



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de l'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER PROFESSIONAL

Spécialité : Conception et diagnostic des systèmes
d'AEP et d'assainissement

Présenté par :

SALLOUH Saida

Intitulé :

IMPACT D'IRRIGATION SUR LA NAPPE PHRÉATIQUE
DE LA RÉGION DU HASSI KHELIFA

Soutenue le : 28/05 /2025

Devant le jury composé de :

Dr : KHECHANA Salim

Président

Dr : SAYAHILEMBAREK Mohamed

Examineur

Dr : KHEZAZNA Amina

Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciement

Avant toute chose, nous tenons à remercier "ALLAH" pour nous avoir donné la force, la santé et la persévérance nécessaires à la réalisation de ce mémoire.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à

*Madame **KHAZAZNA AMINA***

notre encadrant de mémoire. La première incitation à terminer le mémoire de fin d'études. Son soutien constant, ses conseils avisés et son expertise précieuse ont été senties dans la réussite de ce projet. Madame AMINA a su nous guider avec patience et perspicacité, en enrichissant notre travail par ses orientations judicieuses et son dévouement. Grâce à elle, nous avons pu mener ce projet à bien et surmonter les défis rencontrés. Nous lui en sommes profondément reconnaissants.

*Nous remercions sincèrement nos accompagnateurs pendant notre collecte de données, en particulier Monsieur **Brahimi yacin** de l'ANRH à la wilaya d'El Oued, et Monsieur **SEGHER Mouhamed Lamine** de la Direction des Ressources en Eaux à la wilaya d'El Oued. Monsieur **BOUSBAI ELIDE** chef personnel de la Direction des Ressources en Eaux à la wilaya d'El Oued pour faciliter le processus de collection d'information. Leur expertise et leur encadrement nous ont permis de développer des compétences essentielles et d'approfondir nos connaissances dans le domaine de Notre étude.*

Enfin, nous remercions tous ceux qui, de près ou de loin, spécialement nos familles pour leur soutien psychologique ainsi que nos amis et proches, ont contribué à la réalisation de ce travail.



Dédicace

*À l'esprit de mon chère **père**, que Dieu l'offre le paradis, qui as toujours cru en moi et m'as inspirée à pour. suivre mes rêver.*

*À mes chers enfants **Nidhal, Rahaf** .ma source de bonheur et les fleurs de ma vie .*

*À mes sœurs **Asma, Ahlem** ,pour votre camaraderie et vos encouragements.*

Vous avez été une source de motivation et de force tout au long de ce chemin.

*À mes amies : **Asma, Noubia, Fouzia ; Aicha, Nesrine** et **sana** pour votre amitié sincère et votre soutien indéfectible .Vous avez rendu ce parcours Plus agréable par votre présence et vos encouragements constants.*

Ce mémoire est le résultat de votre présence et de votre influence positive dans ma vie. Votre amour inconditionnel et vos encouragements constants ont été les fondations sur lesquelles j'ai pu construire ce travail.

Merci du fond du cœur pour tout ce que vous avez fait.

SAIDA



Résumé

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو تحديد العوامل التي تؤثر على جودة وتدهور المياه الجوفية في منطقة حاسي خليفة، مع أخذ وادي سوف كمنطقة دراسة. تم إجراء دراسة ميدانية لجمع البيانات، التي تم تحليلها لمعالجة العينات المجمعة للمعايير الفيزيائية والكيميائية للمياه الطبقة. تشمل الدراسة تحليلاً معمقاً للمياه الجوفية في نفس المنطقة. تهدف هذه الدراسة إلى تقديم توصيات لحماية واستدامة الأراضي الزراعية المروية، لا سيما في ضوء تدهورها في هذه المنطقة.

الكلمات المفتاحية: المناطق الجافة، الري، الزراعة، المياه الجوفية، الدراسة الفيزيائية-الكيميائية.

Abstract

The main objective of this study is to identify the factors affecting the quality and degradation of the groundwater in the Hassi Khelifa region, using Wadi Souf as the study area. A field study was conducted to collect data, which were analyzed to process the collected samples for the physical and chemical parameters of the stratified water. The study includes a thorough analysis of the groundwater in the same area. This study aims to provide recommendations for the protection and sustainability of irrigated agricultural lands, particularly in light of their deteriorating condition in this region.

Keywords: arid zones, irrigation, agriculture, groundwater, physicochemical study.

Résumé

L'objectif principal de cette étude est d'identifier les facteurs affectant la qualité et la dégradation la nappe phréatique de la région du hassi khelifa , en prenant Wadi Souf comme zone d'étude. Une étude sur le terrain a été menée pour collecter des données, qui ont été analysées pour traiter les échantillons collectés pour les paramètres physiques et chimiques de l'eau stratifiée . L'étude comprend une analyse approfondie des eaux souterraines de la même zone. Cette étude vise à fournir des recommandations pour la protection et la durabilité des terres agricoles irriguées, notamment à la lumière de leur état de détérioration dans cette région.

Mot clés: zones arides, irrigation, agriculture, eaux souterraines , étude physico-chimique.

Table des matières

REMERCIEMENT.....	
DÉDICACE	
RÉSUMÉ.....	
TABLE DES MATIÈRES	
LISTES DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES PHOTOS.....	
LISTE D'ABRÉVIATION	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1

CHAPITRE I : PRÉSENTATION DE LA VILLE DE HASSI KHALIFA

INTRODUCTION	4
I.1. SITUATION GÉOGRAPHIQUE :	4
I.2. TOPOGRAPHIE DE HASSI KHALIFA :	5
I.3. SITUATION CLIMATIQUE DE LA COMMUNE DE HASSI KHALIFA:.....	5
I.3.1. Les Températures:.....	6
I.3.2. Les Précipitations.....	7
I.3.3. L'humidité:	9
I.3.4. Les vents:	9
I.4. APERÇU GÉOMORPHOLOGIQUE DE LA VALLÉE DU SOUF:	10
I.4.1. L'Ergoriental:.....	10
I.4.2. Les Talwegs fossiles:	11
I.4.3. Les ghouts	11
I.4.4. Les formations superficielles:	12
I.4.4.1. Les formations simples:	12
I.4.4.2. Les combinaisons:	13
I.4.5. Croûtes calcaires:	13
I.4.6. Sables quartzeux:	13
I.4.7. Gypse	14
I.4.7.1. Le gypse diffuse:	14
I.4.7.2. Les croûtes gypseuses:	14
I.5. SITUATION GÉOLOGIQUE DE LA VALLÉE DU SOUF:	14
I.5.1. Les dépôts sédimentaires continentaux post-hercyniens:	15
I.5.2. Les dépôts sédimentaires laguno - marins (Crétacé supérieur et Eocène):.....	15
I.5.3. Conséquences du plissement Atlasique:	17
I.5.4. Formation du tertiaire continental :.....	17
I.5.5. La lithostratigraphie:.....	18
I.5.5.1. Quaternaire	18
I.5.5.2. Tertiaire (Cénozoïque)	19
I.5.5.3. Secondaire (Crétacé)	19
I.5.5.4. Albien:.....	20

I.5.5.5. Albo-Vraconien.....	20
I.5.6. Cénomanién	20
I.5.5.7. Turonien.....	20
I.5.5.8. Sénonien.....	20
I.6. LA SITUATION HYDRO-GÉOLOGIQUE.....	20
I.6.1. Ressources en eaux.....	20
I.6.1.1. Les ressources en eaux superficielles	21
I.6.1.2. Les ressources en eaux souterraines	21
I.6.2. Les nappes de la vallée du Souf	22
I.6.2.1. Nappe phréatique.....	22
I.6.2.2. Nappe du Continental Intercalaire	22
I.6.2.3. La nappe du Complexe Terminal	25
I.6.3. Les potentialités souterraines totales reconnues et leurs répartitions	26
I.6.3.1. Répartition du nombre des forages par zones	26
I.6.3.2. Répartition du nombre de forages Zone du Souf (La vallée du Souf – Mih Ouensa – Oued Allenda).....	27
I.6.3.3. Evaluation des volumes soutirés des ressources en eau par zones, par usage...	28
I.6.4. Exploitation des nappes.....	28
I.6.4.1. Exploitation la nappe du Complexe Terminal (C.T)	28
I.6.4.2. Exploitation la nappe du Continental Intercalaire (C.I).....	29
I.6.4.3. Exploitation de la nappe phréatique.....	29
CONCLUSION.....	29

CHAPITRE II : LA NAPPE PHRÉATIQUE DE LA VALLÉE DU SOUF ET SON APTITUDE À L'IRRIGATION

INTRODUCTION	31
II.1. LA NAPPE PHRÉATIQUE	31
II.1.1. Les principales caractéristiques de la nappe phréatique.....	31
II.1.2. L'alimentation de la nappe phréatique	32
II.1.3. Historique et mécanisme de la remontée des eaux de la nappe phréatique.....	33
II.1.3.1. Historique de la remontée des eaux de la nappe phréatique.....	33
II.1.3.2. Mécanisme de la remontée des eaux de la nappe phréatique	37
II.2. L'IRRIGATION :	38
II.2.1. Définition.....	38
II.2.2. Provenance de l'eau d'irrigation.....	38
II.2.3. L'irrigation dans le monde	39
II.2.4. L'irrigation en Algérie :	40
II.2.5. L'irrigation au Sahara algérien :	41
II.2.6. L'activité agricole dans la vallée du Souf	41
II.3. LES DIFFÉRENTES SOURCES DE POLLUTION DES EAUX SOUTERRAINES	41
II.3.1. Les pollutions naturelles	42
II.3.2. Les pollutions dues aux activités humaines.....	42
II.3.2.1. La pollution domestique	42
II.3.2.2. La pollution industrielle	42
II.3.2.3. L'agriculture	42
II.3.2.4. Pollution des eaux souterraines.....	43

Conclusion	44
-------------------------	-----------

CHAPITRE III : ETUDE QUALITATIVE ET QUANTITATIVES SUR LA NAPPE PHRÉATIQUE

INTRODUCTION	46
III.1. APPROCHE MÉTHODOLOGIQUE:	46
III.2. MÉTHODE DE PRÉLÈVEMENT	47
III.2.1. Prélèvements :	47
III.2.2. Représentativité des échantillons.	47
III. 2.2.1. Forages et puits	47
III.2.3. Les paramètres physico-chimiques :.....	48
III.2.3.1 Température(T) :.....	48
III.2.3.2. Le Potentiel d'Hydrogène (pH)	48
III.2.3.3. Conductivité électrique (CE) :	48
III.2.3.4. Résidu-sec :.....	49
III.2.3.5. Salinité :	49
III.2.3.6. La turbidité :	49
III.2.3.7. Calcium (Ca^{2+}) :.....	49
III.2.3.8. Magnésium (Mg^{2+}) :	49
III.2.3.9. Titre Hydrométrique TH :.....	50
III.2.3.10. Total Dissolved Solids (TDS) :	50
III.2.3.11. Bicarbonates (HCO_3) :.....	50
III.2.3.12. Les nitrates (NO_3^-) :	50
III.2.3.13. Phosphate (PO_4) :.....	51
III.2.3.14. Alcalimétrie complète (TAC).....	51
III.2.3.15. TA Titre alcalimétrique	51
III.2.3.16. Les nitrites (NO_2^-) ou azote nitreux	51
III.2.4. Les paramètres d'analyse la fluctuation de la nappe phréatique :.....	51
III.2.4.1. Analyse de la fluctuation de la nappe phréatique	52
III.2.4.2. Facteurs essentiels concourant à sa variabilité	52
III.2.4.3. Techniques d'analyse des variations	53
III.3. RÉSULTATS ET DISCUSSION	54
III.3.1. L'échantillonnage :	54
III.3.2. Présentation les Puits (H) de la nappe phréatique de H. KHALIFA:.....	55
III.3.3. Analyse de la fluctuation de la nappe phréatique:	56
III.3.3.1. Évolutions de la nappe phréatique en 2010 :.....	56
III.3.3.2. Évolutions de la nappe phréatique en 2012 :.....	57
III.3.3.3. Évolutions de la nappe phréatique en 2015:	58
III.3.3.4. Évolutions de la nappe phréatique en 2022 :.....	59
III.3.3.5. Évolutions de la nappe phréatique en 2025 :.....	60
III.4. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE	61
III.4.1. Campagnes d'échantillonnage, analyses de laboratoire et de data :.....	61
III.4.2. Méthode électrochimique	65
III.5. CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DE L'EAU DE LA NAPPE PHRÉATIQUE.....	66
III.5.1. Température(T)	66
III.5.2. Conductivité électrique (CE).....	66

III.5.3. Potentiel d'Hydrogène (pH)	67
III.5.4. Salinité:.....	67
III.5.5. Résidu-sec :	68
III.5.6. La turbidité :	68
III.5.7. Calcium (Ca^{2+}) :	69
III.5.8. Magnésium (Mg^{2+})	70
III.5.9. Chlorure (Cl^-)	70
III.5.10. Titre Hydrométrique TH:	71
III.5.11. Total Dissolved Solids (TDS) :	71
III.5.12. Bicarbonates (HCO_3^-) :.....	72
III.5.13. Les nitrates (NO_3^-).....	73
III.5.14. L'Ammonium (NH_4^+).....	73
III.5.15. Phosphate (PO_4^{3-}).....	74
III.5.16. Alcalimétrie complète (TAC) :	74
III.5.17. Les nitrites (NO_2^-) ou azote nitreux.....	75
CONCLUSION.....	75
CONCLUSION GÉNÉRALE	78
LES PROPOSITIONS D'AMÉNAGEMENT	80
RÉFÉRENCES	82
ANNEXES	86

Listes des figures

Figure I.1. Carte de localisation de HASSI KHALIFA	5
Figure I.2. Repartition des temperatures moyennes mensuelles de wilaya d'El Oued (2000-2023).....	7
Figure I.3. Précipitations annuelles moyennes de la station de Guemar (2000-2023).....	8
Figure I.4. L'humidité de la station de Guemar (1991/2021).....	9
Figure I.5. Carte géologique du Nord-Ouest de l'Afrique.....	16
Figure I.6. Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale.....	21
Figure I.7. Limites et piézométrie du Continental Intercalaire.....	24
(Source : Baba SY et al, 2006)	24
Figure I.8. Extension des formations du système Aquifère du Sahara Septentrional.....	26
Figure I.9. Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par zones.....	27
Figure II.1. Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe33	
Figure II.2. Evolution des palmeraies autour d'El Oued en 1980.....	34
Figure II.3. Evolution des palmeraies autour d'El Oued en 1986.....	35
Figure II.4. Evolution des palmeraies autour d'El Oued en 1993.....	36
Figure II.5. La nappe phréatique avant 1980.....	37
Figure II.6. La nappe phréatique après 1980.....	38
Figure III.1. carte d'inventaire des puits de prelevement	54
Figure III.2. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2010 H. KHALIFA	57
Figure III.3. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2012 H. KHALIFA	58
Figure III.4. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2015 H. KHALIFA	59
Figure III.5. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2022 H. KHALIFA	60
Figure III.6. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2025 H. KHALIFA	61
Figure III.7. Pompe immergée au niveau d'un puits. Point de prise d'un échantillon d'eau ...	62
Figure III.8. Histogramme des températures mesurées des puits HASSI KHALIFA	66
Figure III.9. Histogramme conductivités mesurées des puits HASSI KHALIFA.....	67
Figure III.10. Histogramme des pH mesurés puits HASSI KHALIFA	67
Figure III.11. Histogramme des SAL mesurés puits HASSI KHALIFA	68
Figure III.12. Histogramme des RS mesurés puits HASSI KHALIFA	68
Figure III.13. Histogramme des RS mesurés puits HASSI KHALIFA	69
Figure III.14. Histogramme des Ca^{+2} mesurés puits HASSI KHALIFA	69
Figure III.15. Histogramme de magnésium des eaux analysées.....	70
Figure III.16. Histogramme des chlorures des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	70
Figure III.17. Histogramme des TH des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	71
Figure III.18. Histogramme des TDS des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	72
Figure III.19. Histogramme des bicarbonates des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA.....	72
Figure III.20. Histogramme des nitrates d'eaux analysées de la région HASSI KHALIFA...	73
Figure III.21. Histogramme L'Ammonium des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	73
Figure III.22. Histogramme le phosphate des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	74

Figure III.23. Histogramme le TAC des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	74
Figure III.24. Histogramme le NO ₂ - des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA	75

Liste des tableaux

Tableau I.1. Les Températures Moyennes Annuelles de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 2000 et 2023.	6
Tableau I.2. Les Températures Moyennes Annuelles de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 2000 et 2023.	8
Tableau I.3. L'humidité dans la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 1991 et 2021.	9
Tableau I.4. Les Vents Annuelles de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 2000 et 2023.	10
Tableau I.5. Répartition du nombre de forages enregistrés dans La vallée du Souf.....	28
Tableau I.6. Récapitulatif des volumes d'eau soutirés de CT pour les différents types des usages	28
Tableau II.1 : Certains contaminants courants des eaux souterraines et les sources de pollution associées (VANESSA et <i>al.</i> 2015)	43

Liste des photos

Photo III.1. Puits AYACHI AMOR	55
Photo III.2. Puits BRAHIMI KHALIFA	55
Photo III.3 Puits SARL TLMIN	55
Photo III.4. Puits CHERRAHI Mohammed	55
Photo III.5. Puits GHAMAM NAOUS AMMAR Rmple	55
Photo III.6. Puits BRIKE MOHAMED (MIZAN)	55
Photo III.7. Appareil de mesure de niveau statique.....	56
Photo III.8. Les bouteilles en polyéthylène des échantillons d'eau.....	63
Photo III.9. Appareil conductimètre+ pH-mètre.....	63
Photo III.10. Appareil Spectrophotomètre.....	64
Photo III.11. Réactive	64
Photo III.12. Appareil multi paramètre.....	65

Liste d'abréviation

ADE : Algérienne Des Eaux.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques.

B.G : Bonard et Guardel.

CE : Conductivité électrique.

CI : Continental Intercalaire.

CT : Complexe Terminal.

CTGREF : Centre technique du génie rural des eaux et forêts, localisé à Paris.

DHW : Direction de l'Hydraulique de la Wilaya.

DRE : Direction des ressources en eaux.

DSA : Direction des Services Agricoles.

DUAC : Direction de l'urbanisme, de l'architecture et de la construction.

FAO : Organisation des Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture.

HPO BG : Bureau d'Etudes Algérien Hydro Projet Ouest et Bureau d'Etudes Suisse
'Bernard et Gardel' Ingénieur Conseils.

NDVI : indice de végétation par différence normalisé.

ONA : Office National d'Assainissement.

ONM : Office National Météorologique.

PH : Potentiel Hydrogène.

SAU : Surface Agricole Utile.

SAT : Surface Agricole Totale.

STEP : Station d'Epuration.

UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'Education, la Science et la Culture

OSS : Observatoire du Sahara et du Sahel

Introduction générale

Introduction générale

D'une façon générale, l'agriculture est un secteur très consommateur d'eau, laquelle est souvent manquante dans les zones arides et semi-arides et où pour pallier cette insuffisance, le complément de fourniture d'eau très efficace jusqu'ici adopté par les hommes s'avère être l'usage de systèmes de complément d'eau lesquels on appelle irrigation. Cependant, il arrive également qu'on ne puisse disposer de l'eau qui répond aux standards de qualité voulus. Afin de maintenir ou de faire progresser leur productivité, les agriculteurs doivent utiliser diverses sources d'eaux pour irriguer leurs cultures.

Les régions sahariennes, à l'instar de la vallée du Souf en Algérie, doivent faire face à des enjeux importants dans un climat désertique de températures élevées, d'évapotranspiration importante, de vents soufflant souvent chargés de sable et de niveaux de précipitations très faibles. Ces conditions rendent impossible l'agriculture si aucun système d'irrigation n'est mis en place. Malgré cela, l'usage de nappes phréatiques relativement peu profondes a permis d'aménager en un temps très court des techniques de culture. On l'aura compris, l'infrastructure hydraulique est le socle des secteurs économiques dans les villes sahariennes, tandis que l'impact des conditions physico-chimiques de l'eau sur les productions agricoles devient un enjeu crucial pour leur développement soutenu.

Le Sahara septentrional est caractérisé par un aquifère constituant un des sols les plus riches en eau. Trois nappes importantes constituent l'aquifère : la nappe du Continental Intercalaire (CI), la nappe du Complexe Terminal (CT) et la nappe phréatique. Grâce à la découverte des potentiels hydriques considérables et à la baisse des coûts d'exploitation de l'eau souterraine, l'agriculture s'est fortement développée. On assiste à une transformation du paysage agricole du Sahara : on est passé d'un système traditionnel d'exploitation tel que les Ghouts, les puis à balancier ou les Foggaras, à un système moderne ou un système oasien évolué ayant besoin d'un important volume de l'eau. Au cours de ces dernières années, le Sahara a connu une grande Évolution de l'activité agricole.

La localité de Hassi Khelifa se trouve face à de sérieux problèmes relatifs à l'impact de l'irrigation sur les ressources en eau souterraine, menacées de non-durabilité dans un espace sec. Les raisons principales de cela remontent aux modes d'irrigation non durables et à la qualité médiocre de l'eau utilisée pour le besoin de l'irrigation. Ce qui a amené à poser le problème suivant:

Comment les problèmes rencontrés par l'agriculture peuvent être évalués sur le terrain?

Notre but de recherche est d'étudier l'impact d'une irrigation sur la variation de la nappe phréatique et sur le profil chimique des eaux de cette nappe.

Quel impact exercent le mode d'irrigation sur cette nappe phréatique et quelles approches de gestion durable adoptées pour préserver et réhabiliter cette nappe dans un espace aride?

Le but de ce travail de recherche est d'analyser et de quantifier les effets de l'irrigation, ainsi que d'étudier les évolutions de la nappe phréatique de Hassi Khelifa par rapport à l'influence des cultures. L'approche prévue dans ce travail de recherche s'articule autour d'un dispositif en trois chapitres.

Le premier chapitre intitulé : « représentation de la zone d'étude » : vise la présentation (localisation géographique) et l'identification des formations géologiques et du contexte hydrologique.

Le chapitre deux intitulé : La nappe phréatique dans la vallée du Souf et sa capacité d'irrigation. Ce chapitre a trait aux caractéristiques de la nappe phréatique.

Le troisième chapitre, intitulé : Présentation de l'évolution piézométrique de la nappe phréatique de la HASSI KHALIFA et Propriétés physico-chimiques de l'eau souterraine. C'est le chapitre qui traite des propriétés de la nappe phréatique et de son développement piézométrique, puis nous avons analysé les différents paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe.

Chapitre I

***Présentation de la
ville de Hassi Khalifa***

Introduction

La ville de Hassi Khalifa est située dans la région du Wadi Souf, une région désertique où abondent les palmeraies grâce à l'existence d'une nappe phréatique située à une faible profondeur, ce qui favorise la formation d'oasis au sein du « ghot » ou « cuvette », où les palmiers peuvent directement puiser l'eau de cette nappe. Ce premier chapitre se base essentiellement sur une caractérisation de la zone étudiée en termes de climat, de géologie, de géomorphologie et d'hydrogéologie. Cela permettra de situer la zone d'étude dans son contexte géologique au niveau régional et d'identifier le potentiel que présente le cadre physique de la vallée du Souf, qui aura un impact sur l'activité agricole.

I.1. Situation géographique :

La commune de HASSI KHALIFA est située au sud-est du Sahara algérien ou Sahara septentrional, entre la latitude 33°38' et 33°45' et la longitude 6°78' et 7°47' est du méridien de Greenwich. La commune de HASSI KHALIFA est située au Nord de la Wilaya d'El Oued, à une distance de 30 km sur la route nationale N°16, qui traverse le centre de la ville. Elle s'étend sur une superficie de 1112 km². Elle est délimitée par:

- Nord: commune TALEB EL ARBI et BEN GUACHA
- Est: commune de TALEB EL ARBI
- Ouest: commune d'AL-MAGRANE
- Sud: communes de TRIFAOUÏ et DEBILA

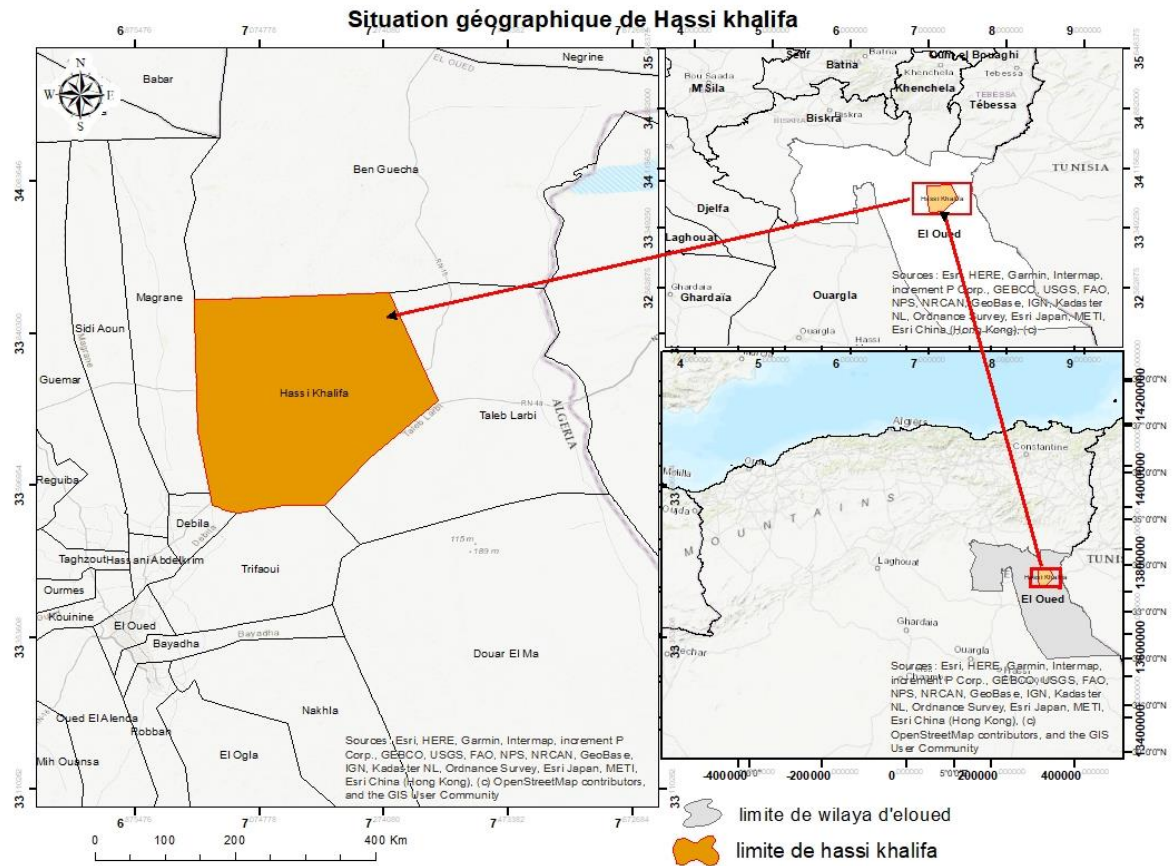


Figure I.1.. Carte de localisation de HASSI KHALIFA

(Source : Dr.KHEZAZNA Amina, 2025)

I.2. Topographie de Hassi Khalifa :

La région de Hassi Khalifa fait partie du Bas-Sahara, caractérisée par :

- Le point le plus haut se trouve à une altitude de 110 m (Nord-Ouest de la commune).
- Le point le plus bas est situé à environ 6 m dans la partie sud-est.
- L'altitude moyenne est estimée à 58 m, avec une pente douce vers le sud.

Le relief est globalement plat, composé de sols sableux et favorables à l'agriculture oasienne.

I.3. Situation climatique de La commune de Hassi Khalifa:

La commune de Hassi Khalifa fait partie de la région de souf qui se caractérise par un climat aride de type saharien.

Le climat est déterminant dans la formation de la commune de HASSI KHALIFA. Il a un effet considérable sur le relief, la flore, la constitution des sols et l'agriculture dans cette région.

Un climat saharien prédomine dans la vallée du Souf. Cela se caractérise par une faible pluviosité, des chaleurs marquées en été, des hivers tempérés et un fort taux d'évaporation.

Les données météorologiques dont nous nous sommes servis pour cette étude sont assurées par l'Office National de Météorologie (ONM) d'emplacement à Guemar au nord d'Oued Souf ville. Accompagnée par des données des sites suivant : le site www.meteomanz.com.

I.3.1. Les Températures:

Les saisons dans la vallée du Souf sont bien marquées par l'alternance d'hivers assez rudes et d'étés très chauds. Les mois de juillet et août dépassent fréquemment 40 °C (37,1° à @ 20,77° à N, 01° 18' à E, Fig. 02). Le mois de juillet est le plus chaud de l'année (indicateurs climatiques), avec des températures qui peuvent aller au-delà de 40,27°C. En hiver, la température reste relativement douce, mais les températures les plus froides sont généralement celles de décembre et de janvier, oscillant entre 5°C la nuit et 20°C en pleine journée. (Tableau I.1).

Tableau I.1. Les Températures Moyennes Annuelles de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 2000 et 2023.

