



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Hamma Lakhdar — El Oued Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Hydraulique

Option : Conception et Diagnostic des Systèmes d'AEP et d'Assainissement

THÈME:

Évaluation de la dynamique de la nappe phréatique de la commune d'El Oued à partir
des images Sentinel-1

Réalisé par:

SEROUTI Bachir

Membres du jury :

Président :	Dr. KHACHANA SALIM	MCA	Université d'El-Oued
Examineur :	Dr. ZAIZE ISSAME	MCA	Université d'El-Oued
Superviseur :	Dr. MEGA Nabil	MCA	Université d'El-Oued
co Superviseur:	Pr. KHECHANA Salim	MCA	Université d'El-Oued

Année Universitaire : 2025 / 2026



DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à :

**Mes chers parents, qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours et qui m'ont appris
la valeur du travail et de la
persévérance.**

**Mes frères et sœurs, pour leur encouragement et leur présence
dans les moments difficiles.**

**Mes amis et camarades de promotion, pour les moments de
partage et d'entraide.**

**Tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à
l'accomplissement de ce travail.**

SEROUTI Bachir



REMERCIEMENTS

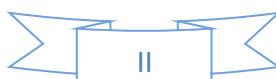
Au terme de ce travail, il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude envers toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je tiens, tout d'abord, à remercier vivement mon encadrant, Monsieur Dr. MEGA Nabil, et à notre co-encadreur Pr. KHECHANA Salim pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son soutien constant et la confiance qu'il m'a accordée tout au long de la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail et de me faire bénéficier de leurs remarques constructives.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble du corps enseignant de l'Université Hamma Lakhdar d'El Oued, en particulier les enseignants du département d'Hydraulique et de Génie Civil, pour la qualité de la formation dispensée.

Enfin, mes remerciements les plus sincères vont à ma famille et à tous mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements indéfectibles.



RÉSUMÉ

Ce mémoire propose une évaluation de la dynamique spatio- temporelle de la nappe phréatique de la commune d'El Oued à partir des images radar du satellite Sentinel-1 (bande C, polarisation VV). Une relation empirique linéaire ($NS = a \cdot VV + b$) a été calibrée sur 159 puits piézométriques pour la période 2016–2022, en utilisant des composites médians annuels filtrés (filtre médian à 50 m). La régression linéaire par pixel a permis de cartographier la tendance temporelle du niveau statique (dNS/dt en m/an).

Les résultats révèlent des coefficients de détermination (R^2) satisfaisants, variant de 0,766 à 0,917, avec des erreurs RMSE comprises entre 1,98 et 2,12 m. L'analyse temporelle confirme la tendance généralisée à la remontée de la nappe phréatique sur l'ensemble de la commune.

Mots-clés : Nappe phréatique, El Oued, Sentinel-1, télédétection radar, niveau statique, modèle empirique, Google Earth Engine.

ملخص

تقترح هذه الأطروحة تقييمًا للديناميكيات المكانية والزمانية لمنسوب المياه الجوفية في الوادي باستخدام صور الرادار من القمر الصناعي Sentinel-1 (النطاق C، الاستقطاب VV). وتمت معايرة علاقة خطية تجريبية ($NS = a \cdot VV + b$) على 159 بئرًا بيزومتريًا للفترة 2016–2022، باستخدام متوسطات سنوية مُفلترة (مرشح الوسيط عند 50 مترًا). واستُخدم الانحدار الخطي لكل بكسل لرسم خريطة الاتجاه الزمني لمستوى المياه الساكن (dNS/dt بالمتر/السنة). أظهرت النتائج معاملات تحديد مُرضية (R^2)، تتراوح بين 0.766 و 0.917، مع أخطاء جذر متوسط مربعات خطأ (RMSE) تتراوح بين 1.98 و 2.12 مترًا. ويؤكد التحليل الزمني الاتجاه العام لارتفاع مستويات المياه الجوفية في جميع أنحاء البلدية.

الكلمات المفتاحية: المياه الجوفية، الوادي، سينتينل-1، الاستشعار عن بُعد بالرادار، المستوى الثابت، النموذج التجريبي، محرك جوجل إيرث.

ABSTRACT

This thesis proposes an evaluation of the spatio-temporal dynamics of the El Oued water table using Sentinel-1 radar satellite imagery (C- band, VV polarization). An empirical linear relationship ($WL = a \cdot VV + b$) was calibrated on 159 piezometric wells for the 2016–2022 period using filtered annual median composites (50 m median filter). Pixel-by-pixel linear regression was used to map the temporal trend of the water level (dWL/dt in m/year).

Results show R^2 values ranging from 0.766 to 0.917 and RMSE between 1.98 and 2.12 m, confirming the generalized rising trend of the water table across the municipality.

Keywords: Water table, El Oued, Sentinel-1, radar remote sensing, static level, empirical model, Google Earth Engine.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACES.....	I
REMERCIEMENTS	II
RÉSUMÉ	III
ABSTRACT	IV
TABLE DES MATIÈRES.....	V
LISTE DES FIGURES	VII
LISTE DES PHOTOS	VIII
LISTE DES CARTES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	VIII
Introduction Générale	1
CHAPITRE I Présentation générale de la zone d'étude.....	3
I.1.Introduction.....	4
I.2. Historique et situation géographique.....	4
I.3. Relief et topographie.....	5
I.4. Géologie régionale et stratigraphie	8
I.5. Hydroclimatologie de la zone d'étude.....	15
I.6. Conclusion.....	18
CHAPITRE II Répercussions du phénomène de remontée des eaux sur la ville d'El Oued et solutions proposées.....	20
Introduction	21
Section 1 : Répercussions du phénomène dans la ville d'El Oued.....	21
1. Répercussions du phénomène sur la population	21
2. Répercussions du phénomène sur l'urbanisme et le logement	21
3. Répercussions du phénomène sur le réseau routier.....	23
4.Répercussions sur les réseaux d'eau potable et d'assainissement	24
5 .Répercussions sur la santé et l'environnement	24

6. Répercussions sur l'agriculture et autres domaines	25
Section 2 : Mesures prises pour limiter le phénomène	25
1. Mesures préventives (réduction des causes du phénomène)	26
2. Mesures curatives	27
Conclusion	31
CHAPITRE III Méthodologie de l'étude.....	32
III.1. Introduction	33
III.2. Données Sentinel-1.....	33
III.3.Organigramme méthodologique	33
III.4.Relation Niveau Statique – Rétrodiffusion VV.....	34
III.5.Prétraitement des images Sentinel-1.....	35
III.6.Application pixel par pixel.....	35
III.7.Analyse de la tendance temporelle.....	35
III.8.Conclusion.....	36
CHAPITRE IV Résultats et discussions.....	37
IV.1. Introduction.....	38
IV.2. Images VV Sentinel-1	38
IV.3.Modèles NS–VV et performances.....	39
IV.4. Corrélation globale(2022–2016)	40
IV.5.Discussion.....	46
IV.6.Conclusion.....	47
Conclusion générale et perspectives.....	47
Perspectives	48
Références bibliographiques.....	49

LISTE DES FIGURES

Figure N° 01 : Situation géographique de la zone d'étude	05
Figure N° 02 : Carte topographique de la région du Souf	07
Figure N° 03 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gouskov)	10
Figure N° 04 : Log de forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993)	12
Figure N° 05 : Coupe géologique N° 01 (Drouiche 2008)	13
Figure N° 06 : Coupe géologique N° 02 — Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)	14
Figure N° 07 : Coupe géologique N° 03 (Drouiche 2008)	15
Figure N° 08 : Étage bioclimatique d'Oued Souf	18
Figure N° 09 : Effets de la remontée des eaux sur les Ghouts (Ghoutinondé)	25
Figure N° 10 : Modèle de station d'épuration (modèle STEP3) — Source : Direction des Ressources en Eau, wilaya d'El Oued	30
Figure N° 11 : Organigramme méthodologique de l'étude	36
Figure N° 12 Composite médian annuel VV Sentinel-1 — 2018	40
Figure N° 13 : Composite médian annuel VV Sentinel-1 — 2018	41
Figure N° 14 : Evolution du modèle de régression NS–VV (2016 - 2022)	42
Figure N° 15 : : Images VV de la commune d'El Oued (2015 - 2024)	42
Figure N° 16 : Surfaces NS estimées pour les années : 2016, 2018, 2021 et 2022	43
Figure N° 17 : Images VV de la commune d'El Oued (2015 - 2024)	43
Figure N° 18 : Surfaces NS estimées pour les années 2016, 2018, 2021 et 2022	46

LISTE DES PHOTOS

Photo N° 01 : Remontée des eaux dans les zones urbaines — Source : Étude de terrain, mai 2022	22
Photo N° 02 : Quartiers touchés par la remontée des eaux dans les agglomérations urbaines de la commune d'El Oued (fin 2020) — Source : Direction de l'Urbanisme et de la Construction, wilaya d'El Oued, mai 2022	23
Photo N° 03 : Mélanger l'eau potable avec les eaux usées.....	24
Photo N°04 : Réseau d'assainissement et exutoire de Chott El-Holofa — Source : Élaboration de l'étudiant avec Google Earth	31

LISTE DES CARTES

Carte N° 01 : Projet de ceinture verte de la wilaya d'El Oued 2002 — Source : Abdaoui Djihan Rim, référence citée, p. 16	28
Carte N° 02 : Plan de drainage vertical.....	32

LISTE DES TABLEAUX

Tableau N° 01 : Coordonnées géographiques de la station météorologique de la région d'El Oued	16
Tableau N° 02 : Données climatologiques mensuelles de la région d'El Oued.....	17
Tableau N° 03 : Croissance démographique de la ville d'El Oued de 1966 à 2016.....	21
Tableau N° 04 : Bâtiments et logements endommagés par la remontée des eaux (recensement 2016).....	22
Tableau N° 05 : Recensement des routes endommagées par la remontée des eaux (recensement 2011).....	24
Tableau N° 06 : Recensement des palmiers endommagés et des pertes financières dans la ville d'El Oued	26
Tableau N° 07 : Paramètres de régression du modèle NS–VV par année (2016–2022).....	41

Introduction Générale

L'eau souterraine constitue une ressource vitale pour les populations des régions arides, où elle représente souvent la seule alternative disponible pour satisfaire les besoins en eau potable, agricole et industriel. Dans ces contextes, la gestion durable des aquifères est un impératif face aux pressions croissantes exercées par la démographie galopante, l'agriculture intensive et les changements climatiques.

La région d'El Oued, surnommée « La ville aux mille coupes », est marquée par la présence d'un système aquifère complexe dont la nappe phréatique peu profonde manifeste, depuis plusieurs décennies, une remontée progressive alarmante. Ce phénomène, aggravé par les pratiques d'irrigation non raisonnées et les insuffisances des réseaux de drainage et d'assainissement, engendre des conséquences désastreuses sur les Ghouts, les infrastructures urbaines et la qualité de vie des populations.

Face à l'ampleur de ce défi, les méthodes conventionnelles de surveillance piézométrique se révèlent insuffisantes pour assurer un suivi spatial continu. La télédétection spatiale radar, grâce à sa couverture systématique et à sa disponibilité temporelle élevée, offre des perspectives prometteuses pour compléter les réseaux de mesures in situ.

Le satellite Sentinel-1, développé dans le cadre du programme Copernicus de l'ESA, fournit des données SAR en bande C à haute résolution. L'exploitation du signal de rétrodiffusion radar (polarisation VV) par une approche de modélisation empirique permet d'estimer indirectement le niveau statique de la nappe phréatique, calibrée sur des données piézométriques de terrain.

C'est dans ce contexte que s'inscrit ce mémoire, dont l'objectif est d'évaluer la dynamique spatio-temporelle de la nappe phréatique de la commune d'El Oued à partir des images Sentinel-1 sur la période 2016– 2022.

Le travail est structuré en quatre chapitres:

- Le premier chapitre présente la zone d'étude : géographie, climatologie, géologie et hydrogéologie.
- Le deuxième chapitre expose le phénomène de remontée des eaux : historique, causes et impacts.
- Le troisième chapitre décrit la méthodologie : données Sentinel-1, relation NS–VV et traitement sur la plateforme Google Earth Engine (GEE).
- Le quatrième chapitre présente les résultats des modèles de régression et la corrélation globale.

Une conclusion générale synthétise les apports de l'étude et propose des perspectives.

CHAPITRE I

Présentation générale de la zone d'étude

I.1. Introduction

Le « SOUF » vient du nom berbère désignant rivière ou OUED. La région du SOUF se trouve dans la partie du grand Erg Oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'origine continental et d'âge quaternaire. Ces dunes sont déposées longitudinalement portant la dénomination du (SEIF) dépassant parfois 60 mètres de hauteur.

La wilaya d'El Oued est une région aride, fait partie du Sahara Septentrional partagé par la Tunisie, la Libye et l'Algérie. Elle est située au Sud-Est du Sahara Algérien.

La wilaya est répartie en trois zones bien distinguées qui sont les suivantes:

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

Dans cette partie, nous mettrons en évidence la localisation géographique et les principales activités de la population dans la région d'EL OUED, en exposant les paramètres climatiques importants et les différentes couches de formation géologique. Nous vous présentons les trois types d'aquifères : la nappe phréatique, le complexe terminal et le continental intercalaire dans la région d'Oued Souf.

I.2. Historique et situation géographique

Le Souf, nom berbère de rivière, synonyme de (Oued). À l'origine, des habitants d'El Oued vivent de la culture, de la terre, chacun avait sa palmeraie et son potager réalisé à l'issue d'une somme d'efforts considérables.

La forme de la culture consistait à creuser des cuvettes pour planter à proximité de la nappe phréatique, cette situation a fait que l'agglomération soit implantée à travers des entonnoirs ou cratères rendant tout aménagement planimétrique du terrain difficile, et les aménagements plus coûteux (O.N.R.G.M., 1999).

