



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar El oued

Faculté de Technologie

Département : Hydraulique et Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique

Option: Ouvrage Hydraulique

THEME

**Analyse Et Détermination Qualitative Des Eaux Des
Nappes Aquifères De La Région D'El-Oued**

Dirigé par

Dr: ZAIR Nadjjet

Co Promoteur Dr: MILOUDI Abdelmounem

Soutenu devant un jury composé :

Dr: KHCHANA Salim

Dr: MEGA Nabil

Présente par

* TAMMA Mohammed Saci

* BRAHIMI Yacin

Président

Examineur

Promotion: 2023/2024

REMERCIEMENTS

Louange à Dieu qui nous a permis d'accomplir cette modeste recherche. Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude à notre superviseure, la docteure: **Dr. ZAIR NADJET**

qui nous a enseigné, aidé, et soutenu avec ses conseils et son appui dans le développement de ce projet. Nous tenons également à exprimer notre reconnaissance particulière au

docteur: **MILOUDI .ABDELMONEM**

Nous remercions également M :**MEBARKI ABDESSATAR** pour ses efforts déployés pour nous aider.

Nous remercions le professeur **TAMMA ABDELOAHAB...** pour son aide dans ce travail.

Nous exprimons notre gratitude a l' institution : **ANRH / ADE /ONA** à tous ceux qui nous ont aidés directement ou indirectement dans la réalisation de ce document, nous vous remercions.

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail à mon cher père, que Dieu ait son âme, et à la source de tendresse, ma chère mère.

À celle qui a été à mes côtés, ma compagne de route, Ma chère épouse.

À mes chères filles, Maria et Amina.

À mes chers frères, chacun par son nom.

À tous les professeurs, collègues et amis.

Tamma mohammed saci

DEDICACES

Je dedie ce modeste travail a la cle du paradis, mes chers parents, a mon soutien de vie.

Ma chere epouse, et a l'ame de mon cœur, ma fille Elaf.

A mes freres et sœurs, chacun par son nom, et a tous les membres de la famille.

À tous mes collegues de travail et d'etudes, ainsi qu'a mes amis.

Brahimi yacin

RESUME

La zone d'Eloued possède actuellement des ressources hydriques relativement limitées, et qui ne sont représentées, uniquement, que par les eaux souterraines telles que la nappe libre. Ces dernières années, un essor économique, particulièrement agricole, a eu lieu, ce qui a entraîné, d'une part, l'accroissement des besoins en eaux et a provoqué, d'autre part, la dégradation de la qualité des eaux.

Le but de ce travail est d'évaluer la qualité de l'aquifère libre à l'aide de deux modèles d'analyse (GWQI et NPI) qui ont été appliqués en pratique dans la région d'Eloued au nord du Sahara algérien, ont utilisé l'indice de qualité de l'eau (GWQI) et l'indice de pollution par les nitrates (NPI), en fonction des usages d'irrigation et domestiques. Dans cette étude, une collection complète de 20 échantillons a été obtenue à partir de divers endroits pour analyse et évaluation.

Les résultats du GWQI ont révélé que 90% des échantillons indiquent une eau de très mauvaise qualité à insalubre, présentent une salinité forte à très forte pour tout usage, et 10% pour les échantillons de la zone d'étude qui présentent : eau de bonne qualité et salinité modérée pour les usages domestiques et d'irrigation.

Le nitrate (NPI) a été calculé pour évaluer la contamination des eaux de la région d'Eloued par le nitrate (NO_3). Les résultats du NPI ont révélé que 50% des échantillons indiquent une pollution élevée à très élevée s'ils ne sont pas utilisés et 50% des échantillons de la zone d'étude qui présentent une pollution faible à modérée pour l'usage de l'irrigation. Cette forte pollution en nitrates de l'aquifère libre enregistrée dans les zones urbaines est due aux activités humaines, notamment l'élimination des déchets en zones ouvertes et l'infiltration des eaux usées.

المخلص

تتمتع منطقة الوادي حالياً بموارد مائية محدودة نسبياً، والتي لا تتمثل إلا في المياه الجوفية مثل المياه الجوفية الحرة. وفي السنوات الأخيرة، حدث ازدهار اقتصادي، وخاصة الزراعي، مما أدى، من ناحية، إلى زيادة الاحتياجات المائية، ومن ناحية أخرى، إلى تدهور نوعية المياه.

الهدف من هذا العمل هو تقييم جودة طبقة المياه الجوفية الحرة باستخدام نموذجي التحليل (GWQI) و(NPI) اللذين تم تطبيقهما عملياً في منطقة الوادي شمال الصحراء الجزائرية، وقد استخدمنا مؤشر جودة المياه (GWQI) والنترات. مؤشر التلوث (NPI)، على أساس الري والاستخدامات المنزلية. في هذه الدراسة، تم الحصول على مجموعة شاملة من 20 عينة من مواقع مختلفة لتحليلها وتقييمها.

كشفت نتائج مؤشرات جودة المياه أن 90% من العينات تشير إلى نوعية مياه رديئة جداً إلى غير آمنة، وذات ملوحة عالية إلى عالية جداً لجميع الأغراض، كما أن 10% من العينات من منطقة الدراسة تظهر: مياه ذات نوعية جيدة ومتوسطة الملوحة للاستخدامات المنزلية والري.

تم حساب النترات (NPI) لتقييم تلوث المياه في منطقة الوادي بالنترات (NO_3). كشفت نتائج NPI أن 50% من العينات تشير إلى تلوث مرتفع إلى مرتفع جداً إذا لم يتم استخدامها وأن 50% من العينات من منطقة الدراسة تظهر تلوثاً منخفضاً إلى متوسطاً عند استخدام الري. ويرجع هذا التلوث المرتفع بالنترات لطبقة المياه الجوفية غير المحصورة المسجلة في المناطق الحضرية إلى الأنشطة البشرية، ولا سيما التخلص من النفايات في المناطق المفتوحة وتسرب مياه الصرف الصحي.

LISTE DES ABREVIATIONS

ABHS: Agence de Bassin Hydrographique Sahara

ADE: Algérienne Des Eaux

APC : Assemblai populaire communale

AEA : Alimentation en Eau d'Agriculture.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques

CI: Continental Intercalaire

CT: Complexe Terminal

DSA : Direction des Services Agricoles.

DRE : Direction des Ressources en Eau

GIRE : Gestion Intégrée de la Ressource en Eau.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONM : Office National Météorologique

Sommaire

I INTRODUCTION	3
I. 1 PRESENTATION DE LA ZONE	3
I.1.1 Historique et situation géographique	3
I.1.2 Situation géographique:.....	3
I.1.3 Aperçu sur la wilaya d'Eloued :.....	5
I.1.4 Relief d 'El oued:	5
I.1.5 Topographie de la région :.....	5
I.1.5.1 Situation topographique :	5
I. 2 GEOLOGIE REGIONALE	7
I.2.1 Stratigraphie régionale :.....	7
I.2.2 Formation de l'ère Secondaire :.....	7
I.2.2.2 Le Barrémien :	7
I.2.2.3 L'Aptien :	8
I.2.2.4 L'Albien :.....	8
I.2.2.5 Le Vraconien :.....	8
I.2.2.6 LE Cénomaniens :	8
I.2.2.7 Le Turonien :.....	8
I.2.2.8 Sénonien :	9
I.2.3 Formation de l'ère Tertiaire :	9
I.2.3.1 L'Eocène :.....	9
I.2.3.2 LE Mio-Pliocène :	9
I.2.4 Formations du Quaternaire.....	10
I. 3 Interprétation des coupes géologiques :.....	11
I.3.1 Coupe N°01 :	12

I.3.2 Coupe N°02 :	12
I.3.3 Coupe N°03 :	13
I. 4 Hydro climatologique de la zone d'étude :	14
I. 5 Conclusion:	19
II Introduction	20
II. 1 Hydrogéologie :	20
II.1.1 La Nappe phréatique :	21
II.1.2 Complexe Terminal C.T :	23
II.1.3 Nappe du Continental Intercalaire C.I :	25
II. 2 Les cartes de niveau piézométrique:	28
II. 3 La carte de niveau statique de la commune d'El Oued en 2021 :	29
II. 4 Conclusions :	30
III Introduction :	31
III. 1 Méthodologie et données utilisées :	31
III.1.1 Échantillonnage et analyses:	31
III.1.2 Cartographie hydrochimique :	33
III. 2 Calcul de l'Indice de qualité de l'eau souterraine (GWQI):	43
III.2.1 Calcul Nitrate pollution index (NPI):	44
III.2.2 Méthode statistique:	45
III. 3 Résultats et Discussion :	45
III.3.1 Statistique descriptive :	45
III.3.2 L'indice de qualité de l'eau souterraine (GWQI) :	46
III.3.3 L'indice de pollution de l'eau souterraine par les nitrates (NPI) :	49
III.3.4 Relation nitrates – chlorures :	51
III.3.5 Relation nitrates – nitrites :	52
III.3.6 Les phosphates (PO_4^{-3}) :	53
III.3.7 Analyse statistique:	53
III. 4 Conclusion:	57
IV Conclusion Générale	59

Liste des figures

Figure N°01 : Situation géographique de la zone d'étude-----	4
Figure N°02 : Carte topographique de la région de souf-----	6
Figure N°03 : Log de forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993).-----	11
Figure N°04: Coupe géologique N° 01(DROUCHE 2008).-----	12
Figure N°05: Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989) -----	13
Figure N°06: Coupe géologique N° 03(DROUCHE 2008).-----	14
Figure N°07: Etage bioclimatique d'Oued Souf -----	18
Figure N°08: récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (Khechana 2007) -----	21
Figure N°09: Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement. -----	22
(Cote Marc, 2006) -----	22
Figure N°10: Limites de l'aquifère du Complexe terminale avec les niveaux piézométrique et les sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006) -----	24
Figure N°11: Limite de l'aquifère du Continental Intercalaire avec les niveaux piézométrique et le sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006) -----	26
Figure N°12: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972) -----	27
Figure N°13: Localisation des 58 forages de réseau de drainage vertical -----	28
Nous avons traité les basses des données par l'Arc GIS 10.1 pour extrait les cartes.-----	28
On remarque que la nappe phréatique est caractérisée par l'existence de deux zones importantes:-----	28
Figure N°14: Niveau statique de la nappe phréatique de la commune d'El Oued en 2021. ----	29
Figure N°15: Échantillonnage et analyses (BRAHIMI . Y/ TAMMA.M.S - 2024) -----	32
Figure N°16 : Carte de Chlorure (Cl ⁻) des eaux souterraines de la région d'étude (2024). ---	34
Figure N°17 : Carte de Bicarbonates (HCO ₃ ⁻) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).-----	35
Figure N°18 : Carte de Calcium (Ca ⁺²) des eaux souterraines de la région d'étude (2024). --	36

Figure N°19: Carte de Magnésium (Mg^{+2}) des eaux souterraines de la région d'étude (2024). -----	37
Figure N°20: Carte de Conductivité électrique (CE) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).-----	38
Figure N°21 : Carte de pH des eaux souterraines de la région d'étude (2024). -----	39
Figure N°22: Carte de T° (C) des eaux souterraines de la région d'étude (2024). -----	40
Figure N°23 : Carte de TDS des eaux souterraines de la région d'étude (2024).-----	41
Figure N°24 : Carte de Nitrates (NO_3^-) des eaux souterraines de la région d'étude (2024). --	42
Figure N°25: Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine (GWQI). -----	48
Figure N°26: Carte de répartition spatiale de l'indice de pollution des eaux souterraine par les nitrates (NPI). -----	50
Figure N°27: Concentration des nitrates et des chlorures de la zone d'étude (2024)-----	51
Figure N°28: Diagramme du nitrate versus des chlorures de la zone d'étude (2024).-----	52
Figure N°29 : Evolution du nitrate en fonction des nitrites de la nappe libre d'El-Oued (2024) -----	52
Figure N°30:Correlation des teneurs de nitrate avec celles des phosphates de nitrates de la zone d'étude (2024) -----	53
Figure N°31 : Tracé Matriciel des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe phréatiques d'El-Oued -----	54
Figure N°32: Analyse des variables dans le plan factoriel F1-F2 sans et après rotation. -----	55

Liste des tableaux

Tableau N°01: Coordonnées géographiques de la station météorologique de la région d'El Oued -----	14
Tableau N°02: Climatologie annuel moyennes des (températures, humidité, précipitations, chaleur du soleil) -----	18
Tableau N°03: Étendue et volume des ressources en eaux souterraines -----	27
Tableau N°04: Poids des paramètres utilisés dans le calcul de l'indice GWQI. -----	44
Tableau N°05: Catégorie de GWQI -----	44
Tableau N°06: Categories de NPI -----	45
Tableau N°07: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique de la région d'étude (2024) -----	46
Tableau N°08: Poids des paramètres physico-chimiques et norme de l'OMS de qualité des eaux de la nappe libre de la zone d'étude -----	46
Tableau N°09: Le pourcentage de la catégorie de l'indice de qualité de l'eau souterraine (GWQI) pour cette zone d'étude -----	48
Tableau N°10: Le pourcentage de la catégorie de l'indice de qualité de l'eau souterraine (NPI) pour cette zone d'étude -----	49
Tableau N°11: Matrice de corrélation entre les variables. -----	54
Tableau N°12: Caractéristiques de l'ACP appliquée aux données physico-chimiques de la nappe phréatique d'El-Oued (2024). -----	56

Introduction Générale

Introduction Générale

L'eau est une ressource vitale pour la vie et le développement économique. Dans de nombreuses régions, les nappes aquifères constituent une source majeure d'eau potable et d'irrigation. La région d'Eloued en Algérie ne fait pas exception, avec ses précieuses nappes aquifères. Cependant, la qualité de ces eaux souterraines est cruciale pour assurer leur utilisation sécurisée et durable. Cette étude vise à analyser et à déterminer qualitativement la composition des eaux des nappes aquifères de la région d'Eloued. En comprenant les caractéristiques physico-chimiques et biologiques de ces eaux, nous pourrons mieux évaluer leur aptitude à différents usages, ainsi que les défis potentiels liés à leur utilisation. Cette analyse approfondie fournira une base solide pour la gestion efficace et la préservation de cette ressource précieuse dans la région. Les dernières études réalisées sur la qualité des eaux de la nappe phréatique de la région d'El-Oued ont relevé que ces eaux étaient confrontées à une pollution anthropique.

A travers notre étude, nous nous sommes concentrés sur les caractéristiques de l'eau de la commune d'Eloued en termes de (Température T°C, pH, conductivité (CE), TDS, Na⁺, Cl⁻, HCO₃⁻², Mg⁺², NO₃⁻, NO₂⁻, NH₄⁺, PO₄⁻³) afin qu'elles soient représentées dans les cartes qui sont réalisées par logiciel d' Arc Gis. L'étude que nous présentons est une contribution à l'évaluation de l'état actuel de la nappe phréatique d'Eloued. Elle vise également à faire le bilan environnemental de l'utilisation des nitrates dans la région d'Eloued à travers l'évaluation de la contamination et son évolution spatiale, et évaluer la qualité physicochimique des eaux de la nappe phréatique.

Ce diagnostic permettra d'élaborer des stratégies de gestion rationnelle et ainsi contribuer au développement durable de la zone d'étude afin d'aboutir à la mise en place d'un réseau de prévention et d'alerte rapide de la pollution des eaux souterraines sur toute la nappe libre d'Eloued. Notre étude est divisée en trois chapitres:

- Le premier chapitre a été consacré à l'étude du contexte géographique et géologique de la zone d'étude en présentant les caractéristiques géologiques et climatiques.

-Le deuxième chapitre porte sur l'hydrogéologie de la couche souterraine de la zone d'étude (commune d'El- Oued).

- Le troisième et dernier chapitre est consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats. Dans cette partie il a été question de la détermination des différents polluants dégradant la qualité des eaux souterraines et de la vulnérabilité des nappes.

CHAPITRE I

**Présentation générale de la zone
d'étude**

I 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 répartie en trois zones bien distinguées qui sont les suivantes.

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

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

I. 1 PRESENTATION DE LA ZONE

I.1.1 Historique et situation géographique

Le Souf nom berbère de rivière, synonyme de (Oued). A 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, vête situation a fait que l'agglomération soit implantée à travers des entonnoirs ou cratère rendant tout aménagement planimétrique du terrain difficile, et les aménagements plus coûteux (O.N.R.G.M., 1999).

I.1.2 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(DPSB2021), 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,
- A l'est par la Tunisie,
- A l'ouest par les wilayas El-Méghaier et Touggourt,
- Au sud par la Wilaya d'Ouargla.

L'aire d'étude représente la vallée du Souf, par 7° E et 33°5N. La vallée de Souf ce 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.
- A l'est par une série de chotts.
- A l'ouest par l'Oued Righ et par la linge de palmeraie qui court de Biskra à Touggourt.

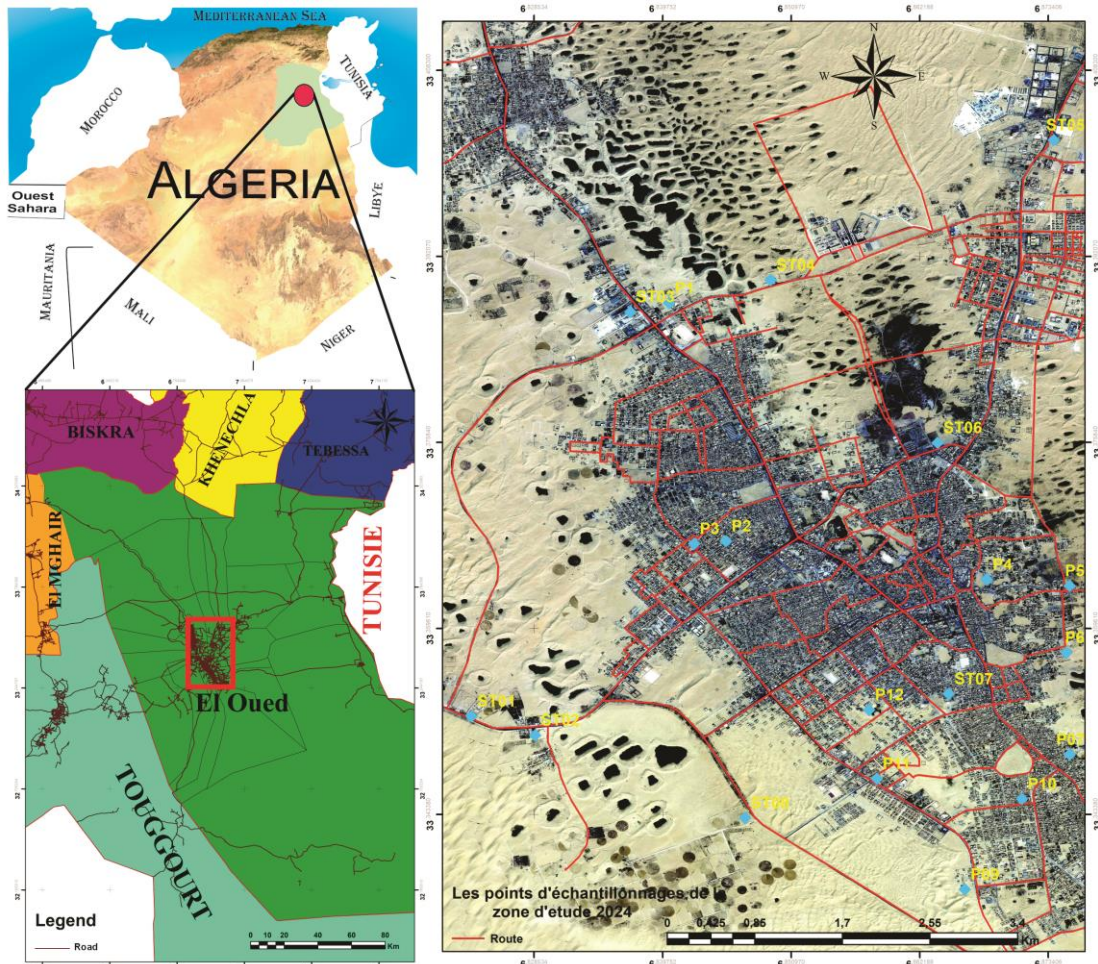


Figure N°01 : Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude situ de nord de la vallée d'oued Souf commune de El-Oued.

