

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
UNIVERSITÉ KASDI MERBAH – OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, ÉNERGIES
RENOUVELABLE ET SCIENCE DE LA TERRE
DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Thèse

En vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} Cycle en Géologie

Spécialité : Hydrogéologie

Présenté Par :

Mr. OUAREKH Mohammed

THEME

**Caractérisation Hydrogéologique et Géochimique, et
Gestion de l'aquifère de Mio-Pliocène de la vallée du
Souf (SE Algérie)**

Soutenu publiquement le 10 / 10 / 2022

Devant le jury :

Président :	ZEDDOURI Aziez	Professeur	Univ. Ouargla
Directeur de thèse:	BOUSELSAL Boualem	Professeur	Univ. Ouargla
Co-directeur de thèse :	BELKSIER Med Salah	M.C. "A"	Univ. Ouargla
Examineur :	NEZLI Imed Eddine	Professeur	Univ. Ouargla
Examineur :	KHECHANA Salim	Professeur	Univ. EL OUED
Examineur :	BOUZNAD Imad Eddine	M.C. "A"	Univ. Djelfa

Année universitaire : 2021-2022

Dédicace

C'est avec toute mon affection que je dédie ce modeste travail :

*À celle qui m'a donné la vie et qui m'as apporté sans cesse son amour,
ma mère.*

À mon père.

À ma famille,

Et à mes grands-parents

*À toute ma famille et tous mes amis ! Chacun avec son nom, vous
m'avez beaucoup soutenu ! Et vous allez continuer ... Merci !*

Ouarek'h Mohammed

REMERCIEMENTS

*Je remercie en premier lieu **ALLAH**, le tout puissant qui a éclairé mon chemin, et ma donné le courage, la force et la patience pour achever ce travail.*

Cette thèse a été réalisée dans le cadre d'un axe de recherche du laboratoire des réservoirs souterrains pétroliers gaziers et aquifères de l'Université KASDI Merbah-Ouargla, Je remercie les responsables de ces laboratoires qui m'ont accordé d'y accéder afin de réaliser mes expérimentations.

*Je voudrais remercier vivement ma directeur de thèse, **Pr. Bouselsal Boualem**. Je la remercie de m'avoir proposé ce sujet, de m'avoir encadré et de m'avoir consacré une grande partie de son précieux temps pour la réalisation de ce travail.*

*Mes remerciements vont aussi à **Dr. Belksier Med Salah**, mon co-directeur de thèse ; qui n'a jamais cessé à me diriger. Ses conseils et ses orientations, ont permis l'avancement de ce travail. Merci pour la disponibilité et l'intérêt porté à ce travail.*

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à tous les membres de jury :

*- Pr. **ZEDDOURI Aziez**, Professeur à l'université de Ouargla, d'avoir accepté de présider le jury.*

*- Pr. **Nezli Imed Eddine**, Professeur à l'Université de Ouargla d'avoir accepté d'examiner ce travail*

*- Pr. **KHECHANA Salim**, Professeur à l'Université d'El Oued d'avoir accepté d'examiner ce travail*

*- Dr. **BOUZNAD Imad Eddine**, Maître de conférences à l'Université de Djelfa qui a bien voulu juger ce travail, en faisant partie du jury.*

Je remercie toute ma famille, pour le soutien le long de mon parcours, chacun avec son nom qu'ils trouvent ici ma gratitude les plus distinguée.

Merci à maman, papa, mes sœurs et mes frères

الملخص

تُرَكز هذه الدراسة على منطقة وادي سوف، الواقعة في الصحراء الجزائرية، والتي تمتد على مساحة 11,738 كم² وتضم حوالي 643,120 نسمة. وتهدف إلى تعميق المعرفة بالهيدروجيولوجيا والهيدروكيمياء لمستودع المياه الجوفية المركب النهائي (CT) من خلال التحقيقات وتحليل عينات المياه الجوفية. وقد تم تحديد ثلاثة طبقات مائية رئيسية: الحوض القاري المتداخل (CI)، المستودع النهائي (CT)، والمستودع السطحي. يُعتبر المستودع النهائي (CT) خزناً متعدد الطبقات يتكون من الرمال الميو-بليوسينية، والرمل، والحصى الرملية من البونتياني، بالإضافة إلى الحجر الجيري والدولوميت من السينوني-الإيوسي. كشفت الدراسة الهيدروكيميائية للمستودع النهائي (CT) عن سيطرة الأوجه التبخرية CaMg-Cl و Na-Cl، مع تراكيزات من العناصر الرئيسية تتجاوز معايير منظمة الصحة العالمية والجزائر. يصنف مؤشر جودة المياه (WQI) مياه المستودع النهائي (CT) على أنها ذات جودة سيئة جداً. بالإضافة إلى ذلك، تشير تحليلات التوصيل الكهربائي، ونسبة الصوديوم الامتصاصية (SAR)، ورسوم ريتشارد وويلكوكس، و PI و MR إلى أن هذه المياه غير صالحة للري. وتتأثر كيمياء المياه بشكل رئيسي بإذابة الصخور التبخرية، وتبادل الكاتيونات، والأنشطة البشرية. كشفت الدراسة أيضاً عن مستويات مرتفعة من الفلوريد، تتراوح بين 1.86 و 2.65 مغ/لتر. يُعزى هذا الإثراء بالفلوريد إلى العمليات الجيولوجية. يرتبط خطر السرطان الناجم عن تناول الفلوريد بخطر متوسط إلى مرتفع للبالغين ومرتفع للأطفال. يُوصى باستخدام مصادر منخفضة الفلوريد، مثل آبار الحوض القاري المتداخل (CI). وباستخدام نموذج WEAP، قدرت الدراسة الموارد المائية المتاحة ومحاكاة الطلب المستقبلي. من المتوقع أن تبقى الموارد كافية حتى عام 2035، لكن من المتوقع أن تظهر توترات بعد هذا التاريخ بسبب نمو السكان. تم تحديد الزراعة كمستهلك رئيسي للمياه في المستقبل، مع طلب يتجاوز 4820 مليون متر مكعب بحلول عام 2050. ستدخل الموارد المائية القابلة للتعبئة في توترات بعد عام 2030 وتصبح في حالة نقص بعد عام 2035. تسلط نتائج هذه الدراسة الضوء على ضرورة الإدارة المستدامة لموارد المياه في منطقة وادي سوف، إلى جانب معالجة المياه بشكل مناسب لتلبية متطلبات الجودة للاستهلاك والري.

الكلمات المفتاحية: ولاية الوادي، المستودع النهائي (CT)، التحلل، الفلوريد، إدارة المياه الجوفية.

Résumé

Cette étude se concentre sur la région d'Oued Souf, située dans le Sahara algérien, couvrant 11 738 km² et abritant environ 643 120 habitants. Elle vise à approfondir les connaissances en hydrogéologie et hydrogéochimie de l'aquifère du Complexe Terminal (CT) par des investigations et des analyses d'échantillons d'eau souterraine. Trois aquifères principaux ont été identifiés : le Continental Intercalaire (CI), le Complexe Terminal (CT) et l'aquifère superficiel. L'aquifère CT, un réservoir multicouche constitué des sables du Mio-Pliocène, des sables, grès et graviers du Pontien, ainsi que des calcaires et dolomies du Sénonien-Eocène. L'étude hydrochimique de l'aquifère CT a révélé une dominance des faciès évaporitiques CaMg-Cl et Na-Cl, avec des teneurs en éléments majeurs dépassant les normes de l'OMS et de l'Algérie. L'indice de qualité de l'eau (IQE) classe les eaux du CT comme très mauvaises. De plus, les analyses de la conductivité électrique, du SAR, des diagrammes de Richard et de Wilcox, du PI et du MR, montrent que ces eaux sont impropres à l'irrigation. La chimie de l'eau est principalement influencée par la dissolution des roches évaporitiques, les échanges cationiques et les activités anthropogéniques. L'étude a également révélé des teneurs élevées en fluorure variant de 1,86 à 2,65 mg/L. Cet enrichissement en fluorure est attribué à des processus géogéniques. Le risque cancérigène lié à l'ingestion de fluorure est modéré à élevé pour les adultes, et élevé pour les enfants. L'utilisation de sources à faible concentration en fluorure, comme les puits de l'aquifère CI, est recommandée. En utilisant le modèle WEAP, l'étude a estimé les ressources en eau disponibles et simulé la demande future. Les ressources devraient rester suffisantes jusqu'en 2035, mais des tensions sont prévues après cette date en raison de l'augmentation de la population. L'agriculture est identifiée comme le principal consommateur futur d'eau, avec une demande dépassant 4820 Mm³ d'ici 2050. Les ressources mobilisables entreront en tension après 2030 et en pénurie après 2035. Les résultats de cette étude soulignent la nécessité d'une gestion durable des ressources en eau dans la région d'Oued Souf, ainsi qu'un traitement approprié des eaux pour répondre aux exigences de qualité pour la consommation et l'irrigation.

Mots-clés: Oued-Souf, Complexe Terminal, fluorure, Contamination, Gestion des eaux.

Abstract

This study focuses on the Oued Souf region, located in the Algerian Sahara, covering 11,738 km² and home to approximately 643,120 inhabitants. It aims to deepen the knowledge of hydrogeology and hydrogeochemistry of the Complex Terminal (CT) aquifer through investigations and analyses of groundwater samples. Three main aquifers have been identified: the Continental Intercalaire (CI), the Complex Terminal (CT), and the superficial aquifer. The CT aquifer is a multilayer reservoir consisting of Mio-Pliocene sands, Pontian sands, sandstones and gravels, as well as Senonian-Eocene limestones and dolomites. The hydrochemical study of the CT aquifer revealed a dominance of CaMg-Cl and Na-Cl evaporitic facies, with major element concentrations exceeding WHO and Algerian standards. The water quality index (WQI) classifies the CT waters as very poor. Additionally, analyses of electrical conductivity, SAR, Richard and Wilcox diagrams, PI, and MR indicate that these waters are unsuitable for irrigation. The water chemistry is mainly influenced by the dissolution of evaporitic rocks, cation exchanges, and anthropogenic activities. The study also revealed high fluoride levels, ranging from 1.86 to 2.65 mg/L. This fluoride enrichment is attributed to geogenic processes. The cancer risk associated with fluoride ingestion is moderate to high for adults and high for children. The use of low-fluoride sources, such as CI aquifer wells, is recommended. Using the WEAP model, the study estimated the available water resources and simulated future demand. Resources are expected to remain sufficient until 2035, but tensions are anticipated after this date due to population growth. Agriculture is identified as the main future water consumer, with demand exceeding 4820 Mm³ by 2050. Mobilizable resources will come under tension after 2030 and be in shortage after 2035. The results of this study highlight the necessity of sustainable water resource management in the Oued Souf region, along with appropriate water treatment to meet quality requirements for consumption and irrigation.

Keywords: Oued-Souf, Complex Terminal, Dissolution, fluoride, Water Management.

LISTE DES FIGURES

N°	Titre	Page
1	Situation géographique de la zone d'étude	04
2	Carte administrative de la zone d'étude.....	06
3	Topographie de la zone d'étude	08
4	Géomorphologie de la région d'étude	09
5	carte d'occupation du sol de la région d'étude (2000).....	10
6	carte d'occupation du sol de la région d'étude (2010).....	12
7	carte d'occupation du sol de région d'étude (2020).....	13
8	Histogramme des variations annuelles des précipitations	14
9	Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1978-2017).....	15
10	Histogramme des températures moyennes mensuelles (1978-2017).....	16
11	Courbe Pluvio-thermique d'El-Oued (1978-2017).....	16
12	Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1978-2017).....	18
13	Histogramme d'humidité relative moyenne mensuelle (1997 – 2017).....	19
14	Histogramme de La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2017).....	20
15	Insolation de la région du Souf (1997-2009).....	20
16	Evapotranspirations potentielle et réelle mensuelle (en mm).....	22
17	Etat de réserve facilement utilisable et le déficit agricole dans la région d'El-Oued.....	24
18	Carte géologique du Grand Erg Oriental, (Baba Sy.M, 2005).....	28
19	Carte géologique locale du Souf	29
20	Log stratigraphique du Forage dans l'Albien (ANRH)	33
21	Localisation des 26 logs de forages sélectionnés.....	34
22	localisation des logs avec orientation des coupes.....	35
23	Coupes litho-stratigraphiques N°01.....	35
24	Coupes litho-stratigraphiques N°02.....	36
25	Limites du Bassin de Système Aquifère du Sahara Septentrional SASS (OSS, 2003) Modifier.	37
26	Carte piézométrique de la commune d'El oued en Mars 2008 (a), Mars 2016 (b)	39
27	Carte de niveau statique de la commune d'El oued en Mars 2008 (a), Mars 2016 (b)	40
28	Limites de l'aquifère du Complexe Terminal (OSS, 2003b). Modifier.....	41

29	Carte du niveau piézométrique des eaux souterraines de l'aquifère du CT (mars 2010).....	42
30	Carte du niveau piézométrique des eaux souterraines de l'aquifère du CT (mars 2017).....	44
31	Carte de variation du niveau piézométrique des eaux souterraines du CT (2010-2017).....	45
32	Les zones d'alimentation de CT (Baba SY, 2005). Modifier.....	46
33	Coupe hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972).....	47
34	Limite et piézométrie du Continental Intercalaire (Baba SY et al., 2006). Modifier.....	48
35	Les zones de recharge de CI (OSS, 2015) Modifier	48
36	Essai de pompage longue durée à Guemar.....	50
37	Essai de pompage longue durée à Ourmes.....	51
38	Essai de pompage longue durée à Nakhla.....	51
39	Essai de pompage longue durée à el Magrane.....	52
40	Organigramme illustrant les différentes étapes de l'étude.....	54
41	Distribution spatiale de la productivité de l'aquifère CT.....	57
42	Distribution spatiale de la transmissivité de l'aquifère CT.....	58
43	Distribution spatiale de l'épaisseur de l'aquifère CT.....	59
44	Distribution spatiale de niveau statique de l'aquifère CT	60
45	Zones potentielles d'eaux souterraines du CT (mars 2010).....	62
46	Organigramme montrant la méthode adoptée	66
47	Faciès chimique des eaux souterraines	67
48	Carte de distribution spatiale de pH.....	69
49	Carte de distribution spatiale de la conductivité électrique.....	70
50	Carte de distribution spatiale de calcium	71
51	Carte de distribution spatiale de magnesium	72
52	Carte de distribution spatiale de potassium	73
53	Carte de distribution spatiale de sodium.....	74
54	Carte de distribution spatiale de sulfates	75
55	Carte de distribution spatiale des chlorures.....	76
56	Carte de distribution spatiale des bicarbonates	77
57	Carte de distribution spatiale des nitrates	78

58	Carte de distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau	80
59	Le diagramme de Wilcox des eaux de l'aquifère de CT	82
60	Le diagramme de Richards des eaux de l'aquifère de CT	83
61	Le plot de l'échantillon d'eau souterraine dans le diagramme de Gibbs	85
62	Diagramme de Na^+ en fonction Cl^-	86
63	Diagramme de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ en fonction de SO_4^{2-}	87
64	Diagramme de Ca^{2+} en fonction de SO_4^{2-}	87
65	Relation entre Na^+ et SO_4^{2-}	88
66	Diagramme de $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl}^-)]$ en fonction de $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ en meq/l.....	89
67	Diagramme de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ en fonction de $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ en meq/l.....	89
68	Diagramme de l'état de saturation de minéral de l'aquifère CT	90
69	Dendrogramme HCA des paramètres des eaux souterraines (a), résultats de l'ACP montrant les variables des PCs (b)	91
70	Distribution spatiale du CE pour les clusters d'eau souterraine.....	92
71	Organigramme montrant la méthode adoptée.....	93
72	Distribution spatiale du fluorure dans les eaux souterraines.....	94
73	Relation entre F^- et le Ca^{2+}	96
74	Relation entre F^- et pH	97
75	Relation entre F^- et HCO_3^-	97
76	Relation entre F^- et Na^+	98
77	Diagramme de $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-]$ vs $[(\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-) - (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})]$ en meq.....	99
78	Diagrammes de fluorite (SI) vs F^-	101
79	Diagrammes de fluorite (SI) vs calcite (SI).....	101
80	Diagrammes de fluorite (SI) vs dolomite (SI).....	102
81	Diagrammes de fluorite (SI) vs gypse (SI).....	102
82	Distribution spatiale du risque pour la santé dû à la contamination par le fluorure dans les eaux souterraines (Enfants)	103
83	Distribution spatiale du risque pour la santé dû à la contamination par le fluorure dans les eaux souterraines (Femmes).....	104
84	Distribution spatiale du risque pour la santé dû à la contamination par le fluorure dans les eaux souterraines (Hommes).....	105

85	License WEAP acquise pour la présente étude.....	109
86	Sites de demandes dans les communes de la vallée de Oued Souf.....	111
87	Niveau d'activité annuelle des sites des demandes domestiques -Compte d'état actuel, 2017-.....	112
88	Prélèvement maximal des nappes phréatique.....	113
89	Prélèvement maximal de l'aquifère CT.....	113
90	Fenêtre montrant les hypothèses clés et le compte courant.....	114
91	Création des scénarios	115
92	Evolution de la population dans la zone d'étude.....	116
93	Evolution de la demande en eau domestique dans le zone d'étude - Scénario 1 :Scénario de référence (2018-2050).....	117
94	Evolution des superficies irriguées - Scénario 1 : Scénario de référence (2018- 2050)- Demande pour l'irrigation.....	118
95	Demande en eau pour l'irrigation	119
96	L'eau distribuée - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-.....	120
97	Demande en eau non satisfaite - Scénario 1 : Scénario de référence (2018- 2050)-.....	120
98	Evolution de la population. Scénario 2 : Scénario de forte accroissement de la population (2018-2050)-.....	122
99	Evolution de la demande en eau - Scénario 2 : Fort accroissement de la populaion (2018-2050)-.....	123
100	Eau distribuée. - Scénario 2 : Fort accroissement de la populaion (2018-2050)-	124
101	Demande en eau non satisfaite. - Scénario 2 : Fort accroissement de la population (2018-2050)-.....	125
102	Comparaison de l'eau distribué avec le scénario référence (2018-2050)-.....	126
103	Comparaison de demande non satisfaite avec le scénario référence (2018- 2050)-.....	126
104	Evolution des superficies irriguées -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-.....	127
105	Evolution de la demande en eau d'irrigation -Scénario 3 : Augmentation des... superficies irriguées (2018-2050)-.....	128
106	Eau distribuée. -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018- 2050)-.....	129
107	Demande en eau non satisfaite. -Scénario 3 : Augmentation des superficies	130

	irriguées (2018-2050)-.....	
108	Evolution de la demande en eau. - Comparaison avec le scénarios (2018-2050)-	131
109	Evolution de l'eau distribué . - Comparaison avec le scénarios (2018-2050)-.....	132
110	Evolution de la demande non satisfaite - Comparaison avec le scénarios (2018-2050)-.....	132

LISTE DES TABLEAUX

N°	Titre	Page
1	Répartition de la superficie et nombre d’habitant et la densité de La zone d’étude	5
2	Classement en fonction de l’indice d’aridité (selon De Martonne).....	18
3	Bilan hydrique de la station de Guemar (1977/ 2018) par la méthode de THORNTWAITE.....	23
4	Résultats des paramètres hydrodynamiques pour les 04 sites d'essai.....	52
5	Poids des différentes couches et classement des caractéristiques.....	56
6	Résumé statistique des paramètres des eaux souterraines.....	61
7	Les catégories des zones de potentiels en eaux souterraines.....	61
8	Variations des paramètres physico-chimiques des eaux du complexe terminal et les normes de potabilité des eaux.....	68
9	Poids et poids relatif de chaque paramètre utilisé pour le calcul de l'IQE.....	79
10	Classification des échantillons d'eau souterraine pour les besoins de l'irrigation..	81
11	Corrélations de Pearson pour les eaux souterraines de l'aquifère CT.....	85
12	Projection de la population totale de la zone d'étude.....	111
13	Projection de la population totale.....	116
14	Evolution de la demande en eau domestique.....	117
15	Projection des superficies irriguées	118
16	Evolution de la demande en eau d’irrigation	119
17	L’eau distribuée	120
18	L’eau non satisfaite	121
19	Projection de la population totale	122
20	Evolution de la demande en eau	123
21	L’eau distribuée	124
22	L’eau non satisfaite - Scénario 2.....	124
23	Projection des superficies irriguées. -Scénario 3	126
24	Evolution de la demande en eau d'irrigation-Scénario 3.....	128
25	Projection de l’eau distribuée. -Scénario 3.....	129
26	Projection de la demande en eau non satisfaite. -Scénario 3.....	130

SOMMAIRE

DEDICACE.....	I
REMERCIEMENT.....	II
الملخص.....	III
RESUME.....	IV
ABSTRACT.....	VI
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

CHAPITRE I : Généralités sur la zone d'étude

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	4
1.1. Situation géographique.....	4
1.2. Répartition administratif et population du Souf	5
1.3. Cadre socioéconomique	6
1.4. Topographie et géomorphologie de la zone d'étude.....	7
1.5. Évolution d'occupation des sols dans la zone d'étude.....	9
2. CONTEXTE HYDROCLIMATOLOGIQUE DU SOUF.....	13
2.1. Les précipitations.....	14
2.2. La température	16
2.3. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN.....	16
2.4. Diagramme d'Emberger	17
2.5. L'indice d'aridité.....	17
2.6. Humidité relative de l'air.....	19
2.7. Le vent.....	20
2.8. L'insolation.....	20
2.9. Evapotranspiration	
2.9.1. Evapotranspiration potentielle (ETP)	21

2.9.2. Evapotranspiration réelle (ETR).....	22
2.10. Bilan hydrologique	23
3. Conclusion.....	24

CHAPITRE II : Géologie et Hydrogéologie de la région d'étude

1. Géologie de la région du Souf.....	27
1.1. Géologie régionale	27
1.2. Cadre géologique local	28
1.2.1. Formation de l'ère Secondaire	28
1.2.1.1. Le Barrémien.....	28
1.2.1.2. L'Aptien.....	28
1.2.1.3. Albien.....	29
1.2.1.4. Le Vraconien.....	30
1.2.1.5. Le Cénomaniens.....	30
1.2.1.6. Le Turonien.....	30
1.2.1.7. Sénonien.....	30
1.2.2. Le Tertiaire.....	31
1.2.2.1. L'Eocène.....	31
1.2.2.2. Le Mio-pliocène.....	31
1.3. Interprétation des coupes Litho-stratigraphiques.....	34
1.3.1. Coupe N° 1.....	34
1.3.2. Coupe N° 2.....	35
2. HYDROGEOLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE.....	36
2.1. Introduction.....	36
2.2. Présentation du système aquifère du Sahara septentrional.....	37
2.2.1. Nappe phréatique.....	37
2.2.2. Piézométrie de la nappe phréatique.....	38
2.2.3. Variation du niveau piézométrique entre Mars 2008 et Mars 2016	39
2.2.4. Variation du niveau statique	39
2.3. Le complexe terminal.....	40

2.3.1. Nappe des Sables.....	42
2.3.2. Nappe des calcaires.....	42
2.3.3. Piézométrie du CT dans la région de Souf.....	43
2.4. Le Continental Intercalaire.....	46
2.4.1. La piézométrie de la nappe continentale intercalaire.....	47
3. Caracteristiques hydrodynamiques de la nappe du CT	48
3.1. Méthode de Theis.....	49
3.2. L'approximation logarithmique de Cooper-Jacob	49
4. Délimitation hydrogéologique des zones potentielles en eau souterraine dans l'aquifère CT	53
4.1. Collecte des données.....	54
4.2. Essais des pompages.....	55
4.3. Le processus de hiérarchisation analytique (PHA).....	55
4.4. Carte de productivité de l'aquifère.....	57
4.5. Carte de transmissivité de l'aquifère	58
4.6. Carte d'épaisseur	59
4.7. Carte des niveaux statiques.....	60
4.8. Zones de potentiel des eaux souterraines.....	61
4.9. La validation.....	61
5. Conclusion:.....	63

CHAPITRE III : Etude hydrogéochimique de l'aquifère de CT

1. Introduction.....	63
2. Prélèvement des eaux souterraines et analyse physico-chimique.....	64
3. Faciès chimique des eaux souterrain.....	66
4. Propriétés physico-chimiques.....	67
4.1. Evaluation de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine.....	67
4.2. Cartographie de la répartition spatiale des différents éléments.....	68
5. Evaluation de la qualité des eaux à l'aide de l'indice de qualité des eaux (IQE	78

5.1. Principe et méthode:.....	78
5.2. Résultats et discussions.....	79
6. Aptitudes des eaux à l'irrigation.....	80
6.1. La méthode de Richards et Wilcox.....	82
6.2. La conductivité électrique	83
6.3. L'indice de perméabilité (IP) (Doneen 1964).....	84
6.4. Le rapport de risque du magnésium.....	84
7. Contrôle de la chimie des eaux souterraines	84
7.1. La matrice de corrélation.....	84
7.2. Diagramme de Gibbs(Gibbs 1970).....	85
7.3. Les diagrammes binaires.....	86
7.4. Ion exchange processes.....	88
7.5. Analyse statistique multivariée	90
8. Évaluation géochimique des fortes concentrations de fluor et de leurs effets sur la santé humaine.....	92
8.1. Évaluation des risques non cancérogènes pour la santé humaine.....	92
8.2. Caractéristiques statistiques et variation spatiale de F-	94
8.3. Évolution géochimique de la fluore dans les eaux souterraines	95
8.4. Processus d'échange ionique.....	98
8.5. Modélisation géochimique des phases minérale.....	99
8.6. Évaluation des risques pour la santé liés au fluorure.....	100
9. Conclusion.....	106

CHAPITRE IV : Gestion de l'aquifère de Complexe Terminal

1. Introduction.....	108
2. Application du modèle WEAP dans la région de Oued Souf.....	108
2.1. Acquisition du software WEAP 21.....	108
2.2. Fonctionnement du logiciel.....	108
2.3. La création de la région d'étude.....	109
2.4. Analyse et traitement des données nécessaires.....	110

2.5.	Sites des demandes.....	110
2.5.1.	Demande d'eau domestique	111
2.5.2.	Superficie agricole et besoins en irrigation.....	112
3.	Les ressources en eau.....	112
3.1.	La nappe phréatique	112
3.2.	L'aquifère du Complexe Terminale.....	113
3.3.	L'aquifère du Continental Intercalaire.....	114
4.	Création et analyse des scénarios.....	114
4.1.	Scénario de référence (2018-2050).....	115
4.2.	Scénarios de forte accroissement de la population.....	121
4.3.	Scénario de forte croissance des superficies irriguées.....	126
5.	Confrontation offre-demande en eau dans la région de Oued Souf.....	133
	CONCLUSION GENERALE.....	135
	BIBLIOGRAPHIE.....	139

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

En Algérie, il existe une forte pénurie d'eau potable. La pénurie d'eau à des fins domestiques, agricoles et industrielles est devenue plus sérieuse dans les régions arides et semi-arides, principalement en raison des faibles précipitations. Depuis 1970, l'Algérie a commencé à exploiter le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) où les prélèvements d'eau sont passés de 600 Mm³/an en 1970 à plus de 2120 Mm³/an en 2020 (DRE 2021). Ce réservoir est considéré comme l'un des plus grands systèmes d'eau souterraine du monde et est composé de deux aquifères principaux (le Complexe Terminal (CT) et le Continental Intercalaire (CI)) englobant la plus grande réserve d'eau douce du monde sont estimés à $31.000 \times 10^9 \text{ m}^3$ (ERESS 1972 ; OSS 2003). En raison de la détérioration de la qualité de l'eau de l'aquifère superficiel dans la région de Oued Souf depuis les années 1980, les forages dans le réservoir profond ont augmenté, les prélèvements d'eau pour l'alimentation en eau potable sont principalement effectués à partir de 203 forages dans l'aquifère du Complexe Terminal avec une exploitation moyenne de 563 Mm³ /an (DRE 2019).

De nombreuses recherches ont été menées sur cet aquifère focalisées sur la modélisation par simulation et modèles mathématiques, les processus contrôlant la minéralisation des eaux souterraines basés sur l'analyse chimique et isotopique, l'analyse statistique multivariée et l'évaluation des eaux souterraines et la plupart de ces recherches se sont intéressées à la prédiction du comportement à long terme de l'aquifère (Guendouz et al. 2003 ; Moulla et al. 2012 ; Guendouz et Moulla 1995 ; Paix 1956 ; Cornet 1964). Cependant, ces études ont montré que les temps de résidence des eaux souterraines et les signatures hydrogéochimiques (isotopiques et chimiques) dans ces systèmes d'eaux souterraines diffèrent considérablement (géométrie, lithologie et tectonique) (Guendouz 1985 ; Moulla et al. 2012). Ils ont constaté que les schémas d'écoulement des eaux souterraines, la précipitation/dissolution des minéraux, l'altération des silicates, l'échange d'ions et le mélange des eaux étaient responsables de la qualité des eaux souterraines du système aquifère.

A la fin du dernier siècle, différents problèmes environnementaux ont été observés autour de la région du Souf, notamment une augmentation du niveau de la nappe phréatique et une dégradation significative de la qualité des ressources en eau souterraine (Bouselsal et al. 2014 ; Bouselsal et al. 2015 ; Bouselsal 2016 ; Khechana 2014 ; Khalfaoui et al.

2021). Ceci résulte probablement d'un besoin croissant en eau dû à la croissance rapide de la population de la région, à l'expansion des champs agricoles, et à l'utilisation de nombreux puits artésiens utilisés localement pour l'irrigation. De nombreuses études ont été menées sur l'aquifère CT (Bouselsal et Belksier 2018 ; Bouselsal 2016 ; Khechana 2014). Cet aquifère considéré comme fossile est rapidement surexploité dans toute la région d'Oued Souf, ce qui entraîne une détérioration rapide de la qualité de l'eau et une baisse significative du niveau piézométrique. Par conséquent, la compréhension des processus hydro-géochimiques et des facteurs affectant la chimie des eaux souterraines dans l'aquifère du Mio-Pliocène est également essentielle pour l'élaboration d'une gestion durable des ressources en eau ; il est nécessaire d'établir un calendrier de programme axé sur l'amélioration du pompage de l'eau à long terme pour l'exploitation durable de cet aquifère, en particulier dans les zones où des salinités élevées sont observées, ce qui permettra de maintenir l'équilibre entre la disponibilité de l'eau douce et les besoins humains.

Cependant, il manque des études complètes couvrant les évaluations hydrogéochimiques effectuées sur la partie de la vallée du Souf de l'aquifère Mio-Pliocène qui est considéré comme une grande ressource en eau, ce qui a limité la compréhension de la variation spatiale de la qualité des eaux souterraines et donc l'identification des principaux processus contrôlant la chimie des eaux souterraines .

Ces études ont été développées pour évaluer le système de ressources en eau souterraine, structuré en quatre chapitres comme suit :

- ***Le premier chapitre*** se base sur la présentation du cadre physique de la zone d'étude ; dans laquelle les caractéristiques géographiques, climatiques et hydrologiques de la région de Souf sont discutées.
- ***Le deuxième Chapitre*** traite de la géologie et l'hydrogéologie des systèmes aquifères de la région du Souf; en définissant sa géométrie, piézométrie ses paramètres hydrodynamiques par l'interprétation des essais de pompages
- ***Le troisième Chapitre*** se fonde sur, l'identification des principaux processus contrôlant la chimie des eaux souterraines ont été limitées et évaluer sa qualité du point de vue pour la consommation humaine et de l'irrigation. Identifier les

groupes d'eau homogènes ayant des caractéristiques chimiques similaires et expliquer les relations de mélange entre les différents horizons aquifères

- *Le quatrième chapitre* est basé sur la gestion des ressources en eau et applique le modèle (WEAP) pour fournir une estimation quantitative des ressources en eau disponibles, simuler la demande en eau non satisfaite dans différents scénarios futurs, et le bilan hydrique de l'aquifère du CT dans le but de fournir des recommandations techniques sur la gestion intégrée durable des ressources en eau.
- La thèse se terminera par *une conclusion* qui présentera les principaux résultats obtenus.

Cette thèse aspire ainsi à apporter des contributions significatives à la compréhension et à la préservation des ressources en eau souterraine dans cette région cruciale du Sahara algérien. Elle s'adresse tant aux chercheurs qu'aux décideurs, offrant des connaissances essentielles pour garantir un avenir durable pour la région de Oued Souf et pour répondre aux défis mondiaux liés à la gestion de l'eau.

Chapitre I

Généralités sur la zone d'étude.

1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1. 1. Situation géographique :

La wilaya d'oued Souf est située dans le Sahara algérien au Sud Est à 500 Km d'Alger (Figure 01), elle est considérée comme une wilaya depuis 1984 et occupe une superficie totale de 4458600 ha répartie à travers 30 communes regroupées dans 12 daïras. Oued Souf se trouve à environ 350 km à l'Ouest de Gabes (Tunisie). Elle est limitée :

- ✓ Au Nord par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa.
- ✓ Au Sud par l'extension de l'Erg Oriental.
- ✓ A l'Est par la frontière algéro-tunisienne.
- ✓ A l'Ouest par la vallée de l'Oued Righ.

La région d'étude s'étend sur 18 communes (El Oued, Bayadha, Robbah, Kouinine, Guemar, Taghzout, Hassani Abdelkrim, Debila, Sidi Aoun, Magrane, Hassi Khelifa, Reguiba, Mihouensa, Oued Alenda, Ogla, Nakhla, Ourmes et Trifaoui), elle occupe une superficie d'environ 11738 Km². Elle est limitée :

- Au Sud par les dunes du grand erg oriental.
- A l'Est par la zone frontalière (Taleb Larbi et Douar El Maa) .
- A l'Ouest par la ligne de palmeraie de Oued Righ .

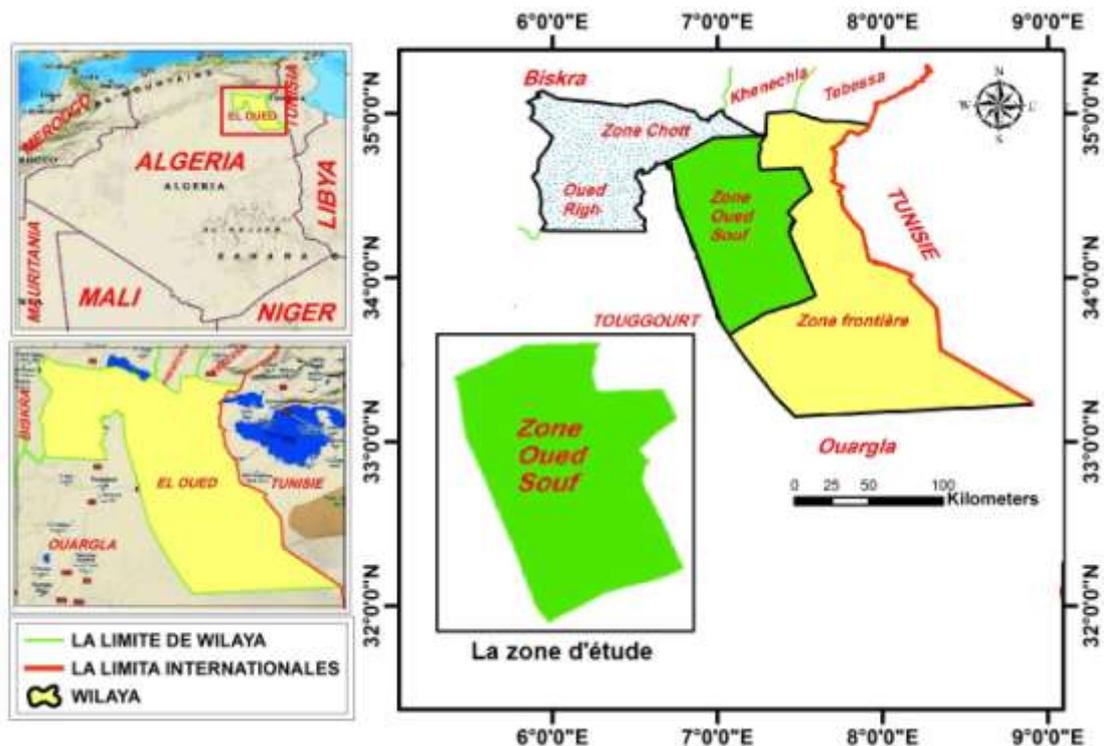


Figure 01: Situation géographique de la zone d'étude

1.2. Répartition administrative et population du Souf

La région fait partie de la wilaya de Oued Souf, elle occupe une superficie de 11738 Km² regroupe 18 communes avec une population de 643120 habitants (Figure 02), selon le recensement de 2019. La figure 03 montre la répartition des habitants de la région du Souf, où nous remarquons que la commune la plus peuplée est celle d'El-Oued (Chef-lieu) 185615 habitant avec une densité de 2411 hab/km², suivie par la commune de Hassani Abdelkerim (552 hab/km²), par contre la commune d'El-Ogla la plus faible densité de population (6 hab/km²) le taux d'accroissement de la population est égal à 3.4% (Tableau 01).

Tableau 01: Répartition de la superficie et nombre d'habitants et la densité dans la zone d'étude.

N°	Commune	Population (hab)	Superficie (km ²)	Densité (hab/km ²)
1	El Oued	185615	77	2410.58
2	Kouinine	14395	116	86.72
3	Reguiba	58610	1966	29.81
4	Guemar	57220	1264	45.27
5	Taghzout	18560	539	34.43
6	Ouermes	7540	443	17.02
7	Débila	33960	78	435.38
8	Hassani Abdelkrim	32030	58	552.24
9	Hassi Khalifa	43255	1112	38.9
10	Trifaoui	11375	474	24
II	Magrane	32115	618	51.97
12	Sidi Aoun	15950	480	33.23
13	Robbah	29685	499	59.49
14	Nakhla	18040	700	25.77
15	ElOgla	8620	1352	6.38
16	Bayadha	43720	139	314.53
17	Oued el Alenda	8545	712	12
18	Mih Ouensa	23885	1111	21.5
Total		643120	11738	

D.P.S.B W.d'El-Oued 2019

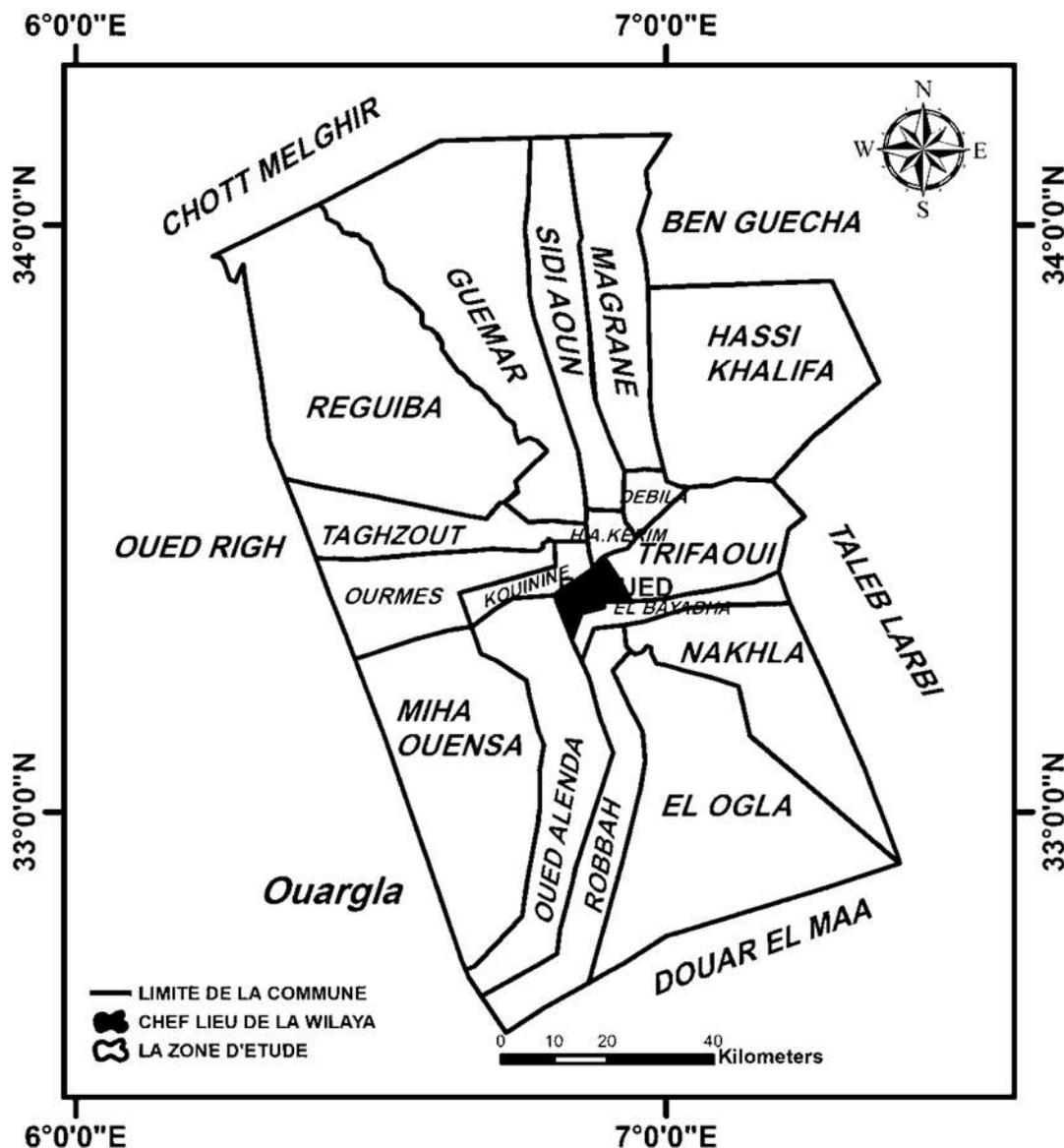


Figure 02: Carte administrative de la zone d'étude.

1.3. Cadre socioéconomique

L'activité principale a longtemps été représentée par l'agriculture, et notamment l'exploitation du palmier dattier (phoeniculture). Aujourd'hui il existe près de 3890330 palmiers dattier dont 3735800 seulement sont productifs (DSA 2019). La moyenne d'exportation est de 262440 tonnes/an, en utilisant une méthode originale les ghouts, sortes de cratères creusés et perpétuellement entretenus manuellement par les cultivateurs, afin que la profondeur creusée dans le ghout aide les racines des palmiers à atteindre l'eau de la nappe phréatique. Ce paysage est donc caractéristique de la vallée du Souf. L'élevage est une autre activité dans la wilaya qui a commencé l'année 2000 et se quantifie comme suit:

- ✓ Ovin : 716 500 têtes.

- ✓ Caprin : 498 500 têtes.
- ✓ Camelin : 45000 têtes.
- ✓ Bovin : 24415 têtes.

Cela permet d'avoir :

- ✓ Une production de viande rouge estimée à : 14900 tonnes/an;
- ✓ Une production de viande blanche estimée à : 5470 tonnes/an;
- ✓ Une production d'œufs estimée à : 8064000 Œufs/an;
- ✓ Une production laitière : 35500000 litres/an.

En 2017, l'élevage a atteint une surface de 2.215 hectares structurés en 100 périmètres agricoles, éparpillés à travers les 30 communes de la wilaya, dont la majorité est allée aux communautés agricoles.

D'autres activités, initialement embryonnaires, se sont développées, tels que : la commerce, l'artisanat et, plus récemment quelques petites industries. La wilaya d'El Oued compte 23772 opérateurs économiques enregistrés pour l'année 2017. La ville d'El-Oued seule compte 13409 commerçants. Grâce à sa position géographique entre les trois états (Algérie, Tunisie, Libye), El-Oued a acquis une position stratégique exceptionnelle, on peut dire que la ville d'El Oued est un centre d'échange commercial très actif, elle constitue donc le centre d'achat de toute la région, d'où l'importance de son marché.

1.4. Topographie et géomorphologie de la zone d'étude

La région de Oued Souf fait partie du grand Erg oriental, appelée aussi région du Bas-Sahara en raison de la faible altitude et se présente sous la forme d'une dépression orientée Sud-Nord, qui s'étend d'Essoualah situé à 125m à Réguiba trouve à la cote 29 m (commune de Foulia). L'altitude moyenne de la région est de 80 m et présente une décroissance du Sud vers le Nord pour atteindre 50 m au-dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts (Figure 04). La région est limitée au Nord par les grands chotts où les altitudes sont inférieures au niveau de la mer, au Sud par le massif de dunes du Grand erg Oriental.

Géomorphologiquement, la vallée d'El Oued est caractérisée par l'existence de trois paysages caractéristiques. Le relief se présente sous un double aspect, l'Erg et le Sahane (Figure 05), dans une région sableuse. On peut distinguer des plateaux sur lesquels sont érigés des reliefs (Hamdi Aissa, 2001). La différence fondamentale dans la topographie du Souf est celle qui existe entre l'Erg et le Sahane:

L'Erg : L'Erg est un massif de dunes de sables immenses et bien différenciées, atteignant parfois 200 m de hauteur; on les appelle Ghroudes, c'est la partie la plus importante, elle

occupe les 3/4 de la surface totale, elle est relativement épaisse, toujours de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres, les récents creusements de puits ont montré une épaisseur un peu plus grande que nous avons pensé 70-80m dans la partie sud du Souf, 60m à l'endroit d'El-Oued, il s'amincit progressivement vers le Nord du Souf jusqu'à 30m, et n'est plus qu'une couverture au niveau des sebkhas. Il repose sur un substratum argileux imperméable du Pliocène.

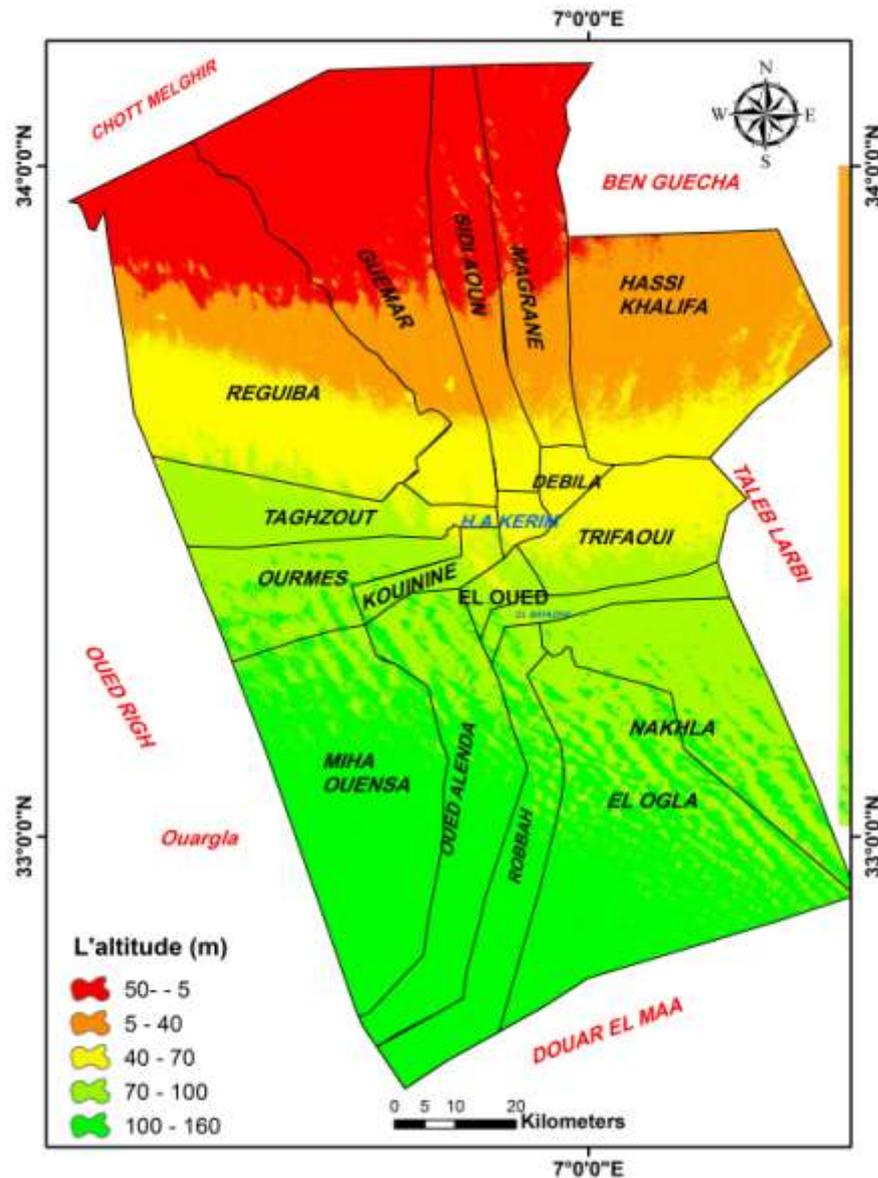


Figure 03 : Topographie de la zone d'étude

Les sebkhas : La nappe phréatique est très proche de la surface, ce qui favorise la formation de sol sodique excessivement salé, des plaques de sels divers se déposent en surface formant selon l'origine de leur eau (phréatique ou superficielle) des chotts et des sebkhas.

Le Sahane: est une région plate et déprimée, parfois caillouteuse, formant des dépressions fermées, entourées de dunes, au fond desquelles, quelques rares plantes poussent sur une croute gypseuse.

1.5. Évolution d'occupation des sols dans la zone d'étude

Les caractéristiques temporelles des changements de la structure d'occupation du sol entre 2000, 2010 et 2020 sont cartographiées dans la figure 06,07,08 y compris les principales classes de zones urbaines, de zones agricoles irriguées, de terres libres et de Ghouts. la figure 06,07,08 présente les détails de la couverture de surface de chaque classe d'occupation des sols pour 2000, 2010 et 2020, ainsi que le pourcentage de changement sur cette période.

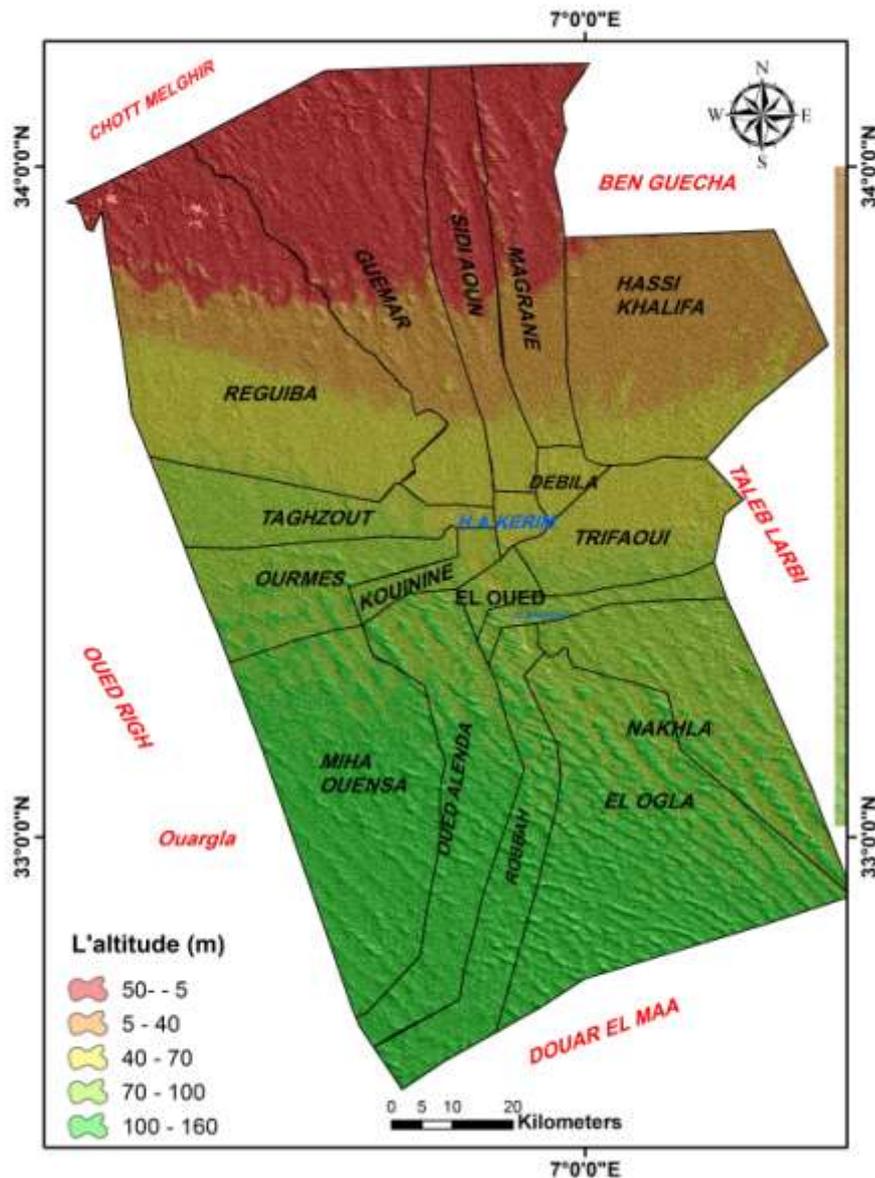


Figure 04 : Géomorphologie de la région d'étude

En 2000, La carte des catégories d'occupation du sol montre une expansion importante des zones urbaines d'environ 4 %, la plupart des établissements urbains sont concentrés dans la partie centrale de la région du Souf, dans toutes les directions, principalement 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, nous ajoute aussi quelques agglomérations isolées de faible population: Ogla, Nakhla, Khobna, Trifaoui et Ourmes. La classe des Ghouts est de plus en plus abondante,

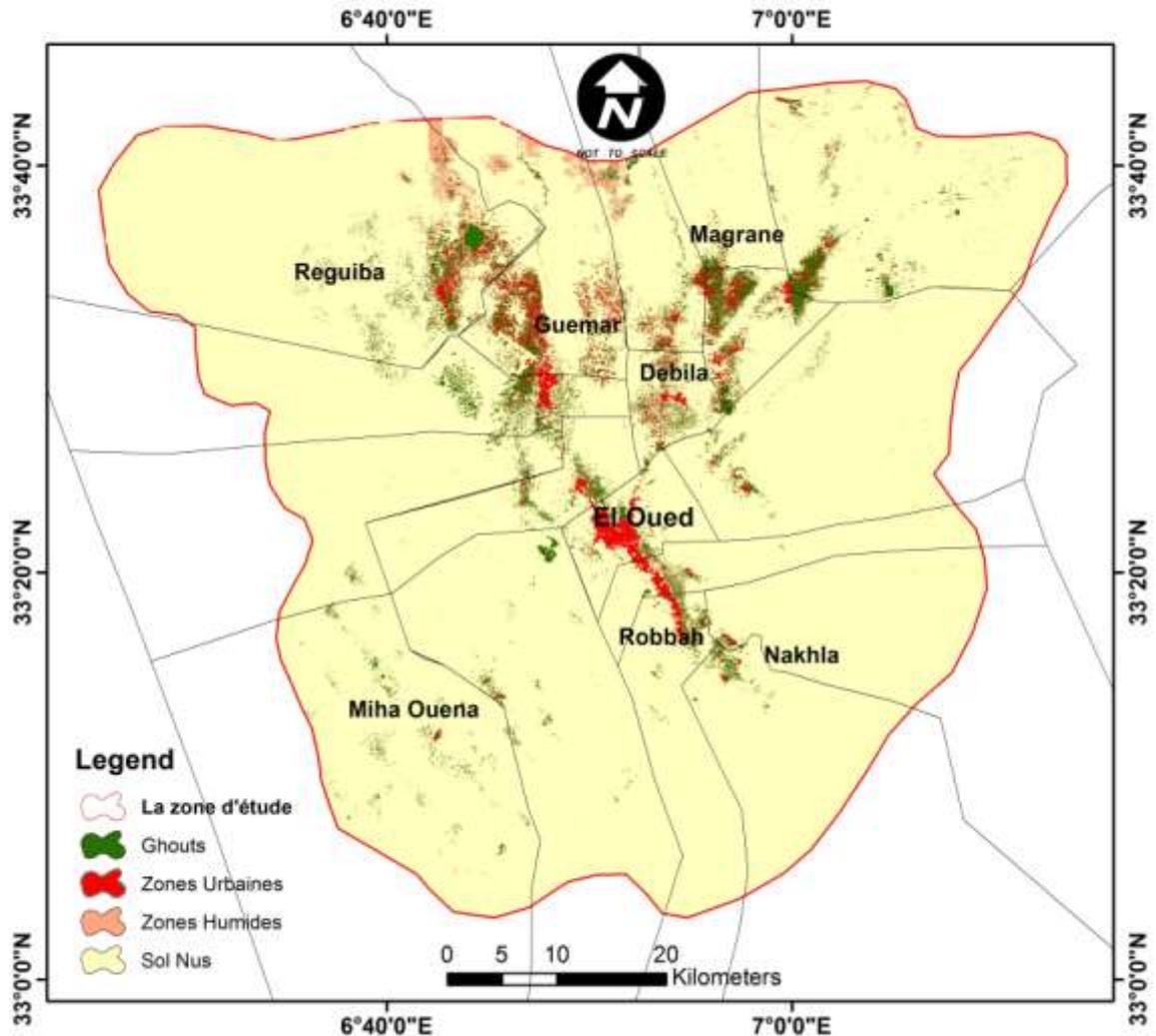


Figure 05: carte d'occupation du sol de la région d'étude (2000)

l'existence des palmeraies dattiers cultivées dans des cratères artificiels appelés (ghout), Les palmeraies dictent un schéma de croissance fortement linéaire, le long d'une dépression nord-sud. Les zones urbaines limitent les ghouts du côté ouest, on constate donc que l'agriculture est pratiquée seulement dans les ghouts. En 2010, les zones agricoles deviennent de plus en plus abondantes (Figure 07), elles ont donné à la région une autre identité économique en tant que région de culture de légumes et de pomme de

terre. La zone urbanisée a augmenté de 104 km² au cours de la dernière décennie, avec une augmentation moyenne de 13 km² par an. Les principaux changements sont observés dans les classes de zones urbaines et de zones agricoles irriguées. En 2010, on note la disparition des palmeraies et l'inondation des ghouts (Figure 07), où l'on constate que plus de 1000 Ghouts ont été inondés sur un total de 9500 dans la commune d'El Oued seulement. Cela a entraîné une perte de plus de 150000 palmiers dattiers, par l'asphyxie, selon la direction de l'agriculture d'El Oued.

En 2020, Les terres agricoles constituent l'un des phénomènes les plus importants de la zone d'étude la classe des zone agricoles a connu une évolution positive d'environ 3.34 %, avec une couverture de 7.12 % de la superficie totale en 2010 et 10.46 % en 2020 (figure 07) les zones agricoles ont connu une très grande extension dans toute la zone d'étude entre 2010 et ,2020 la culture de la pomme de terre a connu un fort développement. La superficie agricole irriguée est d'environ 59935 hectares en 2010 pour atteindre les 110975 hectares en 2020 (DSA 2020). Les résultats ont montré que l'urbanisation est passée de 654 km² (1.55%) en 2010 à 1689 km² (4,1 %) en 2020, principalement en raison de la croissance démographique.

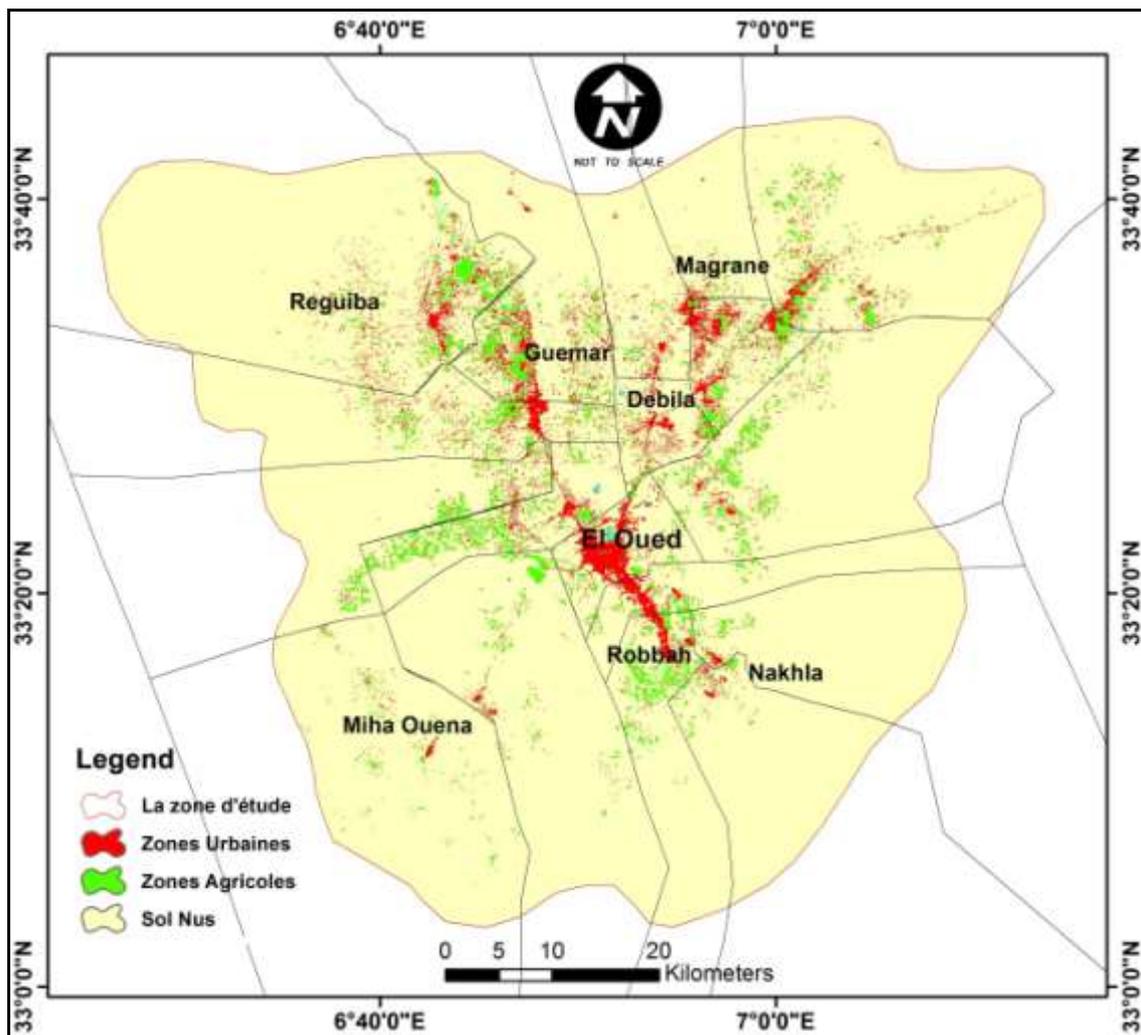


Figure 06: carte d'occupation de sol de la région d'étude (2010)

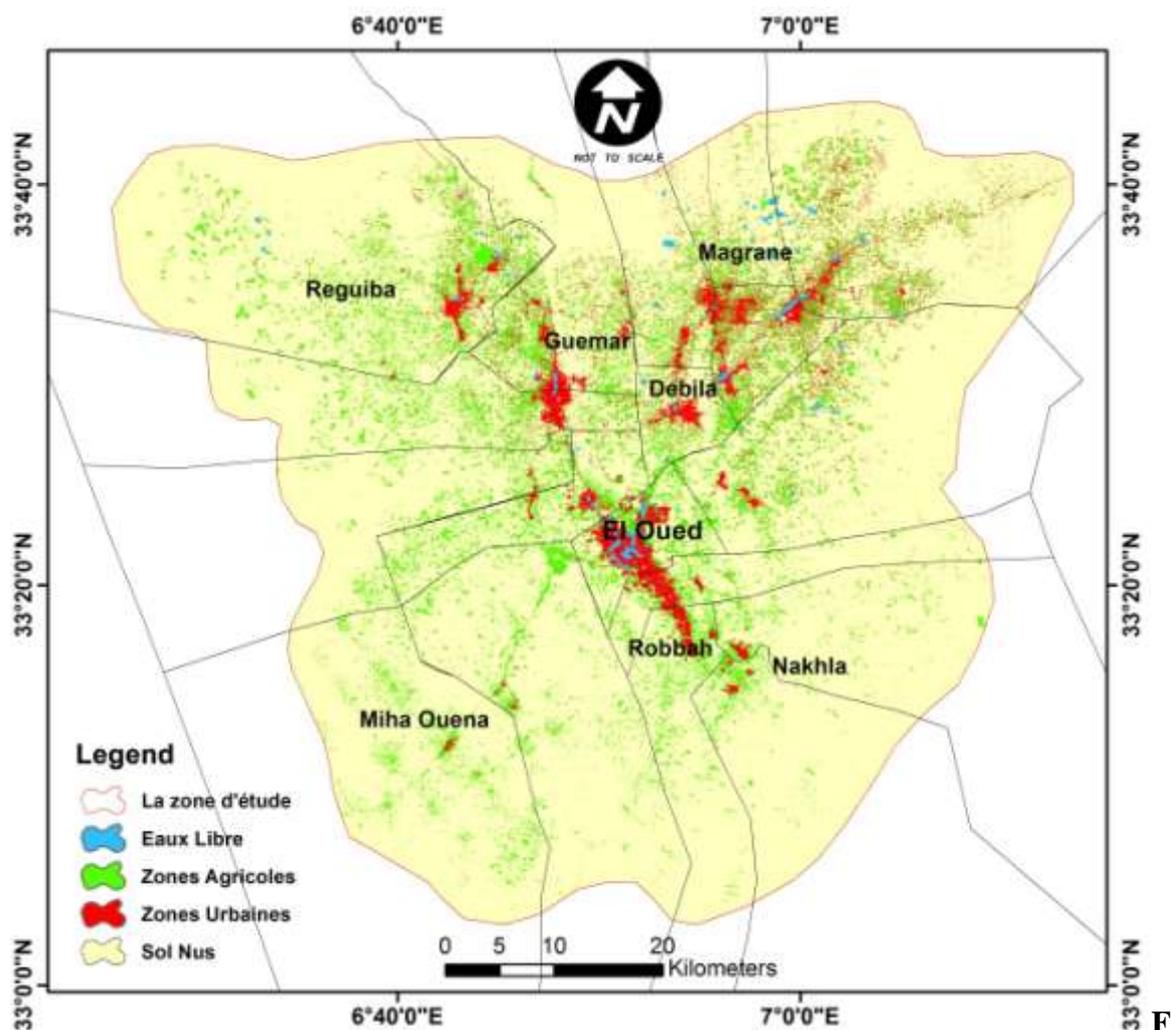


Figure 07: carte d'occupation de sol de région d'étude (2020)

6. CONTEXTE HYDROCLIMATOLOGIQUE DU SOUF.

Le climat algérien est caractérisé par sa grande variabilité de précipitations et des températures annuelles, L'Algérie est divisée en trois zones climatiques distinctes, la première à climat méditerranéen au Nord, la seconde semi-aride vers l'intérieur du pays (hauts plateaux) et enfin un climat aride, caractéristique du grand Sahara. La wilaya d'Oued Souf est située au Nord du Sahara septentrional, la mer du Golfe de Gabès est à 305 km à l'Est. El-Oued est à 1100 km au Nord de tropique de Cancer et à 3700 km de l'Equateur. L'étude du climat est importante, elle est basée l'interprétation des données des paramètres climatiques mesurés pendant une période bien définie, permettant ainsi d'estimer les différentes composantes du bilan hydrique qui influencent d'une façon directe et à long terme le comportement des nappes aquifères. Dans ce contexte, nous analyserons les facteurs climatiques et mettrons en évidence les régimes

pluiothermiques, à savoir les périodes humides et sèches et le type de climat caractérisant la région étudiée.