Les Mois	Les Températures Moyennes Annuelles °C		
	T max	T min	T moy
Janvier	15,58	5	10,27
Février	17,92	6,63	12,27
Mars	22,53	10,24	16,39
Avril	27,32	14,37	20,84
Mai	32,05	18,73	25,4
Juin	37,12	23,25	30,19
Juillet	40,27	26,17	33,23
Août	39,21	25,81	32,52
Septembre	34,68	22,54	28,62
Octobre	28,75	17,29	23,02
Novembre	21,16	10,78	15,95
Décembre	16,42	6,63	11,5
Moyenne/ Somme	27,750	15,62	21,683

(Source : Météomanz.com)

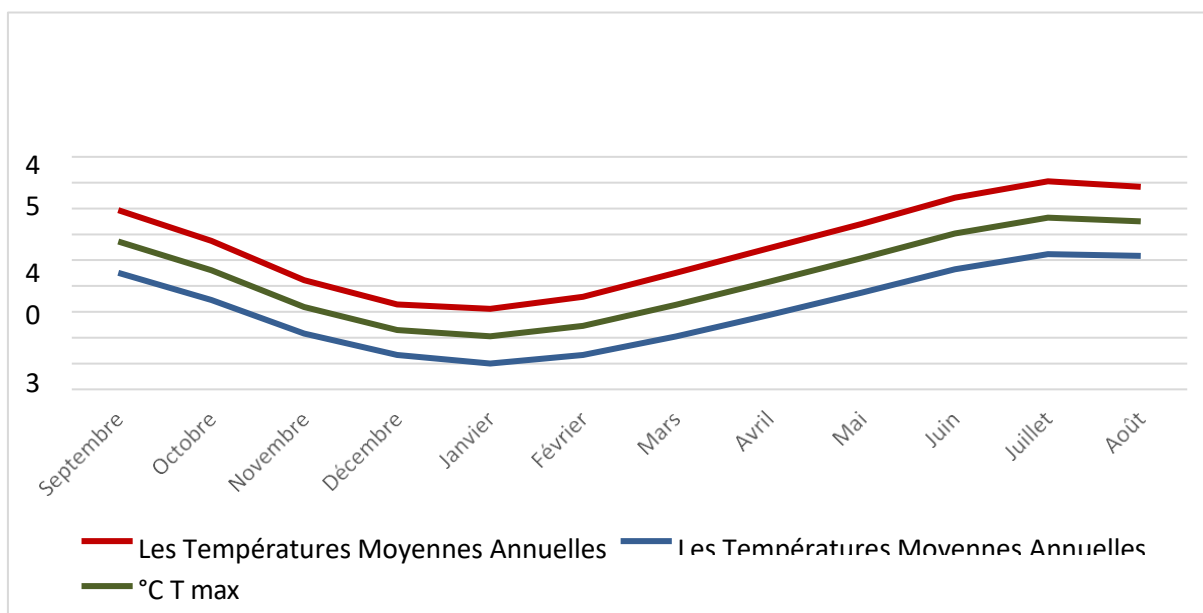


Figure I.2. Repartition des temperatures moyennes mensuelles de wilaya d'El Oued (2000-2023)

(Source : établie par étudiants).

I.3.2. Les Précipitations

L'analyse pluviométrique est une pièce maîtresse de l'hydro climatologie de la région en question, dans la mesure où elle contribue à déterminer le régime des précipitations et influe sur les variations des niveaux d'eau souterraine dans la région. A l'occasion des deux dernières décennies et demi, nous avons observé une immense variabilité des moyennes annuelles de précipitations.

Janvier is marked by the maximum amount of precipitation to 11,34mm (Fig.03), and the minimum amount of precipitation in juillet at 0.11 mm only. The maximum rainfall accumulation is in janvier at approximately 260 mm and the minimum amount is approximately 2mm in juillet. The variability of rainfall and the minimum annual mean volume define the dryness that marks Souf valley. Ces bas taux de précipitations affectent considérablement l'agriculture, tout comme la disponibilité et l'administration des ressources en eau.(Tableau I.2)

Tableau I.2. Les Températures Moyennes Annuelles de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 2000 et 2023.

Les Mois	Les Précipitations Moyennes Annuelles (mm)
Septembre	7,43
Octobre	4,28
Novembre	6,81
Décembre	5,71
Janvier	11,34
Février	2,91
Mars	5,96
Avril	8,16
Mai	3,29
Juin	0,51
Juillet	0,11
Août	2,48
Cumule	58,99

(Source : Météomanz.com)

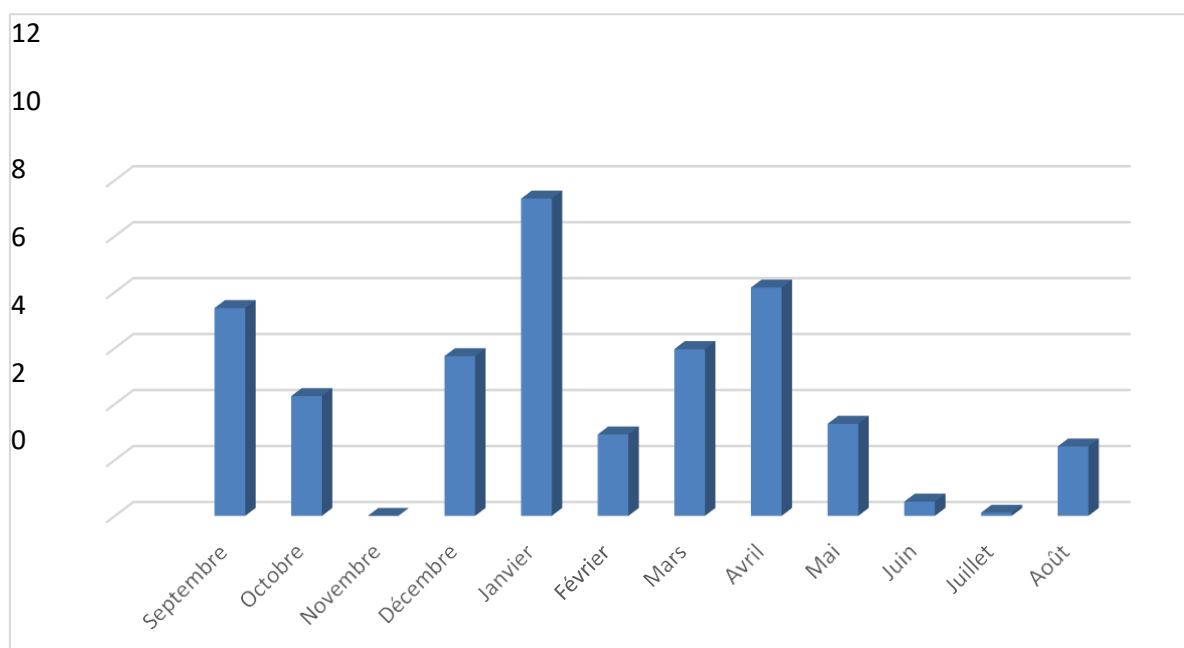


Figure I.3. Précipitations annuelles moyennes de la station de Guemar (2000-2023).

(Source : établie par étudiants).

I.3.3. L'humidité:

Tableau I.3. L'humidité dans la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 1991 et 2021.

	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juill	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
Humidité (%)	61	47	39	32	28	25	23	26	36	43	53	63

(Source : www.climate-data.org)

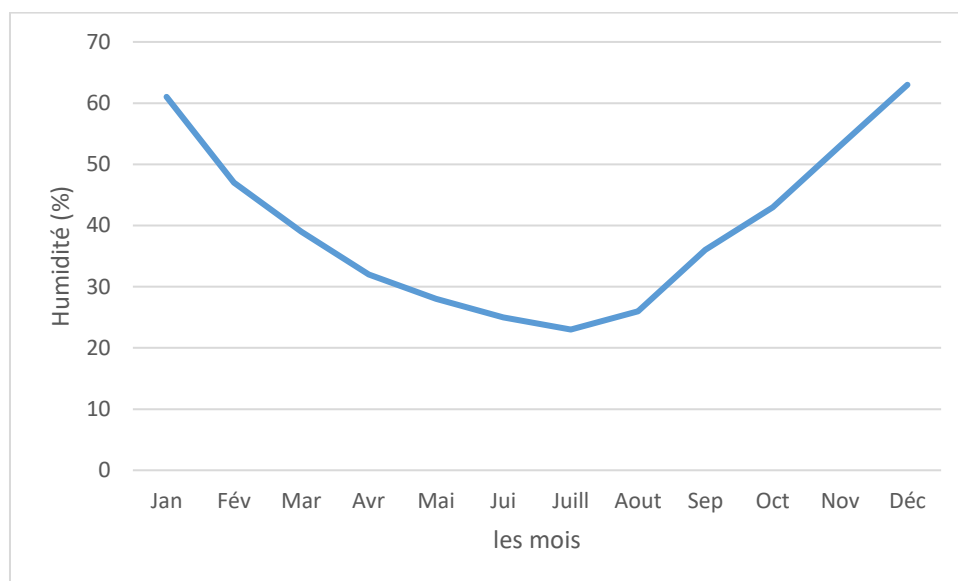


Figure I.4. L'humidité de la station de Guemar (1991/2021)

(Source : établie par étudiants).

Le tableau (Tab 01 de l'annexe) donne des données pour la période allant de 1991 à 2021, et nous pouvons voir à partir du dernier que les précipitations varient beaucoup entre les mois les plus secs et les plus humides, avec un intervalle de 13 mm. Nous voyons une variation de 23,5 °C au cours de l'année entière. D'après le Tableau I.3 et la Fig.04, le taux d'humidité relative est minimum en juillet (23,01 %). En décembre, le taux d'humidité atteint un pic de 62,89 %. En général, juin distingués en comptant le nombre minimum de jours pluvieux (0.20 jours). Janvier possède le niveau le plus important de précipitations avec 2.03 jours average.

I.3.4. Les vents:

La vallée du Souf dispose d'une longue période de vent fort, lesquels sont cycliques et les plus forts sont en printemps. La direction dominante est Nord-Est, sauf durant les mois hivernaux où elle change pour un Sud-Ouest. Le sirocco (Chihili) est le vent d'été ordinaire qui souffle en général sur la région, depuis le sud vers le nord et emportant avec lui des courants

d'air chaud qui peuvent à leur tour apparaître en vagues de sable. Il vaut également mentionner que la tempête de sable ont tendance a se produire entre février et avril au cours de printemps saisons. Heureusement, les "véritables" tempêtes sont rares.

Tableau I.4. Les Vents Annuelles de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 2000 et 2023.

Mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	mo y
Vent													
(Km/h)	17,1 0	15,4 4	14,0 0	15,2 7	17,2 7	17,3 6	18,0 9	19,6 4	18,8 2	18,3 0	15,6 0	17,7 3	17,0 5

I.4. Aperçu Géomorphologique de la vallée du souf:

L'analyse géomorphologique de la vallée du Souf a été opérée à partir de Ballais J-L (2010), Ballais, J. L et al (2009). et le rapport du Commissariat au développement de l'agriculture des régions sahariennes. Les recherches entamées concernant la géomorphologie du Souf ont visé la dynamique des sables et la genèse et positionnement des dunes. E. Reclus (1886 in Ballais et al., 2009) avait déjà soutenu que « dans la partie septentrionale du Sahara, les dunes sont en mouvement, elles migrent lentement vers le sud-est, ce qui résulte de l'orientation de leur forme, du fait de leur disposition actuelle par rapport aux centres de désagrégation ». Après quoi, les recherches axées sur le Grand Erg Oriental négligent son socle. Les auteurs habituellement cités sont G. Wilson (1971) ou Mainguet (1984). La nouvelle région d'analyse présente des altitudes modestes, 80 m de moyenne, le sommet le plus élevé est 125 m dans la commune de Bayadha (Soualah), le point le plus bas se trouve à – 29 m dans la commune de Réguiba (Foulia).

La vallée du Souf présente, en revanche, trois types de formations morphologiques naturelles : l'Erg oriental, les talwegs fossiles et les Ghouts.

I.4.1. L'Ergoriental:

Le Grand Erg Oriental consiste en trois sortes uniques de dunes : les nappes et sifs de sable, les chaînes de dunes et les ghourds.

Les nappes et les sifs couvrent un quart nord-ouest de l'erg et la partie nord qui se frotte aux chotts. Leurs hauteurs s'accumulent graduellement jusqu'au sud de l'erg, avec une altitude maximale quasi de 80 mètres. Les couches de sable et les sifs vers le nord-ouest sont

relativement minces en moyenne. La hauteur de la couche de sable est corrélée à une montée continue du niveau du sol du nord vers le sud : de -37 mètres au chott Melhrir à 379 mètres à Hassi Bel Guebbour au sud de l'erg. Le relief d'inclinaison inverse par rapport à la direction dominante du vent (NNE-SSO) et la nature sableuse du terrain favorisent un ralentissement de ce dernier et encouragent l'accumulation de sable. Au nord d'El Oued, on remarque une série de dunes vivantes (sifs et soies) formées en bandes et en surfaces planes, parfois recouvertes d'un mince tapis de sable transporté par le vent, appelé sahanes.

Au fur et à mesure que nous nous dirigeons vers le sud dans le Grand Erg Oriental, les lignes de dunes sont plus hautes, séparées par des passages inter-dunaires qui s'élargissent progressivement. On appelle ces réseaux de dunes « erg », ils sont composés de dunes longitudinales alignées en parallèle, orientées du nord-est au sud-ouest. Elles se créent sous l'effet du vent dominant, qui souffle dans cette direction.

Pour ce qui est des ghourds, ils se présentent comme des dunes pyramidales agencées en rangées. Ils se différencient des autres sortes de dunes grâce à leur structure pyramidale et leur disposition en lignes. Les ghourds se créent dans des régimes éoliens à trois ou sans orientation prépondérante, autrement dit lorsque le vent provient de diverses directions.

I.4.2. Les Talwegs fossiles:

En plus des dunes de sable, le Grand Erg Oriental abrite deux dunes fossiles, appelées "Horra" et "Daya." Ces structures, clairement visibles dans les images aériennes et photographiées de près, témoignent de l'ancienne présence de vastes vallées avec une énergie significative. Les études géologiques indiquent que l'origine de ces vallées remonte au Pléistocène moyen (Palais et al., 1985; Pallais, Benazouz, 1987; Pallais, Benouzdu, 1987, 1991).

I.4.3. Les ghouts

- **La Horra :**

Également désigné par le terme de « oued », il s'agit d'un dispositif consistant exclusivement en un tracé, parfois double, de ghouts, serpentant depuis le secteur sud de Guémar jusqu'au nord-est de Hobba. Les deux systèmes de ghouts en amont sont constitués respectivement, à l'ouest, d'une première quinzaine de ghouts allant de Daouia-Douara à Ourmès et, à l'est, d'une deuxième quinzaine de ghouts allant de Robbah à El Oued. Les deux dispositifs présentent en effet des couloirs de convergences vers Guémar, jusqu'à Hobba, puis,

au-delà, au niveau de l'orientation NNW-SSE, se développent des dunes et à l'ouest, une sahane et sa croûte gypseuse. Ce dessin hexagonal de la Horra évoque une structure fluviale. Au Nord, le talweg se resserre alors et se jette au niveau de l'une des nombreuses sebkhas de cours NNW-SSE.

- **La Daya :**

Il s'agit d'un second alignement de ghouts, qui suit un tracé parallèle à la Horra et traverse Magrane. Elle s'évanouit vers le nord plus tôt que la Horra.

I.4.4. Les formations superficielles:

Dans le domaine de la géologie, on distingue deux catégories de formations, les formations simples et les associations.

I.4.4.1. Les formations simples:

On les trouve plus fréquemment dans le Souf. On distingue uniquement deux variétés de sables :

a) Les sables quartzo-gypseux:

La composition de ces sables est faite d'un agglomérat de grains de quartz et de gypse ; ce dernier est un minéral hydraté, contenant du sulfate, qui se présente souvent sous forme de cristaux fragiles. La proportion de gypse présent dans ces sables peut varier considérablement. Ils sont présents dans le Souf, à une plus forte concentration dans les régions arides.

b) Les sables quartzeux:

La quasi-totalité des grains de sables est formée de quartz, un minéral particulièrement dur et solide. Ce sont essentiellement des régions où l'érosion est marquée par le vent qui nous les offrent : les ergs. Au-delà de la seule existence des deux variétés de sables déjà signalées, on trouve des formations meubles, cela vaut aussi bien pour les limons et argiles. Elles ne sont souvent pas l'apanage du sable, mais leur ample occurrence dans certains milieux, spécialement lorsqu'ils sont bas ou alluviaux, leur confère une grande importance.

Les formations meubles du Souf possèdent une place prépondérante dans l'environnement de la localité. En premier lieu, elles leur attribuent la responsabilité de générer des dunes qui constituent un attribut paysager du Sahara. En second lieu, le sable meuble est

d'une grande importance pour les exploitations agricoles, car il a une capacité de rétention à la fois en eau et en nutriments.

I.4.4.2. Les combinaisons:

Les formations géologiques composites, se composant de multiples strates de roches ou de sédiments d'origines diverses, se rencontrent également dans le Souf. Dans les cas les plus fréquents, le sable quartzueux se trouve en présence de concrétions gypseuses ou bien le sable est constitué de sable sur grès ou de sable quartzueux sur gypse.

Ces formations géologiques composites témoignent de l'histoire complexe du Souf, entre phases d'inondation, phases d'assèchement et phases d'érosion, au cours desquelles le vent et les rivières ont déposé les strates de sable alors que l'évaporation de l'eau salée a produit des concrétions gypseuses.

Les formations superficielles du Souf, telles que les croûtes calcaires, les sables de quartz et le gypse, posent des problèmes pour l'action humaine car elles peuvent être instables et sensibles à l'érosion éolienne, ce qui peut être un obstacle pour le développement des infrastructures et l'agriculture ; le gypse, en particulier, se dissout dans l'eau, ce qui peut provoquer une pollution des eaux souterraines. L'étude des formations géologiques, naturelles du Souf est nécessaire pour évaluer les dangers et la gestion des ressources naturelles.

I.4.5. Croûtes calcaires:

Les formations géologiques superficielles fossiles, plus communément appelées croûtes calcaires, se situent principalement en bas de l'Atlas saharien et sur les collines entourant les dépressions du Souf. Leur extension est moins large que dans le cas des zones semi-arides voisines. Avant d'être cultivées, ces croûtes, dures et étanches en surface, doivent être brisées. Elles présentent cependant l'avantage d'être peu solubles, ce qui en fait un matériau de construction de choix. Mais cette solubilité se renforce au contact de l'eau salée, ce qui pourrait rendre problématique à terme l'édification en ce matériau.

I.4.6. Sables quartzueux:

Le Souf héberge une grande variété de sables quartzueux, tout particulièrement dans les grands ergs comme le Grand Erg Occidental et le Grand Erg Oriental, et notamment en raison de la présence du corridor trans-atlasique Hodna-Grand Erg Oriental, où ils apparaissent sous forme de dunes mobiles contemporaines ou de concentrations fossiles finement sélectionnées

par l'ancien régime vent où s'exprime la déposition de la matière. Bien qu'ils aient une relative stabilité rendant leur culture facile, ces sables sont facilement érodables au vent. De par leur très grande perméabilité, ces terrains peuvent stocker les eaux de pluie, mais leur instabilité interroge leur capacité à supporter des infrastructures durables.

I.4.7. Gypse

Le gypse se présente sous deux formes principales dans le Souf :

I.4. 7.1. Le gypse diffuse:

En compagnie des argiles gypseuses (Miocène-Pliocène) qui se rencontrent au pied de l'Atlas saharien ainsi que dans toute la région bas-saharienne, ce gypse diffus est diffuse au sol, surtout qu'il est fréquemment mal visible au surface où il est dispersé.

I.4.7.2. Les croûtes gypseuses:

Ces croûtes occupent de vastes surfaces, particulièrement au pied de l'Atlas saharien où elles recouvrent les glacis et le sous-sol calcaire. Résultant de l'évaporation des eaux salées, les croûtes produites sont peu cohérentes et riches en sulfate de calcium. Cette situation limite l'expansion de la flore et occasionne l'haloclastie (destruction par le sel) et la dégradation des constructions. Les croûtes de gypse ont pourtant été déjà largement exploitées comme matériau construction dans ce secteur même, bien qu'elles soient peu solides et facilement solubles.

Tous les types de structures géologiques, isolés ou non, sont analysés par les spécialistes de la géologie qui sont en mesure de suivre l'évolution historique de la terre ainsi qu'elle-même et l'acquisition d'une connaissance des mécanismes géologiques ayant contribué à sa structure et à son évolution.

I.5. Situation Géologique de la vallée du Souf:

La géologie du Sahara algérien est la résultante de quatre ensembles :

- Le bouclier du Hoggar et la dorsale.
- La base Rguiba, recouverte de paléozoïque.
- Le secteur de la plateforme saharienne.
- Les formations les plus jeunes (Erg Hamada).

La vallée d'El-oued est localisée dans la partie septentrionale de la plateforme saharienne de la région orientale du bas-Sahara. Les roches les plus observées dans cette vallée, où existent des affleurements, sont les roches sédimentaires chimiques (alluvions modernes, croûtes gypso-salines et sables éoliens). La région du Bas Sahara a été marquée par les dépôts marins et continentaux successifs. L'accumulation de vastes alluvions a été engendrée par des mouvements de subsidence.

I.5.1. Les dépôts sédimentaires continentaux post-hercyniens:

Suite à la mise en place des sédiments marins du Primaire, le Sahara a connu une histoire géologique riche marquée par divers épisodes tectoniques et d'érosion. La phase hercynienne, attestée entre 300 et 250 millions d'années, a abouti à la mise en place des chaînes du Hoggar avec de multiples vagues dans la couverture sédimentaire primaire. Elle a aussi généré un affaissement du Bas Sahara, créant des bassins où se sont déposés les sédiments.

C'est l'action du vent éolien, par le détachement des matériaux, éléments du paysage saharien. Matériaux, sables et argiles surtout, ont été détachés des massifs du Hoggar et du Tassili par le bouvier, puis transportés grâce aux oueds d'un cours d'eau temporaire, où ils ont été, enfin, déposés dans les bassins du Bas Sahara.

L'épaisseur des dépôts détritiques varie en fonction de la distance aux masses sources. Elle est faible dans le sud et augmente vers le nord, où elle peut atteindre 2 000 mètres. Durant l'ère de ces dépôts sédimentaires, on remarque que ces derniers étaient constitués en majorité de sables éoliens et fluviatiles, mais aussi d'argiles continentales puis devenus par la suite des grès à porosité importante, connus comme Continental Intercalaire.

L'actuel aspect du Sahara, qui comprend une succession de dunes géantes et de plateaux de blocs rocheux, mais aussi de bassins sédimentaires, résulte là aussi de processus très particuliers de sédimentation et d'érosion.

I.5.2. Les dépôts sédimentaires laguno - marins (Crétacé supérieur et Eocène):

La phase marine du Cénomanién a été suivie sur les différentes régions sahariennes par une série de cycles marins et continentaux ayant contribué à façonner la géologie actuelle du Sahara : au Vraconien, une suite de lacs et de lagunes à salinités variées s'est développée sur les dépôts du Continental Intercalaire à la suite du retrait de la mer, dont les dépôts sont marqués par une succession d'argiles, de dolomies, d'argiles sableuses et de grès cimentés par la calcite.

À partir du Cénomanién inférieur, une mer peu profonde a transgressé par paliers vers le sud, jusqu'à atteindre enfin le Tassil Les dépôts correspondent à une série de strates d'argile et d'anhydrite. Au Cénomanién supérieur, un régime marin s'est mieux marqué, avec des accumulations de dolomie et de calcaire dolomitique écolé par une série de feuillets de plusieurs mètres d'épaisseur, entrecoupés d'anhydrite et d'argile.

À l'époque du Turonien, tout le Sahara passait dans un environnement marin créant une haute mer favorisant le dépôt de calcaire et dolomie qui constituaient une couche carbonatée uniforme sur l'ensemble de la surface pouvant localement dépasser les 100 mètres d'épaisseur. On note cependant au sud quelques variations faciologiques avec un caractère légèrement lagunaire. Le régime est plus clairement marin au centre et au nord avec un épaissement des sédiments qui indique que la bordure de la plate-forme continentale subit encore un mouvement de subsidence.

À la fin du Turonien, la mer fait place aux lagunes. Les dépôts de cette époque sont caractérisés par une suite irrégulière de couches d'anhydrite, de dolomie, d'argile et de sel, dont certaines dépassent 10 mètres de puissance pour l'anhydrite et le sel, le tout pouvant atteindre une épaisseur de près de 60 mètres. C'est à la faveur de ce cadre marin et continental que se forment les ensembles sédimentaires qui constituent aujourd'hui la couverture du socle saharien, et la richesse et la variété de son paysage.

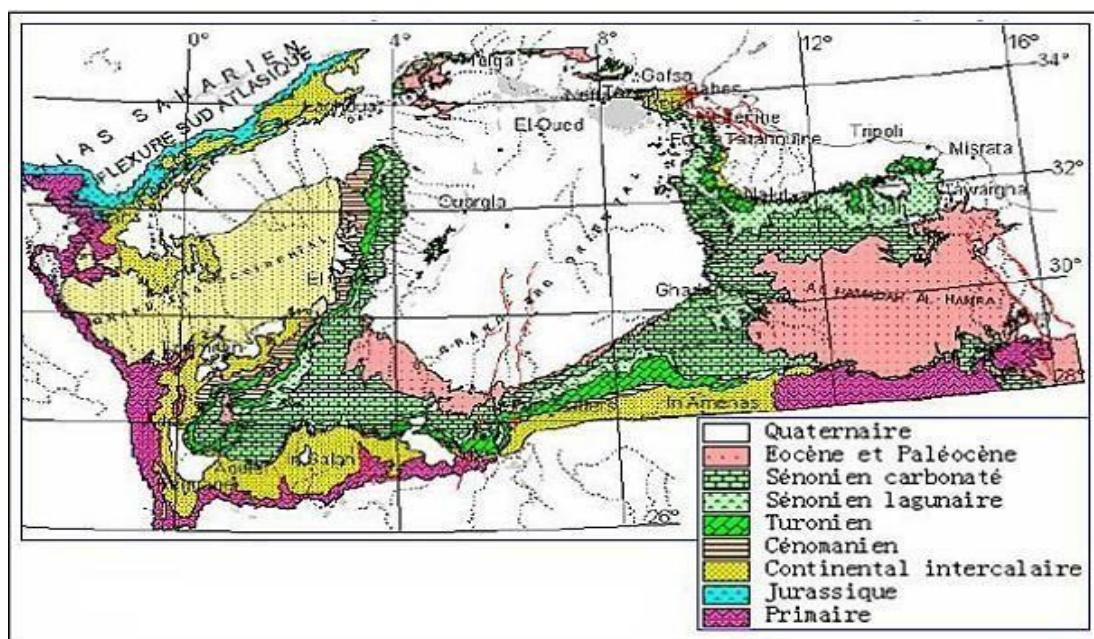


Figure I.5. Carte géologique du Nord-Ouest de l'Afrique.

(Source : OSS. 2003).

I.5.3. Conséquences du plissement Atlasique:

L'épaississement atlasique, intervenu durant le Tertiaire, a eu une forte portée sur la région du Bas Sahara qu'il a transformé en une zone isolée et déprimée : l'Atlas saharien, considérable chaîne des monts des Ouled Nail, ou massif des Aurès, ou monts de Nementcha, a fait barrière entre le Bas Sahara et le Nord ; pour la construction géologique et météorologique de cette zone.

En ce qui concerne la faille majeure qui a suivi l'accident sud-atlasique, celle-ci provoque (de manière distincte) de larges déformations du socle saharien, d'un rayon de courbure (échelle) important. Ces déformations sont à l'origine de la genèse d'axes anti-axiaux, comme l'anticlinal est-ouest de Tozeur qui se prolonge à l'ouest par l'anticlinal de Sidi Khelil, au niveau d'oued Righ, ou plus au nord par l'ondulation de la dépression du chott Merouane, et de formation géologique ayant fortement influencé le Bas Sahara :

- Formation d'un bassin sédimentaire dans le Bas Sahara : Le Bas Sahara devient un bassin sédimentaire dans lequel se cumulent les sédiments dégagés par l'érosion du relief de l'Atlas saharien. Ces sédiments aboutissent au développement de formations géologiques comme les formations détritiques continentales et les formations marines.

En ce qui concerne le changement climatique, l'Atlas saharien constitue une barrière pour les masses d'air humide venant du nord, entraînant un climat plus sec, provoquant une sécherie plus importante du Bas Sahara, et contribuant ainsi à la mise en place des paysages désertiques. En ce qui concerne la tectonique, la zone du Bas Sahara continue de connaître une activité tectonique avec des séismes ou des sources chaudes. Pour le dire différemment, l'ensemble plissé de l'Atlas a intégré les données géologiques et climatiques du Bas Sahara, réalisant ainsi une zone à part avec ses caractéristiques inédites.

I.5.4. Formation du tertiaire continental :

Le bassin du Bas Sahara, qui est une dépression sédimentaire liée au mouvement orogénique atlasique, est géologiquement complexe et varié. La région montagneuse septentrionale joue un rôle d'érosion et d'apport sédimentaire à la région en subsidence présente dans le bassin. Les nombreux oueds de la zone transportent une partie de ces dépôts détritiques vers les chotts (lacs salés taris) tels que ceux de Melghir, Merouane ou enfin El Rharsa.

Le cadre géologique du système aquifère du bassin du Bas Sahara est favorable à des déplacements adéquats d'eau souterraine. En effet, la juxtaposition de strates perméables et de

strates étanches favorise l'existence des aquifères, qui sont des réservoirs d'eau souterraine utilisés à des fins d'approvisionnement des populations ainsi que pour l'irrigation. L'aire du bassin sédimentaire est définie par :

- Au Nord : La faille majeure du Sud-atlasique, qui est un accident géologique.
- A l'Est : les formations géologiques plus anciennes du Crétacé, qui se situent à Dahra.
- Au Sud : les plateaux du Tinrhert et du Tadmait.
- A l'Ouest : la chaîne de montagnes de la dorsale du M'Zab.

Du point de vue stratigraphique, le bassin sédimentaire est essentiellement constitué de trois grands groupes :

- Les formations marines du Paléozoïque, ces plus anciennes formations qui apparaissent au sud, se composent de grès et de sables hérités du Tassil
- Les formations secondaires et du début du Cénozoïque : Lors des transgressions marines intervenues alors, émergeaient des sédiments alternés (sables et argiles continentaux, argiles et calcaires marins) tant marins que continentaux.
- Le Tertiaire (Mio-Pliocène) et le Quaternaire, marqués par des dépôts continentaux, sont notamment témoins d'effondrements et de formations de dunes qui peuvent dépasser plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur. La géologie régionale a déterminé la topographie, le climat et le potentiel en eau du bassin du Bas Sahara, conférant à cette région une originalité et une fragilité tout à la fois.