Situation géographique

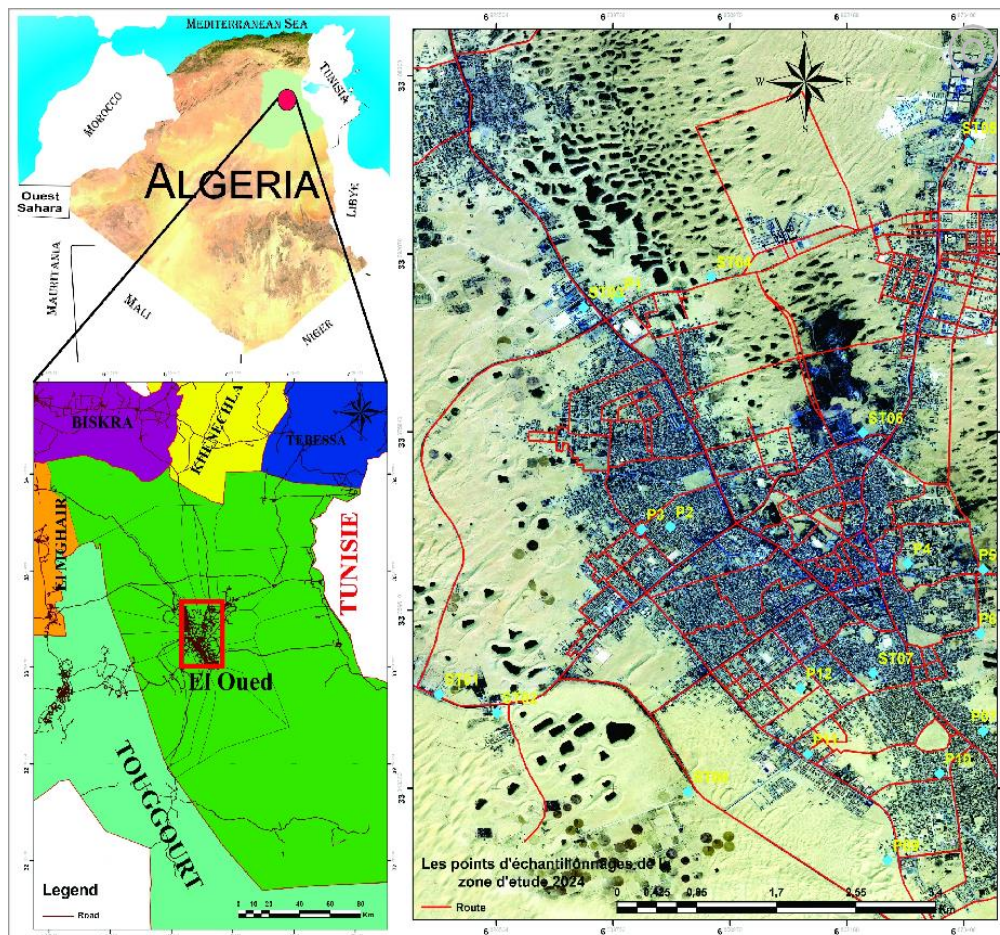
El Oued est située dans le Sahara algérien, c'est une Wilaya depuis 1984 et couvre une superficie totale de 37751.20 km², la population est de 660175 habitants (DPSB 2021), se trouve à environ 700 km au Sud-Est d'Alger (Fig.01) et 350 km à l'Ouest de Gabes (Tunisie). Elle est limitée:

- Au nord par les wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa
- À l'est par la Tunisie
- À l'ouest par les wilayas El-Méghaier et Tougourt
- Au sud par la Wilaya d'Ouargla.

L'aire d'étude représente la vallée du Souf, par 7° E et 33°5 N. La vallée de Souf n'est pas un bassin versant mais une unité de ressource en eau qui est délimitée:

- Au sud par la mer de dunes du grand erg oriental.
- À l'est par une série de chotts.
- À l'ouest par l'Oued Righ et par la ligne de palmeraie qui court de Biskra à Touggourt.

La zone d'étude située au nord de la vallée d'Oued Souf, commune de El Oued.



FigureN°01:Situation géographique de la zone d'étude

Aperçu sur la wilaya d'El Oued

La wilaya d'El Oued occupe une superficie de 44586 km², divisée en 30 communes avec une population de 900000 habitants et une densité de 19.58 hab/km² (DBSP fin 2019). Cette population est répartie à travers 30 communes regroupées dans 12 daïras.

I.3. Relief et topographie

Relief d'El Oued

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

- Une région sableuse ayant un double aspect : l'Erg et le Sahara à l'Ouest.
- Une forme de plateau rocheux qui se prolonge vers le Sud avec une alternance de dunes et de crêtes rocheuses.

- Une zone de dépression caractérisée par la présence d'une multitude de Chotts qui se prolongent vers l'Est.

Topographie de la région

Situation topographique

La région d'Oued Souf, appelée aussi région du Bas-Sahara à cause de la faible altitude, est située au Sud-Est du pays. Le point le plus haut se trouve à la cote 125 m à la commune de Bayadha (Soualah), (Fig.02) alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29 m à la commune de Réguiba (Foulia).

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

Pente de terrain

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

L'altitude moyenne de la région est de 61 m et décrit une diminution du Sud vers le Nord pour être de 25 m au-dessous du niveau de la mer dans la zone des Chotts (ANRH, 2016).

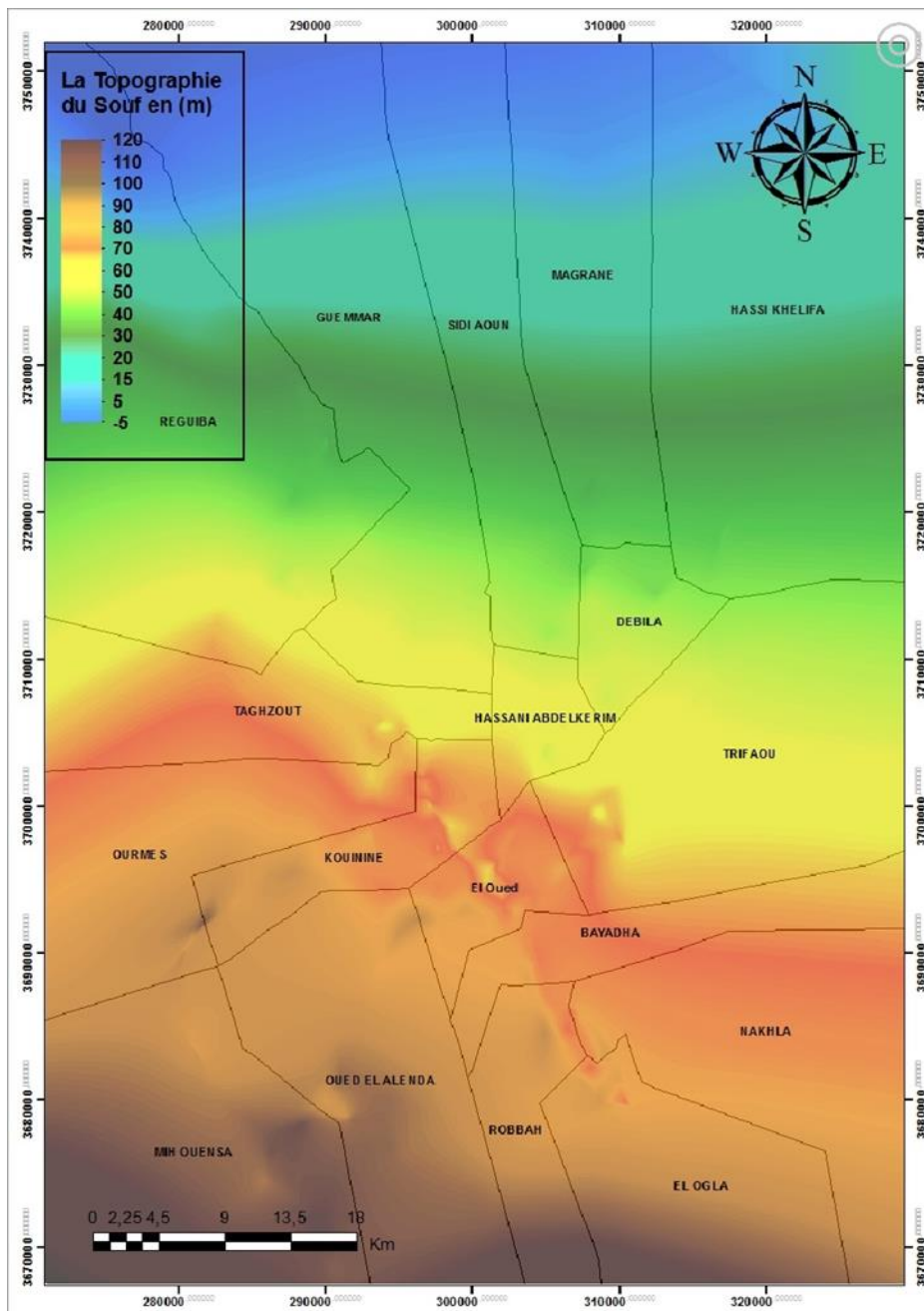


Figure N°02 : Carte topographique de la région de Souf

I.4.Géologie régionale et stratigraphie

Le Sahara a subi au cours des temps géologiques plusieurs périodes de stabilité et d'instabilité qui ont conduit à la structure actuelle. Les principaux traits de la structure géologique et la reconstitution paléogéographique du Sahara sont:

- Le socle précambrien.
- Les Tassilis.
- Les mers primaires et les plissements hercyniens.
- Le continental intercalaire.

Ce régime continental dure jusqu'au milieu de la période crétacée : soit entre 175 et 100 million d'années. Le développement des grès a été particulièrement abondant de l'Hauterivien à l'Albien et à ce dernier étage surtout.

L'importance provient de la perméabilité et de l'extension de ses grès qui renferment actuellement la plus grande ressource aquifère du Sahara, constituant l'un des plus importants bassins artésiens du monde.

- La dernière invasion marine (Transgression Cénomaniennne).
- La phase continentale tertiaire et actuelle.

Stratigraphie régionale

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

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

Formation de l'ère Secondaire

Le Barrémien:

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

L'Aptien:

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

L'Albien:

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo

carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres ; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres.

Le Vraconien:

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

Le Cénomanién:

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

Cet étage joue le rôle d'un écran imperméable. La limite inférieure de cet étage est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui le distinguent nettement. La limite supérieure est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspondant à la base du Turonien.

Le Turonien:

Cet étage représente la base du complexe terminal. Il est généralement carbonaté et constitué par des calcaires dolomitiques et des dolomies microcristallines compactes avec des intercalations de calcaires et parfois de marnes. Les forages de la région montrent clairement que son épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 m (Bensaddik / Aouadi, 2014).

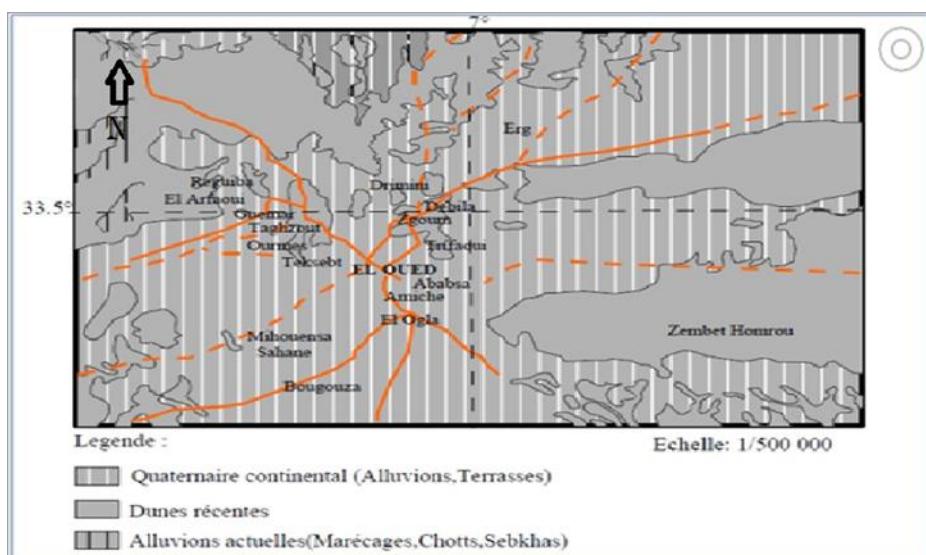


Figure N°03 : Carte géologique locale (d'après la carte dressée par Gouskov)

Sénonien:

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

Sénonien lagunaire:

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

Sénonien carbonaté:

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

Formation de l'ère Tertiaire

L'Éocène:

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

Le Mio-Pliocène:

Ce dernier repose en discordance indifféremment sur le primaire, d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomanien et l'Éocène d'autre part. Il appartient à l'ensemble appelé communément complexe terminal (CT).

La plupart des coupes de sondages captant cet horizon montre que le Mio-Pliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo-argileux avec des intercalations gypseuses, marneuses et des passages de grès. Sur toute l'étendue du Sahara oriental, Bel et De Marne séparent cet horizon en quatre niveaux:

- a. NIVEAU ARGILEUX : Il présente une faible épaisseur, son existence n'affecte que la partie centrale du Sahara oriental.
- b. NIVEAU GRÉSO-SABLEUX : C'est le plus puissant par rapport aux autres, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara. C'est en fait à ce niveau que se trouve le principal horizon aquifère, appelé aussi complexe terminal (CT).
- c. NIVEAU ARGILO-SABLEUX : Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique ; ses limites demeurent toujours confondues.
- d. NIVEAU SABLEUX : Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du complexe terminal. Donc du point de vue hydrogéologique les deux niveaux sableux (b et d) présentent un grand intérêt. Ils correspondent à la nappe des sables du complexe terminal.