Les données traitées collectées à partir de la station (ONM) d'El Oued sont sélectionnées durant une période de 40 ans (1978-2018). La station climatique (ONM) est située dans la commune de Guemar, au Nord de la ville d'El Oued à environ 20 km.

Les caractéristiques géographiques de cette station sont :

- ✓ Code A.N.R.H : 13 04 14
- ✓ Altitude : 64m
- ✓ Longitude : 06°47'E
- ✓ Latitude : 33°30 'N

6.1. Les précipitations.

6.1.1. Variations annuelles des précipitations

La variation annuelle des précipitations pendant une période d'observation de quarante ans (1978-2017) schématisée dans le graphique (figure 09) montre que les deux années 1983 et 2015 représentent une période plus au moins sèche avec une précipitation de 15.9 et 13 mm, comprend le déficit maximal de précipitations, les deux années 1990 et 2009 sont les plus humides avec une précipitation de 209 et 233 mm. A noter que la moyenne interannuelle des précipitations est estimée à 71.75 mm.

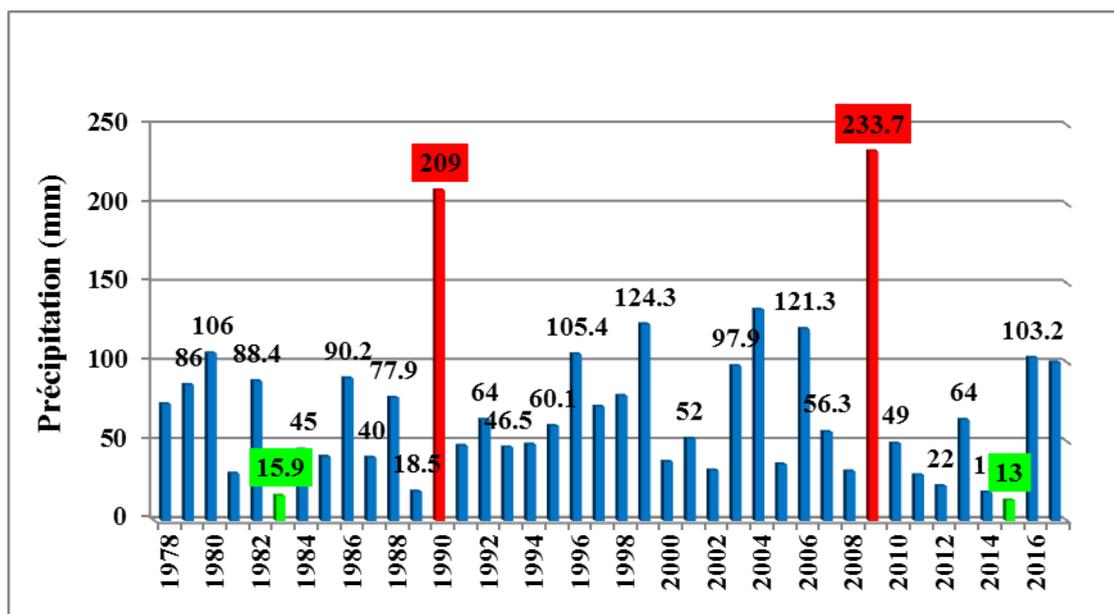


Figure 08: Histogramme des variations annuelles des précipitations.

Selon DUBIFE, 1963, les régimes de précipitations sont différents selon les saisons : pendant l'été elles sont dues aux dépressions de la Mousson, pendant l'hiver leur

provenance est due aux dépressions accompagnant la migration vers le sud des fronts polaires, tandis que pendant la période intermédiaire, ces précipitations sont dues aux dépressions Soudano-Sahariennes du sud au nord.

6.1.2. Variations mensuelles des précipitations

Les estimations des précipitations moyennes mensuelles interannuelles pour une période d'observation de 40 ans (1978-2017) sont résumées dans le graphique (figure 10):

le graphe de variation moyenne mensuelle interannuelle des précipitations (Figure 10) montre la variabilité des précipitations dans le temps, d'où la précipitation maximale est d'environ 14.67 mm enregistrée au cours du mois de janvier, et le minimum est d'environ 0.26 mm enregistré au cours du mois de juillet, la précipitation moyenne mensuelle est de 71,75 mm.

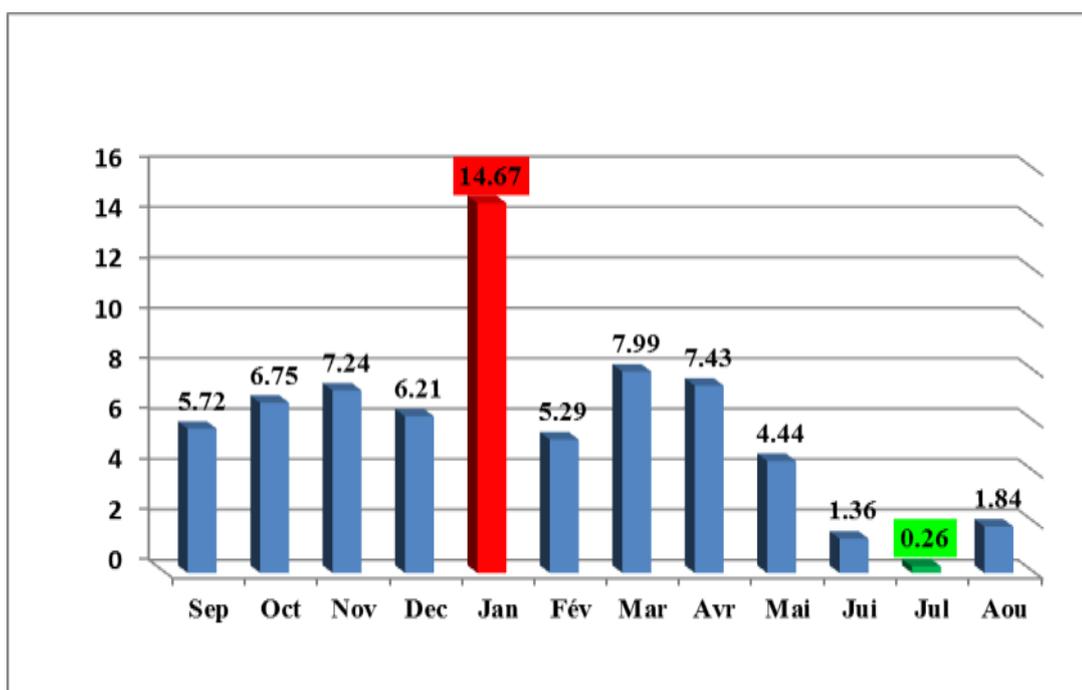


Figure 09: Histogramme des précipitations moyennes mensuelles (1978-2017).

6.2. La température :

L'analyse de la figure 11 de variation de température ci-dessus montre que la température moyenne mensuelle enregistrées pendant la période de 1978 à 2017 est de 27,06 °C, avec des températures maximales sont observées pendant l'été (Juin-Août) 37.67 et 37,77 °C et des minimales qui varient de 15,76 à 15.31 °C sont observées pendant la période d'hiver (Décembre – Janvier). L'année la plus chaude est 2000/2001 avec une température moyenne $T=22.85^{\circ}\text{C}$ et l'année la plus froide est 1990/1991 avec une moyenne de température égale à 19.93°C .

Il faut noter que, contrairement au reste de la zone climatique définie, au Sud, il y a des variations importantes de température, entre le jour et la nuit, où le thermomètre indique jusqu'à 55 °C à l'ombre pendant la journée pour n'enregistrer dans la nuit que 15 °C ou 16 °C ; car le sable se refroidit beaucoup plus vite que la pierre ou l'argile. Cette différence peut aller jusqu'à 30 °C. En hiver, cependant, la température descend souvent en dessous de 0°C dans la nuit.

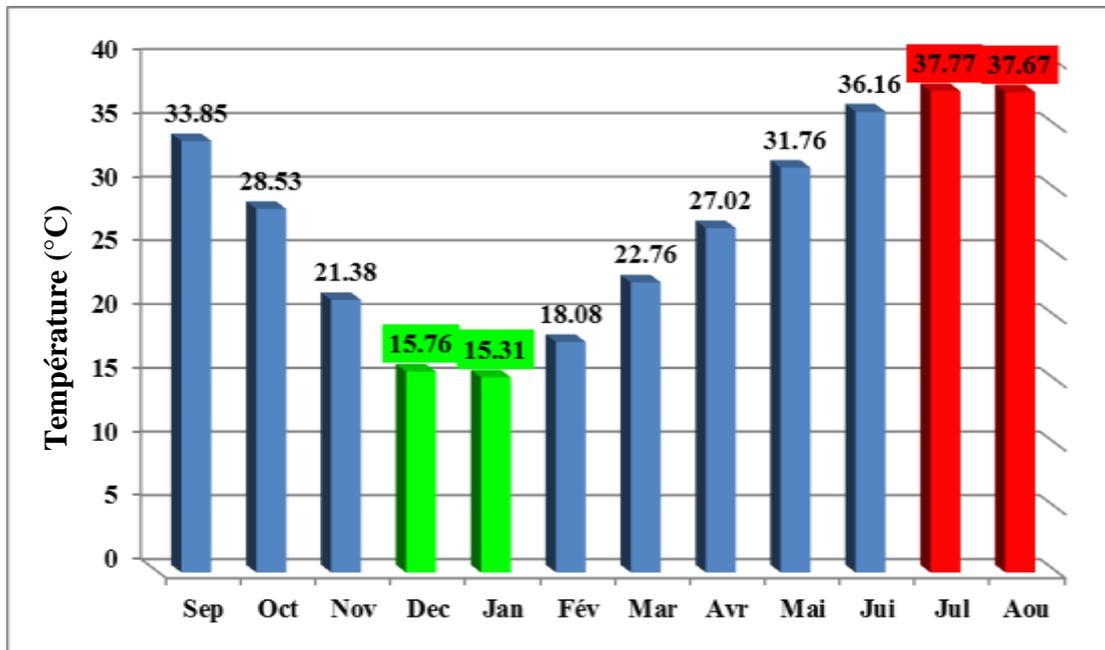


Figure 10: Histogramme des températures moyennes mensuelles (1978-2017).

6.3. Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN

Le diagramme Ombrothermique de Gaussen et Bagnouls est la combinaison de deux paramètres climatiques principaux qui sont la température et les précipitations (figure 12).

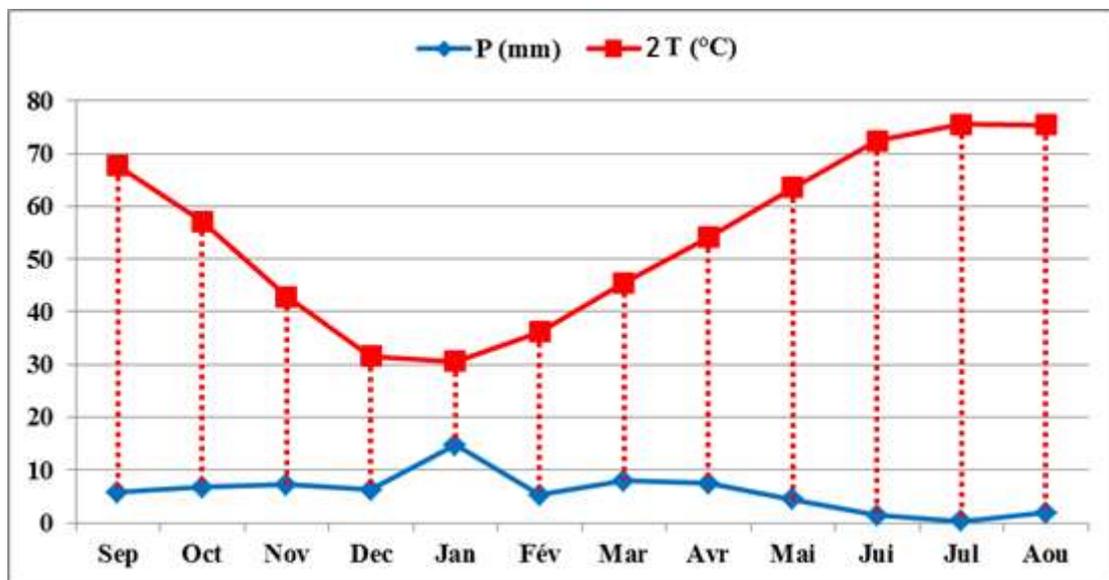


Figure 11: Courbe Pluvio-thermique d'El-Oued (1978-2017)

Selon Bagnouls et Gausson (1953), un mois donné est considéré comme sec quand $P < 2T$, (P moyenne en millimètres). L'analyse des deux paramètres climatiques (température et précipitation) permet de tracer la courbe pluviothermique qui met en évidence une période sèche et humide et l'absence total de la période humide sur les douze mois de l'année dans la zone d'étude, même pour le mois de janvier qui est marqué par la température la plus basse et les précipitations les plus élevées.

6.4. Diagramme d'Emberger.

Pour déterminer le climat de la zone méditerranéenne, L. Emberger a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique Q_2 (Figure 13), on met en abscisses la moyenne des minima du mois le plus froid et en ordonnée le quotient pluviométrique (Q_2) d'EMBERGER ; de STEWART (1969) adapté pour l'Algérie et qui est le suivant :

$$Q_2 = 3.43P / (M - m)$$

- ✓ P : précipitations moyenne annuelle (en mm).
- ✓ M : température maximale moyenne du mois le plus chaud (degrés/Kelvin).
- ✓ m : température minimale moyenne du mois le plus froid (degrés/Kelvin).

L'application numérique donne les résultats suivants :

6.5. L'indice d'aridité :

On peut également ajouter l'Indice d'aridité annuelle de DE MARTONNE, cet indice dépend essentiellement des précipitations moyennes mensuelles en (mm) et de température annuelle en ($^{\circ}\text{C}$) (Tableau 02), cet indice est calculé à l'aide de la formule suivant :

$$I = P / T + 10$$

Avec :

- ✓ I : indice d'aridité.
- ✓ P : précipitation moyenne mensuelle (mm).
- ✓ T : température moyenne annuelle ($^{\circ}\text{C}$).

Application numérique

$P = 72.04$ mm, $T = 21.51^{\circ}\text{C}$, Donc :

$$I = 2.53$$

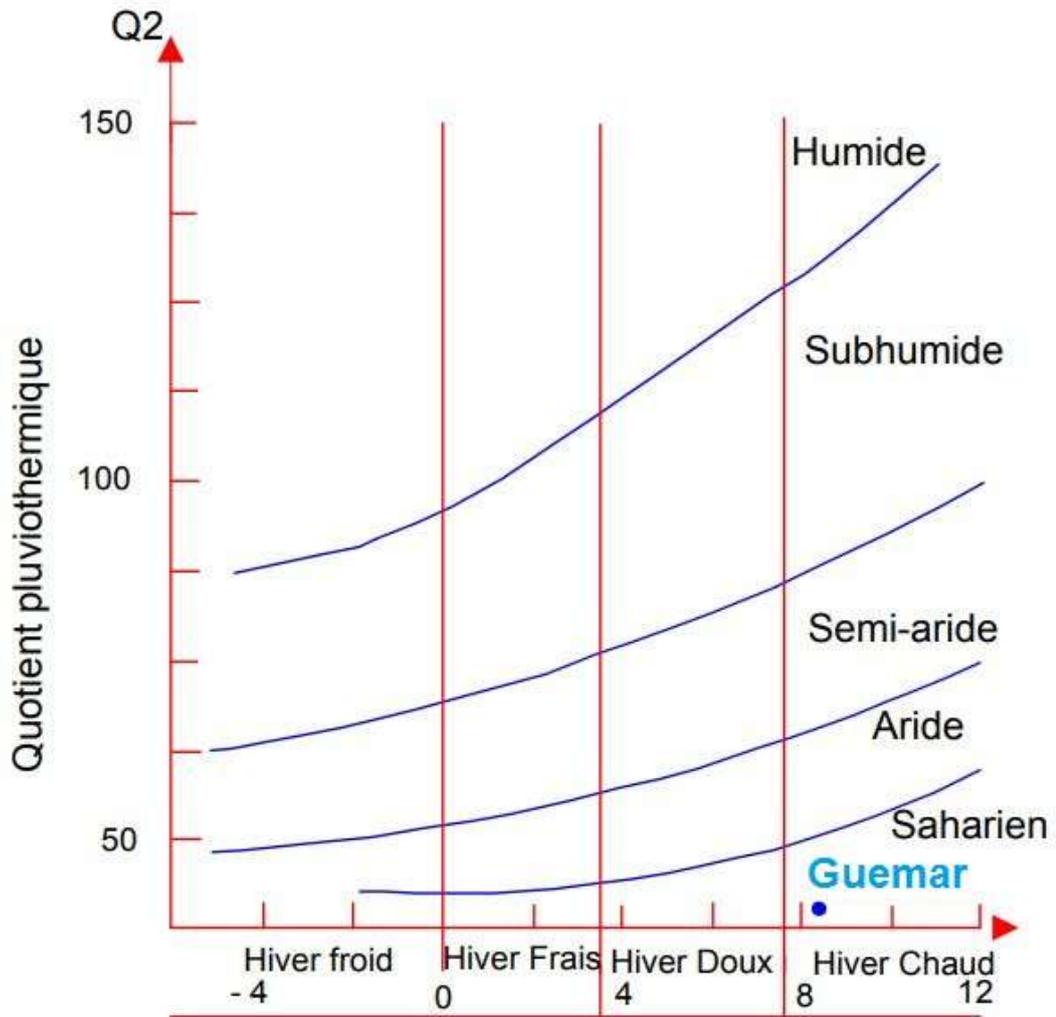


Figure 12: Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1978-2017)

Tableau 02. Classement en fonction de l'indice d'aridité (selon De Martonne)

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

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

6.6. Humidité relative de l'air

L'humidité de l'air est un élément atmosphérique important car elle représente le pourcentage d'eau existant dans l'atmosphère. L'humidité relative de l'air est plus élevée en hiver qu'en été, elle est conditionnée par la température et l'existence d'eau. Les valeurs les plus importantes sont enregistrées au cours du mois de décembre en hiver (73 %) ; celles-ci diminuent presque de moitié en mars avec une valeur de d'environ 32 % enregistrée au cours du mois de Juillet, qui est la saison estivale, avec une moyenne annuelle d'environ 44 % (Figure 14).

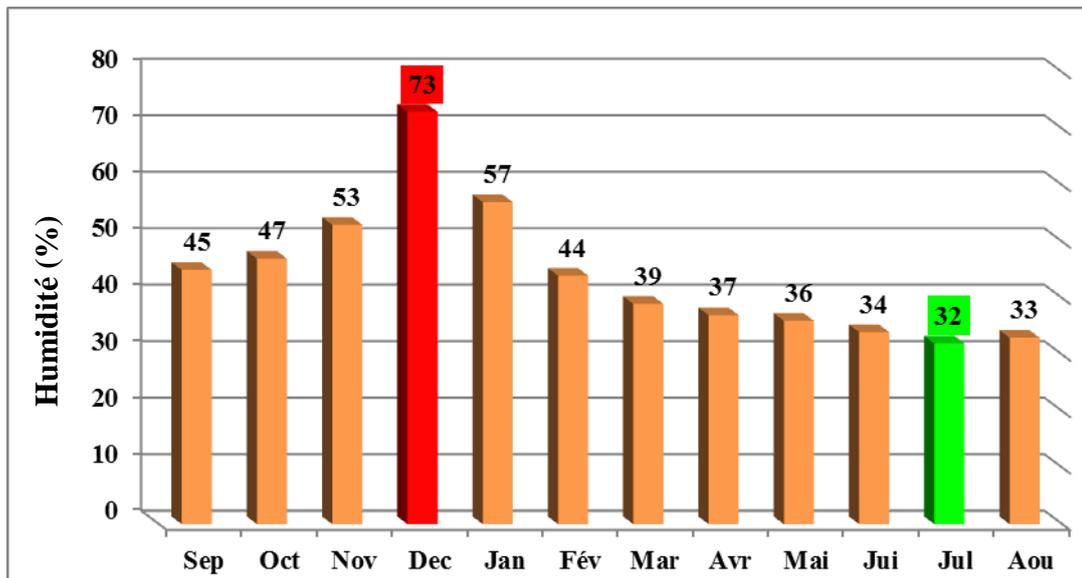


Figure 13 : Histogramme d'humidité relative moyenne mensuelle (1997 – 2017)

6.7. Le vent

Les vents sont les principaux facteurs de la construction des reliefs (dunes) et de la dégradation des sols (vannages) dans les régions d'El Oued. Selon les observations relevées au niveau de la station d'ONM d'El Oued, les vents de direction Est et Nord-Est, appelés Bahri, prédominent ; puis, à un moindre degré, ceux de la direction Ouest et Sud-Ouest, caractérisés par une température élevée (Sirocco) qui souffle en été et accélère l'évapotranspiration. Les vents sont relativement fréquents au printemps et en été (coïncidence avec la période de pollinisation des palmeraies) et pouvant durer jusqu'à trois jours successifs avec une vitesse variant de 40 à 50 km/h. Selon la figure ci-dessous, le maximum est enregistré en juin avec une vitesse de 38.83 Km/h et le minimum en Novembre de 19.52 Km/h (Figure 15).

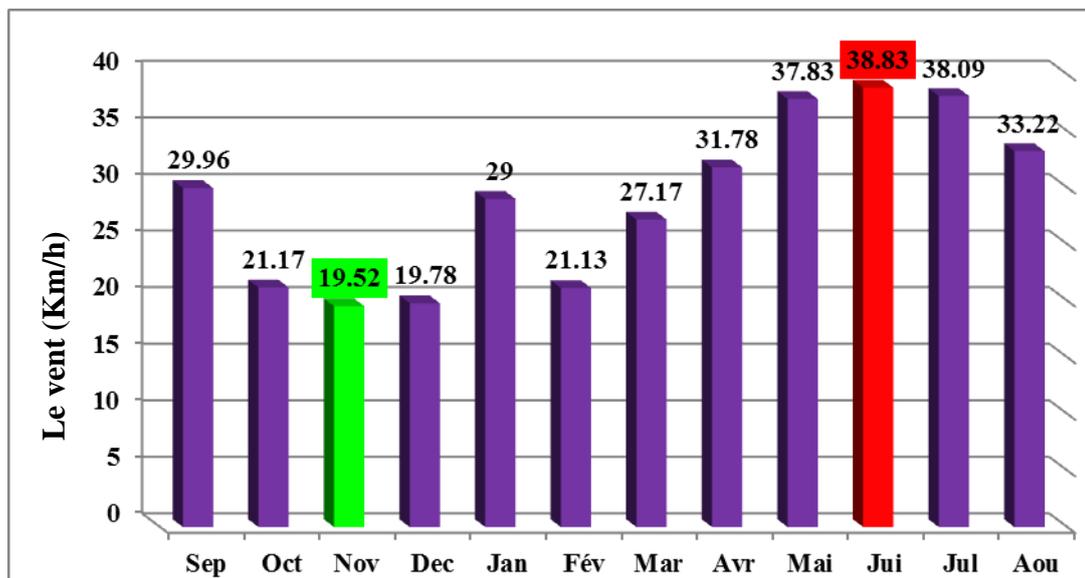


Figure 14 : Histogramme de La vitesse du vent moyenne mensuelle (1997 – 2017)

6.8. L'insolation :

La durée de l'insolation est évidemment très importante dans les régions d'El Oued et varie assez sensiblement d'une année à l'autre et même en fonction de la période de l'année considérée. La vallée du Souf reçoit un ensoleillement relativement important (Figure 16) La distribution des moyennes mensuelles d'insolation nous permet de constater que le maximum d'ensoleillement est atteint au mois de Juillet avec une durée d'insolation de 352.59 heures et le minimum enregistré au mois de Décembre avec une durée de 225.92 heures

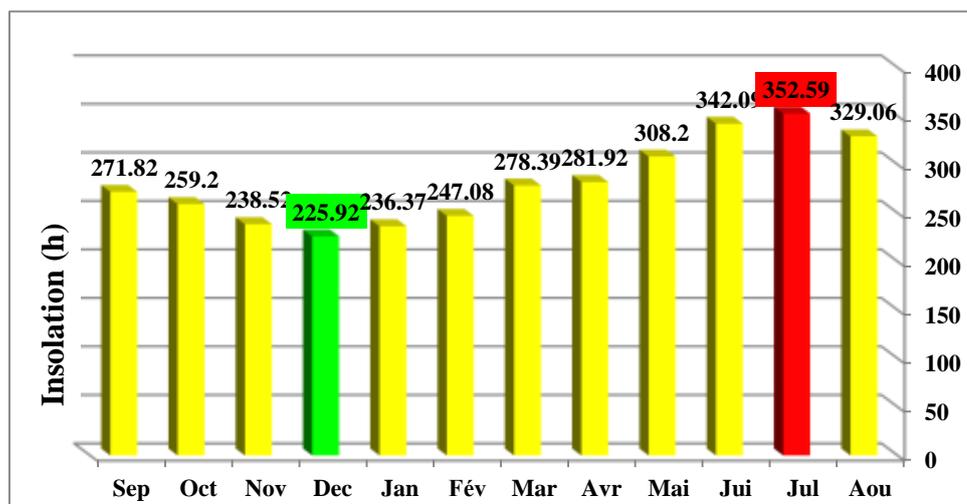


Figure 15 : Insolation de la région du Souf (1997-2009).

6.9. Evapotranspiration

L'évapotranspiration est définie comme étant une restitution de l'eau sous forme de vapeur de la surface terrestre à l'atmosphère. Cette notion englobe aussi bien la lame d'eau évaporée à partir du sol que celle transpirée par les plantes. Elle est donc un élément très important pour l'établissement du bilan hydrique et dépend des plusieurs paramètres : la température, les précipitations, l'humidité de l'air, le couvert végétal.

Plusieurs expressions empiriques, introduisant les paramètres climatiques, ont été établies pour l'évaluation de l'évapotranspiration réelle (ETR) et/ou potentielle (ETP). La méthode utilisée dans ce travail est celle de [Thornthwaite \(1948\)](#) puisque cette méthode semble la plus utilisée est celle qui donne les résultats les plus cohérents dans les zones méditerranéennes ([Rkiouak, 1996](#) et [Stitou El Messari, 2002](#)).

6.9.1. Evapotranspiration potentielle (ETP) :

L'évapotranspiration potentielle (ETP) est la quantité d'eau pouvant être restituée à l'atmosphère par transpiration des êtres vivants et évaporation du sol et des surfaces d'eaux libres. La formule proposée par Thornthwaite ([in Belkacem, 1994](#) et [Stitou El Messari, 2002](#)) permet le calcul de l'évapotranspiration potentielle en millimètres, à partir de la température moyenne mensuelle (T) par l'expression :

$$\mathbf{ETP = 16 [10 t / I]^a k.}$$

Avec:

$$i=(t/5)^{1.514}$$

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

t : la température moyenne mensuelle du mois considéré.

ETP : l'évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau).

k : un coefficient d'ajustement mensuel.

I : appelé indice thermique annuel

$$\mathbf{Le\ param\grave{e}tre : a = 0.016 * I + 0.5}$$

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle (Figure 17) obtenue est de 1380.60 mm. Le maximum s'enregistre au mois de juillet (273.2 mm) et le minimum au mois de janvier (11.9 mm).

6.9.2. Evapotranspiration réelle (ETR).

Pour le calcul de l'évapotranspiration réelle, on utilise la méthode de C.W.Thorntwaite. Cette méthode part d'un bilan hydrique du sol, dans lequel on estime la réserve facilement utilisable exprimée en millimètres de hauteur d'eau. En plus, cette méthode tient en compte les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. En considérant que les réserves superficielles en tant que réserves facilement utilisables (RFU) sont de l'ordre de 100 mm. On distingue deux cas principaux :

1. Si $P - ETP > 0$; c-à-d : $P > ETP$, dans ce cas $ETR = ETP$.
2. Si $P - ETP < 0$; c-à-d : $P < ETP$, ce cas est subdivisé encore en deux cas :
 - a- Si $P + RFU > ETP \Rightarrow ETR = ETP$.
 - b- Si $P + RFU < ETP \Rightarrow ETR = P + RFU$.

L'évapotranspiration réelle moyenne annuelle (Fig.17) est de 68.10 mm avec un maximum au mois de janvier (11.90 mm) et un minimum au mois de juillet (0.30 mm). L'évapotranspiration réelle représente 100% la pluviométrie moyenne annuelle.

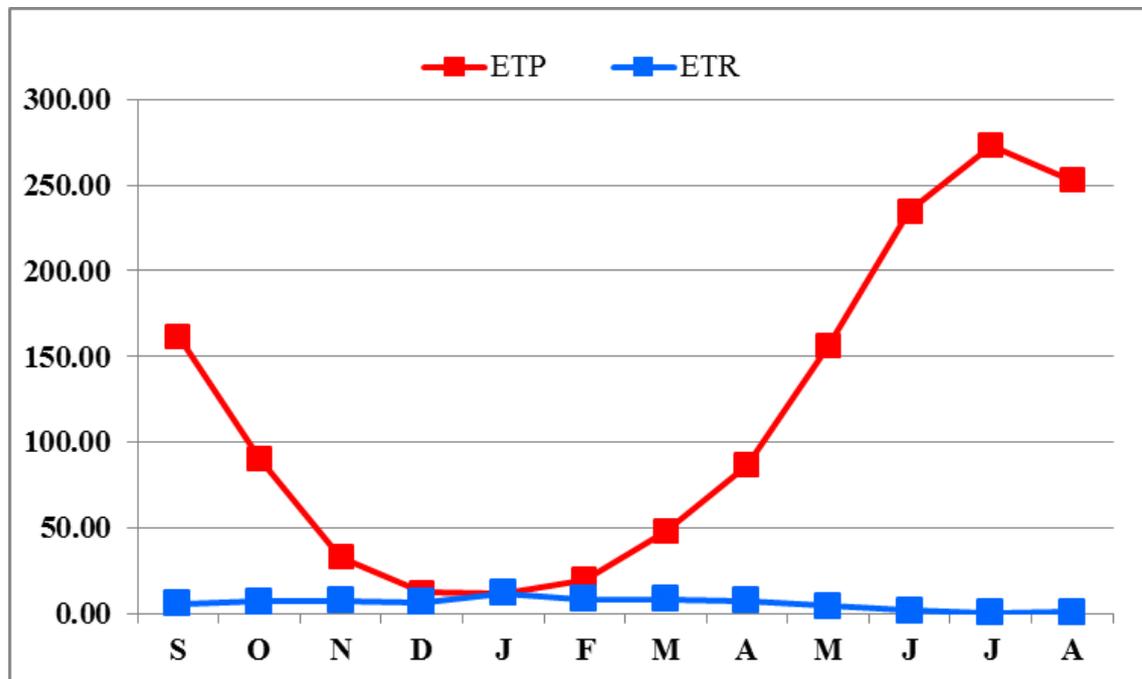


Figure 16: Evapotranspirations potentielle et réelle mensuelle (en mm) calculée par la méthode de Thornthwaite sur la période 1977/2018.

6.10. Bilan hydrologique

Selon Thornthwaite, le calcul du bilan se résume à la relation suivante :

$$P = ETR + R + I$$

où

P : précipitations moyennes mensuelles ;

ETR : évapotranspiration réelle calculée par les différentes méthodes ;

R : ruissellement ;

I : infiltration.

Tableau 03: Bilan hydrique de la station de Guemar (1977/ 2018) par la méthode de THORNTWAITE.

	T	ETP	P	RFU	ETR	Def	Exc
S	33.90	162.00	5.72	0.00	5.70	156.30	0.00
O	28.50	90.20	6.75	0.00	6.80	83.40	0.00
N	21.40	32.90	7.24	0.00	7.20	25.70	0.00
D	15.80	12.10	6.21	0.00	6.20	5.90	0.00
J	15.30	11.90	14.67	2.80	11.90	0.00	0.00
F	18.10	19.40	5.29	0.00	8.00	11.40	0.00
M	22.80	47.80	7.99	0.00	8.00	39.80	0.00
A	27.00	86.50	7.43	0.00	7.40	79.10	0.00
M	31.80	156.40	4.44	0.00	4.40	152.00	0.00
J	36.20	235.10	1.36	0.00	1.40	233.70	0.00
J	37.80	273.20	0.26	0.00	0.30	273.00	0.00
A	37.70	253.10	1.84	0.00	0.80	251.70	0.00
Annuel	27.19	1380.60	69.20		68.10	1312.00	0.00

Le bilan hydrique d'El-Oued (Tableau 03), dans la période (1977-2018) suivant la méthode de Thornthwaite est déficitaire, le déficit annuel est de l'ordre de 1312 mm (1977-2018) et atteint son maximum au mois de Juillet avec 273 mm (Tableau 03). La quantité d'eau précipitée sera vite évaporée parce qu'évapotranspiration potentiel (ETP) est plus importante que les précipitations, sauf au mois de janvier, la réserve facilement utilisable est nulle pendant les onze mois de l'année (Figure 18). Cet indice est

l'expression d'une approximation des besoins en eau d'irrigation des cultures, étant donné que la formule de Thornthwaite a tendance à sous-estimer les fortes ETP, particulièrement en zone aride et semi-aride, où elle ne tient pas compte de l'accentuation de l'ETP due aux phénomènes adventifs.

Le bilan hydrique de la région d'El-Oued montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable, la recharge de la nappe est faite par les eaux de la ré-infiltration due à l'irrigation et les eaux urbaines (les eaux usées domestiques).

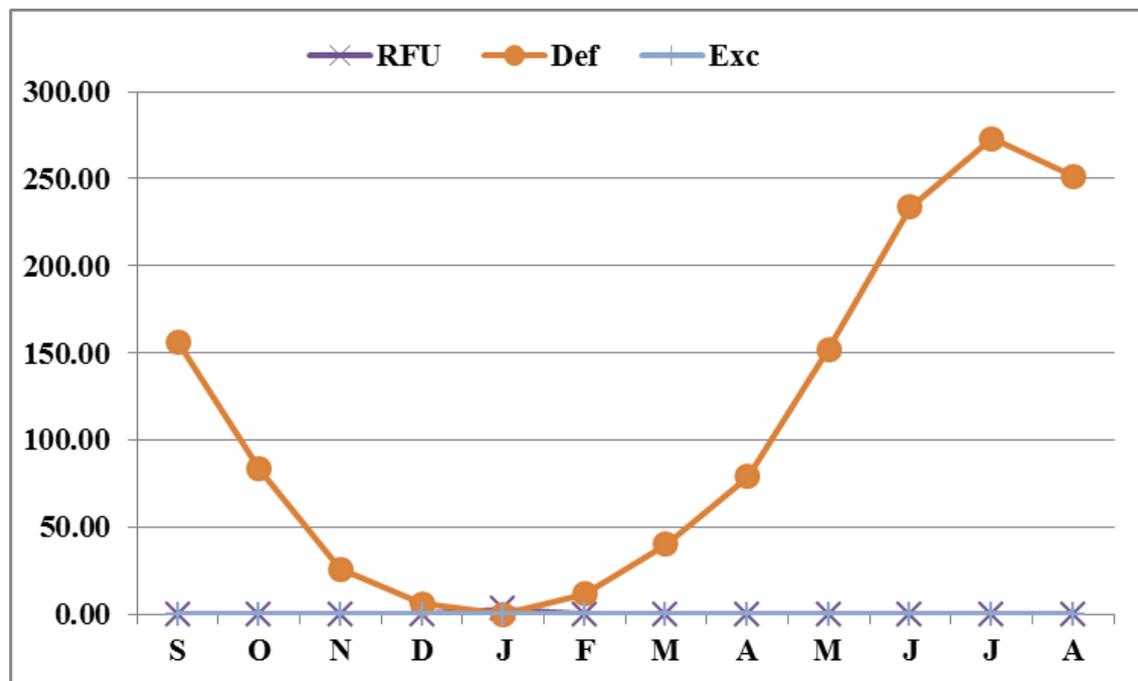


Figure 17: Etat de réserve facilement utilisable et le déficit agricole dans la région d'El-Oued.

7. Conclusion :

La zone d'étude appartient à la Wilaya d'El Oued, elle est située dans la partie sud-est de l'Algérie. La zone d'étude comprend les centres urbains les plus importants de la Wilaya, avec des zones agricoles aux frontières ouest et des centres urbains, elle couvre une superficie de 11738 km² et avec une population d'environ 643120 habitants. La zone d'étude appartient au Grand Erg Oriental, constitué principalement de dunes de sable. La zone d'étude est marquée par un climat aride, où la période sèche s'étend sur toute l'année. L'évapotranspiration annuelle moyenne (période 1977 à 2018) calculée à l'aide de la formule empirique de Thornthwaite est d'environ 1224 mm, avec des valeurs extrêmes de 9,8 mm et 236 mm pour janvier et juillet respectivement (ONM 2018). La région d'El Oued a connu ces dernières années une expansion constante de sa production agricole, ce

qui en fait l'une des plus importantes régions agricoles du pays. Elle est considérée parmi les premières régions productrices de palmiers dattiers et de pommes de terre. Ce statut de "pôle agricole" par excellence se traduit non seulement par la culture de la pomme de terre et du palmier dattier, qui constituent les principales vocations de la région, mais aussi par le degré de réalisation de la culture du tabac et du maraîchage.

Chapitre II
Géologie et Hydrogéologie
de la région d'étude

1. Géologie de la région du Souf

L'étude géologique est un moyen d'investigation très utile pour toute étude hydrogéologique car elle permet de déterminer des horizons susceptibles de contenir des réserves d'eau et d'expliquer les variations des concentrations de certains paramètres chimiques, existant dans l'eau. Dans ce chapitre, nous aborderons les aspects géologiques généraux de la région et donnerons par la suite en détail la description de chaque formation aquifère, les références de base sont tirées des travaux de [Busson \(1970\)](#), [Fabre \(1976\)](#), [Cornet \(1964\)](#) et [Bel \(1968\)](#).

1.1. Géologie régionale

Notre zone d'étude fait partie du Bas Sahara et se présente comme une vaste cuvette de faible altitude (200 à -30 m dans les chotts) limitée à l'Ouest par la dorsale du M'Zab, au Sud par les Hamadas de Tademaït et de Tinghert, à l'Est par les plateaux du Dahar Tunisien et au Nord par les monts Aurès et Nememchas (Figure.19). Ses bords, de hauteur modeste, s'inclinent en pente douce vers la zone déprimée marquée par l'axe SSW-NNE des oueds Mya et Righ. Au contraire, vers le Nord, s'élève une dépression longitudinale occupée par les Chotts et dont le fond se trouve sous le niveau de la mer. La zone d'étude fait partie du bassin du Sahara Septentrional de l'Algérie ou plus précisément du bassin oriental ([Touahra et al. 2023](#) ; [Satouh et al. 2021](#) ; [Bouselsal 2017](#)).

Notre zone d'étude fait partie de la plateforme saharienne constituée d'un bouclier précambrien, émergeant des sédiments qu'ils recouvrent uniquement dans le Sahara Central (Massif du Hoggar) et le Sahara Occidental (Massif des Eglab) ([UNESCO, 1972](#)).

Elle comprend à la base des sédiments Paléozoïques plissés, et pénétrés par l'orogénèse hercynienne, surmontés en discordance par divers sédiments (marins et continentaux) du Secondaire et du Tertiaire sur une épaisseur d'environ 3000 mètres (Figure 19).

On y trouve le socle ancien à une profondeur de 3000 m ou plus surmonté des grès primaires plus ou moins plissés et érodés qui constituent les roches réservoirs d'hydrocarbures. Les grès de continental l'intercalaire sont empilés et constituent l'aquifère du même nom. Après la discordance du céno-manien, les couches marines du Sénonien et de l'Éocène s'empilent pour aboutir à la couverture continentale du Mio-Pliocène, qui est également un aquifère (Complexe terminal).

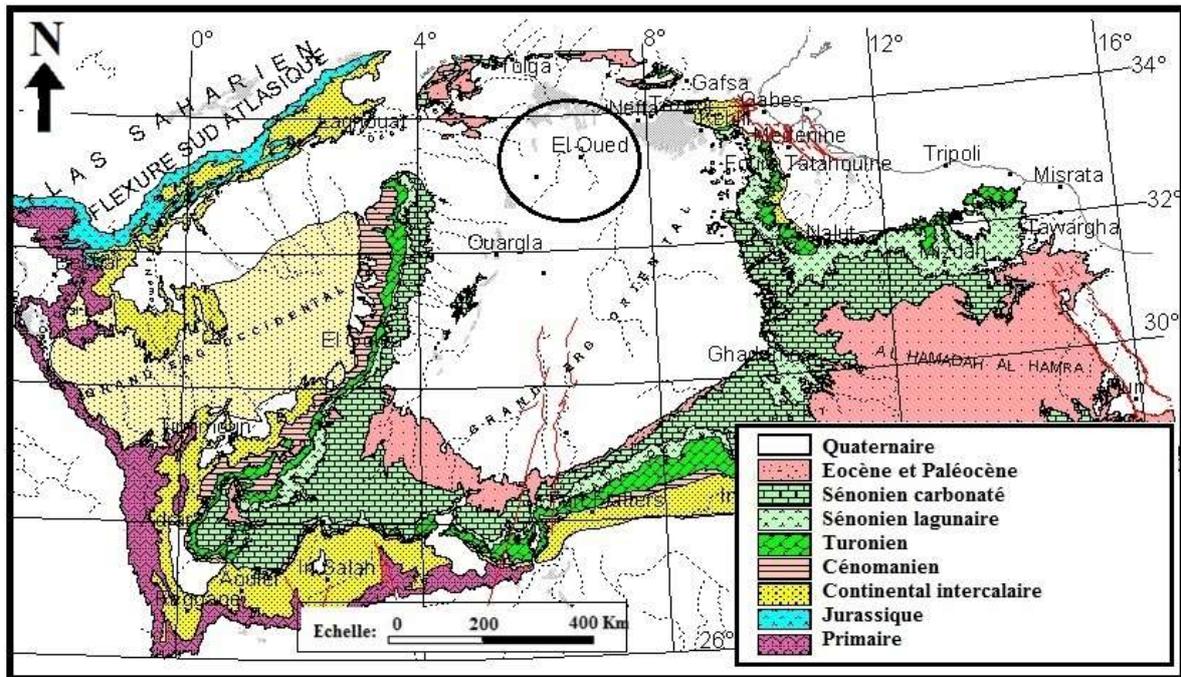


Figure 18. Carte géologique du Grand Erg Oriental, (Baba Sy.M, 2005).

1.2. Cadre géologique local

Dans cette étude, nous sommes principalement intéressés par la couverture sédimentaire post Paléozoïque, qui contient les principaux aquifères du Sahara. La carte géologique d'El-Qued montre que seuls les terrains d'âge Quaternaire et MioPliocène sont visibles en surface (Figure 20). Les formations dunaires, atteignant des dizaines de mètres de hauteur, couvrent la zone d'étude. L'analyse litho-stratigraphique des forages d'exploration hydraulique dans la zone d'étude nous a permis de constater que la vallée d'Oued Souf contient les formations suivantes :

1.2.1. Formation de l'ère Secondaire

1.2.1.1. Le Crétacé inférieur :

Le Barrémien: Son épaisseur varie de 237 m à 270 m. Le Barrémien présente une alternance de grès avec passages d'argile et parfois des intercalations de calcaires dolomitiques. Cet étage est capté par tous les forages du Continental Intercalaire de cette région. On trouve également des sables avec la présence de silex.

L'Aptien: ainsi que le Barrémien, est une bonne référence lithologique dans les forages, sont constitués de dolomies microcristallines à cristallines, parfois de marnes et marno-calcaires,

d'argiles et de lignite (sédimentation lagunaire). L'aptien a les caractéristiques d'un terrain semi-perméable.

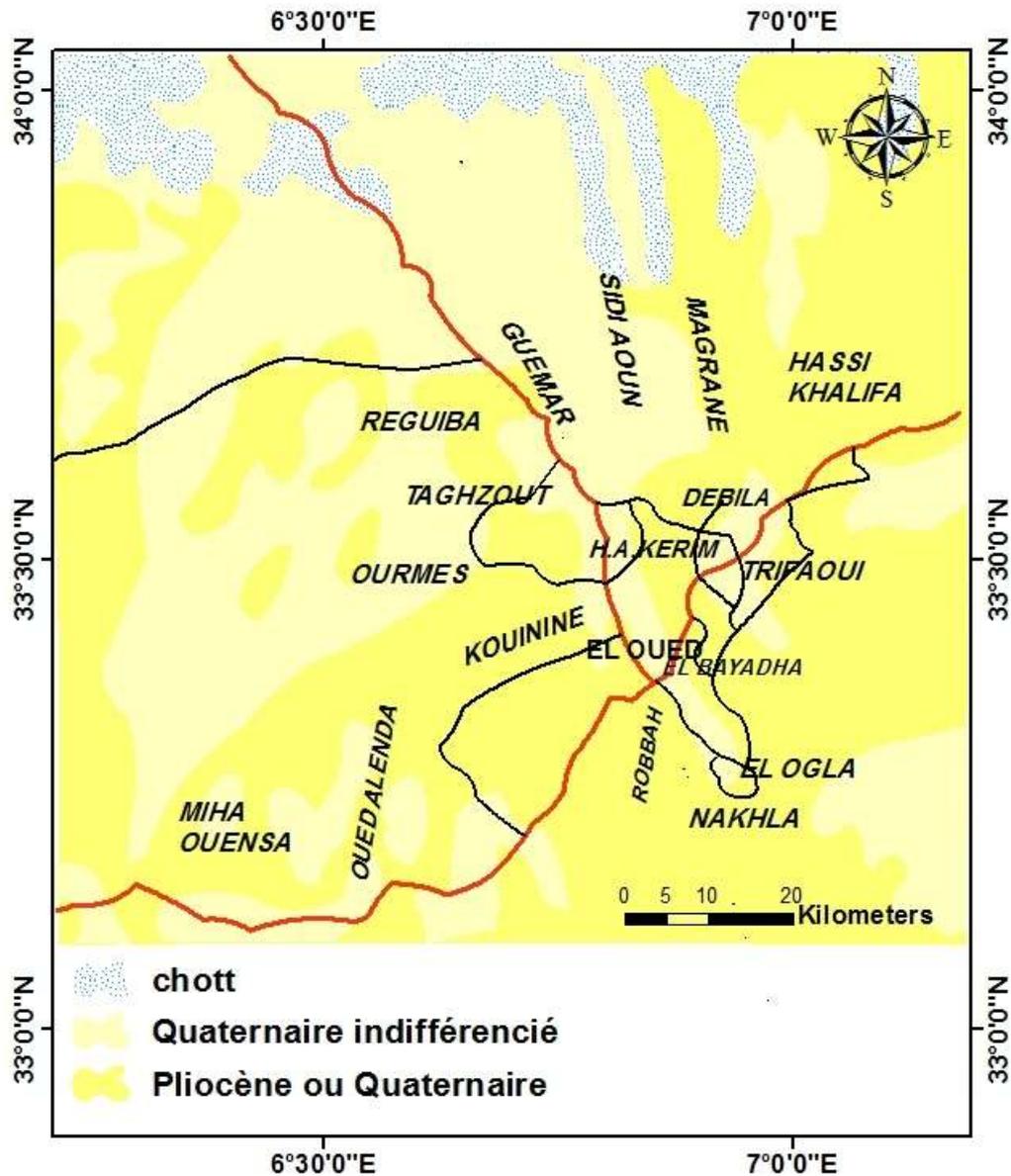


Figure 19 : Carte géologique locale

D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région du Souf, L'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse guère 40 mètres (Figure 21).

L'Albien: C'est un ensemble gréseux, avec des passages de silex, d'argile et de marnes et quelques calcaires et d'anhydrites au Sud de la vallée. Les grés et sables sont fins à très fins, passant parfois à des pélites, il est caractérisé par un retour massif de la sédimentation terrigène. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, tandis que sa

limite supérieure est caractérisée par l'apparition des faciès argilo-carbonatés. La puissance de cet étage varie de 100 à 150 m.

Le Vraconien: est le terme de transition entre l'Albien sableux (sommet du Continental Intercalaire) et le Cénomaniens argilo-carbonaté (base du Complexe Terminal), constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques et argiles sableuses. Le Vraconien est imperméable et son épaisseur varie entre 250 et 300 mètres

Le Cénomaniens: est en fait un stade de transition entre l'Albien et le Cénomaniens argilocalcarbonaté. Cet étage marque, pour la première fois depuis le paléozoïque, le retour de la mer au Sahara, jusque dans les régions les plus éloignées. Selon Karpoff, son faciès est partout lagunaire ou détritique, et on peut donc déduire que le bas Sahara, lors de cette transgression, était partout réduit à une pénéplaine extrêmement plate. L'immense transgression n'a pas dû avoir lieu partout en même temps et les faciès continentaux remontent plus au moins haut dans l'étage. Tous les forages effectués dans cette zone ont montré que cet étage est constitué d'une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. Dans la zone d'étude, l'épaisseur de cette couche varie entre 250 et 300 m. En raison de l'importance de ses niveaux argileux, elle constitue une couverture importante de l'Albien.

Le Turonien : cet étage représente la base du complexe terminal. Il est généralement carbonaté et se compose d'une épaisse barre de calcaire et de dolomie et des dolomies microcristallines compactes avec des intercalations de calcaires et parfois de marnes. Au Turonien, le régime marin persiste dans le Bas Sahara, et la mer présente l'extension maximale. Les forages effectués dans cette région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à l'autre. Son épaisseur varie d'environ 95m.

Le Sénonien: La plupart des études géologiques menées dans tout le Sahara oriental montrent que le Sénonien est constitué de deux formations lithologiques superposées

- **Le Sénonien lagunaire:** La limite de ce sous-étage est généralement claire. Le Sénonien lagunaire est caractérisé par un faciès évaporitique à argiles où ces dernières sont facilement différenciées de celles du Turonien. Il est également constitué d'anhydrites, de calcaires dolomitiques à argiles et surtout les bancs de sel massif dont l'épaisseur est de l'ordre de 150 mètres et qui jouent le rôle de barrière imperméable. La limite supérieure de cette formation coïncide avec le toit de la dernière intercalation anhydrite.

- **Le Sénonien carbonaté:** Le Sénonien supérieur est carbonaté et se compose de dolomies, de calcaires dolomitiques avec des intercalations marno-argileuses et de calcaires largement fissurés. En raison de leur identité de faciès, le Sénonien et l'Eocène carbonatés doivent constituer une seule unité hydrogéologique, que nous interpréterons comme un aquifère. Son épaisseur dépasse parfois 200 m. La limite supérieure de ce niveau est encore plus floue ; en effet, il existe pratiquement une continuité lithologique entre le Sénonien et l'Eocène carbonaté.

1.2.2. Le Tertiaire.

L'Eocène: Avant la fin d'Eocène carbonaté, la mer quitte définitivement le Sahara, qui va connaître un régime de sédimentation continental. Quant au sénonien, ce sont deux ensembles distincts ; du point de vue lithologique ;

- L'Eocène carbonaté présente des caractéristiques lithologiques qui le rendent difficile à distinguer du Sénonien. L'Eocène carbonaté formé essentiellement de dolomies et de calcaires dolomitiques avec quelques intercalations de marnes, d'argile et même d'anhydrite et de sel qui peut atteindre 340 m, ces calcaires sont très fissurés marqués par des pertes totales ou partielles de boues dans les forages traversent cette couche.
- L'éocène évaporitique au-dessus de l'Eocène carbonaté se compose d'une alternance de calcaires, d'argiles, de marnes et d'anhydrites. Il contient des Nummulites et Globigérines. Cette formation est désignée dans le bas-Sahara sous le nom d'Eocène évaporitique. Dans la région d'El-Oued, l'épaisseur de la formation varie entre 150 m (forage de 19 mars) et 340 m (forage DW-101)

Le Mio-pliocène : Le Mio-Pliocène est caractérisé par une forte hétérogénéité, tant dans le sens vertical qu'horizontal. C'est un puissant ensemble de sables et d'argiles qui s'étend sur tout le Sahara et qui repose en discordance indifféremment sur le Primaire, le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens ou l'Eocène, il appartient à l'ensemble appelé communément Continental Terminal. La plupart des coupes de sondages captant cet horizon, montrent que le Mio-pliocène est constitué par un empilement d'alternances de niveaux sableux, sablo-argileux avec des intercalations de gypse et des couches gréseuses. [Bel et Demargne \(1966\)](#) distinguent, de bas en haut, quatre niveaux :

- Niveaux argileux : Il est peu épais et n'existe que dans la zone centrale du Sahara Oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Mio-pliocène constituent

une barrière peu perméable entre les nappes carbonatées du Sénon-Éocène et les nappes sableuses du Pontien.

- Niveaux grès-sableux : C'est le plus intéressant du point de vue hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara Oriental. A sa base, on trouve parfois des graviers, tandis que le sommet est progressivement rempli d'argiles. L'épaisseur de ce niveau peut atteindre 400 m, c'est le principal horizon aquifère du Mio-pliocène.
- Niveaux argileux : Ce niveau est formé d'argiles et de sables dont les contours sont mal définis et n'est pas présent partout.
- Niveau sableux : du point de vue hydrogéologique, ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. Ces niveaux sableux sont d'un grand intérêt car ils correspondent, en quelque sorte, à la nappe phréatique des sables du Complexe Terminal. C'est le deuxième niveau sableux du Mio-pliocène, il repose parfois sur le niveau grès-sableux lorsque le niveau argileux est absent et se distingue très mal. Son extension est limitée à certaines régions du Bas Sahara. Dans la partie Nord son épaisseur s'accroît jusqu'à 400 m au pied de l'Aurès.

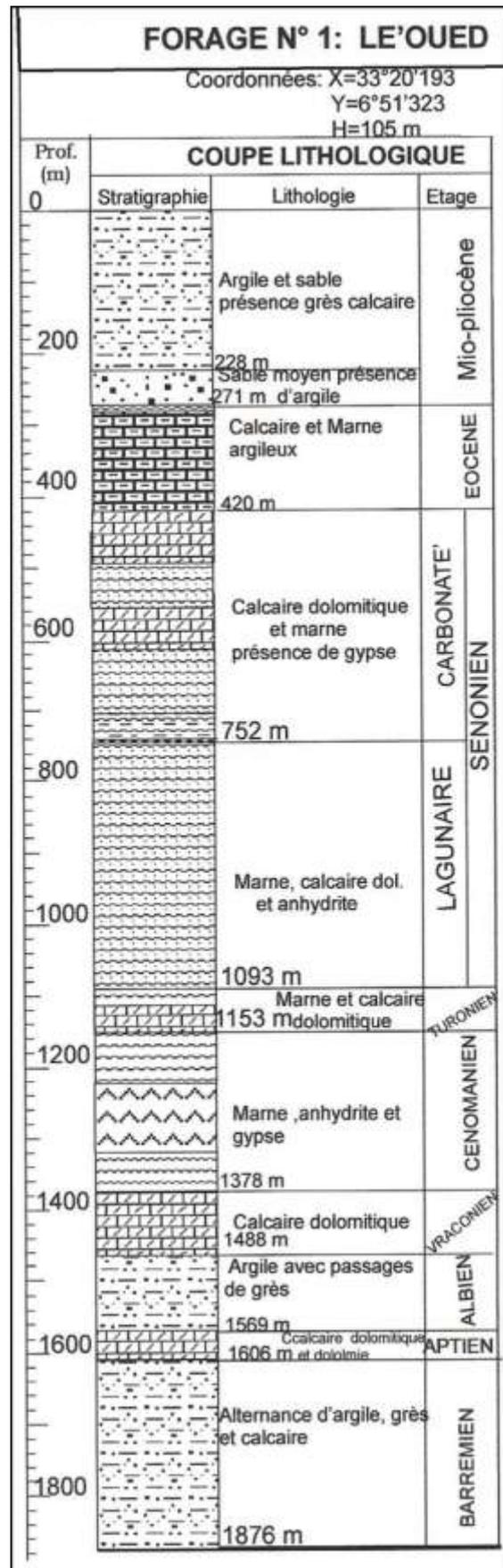


Figure 20: Log stratigraphique du Forage dans l'Albien (ANRH)

1.3. Interprétation des coupes Litho-stratigraphiques:

L'ensemble de la base de données est constitué de 26 colonnes stratigraphiques réparties sur l'ensemble de la zone d'étude a pour but d'établir une corrélation lithologique du sous-sol, ainsi que d'identifier l'extension géographique, l'épaisseur approximatif de la nappe et l'épaisseur utile des couches, après traitement des données des 26 logs de forage sélectionnés, un travail de saisie des différentes caractéristiques lithologiques et stratigraphiques a été réalisé , nous avons utilisé le logiciel RockWorks pour procéder à l'application de la corrélation entre ces logs. La figure suivante (figure 22) présente la position des 26 colonnes stratigraphiques avec une description des différentes couches de chaque forage (Figure 23).

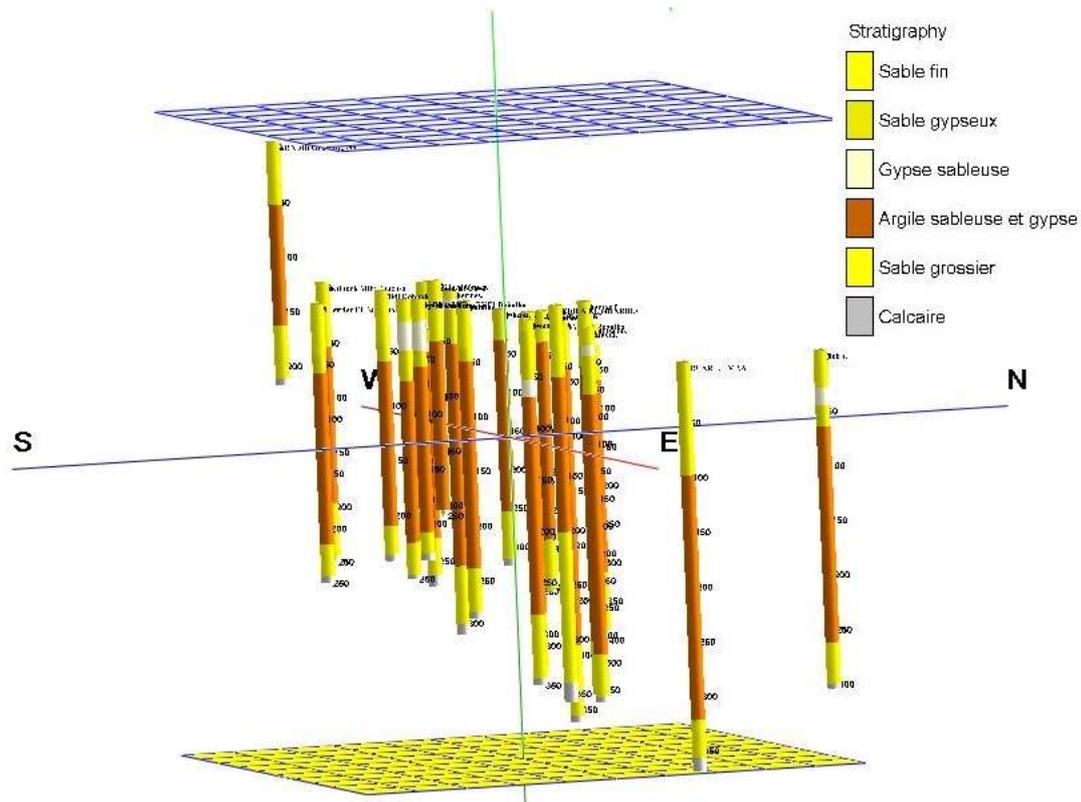


Figure 21: Localisation des 26 logs de forages sélectionnés. (Représentation de la stratigraphie en 3D)

1.3.1. Coupe N° 1:

En allant de la région dite Taleb Laarbi vers Oued Alenda, on remarque la succession des formations géologiques où l'Eocène se trouve à la base, constitué d'une intercalation de calcaire et de marne, suivi de Mio-Pliocène, qui repose en discordance sur l'éocène carbonaté,

il est représenté en général par des intercalations de deux niveaux sableux et un niveau argileux, l'épaisseur de chaque niveau est variable d'un endroit à l'autre (Figure 24). Nous remarquons au niveau du Trifaoui et el Bayadha l'épaisseur du Quaternaire présente presque la moitié de celle de Taleb Laarbi, ceci ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, mais s'épaississent vers le Sud (Oued Alenda). Tandis que les formations Mio-pliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable, constituées par des argiles sableuses, de sable et de calcaire, diminue du Nord-Est vers le Sud-Ouest.



Figure 22: localisation des logs avec orientation des coupes.

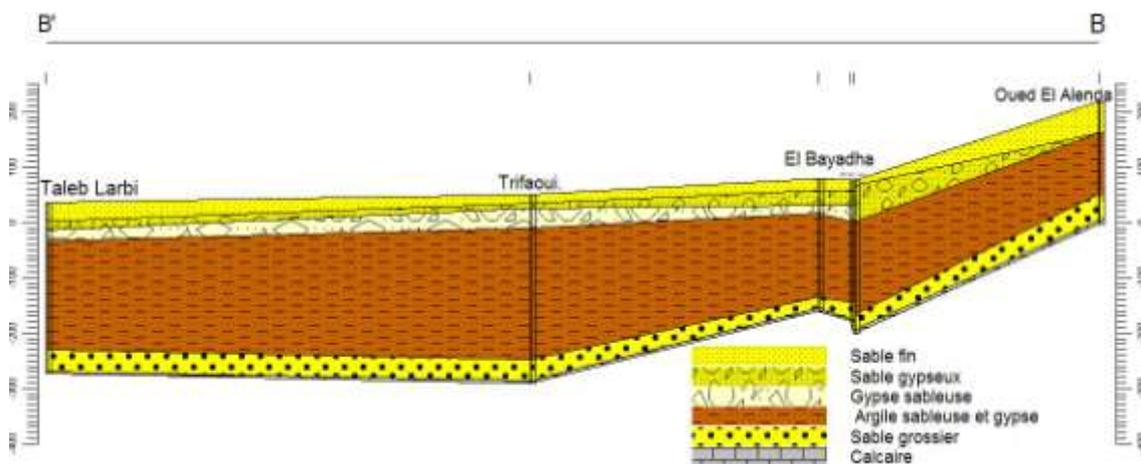


Figure 23: Coupes litho-stratigraphiques N°01

1.3.2. Coupe N° 2:

La coupe (Figure 25) est orientée NO-SE, sur une longueur de 30 Km, on rencontre les formations géologiques de bas en haut ; l'éocène supérieur formé de calcaire et de marne, le Mio-Pliocène constitué de sables et d'argiles, et enfin le Quaternaire formé de sable. Le toit de Mio-pliocène et le mur de Quaternaire sont souvent confondue, ils sont constitués par un empilement de niveaux alternativement sableux, argileux, sablo-argileux, gypseux et des passages de marne, de grés et de calcaire. Dans cette coupe on remarque que la première nappe de sable est confondue avec les formations de gypse et de sable Gypseux, on faite cette nappe n'est pas exploitée dans la région où on remarque que tous les forage de CT captant la deuxième nappe de sable à cause de son épaisseur très importante et sa bonne perméabilité.