I.5.5. La lithostratigraphie:

Le bassin du Bas Sahara présente une stratigraphie complexe, comprise entre le Crétacé et le Quaternaire. Le forage F1 de la région d'Oued Souf qui résume les différentes strates qui composent la lithosphère (Annexe Fig 01, 02).

I.5.5.1. Quaternaire

- Le Quaternaire ancien est constitué d'unités détritiques perméables telles que : sands, silex et gypse, couvertes par des sables éoliens et grès cimentés (calcaire et gypsifère) formant les dunes.
- Le Quaternaire récent est doté d'un aquifère avec un champ de 50 mètres de moyenne.

I.5.5.2. Tertiaire (Cénozoïque)

a) Eocène:

L'Eocène inférieur carbonaté (150–200 m) est une superposition de strates de dolomites et de calcaires dolomitiques, parfois détritiques, et d'une série de calcaires dont des couches de silex, de calcaires, dolomites, de marnes et de marnes dolomitiques. Elle est poreuse. L'Eocène moyen lagunaire (30 m) est constitué de gypse, de calcaire, de dolomie et de marne dolomitique. Elle est aussi perméable.

b) Mio-Pliocène:

- Quatre strates distinctes illustrent le Mio-Pliocène (300 m), du bas vers le haut :
 - Une première couche d'argile de faible épaisseur.
 - Un second niveau composé d'argile et de sable.
 - Un troisième stratum argileux contenant des lentilles de sable.
 - Un quatrième niveau de sable représente le deuxième horizon aquifère du Mio-Pliocène.
- Les deux strates de sable du Mio-Pliocène sont associées à la nappe des sables du Complexe Terminal.

I.5.5.3. Secondaire (Crétacé)

a) Néocomien:

Le Néocomien (350 mètres), quant à lui, se subdivise en deux ensembles :

- Une série inférieure à dominance argileuse.
- Un ensemble supérieur qui concerne un aspect dolomitique et calcaire.
- Le Néocomien est imperméable.

b) Barrémien

- Au Barrémien (200-300 m), la sédimentation s'est faite sous forme d'argiles, de grès, et avec parfois des calcaires dolomitiques et des sables avec silex.

Le Barrémien est perméable et laisse passer l'eau, notamment du Continental Intercalaire qui est ici aquifère.

c) Aptien :

- L'Aptien (30 m) se compose principalement de dolomites marneuses et de calcaires marneux.
- L'Aptien est étanche.

I.5.5.4. Albien:

- L'Albien (100-200 m) est constitué d'une succession de marnes, grès, sables et calcaires, avec intercalation de silex et d'argiles.
- La partie supérieure de l'Albien est perméable.

I.5.5.5. Albo-Vraconien

- L'Albo-Vraconien, allant de 250 à 300 m, correspond à une période de transition entre l'Albien et le Cénomanién.
- Il est constitué d'une succession argilo-sableuse, de grès et de calcaires. • Ce niveau est semi-perméable.

I.5.6. Cénomanién

- * En ce qui concerne la successions géologiques du Cénomanién, nous avons une suite de dolomies, de calcaire dolomitique, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites.
- * Un mot important : le Cénomanién est imperméable.

I.5.5.7. Turonien

- Le niveau turonien (65 m) assure la base du complexe terminal.
- C'est un ensemble composé de dolomites, dolomies et calcaire argileux avec des marnes et argiles en alternance.
- Cette structure devient peu perméable.

I.5.5.8. Sénonien

Le Sénonien (570 m) se compose de deux ensembles :

Le Sénonien lagunaire (270 m) est imperméable.

Le Sénonien carbonaté (300 m) est perméable.

I.6. La situation hydro-géologique**I.6.1. Ressources en eaux**

Trois pays se partagent le système aquifère du Sahara septentrional (SASS) : l'Algérie, la Tunisie et la Libye. Ce système couvre une superficie de plus d'un million de Km², dont 70 % se trouve en Algérie, 6 % en Tunisie et 24 % en Libye. Le SASS est composé de deux grandes réserves d'eau superposées : la formation du Continental Intercalaire (CI), la plus profonde, et le Complexe Terminal (CT). L'eau captive du C.T, du C.I et de la nappe phréatique se trouve en pression, justifiant leur position géographique au-dessus de l'équateur (0). (Figure I.6.)

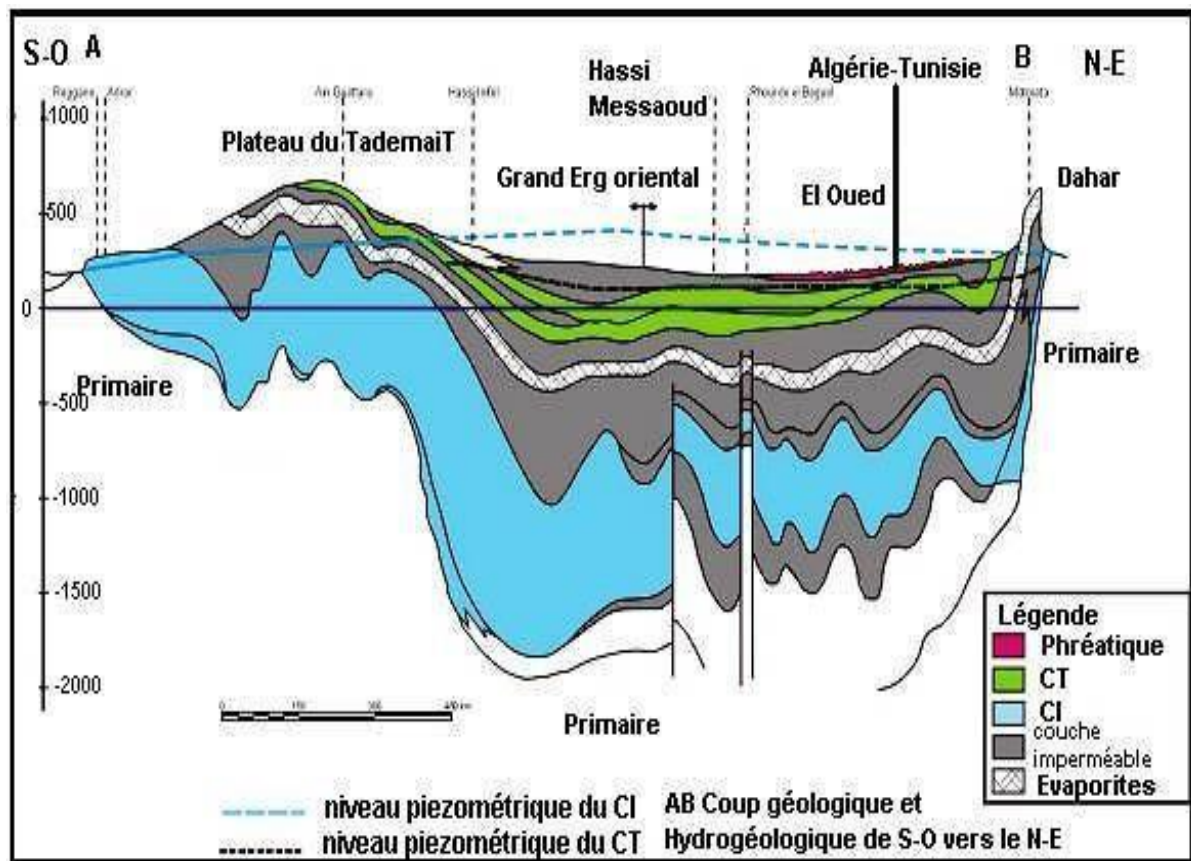


Figure I.6. Coupe hydrogéologique des aquifères du Sahara septentrionale.

(Source : UNESCO 1972)

I.6.1.1. Les ressources en eaux superficielles

Analysons tout d'abord la configuration hydrologique du Souf, vallée qui appartient, au plan hydrologique, à un relief sen propre au grand bassin du Bas Sahara, où le manque total de relief est omniprésent. La vaste et plane superficie présente des dépressions au nord de la wilaya comme autant de points de décharge de l'eau de pluie du secteur vers les plaines maritimes des bassins immédiatement environnants au nord, comme R'Tem, El Kherrouf et Ittel amenant à l'intérieur des Chotts.

I.6.1.2. Les ressources en eaux souterraines

Dans le sous-sol de la vallée du Souf, on trouve des réserves d'eau enfouies, importantes en quantité, d'où leur intégration à Système Aquifère du Sahara Septentrional (SASS). Ces réservoirs d'eau généralement appelés nappes CT et CI sont des nappes fossiles car leur recharge est très faible par rapport aux prélèvements qui y sont effectués.

6.1.2.1. Le Complexe Terminal

Ce réservoir aquifère est formé par deux aquifères à des profondeurs allant de 100 m à 400 m sous le niveau du sol.

- Le Mio-pliocène : il s'agit d'un aquifère dont la salinité est relativement élevée, mais dont l'extraction est utilisée pour l'irrigation.
- La nappe du Sénonien dont la salinité est moins importante et l'eau est affectée à l'AEP.

a) Le continental intercalaire

Dénommée nappe de l'Albien, cette nappe profonde (entre 1 000 et 1 900 m) est la principale source d'eau souterraine de la région.

b) Les nappes phréatiques (superficielles)

Ces couches se retrouvent dans plusieurs secteurs de la vallée et sont enchâssées dans les sables du quaternaire. Leur profondeur est modeste, entre 10 et 80 m

I.6.2. Les nappes de la vallée du Souf

Il existe plusieurs nappes qui couvrent la vallée du Souf :

I.6.2.1. Nappe phréatique

Cette nappe phréatique paraît étendue sur toute la vallée, exploitée par des puits classiques relativement peu profonds et dans une cuvette close.

Elle est située sur le substrat argilo-gypseux du Pontien supérieur. La distance verticale moyenne entre la surface de cette nappe et le sol, séparée par une zone d'aération, n'excède pas 40 m de sable non aquifère (D.S.A, 2005). Cette nappe est alimentée par les eaux issues du drainage de l'irrigation, les eaux usées urbaines, les eaux de source, les pluies, etc. Le sens d'écoulement des eaux de la nappe phréatique est identique à celui de la nappe du Complexe Terminal, soit du Sud vers le Nord (Guendouz, Reghis et Moulla, 1992).

I.6.2.2. Nappe du Continental Intercalaire

Le criocène supérieur est ainsi désigné dans les formations continentales du Crétacé inférieur car il se superpose à deux cycles de sédimentation caractérisés par une régression marine puis une transgression marine du Crétacé supérieur. Il s'étend ainsi du bas du Trias au sommet de l'Albien. (Voir Figure I.7) Cet intervalle stratigraphique contient un potentiel aquifère très

important représentant le plus grand aquifère du Sahara nord représentant plus de 600 000 km², d'une épaisseur de plusieurs centaines de mètres d'eau.

Le nouveau réservoir aquifère est d'une grande importance car il est capable, pendant les périodes humides du Quaternaire, de stocker un volume d'eau considérable et exploitable. Il est désormais alimenté par l'eau météorologique, garantissant ainsi l'approvisionnement hydraulique du système (approvisionnement, débit, points de sortie). Ce réservoir est composé de sables et de grès du bas crétacé. Sa mise en œuvre représente donc un enjeu important pour l'approvisionnement en eau de la région, car il ouvre des perspectives intéressantes pour le développement durable et l'aménagement des territoires concernés.

Ce réservoir aquifère se retrouve ainsi confiné entre le plafond constitué d'un dépôt argileux et marneux, épais et très résistant au Cénomaniens, et le mur fait d'argiles néocomiennes. Dans les zones plus étendues assurant la généralisation, le réservoir peut atteindre l'épaisseur totale de plus de 250 mètres et jusqu'à 1000 mètres au nord ouest.

Le mouvement de la nappe phréatique du Continental Intercalaire (CI) se propage de la zone de piémont de l'Atlas au sens géographique le plus large vers le sud, à savoir les régions des Foggaras, du Tineh et du Djebel Hassaoua, en direction du golfe de Syrte mais également vers la plage, de manière particulière, de son exutoire tunisien localisé au nord au golfe de Gabès.

L'exploitation de la nappe albienne n'est pas très répandue en raison de sa profondeur et de son coût élevé en tant qu'aquifère. La profondeur de captage de cette nappe peut être de 1900 m, donnant un débit atteignant 200 l/s pour une température supérieure à 60 °C avec un résidu sec de 2 à 3.

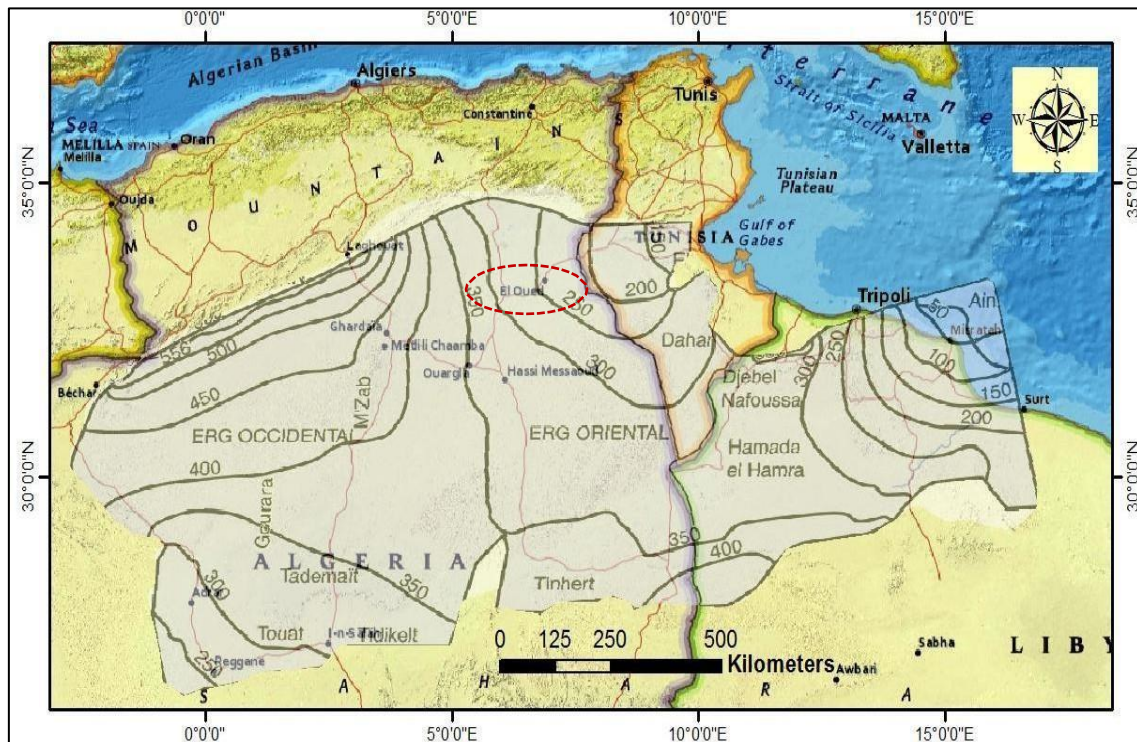


Figure I.7. Limites et piézométrie du Continental Intercalaire

(Source : Baba SY et al, 2006)

I.6.2.3. La nappe du Complexe Terminal

Le terme « Continental Terminal » désigne les formations continentales de Miocène en argile et sable. Selon Bel et Demargne (1966), l'interaction est variable entre la nappe du Continental Terminal des sables du Mio-Pliocène et les nappes Éocène, Sénonien, Turonien. Ainsi, sur l'ensemble du Sahara, ces différentes formations sont considérées comme n'étant qu'une seule nappe, nommée Continental Terminal, en opposition au Continental Intercalaire.

Le Complexe terminal est composé de couches argilo-sableuses et sableuses, notamment de niveaux sénoniens et Mio-pliocènes, charriés au cours de la dernière régression marine du Sahara oriental, la fin de l'Eocène. Ce complexe s'étend sur une large aire d'environ 350 ... La profondeur de leurs gisements varie entre 100 et 600m pour une épaisseur de l'ordre de 300m (Cornet, 1964 cité par Khechana, 2016).

Ce complexe se divise en trois aquifères, séparés localement par des sédiments semi-perméables, ce qui autorise leur interaction. Les deux premiers aquifères se réfèrent aux couches de sable du Mio-Pliocène et du Pontien, alors que le troisième fait référence à la nappe des calcaires du Seno-Éocène.

La première nappe, provenant de la formation supérieure du Complexe Terminal (CT), est constituée de sables faiblement grossiers et se situe à une profondeur moyenne d'environ 280 m, elle occupe presque l'intégralité de la région du Souf.

La deuxième couche de sable est datée du Pontien (Eocène tardif), elle se place entre la première couche et la couche de calcaire. Selon Cornet (1964) sa profondeur oscille entre 400 et 450 m et son épaisseur est de l'ordre de 50 m. D'après Baba SY (2005), deux types de retenues d'eau sont trouvés pour les nappes du Complexe Terminal, à savoir les affleurements calcaires et les nappes d'inféro-flux des oueds, spécifiquement la bordure Sud-atlasique, le M'Zab, le Jebel Tebaga, le Dahar et le Jebel Nefousa.

De surcroît, dans les grandes dunes de sable du Sahara oriental et occidental, les nappes phréatiques, elles-mêmes, reçoivent leur alimentation hydrique par infiltration en cas de déluge passant à travers les formations dunaires perméables. Ces précipitations exceptionnelles mais violentes – phénomène rare pour les sublittoraux du Sahara – atteignent les nappes phréatiques du Complexe Terminal. Cet aquifère contient des eaux dont le résidu à sec va de 1,6 à 2,7 g/l, avec une prédominance du faciès chimique sulfaté magnésien (ANRH OUARGLA, 2005).

La profondeur de la première prospection artésienne des sables profonds a eu lieu au niveau de Sif El Menadi (à 90 km au nord-ouest d'El Oued) en 1953 à 435 m, d'un débit approximatif de

4 m³/minute, alors que la culture des palmiers s'établit par irrigation (Najah A. 1970).

Dans le Souf un forage réalisé à El-Oued obtient du jaillissement à partir du printemps 1956, à une profondeur d'environ 300 m.

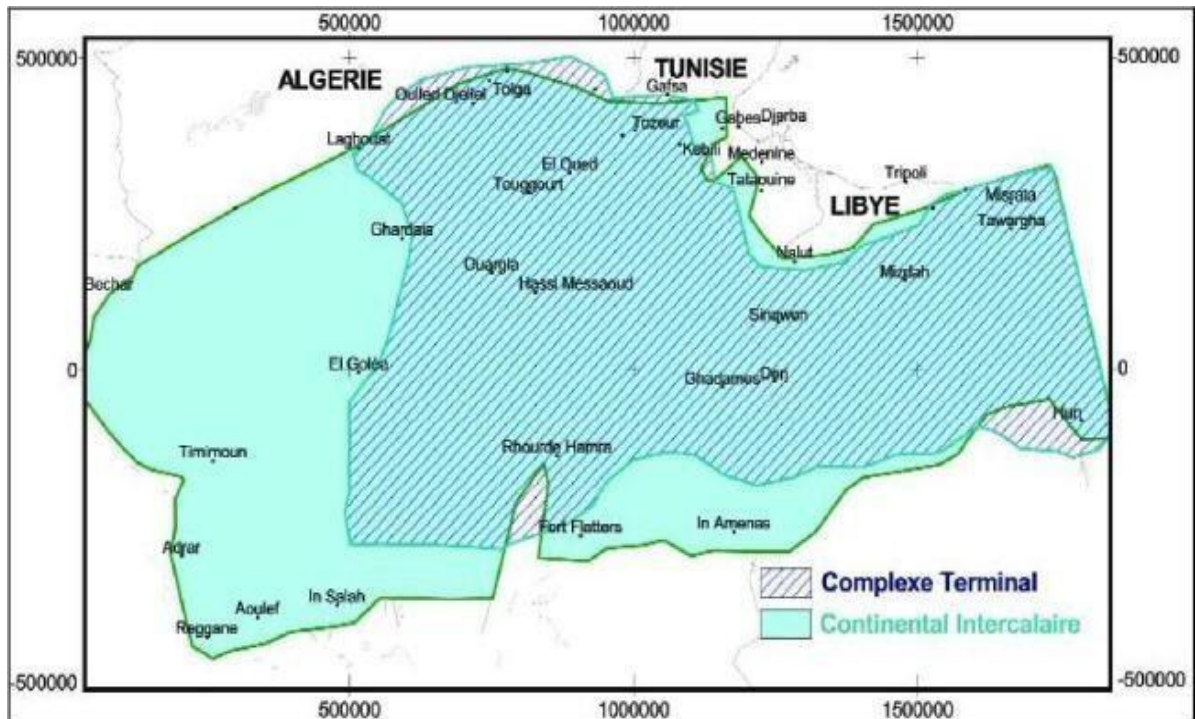


Figure I.8. Extension des formations du système Aquifère du Sahara Septentrional.

(Source : OSS, 2002)

I.6.3. Les potentialités souterraines totales reconnues et leurs répartitions

Dans la zone d'étude le long de la Djefara sont localisables trois nappes, à savoir la nappe intercalaire continentale, la nappe terminale et la nappe de surface. Dans un contexte aussi complexe, les couches profondes sont qualifiées de fossiles, elles renferment des ressources importantes à l'état des connaissances. Élément dit en filigrane et difficilement exploitable, mais accessible via des modalités de jaugeage pour en déterminer les réserves régulatrices du système à partir des débits des sources et des puits artésiens. En effet, la région d'Oued-Souf est estimée à un potentiel de ressources souterraines de 500 millions de m³/an.

I.6.3.1. Répartition du nombre des forages par zones

La majeure partie du potentiel du sous-sol en matière de ressources en eau est exploitée par pompage selon un réseau de puits localisé dans la zone d'El-Oued. En décembre 2017, il était recensé un total de 951 forages (en bon ou en mauvais état) (Figure I.9), répartis dans les zones qui suivent:

- La vallée du Souf (202 Forages d'eau)
- La Zone Frontalière (92 Forages d'eau)
- Oued Righ Nord (566 Forages d'eau)
- La Zone nord des Chotts (91 Forages d'eau)

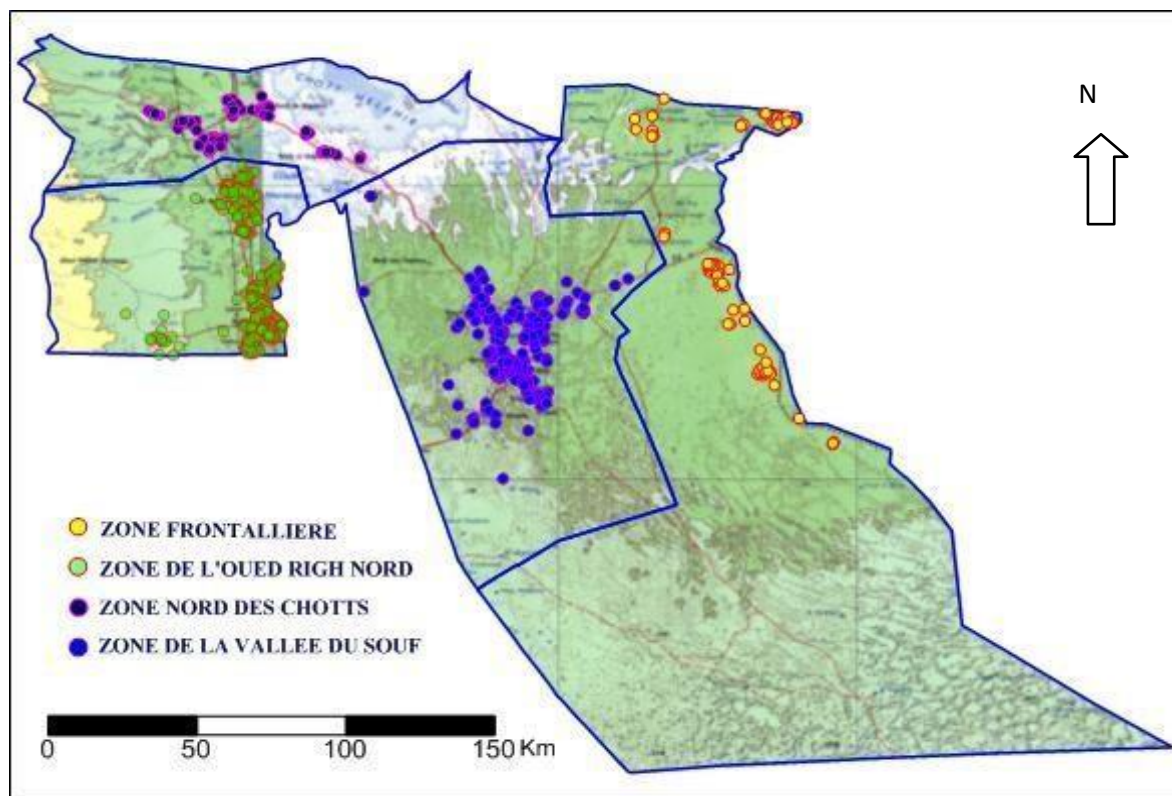


Figure I.9. Répartition du nombre total de forages d'eau CT et CI par zones.

(Source : DRE 2024)

I.6.3.2. Répartition du nombre de forages Zone du Souf (La vallée du Souf – Mih Ouensa – Oued Allenda)

Sur les 951 forages identifiés, seuls 734 (CT, CI) fonctionnent alors que 219 (CT, CI) ne sont pas en marche. Sur les 434 forages actifs, un volume total de 522,04 Mm³/an est prélevé, dont 412 Mm³/an est destiné à la nappe du CT alors que le reste, soit 88,67 Mm³/an, alimente la nappe du C Ces volumes sont affectés pour répondre aux besoins agricoles (pour l'irrigation) et également pour l'alimentation en eau des différentes communes de la wilaya (D.R.E d'EL Oued 2020). (Tableau I.5).

Tableau I.5. Répartition du nombre de forages enregistrés dans La vallée du Souf.

Nappe	CT		CI		Piézomètre
Usage	AEP	IRR	AEP	IRR	
Nombre des forages en Service	9	57	/	1	7
Total des forages	87 dont (17 Arrêt – 04 Abd.)		1		
Total des forages en Service	66 (Vol = 38,33 Hm³/an)		01 (Vol =0, 95 Hm³/an)		
Total	91 Forages dont 67 en Service pour un–Vol. Total = 39,28 Hm3/an				

(Source : D.R.E d'EL Oued 2020).

I.6.3.3. Evaluation des volumes soutirés des ressources en eau par zones, par usage

L'appréciation de la distribution des ressources en eau dans la région, est largement conditionnée par les besoins agricoles, pour ce qui est de l'irrigation qui en consomme annuellement 379 millions de m³. Cette priorité étant en grande partie à imputer à la croissance, sans relâche, des besoins pour irrigation, il n'en demeure pas moins que les besoins domestiques tiennent une place non négligeable dans le prélèvement d'eau de la région, de l'ordre de 121 millions de m³ annuels (DRE d'El-Oued, 2020).

I.6.4. Exploitation des nappes**I.6.4.1. Exploitation la nappe du Complexe Terminal (C.T)**

À partir du printemps 1956, de l'eau jaillit dans la région du Souf, au niveau de l'ouvrage d'El-Oued, à une profondeur de presque 300 m. Bien que le flux soit relativement faible (3,3 l/s), la pression au sol est assez faible (+2,4 m). Une nouvelle opération de forage était effectuée chaque année, entre 1957 et 1969, dans le cadre du Complexe Terminal. De 1970 à 1980, environ deux forages étaient accomplis par an, puis, de 1980 à 1997, une centaine de nouveaux forages ont été accomplis dans le cadre du Complexe Terminal.

Tableau I.6. Récapitulatif des volumes d'eau soutirés de CT pour les différents types des usages

Zones	V. AEP (Hm ³ /an)	V. IRR (Hm ³ /an)	Total (Hm ³ /an)
Vallée du Souf	70,53	17,62	88,15

(Source:D.R.E d'El-Oued 2020).

I.6.4.2. Exploitation la nappe du Continental Intercalaire (C.I)

Des forages en profondeur ont été réalisés dans le Continental Intercalaire (CI) en 1986 et 1987. Deux d'entre eux ont permis l'alimentation en eau potable d'El Oued, le troisième a été attribué à Hassi-Khalifa pour des besoins agricoles. ces forages présentent une accentuation artésienne en leur sein et apportent des débits qui sont 5 à 10 fois plus élevés que ceux de forages du complexe terminal (CT). D'après les travaux de Khechana (2014),

I.6.4.3. Exploitation de la nappe phréatique

Les réserves en eau de la nappe phréatique sont suffisantes allant de 10 000 à 60 000 m³/an dans toute la région du Souf facilement exploitables et à la portée des agriculteurs (DSA, 2018).

Conclusion

La commune de Hassi Khalifa est cette ville du Souf, caractérisée par son climat aride avec des étés chauds et secs et des pluies rares. Cette vallée est marquée par des dunes de sable et des formations de dépôts aériens causés par les vents. Les fouilles thallogiques indiquent la présence de deux ensembles de vallées, avec le Hawra au nord de notre vallée et le Daya en parallèle. La zone d'étude est caractérisée par la complexité de son aquifère, où l'on note trois principaux niveaux d'eau saumâtre, à savoir : l'aquifère continental intercalaire (CI) ; l'aquifère terminal complexe (CT) et l'aquifère phréatique. L'aquifère est d'une importance capitale pour l'approvisionnement en eau, notamment pour l'approvisionnement des points d'eau et le soutien à l'agriculture saharienne. Les eaux souterraines de la vallée du Souf jouent un rôle important dans l'approvisionnement en eau de la région, le recharge des puits et des forages qui fournissent de l'eau pour l'irrigation et permettent le développement de l'agriculture désertique. Les chapitres suivants traiteront de la minéralisation de l'eau de ce bassin et de son adéquation pour l'irrigation.