I.1.3 Aperçu sur la wilaya d'Eloued :

La wilaya d'Eloued occupe une superficie de 44586 km², divisé en 22 communes avec une population de 900000 habitants et une densité de 19.58hab/km² habitants au kilomètre carré. (DBSP fin 2019).

Cette population est répartie à travers 22 communes regroupées dans 10 daïras.

I.1.4 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

I.1.5 Topographie de la région :

I.1.5.1 Situation topographique :

- **Nature topographique de la région d'étude :**

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 haut se trouve à la cote 125m à la commune de Bayadha (Soualah), (Fig.02) alors que le point le plus bas se trouve à la cote 29m 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 0,0002 m/m à 0,0003 m/m) et des incidents liés à la présence des dunes. (ANRH ; 2005)

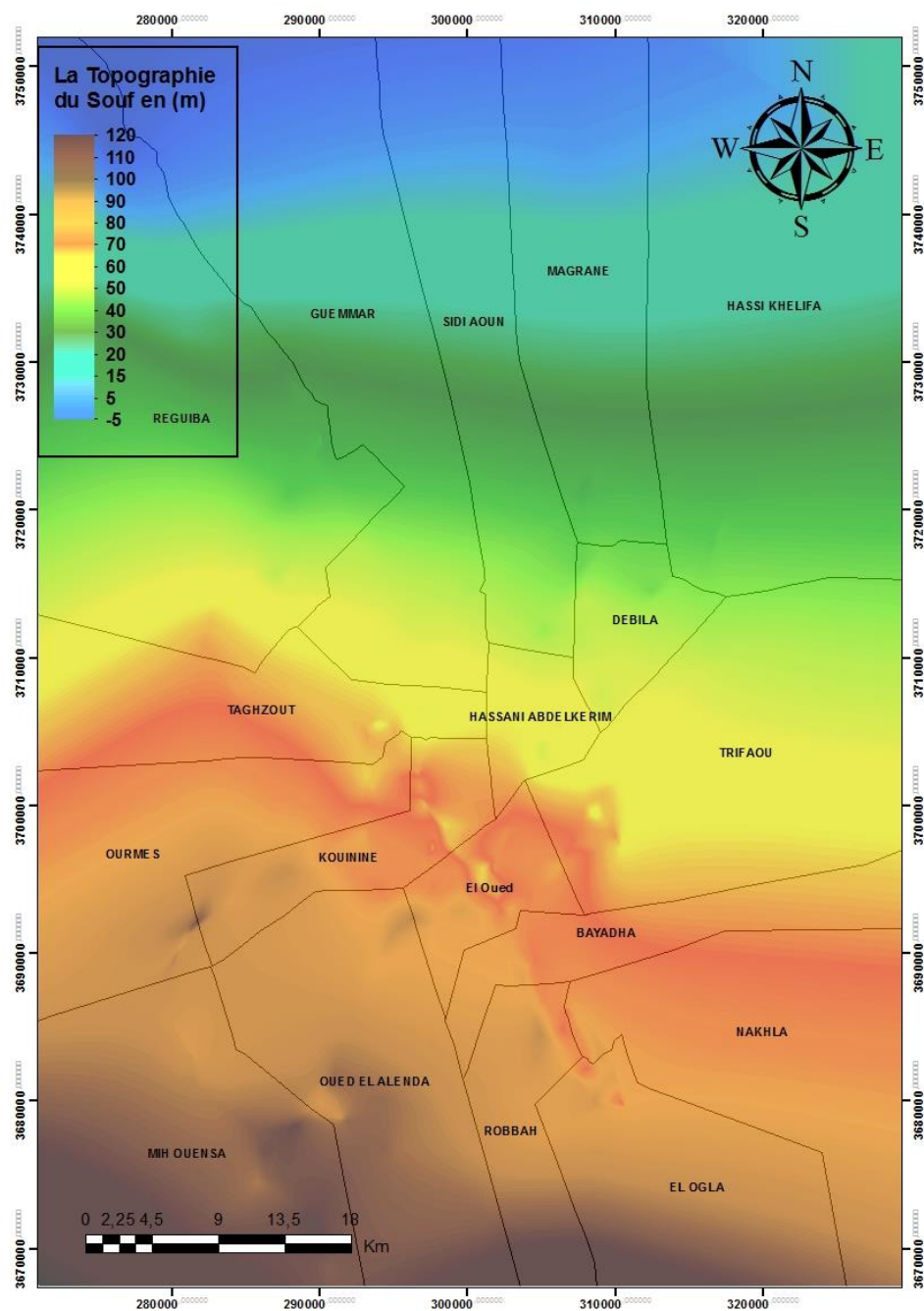


Figure N°02 : Carte topographique de la région de souf

L'altitude moyenne de la région est de 61 m et dénonce 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).

I. 2 GEOLOGIE REGIONALE

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 crétacé: 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 grés 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.

I.2.1 Stratigraphie régionale :

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

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

I.2.2 Formation de l'ère Secondaire :

I.2.2.2 Le Barrémien :

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

I.2.2.3 L'Aptien :

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

I.2.2.4 L'Albien :

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres.

I.2.2.5 Le Vraconien :

C'est une zone de transition en tire l'Albien sableux et le Cénomanién argilocarbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques.

On rencontre aussi des sables avec passages des grés à ciment calcaires. Cet étage constitue la couverture de l'albien par des niveaux argileux.

L'épaisseur de cet étagedans toute la zone d'étude varie entre 250 m et 300 m.

I.2.2.6 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 de d'Anhydrites.

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

I.2.2.7 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 sont épaisseur varie d'un endroit à un autre, elle dépasse parfois 650 m. **Bensaddik / Aouadi (2014)**

I.2.2.8 Sénonien :

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

- **Sénonien lagunaire :**

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

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

- **Sénonien carbonaté :**

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

I.2.3 Formation de l'ère Tertiaire :

I.2.3.1 L'Eocène :

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

I.2.3.2 LE Mio-Pliocène :

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

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

a.NIVEAU ARGILEUX:

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

b.NIVEAU GRESO-SABLEUX

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

c.NIVEAU ARGILO-SABLEUX

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

d.NIVEAU SABLEUX

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

I.2.4 Formations du Quaternaire

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

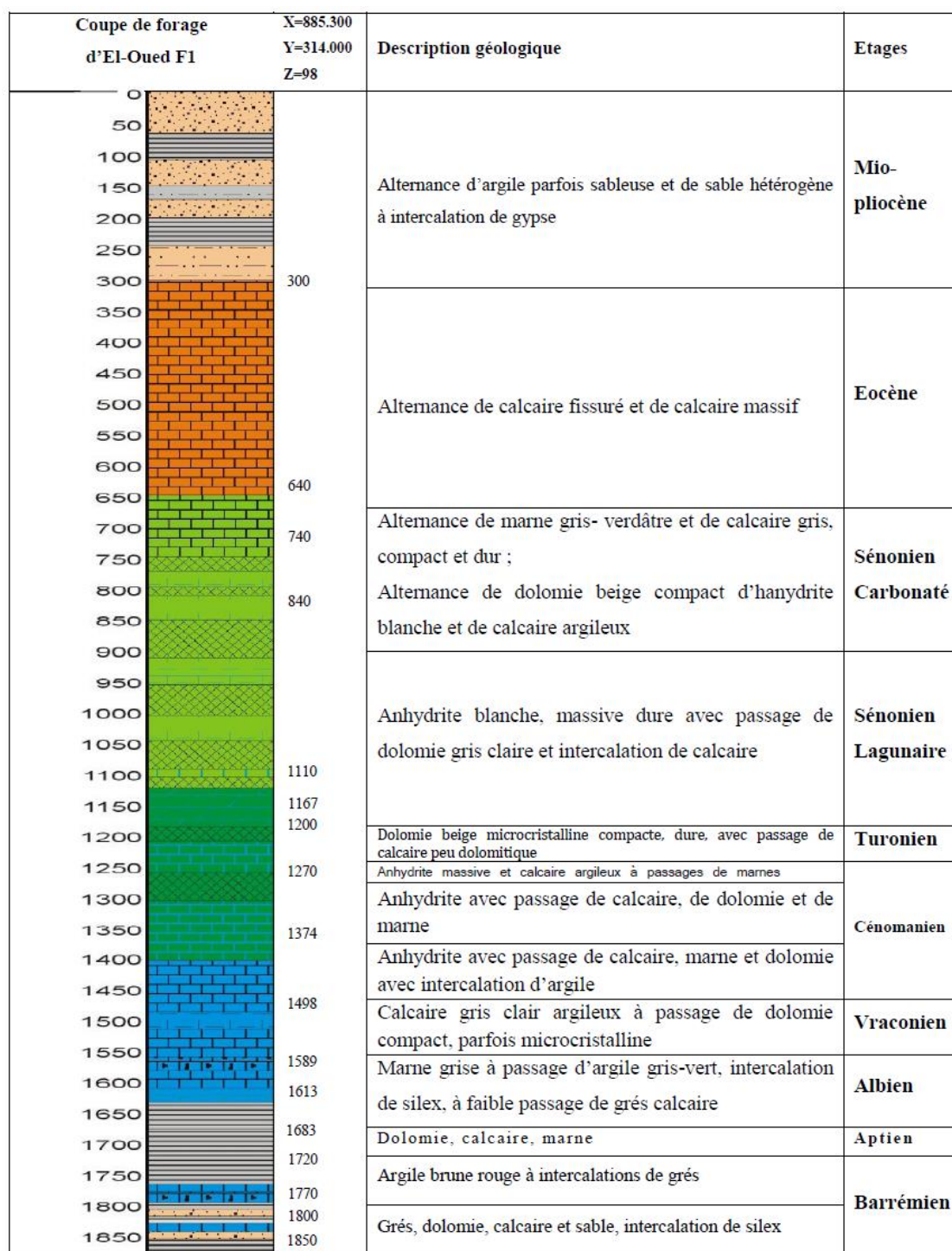


Figure N°03 : Log de forage F1 à l'Albien (coupe d'après ANRH 1993).

I. 3 Interprétation des coupes géologiques :

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

I.3.1 Coupe N°1 :

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

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

Coupe corrélatrice extraite à partir des logs lithologiques des forages.

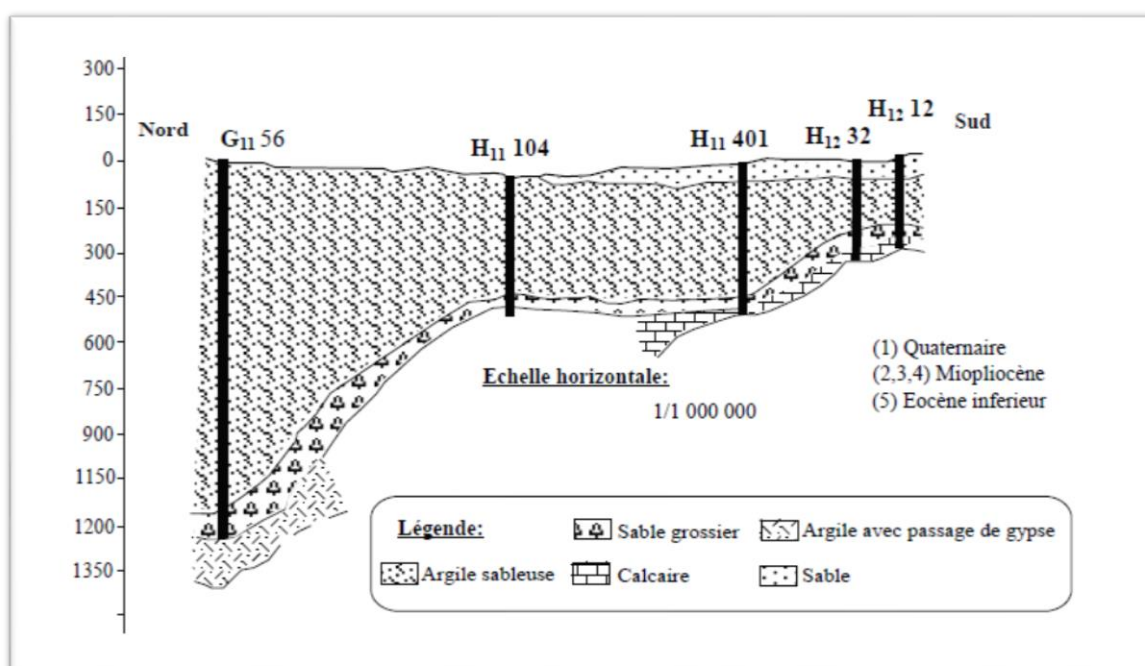


Figure N°04: Coupe géologique N° 01(DROUCHE 2008).

I.3.2 Coupe N°2 :

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

Les formations miopliocènes sont caractérisées par une épaisseur considérable (plus de 200m).

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

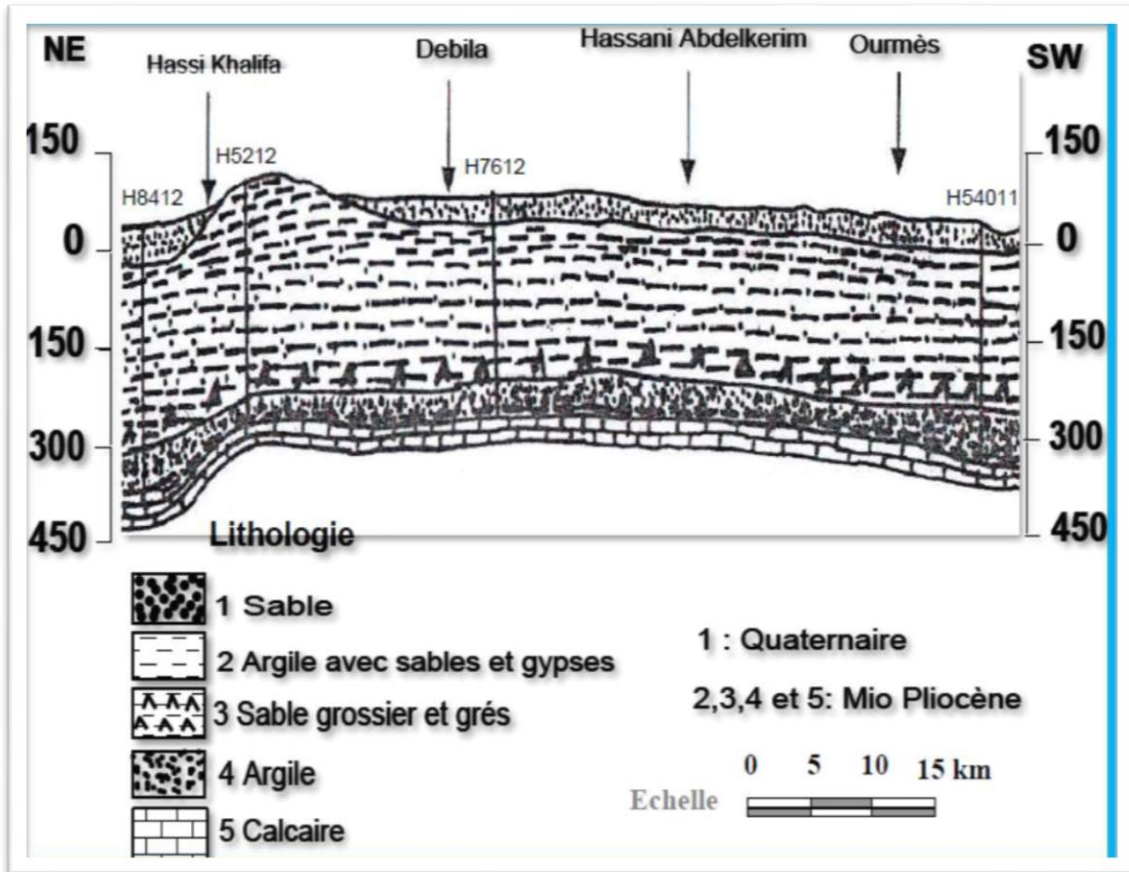


Figure N°05: Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)

I.3.3 Coupe N°03 :

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

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

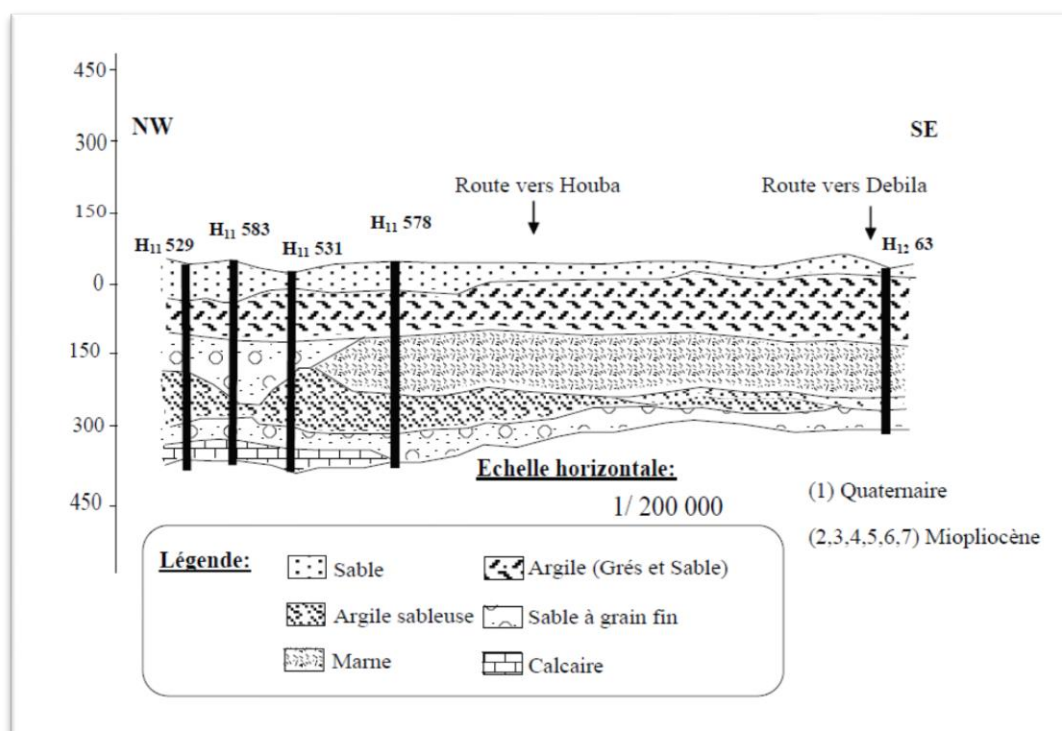


Figure N°06: Coupe géologique N° 03(DROUICHE 2008).

