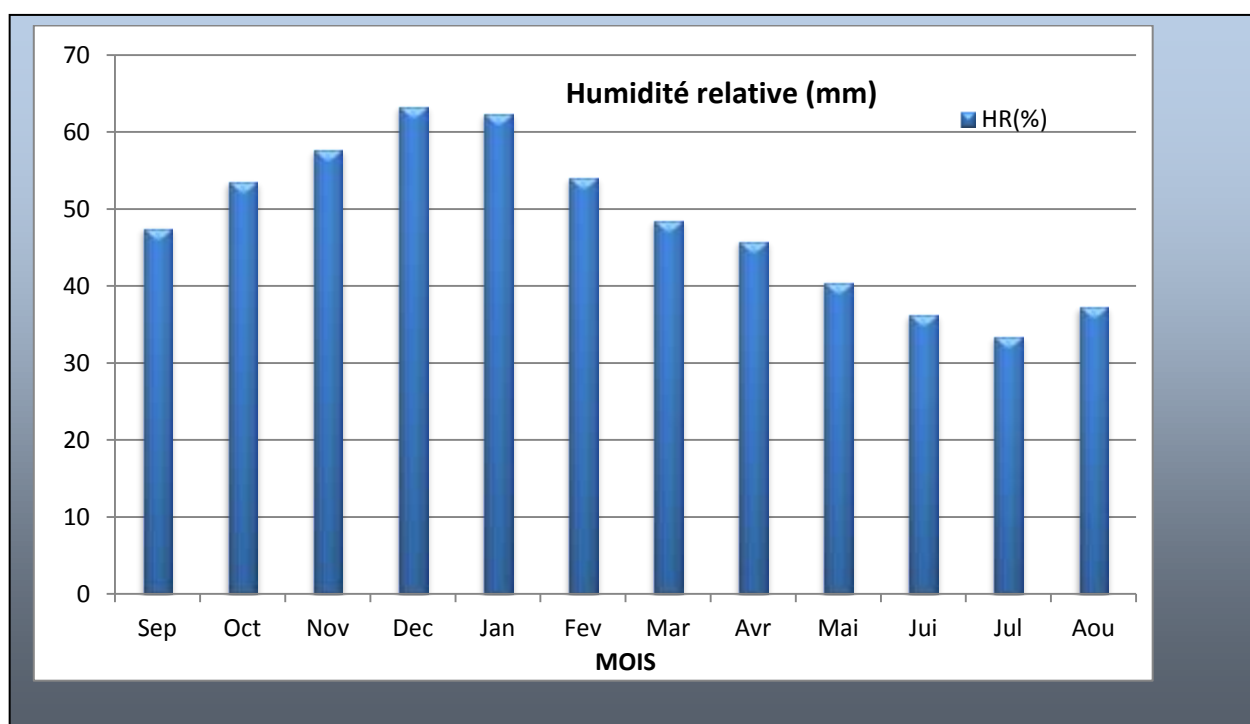


Figure 16: Histogramme de l'humidité relative moyenne mensuelle (1993-2018)

L'histogramme (Fig N°11) permet de distinguer les mois secs des mois relative menthumides.

On remarque que :

- ✓ les mois humides sont Janvier, Février, Octobre, Novembre, Décembre
- ✓ les mois secs caractérisant le reste de l'année.

D'après le tableau (Tableau II.7)on remarque que :

- un minimum enregistré pendant le mois de juillet avec une valeur de l'ordre de 33.42 %, c'est la saison d'été.

- un maximum enregistré pendant le mois de décembre avec une valeur de 63,42 %, c'est la saison d'hiver.
- Humidité annuelle de l'ordre de 48,41%

II.1.6. Le vent :

Les vents sont fréquents, les plus violents se situent au printemps.

La direction dominante est Nord-Est, à l'exception des mois d'hivers dont la direction est Sud-Ouest.

Le sirocco (Chihili) présente le vent caractérisant la saison d'été souffle fréquemment dans la région, prenant un sens Sud-Nord et jeter des courants d'air chaud parfois avoisiner des vagues de sables.

Il faut aussi parler des vents de sables qui ont leurs saisons de prédilection entre février et avril (durant le printemps). Mais heureusement, les véritables tempêtes restent très rares.

Tableau 13: Vitesses des vents moyennes mensuelles de la région d'Oued Souf(1993-2018)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	moy
Vent (Km/h)	17,10	15,44	14,00	15,27	17,27	17,36	18,09	19,64	18,82	18,30	15,60	17,73	17,05

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

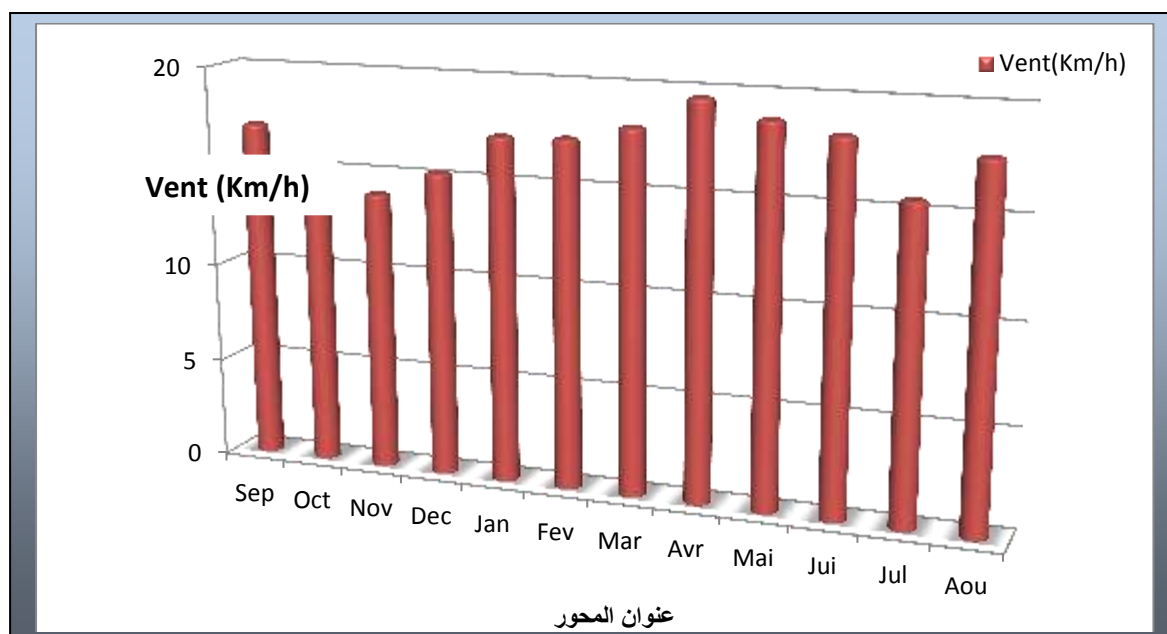


Figure 17: Histogramme des vitesses moyennes mensuelles du vent en Km/h (1993-2018)

D'après l'histogramme on peut remarquer que la vitesse du vent moyenne varie entre 15,27Km/h enregistrée durant le mois de décembre et 17,73 m/s pour le mois d'avril, Les vitesses du vent moyennes annuelles est 17,05 m/s.

II.1.7. Evaporation :

Le tableau suivant (15) porte les valeurs moyennes mensuelles de l'évaporation période (1994-2018).

L'évaporation la plus élevée se produit en juin, Juillet et Août, et la plus faible en janvier. En moyenne elle est de 47.38 mm par an.

Tableau 14: Evaporation moyenne mensuelle à Oued Souf en (1993-2018)

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	moy
EVAP (mm)	19.98	14.76	9.833	7.865	7,79	9.6	14 .72	20.62	25.57	29.92	33.39	30.79	22.485

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

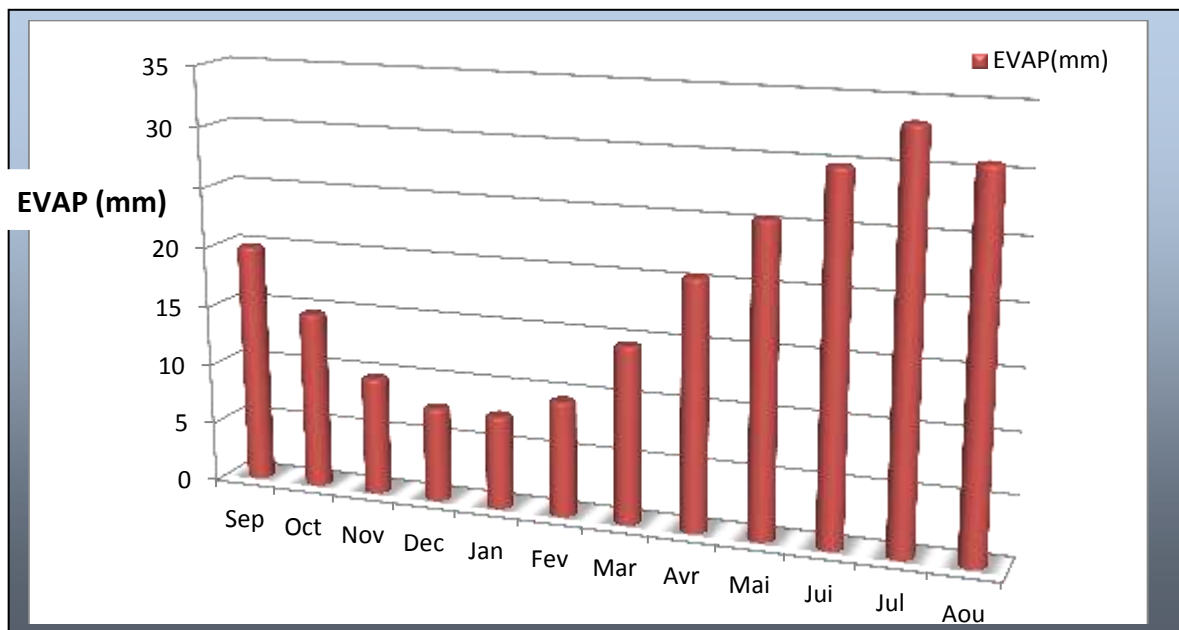


Figure 18: Histogramme de l'évaporation moyenne mensuelle en mm (1993-2018)

II.2. Calcul des paramètres de bilan hydrique :

II.2.1.L'évapotranspiration :

L'évapotranspiration résulte de deux phénomènes : l'un physique (évaporation) et l'autre biologique (Transpiration). Elle est en fonction de plusieurs facteurs tels que climat, humidité, température, l'insolation et aussi la végétation.

II.2.1.1. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'ETP représente la quantité d'eau qui serait évaporée et transpirée si les réserves en eau étaient suffisantes pour compenser les pertes maximales.

La région d'étude est une zone aride, nous avons utilisé la méthode de THORNTWAITE pour calculer l'évapotranspiration potentielle selon les formules suivantes :

$$ETP = 16 \left(\frac{10T}{I} \right)^a K$$

$$a = (1.6 / 100) \times I + 0.5.$$

Avec :

Application numérique: a= 2.47

$$I = \sum i \text{ avec } i = (T / 5)^{1.514}$$

T : Température moyenne du mois considéré en °C

I : indice thermique annuel

i : indice thermique mensuel

a: exposant

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

Notre station se trouve à une latitude 33° 30' N.

Ce terme sera ensuite multiplié par l'ETP du mois : **ETP c = ETP.K**

Tableau 15: Les valeurs mensuelles du coefficient de correction K dans la région d'étude

Mois	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Jui	Jui	Août
K	1.03	0.98	0.89	0.88	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.2	1.14

(O.N.M. El-Oued Guemar, 2018)

II.2.1.2.L'évapotranspiration réelle (E.T.R)

Pour le calcul de l'ETR, nous appliquerons plusieurs méthodes

II.2.1.2.1.Méthode de Thorntwaite

L'évapotranspiration peut être évaluée la formule empirique de Thorntwaite, en se basant sur les conditions suivantes :

- ❖ Si $P-ETP > 0$; c.-à-d. : $P > ETP$, dans ce cas $ETR = ETP$.
- ❖ Si $P-ETP < 0$; c.-à-d. : $P < ETP$, nous avons alors deux cas :

$$A/ \text{ si } P + RFU > ETP \quad \longrightarrow \quad ETR = ETP.$$

$$B/ \text{ si } P + RFU < ETP \quad \longrightarrow \quad ETR = P + RFU$$

II.3. Etablissement du bilan Hydrique :

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

$$P = ETR + EX$$

Avec : P : Précipitation en (mm).

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

EX : Excédent : $EX = R + I$;

R : ruissellement, I : infiltration.

Le tableau (II. 09), résume le calcul du bilan hydrique par la méthode de Thorntwaite pour la station météorologique de Guemar à partir de la pluviométrie et des températures mensuelles.

Tableau 16: Bilan hydrique d'après Thorntwaite (1993-2018)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
P(mm)	7.49	7.36	6.93	7.73	20.88	1.32	7.21	11.58	1.65	0.99	0.16	2.65	75.95
T°	29.05	24.31	16.59	11.98	11.42	12.81	17.28	21.65	26.07	31.06	33.85	34.62	/
K	1.03	0.98	0.89	0.88	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.18	1.2	1.14	/
I	14.35	10.96	6.14	3.75	3.49	4.15	6.53	9.19	12.18	15.88	18.09	18.72	123.43
ETP (mm)	136.4	83.64	29.56	13.07	11.88	15.25	37.83	69.23	119.69	184.47	232	233	933.34
P-ETP	-129	-76.28	-22.63	-5.34	9.00	-13.93	-30.62	-57.65	-118.04	-183.48	-231.8	-230.35	- 1099.12
RFU (mm)	0	0	0	0	9.00	0	0	0	0	0	0	0	9.00
ETR(mm)	7.49	7.36	6.93	7.73	11.88	1.32	7.21	11.58	1.65	0.99	0.16	2.65	66.95
EXC/mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ETPc (mm)	140.58	81.96	26.30	11.52	10.69	13.26	38.96	74.76	141.23	217.67	278.4	265.62	1300.95
DA (mm)	129	76.28	22.63	5.34	0	13.93	30.62	57.65	118.04	183.48	231.8	230.35	1099.08

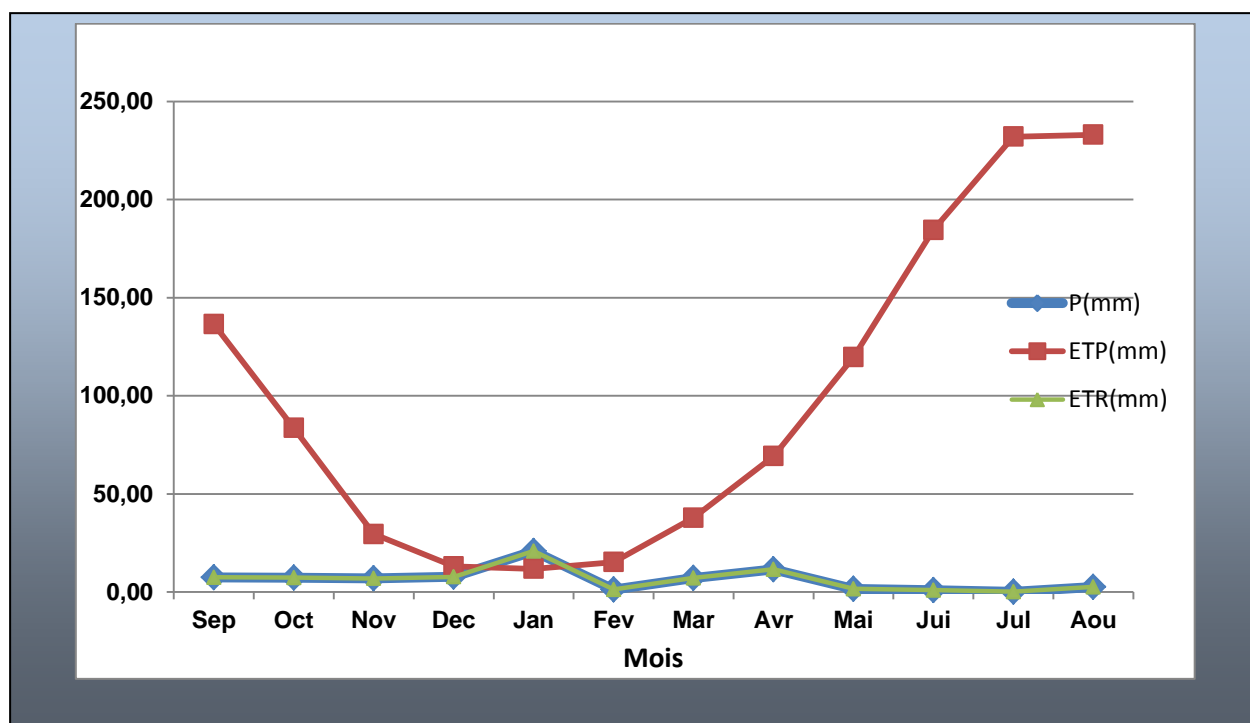


Figure 19: Bilan hydrique d'après Thorntwaite (1993-2018)

II.3.1. Interprétation du bilan Hydrique :

Au terme de ce bilan hydrique pour la station de Guemar selon Thorntwaite, nous pouvons dire que :

- Au cours de l'année, la pluviométrie annuelle dépasse une fois l'évapotranspiration potentielle.
- l'ETP atteint le maximum au mois d'Août 233 mm et son minimum au mois de Janvier 11,88mm.
 - La constitution de la RFU ne s'effectue qu'au mois de Janvier avec une valeur de 9,00mm et le reste de l'année est épuisée.
 - La sécheresse constitue une partie prédominante de l'année hydrologique. Elle dure 11 mois de l'année (sauf Janvier).
 - Il y a un déficit agricole durant toute l'année d'où la nécessité d'irriguer.
 - L'excédent est nul durant toutes les saisons de l'année, d'où l'alimentation de l'aquifère ne se fait probablement donc qu'à partir des limites.

Conclusion :

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

- La précipitation mensuelle interannuelle est de l'ordre de 75.95mm.
 - La température moyenne mensuelle est de l'ordre 22.54 C°.
 - La région de Souf se caractérise par un climat hyper aride;
 - Le mois le plus humide est Décembre (moyenne interannuelle 63.42%) avec un faible rayonnement solaire (moyenne de 277.29 heures).
 - Le mois le plus sec est Juillet caractérisé par une faible humidité (moyenne de 33.42 %).
- La brillance du soleil est très élevée (moyenne de 358.89 heures) ce qui traduit un pouvoir évaporant excessif.
- L'évapotranspiration réelle moyenne est de l'ordre de 66.95mm soit 100 % des précipitations annuelles (selon la méthode de Thorntwaite).
 - Le déficit agricole est de l'ordre de 1108.12 mm.

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

Chapitre III
Hydrogéologie

Introduction :

L'étude hydrogéologique est prépondérante à la compréhension des processus d'alimentation des aquifères d'une part, et la reconnaissance des sens d'écoulement d'autre part, ainsi que la variation du gradient hydraulique, les caractéristiques hydrodynamiques, et la détermination des conditions aux limites du système aquifère et enfin la détermination de la géométrie des nappes.

Dans un premier stade est de comprendre l'évolution du niveau piézométrique dans le temps et dans l'espace.

Dans un deuxième stade de connaître le régime hydrodynamique du réservoir en cernant finalement les zones de fortes transmissives d'une part, et d'autre part les zones de fortes perméabilités.

Ces descriptions vont pouvoir nous aider à mieux comprendre la vulnérabilité de la nappe aux différents polluants.

III.1. Inventaire des forages :

L'inventaire des points d'eau de notre système aquifère se définit par 29 forages en Complexe Terminale selon l'inventaire de 2013.

Parmi les quels trois sont abandonnés, le reste est destiné soit à l'exploitation de l'AEP soit à l'exploitation irrigation, Plus d'une soixantaine de forage se trouvent dans la région d'El-Oued exploitant la nappe pour l'alimentation en eau potable d'une part et d'autre part pour l'irrigation des terres cultivées. (Fig. III.1).

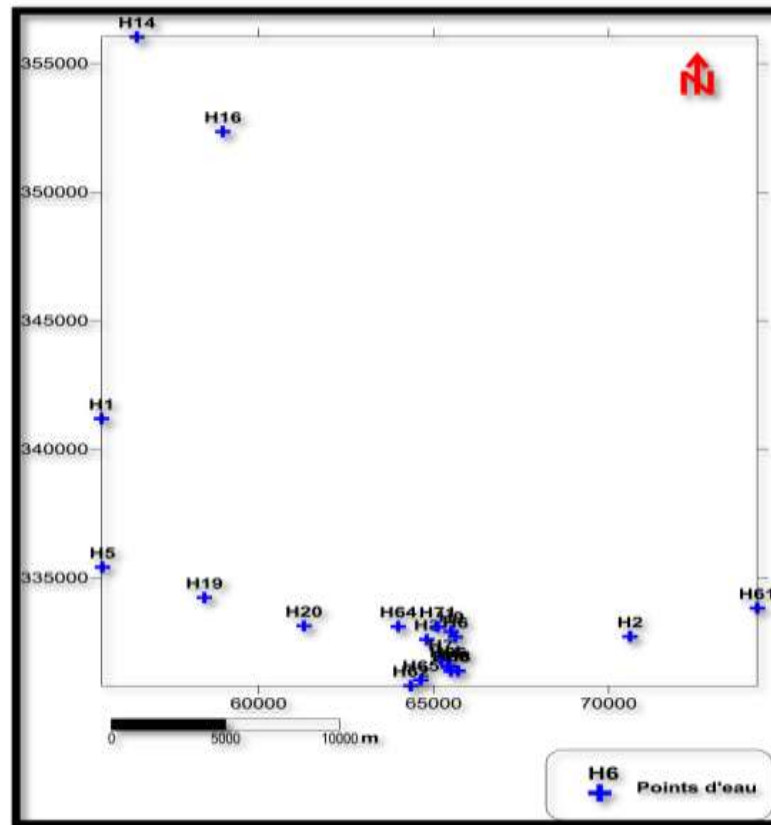


Figure 20: Carte d'inventaire des points des eaux souterraines de la région d'El-Oued (2013)

III.2. Cadre hydrogéologique :

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780'000 km².

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

Les pentages des bancs sont en général faibles, à l'exception de la zone bordière située au Nord-Est du bassin (Fig. I I I . 2). Celui-ci comporte, à sa base, des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par les formations continentales du Secondaire et du Tertiaire épaisses de plusieurs milliers de mètres. Le Quaternaire y succède. Il est constitué essentiellement de sables dunaires dont l'épaisseur peut atteindre quelques centaines de mètres.

Seule la série supérieure présente un intérêt hydrogéologique certain. Allant du Crétacé au Quaternaire, elle constitue une alternance de grès, sables, sables argileux et d'argiles, de calcaires, dolomies et de marnes, ainsi que d'évaporites. Cette série comporte

trois grands ensembles perméables auxquels correspondent trois grands systèmes aquifères : la nappe du Continental Intercalaire, la nappe du Complexe Terminal et la nappe phréatique.

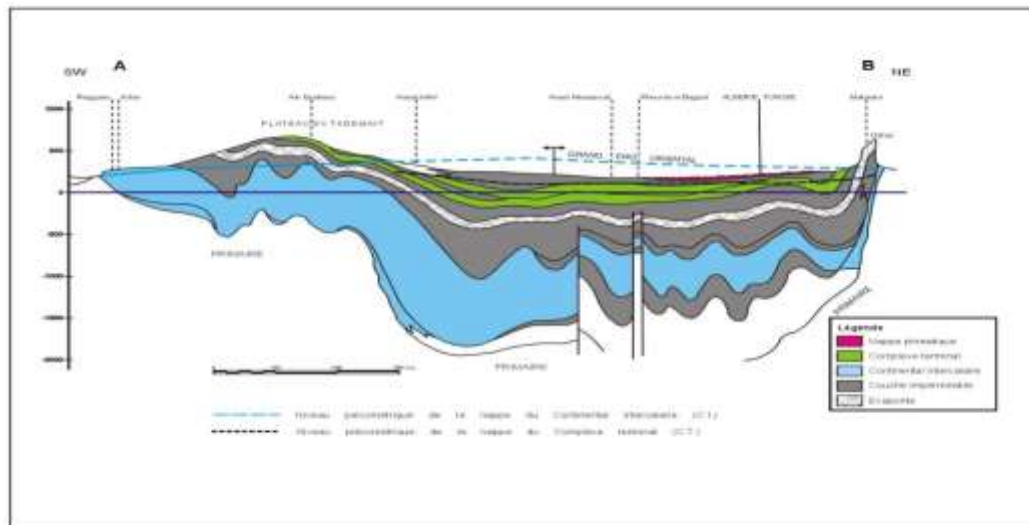


Figure 21: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972)

III .2.1. 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 21000.