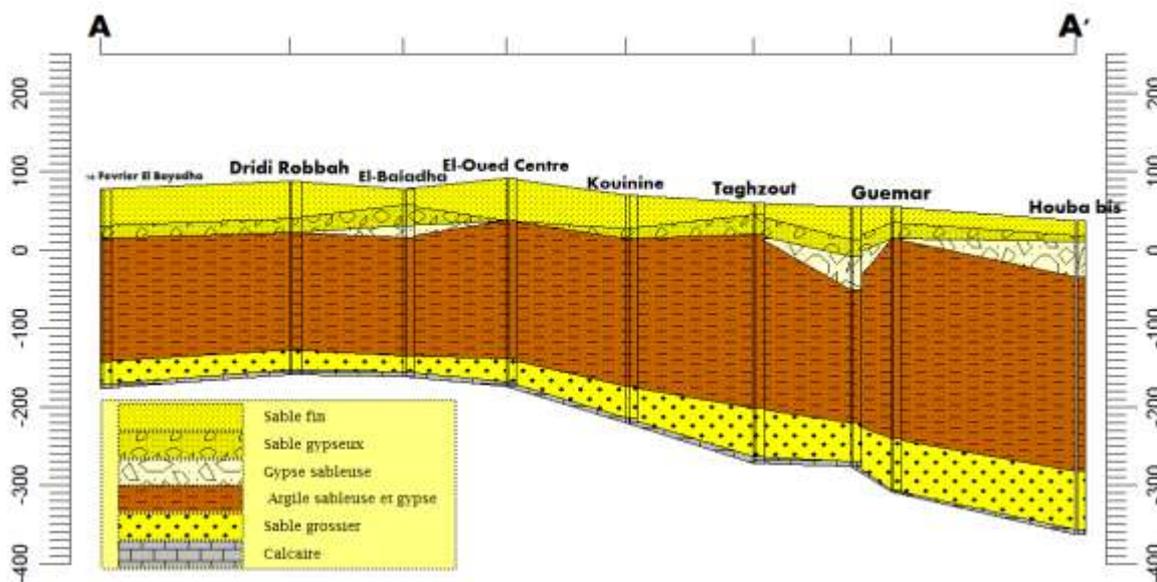


Figure 24: Coupes litho-stratigraphiques N°01

2. HYDROGEOLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE:

2.1.INTRODUCTION :

L'étude hydrogéologique vise à identifier les différents aquifères, à avoir une idée sur l'évolution de la surface piézométrique, géométrie, le comportement hydrodynamique et leur mode d'alimentation.

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional SASS s'étend sur une vaste zone de 780000 km². Dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye (Figure 26). Du point de vue hydrogéologique, ce bassin est constitué de plusieurs formations hétérogènes, très étendues, séparées par des formations imperméables, qui s'étendent au-delà des frontières algériennes (Tunisie et Libye), Il s'agit de dépôts continentaux dans lesquels on peut effectivement

distinguer deux aquifères superposés que nous appellerons, de bas en haut, le « Continental Intercalaire » CI, et le « Complexe Terminal » CT et surmonté par la nappe superficielle.



Figure 25 : Limites du Bassin de Système Aquifère du Sahara Septentrional SASS (OSS, 2003) Modifier.

2.2.PRESENTATION DU SYSTEME AQUIFERE DU SAHARA SEPTENTRIONAL.

2.2.1. Nappe Phréatique :

La nappe phréatique présente est contenue dans des sables fins à cristaux de gypse, des lentilles d'argiles sableuses, correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire dans toute la région du Souf ; elle peut être rencontrée à des profondeurs variant de 10 et 60 mètres, augmente du Sud vers le Nord.

Elle est caractérisée par une forte salinité des eaux. Compte tenu de son importance, cette nappe représente la principale source en eau des palmeraies ; elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui, selon les enquêtes, sont en nombre de 21 000.

La circulation des eaux dans cette nappe est relativement rapide dans toute la région du Souf et notamment dans les zones caractérisées par l'existence de lentilles argileuses qui influencent la perméabilité des sables. A l'exception de la région des Chotts, la nappe libre est présente sur toute la zone d'étude.

La nappe phréatique de la région du Souf est principalement alimentée par les excédents d'eau d'irrigation, industrielles et domestiques des pompages du CI et CT ainsi que par les eaux usées (Marc Cote, 1998).

2.2.2. Piézométrie de la nappe phréatique

Depuis 1950, aucune carte piézométrique de la nappe libre du Souf n'a été établie ; ceci est dû soit à un manque de moyens, soit à l'absence d'un réseau de surveillance piézométrique. En 2006, la COSIDER a réalisé 58 forages, qui seront utilisés pour le drainage vertical, dans le cadre de la lutte contre la remontée des eaux de la nappe superficielle, l'ONA d'El Oued a réalisé une campagne de mesures piézométriques au niveau de 58 drains (piézomètres), pour avoir un niveau piézométrique de référence (Bouselsal 2016 ; Bouselsal et al. 2015 ; Khelfaoui et al. 2021). A partir des données du niveau piézométrique fournies par l'ANRH (Ouargla) et la DHW d'El-Oued, nous avons pu réaliser quatre cartes piézométriques de la nappe phréatique, pour les années: Mars 2008, Mars 2011, Mars 2014 et Mars 2016 (Figure 27 à 30).

D'après les cartes piézométriques de Mars 2008 et Mars 2016 (Figure 27 à 30). On remarque que le niveau piézométrique le plus élevé de la nappe est situé au Sud-Ouest avec une côte proche de 90 m (P17), forme des dômes piézométriques remédiés par la remontée des eaux et son impact dans la région du Souf (Moudjahidine -D39-D43- jusqu'à El REMMAL -D40-D44-D46- et les cités 19 mars -D52- et SAHANA I -D48-) correspondent à des zones privilégiées d'infiltration, et une autre zone au Nord-Est de la ville d'El Oued (Cités 01 Novembre 1954 et 08 Mai 1945), donc des zones d'alimentation. Alors que le niveau piézométrique le plus bas est situé au Nord-Ouest et Nord-Est avec une côte d'ordre 64 m (G12, H80) forme des dépressions piézométriques au niveau du Chott d'El Oued (Nord de la Commune d'El Oued), donc exutoire naturel dans la zone urbaine.

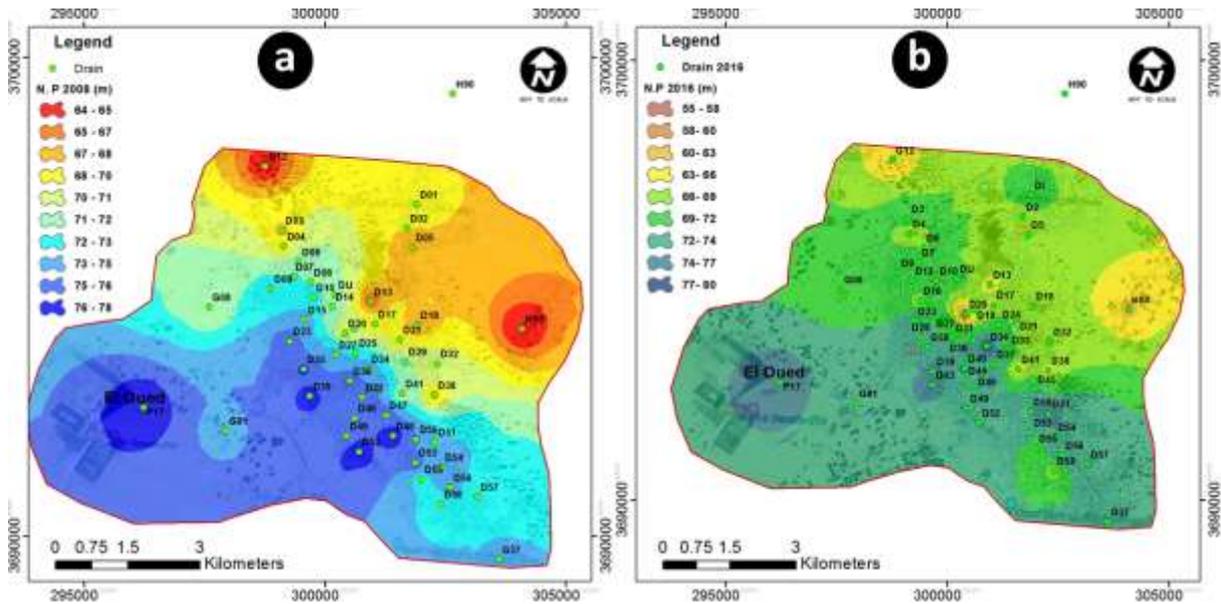


Figure 26. Carte piézométrique de la commune d'El oued en Mars 2008 (a), Mars 2016 (b)

D'une façon générale, le gradient hydraulique de la nappe est faible, avec les valeurs les plus bas sont situés dans la partie centrale, du Sud et du Nord (D01, D02, D05, G81) jusqu'à El Oued où les courbes sont un peu espacées donnant des valeurs variantes entre 1‰ (carte piézométrique Mars 2008) et 0.5‰ (carte piézométrique Mars 2016). Par contre, dans la partie Nord-Ouest et Nord-Est les courbes sont plus serrées avec un gradient de l'ordre 11 ‰ (carte piézométrique Mars 2008) et 9 ‰ (carte piézométrique Mars 2016). En général l'écoulement de la nappe se fait du Sud vers le Nord pour toutes les cartes.

2.2.3. Variation du niveau piézométrique entre Mars 2008 et Mars 2016

Afin de voir la variation du niveau piézométrique entre la première campagne réalisée en Mars 2008 et la dernière campagne en Mars 2016, nous avons élaboré la carte ci-dessous, cette dernière nous a permis de constater :

- Une élévation du niveau piézométrique de la nappe phréatique près du rejet de la ville d'El Oued avec une élévation atteignant 4.5 m, 0.5 mètre à Robah et Kouinine, 2 mètre à El Oued et Bayada.
- Un abaissement dans presque tout le reste de la zone d'étude atteint 6 m au Nord-Est de Guemar, 1.8 m dans la région de Riguiba et Hassi Khalifa, 1 m entre Nekhla et Ogla et 0.7 m à Mihouensa.

2.2.4. Variation du niveau statique

L'analyse de la carte des niveaux statiques montre qu'il existe des zones caractérisées de grand débit de pompages au Nord-Est de la commune d'El Oued, en raison des taux d'irrigation des espaces verts dans les écoles et les directions. Nous parlons ici du drain H80, et les drains D05 D03- D04-D09-D34 avec un pompage moins agressif (Figure 31). La superficie moyenne des zones inondée et humides dans la commune d'El Oued atteignent environ 6 km² (Figure 31).

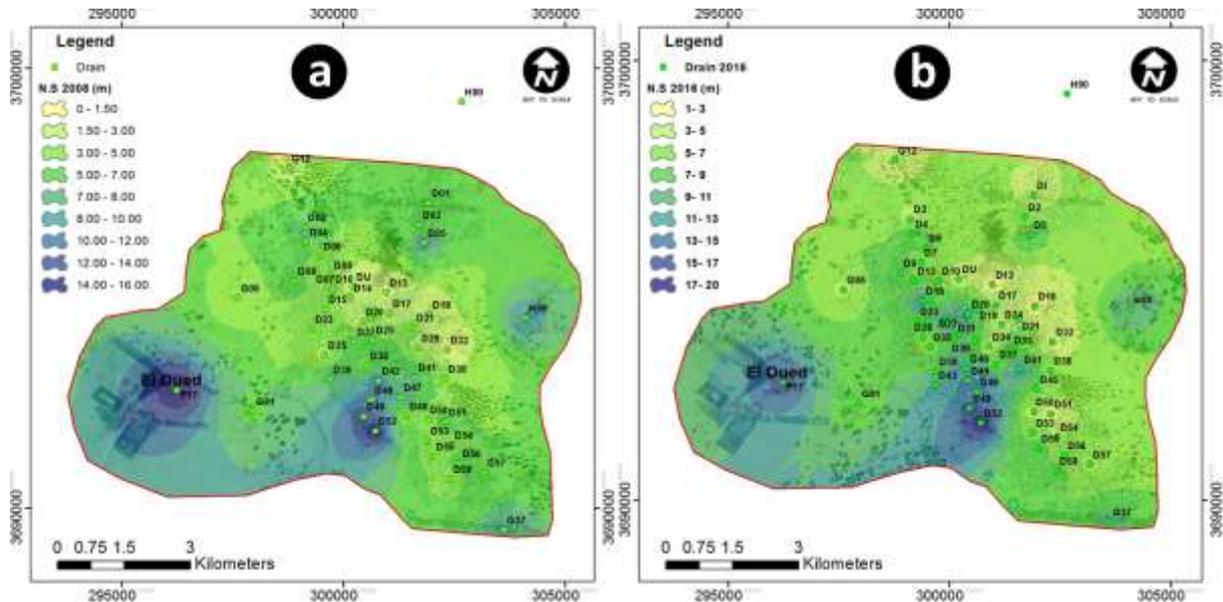


Figure 27. Carte de niveau statique de la commune d'El oued en Mars 2008 (a), Mars 2016 (b)

La surface moyenne des zones inondées (et humides) au niveau du Chott de la ville d'El Oued s'est étendu d'environ 4,5 km² (Figure 32). Il faut noter ici que les 52 drains du réseau de drainage vertical installé dans les zones urbaines de la commune d'El Oued, qui évacue les eaux souterraines excédentaires vers la station 10 ; ne sont pas les seuls à drainer les eaux souterraines. Plus de 200 points d'eau (forages) sont répartis sur l'ensemble de la commune d'El Oued. Tous ces forages (Figure 34) sont entièrement destinés à l'irrigation des espaces verts où les arbres forestiers dans les directions (les directions de la DCF, la DRH ...etc.), des écoles et des jardins publics. Il faut noter ici que les pompages successifs à travers les drains pendant près de deux ans, donnent un résultat remarquable présenté par le battement d'environ 0,5 m du niveau moyen des eaux de la nappe phréatique traditionnelle de la commune d'El Oued.

2.3. Le complexe terminal

D'après la définition de **KILIAN en 1931** le terme continental terminal désigne les formations continentales sableuses et argileuses du Mio-pliocène. En **1966, BEL et DEMARGNE** considèrent que la nappe du continental terminal qui est contenue dans les sables du Mio-Pliocène, et plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, ces différents niveaux forment une même nappe. C'est avec le projet « **ERESS, 1972** » qu'apparaît la notion du « Complexe Terminal », appellation publiée pour la première fois par **BEL.F et CUCHE.D (1969)**, ce terme de « nappe du Complexe Terminal », cette dénomination regroupe tous les aquifères situés dans les différentes formations géologiques, car ces nappes représentent le même ensemble hydraulique.

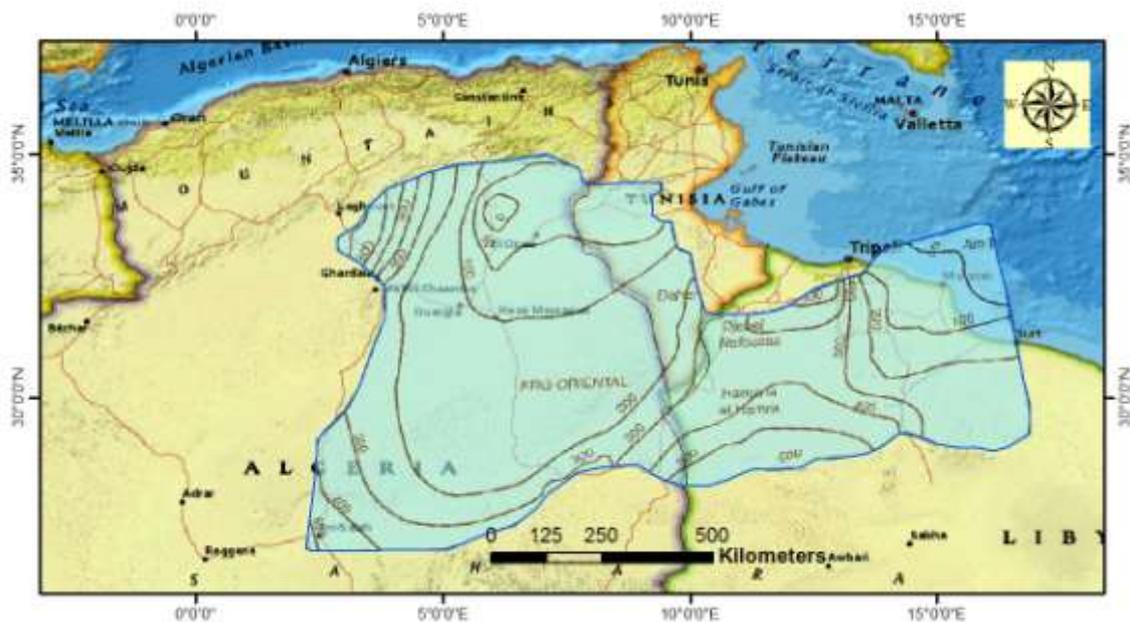


Figure 28. Limites de l'aquifère du Complexe Terminal (OSS, 2003b). Modifier

Le système aquifère du Complexe Terminal est moins étendu que celui du CI, le terrain du Complexe Terminal couvrant environ 350 000 km² (Figure 35) en Algérie et en Tunisie couvrant essentiellement la majeure partie du bassin oriental et l'ensemble du Sahara septentrional, de Saoura à l'Ouest au Graben de Hon (et même jusqu'au Golfe de Syrte) à l'Est, de l'accident Sud-Atlasique au Nord, au flanc nord des plateaux de Tademaït et du Tinhert en Algérie, du Gargaf (Nord du Fezzan) en Libye. Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes, englobant les assises perméables du calcaire Sénonien et du Mio-Pliocène. Il s'agit de formations continentales sableuses et sablo-argileuses avec des

intercalations de gypse et de passées de grès qui reposent en discordance sur les formations calcaires érodées de l'Eocène inférieur.

Il est possible de distinguer trois aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables, dont les deux premières correspondent respectivement aux sables d'âge Miocène (Pontien) et Pliocène, tandis que la dernière correspond à l'Eocène inférieur.

2.3.1. Nappe des Sables.

Dans ces niveaux de sable viennent se générer deux nappes de type captif, dont le premier moins profond correspond à la formation supérieure du complexe terminal communément appelée réservoir du "Sub-Souf".

Outre la nappe phréatique, Cette nappe est constituée de sables fins à moyens, de sables argileux et de grès, d'âge Mio-Pliocène, et son toit est constitué d'argiles et d'évaporites, émerge progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud au Rustine. Il s'agit d'une nappe captive et était autrefois très exploitée avec des débits faibles à moyens, Dans la zone d'étude, elle a une profondeur moyenne de 280 mètres (Figure 40).

Il faut également mentionner l'existence d'une deuxième nappe contenue dans les sables d'âge pontien. Cette couche est séparée de la précédente (première nappe des sables) par une formation d'argiles-gypseuse imperméable formant son toit, son substratum est constitué d'argiles et d'argiles-sableuses, la profondeur de cette couche varie entre 400 et 450 mètres (Figure 40), l'épaisseur utile de cette couche est d'environ 50 mètres. L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-ouest vers le Nord-est, c'est-à-dire vers la zone des Chotts Algéro- Tunisiens. Dans les zones de fortes exploitations comme la ville d'El Oued, l'extraction de l'eau se fait par pompage. Par contre dans les régions où l'exploitation est moindre à Taleb Larbi et Douar EL Maa, la nappe est artésienne : c'est le cas de la nappe de Pontien.

2.3.2. Nappe des calcaires :

Est un ensemble calcaire-dolomitique à dolomitique, avec la présence de quelques couches d'argiles, de marnes et de gypses, situé dans les calcaires fissurés du Sénonien carbonaté et de l'Eocène inférieur ; essentiellement carbonaté et très peu exploité, les forages captant cette nappe nous montrent l'existence de deux niveaux servant de référence pour la classification des eaux souterraines. Du Sud au Nord, on observe l'existence d'un premier niveau calcaire

mieux individualisé, tantôt purement calcaire, tantôt formé de 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 couches d'argile rouge. Le Sénonien lagunaire forme son substratum et les argiles lagunaires et marnes de l'Eocène moyen forment le toit imperméable de cette nappe

2.3.3. Piézométrie du CT dans la région de Souf :

La carte piézométrique d'avril 2010 (Figure 36) montre que la partie haute de la nappe se trouve à Robbah avec une cote de 67,55 m et Mih Ouensa avec une cote de 67.4 m, alors que la partie basse se trouve au nord de Hassani Abdelkrim avec une cote de 16 m et au nord de Reguiba avec une cote de 18 m. Le sens d'écoulement des eaux sont orienté du sud-ouest au nord-est (Oualekh et al. 2021).

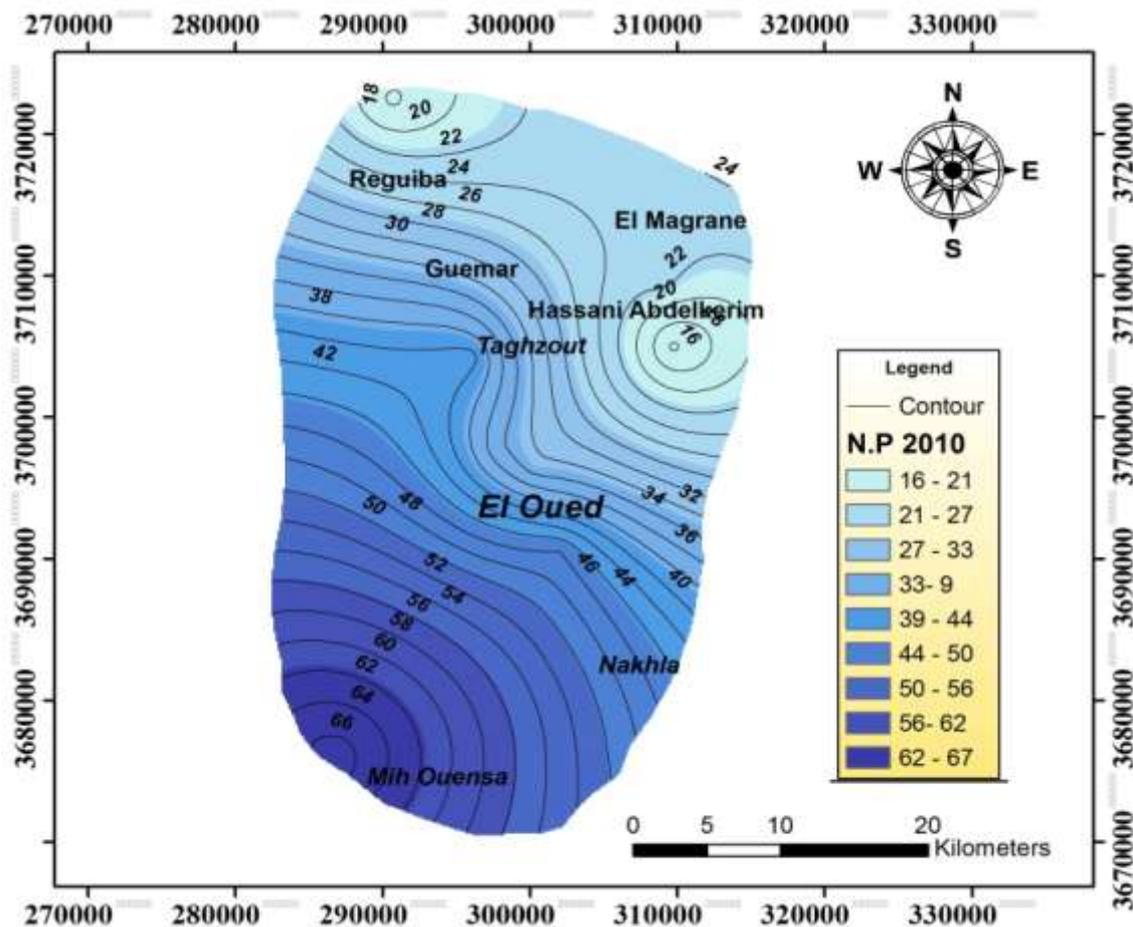


Figure 29: Carte du niveau piézométrique des eaux souterraines des aquifères du CT (mars 2010).

La carte piézométrique mars 2017 (Figure 37) présente le même aspect que celle de 2010. La partie haute de la nappe est située à Robbah (59,55m) et Mih Ouensa (59.2m), alors que la partie basse de la nappe est située à Hassani Abdelkrim (8 m) et au nord de Reguiba (12 m). Dans la ville d'El-Oued, le niveau piézométrique est d'environ 28 m. Le sens d'écoulement des eaux est orienté suivant une direction générale du sud-ouest au nord-est. Les deux dépressions piézométriques observées sur les cartes sont les résultats de la surexploitation de l'aquifère pour l'irrigation des surfaces cultivées, affectées au maraîchage, aux céréales et aux pommes de terre.

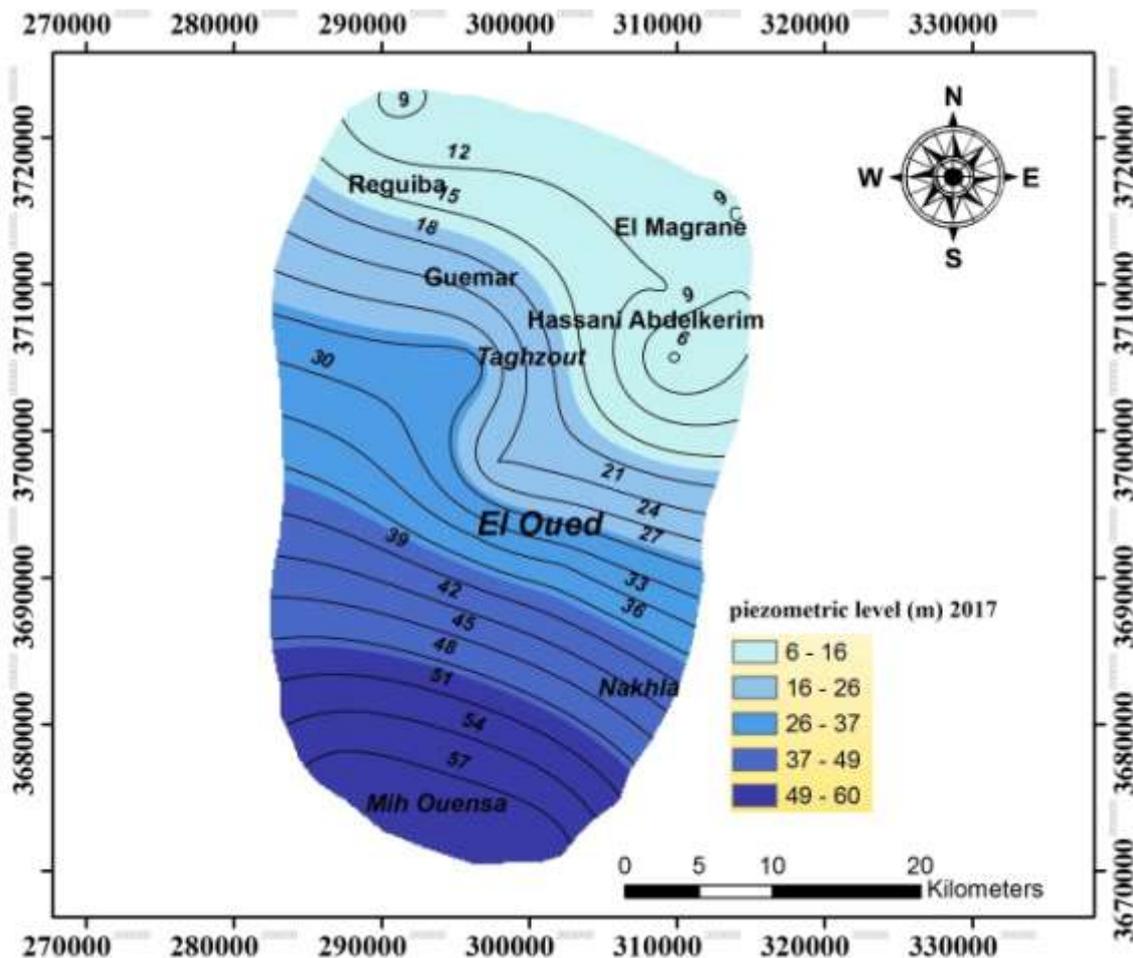


Figure 30: Carte du niveau piézométrique des eaux souterraines des aquifères du CT (mars 2017).

La comparaison entre les deux cartes piézométriques précédentes (Figure 38) montre une diminution générale du niveau piézométrique dans toute la zone d'étude varie entre 7.5m et 17.5m. Dans la ville d'El-Oued la diminution varie entre 15m et 17.5m, ceci s'explique par la surexploitation de la nappe du complexe terminale dans ces sept dernières années.

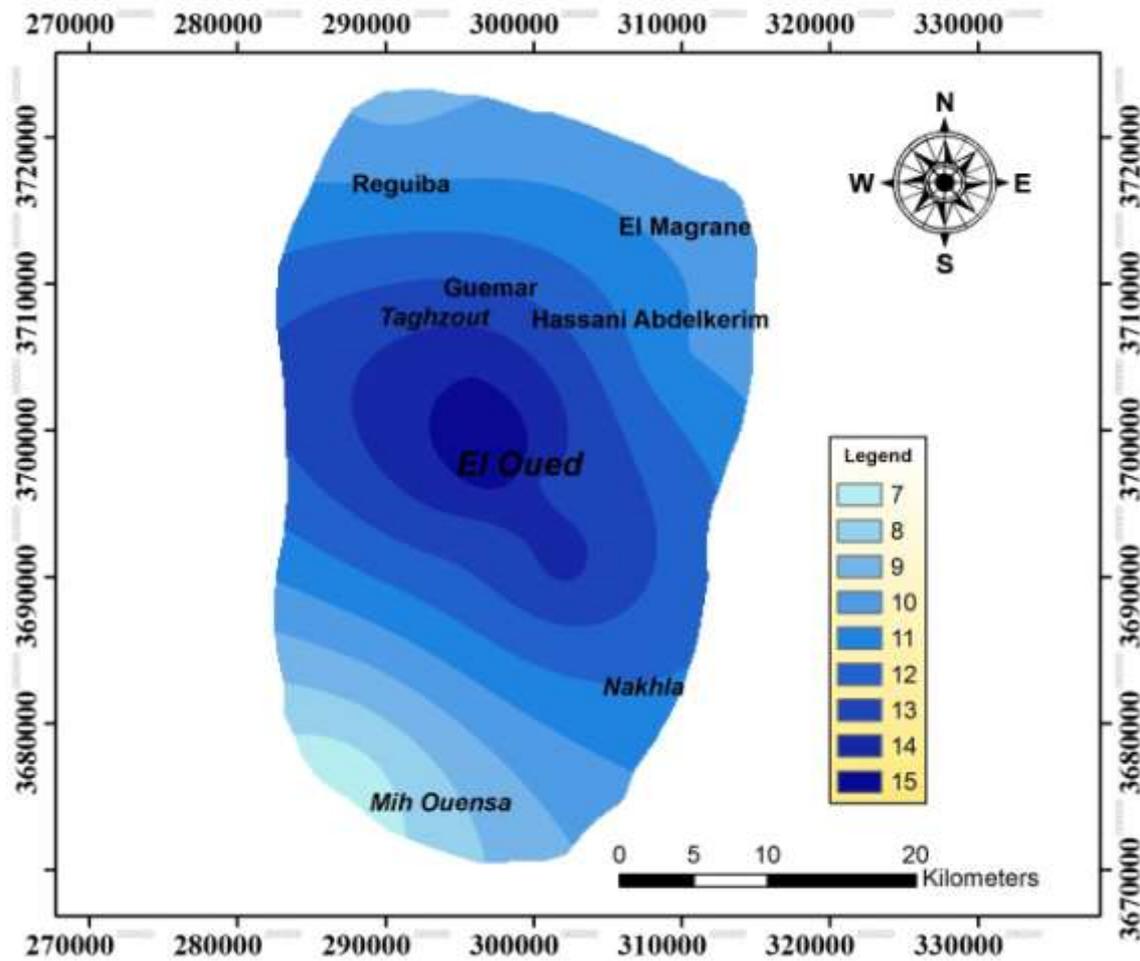


Figure 31: Carte de variation du niveau piézométrique des eaux souterraines du CT (2010- 2017).

On constate que les nombres de forages destinés à l'AEP ou à l'irrigation sont augmentés. Dans les autres localités de la zone d'étude la chute du niveau piézométrique est de l'ordre de 15m à Kouinine et Trifaoui, de l'ordre de 10 m à 14m dans les régions de Guemar, Hassani Abd Karim, Debila et Hassi Khalifa, cependant Mih Ouensa, Robbah et Réguibia, elle est de l'ordre de 7.5m à 10.5m.

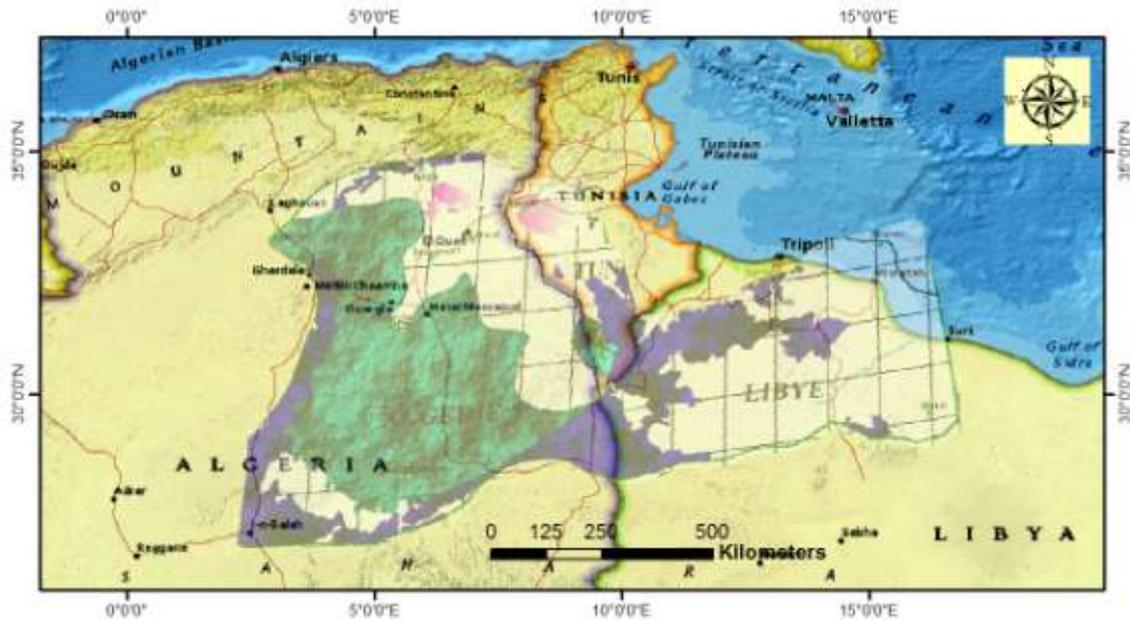


Figure 32: Les zones d'alimentation de CT (Baba SY, 2005). Modifier

2.4. Le Continental Intercalaire

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts sablo-gréseux et sablo-argileux continentaux du Crétacé Inférieur, qui ne peuvent être que la période continentale intercalée entre deux cycles sédimentaires ; la régression marine suivie d'une transgression du Crétacé supérieur. C'est un système aquifère multicouche, dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et une puissance variante entre 200 et 400 mètres, son volume considérable étant dû à la fois à son extension sur plus de 600.000 km². Le CI est qualifié dès 1945 de « plus grand système hydraulique du Sahara » [Savornin, \(1945\)](#). Il stocke un volume d'eau considérable, estimé à 3.5x 10⁹ milliards de m³ environ.

Il est limité au Nord par l'Atlas Saharien, à l'Ouest par l'axe Bechar-Reggan et au Sud par l'axe Reggan-Ain Amenas ; à l'Est, elle s'étend jusqu'aux frontières Algéro-Libyenne et Algéro- Tunisienne. Il est divisé par la dorsale du M'zab en deux bassins (figure 40) le bassin Occidental Oriental et le bassin Oriental qui comprend le Bas Sahara.

Cependant, si l'intérêt majeur de ce système aquifère réside dans les grandes quantités d'eau qui y ont été stockées pendant les périodes pluvieuses du Quaternaire ([UNESCO, 1972](#)). Dans la zone d'étude, cet aquifère est capté par trois forages profonds d'une profondeur de (1800 à 2100 m), donnant un débit total de 680 l/s dont deux forages pour l'alimentation en eau potable (AEP) de la ville d'El Oued (430 l/s) et un forage pour l'irrigation à Sahan Berry avec un débit de 250 l/s, l'épaisseur du réservoir est importante et varie de 200 à 400 m, sa

température atteint 60°C et la pression en tête de puits fermé est de 25 à 27 bars (HPO & BG ; 2004)

2.4.1. La piézométrie de la nappe continentale intercalaire

Les travaux de Cornet (1964), ERESS (1972), Pallas (1978), Idroteneo(1982), Geomat (1994) et OSS (2003a et b), ont contribué à l'élaboration de la carte piézométrique de la CI. Le niveau piézométrique de cette nappe est généralement supérieur à celui de la nappe du complexe intercalaire. Les écoulements d'eau souterraine du CI dans le Grand Erg Oriental convergent vers un seul exutoire : la région du Golfe de Gabès en Tunisie. La direction principale de l'écoulement, W-E, provient de l'Atlas Saharien et de la dorsale du M'Zab. Une autre direction provient du Sud et du Sud-Est (Figure 41-42).

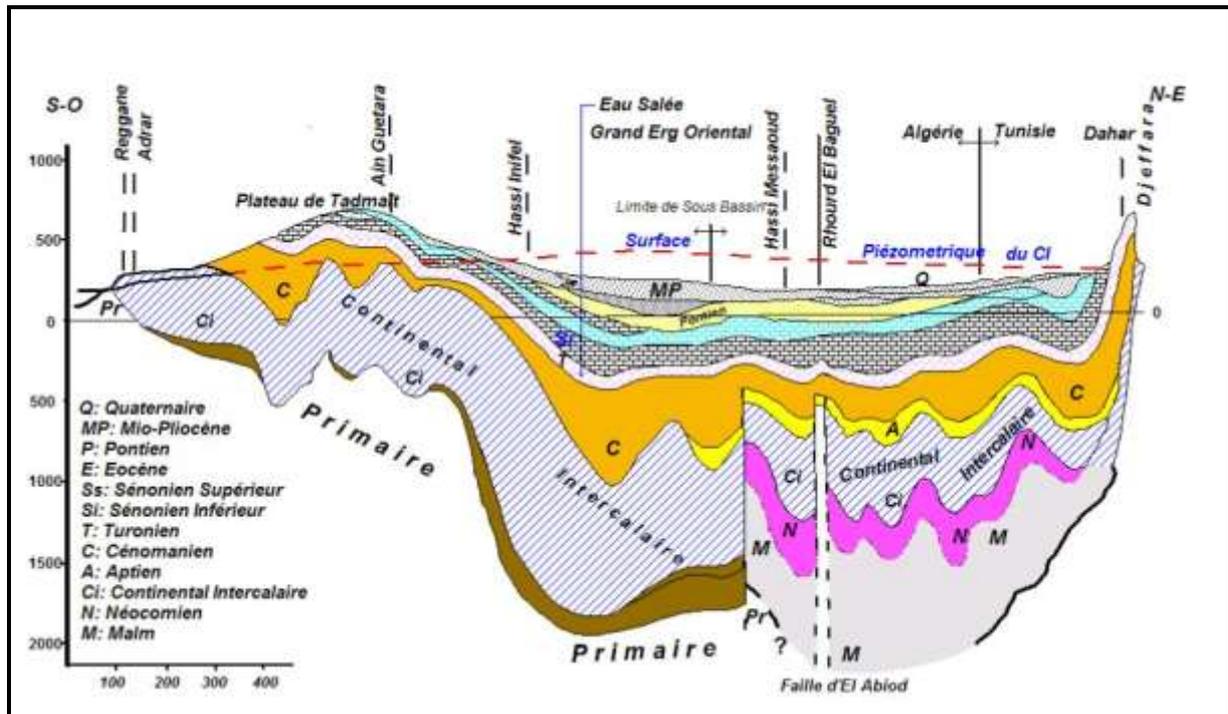


Figure 33 : Coupe hydrogéologique du système aquifère CI et CT (UNESCO, 1972)



Figure 34: Limite et piézométrie du Continental Intercalaire (Baba SY et al., 2006).

Modifier

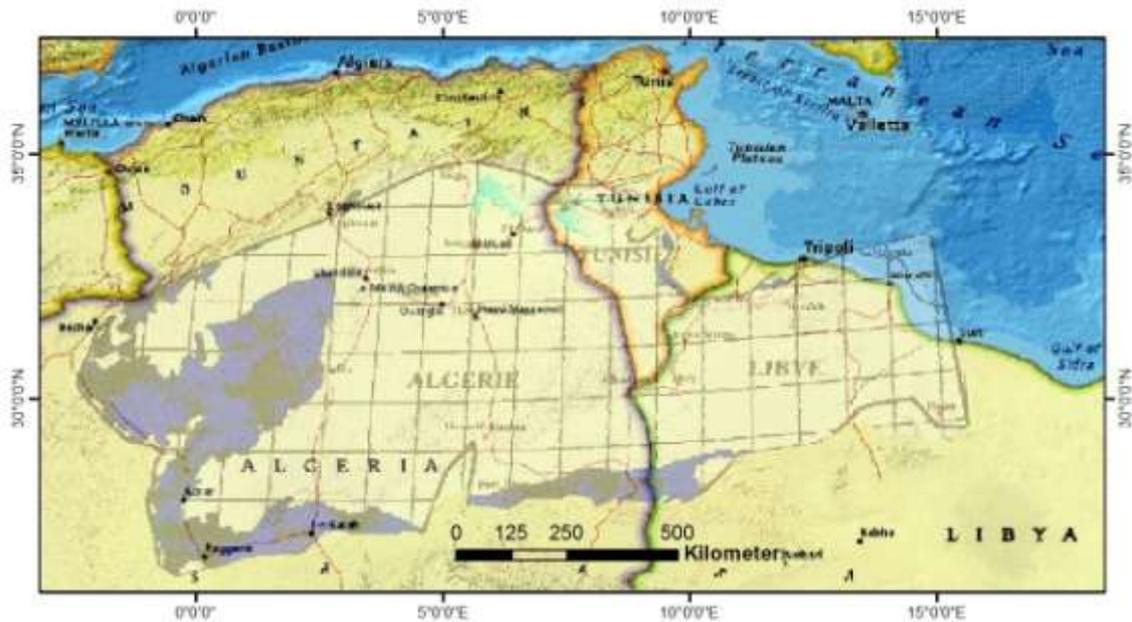


Figure 35: Les zones de recharge de CI (OSS, 2015) Modifier.

3. Caractéristiques hydrodynamiques de la nappe du CT :

Les essais de puits et le pompage d'essais sont deux méthodes d'expérimentation qui a pour objet l'évaluation des caractéristiques du complexe aquifère /ouvrage d'une part et la

détermination des paramètres hydrodynamique d'autre part. La détermination des caractéristiques hydrauliques de la nappe de complexe terminal se fait par des pompages d'essais. Cette méthode consiste à représenter expérimentalement par des graphiques, les courbes et les droites des fonctions mathématiques régissant l'écoulement des eaux souterraines vers les ouvrages de captage.

Plusieurs méthodes permettent l'interprétation des essais de pompage. Leur choix est basé sur plusieurs hypothèses que sont la nature de la nappe, la géométrie de l'aquifère (type de nappe, homogénéité, isotropie) et le type d'écoulement qu'on y rencontre.

3.1.Méthode de Theis:

La solution analytique donnant le rabattement de la surface d'une nappe captive lors d'un pompage à débit constant en régime transitoire a été développée par [Theis \(1935\)](#) par analogie avec les problèmes de conduction de la chaleur. Lors d'un essai de pompage dans un puits de diamètre infinitésimal pénétrant totalement un aquifère poreux à nappe captive, homogène, isotrope, d'épaisseur constante et d'extension infinie, le rabattement s (m) est donné par la formule suivante :

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u); u = \frac{r^2}{4Tt}$$

Avec

- Q : le débit (m³/s)
- T : la transmissivité (m²/s)
- S : le coefficient d'emmagasinement
- t : la durée du pompage (s)
- r : distance au puits d'observation
- W (u) une fonction de Theis

W(u) est appelée fonction de puits. Elle est tabulée dans de nombreuses références, par exemple [Domenico & Schwartz \(1990, p. 106\)](#). Dans l'équation 1.8, r (m) est la distance entre le puits de pompage et le puits d'observation dans lequel le rabattement est mesuré, S est le coefficient d'emmagasinement de l'aquifère, T (m² /s) sa transmissivité et t (s) le temps écoulé entre le début de l'essai de pompage et la prise de mesure du rabattement.

3.2.L'approximation logarithmique de Cooper-Jacob :

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

$$T = 0,138Q / C$$

- T: La transmissivité en (m² /s).
- Q: Le débit (longue durée) en (m³ /s).
- C : La pente moyenne (‰).

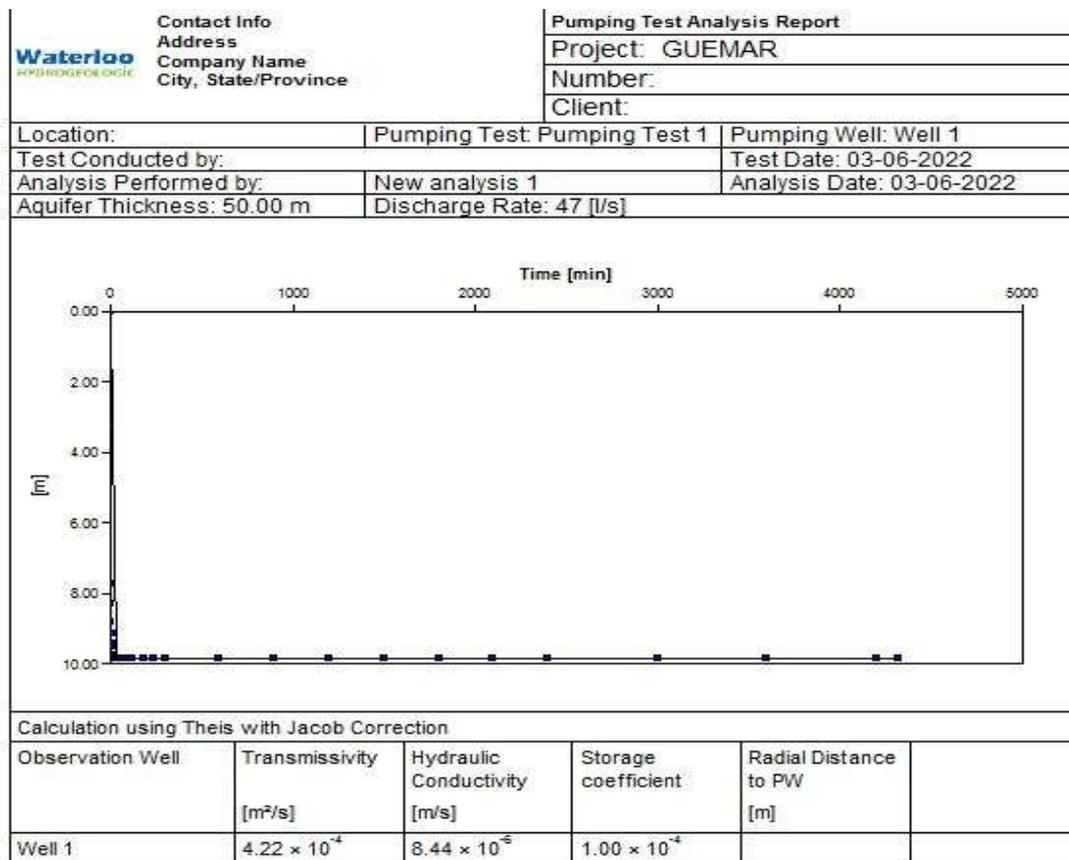


Figure 36: Essai de pompage longue durée à Guemar

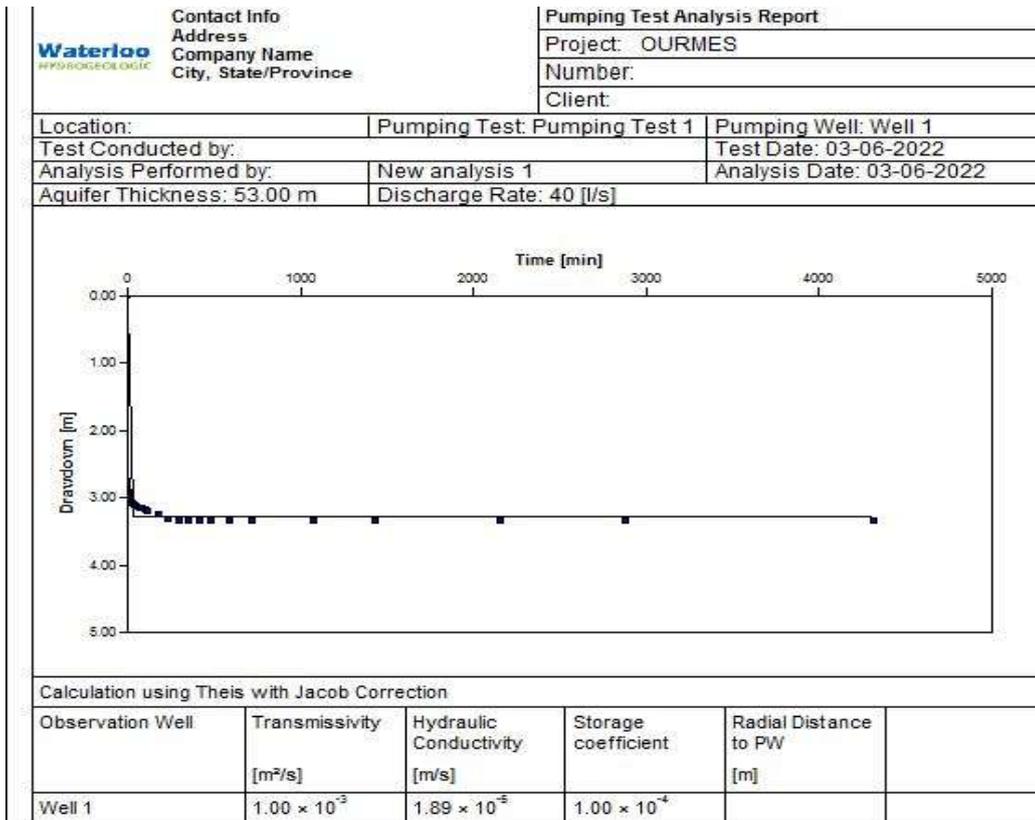


Figure 37: Essai de pompage longue durée à Ourmes

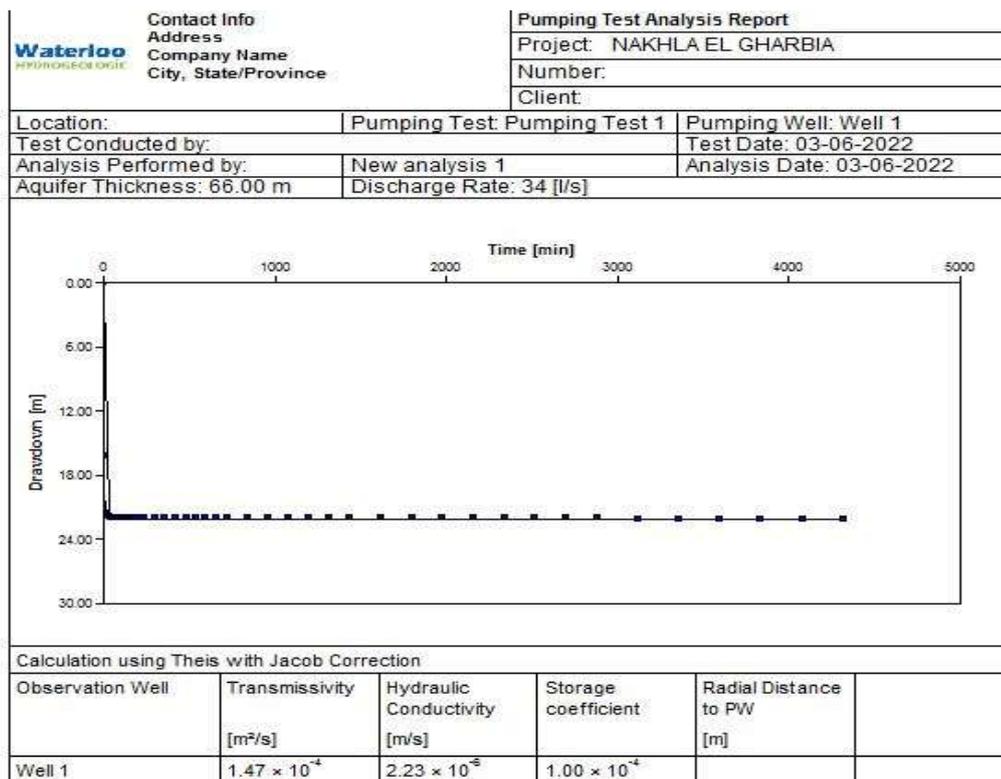


Figure 38. Essai de pompage longue durée à Nakhla

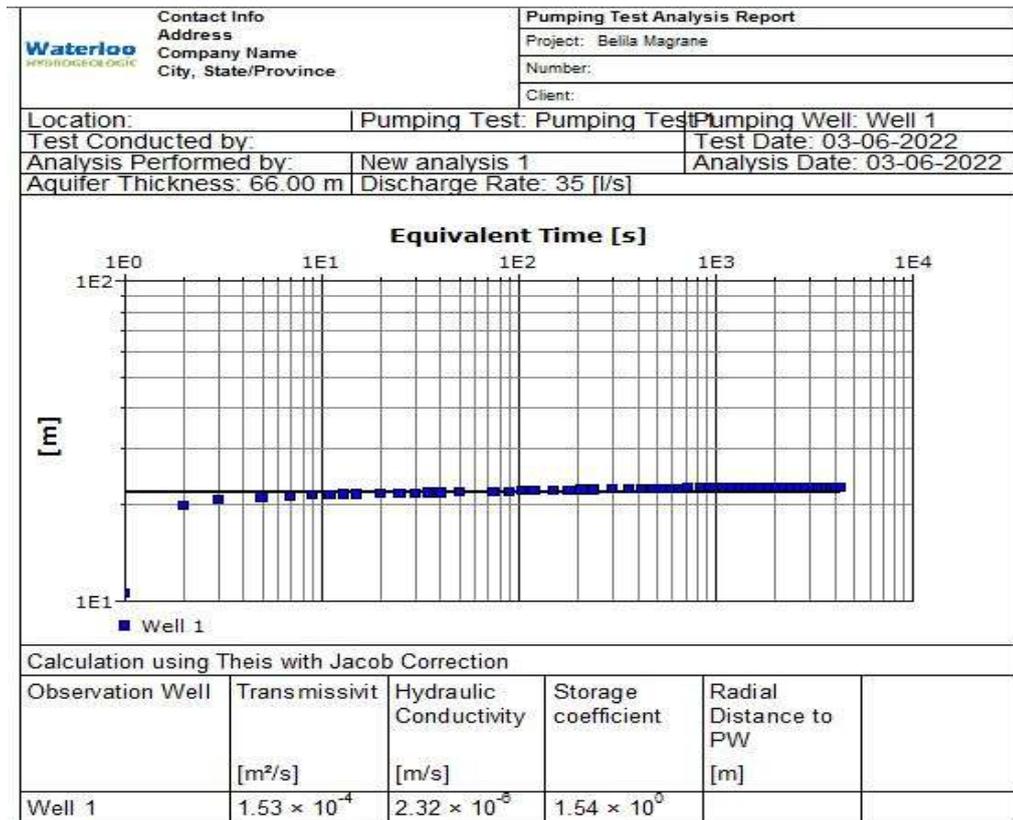


Figure 39: Essai de pompage longue durée à el Magrane

Tableau 04: Résultats des paramètres hydrodynamiques pour les 04 sites d'essai.

	T (m ² /s)	K (m/s)	S
Guemar	4.22 × 10 ⁻⁴	8.44 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁴
Ourmes	1 × 10 ⁻³	1.89 × 10 ⁻⁵	1 × 10 ⁻⁴
Nakhla	1.47 × 10 ⁻⁴	2.22 × 10 ⁻⁶	1 × 10 ⁻⁴
Magrane	1.53 × 10 ⁻⁴	2.32 × 10 ⁻⁶	1.54 × 10 ⁻⁴

Quatre essais de pompage ont été réalisés dans la zone d'étude (Guemar, Ourmes, Nakhla, Magrane). Les propriétés hydrauliques (transmissivité, conductivité hydraulique et coefficient d'emmagasinement) de l'aquifère du CT ont été obtenues par l'analyse des résultats des essais de pompage, ces données ont été introduites dans le logiciel (Aquifer Test) (Figure 43 à 46).

La conductivité hydraulique dans son sens physique est définie comme "le volume de liquide s'écoulant perpendiculairement à une unité de surface de milieu poreux par unité de temps sous l'influence d'un gradient hydraulique.

Les valeurs de conductivité hydraulique observées dans la zone d'étude varient de 1.89×10^{-5} observés dans la partie nord-est de cette zone (Ourmes) à 2.22×10^{-6} m/s observés dans la partie sud-ouest de la zone d'étude (Nakhla) (Tableau 04).

La transmissivité définit la capacité de l'eau à se déplacer dans un grand milieu poreux, tel qu'un aquifère horizontal ou stratifié. Elle représente le produit de la conductivité hydraulique et de l'épaisseur saturée de l'aquifère. Les zones à haut débit sont caractérisées par des valeurs de valeurs de transmissivité élevées, observés dans la partie nord et nord-est (**Guemar, Ourmes**), supérieure à 4.22×10^{-4} m²/s.

Ces résultats indiquent clairement que la partie nord et nord-est de la zone est la plus productive en termes d'exploitation des eaux souterraines et donc la plus favorable à l'implantation de forages productifs. Cette zone correspond à la zone de haute transmissivité et épaisseur de l'aquifère et sont donc de bonnes perspectives pour la réalisation de forages. Cette zone a également enregistré la plus grande valeur de storativité comme indiqué dans la (Tableau 04).

4. Délimitation hydrogéologique des zones potentielles en eau souterraine dans l'aquifère CT

La technique AHP a été largement appliquée au MCDA, utilisant une structure hiérarchique pour prendre une décision. Ces dernières années, certains chercheurs ont couplé la technique AHP avec des données de télédétection et des outils SIG pour délimiter le potentiel des eaux souterraines sur la base de plusieurs modèles basés sur la connaissance et l'évidence, la logique floue, les réseaux neuronaux artificiels, ce qui suggère la capacité et la fiabilité de la technique pour la gestion des eaux souterraines dans différents contextes géo-environnementaux. Le concept de base de ces types de techniques est d'explorer les interrelations entre les emplacements des eaux souterraines et les facteurs influençant la présence des eaux souterraines. La nature et le nombre de ces facteurs varient selon les études et la sélection de ces facteurs est souvent arbitraire. Cette étude examine les zones d'eaux souterraines potentielles de l'aquifère CT en construisant une base de données géo spatiale, en intégrant quatre paramètres d'influence en utilisant l'analyse de superposition pondérée basée sur la technique (AHP). Les résultats de cette étude pourraient contribuer à une gestion efficace des ressources en eau souterraine à Oued Souf.

4.1. Collecte des données

L'organigramme de la (Figure 47) illustre les différentes étapes appliquées dans cette recherche, l'intégration entre l'étude géologique, hydrogéologique et SIG mis en œuvre pour un total de vingt-six 26 forages d'eau souterraine construits entre 2014 et 2018 a été obtenu de l'agence nationale pour les ressources en eau. Les études hydrodynamiques ont été menées à l'aide d'essais de pompage de forages, en particulier des essais de pompage par paliers, afin d'identifier les paramètres des forages tels que la perte des forages, la perte de l'aquifère, l'efficacité des forages et les taux de pompage optimaux des forages. Ces données ont été préparées et superposées à la carte thématique d'investigation des eaux souterraines élaborée par l'environnement SIG permettant d'élaborer une compréhension des caractéristiques hydrauliques de l'aquifère telles que la conductivité hydraulique et la transmissivité. Chaque carte thématique contient plus de quatre couches, ce qui indique que les relations entre ces classes interconnectées sont trop complexes. Par conséquent, la relation entre ces quatre couches thématiques est obtenue en utilisant diverses couches et est caractérisée en utilisant l'AHP.

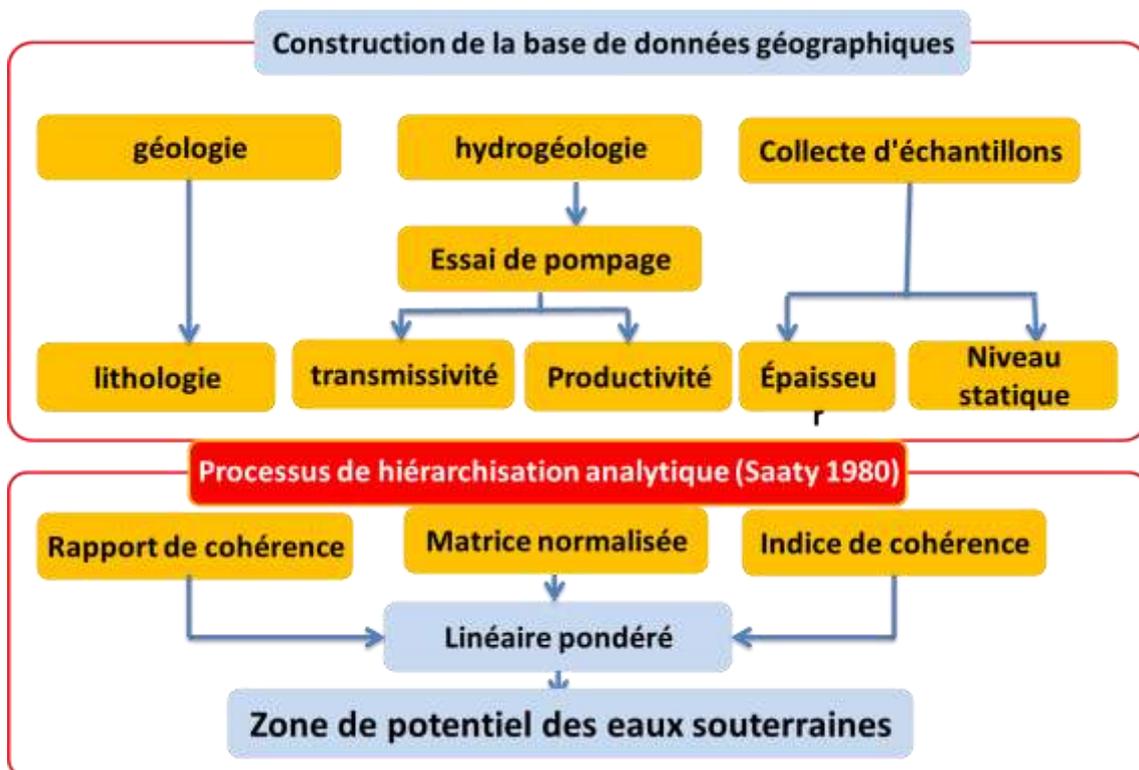


Figure 40: Organigramme illustrant les différentes étapes de l'étude

4.2. Essais des pompages:

Des essais de longue durée ont été réalisés sur 26 sites répartis dans la zone d'étude de la vallée d'Oued- Souf. L'essai de longue durée a consisté en un pompage à débit constant de 72 heures suivi de 24 heures de remontée après l'arrêt de la pompe. Son interprétation a permis de calculer la transmissivité (T), le coefficient de perméabilité (K), le coefficient de perméabilité verticale (Kv) et la porosité efficace (Sy).

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

1. Le débit est supposé constant pendant toute la durée de pompage ;
2. La surface de la nappe est supposée horizontale ;
3. Le forage capte la nappe sur la totalité de son épaisseur ;
4. L'écoulement est supposé laminaire ;
5. L'aquifère est illimité.

4.3. Le processus de hiérarchisation analytique (PHA)

La zone de prospection des eaux souterraines dans une région est déterminée par un certain nombre de facteurs. Les facteurs sont conçus comme des paramètres hydro-géologiques importants dans l'étude des eaux souterraines. Dans ce cas, des poids et des rangs appropriés ont été attribués à chaque paramètre d'influence et à ses sous-classes dans les couches thématiques. Le modèle de l'AHP est considéré comme la méthode de décision multicritère la plus populaire et la plus acceptée, et utilisé dans diverses recherches pour le contrôle des ressources environnementales.

La détermination des poids normalisés des thématiques individuelles et de leurs différentes couches en utilisant la méthode d'AHP. Cependant, une méthode commune pour dériver les poids des différents facteurs est de dessiner un schéma des interrelations des différents facteurs. L'AHP utilise une matrice de comparaisons de paires pour évaluer la hiérarchie (par exemple, pour comparer deux variantes A_i et A_j sur la base d'un critère) sur la base d'une gamme fondamentale de valeurs allant de 1 à 9. La définition du classement de [Saaty \(1995\)](#) est présentée dans le tableau 05.

Tableau 05: Poids des différentes couches et classement des caractéristiques

Facteurs	Poids normalisé	Sous-classes	Rang
Productivité (l/s)	0.40	28-34	2
		34-40	4
		40-45	6
		45-50	7
Transmissivité (m²/s)	0.25	0.00001-0.0004	2
		0.0004-0.0006	3
		0.0006-0.0008	4
		0.0008-0.0016	6
Epaisseur (m)	0.22	23-36	1
		36-49	3
		49-62	5
		62-75	6
Le niveau d'eau statique (m)	0.13	35-40	2
		40-45	4
		45-50	6
		50-55	7

La matrice pour la comparaison par paires est donnée par [Saaty \(1995\)](#):

$$\text{Judgment Matrix } (X) = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nn} \end{bmatrix}$$

Avec X la matrice de comparaison par paire des solutions X_i , $i = 1, 2, 3, \dots, n$, selon les critères X. En outre, l'indice de cohérence représente un avantage supplémentaire pour le décideur, qui lui permet de justifier son jugement.

$$CI = \frac{(\alpha \max - n)}{(n - 1)}$$

Le ratio de cohérence est utilisé pour vérifier la cohérence du jugement, et est calculé en divisant le

CI par l'indice de cohérence aléatoire.