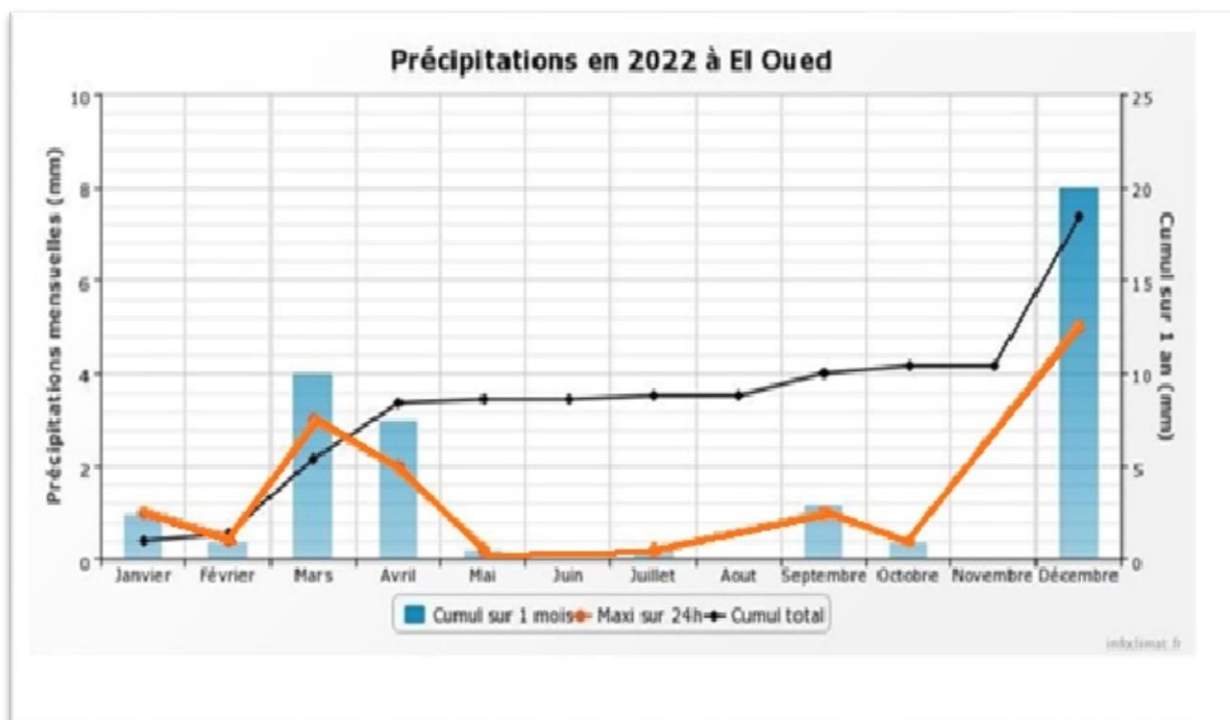
I. 4 Hydro climatologique de la zone d'étude :

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

Dans ce chapitre, nous allons travailler avec une série de données climatologiques 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	13 04 30	77	6°52'32"E	33°20'20"N

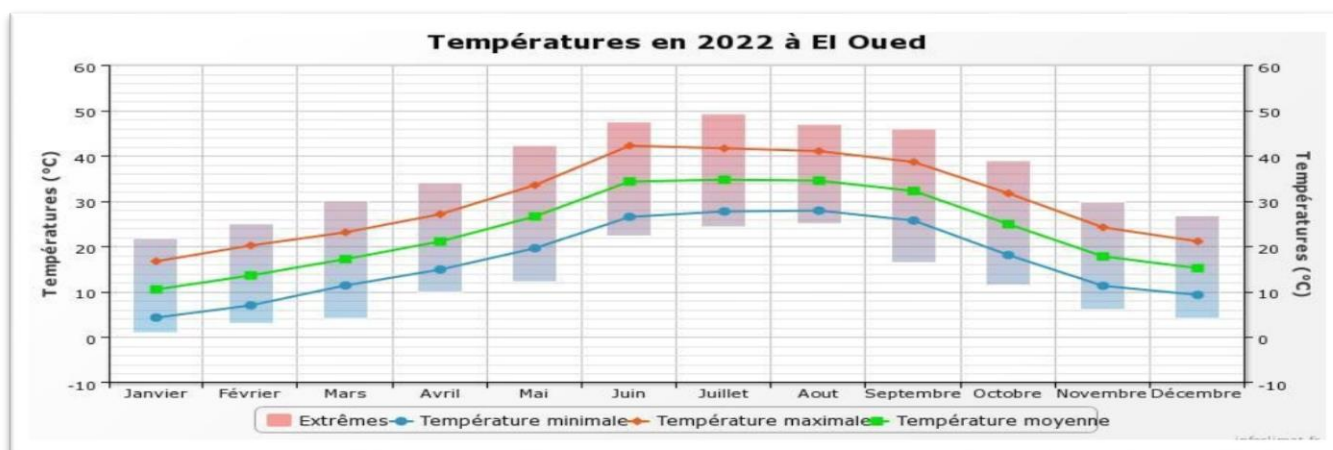


a) Les Précipitations :

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 ou des précipitations importantes ont provoqués de fortes inondations).

b) 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.



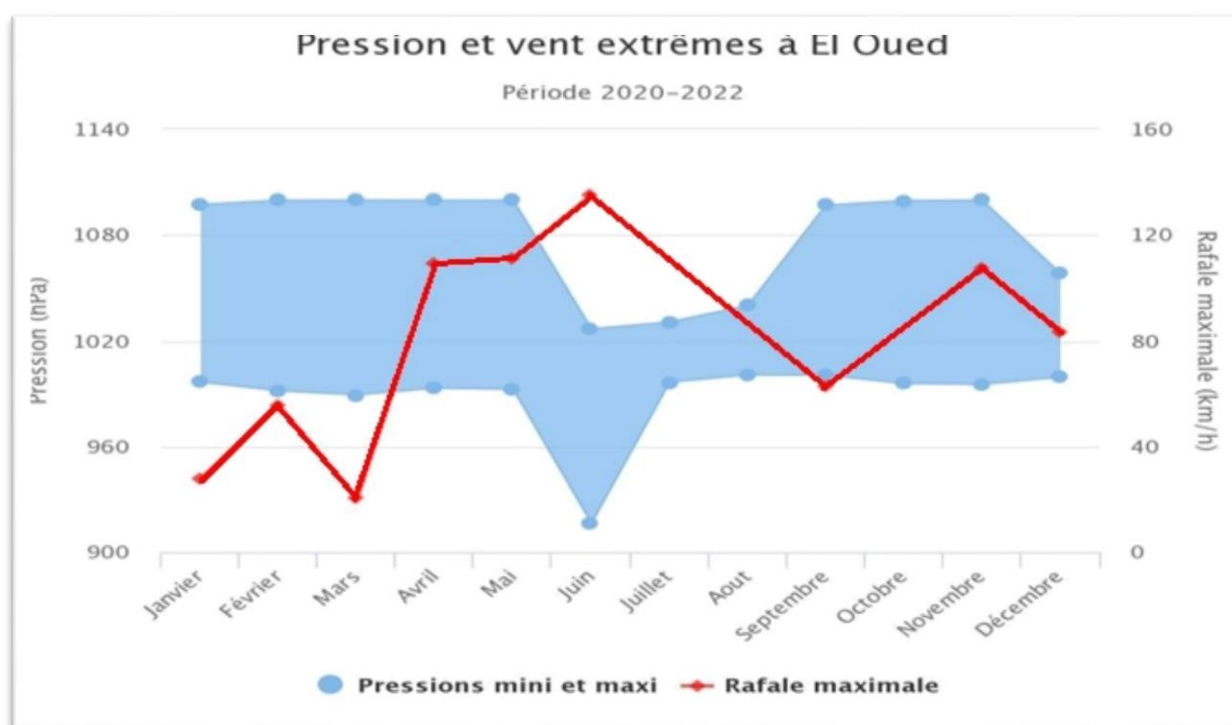
c) Les Vents :

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

La direction dominante est Nord-Est, à l'exception des mois d'hivers dont la direction est Sud-Ouest. Le sirocco (Chihili) présente le vent caractérisant la saison d'été souffle fréquemment dans la région, prenant un sens Sud-Nord et jeter des courants d'air chaud parfois avoisiner des vagues de sables.

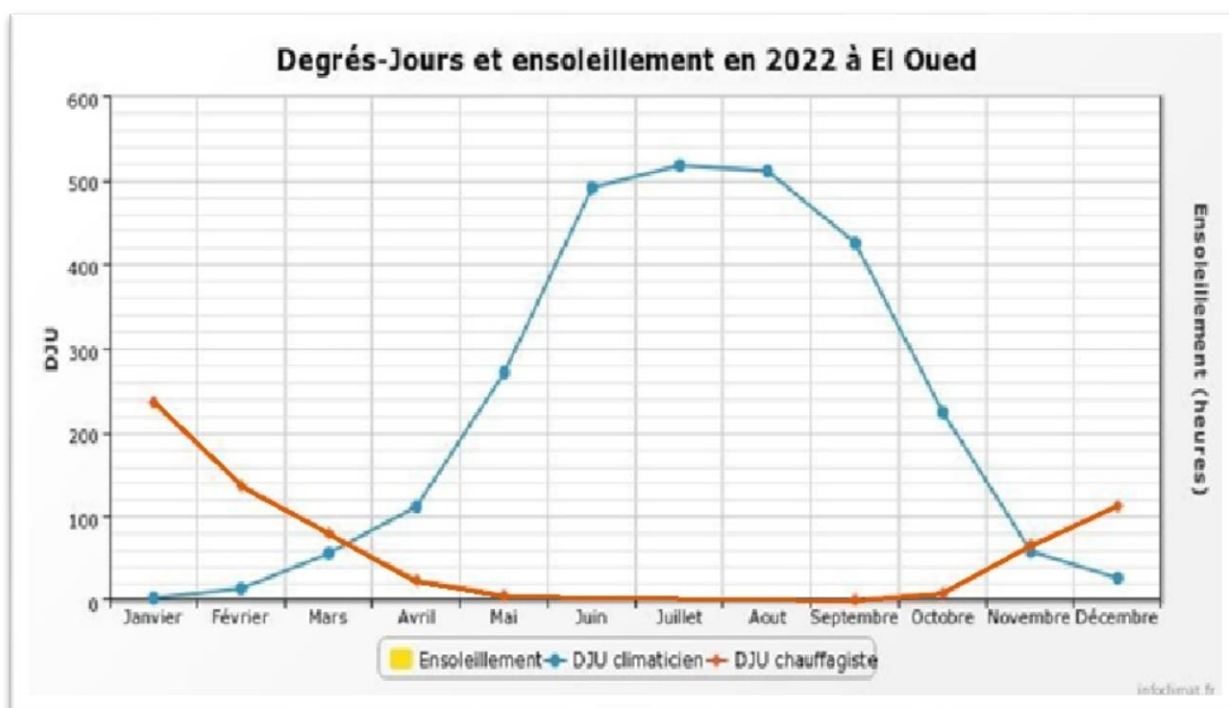
Il faut aussi parler des vents de sables qui ont leurs saisons de prédilection entre février et avril (durant le printemps). Mais heureusement, les véritables tempêtes restent très rares.

Dans wilaya d'El oued la vitesse du vent moyenne varie entre 15,27Km/h enregistrée durant le mois de décembre et 17,73 m/s pour le mois d'avril, Les vitesses du vent moyennes annuelles est 17,05 m/s.



d) L'Evaporation potentielle (ETP) :

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



e) 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 caractérisant le reste de l'année.

CHAPITRE I :REPRESENTATION DE LA REGION

Tableau N°02: Climatologie annuel moyennes des (températures, humidité, précipitations, chaleur du soleil)

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
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 minimale 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
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
Précipitations (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%
Jours de pluie (jrée)	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Heures de soleil (h)	8,8	9,6	10,5	11,5	12,4	12,9	12,7	12	11,1	10,1	9,2	8,6

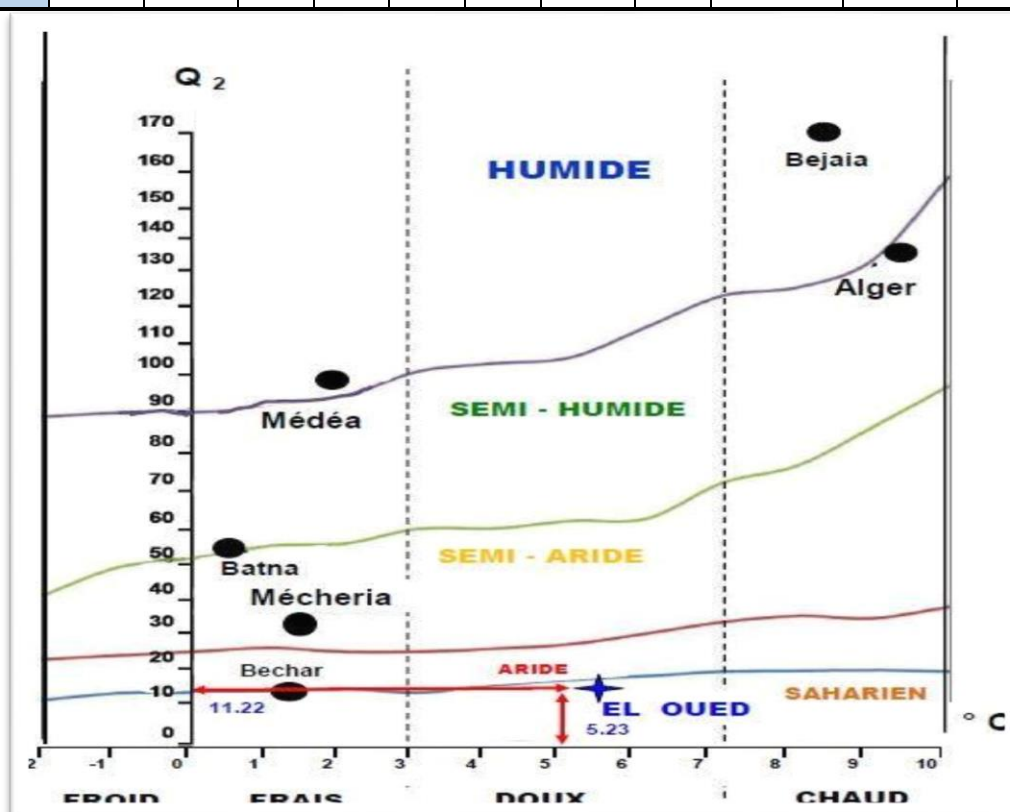


Figure N°07: Etage bioclimatique d'Oued Souf

I. 5 Conclusion:

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

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

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

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

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

CHAPITRE II :

Hydrogéologie de la zone d'étude

II Introduction

La séparation de l'hydrogéologie de l'aquifère dans la commune de la vallée est considérée comme une partie importante de l'étude des ressources en eau de la région. Ce chapitre vise à comprendre la répartition et les caractéristiques des eaux souterraines dans la région, y compris le débit de l'eau, la qualité de l'eau et les effets des changements environnementaux et humains sur l'aquifère. Les facteurs affectant la formation de l'aquifère, tels que le sol, les roches et la topographie, seront abordés, ainsi que les utilisations des eaux souterraines et les défis liés à leur gestion et à leur protection.

II. 1 Hydrogéologie :

Les études hydrologiques modernes ont permis d'identifier les différents aquifères, les niveaux piézométriques, leur géométrie et la direction des lignes d'écoulement des eaux souterraines. Elles ont également contribué à l'étude des caractéristiques hydrodynamiques de l'eau et du mode d'approvisionnement. Et elle nous a expliqué ce qui suit :

- Des cartes de substratum de l'aquifère.
- Des coupes hydrogéologiques générales, régionales et locales.
- Des cartes piézométriques avec sens des écoulements des eaux.
- L'évaluation des caractéristiques de l'aquifère/ouvrage de captage (Débit spécifique, débit critique,...).
- La détermination des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère (Transmissivité, Perméabilité, Porosité efficace,...)

L'étude hydrogéologique générale a montré l'existence de trois horizons aquifère de bas en haut :

Le Continental Intercalaire (CI) qui s'étend sur une superficie de 600000 km², limité dans sa partie ouest par Bechar et Touat, à l'Est il s'étend sur le territoire Libyen, au Sud il est limité par les affleurements du primaire et du socle et enfin au Nord par l'accident Sudatlasique.

Le Complexe Terminal (CT) s'étend sur une superficie de 350000 km². Il est constitué de formations de la fin du Crétacé supérieur (secondaire) jusqu'à la fin du Mio-Pliocène (Tertiaire);(D.H.W, 2005).

Cet horizon aquifère est constitué de bas en haut par les formations calcaires et dolomies de l'Eocène (aquifère des calcaires), de la deuxième nappe des sables du Pontien et de la première nappe des sables mio-pliocènes.

La nappe superficielle (libre) contenue dans les formations continentales du Quaternaire, ce sont des sables fins localement intercalés d'argiles sableuses et gypseuses lenticulaires. Elle couvre toute la région d'étude

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

Figure N°08: récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (Khechana 2007)

II.1.1 La Nappe phréatique :

La nappe phréatique partout dans le Souf, repose sur le plancher argilogypseux du Pontien supérieur. La zone d'aération qui sépare la surface de cette eau de la surface du sol, ne dépasse pas une profondeur moyenne de plus de 40 m de sable non aquifère (Voisin A.R,2004).

L'alimentation de la nappe phréatique dans la zone d'étude est assurée par l'infiltration des eaux de forages profonds (CT et CI) et par les rares et faibles précipitations typiquement sahariennes.

Les études passées montrent d'une manière générale, comme d'ailleurs dans tout le Bas-Sahara que le sens de l'écoulement des eaux de la nappe libre suit celui de la nappe du Complexe Terminal, c'est-à-dire du Sud vers le Nord (Fig.10).

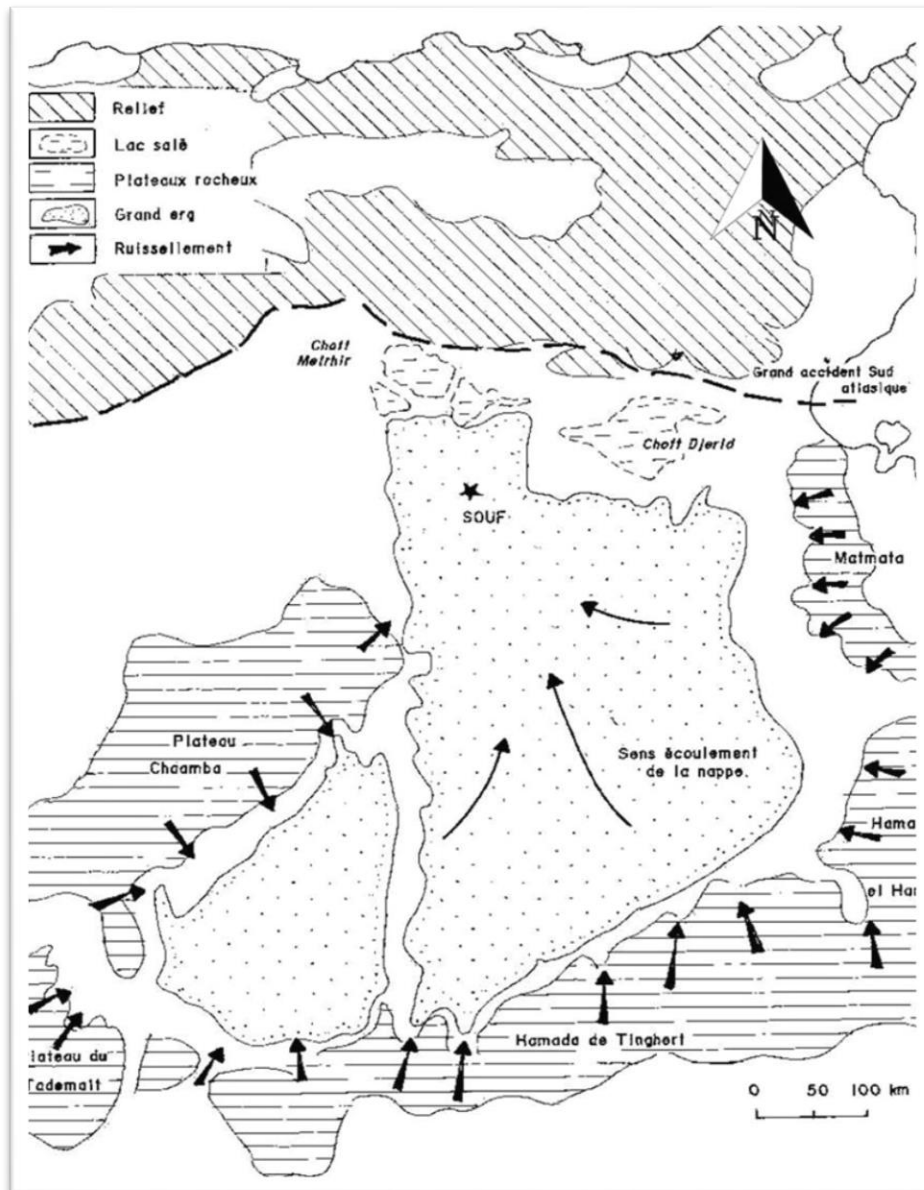


Figure N°09: Zone d'alimentation de la nappe phréatique et le sens d'écoulement.

(Cote Marc, 2006)

L'aquifère quaternaire du Souf présente une épaisseur moyenne de 40 m. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au Nord-ouest de la région de Foulia et se situe à moins de 10 m de profondeur à l'extrémité Nord-est de la région d'étude. Cette nappe a engendré un problème néfaste pour l'environnement dans certaines zones de la vallée.

II.1.2 Complexe Terminal C.T :

Le terme « Continental terminal » désignait les formations continentales, argileuses et sableuses du Miopliocène. Mais d'après BEL et DEMARGNE (1966) : « La nappe du Continental Terminal contenue dans les sables du Miopliocène est plus ou moins en relation avec les nappes de l'Eocène, du Sénonien et du Turonien, de sorte qu'à l'échelle de l'ensemble du Sahara, on peut considérer que ces différents niveaux forment une seule et même nappe, celle du Continental Terminal, par opposition. Cette du Continental Intercalaire».