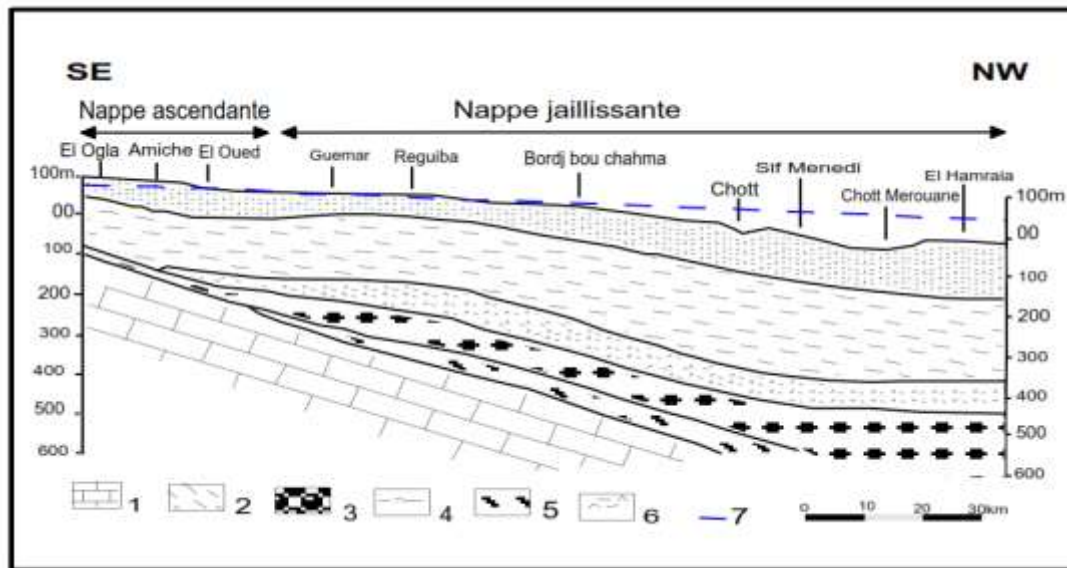
La circulation des eaux dans cette nappe est relativement rapide sur toute la région du Souf et particulièrement dans les zones caractérisées par l'existence de lentilles argileuses qui influent sur la perméabilité des sables. Excepté dans la région des Chotts la nappe libre est présente sur toute la 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 dernières est des nappes profondes du Complexe Terminal et Continentale Intercalaire (Cote, 1998).

III .2.2. Nappe du Complexe Terminal :

Ce terme regroupe sous une même dénomination, un ensemble de nappes aquifères qui sont situés dans la formation géologique différentes : Sénonien carbonaté et Eocène, 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 (Figure II.03).



1- calcaire de l'Eocène inférieur marin et de l'Eocène moyen évaporitique. 2- Argiles sableuses et marnes de la base du continental terminal. 3- Sable grossiers à graviers du Pontien inférieur. 4- Argiles et gypse dominants. 5- Argiles et sable dominants. 6- Argile sable et gypse (les trois derniers étages appartiennent au Mio-Pliocène supérieur). 7- Niveau hydrostatique de la nappe du Pontien inférieur

Figure 22: Coupe hydrogéologique de l'El-Oued

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 Laarbi et

Douar El Maa, la nappe est exploitée à ce jour artisanalement. C'est le cas de la nappe Pontienne.

b- Les nappes de calcaires :

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

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

III.2.3.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.

Tableau 17: Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued.

Nature hydrogéologique	Nature lithologique	Etage		Ere
Nappe phréatique	Sables	Quaternaire		
Niveau imperméable	Argiles			
1 ^{ère} nappe des sables	Sables	Pliocène		
Semi-perméable				
2 ^{ème} nappe des sables	Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	Tertiaire
Niveau imperméable	Argiles lagunaires, marnes	Moyen	Eocène	
Nappe des calcaires (perméables)	Calcaire fissuré	Inférieur		
		Sénonien carbonaté		
Semi-perméable	Evaporites, argiles	Sénonien lagunaire	Crétacé	Secondaire
Niveau imperméable	Argiles, marne	Cénomaniens		
Nappe de Continental Intercalaire	Sables et Grés	Albien		

III .3. Aperçu historique :

La géomorphologie de la région du Souf se présente par des reliefs très accidentés, avec l'existence de plusieurs fosses (GHITANES) inondées abritant en général les palmeraies dépériées.

Avant la réalisation du premier forage en 1956 la nappe ne susciter pas d'inquiétudes, car elle était presque l'unique ressource exploitée, soit pour l'A.E.P ou pour l'irrigation.

Autre fois dans le Souf la palmeraie était plantée dans le GHOUT à environ 1m du toit de la nappe phréatique ce qui lui permet de puiser l'eau directement de l'aquifère. Mais avec lacroissance démographique et le développement urbain et agricole de la région créant ainsi une demande importante et incessante des besoins en eau pour l'A.E.P et l'irrigation, provoquant ainsi la multiplication des forages à travers la région du Souf.

En présence de toute cette mobilisation en eau totalisant un débit de 119.92hm³/an et en présence d'un sol favorable au phénomène de la remontée capillaire et en l'absence de

réseau d'assainissement et de drainage et d'un exutoire naturel. Toutes ces conditions accélèrent l'apparition de ce phénomène de la remontée

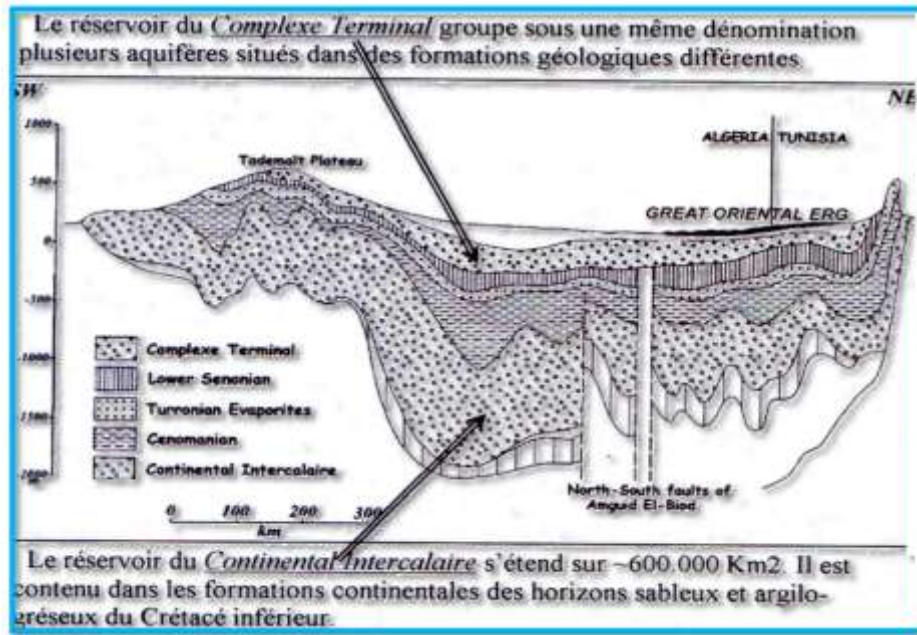


Figure 23: Coupe hydrogéologique synthétique du Sahara septentrional.(Cornet, 1964)



Figure 24: Carte géologie avec le sens d'écoulement des aquifères CT et CI (UNESCO, 1972) (Sghiri M.L & Mesmech.M/2019)

III .4. Piézométrie:

La carte piézométrique a pour but de représenter 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 fais pendant les basses eaux a permis de suivre l'évolution de la piézométrie de la nappe

III .4.1. Interprétation de la carte piézométrique (2010):

La carte piézométrique dressée pendant la période des basses eaux (2010) a permis de déterminer le sens d'écoulement, les principales zones de circulation des eaux souterraines, l'alimentation de la nappe.

Le sens d'écoulement est Sud – Nord-Ouest, les courbes hydro isohypses sont relativement rapprochées avec une concavité orientée vers le Sud.

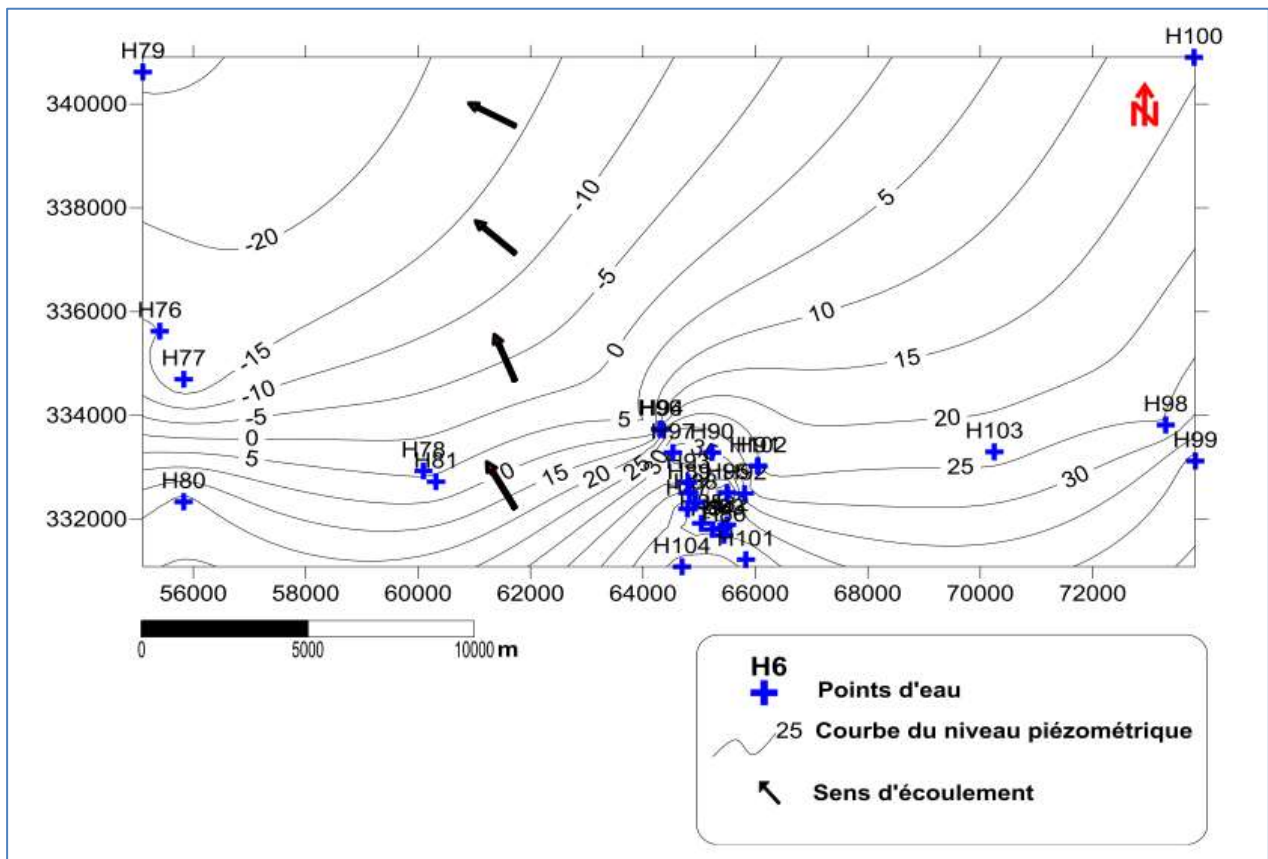


Figure 25: Carte piézométrique de la nappe libre (ou du CT ou de CI) de la région d'El-Oued (2010)

III .4.2. Interprétation de la carte piézométrique (2013):

La carte piézométrique dressée pendant la période des basses eaux (2013) a permis de déterminer le sens d'écoulement, les principales zones de circulation des eaux souterraines, l'alimentation de la nappe. (La figure III . 7) décrit principaux :

Le sens de l'écoulement est Sud - Nord-Ouest, les courbes hydro isohypses sont relativement rapprochées avec une concavité orientée vers le Sud-Ouest.

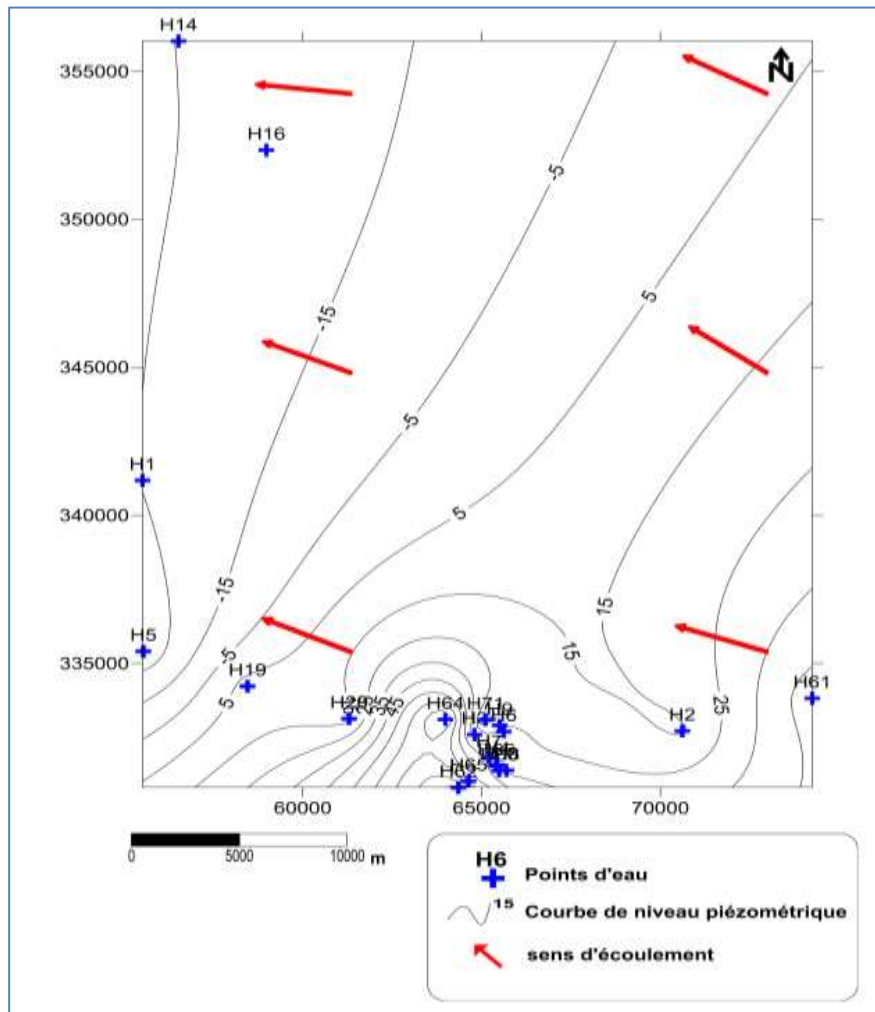


Figure 26: Carte piézométrique de la nappe libre (ou du CT ou de CI) de la région d'el-Oued (2013)

III .5. Paramètres hydrodynamiques :

Des essais de pompage par paliers et de longue durée ont été réalisés sur 4 sites répartis dans la zone d'étude de la région du Souf à Ain raach, NakhlaChamaliya, Ourmes, El-Oued centre, et Foulia, du 2013.

Chaque site d'essais est constitué d'un forage de pompage et trois piézomètres d'observation, situés à 5, 15, 45 mètres du puits de pompage. Les forages de pompage sont des forages existants avec des caractéristiques différentes, alors que tous les piézomètres réalisés pour ces essais de pompage sont identiques. Les rejets des eaux de pompage sont situés plus loin des sites des essais de pompage.

Les essais de pompage ont comporté, pour chaque site :

Un essai par paliers enchaînés et composé de trois paliers de 6 heures chacun à débit constant mais différents, séparés par un intervalle d'au moins 12 heures.

- L'essai de longue durée a constitué en un pompage à débit constant de 72 heures suivi de 24 heures de remontée.

IV.2. Coordonnées UTM des sites des essais par pompage :

Les coordonnées UTM des sites des essais de pompage sont définies dans le tableau (III.1).

Tableau 18: Coordonnées UTM des sites des essais pompages

Site	X	Y	Z (m)
El-Oued centre	06°51'44"	33°21'22"	92
Ain raach	06°0'20 ,2 "	33°54'22 ,5 "	24
Nakhlagharbiya	06°56'20"	33°15'45"	90
Ourmes	06°45'54 "	33°23'59"	79
Blila	06°57'06"	33°34'19"	60

III .5.1.Essai de pompage à El-Oued centre :

Quatre essais de pompage, trois de 8 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués le 2013 sur un forage amélioré, exploité, dans la commune d'El-Oued, (coordonnées UTM Clarke 1880 X = 06°51'44", Y =33°21'22").

Cet aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitué du sable fin, plus ou moins induré, comprenant une forte proportion de gypse.

III .5.1.1.Détermination de débit spécifique :

Les mesures du rabattement du niveau piézométrique dans le forage de pompage d'essai de 8 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le graphe, temps/rabattement. Le débit est de 33l/s

Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 28800 secondes. Le rabattement à 16l/s est de 2,1 m, celui à 24 l/s est de 1,02 m, et celui à 33l/s est de 1,22 m.

Le débit spécifique est de $2, \times 10^{-2}$ m²/s.

III .5.1.2. Interprétation de l'essai de longue durée :

Interprétation d'essai de longue durée, (72 h) à débit constant de 43 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le forage de pompage. Les mesures dans le forage de pompage sont représentées sur le graphe, temps/rabattement.

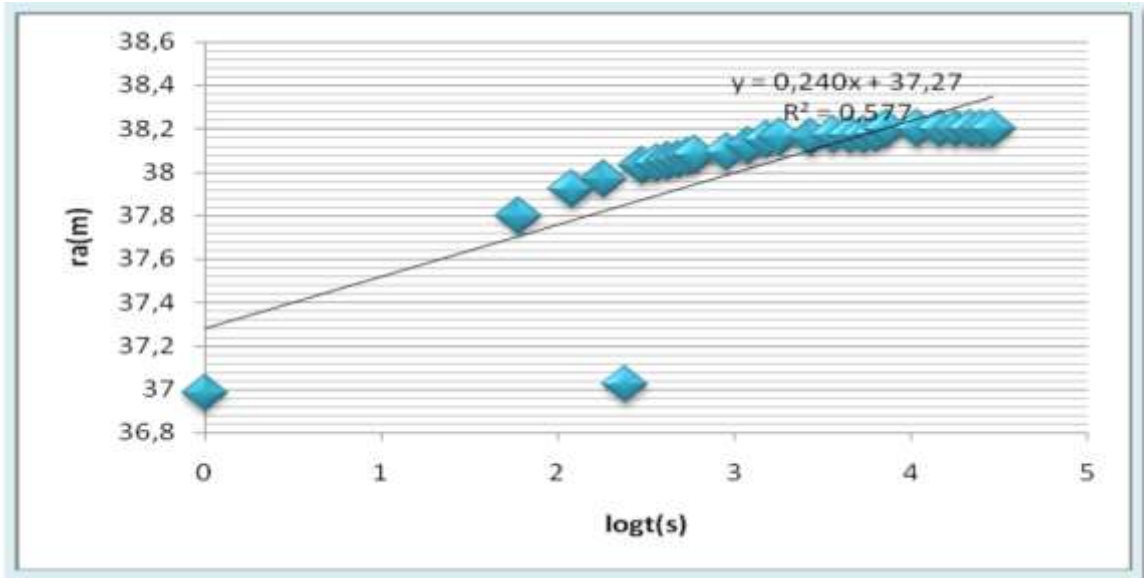


Figure 27: Essai de pompage longue durée à El-Oued centre interprété par la méthode de Cooper &-Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper-jacob est de :

$$T = 0.183Q / c = 0.183 * 53 * 10^{-3} / 0.28 = 3.4 * 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

III .5.2. Essai de pompage à Ain raach :

Quatre essais de pompage, 3 de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués en 2013 , au-delà de la localité de Ain raach, en direction de Biskra (coordonnées UTM X = 06°0'20,2 ", Y = 00°34'22,5 ").

Cet aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitué du sable limoneux gypseux peu argileux et du sable fin, plus ou moins induré, comprenant une forte proportion de gypse.

III .5.2.1. Détermination de débit spécifique :

Les mesures du rabattement du niveau piézométrique dans le forage de pompage d'essai de 8 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le graphe, temps/rabattement.

Le débit est de 53/s.

Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 28800 secondes. Le rabattement à 30l/s est de 4 m, celui à 40 l/s est de 0,97 m, et celui à 53/s est de 1,29 m.

Le débit spécifique est de $4,1 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

III .5.2.2. Interprétation de l'essai de longue durée :

Interprétation de l'essai de longue durée, (72 h) débit constant de 53 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le forage de pompage.

Les mesures dans le forage de pompage

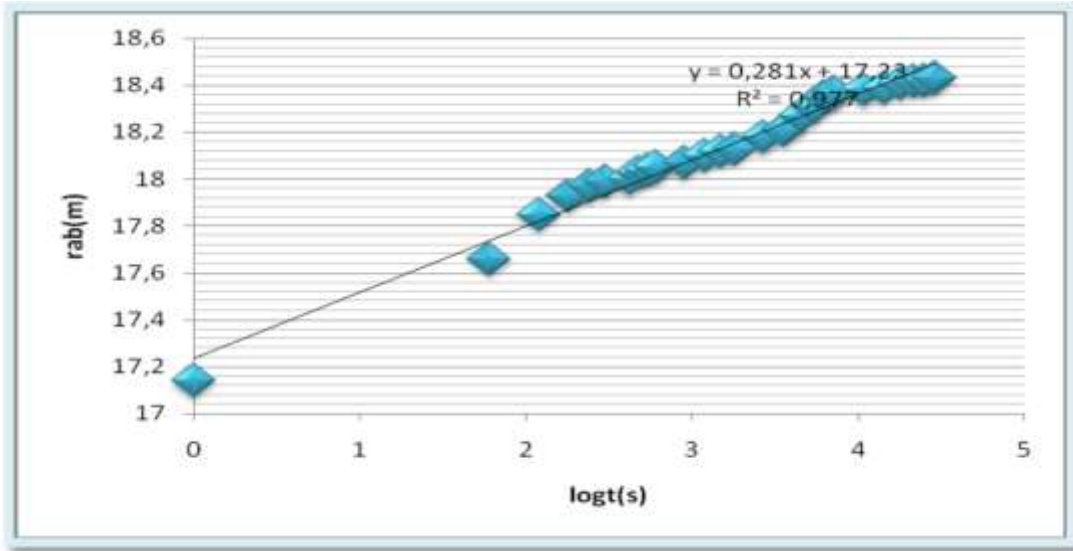


Figure 28: Essai de pompage long durée à Ain Raach Interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper & Jacob est de :

$$T = 0,183Q / c = 0,183 * 40 * 10^{-3} / 0,04 = 1,83 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

IV.5. Essai de pompage à Nakhla gharbiya:

Quatre essais de pompage, 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 2013 sur un forage amélioré, non exploité, dans un périmètre agricole abandonné de la commune de (coordonnées UTM Clarke 1880 X = $6^{\circ}56'20$, Y = $33^{\circ}15'33$).

III .5.3. Détermination de débit spécifique :

Les mesures dans le puits de pompage des trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le même graphique (voir annexe), temps/rabattement. Les débits sont de

15 l/s, 25 l/s et 34 l/s.

Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 14400 secondes. Le rabattement à 15 l/s est de 8,46 m, celui à 25 l/s est de 16,47 m, et celui à 34 l/s est de 21,09 m.

Le débit spécifique est de $0,161 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

III .5.4. Interprétation de l'essai de longue durée :

Interprétation de l'essai de loge --durée, (72 h) à débit constant de 34 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le forage de pompage. Les mesures dans le forage de pompage est représenté sur le graphe, temps/rabattement.

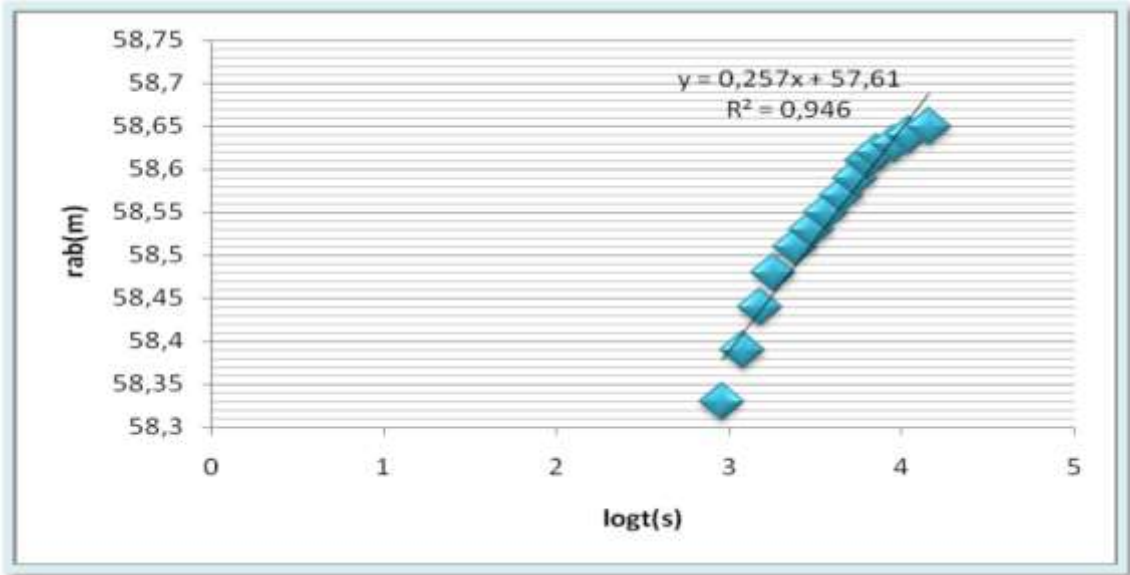


Figure 29: Essai de pompage longue durée à Nakhla ttghamaliya interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper-jacob est de : $T = 0,183Q / c = 5,88 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$

III.6. Essai de pompage à Blila :

III.6.1. Introduction :

Quatre essais de pompage, 3 de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre le 2013 et sur un Le forage de Blila est destiné à l'alimentation en eau potable (AEP) de la commune de Magran ..

(coordonnées UTM Clarke 1880 X = $6^{\circ}57'05''$, Y = $33^{\circ}54'22,5''$).

Cette aquifère est séparé par des niveaux moins perméables, constitué du sable limoneux gypseux peu argileux et du sable fin, plus ou moins induré, comprenant une forte proportion de gypse. 92m.

III.6.1. Détermination de débit spécifique :

Les mesures dans le forage de pompage des trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le même graphe temps/rabattement. Les débits sont de 20 l/s, 30 l/s et 35 l/s.

Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 14400 secondes. Le rabattement à 20 l/s est de 8,67 m, celui à 30 l/s est de 15,59m, et celui à 35 l/s est de 21,53 m.

Le débit spécifique est de $1,62 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$.

III.6.2..Interprétation de l'essai de longue durée :

Interprétation de l'essai de longue durée, (72 h) à débit constant de 35l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le forage de pompage. est représentées sur le graphe, temps/rabattement

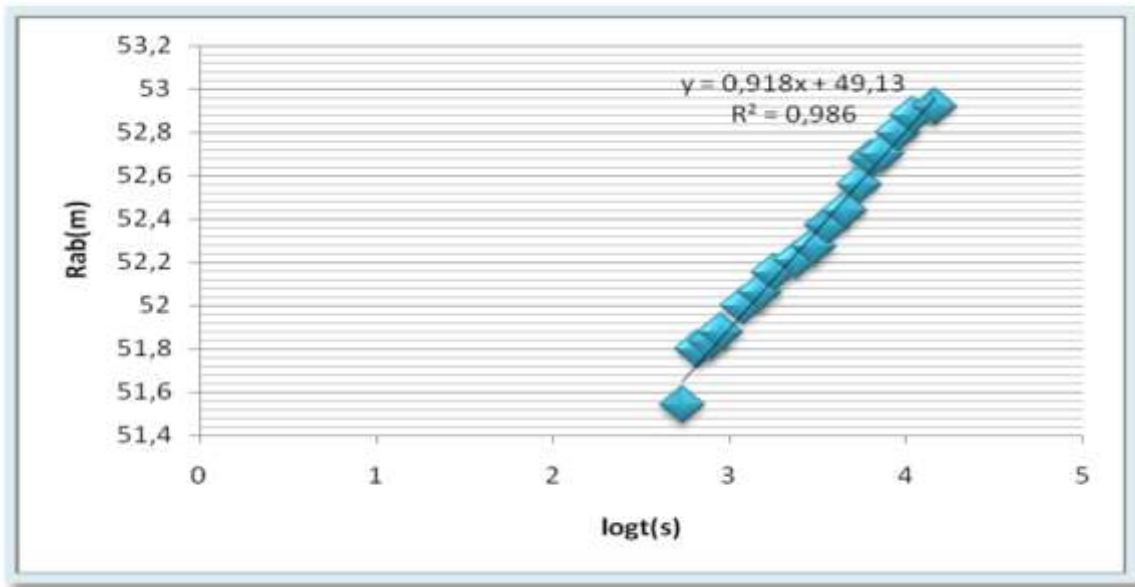


Figure 30: Essai de pompage longue durée a magrane interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Cooper & Jacob est de : $T = 3,44 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

III.7.Essai de pompage à Ourmes :

Quatre essais de pompage, 3 de 6 heures avec 12 heures de remontée minimum entre les essais et un de 72 heures suivi de 24 heures de remontée ont été effectués entre 2013 sur un forage amélioré exploité, dans la commune de Ourmes (coordonnées UTM Clarke 1880 $X = 06^{\circ}45'54''$, $Y = 33^{\circ}23'59''$).

III.7.1.Détermination de débit spécifique :

Les mesures dans le forage de pompage des trois essais de 6 heures suivis de 12 heures de remontée sont représentées sur le même graphe temps/rabattement. Les débits sont de 20l/s, 30 l/s et 40 l/s.

Le débit spécifique est déterminé à partir de droit débit - rabattement à un temps de 28800 secondes. Le rabattement à 20 l/s est de 1,62 m, celui 30 l/s est de 0,88 m, et celui à 40 l/s est de 0,83 m. Le débit spécifique est de $5,6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

III.7.2. Interprétation de l'essai de longue durée :

Interprétation d'essai de longue durée, (72 h, 05 min et 30 s) à débit constant de 13,3 l/s suivi de 24 h de remontée après l'arrêt de la pompe. Le rabattement a été mesuré dans le forage de pompage

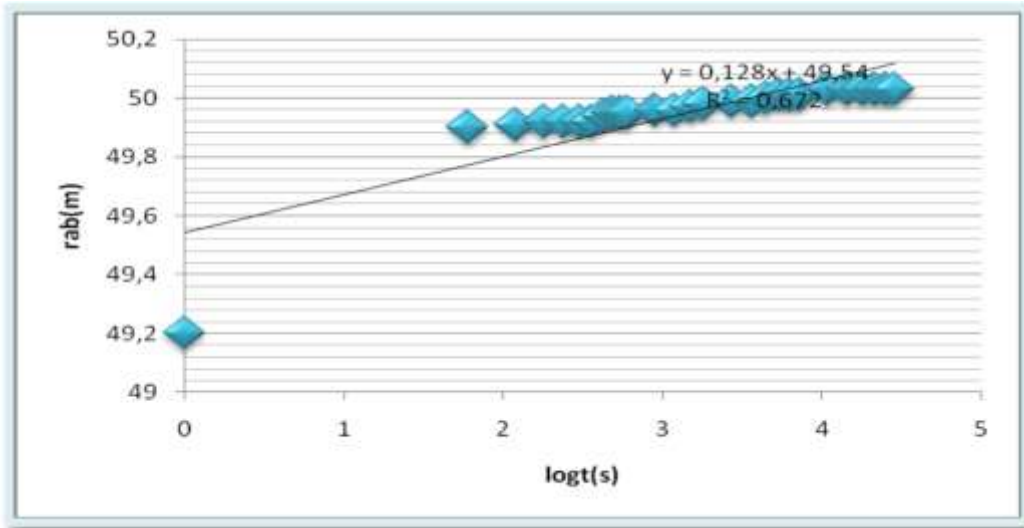


Figure 31: Essai de pompage longue durée à Ourmes interprété par la méthode de Cooper & Jacob

La transmissivité T déterminée par la méthode de Jacob & Cooper est de :

$$T = 0,183Q / c = 0,183 * 40 * 10^{-3} / 0,04 = 1,83 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}.$$

Coefficient de porosité efficace (ne) :

Le coefficient de porosité efficace de la nappe libre est estimé à 10 % dans la zone d'étude (d'après la DHW d'El Oued).

Tableau 19: Tableau récapitulatif des paramètres hydrodynamiques .

site	Débit spécifique (m^2/s)	Transmissivité (m^2/s)
El-Oued centre	2×10^{-2}	$3,4 \times 10^{-6}$
Nakhlgharbiya	$4,1 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-2}$
Ain raach	$1,61 \times 10^{-3}$	$5,88 \times 10^{-2}$
Blila	$1,62 \times 10^{-3}$	$3,44 \times 10^{-2}$
Ourmes	$5,6 \times 10^{-2}$	$1,83 \times 10^{-2}$

Conclusion :

L'étude hydrogéologique complétée par la géophysique ainsi que la géologie et les données de forages ont permis de schématiser la géométrie de l'aquifère alluvionnaire. Il s'agit d'un aquifère libre au Nord devient captif à semi captif au Sud par changement de faciès lithologique.

L'analyse piézométrique a montré que la surface piézométrique a une morphologie non uniforme avec un écoulement de direction générale Sud-Nord, et un gradient hydraulique assez fort en bordure de la plaine diminuant en allant au centre de cette dernière.

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

Chapitre IV

Caractérisation hydrochimiques des eaux souterraines de la commune d'El-Oued

Introduction :

La composition chimique d'une eau est importante dans la détermination de sa qualité, donc le domaine de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation, l'industrie...Etc.

Elle est également utile pour visualiser à l'aide de cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous.

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence les caractéristiques chimiques des échantillons qui ont été prélevés sur la période (2020) dans les localités de la commune d'El - Oued; nous notons que les mesures des paramètres physicochimiques ont été effectuées sur 20 forages (échantillons) pour la période de 20 forages, dans laboratoire d'analyse physico-chimique de l'ADE de la commune d'El-Oued.

IV.1. Echantillonnage et analyse hydrochimique :

Les échantillons ont été collectés à travers toute la zone d'étude afin de mieux représenter la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de la nappe aquifère (Figure).

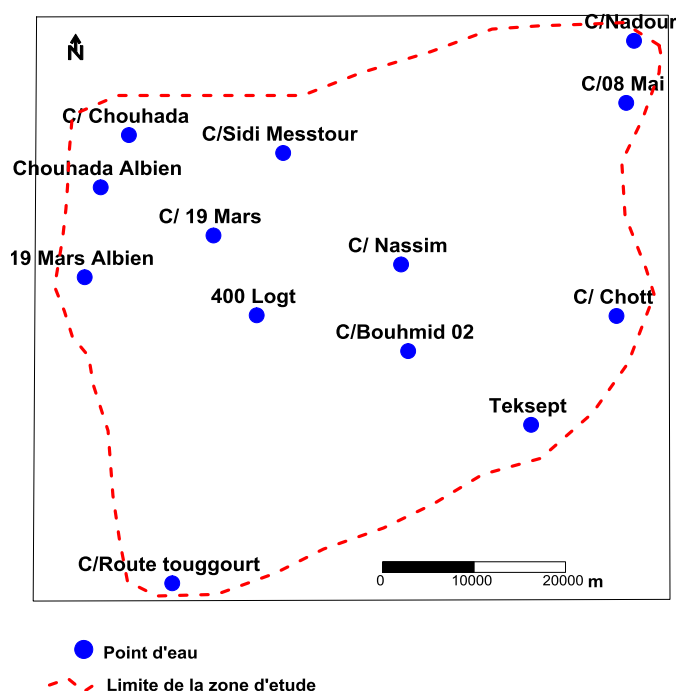


Figure 32: la carte de la répartition des points de prélèvement dans la commune d'El Oued 2020

IV.2. Description sommaires des paramètres physico chimiques :

IV.2.1. Paramètres physiques :

IV.2.1.1. Potentiel d'hydrogène (pH) :

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les mesures du pH montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité. Le pH varie entre 6.95 et 7.98, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles.

IV.2.1.2 .La conductivité électrique (CE):

Elle dépend de la présence des espèces ioniques contenues dans l'eau. Les valeurs mesurées ont été ramenées à 25°C. Les valeurs de la conductivité électrique montrent que la plupart des puits dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 4300 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$).

IV.2.1.3 La température (T° C) :

La température mesurée sur les eaux souterraines de la région d'étude, varie de 13,3 à 34,6°C, avec une moyenne proche de 23,5°C. Ces valeurs sont dues principalement à la profondeur du plan d'eau, et sont très proches de la température moyenne de l'atmosphère de la région d'étude. Nous pouvons donc penser que l'aquifère est en équilibre thermique avec l'atmosphère.

IV.2.2. Les éléments chimiques majeurs:

IV.2.2 .1. Le calcium (Ca^{2+}) :

la totalité des points de prélèvement présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 484 mg/l sont observées à l'Est de la nappe avec une moyenne de 339,8 mg/l.

L'ion Ca^{2+} provient de deux origines naturelles différentes qui sont :

La dissolution des formations carbonatées d'âge crétacé et la dissolution des formations gypses et de calcaires.

IV.2.2. 2. Le magnésium (Mg^{2+}) :

Les valeurs du magnésium varient de 36,2 mg/l au niveau du forage Bouhmide 2 à 213.9 mg/l au centre de la ville d'El-Oued (forage Nassime) avec une valeur moyenne de 146,46 mg/l. Les variations de concentration sont élevées .

IV.2.2. 3. Le sodium (Na^+) :

Le sodium présente également des valeurs fortes allant de 220 mg/l au sud-ouest, et 540 mg/l au nord-ouest, avec une valeur moyenne de 432 mg/l.

IV.2.2. 4. Le potassium (K^+):

Les valeurs de potassium sont basses, de l'ordre de 25 mg/l au niveau du forage route Touggourt. Les valeurs les plus élevées sont observées au nord- Ouest de la ville d'El-Oued avec un maximum de 39 mg/l, pour une moyenne de 29,54 mg/l.

IV.2.2.5. Les chlorures (Cl^-) :

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution. Les teneurs enregistrées, pendant toute la période d'observation, montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l. On signale la totalité des puits dépassent cette norme. Le taux des chlorures est très élevé à l'Est de la zone d'étude et au centre 932 mg/l, mais moindre au niveau des forages albiens où il ne varie qu'entre 480 mg/l et 570 mg/l, avec une moyenne de 770 mg/l.

IV.2.2.6. Les sulfates (SO_4^{2-}):

Les plus fortes teneurs en sulfates sont enregistrées au centre du secteur d'étude avec un maximum de 968,6 mg/l, avec une moyenne de 702 mg/l, suite au phénomène d'évaporation alors que les plus faibles valeurs sont enregistrées dans la partie ouest avec un minimum de 310.41 mg/l.

IV.2.2.7. Les bicarbonates (HCO_3^-) :

Les teneurs de bicarbonates (HCO_3^-) sont enregistrées avec une moyenne de 131,76 mg/l et un maximum de 163.1 mg/l se trouve à l'ouest de la région d'étude (Chouhada). Les concentrations varient faiblement.

IV.3. Représentation graphique des faciès hydrochimiques :

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil indispensable. Pour atteindre cet objectif, nous avons eu recours au diagramme de Piper et à celui de Schoeller-Berkaloff. L'établissement de ces diagrammes a été fait en utilisant le logiciel

IV.3.1. Diagrammes,

Conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon).

IV.3.1.1. Diagramme de PIPER :

Les faciès sont représentés sur le diagramme de Piper (figure 33 et 34).

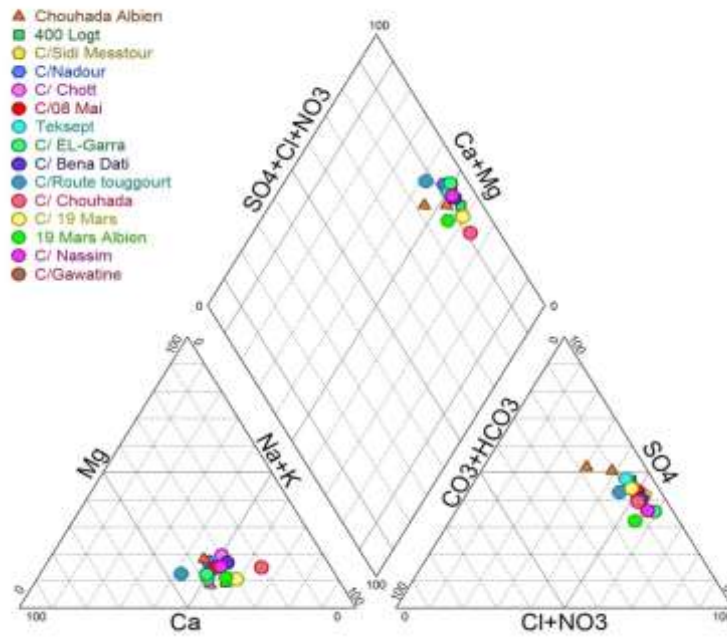


Figure 33: Diagramme de Piper des eaux souterraines des aquifères profondes (2019).

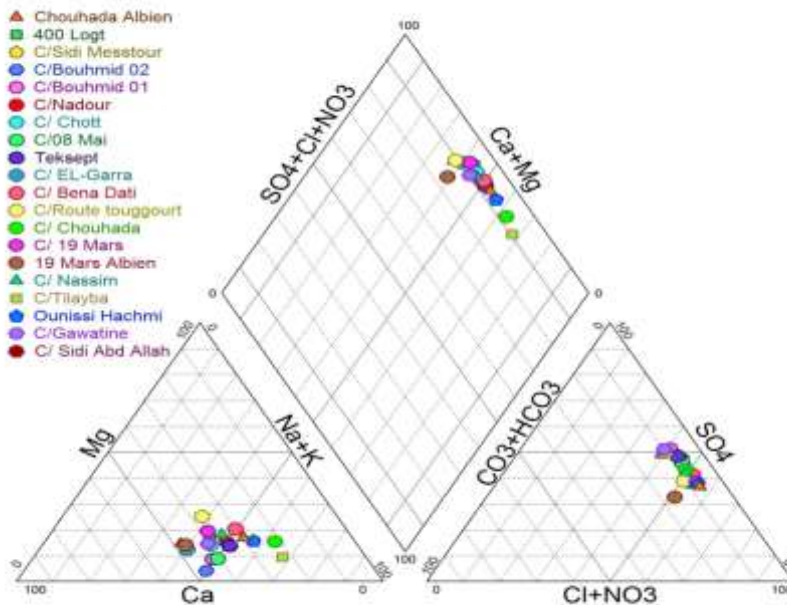


Figure 34: Diagramme de Piper des eaux souterraines des aquifères profondes (2020).

D'après les figures, nous remarquons que l'ensemble des nuages de points ne présente pas de dominance anionique ou cationique. Nous signalons cependant la présence d'un faciès chloruré calcique, relativement dominant, et un faciès sulfaté calcique et chloruré sodique.

IV.4. Cartographie hydrochimique :

L'outil cartographique reste un outil très appréciable dans la vision de l'évolution spatiale d'un constituant chimique quelconque ou d'un polluant. Les éléments chimiques dominants caractérisant les faciès chimiques sont cartographiés, ils montrent une évolution significative durant toute la période d'observation. La cartographie hydrochimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 13 (Golden software, 2012).

IV.4.1. Les chlorures :

L'observation des cartes des chlorures montre que les teneurs varient entre 500 mg/l et 1100 mg/l.

Les valeurs des concentrations durant l'année 2020 est due à l'effet du lessivage et de l'évaporation. A l'Est et au centre de la zone d'étude, nous avons enregistré des concentrations importantes en chlorures (1000 mg/l). Ces teneurs très élevées résultent de l'infiltration des eaux usées dans la nappe CT. Il est à signaler que l'évolution de la teneur en chlorures se fait suivant l'axe du sens de l'écoulement des eaux souterraines, c'est-à-dire selon une direction Ouest-Est. La valeur minimale est d'environ 500 mg/l ; elle est enregistrée dans le forage de la cité route Touggourt.

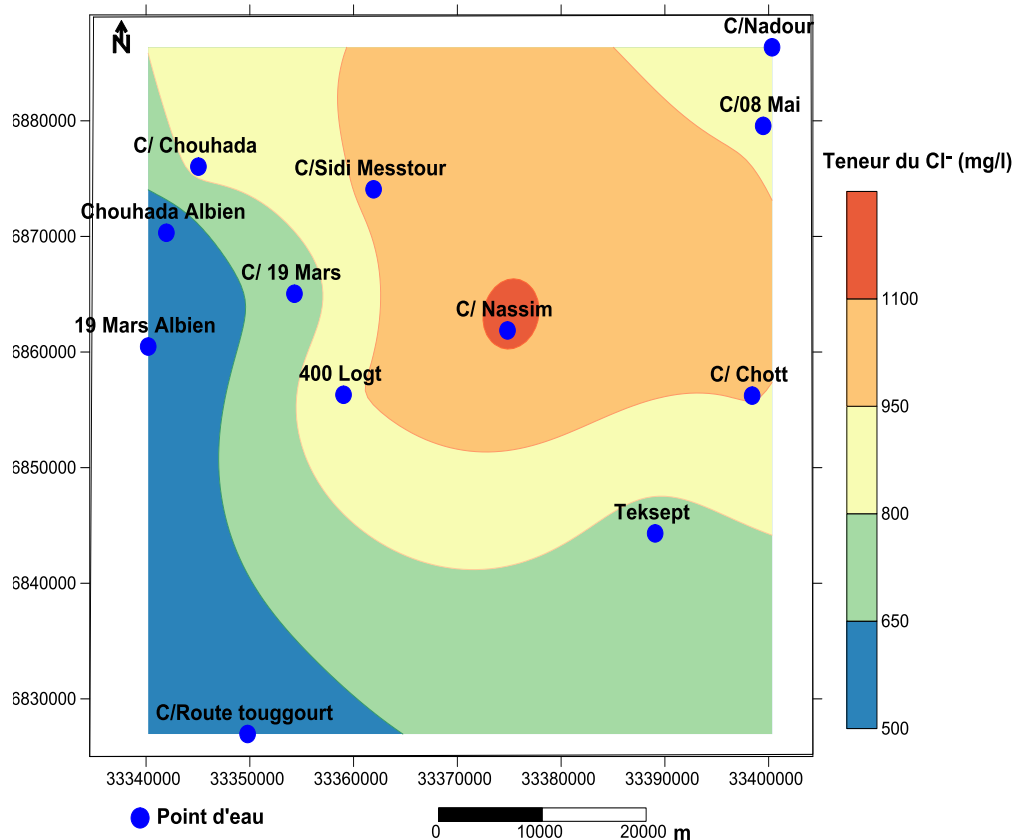


Figure 35: Carte de chlorure des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.4.2. Les sulfates:

Les concentrations, en général, oscillent entre 300 et 900 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées au centre et à l'Est de la nappe. Elles sont dues au lessivage des dépôts évaporitiques. Les plus faibles concentrations sont constatées à l'Ouest de la nappe (figure 36).