Formations du Quaternaire:

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

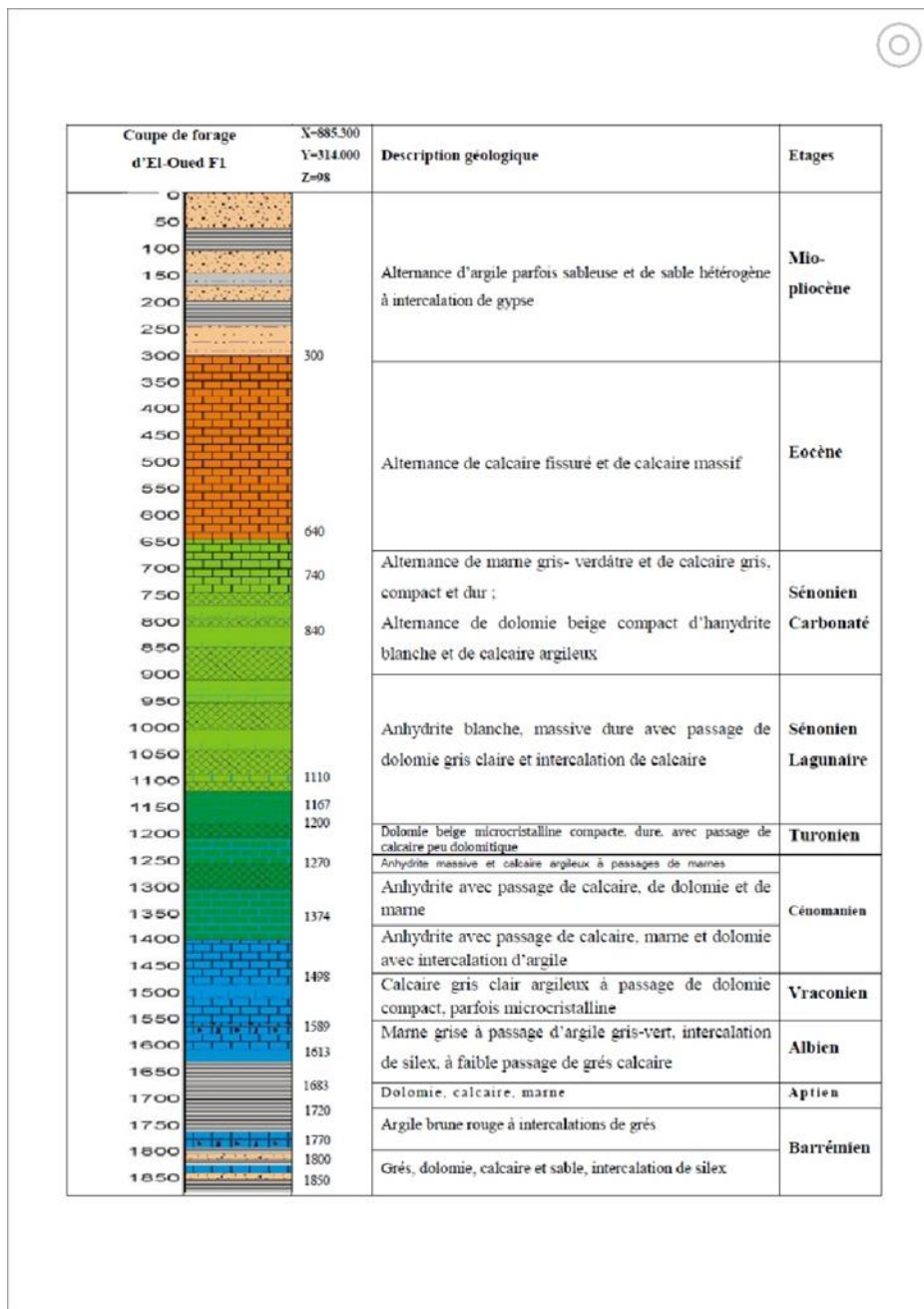


Figure N°04: Log de forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH, 1993)

Interprétation des coupes géologiques

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

Coupe N°1:

Cette coupe orientée Nord-Sud, faite sous la base de coupes de forages, on remarque que l'épaisseur de la formation miopliocène (constituée par des argiles sableuses, de sable et de calcaire) diminue du Nord vers le Sud.

Au niveau du H11.104, on remarque l'absence des formations quaternaires correspondant aux formations sableuses ; ce manque ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne, ces formations tendent à s'épaissir vers le Sud (voir H12.32 et H12.23). (Fig N°05). (BENSEDIK AOUADI 2014).

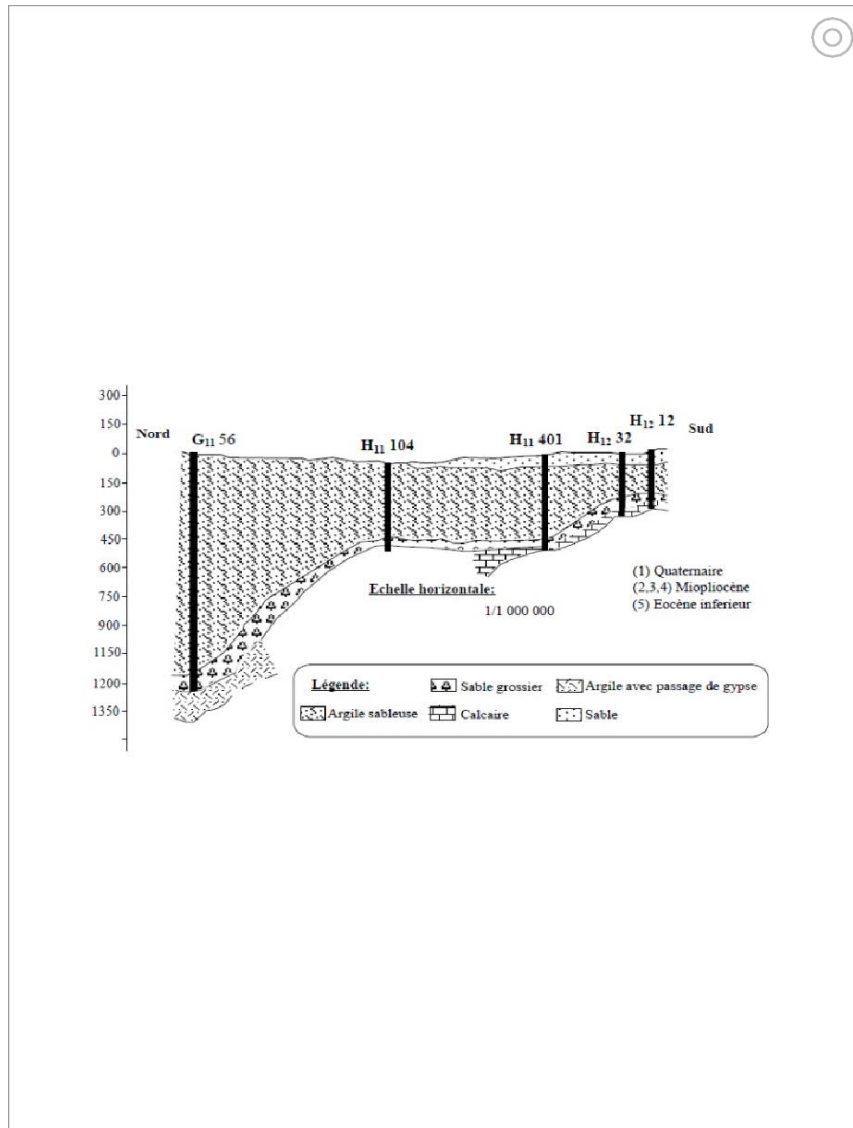


Figure N°05 : Coupe géologique N° 01 (DROUCHE 2008)

Coupe corrélatrice extraite à partir des logs lithologiques des forages.

Coupe N°2:

La coupe N° 2 orientée NE-SW, en allant de la région dite Merzaga vers Ouermès, on remarque au niveau du forage (H12-52), l'absence du Quaternaire, ceci ne peut être expliqué que par l'effet d'une érosion éolienne.

Les formations miopliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable (plus de 200 m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région, au contraire de celle du Quaternaire qui est constituée par des sables qui changent d'une région à l'autre (par exemple, au niveau du forage H12-540 l'épaisseur présente presque la moitié de celle de H12-84) (Fig N°06). (MIMOUNE / ZOUBEIDI 2014).

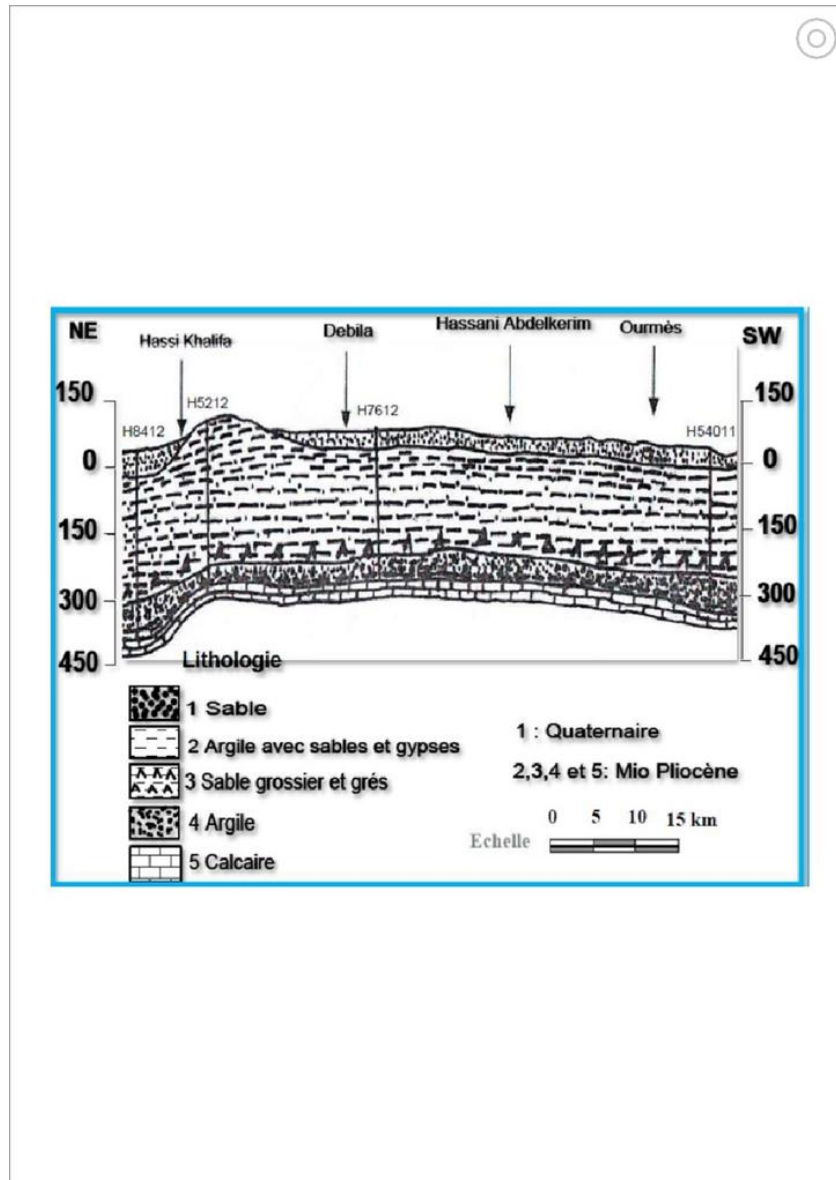


Figure N°06 : Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)

Coupe N°03:

La coupe N° 3 est orientée du Nord-Ouest vers le Sud-Est, elle est différente des autres surtout du point de vue stratification ; cette dernière entre croisée, ce qui donne naissance à des « biseautages ». Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages.

On constate que l'épaisseur des formations quaternaires est plus importante au Nord-Ouest qu'au Sud-Est (Fig N°07). (MIMOUNE/ZOUBEIDI 2014).

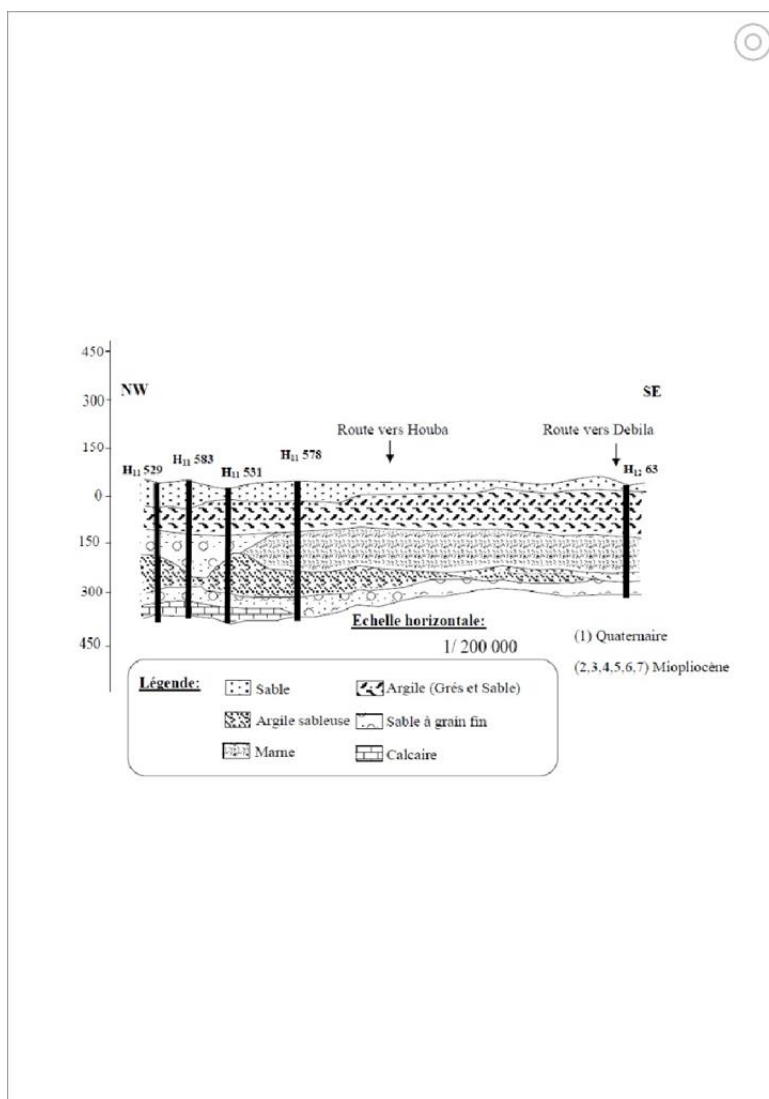


Figure N°07 : Coupe géologique N° 03 (DROUCHE 2008)

I.5. Hydroclimatologie de la zone d'étude

La connaissance des caractéristiques hydroclimatologiques est nécessaire pour l'étude hydrogéologique, elle est indispensable pour évaluer l'alimentation du réservoir souterrain par infiltration, et pour l'établissement du bilan hydrique.

Dans ce chapitre, nous allons travailler avec une série de données climatiques enregistrées sur une période de 2022 ; fournies par l'Office National de Météorologie (ONM) à Guemar au Nord de la ville d'Oued Souf.

Tableau N°01 : Coordonnées géographiques de la station météorologique de la région d'El Oued

Station	Code A.N.R.H	Altitude (m)	Longitude	Latitude
El Oued	130430	77	6°52'32"E	33°20'20"N

Les Précipitations

Les précipitations sont rares mais il peut quand même pleuvoir en particulier entre les mois de novembre et février. Cela reste une pluie fine et modérée même si une pluie torrentielle demeure possible (comme en avril 1947 ou en mai 1967 où des précipitations importantes ont provoqué de fortes inondations).