Chapitre II

La nappe phréatique de la vallée du Souf et son aptitude à l'irrigation

Introduction

Ce chapitre se penche sur l'histoire de la nappe phréatique dans la vallée, explorant ses caractéristiques dans la région saharienne, deux vastes systèmes aquifères de grande ampleur, le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT), constituent l'ensemble des ressources en eaux souterraines de cette zone, partiellement couverts dans la majorité de leur étendue par des nappes d'eau superficielles.

Ainsi, la nappe phréatique était autrefois, dans la vallée du Souf, à la fois le vivier de vie, le source dont l'approvisionnement désaltérait les hommes et les bêtes et alimentait les cultures vivrières.

Or, cette nappe phréatique, jadis généreuse, est aujourd'hui confrontée à l'extraction excessive pour l'irrigation, menant aussi à la détérioration des oasis qui valorisaient la beauté et la richesse de cette zone.

II.1. La nappe phréatique

II.1.1. Les principales caractéristiques de la nappe phréatique

L'alcôve aquifère de la nappe phréatique de la vallée du Souf constitue la source d'eau principale pour l'irrigation des palmeraies de la région. En effet, elle est localisée dans la couverture de strates sableuses quaternaire reposant sur un socle de strata sableuses plus anciennes avec inclusions de l'argile du Pliocène (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, 2013). Zine B (2014) a mentionné que la zone d'alimentation de l'aquifère à nappe libre couvre une superficie d'approximativement 40 km² dans la vallée du Souf, l'aquifère détritique ayant une épaisseur d'environ 60 mètres est principalement de type sableux avec des accumulations locales de gypse et d'argile surtout dans le secteur Nord-Est où il s'épaissit et se ferme avec une couche gypseuse. Le sol de couverture, pour ce qui est de sa composition minérale, est assurément de type argileux, en dépit du fait qu'il soit possible de croiser, ici ou là, des secteurs sableux et gypseux (Messekher et al, 2012). Selon les essais de pompage réalisés en 2003, le volume d'eau estimé serait d'environ 154 hectomètres cubes (Zine, B 2014). La direction de circulation de la nappe phréatique dans la zone est globalement du SSW vers le NNW, avec une légère courbure le faisant s'orienter vers le SN. Le gradient d'écoulement est d'environ 1,2 ‰, tout en l'estimant vers 0,6 ‰ à Mih Ouensa (Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural, 2013). Les vitesses d'écoulement de la nappe

phréatique sont relativement faibles, freinées par les dépôts gypseux en aval d'El Oued et les affleurements de grès. En moyenne, le débit est d'environ 20 mètres par an.

II.1.2. L'alimentation de la nappe phréatique

Dans cette partie du Souf, l'alimentation de la nappe phréatique est largement fonction des flancs sud et ouest de l'immense Erg Oriental, qui constitue le site de la pluie, ayant infiltré les oueds (Côte, 2006). À cela s'ajoute la percolation directe des eaux météorologiques, les déversements issus des forages (et tout particulièrement ceux couvrant le Continental Intercalaire et le Continental Terminal), les effluents des eaux usées (et, dans un certain sens, de l'eau d'irrigation des palmeraies) en plus des retours d'eaux artésiennes. (Fig. 010)

Il a été mis en lumière dans une étude réalisée en collaboration avec le bureau suisse Bernhard et Guambel (BG) et le bureau algérien Hydro Projet Ouest (HPO) que la nappe phréatique se régénère également à partir des rejets urbains en provenance de l'irrigation, des eaux usées, à la suite ou par les fuites du réseau de distribution d'eau potable. Cette recharge a été particulièrement constatée autour des villes, notamment dans les années 1990 et 2000, au moment où la nappe phréatique est, il est vrai, en hausse. Au contraire, elle est en baisse dans les zones agricoles où l'irrigation est effectivement pratiquée.

Le service de l'eau potable, également souffrant de nombreux points de défaillance comme des branchements non déclarés, des pertes sur conduites et l'absence de compteurs d'eau, ne perçoit que 2500 DA par an dans la vallée, sauf El Oued, ce qui entretient le gaspillage. L'association de ces divers éléments participe de manière importante à la recharge de la nappe phréatique.

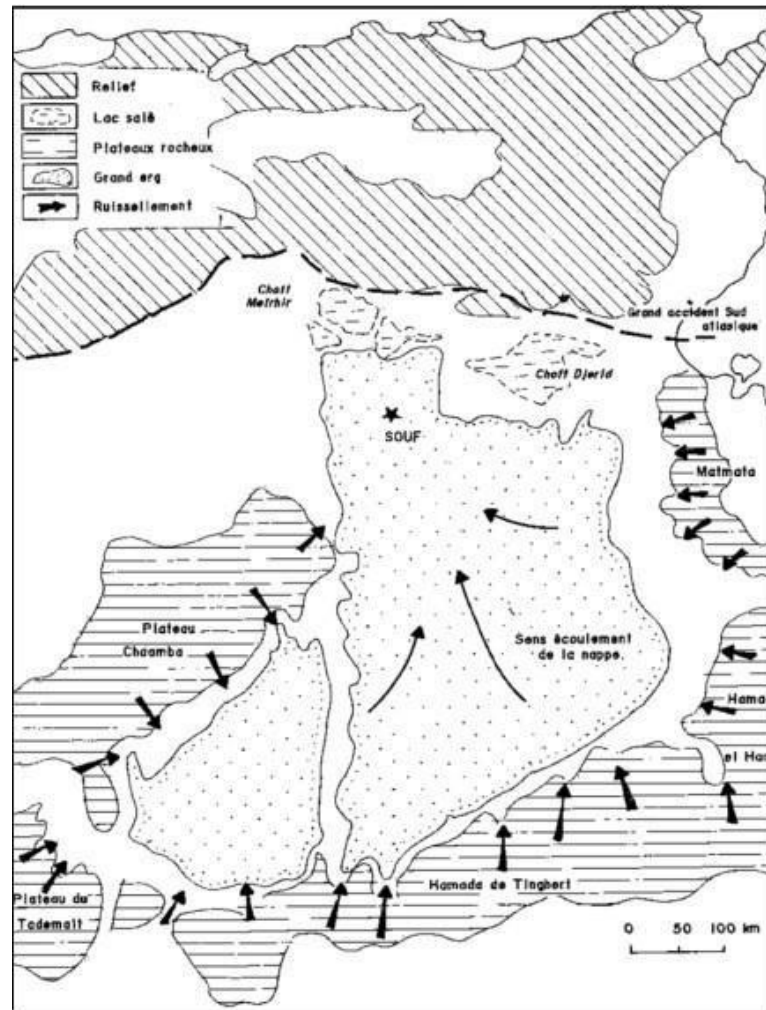


Figure II.1. Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement de la nappe

(Source : Côte. 2006).

D'après les responsables de la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya (DHW) d'El Oued, en 2018, ils estiment à 6000 le nombre de puits qui exploitent la nappe phréatique. Un nombre non négligeable de puits sont, en effet, creusés par les agriculteurs sans avoir obtenu d'autorisation.

II.1.3. Historique et mécanisme de la remontée des eaux de la nappe phréatique

II.1.3.1. Historique de la remontée des eaux de la nappe phréatique

D'après les responsables de la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya (DHW) d'El Oued, en 2018, ils estiment à 6000 le nombre de puits qui exploitent la nappe phréatique. Un nombre non négligeable de puits sont, en effet, creusés par les agriculteurs sans avoir obtenu d'autorisation.

Le premier puits de profondeur intermédiaire dans le Complexe Terminal (CT) a été réalisé en 1956 pour l'alimentation en eau potable ; cette pratique a duré durant toute une décennie, en moyenne, un forage était nouvellement réalisé par an jusqu'en 1969. En effet, suite à une forte pluviométrie en 1969, une élévation générale de la nappe phréatique a été constatée, conduisant à une inondation touchant 150 hectares dans les zones de Magrane et Hassi Khalifa. La décennie de 1970 jusqu'en 1980 a été marquée par une intensification de la cadence de forage dans le CT, atteignant 2 forages annuellement en moyenne.

À partir de l'année 1980, des ghouts noyés ont été observés autour de la ville d'El Oued (voir Fig. 11 et Fig. 12), caractérisés par une hausse continue et continuelle de la nappe phréatique environnante. Mais pendant ce temps encore, les responsables ont continué à pomper les eaux dans le Continental Intercalaire (CI) par trois forages profonds (1986-1987), dont deux visent à approvisionner la ville en eau potable, le troisième, à Hassi Khalifa qui est destiné à un emploi agricole.

Les forages du CI étaient connus pour leur forte production d'eau artésienne, qui approchait les 200 l/s, soit entre 5 et 10 fois plus que les forages du CT, de sorte que les débits cumulés dans le CT (nappes phréatique) et le CI (nappes artésiennes) s'élevaient à 3000 l/s. (Côte, 1993 ; INSID, 2001).

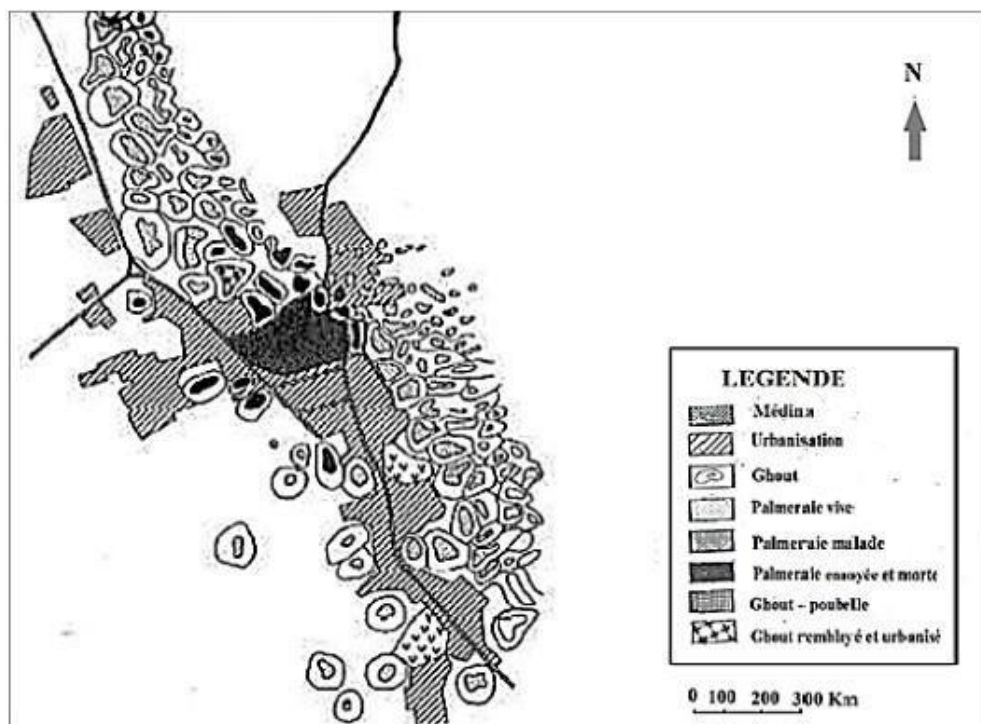


Figure II.2. Evolution des palmeraies autours d'El Oued en 1980.

(Source : Côte.1993)

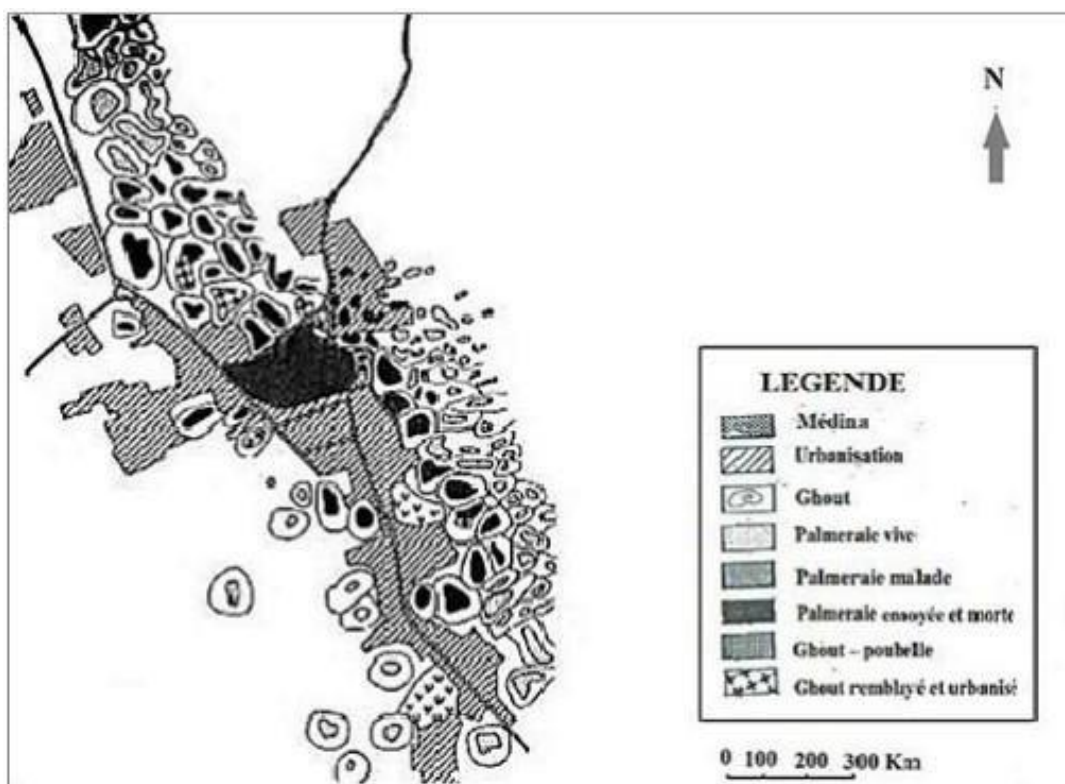


Figure II.3. Evolution des palmeraies autours d'El Oued en 1986.

(Source : Côte.1993)

La période de 1980 à 1993 a vu la mise en œuvre de plusieurs dizaines de nouveaux forages de puits dans le Complexe Terminal (CT). La propagation de la hausse de la nappe phréatique a désormais touché toute la zone sud, de Robbah à Bayadha, Oued Alenda et El Oglâ, elle représente une menace réelle pour l'habitat, mais aussi pour les terres cultivables. Son niveau atteindra au maximum 80 cm, touchant de plein fouet toute l'architecture ancienne de la région.

Un constat alarmant a été fait en 1993 : la nappe phréatique a provoqué l'inondation de la palmeraie sur une étendue de 25 km le long de la trajectoire Kouinine – Robbah (Fig. 13). Cette situation inquiétante illustre les conséquences désastreuses de l'élévation des eaux souterraines dans la vallée du Souf..

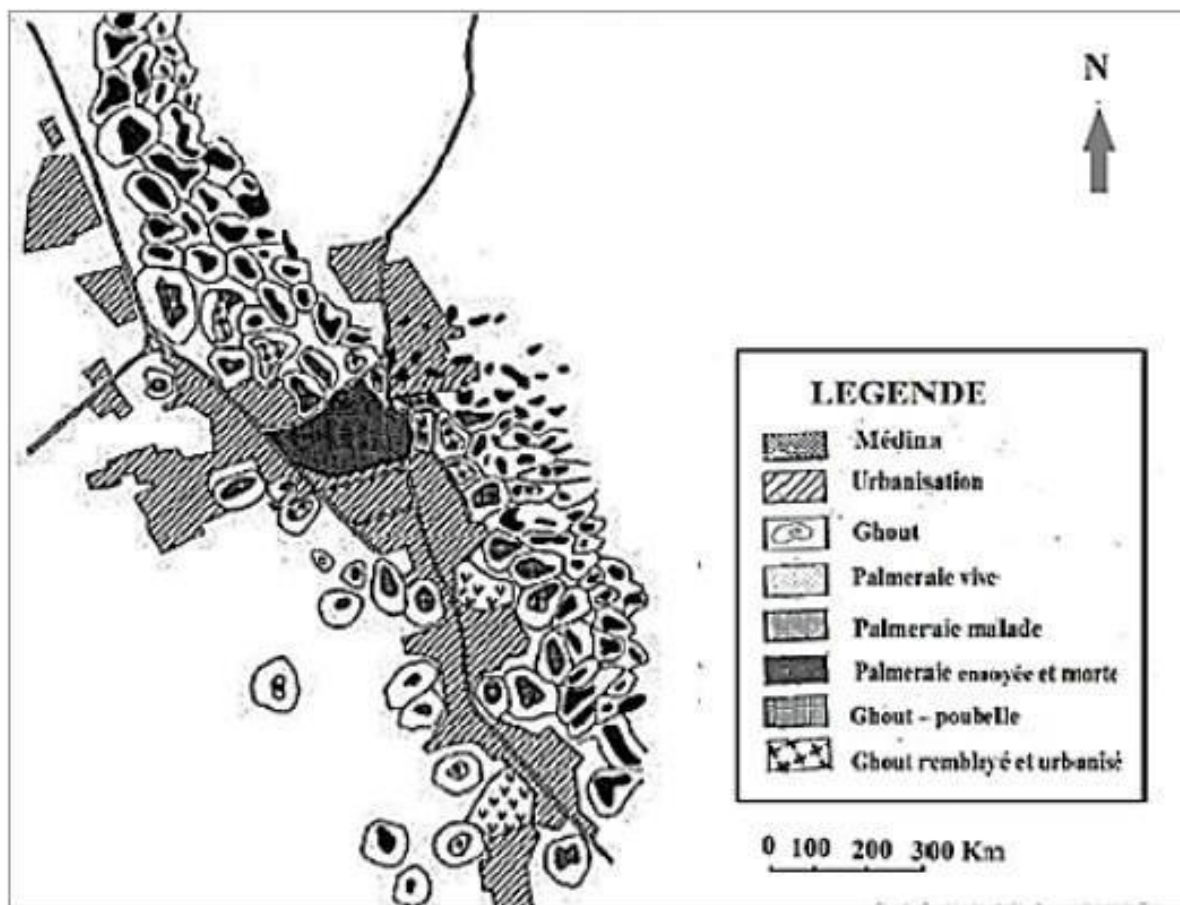


Figure II.4. Evolution des palmerais autours d'El Oued en 1993.

(Source : Côte.1993)

L'exploitation continue des aquifères du Continental Intercalaire (CI) et du Continental Terminal (CT) a permis d'accompagner l'évolution à la hausse de la demande en eau, tant domestique qu'agricole pour l'irrigation. Mais la surexploitation des ressources en eau souterraine a aussi eu des impacts notables, démontrant des remontées de la nappe phréatique et une dégradation des ghouts, enthousiaste dès les années 1980.

Au commencement des années 2000, les diverses opérations de mesure effectuées par le bureau d'étude HPO BG avec l'aide de l'ANRH ont mis en exergue une tendance à la baisse du niveau de la nappe. Dans le cadre du modèle réalisé par le HPO/BG sur la variation du niveau de la nappe phréatique pour les 18 chefs lieux des communes de la vallée du Souf, il a été démontré que la remontée de la nappe à El Oued d'ici 2030 pourrait atteindre au moins 6 m si lui-même étant sans solution d'assainissement.

Dès le début des années 2000, une tendance à la baisse du niveau de la nappe a été observée et acceptée en fonction des résultats de diverses opérations de mesure possibles par le bureau d'étude HPO BG en partenariat avec l'ANRH. Le modèle HPO/BG sur la fluctuation

du niveau de nappe phréatique pour 18 chefs-lieux de communes de la vallée de Souf a prouvé qu'à l'absence d'un système d'assainissement, la nappe pourra croître de plus de 6m à El Oued à l'horizon 2030.

II.1.3.2. Mécanisme de la remontée des eaux de la nappe phréatique

Plusieurs auteurs ont étudié ce phénomène afin d'apporter des précisions, parmi lesquels on trouve d'abord Marc Côte qui a écrit plusieurs ouvrages à ce sujet (Côte, 1993, 1998, 2001), puis divers chercheurs tels que Khadraoui (2004, 2006, 2008), Remini (2006) et Khechana (2007) ensuite. On distingue dans le processus de montée des eaux de la nappe phréatique un équilibre s'établissant d'abord dans le temps dans une première phase : la phase d'équilibrage. Avant 1980 (Fig. 14), la structure hydraulique du Souf était plutôt simple et équilibrée (Côte, 1998), les puits prenant de l'eau dans la nappe phréatique, tandis que les eaux usées étaient déversées dans des fosses ou puits perdus où elles s'infiltraient lentement dans la nappe phréatique dans un processus naturel de purification sous le sable. Néanmoins, ce système a été touché par le phénomène d'urbanisation et d'agriculture de la région .

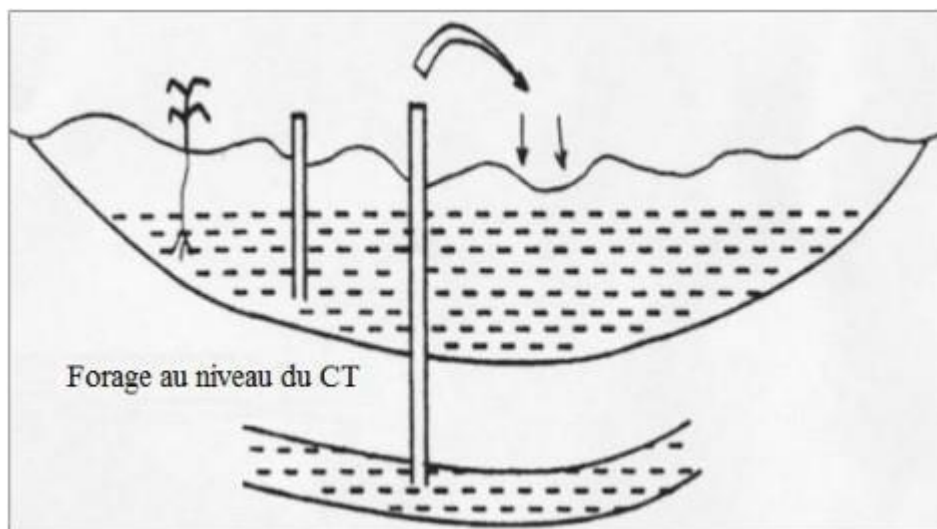


Figure II.5.La nappe phréatique avant 1980.

(Source : Côte.1993)

Le stade de déséquilibre : il correspond à une augmentation de la demande en eau résultant d'une forte pression démographique et d'un secteur agricole de plus en plus exigeant. Cette forte demande entraînant une utilisation accrue des nappes phréatiques profondes, et plus particulièrement du Terminal Continental (CT) et du Continental Intercalaire (CI), comme le montre le graphique suivant (Fig. 15).

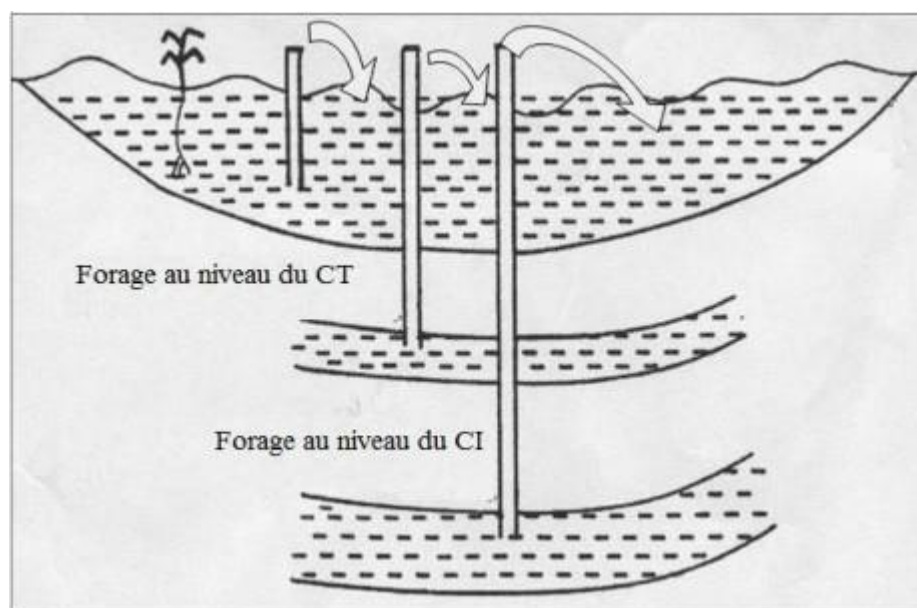


Figure II.6. La nappe phréatique après 1980.

(Source : Côte. 1993)

Au regard de Remini (2006), l'afflux des eaux a connu une évolution linéaire au cours du temps mais, à compter de 1980, cette augmentation a pris de l'essor et s'est même triplée. Ces eaux ont seulement une voie d'accès à la nappe phréatique elles doivent s'infiltrer dans le sol pour atteindre la nappe phréatique.

II.2. L'irrigation :

II.2.1. Définition

L'irrigation est un processus consistant à fournir des quantités artificielles d'eau à des plantes cultivées pour les stimuler à produire et pour leur assurer une croissance normale en cas de manque d'eau, ce qui pourrait être dû à un faible niveau de pluviométrie, à un drainage trop intensif du milieu ou à un abaissement du niveau de la nappe phréatique, plus spécialement dans les régions dites arides ou semi-arides (El-Asslouj et al, 2007).

II.2.2. Provenance de l'eau d'irrigation

Au fil des générations, et par la diversité des civilisations humaines, elles ont su se montrer ingénieuses pour contourner de multiples manières la ressource hydraulique indispensable à la culture et mettre en valeur leurs terres. Certaines techniques se cantonnent au seul usage des eaux de crue des rivières, ou de pluie. Ces dernières ne régulent guère la circulation des eaux dans les rivières et déplacent peu l'eau dans l'espace. Par exemple, autour de plusieurs grands fleuves en Afrique, des agriculteurs parviennent à exploiter des terres

susceptibles d'être submergées par les eaux montantes du fleuve lors de la saison des pluies, qu'ils mettent en culture juste avant que l'eau commence à monter.

Particulièrement répandue en Asie et également en Afrique, tout particulièrement lorsque l'on cultive le riz, l'aménagement d'un large réseau de canaux et de digues facilite la collecte des eaux de crue des rivières pour les distribuer tout en maîtrisant leur niveau dans chaque parcelle, en les maintenant. L'usage d'assez petites retenues d'eau, appelées collinaires, aménagées en amont des vallées, connaît aussi un fort développement en Inde et au Brésil, ces petits barrages en terre, peu profonds, permettent de capter et de stocker les eaux de ruissellement et les eaux pluviales au cours de la saison des pluies qui pourront ensuite être utilisées pour irriguer les cultures. Situation des lacs de l'arborétum de Djebel El Ouahch (Constantine)

Pourtant, certaines techniques relèvent bel et bien d'un véritable détournement des masses d'eau. L'usage des puits, en particulier, permet d'extraire de l'eau de certaines nappes souterraines durant toute l'année. Plus la quantité d'eau à extraire est importante, plus on peut de nos jours percer à des profondeurs considérables et pomper l'eau mécaniquement ;

Une autre pratique consiste à dévier l'eau des rivières qui est ensuite acheminée, parfois sur de longues distances, par des canaux vers des zones déficitaires en eau.

Pour conclure, enfin, l'érection dans le cours ou le voisinage de grands et très grands lacs de retenue le long de cours d'eau a fait de grands progrès au XX^e siècle et, doté d'une capacité de stockage très importante, ce qui permet aussi d'avoir accès quasiment tout le temps à de l'eau (Ollier et Poirée, 1983).

Pourtant ces processus offrent, tout au long de l'année, des débits considérables, ils restent malgré tout désavantageux, et de la sorte, la multiplication des réseaux de canaux et de retenues contribue à une augmentation des pertes par évaporation, mais, d'autre part, les grands barrages se traduisent par des modifications des régimes hydrauliques, de la qualité de l'eau, et des équilibres de la flore et de la faune des cours d'eau sur lesquels on les construit.

II.2.3. L'irrigation dans le monde

La manière dont l'eau est utilisée pour l'agriculture présente des disparités profondes d'un pays à un autre. Dans le monde entier, elle ne concerne que 273 millions d'hectares, très inégalement répartis sur tous les continents. Contre toute attente, les pays où la pratique de l'irrigation est la plus forte ne sont pas dans les zones sèches ou semi-sèches. Dans ces régions,

l'irrigation étant nécessaire à toute culture, toutes les surfaces cultivées le sont. En effet, sans eau, il n'y a pas d'irrigation et donc pas de culture sur de grandes surfaces, puisque celles-ci sont limitées par la disponibilité des ressources en eau, et où elles sont accessibles. Sur les rives du Nil, en Égypte, ou au Mexique, pays d'Amérique latine, l'agriculture a en revanche fait montre d'un certain succès.

Dans les parties où l'eau de pluie est à disposition en abondance, en plus de faire jouir à la surface cultivable d'une ampleur non négligeable, à condition que le relief y soit favorable, l'irrigation comme dans les zones sèches, bien qu'en aucun cas obligée, est pourtant bien fournie et – en ce qui est justifié de l'eau – aisément mise en place, dans le but de diversifier et améliorer les plantations, de se permettre plusieurs récoltes et de faire augmenter les rendements, car – c'est accessoire – elle peut effectivement devenir nécessaire. C'est bien ce qui se passe au Japon, en Chine, en Inde et au Pakistan (Milos, 1971).

D'autres éléments de nature non géographique sont également à prendre en compte pour comprendre la distribution de l'irrigation dans le monde. En l'occurrence, l'irrigation nécessite des infrastructures parfois coûteuses et la richesse des pays considérés constitue un déterminant essentiel, c'est dans cette optique que Boucra et al (2019) précisent que l'irrigation se développe moins en Afrique que dans les pays brésiliens.