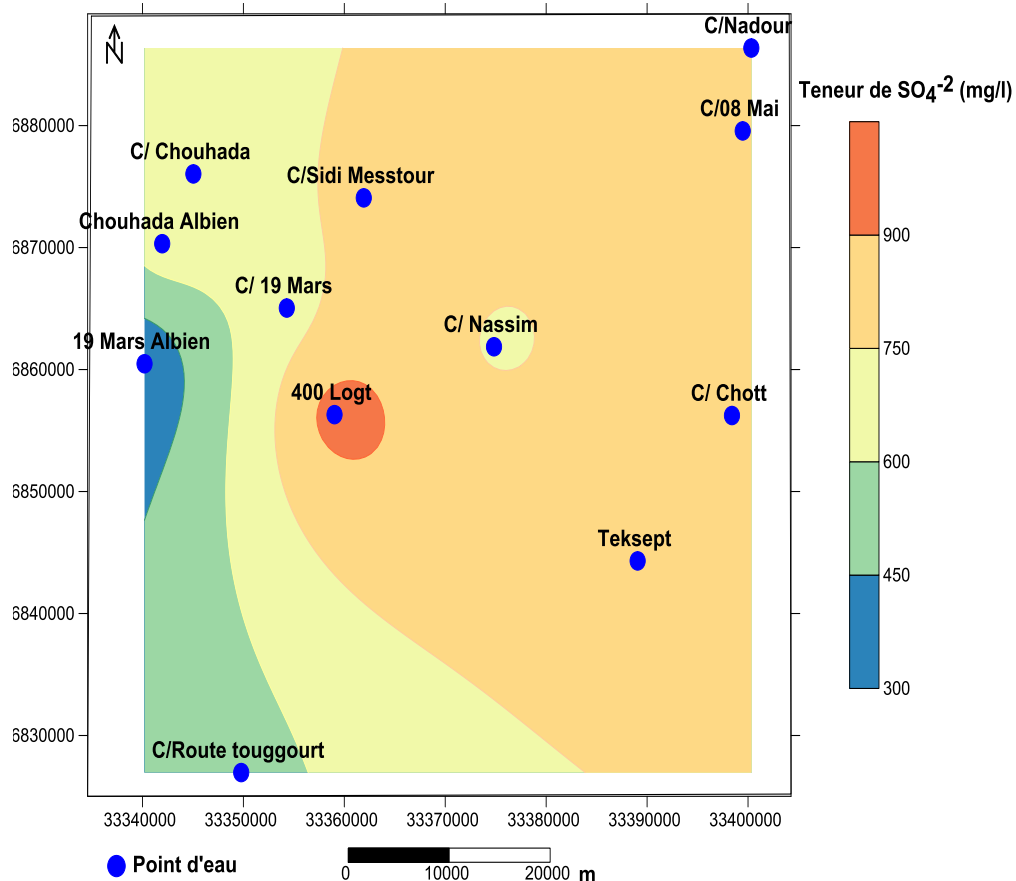


Figure 36: Carte de sulfates des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.4.3. Les bicarbonates:

Les concentrations oscillent entre 100 et 150 mg/l. Nous notons que pour quelques points, les valeurs maximales sont rencontrées presque sur la totalité de la zone d'étude, ceci est dû à la dissolution des formations carbonatées. Les faibles concentrations sont enregistrées dans une partie au Nord de la région. Il est à noter que les teneurs en bicarbonates diminuent dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines (figure 37).

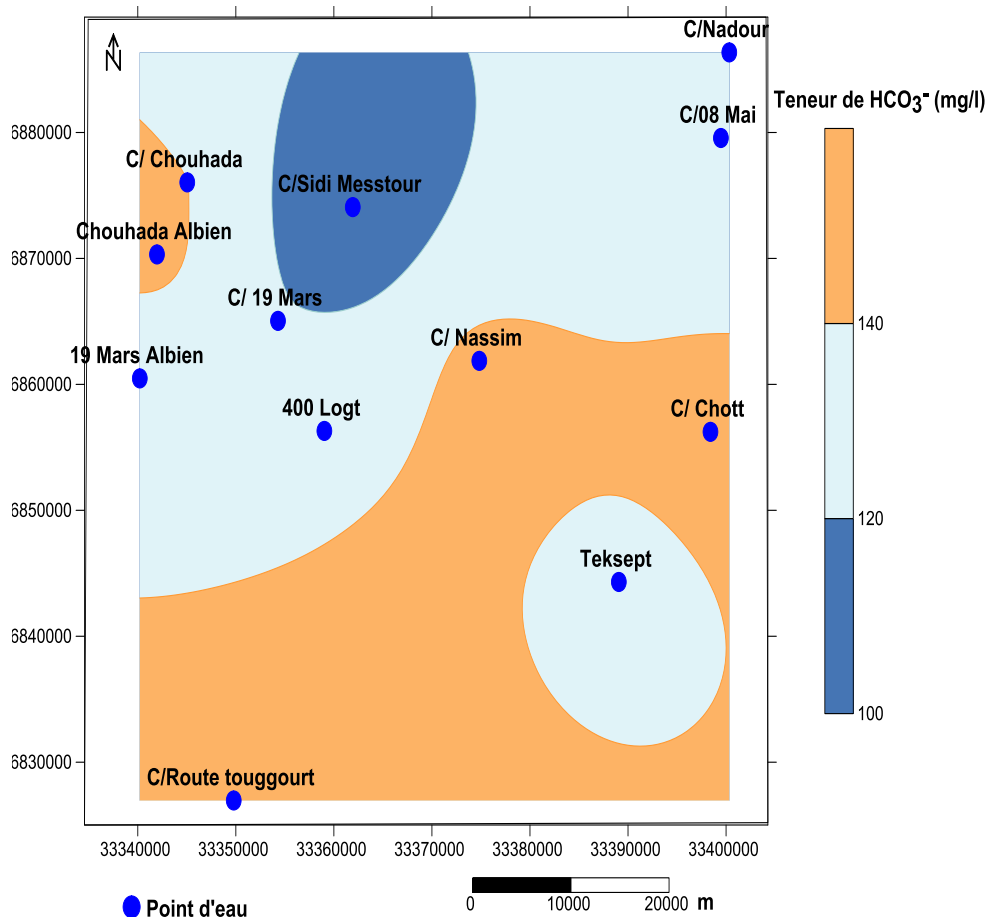


Figure 37: Carte des bicarbonates des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.4.4. Le calcium:

Les concentrations oscillent en général entre 200 et 300 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles à l'Ouest de la nappe par rapport aux autres régions, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées de la plaine. Nous remarquons que les teneurs décroissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au centre et au sud-est, nous pensons qu'elles résultent de la dissolution des formations des dépôts évaporitiques. La variation des teneurs en calcium est semblable à celle des chlorures, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré-calcique (figure 38).

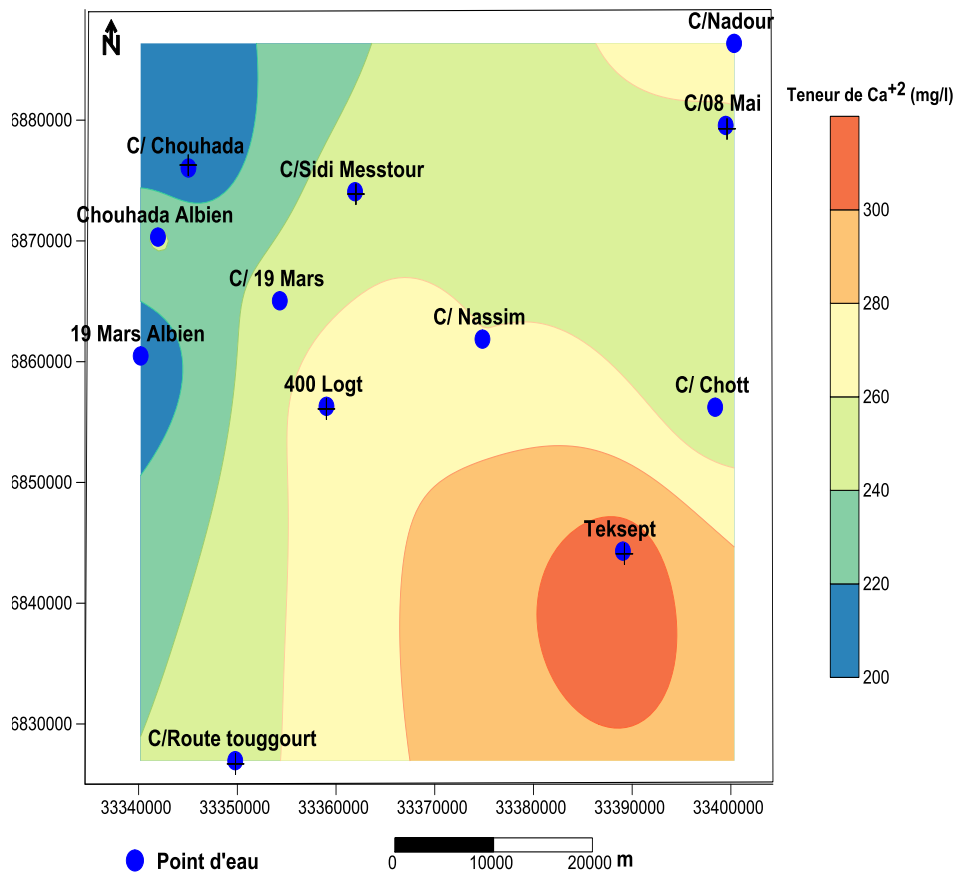


Figure 38: Carte de calcium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.4.5. Le sodium:

Les concentrations varient entre 200 et 600 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère et à l'extrémité Nord-ouest de la plaine, à cause de l'effet de l'évaporation.

L'origine du sodium provient de la dissolution des formations argileux-gypseuse, qui constituent le substratum.

Les faibles concentrations se localisent au Sud-ouest de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées. Les argiles, qui se trouvent dans la nappe, peuvent donner du sodium par échange de base en fixant un ion Ca²⁺ après libération de deux ions Na⁺ (figure 39).

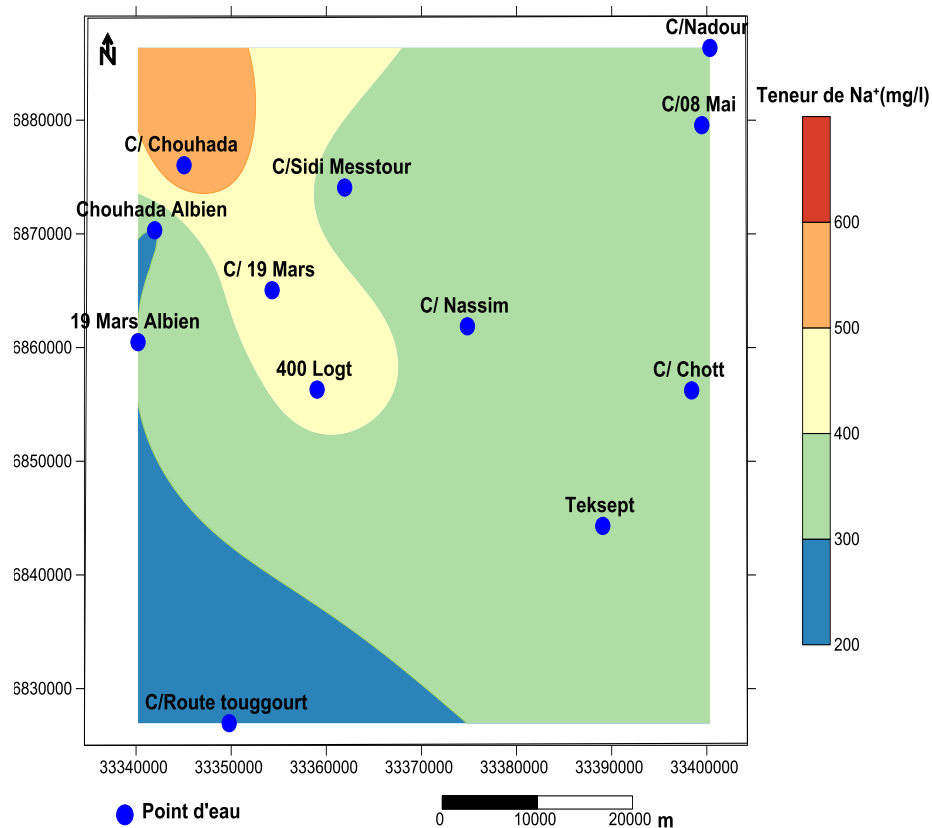


Figure 39: Carte de sodium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.4.6. Le Magnésium :

Les concentrations varient entre 50 et 150 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère et à l'extrémité Est de la plaine. L'origine du magnésium provient de la dissolution des terrains gypseux triasiques ($MgSO_4$), et par les calcaires dolomitiques qui libèrent le magnésium par dissolution, en présence du gaz carbonique. Les faibles concentrations se localisent au Sud-ouest de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées.

En effet, la majorité des forages de l'oued présentent des teneurs supérieures à la norme admissible de 50 mg/l, fixée par l'OMS (figure 40).

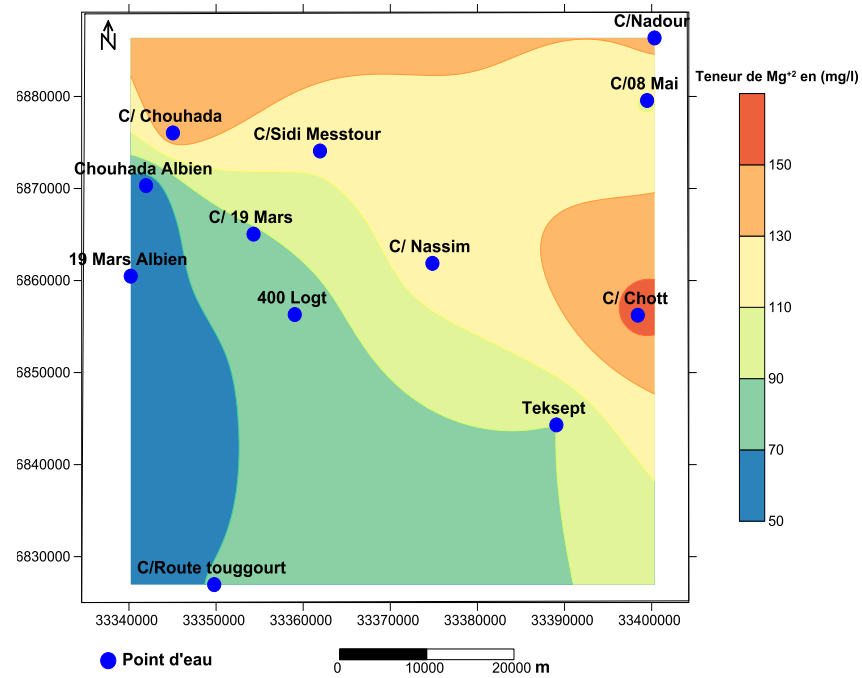


Figure 40: Carte de magnésium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.4.7. Le Potassium :

Les concentrations oscillent en général entre 50 et 150 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles au niveau du forage route Touggourt et Sidi Masstour par rapport aux autres forages, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées. Nous remarquons que les teneurs croissent dans la partie Est et Nord-ouest de la zone d'étude.

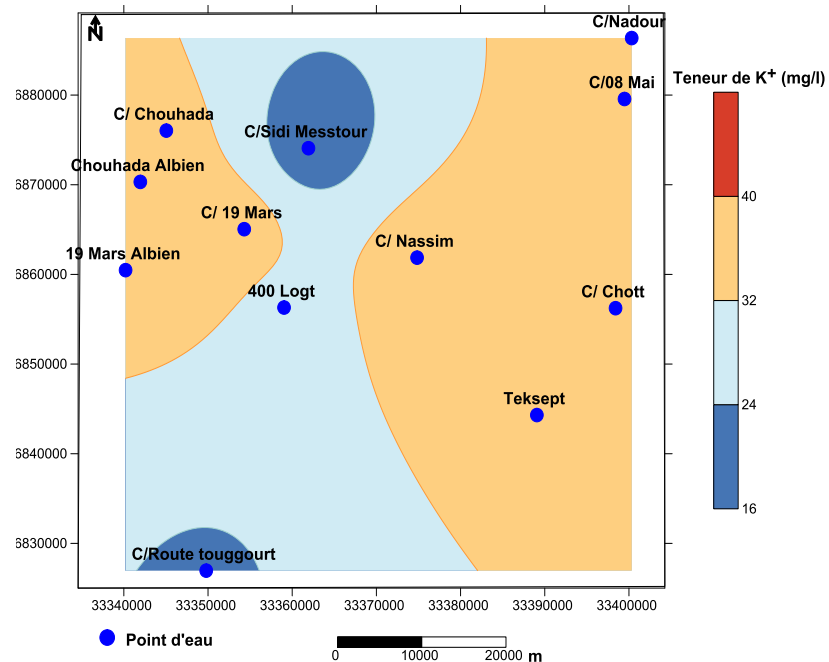


Figure 41: Carte de potassium des eaux souterraines de la région d'étude (2020).

IV.5. Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines :

L'analyse des données chimiques à l'aide de la cartographie a pu donner une idée sur le mécanisme du chimisme des eaux souterraines de la nappe aquifère.

L'influence des formations géologiques sur la nature des faciès est très remarquable:

Les formations gypsifères, ainsi que les dépôts triasiques, sont à l'origine des faciès chloruré calcique, sulfaté-calcique et chloruré-sodique, par les phénomènes de lessivage et d'évaporation.

Les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction W-E et se chargent progressivement au fur et à mesure de leur déplacement vers la zone d'accumulation, ce qui explique les fortes teneurs observées dans cette région.

Quelques éléments chimiques ont des origines différentes telles que le calcium et le sodium.

-Ces faciès se sont-ils stabilisés ou évoluent-ils vers d'autres tendances?

-Ces éléments chimiques ont-ils la même évolution dans le temps et dans l'espace ?

Pour répondre à ces questions, une étude détaillée s'impose pour mettre en relief l'origine, l'évolution et l'influence de chaque élément sur l'acquisition des faciès. La réalisation d'une telle étude se basera sur les propriétés de chaque élément chimique et les outils statistiques.

IV.5.1. Faciès caractéristiques :

A partir de la représentation graphique des faciès chimiques par le diagramme de Piper, nous constatons la dominance de trois (3) faciès: le chloruré calcique, le sulfaté-calcique et chloruré sodique. Ceci est vérifié par les teneurs dominantes des ions suivants : Cl^- , SO_4^{2-} Ca^{+2} et Na^+ . Les deux diagrammes (figure 42 A,B) utilisent les rapports $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ et $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ (les valeurs sont exprimés en meq/l). L'interprétation de ces deux diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en 4 pôles indiquant les 3 faciès, qui caractérisent la nappe. Nous notons l'absence des faciès bicarbonaté sodique et sulfaté sodique.

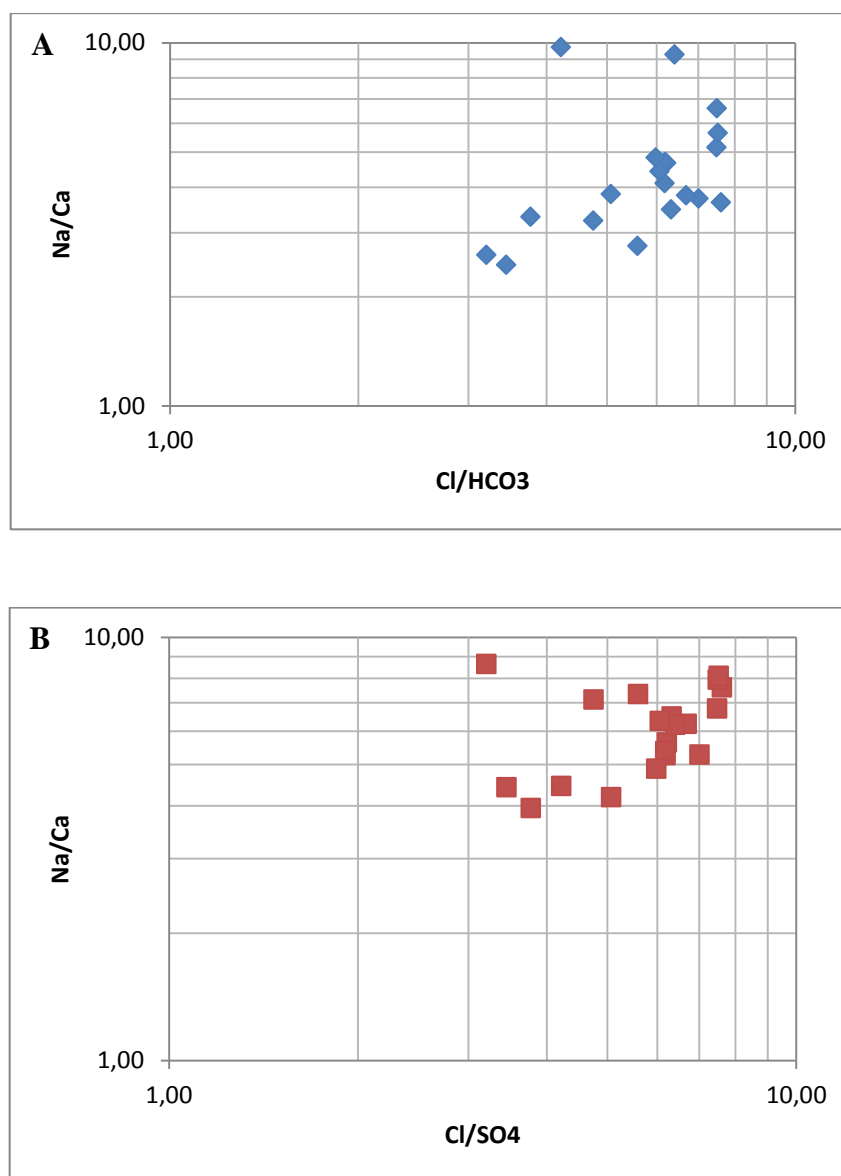


Figure 42: (A, B) : Evolution et distribution des faciès chimiques.

IV.5.2. Origine des éléments chimiques :

Les analyses chimiques ont concerné les points d'eau relevés durant 2020.

IV.5.2.1. Les éléments Ca^{+2} , SO_4^{-2} et HCO_3^- :

Le calcium est en relation avec les deux éléments chimiques - bicarbonates et sulfates qui proviennent soit des calcaires soit du gypse.

La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates montre un ensemble qui se positionne sur la droite, indiquant l'origine carbonatée des ions de calcium par la dissolution des formations carbonatées (figure 43 A, B) .

Par contre les autres points présentent un excès en Ca^{2+} , provenant de la mise en solution du gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) ou du CaCO_3 (calcaires).