Les Températures

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

Les Vents

Les vents sont fréquents, les plus violents se situent au printemps. La direction dominante est Nord-Est, à l'exception des mois d'hiver dont la direction est Sud-Ouest. Le sirocco (Chihili) présente le vent caractérisant la saison d'été, souffle fréquemment dans la région, prenant un sens Sud-Nord et jetant des courants d'air chaud parfois accompagnés de vagues de sables.

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

Dans la wilaya d'El Oued la vitesse du vent moyenne varie entre 15,27 km/h enregistrée durant le mois de décembre et 17,73 m/s pour le mois d'avril. La vitesse du vent moyenne annuelle est de 17,05 m/s.

L'Évaporation potentielle (ETP)

L'évaporation est très importante, la moyenne annuelle est de 1883.34 mm. Le maximum est atteint en période de juin et juillet. Les minima sont enregistrés durant le mois de décembre (47.46 mm)

L'Humidité de l'air

Elle est très faible. La moyenne annuelle est de 48.30 %. Elle varie sensiblement en fonction des saisons. En effet, pendant l'été, elle chute jusqu'à 31.80 % au mois de juillet sous l'action d'une forte évaporation et des vents chauds ; alors qu'en hiver elle s'élève à 67.90 % durant le mois de décembre

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

Les mois humides sont : Janvier, Février, Octobre, Novembre, Décembre. Les mois secs caractérisent le reste de l'année

Tableau N°02 : Données climatologiques mensuelles de la région d'El 2016/2022

Oued

Paramètre	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Sep	Oct	Nov	Déc
T.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
T.min.moy.(°C)	4,9	6,2	10	14,2	18,6	22,7	25,8	25,6	22,4	17,3	10,4	6,2
T.max. (°C)	15,5	17,6	22,6	27,4	32,2	36,9	40,1	39,1	34,5	28,8	21	16,1
Précip.(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%
Joursdepluie	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Heuressoleil(h)	8,8	9,6	10,5	11,5	12,4	12,9	12,7	12	11,1	10,1	9,2	8,6

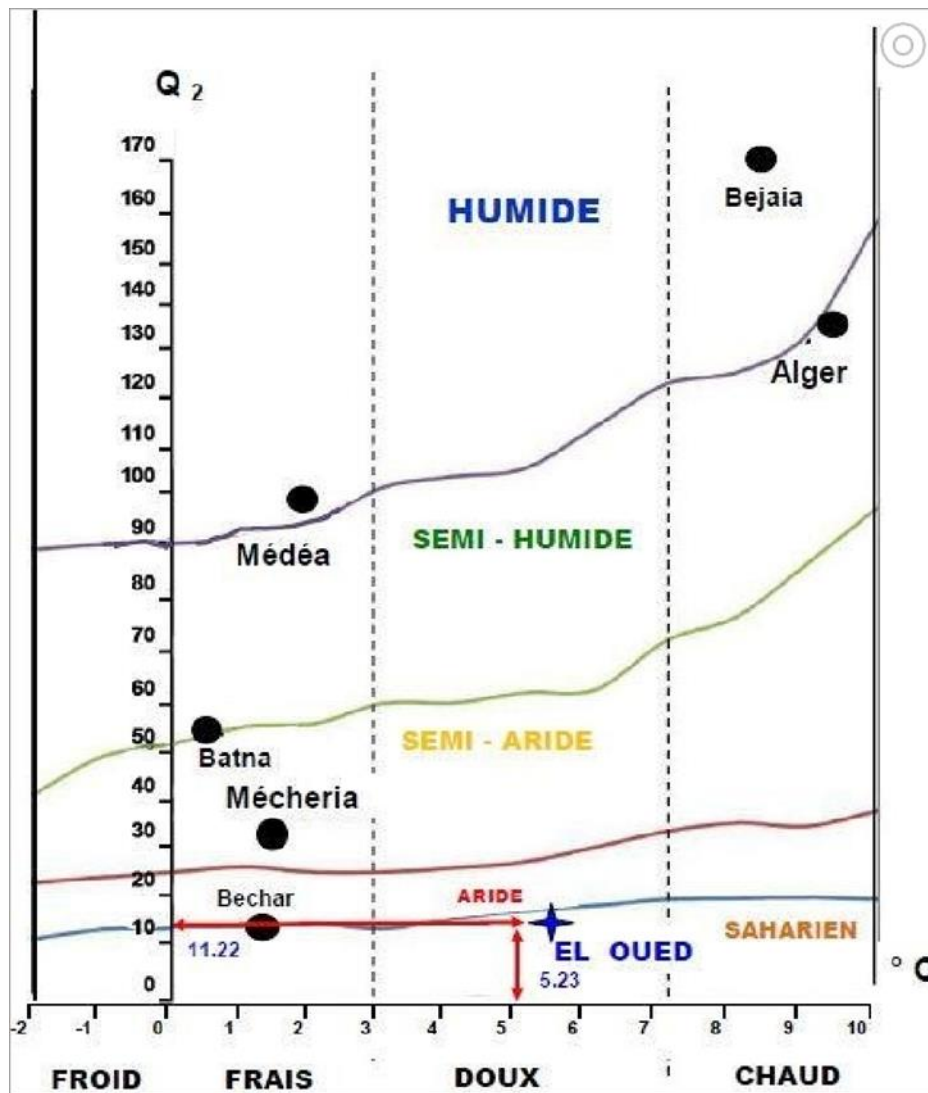


Figure N°08 : Étage bioclimatique d'Oued Souf

I.6. Conclusion

Le relief d'El Oued est caractérisé par l'existence de trois principales formes : une région sableuse, une forme de plateau rocheux et une zone de dépression. Du point de vue topographique, l'altitude diminue du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est pour atteindre des valeurs négatives au niveau des chotts.

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

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

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

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

CHAPITRE II

Répercussions du phénomène de remontée des eaux sur la ville d'El Oued et solutions proposées

Introduction

Le phénomène de remontée des eaux souterraines vers la surface est l'un des problèmes contemporains qui a touché la région du Souf et certaines autres régions sahariennes, ayant un impact négatif considérable sur la plupart des aspects de la vie, notamment environnemental, économique et urbain.

Dans la ville d'El Oued, ses conséquences ont été plus importantes et plus sévères, car la remontée des eaux ne s'est pas limitée aux zones agricoles et aux Ghouts, mais a dépassé cela pour atteindre la surface dans les zones urbaines, comme les quartiers Sidi Mastur, El-Nzla, Sidi Abdullah et Taxbest. Cela a rendu la situation alarmante, d'autant plus que le phénomène ne s'est pas limité à une ou deux années, mais a duré de nombreuses années depuis sa première apparition dans les années 80 du siècle dernier jusqu'à nos jours.

Quelles sont donc les répercussions de ce phénomène dans la ville d'El Oued, et quelles sont les mesures prises par l'État pour éliminer définitivement ce phénomène et réduire ses répercussions négatives?

Section 1 : Répercussions du phénomène dans la ville d'El Oued

La ville d'El Oued est la plus grande ville touchée par le phénomène de remontée des eaux, ce qui l'a affectée dans de nombreux aspects de la vie urbaine, environnementale et autres.

1. Répercussions du phénomène sur la population

Le phénomène de remontée des eaux a eu de grandes répercussions sur la population de la ville d'El Oued, notamment un faible taux de croissance démographique. Ce taux avait atteint environ 60% dans les années précédentes, mais dans les dernières années, il est tombé à environ 2,16%. Cela est principalement dû au manque de sentiment de sécurité de la population dans la région, ainsi qu'au manque de migration interne en provenance des communes voisines, la migration étant devenue inverse, c'est-à-dire de la commune vers les communes voisines.

Tableau N°03 : Croissance démographique de la ville d'El Oued de 1966 à 2016

Population 1966	Populatio n1987	Croissanc e	Populatio n1998	Croissanc e	Population 2016	Taux %
02252	21652	2862	115244	2451	112113	2 451

2. Répercussions du phénomène sur l'urbanisme et le logement

Certains quartiers de la ville d'El Oued ont connu une grande saturation en eau dans la couche superficielle, ce qui l'a fait affleurer en surface. Ce phénomène ne s'est pas limité aux zones basses et aux Ghouts, mais a atteint les bâtiments et l'habitat urbain, notamment les quartiers Sidi Mastur, Taksebt et Nazla, accélérant leur dégradation, particulièrement pour les

logements anciens construits avec des matériaux locaux (plâtre) qui sont fortement affectés par l'humidité. Cela a également déformé l'aspect général de la ville et contraint les habitants à quitter leurs maisons pour s'installer dans les banlieues et les zones les plus élevées.



Photos N°01 : Remontée des eaux dans les zones urbaines (Source : Étude de terrain, mai 2022).

Tableau N°04 : Bâtiments et logements endommagés par la remontée des eaux (recensement 2022)

Quartierslesplustouchés	Totalbâtiments	Bâtimentssains	Bâtimentshumidité	Bâtimentstotalementendomm.
Sidi Mastur	2615	1423	721	471
Nazla	2205	2420	452	126
Taksebt	2444	2421	211	162

(Source: Entretien avec l'agent chargé du recensement, commune d'El Oued, mai 2022).

Les répercussions urbaines les plus importantes se manifestent dans les points suivants:

- Érosion des fondations des bâtiments due à l'humidité, créant un risque d'effondrement.
- Déformation de l'aspect esthétique de la ville.
- Ruptures dans le tissu urbain.
- Baisse de la valeur immobilière et abandon de nombreux logements.

- Formation d'un obstacle à l'expansion de la ville, notamment par rapport aux Ghouts inondés.



Photo N°02 : Quartiers touchés par la remontée des eaux dans les agglomérations urbaines de la commune d'El Oued (fin 2020) — Source : Direction de l'Urbanisme et de la Construction, wilaya d'El Oued, mai 2022

3. Répercussions du phénomène sur le réseau routier

Certaines routes à l'intérieur de la ville ont connu une grande dégradation, notamment dans les zones urbaines où la remontée des eaux est importante. Cela est dû à leur inondation par les eaux, qui ont provoqué de nombreuses fissures, en plus de la saturation de la couche de gypse sous la chaussée, créant un risque pour les usagers.

Tableau N°05 : Recensement des routes endommagées par la remontée des eaux (recensement 2011)

État	Route nationale	Route de wilaya	Routes communales	Routes urbaines
Avec humidité	33km	32km	31km	22km
Inondées	33km	33km	32km	31km

(Source: Direction de l'Urbanisme et de la Construction, wilaya d'El Oued)

4. Répercussions sur les réseaux d'eau potable et d'assainissement

La montée des eaux a affecté les réseaux d'eau potable et d'assainissement, notamment compte tenu du vieillissement de certains réseaux qui connaissent des fuites, les mélangeant avec les eaux montantes souvent chargées de divers polluants, ce qui a augmenté les risques de maladies hydriques. Des maladies inconnues dans la région sont apparues. Les réseaux d'assainissement connaissent également des obstructions, notamment dans les regards d'inspection inondés par les eaux montantes, ce qui entraîne l'accumulation des déchets et des débris, provoquant leur colmatage.



Photos N°03: Mélanger l'eau potable avec les eaux usées

5. Répercussions sur la santé et l'environnement

Parmi les problèmes les plus dangereux auxquels l'homme est confronté figurent les problèmes environnementaux, qui affectent essentiellement sa santé et sa vie. La remontée des eaux souterraines vers la surface est l'une des principales causes ayant entraîné la dégradation de la situation sanitaire générale dans la ville d'El Oued. Les Ghouts inondés par les eaux ont formé des mares et des marécages, en faisant un terrain fertile pour la prolifération des insectes et l'accumulation des déchets. Ce qui a aggravé le problème est l'utilisation par les habitants de ces Ghouts comme décharges ménagères, contribuant à l'accumulation des déchets, à la prolifération des insectes et des mauvaises odeurs, et à la dégradation de la situation sanitaire .

6. Répercussions sur l'agriculture et autres domaines

La remontée des eaux a eu de grandes répercussions dans le domaine agricole. Sa montée a inondé la plupart des Ghouts de la ville, affectant la richesse en palmiers dattiers et causant d'importantes pertes financières aux agriculteurs. Elle a également contraint de nombreux acteurs du secteur agricole au chômage. Elle a eu un impact négatif sur la région, les Ghouts étant le symbole de la région et un facteur d'attraction touristique.



Figure N°09 : Effets de la remontée des eaux sur les Ghouts (Ghout inondé)

Tableau N°06 : Recensement des palmiers endommagés et des pertes financières dans la ville d'El Oued

Commune	Nbtot al palmie rs	Nbpalmiers endomm.	% endomm.	Pertesestim ées(DA)
ElOued	56764	52674	63	80890000

(Source : Direction des Services Agricoles, 2011)

Section 2 : Mesures prises pour limiter le phénomène

Depuis le début du phénomène de remontée des eaux dans la région, les autorités concernées ont tiré la sonnette d'alarme, d'autant plus qu'il est en augmentation constante et s'aggrave chaque année. Elles ont pris un ensemble de mesures et de solutions pour l'éliminer définitivement et atténuer ses répercussions négatives. Ces mesures se sont divisées en deux types essentiels : le premier concerne les causes (mesures préventives) pour ne pas augmenter

la recharge superficielle, et le second pour réduire le volume des eaux de la couche phréatique (mesures curatives) et donc l'éliminer définitivement.

1. Mesures préventives (réduction des causes du phénomène)

Les mesures préventives constituent la première étape dans tout traitement d'un problème, car elles contribuent à le réduire. Notre étude précédente du problème de remontée des eaux montre que le principal facteur du phénomène est la grande recharge du smat superficiel. La première mesure pour éliminer le phénomène consiste donc à réduire au maximum l'alimentation de la couche superficielle en eau.

1-1 . Réduction de l'alimentation de la couche superficielle en eau

Il s'agit notamment des eaux provenant des couches profondes à fort débit. Les mesures prises comprennent:

- Gel de la réalisation de nouveaux forages dans la couche profonde, se contentant des puits existants, depuis 1996.
- Travail de lutte contre les fuites : environ 2 214 fuites ont été recensées en 1991 dans la wilaya, avec réhabilitation des réseaux et contrôle périodique.
- Réduction des heures d'alimentation des logements en eau potable, et installation de compteurs pour rationaliser la consommation .

1-2 . Exploitation des eaux de la couche superficielle

L'une des mesures les plus importantes prises pour limiter la remontée des eaux est la réduction du volume des eaux de la couche phréatique. Cela passe par l'exploitation de ces eaux après leur extraction, notamment dans le domaine agricole (elles sont utilisées pour les arbres et les palmiers uniquement). Cette opération présente deux avantages : le premier consiste à se contenter des puits existants sans avoir recours à de nouveaux forages, et le second à réduire le volume des eaux de la couche superficielle afin d'atteindre un équilibre entre l'exploitation et l'évacuation.