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

4.4. Carte de productivité de l'aquifère

La productivité de l'aquifère (obtenue par les essais de pompage) a été régionalisée par IDW (Figure 48).

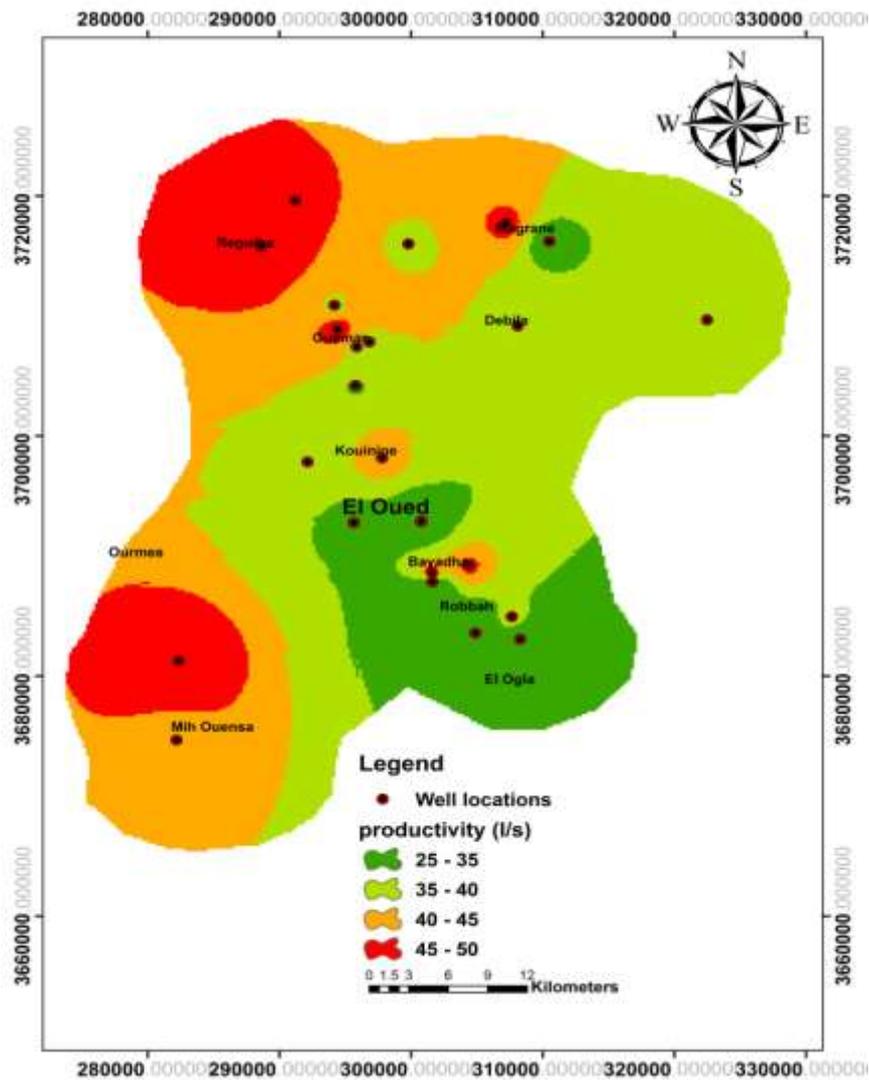


Figure 41: Distribution spatiale de la productivité de l'aquifère CT.

La moyenne de la productivité atteint 40,48 l/s, tandis que le minimum est de 28 l/s et le maximum atteint 50 l/s. Il existe une nette variation de la productivité des forages entre les différents contextes géologiques présents dans notre région d'étude. En effet, la productivité des forages était considérée comme la plus élevée pour l'aquifère pontien, localisé dans la partie nord-ouest du Souf, tandis que les forages les moins productifs captent le Mio-Pliocène et sont localisés dans la partie sud-est .

4.5. Carte de transmissivité de l'aquifère

La transmissivité de l'aquifère correspond au débit d'eau souterraine de l'unité de surface par unité de temps. Les résultats obtenus indiquent que la transmissivité potentielle dans cette zone varie de 0,0001 à 0,0016 m²/s avec une valeur moyenne de 0,001 m²/s (Figure 49).

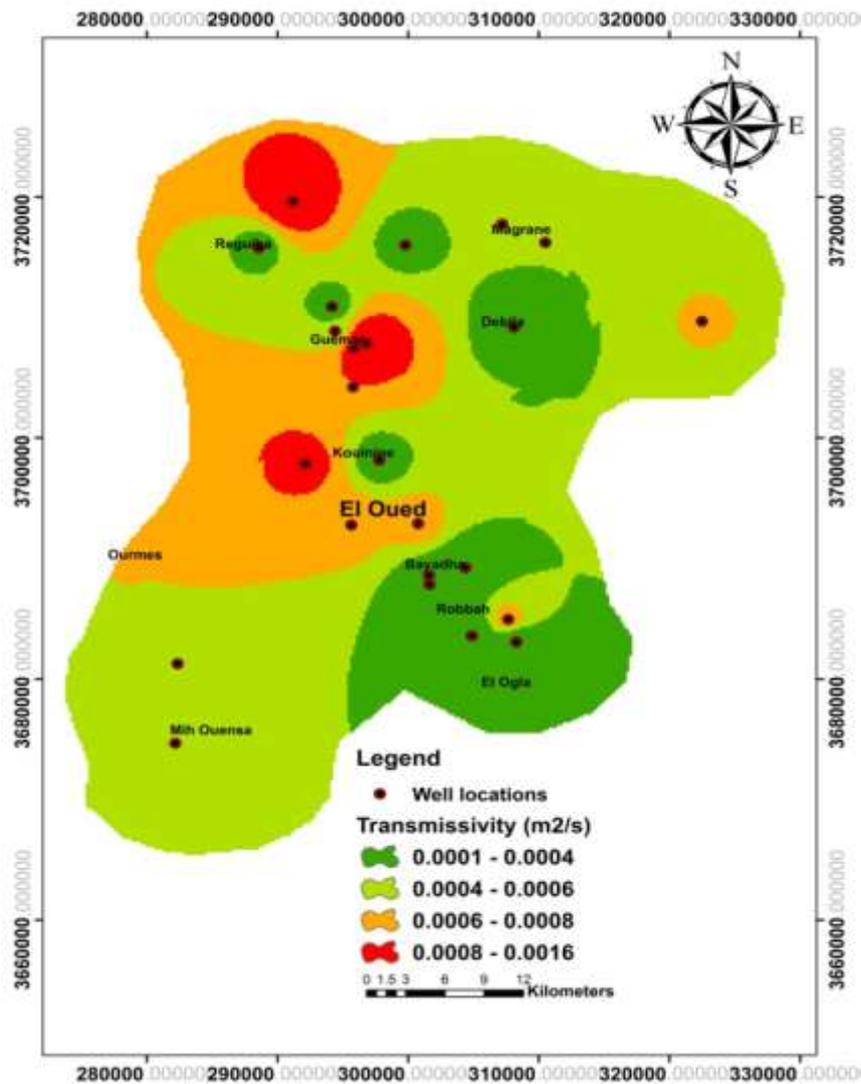


Figure 42: Distribution spatiale de la transmissivité de l'aquifère CT.

La figure indique cinq plages de distribution des valeurs de transmissivité. Les valeurs élevées de transmissivité sont enregistrées sur la section centrale et le nord-ouest. Les valeurs modérées de transmissivité entre 0.0001 et $0.0004 \text{ m}^2/\text{s}$ sont observées dans la partie sud-est et nord-est de la zone (Figure 49).

4.6. Carte d'épaisseur

L'épaisseur de l'aquifère varie de 23 m à 74 m dans l'aquifère CT avec une épaisseur moyenne de 44,48 m (Figure 50). L'aquifère profond est plus épais dans la partie nord-ouest de cette région, constituée par les formations du Pontian, l'épaisseur varie de moins de 25 m à plus de 35 m. Dans la partie sud-est de cette région, constituée principalement par la formation du Mio-Pliocène, l'épaisseur de l'aquifère varie de 25 à 35 m.

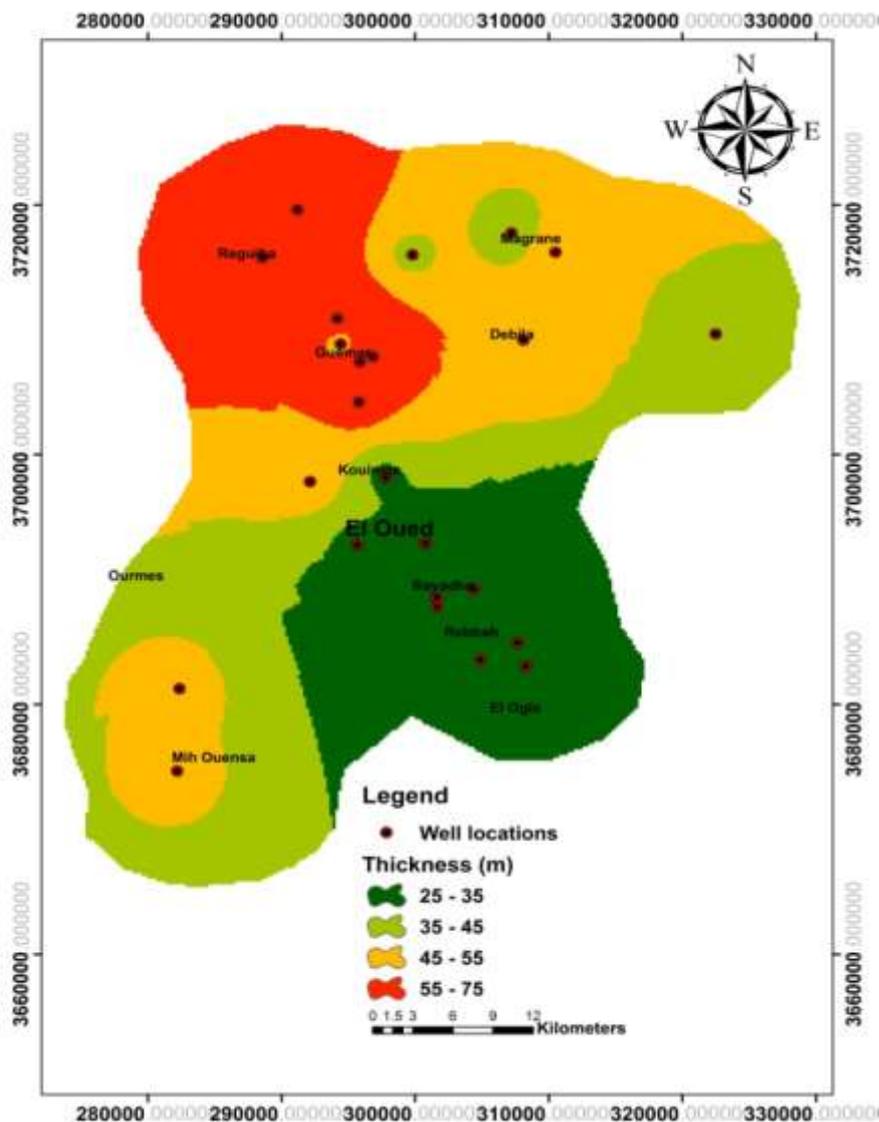


Figure 43: Distribution spatiale de l'épaisseur de l'aquifère CT.

4.7. Carte des niveaux statiques

L'étude de ce paramètre est basée sur l'exploitation de données de niveaux statiques enregistrées par l'ANRH de Ouargla en 2018 à partir de 26 puits situés à El Oued. Les valeurs des niveaux statiques varient de 31,3 m observés dans la partie sud-ouest et nord-ouest de cette zone à 54 m observés dans la partie sud-est et nord-ouest de cette zone. La figure 51 montre la carte des niveaux statiques. Cette carte a été subdivisée en 4 classes : niveaux statiques de 30 m à 35 m dans les régions de Magrane et Mih Ouensa, niveaux statiques de 35 m à 40 m dans les régions de Guemar et Oued alend, niveaux statiques de 40 m à 45 m dans les régions de Reguiba, Ourmes et Guemar, et niveaux statiques de 45 m à 55 m dans les régions d'El Oued, Robbah et Nakhla.

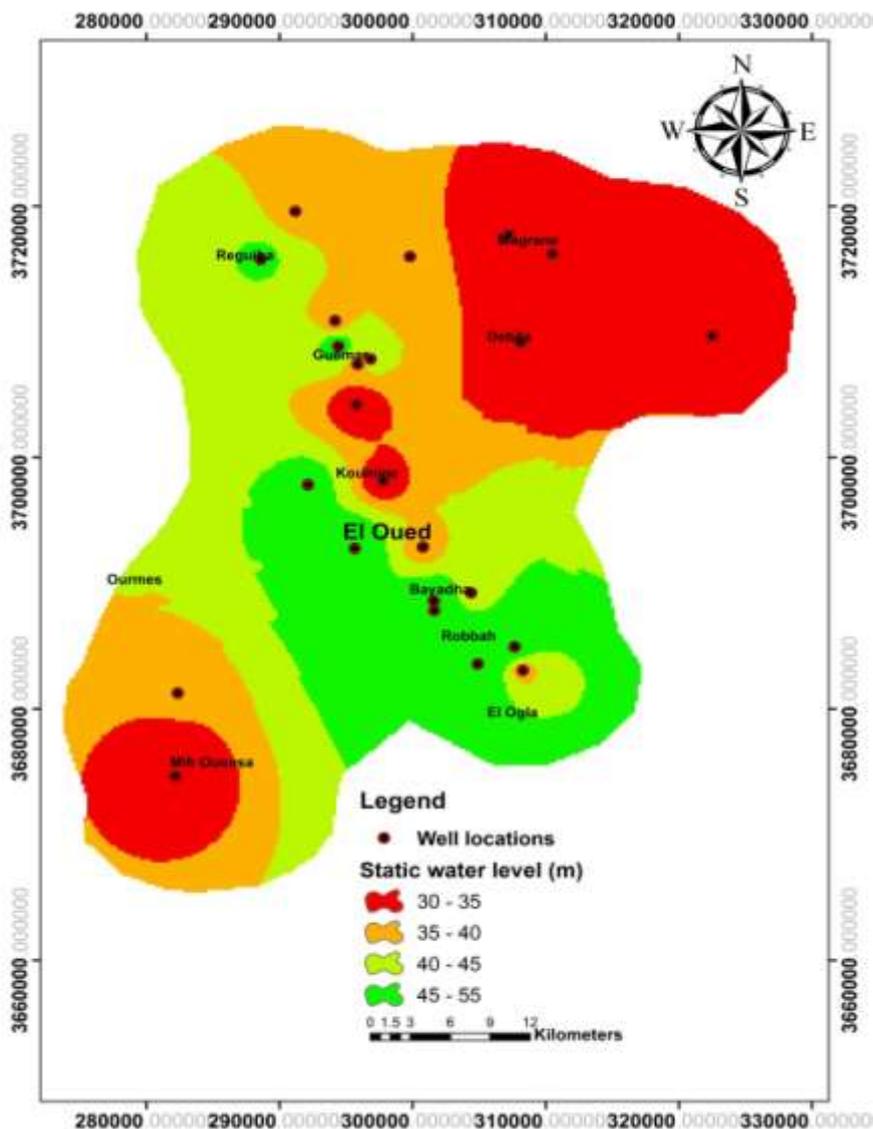


Figure 44: Distribution spatiale de niveau statique de l'aquifère CT.

Tableau 06. Résumé statistique des paramètres des eaux souterraines

Parameters	Min	Max	Mean	SD
Static levels (m)	31.300	54.000	40.342	7.022
Thickness (m)	23.000	75.000	44.480	15.100
Productivity (l/s)	28.000	50.000	40.480	5.716
Transmissivity (m ² /s)	0.0001	0.0016	0.001	0.001

4.8. Zones de potentiel des eaux souterraines

La carte du potentiel des eaux souterraines (GPM) a été obtenue par la superposition pondérée des quatre paramètres en utilisant l'approche AHP pour délimiter les eaux souterraines dans les zones à potentiel élevé, moyen et faible zone à haut, moyen et faible potentiel (Figure 52).

La partie nord-ouest de l'aquifère a également quelques parties de zone d'eau souterraine à haut potentiel classées 173 km² du bassin couvrant 5,16% de la totalité de l'aquifère, ces localités sont les meilleurs emplacements pour réaliser de nouveaux forages. Les zones de bon potentiel des eaux souterraines couvrent les régions du centre et de l'ouest et représentent environ 1335 km² de la zone, ce qui représente environ 39,90 % de la totalité de la surface aquifère. Les zones à faible potentiel des eaux souterraines, en raison du changement des quatre paramètres dans ces zones, occupent la partie orientale et représentent environ 1839 km², soit environ 54,94 % de la superficie totale du bassin (Tableau 07).

Tableau 07: Les catégories des zones de potentiels en eaux souterraines

GW.P.Z	Area (Km²)	Percentage
Poor	1839	54.94
Good	1335	39.90
Very good	173	5.16

4.9. La validation

La validation des zones d'eaux souterraines potentielles indique qu'environ 48% de tous les puits forés avec des rendements inférieurs à 28 l/s étaient situés dans les zones pauvres, tandis que les 52 autres % des puits forés étaient situés dans les zones bonnes et très bonnes. Tous les puits forés dans les très bonnes zones avaient des rendements supérieurs à 45 l/s. Par

conséquent, le potentiel résultant des eaux souterraines dans la région peut être considéré comme une référence pour les activités d'exploration des eaux souterraines dans la région. Nous voyons également la distribution spatiale du niveau d'eau, qui montre que les eaux souterraines sont trouvées à des profondeurs variant de 34,75 à 55,39 m avec une moyenne de 41,45 m de profondeur.

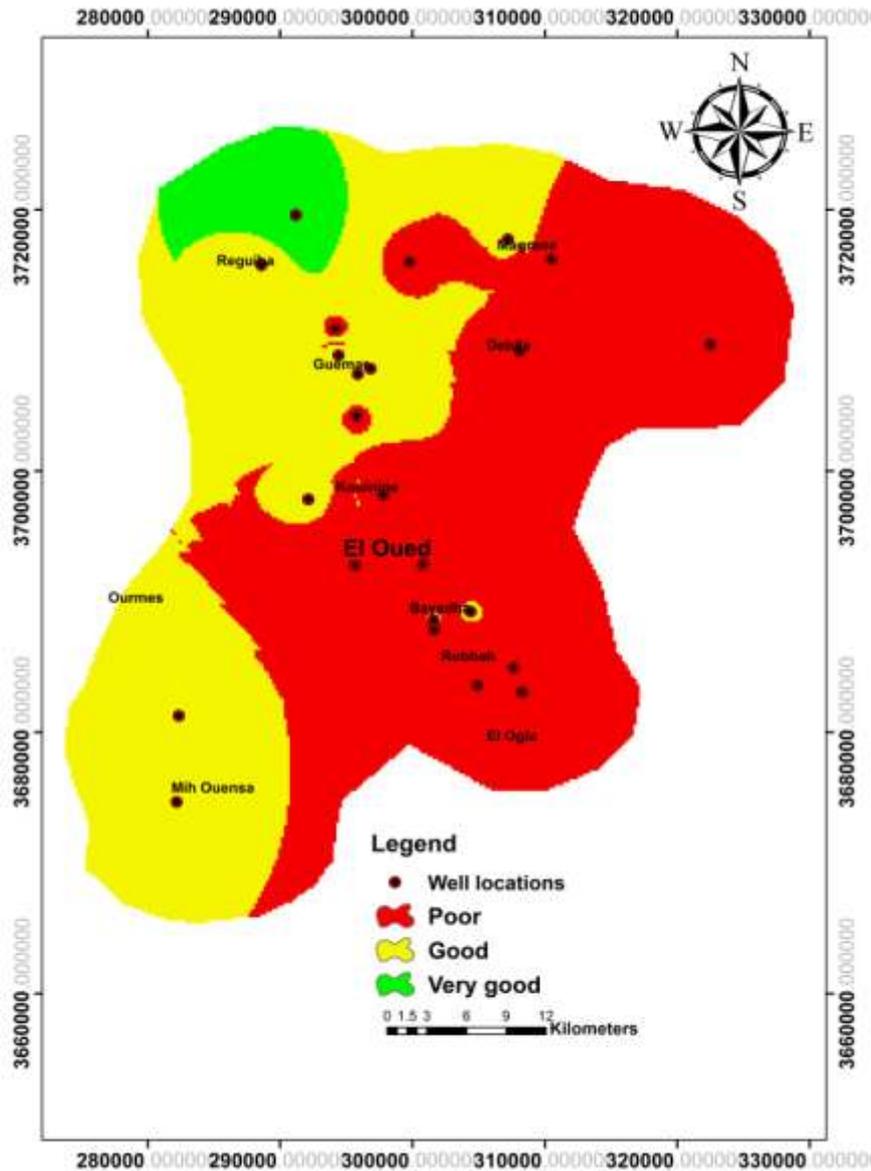


Figure 45: Zones potentielles d'eaux souterraines à Oued Souf

Cette carte indique généralement que des profondeurs d'environ 40,55 m pourraient être interceptées lors du forage dans les zones à fort potentiel d'eaux souterraines. Les zones à faible potentiel d'eaux souterraines ont des profondeurs d'environ 34 à 40 m capturant le Mio-Pliocène et situées dans la partie sud-est. Heureusement, les eaux souterraines dans les zones à

haut potentiel se trouvent dans l'aquifère de Pontian, elles sont situées dans le nord-ouest et sont comparativement plus profondes que celles des zones pauvres.

5. Conclusion :

La structure aquifère d'El-Oued est caractérisée par la superposition de trois aquifères distincts: le Continental Intercalaire (CI), le Complexe Terminal (CT) et l'aquifère superficiel. Comme le révèle l'enquête hydrogéologique, l'aquifère CT est un réservoir multicouche constitué des sables du Mio-Pliocène, des sables, grès et graviers du Pontien, ainsi que des calcaires et dolomies du Sénonien-Eocène. Situé à 220 m de profondeur avec une épaisseur de 300 m, cet aquifère présente une dynamique intéressante.

L'étude piézométrique de l'aquifère CT indique que sa partie haute se situe à Robbah et Mih Ouensa, tandis que sa partie basse se trouve au nord de Hassani Abdelkrim et au nord de Reguiba, avec un écoulement des eaux orienté du sud-ouest au nord-est. Les essais de pompage ont révélé une conductivité hydraulique de l'ordre de 2×10^{-5} m/s et une transmissivité allant jusqu'à 4.22×10^{-4} m²/s.

La cartographie des potentialités des eaux souterraines effectuée à partir de cette étude a permis de classer la zone d'étude en différentes sections. Les zones à haut potentiel couvrent 173 km², soit 5,16% de la superficie totale de la zone d'étude, représentant les meilleurs emplacements pour le forage de nouveaux puits. Les zones à bon potentiel couvrent environ 1335 km², soit 39,90% de la superficie totale, situées dans les sections centrale et occidentale de la zone d'étude. Les zones à faible potentiel, en raison de variations de certains paramètres, occupent l'est et s'étendent sur environ 1839 km², représentant 54,94% de la superficie totale.

Chapitre III

***Etude hydrogéochimique de
l'aquifère de CT***

1. Introduction

En raison de l'absence de contrôles hydrogéochimiques systématiques effectués sur la partie de la vallée d'Oued Souf de l'aquifère du Mio-Pliocène, qui est considérée comme une grande entité hydrogéologique, la compréhension de la variation spatiale de la qualité des eaux souterraines et, par conséquent, l'identification des principaux processus contrôlant la chimie des eaux souterraines ont été limitées. En utilisant des techniques SIG couplées à une analyse statistique, des méthodes statistiques multivariées intégrées (analyse en composantes principales et en clusters) appliquées aux données physico-chimiques du système d'eau souterraine pour (1) identifier les processus hydro-géochimiques dominants qui se produisent dans le système, évaluer sa qualité du point de vue pour la consommation humaine et de l'irrigation. (2) Identifier les groupes d'eau homogènes ayant des caractéristiques chimiques similaires. (3) Expliquer les relations de mélange entre les différents horizons aquifères. Les résultats de cette recherche ont pour but d'aider à atteindre une meilleure gestion des sources d'eau souterraine dans le Souf pour prévenir toute dégradation supplémentaire des eaux souterraines.

2. Prélèvement des eaux souterraines et analyse physico-chimique.

Une campagne d'échantillonnage hydrochimique a été réalisée en mars 2019. Vingt-deux (22) échantillons d'eau ont été prélevés dans des bouteilles en polyéthylène après filtration et acidification pour être analysés au laboratoire des réservoirs souterrains pétroliers, gaziers et aquifères, Université de Ouargla. Les analyses ont été réalisées au laboratoire selon les techniques standard (Rodier 1984). Les nitrates, les sulfates et les chlorures ont été déterminés à l'aide du spectrophotomètre de type DR2000 (HACH), tandis que Ca^{2+} , Na^+ et K^+ ont été déterminés à l'aide d'un spectrophotomètre à flamme. Le magnésium a été déterminé par complexométrie et déduit de la différence ($\text{TH} - \text{Ca}^{2+}$). Les concentrations en CO_3^{2-} et HCO_3^- ont été analysées par titrimétrie .

Le diagramme de Piper et les diagrammes binaires ont été réalisés à l'aide de logiciel Diagramme élaboré par Ronald Simler (laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon 2004). L'organigramme de la Figure 53 présente la méthodologie utilisée pour cette étude.

Logiciel Excel est utilisé pour l'analyse statistique des résultats obtenus se base sur la comparaison des moyennes des différents paramètres mesurés. Les maximas, les minima et l'écart type ont été déterminés pour évaluer la qualité chimique des eaux vis-à-vis des normes de potabilité. XLSTAT 2015 pour Windows est utilisé pour réaliser l'analyse de composante principale (ACP) de onze (11) variables hydrochimiques et vingt-deux (22) échantillons ont

été traités en utilisant des techniques statistiques multivariées et pour réaliser les diagrammes binaires entre les différents paramètres hydrochimiques afin de préciser l'origine probable de la minéralisation de l'eau de l'aquifère du complexe terminal. La cartographie piézométrique, des paramètres hydrochimiques et de la qualité des eaux sont réalisées à l'aide du logiciel ArcGIS.

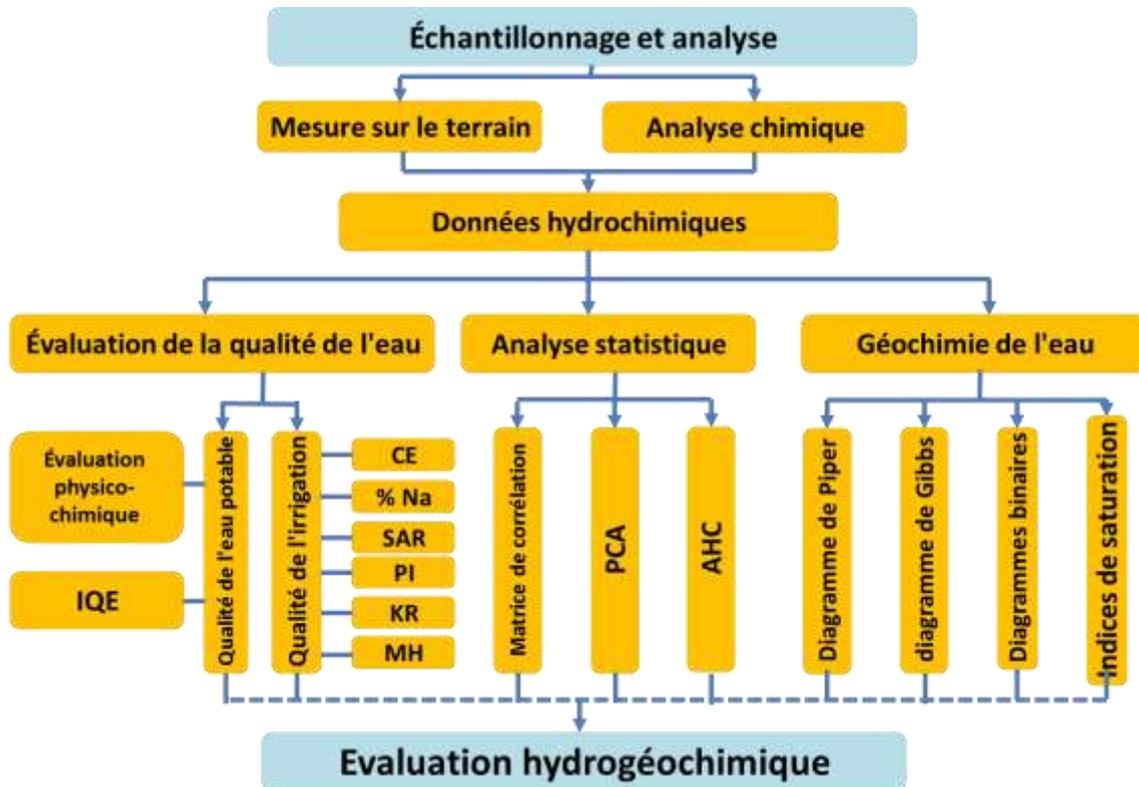


Figure 46: Organigramme montrant la méthode adoptée

3. Faciès chimique des eaux souterraines

Le diagramme de Piper (1944) a été utilisé pour représenter les différents faciès des eaux souterraines de l'aquifère du Complexe Terminal. La représentation des résultats (Figure 54) montre deux faciès hydrochimiques : Le type d'eau Mg -Ca-Cl représente 68 %, distribué dans les parties centrale et occidentale. Le type Na-Cl représente 32%, distribué dans la partie Est, ce qui reflète la dominance du sodium et du chlorure, suggérant l'influence des dépôts évaporitiques. On peut observer une graduation de l'enrichissement depuis un type mixte de sulfate jusqu'à celui du chlorure de sodium distribué dans les parties Est plus proches de la région de Chott selon le sens d'écoulement des eaux souterraines. Une légère augmentation du Cl a été observée dans la partie extrême Nord-Est de l'aquifère étudié.

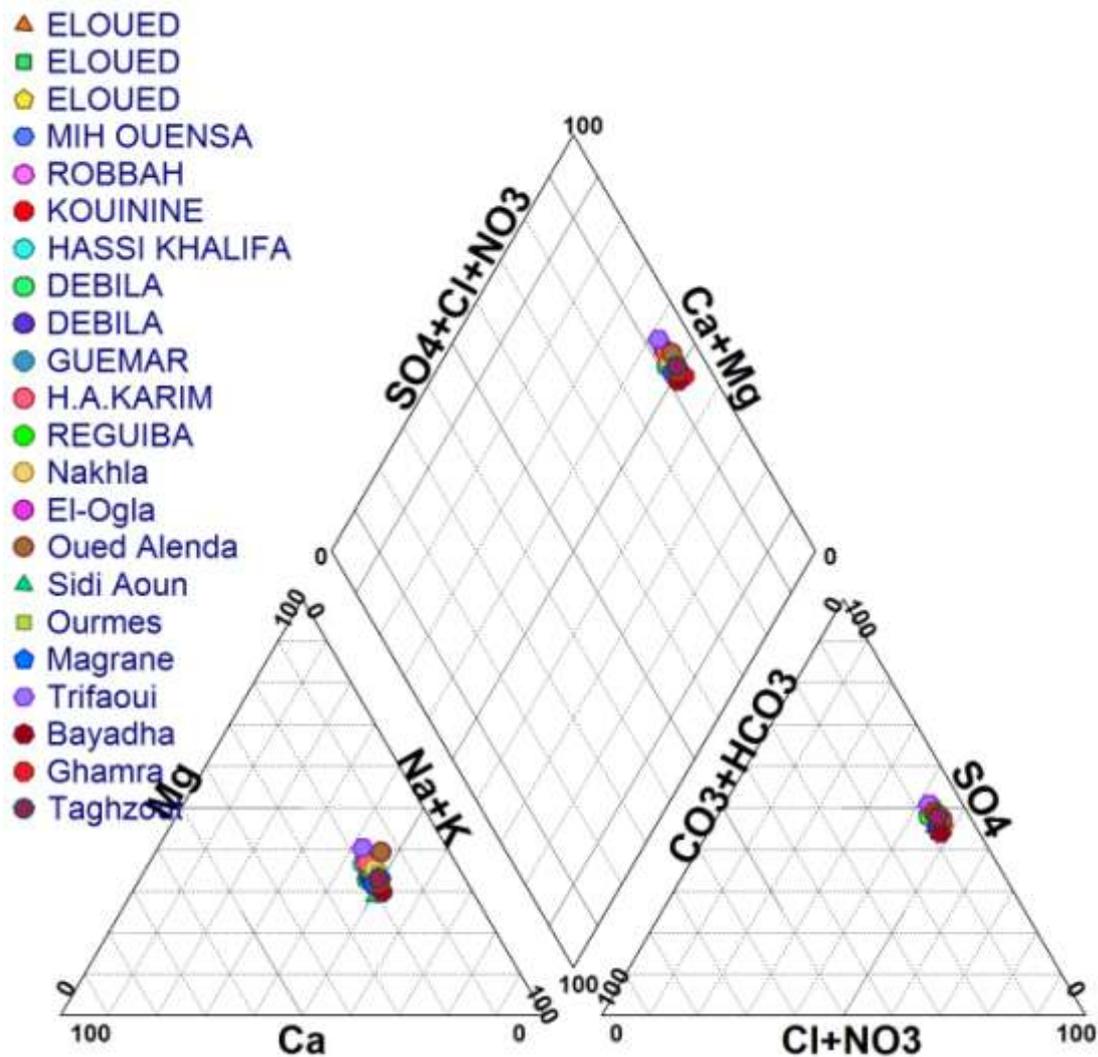


Figure 47 Faciès chimique des eaux souterraines

4. Propriétés physico-chimiques

4.1. Evaluation de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine

L'évaluation de la qualité de l'eau de l'aquifère du Complexe Terminal pour la consommation humaine a été faite en comparant les paramètres physico-chimiques analysés aux normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2011) et aux normes algériennes d'eau potable (JORADP 2011) (Tableau 08).

Cette comparaison met en évidence que les eaux souterraines du CT ne sont pas conformes aux normes de potabilité, car les teneurs en éléments majeurs (Ca^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} et Cl^-) dépassent souvent les valeurs recommandées (Tableau 08). Les concentrations élevées de Ca^{2+} et Mg^{+2} contribuent à l'augmentation de la dureté totale de l'eau de 1013.66 (F20) à 15091.08 (F19) mg/l. Selon (Freeze 1979), cette eau souterraine est définie comme une eau très dure et ne convient pas à la plupart des utilisations domestiques (US EPA 1999). La concentration en

nitrate des eaux souterraines dans la zone d'étude varie de 15,3 à 43 mg/L. Ces valeurs restent inférieures à la limite de potabilité (50 mg/L) (JORADP 2011 ; WHO 2011) dans tous les puits étudiés (Tableau 08). Cependant, la concentration de fond en nitrates (nitrates naturels) dans les eaux souterraines ne doit pas dépasser 10 mg/l et les valeurs qui dépassent ce seuil reflètent une contamination par les nitrates due essentiellement aux activités humaines (Adimalla 2020 ; Saurabh et Abhishek 2020).

Tableau 08 : Variations des paramètres physico-chimiques des eaux du complexe terminal et les normes de potabilité des eaux.

Well	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	T	pH	EC
										(°C)		(µS/cm)
F1	157.5	192	475	28.5	731	1000	234.8	38	3081	25.1	8.38	4740
F2	187	174	545	44.3	763	1100	231.8	23.8	3373.5	24.2	8.45	5190
F3	177	169	505	30	725	1013	195.2	38.5	3178.5	25.7	8.44	4890
F4	183.3	209	580	31.8	900	1200	247.0	43	3822	21.6	8.44	5880
F5	155	176	437	29.8	700	888	201.3	29.2	3022.5	25.1	8.22	4650
F6	185	176	557.7	44.3	781	1125	183	36.8	3354	22.1	8.44	5160
F7	171.3	199	445	24	706	1088	201.3	32	3068	24.9	8.15	4720
F8	172.5	171	452.5	24.5	700	1050	231.8	15.3	3074.5	23.7	8.17	4730
F9	176.3	184	482.5	24.5	731	1113	195.2	32	3217.5	22.9	8.32	4950
F10	172.5	199	482.5	29	756	1150	198.2	27	3373.5	23.7	8.08	5190
F11	167.5	202	452.5	27.8	725	963	186.0	29.5	3042	22.5	8.21	4680
F12	170	186	502.5	26	703	1138	195.2	23.5	3308.5	23.2	8.2	5090
F13	152.5	186	455	33.5	719	925	201.3	39.5	3016	23.8	7.94	4640
F14	172.5	166	490	32.5	713	1013	198.2	33.3	3107	23.9	8.27	4780
F15	152.5	258	557.5	33.5	869	1213	195.2	38	3685.5	22.3	8.09	5670
F16	177.5	148	475	31.8	719	925	204.3	20.5	3074.5	22.7	8.16	4730
F17	177.5	217	570	28.8	813	1200	186.0	39.8	3549	21.8	8.52	5460
F18	162.5	158	447.5	25.3	681	900	210.4	39.5	3003	25.4	8.04	4620
F19	181.3	253	485	25.5	744	1238	213.5	26	3282.5	24.2	8.23	5050
F20	153.8	151	470	28	713	913	204.3	30	2990	23.7	7.94	4600
F21	170	179	516.3	28.8	725	1113	201.3	32.5	3360.5	23.6	8.29	5170
F22	173.8	194	532.5	28.3	781	1138	195.2	36.8	3412.5	24.3	8.36	5250
Min	152.5	148	437.0	24.0	681.0	888.0	183.0	15.30	2990	21.6	7.940	4600.0
Max	187.0	258	580.0	44.3	900.0	1238	247.0	43.00	3822	25.7	8.520	5880.0
Mean	170.4	188	496.1	30.0	745.3	1063	205.0	32.02	3245.2	23.6	8.243	4992.7
Std-Dev	10.62	28.0	43.84	5.42	54.98	110.6	16.94	7.19	188.07	0.92	0.16	355.04
Alg-Std2011)	100-200	50-150	200	12	250-500	250-400	-	50	500-1500	25	6.5- 8.5	1500-2800
WHO (2011)	75-200	30-150	200	12	200-500	200-400	120	50	500-1000	18-25	6.5-8.5	500-1500

4.2. Cartographie de la répartition spatiale des différents éléments.

La température (°C)

La température de l'eau dans l'aquifère du Complexe Terminal est fortement influencée par la profondeur de l'eau. Les températures élevées appartenant aux parties Nord et Est de la zone d'étude (F5, F10, F11, F16, F20 et F21) où le mélange avec les eaux chaudes de l'aquifère carbonaté du Sénonien par contre, les basses valeurs de température mesurées dans la partie ouest (F4, F8, F15, F17, F18 et F19). La plupart des valeurs de température dépassent la norme algérienne et la norme de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) pour l'eau

potable (18°C - 25°).

Le potentiel hydrogène (pH)

Le pH de l'aquifère CT est alcalin (Figure 55), variant entre 7.94 et 8.52. Pour le pH, les valeurs ne dépassent pas la norme algérienne et la norme de l'OMS pour l'eau potable (6,5 à 8,5), sauf pour certains points d'eau (pH=8,52).

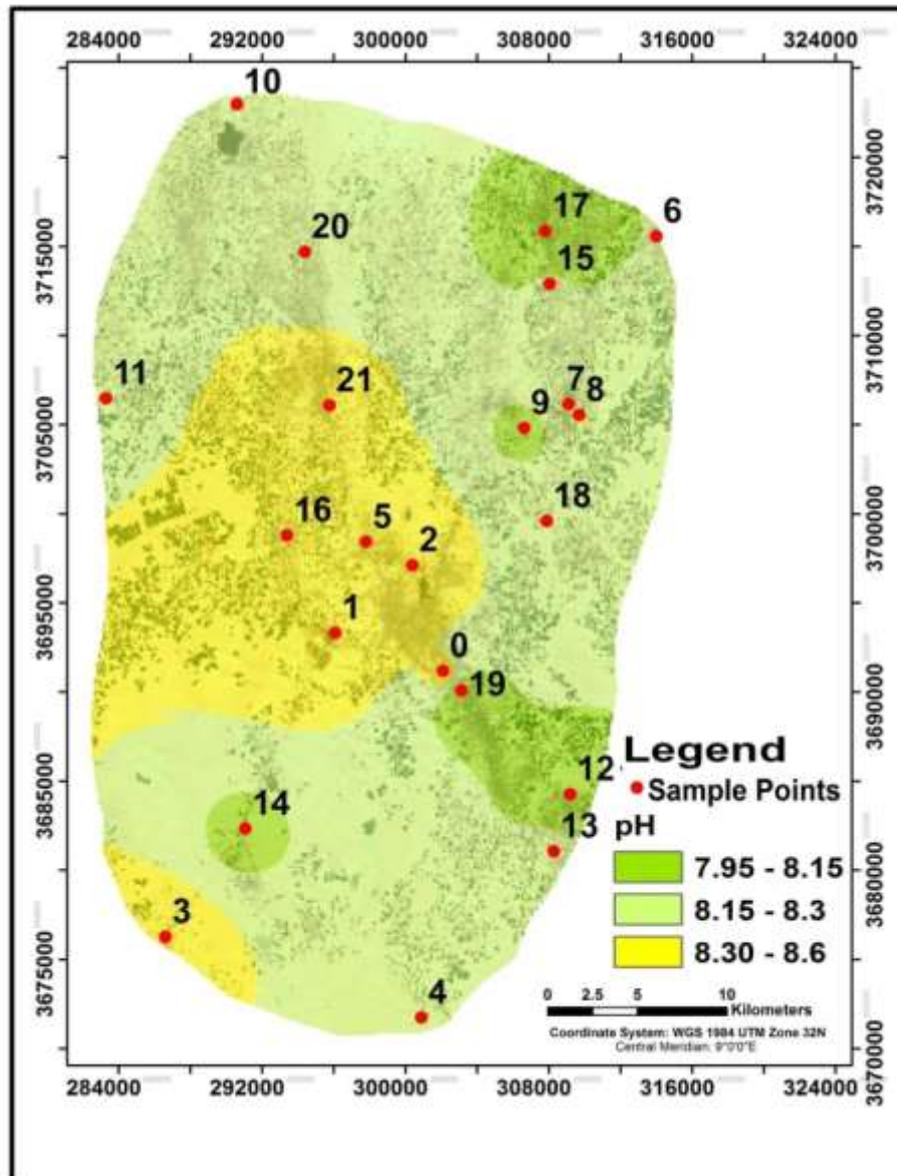


Figure 48: Carte de distribution spatiale de potentiel hydrogène

La conductivité électrique (CE)

Pour la conductivité électrique, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS 2011) recommande une valeur limite de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Cependant, dans la zone d'étude, les valeurs obtenues restent beaucoup plus élevées par rapport à la norme algérienne de qualité de l'eau potable (2800 $\mu\text{S}/\text{cm}$) et varient de 4620 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le Nord et l'Ouest à 5880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dans le Sud-

Ouest de la zone d'étude (Figure 56). Environ 45% des échantillons ont montré une CE supérieure à 5000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui caractérise les puits situés dans la partie sud-ouest (F2, F4, F6, F10, F12, F15, F17, F19, F20, et F21) et tous les échantillons d'eau souterraine ont montré une qualité d'eau saumâtre basée sur la classification de [Cherry et Freeze \(1979\)](#).

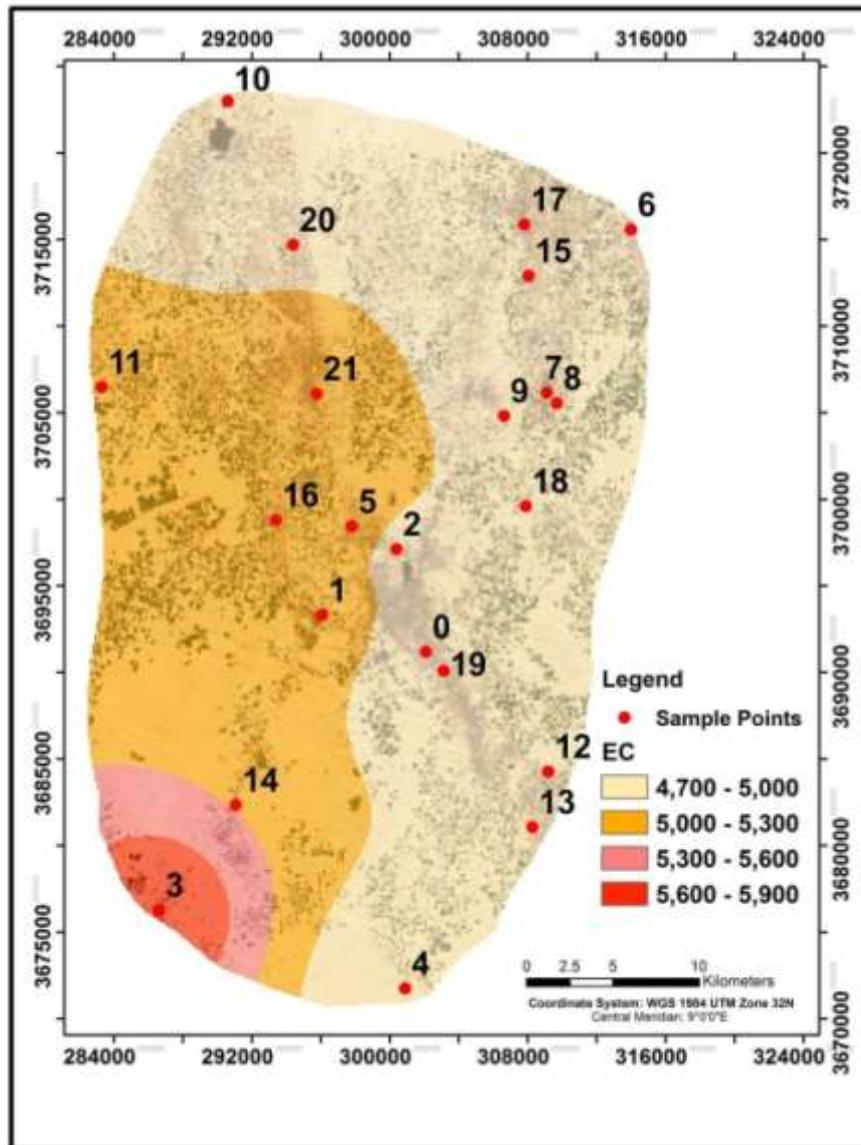


Figure 49: Carte de distribution spatiale de la conductivité électrique

Le calcium

Le calcium est un minéral alcalino-terreux et peut provenir des formations gypsifères ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et de la dissolution du calcaire (CaCO_3) présent dans le réservoir du Complexe Terminal. La teneur en Ca^{2+} dans les eaux souterraines de l'aquifère du CT ne dépasse pas la norme algérienne et la norme de l'OMS pour l'eau potable (200 mg/l) et varie entre 152 mg/l et 185.5 mg/l. La figure 57 révèle que tous les échantillons d'eau analysés ont des

concentrations en Ca^{2+} inférieures à la norme de qualité de l'eau potable (200 mg/l). Des concentrations élevées sont mesurées au centre de la zone d'étude (F1, F2, F5, F16 et F18).

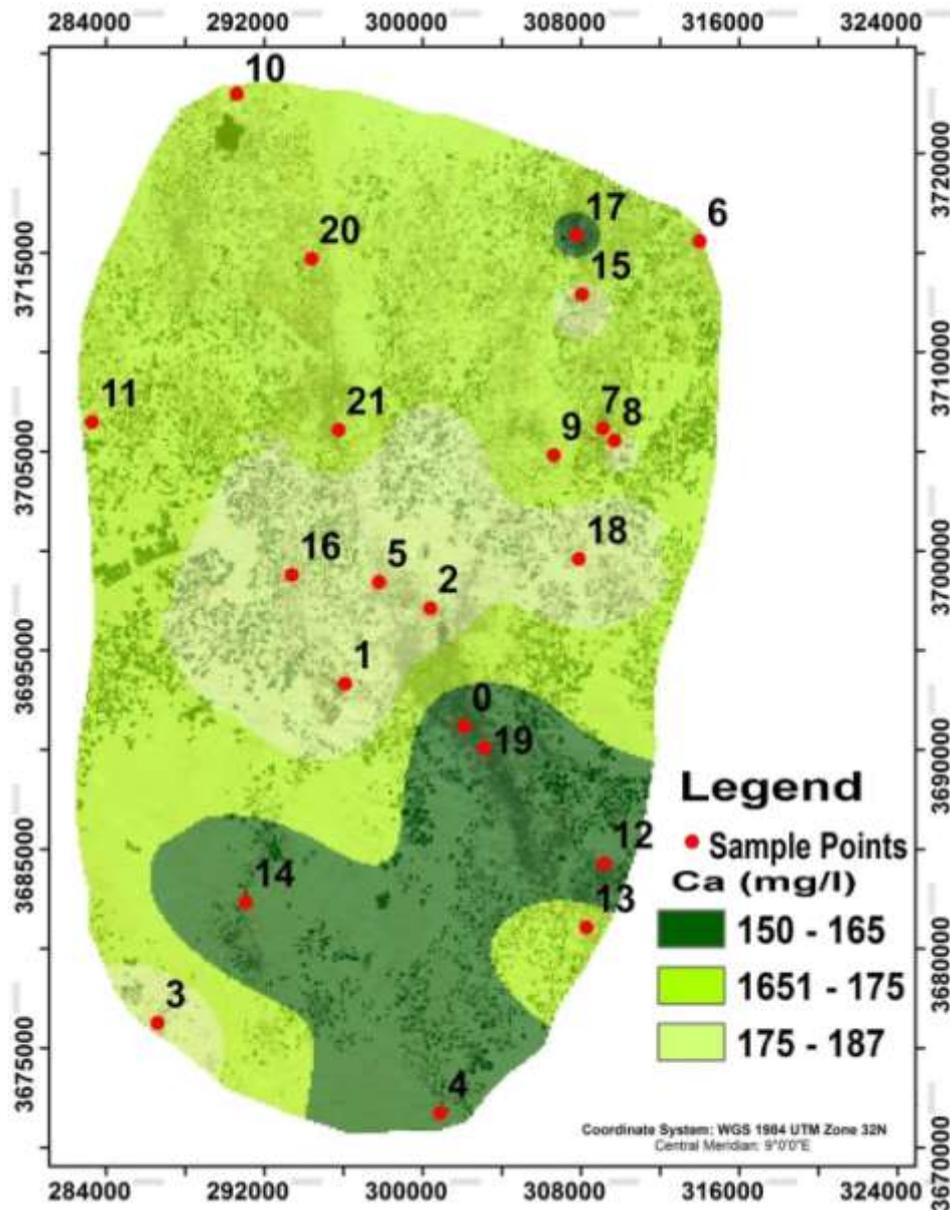


Figure 50: Carte de distribution spatiale de calcium

Le magnésium

Pour le Mg^{2+} , les eaux de l'aquifère du Complexe Terminal contiennent des concentrations élevées variant entre 159 mg/l et 258 mg/l Figure 52 et dépassant la norme algérienne et celle de l'OMS pour l'eau potable (150 mg/l), les concentrations élevées de Mg^{2+} appartenant à la partie sud-est de la zone d'étude (F3, F14). En revanche, les faibles concentrations en Mg^{2+} mesurées dans la partie Ouest (F4, F13, F15, F17 et F19).

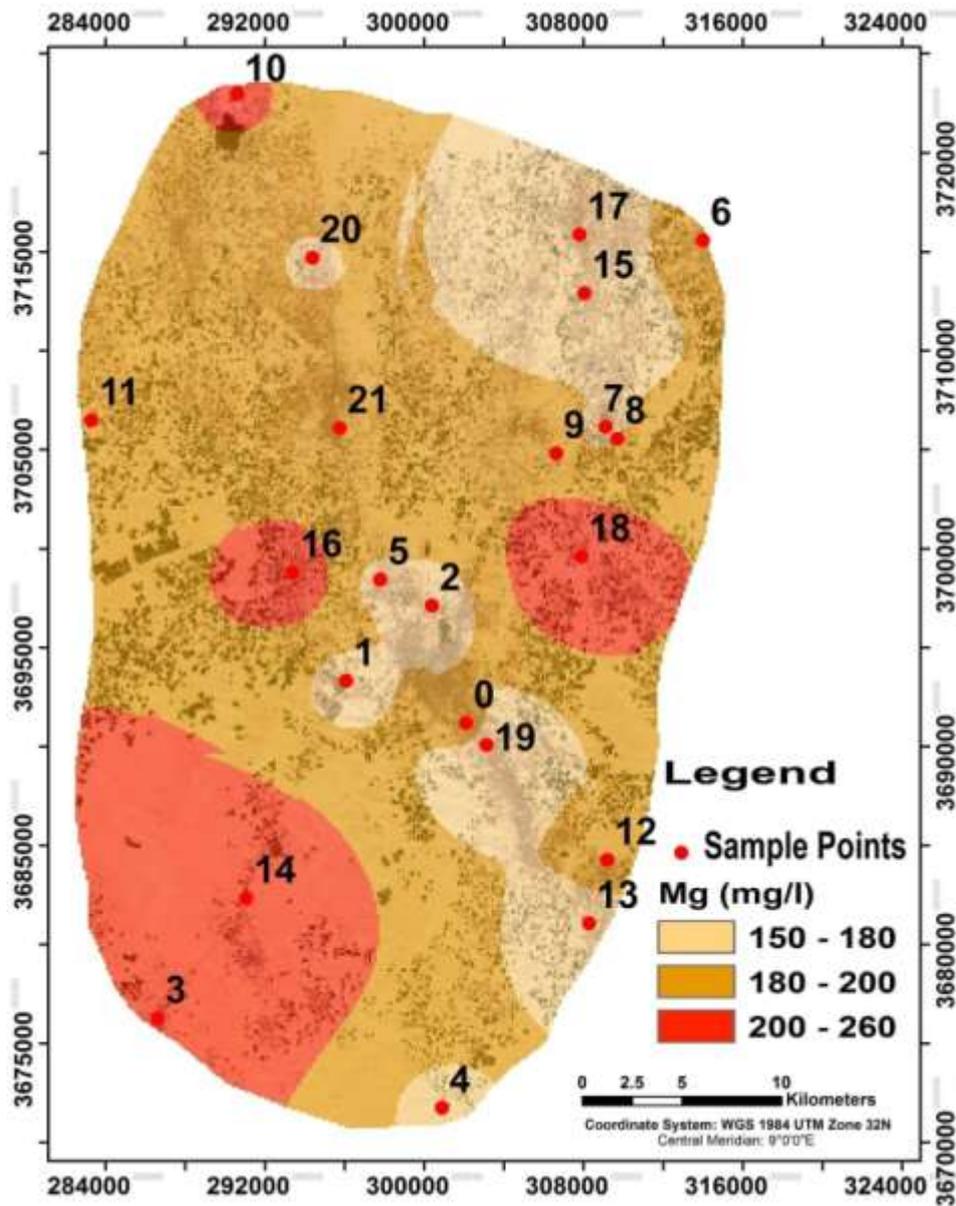


Figure 51: Carte de distribution spatiale du magnésium

Le potassium

Pour le potassium, tous les puits montrent des concentrations en potassium allant de 24 mg/l à 44 mg/l (Figure 59) dépassant la norme algérienne et la norme de l'OMS pour l'eau potable (12 mg/l).

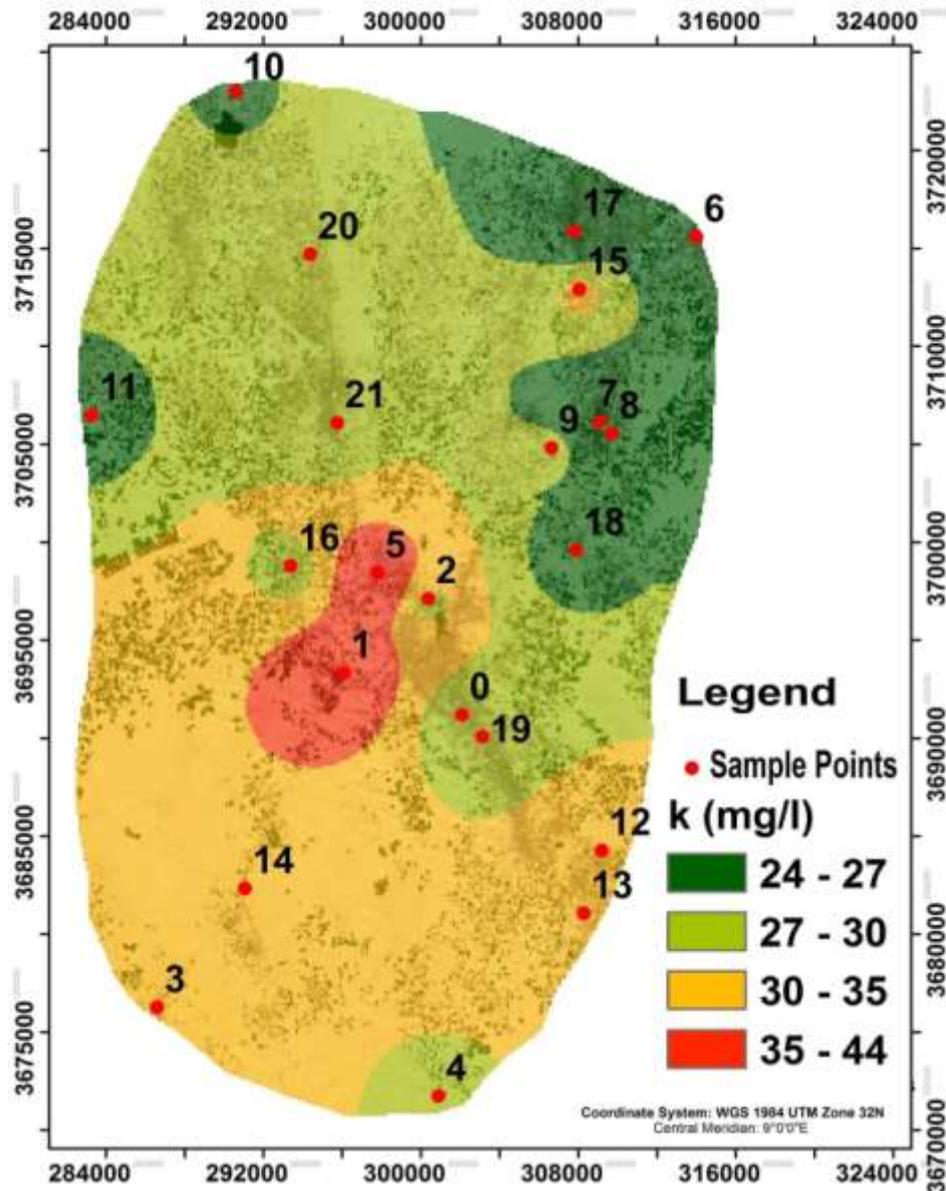


Figure 52: Carte de distribution spatiale de potassium

Le sodium

Le sodium provient essentiellement de la dissolution de l'Halite ; l'eau trop chargée en sodium devient saumâtre et prend un goût désagréable (Rodier1984). Pour des considérations de critère de goût, l'OMS recommande une valeur limite de 200 mg/l. Cependant, l'aquifère du Complexe Terminal contient de fortes concentrations en sodium allant de 437 mg/l à 580 mg/l (Figure 60) dépassant les normes algériennes et celles de l'OMS pour l'eau potable. La carte de distribution du sodium montre que les valeurs maximales sont mesurées dans la partie ouest (F3, F14, F16, F5 et F21).

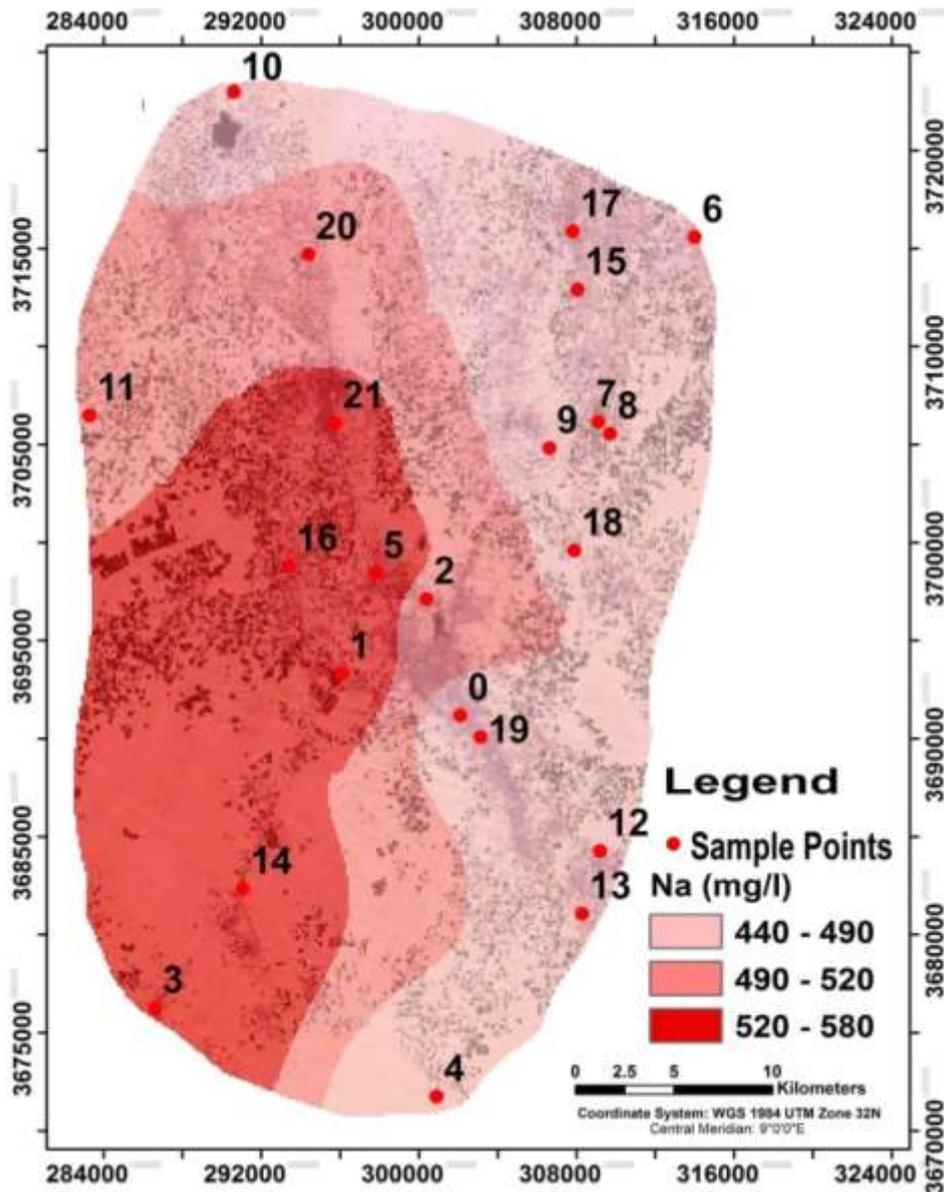


Figure 53: Carte de distribution spatiale de sodium

Les sulfates

Le taux de sulfate dans la zone d'étude est également élevé, allant de 888 mg/l à 1238 mg/l, avec une moyenne de 1083,3 mg/l ; il est lié à la dissolution des évaporites (gypse). Les valeurs de sulfate dans les eaux de l'aquifère dépassent largement la norme algérienne de 400 mg/l pour l'eau potable. Des valeurs élevées sont mesurées dans les parties centrale et sud-ouest de la zone d'étude (F3, F5, F14, F16, F11, F18, F20 et F21) (Figure 61).