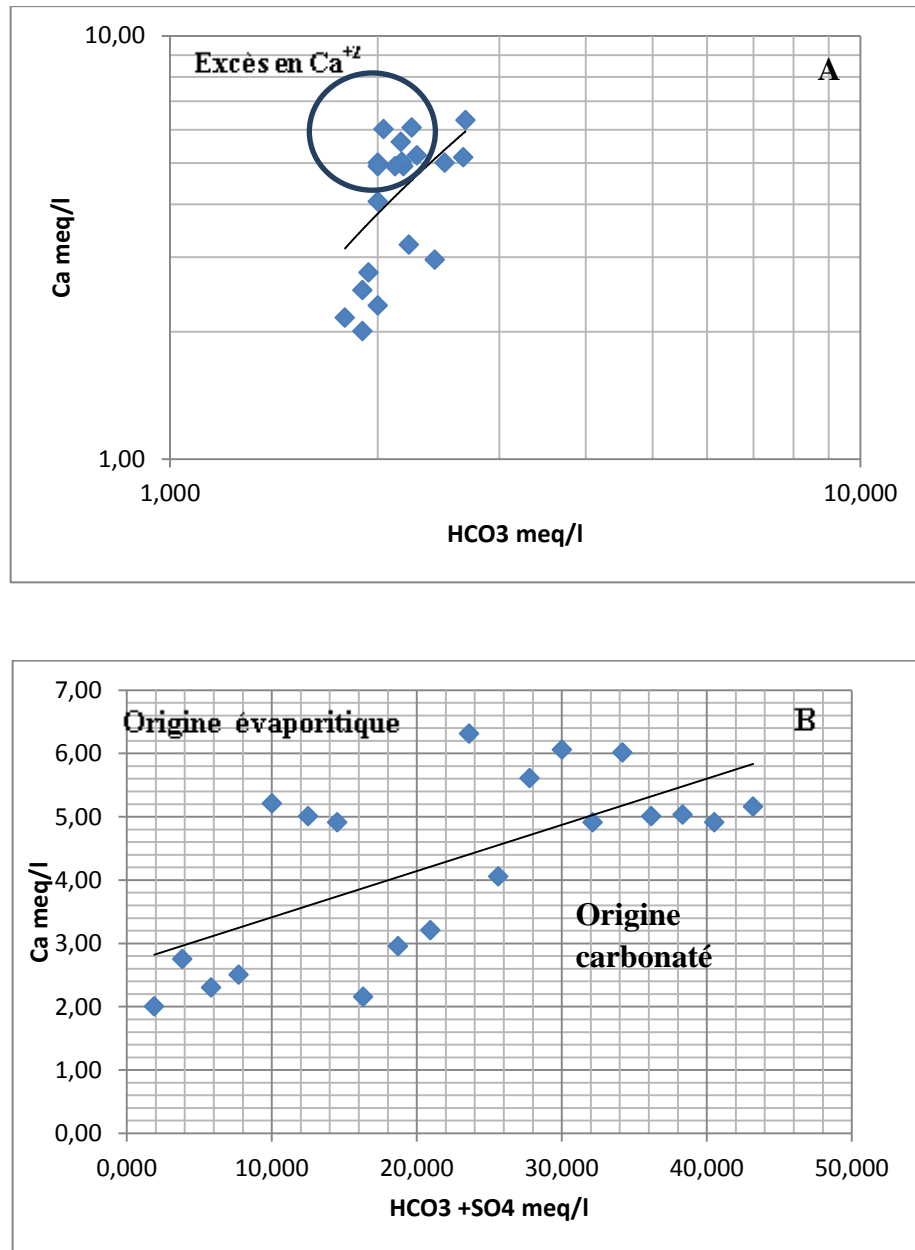


Figure 44: (A, B) : Détermination l'origine de calcium.

IV.5.2.2. Les éléments Na⁺, Cl⁻ :

Dans les eaux naturelles, la présence des deux éléments Na⁺ et Cl⁻ est attribuée à la dissolution de l'halite, incluse dans les formations triasiques. Cependant, les chlorures comme le sodium peuvent avoir d'autres origines (naturelles ou anthropiques).

La représentation graphique de l'évolution du Na⁺ en fonction de Cl⁻ (figure 44 A) a montré un excès des teneurs en Na⁺, qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodium (autre que l'halite).

L'augmentation des teneurs en Na^+ qui a accompagné les faibles teneurs en Cl^- est due au phénomène d'échange de base (figure 44 B), car les argiles du substratum peuvent libérer des ions Na^+ après avoir fixé le Ca^{2+} .

Les fortes teneurs en Na^+ qui ont accompagné celles élevées du Cl^- , sont attribuées à la dissolution de l'halite contenue dans les formations carbonatées. Ce diagramme a confirmé un excès de Ca^{2+} par rapport à Na^+ .

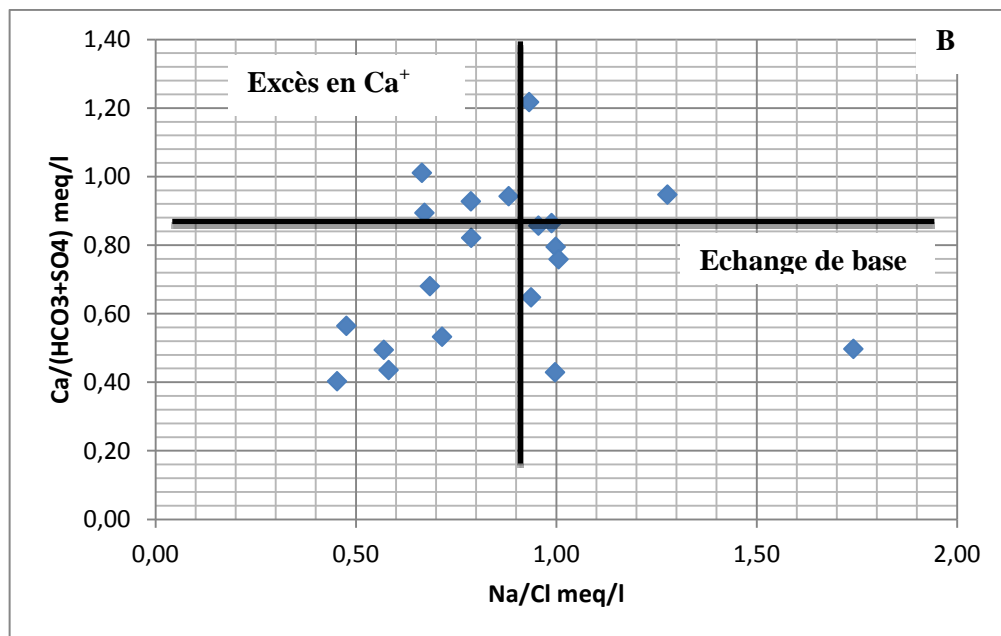
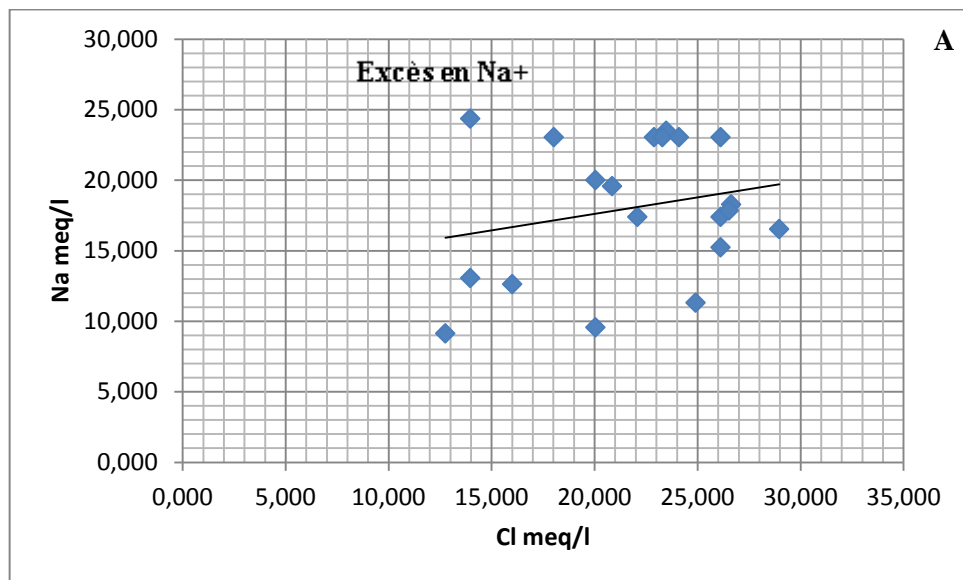


Figure 45: (A, B): Détermination l'origine de sodium.

IV.5.2.3. Les éléments HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- :

Après avoir fait le point sur les origines des cations, on a essayé de représenter l'évolution des anions en fonction de la conductivité. L'interprétation de la figure 45A montrée que la conductivité électrique évolue plus avec les chlorures et les sulfates qu'avec les bicarbonates, ce qui indique une influence prépondérante des formations salifères.

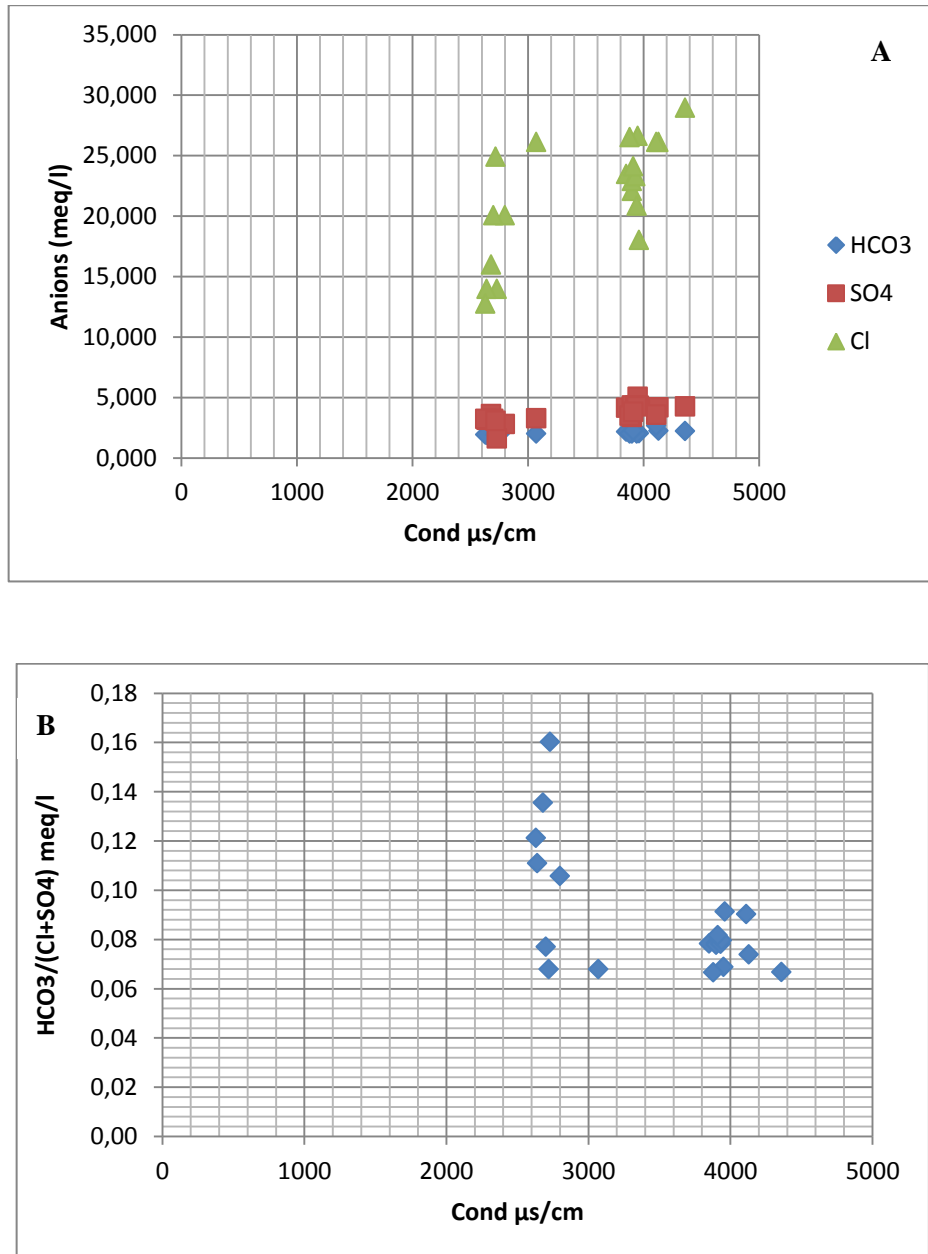


Figure 46: (A, B): Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

L'examen de la relation $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$ permet d'observer les facteurs qui influencent la variation de la conductivité des eaux (figure B).

Nous constatons ainsi une diminution du rapport en fonction de la conductivité électrique, un pôle est observé :

Le pôle est évaporitique avec une dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités ($>2000 \mu\text{S}/\text{cm}$) et rassemble 100% des points d'eau. Lorsque la conductivité électrique dépasse $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$, elle devient liée plus aux ions évaporitiques (Cl^- et SO_4^{2-}).

IV.5.2.4. Les éléments SO_4^{2-} , Cl^- :

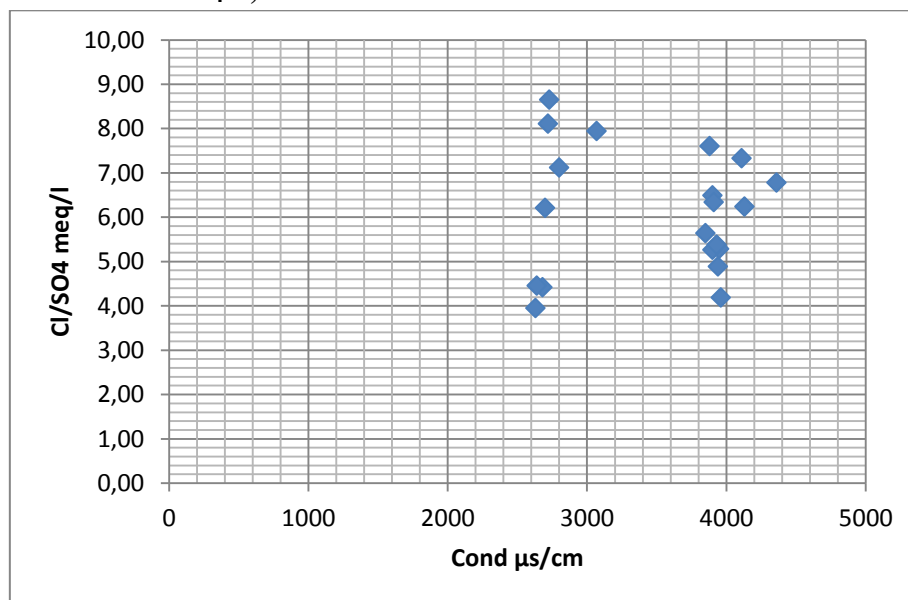


Figure 47: Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique.

Le rapport $\text{Cl}/\text{SO}_4^{2-}$ montre que tous les points d'eau supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl^- par rapport à SO_4^{2-} , ce qui confirme la dominance du faciès chloruré calcique et sodique (Figure).

IV.5.3. Etude de l'acquisition de la minéralisation de l'eau :

Dans ce paragraphe, il convient de discuter sur les différents processus contribuant à la minéralisation des eaux à travers l'approche thermodynamique et les diagrammes d'équilibre construits à partir des teneurs en éléments chimiques majeurs.

L'approche thermodynamique permet d'étudier l'évolution chimique de l'eau en fonction de son état d'équilibre vis-à-vis des minéraux primaires et néoformés de la roche réservoir lors du prélèvement.

Si on considère une réaction chimique entre l'eau et un minéral, la constante d'équilibre thermodynamique de cette réaction, $K(T)$ s'écrit :

$$\mathbf{K(T) = PAI} \quad (1)$$

PAI est appelé produit d'activité ionique. L'écart à l'équilibre est défini par l'indice de saturation IS qui s'écrit :

$$\mathbf{IS = \log(PAI) - \log(T)} \quad (2)$$

Quand $IS = 0$ l'eau est à l'équilibre avec le minéral ;

$IS < 0$ l'eau est sous saturée, et capable de dissoudre le minéral ;

$IS > 0$ l'eau est sursaturée, et capable de précipiter le minéral ;

Dans cette optique, les calculs des indices de saturation ont été réalisés à l'aide du logiciel PHREEQC du programme thermodynamique WATEQ.

Les calculs menés sur les échantillons prélevés en 2020 ont montré que :

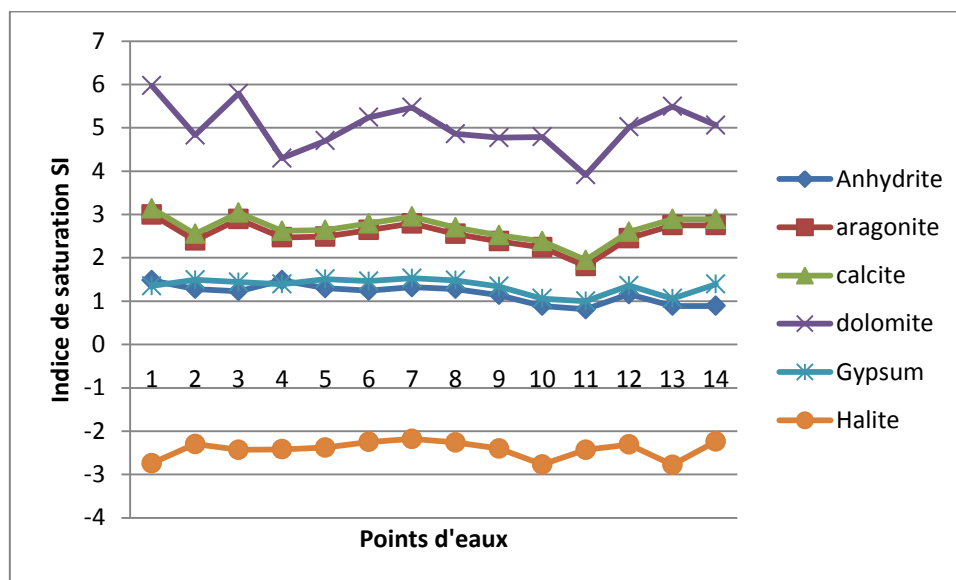


Figure 48: Variation de l'indice de saturation IS (2020).

Les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents. En effet, celui de la calcite varie de - 0.36 à + 0.19, suivi par celui de l'aragonite qui varie de - 1.59 à + 0.09 et enfin celui de la dolomite varie de 3.91 à 5.97.

Le gypse enregistre des indices qui varient de 1 à 1.53 (où 50 % des points d'eau analysés atteint le degré de saturation), suivi de l'anhydrite dont l'indice varie de 0.8 jusqu'à 1.5 (65% atteint le degré de saturation) et enfin l'halite dont les indices varient de -2.74 à - 2.18 (donc sous saturés). Il est intéressant de remarquer que la majorité des eaux sont sursaturées.

IV.6. Les principales sources de pollution :

Les activités humaines passées ou présentes, et en particulier les activités industrielles, mais aussi agricoles et domestiques, libèrent dans l'environnement des produits et des substances potentiellement dangereux, appelés contaminants ou polluants. Ces derniers sont rejetés vers les milieux naturels (eau et sol). Leur présence, notamment dans les eaux souterraines, pose un problème transdisciplinaire à l'interface des écosystèmes et des ressources hydriques.

La ville d'El-Oued a connu durant ces dernières années une certaine expansion économique augmentation démographique Ceci a, d'une part, augmenté la demande en eau et a d'autre part exposé les ressources en eau à différentes pollutions résultant de l'activité urbaine.

Durant nos sorties sur terrain, on a pu faire un inventaire des différentes sources de pollution, qui se résument comme suit:

- Les rejets urbains, qui déversent des eaux usées domestiques dans la plaine, sans traitement préalable ;
- Les décharges ménagères sauvages.

IV.6.1. Répartition spatiale des nitrates :

- La répartition des teneurs en nitrates dans la ville d'El-Oued est liée aux facteurs polluants signalés précédemment, et en particulier à l'activité urbaine et à la nature lithologique de la couche superficielle.
- La cartographie des concentrations (figure 48) montre des teneurs dépassant 30 mg/l à l'Est et au centre de la zone d'étude. Au contraire, à l'ouest de l'aquifère, où les teneurs enregistrées sont faibles et ne dépassent pas 10 mg/l. Les faibles teneurs en nitrates dans cette zone peuvent s'expliquer par le type de la nappe de captage (CI) et le bon état du développement des forages de captage.

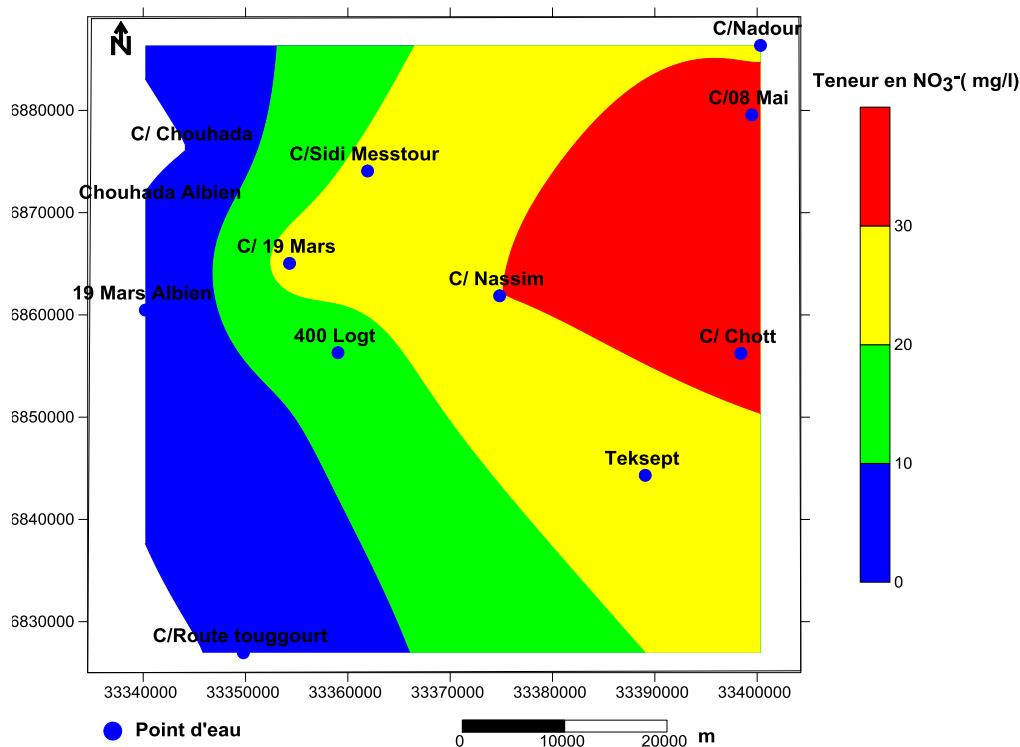


Figure 49: Carte des nitrates en (mg /l) dans la région d'étude 2020.

IV.6.2. Relation nitrates - nitrites :

Les ions nitrates évoluent d'une manière inverse par rapport aux nitrites (figure 49) car ces deux ions présentent deux formes opposées de l'azote : L'une oxydée (nitrates) et l'autre réduite (nitrites).

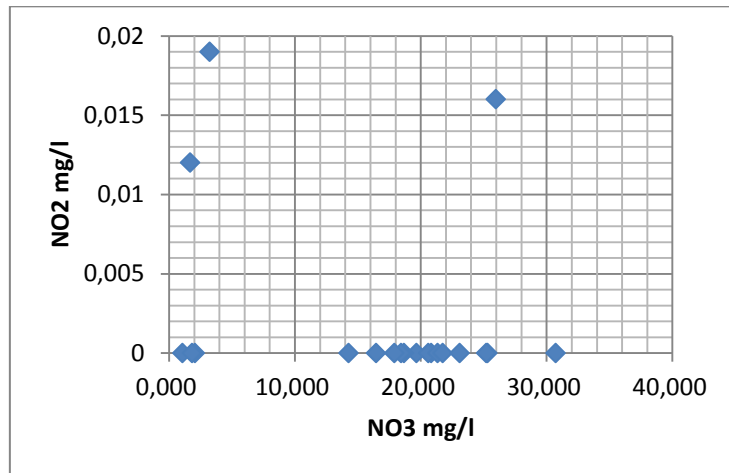


Figure 50: Evolution du nitrate en fonction des nitrites de la zone d'étude (2020).

IV.6.3. Relation nitrates – chlorures :

On a remarqué une certaine corrélation entre les nitrates et les chlorures.

En d'autre terme, les chlorures peuvent avoir plusieurs origines naturelles et anthropiques. On pense qu'une partie des chlorures tire son origine des eaux usées domestiques qui constituent, en même temps une source de nitrates d'origine organique.

Dans le but de confirmer cette dernière, on a fait une comparaison entre l'évolution des chlorures et celle des nitrates (figure50).