- Utilisation des eaux pour irriguer les espaces verts dans les zones urbaines via la réalisation de 57 puits en 1997.
- Exploitation des eaux montantes dans le domaine agricole pour irriguer les espaces verts : en 1991, 21 hectares bénéficiant de l'irrigation par les eaux de la couche superficielle ont été créés.
- Exploitation des eaux des Ghouts inondés pour irriguer les zones agricoles voisines.

1-3 . Projet de ceinture verte

La ceinture verte est une bande entourant les communes de la région du Souf, comprenant neuf communes sur une longueur de 300 km, soit l'équivalent de 150 hectares, de Guémar en passant par Taghzout, Kouinine, bifurquant à El Oued vers l'est jusqu'aux communes de Hassani Abdelkrim — El-Trifaoui, et vers l'ouest jusqu'à El-Bayadha — El-Robah — El-Nakhla. Ce projet comprend 21 espaces de voisinage d'une superficie de 600 hectares, composé principalement d'arbres forestiers à croissance rapide, adaptés au climat et à haute capacité d'absorption des eaux, représentés essentiellement par l'eucalyptus.



Carte N°01 : Projet de ceinture verte de la wilaya d'El Oued 2002 — Source : AbdaouiDjihan Rim, référence citée, p. 161

2. Mesures curatives

Le problème de remontée des eaux résulte de la saturation de la couche superficielle en eau, ce problème s'aggravant avec la forte croissance démographique, notamment dans les zones de cohésion urbaine : El Oued, Kouinine, El-Bayadha. La ville d'El Oued est exposée au plus grand danger. Les autorités compétentes de la wilaya ont donc fait la course contre la montre pour identifier les causes et commencer les solutions d'urgence. Un bureau d'études spécialisé dans les travaux d'irrigation (HPO, basé à Oran) en partenariat avec le bureau d'études étranger suisse BG, ont présenté une étude prospective pour les horizons 2011. Il a été établi que la couche d'eau superficielle pourrait continuer à s'élever jusqu'à 1,2 mètre dans la ville d'El Oued en l'absence de réseau d'assainissement, et même en sa présence, elle pourrait atteindre 2,16 mètres. L'étude a conclu à la nécessité d'achever le réseau d'assainissement.

2-1 .Généralisation du projet de réseau d'assainissement

Avant le phénomène de remontée des eaux, la ville d'El Oued avait une faible couverture par le réseau d'assainissement, dont la réalisation a démarré en 1984 sans atteindre 13% de couverture. Le démarrage effectif de la réalisation du réseau d'assainissement a eu lieu en 2004, confié au groupement sino-algérien « Sinohydro-Cosidar » et à la société

GCB. L'exploitation a démarré en 1996, la couverture actuelle atteignant environ 71% dans la wilaya, et 62% dans la ville d'El Oued.

Le réseau se compose de trois composantes essentielles:

- Le réseau de collecte et de transfert

- Les stations d'épuration et d'assainissement (STEP)؛
- Le réseau d'évacuation des eaux usées .

a. Le réseau de collecte et de transfert

Il s'agit d'une des composantes du réseau d'assainissement, chargée de collecter les branchements individuels et d'acheminer vers les quatre stations d'épuration (STEP). Il comprend des canalisations, des réseaux de raccordement et des stations de pompage. Le nombre de stations de relevage atteint 17 stations en 2021, la longueur du réseau ayant atteint 261 km.

b. Les stations d'épuration et d'assainissement (STEP)

Le réseau comprend quatre stations d'épuration:

- **STEP1** : couvre les communes d'El Oued, El-Bayadha, Kouinine et El- Robah. La station est située dans la commune de Kouinine.
- **STEP2** : couvre les communes de Guémar, Taghzout, Hassani Abdelkrim et Debila. La station est située dans la commune de Hassani Abdelkrim (village El-Dhekar).
- **STEP3** : couvre les communes de Sidi Aoun, El-Megrane et Hassi Khalifa. La station est située dans la commune de Sidi Aoun (village Nord).
- **STEP4** : couvre la commune de Reguiba et y est située.

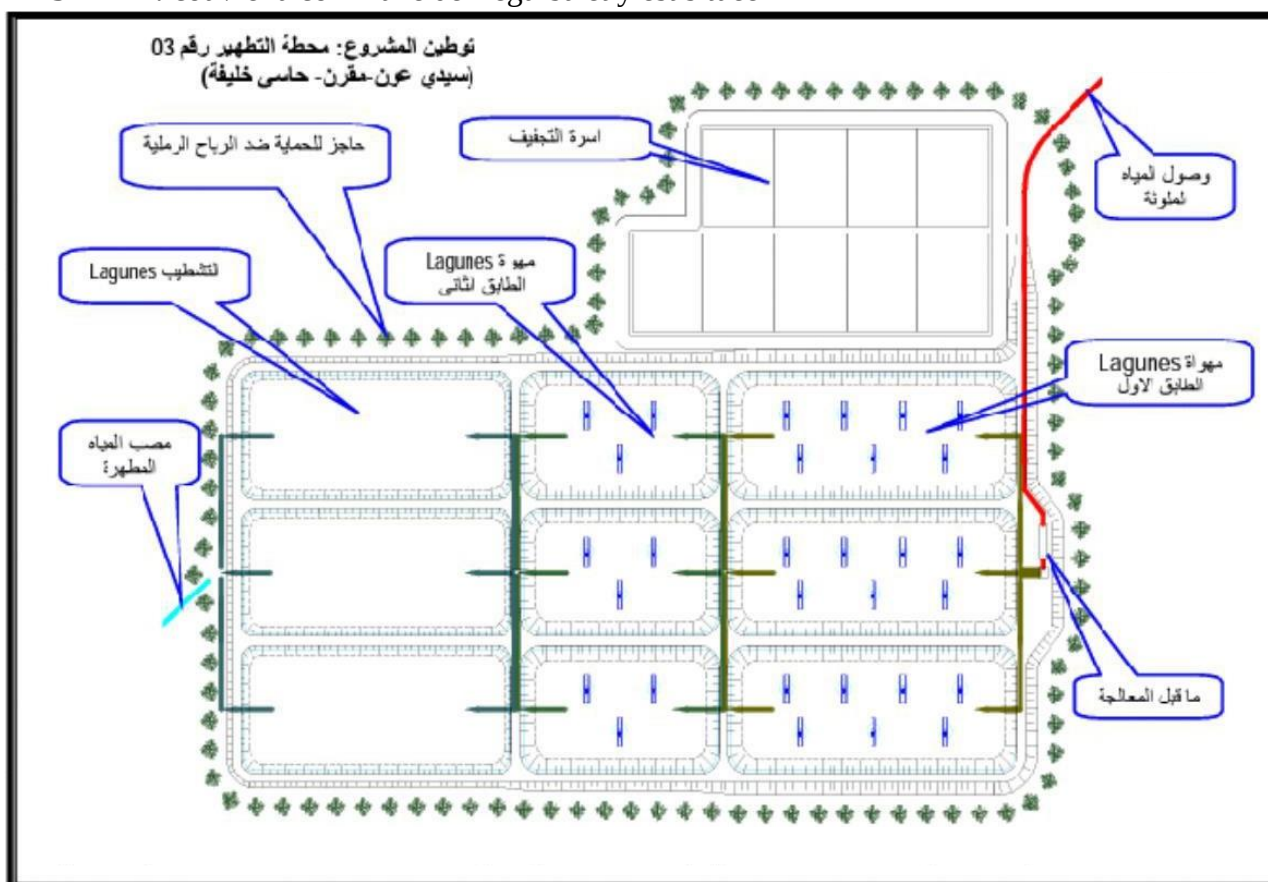


Figure N°10 : Modèle de station d'épuration (modèle STEP3) — Source : Direction des Ressources en Eau, wilaya d'El Oued

2-2 .Éloignement de l'exutoire du réseau d'assainissement

Avant le phénomène de remontée des eaux, l'exutoire du réseau d'assainissement se trouvait dans le quartier El-Chatt à seulement 14 km du siège de la commune. L'étude a révélé que l'un des facteurs est la proximité de l'exutoire d'assainissement de la commune et des zones urbaines. Lors de la réalisation du nouveau réseau d'assainissement, un nouvel exutoire éloigné de la ville d'El Oued et des zones urbaines a été programmé, à savoir la zone appelée Chott El-Holofa, située à environ 21 km du siège de la wilaya, aux limites de la commune de Sidi Aoun.

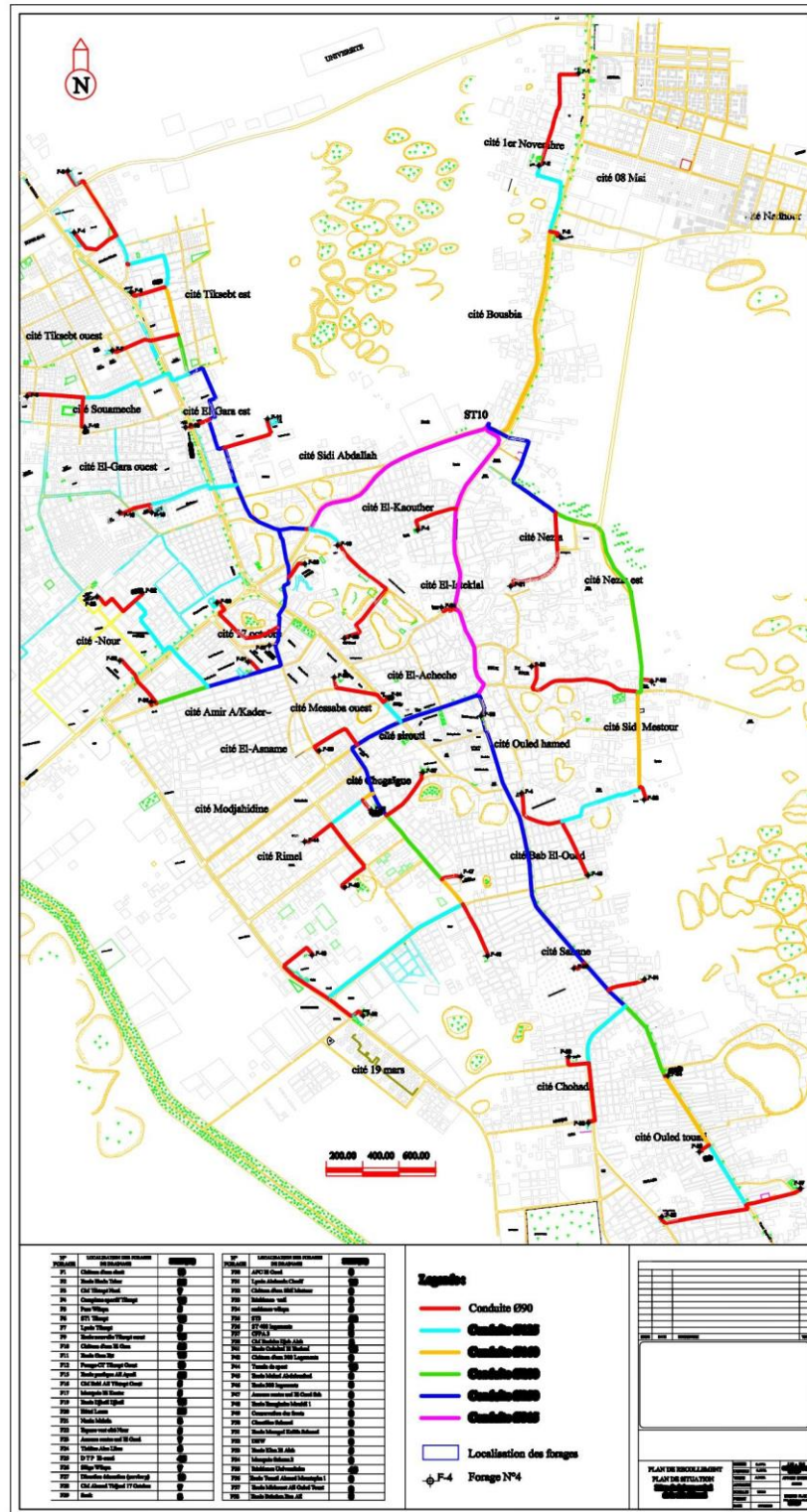


Photo N°04 : Réseau d'assainissement et exutoire de Chott El-Holofa — Source : Élaboration de l'étudiant avec Google Earth (memoir garbi abd lbari 2022)

2-3 .Drainage vertical des eaux de la couche superficielle

Il s'agit d'un système de drainage vertical des eaux de la couche superficielle, existant uniquement dans la commune d'El Oued, comprenant 51 forages dont la mission est de baisser les eaux de la couche superficielle. Ils sont équipés de pompes qui commencent à aspirer les eaux automatiquement lorsque le niveau des eaux atteint un certain seuil. La longueur du réseau est de 21 mètres. Il s'agit d'un réseau séparé du réseau d'assainissement, et ses eaux sont de bonne qualité et peuvent être utilisées dans le domaine de la sylviculture.

Plan Stations Drainages vertical Commune El-Qued



CarteN°02 :Plan de drainage vertical

Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons étudié les répercussions du phénomène de remontée des eaux dans la ville d'El Oued, qui a été la plus touchée dans divers aspects de la vie (urbain, agricole, environnemental et sanitaire). Nous avons également présenté les mesures et les solutions adoptées par les autorités compétentes pour limiter ce phénomène, tant préventives que curatives, notamment la réalisation du réseau d'assainissement, le projet de ceinture verte, l'exploitation des eaux de la couche superficielle pour l'irrigation, et le drainage vertical.

Ces mesures ont donné des résultats relativement satisfaisants, mais leur impact reste insuffisant en raison de la persistance du problème. Il est donc impératif de poursuivre ces efforts et de les compléter par des solutions plus efficaces pour éliminer définitivement le phénomène et ramener la région à la sécurité.

CHAPITRE III

Méthodologie de l'étude

III.1. Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie mise en œuvre pour évaluer la dynamique de la nappe phréatique d'El Oued à partir des images Sentinel-1, sur la plateforme à accès gratuit Google Earth Engine (GEE). L'approche repose sur l'établissement d'une relation empirique entre le signal de rétrodiffusion radar en polarisation VV et le niveau statique (NS) mesuré dans les puits piézométriques, suivie d'une application pixel par pixel pour cartographier l'évolution temporelle de la nappe.