Ainsi, les pays qui ont la plus grande part de leur surface irriguée se trouvent raccordés à un espace géographique, l'Asie du sud-ouest, qui concentre plus de 60 % des surfaces irriguées du monde. En fait, quelques pays autour de la Méditerranée, notamment l'Italie et la Grèce, sont également concernés.

II.2.4. L'irrigation en Algérie :

On estime qu'irrigables, dans le Sahara 1 154 000 ha (hors) dont 607 000 sans difficultés et 547 000 sous conditions. En ce qui concerne les grandes surfaces irriguées par les grands systèmes d'irrigation, essentiellement les périmètres irrigués, elles se déclinent entre 50 000 et 90 000 ha. Quant à l'hydraulique moyenne et petite, ce qui est véhiculé va de 230 à 260 000 ha dont 3 % par les retenues collinaires, 42 % par les puits, 20 % par les forages, 3 % par les sources et 8 % par le cours d'eau. De plus, selon ANONYME (1993), sur une superficie totale de 512 700 hectares irrigués, les quatre wilayas du Sud détiennent 30 % de la SAU irriguée. La Wilaya de Biskra se classe en tête avec 13,24%, suivie par la Wilaya de M'sila qui détient 5,64%, tandis que la Wilaya d'Adrar arrive en troisième position avec 5,54%. Enfin, nous avons

la Wilaya d'El Oued avec un pourcentage de 5,3%. C'est surtout ces zones d'irrigation qui ont besoin d'une modernisation de leur méthode d'irrigation HALILAT, selon HALILAT (2004).

II.2.5. L'irrigation au Sahara algérien :

En 1998, on aurait même signalé que l'agriculture irriguée dans l'ensemble du Sahara algérien aurait dépassé enfin 150.000 ha, dont 60.000 ha de palmier dattier, 30.000 ha de maraîchage et 60.000 ha de céréales. Actuellement, environ 100.000 ha dans la région sont irrigués à partir des eaux du continental intercalaire (C.I) et du continental terminal (C.T). L'évolution du mode de prélèvement de l'eau pour l'irrigation, de l'usage de l'eau dans les zones irriguées n'a pas obéi à un schéma linéaire en raison de changements de stratégies opératoires de l'irrigation au cours des trois dernières décennies. HALILAT (2004).

II.2.6. L'activité agricole dans la vallée du Souf

Dans la région d'El Oued, plus précisément la vallée du Souf, très connue pour la culture de la date, l'agriculture des différentes cultures a pris du volume au cours des dernières années (DSA El-Oued, 2024). La pomme de terre est bien sûr au rendez-vous mais aussi le blé, l'oignon, la tomate, l'ail, la pastèque... Cette diversité croissante a été favorisée par les caractéristiques climatiques et hydriques de la région, encore dans un contexte (DSA El-Oued, 2024). Ceci dit, les chiffres montrent que la région s'est hissée cette année parmi les premières à produire la pomme de terre (24% de la production nationale –725 000 quintaux/an). (DSA El-Oued, 2024)

Avec approximativement 38 298 ha dans dix-huit communes, soit 9,09 % de la surface agricole totale, la culture de la pomme de terre s'intègre dans un espace agricole ayant une superficie totale d'environ 420900 ha dont 80500 ha de S.A.U. Dans cette vallée, la bonne potentialité des sols (DSA, 2024) assure un système de production pluriannuel. Elle demeure dominée par les cultures maraîchères, la pomme de terre et les palmiers dattiers en particulier ; la production des cultures maraîchères atteint au total 18 113 259 quintaux (DSA, 2023).

II.3. Les différentes sources de pollution des eaux souterraines

. Les origines diverses de la pollution des eaux souterraines On distingue deux types de pollution de l'eau :

- Les contaminations naturelles
- Les pollutions engendrées par l'action humaine :

- ✓ Pollutions domestiques
- ✓ Pollutions industrielles
- ✓ Pollutions agricoles.

II.3.1. Les pollutions naturelles

Elle peut être engendrée par un phénomène éruptif volcanique, par des déversements de composés hydrocarbonés sous-marin, etc., ou lorsque l'eau est mise en contact avec des dépôts de minéraux générant, par dissolution ou érosion, des concentrations anormales en métaux lourds (CARNEVALE et al., 2006).

II.3.2. Les pollutions dues aux activités humaines

II.3.2.1. La pollution domestique

Les eaux vannes (celles issues des toilettes), les eaux ménagères (celles qui proviennent de la cuisine et des sanitaires) qui contiennent des graisses, du savon, des détergents... mais également les eaux usées qui sortent des établissements collectifs.

II.3.2.2. La pollution industrielle

On l'estime largement diversifiée. Elle est conditionnée par l'activité (entre autres) de l'industrie. On peut alors y trouver des substances organiques et lipidiques, des hydrocarbures, des métaux, etc. ; des acides, divers produits chimiques, voire des matières radioactives (CARNEVALE et al., 2006).

II.3.2.3. L'agriculture

L'agriculture fait de plus en plus appel aux produits chimiques et organiques, en particulier sur les sols pauvres en éléments nutritifs, étant à l'origine de la pollution diffuse des ressources en eau.

- La pollution agricole peut être représentée sous ces deux modes de pollution :
- La pollution diffuse est le nom donné à la dégradation de la qualité de l'eau dans un large espace qui est le résultat de rejets agricoles, n'ayant pas pour origine une source précise de ce territoire.
- La pollution sporadique, c'est le rejet de polluants, certes en petites quantités, mais avec une certaine répétition, difficile à maîtriser parce que relié à un nombre considérable de sources (BOULIER, 2011).

II.3.2.4. Pollution des eaux souterraines

L'eau souterraine subit l'action de divers nœuds et sources de pollution diffuse (Tableau n°02) parmi lesquels se trouvent les secteurs industriel, agricole, domestique (assainissement précaire), stockage des hydrocarbures, médical etc... et d'autres sources habituelles.

Tableau II.1 : Certains contaminants courants des eaux souterraines et les sources de pollution associées (VANESSA et *al.* 2015)

SOURCE DE POLLUTION	Type de contaminant
Activité agricole	les nitrates, ammonium, pesticides, organismes fécaux
Assainissement individuel	les nitrates, les organismes fécaux, hydrocarbures synthétiques de trace
Stations d'essence & Garages	benzène, d'autres hydrocarbures aromatiques, des phénols, des hydrocarbures halogènes
Enfouissement des déchets solides	ammonium, salinité, hydrocarbures halogènes, métaux lourds
Industries métalliques	trichloréthylène, tétrachloroéthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, métaux lourds, des phénols, cyanures
Travaux de Peinture	alkylbenzène, tétrachloroéthylène, d'autres hydrocarbures halogènes, des métaux, quelques hydrocarbures aromatiques
Industrie du bois	pentachlorophenol, certains hydrocarbures aromatiques
Nettoyage à sec	trichloroéthylène, tétrachloroéthylène
Fabrication de pesticides	divers hydrocarbures halogènes, des phénols, de l'arsenic
Vidange des boues d'eaux usées	les nitrates, les divers hydrocarbures halogènes, plomb, zinc
Tanneries	chrome, divers hydrocarbures halogènes, des phénols
Exploration / Extraction pétrolière et gazière	salinité (chlorure de sodium), les hydrocarbures aromatiques
Les mines de charbon et métallifères	acidité, divers métaux lourds, fer, sulfates

Conclusion

La valorisation accrue de l'agriculture de la vallée du Souf a permis un potentiel économique élevé qui a renforcé la sécurité alimentaire locale. Toutefois, la forte expansion de cette agriculture a été à l'origine d'importants désagréments environnementaux. L'emploi intensif d'eau d'irrigation et le recule du niveau de la nappe phréatique sont des illustrations de pratiques agricoles intensives. Bref, la qualité de l'eau est affectée par l'activité humaine notamment à travers l'agriculture.



Chapitre III

***Etude qualitative et
quantitatives sur la
nappe phréatique***

Introduction

Auparavant, l'unique ressource en eau potable pour les hommes et le bétail était constituée par la nappe phréatique dans la localité H. KHALIFA. Elle était également utilisée pour l'irrigation des cultures vivrières. À l'heure actuelle, elle est très largement mobilisée pour assurer l'irrigation, ce qui constitue l'objectif de ce chapitre qui va se pencher sur la description des propriétés de la nappe phréatique à H. KHALIFA et son évaluation piézométrique dans le temps et sur le passé, ce chapitre aborde aussi les paramètres physico-chimiques de l'eau de cette nappe phréatique dans cette localité.

Cette étude est justifiée d'abord par l'analyse de la composition chimique de l'eau et ensuite pour mieux analyser les variations de la nappe phréatique à partir des sites de suiv Des informations des différentes campagnes de mesures et divers rapports de suivi et de contrôle des agences de l'ANRH, de l'ONA et de la direction de l'hydraulique de la wilaya d'El Oued sont associées aux résultats d'une enquête de terrain.

III.1. Approche méthodologique:

Notre recherche utilise une approche méthodologique. Deux types d'informations favorables à l'analyse des nappes phréatiques:

1) - La profondeur de l'eau par rapport au sol, à partir de laquelle sont déterminées les fluctuations des niveaux de nappes phréatiques.

2) - Informations relatives' aux variations Caractéristiques physico-chimiques de l'eau

Les paramètres auxquels nous faisons appel pour interpréter la variabilité spatiale des facteurs régissant l'irrigation sur le terrain:

1- Des paramètres d'analyse la fluctuation de la nappe phréatique propose de présenter les caractéristiques de la nappe phréatique, ainsi que l'évolution de la piézométrie au fil du temps. Pour ce faire, nous nous appuierons sur les données issues de campagnes de mesures et les nombreux rapports de suivi et de surveillance établis par l'ANRH. Ces données ont été complétées par une enquête de terrain

- Les niveaux statiques des eaux souterraines.

2- Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique:

Nous intéressons aux paramètres physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique. Cette analyse est nécessaire afin de connaître la composition chimique de l'eau dans le temps, eaux de la nappe phréatique

- Qualité des eaux d'irrigation.
- Catégorisation des eaux phréatiques.

III.2. Méthode de prélèvement

III.2.1. Prélèvements :

Il est déterminant de bien choisir l'échantillon pour en assurer la pertinence. Ce dernier doit être de bonne qualité mais également représentatif du contexte de l'analyse (SAYAD, 2015). Ces pratiques sont mises en œuvre avec des fréquences et des répartitions différentes d'un lieu à l'autre, selon le type des ressources en eau (superficielle, souterraine), les formations géologiques, la profondeur d'installation du captage, les exploitations agricoles existantes et selon les disponibilités et les modalités d'utilisation des installations de prélèvements. Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des contenants nettoyés, rincés plusieurs fois avec l'eau à tester, et scellés de façon étanche à l'air.

III.2.2. Représentativité des échantillons.

III. 2.2.1. Forages et puits

Un échantillon prélevé sur une eau en stagnation prolongée ne fournit pas un échantillon représentatif de la nappe. En effet, l'eau a été influencée à la fois par le matériau du tubage et par des éléments extérieurs (pollution, pluies...). Pour obtenir un échantillon moyen de l'horizon capté, il faut pomper suffisamment de temps pour remplacer l'eau présente dans le tubage/cuvelage. Dans le cas d'un ouvrage captant plusieurs aquifères, ce dernier fournira un échantillon de mélange des différentes eaux, dont les ratios sont directement liés aux transmissivités des différents niveaux. Il est possible de prélever des échantillons à différentes profondeurs grâce à des conteneurs lestés équipés d'un système de fermeture actionnable depuis la surface (hydrocapteurs). Pour diminuer le mélange de l'eau pendant l'échantillonnage, la manipulation d'hydrocapteurs de diamètre largement inférieur à celui du forage est préconisée. Le purging progressif des hydrocapteurs en zones ouvertes peut être réalisé par descente

III.2.3. Les paramètres physico-chimiques :

Les paramètres physico-chimiques: la température (T), le potentiel hydrogène (pH), la conductivité électrique (CE) et l'oxygène dissous (O_2), sont mesurés in situ à l'aide d'un appareil multi paramètre .

Les échantillons d'eau destinés aux analyses des éléments chimiques majeurs et en traces (Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , Na^+ , K^+ , SO_4^{-2} , HCO_3^{-} , Cu , Hg , Fe^{+3} , As , Zn , Cd)

Le pH, la température et la conductivité sont mesurés in situ au moyen d'appareillage de terrain avec des sondes sélectives (pH-mètre, Mettler Toledo MP 120, conductimètre HANNA instruments Hi 8633).

III.2.3.1 Température(T) :

L'analyse et la gestion des eaux, qu'elles soient superficielles ou souterraines, ne sauraient omettre la température, un paramètre fondamental à tous les niveaux. Les eaux souterraines ont généralement une température plus stable que celle des eaux de surface plus fluctuante selon la saison ; ce qui est déterminant dans divers processus ; il en est ainsi de la solubilité des gaz, de la ségrégation des sels dissous, du pH et de l'origine des eaux, sans écarter divers mélanges, etc.

III.2.3.2. Le Potentiel d'Hydrogène (pH)

Le pH est un élément clé dans l'appréciation de l'agressivité de l'eau, étant défini comme le logarithme décimal du contraire de la concentration en ions hydronium (H_3O^+). Il est neutre à 7. Quand il est supérieur à 7, il est basique ; quand il est inférieur à 7, il est acide. Mais l'eau est le solvant de la quasi-totalité des ions, et le pH constitue une manière de comparer la solubilité de ces ions dans l'eau. Ainsi, pour les eaux naturelles, il oscille quasiment toujours entre 6 et 8.

III.2.3.3. Conductivité électrique (CE) :

L'évaluation de la conductivité électrique permet d'obtenir des renseignements sur la concentration en sels dissous dans l'eau. Elle augmente souvent lorsque les valeurs du pH sont anormales et que la salinité est forte. Il est également vrai que les variations de la conductivité dépendent de la température de l'eau dont les dérives s'avèrent sensibles lorsque celle-ci s'élève. Elle sert aussi à évaluer la quantité de sels dissous dans l'eau (Pescod, 1985 ; Rodier, 1984).

III.2.3.4. Résidu-sec :

La quantité de sels en grammes après évaporation d'un litre d'eau minérale à 180°C est appelée résidu sec à 180°C. Il permet d'établir :

- L'eau avec une teneur élevée en minéraux (résidu sec supérieur à 1500 mg/l),
- L'eau avec une teneur moyenne en minéraux (résidu sec compris entre 500 mg/l et 1500 mg/l).
- L'eau avec un taux de minéraux faible (résidu sec compris entre 50 mg/l et 500 mg/l) ,
et l'eau à très faible contenu en minéraux (résidu sec < 50 mg/l)

III.2.3.5. Salinité :

La minéralisation totale de l'eau est représentée par la totalité des sels dissous et des matières organiques (MO) présents dans l'eau après évaporation à 110°C. Elle est exprimée en mg/l ou en mg/l.

III.2.3.6. La turbidité :

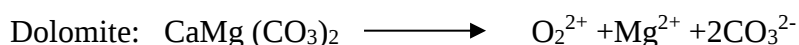
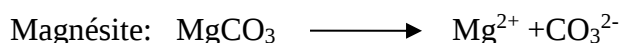
L'urbidité est un indicateur clé de la qualité de l'eau, affectant la pénétration de la lumière, la demande biologique en oxygène et le transport des contaminants. Elle est étroitement surveillée dans les rivières urbaines, les lacs et les écosystèmes côtiers afin de suivre les épisodes de pollution, le transport des sédiments et les impacts du ruissellement des eaux pluviales.

III.2.3.7. Calcium (Ca^{2+}) :

Les ions calcium présents dans l'eau sont issus principalement de 2 sources naturelles : la dissolution des formations carbonatées (CaCO_3) et la dissolution des formations alluvionnaires gypseuses (CaSO_4). (Gasm2009)

III.2.3.8. Magnésium (Mg^{2+}) :

Ce réctal, dérivant lui-même du calcium, est issu de la dissolution de formations carbonatées riches, notamment en magnésium (magnésite, dolomites) ou bien en sulfate de magnésium (MgSO_4).



Chlorure (Cl⁻) :

Le chlore est présent sous forme de chlorure (Cl⁻) dans une large part de la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl), de potassium (KCl) et de calcium (CaCl₂) : 90 % des ions chlorures (Cl⁻) que nous côtoyons dans l'environnement proviennent des océans. L'ensemble des chlorures représente environ 0,05 % de la lithosphère (couche solide de la sphère terrestre).

III.2.3.9. Titre Hydrométrique TH :

Le titre hydrotimétrique (TH) de l'eau, ou concentration totale en minéraux, est un indicateur de la minéralisation de l'eau. Cela est à créer à l'apport relative des ions calcium et magnésium. Notons que les critères algériens (50 F°), tout comme ceux de l'OMS (1972, 54 °F), concernent la potabilité de l'eau.

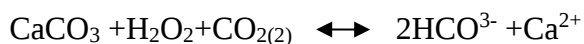
III.2.3.10. Total Dissolved Solids (TDS) :

La concentration globale des substances dissoutes dans l'eau, soit l'ensemble des éléments et des composés dont il peut s'agir, tels les sels inorganiques, la matière organique et d'autres éléments minéraux (silice, carbonates, phosphates, sulfates, etc.), est ce que l'on nomme en général les Solides Dissous Totaux (SDT). La mesure de la TDS se fait traditionnellement en milligrammes par litre (mg/L) ou en parties par million (ppm).

III.2.3.11. Bicarbonates (HCO₃⁻) :

L'arrivée des bicarbonates dans l'eau est liée à celle des formations carbonatées (cipolin, calcaire) qui se sont dissous dans les eaux riches en CO₂.

L'équation de réaction de dissolution est donnée ci-dessous.

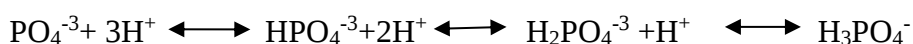
**III.2.3.12. Les nitrates (NO₃⁻) :**

L'azote provient de la décomposition dans le sol des déchets organiques d'origine végétale ou animale. Les bactéries combinent ensuite cet élément avec l'oxygène pour former des nitrates. L'azote est un nutriment indispensable au développement des plantes et des cultures, mais en excès, l'azote se révèle toxique. Employés couramment dans l'agriculture, les nitrates peuvent être une cause non négligeable de pollution des eaux. Selon certaines

estimations, l'agriculture serait à l'origine de plus de la moitié des rejets d'azote dans les eaux superficielles.

III.2.3.13. Phosphate (PO_4^-) :

De la même façon que l'azote, le phosphate est essentiel à la vie aquatique. Il peut exister sous différentes formes oxydées : méta HPO_3 , pyro $\text{H}_4\text{P}_2\text{O}_7$ et ortho H_3PO_4 – 4. Dans un écosystème aquatique, les formes méta et pyro se convertissent en forme ortho pour des pH allant de 5 à 8. Voici les réactions chimiques impliquant les différentes formes de phosphates :



III.2.3.14. Alcalimétrie complète (TAC)

Le titre alcalimétrique complet (TAC) correspond au volume d'acide nécessaire pour neutraliser les ions bicarbonate HCO_3^- en complément des ions carbonate CO_3^{2-} contenus dans 100 ml d'échantillon

III.2.3.15. TA Titre alcalimétrique

L'alcalinité d'une eau provient de la présence en solution d'ions hydroxyde (OH^-) et d'ions carbonate $\text{CO}_3^{2-}(\text{aq})$ et d'ions hydrogénocarbonate $\text{HCO}_3^-(\text{aq})$ principalement (les ions phosphate PO_4^{3-} ou silicate SiO_3^{2-} peuvent également y contribuer de façon minoritaire).

III.2.3.16. Les nitrites (NO_2^-) ou azote nitreux

L'azote nitreux représente une forme moins oxygénée et moins stable représentant ainsi la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium il s'agit d'une forme toxique les nitrites sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium (Aghzar&al ;2001).

L'analyse des histogrammes établis dans la Figure pour les échantillons des puits. Donc toutes les valeurs obtenues pour le régions ne dépassent pas la norme OMS (0,1 mg/l). Charrahi Mohammed dépassé les normes.

III.2.4. Les paramètres d'analyse la fluctuation de la nappe phréatique :

Le niveau piézométrique, aussi appelé niveau libre de la nappe, est défini comme étant le point où les fluctuations des niveaux de nappes phréatiques sont mesurées par rapport à la surface du sol. Il correspond à l'endroit où la nappe phréatique est présente, se situant à la frontière entre la zone saturée (où chaque pore du sol est rempli d'eau) et la zone non saturée (où le sol contient un mélange d'air et d'eau).

Pour être plus précis:

On détermine le niveau piézométrique en soustrayant la profondeur de l'eau relevée dans un puits ou piézomètre à l'altitude du sol à cet emplacement, c'est-à-dire

$$N P = Z - \text{profondeur de l'eau/sol}$$

Ce niveau indique la hauteur de la nappe phréatique, soit le point où le sol devient complètement saturé d'eau. Les oscillations de ce niveau signalent les changements dans le remplissage de la nappe, qui sont affectés par les précipitations, les extractions d'eau, les inondations ou d'autres événements hydrologiques.

On réalise les mesures dans des conditions stabilisées, à l'écart des périodes de fortes précipitations ou de pompages, afin d'obtenir des valeurs qui reflètent les variations naturelles. Donc, la profondeur de l'eau par rapport au niveau du sol, qui est établie à partir de relevés piézométriques, sert d'indicateur pour observer les variations saisonnières et interannuelles des nappes phréatiques. Ces variations sont quantifiées en battements de nappe, calculés sur la base des changements du niveau piézométrique.

III.2.4.1. Analyse de la fluctuation de la nappe phréatique

Les variations temporelles du niveau de la nappe phréatique, sujet d'étude des diverses modalités naturelles puis humaines par lesquelles s'opère son analyse, sont donc essentiellement tributaires de la situation qu'occupent en chacun des moments du temps qui étudie sa fluctuation les éléments qui sous-tendent sa variabilité.

III.2.4.2. Facteurs essentiels concourant à sa variabilité

a) Recharge naturelle par percolation :

L'eau des pluies pénètre dans le sol pour alimenter la nappe phréatique : les variations saisonnières et interannuelles de celle-ci sont dues à l'irrégularité du volume de l'eau apportée chaque année dont le caractère est, on le sait, tributaire lui-même de conditions météorologiques : on connaît des années sèches ou humides.

b) Géologie et perméabilité des sols :

Le concassage du sol entraîne la contamination de l'eau par le passage des éléments nuisibles du sol. En effet, selon les sols et les roches la capacité d'infiltration est diverses. Les sols qui laissent passer l'eau (un sable par exemple ou un gravier) facilitent la recharge et donc

le niveau de la nappe va monter. Si au contraire le sol ne laisse pas passer l'eau (un argile par exemple), l'infiltration et donc la nappe sont non alimentés, et donc occupant dans le temps une position plus basse.

Dans les zones côtières, la proximité de l'eau de mer et les tensions salines conduisent à la salinisation de la nappe phréatique, laquelle peut être impactée par l'eau marine. Avec l'élévation du niveau de la mer lié à la hausse des températures, une intrusivité de l'eau saline dans les aquifères pourrait induire la déprise (dégradation) du niveau et de la qualité de la nappe phréatique.

c) Les activités humaines :

L'extraction de la ressource en eau par pompage peut contribuer à abaisser le niveau de la nappe phréatique, que l'on appelle rabattement, lorsque le pompage est intensifié ou généralisé, on localise la dépression, au sein même de la nappe phréatique. Ces prélèvements interfèrent avec les variations naturelles du niveau de la nappe phréatique.

d) Événements météorologiques extrêmes :

Les tempêtes, les ondes de tempête et tous les aléas climatiques extrêmes ont par définition un impact fort sur les niveaux de la nappe phréatique source d'une érosion ponctuelle de son niveau, surtout en secteur littoral.

III.2.4.3. Techniques d'analyse des variations

a) Mesures piézométriques :

L'observation continue (idéalement sans rupture) du niveau piézométrique permet de tracer des courbes de variations (limnigrammes) illustrant les cycles de charges et de décharges de la nappe sur plusieurs années.

b) Représentation des niveaux extrêmes:

La cartographie des altitudes maximales et minimales de la nappe sur la durée permet de déterminer les zones de fortes variations et de déceler les tendances à long terme.

c) Examen physico-chimique :

L'analyse de l'hydrologie est renforcée par l'examen des variations chimiques étudiées et de la salinité de la nappe phréatique, en particulier pour déterminer l'impact de l'irrigation, des drains et de l'intrusion marine.

III.3. Résultats et discussion

III.3.1. L'échantillonnages :

Des échantillons ont été prélevés dans 6 puits (h) de la nappe phréatique de la région de Khalifa par une enquête de terrain menée avec l'ANRH (2025), couvrant toute la longueur de notre zone d'étude, et leurs emplacements sont indiqués sur la carte ci-dessous.

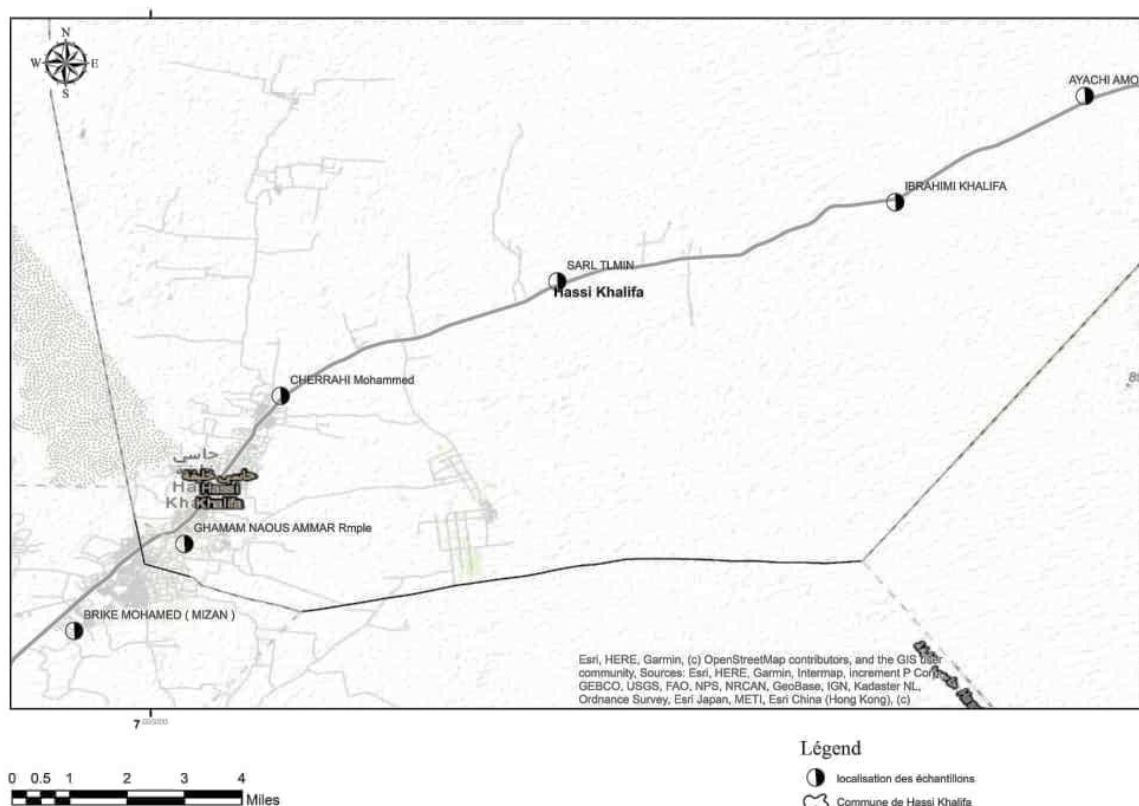


Figure III.1. carte d'inventaire des puits de prelevement

(Source : Dr.KHEZAZNA Amina, 2025)

III.3.2. Présentation les Puits (H) de la nappe phréatique de H. KHALIFA:

AYACHI AMOR est géolocalisée en coordonnées spatiales $7^{\circ} 14' 07''$ et $33^{\circ} 40' 55''$



Photo III.1. Puits AYACHI AMOR

BRAHIMI KHALIFA est géolocalisée en coordonnées spatiales $7^{\circ} 11' 15''$ et $33^{\circ} 39' 49''$



Photo III.2. Puits BRAHIMI KHALIFA

SARL TLMIN est géolocalisée en coordonnées spatiales $7^{\circ} 06' 09''$ et $33^{\circ} 38' 08''$



Photo III.3 Puits SARL TLMIN

GHAMAM NAOUS AMMAR Rmple est géolocalisée en coordonnées spatiales $7^{\circ} 00' 30''$ et $33^{\circ} 34' 09''$



Photo III.5. Puits GHAMAM NAOUS AMMAR Rmple

CHERRAHI Mohammed située est géolocalisée en coordonnées spatiales



Photo III.4. Puits CHERRAHI Mohammed BRIKE MOHAMED (MIZAN) est géolocalisée en coordonnées spatiales $6^{\circ} 59' 14''$ et $33^{\circ} 33' 21''$



Photo III.6. Puits BRIKE MOHAMED (MIZAN)

Le niveau et la profondeur de l'eau mesurés ont été effectués dans des conditions stables,

loin des périodes de fortes pluies ou de pompage, afin d'obtenir des valeurs reflétant les variations naturelles. Utilisation d'un appareil de mesure de niveau statique



Photo III.7. Appareil de mesure de niveau statique

III.3.3. Analyse de la fluctuation de la nappe phréatique:

À partir des années 90, il a été constaté des variations conséquentes du niveau piézométrique de cette nappe phréatique, situation suivie à travers plusieurs campagnes de mesure piézométrique conduites par l'ANRH.

Précisons que l'on ne réalise pas de vastes campagnes de surveillance mais des actions ponctuelles.

Nous allons décrire l'évolution de la profondeur de la nappe à quelques dates, 2010, 2012, 2015, 2022 et 2025.

III.3.3.1. Évolutions de la nappe phréatique en 2010 :

La carte présente la profondeur de la nappe phréatique en 2010, les lignes piézométrique (en bleu) matérialisent les altitudes du niveau d'eau souterraine (exprimé en mètres).