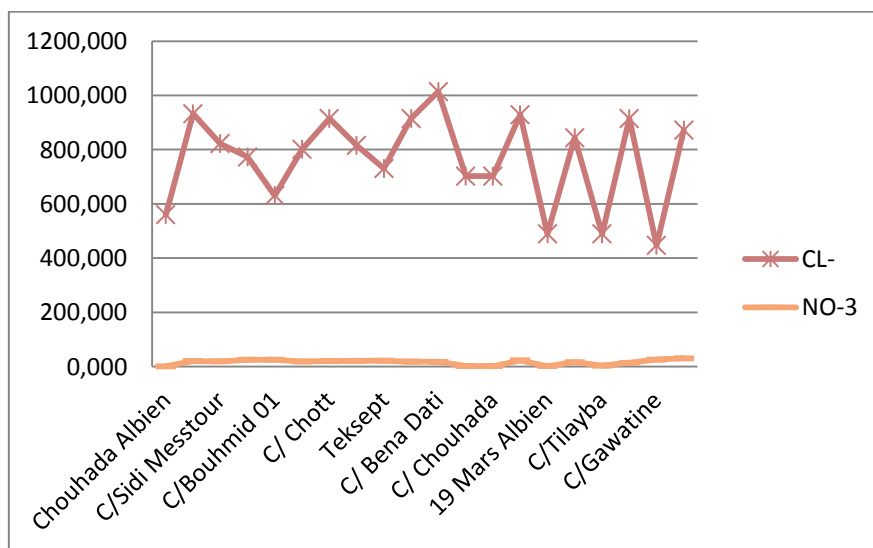


Figure 51: Concentration des nitrates et des chlorures de la zone d'étude (2020)

L'illustration présente un diagramme binaire nitrates versus chlorures. Elle permet de montrer les différentes relations entre les ions Cl^- et NO_3^- . On peut constater sur le graphique qu'au plus de moitié des eaux sont influencées par des apports anthropiques (urbains ou autres). Un échantillon de sites (encadré rouge) présente de fortes teneurs en chlorures combiné à de faibles teneurs en nitrates. Les fortes teneurs en chlorures ne sont donc pas toujours corrélées avec de fortes teneurs en nitrates. Ceci pourrait être dû à un apport naturel en chlorures, (par la dissolution des formations gypso-salifères d'âge triasique, où les évaporites affleurent).

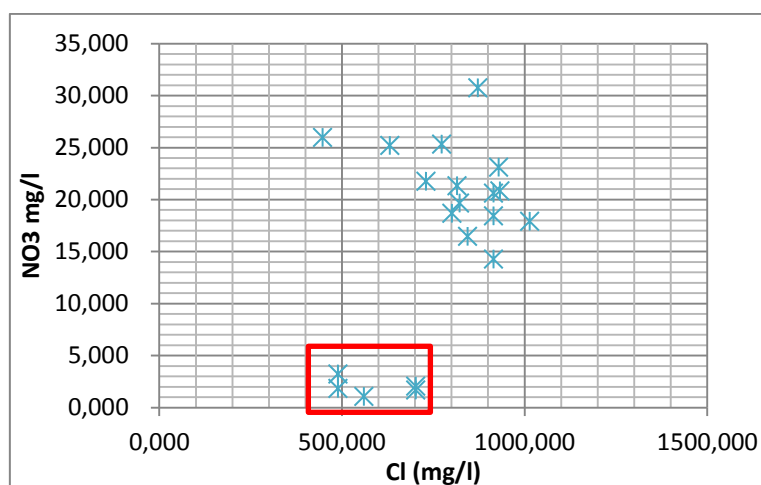


Figure 52: Diagramme du nitrate versus des chlorures de la zone d'étude (2020).

Conclusion :

L'étude hydrogéochimique des eaux de l'aquifère permet de dire que :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de trois faciès dominants, qui sont le chloruré calcique, le chloruré sodique et le sulfaté calcique.

La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques ;

L'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales de la nappe, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-) dans l'acquisition de la salinité. Ce bilan a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux gypsifères et carbonatés a montré que les premiers ont tendance à précipiter avant les seconds, ce qui permet aux éléments chimiques provenant de la dissolution des halites d'acquérir des teneurs importantes.

Chapitre V
Evolution des teneurs en nitrates

Introduction :

L'étude de l'évolution pluriannuelle des concentrations de nutriments dans la région d'étude (nappes profondes et phréatique) est nécessaire, non seulement pour évaluer les tendances en matière de qualité générale des eaux souterraines.

La région d'étude a donc fait l'objet de plusieurs études quantitatives. Les activités urbaines, de plus en plus intensives, auxquelles s'ajoutent une croissance démographique importante et une pluviométrie déficitaire, ont contribué à la diminution des réserves en eau souterraine de cet aquifère et à la dégradation de leur qualité. Parmi les agents chimiques susceptibles d'être à l'origine de la pollution de l'aquifère figurent les nitrates, divers sels. Le but de ce travail est d'identifier clairement d'une part les pratiques qui favorisent l'entraînement des fertilisants dans les eaux souterraines, et d'autre part celle qui ralentissent ou empêchent cette entraînement.

Compte tenu de la forme d'évolution historique de ces teneurs en nitrates depuis 2011, 2012, l'étude de leur évolution, de leur classement, de leur localisation et leur croisement, d'une part avec les données techniques et structurelles de la direction Algérienne d'eau et la direction d'hydraulique de la wilaya d'El-Oued, et d'autre part les paramètres hydrogéologique, paraissent être des moyens privilégiés et promoteurs pour définir et orienter des actions de prévention durables.

V.1.Evolution de l'occupation du sol de la ville d'El-Oued:

Le dynamisme économique et démographique de la ville fait progresser le tissu urbain dans toutes les directions, essentiellement le long de l'axe routier nord-sud, réalisant une conurbation linéaire de 18 km dont les limites se confondent avec Kouinine au Nord et Bayadha au Sud.

La région possède une particularité urbanistique unique, en ce sens que les coupoles et les arcades englobent presque l'ensemble de ses constructions sahariennes, lui conférant splendeur et beauté et lui donnent le surnom de «La ville des milles coupoles».

La population de la commune d'El Oued a quadruplé ses effectifs en l'espace de trente-deux ans, selon les recensements de la population et de l'habitat en 1966, 1987, 1998 et 2008. Plus précisément entre 1966 et 1998, passant de 24 747 habitants à 105 957 habitants. Cela représente un apport moyen de 2 707 hab/an. Depuis 1998, la croissance démographique continue d'être rapide et importante, de 1998 à 2008, elle est passée de 106 000 à 134 699 habitants, avec un apport annuel moyen de 2870 habitants.

L'analyse des photos satellites de la zone d'étude, montre une évolution dans l'occupation de sol dans la période étendue de 2000 à 2009 :

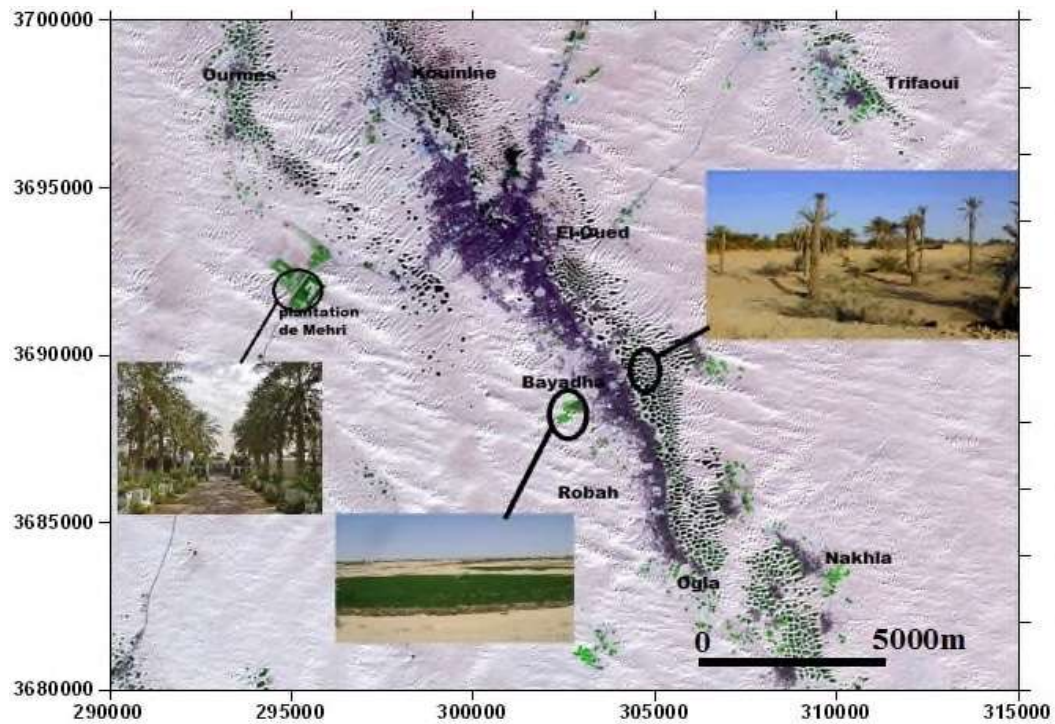


Figure 53: photo satellite de la zone d'étude en 2000 (d'après Boussalssal 2016).

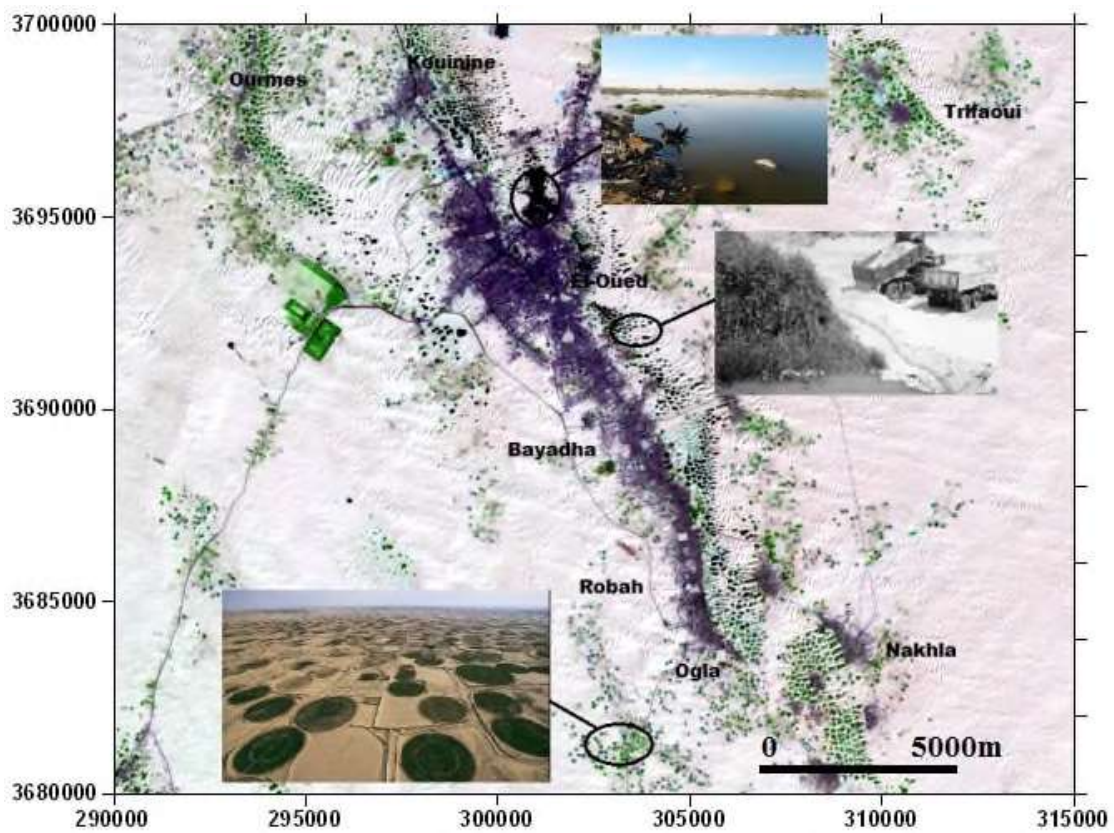


Figure 54: photo satellite de la zone d'étude en 2009 (d'après Boussalssal 2016).

Photo 1 de 2000: nous remarquons la disparition des palmeraies et noyage des ghouts (figure 52), où on constate que plus de 1000 Ghouts inondés sur un total de 9500 à la commune d'El Oued seulement. Ceci s'est traduit par une perte de plus de 150000 palmiers dattiers, à cause de l'asphyxie, selon la direction agricole d'El Oued. Cette disparition est traduite par remplacement de la couleur verte dans la photo 1 par la couleur noire dans la photo 2, le tissu urbain se repousse vers l'ouest, à cause de la croissance démographique, la couleur bleue ciel dans la partie nord représente les eaux de surface apparues dans les zones de dépression (Sidi Mestour, hôtel Louss, Chott et zone de rejet de la ville d'El-Oued).

Photo 2 de 2009: devant les risques des ghouts inondés sur l'homme et l'environnement (crient un milieu idéal pour la croissance des moustiques, source probable des maladies à transmission hydrique), le service de l'hydraulique a décidé de rempilai les ghouts avec des sables dunaires. Les zones agricoles deviennent de plus en plus abondantes (figure53), elles ont donné à la région une autre identité économique comme une région d'agriculture de légumes et de la pomme de terre.

Réseau d'assainissement de la région d'étude:

Le Schéma directeur d'assainissement des eaux usées et pluviales de la vallée de Souf fixe les orientations et les conditions de collecte, d'évacuation, de traitement et d'épuration des eaux usées afin de réduire l'impact de la remontée de la nappe sur les activités socio-économiques, équilibrer le bilan d'eau au niveau de la ville, assurer une profondeur minimale de la nappe phréatique de 1m dans les quartiers inondés, stabiliser ou inverser le phénomène de remontée dans le reste de la ville, assécher les chotts pour éviter la contamination de la nappe phréatique et réduire les nuisances (odeurs, développement de moustiques et de rongeurs) causées aux riverains et sur le cadre de vie et améliorer les conditions sanitaires et environnementales de la zone (BG, 2004).

V.2. La nappe superficielle :

V 2.1. Caractérisation des données :

Après avoir sélectionné le jeu de données pour la détermination de tendance, la première étape consiste à étudier leurs caractéristiques. Cette évaluation débute généralement par la représentation graphique des données suivies par le calcul des statistiques de base qui caractérisent la chronique.

L'illustration ci-dessous montre les teneurs en nitrates (mg/l) de la nappe libre de la région d'étude aux différentes périodes. Les poids médians des groupes de boîte sont plus

variables à l'autre. La boîte de l'étendue interquartile indique une distance longue entre le premier quartile et le troisième quartile.

D'une manière générale, les teneurs en nitrates mesurées sont généralement modérées à élevés, mais varient dans une gamme de deux ordres de grandeurs, entre 0,26 mg/l et 176 mg/l. La plus forte teneur (176 mg/l) a été mesurée au puits D6 durant la période 2018.

La période 2016 présente des teneurs en nitrates généralement faibles, variant entre 0,26 mg/l à 19,8 mg/l (n= 15) avec une moyenne d'ordre 9,11 mg/l et une médiane de 13,5 mg/l (Figure N°). La période 2018 présente des teneurs en nitrates généralement forte, variant entre 2,33 mg/l à 176 mg/l (n= 15) avec une moyenne et médiane d'ordre 59 mg/l et 30 mg/l respectivement (figure 54).

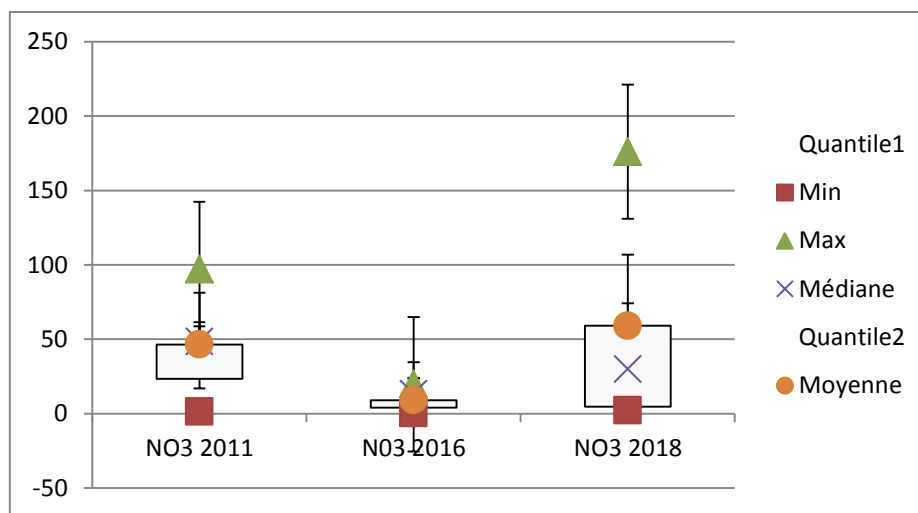


Figure 55: Indicateur statistique pour les teneurs en nitrates (mg/l) de la nappe libre de la région d'étude.

Les points d'eau de notre étude sont représentés par des drains (Figure 55). Le totale des points de captage de l'étude sont des drains captent l'aquifère libre avec pompage.

Les points d'eau sont situés dans les espaces publiques, les jardins de particuliers.

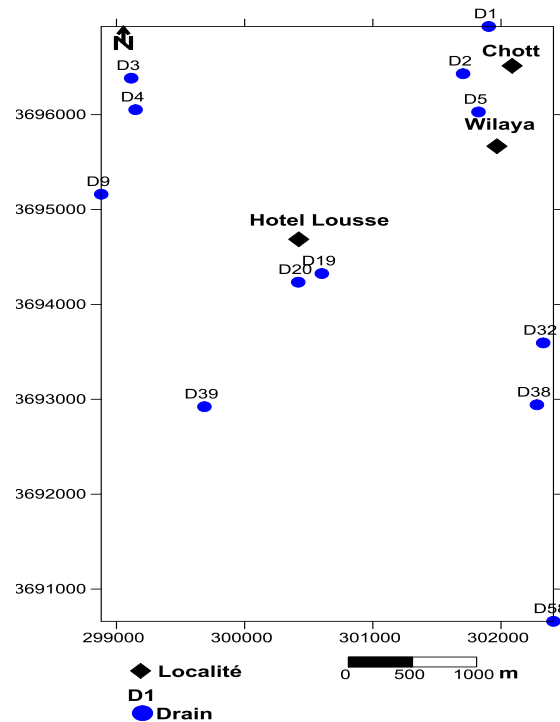


Figure 56: Carte de localisation des différents points d'eau de suivi pour la période de 2011 ,2016 et 2018 ;

V 2.2.Détermination de la courbe des teneurs en nitrates à chaque captage d'eau :

Le premier objectif est de cerner l'évolution temporelle des concentrations de nitrate, à l'échelle annuelle. Une fois ces graphiques obtenus ont relié chaque graphique d'évolution des teneurs en nitrates à son captage (Figure N°). A partir de l'allure des courbes d'évolution des teneurs en nitrates nous avons déterminés trois type de courbes (Tableau 20 et Figure 56).

Type 1 : teneurs inférieur à 20 mg/l ;

Type Z : une stabilisation des teneurs après un abaissement ;

Type M : les teneurs montrent après une stabilisation ou abaissement ;

Les teneurs en nitrates et leur évolution dans le temps en un captage donne sont relievé à l'occupation du sol de la zone d'étude et à l'évolution de cette occupation.

Par contre le type 1 et Z ne couvre que 8,33% et 16,66% de la superficie du secteur d'étude.

On remarque que le type M occupe presque la majorité de la surface de la zone d'étude avec un pourcentage de 75%.

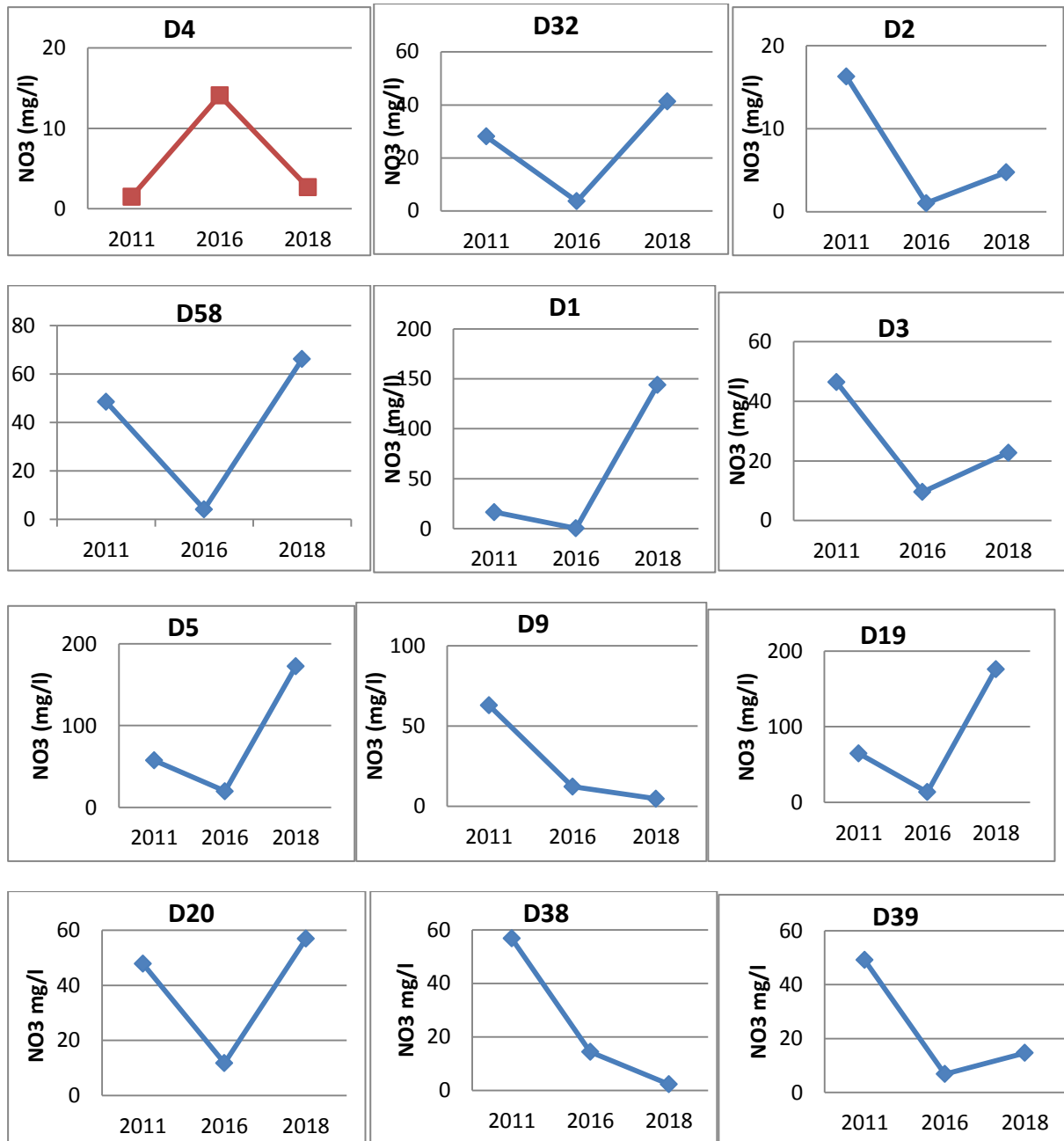
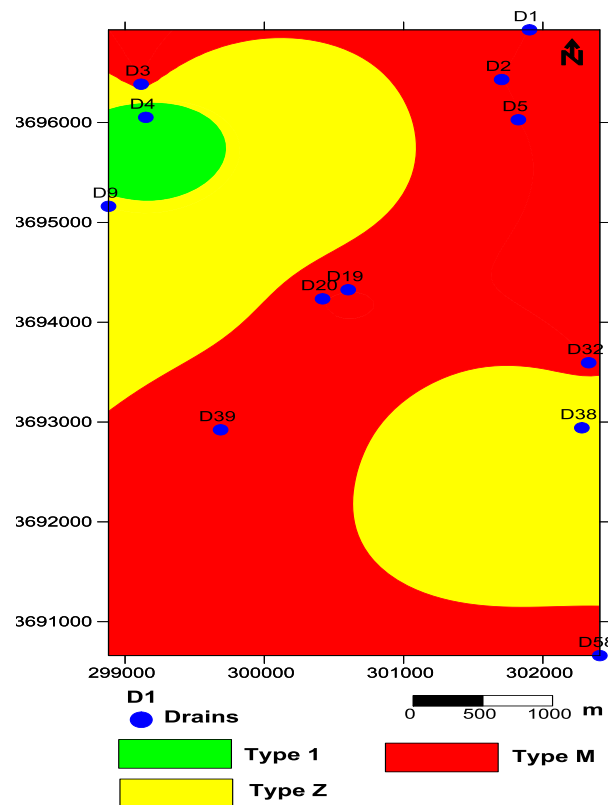


Figure 56: Courbes d'évolution des teneurs en nitrates (mg/l) pour la nappe libre ;

**Tableau 20: Type d'évolution des teneurs en nitrates
(Nappe superficielle)**

Type	Nombre	%
Type 1	1	8,33
Type M	9	75
Type Z	2	16,66

Le tableau ci-dessus montre les types d'évolution des teneurs en nitrates (nappe libre), on remarque que le type M occupe presque la majorité de la surface de la zone d'étude avec un pourcentage de 75%, par contre le type 1 et Z ne couvrent que 8,33% et 16,66% de la superficie du secteur d'étude.