III.2. Données Sentinel-1

III.2.1. Présentation du satellite

Sentinel-1 est une constellation de deux satellites (Sentinel-1A et Sentinel-1B) développée par l'ESA dans le cadre du programme Copernicus. Ils embarquent un radar à synthèse d'ouverture (SAR) opérant en bande C (fréquence 5,405 GHz, longueur d'onde $\approx 5,6$ cm). Le cycle de revisite est de 6 à 12 jours selon la géométrie d'acquisition.

III.2.2. Données utilisées

Les données utilisées dans cette étude sont :

A. Les images SAR Sentinel-1 en mode GRD (Ground Range Detected), polarisation VV, acquises en mode IW (Interferometric Wide Swath, fauchée 250 km, résolution 10 m), téléchargeables à partir de la plateforme à accès gratuit Google Earth Engine (GEE). La période couverte est 2015–2024.

- Capteur : Sentinel-1A/B — SAR bande C
- Mode d'acquisition : IW (Interferometric Wide Swath)
- Polarisation utilisée : VV (Vertical–Vertical)
- Niveau de traitement : GRD (Ground Range Detected)
- Résolution spatiale : 10 m
- Source : Google Earth Engine (Collection « COPENICUS/S1_GRD »).

B. Les données piézométriques/ statiques disponibles auprès de la Direction des Eaux d'El Oued (ADE), couvrant les années : 2008, 2009, 2011, 2014, 2016, 2018, 2021 et 2022.

III.3. Organigramme méthodologique

L'organigramme ci-dessous résume les principales étapes de la méthodologie adoptée, depuis l'acquisition des données jusqu'à la production des cartes de tendance temporelle du niveau statique.

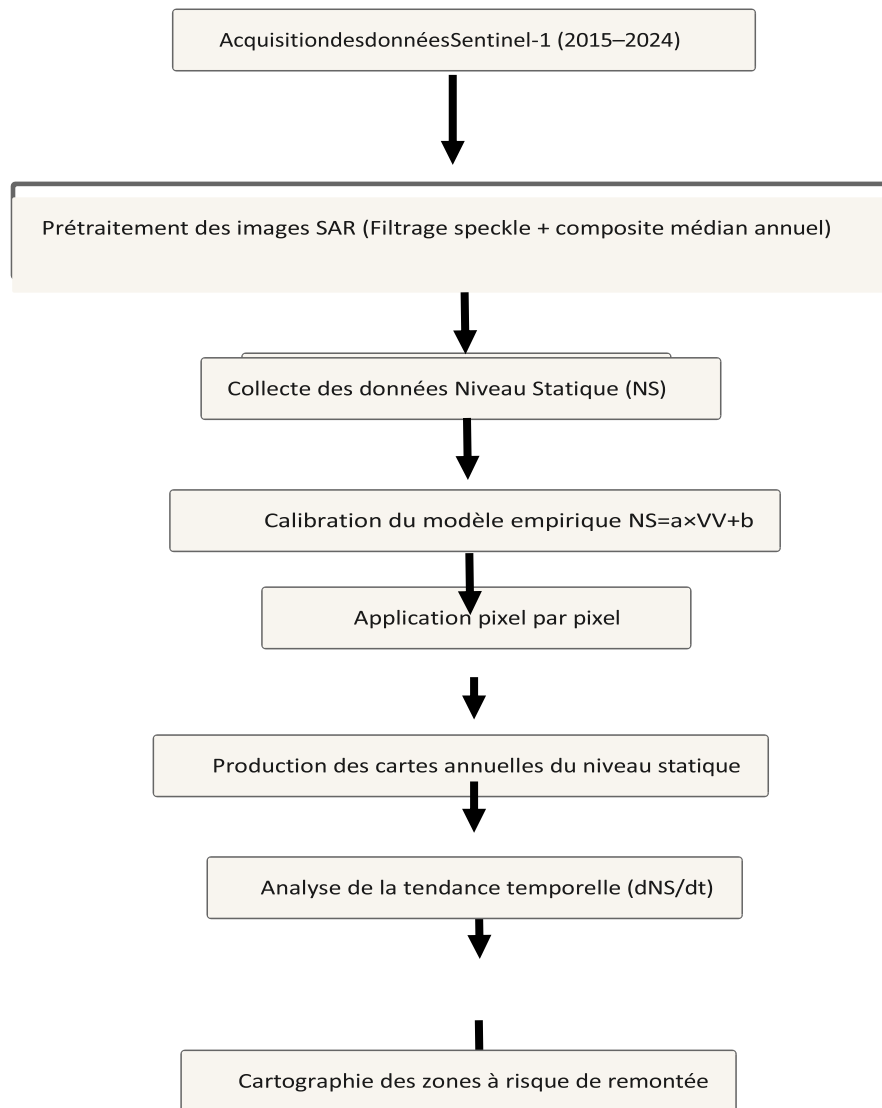


Figure N°11: Organigramme de la méthodologie adoptée.

III.4. Relation Niveau Statique – Rétrodiffusion VV

III.4.1.Principe physique

Le signal radar en polarisation VV est sensible aux propriétés diélectriques des matériaux en surface et en sous-surface. Dans les milieux sableux peu végétalisés comme le Souf, la rétrodiffusion VV est influencée par la teneur en eau du sol superficiel, elle-même liée à la profondeur de la nappe phréatique par le mécanisme de remontée capillaire. Plus la nappe est proche de la surface, plus la teneur en eau capillaire est élevée, et plus la rétrodiffusion VV est forte.

III.4.2.Modèle empirique

La relation empirique retenue est une régression linéaire simple entre le niveau statique NS (en mètres NGF) et la rétrodiffusion VV (en dB) (Equation 1):

$$NS = a \times VV + b \quad (1)$$

Où a est la pente de régression et b est l'ordonnée à l'origine, calibrés par moindres carrés ordinaires sur les 159 puits de mesure de l'ANRH.

III.5. Prétraitement des images Sentinel-1

Les images Sentinel-1 ont été prétraitées sous Google Earth Engine (GEE) selon le protocole suivant:

- **Filtrage du chatolement (Speckle)** : application d'un filtre médian à fenêtre de 50 m pour réduire le bruit cohérent inhérent aux images SAR.
- **Composition annuelle** : calcul d'un composite médian annuel (valeur médiane de tous les pixels disponibles pour l'année), minimisant les effets météorologiques et les anomalies ponctuelles.
- **Masquage** : exclusion des zones urbaines denses et des surfaces en eau permanente où la relation NS–VV n'est pas valide.
- **Projection et export** : les images composites filtrées sont exportées en coordonnées géographiques WGS84 à une résolution de 10 m.

III.6. Application pixel par pixel

Pour chaque pixel de la zone d'étude, le niveau statique annuel est estimé par application de la relation $NS = a \cdot VV + b$, avec les paramètres de régression calibrés pour l'année correspondante. Ce processus génère une série temporelle de 4 cartes de NS estimé (2016, 2018, 2021 et 2022).

III.7. Analyse de la tendance temporelle

Sur chaque pixel, une régression linéaire temporelle est ajustée aux 4 valeurs de NS estimé (2016–2022). La pente de cette régression (dNS/dt , en m/an) constitue l'indicateur de tendance : une valeur positive indique une remontée de la nappe, une valeur négative une baisse. Cette cartographie de la vitesse de variation permet d'identifier les zones en risque aggravé.

L'ensemble du traitement (filtrage, composition, application du modèle, régression temporelle) a été mis en œuvre dans l'environnement de calcul Cloud dans Google Earth Engine, permettant de traiter l'intégralité des données sur la période 2016–2022 sans nécessiter de téléchargement local.

III.8. Conclusion

La méthodologie présentée dans ce chapitre combine la disponibilité gratuite et régulière des images Sentinel-1, la puissance de calcul de Google Earth Engine et la robustesse d'un modèle empirique calibré sur un réseau dense de puits piézométriques. Cette approche permet d'obtenir une couverture spatiale continue de la dynamique de la nappe phréatique, complétant avantageusement les réseaux de mesures ponctuelles. Les résultats de l'application de cette méthodologie sont présentés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Résultats et discussions

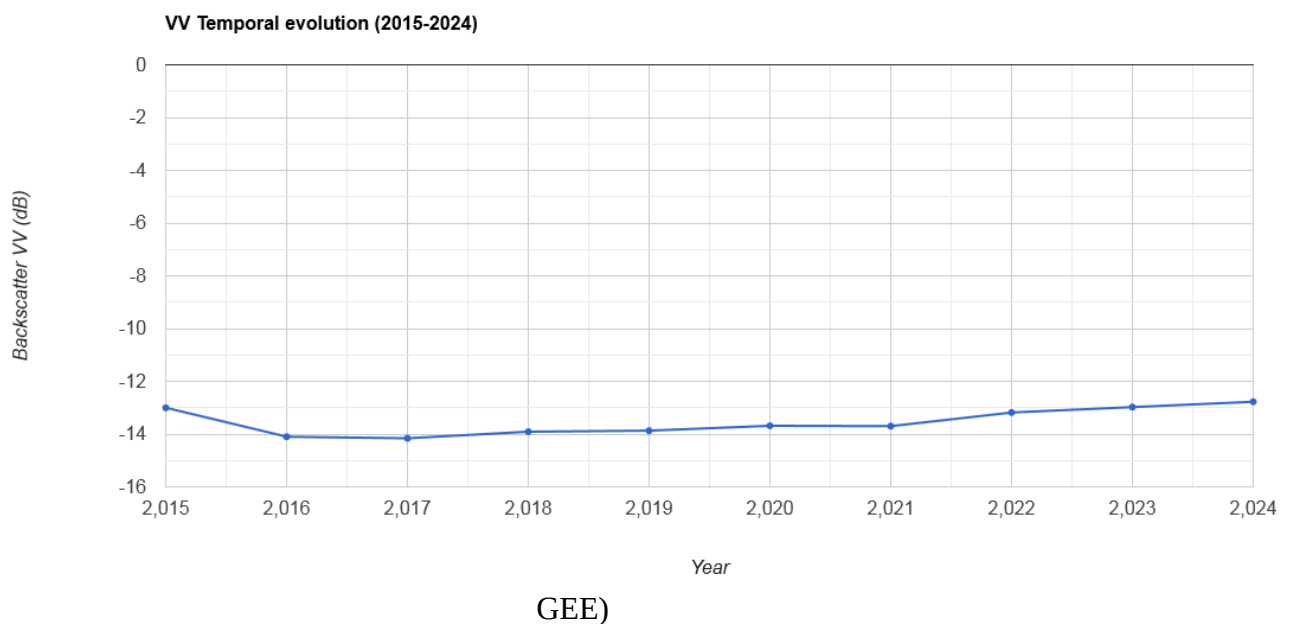
IV.1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus par l'application de la méthodologie décrite au chapitre précédent. Nous exposons successivement les images de rétrodiffusion VV, les performances des modèles de régression NS–VV, la corrélation globale sur la période 2015 – 2024, et nous discutons de la signification des tendances observées.

IV.2. Images VV de Sentinel-1

Les composites médians annuels de la rétrodiffusion VV révèlent des variations spatiales significatives du signal radar sur la commune d'El Oued. Les zones à forte rétrodiffusion (valeurs VV élevées) correspondent aux secteurs où la nappe phréatique est proche de la surface, avec une teneur en eau capillaire élevée dans les premiers centimètres du sol. À l'inverse, les zones à faible rétrodiffusion correspondent aux secteurs plus secs ou fortement urbanisés.

L'analyse visuelle des composites annuels montre une augmentation progressive de la rétrodiffusion VV entre 2015 et 2024 dans la majorité des pixels de la zone d'étude, traduisant une remontée généralisée de la nappe phréatique confirmée par les données piézométriques de terrain.



IV.3. Modèles NS–VV et performances

La calibration du modèle empirique $NS = a \cdot VV + b$ a été réalisée pour chaque année de la période 2016–2022 sur les 159 puits piézométriques de l'ADE. Les paramètres de régression et les indicateurs de performance sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Tableau N°07 : Paramètres de régression du modèle NS–VV par année (2016–2022)

Année	a (pente)	b (origine)	R ²	RMSE(m)	N (puits)
2016	2.452	32.888	0,822	2,01	159
2018	2.204	31.39	0,766	1,98	159
2021	2.602	36.399	0,917	2,08	159
2022	2.371	30.84	0,903	2,12	159

Les coefficients de détermination R² varient de 0,766 (2018) à 0,917 (2021), indiquant une bonne capacité explicative du modèle empirique. Les erreurs RMSE restent comprises entre 1,98 et 2,12 m, ce qui est acceptable compte tenu de la résolution spatiale des images (10 m) et de la variabilité naturelle du niveau statique au sein de la zone d'étude.

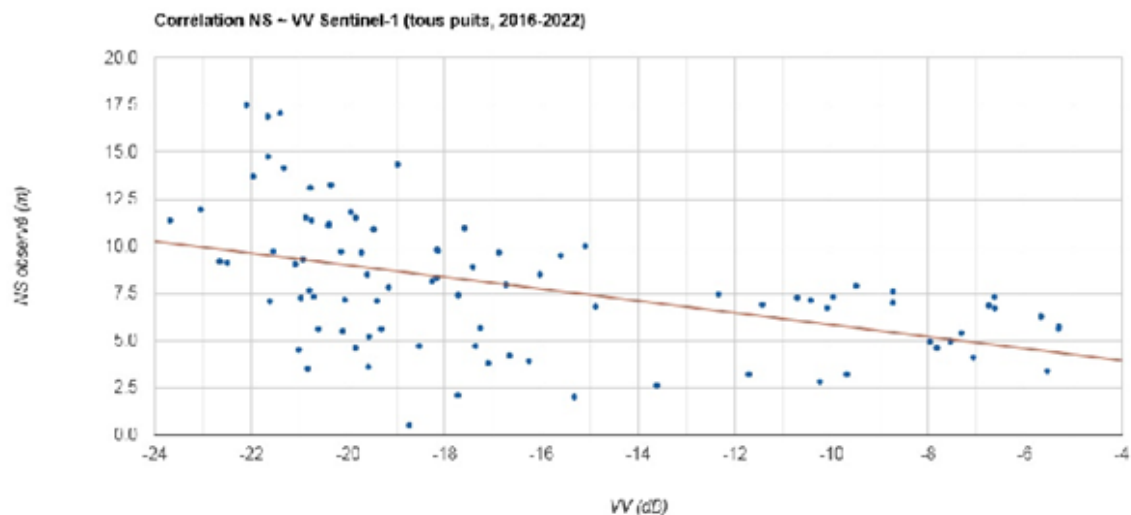


Figure N°13 : Corrélation NS - VV Sentinel-1 (2016 – 2022).