C'est avec le projet ERESS que l'on verra apparaître la notion du «Complexe Terminal», appellation publiée pour la première fois par BEL et CUCHE (1969) : ce terme de « nappe du Complexe Terminal » qui groupe sous une même dénomination plusieurs aquifères situés dans des formations géologiques différentes, a été retenu car ces nappes font bien partie d'un même.

Les intercommunications entre Sénonien, Eocène et Miopliocène sont évidentes sur l'ensemble du Bassin, à l'exception de la région des Chotts où l'Eocène moyen et supérieur imperméable vient s'intercaler. La nappe turonienne est plus individualisée par suite de la couverture imperméable du Sénonien lagunaire. Cependant, ces niveaux concordent avec ceux du Sénonien ou du Miopliocène sur la bordure du bassin.

Les terrains constitutifs du Complexe Terminal s'étendent sur une superficie de 350 000 km² d'environ (Fig.II.8) en Algérie et en Tunisie couvrant ainsi essentiellement la majeure partie du bassin oriental et l'ensemble du Sahara septentrional, depuis la Saoura à l'Ouest jusqu'au Graben de Hun (et même jusqu'au Golfe de Syrte) à l'Est, depuis l'accident Sud-Atlantique au Nord jusqu'au flanc Nord des plateaux de Tademaït et du Tinhert en Algérie, de Gargaf (Nord du Fezzan) en Libye. Son extension longitudinale est donc au moins égale à celle du Continental Intercalaire (1600 km), tandis que sa hauteur dans le sens Nord-Sud est plus réduite (600 km) (BRL-BNEDER, 1992).

L'écoulement dans le bassin Occidental se produit dans des zones d'affleurement du piedmont vers le Sud (limite Sud du Grand Erg et zone d'affleurement du Continental Intercalaire).

A l'extrême Ouest, une partie de cet écoulement est interceptée vers le sillon de la Saoura. Et à partir de la dorsale du M'Zab, l'ensemble de l'écoulement converge vers la zone des Chotts (c'est-à-dire qu'il se renverse et s'effectue du Sud vers le Nord sous le Grand Erg Oriental). (khechana2014).

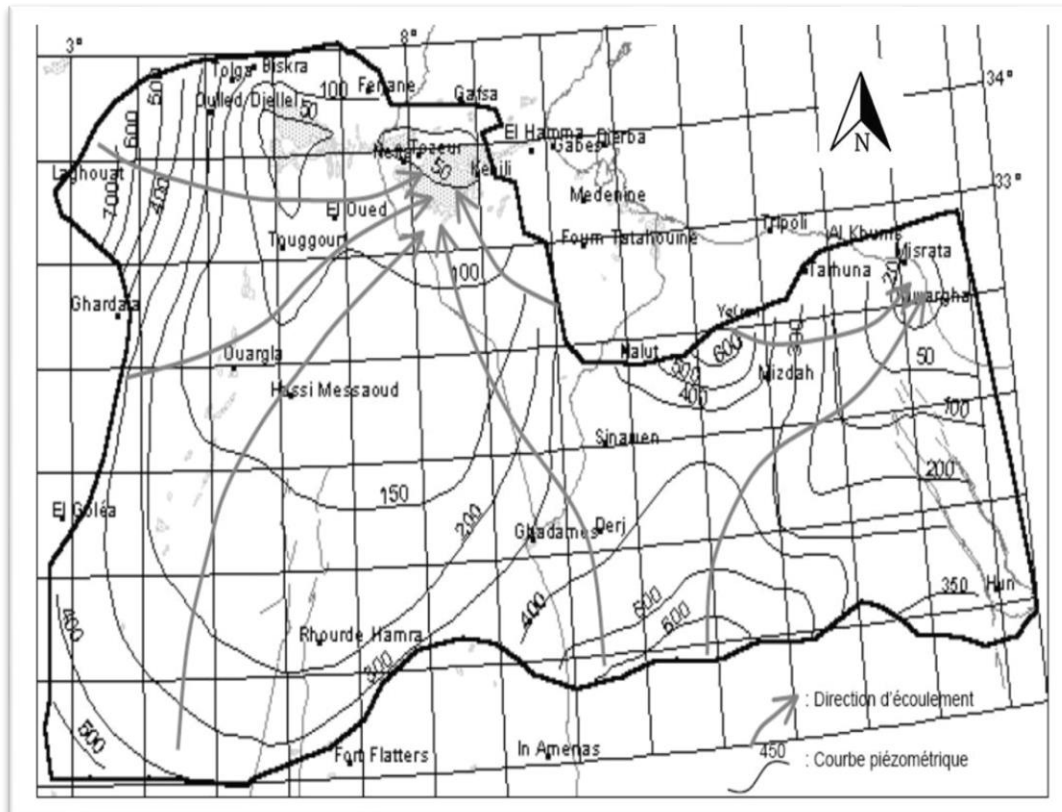


Figure N°10: Limites de l'aquifère du Complexe terminale avec les niveaux piézométrique et les sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)

Dans le Sud tunisien et en Libye cette direction d'écoulement vers le Nord-Ouest puis vers le Nord se poursuit, avec un fort gradient en Libye par suite de la réduction de transmissivité du réservoir (BRL-BNEDER, 1992).

D'après Baba SY (2005), les nappes du Complexe Terminal sont essentiellement alimentées sur les bordures relativement arrosées du bassin, par infiltration directe sur les affleurements calcaires (Sénonien, Eocène inférieur, Turonien), ou à travers des nappes d'inféro-flux des oueds : bordure Sud- Atlasique, M'Zab, JebelTebaga, Dahar, JebelNefousa.

Dans les deux grands ergs (Occidental et Oriental), par infiltration de pluies exceptionnelles à travers des formations dunaires perméables (BRL-BNEDER, 1992). Et à l'Est du Djérid, la partie nord de la "chaîne" des Chotts est considérée comme source de recharge potentielle.

Les zones d'exutoire sont principalement centrées sur les Chotts Algéro- Tunisiens et sur le Golfe de Syrte, où les nappes sont artésiennes sous couverture semi perméable peu épaisse (Fig.11).

Les sources constituent également un autre exutoire. La plupart d'entre elles ont aujourd'hui disparu à cause de la baisse du niveau des nappes, et les seules qui subsistent, se localisent dans les chotts.

Le premier forage profond artésien de prospection fut exécuté en 1953 à Sif El Menadi (90 Km N.O d'El Oued). Foré à 435 m de profondeur, il a débité quelques 4 m³ par minute et a permis la première plantation de palmiers irrigués (Najah A., 1970).

Dans la région du Souf, l'eau jaillit depuis le printemps 1956 d'un forage exécuté à El-Oued, à près de 300 m de profondeur; le débit est assez faible (3,3 litres/seconde) et la pression au sol est assez réduite (+2,4 mètres) (Voisin A.R, 2004).

Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes. Elles englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. En effet, il est possible d'y distinguer trois corps aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables.

Ces trois corps sont représentés par les calcaires et les dolomies du Sénonien et de l'Eocène inférieur, par les sables, les grès et les graviers du Pontien, et par les sables du Mio- Pliocène. (khechana2014)

II.1.3 Nappe du Continental Intercalaire C.I :

On appelle du " Continental Intercalaire " englobe au sens large l'ensemble des dépôts sédimentaires d'un long épisode continental intercalé entre les deux cycles marins du Paléozoïque et du Crétacé supérieur.

A cette définition stratigraphique, qui présente l'inconvénient d'englober des épisodes lagunaires, voire franchement marins, nous préférons emprunter la définition hydrogéologique plus classique d'un continental intercalaire au sens strict réduit aux seuls dépôts clastiques (argilo-gréseux) véritablement continentaux constituant un réservoir plus ou moins homogène rempli d'eau douce.

Ces dépôts, d'âge Crétacé inférieur, recouvrent en discordance des terrains d'âges variés allant du toit du Primaire à l'Ouest (le mur du Continental Intercalaire correspondant ici avec la discordance hercynienne) au toit du Néocène à l'Est.

Le toit du réservoir correspond à la base du Cénomaniens argileux à l'Ouest, de l'Albien argileux à l'Est.

Le Continental Intercalaire constitue le réservoir profond du Sahara septentrional. Il s'étend sur plus de 600 000 km² sur les seuls territoires algériens et tunisiens, depuis l'accident Sud-atlasique au Nord jusqu'aux affleurements du Tidikelt et du rebord méridional du Tihert au Sud. Limité à l'Ouest selon un axe Béchar - Reggane, sa prolongation vers l'Est en Libye sous la Hamada al Hamra jusqu'au Graben de Hon couvre encore quelques 250 000 km² supplémentaires (BRL-BNEDER, 1992).

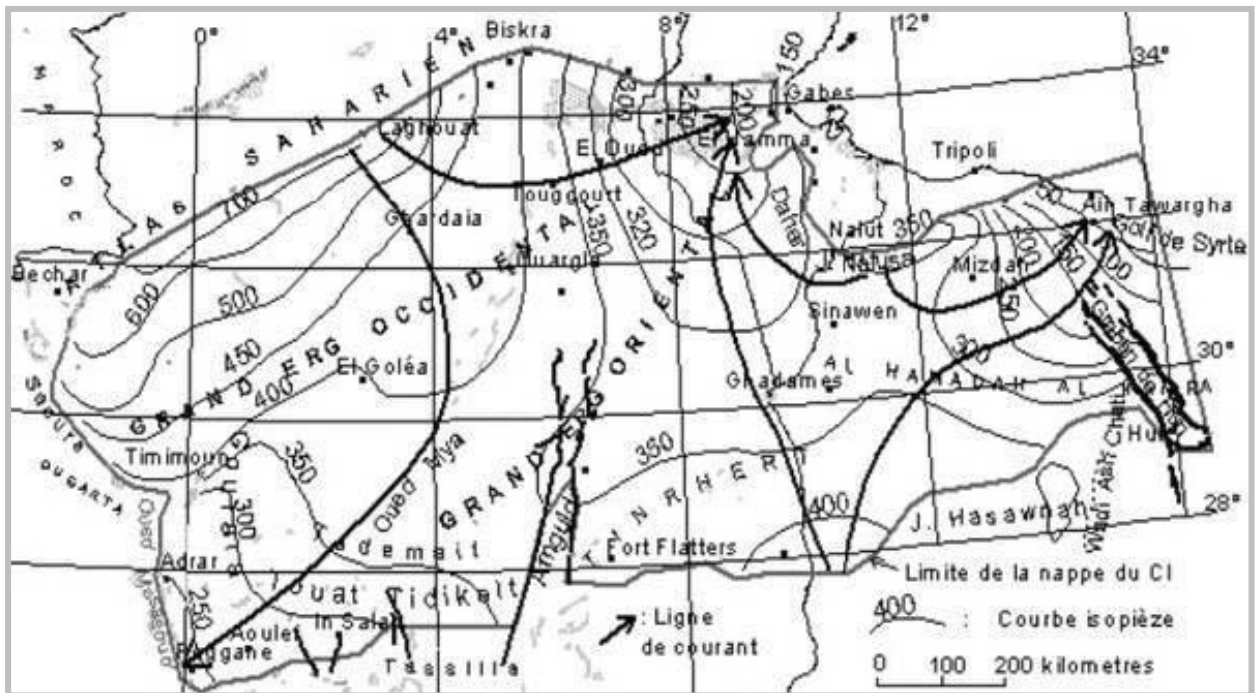


Figure N°11: Limite de l'aquifère du Continental Intercalaire avec les niveaux piézométrique et le sens d'écoulement (Baba SY et al., 2006)

Baba SY et al., (2006) met en évidence les zones d'alimentation qui sont:

- a) piémont sud atlasique au Nord-Ouest, b) Tinrhert au Sud, c) Dahar à l'Est, d) JebelNafusa au Nord-est, e) JebelHassawna au Sud, où la nappe du Cambro-Ordovicien est drainée vers le Nord par la nappe du Continental Intercalaire (Fig.12).

L'exutoire naturel principal de l'aquifère est situé en Tunisie. Il consiste en des remontées verticales par failles dans la zone du Chott Fedjaj et grâce à un écoulement vers la nappe de la Geffara tunisienne par l'intermédiaire des failles d'El Hamma et de Medenine

Les bordures occidentales et méridionales du Tademaït constituent également une zone d'exutoire naturelle importante, probablement jalonnée anciennement par des sources, dont les foggaras ont pris la relève.

L'eau non captée s'évapore dans un chapelet de sebkhas qui occupent le fond des dépressions du Gourara, du Touat et du Tidikelt. Par ailleurs, des transferts verticaux à partir du Continental Intercalaire vers le Complexe Terminal existent peut-être à la faveur des fractures qui jalonnent la dorsale d'Amguid - El Biod. Sur le reste du domaine, mis à part la zone de communication possible avec le Complexe Terminal sur le Grand Erg Occidental (Fig. 12), le toit de la formation, constitué d'une épaisse couche d'argile et d'anhydrite, est parfaitement imperméable et isole complètement les deux réservoirs, L'exploitation du Continental

Intercalaire s'est d'abord effectuée, depuis de longs siècles des exutoires artificiels, par le système traditionnel des foggaras, introduit sur la bordure du plateau du Tademaït dès le Xe siècle (UNESCO, 1972a ; BRL-BNEDER, 1992).

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur. C'est un système aquifère multicouche dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m. Elle est exploitée par trois forages artésiens.

La commune d'El-Oued exploite cet aquifère par deux forages artésiens pour l'AEP d'un débit cumulé de 340 l/s et une température avoisinant les 70 °C.

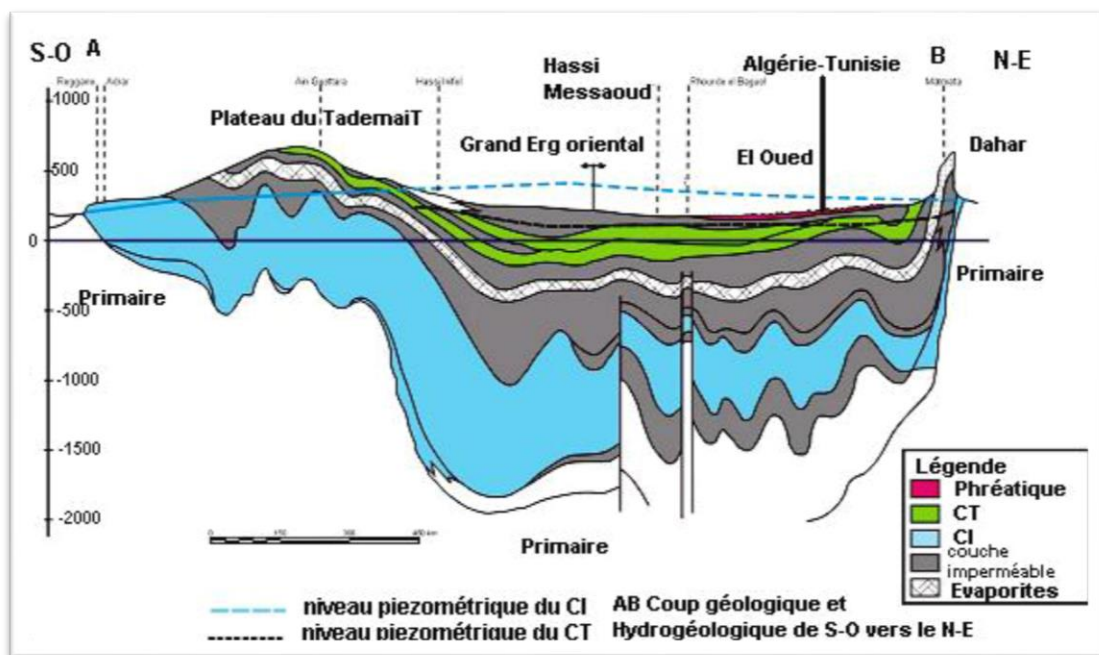


Figure N°12: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)

Tableau N°03: Étendue et volume des ressources en eaux souterraines

Lanappe souterraine	La superficiel(l'étendue)	Le volume	Le temps de renouvellement
Lanappe phréatique	250 000 km ²	--	6 000 ans
Lanappe du complexe terminal	350 000 km ²	--	--
Lanappe du continental intercalaire	600 000 km ²	60 000 .10 ⁹ m ³	70 000 ans

Source: ANRH2005

II. 2 Les cartes de niveau piézométrique:

le basses des données qu'on a utilisées est composée par 58 forages des drains verticales de l'office national d'assainissement d'El Oued:

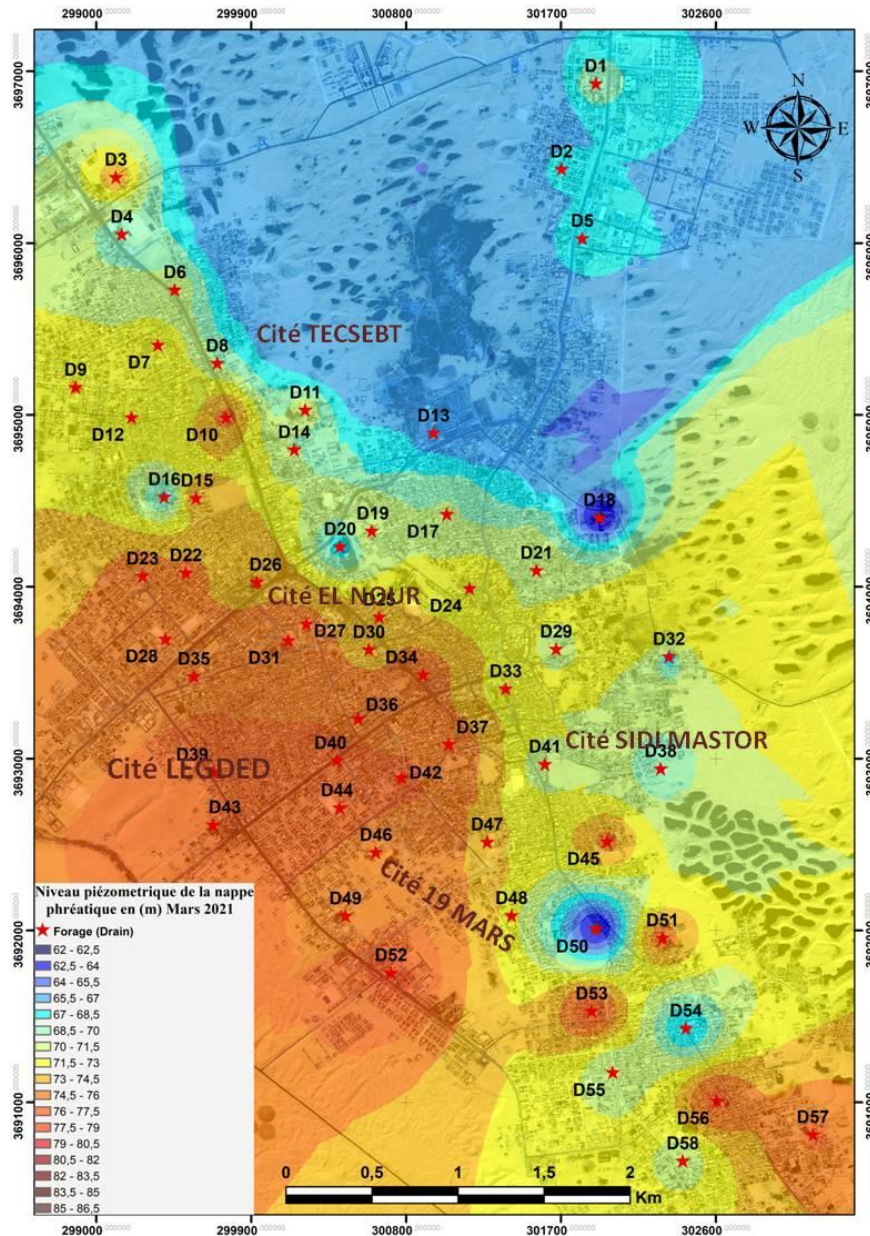


Figure N°13: Localisation des 58 forages de réseau de drainage vertical

Nous avons traité les basses des données par l'Arc GIS 10.1 pour extrait les cartes.