**Figure 57: Carte de répartition spatiale de type d'évolution des teneurs en nitrates
(nappe libre) ;**

L'observation de répartition spatiale de type d'évolution des teneurs en nitrates ; des eaux de la nappe superficielle de la ville d'El-Oued (figure 57) indiquent une convergence de croissance de celles-ci depuis sept ans (2011 à 2018). Cette variabilité d'évolution est fonction des champs captant. Trois types d'évolution des teneurs en nitrates sont définis : Type 1 moins de 20 mg/l, il ne couvre que 8,33% de la zone d'étude.

Type Z couvre 16,33% de la surface de la zone d'étude s'étend du Nord de la région d'étude au Sud-est.

Type M, occupe 75 % respectivement de la zone d'étude, couvre la majorité des points d'eaux ;

V .2.3.Calcul la moyenne des teneurs en nitrates en chaque captage par période de trois ans :

Apartir des valeurs des teneurs en nitrates mesurées aux captages, on a calculés les teneurs moyennes en chaque captage pour trois périodes de trois années chacune (Figure N°).

Moyenne1 : moyenne des années 2011,2016 et 2018 ;

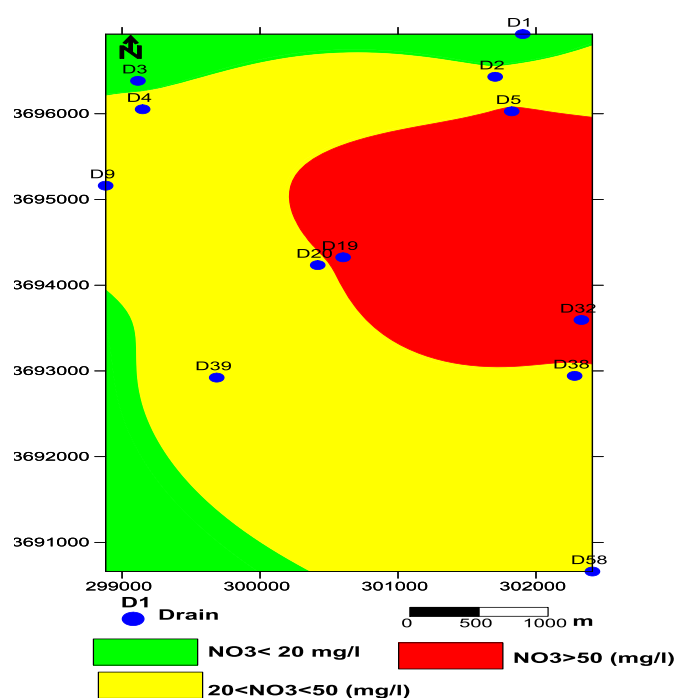


Figure 58: Carte d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2011,2016 et 2018), (Nappe libre) ;

L'observation d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2011,2016 et 2018) ; des eaux de la nappe libre de la ville d'El-Oued (Figure58) indiquent une croissance variable de celles-ci. A l'extrême sud-ouest de la région d'étude présentent une croissance en nitrates plus faible, elle est inférieure à 20 mg/l, Cela montre que ces eaux sont de bonne qualité chimique et plus protégées contre la pollution. Les teneurs moyens varient de 20 mg/l à 50 mg/l. Cette augmentation est orientée de Sud vers le Nord de la région d'étude. Sauf dans l'extrême Nord –de la région d'étude enregistre des teneurs faibles en nitrates moins de 20 mg/l.

Au centre de la région d'étude vers l'est, les teneurs moyennes en nitrates dépassent les normes de l'OMS. Les valeurs élevées sont mesurées aux forages de Teksabt, Chott, Sahenne et hôtel Louss, ils proviennent essentiellement des eaux usées et des fosses perdues, dans les zones urbaines.

V .2.4.Causes probables de l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines :

V .2.4.1 Évolution des teneurs en nitrates en fonction de l'altitude des forages :

L'analyse de l'évolution des teneurs moyennes en nitrates mesurées dans les eaux des points d'eau de la nappe libre comparée à la variation de l'altitude de l'eau de cette nappe révèle qu'il n'y a pas une répartition liée (Figure 59). En effet, certains points de près de 80 m d'altitude présentent des teneurs en nitrates de l'ordre 10 mg/l (directive OMS), alors que des forages ont presque les mêmes altitudes ont des teneurs largement supérieures à 50 mg/l.

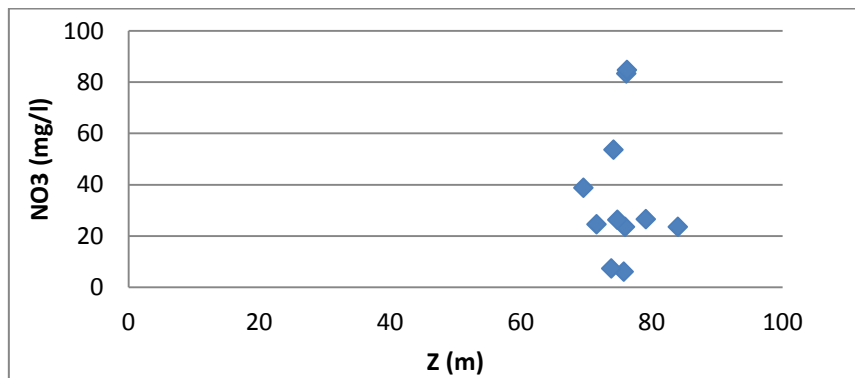


Figure 59: Évolution comparée de la côte de l'eau de la nappe libre et des teneurs moyenne annuelle en nitrates.

V .2.4.2 Évolution des teneurs en nitrates en fonction des profondeurs d'eau des forages:

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la nappe libre présentent une répartition liée à la profondeur des points d'eaux (Figure).

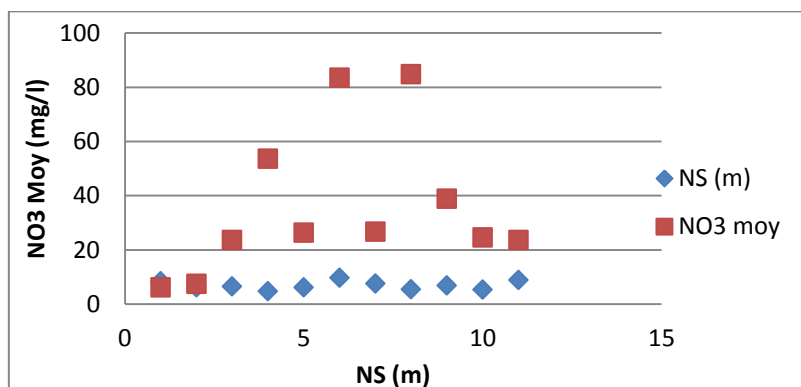


Figure 60: Répartition des teneurs en NO_3^- des eaux en fonction de la profondeur des points d'eaux.

La majorité des forages ont des faibles profondeurs d'eaux et présentent des teneurs en nitrates modérés à fortes.

V.3. Les nappes profondes :

V.3.1. Caractérisation des données :

Après avoir sélectionné le jeu de données pour la détermination de tendance, la première étape consiste à étudier leurs caractéristiques. Cette évaluation débute généralement par la représentation graphique des données suivies par le calcul des statistiques de base qui caractérisent la chronique.

L'illustration ci-dessous montre les teneurs en nitrates (mg/l) des nappes profondes de la région d'étude aux différentes périodes ; il existe une symétrie des données pour chaque série de données. Les poids médians des groupes de boîte sont plus variables à l'autre. La boîte de l'étendue interquartile indique une distance assez longue entre le premier quartile et le troisième quartile.

D'une manière générale, les teneurs en nitrates mesurées sont généralement modérées, mais varient dans une gamme de deux ordres de grandeurs, entre 0,125 mg/l et 62 mg/l. La plus forte teneur (62 mg/l) a été mesurée au puits Bouhmid 1 durant la période 2017.

La période 2015 présente des teneurs en nitrates généralement faibles, variant entre 0,93 mg/l à 33 ,37 mg/l (n= 15) avec une moyenne d'ordre 15,94 mg/l et une médiane de 20,76 mg/l (Figure 61).

La période 2017 présente des teneurs en nitrates généralement forte, variant entre 2,17 mg/l à 62 ,17 mg/l (n= 15) avec une moyenne et médiane d'ordre 25,07 mg/l (Figure 61).

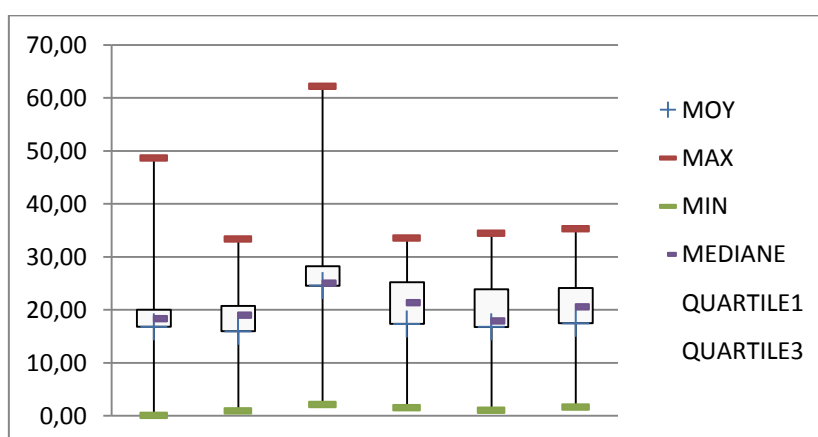


Figure 59: Indicateur statistique pour les teneurs en nitrates (mg/l) pour les nappes profondes de la région d'étude.

V.3.2. Caractérisation des points d'eaux des nappes profondes :

Les points d'eau de notre étude sont représentés par des forages. Plus de 80 % des points de captage de l'étude sont des forages captent l'aquifère du complexe terminal avec pompage, et 20% captent l'aquifère du continentale intercalaire sans pompage (Figure 62).

Les points d'eau sont situés dans les espaces publics, les jardins de particuliers.

Les différents types de captages rencontrés sur la zone d'étude sont en général réalisés dans le cadre de programmes de renforcement de l'alimentation en eau. Ces points d'eaux, captant des nappes profondes.

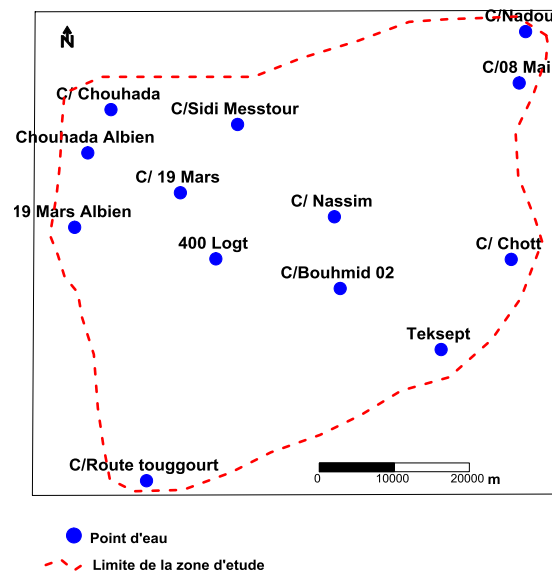


Figure 60: Carte de localisation des différents points d'eau de suivi pour la période de 2012 – 2020 ;

V .3. 3. Détermination de la courbe des teneurs en nitrates à chaque captage d'eau :

Le premier objectif est de cerner l'évolution temporelle des concentrations de nitrate, à l'échelle annuelle et sur le long terme. Une fois ces graphiques obtenus ont relié chaque graphique d'évolution des teneurs en nitrates à son captage. A partir de l'allure des courbes d'évolution des teneurs en nitrates nous avons déterminés cinq type de courbes (Tableau 21 et Figure 63).

Type 1 : teneurs inférieur à 10 mg/l ;

Type 4 : les teneurs augmentent lentement de 10 mg/l à 25mg/l et plus et reste stable à ce niveau ;

Type D : les teneurs baissent après une évolution ;

Type Z : une stabilisation des teneurs après un abaissement ;

Type M : les teneurs montrent après une stabilisation ou baissement;

Les teneurs en nitrates et leur évolution dans le temps en un captage donne sont reliev à l'occupation du sol de la zone d'étude et à l'évolution de cette occupation.

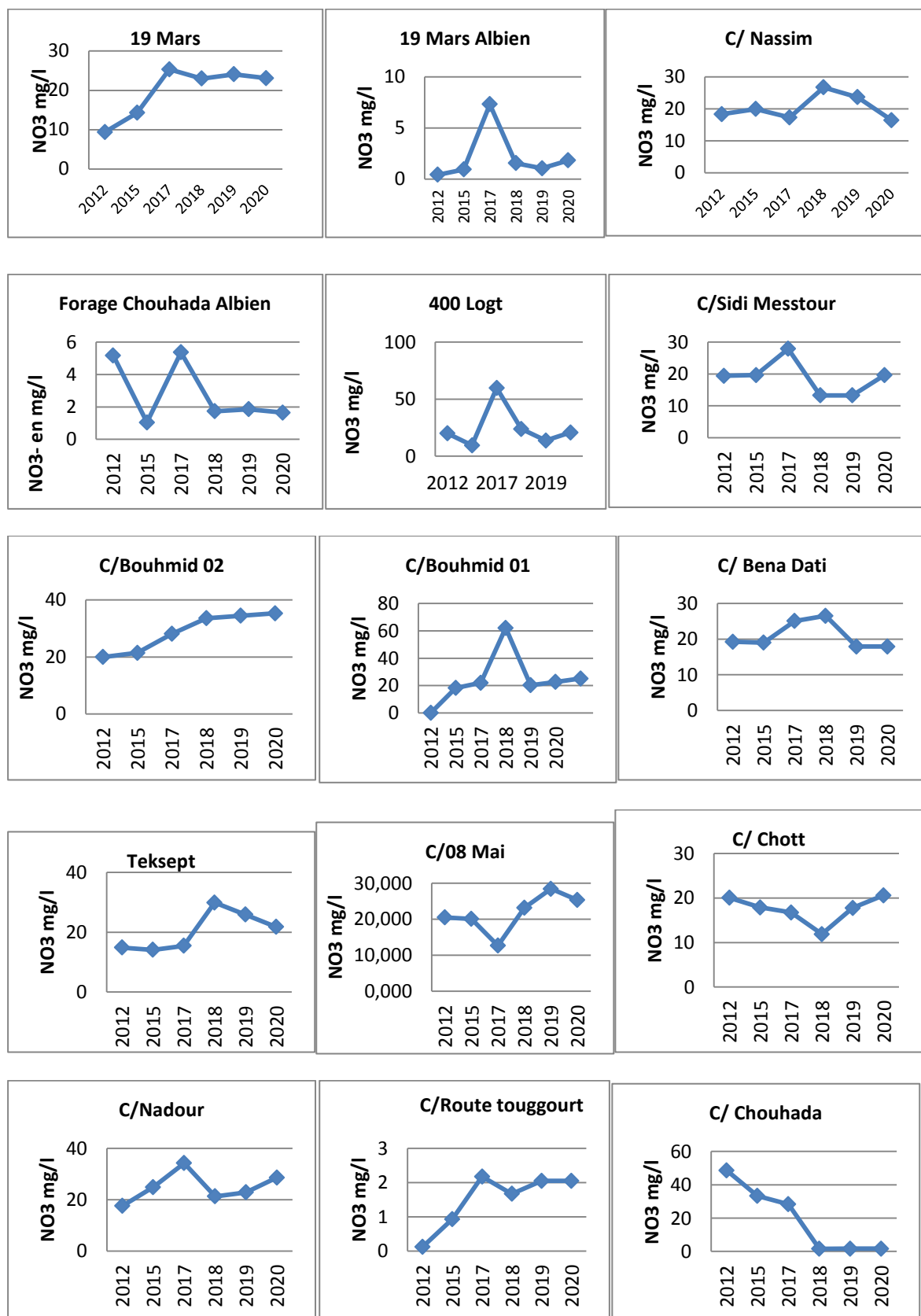


Figure 61: Courbes d'évolution des teneurs en nitrates (mg/l) ;

Tableau 21: Type d'évolution des teneurs en nitrates
(Nappes profondes CT et CI)

Type	Nombre	%
Type 1	3	20
Type 4	2	13,33
Type D	7	46,66
Type M	2	13,33
Type Z	1	6,66

Le tableau ci-dessus montre les types d'évolution des teneurs en nitrates (CI et CT), on remarque que le type D occupe presque la moitié de la surface de la zone d'étude, par contre le type Z ne couvre que 6,66% de la superficie du secteur d'étude.

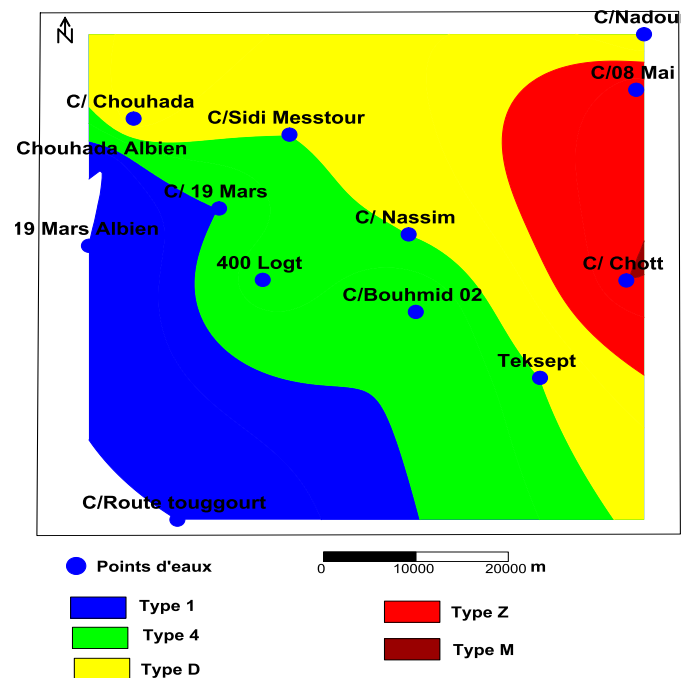


Figure 62: Carte de répartition spatiale de type d'évolution des teneurs en nitrates
(Nappes profondes CT et CI)

L'observation de répartition spatiale de type d'évolution des teneurs en nitrates ; des eaux de forages de la ville d'El-Oued (Figure 64) indiquent une divergence de croissance de celles-ci depuis huit ans (2012 à 2020). Cette variabilité d'évolution est fonction des champs captant.

Cinq types d'évolution des teneurs en nitrates sont définis :

Type 1 moins de 10 mg/l, il ne couvre que 20% de la zone d'étude, les forages captent le CI il est dû à la profondeur de la nappe.

Type 4 et type D couvre 60% de la surface de la zone d'étude s'étend du Nord de la région d'étude au Sud-est. Ces types d'évolution sont dus à

Type M et Z, occupe 13,33% et 6,66% respectivement de la zone d'étude, situé à l'extrémité est de l'aquifère.

V.3.4. Calcul la moyenne des teneurs en nitrates en chaque captage par période de trois ans :

Apartir des valeurs des teneurs en nitrates mesurées aux captages, on a calculés les teneurs moyennes en chaque captage pour trois périodes de trois années chacune (Figure 65.).

Moyenne 1 : moyenne des années 2012,2015 et 2017 ;

Moyenne 2 : moyenne des années 2018,2019 et 2020 ;

L'observation d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2012,2015 et 2017) ; des eaux de forages de la ville D'El-Oued indiquent une croissance variable de celles-ci. A l'extrême sud-ouest de la région d'étude présentent une croissance en nitrates plus faible, elle est inférieur à 10 mg/l, Cela montre que ces eaux sont de bonne qualité chimique et plus protégées contre la pollution. Les teneurs moyens varient de 10 mg/l à 30 mg/l. Cette augmentation est orientée de Sud vers le Nord de la région d'étude. Sauf dans l'extrême Nord –Ouest de la région d'étude enregistre des teneurs moyennes en nitrates assez fortes plus de 30 mg/l.

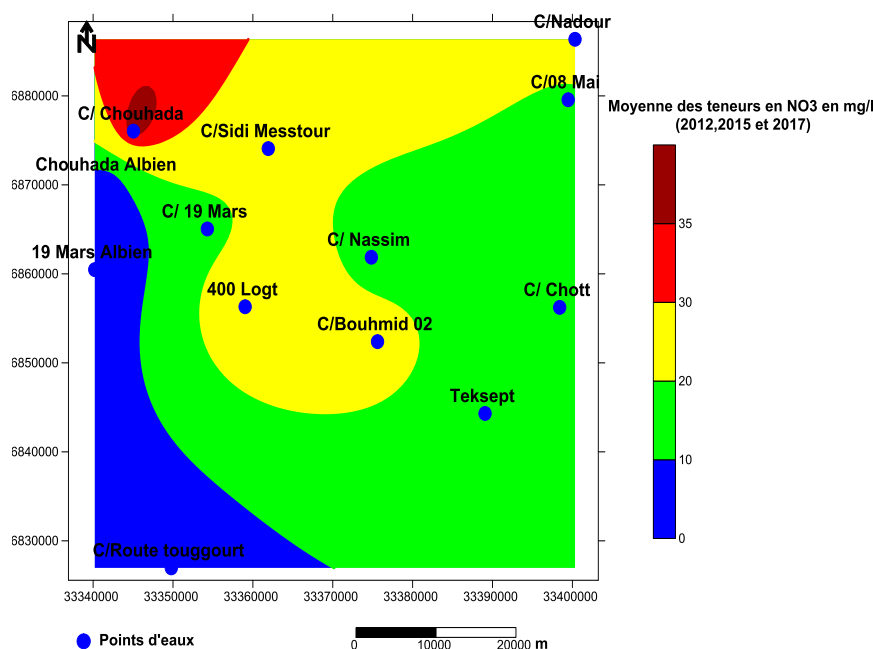


Figure 63: Carte d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2012,2015 et 2017) ; (Nappes profondes CT et CI) ;

L'observation d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2018,2019 et 2020) ; des eaux de forages de la ville d'El-Oued (Figure66) indiquent une croissance variable de celles-ci. A l'extrême ouest de la région d'étude présentent une croissance en nitrates plus faible, elle est inférieure à 10 mg/l, Cela montre que ces eaux sont de bonne qualité chimique et plus protégées contre la pollution. Les teneurs moyens varient de 10 mg/l à 30 mg/l. Cette augmentation est orientée d'Ouest vers l'Est de la région d'étude, elle est suivi le sens d'écoulement des eaux dans le sol. Sauf au niveau du forage Bouhmid 02 situé au centre de la région d'étude enregistre des teneurs moyennes en nitrates assez fortes plus de 30 mg/l.