L'amélioration progressive de R² au fil des années peut s'expliquer par l'augmentation du nombre d'images Sentinel-1 disponibles (dû au lancement de Sentinel-1B en 2016), améliorant la qualité des composites médians annuels.

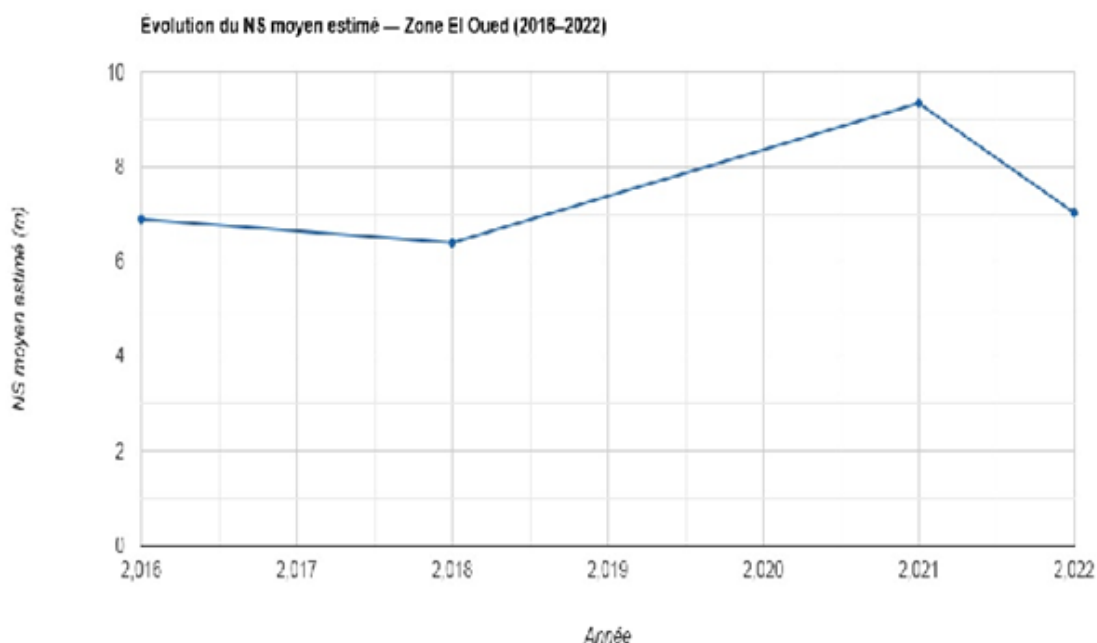


Figure N°14: Evolution du modèle de régression NS–VV (2016 - 2022).

IV.4. Corrélation globale (2016 - 2022)

La corrélation globale, calculée en regroupant l'ensemble des observations (159 puits $\times$ 4 années = 636 paires NS–VV), confirme la robustesse de la relation empirique. Le nuage de points NS–VV montre une distribution linéaire claire, avec un R^2 global élevé confirmant que le signal radar VV est un bon proxy du niveau statique de la nappe phréatique dans les conditions environnementales de la région du Souf.

Cette corrélation globale justifie l'utilisation du modèle pour l'application spatiale pixel par pixel et la production des cartes de niveau statique estimé.

Analyse des images VV

L'analyse des images Sentinel-1 (polarisation VV) de la commune d'El Oued entre 2015 et 2024 montre une variabilité spatiale et temporelle de l'humidité de surface. Les valeurs les plus faibles d'humidité correspondent aux classes en rouge/orange (−8,5 à 1,7 dB), tandis que les fortes humidités apparaissent en bleu foncé (−23 à −18 dB).

Les observations suivantes peuvent être formulées année par année (Figure 15):

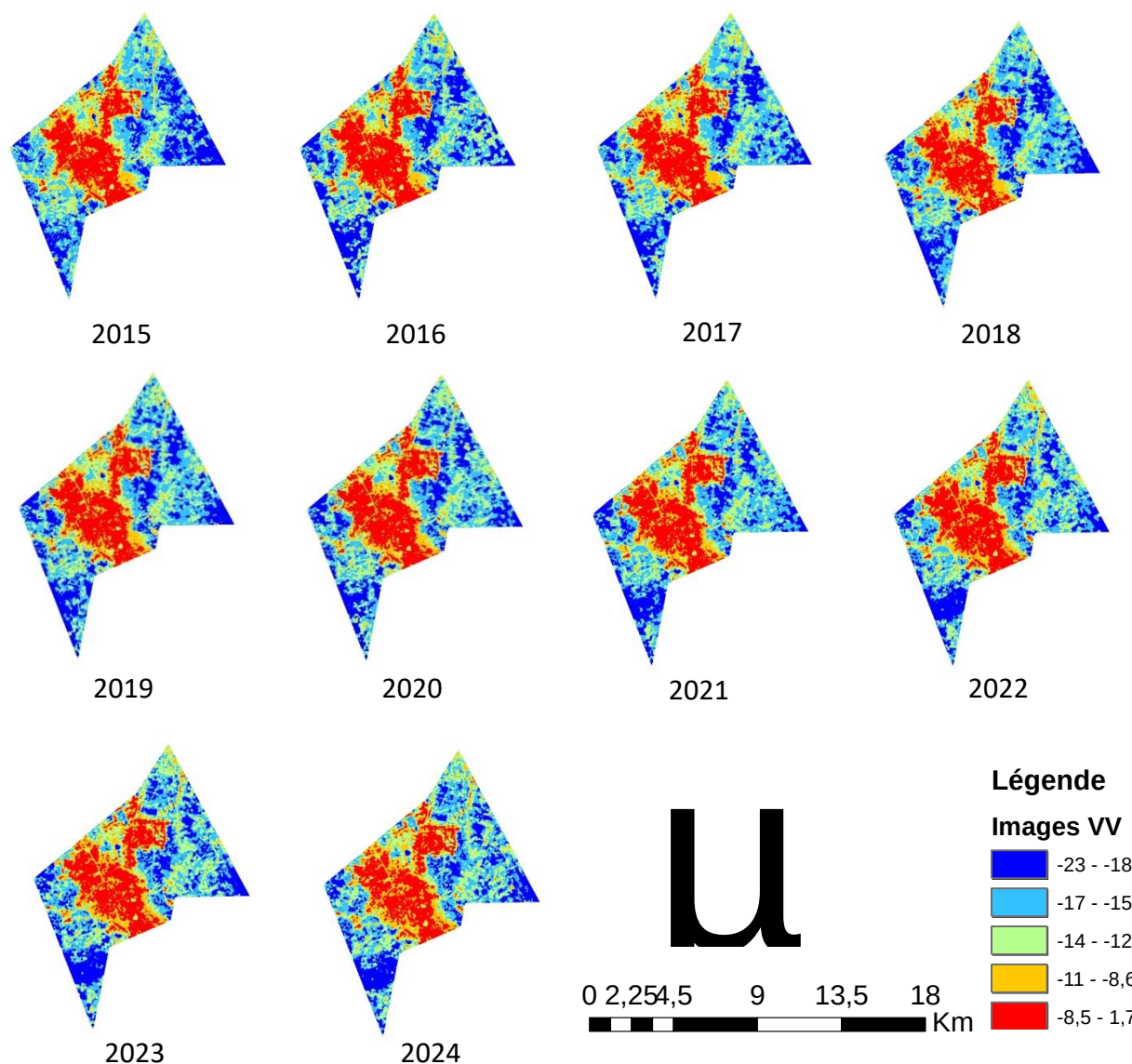


Figure 15 : Images VV de la commune d'El Oued (2015 - 2024)

- 2015

L'année 2015 présente une humidité relativement importante dans la partie ouest et sud-ouest de la commune. Les zones périphériques restent dominées par des valeurs fortes à modérées (bleu et cyan). Cette répartition traduit probablement des secteurs agricoles ou des sols plus humides liés à l'irrigation et à la remontée de la nappe.

- 2016

La structure spatiale reste proche de celle de 2015, avec une légère augmentation des surfaces intermédiaires (vert et jaune). Les zones fortement humides demeurent concentrées à l'ouest et au sud-ouest. L'humidité paraît relativement stable à l'échelle de la commune.

- 2017

En 2017, les zones rouges deviennent légèrement plus fragmentées. On observe une progression des classes moyennes (cyan et vert), indiquant une augmentation locale de l'humidité de surface dans certains secteurs auparavant très secs.

- 2018

L'année 2018 montre une redistribution spatiale plus contrastée. Les zones humides persistent dans la partie ouest mais les surfaces à faible humidité augmentent dans les marges orientales et septentrionales. Cela suggère une tendance à l'assèchement dans certaines zones périphériques.

- 2019

En 2019, les zones à forte humidité réapparaissent de manière plus étendue dans le centre et le sud-ouest. La dominance des couleurs bleu et cyan indique une amélioration relative de l'humidité superficielle par rapport à 2018.

- 2020

L'année 2020 présente l'une des répartitions les plus homogènes des zones humides. Les secteurs bleus restent importants, tandis que les classes intermédiaires se développent davantage. Cette situation peut refléter une augmentation de l'humidité du sol ou une intensification des activités agricoles irriguées.

- 2021

En 2021, une légère diminution des surfaces très humides est observable. Les classes cyan et bleu clair deviennent moins dominantes, traduisant une baisse modérée de l'humidité superficielle dans plusieurs secteurs.

- 2022

L'année 2022 marque un retour des fortes humidités dans les zones centrales et occidentales. Les surfaces bleues sont relativement continues, ce qui indique des conditions plus humides ou une forte activité d'irrigation.

- 2023

En 2023, les zones rouges et orangées restent importantes mais deviennent plus dispersées. Les surfaces à faible humidité progressent légèrement dans la partie orientale. Cette année semble caractérisée par une variabilité spatiale plus marquée.

- 2024

L'image de 2024 montre une configuration proche de celle de 2023, avec le maintien des noyaux humides au centre-ouest et des secteurs plus humides en périphérie. Les classes intermédiaires dominent une grande partie de la commune, traduisant une humidité modérée globalement stable.

Synthèse générale

Sur l'ensemble de la période 2015-2024, la commune d'El Oued présente:

- Une persistance des zones humides dans les secteurs ouest et sud-ouest ;
- Une dominance des faibles humidités dans le centre urbain et septentrionales ;
- Des fluctuations interannuelles modérées plutôt qu'un changement brutal ;
- Une influence probable de l'irrigation agricole et des conditions climatiques sur la dynamique de l'humidité de surface .

Les données Sentinel-1 VV sont particulièrement adaptées au suivi de l'humidité du sol grâce à la sensibilité du signal radar aux propriétés diélectriques de la surface. Les valeurs de rétrodiffusion augmentent généralement avec l'humidité du sol.

Analyse des images NS estimées

La figure 16 présente quatre cartes du NS estimé (profondeur de la nappe phréatique en mètres, année : 2016, 2018, 2021 et 2022) sur la zone d'El Oued, produit par le modèle de régression SAR. La palette va du bleu (nappe très proche de la surface ou affleurante, $NS \leq 0$) au rouge foncé (nappe très profonde, $NS = 17-30$ m), en passant par le vert, le jaune et l'orange.

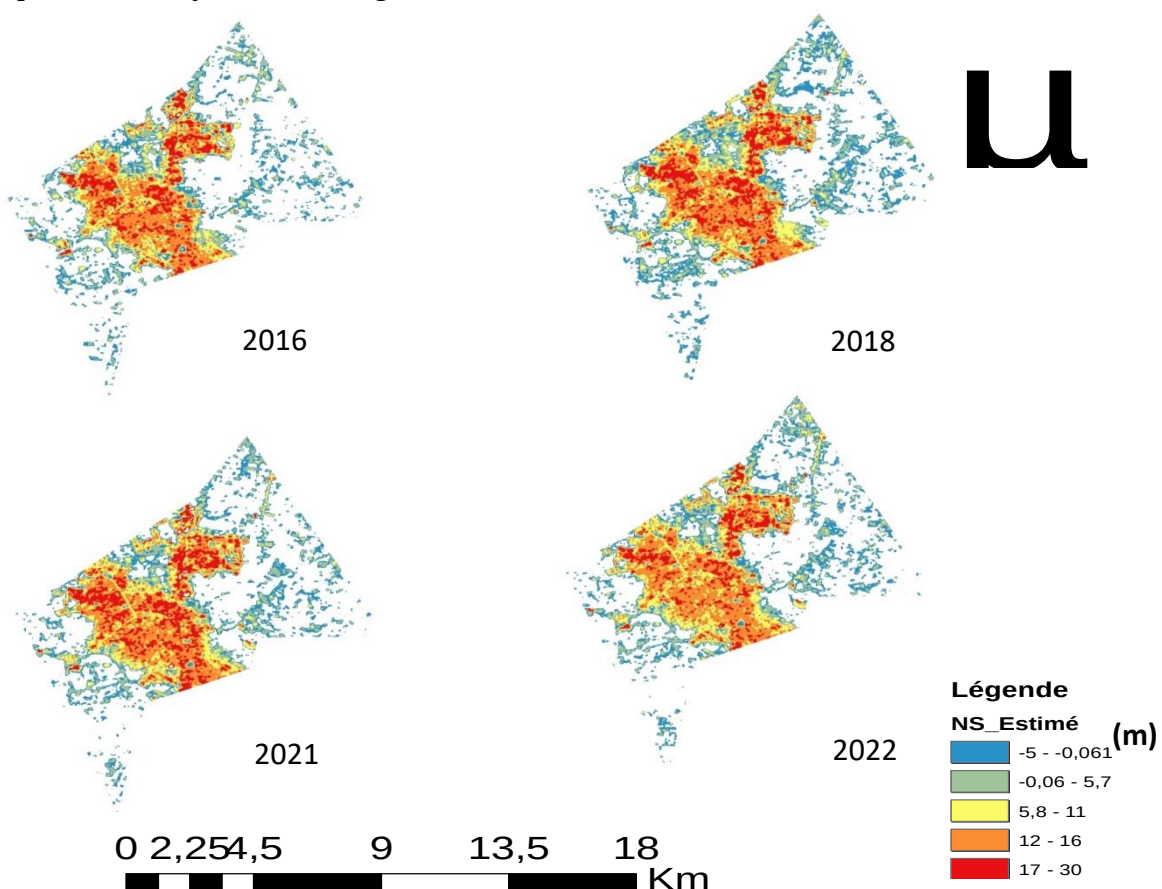


Figure 16 : Surfaces NS estimées pour les années : 2016, 2018, 2021 et 2022

- **2016 Nappe globalement profonde, forte hétérogénéité spatiale**

La carte 2016 est dominée par les tons rouge–orange au centre de la zone, avec des valeurs NS atteignant 17–30 m. Cela indique une nappe phréatique profondément enfouie dans le cœur urbain et péri-urbain d'El Oued. Les bordures de la zone montrent des pixels bleus à verts (NS négatif à faible), correspondant aux dépressions inter-dunaires et aux zones de sebkha où la nappe affleure naturellement. Cette configuration spatiale reflète la morphologie dunaire du Souf : les crêtes dunaires portent un sol sec (NS élevé), tandis que les Ghout et les dépressions montrent une nappe plus accessible.