On remarque que la nappe phréatique est caractérisée par l'existence de deux zones importantes:

- Un dôme piézométrique situe dans le Sud-Ouest de la commune d'E Oued présenté par l'intervalle piézométrique 76 à 77.5m; donc on peut considérer cette zone comme une source d'alimentation de la nappe phréatique.

- Zone Chotteuse située dans la partie Nord est caractérisée par d'une dépression piézométrique inondée allant entre 62 m et 62.5 m.

Le sens d'écoulement de la nappe phréatique de la ville d'El-Oued est généralement du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

II. 3 La carte de niveau statique de la commune d'El Oued en 2021 :

Pour suivre l'évolution de la nappe phréatique, nous avons utilisé les mesures de niveau statique qui ont été déjà fait en mars 2021 les mesures de niveau statique de Dr MILOUDI A. après la mise en marche de réseau de drainage vertical. Elles nous ont permis d'établir une carte de niveau statique des eaux de la nappe phréatique en 2021.

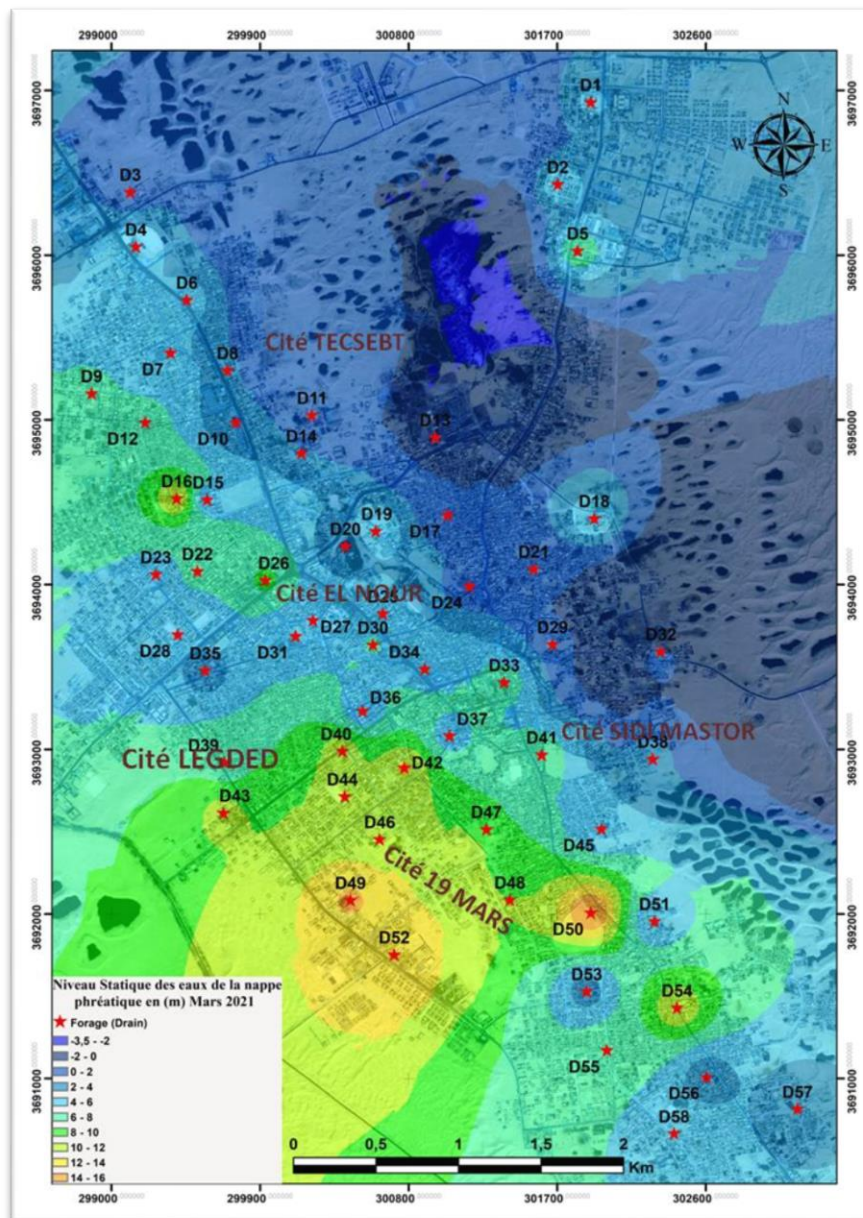


Figure N°14: Niveau statique de la nappe phréatique de la commune d'El Oued en 2021.

La carte des niveau statique de la commune d'El Oued nous indique que le Niveau statique plus rabatte de la niveau précédente enregistrée en 2024 d'environ D49 et D52, à cause de les irrigations agressifs .Il y a des zone inondée d'environ D13 et D32.

II. 4 Conclusions :

Le bassin sédimentaire du désert du Nord est considéré comme une dépression topographiquement importante. Il s'agit d'une zone étendue et située sous un bassin structural sous la forme d'un synclinal asymétrique. La région de Oued Souf est considérée comme faisant partie de ce bassin. Le centre de la tranchée est caractérisé par de grands événements tectoniques presque verticaux.

La stratigraphie de la région est caractérisée par la formation de séries sédimentaires allant du Crétacé inférieur jusqu'au Quaternaire .

Les formations récentes du Quaternaire forment l'aquifère détritique de la nappe superficielle, cet aquifère est sableux à gréseux parfois il devient gypseux et argileux .

Ces dernières formations sont localisées particulièrement dans la partie nord-est du terrain où elles se terminent par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

Selon la coupe d'un forage de l'Albien, les principaux étages repérés dans cette région sont : le Barrémien, L'Aptien, L'Albien, Le Vraconien, Le Cénomaniens, Le Turonien, Le Sénonien, L'Eocène et Le Mio pliocène. Parmi ces étages, seuls le Cénomaniens et l'Eocène jouent le rôle d'écran imperméable.

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

La nappe phréatique représentait la source principale d'irrigation d'importantes palmeraies, elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui sont en nombre de 10000 puits (BG, 2001) , et cette nappe a engendré un problème néfaste pour l'environnement dans certaines zones de la vallée d'El Oued.

L'importance de les aquifères CT et CI représente à la satisfaire des besoins en eaux qui sont provenus de l'augmentation de la population et l'extension des cultures après le rabatement de niveau de la nappe traditionnelle.

CHAPITRE III :

**Evaluation qualitative des eaux de la
nappe libre dans un milieu urbain**

III Introduction :

Le système aquifère de la plaine d'El-Oued renferme la principale ressource pour l'approvisionnement en eau potable et l'irrigation agricole, dans un contexte de stress hydrique agressive par la rareté des eaux de surface et une diminution des apports pluviométrique. La diminution des réserves de ce système est un fait indiscutable corroboré par les rabattements importants enregistrés dans divers parties de la région et cela depuis une dizaine d'année.

De plus, la qualité de cette ressource a été affectée et devient actuellement une préoccupation majeure pour les gestionnaires de l'eau et la population locale. Cette détérioration de la qualité s'est traduite par des taux élevés de quelques éléments physico-chimiques qui dépassent parfois les standards nationaux (normes Algériennes) ou internationaux (normes OMS) relative à l'eau potable. Cette dégradation de la qualité est le résultat de plusieurs facteurs et notamment ceux liés l'intensification des activités agricoles et l'utilisation des fertilisants, la prolifération des rejets d'eau usées non épurées et des décharges sauvages.

Ce travail vise à estimer la qualité des eaux souterraines de l'aquifère plio-quaternaire (aquifère superficiel). Dans la présente étude on utilise l'indice de pollution des eaux souterraine (NPI) et l'indice GWQI (Groundwater Quality Index).

La cartographie de cet indice met en lumière la répartition spatiale de ces classes, afin de cibler les zones où l'eau ne convient pas à la consommation humaine. Les cartes thématiques finales de distribution de NPI et GWQI ont été préparées à l'aide du système d'information géographique SIG.

III. 1 Méthodologie et données utilisées :

III.1.1 Échantillonnage et analyses:

Dans le cadre de la surveillance qualitative des eaux de l'aquifère plio-quaternaire, des prélèvements sont effectués sur plusieurs puits répartis sur toute la plaine d'El-Oued et captant uniquement cette nappe. Ces prélèvements sont réalisés au mois d'Avril 2024 et les échantillons sont analysés par le laboratoire de l'ADE et l'université. Les analyses chimiques concernent les concentrations des éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- et NO_3^-) et les paramètres physiques (conductivité électrique (CE), température ($^{\circ}\text{C}$), TDS et pH) qui sont prélevés sur le terrain ainsi que les polluants (NO_2^- , PO_4^{3-} et NH_4^+). Au total 20 puits sont échantillonnés et les données hydrochimique qui y correspondent ont une balance ionique inférieure à 5%



Figure N°15: Échantillonnage et analyses (BRAHIMI . Y/ TAMMA.M.S - 2024)

III.1.2 Cartographie hydrochimique :

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

- **Les chlorures (Cl⁻) :**

L'observation des cartes des chlorures montre que les teneurs varient entre 400 mg/l et 4400 mg/l. Les valeurs des concentrations durant l'année 2024 sont dues à l'effet du lessivage et de l'évaporation et l'impact des activités humaines telles que l'utilisation domestique. Au nord et au centre de la zone d'étude, nous avons enregistré des concentrations très importantes en chlorures (dépassée 2000 mg/l). Ces teneurs très élevées résultent de l'infiltration des eaux usées dans la nappe phréatique (Fig.17). Il est à signaler que l'évolution de la teneur en chlorures se fait suivant l'axe du sens de l'écoulement des eaux souterraines, c'est-à-dire selon une direction Sud-Nord. La valeur minimale est d'environ 400 mg/l ; elle est enregistrée dans le Sud de la zone d'étude (Fig.17).

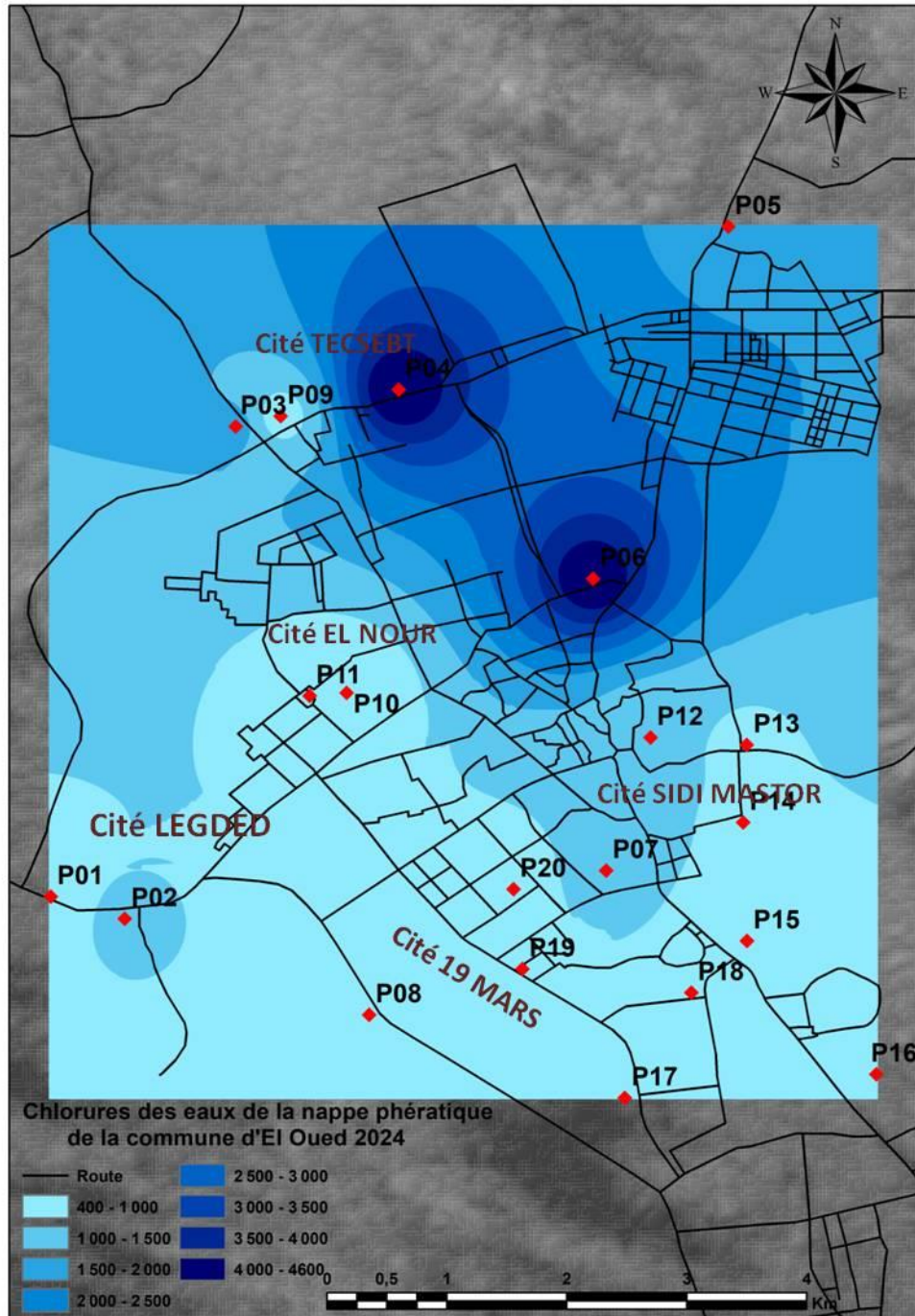


Figure N°16 : Carte de Chlorure (Cl⁻) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- Les bicarbonates (HCO₃⁻) :

Les concentrations oscillent entre 20 et 220 mg/l. Nous notons que pour tous les points de prélèvements, les valeurs ne dépassent pas les normes de l'OMS, sont rencontrées presque sur la totalité de la zone d'étude. Les faibles concentrations sont enregistrées dans une partie au Nord et au Sud-Ouest de la région d'étude (Fig. 18).

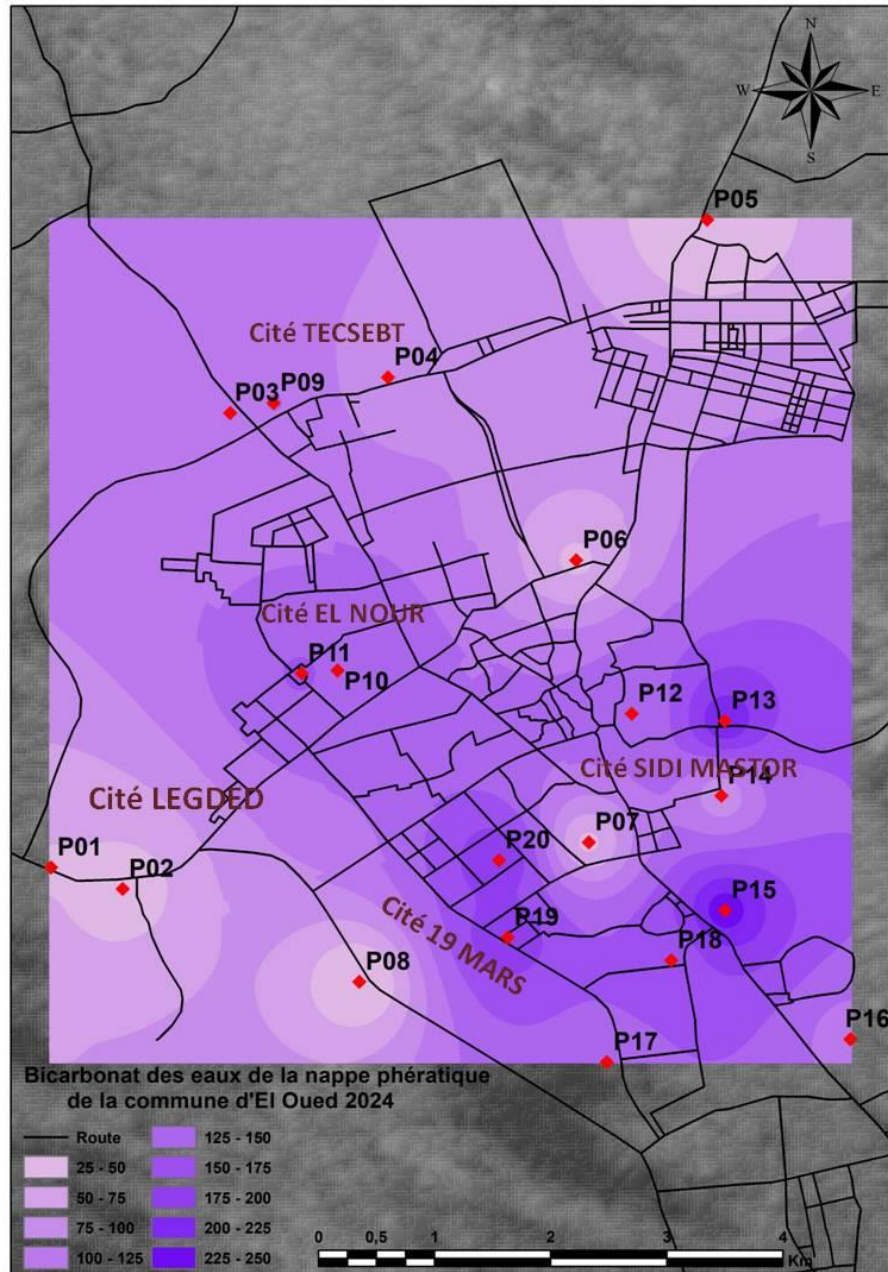


Figure N°17 : Carte de Bicarbonates (HCO_3^-) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- **Le calcium (Ca^{+2}):**

Les concentrations oscillent en général entre 100 et 800 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles au Sud-est vers le centre et à l'Ouest de la nappe par rapport aux autres endroits, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées de la plaine. Nous remarquons que les teneurs décroissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au Nord et au sud- Ouest, nous pensons qu'elles résultent de la dissolution des formations des dépôts évaporitiques. La variation des teneurs en

calcium est semblable à celle des chlorures, ce qui confirme la prédominance du faciès chloruré-calcique (Fig.18).

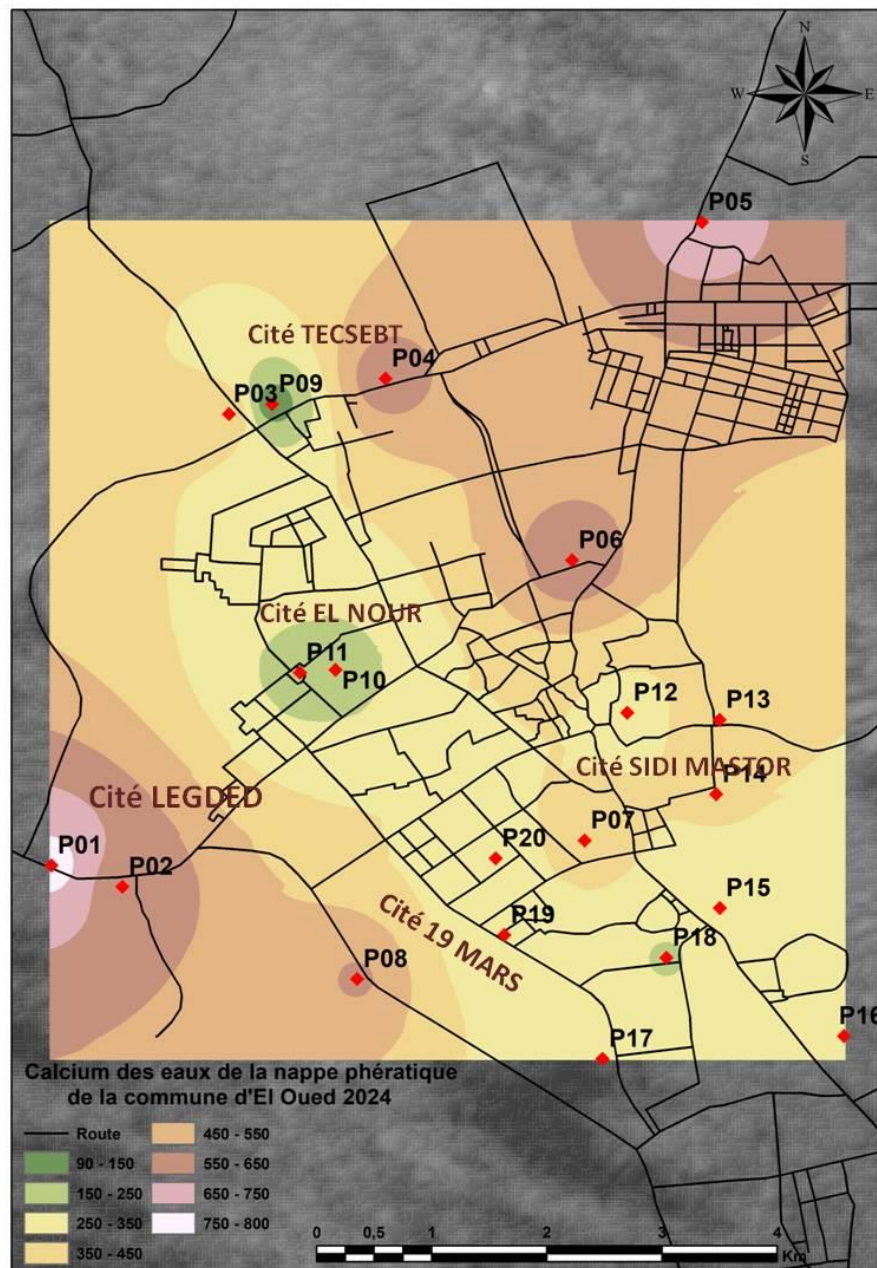


Figure N°18 : Carte de Calcium (Ca^{+2}) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- Le Magnésium (Mg^{+2}) :

Les concentrations varient entre 40 et 460 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont très importantes dans la plupart de l'aquifère et à l'extrémité Nord-Ouest de la plaine en particulier au niveau des points d'eau P4 (ST04) et P6 (ST06). L'origine du magnésium provient de la dissolution des terrains gypseux triasiques (MgSO_4), et par les calcaires dolomitiques qui libèrent le magnésium par dissolution, en présence du gaz carbonique

CHAPITRE III : Evaluation qualitative des eaux de la nappe libre dans un milieu urbain

ou industriel. Les faibles concentrations se localisent dans une petite partie au Sud-est de la nappe au niveau des points d'eau P10 et P18, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées.