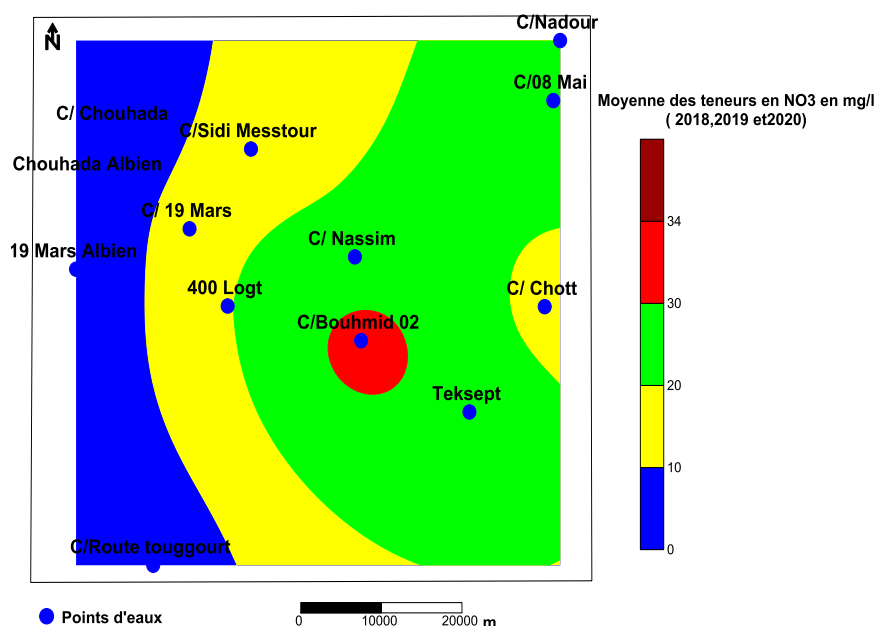


Figure 64: Carte d'évolution des teneurs moyennes en nitrates (mg/l) pour les années (2018,2019 et 2020) ; (Nappes profondes CT et CI) ;

V .3.5. Causes probables de l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines :

On exclut de l'analyse des résultats des captages de type 1, c'est-à-dire les captages de faibles teneur en nitrates (les points d'eaux du CI).

V .3.5.1 Évolution des teneurs en nitrates en fonction de l'altitude des forages :

L'analyse de l'évolution des teneurs moyennes en nitrates mesurées dans les eaux de forages du CT comparée à la variation de l'altitude de l'eau de ces nappes révèle que les teneurs en nitrates sont faibles à moyennes dans les forages où la côte de l'eau de la nappe est forte (Figure 67). Les teneurs moyennes en nitrates diminuent avec l'augmentation de l'altitude de l'eau de la nappe.

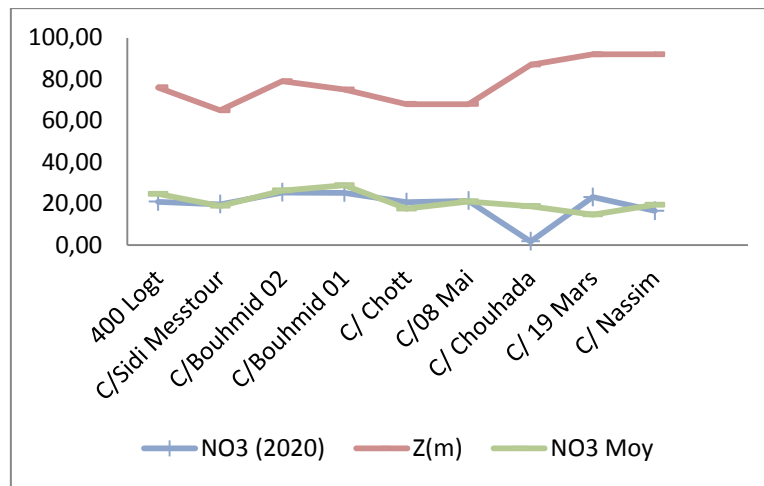


Figure 65: Évolution comparée de la côte de l'eau de la nappe profonde (CT) et des teneurs moyenne annuelle en nitrates et en 2020.

V .3.5.2 Évolution des teneurs en nitrates en fonction des profondeurs d'eau des forages:

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux du Continental Terminal ne présentent pas une répartition liée à la profondeur des forages (Figure68).

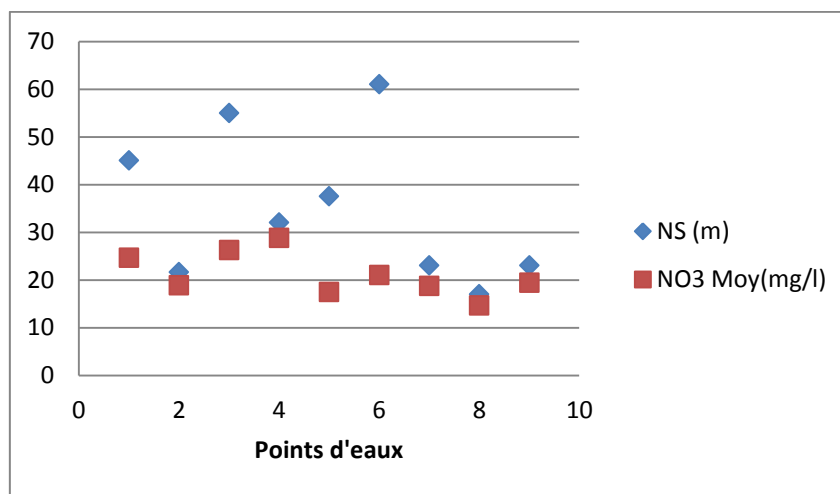


Figure 66: Répartition des teneurs en NO₃⁻ des eaux en fonction de la profondeur des forages.

En effet, certains forages de près de 40 m de profondeur présentent des teneurs en nitrates de l'ordre 25 mg/l (directive OMS), alors que des forages de moyenne profondeurs de 17 m ont des teneurs largement inférieures à 20 mg/l.

V .3.5.3 Évolution des teneurs en nitrates en fonction des volumes d'eau pompés :

L'évolution du taux de nitrates annuel des eaux souterraines en fonction de la production d'eau brute pendant ces dernières années est présentée par la figure. Celle-ci montre que la teneur moyenne annuelle en nitrates des eaux souterraines augmente en

fonction du volume d'eau produit. Cette augmentation de la production d'eau brute s'est faite suite à l'accroissement des besoins en eau de la population de la ville. Cela a entraîné une augmentation du débit de pompage des forages pouvant atteindre par endroits 3715,2 m³/j (Forage Nassim). L'accroissement des teneurs en nitrates, suite à la hausse du débit de pompage des différents forages de la ville, laisse penser à des appels d'eaux extérieures riches en nitrates.

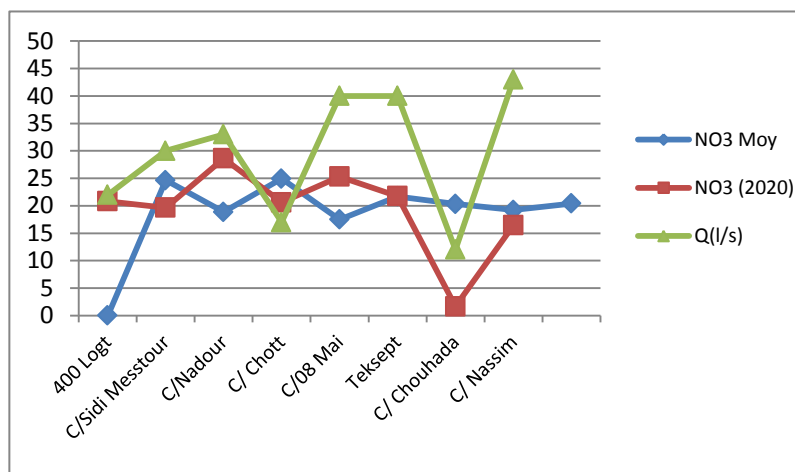


Figure 67: Évolution comparée en fonction des volumes pompés de la nappe profonde (CT) et des teneurs moyenne annuelle en nitrates et en 2020.

V .3.5.4 Évolution des teneurs en nitrates en fonction du niveau piézométrique de la nappe :

Par ailleurs, nous avons observé la variation des teneurs en nitrates des eaux en fonction du niveau piézométrique de la nappe (Figure70). Le niveau piézométrique de la nappe varie respectivement de 24 m et de 75 m. Cette figure montre une variation du taux de nitrates des eaux avec le niveau piézométrique de la nappe. Dans les zones où le niveau piézométrique est assez faible à modérée, le taux de nitrates est modéré dans l'eau des forages. Cette variation est mise en évidence par la moyenne corrélation qui existe entre taux de nitrates et niveau piézométrique (0,49). Cette variation du niveau piézométrique de la nappe avec la teneur en nitrates nous amène à penser à une infiltration verticale des nitrates dans ces différents captages d'eau.

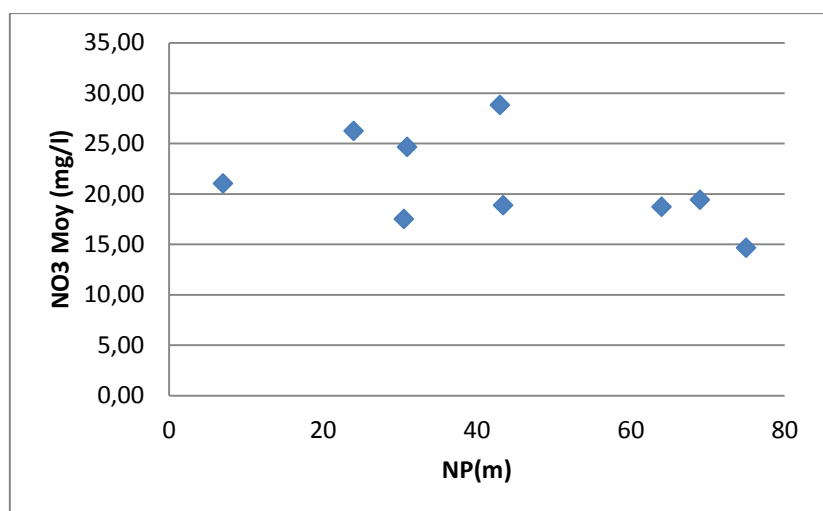


Figure 70: Évolution de la teneur moyenne en nitrates dans les stations en fonction du niveau piézométrique de la nappe.

V .4.Discutions des résultats :

Les nitrates constituent l'un des composés azotés dominants dans les eaux de la ville d'El-Oued.

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville diffèrent d'un aquifère à l'autre.

Cette variabilité spatiale des teneurs en nitrates des eaux traduit également une diversité dans leur origine. Dans une eau naturelle, la minéralisation nitratée peut avoir plusieurs origines.

En effet, dans la ville d'El-Oued, les travaux qui signalent des excès en nitrates dans les eaux souterraines sont de plus en plus fréquents. L'origine des nitrates dans une eau souterraine peut être multiple. Les fortes teneurs en nitrates rencontrées dans les eaux de la nappe du Quaternaire ont une origine urbaine liée aux :

Pendant l'année 2011 il existe l'insuffisance du réseau d'assainissement de la région d'étude à cause de la croissance démographique se traduit par des pressions supplémentaires et l'évolution de la population urbaine, ainsi l'intercommunication puits-latrines par l'écoulement souterrain et la fluctuation du niveau de la nappe ;

En 2016 on enregistre un abaissement des teneurs en nitrate de la région d'étude, cet abaissement peut s'expliquer par l'exécution du projet directeur d'assainissement d'El-Oued.

Pour la période après (2018), on remarque une autre augmentation des teneurs en nitrates de la ville d'El-Oued, cette dernière est due au réseau d'égouttage en mauvais état ; l'infiltration des eaux usées, Fuites depuis le réseau séparatif. Ce risque ne peut concerner que des nouveaux lotissements étant exceptionnellement équipés de réseaux séparatifs. Ils sont peu fréquents ; cependant ces puits sont non aménagés.

Pour les nappes profondes (l'aquifère du complexe terminal) on observe des valeurs ne dépassent pas les normes de l'OMS (50 mg/l), mais on enregistre des valeurs au niveau de certain forage ou endroit (Forage 400 logements, Forage 8Mai, Forage Bouhmid et Forage Sidi Mastour) modérée des fois dépassent 35 mg/l, dans ce cas on peut expliquer par l'influence de l'aménagement de l'ouvrage où la nappe superficielle et la nappe profonde se confondent, et à la suite de dilution des eaux de nappe libre par l'eau des nappes profondes. En fin on peut dire que l'origine de cette pollution au niveau de la ville d'El-Oued est domestique.

Conclusion :

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville d'El-Oued diffèrent d'un aquifère à l'autre. En effet, les eaux de la nappe du Quaternaire sont les plus riches en nitrates. Celles-ci, compte tenu de leur faible profondeur, sont les plus vulnérables. Dans ces eaux, les teneurs moyennes annuelles varient de 6 mg/l à 85 mg/l, avec une moyenne de 37 mg/l. Ces teneurs sont supérieures à la directive OMS (50 mg/l) pour une eau de boisson. Au niveau des eaux du Complexe Terminal, les teneurs moyennes en nitrates varient de 14 mg/l à 37 mg/l, avec une moyenne de 18,14 mg/l. Dans le Complexe Terminal, les teneurs excessives en nitrates sont observées dans les localités telles que Forage Bouhmid 2, 400 logements au centre de la ville.

La distribution spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe du Quaternaire montrent que la majorité des points qui captent cette nappe est soumise à une pollution nitratée. Dans la nappe du Complexe Terminal (CT), les études montrent une évolution de la pollution nitratée selon deux grands foyers. Le premier foyer est Sud-Nord (de la région d'étude). Le second est Ouest- Est en progression vers chott Zone Est. La distribution temporelle des teneurs en nitrates des eaux de la nappe du Complexe Terminal a montré que depuis des décennies, les teneurs en nitrates ont subi un baissment après une augmentation. Cette évolution des teneurs en nitrates est en rapport avec la l'état des infrastructures de la ville d'El-Oued. En fin la grande pression exercée par les activités anthropiques sur les eaux souterraines de ladite ville; ce qui participe à la dégradation de leur qualité.

Conclusion générale

Conclusion générale:

La zone d'étude fait partie de la wilaya El-Oued, elle fait partie du grand Erg oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'altitudes varie entre 64 m et 100 m. La surface de la zone d'étude est occupée par les massifs dunaires, les Ergs, les zones urbaines, les Ghouts, les zones agricoles irriguées et les zones d'eau libre. Le climat de la région est saharien avec un hiver chaud, le bilan hydrique montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable.

De point de vu géologique la zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, à sa base, on trouve des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par des formations continentales de Secondaire et de Tertiaire épaisses de quelques milliers de mètres et en fin le Quaternaire y succède.

La zone d'étude fait partie au système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce dernier est constitué de trois aquifères, un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)). L'interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées sur la base de logs de forages d'eau, montre que l'aquifère libre d'El Oued est constitué de sables, de grés à ciment gypseux friable et des argiles sableuses.

Le substratum est argileux, sa profondeur oscille entre 40 m et 70 m. Les limites latérales de l'aquifère libre, n'ont pas été atteintes étant donné que cette dernière s'étend au-delà de la zone d'étude.

L'examen des cartes piézométriques, montre que l'écoulement de la nappe se fait en général de sud-ouest vers nord-est. Les centres urbains et les zones agricoles irriguées à partir des nappes profondes de CT et CI, présentent sur la carte comme des dômes piézométriques, a cause d'une alimentation forte de la nappe par les eaux d'infiltrations, on ajoute aussi les zones de dépressions et la zone de rejet d'El-Oued.

Caractérisation hydrogéochimique des eaux de l'aquifère permet de dire :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de trois faciès dominants, qui sont le chloruré calcique, le chloruré sodique et le sulfaté calcique.

La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques ;

L'évolution des éléments chimiques (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales de la nappe, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , HCO_3^-)

dans l'acquisition de la salinité. Ce bilan a également mis en évidence le phénomène d'échange de base entre les eaux de la nappe.

Le calcul de l'indice de saturation des minéraux gypsifères et carbonatés a montré que les premiers ont tendance à précipiter avant les seconds, ce qui permet aux éléments chimiques provenant de la dissolution des halites d'acquérir des teneurs importantes.

Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville d'El-Oued diffèrent d'un aquifère à l'autre. En effet, les eaux de la nappe du Quaternaire sont les plus riches en nitrates. Celles-ci, compte tenu de leur faible profondeur, sont les plus vulnérables. Dans ces eaux, les teneurs moyennes annuelles varient de 6 mg/l à 85 mg/l, avec une moyenne de 37 mg/l. Ces teneurs sont supérieures à la directive OMS (50 mg/l) pour une eau de boisson. Au niveau des eaux du Complexe Terminal, les teneurs moyennes en nitrates varient de 14 mg/l à 37 mg/l, avec une moyenne de 18,14 mg/l. Dans le Complexe Terminal, les teneurs excessives en nitrates sont observées dans les localités telles que Forage Bouhmidé 2, 400 logements au centre de la ville. La distribution spatiale des nitrates dans les eaux de la nappe du Quaternaire montrent que la majorité des points qui captent cette nappe est soumise à une pollution nitratée. Dans la nappe du Complexe Terminal (CT), les études montrent une évolution de la pollution nitratée selon deux grands foyers. Le premier foyer est Sud-Nord (de la région d'étude). Le second est Ouest- Est en progression vers chott Zone Est. La distribution temporelle des teneurs en nitrates des eaux de la nappe du Complexe Terminal a montré que depuis des décennies, les teneurs en nitrates ont subi un baissement après une augmentation. Cette évolution des teneurs en nitrates est en rapport avec la l'état des infrastructures de la ville d'El-Oued. En fin la grande pression exercée par les activités anthropiques sur les eaux souterraines de ladite ville; ce qui participe à la dégradation de leur qualité.

RECOMMANDATIONS :

Les principales recommandations que nous proposons, d'après notre travail, pour résoudre le problème de la sensibilité à la pollution des eaux souterraines de la région d'étude sont:

- La sensibilisation de la population sur la préservation de ressources hydriques captives non renouvelables pour les futures générations par optimisation de consommation de l'eau.
- Limitation des apports d'eau vers la nappe libre par réduction des fuites dans réseau de l'AEP et d'assainissement, optimisation de la consommation d'eau par pose de compteurs, interdiction d'arrosage des espaces verts à partir des forages de l'AEP et optimisation de pompage des eaux à partir des nappes profondes (CT et CI).

- La réutilisation des eaux épurées est une nécessité dans la région, mais il faut séparer les eaux usées domestiques qui présentent une conductivité moyenne, des eaux de drainage (vertical et horizontal) présentent une conductivité forte. En plus pour augmenter le rendement du traitement des eaux, il faut utiliser le système d'épuration à plante macrophytes (les roseaux).
- Arrêter le déversement direct des rejets domestiques au niveau de la région d'étude, en réalisant un traitement préalable des eaux de rejet.
- Réaliser une étude d'impact environnemental pour l'emplacement des décharges ménagères dans des endroits où la pollution serait moins importante pour influencer sur la qualité des eaux.
- L'établissement de modèle d'écoulement permettrait de mieux connaître le mécanisme hydrodynamique des eaux souterraines des nappes et un modèle hydrodispersif pour mieux évaluer les mécanismes de transfert de polluants.
- Veiller à une gestion rationnelle des eaux, afin d'éviter la surexploitation intensive et anarchique des eaux souterraines.

***Référence
bibliographique***

Référence bibliographique :

Aghui N. et Biémi J. Géologie et Hydrogéologie des nappes de la région d'Abidjan et risques de contaminations. *Annales de l'Université de Côte d'Ivoire, série C (Sciences)*, tome 20, pp. 313- 347 (1984)

Achour, S. 1990. La qualité des eaux du Sahara Septentrional en Algérie. Etude de l'excès en fluor. *Tribune de l'eau, Cebedeau*, 42 (542), 53-57.

ADE : direction des eaux Algérienne : les résultats des analyses physico-chimiques des forages de CI et CT ;

Adelam S. M. *A Nitrates pollution of groundwater in Nigeria. Groundwater pollution in Africa, Editors Yogini Xu and Brent Usher, Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain, pp. 37-45 (2006)*

Ake, G. E., Dongo, K., Kouadio, B. H., Dibi, B., Saley, M. B. et Biemi, J. 2009.

Contribution des Méthodes de Vulnérabilité Intrinsèque DRASTIC et GOD à L'Etude de la Pollution par les Nitrates dans la Région de Bonoua (Sud- Est de la Côte d'Ivoire). *European Journal of Scientific Research*, ISSN 1450- 216X, Vol.31 No.1 (2009), pp. 157-171.

Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J. et Hack, G. 1987. A standardised system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency Report (EPA/600/2-87/035).

Antonakos, N. et Lambrakis, A. 2000. The hydrogeochemistry of the lake Wako drainage basin, Texas. *Environmental Geology*, Vol. 45 (1): 106-114.

Besbes, M. et Jarraya, H.F. 2007. Définition d'un réseau de surveillance piézométrique du système aquifère du Sahara septentrional. *Sécheresse 2007 ; 18 (1) : 13-22*

Boubir, H. M. N. et Abdallah, F. 2009. Le rôle des services et des investissements dans l'hypertrophie de la ville d'El Oued au bas Sahara algérien. *Environnement Urbain/Urban Environment*, vol. 3, p. c-1-c-18.

Bouhlassa, Saidati., Alechcheikh, Charifa. et Kabiri, Lahcen. 2008. Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Sécheresse. Volume 19, Numéro 1, 67-75, janvier-février-mars 2008.*

Boukari M., Alassane A., Azonsi F., Dovonou F. A. L., Tossa A. et Zogo D. Groundwater pollution from urban development in Cotonou City, Benin. *Groundwater pollution in Africa, Editors Yongxin Xu and Brent Usher, Taylor & Francis/Balkema, Great-Britain, pp. 125-138 (2006)*

- Bouselsal, B. et Kherici, N. 2014.** Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie). *Afrique Science*, Vol.10, N°3, 1 septembre 2014.
- Derradji, F., Kherici, N., Romeo, M. et Caruba, R. 2004.** Aptitude des eaux de la vallée de la Seybouse à l'irrigation (Nord-Est algérien). *Sécheresse* 2004 ; 15 (4) : 353-60.
- Gouaidia, Layachi. 2008.** Influence de la lithologie et des conditions climatiques sur la variation des paramètres physico-chimiques des eaux d'une nappe en zone semi-aride, cas de la nappe de Meskiana (NE Algérie). Thèse doctorat. Univ Annaba. 199p.
- Khechana, S. 2014.** Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyperaride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien). Th. Doctorat, Univ.de Annaba, 148 p.
- Kherici, N., Zouini, D. et Kherici, H. 1996.** Origine de la remontée des eaux de la nappe superficielle de Souf (Nord-Est du Sahara Septentrional Algérien). *Association Espanola de Hidrologia Subterranea. Hidrogeologia* 12:49–59.
- Meziani, A. et al. 2011.** The Aquifer System of the Souf Valley Algerian Northern Sahara. *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X Vol.65 No.3, pp. 416-423.
- Miloudi, Abdel-Monem. 2008.** Mécanismes et remèdes de phénomène de la remontée des eaux dans la région d'Oued Souf. Mémoire magistère en hydraulique. Univ Ouargla.116p.
- Saibi, H. 2003.** Analyse qualitative des ressources en eau de la vallée de l'oued Souf et impact sur l'environnement, région aride à semiaride d'El-Oued (Qualitative evaluation of Oued-Souf valleywater resources and their impact on the environment). Thesis, Houari Boumediene University, Algiers, Algeria, 200 pp
- ZINE, Brahim. 2009.** La remontée des eaux souterraines en surface: mécanisme et l'impact sur l'environnement (Cas de Oued Souf). Mémoire magistère en hydraulique. Univ Batna. 145p.