Les flèches noires dépeignent le sens de circulation de l'eau, des régions de haute altitude piézométrique au nord-est (voir AYACHI AMOR) aux zones de basse altitude au sud ouest (voir BRIKE MOHAMED M'IZAN). IBRAHIMI KHELIFA entouré de courbes étroites

formant un « entonnoir » témoignant d'un pompage important qui diminue le niveau de la nappe au niveau local.

Le remplissage s'effectue au nord-est (niveaux élevés), alors que la vidange se fait au sud-ouest (niveaux bas).

Les flèches en noir témoignent du sens d'écoulement des eaux souterraines. En général, l'eau semble de tendance naturelle se déplacer des régions de fortes hauteurs piézométriques vers celles de faibles hauteurs piézométriques.

Ce qui est conforme à la loi de la conservation de l'eau : l'eau circule toujours des plus fortes vers les plus faibles pressions.

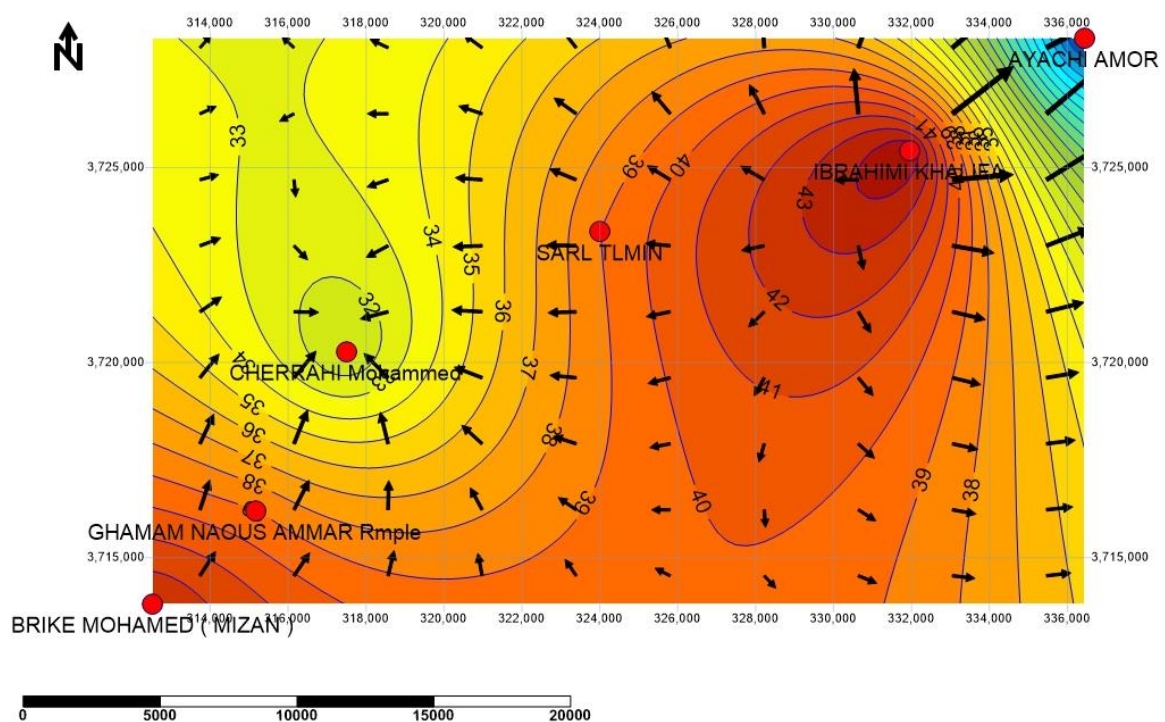


Figure III.2. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2010 H. KHALIFA

III.3.3.2. Évolutions de la nappe phréatique en 2012 :

Comparativement à la carte de 2010, nous pouvons observer les modifications suivantes:

Dans le même secteur à droite (sur la carte 2010 en rouge foncé), le niveau piézométrique est identique et même peut-être légèrement plus élevé, en 2012.

Dans la zone à gauche (jaune clair sur la carte 2010), le niveau piézométrique a déjà baissé. Il semble avoir baissé encore plus en 2012.

Comme le montrent les flèches noires de la carte, l'eau se dirige des régions en surélévation (nord-est, vers AYACHI AMOR) vers les régions en dépression (sud-ouest, vers BRIKE MOHAMED M'IZAN). L'étranglement des graphiques autour d'IBRAHIMI KHELIFA donne au niveau piézométrique une allure d'entonnoir témoignant d'un pompage fort et d'un abaissement local du niveau de la nappe aquifère.

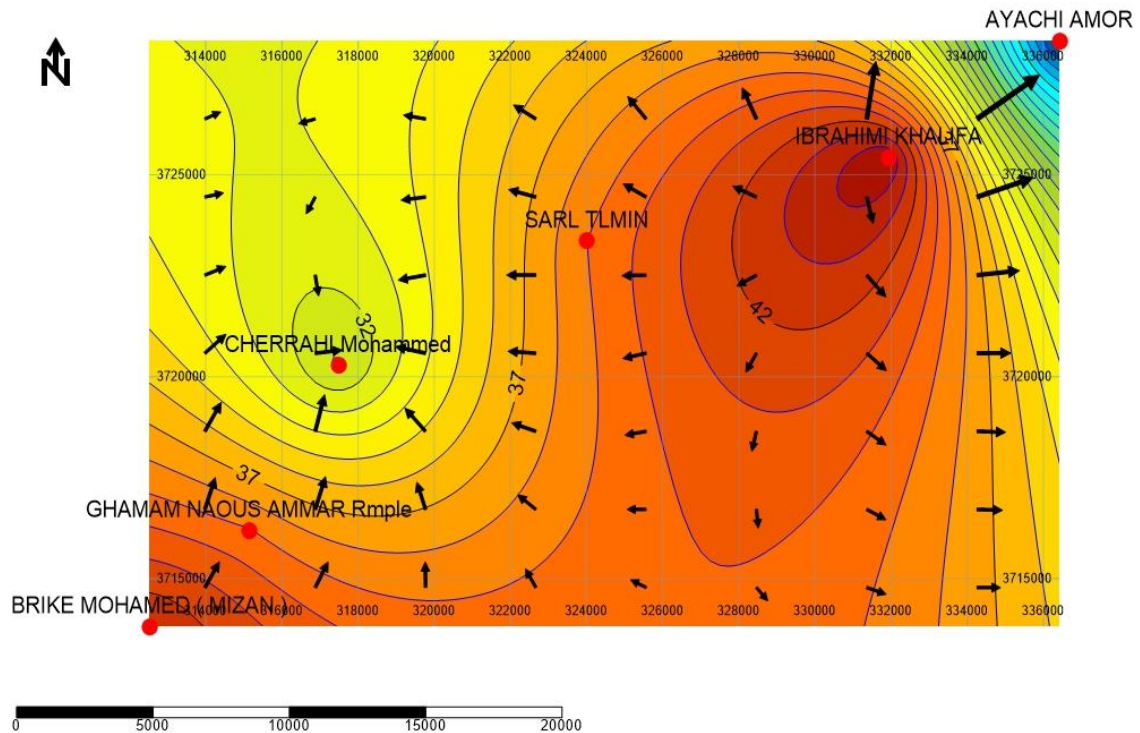


Figure III.3. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2012 H. KHALIFA

III.3.3.3. Évolutions de la nappe phréatique en 2015:

En comparant cette carte avec celles de 2010 et 2012, nous pouvons noter les évolutions suivantes :

Évolution des niveaux piézométriques :

Les niveaux piézométriques étaient déjà élevés dans la zone de droite (rouge foncé) en 2010 et 2012, mais semblent avoir légèrement augmenté en 2015.

Les niveaux piézométriques étaient déjà faibles dans la zone à gauche (jaune clair) en 2010 et 2012, mais semblent avoir légèrement diminué en 2015.

L'eau s'écoule naturellement des zones de haut niveau piézométrique (droite) vers les zones de faible niveau piézométrique (gauche), conformément au principe de conservation de l'énergie.

Les zones à droite (rouge foncé) jouent un rôle essentiel comme sources de recharge de la nappe phréatique.

Les zones à gauche (jaune clair) sont probablement des zones abondamment pompées, voire surexploitées pour l'agriculture.

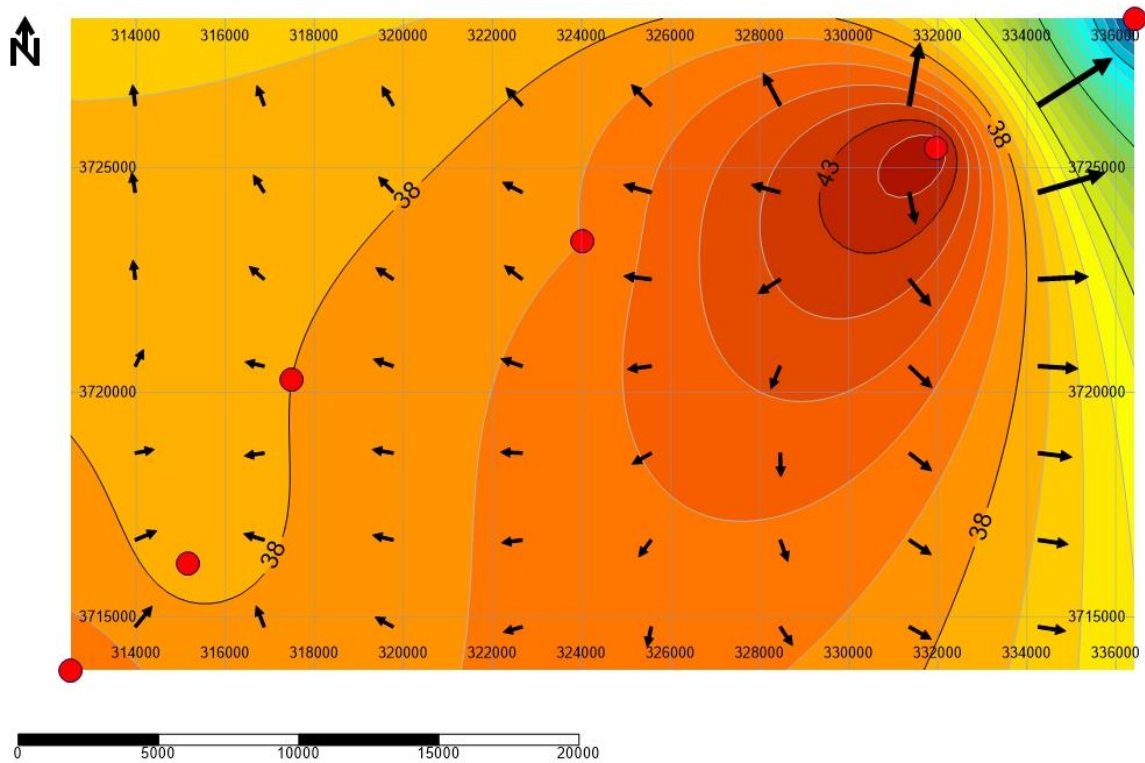


Figure III.4. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2015 H. KHALIFA

III.3.3.4. Évolutions de la nappe phréatique en 2022 :

ORIENTATION DU FLUX On peut remarquer que l'eau est transportée suivant un modèle général. D'où la direction du flux de l'eau allant de droite à gauche (de haut en bas sur la carte). Car ça veut dire que l'eau se déplace des régions à très grands niveaux piézométriques (droite), vers les zones à faibles niveaux piézométriques (gauche).

La densité des lignes isophysiométriques indique le gradient piézométrique. Dans les régions où les lignes sont visiblement adjacentes (comme cela est le cas dans le secteur de IBRAHIMI KHAGUE et AYACHI AMOR), l'intensité du gradient donne lieu à un important volume d'eau qui fuit. Dans les régions où les lignes sont visiblement distantes, (comme c'est le cas autour de BRIKE MOHAMED), il y a peu ou pas de gradient ou il est léger, alors le débit d'eau est faible.

Si l'on compare avec ses équivalents de 2010 , 2012 , et 2015 , nous pouvons observer que :

En 2010 , 2012 , et 2015 , les niveaux piézométriques étaient déjà relativement élevés dans la zone de droite (rouge foncé) , mais ils semblent avoir légèrement baissé en 2022 .

En 2010 , 2012 , et 2015 , les niveaux piézométriques étaient déjà très faibles dans la zone de gauche (jaune clair) , mais ils semblent avoir légèrement augmenté en 2022

Les zones à faible niveau piézométrique (gauche) peuvent correspondre à une surexploitation continue de l'eau souterraine, notamment autour des points comme BRIKE MOHAMED et CHERRAHI Mohammed .

Les zones à haut niveau piézométrique (droite) peuvent correspondre à des protections ou des exploitations plus modestes, expliquant leurs niveaux.

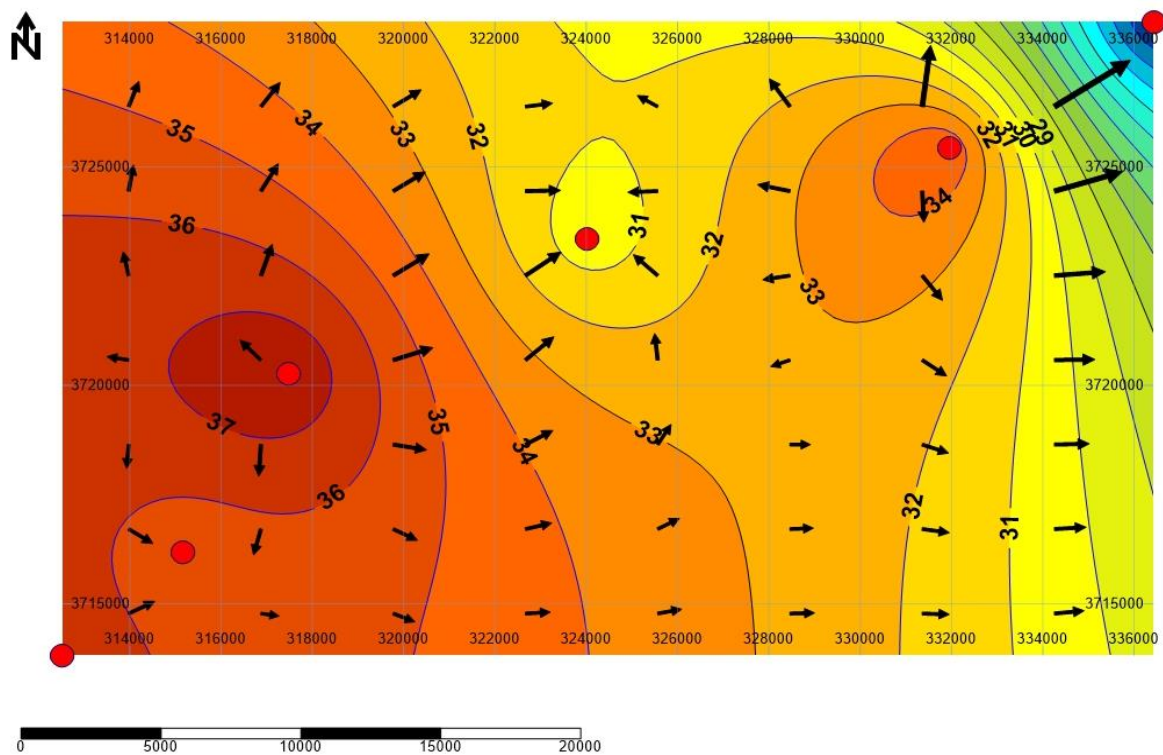


Figure III.5. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2022 H. KHALIFA

III.3.3.5. Évolutions de la nappe phréatique en 2025 :

Sur la partie gauche de la carte, les niveaux piézométriques sont plutôt élevés (environ 27 m), exprimés avec des coloris verts. Les niveaux piézométriques fluctuent entre 28 et 30 m au centre de la carte, représentés avec des coloris jaunes.

Sur la partie droite de la carte, on vit les niveaux piézométriques les plus faibles (environ entre 31 et 33 m), illustrés avec des coloris orange et rouge.:

En raison de niveaux piézométriques très bas (environ 31 à 33 m) sur une grande partie de la carte, surtout à droite, on peut penser que la nappe phréatique est excessivement exploitée ou que les conditions météorologiques le justifient. Les flèches indiquent que l'écoulement des eaux souterraines est globalement dirigé vers la droite, vers les secteurs de faibles pressions (niveaux piézométriques plus bas). A plusieurs endroits de la carte, au centre notamment, les flèches viennent vers des points précis trop marqués, lieux de pompage intense ou d'écoulement naturel important.

Cette cartographie, qui anticipe un échéancier de 2025, justifie la possibilité d'une baisse des cotes piézométriques dans des zones considérées. Ces informations relèvent d'enjeux de tarissement, de salinisation de l'eau souterraine ou encore, d'éventuelles contraintes sur les ressources. Cette carte piézométrique met également en exergue du point de vue des secteurs de la région H. KHALIFA, des niveaux piézométriques très bas et un fort mouvement de flux vers ces secteurs. Il est donc opportun de suivre ces évolutions et d'assurer des politiques de gestion durable des eaux souterraines afin d'éviter des conséquences fardeaux environnementales et économiques.

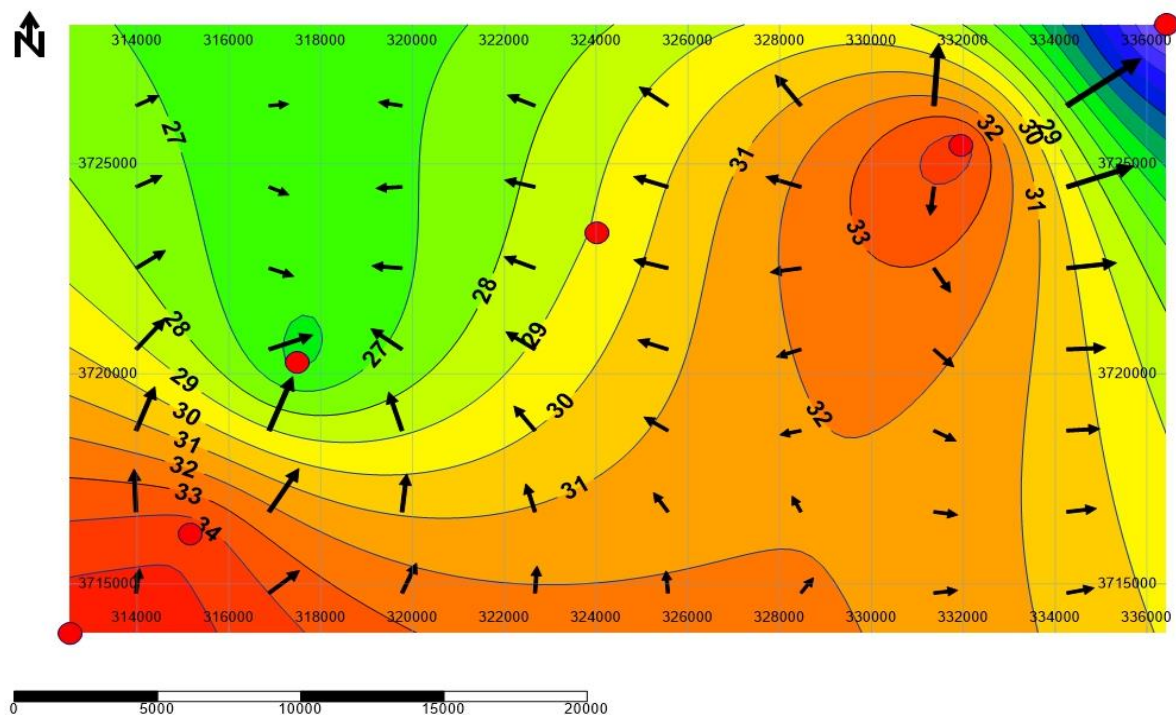


Figure III.6. Carte piézométrique de la nappe phréatique en 2025 H. KHALIFA

III.4. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique

III.4.1. Campagnes d'échantillonnage, analyses de laboratoire et de data :

La campagne d'échantillonnage constitue une étape très importante dans l'analyse des caractéristiques physico-chimiques de l'eau. Elle vise à obtenir des informations précises sur la

composition chimique et les propriétés physiques de l'eau souterraine, ce qui permettra de mieux comprendre sa qualité et son état actuel.

La campagne d'échantillonnage, le 14 avril 2025, nous a permis de collecter des échantillons d'eau provenant de 6 puits utilisés principalement pour l'irrigation (Fig.16).

Les analyses physico-chimiques des échantillons d'eau ont été effectuées au laboratoire de l'Algérienne Des Eaux (ADE) à El Oued. Nous nous sommes concentrés sur l'étude des ions majeurs tels que Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- et NO_3^- , ainsi que sur la conductivité électrique (EC). Le pH a été mesuré in situ à l'aide d'un pH-mètre.

Des précautions ont dû être prises afin d'assurer la qualité des échantillons prélevés et de permettre une interprétation correcte des analyses. Les prélèvements ont été effectués à partir des puits utilisés pour l'irrigation après avoir laissé couler l'eau quelques minutes afin d'évacuer l'eau emmagasinée dans les tuyaux .



Figure III.7. Pompe immergée au niveau d'un puits. Point de prise d'un échantillon d'eau

Les échantillons d'eau ont été recueillis dans des bouteilles en polyéthylène propres, rincées plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermées hermétiquement.

Les échantillons d'eau destiné aux analyses des éléments chimiques majeurs et en traces (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , Na^+ , HCO_3^- ,.....) sont pris dans des bouteilles en plastique.



Photo III.8. Les bouteilles en polyéthylène des échantillons d'eau

Les analyses des eaux ont été effectuées dans le laboratoire de l'Algérienne des eaux ADE de la wilaya d'El Oued



Photo III.9. Appareil conductimètre+ pH-mètre



Photo III.10. Appareil Spectrophotomètre



Photo III.11. Réactive

III.4.2. Méthode électrochimique

Cette méthode est surtout utilisée pour des mesures précises. Elle est également appliquée dans de cas particulier comme par exemple la mesure de PH des eaux très douces des eaux contenant des protéines appareil utilisé : Multiparomètres portable pour mesures sur site les paramètres suivants :

Température, conductivité, salinité, PH, sont mesurés in situ à l'aide d'un appareil multi paramètre



Photo III.12. Appareil multi paramètre

III.5. Caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique

III.5.1. Température(T)

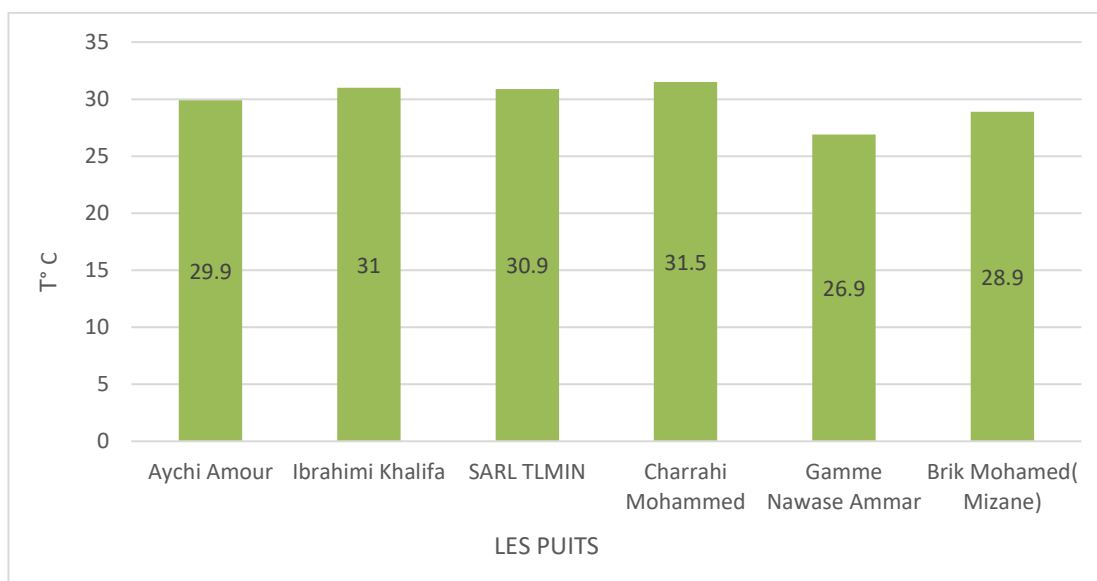


Figure III.8. Histogramme des températures mesurées des puits HASSI KHALIFA

Dans la zone d'étude les températures enregistrées (Fig23) oscillent entre 31.5°C (s) et 26.9 °C. Les valeurs de températures enregistrées sont à la norme et ne dépassent pas la norme OMS (35°C). On peut dire que ces variations peuvent être en fonction de la température saisonnière, la nature géologique et la profondeur de l'oued pour les eaux superficielles et les profondeurs des puits pour les eaux souterraines. La température joue un rôle important dans la composition chimique et l'activité bactérienne.

III.5.2. Conductivité électrique (CE)

Pour la région HASSI KHALIFA (Fig.24), les résultats obtenus des eaux souterraines indiquent des valeurs variant entre 3770 et 8938 μcm ces valeurs dépassent la norme OMS standard (3000 μcm). Notant que les prélèvements d'eaux sont chargés de sels minéraux qui peuvent être d'origine naturelle (calcium, magnésium, sodium, potassium). Cette minéralisation naturelle liée à la nature des sols.

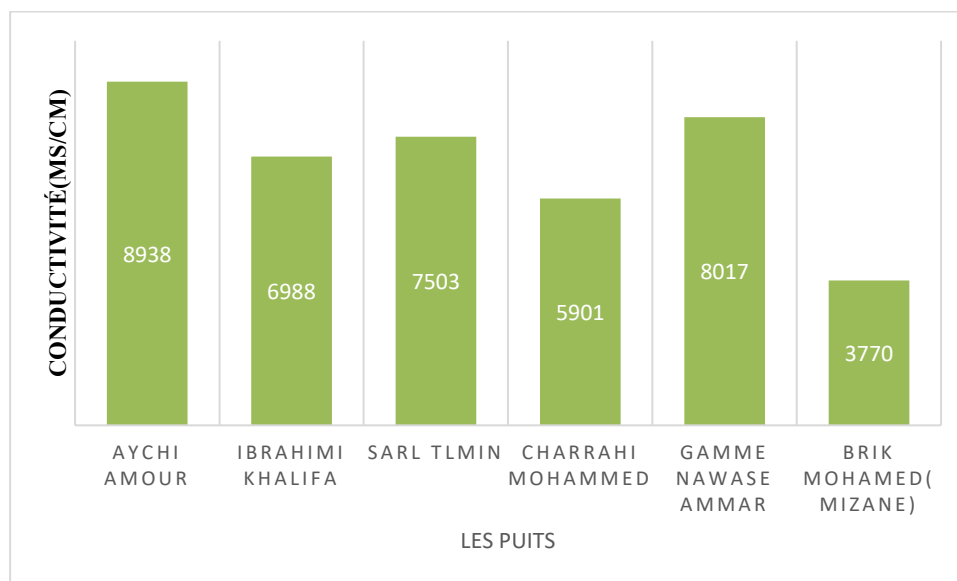


Figure III.9. Histogramme conductivités mesurées des puits HASSI KHALIFA

III.5.3. Potentiel d'Hydrogène (pH)

Les résultats indiqués dans la figure (Fig.25), montrent que les valeurs de pH des eaux souterraines de la région sont des valeurs ne dépassent pas la norme pH entre 6 et 8.5. Ces valeurs sont normales parce qu'elles sont dans l'intervalle des eaux naturelles pH.

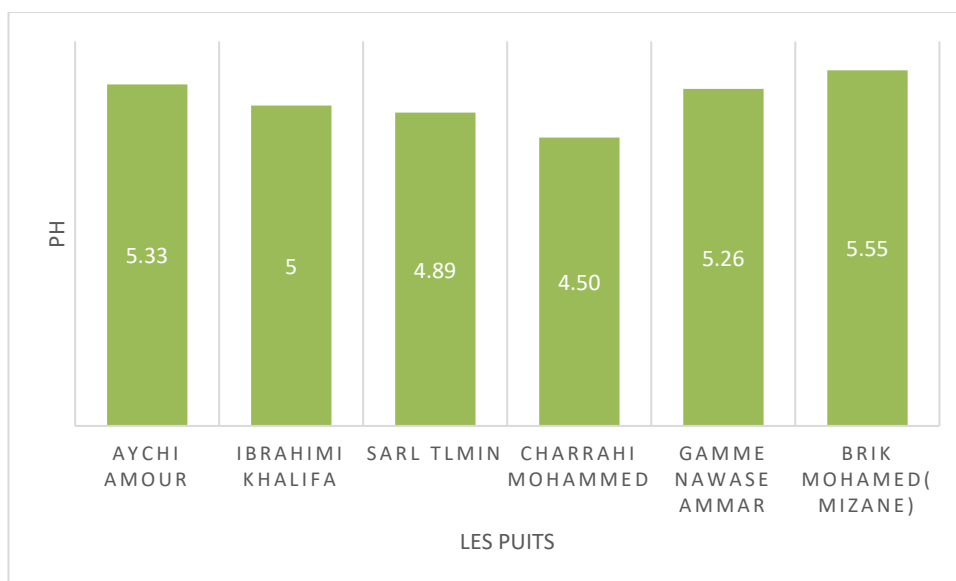


Figure III.10. Histogramme des pH mesurés puits HASSI KHALIFA

III.5.4. Salinité:

Pour la région HASSI KHALIFA (Fig.26), les résultats obtenus des eaux souterraines indiquent des valeurs varient entre 1.87 et 4.58.