En effet, la totalité des points d'eau de la région d'étude présentent des teneurs supérieures à la norme admissible de 40 mg/l, fixée par l'OMS (Fig.19).

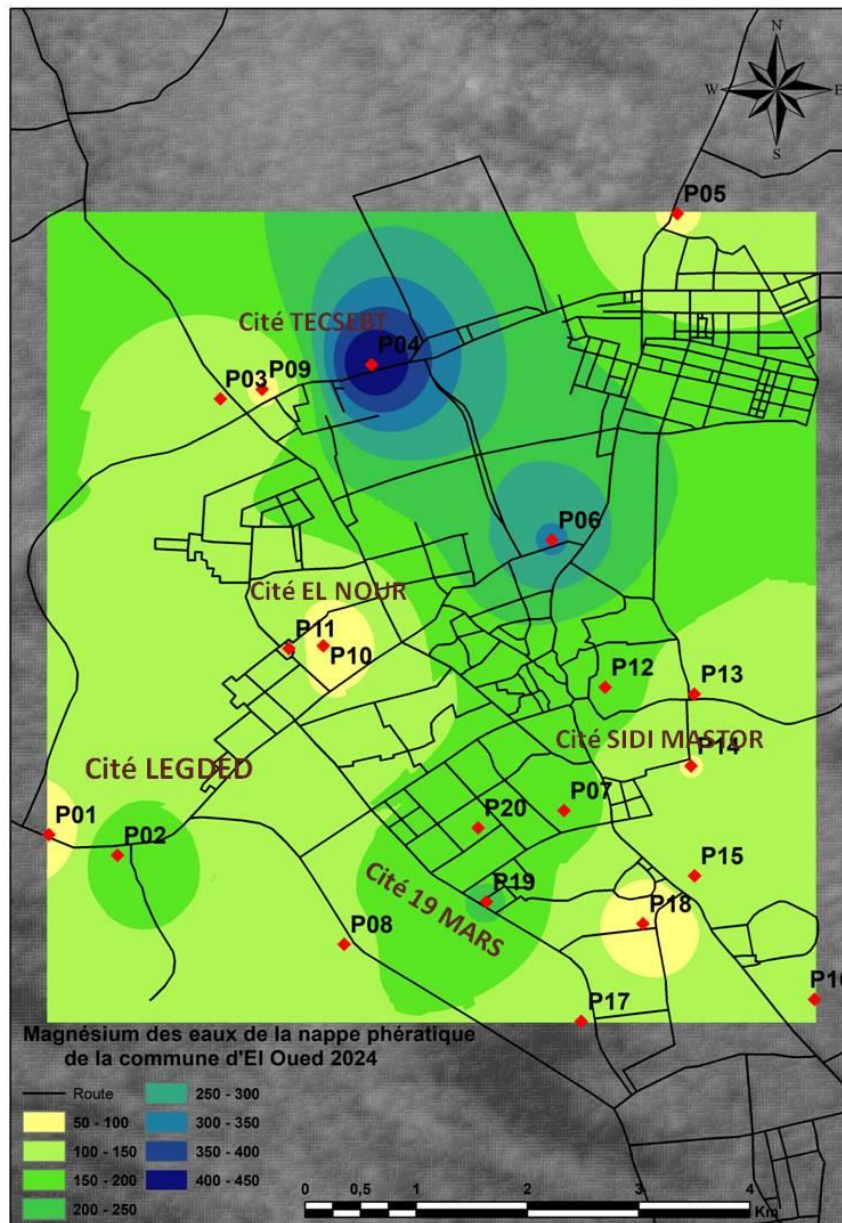


Figure N°19: Carte de Magnésium (Mg^{+2}) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- **La conductivité électrique (CE):**

Elle dépend de la présence des espèces ioniques contenues dans l'eau. Les valeurs mesurées ont été ramenées à 25°C. Les valeurs de la conductivité électrique montrent que la plupart des puits dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 14000 ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), ce paramètre augmente généralement de Sud vers le Nord. La conductivité devient liée plus aux ions évaporitiques (Fig.20).

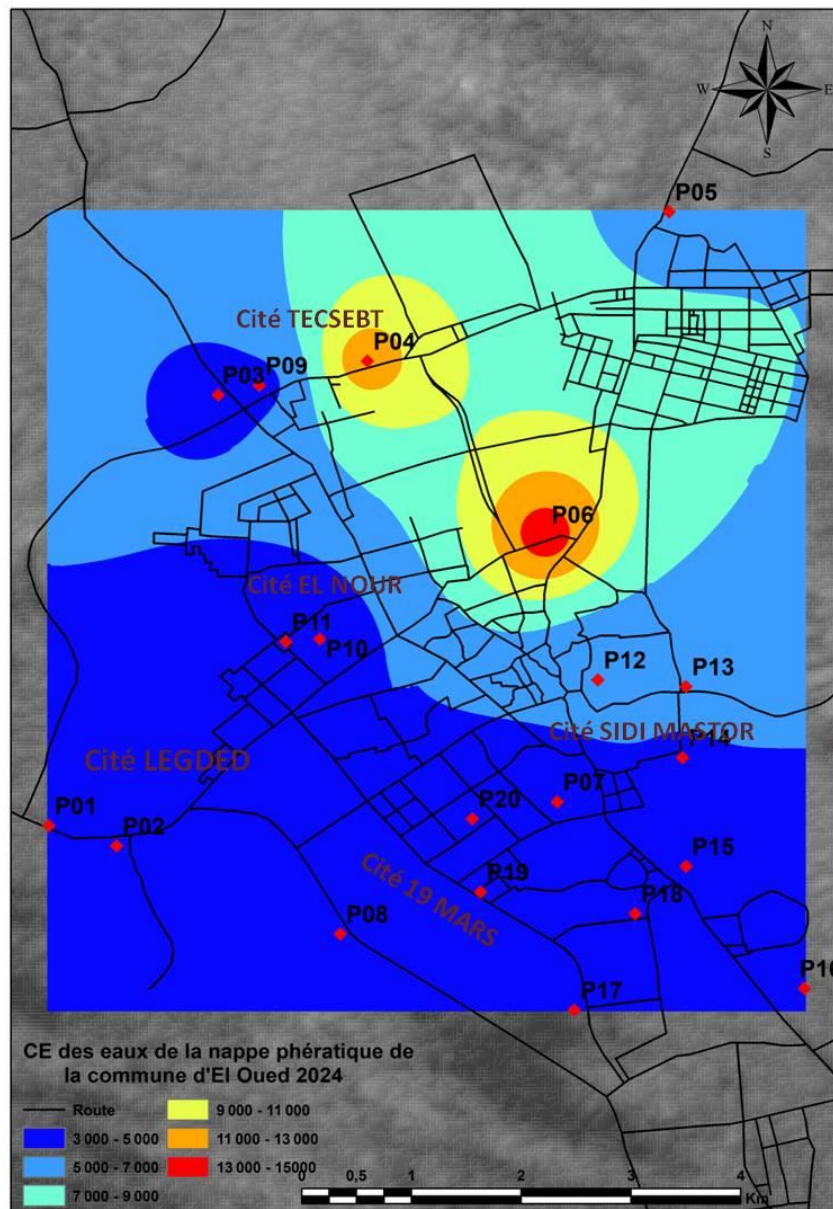


Figure N°20: Carte de Conductivité électrique (CE) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- **Potentiel d'hydrogène (pH) :**

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les mesures du pH montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité. Pendant la période des hautes eaux le pH varie entre 6.85 et 8.1, alors qu'en période de basses eaux, les valeurs oscillent entre 7.2 et 7.81, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles (Fig.21).

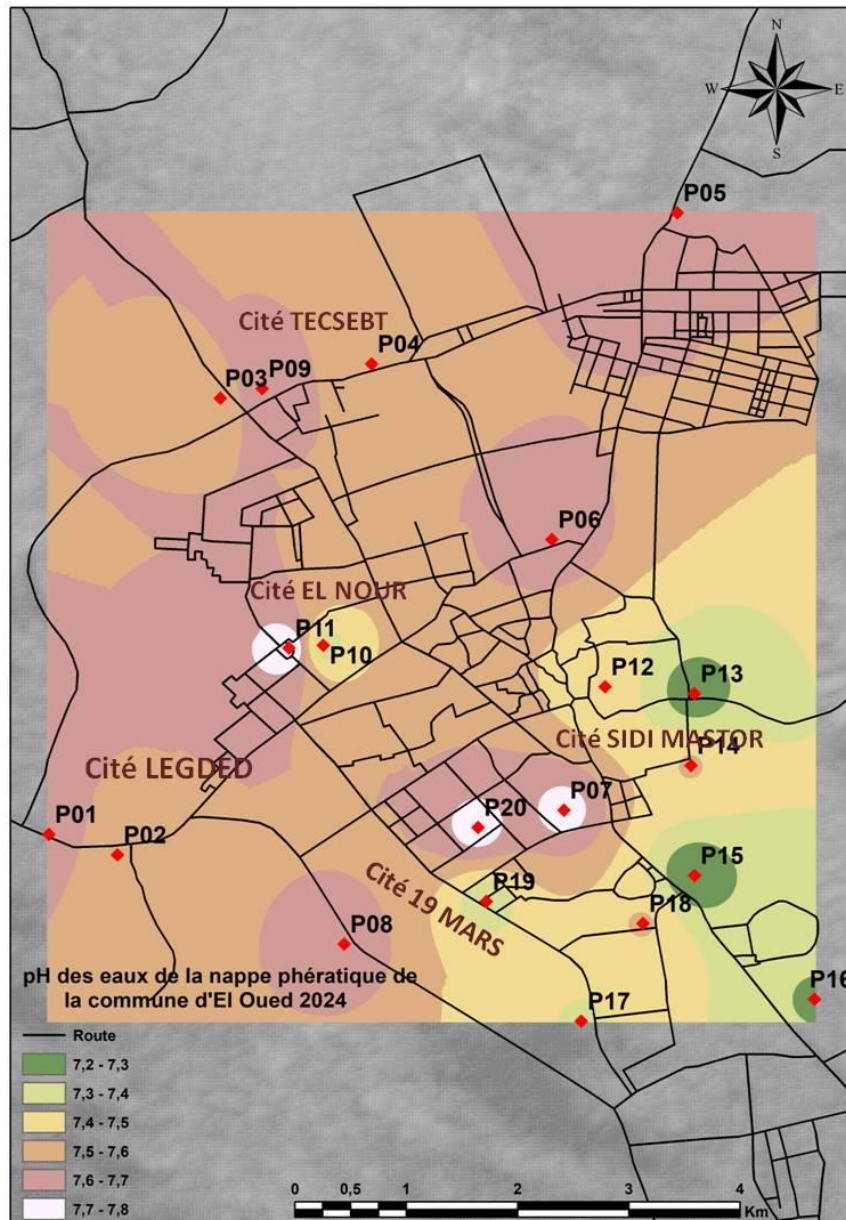


Figure N°21 : Carte de pH des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- **La température (T° C) :**

La température mesurée sur les eaux souterraines de la région d'étude, varie de 18 à 28°C. La température moyenne des eaux souterraines dans la région d'El-Oued est de 23°C.

Ces valeurs sont dues principalement à la profondeur du plan d'eau, et sont très proches de la température moyenne de l'atmosphère de la région d'étude, soit 16,5°C. Nous pouvons donc penser que l'aquifère est en équilibre thermique avec l'atmosphère (Fig.22).

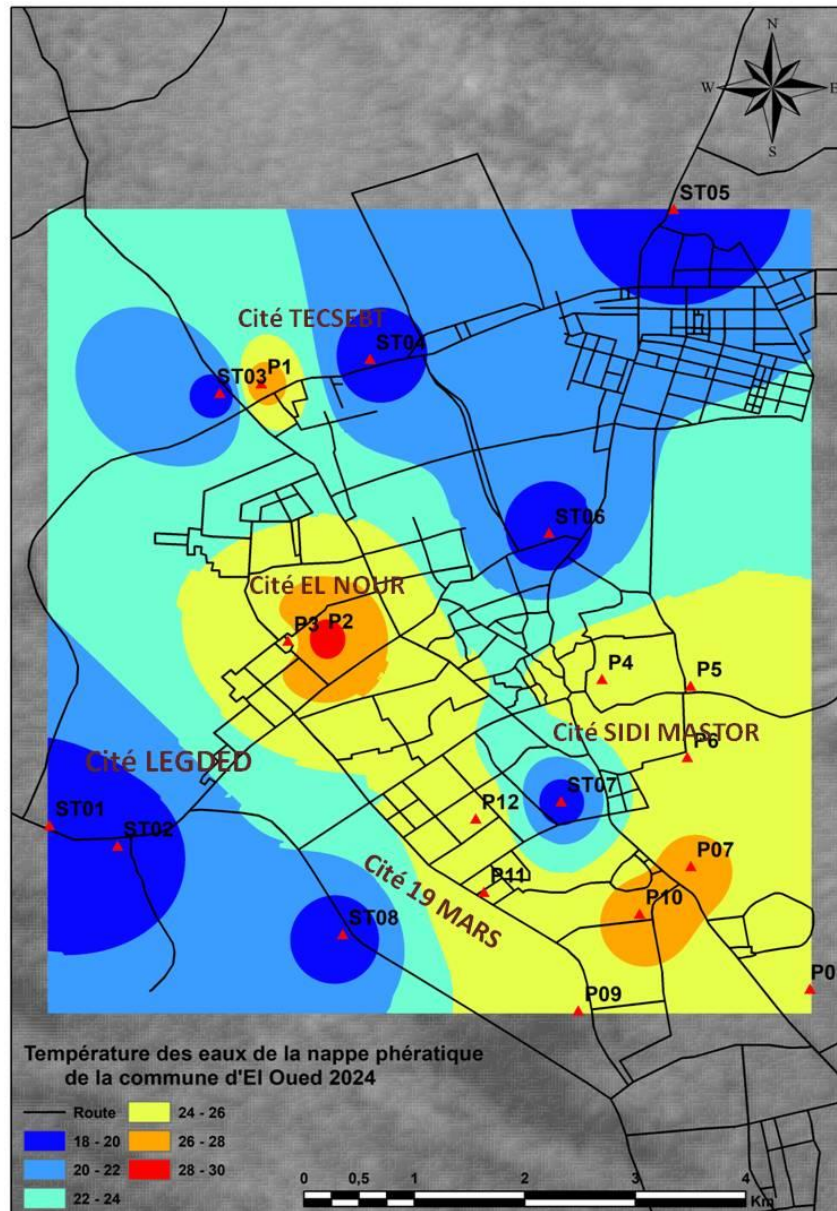


Figure N°22: Carte de T° (C) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- Les solides totaux dissous (TDS) :

TDS signifie total des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau incluent le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium qui sont tous des cations et des carbonates, nitrates, bicarbonates, chlorures et sulfates qui sont tous des anions.

Les valeurs de TDS montrent que la plupart des puits dépassent les normes de l'OMS. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 8500 (mg/l) particulièrement au niveau de deux points d'eaux P4 (ST04) et P6 (ST06), ce paramètre augmente généralement de Sud vers le Nord (Fig.23).

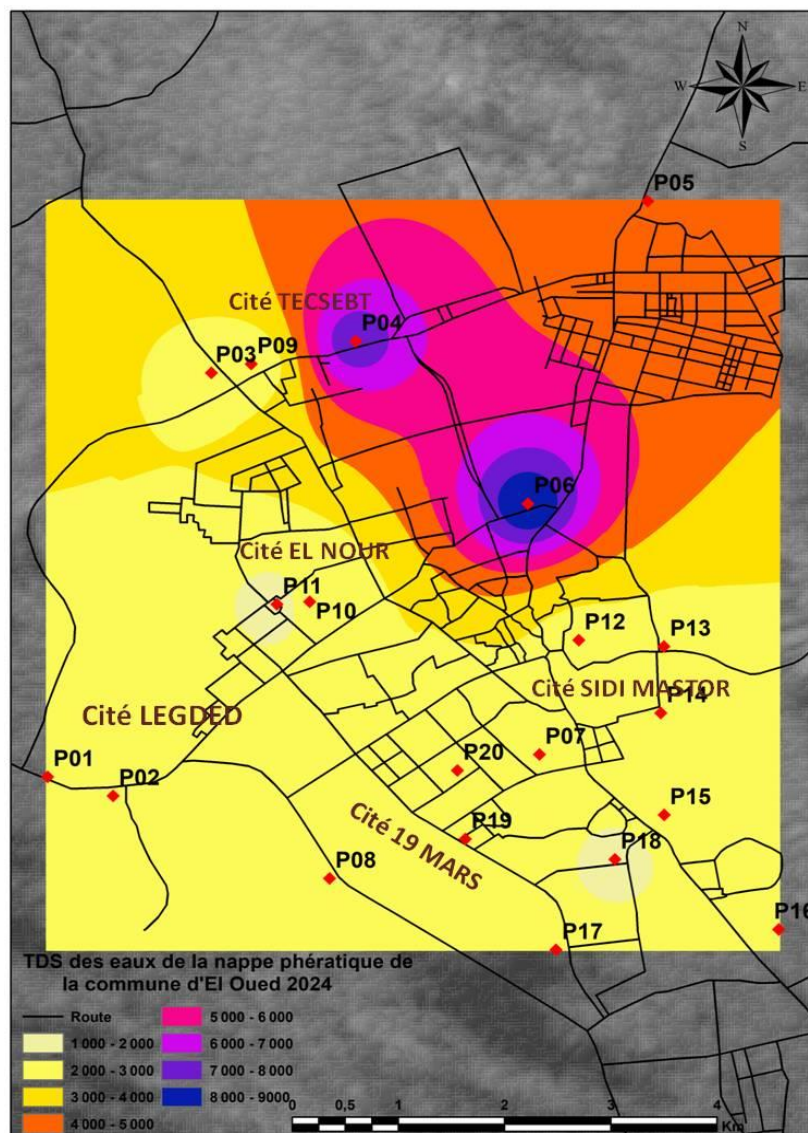


Figure N°23 : Carte de TDS des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

- **Nitrates (NO_3^-) :**

La répartition des teneurs en nitrates dans la nappe de la zone d'étude est liée aux facteurs polluants signalés précédemment, et en particulier à l'activité domestique et à la nature lithologique de la couche superficielle.