Le modèle régression élaboré pour cette année:

$$NS = 2.452 \times VV + 32.888 \mid R^2 = 0.822 \mid RMSE = 2.01 \text{ m}$$

- **2018 Légère remontée de la nappe, extension des zones bleues**

Par rapport à 2016, la carte 2018 montre une réduction de l'étendue des pixels rouges (NS > 17 m) et une progression des teintes vertes à jaunes (NS = 0–11 m), notamment dans la partie nord et nord-est de la zone. Cela traduit une remontée partielle de la nappe, cohérente avec la hausse du niveau piézométrique NP moyen observé dans les données in situ (NP moyen passe de 44.2 m en 2016 à 69.5 m en 2018). La fragmentation spatiale plus marquée en 2018 suggère une hétérogénéité accrue des conditions hydrologiques — certaines zones pompent activement l'eau souterraine (NS élevé maintenu), d'autres voient la nappe remonter.

Le modèle régression élaboré pour cette année:

$$NS = 2.204 \times VV + 31.39 \mid R^2 = 0.766 \mid RMSE = 1.98 \text{ m}$$

- **2021 Situation intermédiaire, structure spatiale stable**

La carte 2021 ressemble structurellement à 2016 dans la distribution spatiale, avec une concentration des valeurs élevées (rouge–orange) dans le centre-ouest de la zone. Cependant, les zones bleues (NS < 0) sont plus dispersées et moins cohérentes qu'en 2018, indiquant une nappe qui a légèrement redescendu après 2018. La persistance du cœur rouge dans la zone urbaine dense d'El Oued reflète l'effet cumulatif des pompes agricoles et domestiques qui maintiennent la nappe profonde localement, malgré la tendance générale à la remontée documentée dans la région.

Le modèle régression élaboré pour cette année:

$$NS = 2.602 \times VV + 36.399 \mid R^2 = 0.917 \mid RMSE = 2.08 \text{ m}$$

- **2022 Nappe la plus haute de la série, dominance des teintes chaudes compactes**

La carte 2022 montre la plage de valeurs NS la plus resserrée des quatre années : la majorité des pixels bascule vers les jaune–orange (NS = 5–16 m), avec moins d'extrêmes rouges qu'en 2016. Ceci est cohérent avec les données in situ qui indiquent un NP moyen de 71.1 m en 2022, le plus élevé de la série — soit paradoxalement une nappe plus haute en altitude absolue, mais la profondeur NS reste significative car l'altitude du terrain Z est aussi élevée dans cette zone. La réduction des pixels bleus en 2022 par rapport à 2018 indique une consolidation des niveaux de nappe sans zones d'affleurement prononcées.

Le modèle régression élaboré pour cette année:

$$NS = 2.371 \times VV + 30.84 \mid R^2 = 0.771 \mid RMSE = 2.12 \text{ m}$$

La lecture temporelle 2016→2018→2021→2022 révèle une dynamique non monotone de la nappe : remontée entre 2016 et 2018, légère stabilisation en 2021, puis réajustement en 2022. Cette oscillation est caractéristique d'une nappe phréatique libre soumise à des forçages anthropiques contradictoires (recharge par les eaux d'irrigation et les fuites de réseaux d'assainissement d'un côté, pompage intensif) sur fond de faible recharge naturelle en contexte hyper-aride saharien.

La persistance de valeurs NS élevées (rouge) dans le centre urbain sur toutes les années confirme que la zone centrale d'El Oued constitue un pôle de pompage structurel, tandis que les marges de la zone d'étude enregistrent la dynamique naturelle de la nappe, plus sensible aux variations climatiques interannuelles.

Modèle synthèse final recommandé - Pondération inverse du RMSE

Les modèles avec la plus faible erreur reçoivent un poids plus élevé : poids = 1/RMSE.

Année	a	b	RMSE	1/RMSE	Poids normalisé
2016	2.452	32.888	2.01	0.4975	0.252
2018	2.204	31.390	1.98	0.5051	0.256
2021	2.602	36.399	2.08	0.4808	0.244
2022	2.371	30.840	2.12	0.4717	0.239
Σ				1.9731	1.000

$$a_{rmse} = (2.452 \times 0.252) + (2.204 \times 0.256) + (2.602 \times 0.244) + (2.371 \times 0.239) = 2.408$$

$$b_{rmse} = (32.888 \times 0.252) + (31.390 \times 0.256) + (36.399 \times 0.244) + (30.840 \times 0.239) = 32.875$$

$$NS = 2.408 \times VV + 32.875 \quad (2)$$

R^2 moyen pondéré = 0.819 — RMSE moyen = 2.05 m — valide sur 4 années $\times$ 159 puits

Ce modèle peut être appliqué directement pour estimer NS sur n'importe quelle image Sentinel-1 de la zone El Oued, indépendamment de l'année, avec une erreur attendue d'environ ± 2 m.

Limites du modèle à mentionner

$R^2 = 0.799$ et RMSE = 2.39 m sont de bonnes performances pour une estimation SAR de nappe phréatique, mais trois limites doivent être signalées:

- 1 . Validité spatiale restreinte: Le modèle est calibré sur la zone El Oued (Souf). Les coefficients ne sont pas transférables à d'autres aquifères sans recalibration.
- 2 . Effet de la rugosité de surface: Les événements pluvieux rares au Sahara peuvent modifier VV et VH de façon transitoire sans relation avec la nappe, créant des erreurs ponctuelles.
3. Colinéarité VV/VH/RVI: Les trois variables ne sont pas indépendantes ($RVI = f(VV, VH)$), ce qui gonfle artificiellement les coefficients individuels. Le modèle simple $NS = 2.529 \cdot VV + 34.860$ ($R^2 = 0.917$ en 2021) est souvent plus robuste et plus interprétable.

IV.5. Discussion

Les résultats obtenus dans cette étude démontrent le potentiel des images Sentinel-1 pour le suivi spatio-temporel de la nappe phréatique dans les environnements sahariens caractérisés par une nappe peu profonde et un couvert végétal modéré. Plusieurs points méritent d'être discutés.

Premièrement, la relation linéaire NS–VV, bien que simple, s'avère suffisamment robuste pour estimer le niveau statique avec une précision de l'ordre de ± 2 m. Cette précision est comparable à celle obtenue par des méthodes plus complexes (interférométrie InSAR, modèles numériques de nappe) tout en offrant l'avantage d'une mise en œuvre rapide et reproductible via Google Earth Engine.

Deuxièmement, la tendance temporelle positive de dNS/dt observée sur la majorité des pixels est cohérente avec les observations de terrain et les études antérieures documentant la remontée continue de la nappe phréatique dans la commune d'El Oued. Les zones les plus affectées correspondent aux secteurs urbains denses où les fuites des réseaux d'eau potable et d'assainissement contribuent significativement à la recharge de la nappe superficielle.

Troisièmement, certaines limites doivent être mentionnées. La relation NS–VV est moins fiable dans les zones très urbanisées (réflexions multiples sur les bâtiments) et dans les zones de surface en eau permanente. Le masquage de ces zones a permis de limiter les artefacts, mais une amélioration pourrait consister à intégrer un masque d'occupation du sol plus précis.

Enfin, l'approche proposée pourrait être étendue à d'autres communes de la wilaya d'El Oued et à d'autres régions sahariennes confrontées à des problématiques similaires de remontée de nappe, à condition de recalibrer le modèle empirique sur des données piézométriques locales.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats de l'application de la méthodologie basée sur les images Sentinel-1 pour l'évaluation de la dynamique de la nappe phréatique d'El Oued. Les performances satisfaisantes des modèles de régression NS–VV (R^2 de 0,766 à 0,917, RMSE de 1,98 à 2,12 m) confirment la validité de l'approche empirique retenue. La corrélation globale sur la période 2016–2022 démontre la robustesse de la relation entre le signal radar VV et le niveau statique de la nappe. Les résultats cartographiques produits constituent un outil d'aide à la décision pour la gestion durable de la ressource en eau souterraine dans la commune d'El Oued.

Conclusion générale et perspectives

La présente étude avait pour objectif d'évaluer la dynamique spatio- temporelle de la nappe phréatique de la commune d'El Oued à partir des images radar Sentinel-1 sur la période 2015–2024. Ce travail s'inscrit dans un contexte régional marqué par une remontée continue et alarmante de la nappe phréatique peu profonde, avec des conséquences graves sur l'urbanisation, l'agriculture et la santé publique.

L'approche méthodologique développée repose sur l'établissement d'une relation empirique linéaire ($NS = a \cdot VV + b$) entre la rétrodiffusion radar en polarisation VV et le niveau statique mesuré dans 159 puits piézométriques (années : 2016, 2018, 2021 et 2022). Le prétraitement des images SAR sous Google Earth Engine (filtrage speckle, composition médian annuel) a permis de réduire le bruit et de générer des composites annuels de qualité. L'application pixel par pixel du modèle calibré a produit 4 cartes

annuelles du niveau statique estimé, et l'analyse de la tendance temporelle (dNS/dt) a permis de cartographier les zones de remontée de la nappe.

Les principaux résultats peuvent être synthétisés comme suit:

- Les modèles de régression NS–VV présentent des coefficients de détermination satisfaisants ($R^2 = 0,766$ à $0,917$) et des erreurs RMSE modérées (1,98 à 2,12 m), validant l'utilisation du signal VV comme proxy du niveau statique dans le contexte saharien du Souf.
- La corrélation globale sur 636 paires NS–VV confirme la robustesse de la relation empirique sur l'ensemble de la période d'étude.
- L'analyse de la tendance temporelle confirme une remontée généralisée de la nappe phréatique sur la commune d'El Oued, avec des vitesses variables selon les secteurs.
- Les zones les plus affectées correspondent aux quartiers urbains denses (Sidi Mastur, Nazla, Taksebt) où les fuites des réseaux contribuent fortement à la recharge de la nappe superficielle.

Perspectives

Au terme de ce travail, plusieurs perspectives peuvent être envisagées pour améliorer et étendre l'approche développée:

- Intégration de la polarisation VH : L'exploitation conjointe des polarisations VV et VH pourrait améliorer la précision du modèle en fournissant une information complémentaire sur la structure de la surface.
- Utilisation de la série temporelle complète : Au lieu de composites annuels, l'exploitation de l'ensemble des images disponibles (dates individuelles) permettrait de résoudre les variations saisonnières et d'améliorer la résolution temporelle du suivi.
- Extension spatiale : L'approche pourrait être appliquée à l'ensemble de la wilaya d'El Oued et aux régions voisines confrontées au même phénomène, après recalibrage du modèle sur des réseaux piézométriques locaux.
- Couplage avec des modèles hydrogéologiques : L'intégration des cartes de niveau statique estimé dans un modèle numérique de nappe permettrait de mieux

contraindre les paramètres hydrodynamiques et d'améliorer la compréhension des mécanismes de recharge.

- Suivi de l'efficacité des mesures correctives : L'approche développée pourrait servir d'outil de suivi pour évaluer l'impact des mesures de drainage, d'assainissement et de ceinture verte sur la dynamique de la nappe phréatique à moyen et long terme.

En conclusion, cette étude démontre que la télédétection radar Sentinel-1, combinée aux données piézométriques de terrain et à la puissance de calcul de Google Earth Engine, constitue un outil efficace et reproductible pour le suivi de la dynamique des nappes phréatiques peu profondes en milieu saharien. Les résultats obtenus fournissent aux décideurs locaux une base cartographique actualisée pour la gestion durable de la ressource en eau souterraine et la lutte contre le phénomène de remontée des eaux dans la commune d'El Oued.

Références bibliographiques

ANRH (1989). Coupes lithologiques des forages de la région du Souf. Agence Nationale des Ressources Hydrauliques, Direction Régionale d'Oued Souf.

ANRH (1993). Log de forage F1 à l'Albien, région d'Oued Souf. Rapport interne, ANRH.

ANRH (2005). Étude hydrogéologique de la nappe phréatique de la wilaya d'El Oued. Direction Régionale d'Oued Souf.

ANRH (2016). Données topographiques et piézométriques de la région du Souf. Rapport interne.

Bel, J. & De Marne, G. (1970). Essai de synthèse hydrogéologique du Sahara Septentrional. Publication du Service Géologique de l'Algérie.

Benseddik, A. & Aouadi, S. (2014). Étude géologique et hydrogéologique de la région d'Oued Souf. Mémoire d'ingénieur, Université d'El Oued.

Bousalsal, B. (2009). Contribution à l'étude hydrogéologique de la nappe phréatique du Souf. Mémoire de Magister, Université d'Annaba.

Cornet, A. (1964). Introduction à l'hydrogéologie saharienne. Mémoire du Service Géologique d'Algérie, n° 10.

DPSB (2021). Données de population de la wilaya d'El Oued. Direction de la Planification et de la Statistique de la wilaya d'El Oued.

Drouiche, M. (2008). Étude hydrogéologique du système aquifère du Souf.

Thèse de Doctorat, Université de Constantine.

ESA (2023). Sentinel-1 User Handbook. European Space Agency, GMES-S1OP-EOPG-TN-13-0001.

Mimoune, M. & Zoubeidi, A. (2014). Analyse géostructurale et hydrogéologique du bassin du Souf. Mémoire d'ingénieur, Université d'El Oued.

ONM (2013). Données climatologiques de la station d'El Oued-Guemar. Office National de Météorologie.

ONRG.M (1999). Étude de reconnaissance géologique et hydrogéologique de la wilaya d'El Oued. Office National de la Recherche Géologique et Minière.

Abdaoui, D.R. Aménagement du territoire et gestion des risques environnementaux dans la wilaya d'El Oued. Thèse, Université d'El Oued.