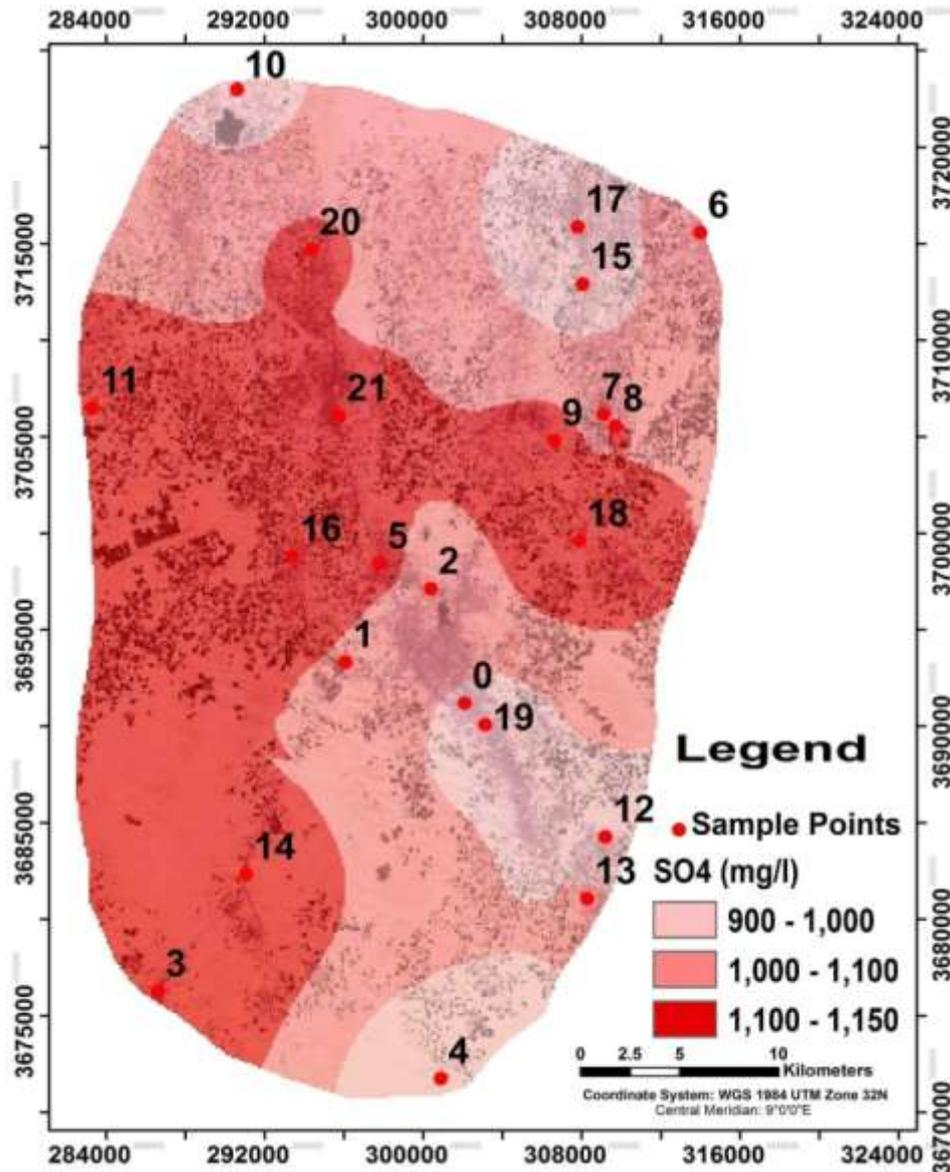


Figure 54: Carte de distribution spatiale de sulfates

Les chlorures

L'ion de chlorure existe toujours dans les eaux naturelles à des concentrations très variables. C'est un traceur conservateur dans les milieux naturels car il ne participe pas aux réactions d'oxydoréduction et ne forme pas de précipités insolubles. Son origine probable est principalement liée à la dissolution de l'halite (NaCl) (Bouselsal et al. 2014 b). Les Chlorures donnent un goût désagréable et génèrent des problèmes de corrosion dans les canalisations et les réservoirs à partir de 50 mg/l. La concentration de cet élément chimique dans la zone d'étude est variable et souvent élevée, allant de 680 mg/l à 900 mg/l. Tous les échantillons d'eau dépassent les normes de l'eau potable. Selon la carte de distribution de la concentration en chlorure (Figure 62) ; Les valeurs les plus élevées sont mesurées dans la partie sud-ouest de la zone d'étude (F3, F5, F14, F16, F20 et F21).

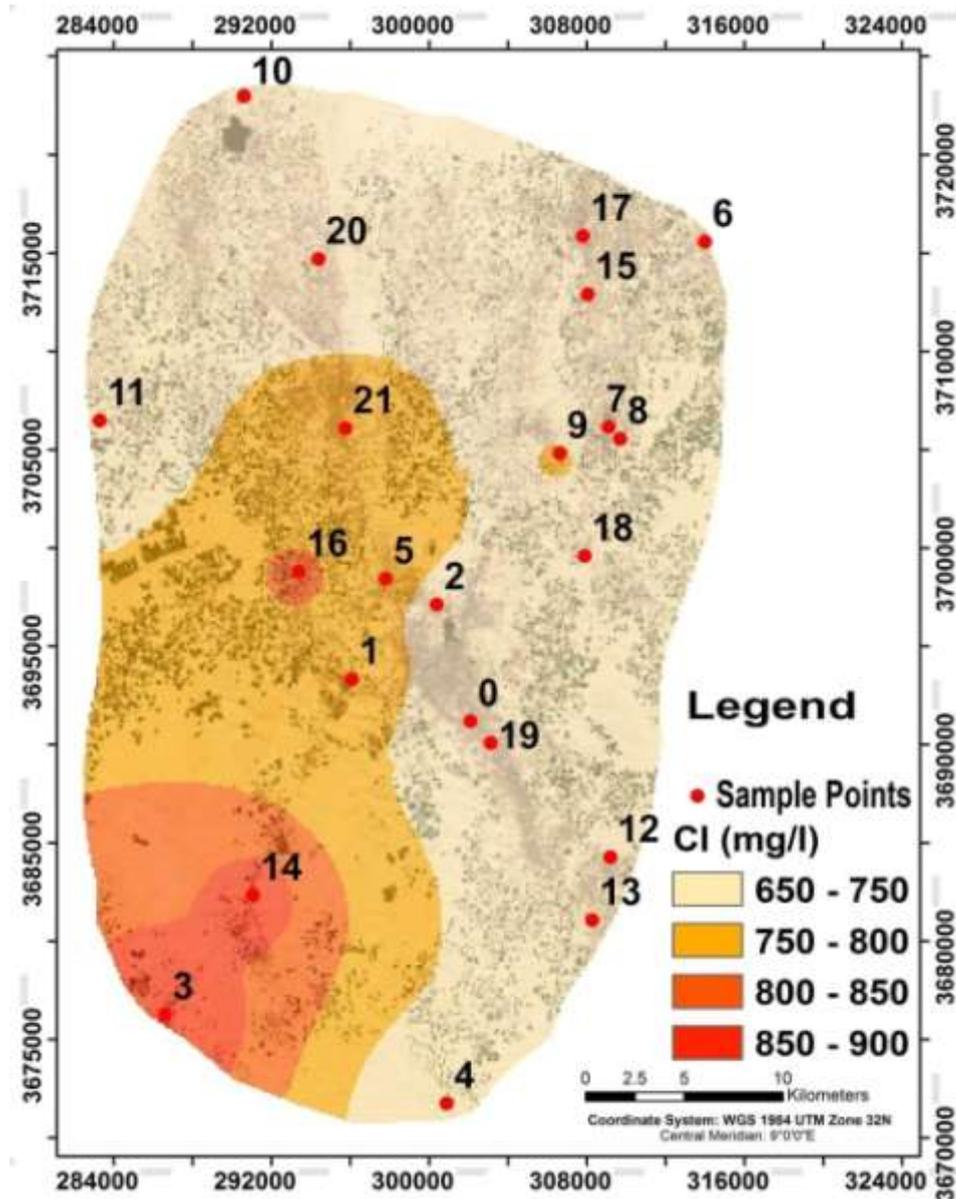


Figure 55: Carte de distribution spatiale des chlorures

Les bicarbonates

Les concentrations en bicarbonate varient de 183 mg/l à 247 mg/l, avec une moyenne de 205.8 mg/l. La carte de distribution du HCO_3^- (Figure 63) montre que les valeurs maximales sont mesurées au centre et au sud-ouest de la zone d'étude (F1, F2 et F3). De plus, les dolomies et les calcaires du Sénonien représentent le substrat de l'aquifère du Miopliocène dans le Sud, ainsi les bicarbonates sont probablement dérivés du flux hydrogéologique amont à travers les formations du Sénonien

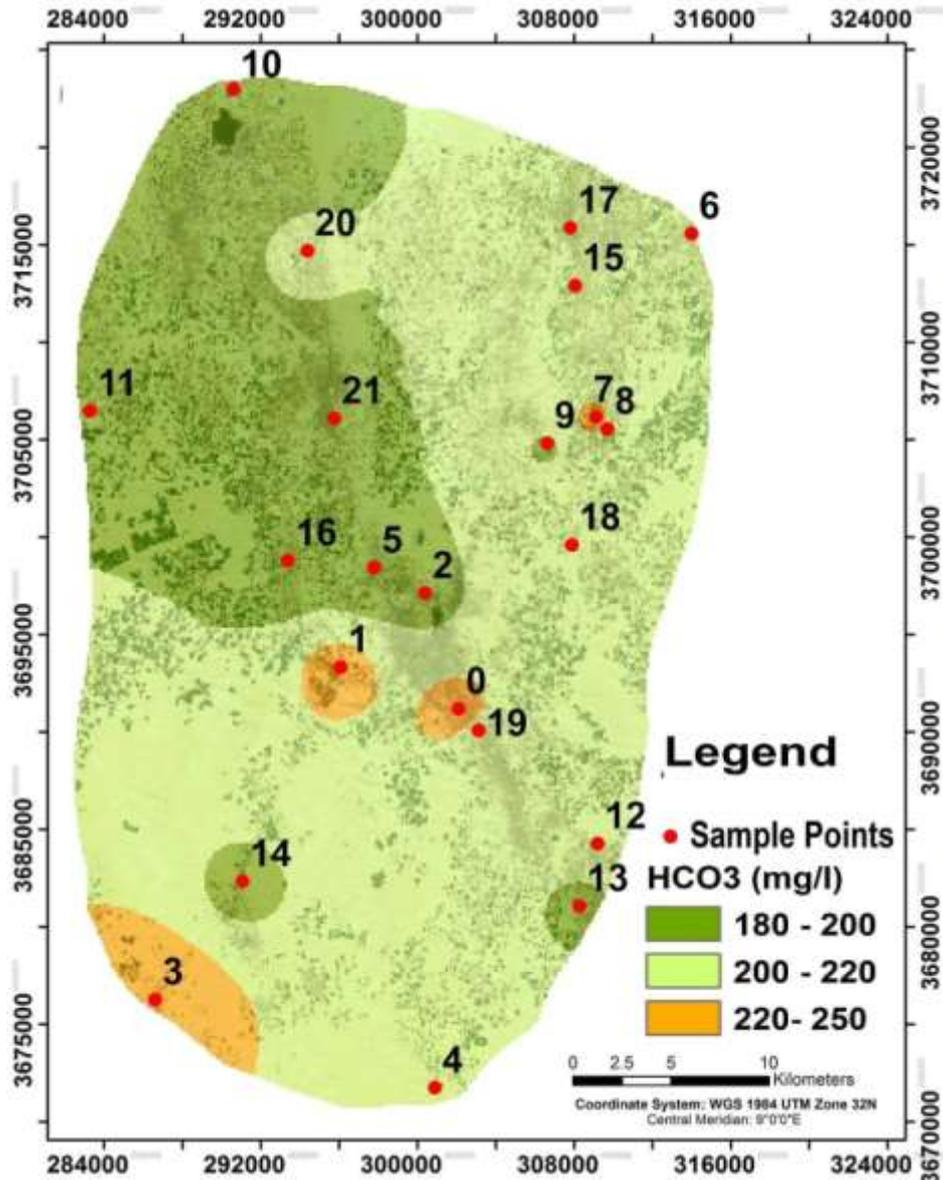


Figure 56: Carte de distribution spatiale des bicarbonates

Les nitrates

Les nitrates peuvent également être utilisés comme indicateurs de la pollution chimique des eaux. Plusieurs auteurs ([Antonakos et al. 2000](#) ; [Bouselsal et Saibi 2022](#) ; [Kharroubi et al. 2022](#)) associent la présence des nitrates dans les eaux, en plus du cycle normal de l'azote, à différentes sources, telles que les engrais chimiques organiques et inorganiques, les installations d'élevage, les effluents domestiques et industriels (eaux usées). La cartographie des nitrates dans les eaux du CT d'El Oued (Figure 64) montre des concentrations allant de 15,3mg/l à 43 mg/l. mesurées respectivement au niveau de Debila et Mih Ouensa. Cependant, les valeurs ne dépassent pas la norme algérienne et la norme de l'OMS (50 mg/l).

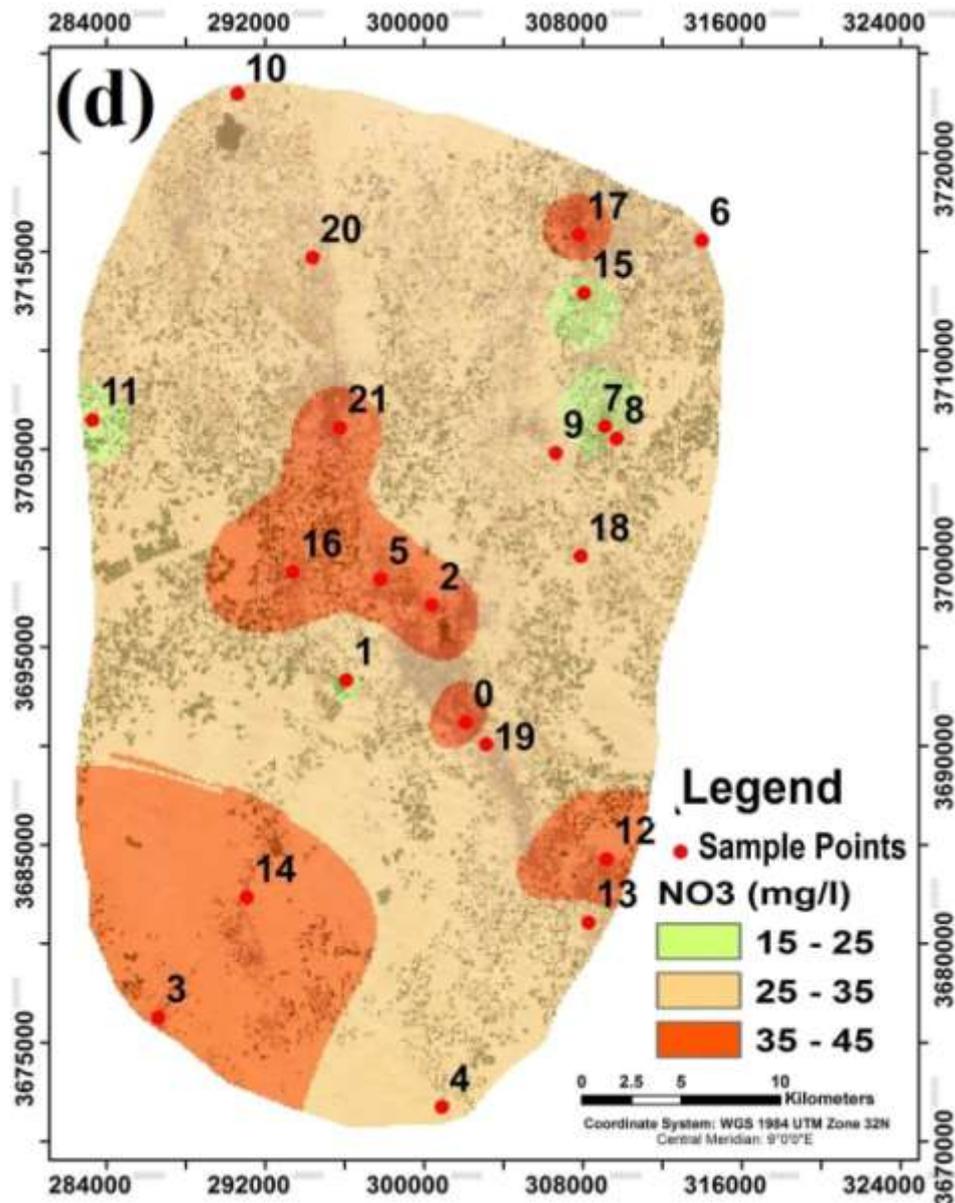


Figure 57: Carte de distribution spatiale des nitrates

5. Evaluation de la qualité des eaux à l'aide de l'indice de qualité des eaux (IQE).

5.1. Principe et méthode :

De plus, la qualité de l'eau a été évaluée en utilisant l'indice de qualité des eaux. Cette méthode est un outil d'évaluation pratique et utile qui fournit un indicateur pertinent de la qualité de l'eau basé sur les paramètres physico-chimiques. Dans la présente étude, l'IQE a été calculé en utilisant la même technique d'indice arithmétique pondéré (Misaghi et al. 2017). Une valeur arbitraire comprise entre 2 et 5 est attribuée pour l'échelle d'évaluation (Tableau 09). Le choix des valeurs dépend de l'importance des considérations qualitatives individuelles de manière comparative. L'IQE est calculé comme suit (Horton 1965 ; Arfa et al. 2022 ; Hammad et al. 2023) :

$$WQI = \sum \left[\left(\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) * \left(\frac{C_i}{S_i} * 100 \right) \right] \quad (1)$$

Où:

C_i : la concentration du paramètre (i).

S_i : la norme algérienne d'eau potable du paramètre (i).

w_i : le poids du paramètre (i).

Tableau 09. Poids et poids relatif de chaque paramètre utilisé pour le calcul de l'IQE

Paramètre	Unité	Poids (w_i)	Normes algériennes (2011)	Poids relatif (W_i)
Ph	-	4	6.5–8.5	0.133
CE	$\mu\text{S/cm}$	4	1500	0.133
Ca^{2+}	mg/l	2	200	0.067
Mg^{2+}	mg/l	1	150	0.033
Na^+	mg/l	2	200	0.067
K^+	mg/l	2	20	0.067
Cl^-	mg/l	3	250	0.100
HCO_3^-	mg/l	3	120*	0.100
SO_4^{2-}	mg/l	4	250	0.133
NO_3^-	mg/l	5	50	0.167
		$\sum w_i = 30$	-	$\sum W_i = 1$

5.2. Résultats et discussions :

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau (IQE) permettent de classer les eaux souterraines en cinq groupes : excellente (<50), bonne (51-100), mauvaise (101-200), très mauvaise (201-300) et impropre à la consommation (>301). L'indice de qualité de l'eau (IQE) calculé pour les eaux de l'aquifère du Complexe Terminal varie de 212,54 à 267,71, ce qui indique que tous les échantillons (100 %) sont de très mauvaise qualité (Figure 65).

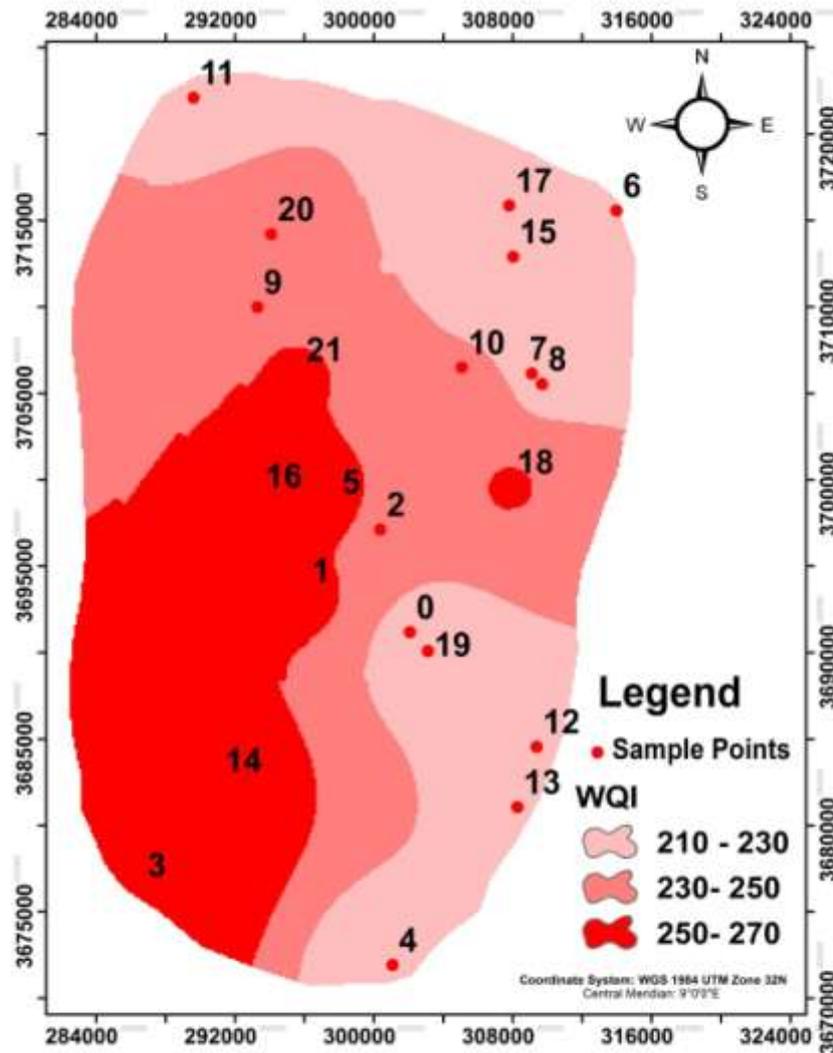


Figure 58: Carte de distribution spatiale de l'indice de qualité de l'eau

6. Aptitudes des eaux à l'irrigation

La qualité des eaux souterraines destinées à l'irrigation dépend principalement de l'influence des composants minéraux de l'eau sur les plantes et le sol (Bouselsal et Johnbosco 2024 ; Boussada et al. 2023). Un total de huit paramètres ont été étudiés pour évaluer la qualité de l'eau pour l'irrigation, et leurs limites ont été obtenues à partir des références correspondantes (Tableau 10) : Le taux d'absorption du sodium (SAR) (Richards 1954), le pourcentage de sodium (%Na) (Wilcox 1948), le CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) (Wilcox 1948), l'indice de perméabilité (PI) (Doneen 1964) et le risque de magnésium (MR) (Ragunath 1987).

Tableau 10: Classification des échantillons d'eau souterraine pour les besoins de l'irrigation

Paramètre	Équation	Range	Classe d'eau	% d'échantillons
% Na		0-20	Excellent	00
(Wilcox 1955)	$Na = \frac{(Na + K) \times 100}{Na + K + Ca + Mg}$	20-40	Bon	00
		40-60	Permissible	68.19
		60-80	Douteux	31.81
		> 80	Impropre	
SAR		0-10	Excellent	00
(meq/l)		10-18	Bon	00
(Richards 1954)	$SAR = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}}$	18-26	Douteux	100
		> 26	Impropre	00
CE		<250	Risque de salinité faible (bon)	00
(μS/cm)	Mesure in situ			
(Wilcox 1955)		250-750	Risque de salinité moyen (modéré)	00
		750-2250	Risque de salinité élevé (mauvais)	00
		>2250	Risque de salinité très élevé (très mauvais)	100
PI (%)		>75	Perméabilité maximale	00
(Doneen 1964)	$PI = \frac{Na + \sqrt{HCO3}}{Ca + Mg + Na} \times 100$	75-25	%75 de la perméabilité maximale	100
		< 25	25% de la perméabilité maximale	00
RM (%)		< 50%	Approprié	00
(Ragunath 1987)	$RM = \frac{Mg}{Ca + Mg} \times 100$	> 50%	Inapproprié	100

L'utilisation d'eau très minéralisée engendre un risque de salinisation du sol, qui peut endommager le sol et les plantes car l'accumulation de sels solubles dans le sol de racine affecte la croissance des plantes. Les effets de la salinité sont de deux types : l'un affecte les plantes et l'autre le sol. En outre, les sels provoquent des modifications de la structure du sol, par exemple sa perméabilité, et affectent directement le développement des plantes. Le pourcentage de sodium ($\% \text{Na}^+$) dans la zone d'étude varie entre 54 et 62,5% (Tableau 10). Selon Wilcox (1948), 68,2% des échantillons sont classés admissibles à l'usage agricole alors que 31,8% sont douteux. La classification des eaux selon Wilcox (1954) basée sur la représentation des valeurs de conductivité électrique (CE) en fonction du pourcentage de sodium ($\% \text{Na}^+$) révèle que les eaux de l'aquifère du Complexe Terminal sont de mauvaise qualité pour l'irrigation (Figure 66). Le risque associé au sodium est déterminé par la concentration relative du sodium (SAR)

6.1. La méthode de Richards et Wilcox:

Le SAR joue un rôle important dans le cadre de l'irrigation en raison de la teneur en sodium présente dans le sol après avoir absorbé l'eau. Une concentration élevée de sodium tend à diminuer la perméabilité du sol et à détruire sa structure. Le diagramme du US Salinity Laboratory (USSL) (1954) montre que tous les échantillons sont tracés dans les classes C4-S2 et C4- S3 (Figure 67) indiquant un risque de salinité élevée et d'alcalinité moyenne à élever.

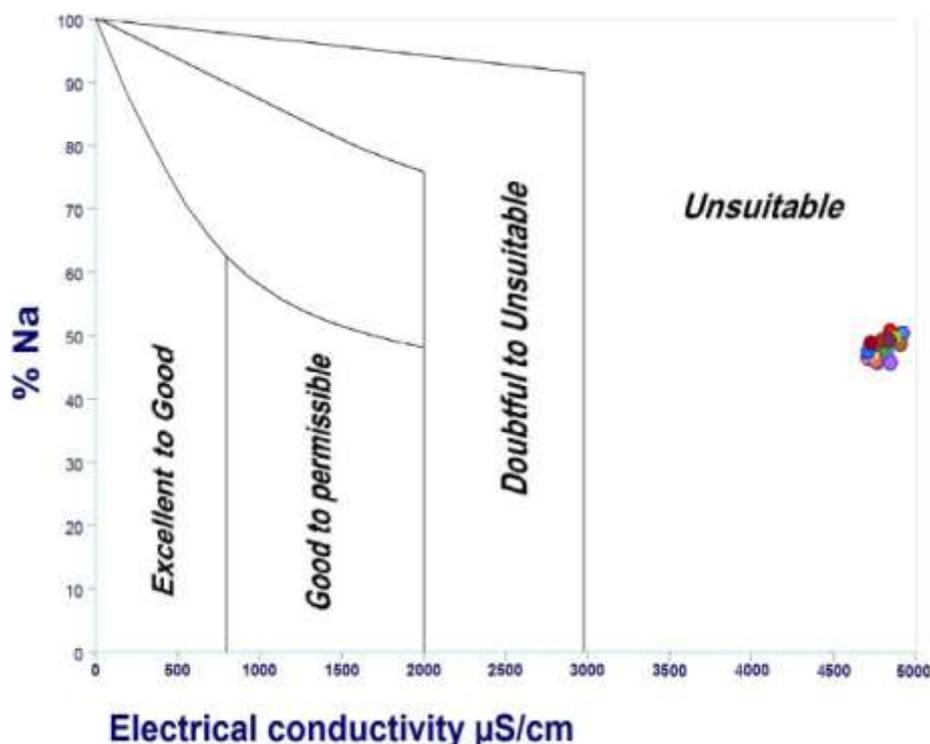


Figure 59: Représentation graphique de la classification de l'eau pour usage d'irrigation, (Diagramme de Wilcox).

(a)

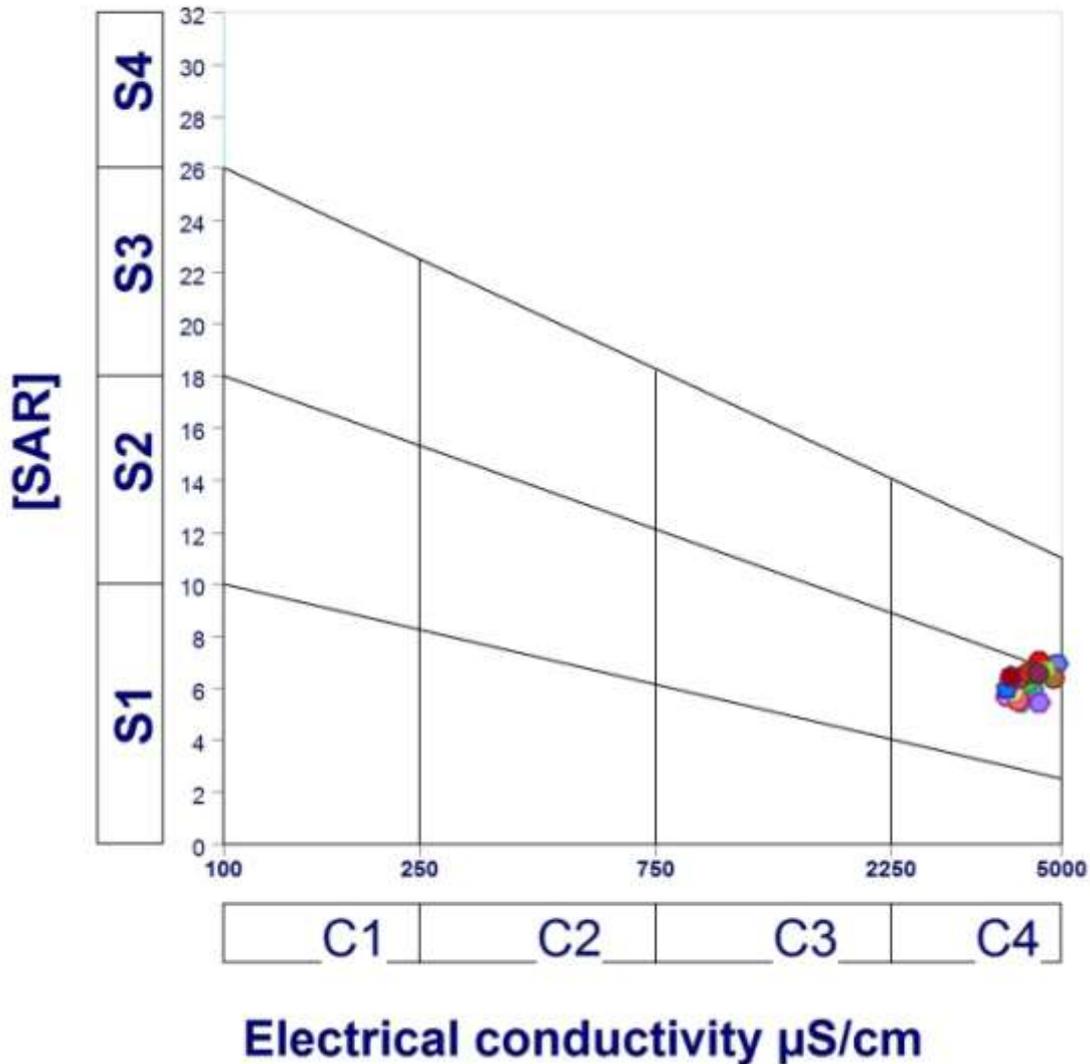


Figure 60: Représentation graphique de la classification de l'eau pour usage d'irrigation, diagramme USSS).

6.2. La conductivité électrique

La conductivité électrique est généralement un indicateur de la minéralisation de l'eau naturelle. La salinité modifie l'accessibilité de l'eau aux cultures. La pression osmotique appliquée à l'eau dans le sol augmente par l'excès de sel, ce qui réduit l'absorption d'eau par les racines des plantes et entraîne une sécheresse physiologique. Même si le sol présente apparemment une humidité suffisante, les plantes peuvent flétrir car les racines n'absorbent pas autant d'eau pour compenser la perte en eau par transpiration. La conductivité électrique mesurée dans la zone d'étude varie entre 4620 et 5880 $\mu\text{S/cm}$. Ces valeurs sont supérieures à 2250 $\mu\text{S/cm}$ indiquant alors un risque de très forte salinité (Wilcox 1948).

6.3. L'indice de perméabilité (IP) (Doneen 1964)

L'indice de perméabilité (IP) (Doneen 1964) est une norme développée pour estimer l'aptitude à l'irrigation. Sur la base de l'IP, l'eau d'irrigation peut être classée en trois classes. La classe I et la classe II ont une perméabilité maximale respectivement de 100% et 75%, tandis que la classe III avec une valeur de 25% reste non appropriée. Dans cette étude, l'IP varie de 45,04 à 54,92, indiquant une qualité modérée pour l'irrigation.

6.4. Le rapport de risque du magnésium

La concentration de magnésium et de calcium dans les eaux souterraines joue un rôle important dans la détermination de la qualité des eaux souterraines pour l'irrigation. [Raghunath \(1987\)](#) a développé le rapport de risque du magnésium. Les valeurs calculées sont classées en deux classes : appropriées et inadéquates. Les valeurs inférieures à 50 ont été considérées comme appropriées et celles supérieures à 50 comme impropres à l'irrigation, car elles réduisent le rendement des cultures quand le sol devient plus alcalin. Pour la zone d'étude, les valeurs supérieures à 50% indiquent que la qualité des eaux de l'aquifère CT est inappropriée pour l'irrigation (Tableau 10).

7. Contrôle de la chimie des eaux souterraines

7.1. La matrice de corrélation

La matrice de corrélation (Tableau 11) donne plusieurs corrélations fortement significatives telles que EC-Cl⁻ (r = 0.92), EC-Na⁺ (r = 0.90), EC-SO₄²⁻ (r = 0.84), Na⁺-Cl⁻ (r = 0.85), et Na⁺-SO₄²⁻ (r = 0.71). Ces corrélations permettent de prédire que la minéralisation des eaux souterraines est principalement liée aux sulfates et aux chlorures ainsi qu'à d'autres éléments. Les indices de saturation minérale (IS) calculés indiquent que tous les échantillons sont sous-saturés en ce qui concerne le gypse, l'anhydrite et l'halite (minéraux évaporitiques). Cependant, la présence d'évaporites est soutenue par la forte corrélation entre les ions sodium et chlorure (r = 0,85). En outre, le coefficient de corrélation entre le magnésium et les sulfates (r = 0,73) dans ces eaux pourrait être expliqué par l'altération des marnes dolomitiques de la couche Mio-Pliocène du (CT). La corrélation modérée entre le calcium et les sulfates (r = 0,52) peut être liée à la dissolution du gypse suivie d'un échange de cations entre les ions des roches aquifères et son influence sur la chimie de l'eau. En général, le coefficient de corrélation entre HCO₃⁻ et Ca²⁺ n'est pas significatif (r = 0,11). Cela indique que les ions calcium ne peuvent pas être émis par la calcite.

7.2. Diagramme de Gibbs(Gibbs 1970)

Le diagramme de Gibbs (Gibbs 1970) est appliqué ici pour représenter la relation entre la composition des eaux souterraines et la lithologie de l'aquifère et pour représenter l'origine des composants chimiques dans les eaux souterraines.

Tableau 11: Corrélations de Pearson pour les eaux souterraines de l'aquifère CT.

	pH	C E	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	Na ⁺	K ⁺	Mg ⁺⁺	Ca ⁺⁺
pH	1.00									
C E	0.48	1.00								
HCO ₃ ⁻	0.11	0.12	1.00							
Cl ⁻	0.41	0.92	0.16	1.00						
NO ₃ ⁻	0.23	0.33	-0.12	0.46	1.00					
SO ₄ ⁻	0.45	0.84	0.02	0.67	0.09	1.00				
Na ⁺	0.64	0.90	0.03	0.85	0.39	0.71	1.00			
K ⁺	0.33	0.29	0.02	0.37	0.13	0.07	0.53	1.00		
Mg ⁺⁺	0.11	0.60	-0.03	0.61	0.23	0.73	0.37	-0.10	1.00	
Ca ⁺⁺	0.68	0.40	0.11	0.25	-0.18	0.52	0.48	0.29	0.01	1.00

tels que les précipitations, l'évaporation et la dominance des roches. Dans cette étude, tous les échantillons de l'aquifère CT sont placés dans le champ d'évaporation (Figure 68), ce qui permet de conclure que la dissolution des évaporites est le principal processus contrôlant la chimie des ions majeurs de l'aquifère CT. La région d'Oued Souf est soumise à un climat aride ; par conséquent, l'évaporation des eaux souterraines est un phénomène dominant qui génère une augmentation de la salinité de l'aquifère. (Masoud et Aldosari 2020; Esmaili et Moore 2012; Ouarekh et al. 2023).

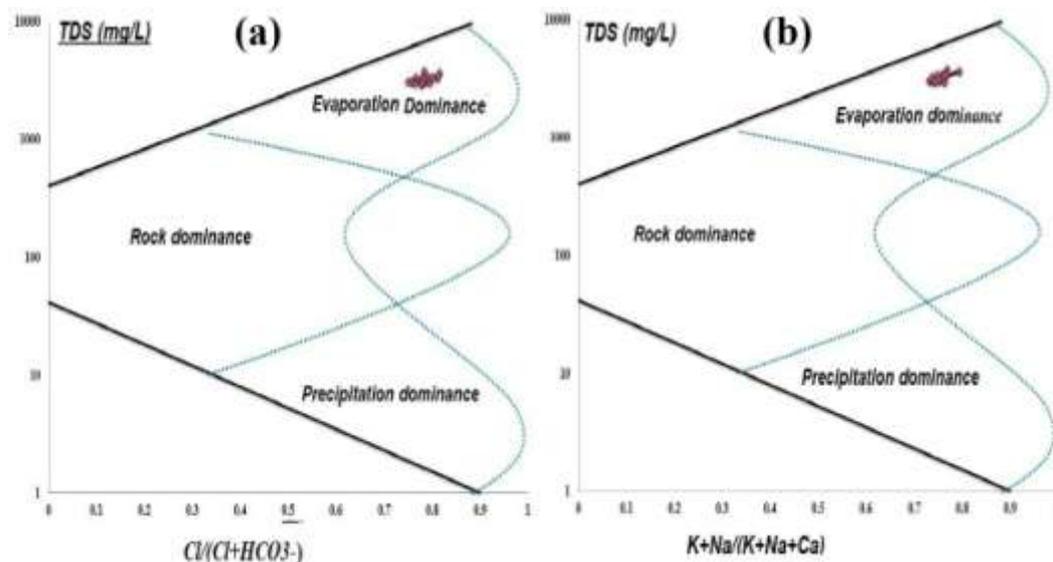


Figure 61: Le plot de l'échantillon d'eau souterraine dans le diagramme de Gibbs

7.3. Les diagrammes binaires

Les diagrammes de dispersion entre les concentrations des principaux éléments majeurs a permis de déterminer l'origine de la minéralisation des eaux de l'aquifère CT .

Le diagramme Na^+ versus Cl^- (Figure 69) montre un alignement des échantillons sur la ligne 1:1, indiquant une origine probablement identique des deux éléments chimiques, à savoir la dissolution de l'halite (Kharroubi et al. 2023). Cependant, certains échantillons montrent un excès en sodium. L'appauvrissement observé de la teneur en Cl^- par rapport à la concentration en Na^+ indique probablement des réactions d'échange cationique résultant de l'adsorption de Ca^{2+} sur les minéraux argileux et la libération d'ions Na^+ .

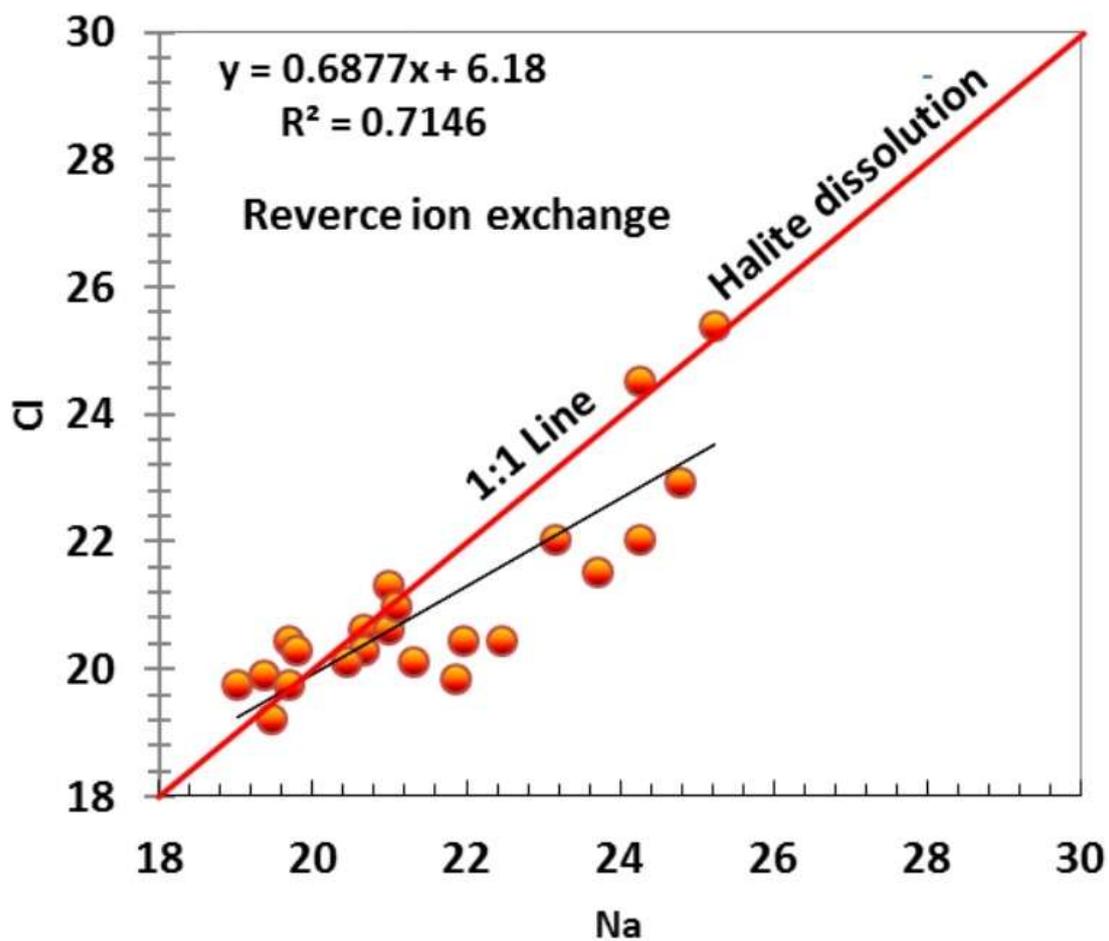


Figure 62: Relation entre a Na^+ et Cl^-

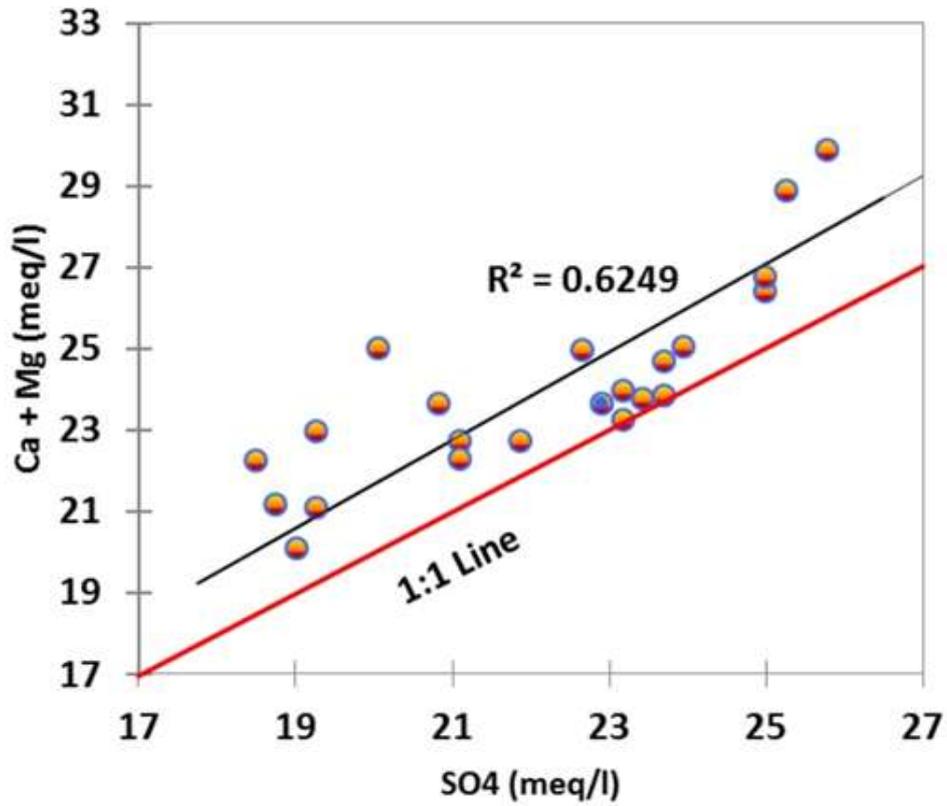


Figure 63: Relation entre a ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) et Cl^-

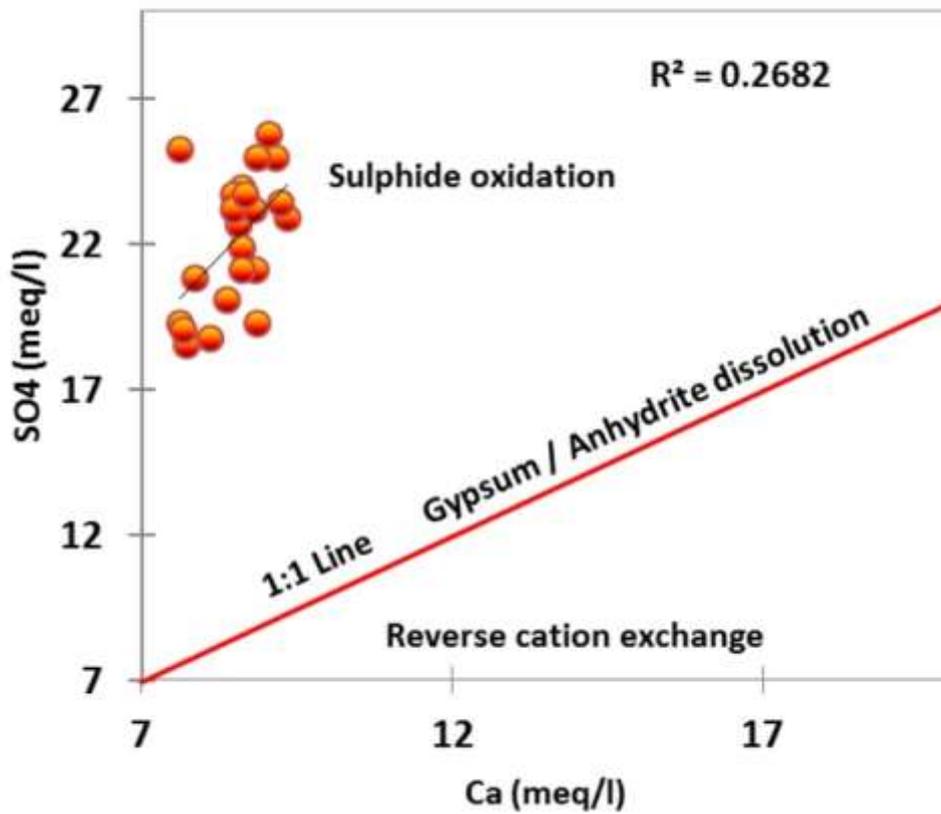


Figure 64: Relation entre a Ca^{2+} et SO_4^{2-}

Le graphique Ca^{2+} versus SO_4^{2-} (Figure 71) montre un déficit en calcium par rapport au sulfate. Cette relation reste en bon accord avec une théorie d'échange cationique Ca^{2+} - Na^+ (Hidalgo et Cruz-Sanjulian 2001 ; Bouselsal et Belksier 2018 ; Ouarekh et al. 2021). Le graphique Mg^{2+} versus SO_4^{2-} (Figure 52) illustre une évolution absolue des sulfates et du magnésium. Cette relation reflète l'altération des formations marneuses dolomitiques caractéristiques des régions sahariennes algériennes.

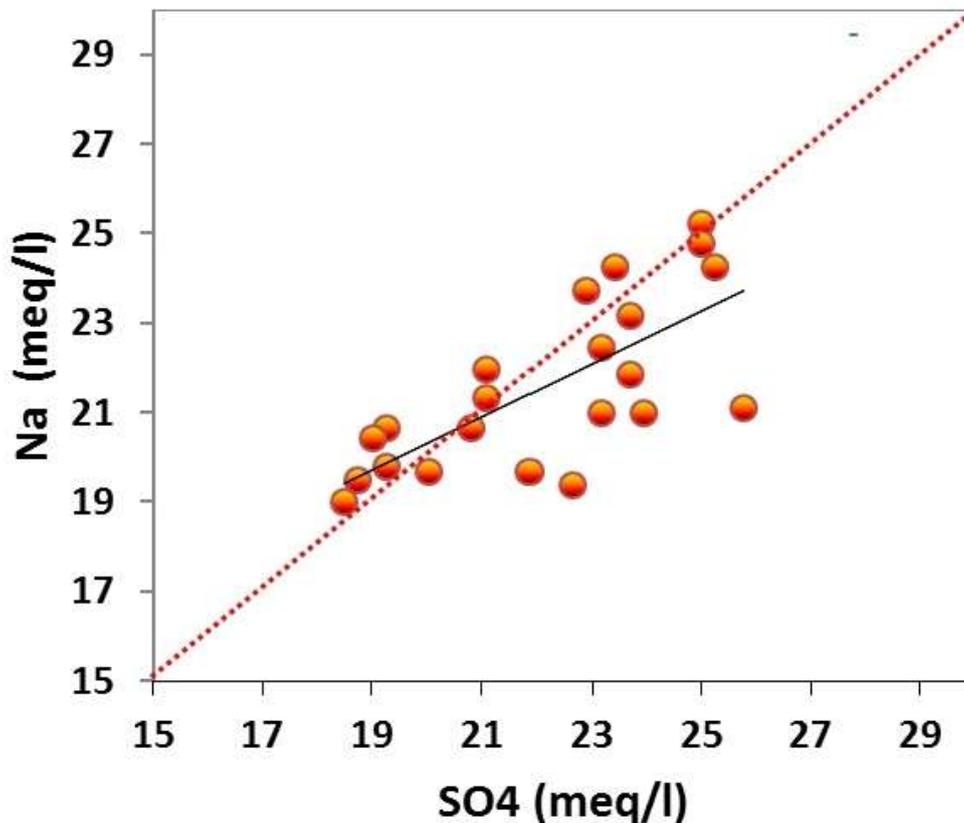


Figure 65: Relation entre a Na^+ et SO_4^{2-}

7.4. Ion exchange processes

Afin de s'assurer que les processus d'échange d'ions affectent l'hydrochimie de l'aquifère CT, $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ a été tracé en fonction de $(\text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ (Figure 73) (Bouselsal et Zouari 2022). Cette figure illustre le nuage de points avec une pente négative de -1, confirmant le processus d'échange de cations dans l'eau de l'aquifère CT. En effet, la plupart des échantillons sont tracés dans les abscisses positives et les ordonnées négatives indiquant que les ions sodium sont enrichis par rapport à la décharge des ions calcium et magnésium dans les sédiments. En plus de cet échange, le processus peut probablement être lié à la présence de précipitations de dolomite et de calcite (Yidana et Yidaa 2010 ; Hamzaoui et al. 2012 ; Jalali 2007). La majorité des échantillons sont en saturation d'aragonite et, puisque

l'état de saturation indique la direction du processus, la précipitation de calcite diminue les concentrations de Ca^{2+} et de HCO_3^- . Ce processus explique la relation non linéaire entre Ca^{2+} et SO_4^{2-} .

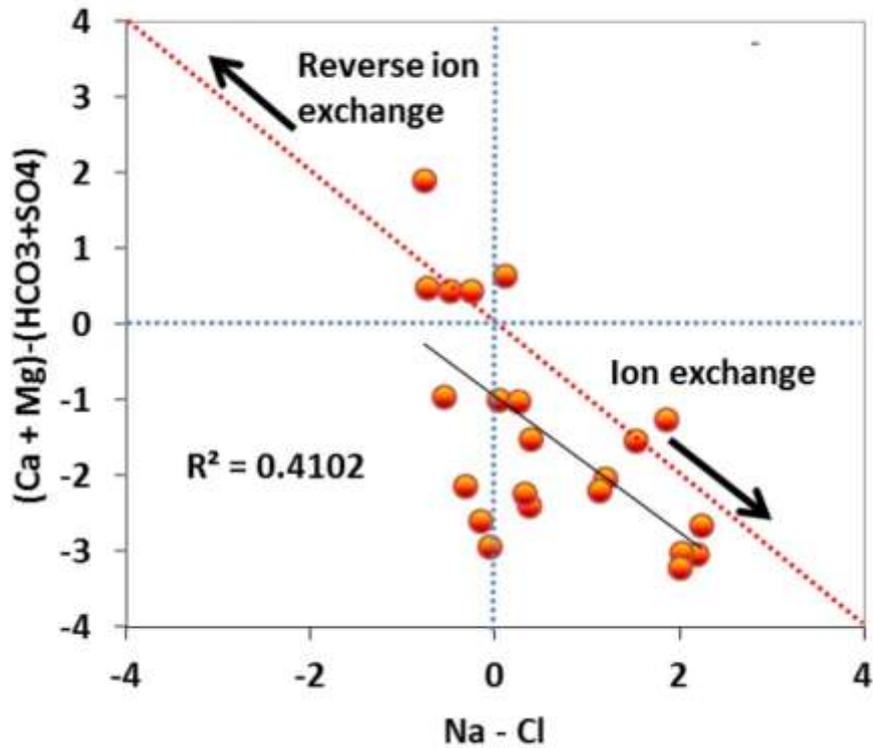


Figure 66: Diagramme de $[(\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Cl})]$ en fonction de $[(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-)]$ en meq/l

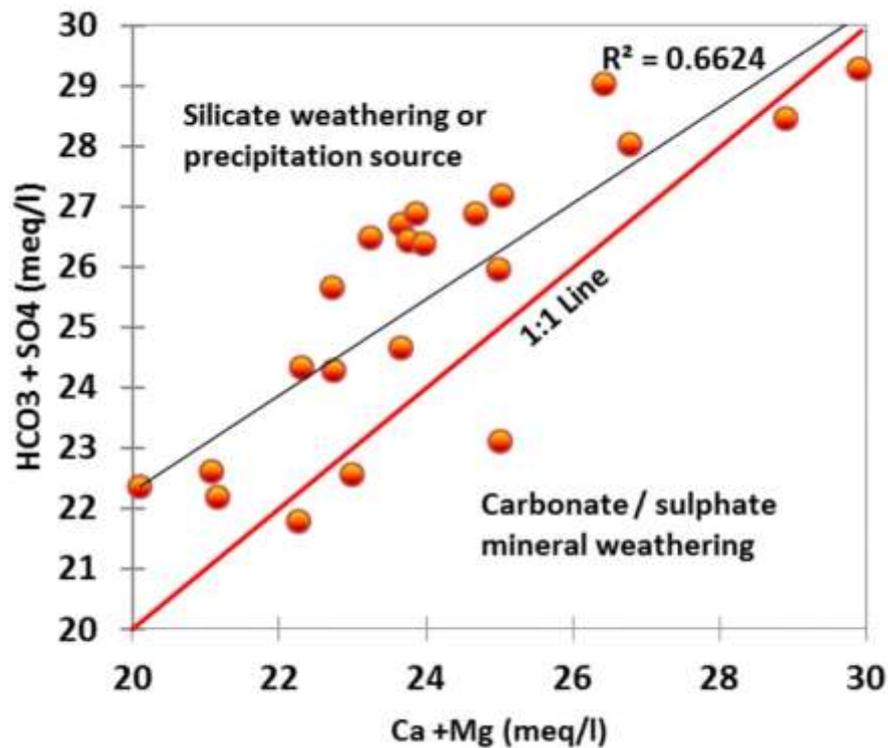


Figure 67: Diagramme de $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$ en fonction de $(\text{HCO}_3 + \text{SO}_4^{2-})$ en meq/l.

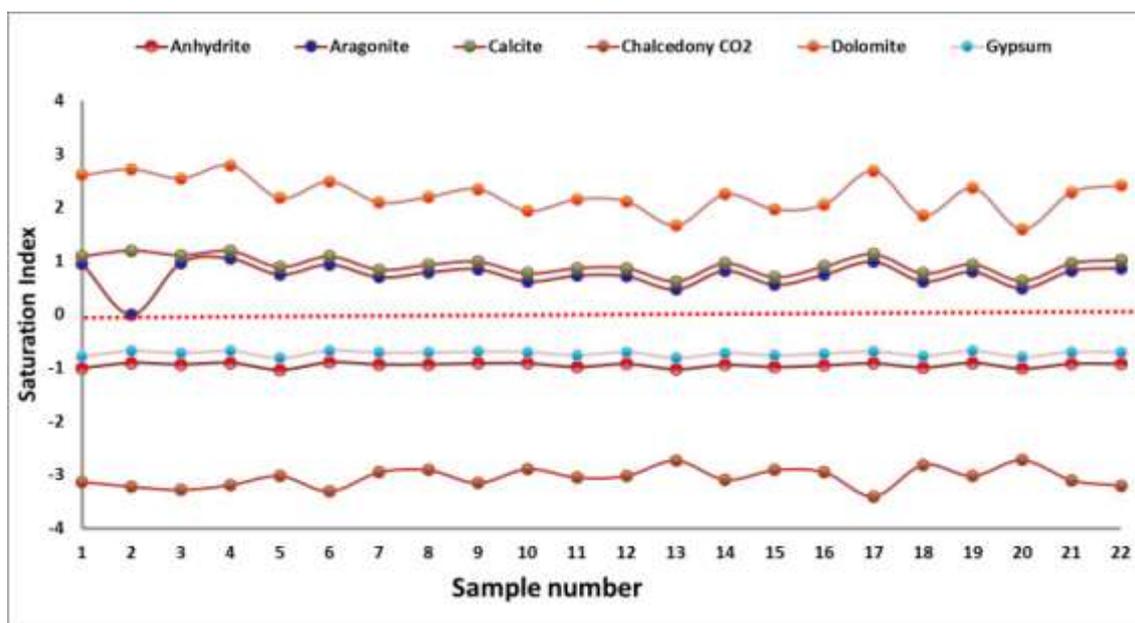


Figure 68: Diagramme de l'état de saturation de minéral de l'aquifère CT

7.5. Analyse statistique multivariée

7.5.1. Le cercle de corrélation

Le cercle de corrélation tracé dans deux niveaux factoriels F1-F2 exprimant 64,16% de la variance (Figure 76) met en évidence une association corrélée positivement avec le facteur F1 (exprimé 47,18%). Cette corrélation comprend les paramètres suivants : chlorures (Cl^-), sulfates (SO_4^{2-}), magnésium (Mg^{2+}), calcium (Ca^{2+}), et sodium (Na^+) associés à la CE. Ces éléments représentent l'axe de la minéralisation naturelle liée aux évaporites (NaCl , $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, et MgSO_4) à l'exception de K^+ , NO_3^- , et HCO_3^- . La corrélation du F2 avec les nitrates et le potassium suggère que le F2 est principalement lié aux activités anthropiques. Les nitrates et le potassium proviennent probablement de l'infiltration des eaux de surface telles que les eaux d'irrigation (Bekkoussa et al. 2013).

7.5.2. Le dendrogramme de la classification hiérarchique

Le dendrogramme de classification hiérarchique des eaux souterraines des échantillons de l'aquifère CT (Figure 76) met en évidence l'existence de trois groupes, qui sont bien différenciés selon leur minéralisation et également bien distingués en ce qui concerne les composantes de l'ACP. Le premier groupe représente la classe de minéralisation très forte en Cl^- et Na^+ et le second groupe représente la classe de minéralisation en SO_4^{2-} . Ces éléments sont fortement corrélés avec la conductivité électrique et sont responsables de la minéralisation totale de l'eau résultant de la dissolution de l'halite et du gypse. Le troisième groupe est caractérisé par une minéralisation moyenne : Mg^{2+} , Ca^{2+} , NO_3^- , HCO_3^- , et K^+ .

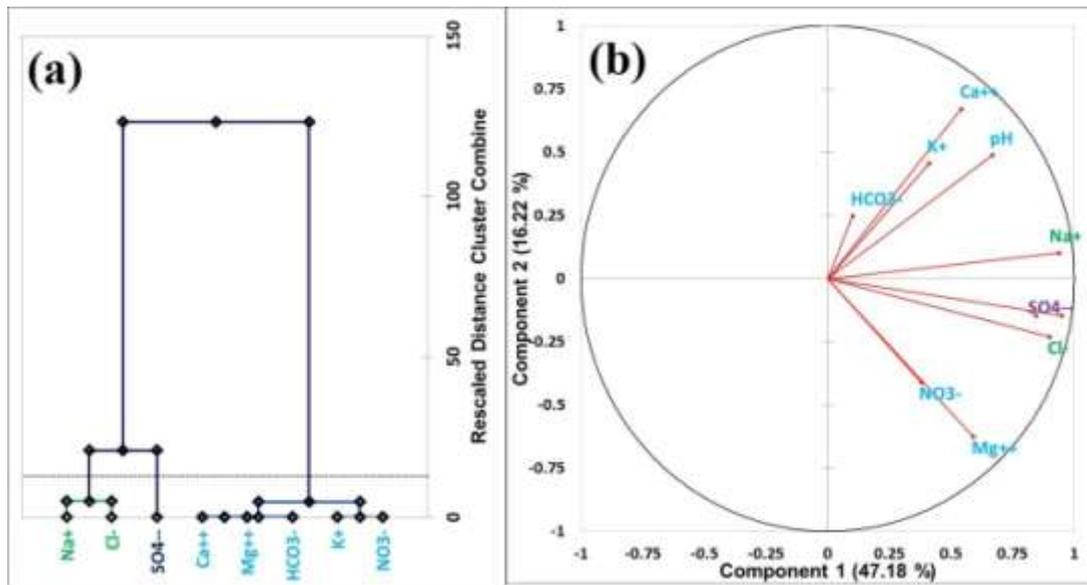


Figure 69: Dendrogramme HCA des paramètres des eaux souterraines (a), résultats de l'ACP montrant les variables des PCs (b)

La variation spatiale entre les points d'échantillonnage est évaluée à l'aide de l'AC hiérarchique et présentée dans la Fig. 14 sous forme de dendrogramme. Il a été observé que les échantillons d'eau souterraine ont été subdivisés en 3 groupes (C1 ; C2 ; C3). C1 représente 36% des échantillons d'eau souterraine comprend 8 puits avec la plus faible minéralisation par rapport aux autres ($4600 < EC < 4740 \mu\text{S/cm}$). Ils comprennent la majorité des forages captant le Mio-Pliocène et localisés dans la partie sud. La géochimie des eaux présentant le type Na-Cl s'explique par la dissolution de l'halite existant dans les horizons du Mio-Pliocène (Figure 77).

C2 représente 32% des échantillons d'eau souterraine formés par 7 puits dans lesquels 2 puits sont du Pontian et 5 puits du Mio-Pliocène avec des échantillons plus minéralisés ($4780 < EC < 5670 \mu\text{S/cm}$) par rapport aux autres. Une gradation claire peut être vue d'une eau de type chlorure de sodium à celle de type mixte sulfate s'explique par la dissolution de l'halite existant dans les horizons du Mio-Pliocène. Le C2 est caractérisé par des eaux souterraines avec une composition variable, de Na-Cl à Na-(Mg)-SO₄. Les contributions des minéraux évaporitiques sont montrées par les corrélations positives entre Ca²⁺-SO₄²⁻, Na⁺-SO₄²⁻ et Mg²⁺-SO₄²⁻.

C3 représente 32% des échantillons d'eau souterraine composés de 7 puits. Ils comprennent la majorité des forages de Pontian et présentent la plus faible minéralisation ($EC < 5190 \mu\text{S/cm}$) par rapport aux autres. Ils sont localisés dans la partie nord du Souf. Il apparaît que C3 est clairement associé à EC et aux ions Na, Ca, Mg, SO₄ et correspond à la dissolution de la dolomite, du gypse et de l'halite.

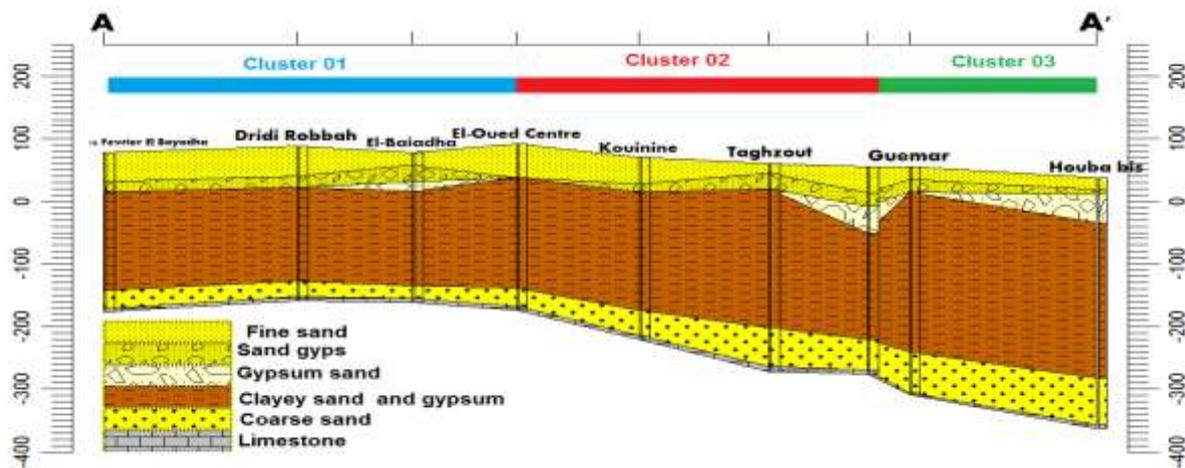
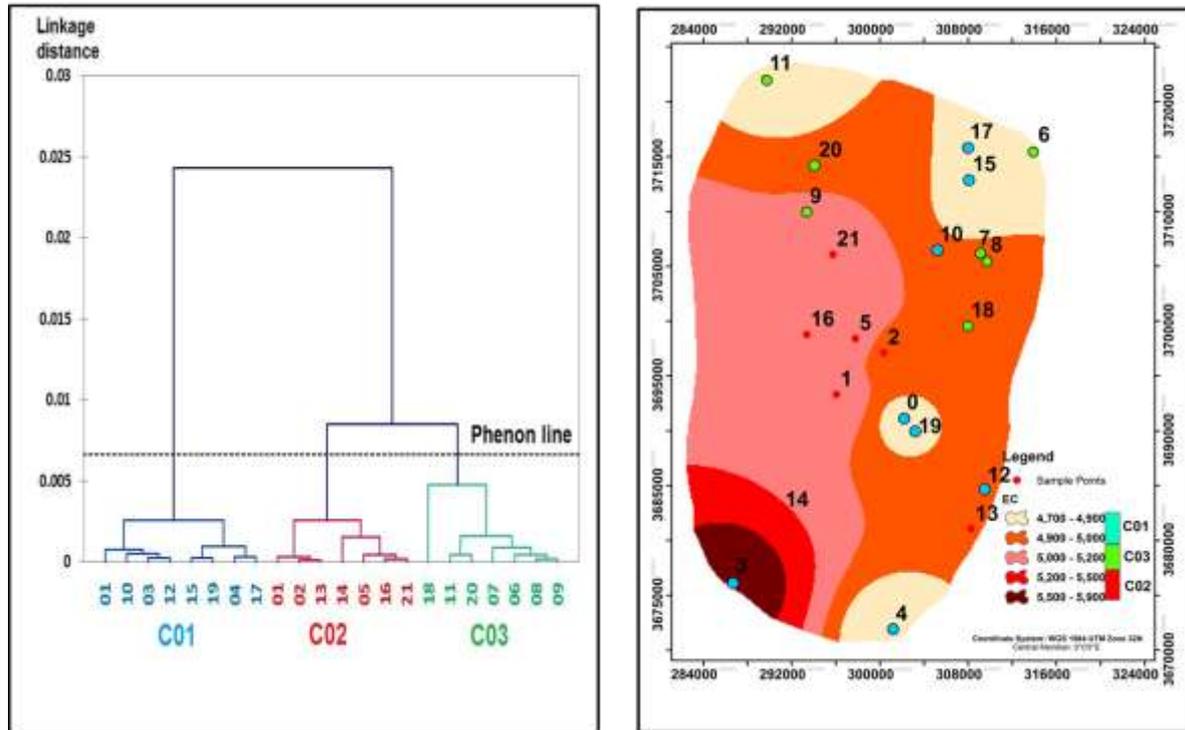


Figure 70: Distribution spatiale de la CE pour les clusters d'eau souterraine.