La cartographie des concentrations (Fig.24) montre que la zone d'El-Oued, est beaucoup plus exposée à la pollution, car les ions des nitrates s'infiltrent rapidement et on y enregistre des teneurs dépassant 300 mg/l. Au Nord de la région d'étude, les teneurs moyennes en nitrates dépassent les normes de l'OMS. Les valeurs élevées sont mesurées aux points d'eau de P4 (ST04), P6 (ST06), P5 (ST05), P2, P8 et P7 ils proviennent essentiellement des eaux usées et des fosses perdues, dans les zones urbaines. Les faibles teneurs en nitrates sont enregistrées dans une partie d'Ouest et de l'Est de la zone d'étude au niveau de P1, P3, P10, P11, P12, P13 et P14. (Fig.24).

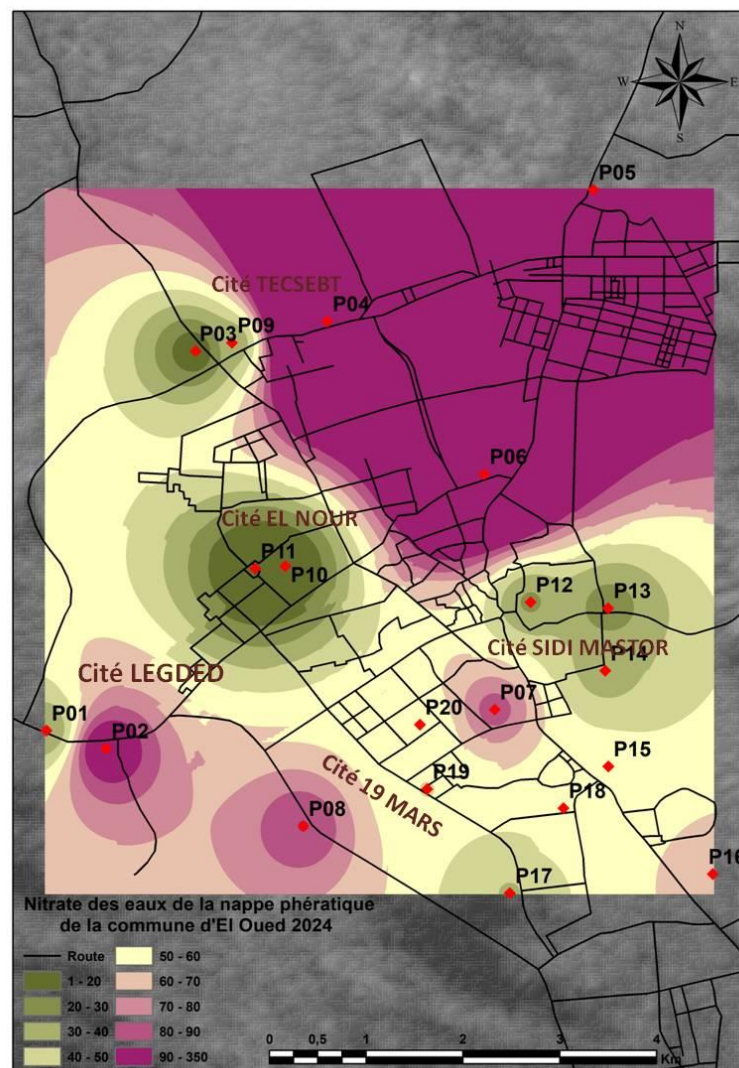


Figure N°24 : Carte de Nitrates (NO_3^-) des eaux souterraines de la région d'étude (2024).

III. 2 Calcul de l'Indice de qualité de l'eau souterraine (GWQI):

L'indice de la qualité de l'eau souterraine (GWQI) est une méthode simple utilisée comme partie de l'analyse de la qualité générale de l'eau à l'aide d'un groupe de paramètres réduisant les grandes quantités d'informations à un seul nombre, généralement sans dimension, d'une manière simple et reproductible. Cette méthode a été initialement proposée par Horton (1965) et Brown et al. (1970). Pour calculer cet indice, Horton (1965) a proposé la première formule qui tient compte de tous les paramètres nécessaires à la détermination de la qualité des eaux de surface et qui reflète l'influence composite de différents paramètres importants pour l'évaluation et la gestion de la qualité de l'eau (Liouet al., 2004 ; Tyagiet al., 2013). Cet indice a été utilisé pour la première fois pour mettre en évidence les changements physico chimiques susceptibles de se produire au cours de l'année et leur impact sur la qualité de l'eau d'alimentation (House et al., 1987 ; House, 1990).

L'indice de la qualité de l'eau souterraine (GWQI) est une méthode mathématique simple utilisée comme partie de l'analyse de la qualité générale de l'eau à l'aide d'un groupe de paramètres réduisant les grandes quantités d'informations à un seul nombre, généralement sans dimension. Ce nombre de l'indice de la qualité des eaux souterraine (GWQI) est représenté l'état de la qualité d'une eau.

Cet indice est une technique de classification de la qualité de l'eau qui repose sur la comparaison des paramètres de qualité de l'eau avec les normes internationales ou nationales Algérienne dans le cadre de cette étude.

GWQI résume de grandes quantités de données sur la qualité de l'eau en termes simples (Excellente, Bonne, Mauvaise, Très mauvaise, etc.). Dans cette étude l'indice GWQI est appliqué pour estimer l'influence des facteurs naturels et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres clés du chimisme des eaux de la nappe phréatique de la zone d'étude.

Deux paramètres importants (pH, CE, T°C, TDS, Ca⁺², Mg⁺², Cl⁻, HCO₃⁻, PO₄⁻³, NH₄⁻, NO₂⁻ et NO₃⁻) ont été sélectionnés pour calculer l'indice de qualité de l'eau souterraine GWQI.

L'indice est calculé en utilisant l'équation suivante en concordance avec les standards de l'OMS :

$$GWQI = \sum SI_i = \sum W_i q_i = \sum \left[\left(\frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \right) * \left(\frac{C_i}{S_i} * 100 \right) \right] \dots \dots \dots (1)$$

Avec:

Ci : concentration de chaque paramètre,

Si: valeur limite de chaque paramètre fixé par les normes OMS,

w_i : le poids de chaque paramètres selon son importance relative dans la qualité des eaux de boisson (Tab.03),

q_i : notation de qualité pour chaque paramètres,

W_i : le poids relatif,

SI_i : le sous-indice du paramètre i .

Tableau N°04: Poids des paramètres utilisés dans le calcul de l'indice GWQI.

Paramètres (mg/l)	Poids
pH	4
TDS	4
Ca ⁺²	2
Mg ⁺²	2
Cl ⁻	5
HCO ₃ ⁻	3
CE (µS/cm)	4
T (°C)	1
NO ₂ ⁻	2
NO ₃ ⁻	5
NH ₄ ⁺	2
PO ₄ ⁻³	2
Total	36

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau souterraine GWQI (Tab.05).

Tableau N°05: Catégorie de GWQI

Classes de l'indice GWQI	Type d'eau de la nappe libre	Usage possible de l'eau
Excellente	(<50)	Eau potable, irrigation et industrie
Bonne	(50 – 100)	Eau potable, irrigation et industrie
Médiocre	(100 – 200)	Irrigation et industrie
Très Médiocre	(200 – 300)	Irrigation
Mauvais	(>300)	Traitement approprié requis avant utilisation

III.2.1 Calcul Nitrate pollution index (NPI):

Le NPI est un indicateur très important pour déterminer la pollution de l'eau par les nitrates présents dans les eaux polluées résultant des activités humaines. La formule pour calculer le NPI est donnée dans l'équation (2) :

$$NPI = C_s - HAV/HAV \dots \dots \dots (2)$$

Où NPI est l'indice de pollution par les nitrates, Cs est la concentration de nitrate dans le puits (mg/l), et HAV est l'avis sanitaire de nitrate pour l'eau potable (mg/l), pris à 20 mg/l. (Adelam S. M. A et al., 2006 ;Obeidad et al 2012;Saidi et al.,2009).

Selon Subba Rao (2018), pour la classification NPI, il existe cinq catégories (Tab.06).

Tableau N°06: Categories de NPI

Valeurs de NPI	Interprétation NPI
< 0	Non polluée
0 à 1	Faible pollution
1 à 2	Pollution modérée
2 à 3	Pollution élevée
> 3	Pollution très élevée

III.2.2 Méthode statistique:

L'Analyse en Composantes Principales (ACP) est une technique d'analyse statistique multivariée, construit à partir d'une matrice de corrélation, permettant une représentation graphique des liens entre variables n ($n > 2$) et des positions des individus par rapport aux vecteurs de ces variables.

L'Analyse en Composantes Principales (A.C.P.) sert également à mettre en évidence des similarités ou des oppositions entre variables et à repérer les variables les plus corrélées entre elles (Zamiche et al., 2018). A cet effet, l'approche statistique a été appliquée dans la présente étude pour déterminer l'impact de chaque paramètre dans le modèle de qualité des eaux sur WQI de la nappe d'Eloued.

III. 3 Résultats et Discussion :

Les résultats obtenus dans cette étude sont analysés, interprétés et présentés sous forme de cartes thématiques à l'aide des outils du système d'information géographique SIG, afin de donner une idée générale sur la qualité globale des eaux étudiées.

III.3.1 Statistique descriptive :

Les caractéristiques statistiques descriptives des variables physico-chimiques utilisées dans cette étude concernaient les valeurs minimales et maximales, la moyenne et l'écart type (Tab.4).

Les eaux de la nappe phréatique d'Eloued sont dans l'ensemble neutres avec un pH qui varie entre 7.2 à 7.81. La moyenne du TDS et de la conductivité sont respectivement 3021,35 mg/l et 5300 μ S/cm, ce qui indique une minéralisation très élevée. Tous les points d'eaux prélevés (100 %) présentent, respectivement, des teneurs en TDS et des conductivités supérieures à la norme fixée par l'OMS [4] pour les eaux de boisson. Les ions Cl sont présents avec des concentrations

élevées qui atteignent 4601 mg/l et 85% des échantillons dépassent la norme fixée par l’OMS à 250-600 mg/l.

Les teneurs moyennes en nitrites, ammonium et en phosphate sont respectivement de $0,26 \pm 0,44$; $0,53 \pm 0,62$; $1,79 \pm 3,12$ (Tab.07). Elle respectent les normes de l’OMS, par contre la majorité des points d’eaux représentent des valeurs très élevées en nitrates avec un minimum de 1,34 mg/l et un maximum de 331,84 mg/l et une moyenne de 72 ± 81 mg/l. Elles dépassent largement les normes préconisées par l’OMS .On remarque que l'écart par rapport à la moyenne est considérable pour les polluants tels que le NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ et les PO_4^{-3} (Tab.07).

Tableau N°07: Statistiques élémentaires des paramètres physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique de la région d’étude (2024)

Paramètres	Unité	Min	Max	Moy	Ecart-type
pH	-	7,19	7,81	7,52	0,18
CE	µs/cm	3090	13800	5300	2724,89
TDS	mg/l	1540	8832	3021,35	1883,55
T°	C°	18,5	28,9	23,07	3,92
NO₃⁻	mg/l	1,34	331,84	72,22	81
NO₂⁻	mg/l	0	1,34	0,26	0,44
NH₄⁺	mg/l	0	2,70	0,53	0,62
PO₄⁻³	mg/l	0	10,42	1,79	3,12
Ca⁺²	mg/l	92,10	785,56	398,87	188,53
Mg⁺²	mg/l	43,42	454,50	150,33	92,71
Cl⁻	mg/l	403,44	4601,79	1295,92	1164,04
HCO₃⁴⁻	mg/l	23,07	237,9	116,65	65,64

À l'aide des équations (1) et (2), la compilation des données géospatiales de tous les paramètres utilisés dans les modèles de qualité de l'eau et de pollution par les nitrates permettent de calculer le GWQI et le NPI qui signifient la répartition du type d'eau.

III.3.2 L'indice de qualité de l'eau souterraine (GWQI) :

Le poids relatif (Wi) de chaque paramètre physico-chimique et la constante de proportionnalité k sont calculés en premier lieu en utilisant les valeurs maximales de la norme standard de l’OMS des eaux de la nappe phréatique d’El-Oued (Tab.08).

Tableau N°08: Poids des paramètres physico-chimiques et norme de l’OMS de qualité des eaux de la nappe libre de la zone d’étude

Paramètres (mg/l)	Poids	Poids relatif	OMS (2011)
pH	4	0.111	7-8,5
TDS	4	0.111	500-1000
Ca⁺²	2	0.055	100-200
Mg⁺²	2	0.055	30-50

Cl⁻	5	0.138	250-600
HCO₃⁻	3	0.083	120-250
CE (µS/cm)	4	0.111	500-1500
T (°C)	1	0.027	12- 30
NO₂⁻	2	0.055	3
NO₃⁻	5	0.138	45-50
NH₄⁺	2	0,055	0,2-0,5
PO₄⁻³	2	0,055	5
Total	36	0,994	/

La carte de l'indice de qualité d'eau (GWQI) calculé, montre que l'indice varie entre 99 et 574 avec une moyenne de $194,26 \pm 112,11$. Selon le tableau 7, trois classes de la qualité d'eau se distinguent: médiocre, très médiocre et mauvaise (Fig.26). Le calcul de l'indice WQI a montré, selon les normes de l'OMS, que 10 % des échantillons prélevés sont de médiocre qualité, 10 % sont de qualité très médiocre avec une possibilité de l'utilisation pour l'irrigation et 80 % sont de mauvaise qualité il faut de restaurer avant d'utilise pour l'irrigation (Tab.8).

La carte de GWQI monter que l'indice de qualité des eaux souterraine (GWQI) très élevé et dépasse la valeur de 300 au Nord de la région d'étude en particulier au niveau du point d'eau ST 06 et ST 04, est dû à la dissolution des formations gypso-salifères qui constituent le substrat de l'aquifère libre et à la dissolution des gypses, calcaires.

On remarque également une très petite zone située à l'ouest de la zone d'étude, notamment au niveau des deux puits P2 et P3, contenant des valeurs médiocre de GWQI comprise entre 50 et 100 (Fig.25).

En revanche, on remarque que la majeure partie de la zone étudiée a une qualité d'eau très médiocre avec des valeurs de GWQI comprissent entre 200 et 300 (Fig.25).

Il apparait également l'impact des teneurs élevés en CE, TDS, Cl⁻ sur l'augmentation de GWQI et la dégradation de la qualité des eaux, du fait que 90 % de ces forages ont des teneurs en CE, TDS et Cl⁻ dépassent les normes de l'OMS.

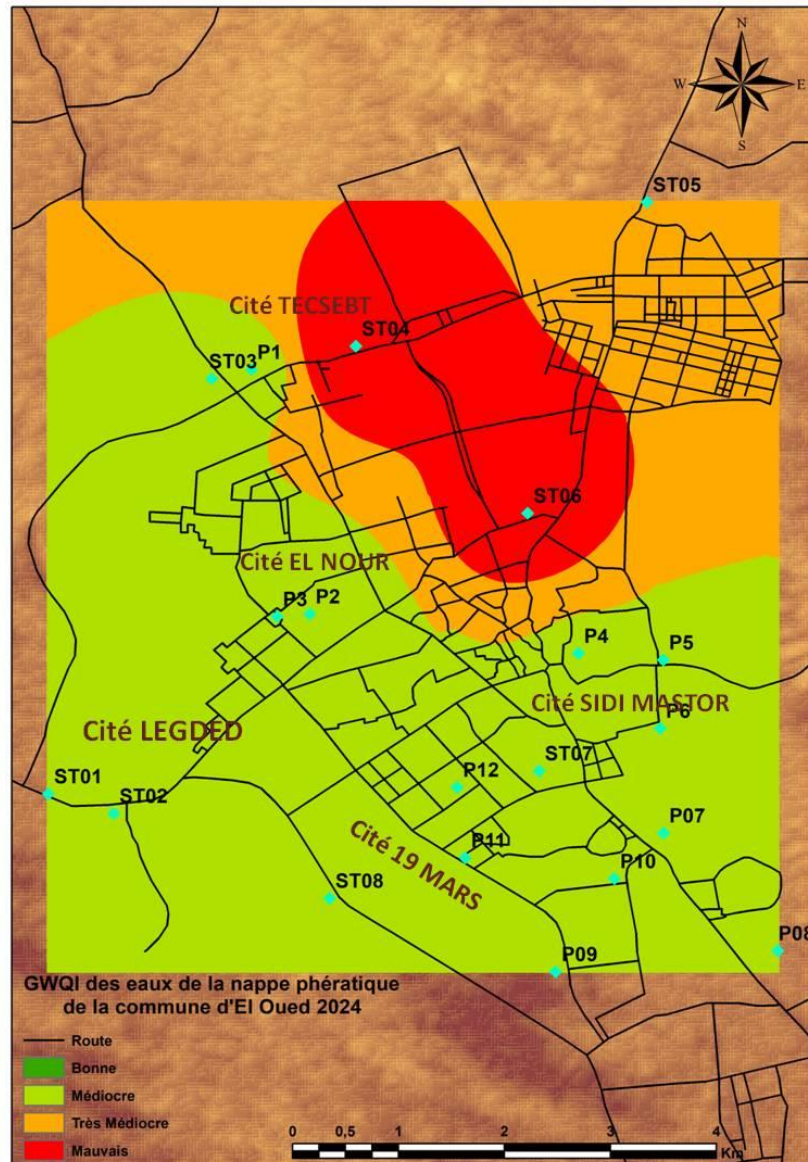


Figure N°25: Carte de répartition spatiale de l'indice de qualité des eaux souterraine (GWQI).

Tableau N°09: Le pourcentage de la catégorie de l'indice de qualité de l'eau souterraine (GWQI) pour cette zone d'étude

Catégorie de qualité de l'eau	% du points d'eau	Nombre de points d'eau
Mediocre	10	2
Très Moderate	80	16
Mauvaise	10	2

III.3.3 L'indice de pollution de l'eau souterraine par les nitrates (NPI) :

L'indice des polluants nitrates est un indicateur permettant d'évaluer la pollution de l'eau causée par concentration élevée en nitrates [20]. Dans cette zone d'étude, les valeurs du NPI varient de - 0,93 à 15,59, avec un NPI moyen de 2,6. Environ 15 % des emplacements de puits ne sont pas pollués, 35 % ont une faible pollution, 20 % ont une pollution modérée et 30 % des emplacements d'échantillonnage de puits ont pollution élevée à très élevée en raison de la concentration plus élevée de nitrates dans les échantillons de puits (Tab.10 et Fig. 27).

Tableau N°10: Le pourcentage de la catégorie de l'indice de qualité de l'eau souterraine (NPI) pour cette zone d'étude

Catégorie de qualité de l'eau	% du points d'eau	Nombre de points d'eau
Non polluee	15	3
Faible pollution	35	7
Pollution modérée	20	4
Pollution élevée	5	1
Pollution très élevée	25	5

La figure 26 montre que plus de 50% des points d'eaux sont contaminé par les nitrates. Les fortes concentrations en nitrates ont été enregistrées au Nord (ST04, ST05 et ST06) et dans une petite zone à l'extrême sud-ouest de la zone d'étude au niveau ST02, ST08.

La valeur minimale en nitrates a été observée dans la limite Ouest et la limite Est de la nappe libre au niveau des points d'eaux ST1, ST3, P2, P3, P4, P5 et P6. Il est à noter que les moyennes teneurs en nitrates ont été retrouvées dans la zone du Sud- est et au centre du secteur d'étude.