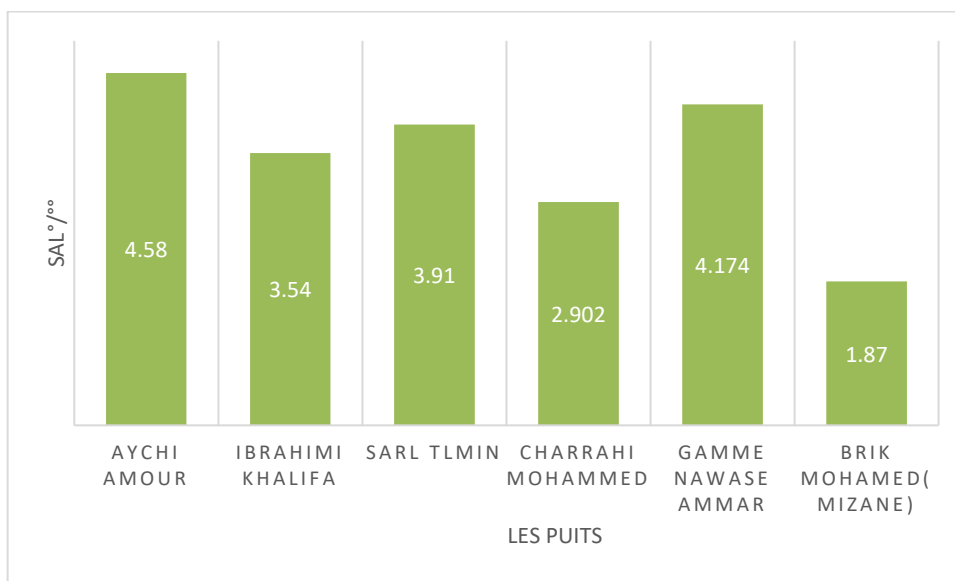


Figure III.11. Histogramme des SAL mesurés puits HASSI KHALIFA

III.5.5. Résidu-sec :

Pour la région HASSI KHALIFA (Fig.27), les résultats obtenus des eaux souterraines indiquent des valeurs variant entre 2980 et 4930 mg/l ces valeurs dépassent la norme OMS standard L'eau avec une teneur élevée en minéraux (résidu sec supérieur à 1500 mg/l),

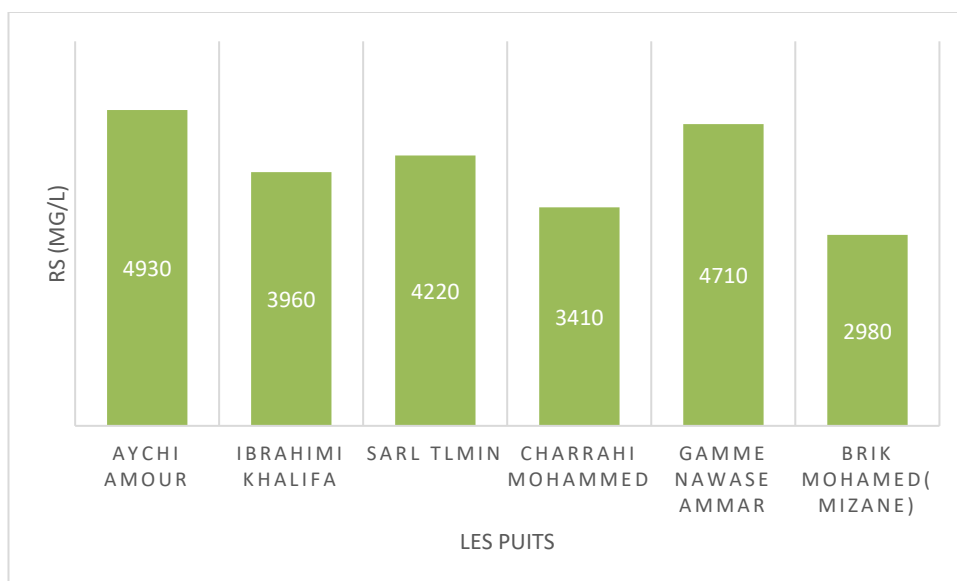


Figure III.12. Histogramme des RS mesurés puits HASSI KHALIFA

III.5.6. La turbidité :

Pour la région HASSI KHALIFA (Fig.28), les résultats obtenus des eaux souterraines indiquent des valeurs variant entre 0.222 et 1.76 Ntu ces valeurs sur la norme OMS standard L'eau. Pour le puit Charrahi Mohammed on enregistre le variable 3.86 et la puit Gamme Nawase Ammar 7.40 dépassent la norme OMS standard

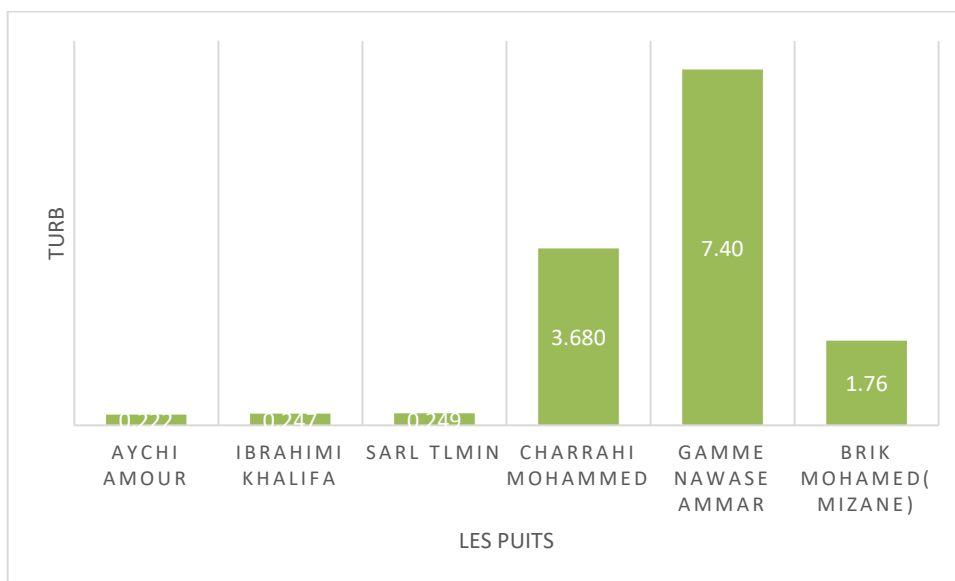


Figure III.13. Histogramme des RS mesurés puits HASSI KHALIFA

III.5.7. Calcium (Ca^{2+}) :

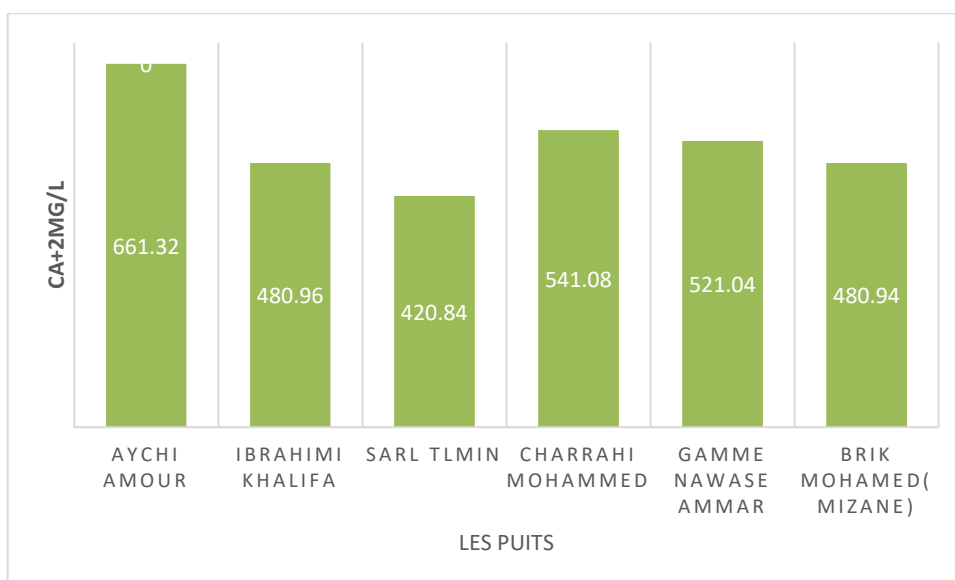


Figure III.14. Histogramme des ca^{+2} mesurés puits HASSI KHALIFA

Les résultats obtenus suite à l'analyse des ions de calcium sont présentés dans les figures on remarque que les eaux de puits de la région HASSI KHALIFA dépassent la norme standard OMS (400 mg/l)

III.5.8. Magnésium (Mg^{2+})

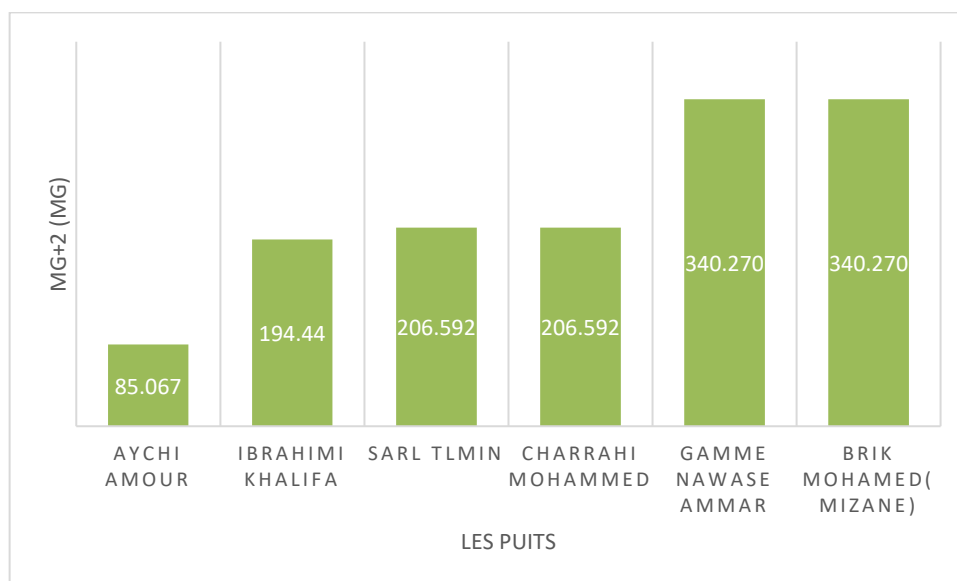


Figure III.15. Histogramme de magnésium des eaux analysées

Les résultats indiqués dans la figure montrent des valeurs variant entre 85.067 et 340.270 mg/l, ces valeurs dépassent la norme OMS des eaux de surface (60-75 mg/l).

III.5.9. Chlorure (Cl^-)

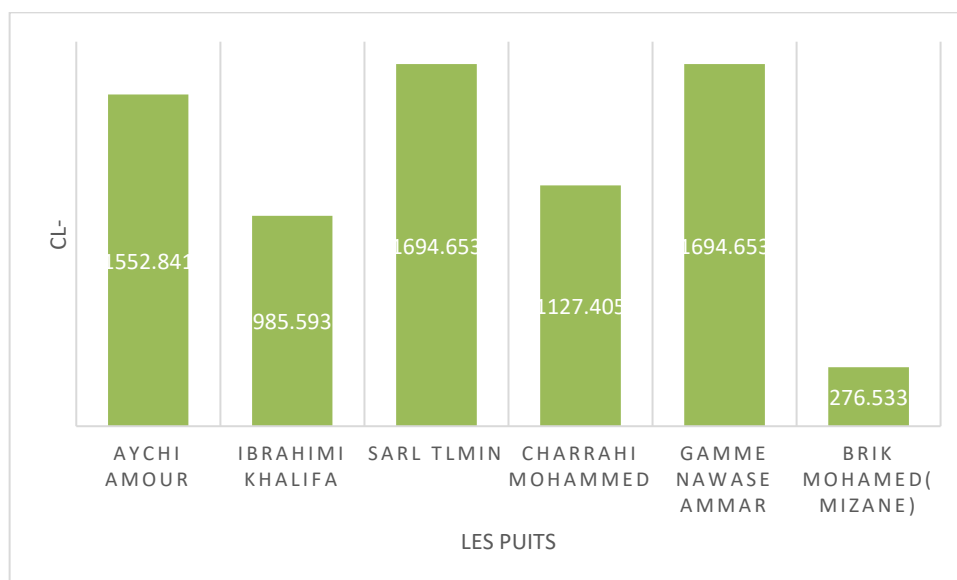


Figure III.16. Histogramme des chlorures des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

pour le puit Brik Mohamed (Mizane) on enregistre de variable 276.533 mg/l pour le prélèvement de puit, concernant le eau de puit Ibrahim Khalifa la concentration enregistrée varie entre 985.593 (mg/l); ces valeurs sont inférieures à la norme OMS à l'exception de ce point de prélèvement (Aychi Amour, SARL TLMIN, Charrahi Mohammed, Gamme Nawase

Ammar), on remarque une augmentation notable dans la concentration en chlorures qui peut être due à la dissolution importante de formation évaporite (halite).

III.5.10. Titre Hydrométrique TH:

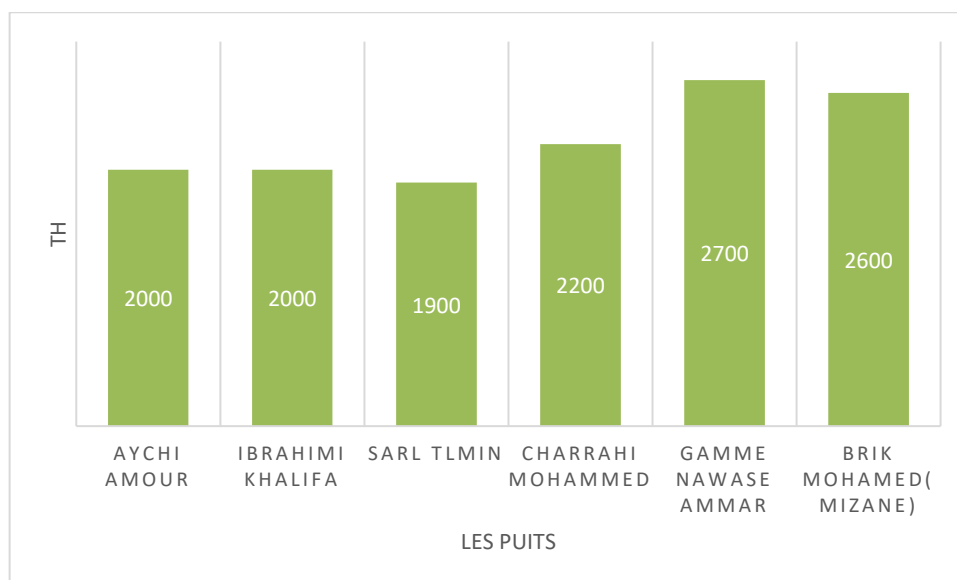


Figure III.17. Histogramme des TH des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

Le TH (Titre Hydrotimétrique) ou la dureté de l'eau indique la teneur globale en sel de calcium et de magnésium exprimée en mg. l⁻¹ de CaCO₃.

Les valeurs de TH fluctuent entre 1900 et 2700 mg. l⁻¹. Ces eaux sont très dures (dépassent 300 mg.L⁻¹). L'ensemble des valeurs enregistrées dépassent les normes de l'OMS de potabilité des eaux (200 ppm soit 199.99 mg.L⁻¹).

III.5.11. Total Dissolved Solids (TDS) :

Les résultats obtenus suite à l'analyse des ions de La concentration globale des substances sont présentés dans la figure on remarque que les eaux de puits de la région HASSI KHALIFA dépassent la norme standard OMS (1000 mg/l)

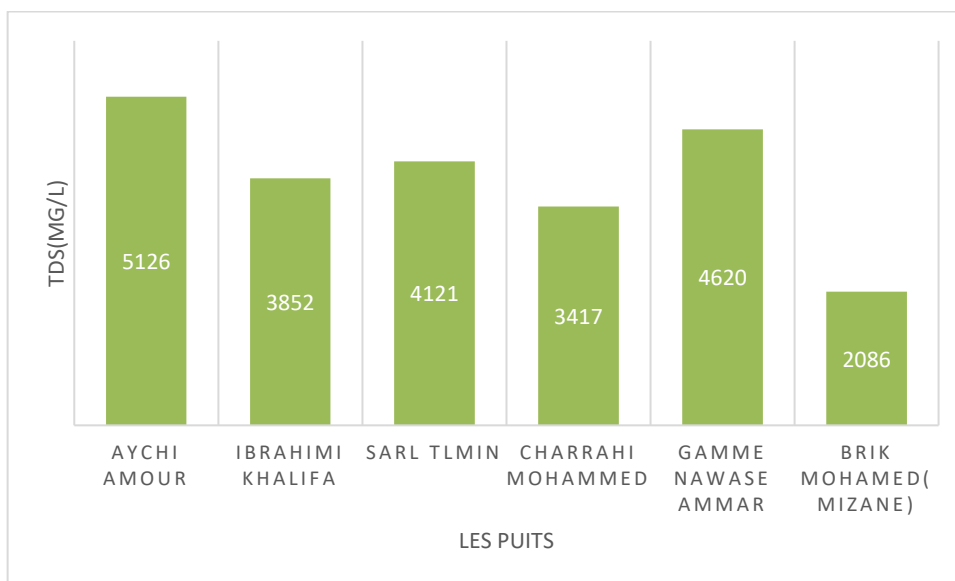


Figure III.18. Histogramme des TDS des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

III.5.12. Bicarbonates (HCO_3) :

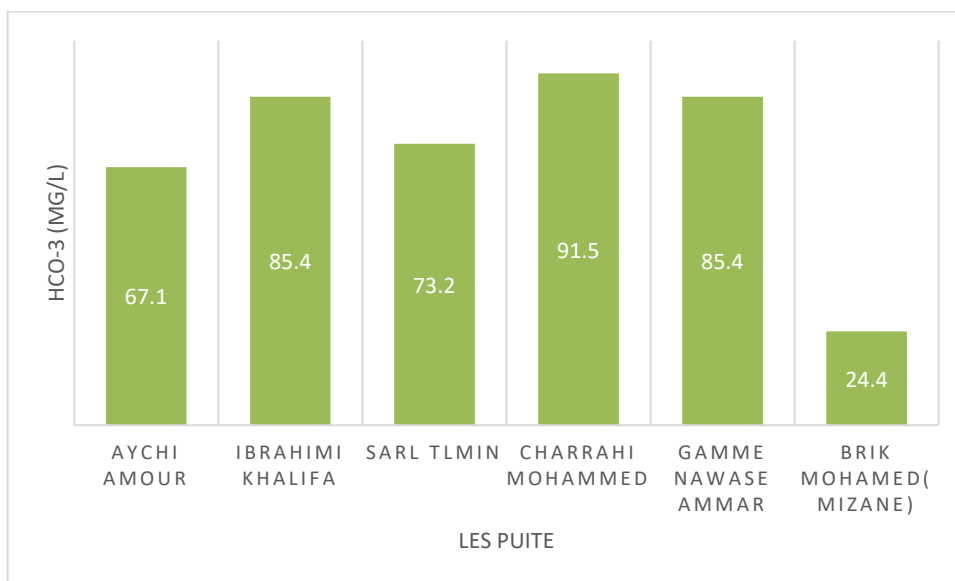


Figure III.19. Histogramme des bicarbonates des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

Les résultats obtenus suite à l'analyse des puits de l'arrivée des bicarbonates dans l'eau sont présentés dans la figure on remarque que les eaux de puits de la région HASSI KHALIFA dépassent pas les normes standard OMS (610mg/l)

III.5.13. Les nitrates (NO_3^-)

Les résultats obtenus suite à l'analyse des puits Le nitrate (NO_3^-) dans l'eau sont présentés dans la figure on remarque que les eaux de puits de la région HASSI KHALIFA dépassent les normes standard OMS (10mg/l)

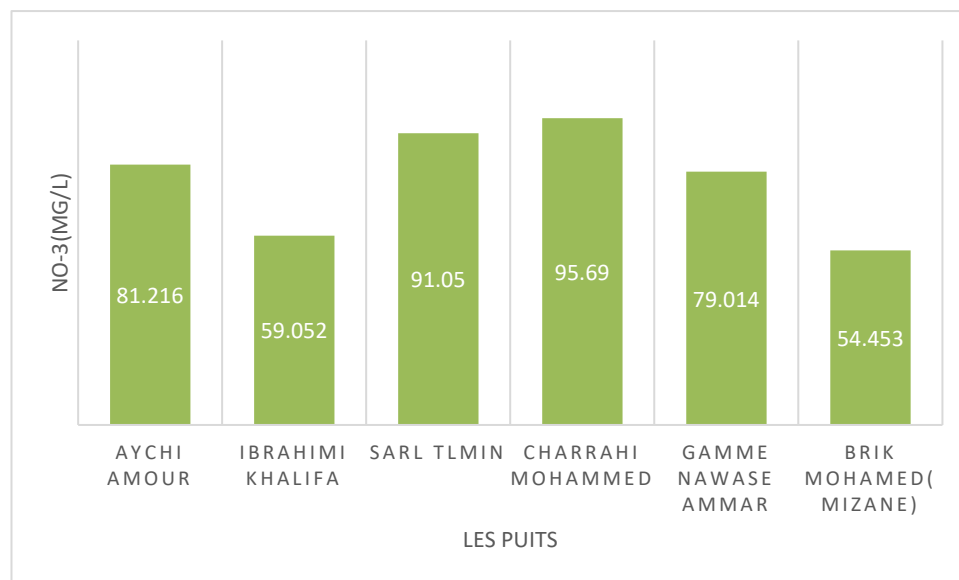


Figure III.20. Histogramme des nitrates d'eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

III.5.14. L'Ammonium (NH_4^+)

Les résultats obtenus suite à l'analyse des puits de L'Ammonium dans l'eau sont présentés dans la figure on remarque que les eaux de puits de la région HASSI KHALIFA ne dépassent pas les normes standard OMS (5mg/l)

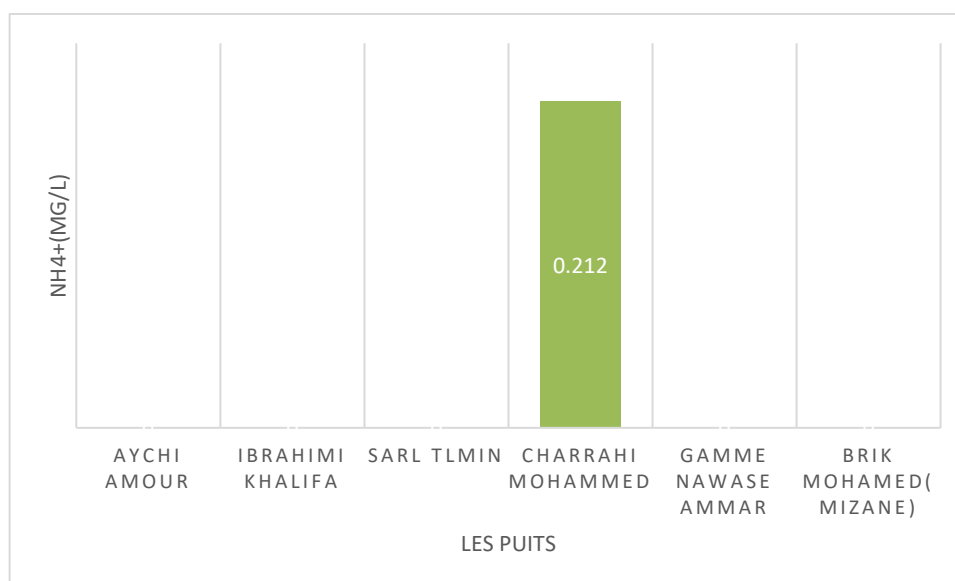


Figure III.21. Histogramme L'Ammonium des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

III.5.15. Phosphate (PO_4)

Les résultats obtenus suite à l'analyse des puits Le Phosphate dans l'eau sont présentés dans la figure on remarque que les eaux de puits de la région HASSI KHALIFA dépassent les normes standard OMS (2 mg/l)

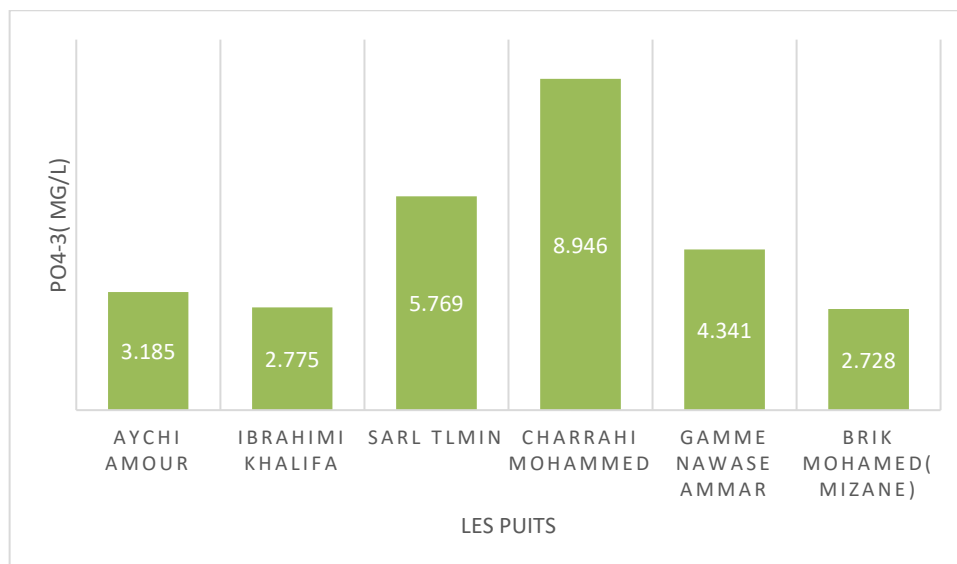


Figure III.22. Histogramme le phosphate des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

III.5.16. Alcalimétrie complet (TAC) :

Les résultats indiqués dans la figure montrent des valeurs variant entre 20 et 75 mg/l, ces valeurs ne dépassent pas les normes OMS des eaux de surface (500 mg/l).

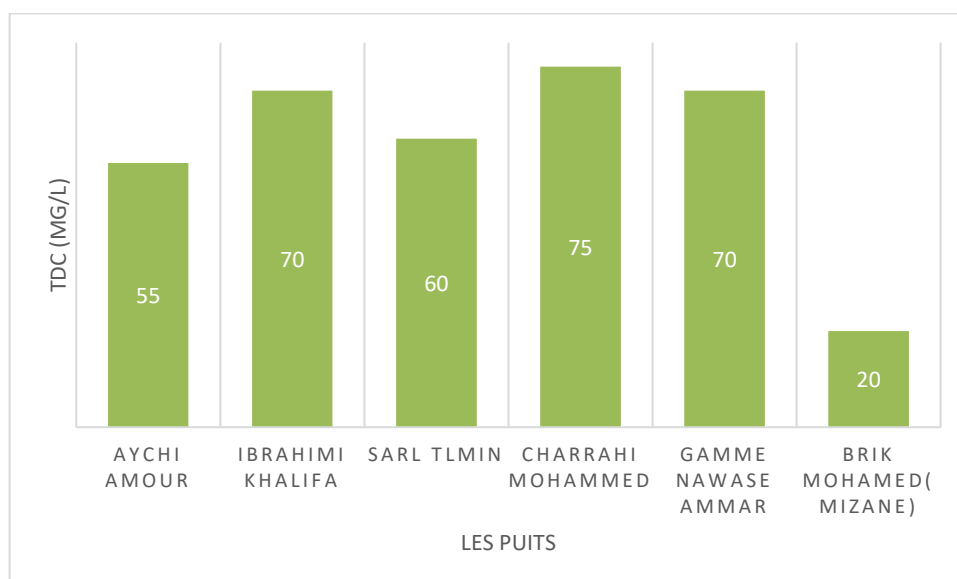


Figure III.23. Histogramme le TAC des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

III.5.17. Les nitrites (NO_2^-) ou azote nitreux

L'azote nitreux représente une forme moins oxygénée et moins stable représentant ainsi la forme du passage entre les nitrates et l'ammonium il s'agit d'une forme toxique les nitrites sont dues à l'effet de l'oxydation de la forme ammonium (Aghzar&al ; 2001).

L'analyse des histogrammes établis dans la Figure pour les échantillons des puits. Donc toutes les valeurs obtenues pour les régions ne dépassent pas la norme OMS (0,1 mg/l). Charrahi Mohammed dépassé les normes

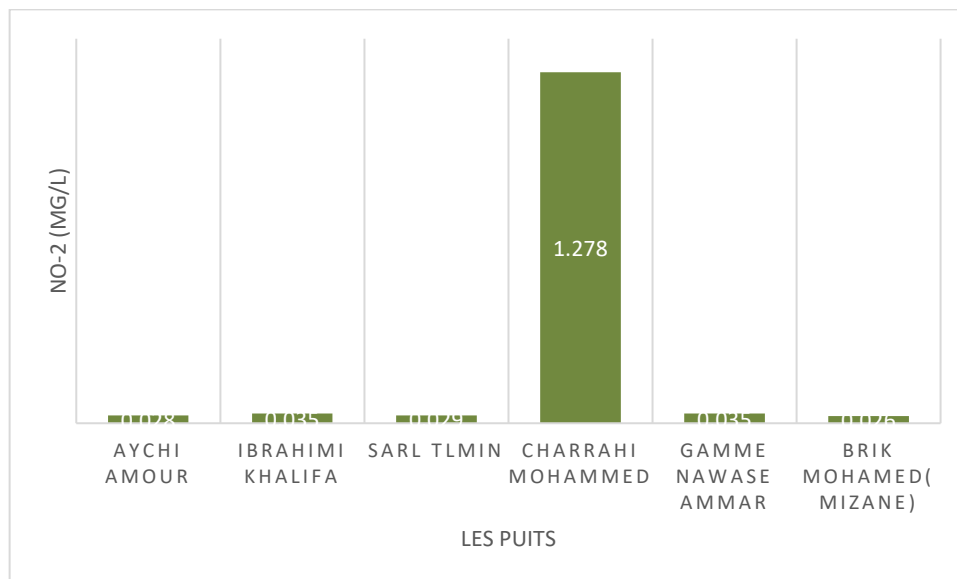


Figure III.24. Histogramme le NO_2^- des eaux analysées de la région HASSI KHALIFA

Conclusion

Nous constatons actuellement un affaissement très important du nappe phréatique en raison d'une part de l'eau prélevée au titre des besoins d'irrigation de plus en plus prégnants, d'autre part si l'exploitation intensives des nappes souterraines profondes (CT et CI), Nous avons montré la vulnérabilité du système hydraulique dans la vallée du Souf et de préserver les ressources en eaux souterraines, d'une gestion équilibrée et d'un recours au système toujours plus menacé des parentées de l'hydraulique des aquifères assurent la pérennité de la nappe phréatique.