8. Évaluation géochimique des fortes concentrations de fluor et de leurs effets sur la santé humaine

8.1. Évaluation des risques non cancérogènes pour la santé humaine

L'évaluation des risques pour la santé est une méthodologie quantitative conçue pour identifier, décrire et étudier les problèmes de santé négatifs probables chez les humains en raison de l'exposition à des agents nocifs tels que des substances toxiques dans l'environnement. Le fluorure peut présenter des risques potentiels pour la santé publique. (USEPA, 1992). Cette étude a évalué le risque non cancérogène du fluorure pour la santé

humaine en utilisant le modèle d'évaluation du risque sanitaire recommandé par l'USEPA pour déterminer le danger, l'évaluation de l'exposition, la dose potentielle et la caractérisation du risque par l'eau potable (la principale méthode d'introduction du fluorure et d'autres contaminants dans le corps humain (Nawale et al. 2021; USEPA 1989; Kharroubi et al. 2024). L'évaluation de l'exposition au fluorure est généralement calculée sur la base de l'apport journalier chronique (AJC) provenant des eaux souterraines, qui varie en fonction de l'âge, de la concentration de fluorure, du taux d'ingestion d'eau, de la durée d'exposition humaine, de la fréquence d'exposition et du poids corporel. L'ICD a été calculé comme suit : Eqs. 2 (USEPA, 2014 ; Kharroubi et al. 2024 ; Houari et al. 2024) :

$$CDI = \frac{CC \times IR \times ED \times EF}{BW \times AT} \quad (2)$$

Rapport de risque (HQ):

Le rapport de risque (HQ) fournit une estimation du risque non cancérigène. dû au fluorure par différentes voies, il est donc calculé en divisant la valeur de (CDI) par (RfD) la dose de référence Eq. (3) ; HQ dans la présente étude, représente le risque non cancérigène humain posé par l'eau:

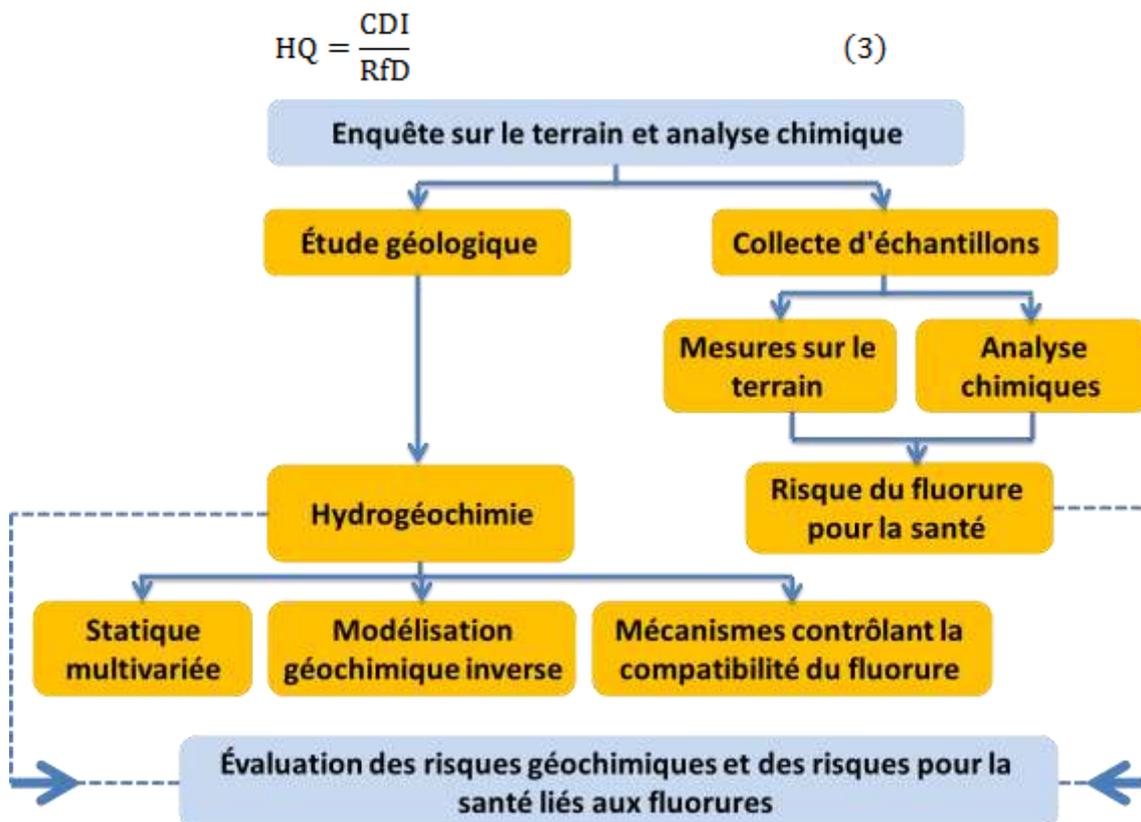


Figure 71: Organigramme montrant la méthode adoptée

8.2. Caractéristiques statistiques et variation spatiale de F-

Dans la présente zone d'étude, la concentration de F⁻ dans l'aquifère CT varie de 1,86 à 2,65 mg/L, avec une moyenne de 2,12 mg/L où tous les échantillons d'eau souterraine (20 échantillons) sont supérieurs à la limite admissible de l'OMS de 1,5 mg/L (OMS, 2011).

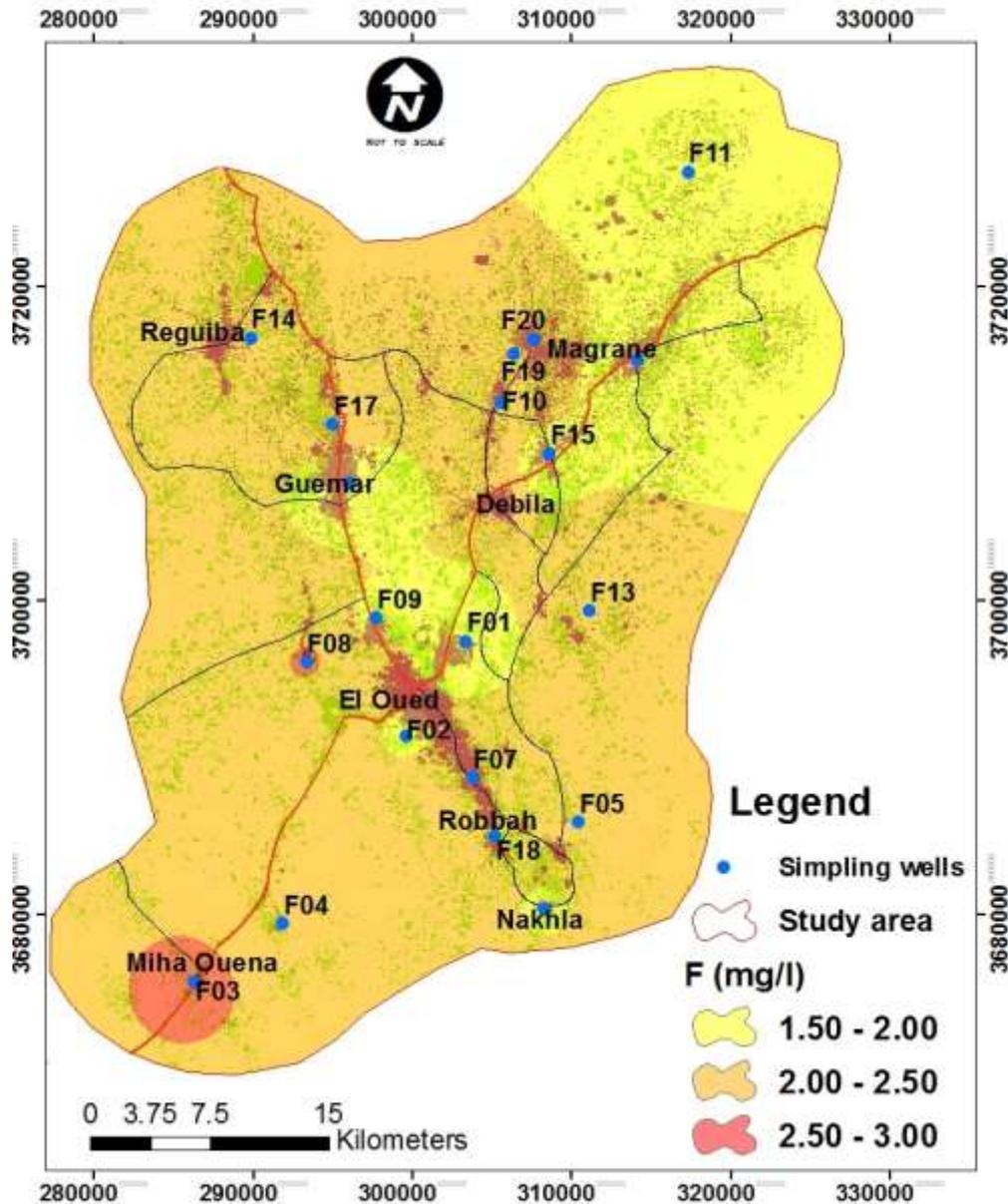


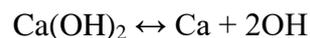
Figure 72 Distribution spatiale du fluorure dans les eaux souterraines

La distribution spatiale du fluorure dans les stations d'échantillonnage de l'aquifère CT est représentée sur la figure 79, ce qui indique que les sources d'eau souterraine de chaque commune sont contaminées par des concentrations élevées de fluorure. Cependant, les concentrations de fluorure les plus élevées se trouvent à Miha Ouensa (2,65 mg/L) et Ourmes (2,54 mg/L) dans les parties sud-est de la vallée d'Oued Souf. Les concentrations les plus faibles sont distribuées dans les villages de Guemar, Hassi Khalifa, Menchia et Chott (Figure

79) situés dans le centre et les parties nord-ouest du bassin où les concentrations sont inférieures à 2,0 mg/L. Les échantillons d'eau souterraine du bassin ont été regroupés par leur concentration en fluorure en trois classes. Celles-ci comprenaient la classe I (élevée) : le niveau de fluorure était compris entre 1,50 et 2,00 mg/l, la classe II (très élevée) : le niveau de fluorure était compris entre 2,01 et 2,50 mg/l, et la classe III (extrêmement élevée) : le niveau de fluorure dans les eaux souterraines était supérieur à 2,50 mg/l.

8.3. Évolution géochimique de la fluore dans les eaux souterraines

Cependant, comme le montre la figure 80, le F^- est lié au Ca^{2+} ($r = -0,42$) dans l'aquifère CT, qui sont étroitement liés aux facteurs de contrôle de l'abondance du calcium dans les eaux souterraines favorise la dissolution de la fluorine. L'étude actuelle a été observée pour avoir des valeurs plus faibles pour Ca et Mg en raison de la précipitation comme la calcite et la dolomite qui conduisent à des eaux souterraines riches en F^- (Li et al. 2011 ; Raza et al. 2016). La présente étude montre une corrélation positive modérée entre la concentration de fluorure et le pH (Figure 80) qui indique que l'environnement alcalin plus élevé est plus favorable à la concentration d'enrichissement en fluorure et affecte donc typiquement la concentration de fluorure dans les eaux souterraines (Réaction 1, 2) (Narsimha et Rajitha 2018) ; les valeurs de pH de la plupart des échantillons étaient comprises entre 7,94 et 8,52 (Fig. 67) (Narsimha et al. 2019). La corrélation légèrement positive entre F^- et HCO_3^- dans l'aquifère CT ($r = 34$) suggère une adsorption compétitive de F^- avec HCO_3^- dans des conditions alcalines, ce qui pourrait à son tour entraîner la libération de F^- des sédiments vers les eaux souterraines (Vázquez-Guerrero et al. 2016) (Eq. 3) et affecter la chimie des eaux souterraines. De plus, une concentration élevée de HCO_3^- pourrait réduire la concentration de Ca^{2+} dans les eaux souterraines, ce qui conduirait un enrichissement en F^- (réaction 3). Par conséquent, une conclusion est que la valeur plus élevée du pH favorise la désorption de F des eaux souterraines dans ces zones d'étude.



Dans la présente étude, Na^+ était le cation dominant et a montré une forte corrélation positive avec F^- ($r = 0.63$) (Figure 83). Les valeurs élevées de Na et les faibles concentrations de Ca^{2+} augmentent la solubilité des minéraux contenant du F^- , cela est favorable à la dissolution du CaF_2 ce qui a entraîné le lessivage de F^- dans les eaux souterraines du CT dans les zones

arides du Sud de l'Algérie (Li et al. 2015b ; Hossain et al. 2016). La corrélation entre la concentration de F^- et de Na^+ et Cl^- est similaire à celle du EC, et elle est positive, indiquant le degré de salinisation des eaux souterraines. Cl^- est un traceur qui fournit des informations sur les processus physiques de l'eau, il est donc clair que le principal facteur de contrôle peut être la dissolution des évaporats. Dans les zones arides, la plupart du Cl^- provient de la dissolution des sédiments évaporés et de la concentration de la solution (Ma et al. 2010). L'effet du sel est également considéré comme utile dans le processus de précipitation en pompage des eaux souterraines, ce qui fait que le $CaCO_3$ atteint la saturation, et favorise la dissolution du CaF_2 et l'enrichissement en F^- dans les eaux souterraines.

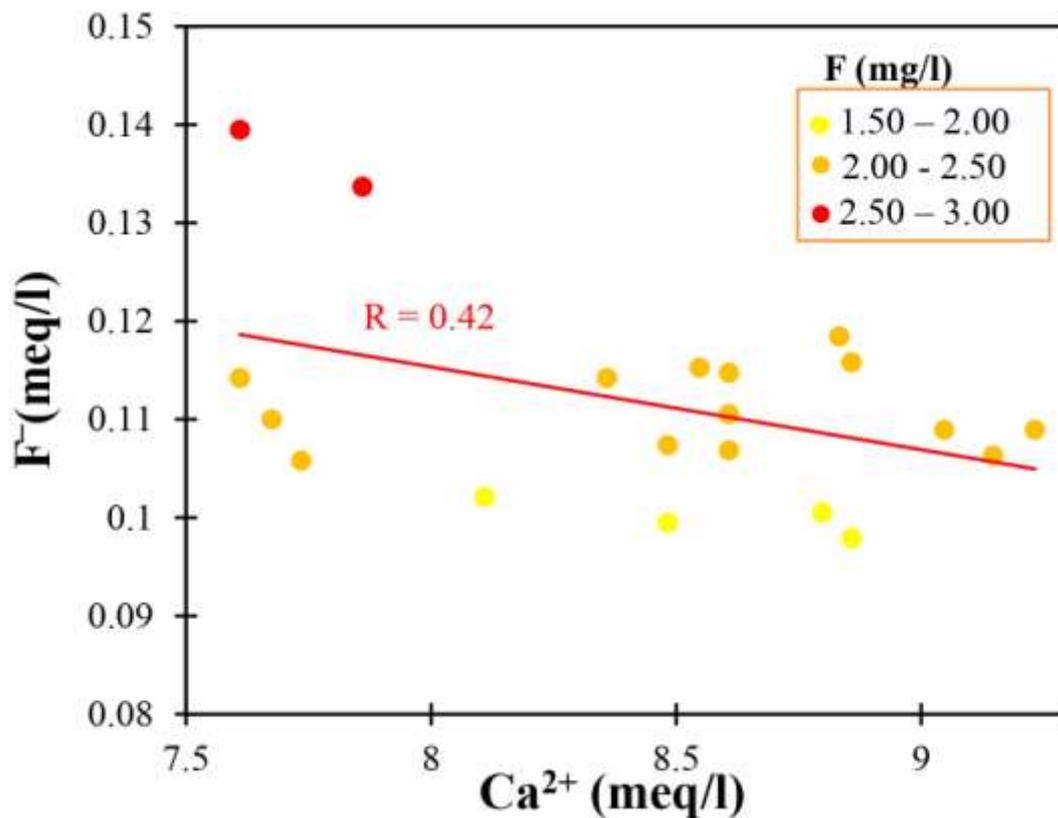


Figure 73: Relation entre F^- et Ca^{2+}

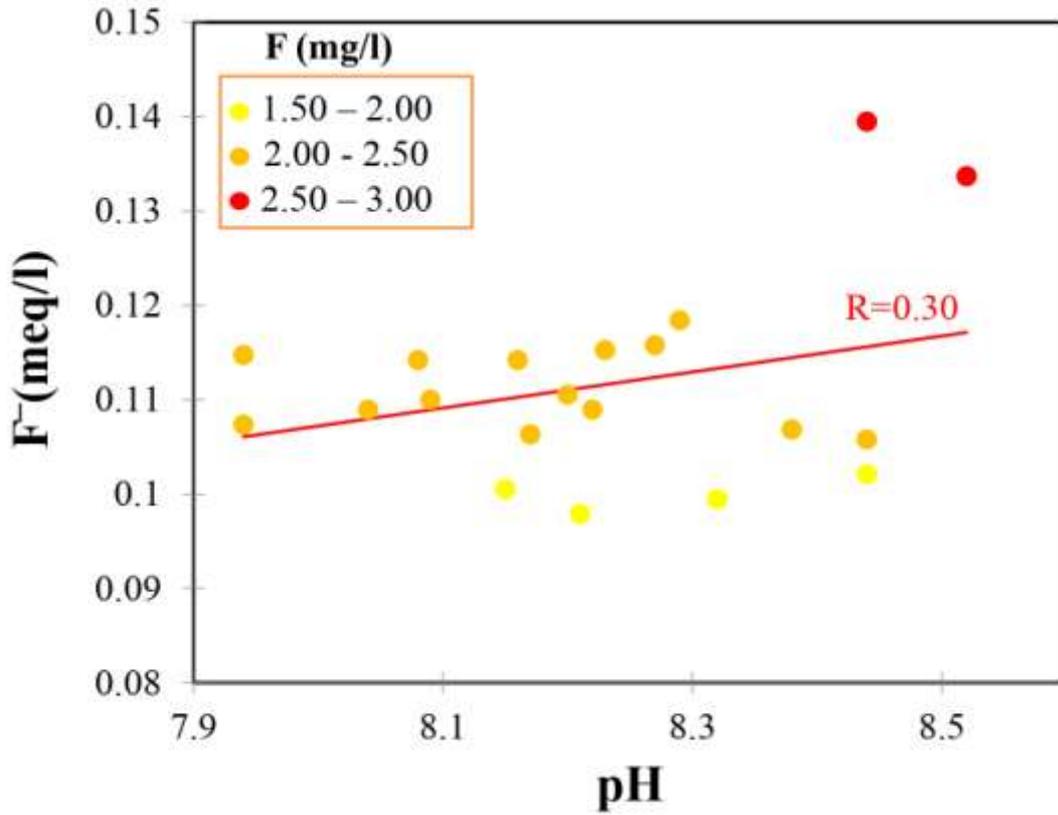


Figure 74: Relation entre F⁻ et le pH

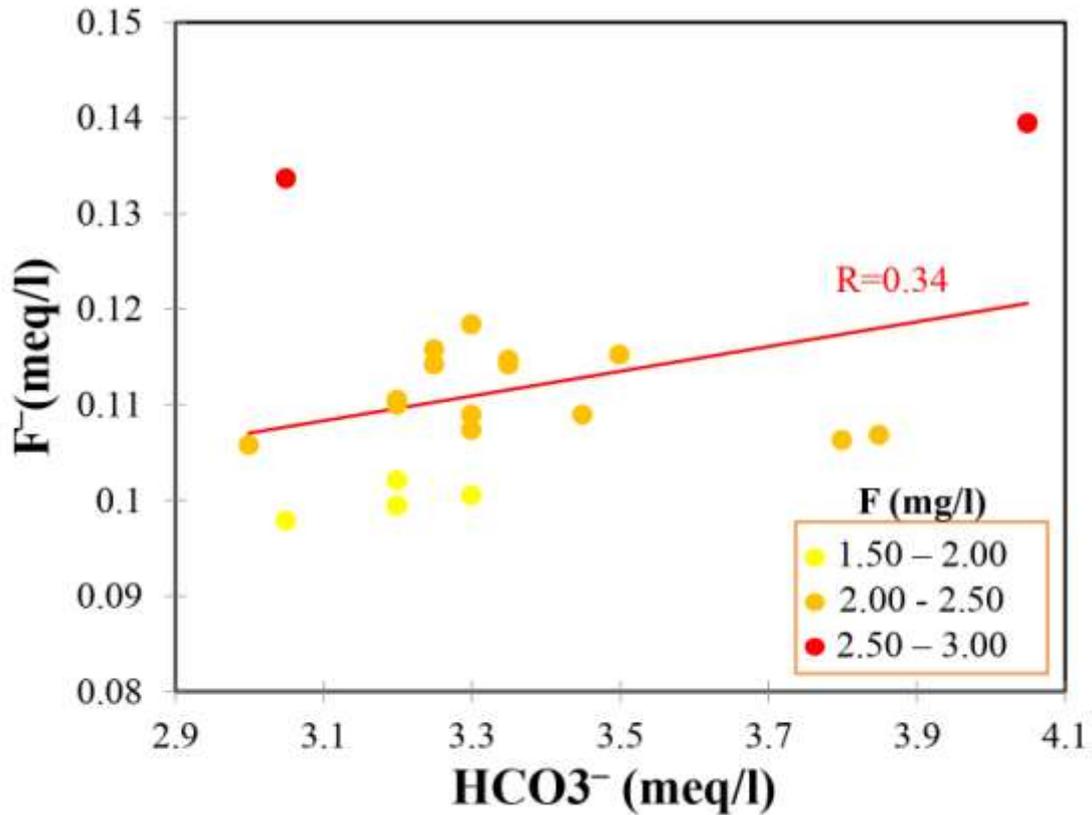


Figure 75: Relation entre F⁻ et HCO₃⁻

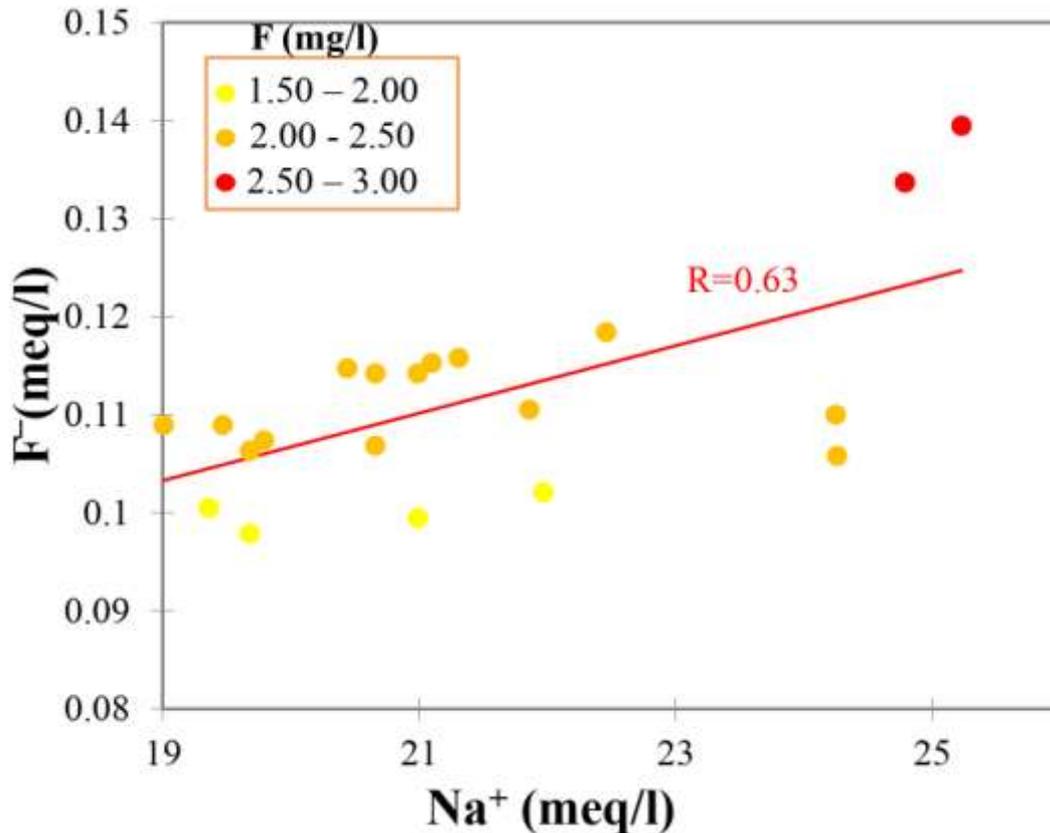


Figure 76: Relation entre F⁻ et Na⁺

8.4. Processus d'échange ionique

L'échange de cations est un processus important affectant les caractéristiques hydrochimiques de l'aquifère CT par l'échange de Ca²⁺ et Mg²⁺, Ca²⁺ et Mg²⁺ gagnés ou éliminés par rapport à ceux fournis par la dissolution du gypse avec Na⁺ gagné ou perdu à partir de sources sauf l'halite dans les eaux souterraines (Su et al., 2013), la relation entre (Na⁺+K⁺-Cl⁻) et (HCO₃⁻ + SO₄²⁻-Mg²⁺-Ca²⁺) linéaire avec une pente de 1 (Liu et al. 2021). Il existe une corrélation positive ($R^2 = 0,34$) entre ces paramètres (Figure 84), ce qui indique que l'échange cationique est un processus hydrochimique vital responsable de l'enrichissement en Na⁺ et de l'absorption de Ca²⁺ (Réaction 4) qui conduit à l'augmentation de la teneur en fluorure dans les eaux souterraines de la zone d'étude. La direction des interactions d'échange de cations entre les minéraux dans l'aquifère CT et les eaux souterraines est également confirmée par les indices de chlore et de soude (CAI-I, CAI-II), comme illustré dans les équations (4), où tous les ions en meq/L sont utilisés pour identifier l'échange de cations direct ou inverse plus en détail, Lorsque CAI < 0 aqueux Ca²⁺ et Mg²⁺ échange le Na⁺ adsorbé dans les sédiments par la libération de Na⁺ de l'aquifère, indiquant l'échange de cations direct. Comme le montre la figure 84, CAI1 et CAI2 sont tous deux négatifs, ce qui démontre que l'échange cationique

direct a un impact sur l'enrichissement en F^- dans l'aquifère CT. En supposant que les eaux de type Na-Cl ont été produites par la dissolution de l'évaporation et l'échange de cations (l'élimination de Ca^{2+} et Mg^{2+} de la solution en échange de Na^+ sur les minéraux argileux), pendant l'interaction roche-eau, les eaux souterraines avec des concentrations élevées de Na^+ et de faibles concentrations de Ca^{2+} ont favorisé la libération de F^- de la matrice aquifère. Avant que la saturation par rapport à la fluorine soit atteinte.

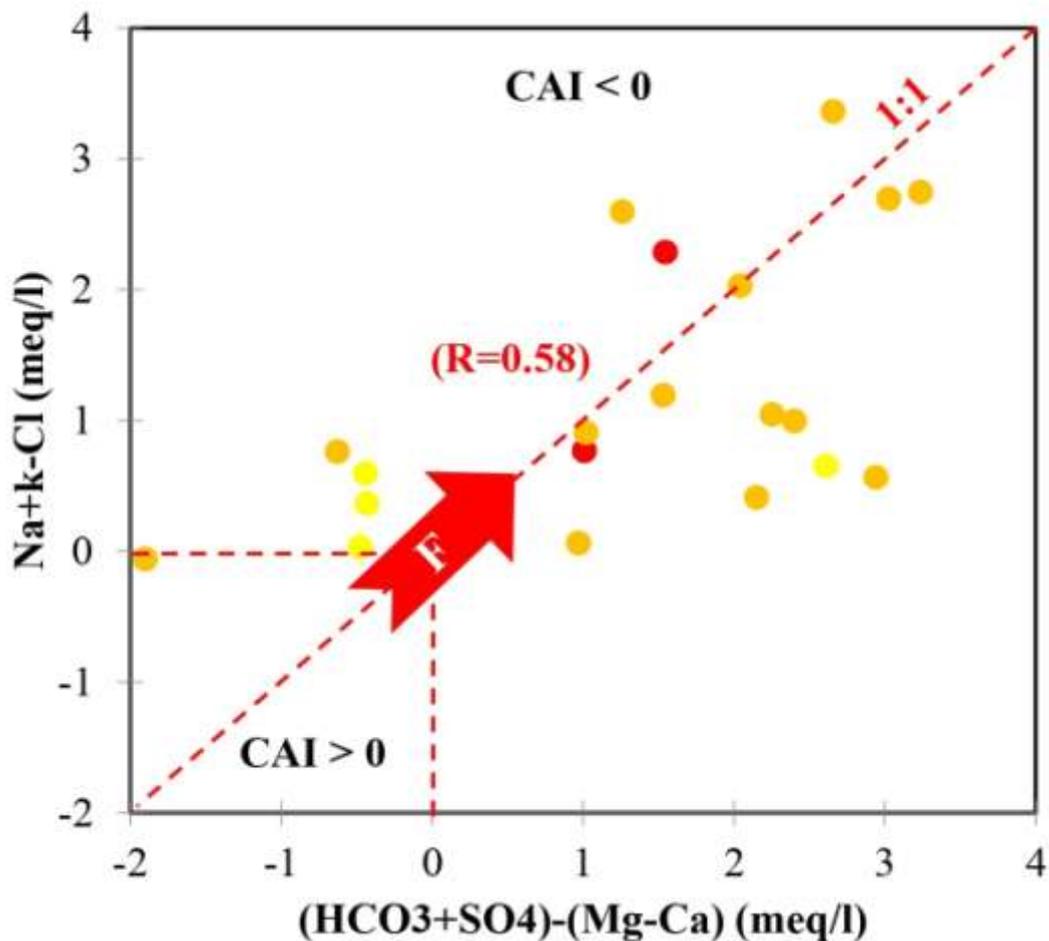
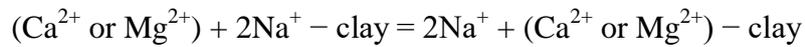


Figure 77: Diagramme de $[(Na^{++}K^+) - Cl^-]$ vs $[(SO_4^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2++}Mg^{2+})]$ en meq

8.5. Modélisation géochimique des phases minérale

Les indices de saturation minérale (SI) pour les phases solides de la calcite ($CaCO_3$), de la fluorite (CaF_2), du gypse ($CaSO_4$) et de la dolomite ($CaMg(CO_3)_2$). Sont étudiés dans tous les échantillons pour explorer l'impact du climat aride et aussi l'influence de la précipitation de la calcite sur la dissolution de la fluorite dans le système des eaux souterraines. Comme illustré dans la figure 85, les valeurs de fluorite (SI) varient entre -0,58 et -0,34 (moyenne -0,49),

suggérant (Xu et al. 2019) que tous les échantillons de l'aquifère CT sont insaturés par rapport à la fluorite, plus de F⁻ peut être dissous dans les eaux souterraines (Figure 85) (Kumar et Kumar, 2015). La calcite (SI) varie de 0,66 à 1,13 (moyenne 0,91), ce qui indique que la calcite est proche du point de saturation. Le Ca²⁺ libéré va créer une sursaturation du CaCO₃ et ensuite une précipitation, facilitant l'élimination du Ca²⁺ des eaux souterraines dans des circonstances alcalines (Li et al. 2018a), entraînant la sous-saturation et la dissolution du CaF₂, puis l'enrichissement du F⁻ dans le CT (Xu et al. 2019).

8.6. Évaluation des risques pour la santé liée au fluorure

Les résultats de l'évaluation des risques pour la santé basée sur le modèle recommandé par l'USEPA soulignent que le QD calculé pour les hommes varie de 0,93 à 1,33, avec une moyenne de 1,06, ce qui suggère que 80 % de tous les échantillons dépassent la limite acceptable de QD et constituent donc une nuisance importante pour les hommes. Le QD varie de 1,07 à 1,53 pour les femmes, avec une moyenne de 1,22, suggérant que tous les échantillons ont des valeurs de QD pour les femmes dépassant la limite acceptable. Pour les enfants, le HQ varie de 1,55 à 2,21, avec une moyenne de 1,77, tous les échantillons ont des valeurs de HQ supérieures à la limite acceptable (Figure 90). En général, dans la zone d'étude, le risque cancérigène pour les adultes de l'ingestion de fluorure via l'eau potable est modéré à élevé, mais les enfants ont un risque plus élevé de toxicité du fluorure via l'eau potable par rapport aux adultes. Il dépend principalement du poids corporel et des activités métaboliques de l'individu soumis à une exposition au fluorure (Ahada et Suthar 2019). Par conséquent, les programmes efficaces de santé environnementale et de gestion des risques visant à réduire l'exposition au fluorure dans l'eau potable devraient principalement se concentrer sur les enfants. Dans d'autres parties du Sahara algérien, des résultats similaires ont également été rapportés à Ouargla par certaines études antérieures (Nezli et al. 2009 ; Kerdoun et al. 2022 ; Nabbouet al. 2019) et à Tindouf, les résidents algériens utilisant des niveaux élevés de fluorure dans les eaux souterraines peuvent souffrir de fluorose dentaire endémique ainsi que de fluorose squelettique, ce qui peut affecter négativement la qualité de vie.

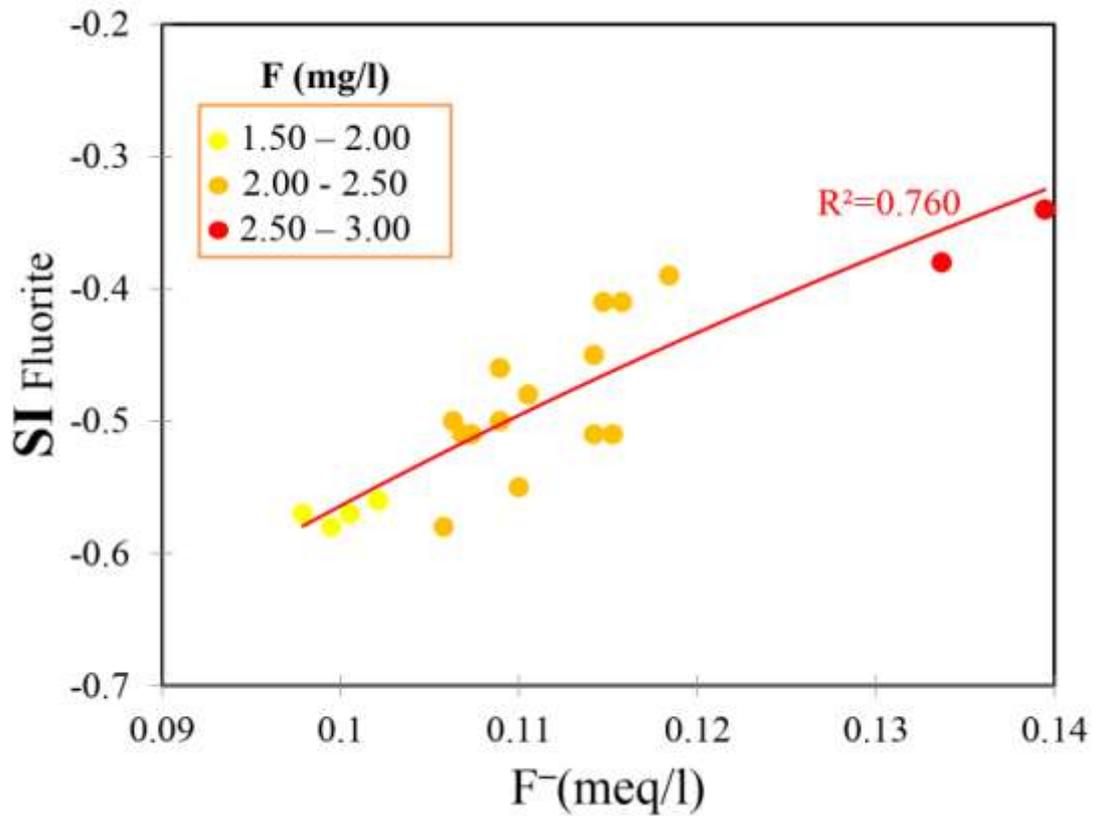


Figure 78: Diagrammes de fluorite (SI) vs F-

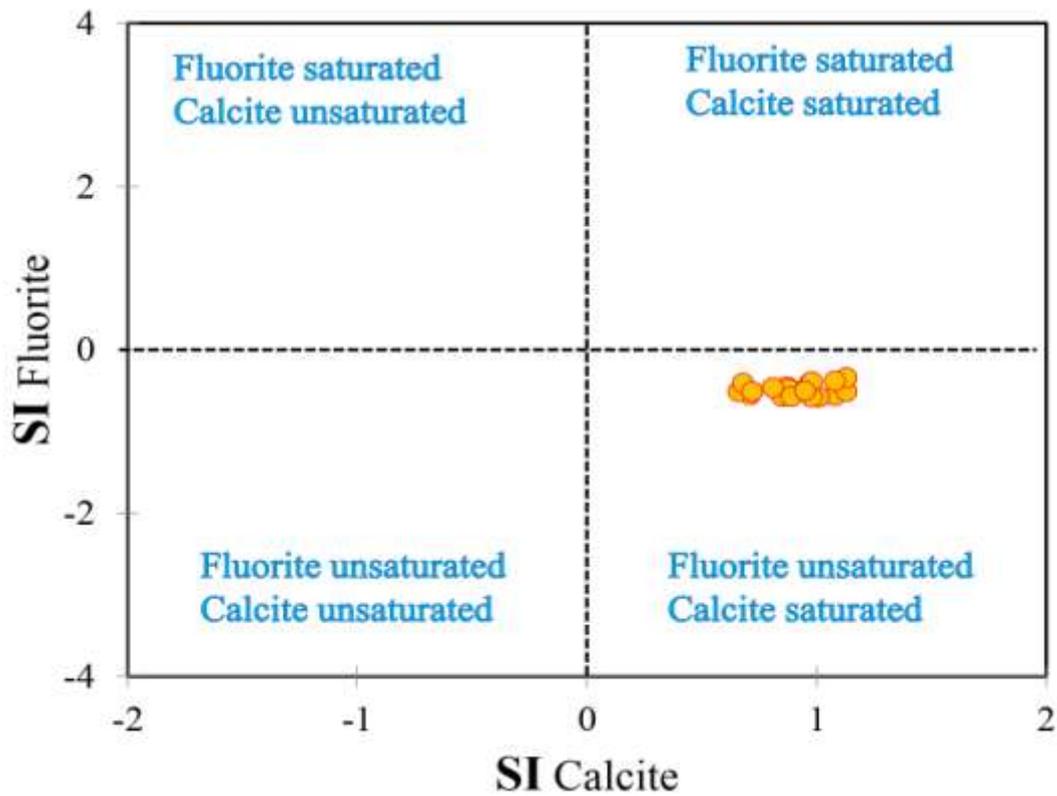


Figure 79: Diagrammes de fluorite (SI)vs calcite

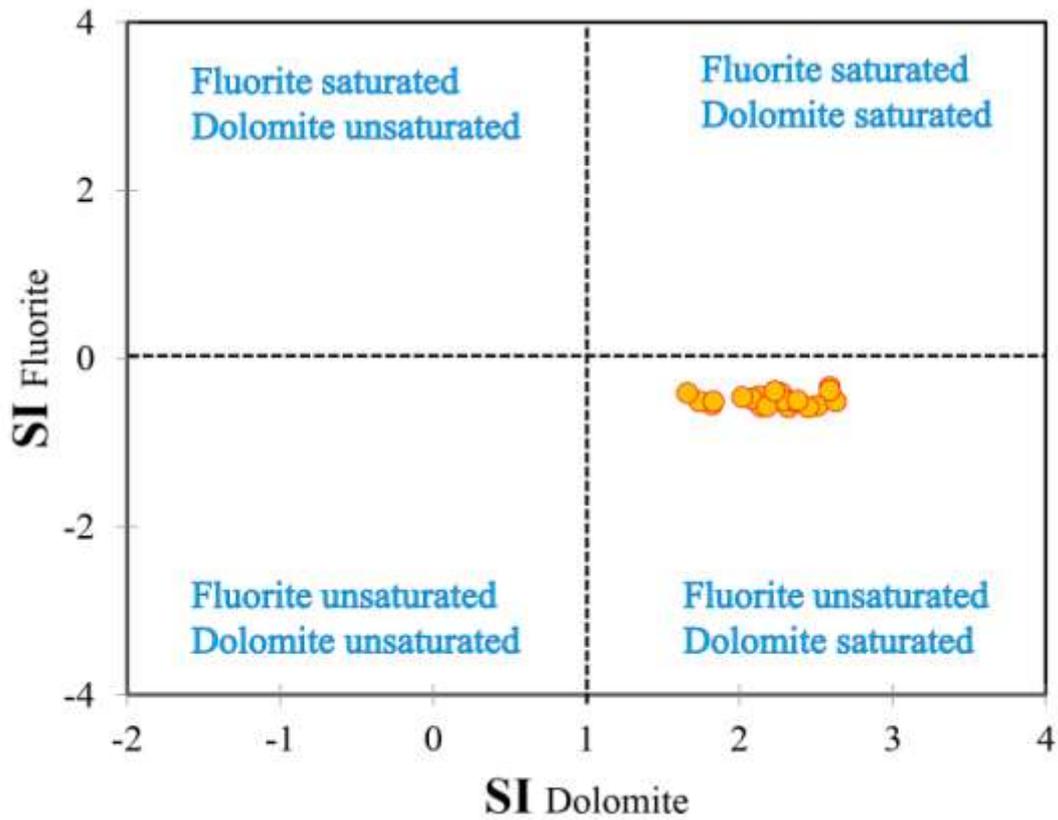


Figure 80: Diagrammes de fluorite (SI)vs dolomite (SI)

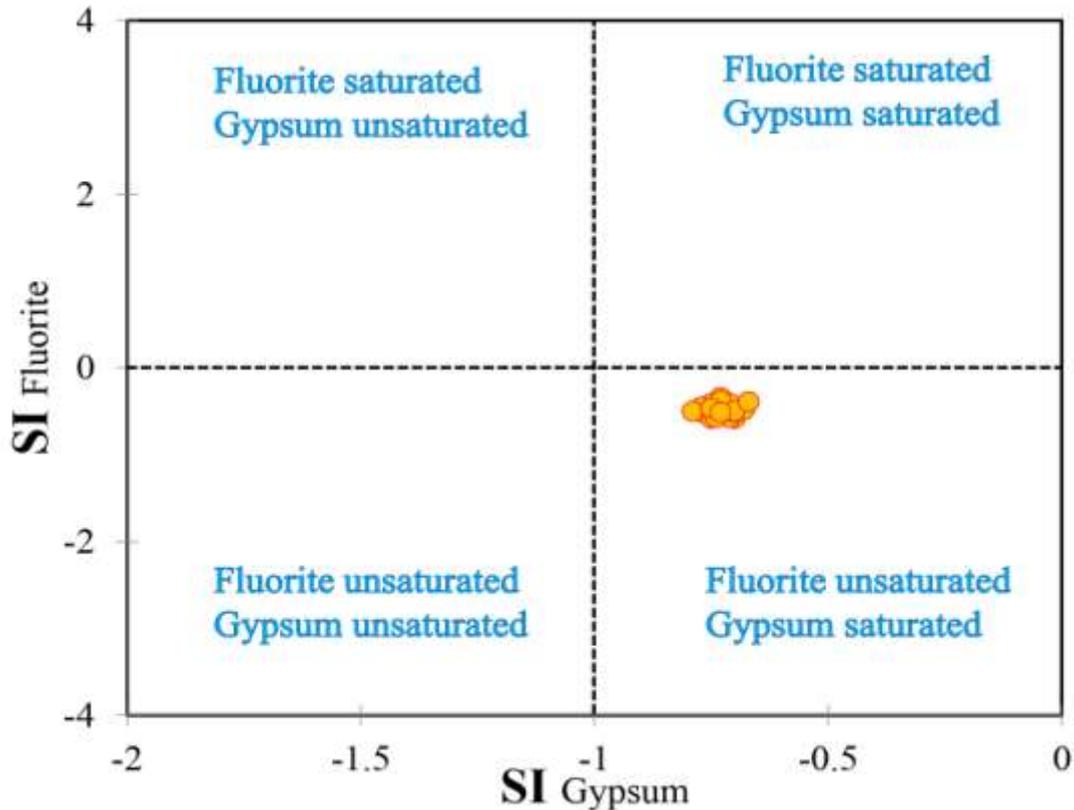


Figure 81: Diagrammes de fluorite (SI)vs gypse (SI).

Pour une meilleure compréhension de la distribution spatiale des zones à haut risque de fluorure de l'aquifère CT à travers Oued Souf, le logiciel ArcGIS a été utilisé pour effectuer une interpolation inverse pondérée par la distance, comme le montre la (Figure 89-92). La variation spatiale du risque sanitaire non cancérigène (HQ) dû à la teneur en fluorure dans les eaux souterraines pour les enfants, les hommes et les femmes est présentée dans la (Figure 89-92), qui montre les régions vulnérables dans cette zone aride.

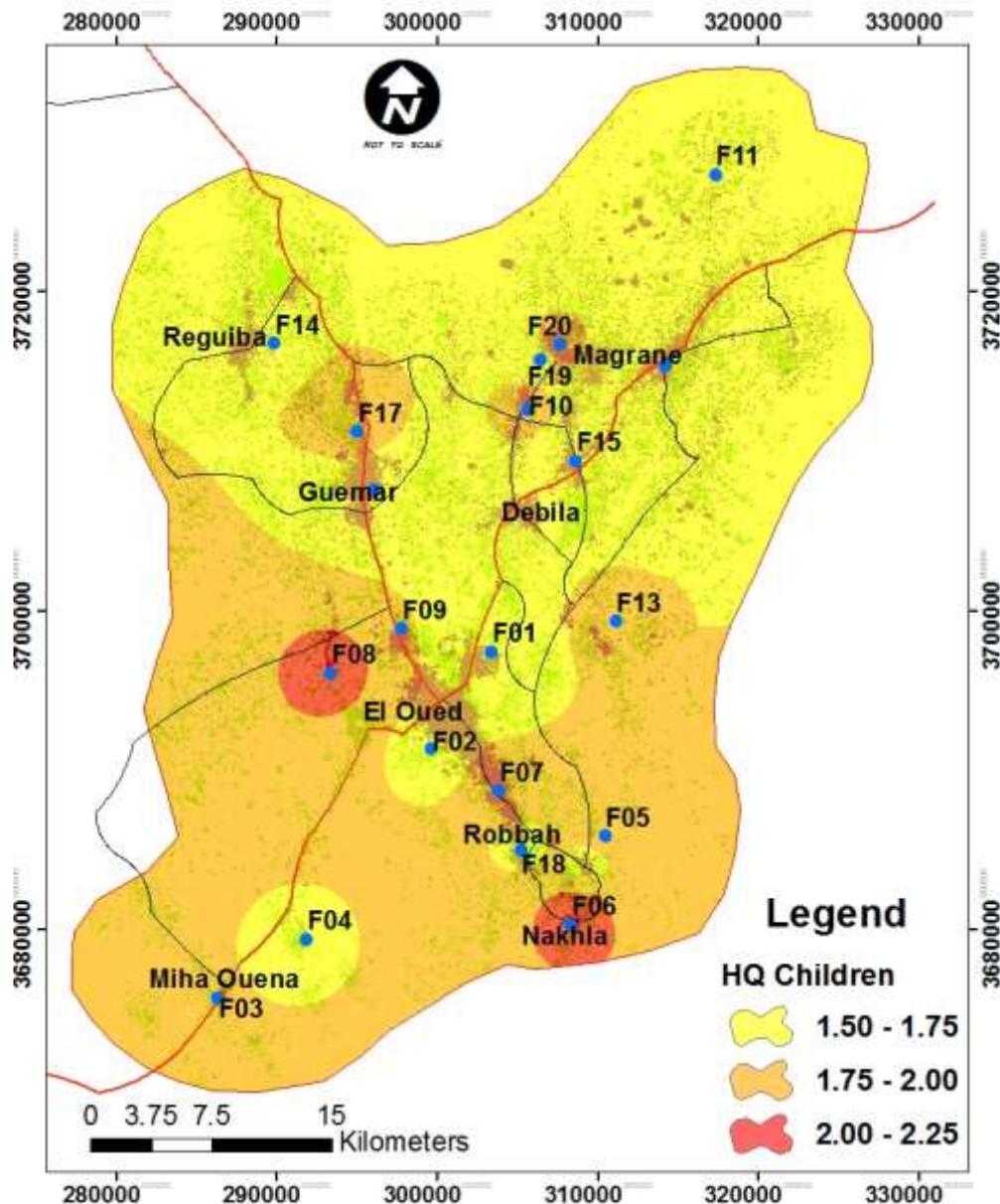


Figure 82: Distribution spatiale du risque pour la santé dû à la contamination par le fluorure dans les eaux souterraines (Enfants)

La variation spatiale du risque dans les échantillons d'eau souterraine à travers la zone d'étude montre l'ordre de dominance enfants > femmes > hommes, avec un accent particulier sur les enfants, qui sont plus vulnérables. Dans certaines régions, telles que la Miha Ouensa au sud-

ouest, Ourmes au centre, et vers le sud-est de Nakhla. Le centre, l'ouest et surtout le sud de notre zone d'étude, le niveau élevé de risque sanitaire non cancérigène des enfants est significativement plus élevé que dans les autres régions (Figure 89). En outre, on a observé que de nombreuses petites zones présentant un QD relativement élevé étaient disséminées dans la zone d'étude.

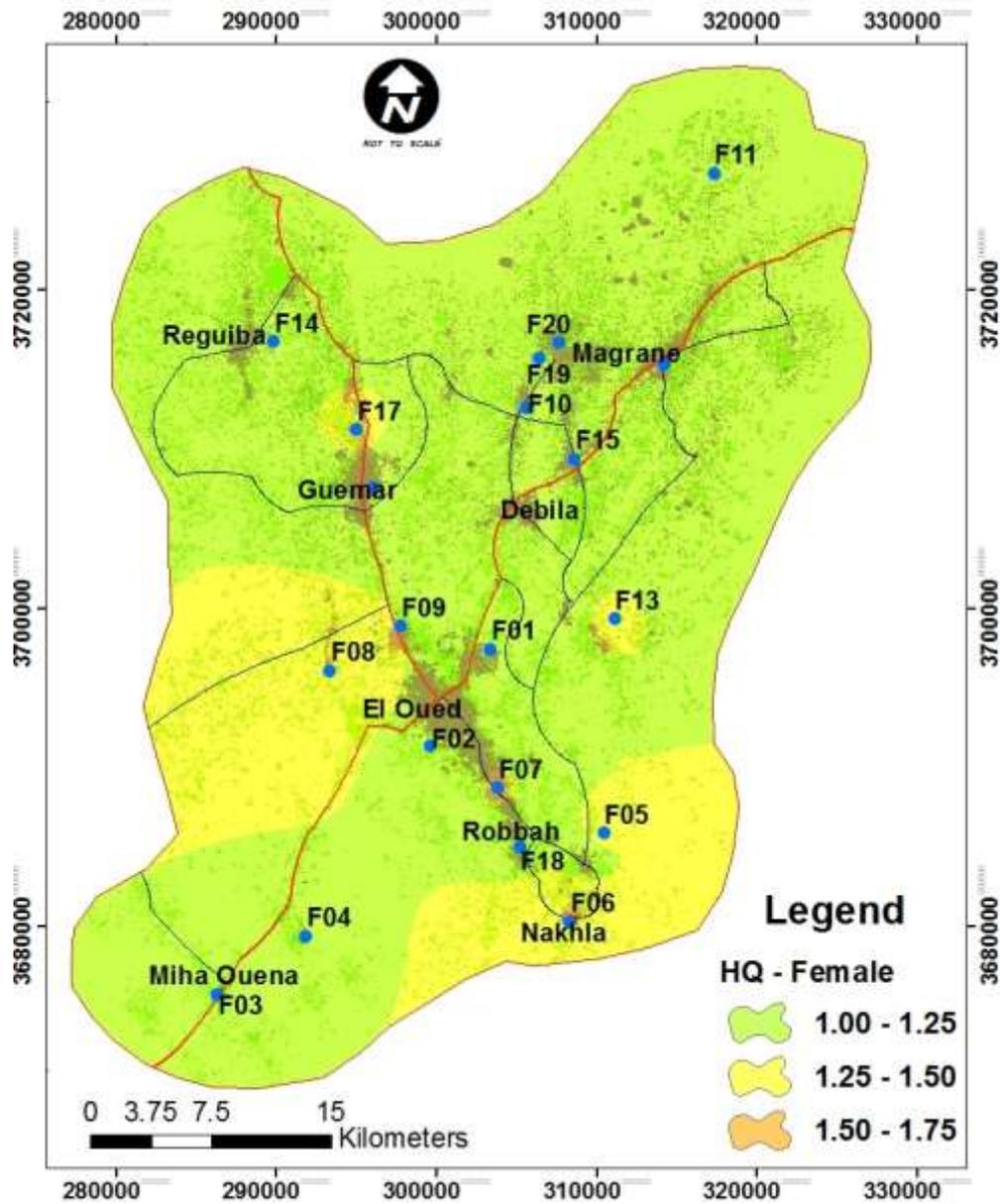


Figure 83: Distribution spatiale du risque pour la santé dû à la contamination par le fluorure dans les eaux souterraines (Femmes)

Le traitement des eaux souterraines est nécessaire pour réduire la concentration de fluorure pour la consommation ou d'autres usages domestiques. Un projet de défluorisation répondant

aux conditions environnementales devrait être réalisé pour améliorer la qualité des eaux souterraines pour les zones où la concentration de fluorure est endémique (Xiao et al. 2015 ; Xu et al. 2019). L'utilisation de sources à faible teneur en fluorure, telles que l'aquifère continental intercalaire, est recommandée pour Oued Souf où les puits d'eau souterraine du CT présentent des concentrations élevées de fluorure.

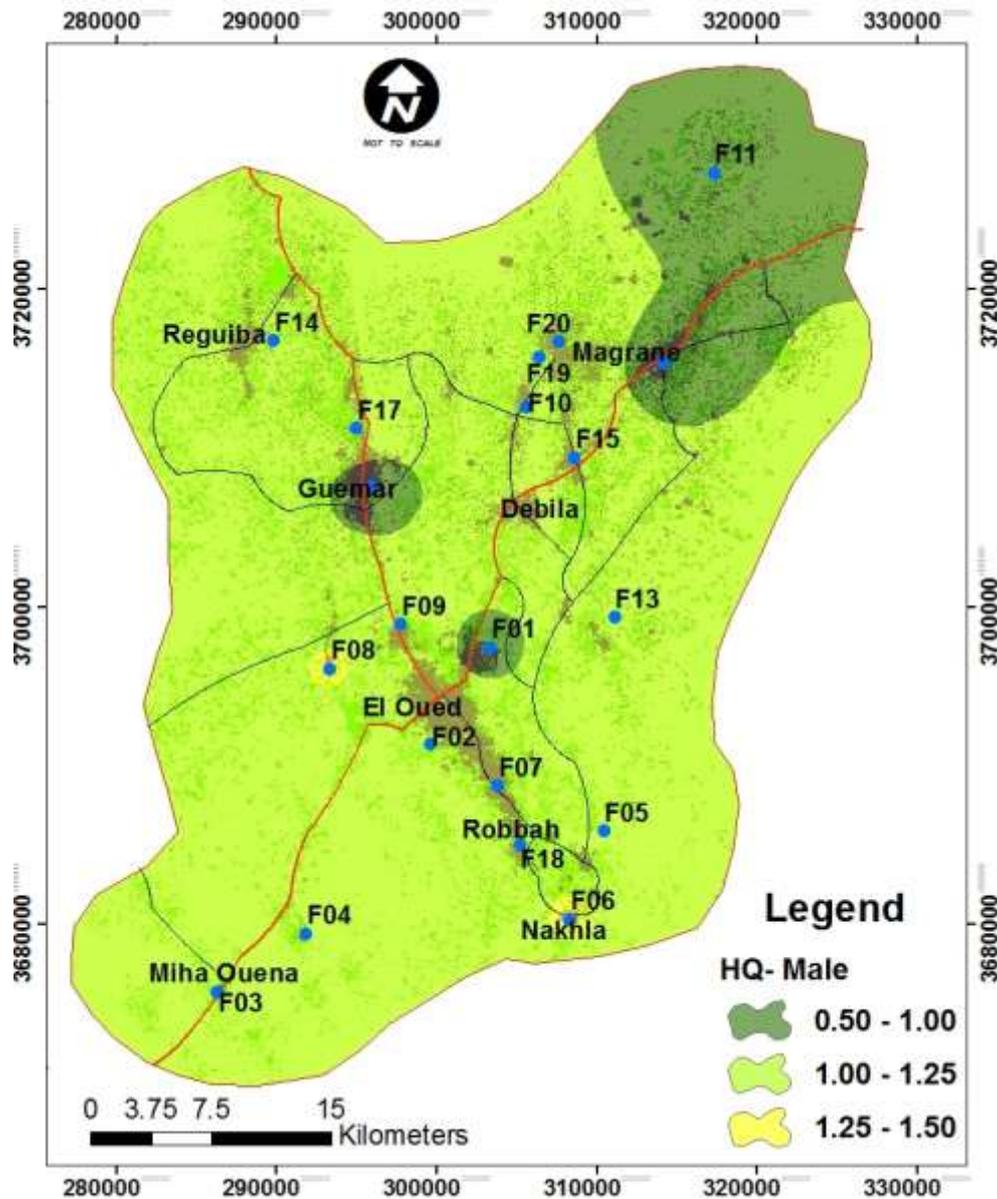


Figure 84: Distribution spatiale du risque pour la santé dû à la contamination par le fluorure dans les eaux souterraines (Hommes)

9. Conclusion

L'étude hydrochimique de la nappe du complexe terminal d'Oued Souf montre la dominance des faciès évaporitiques (CaMg-Cl et Na-Cl). Le diagnostic de (SAR), (IQE), le diagramme de Richard, le diagramme de Wilcox, (EC), (PI) et (MR), indiquent que ces eaux sont impropres à l'irrigation. La chimie de l'eau de l'aquifère Complexe Terminal est principalement contrôlée par la dissolution des roches évaporitiques du Mio-Pliocène (NaCl, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et MgSO_4) et les activités anthropogéniques (NO_3^- , K^+) proviennent probablement de l'infiltration des eaux de surface telles que les eaux d'irrigation de l'aquifère semi-confiné du Mio-Pliocène.

La concentration de F^- dans les échantillons de l'aquifère CT varie de 1,86 à 2,65 mg/L, avec une moyenne de 2,12 mg/L. Na^+ était le cation dominant et a montré une forte corrélation positive avec F^- . Les valeurs élevées de Na et les faibles concentrations de Ca^{2+} augmentent la solubilité des minéraux contenant du F^- , dans des conditions alcalines, le processus d'échange cationique direct, il est favorable à la dissolution de CaF_2 résultant en la dissolution de F^- dans l'aquifère CT. Tous les échantillons sont non saturés par rapport à la fluorine, donc plus de F^- peut être dissous dans les eaux souterraines. Le risque cancérigène de l'apport de fluorure par l'ingestion d'eau potable est modéré à élevé pour les adultes, mais élevé pour les enfants dans la région d'Oued Souf. Il dépend principalement du poids corporel et des activités métaboliques de l'individu soumis à l'exposition au fluorure. Un programme de gestion axé sur l'amélioration du pompage de l'eau à long terme est nécessaire pour l'exploitation durable de cet aquifère, en particulier dans les zones où l'on observe des salinités élevées qui visera à maintenir l'équilibre entre la disponibilité de l'eau douce et les besoins humains. Cependant, l'utilisation de sources de fluorure à faible concentration telles que les puits de l'aquifère Continental Intercalaire est recommandée pour la région d'Oued Souf où les eaux de l'aquifère CT ont une concentration élevée en fluorure.

Chapitre IV
Gestion de l'aquifère
de Complexe Terminal

1. Introduction :

La zone d'Oued souf est une zone de développement rapide et d'énormes activités de construction, ainsi qu'une urbanisation, agriculture et industrialisation rapides. Cette région est une bonne illustration du fort impact du stress naturel et anthropique sur les ressources en eau, induisant d'importantes perturbations des eaux souterraines sur de larges zones. En raison des faibles précipitations (150 mm par an) et de la faible quantité d'eau de surface permanente. La gestion des ressources en eau doit combiner une série de sujets complexes pour promouvoir le contrôle de l'existence de la ressource en eau, sa variabilité dans le temps et l'espace, et la capacité à quantifier sa disponibilité pour sa gestion durable et son allocation efficace entre les utilisateurs concurrents afin de réduire le déficit de la demande en eau.

Cette étude applique le modèle (WEAP) pour fournir une estimation quantitative des ressources en eau disponibles, simuler la demande en eau non satisfaite sous différents scénarios futurs, et le bilan hydrique de l'aquifère CT dans le but de fournir des recommandations techniques sur la gestion intégrée durable des ressources en eau et le développement en utilisant des scénarios socio-économiques et d'utilisation des terres ainsi que des scénarios de changement climatique.

2. Application du modèle WEAP dans la région d'Oued Souf

2.1. Acquisition du logiciel WEAP 21

Le logiciel WEAP (Water Evaluation And Planning) est disponible pour un téléchargement gratuit à l'adresse suivante : <http://www.weap21.org>. Pour activer le modèle, il est nécessaire d'avoir une licence valable avec un nom d'utilisateur ainsi que le code d'enregistrement.

Avec un identifiant et un code d'enregistrement. Nous avons bénéficié d'une licence gratuite pour le logiciel WEAP. Les informations sont présentées dans le figure 92.