Pour ce faire, nous avons étudié les caractéristiques physico-chimiques de l'eau de la nappe phréatique dans la ville de Hassi Khalifa, ramenée grâce à la campagne d'échantillonnage effectuée en 2025, avec des échantillons prélevés dans 6 puits. Les eaux de la nappe présentent une température de 26.9 et 31.5 °C. Les valeurs de pH sont comprises entre 4.9 et 5.55, liées à la variation du niveau piézométrique des eaux souterraines en profondeur, plus bas dans le sud que vers le nord.

Les eaux souterraines affichent une forte dureté, avec des mesures oscillantes entre 1900 et 2700 mg·L⁻¹. Toutes les valeurs mesurées dépassent le critère de l'OMS pour l'eau potable (200 ppm ou 199,99 mg/L¹, selon la méthode d'expression).

La conductivité électrique est un paramètre essentiel dans l'analyse de la salinisation de l'eau et varie considérablement avec des valeurs allant de 3770 à 8938 µS/cm, les valeurs maximales étant relevées au niveau du puits Ayachi Amour. Cette salinité élevée est attribuée aux remontées des eaux souterraines en raison de la surexploitation des nappes profondes (CI et CT) et d'un drainage inapproprié.

Les niveaux de tous les paramètres chimiques valables à savoir : Ca⁺⁺, MG⁺⁺, CL⁻. Les niveaux de TDS et de RS⁻ affichent des valeurs nuisibles, souvent bien au-dessus des niveaux de potabilité de l'eau définis par l'OMS et par les normes algériennes.

Les nitrates (NO⁻³) indiquent la contamination de l'eau, avec des niveaux de concentrations variant de 2.728 à 8.946 mg·L⁻¹ souvent au-delà des normes de qualité de l'eau (2mg/L) surtout dans cet hydrosystème. Ces niveaux peuvent être expliqués par l'extension de l'agriculture avec les grandes fermes pratiquant l'élevage puis l'alimentation de l'eau, sans oublier la pollution de la nappe phréatique.

Le Phosphate (PO⁻⁴) qui est également un indicateur de contamination de l'eau donne des valeurs flottantes variant entre 54.453 et 95.69 mg·L⁻¹ avec des niveaux souvent hors norme pour l'eau (50 mg·L⁻¹).

En effet, afin de progresser dans notre étude, il faudra notamment modification des politiques agricoles pour, des restrictions d'épandage, la couverture végétale des sols, une gestion rigoureuse des effluents, ainsi que sur un suivi et un accompagnement renforcé des agriculteurs. Ces mesures combinées permettent de limiter les pertes vers les nappes phréatiques et d'améliorer la qualité de l'eau

Conclusion générale

Conclusion générale

La ville de Hassi Khalifa, territoire localisé au Sud-est algérien, est caractérisée par un climat hyper aride, caractérisé par des précipitations très irrégulières, par des évapotranspirations bien supérieures aux apports en eau et par une longue période sèche, s'étalant, pour l'essentiel, sur toute l'année. La région a connu une extension des espaces agricoles, surexploitant alors ses ressources en eau (nappe phréatique) tant pour l'irrigation (pour l'agriculture) que pour le besoin en eau potable. Ce mémoire de fin d'études a eu pour objet de montrer en quoi, de quelle manière, l'utilisation, dans la ville de Hassi Khalifa, des eaux d'irrigation modifie les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines utilisées pour la nappe phréatique.

La qualité de l'eau des nappes phréatiques a des effets néfastes sur la dégradation des sols, notamment dans les zones agricoles à irrigation. Les éléments physico-chimiques de l'eau souterraine peuvent s'infiltrer dans le sol au cours de l'irrigation, affectant sa fertilité et fournissant des conditions propices à la salinisation. Cette condition modifie la structure du sol et réduit sa perméabilité et affecte négativement la santé des cultures et la productivité agricole. Une bonne gestion des ressources en eau est donc indispensable pour maintenir la qualité des sols et assurer la durabilité de l'environnement dans les zones arides comme la vallée du Souf. L'agriculture s'est bien développée dans la vallée du Souf, ouvrant d'importantes perspectives économiques et assurant la sécurité alimentaire.

Toutefois, cette expansion rapide a également engendré d'importants enjeux environnementaux, notamment la dégradation des sols. Les méthodes agricoles intensives, à l'instar de l'utilisation exagérée de l'eau d'irrigation chargée de résidus salins, ont entraîné une hausse de la salinisation des terres. Cette accumulation saline en surface a progressivement diminué la fertilité du sol, ce qui a eu un effet néfaste sur les rendements agricoles. La baisse du niveau de la nappe phréatique a exacerbé cette situation en facilitant la remontée du sel vers la surface. En somme, le caractère durable de l'agriculture dans la vallée du Souf repose sur les pratiques d'irrigation employées et la qualité des eaux utilisées pour le faire, ainsi que sur l'éducation des agriculteurs concernant les méthodes durables pour garantir la pérennité des activités agricoles à long terme.

Les propositions d'aménagement

Les propositions d'aménagement

A la lumière des résultats obtenus, nous proposons plusieurs mesures et dispositifs visant à réduire les impacts négatifs de l'accroissement de l'agriculture moderne dans le milieu saharien. Elles ont pour but d'assurer bien sûr une gestion durable tout en préservant les ressources en eau et en sol. La commune de Hassi Khalifa

1- L'aimant du bon usage de l'eau et le choix d'un développement durable des terres sous irrigation nécessitent bien sûr de remettre en bon état le dispositif de suivi du niveau piézométrique de la nappe phréatique.

2- L'eau d'irrigation doit répondre à plusieurs critères, permettant entre autres d'atteindre une végétation en bonne santé et la lutte contre la salinisation potentielle des terres.

3 Il est primordial de respecter des méthodes normalisées pour réaliser des échantillonnages réguliers. Ces méthodes assurent des données fiables et permettent donc d'anticiper une éventuelle dégradation de la qualité de l'eau de la nappe phréatique.

4- Il faut contrôler régulièrement la qualité de l'eau et appliquer des pratiques d'irrigation performantes par exemple l'irrigation au goutte-à-goutte, afin de garantir une irrigation efficace et de réduire les risques de salinisation des terres.

5- L'utilisation d'une filtration pour réduire la salinité de l'eau d'irrigation.

6- Le recours à l'agriculture durable.

7- L'emploi de cultures mieux adaptées au climat hyper-aride.

8- La pratique de la rotation des cultures pour maintenir un bon état du sol, contrôler les maladies et les nuisibles, mieux utiliser les nutriments dans une perspective de durabilité, de manière à développer les productions agricoles à long terme.

9- Évitez l'agriculture de produits très gourmands en eau pour l'irrigation tels que la pastèque, le melon et la mangue.

10- Prise de conscience des agriculteurs des effets nuisibles des pratiques utilisées et engagement pour la sauvegarde des ressources en eau et en sol contre la salinisation, par le biais de l'intensification des actions de sensibilisation et d'éducation agricole.

L'arrosage des vergers avec des eaux usées épurées est une voie à examiner sérieusement. Il serait donc important d'envisager des stratégies afin d'optimiser le recours à cette eau traitée. Les points de distribution appropriés répondant aux besoins d'irrigation des vergers, les actions d'éducation des agriculteurs concernant l'utilisation sûre et profitable de cette ressource doivent être envisagées. Soit, l'eau purifiée pourrait être intégrée dans le stock d'eau d'arrosage, une vraie avancée vers la gestion durable et efficace des ressources.

Références

Références

1. ANRH OUARGLA. (2005), Note relative sur les ressources en eau de la wilaya d'El Oued.
2. ANRH. (2010), Inventaire de Puits de la nappe phréatique de la wilaya el oued Janvier 2010. Direction régionale du Sud Ouargla.
3. Aubert G, (1978). Méthode d'analyse des sols. C.R.D.P., Marseille, p 546.
4. AYERS et WESTCOT, (1985) Water quality for agriculture.
5. AYERS, (1976.) Effect of soil and water salinity on tomato growth.
6. BABA-SY, M. (2005), Recharge et paléo-recharge du système aquifère du Sahara septentrional. Geology doctorate thesis, University of Tunis and Manar, 271.
7. Ballais J-L (2010) , Des oueds mythiques aux rivières artificielles : l'hydrographie du Bas-Sahara Algérien. Physio-Géo - Géographie Physique et Environnement, 2010, volume IV. P107 – 127.
8. BALLAIS J.L. (2009), CHAVE S., DELORME-LAURENT V. et ESPOSITO C. (2009)
9. Hydrogéomorphologie et inondabilité. Géographie physique et Quaternaire, vol. 61, n° 1, 2007, p. 75-84.
10. Ballais, (2005) Les villes sahariennes et les risques naturels. La ville et le désert. Le Bas-Sahara algérien, (chapitre IV), 59-71.
11. BEL, F., & DEMARGNE, F. (1966), Etude géologique du Continental Intercalaire (Geological study of the Continental Intercalaire aquifer).
12. BOUAMMAR, (2000.) Le développement agricole dans les régions sahariennes.
13. CLIMATE DATA. Retrieved from: <https://climate-data.org/>
14. Cornet. (1964), Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn., Vol. VI, France.
15. COTE, M. (1993). Une région saharienne malade de trop d'eau- le Souf. Université de Constantine. p 22.
16. COTE. M. (1998), Des oasis malades de trop d'eau?. Science et changements planétaires/Sécheresse, 9(2), 123-130.
17. COTE. M. (2001), L'agriculture peut-elle résoudre le problème de la remontée de la nappe Côte. (2006), Si le Souf m'était conté, Comment se fait et se défait un paysage : Média Plus. Constantine. p.135 D.S.A, (2005)
18. DHW (2018) , Direction de l'Hydraulique de la Wilaya d'El oued en 2018.

- ECOSOURCES. Retrieved from : <https://www.ecosources.org/solaire/>
19. FAO, (2016). Etat des ressources en sol dans le monde. Résumé technique. P.
 20. FAO. (2021) L'État des ressources en terres et en eau pour l'alimentation et l'agriculture dans le monde: Des systèmes au bord de la rupture
 21. FOA, 1988 ,Evaluation des Terres pour l'Agriculture Pluviale.
 22. Guendouz, Reghis et Moulla. (1992), Qualité chimique et bactériologique des eaux de la nappe phréatique de la région d'Oued-Souf. (Sahara Nord-est Septentrional, Algérie).
 23. HPO-BG (2002). Hydrogéologie. Mission 2. Deuxième campagne de mesures hydrogéologiques. Ministère des ressources en eaux.
 24. HPO-BG. (2002), Vallée du Souf. Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales.
 25. HPO/BG. (2002), Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation. Mesures complémentaires de lutte contre la remontée de la nappe phréatique. Géomorphologie de la vallée du Souf. Influence sur le comportement de la nappe phréatique. Ministère des ressources en eaux. Office National d'Assainissement 'ONA'. Bureau d'Etudes Algérien Hydro Projet Ouest et Bureau d'Etudes Suisse 'Bernard et Gardel' Ingénieur Conseils. Rapport p 10.
 26. [58]G. Wilson. (1971), Wilson, G. 1971: Desert sandflow basins and a model for the development of ergs. The Geographical Journal 137, 180—99.
 27. INSID, 2001 Evaluation de la salinité du sol dans les ghouts d'EL oued. Ministère de l'agriculture. Institut national des sols irrigation et drainage. p 36.
 28. KHADRAOUI, A. (2004), L'excès d'eau dans les zones agricoles et urbaines et leur impact environnemental dans les régions Sahariennes. Revue Echo de l'environnement Algérien. 6p. Khadraoui, sol irrigué p5.
 29. KHADRAOUI. (2010). Sol et hydraulique agricole dans les Oasis algérienne. Caractérisation – contraintes et propositions d'aménagement. OPU. P 311.
 30. KHADRAOUI. (2011). Eau et impact environnemental dans le Sahara algérien. Définition- Evaluation et perspective de développement. OPU. P 204.
 31. KHECHANA, S. (2007), Etude de la gestion intégrée des ressources en eaux dans la vallée de oued-souf (Sud-Est algérien) (Thèse Magister, Annaba).
 32. Khechana. (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). (Doctoral dissertation, Annaba). P 152.
 33. Mainguet (1984) et CH JACQUEMINET. (1984), Le Grand Erg Occidental et le Grand

- Erg Oriental. Classification des dunes, balance sédimentaire et dynamique d'ensemble. In: Travaux de l'Institut Géographique de Reims, n°59-60,. Le vent. Mécanisme d'érosion, de dégradation, de désertification. Notion d'échelle, de budget sédimentaire, de vulnérabilité des paysages. pp. 29-48; doi : <https://doi.org/10.3406/tigr.1984.1151>
https://www.persee.fr/doc/tigr_0048-7163_1984_num_59_1_1151
34. METEOMANZ. Retrieved from : <https://Meteomanz.com/>
35. MESSEKHER, S. H. A. K., CHABOUR, N. A. B. L., et R. MENAN (2012), Remontée de La Nappe Phréatique Du Souf. Conséquences et Solutions Envisagées. Ann. Univ. Buchar. Geogr. Ser, 179-197.
36. Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. Institut national des sols irrigation et drainage. p 36 Ministère de l'agriculture et du développement rural. (2013), Le Drainage en Algérie.18p. Najah A (1970), Ahmed Najah "Le Souf des Oasis.
37. OSS. (2002- 2003) Observation du Sahara et du Sahel (<http://www.oss-online.org/fr>) Paris. , 9 (2). p 123-130.
38. REMINI, B. (2006), La disparition des ghouts dans la region d'el oued (Algérie). LARHYSS Journal P- ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (5).
39. REMINI, B. (2006). La foggara et le ghout (Algérie): quand le forage sonne le déclin. Larhyss Journal, 39, 275-297.
40. Winttling, (2022) ,Pierre Ruelle .Guide pratique de l'irrigation. p 119, p 158, p 159.
41. ZINE, B. (2014), La remontée des eaux souterraines en surface: mécanisme et l'impact sur l'environnement (cas de Oued Souf). Mémoire Magister, Univ. Batna. p 145.
42. REMINI, B. (2006), La disparition des ghouts dans la region d'el oued (Algérie). LARHYSS Journal P- ISSN 1112-3680/E-ISSN 2521-9782, (5).
43. SAYAD L. (2015):le pouvoir autoepurateur de l'oued seybose sur les rejets de la laiterie de l'edough (Annaba Algérie) et les objectifs environnementaux des rejets. thèse de doctorat univ.de Annaba p 145

Annexes

Annexes

Annexe 01:

Tableau : Données Climatiques de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 1991 et 2021

	Jan vier	Fév rier	M rs	Av ril	M ai	Ju in	Juil let	Ao ut	Septe mbre	Octo bre	Nove mbre	Déce mbre
Température Moyenne (°C)	9.9	11.8	16 .4	21	25 .7	30 .2	33. 3	32. 7	28.6	23.1	15.5	10.8
Température Minima le Moyenn e (°C)	4.9	6.2	10	14. 2	18 .6	22 .7	25. 8	25. 6	22.4	17.3	10.4	6.2
Température Maxima le (°C)	15.5	17.6	22 .6	27. 4	32 .2	36 .9	40. 1	39. 1	34.5	28.8	21	16.1
Précipitation (mm)	13	4	8	8	3	1	0	1	6	5	8	8
Humidité (%)	61	47	39	32	28	25	23	26	36	43	53	63

(Source : www.climate-data.org)

• Annexe 02 :

Tableau : Données Climatiques de la région d'El Oued enregistrées à la station de Guemar entre 1991 et 2021

	Jan vier	Fév rier	M rs	Av ril	M ai	Ju in	Juil let	Ao ut	Septe mbre	Octo bre	Nove mbre	Déce mbre
Température Moyenne (°C)	9.9	11.8	16 .4	21	25 .7	30 .2	33. 3	32. 7	28.6	23.1	15.5	10.8
Température Minima le Moyenne (°C)	4.9	6.2	10	14. 2	18 .6	22 .7	25. 8	25. 6	22.4	17.3	10.4	6.2

Annexes

Température Maximale (°C)	15.5	17.6	22.6	27.4	32.2	36.9	40.1	39.1	34.5	28.8	21	16.1
Précipitation (mm)	13	4	8	8	3	1	0	1	6	5	8	8
Humidité (%)	61	47	39	32	28	25	23	26	36	43	53	63

(Source : www.climate-data.org)

• Annexe 03 :

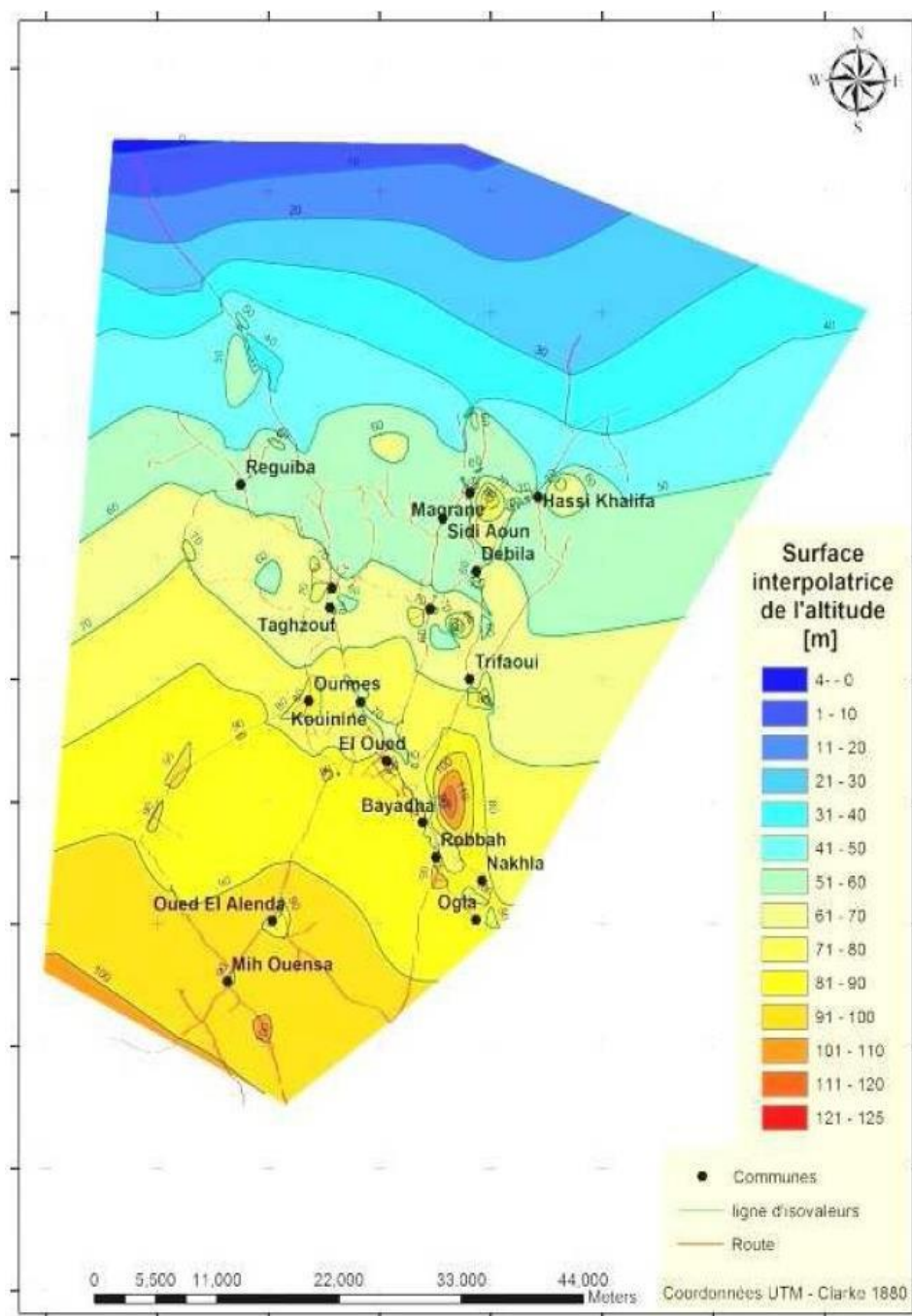


Figure I.1: Le forage F1 représenté dans une région d'Oued Souf
(Source : DUAC 2024)

Annexe 04 :

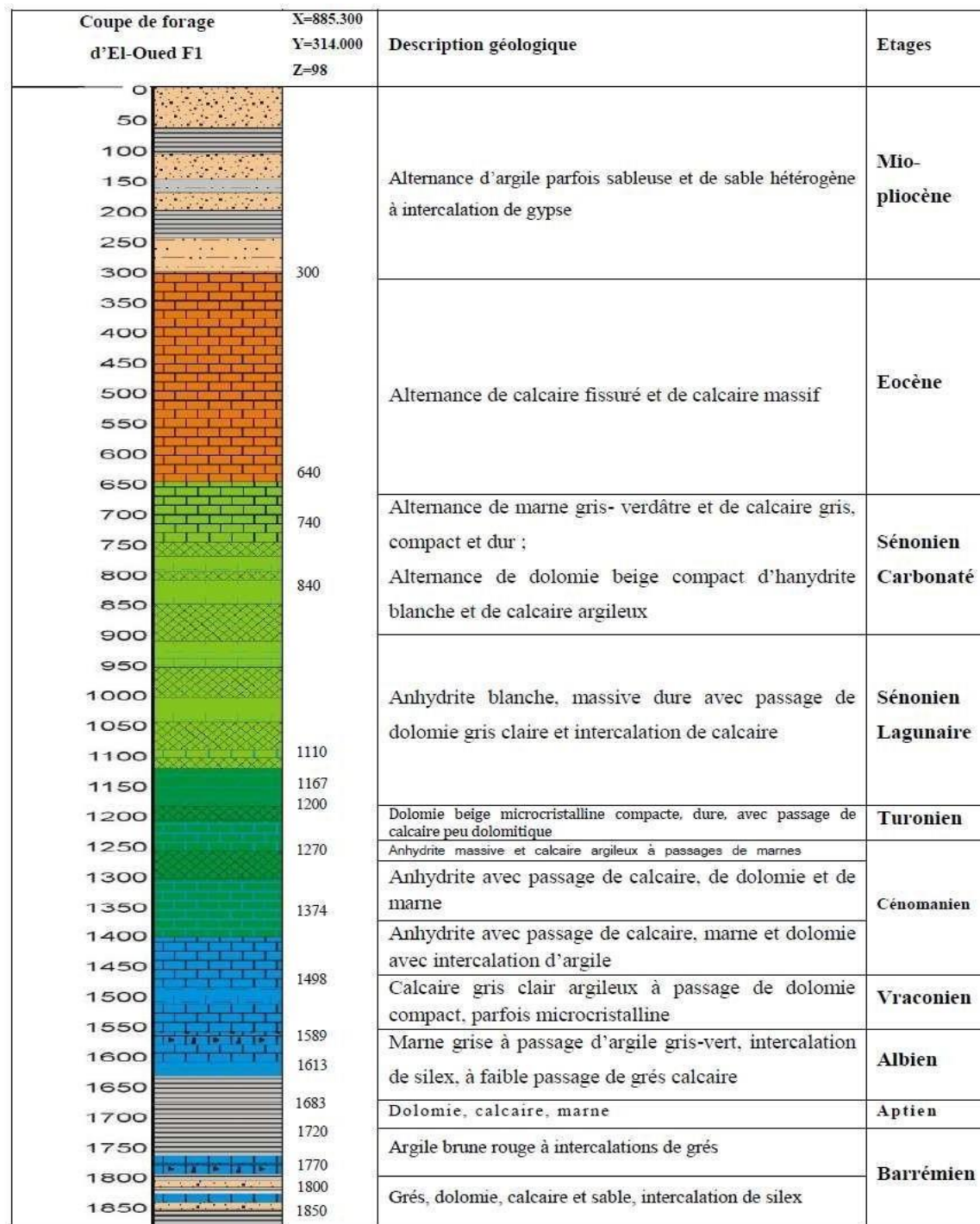


Figure I.2: Log de forage F1 à l'Albien

(Source : coupe d'après ANRH 1993).

Annexe 05:

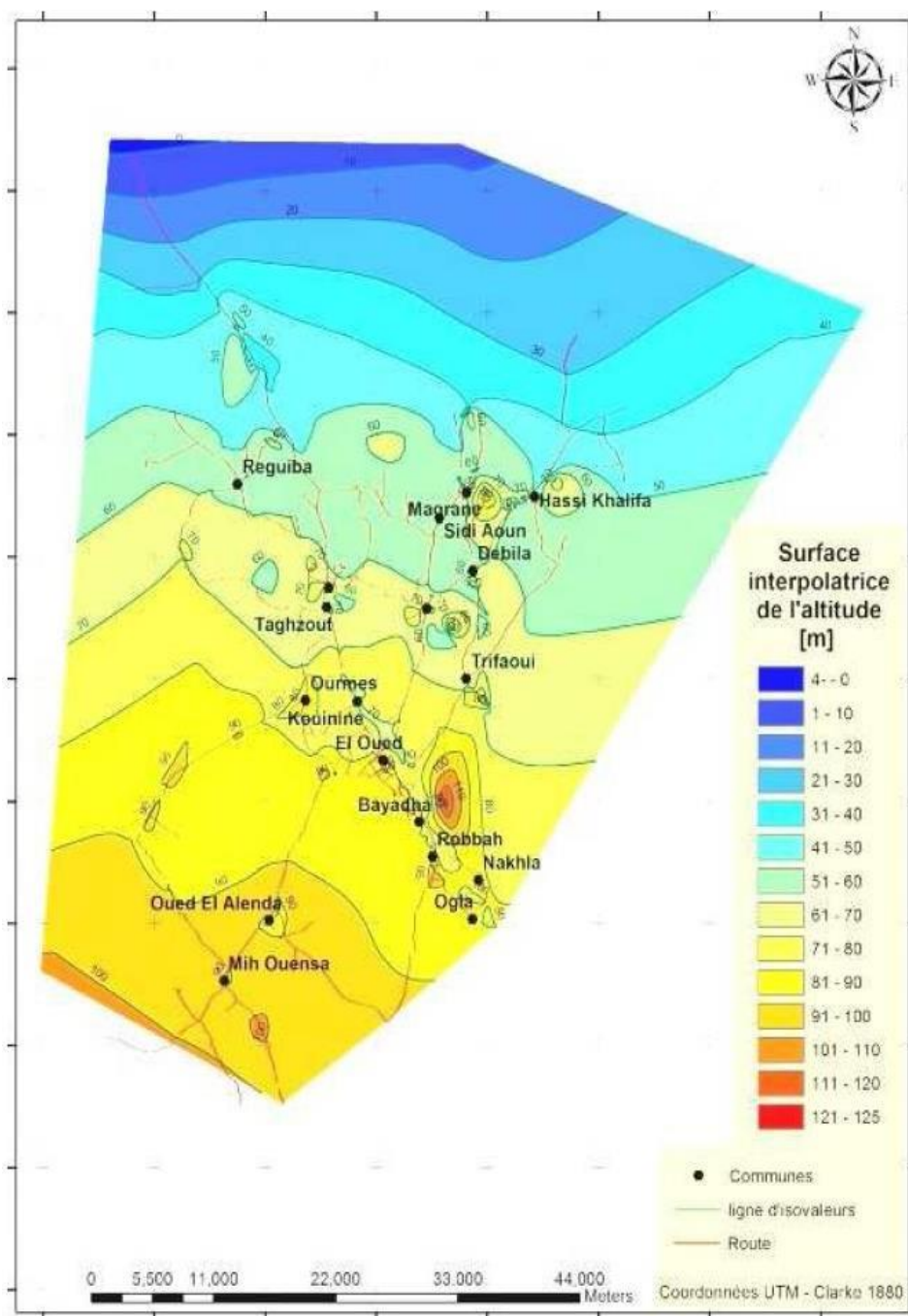


Figure I.3: Le forage F1 représenté dans une région d'Oued Souf
(Source : DUAC 2024)

Annexe 07:*Tableau 1.1 les normes de qualités de l'eau d'irrigation (Directive de l'OMS 2002).*

Paramétré de l'eau	Symbole	Unité	Valeurs indicatives
Conductivité électrique	CE	dS/m	3
Calcium	Ca ²⁺	mg/l	400
Magnésium	Mg ²⁺	mg/l	60-75
Carbonates	CO ₃ ⁻	mg/l	3
Bicarbonates	HCO ₃ ⁻	mg/l	610
Chlore	Cl ⁻	mg/l	1065
Sulfate	SO ₄ ⁻	mg/l	960
Nitrate	NO ₃ ⁻	mg/l	10
Ammonium	NH ₄ ⁺	mg/l	5
Phosphate	PO ₄ ⁻	mg/l	2
Potentiel hydrogéné	pH		6-8,5
Température	T	°C	35

Tableau 1.2 Barème de qualité pour les eaux d'irrigation proposée par la FAO.

Type de problèmes	Guide pour la qualité de l'eau		
	Pas de problèmes	Problèmes croissants	Problèmes graves
Conductivité (ms/cm)	<0,75	0.75-3.0	>3
Alcalinité ou dureté	80-120	/	>120
pH (risque de colmatage)	<7	7-8	>8
Chlore Cl			
Irrigation de surface	<4	4-10	>10
Irrigation par aspiration	<3	>3	
azote	<5	5-30	>30
Bicarbonate HCO ₃ ⁻	<1,5	1,5-8,5	>8,5