2.2. Fonctionnement du logiciel

Le modèle WEAP développé par le Stockholm Environment Institute (SEI), et se distingue par son approche intégrée de la simulation des systèmes d'eau et par son orientation stratégique. Il combine les facteurs bio-physiques influençant l'écoulement de l'eau, tels que le climat, l'hydrologie des eaux souterraines, et la couverture des terres avec des facteurs socio-économiques tels que l'utilisation des terres, les infrastructures, et les priorités de gestion de l'eau. Les données nécessaires dans le WEAP sont la profondeur de la nappe phréatique, le stockage dans les réservoirs, les paramètres hydrologiques, l'utilisation des terres, les

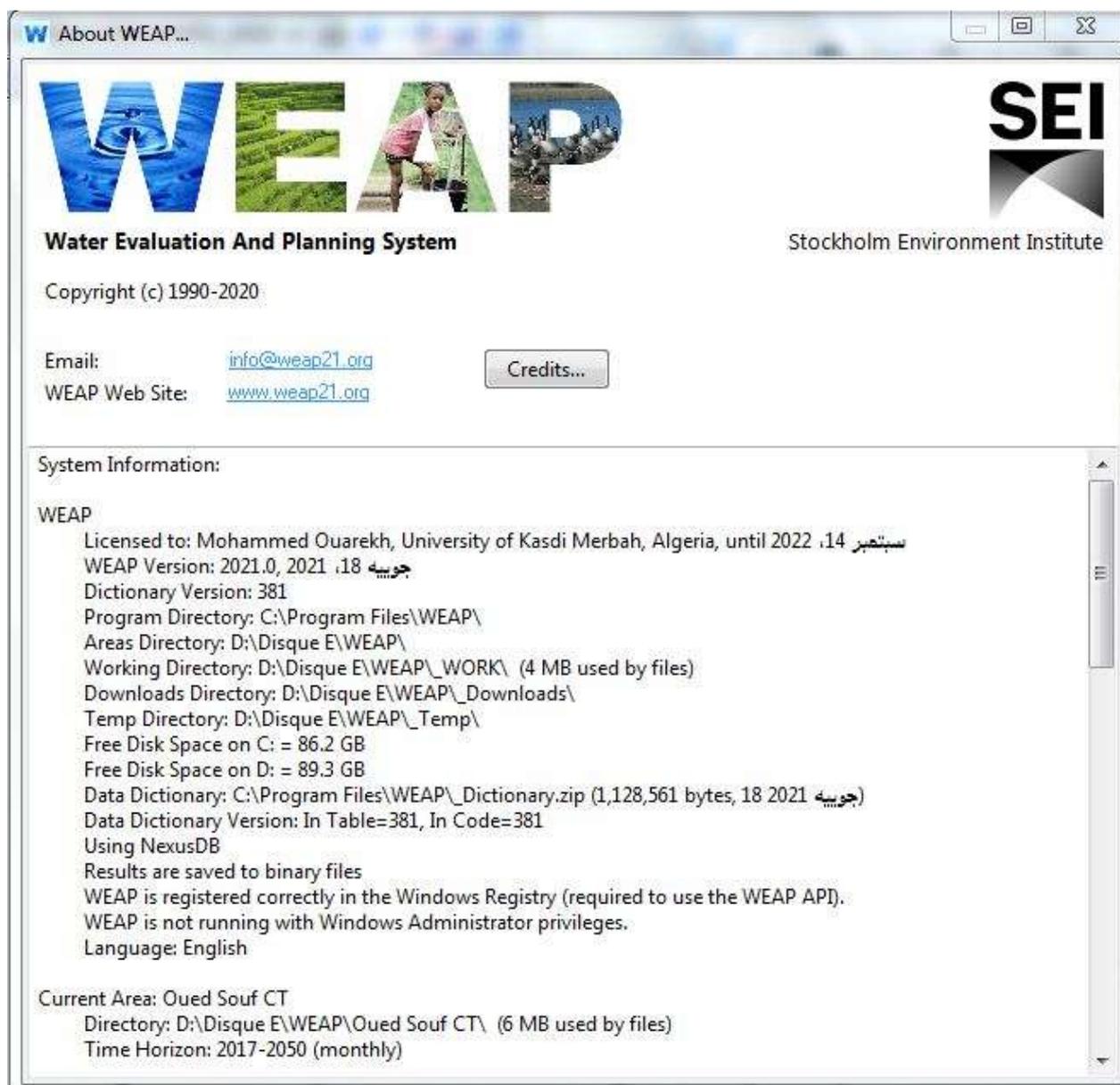


Figure 85. License WEAP acquise pour la présente étude

caractéristiques topographiques et géomorphologiques, les données sur les cultures, les propriétés des sols, les données météorologiques/climatiques, l'irrigation, le rendement de chaque culture, la demande en eau et les détails démographiques ... etc ; c'est un outil de traitement des données qui permet aux gestionnaires de l'eau d'explorer divers scénarios de gestion sur le bassin. Cet outil d'aide à la gestion comprend une base de données (spatiale), un système d'information géographique (SIG).

2.3. La création de la région d'étude

Nous avons inséré la carte de la division administrative de la zone d'étude comme couche de fond dans le fichier Shape et au-dessus de celle-ci, nous avons ajouté la carte d'occupation

des sols du Oued Souf en format de fichier Shape. La carte du nouveau projet nommé "CT oued souf" a été créée (Figure 93).

2.4. Analyse et traitement des données nécessaires

WEAP construit un réseau qui consiste en ressources en eau et sites de demande connectés par des liens qui délivrent l'eau du nœud de ressource au site de demande. Les liens de retour qui renvoient les eaux usées du site de demande aux WWTPs sont une partie importante du réseau WEAP. Les eaux usées traitées sont ensuite transférées des STEP vers le site de réutilisation ou vers le cours d'eau de rejet final. La représentation WEAP de la région Oued Souf est illustrée par la Figure 93.

2.4.1. Compte actuel

Dans notre étude, les données de 2017 considérées comme l'année de référence au regard de l'exhaustivité des informations disponibles utilisées pour l'ensemble des ressources en eau et la demande en eau par commune en tant qu'unité. Pour cela, nous avons d'une part pour chaque commune un site de demande d'eau potable, un site de demande d'eau agricole et un site de demande d'eau industrielle s'il existe et d'autre part des éléments d'approvisionnement en eau comme les eaux souterraines extraites des aquifères .

2.5. Sites des demandes

Comme résultat de cette procédure, les sites de demande ont été créés dans le WEAP pour l'analyse de la demande d'eau souterraine, le calcul du taux de prélèvement et du volume. Notez que chaque nœud de demande représente un groupe spécifique d'utilisateurs d'eau. Les nœuds de demande dans cette étude ont représenté la demande d'irrigation, la demande domestique pour l'utilisation de l'eau urbaine à partir des eaux souterraines. Comme le montre la Figure 93, tous les nœuds de demande d'eau dépendent de l'eau provenant des ressources en eau souterraine

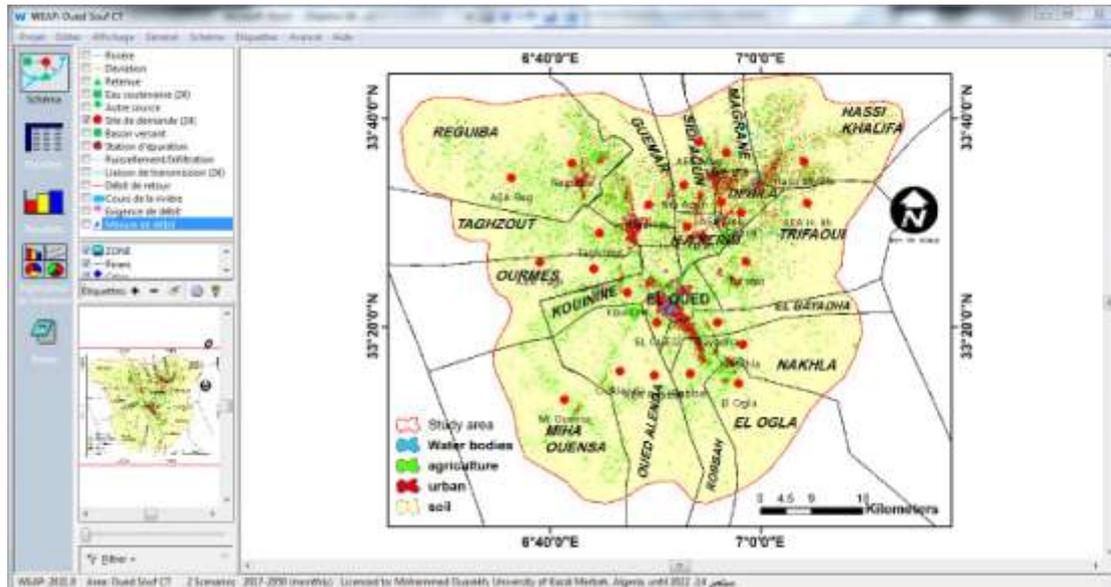


Figure 86: Sites de demandes dans les communes de la vallée de Oued Souf

2.5.1. Demande d'eau domestique

La demande en eau domestique est principalement fonction de la population et du quota d'eau. La demande en eau urbaine fournie par l'ADE est de 150 L/personne/jour. La croissance démographique et le développement économique sont des déterminants majeurs de la demande en eau future concernant le niveau d'activité et le taux d'utilisation de l'eau, qui dépend du type d'accès. On distingue deux sources distinctes : l'eau de l'aquifère CT et l'eau de l'aquifère CI. La population dans la zone d'étude en 2017 était d'environ 604000 habitants et la projection démographique a été estimée à près de 1 millions de personnes en 2035 et 1,60 millions de personnes en 2050. Cependant, comme indiqué dans le tableau 1, la croissance de la population de la ville d'Oued Souf augmente d'année en année (ONS 2017) (Tableau 12). Le graphique de projection de la population a été utilisé lors de la formulation du scénario dans le logiciel WEAP ainsi que la population totale pour l'année 2017 ont été utilisés comme compte actuel.

Tableau 12. Projection de la population totale de la zone d'étude . -
Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Population	603675	659689	764903	887001	1028713	1193208	1384174	1605899

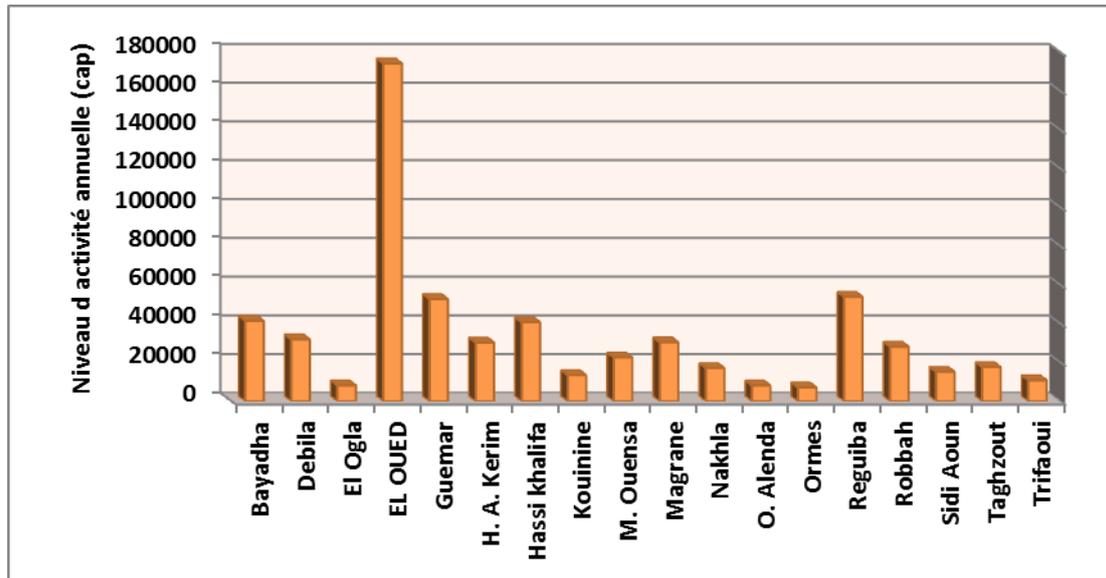


Figure 87. Niveau d'activité annuelle des sites des demandes domestiques.

-Compte d'état actuel, 2017-

2.5.2. Superficie agricole et besoins en irrigation

Selon les statistiques de la DSA, quatre catégories de cultures différentes ont été simulées, à savoir la pomme de terre, les palmiers dattiers, le maraichage, les céréales. Pour l'eau d'irrigation, le modèle de la FAO (Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture) a été utilisé pour simuler la consommation d'eau absorbée par les différentes cultures à partir du sol, puis le calcul des besoins réels en eau d'irrigation en fonction du coefficient d'irrigation. L'efficacité de l'irrigation a été fixée à 85 %, ce qui représente l'irrigation par inondation, et signifie que seulement 85 % de l'eau d'irrigation est disponible pour les cultures et que 15 % ne peuvent pas être utilisés par les cultures. Les besoins en débit déterminent l'ordre de passage des oasis pour recevoir l'eau d'irrigation.

3. Les ressources en eau

3.1. La nappe phréatique

La nappe phréatique est la première réserve d'eau d'irrigation avec un potentiel de 0,13 Millions Hm³ (DHW ELOUD, Khechana). Cet aquifère a une profondeur d'eau libre entre 1 et 60 mètres contenue dans des sables fins qui sont localement intercalés avec des argiles sableuses et des lentilles de gypse (Bouselsal et Kherici 2014 ; Guendouz et al. 2006). Le rendement fiable de l'aquifère phréatique est estimé à 88 MCM/an (ARD 2001). L'eau est extraite de plus de 38980 puits d'extraction dans l'aquifère phréatique à des fins agricoles. La surface agricole est d'environ 59935 hectares en 2009 pour atteindre 110975 hectares en 2019 (DSA 2019). L'agriculture, utilise plus de 71,21% du total des ressources en eau mobilisées, passant de 3512124 m³/jour en 2009 à 4588776 m³/jour en 2019 (Figure 95).

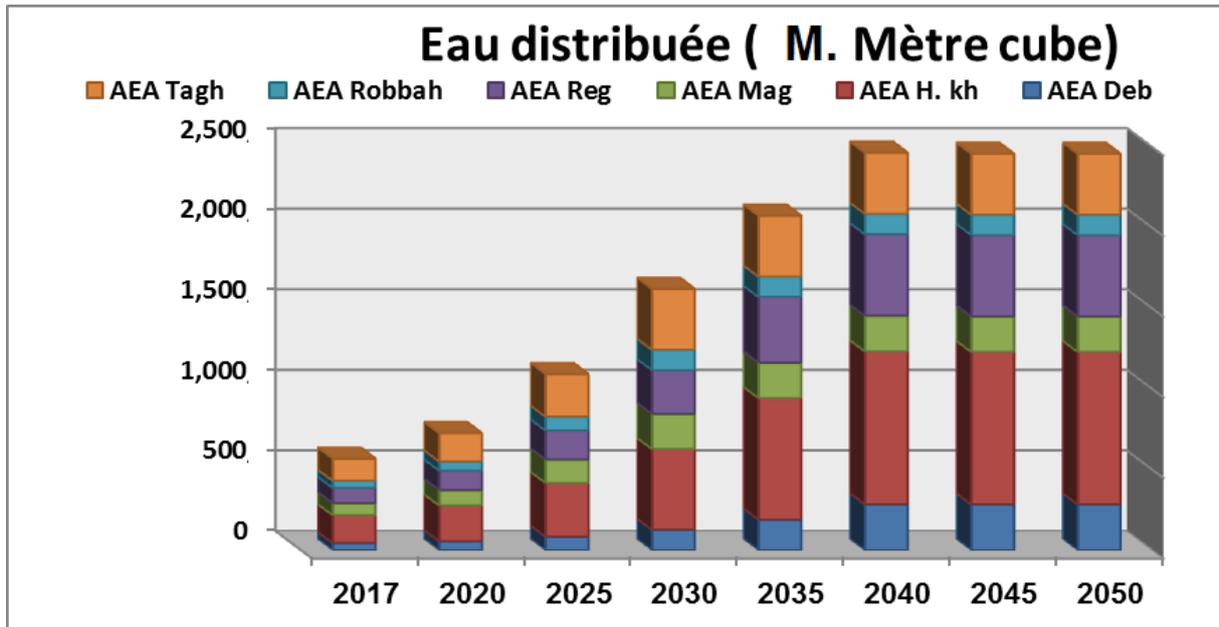


Figure 88. Prélèvement maximal des nappes phréatique

3.2. L'aquifère du Complexe Terminale

L'aquifère du CT est un aquifère multicouche captif, constitué des sables du Mio-Pliocène, des sables, grès et graviers du Pontien et des calcaires et dolomies du Sénonien Eocène. Ce réservoir est situé entre 100 et 600 m de profondeur avec une épaisseur de 300 m. Dans la partie nord d'El-Oued, certains puits sont artésiens (ANRH 1999). A cause de l'exploitation intensive de l'aquifère, les eaux artésiennes ont totalement disparu. Le CT est exploité par 203 puits dans toute la vallée d'El-Oued et 84 puits dans la zone d'étude avec un potentiel de 2,7 milliards de Hm³ et un volume mobilisable de 1309190 m³/j qui atteint 1564819,2 m³/j en 2019 pour l'alimentation en eau potable et industrielle (Figure 96). La population dans la zone d'étude passe de 718460 en 2011 à 900 000 en 2019. (DHW ELOUD, Khechana).

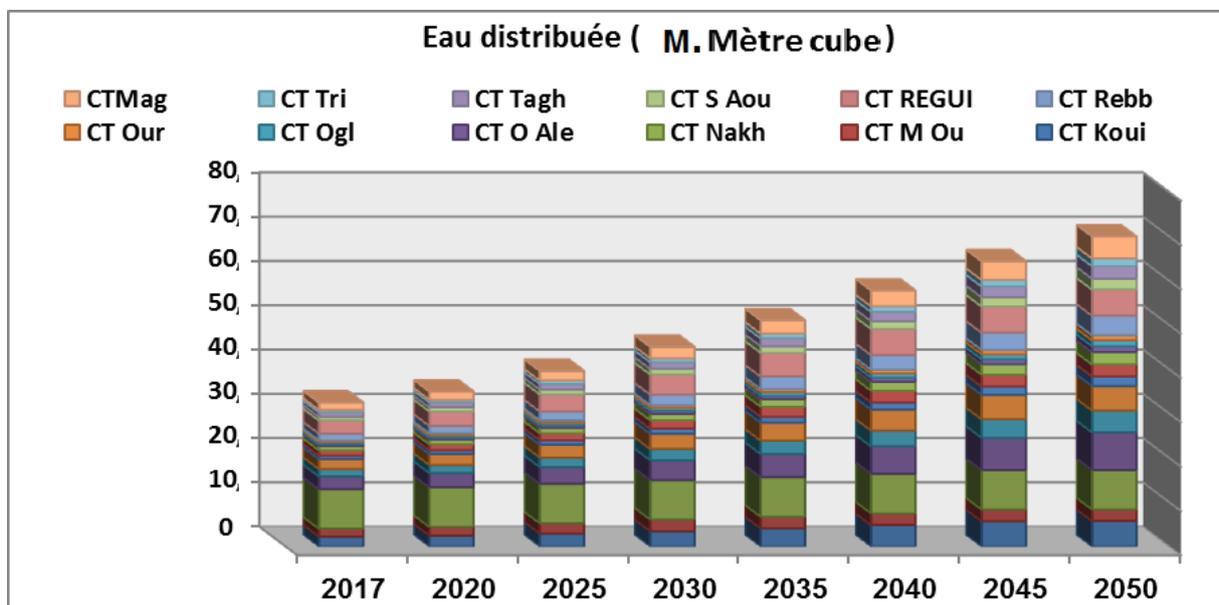


Figure 89. Prélèvement maximal de l'aquifère CT

3.3. L'aquifère du Continental Intercalaire

L'aquifère le plus profond appelé aquifère Continental Intercalaire est contenu dans les formations du Crétacé inférieur, avec une importante variation latérale d'épaisseur et de lithologie qui s'étend sur une surface de $\sim 600\,000\text{ km}^2$. Localement, sa profondeur atteint 2 000 m et son épaisseur varie de 200 à 400 m (Bel et Demargne 1966 ; UNESCO 1972) avec un potentiel de 2,2 Milliards Hm³. Dans la zone d'étude, quatre puits exploitent l'aquifère CI à 1850 m de profondeur, avec une pression d'environ 22 à 23 bars en tête de puits et un rendement de 222 l/s pour l'alimentation en eau potable.

4. Création et analyse des scénarios

Une année est choisie pour les conditions actuelles comme année de base du modèle (Figure 97). Les conditions actuelles ou les conditions du système existant sans appliquer les plans et les politiques futures comme scénarios de référence.

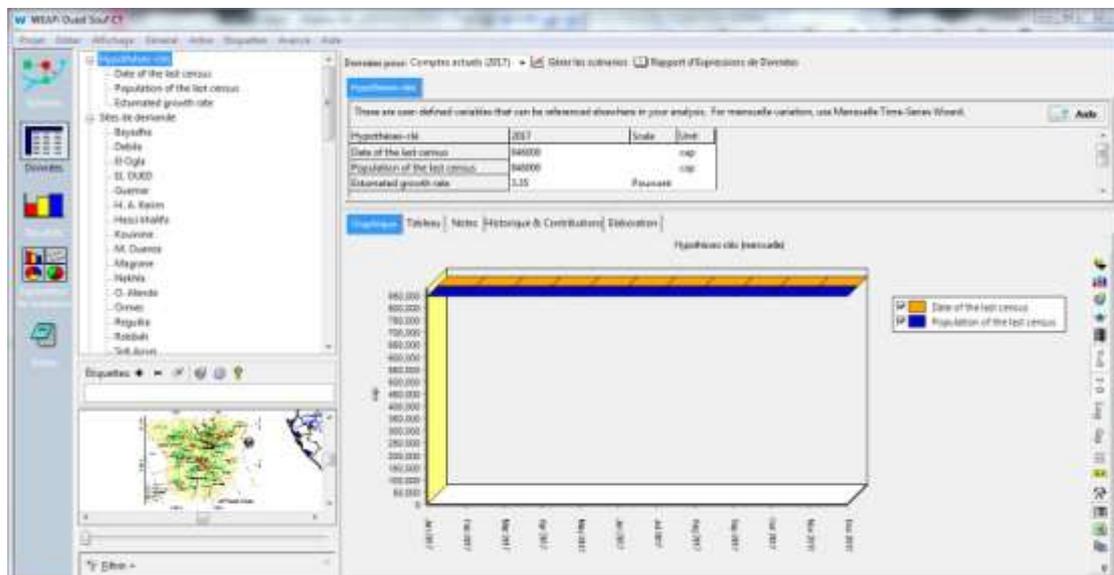


Figure 90. Fenêtre montrant les hypothèses clés et le compte courant.

Le scénario de référence (2018- 2050)

De nombreuses variations peuvent être créées et simulées en introduisant des changements dans le compte courant pour évaluer les effets causés par le changement des règles et des technologies de la gestion de l'eau. Après la mise en œuvre de chaque scénario, le modèle WEAP nous a permis d'analyser les demandes en eau non satisfaites, la demande en eau, l'eau livrée et les besoins en approvisionnement pour chaque scénario. Les besoins d'approvisionnement comprennent la demande en eau et les pertes. Après chaque scénario, ces paramètres sont comparés à ceux obtenus à partir du scénario de référence. Ainsi, l'analyse de

scénarios est utilisée dans cette étude pour explorer l'offre et la demande en eau de la ville d'Oued Souf afin de soutenir l'objectif de durabilité de l'eau. Pour ce faire, trois groupes de scénarios sont développés, à savoir : **Le scénario de référence (2018-2050)**, **Scénarios de fort accroissement de la population (5%)** , **Scénarios de forte croissance des superficies irriguées**.

4.1. Scénario de référence (2018-2050)

Il s'agit du scénario " activités habituelles " dans lequel toutes les données de base seront introduites pour simuler la même évolution du système sans intervention et traduit une projection des tendances courantes sans changements majeurs. Le scénario de référence couvre la période 2018- 2050 (Figure 98); et constitue la base de référence pour l'évaluation des scénarios. Il utilise les tendances actuelles du système d'eau étudié. Le but de ce scénario est d'approcher les réalités actuelles et futures (sans les modifier).

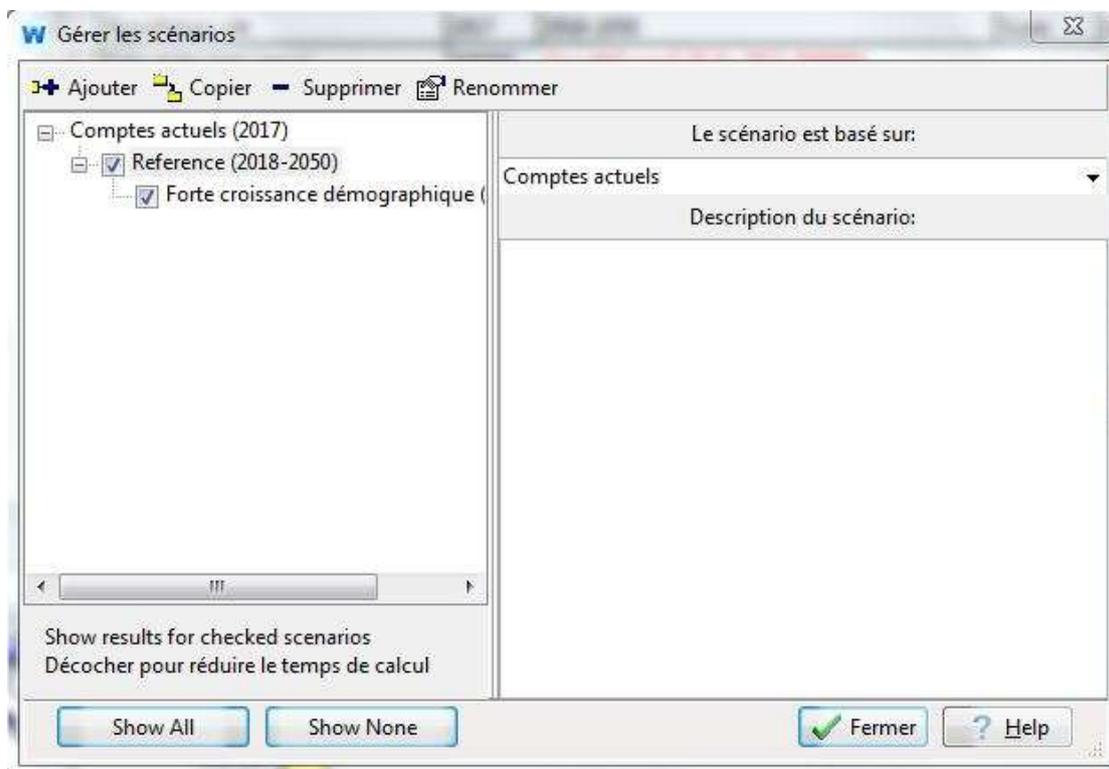


Figure 91. Création des scénarios.

4.1.1. Projection d'accroissement de la population

la zone d'étude s'inscrit dans la wilaya de Oued Souf, dont la moyenne globale du taux de croissance de la population est d'environ 3,35% selon les données de la ONS 2017. La population dans la zone d'étude en 2017 était d'environ 603675 habitants et la projection démographique a été estimée à près de 1,60 personnes en 2035 et 1,60 millions de personnes

en 2050 (Figure 99). Cependant, comme indiqué dans le tableau 13, la croissance de la population de la ville d'Oued Souf augmente d'une année à l'autre (ONS 2017). Le graphique de projection de la population a été utilisé lors de la formulation du scénario dans le logiciel WEAP ainsi que la population totale pour l'année 2017 ont été utilisés comme compte actuel (Tableau 13).

Tableau 13. Projection de la population totale

Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Population	603675	659689	764903	887001	1028713	1193208	1384174	1605899

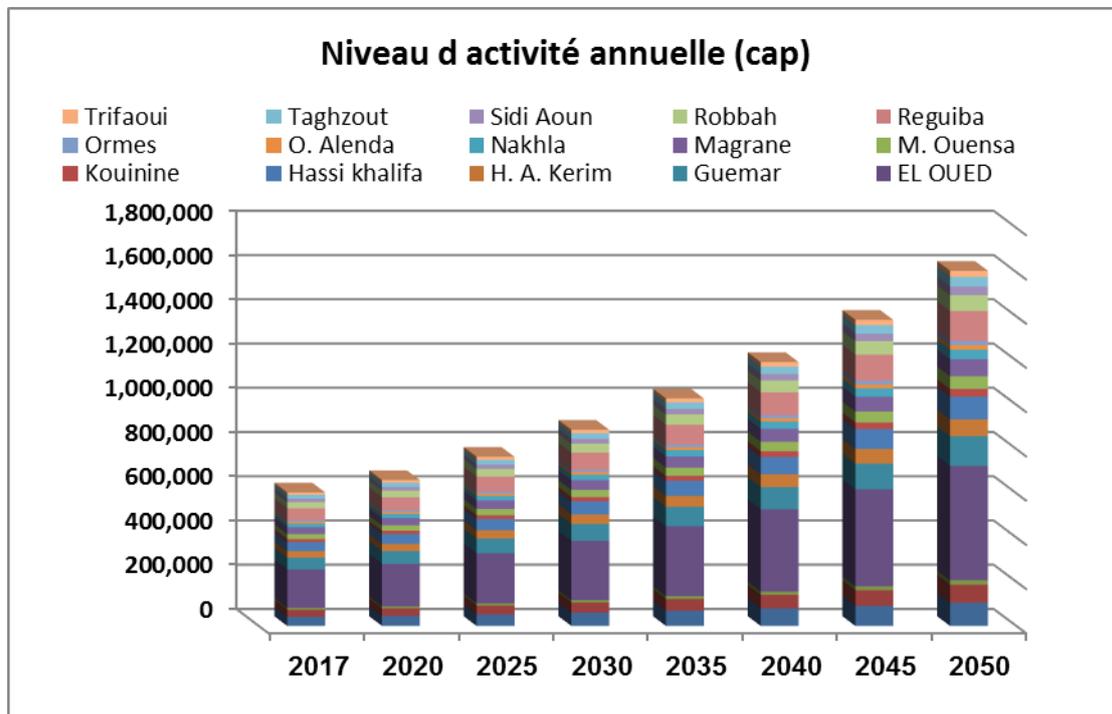


Figure 92. Evolution de la population dans la zone d'étude
Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)

4.1.2. Demande en eau domestique

Elle regroupe les résultats des demandes en eau des agglomérations. Avec la croissance démographique de la région d'Oued Souf, les besoins en eau potable augmentent. La demande en eau potable connaît une augmentation régulière entre 2018 et 2050 (Figure 100). Le tableau 14 présente l'évolution de la demande en eau parallèlement à la croissance démographique, selon la population, sur la base des dotations moyennes proposées. L'évolution de la demande

en eau pour le scénario de base augmente de 33 millions de m³ en 2017 à 49 millions de m³ en 2030, pour atteindre 87 millions de m³ en 2050.

Tableau 14. Evolution de la demande en eau domestique -

Scénario 1 : Scénario de référence (2011-2030)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Population	603675	659689	764903	887001	1028713	1193208	1384174	1605899
Demandes en eau (Mm3)	33	36	42	49	56	65	75	87

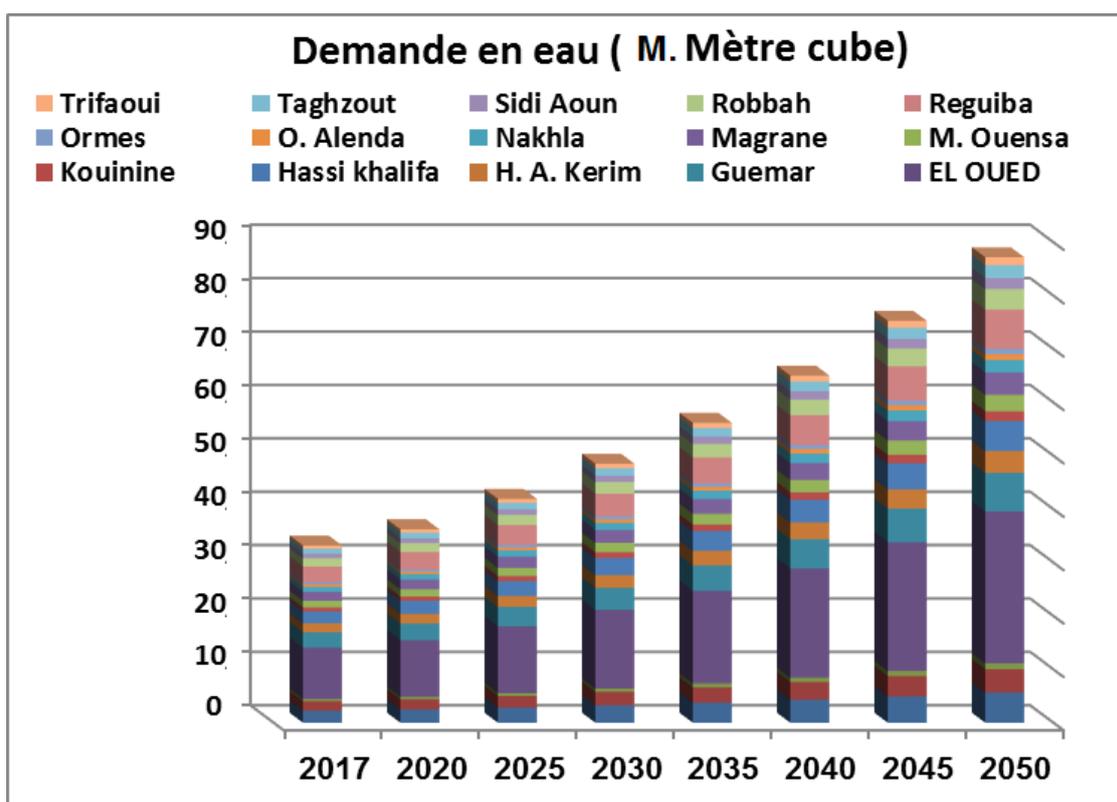


Figure 93. Evolution de la demande en eau domestique dans la zone d'étude - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)

4.1.3. Projection d'augmentation des superficies irriguées

Tous les paramètres sont maintenus constants excepté la surface du secteur irrigué. On considère que la superficie irriguée évolue à un taux de 8 % entre 2018 et 2050, soit le taux adopté par la DSA . Cela signifie que la superficie irriguée passera de 59294 ha en 2017 à 171648 ha en 2030 pour atteindre 880711 ha en 2050 (Figure 101) (Tableau 15).

Tableau 15. Projection des superficies irriguées -

Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Reg	9745	12454	18744	28210	42458	63901	96174	144745
AEA Tagh	14386	18385	27671	41645	62678	94333	141976	213680
AEA Deb	4552	5817	8755	13177	19833	29849	44924	67612
AEA H. kh	18048	23065	34714	52246	78633	118346	178116	268072
AEA Mag	7918	10119	15230	22922	34498	51921	78143	117608
AEA Robbah	4645	5936	8934	13447	20238	30459	45842	68994
Total	59294	75778	114048	171648	258337	388808	585174	880711

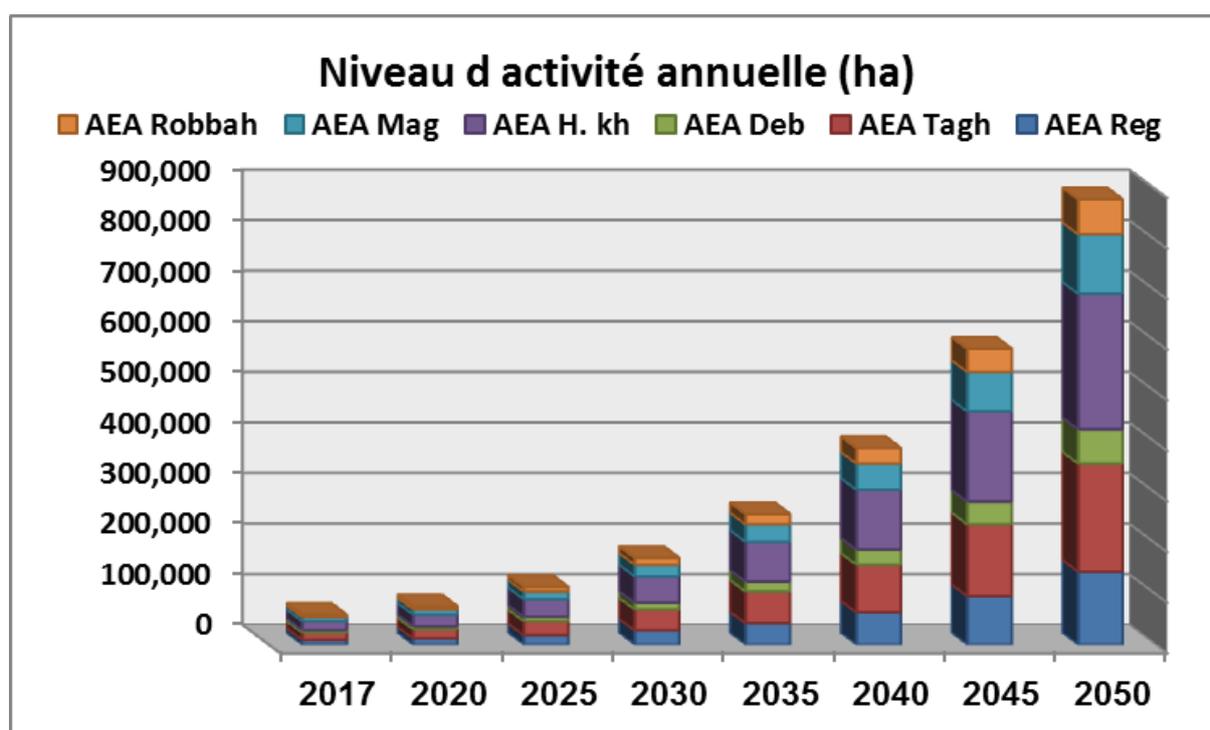


Figure 94. Evolution des superficies irriguées - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Demande en eau d'irrigation

En effet, les besoins en eau à des fins agricole sont généralement évalués grâce à des données relatives aux périmètres irrigués, aux types de cultures et à l'évolution des surfaces (Figure 102), aux pratiques d'irrigation, ainsi qu'à d'autres données. Cependant, lorsqu'il s'agit de la demande en eau agricole, il faut tenir compte du fait que cette demande est dépendante de l'offre. Cette spécificité, simple à considérer à l'échelle nationale (la demande en eau agricole est la différence entre les ressources totales et la demande en eau potable) se complique à l'échelle régionale. Dans la région d'étude, l'agriculture est l'une des plus importantes activités

économiques, elle constitue la principale activité de la région, avec une forte demande en eau d'irrigation. Les périmètres irrigués augmentent durant les années prochaines, il faut donc estimer le taux de demande en eau d'irrigation dans le scénario de référence. La formule utilisée pour calculer les besoins futurs en eau est la suivante :

$$B = B_i (1+Y_i)^n$$

Dont :

B : besoin en eau projeté (m³ /ha/an)

B_i : besoin en eau actuel (m³ /ha/an)

Y_i : seuil de 8 %

n : nombre d'années comptées à partir de l'année de base.

Tableau 16. Evolution de la demande en eau d'irrigation

Scénario 1: Scénario de référence (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Deb	17	22	33	50	75	113	171	257
AEA H. kh	69	88	132	199	299	450	677	1019
AEA Mag	30	38	58	87	131	197	297	447
AEA Reg	37	47	71	107	161	243	365	550
AEA Robbah	18	23	34	51	77	116	174	262
AEA Tagh	55	70	105	158	238	358	540	812
Total	225	288	433	652	982	1477	2224	3347

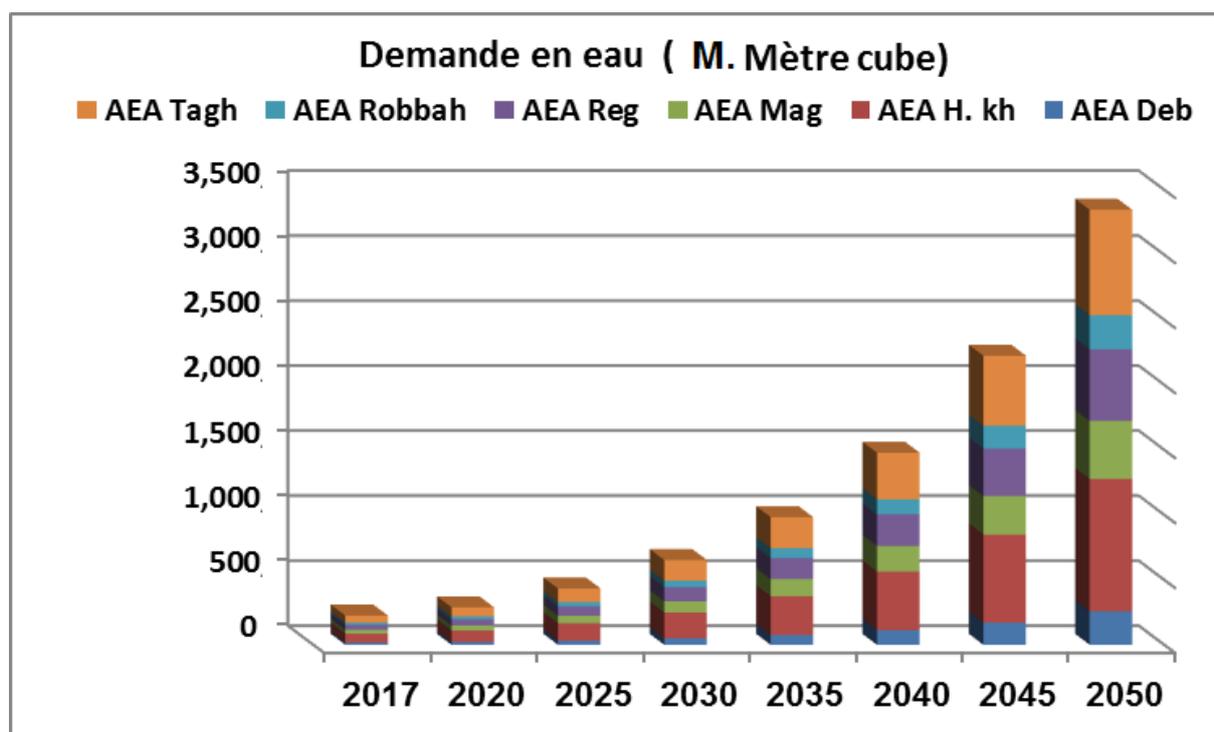


Figure 95. Demande en eau eau d'irrigation - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

4.1.4. Eau distribuée

On constate que le potentiel de la demande en eau n'a pas augmenté parallèlement au potentiel de croissance de l'offre. En effet, le volume des ressources en eau distribuées est d'environ 568 Mm³ en 2017, et passe en 2030 à environ 1621 Mm³ et il atteindra 2459 Mm³ en 2050. (Tableau 17 et Figure 103) Cependant, en raison des pertes de distribution, le volume d'eau nécessaire pour satisfaire les demandes des différents secteurs doit être supérieur à la demande. Ainsi, un manque d'intervention entraînera un déficit ou une demande en eau non satisfaite en 2045 avec un volume de 286 Mm³ et atteindra en 2050 environ 914 Mm³ (Tableau 18 et Figure 104).

Tableau 17. L'eau distribuée - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Deb	44	56	84	126	190	285	284	284
AEA H. kh	173	221	333	501	753	948	946	946
AEA Mag	76	97	146	220	221	221	221	221
AEA Reg	93	119	180	270	407	506	505	505
AEA Robbah	45	57	86	126	126	126	126	126
AEA Tagh	138	176	265	378	378	379	378	378
Total	568	726	1093	1621	2075	2466	2459	2459

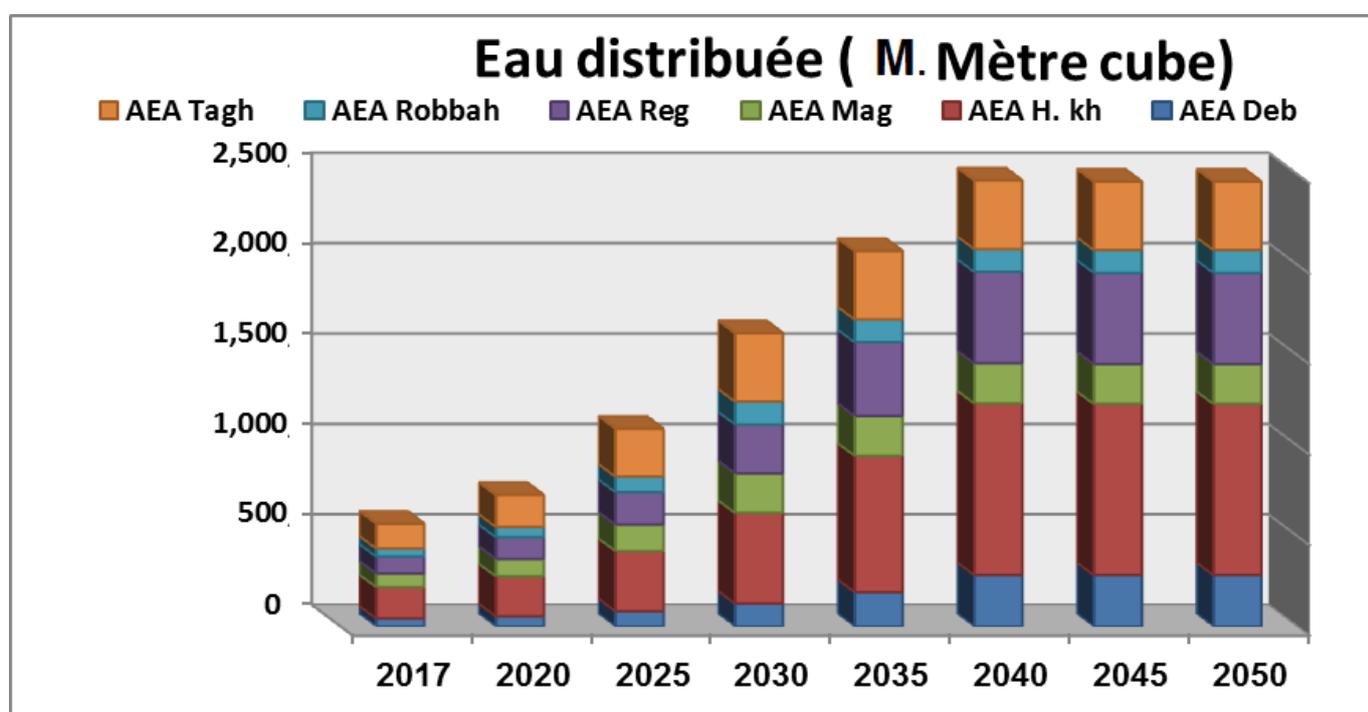


Figure 96. L'eau distribuée - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Tableau 18. L'eau non satisfaite Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Deb	0	0	0	0	0	0	0	0
AEA H. kh	0	0	0	0	0	0	0	73
AEA Mag	0	0	0	0	0	0	76	226
AEA Reg	0	0	0	0	0	0	0	45
AEA Robbah	0	0	0	0	0	0	48	136
AEA Tagh	0	0	0	0	0	0	161	434
Total	0	0	0	0	0	0	286	914

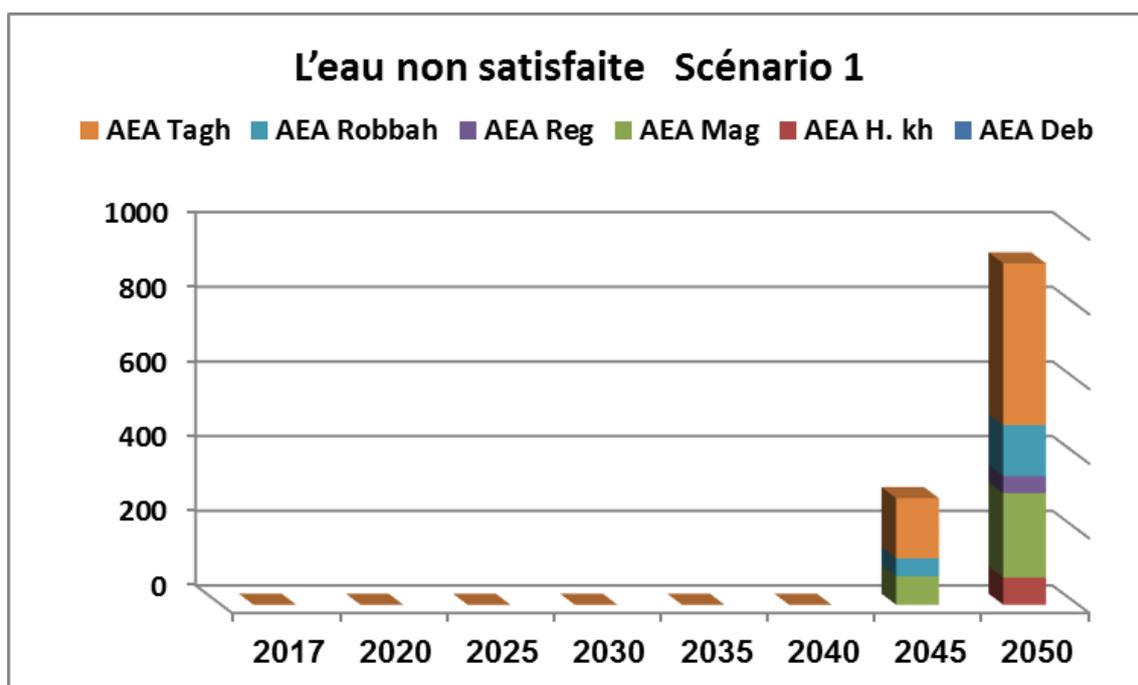


Figure 97. Demande en eau non satisfaite - Scénario 1 : Scénario de référence (2018-2050)-

4.2. Scénarios de fort accroissement de la population (5%)

Dans ce scénario, nous supposons que le taux de croissance de la population totale augmentera de 5% par an, la projection démographique montre une augmentation de la population de 603675 à 3020300 habitants de 2017 à 2050, respectivement (Tableau 19 et Figure 105). Ce qui entraîne une augmentation de la demande par rapport au scénario de référence affectant les besoins d'approvisionnement.

Tableau 19. Projection de la population totale. - Scénario 2 : Scénario de forte accroissement de la population (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Population	603675	698829	891903	1138319	1452816	1854202	2366484	3020300

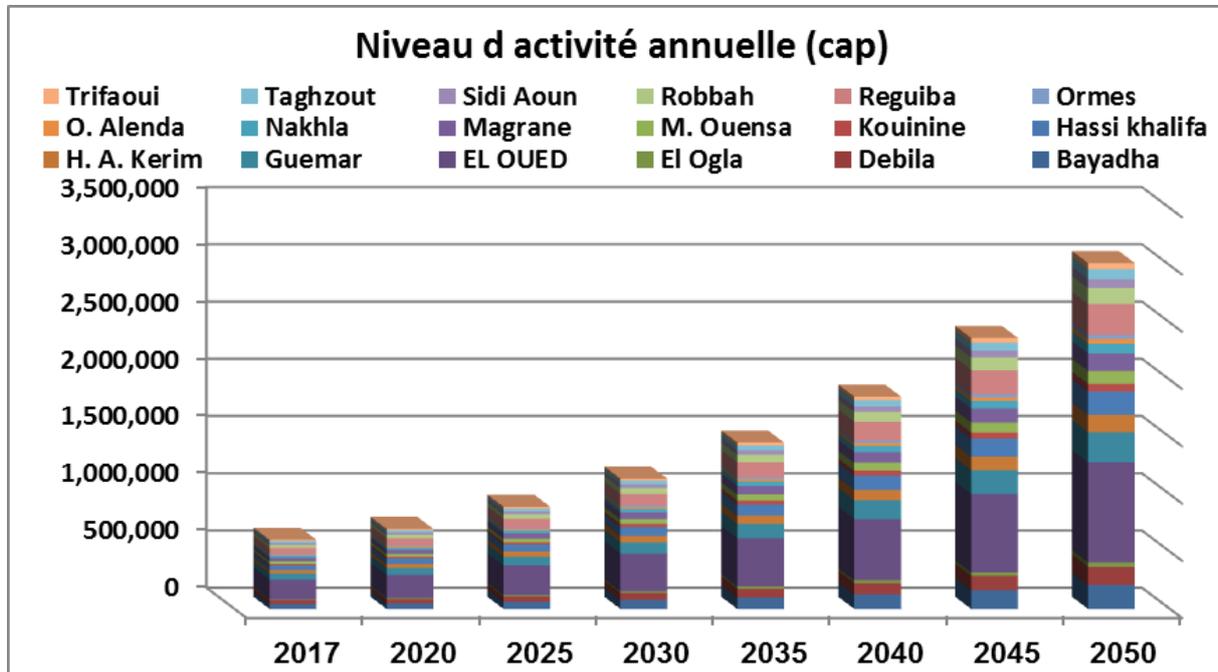


Figure 98. Evolution de la population. Scénario 2 : Scénario de forte accroissement de la population (2018-2050)-

4.2.1. Evolution de la demande en eau

Ce nouveau scénario a été créé pour évaluer l'impact d'un taux de croissance plus élevé que 3,35 % adopté au scénario de référence pour la période 2018-2050. Dans le scénario de « fort accroissement de la population » on va évaluer et comparer la demande en eau si le taux de croissance augmente de 3,35% à 5 %. Pour ce scénario, les dotations unitaires moyenne utilisées sont de 150 l/hab/j. Sur la base de ces hypothèses, les demandes en eau domestique seraient de 38 millions de m³ en 2017 et 63 millions de m³ en 2030, et atteindrait environ 166 millions de m³ en 2050 (Tableau.20 et Figure 106). Le graphique de la figure ci-dessous présente l'accroissement de la demande en eau par rapport au scénario d'un fort accroissement de la population.

L'allure du résultat de l'effet d'un fort accroissement de la population sur la demande en eau est bien visible, où nous observons une demande en eau domestique de l'ordre de 166 Mm³ en 2050 avec un taux d'accroissement de 5%, cependant elle ne dépasse pas les 98 Mm³ pour un taux de 3,35 %.

Tableau 20. Evolution de la demande en eau - Scénario 2 : Fort accroissement de la population (2018-2050)-

Années	2017	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Forte croissance démographique	38	49	63	80	102	130	166
Reference	37	43	51	60	71	84	98

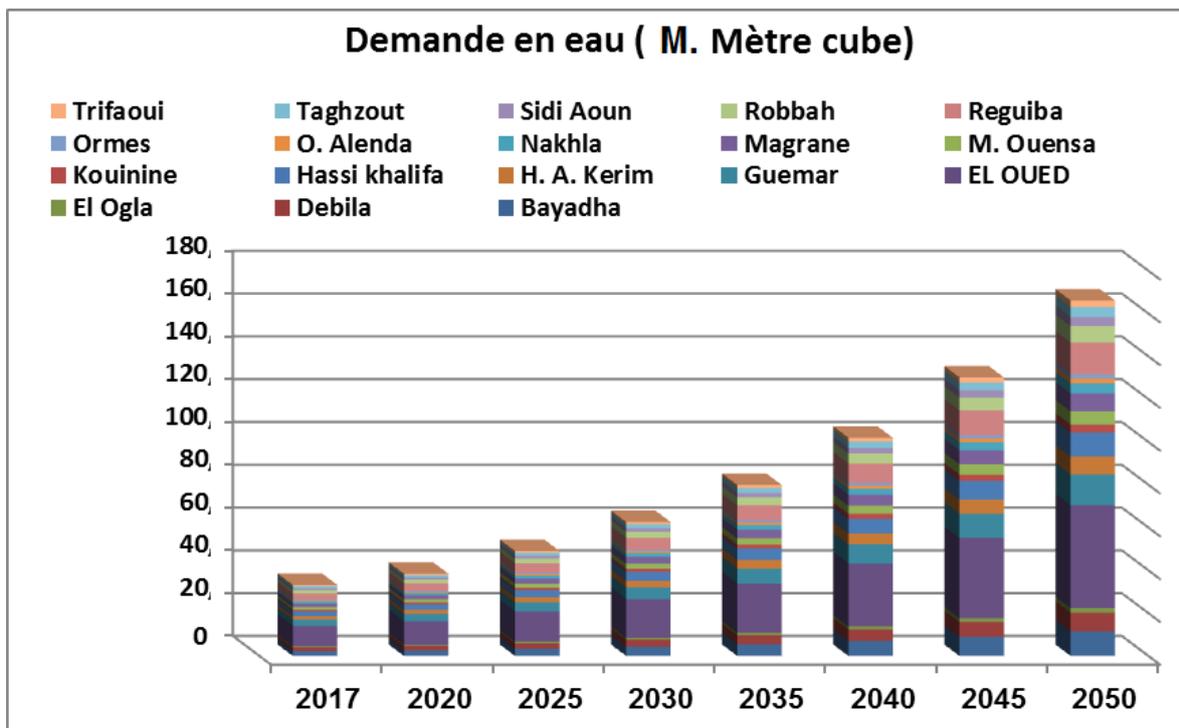


Figure 99. Evolution de la demande en eau - Scénario 2 : Fort accroissement de la population (2018-2050)-

4.2.2. Eau distribuée

Les ressources en eau distribuées à partir de toutes les sources disponibles dans la région d'Oued Souf sont de l'ordre de 36 Mm^3 en 2017 et devenant vers l'horizon 2030 à environ 53 Mm^3 et elles atteindront 77 Mm^3 en 2050 (Tableau.21 et Figure 107). Toutefois, compte tenu des pertes de distributions, le volume d'eau requis pour satisfaire les besoins des secteurs doit être supérieur à la demande. Aussi, une absence d'intervention entraînera un déficit ou une demande non satisfaite en eau et cela à partir de l'année 2017 avec un volume de 2 Mm^3 et atteindront à l'horizon 2050 environ 89 Mm^3 . (Tableau.22, Figure 108)

Tableau 21. L'eau distribuée. - Scénario 2 : Fort accroissement de la populaion (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Forte croissance démographique	36	36	44	53	64	73	77
Reference	35	35	40	45	51	58	66

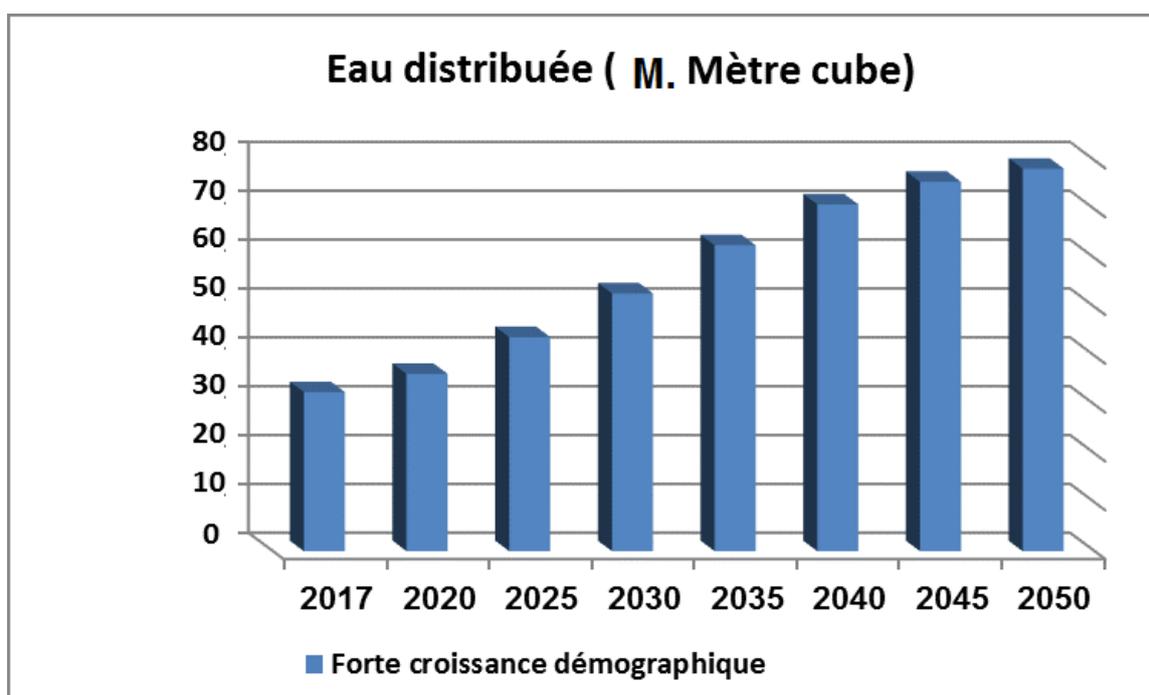


Figure 100. Eau distribuée. -Scénario 2 : Fort accroissement de la populaion (2018-2050)

Tableau 22. L'eau non satisfaite - Scénario 2 : Fort accroissement de la populaion (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Forte croissance démographique	2	5	10	16	29	53	89
Reference	2	4	6	9	13	18	32

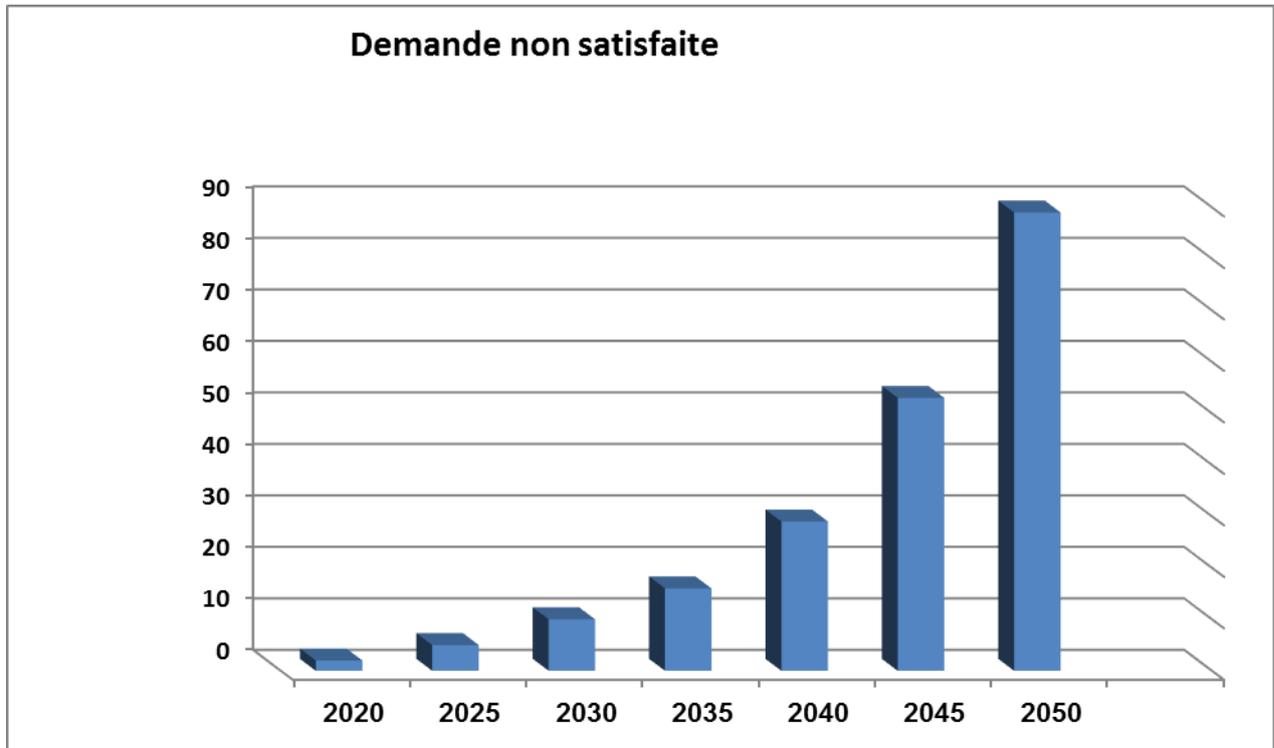


Figure 101. Demande en eau non satisfaite. - Scénario 2 : Fort accroissement de la population (2018-2050)-

4.2.3. Comparaison avec le scénario référence

les exigences du secteur domestique (ménages, collectivités et industries) avec des volumes de l'ordre de 36 Mm³ en 2017 et elles n'atteignent pas en 2050 les 77 Mm³ pour le deuxième scénario qui prend en considération l'effet d'un fort accroissement de la population.

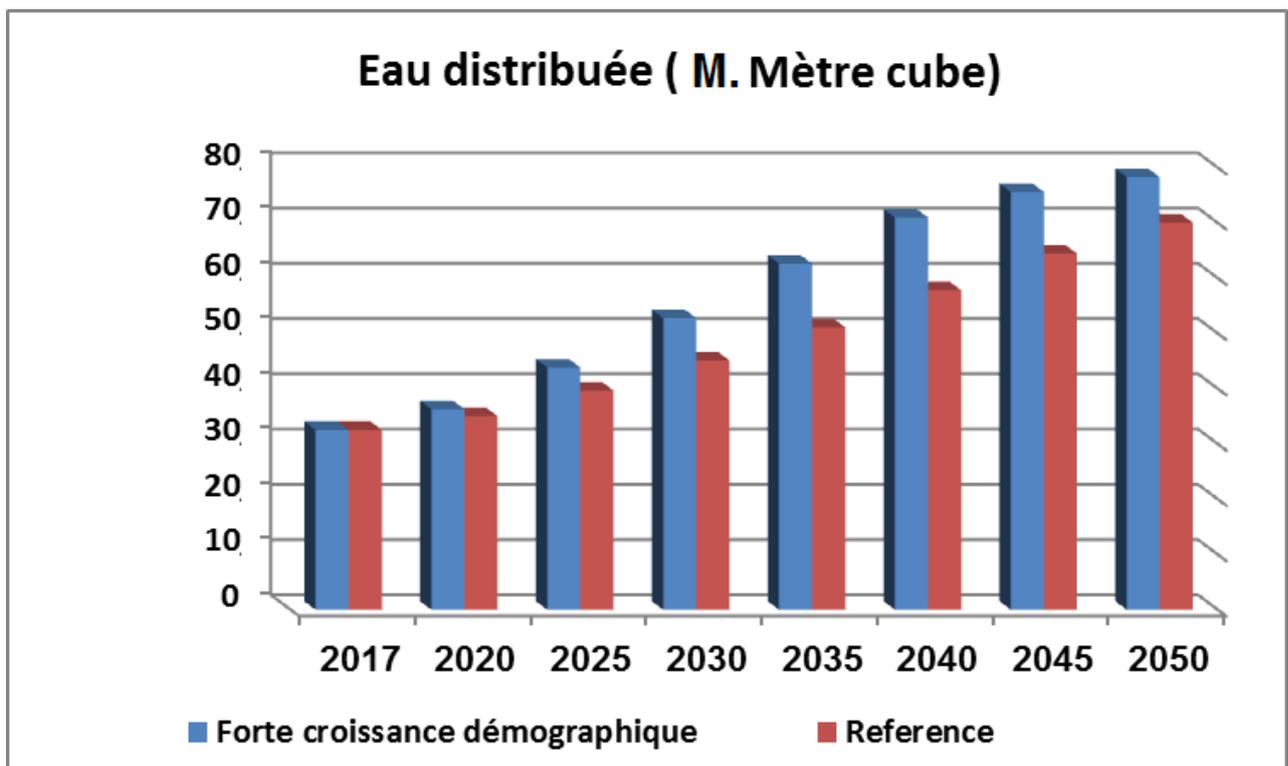


Figure 102. Comparaison de l'eau distribué avec le scénario référence (2018-2050)-

Cependant, en comparant au scénario de référence, les volumes distribués vont abaisser à partir de l'horizon 2035, ce n'est que à partir de l'horizon 2035 que nous commencerons à constater cette demande non satisfaite (Figure.109, 110).

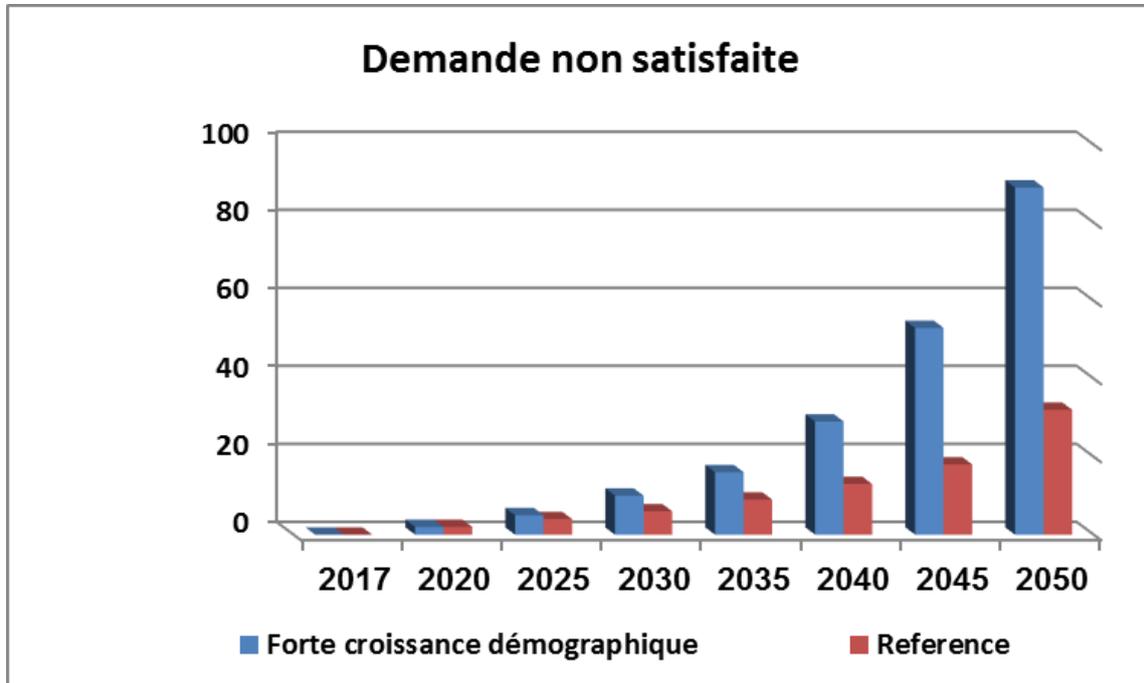


Figure 103. Comparaison de demande non satisfaite avec le scénario référence (2018-2050)-

4.3. Scénario de forte croissance des superficies irriguées

L'un des objectifs du Plan national de développement stratégique est de promouvoir la commercialisation durable et la diversification de l'agriculture. Le gouvernement a l'intention de développer des infrastructures de collecte d'eau et d'augmenter la capacité d'irrigation. Si cela se produit. Il est prévu que les demandes de captage augmentent en période sèche et que les besoins en eau d'irrigation augmentent également. La superficie totale irriguée dans la région d'étude est de 59294 ha (DSA, 2017). Le taux normal d'expansion de l'irrigation de 2017 était de 8,5 % et a été utilisé dans les comptes courants pour obtenir la superficie irriguée de 2050. Le scénario de forte croissance des superficies irriguées adopté pour les 10 % comme scénario possible d'expansion future de l'irrigation.

4.3.1. Projection d'augmentation des superficies irriguées

Pour établir le scénario d'augmentation des superficies irriguées pour l'horizon 2018-2050, on maintient constant tous les paramètres du modèle, sauf la superficie du secteur irrigué. On

suppose que la surface irriguée croît au taux de 10 % entre 2018 et 2050. Par conséquent, la superficie irriguée passera de 59294 ha en 2018 à 1377113 ha en 2050 (Tableau 23 et Figure 101). Avec cette hypothèse, les tensions sur les ressources vont être de plus en plus fortes car les prélèvements vont croître alors que les ressources restent à un même niveau. Cela peut se voir dans la progression des prélèvements qui seront effectués au cours de la période.

Tableau 23. Projection des superficies irriguées. -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Reg	9745	12971	20889	33642	54181	87260	140533	226329
AEA Tagh	14386	19148	30838	49664	79985	128817	207460	334117
AEA Deb	4552	6059	9758	15715	25309	40760	65644	105721
AEA H. kh	18048	24022	38688	62307	100345	161607	260270	419168
AEA Mag	7918	10539	16973	27335	44023	70900	114185	183897
AEA Robbah	4645	6183	9957	16036	25826	41593	66986	107881
Total (Ha)	59294	78922	127103	204699	329669	530937	855078	1377113

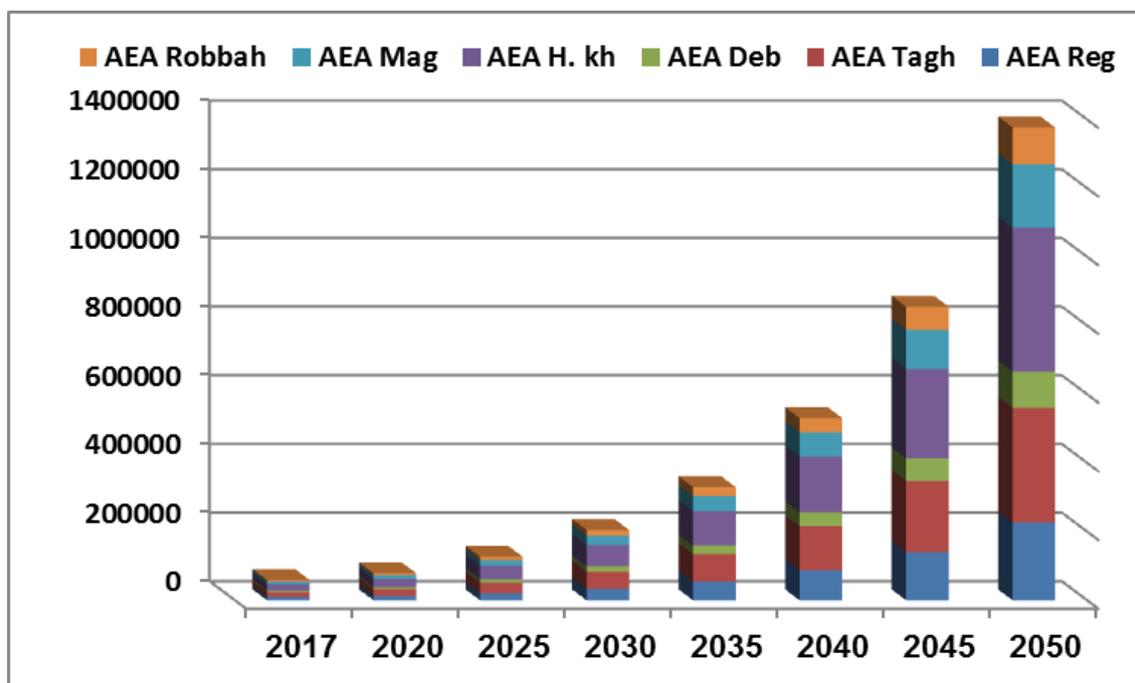


Figure 104. Evolution des superficies irriguées -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

4.3.2. Evolution de la demande en eau d'irrigation

L'étude de l'évolution de la consommation en eau pour l'agriculture vise à chercher une relation entre l'évolution des superficies irriguées et l'évolution des prélèvements d'eau pour

l'agriculture au cours de la période de ce scénario. Donc, l'évolution des besoins en eau d'irrigation est directement liée à l'augmentation des terres irrigables. Les besoins en eau d'irrigation s'élèvent donc de 208 millions de m³ en 2018 à 716 millions de m³ en 2030, pour atteindre un volume de 4820 millions de m³ en 2050 (Tableau 24 et Figure 112).

Tableau 24. Evolution de la demande en eau d'irrigation-Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Reg	16	21	34	55	89	143	230	370
AEA Tagh	63	84	135	218	351	566	911	1467
AEA Deb	28	37	59	96	154	248	400	644
AEA H. kh	34	45	73	118	190	305	492	792
AEA Mag	16	22	35	56	90	146	234	378
AEA Robbah	50	67	108	174	280	451	726	1169
Total	208	276	445	716	1154	1858	2993	4820

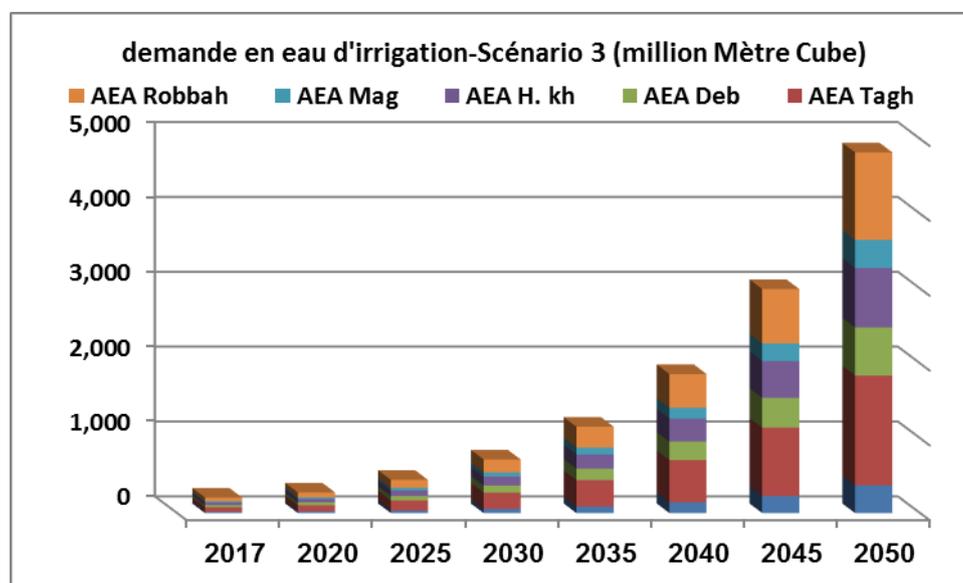


Figure 105. Evolution de la demande en eau d'irrigation -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

4.3.3. Eau distribuée

Les ressources en eau distribuées sont de l'ordre de 569 Mm³ en 2017 et devenant vers l'horizon 2030 à environ 1795 Mm³ et ils dépasseront 2460 Mm³ en 2050. (Tableau 25, Figure 113)

Tableau 25. Projection de l'eau distribuée. -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Reg	44	58	93	151	243	285	284	284
AEA Tagh	173	230	371	597	946	948	946	946
AEA Deb	76	101	163	221	221	221	221	221
AEA H. kh	93	124	200	322	505	506	505	505
AEA Mag	45	59	95	126	126	126	126	126
AEA Robbah	138	183	295	378	378	379	378	378
Total	569	755	1217	1795	2419	2465	2460	2460

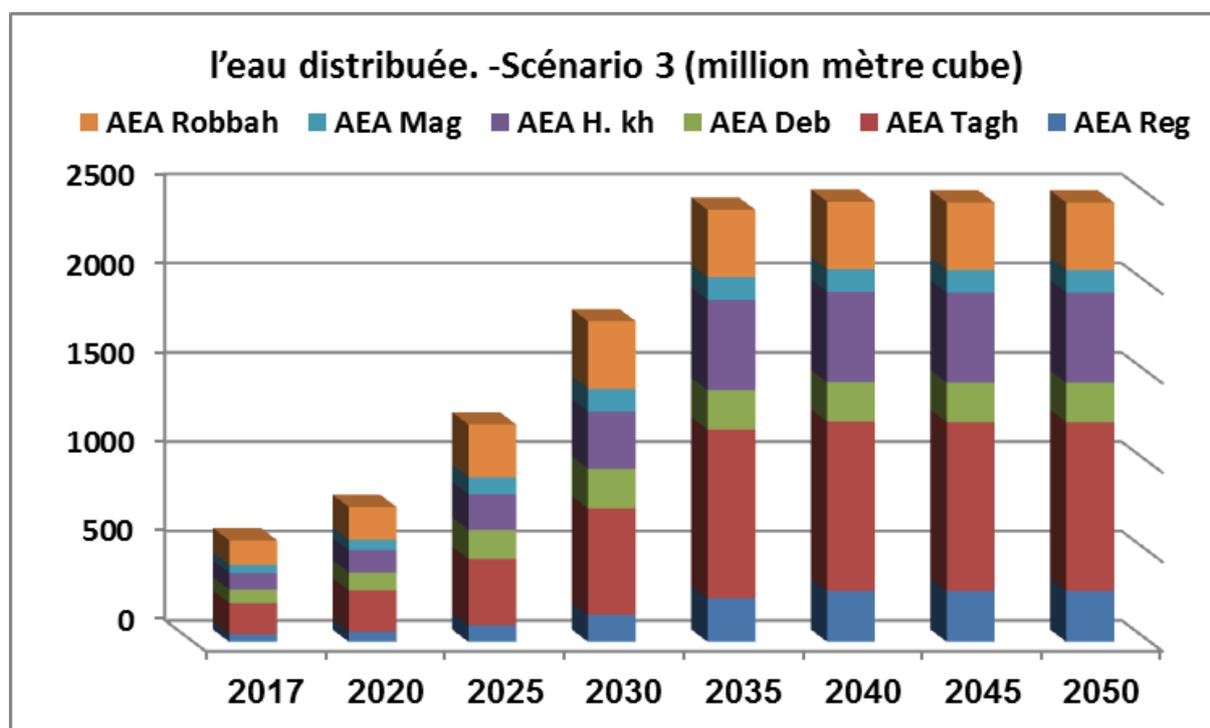


Figure 106. Eau distribuée. -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

4.3.4. Demande en eau non satisfaite

Pour la demande en eau non satisfaite dans le scénario d'augmentation des superficies irriguées, on constate qu'à partir de l'année 2040 un volume de **117 Mm³**, dont 60% concerne seulement secteur du périmètre irrigué de Robbah, et atteindront les **2360 Mm³** à l'horizon 2050 (Tableau 26, Figure 114)

Tableau 26. Projection de la demande en eau non satisfaite. -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

Années	2017	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
AEA Reg	0	0	0	0	0	0	0	86
AEA Tagh	0	0	0	0	0	0	0	521
AEA Deb	0	0	0	0	0	27	179	423
AEA H. kh	0	0	0	0	0	0	0	288
AEA Mag	0	0	0	0	0	19	108	251
AEA Robbah	0	0	0	0	0	71	348	791
Total	0	0	0	0	0	117	635	2360

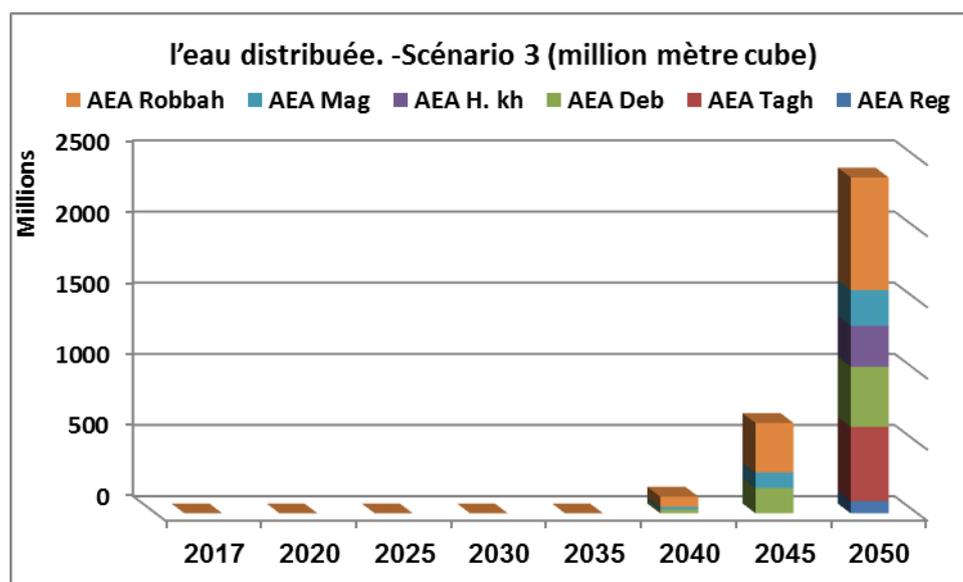


Figure 107. Demande en eau non satisfaite. -Scénario 3 : Augmentation des superficies irriguées (2018-2050)-

4.3.5. Comparaison avec le scénario référence

Les résultats précédemment es comptés sur la période 2017-2050 après la mise en œuvre de toutes les réalisations physiques projetées dans la même période ainsi que les opérations d'amélioration de l'efficacité de la distribution et de l'irrigation qu'on a préconisées et compte tenu de l'évolution des besoins des différents usagers de l'eau dans la région d'Oued Souf et de leur croissance. L'agriculture est considérée comme le grand consommateur d'eau dans la région, l'allure du résultat de l'effet d'augmentation des superficies irriguées est bien visible, la courbe d'évolution des demandes est bien supérieure par rapport aux autres scénarios, où elles dépassent les 4820 Mm³ à l'horizon 2050.

La quantité d'eau distribuée connaît une nette variation entre les différents scénarios, dont leur

comparaison (Figure 115, 116, 117) montre que cette fluctuation est très remarquable, et l'eau distribuée va augmenter à plus de 2460 Mm³ en 2050 pour le scénario d'augmentation des superficies irriguées,

Aussi, une absence d'intervention entraînera un déficit ou une demande non satisfaite en eau, La comparaison des scénarios montre que cette variation est très remarquable pour le scénario d'augmentation des superficies irriguées, où la demande non satisfaite commence à partir de l'année 2040 avec un volume de 117 Mm³ et atteindront à l'horizon 2050 environ 2360 Mm³.

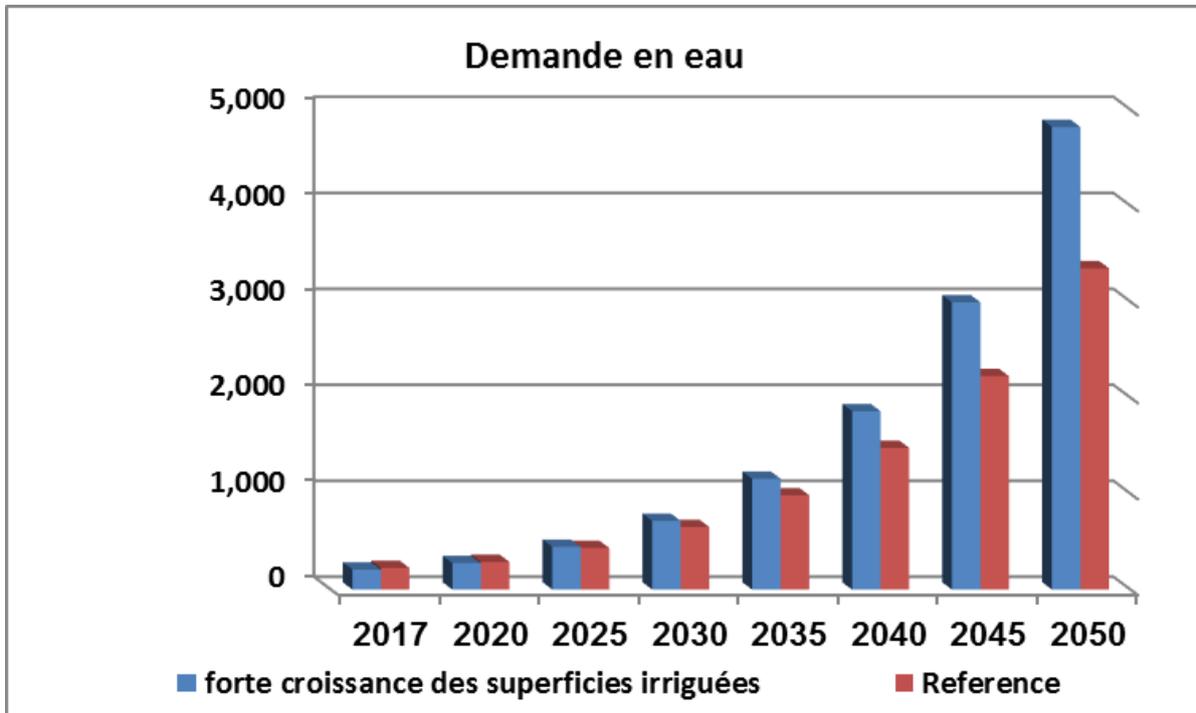


Figure 108. Evolution de la demande en eau. - Comparaison avec le scénarios (2018-2050)-

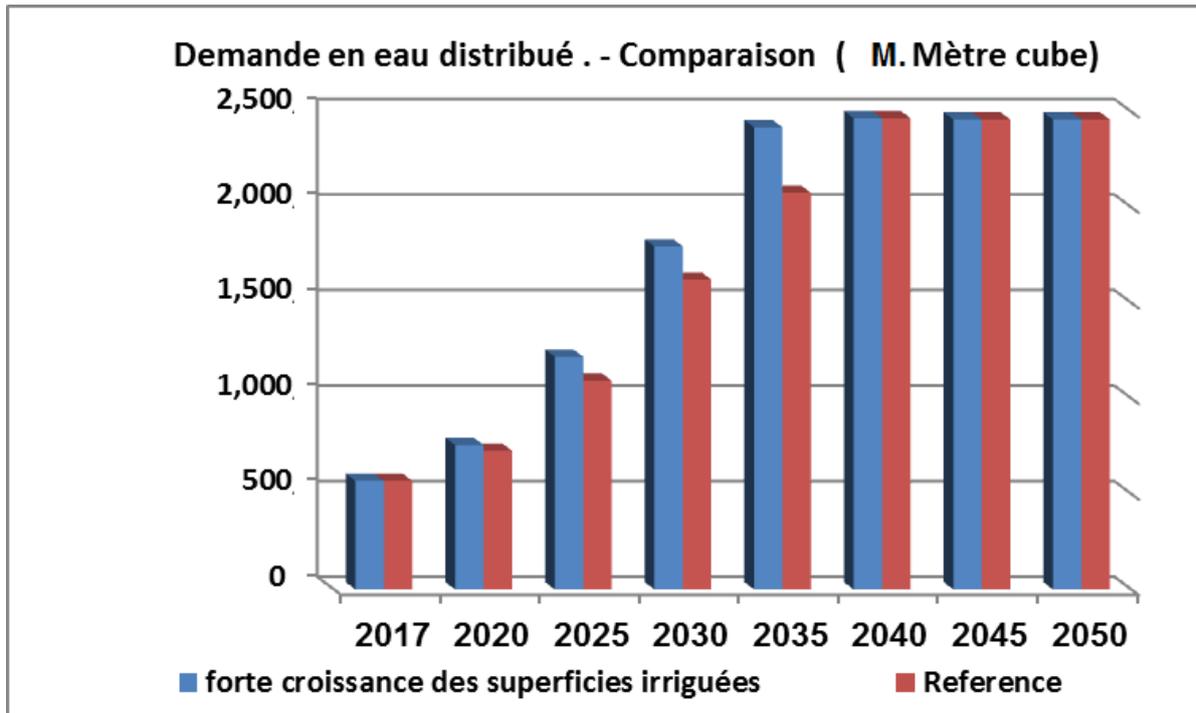


Figure 109. Evolution de l'eau distribué . - Comparaison avec le scénarios (2018-2050)-

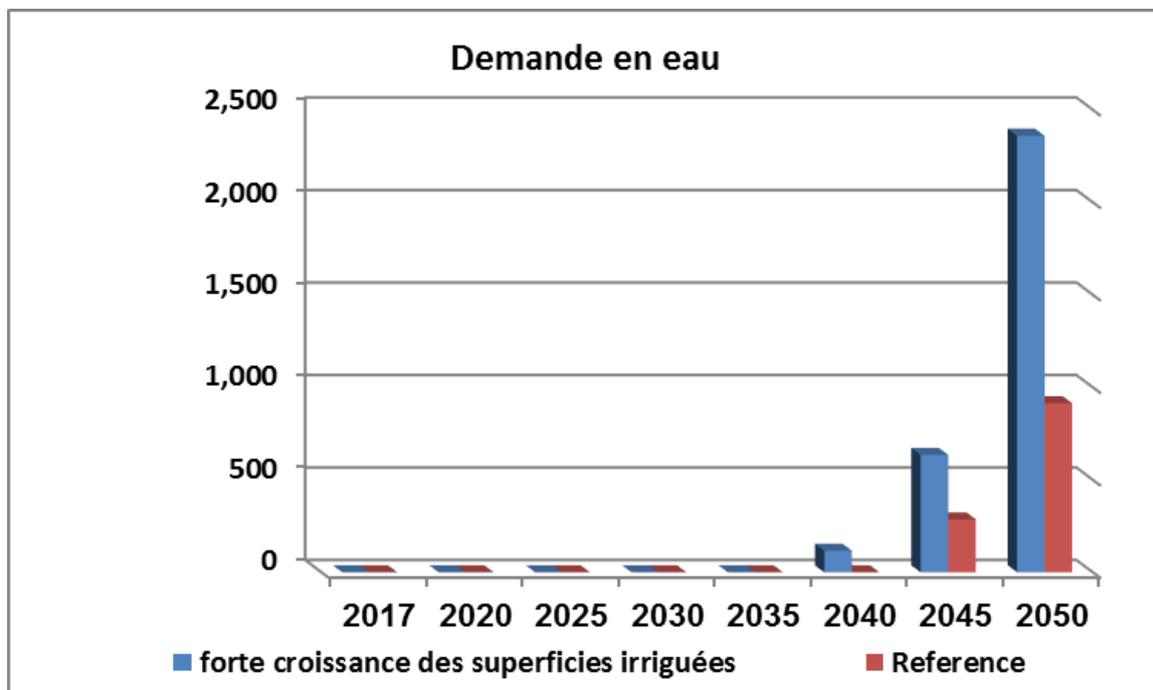


Figure 110. Evolution de la demande non satisfaite - Comparaison avec le scénarios (2018-2050)-

5. Confrontation offre-demande en eau dans la région d'Oued Souf

D'après les chiffres précédemment es comptés pour la période 2017-2050, après la mise en œuvre de toutes les réalisations physiques projetées dans la même période ainsi que les opérations d'amélioration de l'efficacité de la distribution et de l'irrigation qu'on a préconisé, et compte tenu de l'évolution des besoins des différents usagers de l'eau dans la région d'étude (ménages, industrie et les périmètres irrigués) et de leur croissance, pour le scénario référence (sans aucun impact), les ressources resteront suffisantes jusqu'à l'horizon 2035 où il y aura une tension sur la ressource, une augmentation intensive de la population engendrera une pression sur la ressource à partir de l'horizon 2030, l'agriculture peut être considérée comme le grand futur consommateur d'eau dans la région, l'allure des résultats de l'effet d'augmentation des superficies irriguées est bien visible, la courbe d'évolution des demandes est bien supérieure par rapport aux autres scénarios, où elles dépasseront les 4820 Mm³ à l'horizon 2050, cependant elles n'atteindront pas les 166 Mm³ pour le scénario du fort accroissement de la population. Ressources mobilisables entrèrent en tension après l'année 2030 (volume exploitable est inférieur à la demande) et en pénurie après l'année 2035.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

La Cette étude se concentre sur la région de Oued Souf, située dans le Sahara algérien, s'étendant sur 11 738 km² et abritant environ 643 120 résidents. Son objectif principal est de renforcer les connaissances en hydrogéologie et hydrogéochimie de l'aquifère du Complexe Terminal (CT) grâce à des investigations hydrogéologiques et des analyses d'échantillons d'eau souterraine prélevés dans cette zone. Trois aquifères principaux ont été identifiés : le Continental Intercalaire (CI), le Complexe Terminal (CT) et l'aquifère superficiel. L'aquifère CT, un réservoir multicouche constitué des sables du Mio-Pliocène, des sables, grès et graviers du Pontien, ainsi que des calcaires et dolomies du Sénonien-Eocène, se situe à 220 m de profondeur avec une épaisseur de 300 m et présente une dynamique intéressante.

L'étude hydrochimique de l'aquifère CT a révélé la dominance des faciès évaporitiques CaMg-Cl et Na-Cl. Les teneurs en éléments majeurs dépassent les normes de l'OMS et de l'Algérie dans la majorité des échantillons. L'indice de qualité de l'eau (IQE) classe les eaux du CT dans la catégorie très mauvaise. Les analyses de la conductivité électrique, du SAR, des diagrammes de Richard et de Wilcox, du PI et du MR, indiquent que ces eaux sont impropres à l'irrigation. L'analyse statistique multivariée, utilisant le clustering et l'ACP, ainsi que l'étude hydrochimique par l'application des diagrammes de Gibbs et bivariés et le calcul des indices de saturation, montrent que la chimie de l'eau de l'aquifère CT est principalement contrôlée par la dissolution des roches évaporitiques, les échanges cationiques et les activités anthropogéniques issues de l'infiltration des eaux de la nappe phréatique.

L'étude hydrochimique a également révélé des teneurs élevées en fluorure dans les eaux du CT, ce qui peut poser un risque pour la santé des résidents de la région. La concentration de F⁻ dans les échantillons de l'aquifère CT a varié de 1,86 à 2,65 mg/L, avec une moyenne de 2,12 mg/L. Les concentrations les plus élevées ont été trouvées à Mih Ouensa (2,65 mg/L), tandis que les concentrations les plus basses ont été observées dans les villages de Menchia, Hassi Khalifa, Guemar et Chott. L'enrichissement en fluorure est dû à des processus géogéniques en relation avec l'interaction de l'eau avec la roche réservoir. Le risque cancérigène de l'apport de fluorure par l'ingestion d'eau potable est modéré à élevé pour les adultes, mais élevé pour les enfants de la région de Oued Souf. Il dépend principalement du poids corporel et des activités métaboliques des individus exposés au fluorure. L'utilisation de sources de fluorure à faible concentration, telles que les puits de l'aquifère Continental Intercalaire, est recommandée pour la région de Oued Souf.

Cette étude applique également le modèle WEAP pour fournir une estimation quantitative des

ressources en eau disponibles et simuler la demande en eau non satisfaite sous différents scénarios futurs. Les ressources devraient rester suffisantes jusqu'en 2035, moment où une pression accrue sur la ressource sera observée en raison de l'augmentation de la population. L'agriculture est identifiée comme le principal consommateur futur d'eau dans la région, avec une demande dépassant 4820 Mm³ d'ici 2050. Les ressources mobilisables entreront en tension après 2030 et en pénurie après 2035.

Les résultats de cette étude soulignent la nécessité d'une gestion durable des ressources en eau dans la région d'Oued Souf, en tenant compte des défis hydrogéologiques et hydrogéochimiques identifiés. Il est crucial de mettre en place des mesures adaptées pour assurer la qualité et la disponibilité de l'eau à long terme pour la consommation et l'irrigation. En particulier, ces résultats indiquent l'importance d'un programme de gestion axé sur l'amélioration du pompage de l'eau pour une exploitation durable de l'aquifère du Complexe Terminal, ainsi qu'un traitement approprié des eaux pour répondre aux exigences de qualité pour la consommation et l'irrigation.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

1. Adimalla N. (2020). Spatial distribution, exposure, and potential health risk assessment from nitrate in drinking water from semi-arid region of South India. *Human and ecological risk assessment: an international journal*, 26(2), 310-334. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1508329>
2. Adimalla, N. Venkatayogi S. (2018). Geochemical characterization and evaluation of groundwater suitability for domestic and agricultural utility in semi-arid region of Basara, Telangana State, South India. *Applied Water Science*. <https://doi.org/10.1007/s13201-018-0682-1>
3. Ahada C.P & Suthar S. (2019). Assessment of human health risk associated with high groundwater fluoride intake in southern districts of Punjab, India. *Exposure and health*, 11(4), 267-275.
4. Ali S, Kumari M, Gupta S.K, Sinha A, Mishra B.K. (2017). Investigation and mapping of fluoride-endemic areas and associated health risk—A case study of Agra, Uttar Pradesh, India, *Hum. Ecol. Risk Assess.* 23 (2017) 590–604, <https://doi.org/10.1080/10807039.2016.1255139>.
5. Allia Z. (2018). Le Système Aquifère Mio-pliocène du Bassin de Chott Melrhir-Zab Chergui: Caractérisation, Géométrie et Hydrochimie. Dissertation, Université Mohamed Khider–Biskra
6. Amiri V. Berndtsson R. (2020). Fluoride occurrence and human health risk from groundwater use at the west coast of Urmia Lake, Iran. *Arab J Geosci* 13: 921
7. Antonakos A, Nicolaos L. (2000). Hydrodynamic characteristics and nitrate propagation in sparta aquifer. *Water Research*, 34(16), 3977-3986. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00160-3](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00160-3).
8. Arfa A., Bouselsal B., Zeddouri A., Kebili M. 2022. Groundwater Geochemical and Quality of the Continental Intercalary Aquifer in Béni Ounif (Southwest Algeria). *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(9), 1–12. doi.org/10.12911/22998993/151070.
9. Atia, D., & Hoggui, A. (2013). Decreasing fluoride by coagulation in drinkable water from Souf region of Algeria. *International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy*, 5, 57-65.
10. Ayoob S, and Gupta A.K. (2006). Fluoride in drinking water: a review on the status and stress effects. *Crit Rev Environ Sci Technol* 36:433–87.

11. Apambire W.M, Boyle, D.R. Michel, F.A. (1997). Geochemistry, Genesis, and Health Implications of Fluoriferous Groundwater in the Upper Regions of Ghana. *Environ. Geol.* 1997, 35, 13–24.
12. Badeenezhad A, Majid R, Hassan P, Iman P, Fariba A, Saeid R. (2019). Factors Affecting the Nitrate Concentration and Its Health Risk Assessment in Drinking Groundwater by Application of Monte Carlo Simulation and Geographic Information System. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 1-14. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1655634>
13. Belkhiri L, Mouni L. (2012). Hydro chemical analysis and evaluation of groundwater quality in El Eulma area, Algeria. *Appl Water Sci* 2:127–133
14. Belksier M.S. (2017). Caractéristiques hydrogéologiques de la nappe superficielle dans la région de l'Oued Righ et évaluation de l'impact de la pollution et de la salinité sur la qualité de ses eaux. th. Doctorat, univ.de Annaba, 123 p.
15. Bouderbala A. (2017). Assessment of Water Quality Index for the Groundwater in the Upper Cheliff Plain, Algeria. *Journal of the Geological Society of India*, 90(3), 347-356. <https://doi.org/10.1007/s12594-017-0723-7>.
16. Boulifa K. (2012) Synthèse hydrogéologique sur la région d'El-Oued Sahara nord oriental – Est Algérien. Dissertation, Univ. de Constantine.
17. Bouselsal B., Johnbosco C. E. 2024. Graphical, statistical and index-based techniques integrated for identifying the hydrochemical fingerprints and groundwater quality of In Salah, Algerian Sahara. *Environmental Geochemistry and Health* 46, 158 (2024). <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01931-6>
18. Bouselsal B., Zouari K. (2022). Identification of Groundwater Quality and Hydrogeochemical Processes in the Shallow Aquifer of El-Oued (Algerian Sahara). *New Prospects in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences*. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-72543-3_130.
19. Bouselsal, B., Ouarekh, M. (2021). Mapping of the Vulnerability to Pollution of El Oued Shallow Aquifer in the Algerian Sahara. In: Ksibi, M., et al. *Recent Advances in Environmental Science from the Euro-Mediterranean and Surrounding Regions* (2nd Edition). EMCEI 2019. Environmental Science and Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51210-1_150.
20. Bouselsal B., Saibi S. (2022). Evaluation of Groundwater Quality and Hydrochemical Characteristics in the Shallow Aquifer of El-Oued Region (Algerian Sahara).

21. Bouselsal B., Belksier M.S. 2018. Caractérisation géochimique de l'aquifère de Complexe Terminal de El-Oued (SE Algérie). *Journal International Sciences et Technique de l'Eau et de l'Environnement*. Volume III- Numéro1- Avril 2018. P 74 -80.
22. Bouselsal B. 2017. Groundwater quality in arid regions: the case of Hassi Messaoud region (SE Algeria). *J. Fundam. Appl. Sci.*, 2017, 9(1), 528-541. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v9i1.30>
23. Bouselsal B. (2016) Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued souf (SE Algérie). Th. Doctorat Univ.de Annaba, 204p
24. Bouselsal B., Kherici N., Hadj-Said S. (2015). Vulnérabilité et risque de Pollution de la nappe libre d'El-Oued (SE Algérie) : application de la Méthode DRASTIC. *Bulletin du Service Géologique National.*, Vol. 26, n° 1.
25. Bouselsal B., Kherici N., Hadj-Said S., Belksier M.S. (2014b) Qualité des eaux des aquifères de Sahara septentrionale cas des eaux des aquifères d'el-oued (SE Algérie). *International Journal for Environment & Global Climate Change*. Vol 2, Issue 3, 2014. P 21-31.
26. 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.
27. Boussaada N, Bouselsal B, Benhamida SA, Hammad N, Kharroubi M (2023) Geochemistry and water quality assessment of continental intercalary aquifer in Ouargla region (Sahara, Algeria). *J Ecol Eng* 24(2), 279–294. <https://doi.org/10.12911/22998993/156832>
28. Bouznad Imad Eddine. (2017). Ressources en eau et gestion intégrée dans la vallée de Oued Righ (Sahara septentrional algérienne). th. Doctorat, univ.de Annaba, 202 p.
29. Buchhamer E.E, Blanes P.S, Osicka R.M, Giménez M.C. (2012). Environmental risk assessment of arsenic and fluoride in the chaco province, Argentina: research advances, *J. Toxicol. Environ. Heal. - Part A Curr. Issues* 75 (2012) 1437–1450, <https://doi.org/10.1080/15287394.2012.721178>
30. Busson G. (1971). Le Mésozoïque saharien. 2^{ème} partie: Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens. Centre de recherche sur le zones arides, serie geologie, (11).

31. Castany G. (1982). Bassin sédimentaire du Sahara septentrional (Algérie-Tunisie). Aquifères du Continental Intercalaire et du Complexe terminal. Bull. BRGM 2 III 2:127–147, 1982.
32. Chadha D.K. (1999). A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. Hydrogeology Journal, 7, 431–439
33. Chaib W. (2016). L'effet des eaux chaudes albiennes sur l'homme et l'environnement de la région d'Oued Righ, Sud-Est Algérien. Dissertation, Univ. de Annaba.
34. Chen J, Wu H, Qian H, et al. 2017. Assessing nitrate and fluoride contaminants in drinking water and their health risk of rural residents living in a Semi-arid region of Northwest China. Expo Health 9:183–9
35. Coque R. (1962). La Tunisie présaharienne: Etude géomorphologique. Armond Colin, Paris.
36. Cornet A. (1964). Introduction à l'hydrogéologie Saharienne (Introduction to Saharan hydrogeology),” Géogr Phys G_ol Dyn 61:5– 72, 1964.
37. Cretenet J.N. (2003). Vallée du Souf : Etudes d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique, Mission II, 60p.
38. Daifallah T. (2017). Ressources en eau et leurs utilisations dans le bassin versant de l'Oued Kébir Ouest (Nord Est algérien). th. Doctorat, univ.de Annaba,187 p.
39. Dali Naouel. (2018). Contribution A L'actualisation Et Gestion Durable Des Ressources En Eau Des Bassins Des Hauts Plateaux Constantinois. Th. Doc, Univ. Annaba, 229 p.
40. Das N, Das A, Sarma KP, Kumar M. (2018). Provenance, prevalence and health perspective of co-occurrences of arsenic, fluoride and uranium in the aquifers of the Brahmaputra River floodplain. Chemosphere 194:755–772. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.021>
41. Doneen L.D. (1964). Water Quality for Agriculture. Department of Irrigation, University of California
42. Edumnds W, Guendouz A, Mamou A, Moulla A, Shand P, Zouari K. (2003). Groundwater evolution in the continental intercalary aquifer of southern Algeria and Tunisia, trace element and isotopic indicators, Appl Geochem 18, 805–822.
43. Egor M, Birungi G. (2020). Fluoride contamination and its optimum upper limit in groundwater from Sukulu Hills, Tororo District Uganda.Sci Afr 7:e00241
44. Esmaeili A, Moore F. (2012). Hydrogeochemical assessment of groundwater in Isfahan province, Iran. Environ Earth Sci 67:107–120

45. Fordyce FM, Vrana K, Zhovinsky E, Povoroznuk V, Toth G, Hope BC, Iljinsky U, Baker J. (2007). A health risk assessment for fluoride in Central Europe. *Environ Geochem Health* 29:83–102
46. Freeze R.A, Cherry J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice hall. Inc. New Jersey.
47. Gibbs R.J. (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170, 1088–1090
48. Gnanachandrasamy G, Ramkumar T, Venkatramanan S, Vasudevan S, Chung SY, Bagyaraj M. (2014). Accessing Groundwater Quality in Lower Part of Nagapattinam District, Southern India : Using Hydrogeochemistry and GIS Interpolation Techniques. *Applied water science*, 5(1), 39-55. <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0172-z>
49. Gonfiantini R, Conrad G, Ch J, Fontes J, Sauzay G, Payne R. (1974). Etude isotopique de la nappe du Continental Intercalaire et de ses relations avec les autres nappes du Sahara septentrional (Isotopic investigation of the Continental Intercalaire aquifer and its relationship with other aquifers in the Northern Sahara) ,” In: *Isotope Techniques in Groundwater Hydrology*, Vienna. IAEA SM-182/25 1: 227–241.
50. Guendouz A, Moulla A.S, Edmunds W.M, Zouari K, Shand P, Mamou A. (2003). Hydrogeochemical and isotopic evolution of water in the “complexe terminal” aquifer in the Algerian Sahara. *Hydrogeol J* 11:483–495. <https://doi.org/10.1007/s10040-003-0263-7>
51. Guendouz A. (1985). Contribution à l’étude hydrochimique et isotopique des nappes profondes du Sahara septentrional, Algérie (A contribution to the hydrochemical and isotopic study of the northern Sahara deep groundwaters in Algeria). Dissertation, University Paris-sud, Orsay, France
52. Guendouz A, Moulla A.S. (1995). Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines de la cuvette de Ouargla, Algérie, 1993– 1995 (Hydrochemical and isotopic investigation of Ouargla depression groundwaters, Algeria, 1993–1995). Tech Rep CDTN/DDHI, Algiers.
53. Guissouma W, Hakami O, Al-Rajab A, Tarhouni J. (2017). Risk assessment of fluoride exposure in drinking water of Tunisia, *Chemosphere* 177 (2017) 102–108, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.011>.
54. Hammad N, Bousalsal B, Boussaada N, Satouh A, Lakhdari A.S. 2023. Application of Water Quality Index to Assess the Potability of the Phreatic Aquifer in Ouargla (Algeria). *Journal of Ecological Engineering* 2023 24(5), 36–45 doi.org/10.12912/27197050/163122.

55. Hamzaoui AF, Ameer M, Bouhlila R, Gueddari M. (2012). Geochemical Characterization of groundwater in a Miocene aquifer, southeastern Tunisia. *Environmental and Engineering Geoscience*, 18, 159–174
56. Han, C., Liu, J., Gao, Z., Xu, Y., Zhang, Y., Han, Z., ... & Luo, Z. (2021). Chemical characteristics, evolution, and quality of groundwater and processes controlling its fluoride concentration features: case study of typical high-fluoride areas in the Southwestern Shandong Plain, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-16.
57. Hidalgo MC, Cruz-Sanjulian J. (2001). Ground water composition, hydrochemical evolution and mass transfer in a regional detrital aquifer (Baza basin, southern Spain):
58. Hong-jian Gao, You-qian Jin, Jun-ling Wei. (2013). Health risk assessment of fluoride in drinking water from Anhui Province in China. *Environ Monit Assess* 185:3687–3695.
59. Houari I.M, Bouselsal B, Lakhdari A.S. 2024. Evaluating Groundwater Potability and Health Risks from Nitrates in the Semi-Arid Region of Algeria. *Ecological Engineering & Environmental Technology* 2024, 25(6), 222–236. <https://doi.org/10.12912/27197050/186954>.
60. Hossain S, Hosono T, Yang H, Shimada J. (2016). Geochemical processes controlling fluoride enrichment in groundwater at the western part of Kumamoto area, Japan. *Water Air Soil Pollut* 227(10)
61. Horton R.K. (1965). An index number system for rating water quality. *Journal Water Pollution Control Federation*. Vol. 37 p. 300–306
62. Hossain, M., Patra, P. K., Ghosh, B., Khatun, A., & Nayek, S. (2021). Sensitive assessment of groundwater-associated, multi-exposure health hazards in a fluoride-enriched region of West Bengal, India. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(11), 4515-4532.
63. Jalali M. (2007). Stalinization of groundwater in arid and semiarid zones: an example from Tajarak, western Iran. *Environmental Geology*, 52, 1133–1149
64. Jamshidzadeh Z, Barzi M.T. (2018). Groundwater quality assessment using the potability water quality index (PWQI): a case in the Kashan plain, Central Iran. *Environ Earth Sci* 77(3):59
65. Jia, H., Qian, H., Qu, W., Zheng, L., Feng, W., & Ren, W. (2019). Fluoride occurrence and human health risk in drinking water wells from southern edge of Chinese Loess Plateau. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(10), 1683.

66. JORADP. (2011). Décret exécutif n°11-125 du 22 mars 2011, relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine. Journal officiel de la république algérienne
67. Ganyaglo, S. Y., Gibrilla, A., Teye, E. M., Owusu-Ansah, E. D., Tettey, S., Diabene, P. Y., & Asimah, S. (2019). Groundwater fluoride contamination and probabilistic health risk assessment in fluoride endemic areas of the Upper East Region, Ghana. *Chemosphere*, 233, 862–872. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.276>
68. Kazi TG, Arain MB, Jamali MK, Jalbani N, Afridi HI, Sarfraz RA, Baig JA, Shah AQ .(2009). Assessment of water quality of polluted lake using multivariate statistical techniques: a case study. *Ecotoxicol Environ Saf* 72:301–309
69. Karunanidhi, D., Aravinthasamy, P., Subramani, T., Balakumar, K. G., & Chandran, N. S. (2020). Health threats for the inhabitants of a textile hub (Tiruppur region) in southern India due to multipath entry of fluoride ions from groundwater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 204, 111071.
70. Kahal A. (2019). Hydrogéologie de l'aquifère dans la plaine de F'Kirina (Oum El-Bouaghi, Nord-Est Algérien) et Evaluation des ressources en eaux mobilisables. Dissertation, Univ.de Annaba.
71. Kebili M., Bouselsal B., Gouaidia L. 2021. Hydrochemical Characterization and Water Quality of the Continental Intercalare Aquifer in the Ghardaïa Region (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering* 22(10):152–62. <https://doi.org/10.12911/22998993/142041>.
72. Keramati H, Miri A, Baghaei M, Rahimizadeh A, Ghorbani R, Fakhri Y, Bay A, Moradi M, Bahmani Z, Ghaderpoori M, Mousavi Khaneghah A. (2018). Fluoride in Iranian drinking water resources: a systematic review, meta-analysis and non-carcinogenic risk assessment, *Biol. Trace Elem. Res.* (2018) 1–13, <https://doi.org/10.1007/s12011-018-1418-7>.
73. Kerdoun, M. A., Bouaziz, H., Adjaine, O. E. K., Mekhloufi, S., Bechki, Z., & Belkhalifa, H. (2021). Fluoride concentration in bottled drinking water from a fluoride endemic area: A market-based survey. *Clinical Nutrition ESPEN*, 46, 147-151.
74. Kharroubi M., Bouselsal B., Sudhir K.S. 2024. Groundwater quality and non-carcinogenic element health risks assessment using multi-technical models: A case of the deep aquifer of the complex terminal in Ouargla city (southeastern Algeria). *Groundwater for Sustainable Development* 25 (2024) 101140. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2024.101140>.
75. Kharroubi M., Bouselsal B., Said S.H., Zeddouri A., Ouarekh M. (2023). Mineralization Mechanisms and Water Quality of the Complex Terminal Aquifer in Algerian Desert

- (Ouargla). In: Kallel, A., et al. Selected Studies in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. CAJG 2020. Advances in Science, Technology & Innovation. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43803-5_42
76. Kharroubi M., Bouselsal B., Ouarekh M., Benaabidate L., Khadri R. 2022. Water Quality Assessment and Hydrogeochemical Characterization of the Ouargla Complex Terminal Aquifer (Algerian Sahara). *Arabian Journal of Geosciences* 1–24. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09438-z>.
 77. Khechana Salim. 2014. Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien). th. Doctorat, univ.de Annaba, 148 p.
 78. Khechana S, Derradji F, Derouiche A, Mega N. (2011). Caractéristique hydrochimiques des eaux de la nappe phréatique du vallée d'Oued Souf (SE Algérien). *Eur J Sci Res* 62:207–215.
 79. Khechana S. (2011). Hydrochemical characteristics of groundwater in Oued-Souf valley (SE Algerian). *Eur. J. Sci. Res. EJSR* 62, 2011.
 80. Khelfaoui F, Sayad L, Attoui B, Bouselsal B, Ghezaili S. 2021. Contribution of a geographic information system to assess the vulnerability to groundwater pollution of the free water table from the Oued Souf region (South-east Algeria). *Civil and environmental engineering reports. CEER* 2021; 31 (3): 0001-0017. <https://doi.org/10.2478/ceer-2021-0031>.
 81. Kumar S, Sangeetha B. (2019). Assessment of ground water quality in Madurai city by using geospatial techniques. *Groundwater for Sustainable Development* 10 (2020) 100297N°3
 82. Li C, Gao X, Wang Y (2015b) Hydrogeochemistry of high-fluoride groundwater at Yuncheng Basin, northern China. *Sci Total Environ* 52:868–881
 83. Liu, J., Ma, Y., Gao, Z., Zhang, Y., Sun, Z., Sun, T., ... & Qian, L. (2022). Fluoride contamination, spatial variation, and health risk assessment of groundwater using GIS: a high-density survey sampling in Weifang City, North China. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-12
 84. Liu J, Peng Y, Li C, Gao Z, Chen S. (2021). Characterization of the hydrochemistry of water resources of the Weibei Plain, Northern China, as well as an assessment of the risk of high groundwater nitrate levels to human health. *Environ Pollution* 268:115947
 85. Liu J, Peng Y, Li C, Gao Z, Chen S. (2021a). A characterization of groundwater fluoride, influencing factors and risk to human health in the southwest plain of Shandong

- Province, North China. *Ecotoxicol Environ Saf* 207:111512.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111512>
86. Liu H, Guo H, Yang L, et al. (2015). Occurrence and formation of high fluoride groundwater in the Hengshui area of the North China Plain. *Environ Earth Sci* 74:2329–40
 87. Li P, He X, Li Y, et al. (2018). Occurrence and health implication of fluoride in groundwater of loess aquifer in the Chinese Loess plateau: a case study of Tongchuan, Northwest China. *Expo Health*. doi: 10.1007/s12403-018-0278-x
 88. Li P, Wu J, Qian H. (2014). Hydrogeochemistry and quality assessment of shallow groundwater in the southern part of the Yellow river alluvial plain (Zhongwei section), Northwest China. *Earth Sci Res J* 18:27–38
 89. Li X, Hou X, Zhou Z, Liu L. (2011). Geochemical provenance and spatial distribution of fluoride in groundwater of Taiyuan basin, China. *Environ Earth Sci* 62:1635–1642
 90. Ma L, Lowenstein TK, Li B, Jiang P, Liu C, Zhong J, Wu H. (2010). Hydrochemical characteristics and brine evolution paths of Lop Nor Basin, Xinjiang Province, Western China. *Appl Geochem* 25(11):1770–1782
 91. Maliqi E, Kaltrina Ju, Sudhir K.S. (2020). Assessment and Spatial Mapping of Groundwater Quality Parameters Using Metal Pollution Indices, Graphical Methods and Geoinformatics. *Analytical Chemistry Letters* 10 (2): 152–80.
<https://doi.org/10.1080/22297928.2020.1764384>.
 92. Manap M.A, Sulaiman W.N.A, Ramli M.F, Pradhan B, Surip N. (2013). A knowledge-driven GIS modeling technique for groundwater potential mapping at the Upper Langat Basin, Malaysia. *Arab J Geosci* 6:1621–1637
 93. Manap M.A, Hamzah M, Ramli M.F. (2006). Rapid Geological Mapping Systems (RGMS): A New Approach of Collecting Geological Data. *Proceedings of ESRI South Asia User Conference, Kuala Lumpur, 6–8 September*
 94. Marghade D., Malpe D. B., Subba Rao N. Sunitha, B. (2020). Geochemical assessment of fluoride enriched groundwater and health implications from a part of Yavtmal District, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(3), 673-694
 95. Masoud A, Aldosari A. (2020). Groundwater Quality Assessment of a Multi-Layered Aquifer in a Desert Environment: A Case Study in Wadi ad-Dawasir, Saudi Arabia. *Water* 2020, 12, 3020. <https://doi.org/10.3390/w12113020>

96. Mecibah I. (2017). *Les Ressources En Eau et Gestion Intégrée Du Bassin Versant D'oued Guebli (Nord-Est Algerien)*. th. Doctorat, univ.de Annaba, 314 p.
97. Mervat E, Abir M, Amal I. (2013). *Desalination and Water Treatment Assessing Groundwater Quality in a Coastal Area Using the GIS Technique,*” no. December 2014: 37–41. <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.797368>.
98. Mesdaghinia Al, Vaghefi K.A, Montazeri A, Mohebbi M.R, Saeedi R. (2010) *Monitoring of fluoride in groundwater resources of Iran. Bull Environ Contam Toxicol* 84:432–437
99. Misaghi F, Delgosha F, Razzaghmanesh M, Myers B. (2017). *Introducing a water quality index for assessing water for irrigation purposes: a case study of the Ghezel Ozan River. Sci Total Environ* 589:107–116.
100. Moulla A.S. Guendouz A. Cherchali M.H. Chaid Z. Ouarezki S. (2012). *Updated geochemical and isotopic data from the Continental Intercalaire aquifer in the Great Occidental Erg sub-basin (south-western Algeria). Quat. Int.* 257, 64–73.
101. Mudgal K.D, Kumari M, Sharma D.K. (2009). *Hydrochemical analysis of drinking water quality of Alwar District, Rajasthan. Nat Sci* 7(2):30–39
102. Mukherjee, I., & Singh, U. K. (2018). *Groundwater fluoride contamination, probable release, and containment mechanisms: a review on Indian context. Environmental geochemistry and health*, 40(6), 2259-2301.
103. Mustafa E, Esam I, Osman A. (2019). *Assessment of groundwater quality using GIS, hydrogeochemistry, and factor statistical analysis in Qena governorate, Egypt. Desalination and Water Treatment.* <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24423>
104. Narsimha A, Ajay K.T. (2019). *Hydrogeochemical investigation of groundwater quality in the hard rock terrain of South India using Geographic Information System (GIS) and groundwater quality index (GWQI) techniques. Groundwater for Sustainable Development* 10 (2020) 100288
105. Nawale V. P. Malpe D. B., Marghade D. Yenkie R. (2021). *Non-carcinogenic health risk assessment with source identification of nitrate and fluoride polluted groundwater of Wardha sub-basin, central India. Ecotoxicology and Environmental Safety*, 208, 111548.
106. Nezli I. E., Achour S., Djidel M., Attalah, S. (2009). *Presence and origin of fluoride in the complex terminal water of Ouargla Basin (Northern Sahara of Algeria).*
107. Nezli I.E. (2009). *Approche hydrogéochimique a l'étude des aquifères de la basse vallée de l'oued m'ya (Ouargla). Thèse Doctorat, univ.de Biskra*, 143 p.

108. ONM. (2019). Bulletins mensuels de relevé des paramètres climatologiques en Algérie (période 2007-2019), Office national météorologique, El Oued, Algérie.
109. Oruc N. (2008). Occurrence and problems of high fluoride waters in Turkey: an overview. *Environ Geochem Health* 30:315–323
110. OSS (Observatoire Sahara et Sahel). (2003). Système aquifère du Sahara septentrional: gestion commune d'un bassin transfrontière. Rapport de synthèse. OSS, Tunisie.
111. Ouarekh M., Bouselsal B., Belksier M.S., Benaabidate L. 2021. Water quality assessment and hydrogeochemical characterization of the Complex Terminal aquifer in Souf valley, Algeria. *Arabian J. Geosci.* 14, 2239. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08498-x>.
112. Ouarekh, M., Bouselsal, B., Belksier, M.S., Kharroubi, M. (2023). Hydrogeochemical and Groundwater Flow Studies in El Oued Region (Southeast Algeria). In: Kallel, A., et al. *Selected Studies in Environmental Geosciences and Hydrogeosciences. CAJG 2020. Advances in Science, Technology & Innovation.* Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-43803-5_40.
113. Piper AM (1944) Graphical interpretation of water analysis, *Transactions of the American Geophysical Union.*1944, 25: pp 914 -923
114. Paix P. (1956). Les nappes artésiennes de l'Oued Righ (Artesian aquifers of the Wadi Rhir valley). Dissertation, Science Faculty, Algiers University
115. Parkhurst, D. L., & Appelo, C. A. J. (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2): A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. *Water-resources investigations report*, 99(4259), 312.
116. Podgorski J, Labhasetwar P, Saha D, et al. (2018). Prediction modeling and mapping of groundwater fluoride contamination throughout India. *Environ Sci Technol* 52(17):9889–98.
117. Qasemi M, Afsharnia M, Zarei A, Farhang M, Allahdadi M. (2018). Non-carcinogenic risk assessment to human health due to intake of fluoride in the groundwater in rural areas of Gonabad and Bajestan, Iran: a case study, *Hum. Ecol. Risk Assess.* 0 (2018) 1–12, <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1461553>
118. Raghunath H.M. (1987). *Groundwater.* Wiley Eastern Ltd., Delhi.
119. Remini B& Kechad R. 2011. Impact of the water table razing on the degradation of El Oued palm plantation (Algeria) mechanisms and solutions. *Geog Tec* 1: 48-56, 2011.
120. Richards L.A. (1954). *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils.* U. S. Department of Agriculture Handbook, 60 Washington USA. 160

121. Rishi MS, Lakhvinder K, Sakshi S (2019) Human and Ecological Risk Assessment : An International Groundwater Quality Appraisal for Non- Carcinogenic Human Health Risks and Irrigation Purposes in a Part of Yamuna Sub-Basin, India. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal* 0 (0): 1–21. <https://doi.org/10.1080/10807039.2019.1682514>.
122. Raju, N. J. (2016). Prevalence of fluorosis in the fluoride enriched groundwater in semi-arid parts of eastern India: Geochemistry and health implications. *Quaternary International*. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2016.05.028> Raza, M., Farooqi, A., Niazi, N. K., & Ahmad, A. (2016). Geochemical control on spatial variability of fluoride concentrations in groundwater from rural areas of Gujrat in Punjab, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 75(20), 1-16.
123. Raza, M., Farooqi, A., Niazi, N. K., Ahmad, A. (2016). Geochemical control on spatial variability of fluoride concentrations in groundwater from rural areas of Gujrat in Punjab, Pakistan. *Environmental Earth Sciences*, 75(20), 1-16.
124. Rezaei, M., Nikbakht, M., Shakeri, A. (2017). Geochemistry and sources of fluoride and nitrate contamination of groundwater in Lar area, south Iran. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(18), 15471-15487
125. Rodier J (1984) *L'analyse de l'eau*, 7ème édition DUNOD,1984, 1353p.
126. Satouh A., Bouselsal B., Chellat, S., Benaabidate L. 2021. Determination of Groundwater Vulnerability Using the DRASTIC Method in Ouargla Shallow Aquifer (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering*, 22(6), 1–8. [Htps ://doi.org/10.12911/22998993/137680](https://doi.org/10.12911/22998993/137680)
127. Saurabh S, Abhishek S (2020) Sources and Leaching of Nitrate Contamination in Groundwater. *Current science*, Vol. 118, N^o. 6. DOI:10.18520/cs/v118/i6/883-891
128. Saxena VK, Ahmad S (2002) Inferring the chemical parameter for the dissolution of fluoride in groundwater. *Environ Geo* 25:475–481
129. Sekkoum, K., Talhi, M. F., Cheriti, A., Bourmita, Y., Belboukhari, N., Boulenouar, N., Taleb, S. (2012). Water in Algerian Sahara: environmental and health impact. *Advancing desalination*, 197-216.
130. Su C, Wang Y, Xie X, Li J. (2013). Aqueous geochemistry of highfluoride groundwater in Datong Basin, Northern China. *J Geochem Explor* 135:79–92
131. Sudhakar S, Srinivas P. (2019). An analytical hierarchy process-based geospatial modeling for delineation of potential anthropogenic contamination zones of

- groundwater from Arang block of Raipur district, Chhattisgarh, Central India. *Environmental Earth Sciences* <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8724-z>
132. Sunitha, V. (2020). Geochemical and health risk assessment of fluoride and nitrate toxicity in semi-arid region of Anantapur district, South India. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 2, 150-161.
 133. Thilagavathi, T., Kanchana, S., Banumathi, P., Hemalatha, G., Vanniarajan, C., Sundar, M., & Ilamaran, M. (2015). Physico-chemical and functional characteristics of selected millets and pulses. *Indian Journal of Science and Technology*, 8(S7), 147-155.
 134. Touahri M., Belksier M.S., Boualem B., Kebili M. 2022. Groundwater Quality Assessment of Hassi Messaoud Region (Algerian Sahara). *Journal of Ecological Engineering* 2022, 23(11), 165–178. doi.org/10.12911/22998993/153396
 135. UNESCO. (1972). ERESS project: study of the northern Sahara water resources. Final report), United Nations Educational Scientific and Cultural Organisation, Paris, 1972.
 136. USEPA 1989 Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part A) Ofce of Emergency and Remedial Response, Washington DC, USA
 137. USEPA. (2004). Risk assessment guidance for superfund, vol 1, human health evaluation manual. Part E (supplemental guidance for dermal risk assessment), EPA/540/R/99/005. Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, Washington DC, USA.
 138. US EPA. (1999). Health effects from exposure to high levels of sulfate in drinking water workshop. Washington, DC, US Environmental Protection Agency, Office of Water (EPA 815-R-99-002). Available at <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/200021IN.PDF?Docke y=200021IN.PDF>. Accessed on Jan 2019
 139. US Salinity Laboratory (USSL) (1954) Diagnosis and Improvement of Saline and Alkaline Soils. Handbook No. 60, US Department of Agriculture, 160
 140. Vázquez-Guerrero, A., Alfaro-Cuevas-Villanueva, R., Rutiaga-Quiñones, J. G., & Cortés-Martínez, R. (2016). Fluoride removal by aluminum-modified pine sawdust: effect of competitive ions. *Ecological Engineering*, 94, 365-379.
 141. WHO. (2011). Guidelines for Drinking Water Quality, 4th ed.; World Health Organization: Geneva, Switzerland, pp. 1–518
 142. Wilcox L.V. (1955). The quality of water for irrigation use, U.S. Department of Agriculture Circular No. 962, Washington, District of Columbia, 40 p
 143. Wilcox LV (1948) The quality of water for irrigation use (No.1488-2016-124600)

144. Weiyan Z, Long M, Jilili A, Yongxiao G, Gulnura I, Galymzhan S. (2019). Hydrochemical characteristics and irrigation suitability of surface water in the Syr Darya River, Kazakhstan. *Environ Monit Assess* (2019) 191: 572. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7713-8>
145. Wu J, Sun Z. (2016). Evaluation of shallow groundwater contamination and associated human health risk in an alluvial plain impacted by agricultural and industrial activities, mid-West China, *Expo. Heal.* 8 (2016) 311–329, <https://doi.org/10.1007/s12403-015-0170-x>.
146. Xiao J, Jin Z, Zhang F. (2015). Geochemical controls on fluoride concentrations in natural waters from the middle Loess Plateau, China. *J Geochem Explor* 159:252–61
147. Xu, B., Zhang, Y., & Wang, J. (2019). Hydrogeochemistry and human health risks of groundwater fluoride in Jinhuiqu irrigation district of Wei river basin, China. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 25(1-2), 230-249.
148. Yang C, Shuyun Z. (2019). Discussion on controlling factors of hydrogeochemistry and hydraulic connections of groundwater in different mining districts. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03767-1>
149. Yidana SM, Bawoyobie P, Sakyi P, Fynn O.F. (2018). Evolutionary analysis of groundwater flow: application of multivariate statistical analysis to hydrochemical data in the Densu Basin, Ghana. *J Afr Earth Sci* 138:167–176
150. Yidana S.M, Yidaa A. (2010). An assessment of the origin and variation of groundwater salinity in southeastern Ghana. *Environmental Earth Science*, 61, 1259–1273
151. Yousefi M, Ghoochani M, Hossein Mahvi A. (2018). Health risk assessment to fluoride in drinking water of rural residents living in the Poldasht city, Northwest of Iran. *Ecotoxicol Environ Saf* 148:426–430 Zhang L, Huang D, Yang J, et al. 2017. Probabilistic risk assessment of Chinese residents' exposure to fluoride in improved drinking water in endemic fluorosis areas. *Environ Pollut* 222: 118–25
152. Zhang X, Miao J, Hu B.X, Liu H, Zhang H, Ma Z. (2017). Hydrogeochemical characterization and groundwater quality assessment in intruded coastal brine aquifers (Laizhou Bay, China). *Environ Sci Pollut Res* 24(26):21073–21090
153. Zhao J, Fu G, Lei K, Li Y (2011) Multivariate analysis of surface water quality in the Three Gorges area of China and implications for water management. *J Environ Sci* 23:1460–1471.