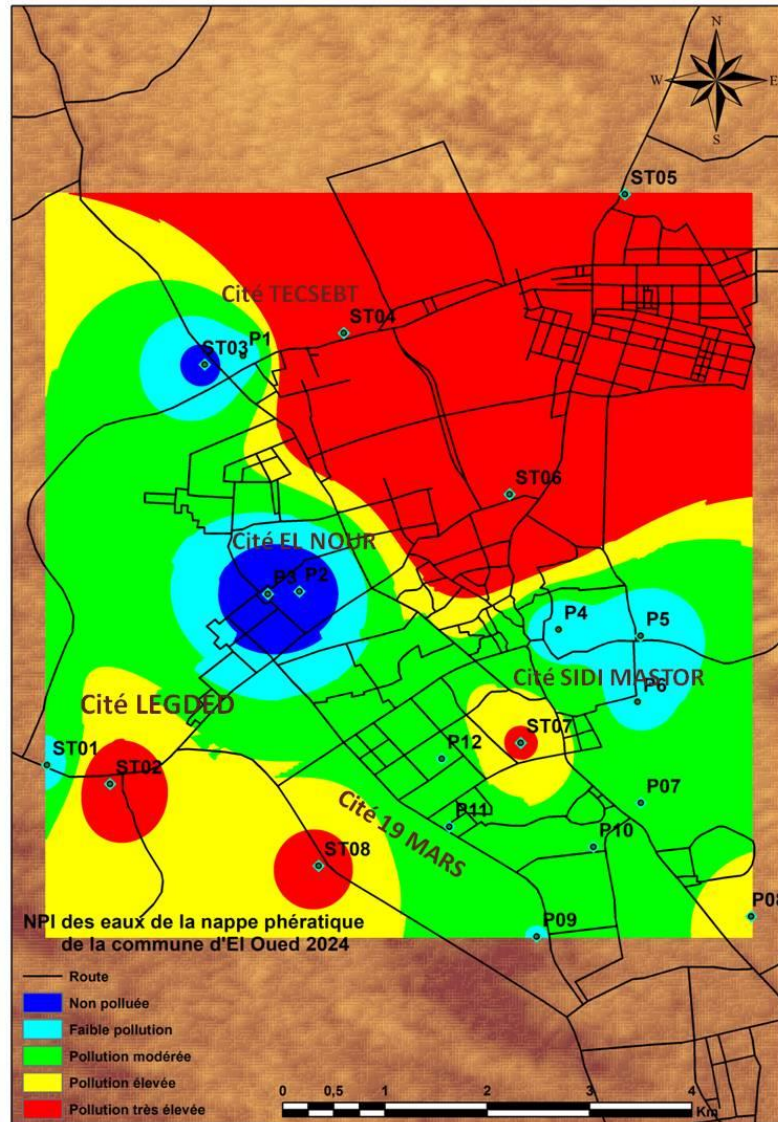


Figure N°26: Carte de répartition spatiale de l'indice de pollution des eaux souterraine par les nitrates (NPI).

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

L'insuffisance du réseau d'assainissement de la région d'étude à cause de la croissance démographique se traduit par des pressions supplémentaires.

L'évolution de la population urbaine, ainsi l'intercommunication puits-latrines par l'écoulement souterrain et la fluctuation du niveau de la nappe.

Cette dernière est due au réseau d'égouttage en mauvais état ; l'infiltration des eaux usées, fuites depuis le réseau séparatif. Ce risque ne peut concerner que des nouveaux lotissements étant exceptionnellement équipés de réseaux séparatifs. Ils sont peu fréquents ; cependant ces puits sont non aménagés.

III.3.4 Relation nitrates – chlorures :

On a remarqué une corrélation entre les nitrates et les chlorures ($R^2 = 0,88$ c'est-à-dire $R = 93,80\%$) (Fig.28).

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

Dans le but de confirmer cette dernière, on a fait une comparaison entre l'évolution des chlorures et celle des nitrates (fig.27).

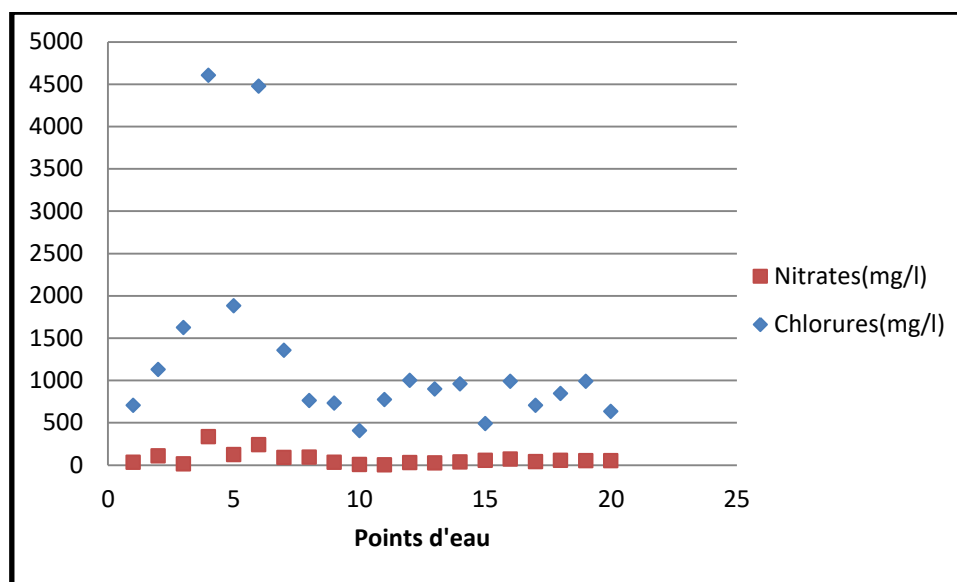


Figure N°27: Concentration des nitrates et des chlorures de la zone d'étude (2024)

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

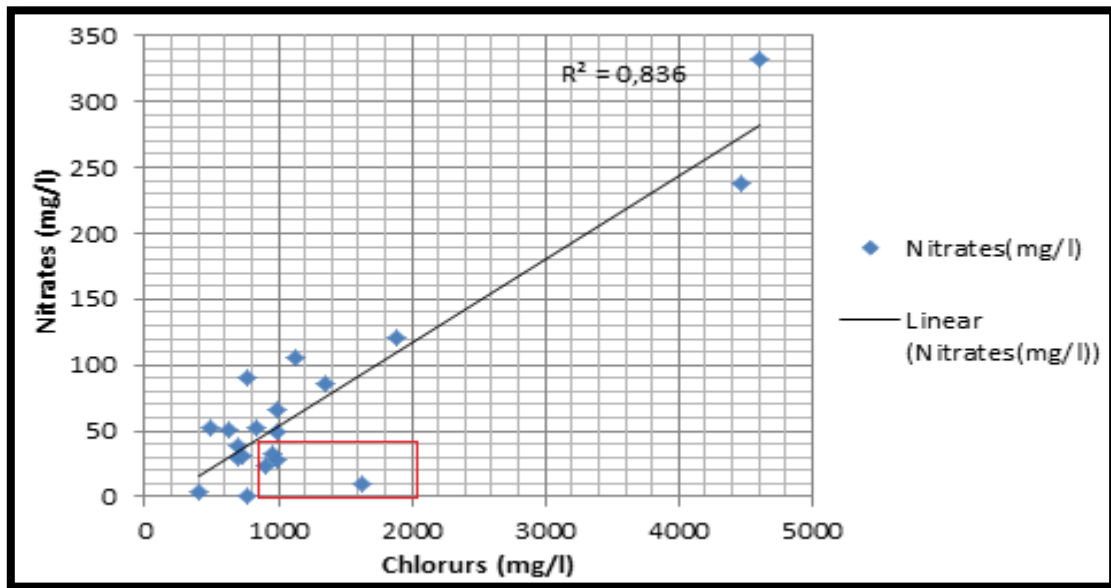


Figure N°28: Diagramme du nitrate versus des chlorures de la zone d'étude (2024).

Les nitrates constituent l'un des composés azotés dominants dans les eaux de la ville d'El-Oued. On remarque une augmentation des teneurs en nitrates de la ville d'El-Oued, cette dernière est due au réseau d'égouttage en mauvais état ; l'infiltration des eaux usées, fuites depuis le réseau séparatif.

III.3.5 Relation nitrates – nitrites :

Les ions nitrates évoluent d'une manière inverse par rapport aux nitrites (Fig. 30) car ces deux ions présentent deux formes opposées de l'azote : L'une oxydée (nitrates) et l'autre réduite (nitrites).

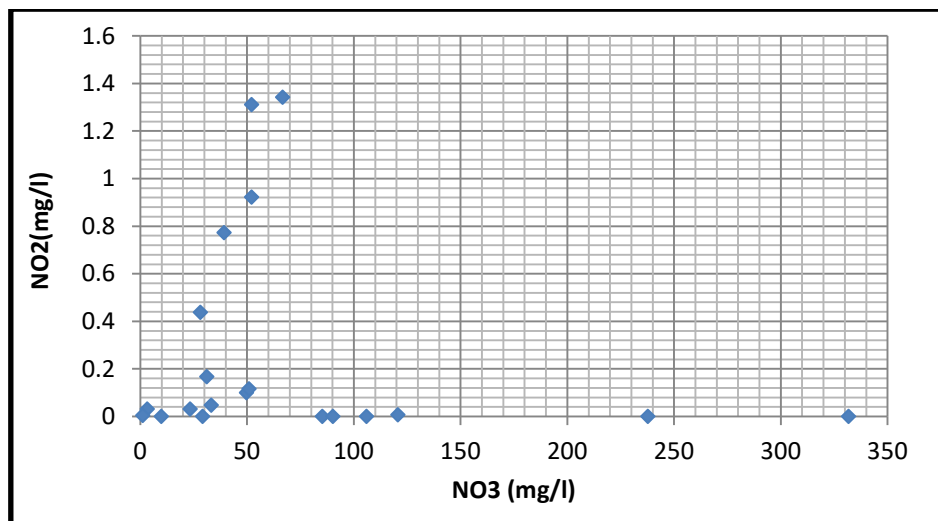


Figure N°29 : Evolution du nitrate en fonction des nitrites de la nappe libre d'El-Oued (2024)

III.3.6 Les phosphates (PO_4^{-3}) :

Le phosphore est nécessaire à la croissance des plantes. Il est présent dans le sol sous la forme de phosphates : soit dissous dans l'eau, soit fixé sur les particules du sol, soit dans les minéraux ou encore sous forme organique. Au fur et à mesure que les racines prélèvent les phosphates dissous dans l'eau, les molécules fixées sont progressivement libérées. (30). En effet, l'examen de la figure 6 a montré qu'il n'existe aucune ressemblance avec celle des nitrates, ce qui laisse penser que leur origine est anthropique résultant ainsi de l'activité domestique et non pas d'une origine naturelle. Les teneurs en phosphates enregistrées varient de 0.11 mg/l à 10 mg/l, elles sont inférieures à la norme de potabilité sauf les deux puits P9 et P10 sont dépassés les normes de l'OMS (Fig.30).

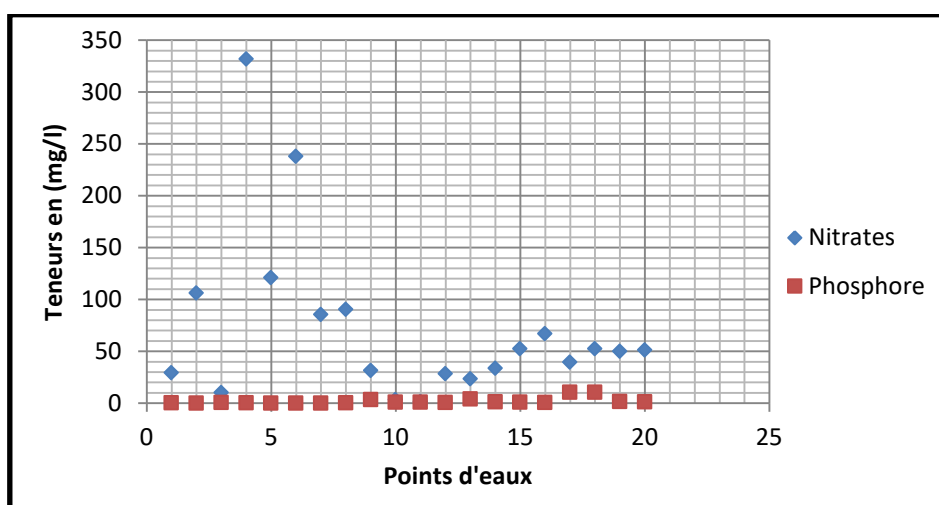


Figure N°30: Corrélation des teneurs de nitrate avec celles des phosphates de nitrates de la zone d'étude (2024)

III.3.7 Analyse statistique:

La liaison existant entre toutes les variables prises deux à deux et les coefficients de corrélation entre ces différentes variables sont donnés par la matrice de corrélation (Tab.11 et Fig.31). L'examen du tableau 11 relatif à la matrice de corrélation permet de voir quelque corrélation significative entre les différents éléments :

L'GWQI est fortement corrélé au TDS (0,97), CE (0,96), Cl^- (0,98), NO_3^- (0,95) et Mg^{+2} (86). D'autres corrélations significatives entre NO_3^- et TDS (0,90) et CE (0,87). Il existe un lien fort entre le chlore et les éléments suivants : CE (0,95), NO_3^- (0,91), Mg^{+2} (0,85) et TDS (0,97).

GWQI est corrélés uniquement et moyennement avec Ca^{+2} (0,53) ce qui indique qu'ils sont étroitement liés entre eux et ont un impact sur la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique d'El-Oued.

Les très faibles corrélations s'observent entre le GWQI et NH_4^+ (0,04) et les corrélations négatives s'observent entre le HCO_3^- et GWQI, TDS, pH, NO_3^- .

Tableau N°11: Matrice de corrélation entre les variables.

	Ca	Mg	Cl	HCO ₃	CE	T°	NO ₂	NO ₃	NH ₄	PO ₄	pH	TDS	GWQI
Ca	1												
Mg	0,36	1											
Cl	0,51	0,85	1										
HCO ₃	0,72	-0,20	-0,4	1									
CE	0,45	0,77	0,95	-0,31	1								
T°	-0,88	-0,45	-0,56	0,79	-0,41	1							
NO ₂	-0,41	-0,26	-0,28	0,44	-0,24	0,44	1						
NO ₃	0,55	0,86	0,91	-0,43	0,87	-0,56	-0,16	1					
NH ₄	-0,25	-0,13	-0,02	0,26	-0,02	0,32	0,54	-0,01	1				
PO ₄	-0,42	-0,29	-0,25	0,37	0,24	0,47	0,42	-0,23	0,57	1			
pH	0,31	0,14	0,24	-0,57	0,11	-0,47	-0,57	0,20	-0,20	-0,24	1		
TDS	0,56	0,78	0,97	-0,42	0,99	-0,54	-0,30	0,90	-0,07	-0,29	0,20	1	
GWQI	0,53	0,86	0,98	-0,37	0,96	-0,53	-0,21	0,95	0,04	-0,21	0,17	0,97	1



Figure N°31 : Tracé Matriciel des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe phréatiques d’El-Oued

L’analyse des variables de l’ACP dans le plan factoriel F1-F2 est présentée par la figure 33.

Ce graphe met évidence deux grands regroupements des paramètres étudiés dans les eaux de la nappe libre d’El-Oued. La Composante Principale1 autour de l’axe factoriel F1 rend compte de 52,17 % de la variance totale et qui prend en compte la conductivité électrique, GWQI, TDS, CE, Cl⁻, NO₃⁻ et Mg⁺². Ce facteur est donc celui de la salinité et la pollution anthropique. Il traduit la minéralisation naturelle par lessivage de sels des formations géologiques et les rejets domestiques non contrôlés. (Fig32).

La Composante Principale 2 autour de l'axe factoriel F2 est responsable à 16,81 % de la variance, elle est déterminée par NH_4 , PO_4^{-3} , NO_2^- , T° et HCO_3^- . Elle est attribuée à la pollution domestique et agricole (Fig.32).

Les deux composantes représentent les principaux processus qui expliquent l'origine, acquisition et l'évolution du chimisme de la nappe libre d'El-Oued, supposés être liés à l'interaction eau-roche et à la pollution par les activités domestique

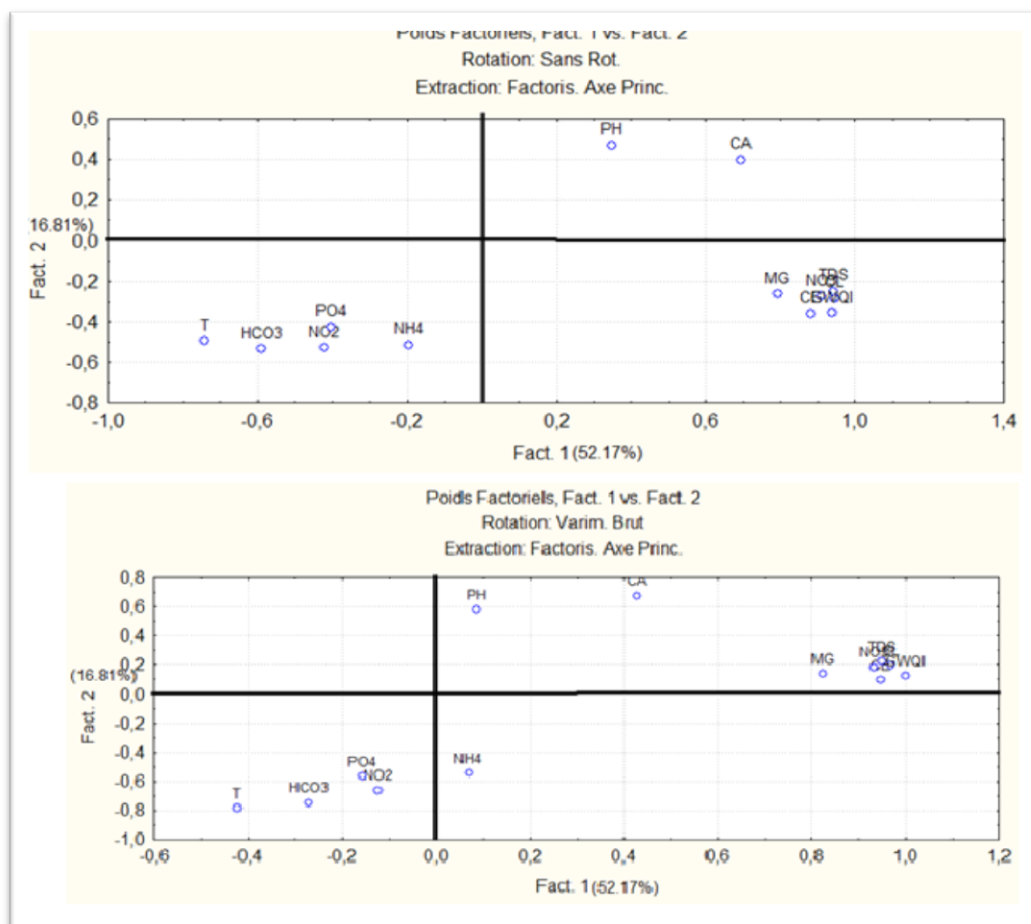


Figure N°32: Analyse des variables dans le plan factoriel F1-F2 sans et après rotation.

La projection des individus révèle deux familles de qualité d'eau, la première correspond aux zones de forte minéralisation et pollution nitratée (Tab.12).

Tableau N°12: Caractéristiques de l'ACP appliquée aux données physico-chimiques de la nappe phréatique d'El-Oued (2024).

Variables	Méthode d'extraction Analyse en composantes principales sans rotation		Méthode d'extraction Analyse en composantes principales après rotation varimax avec normalisation de Kaiser	
	Facteur 1	Facteur 2	Facteur 1	Facteur 2
CE	0,87	-0,38	-0,42	-0,72
pH	0,38	0,54	0,087	0,57
NH4	-0,22	-0,64	0,069	-0,54
NO2	-0,46	-0,6	-0,12	-0,66
NO3	0,90	-0,31	0,93	0,18
PO4	-0,44	-0,50	-0,15	-0,56
TDS	0,93	-0,28	0,95	0,22
T°	-0,76	-0,43	-0,42	-0,78
Ca⁺²	0,73	0,35	0,42	0,67
Mg⁺²	0,81	-0,30	0,82	0,13
Cl⁻	0,93	-0,31	0,96	0,19
HCO₃⁻	-0,62	-0,51	-0,26	-0,74
GWQI	0,92	-0,38	0,99	0,12

III. 4 Conclusion:

L'évaluation qualitative des eaux de la nappe libre d'Eloued permet de dire que :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité. La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques et les activités humaines par les rejets urbains, qui déversent des eaux usées domestiques dans la plaine, sans traitement préalable.

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

La qualité de la ressource en eau a été gravement dégradée, limitant le potentiel hydrique réel et entraînant des impacts sanitaires et écologiques importants. L'étude actuelle s'est concentrée sur l'évaluation de la qualité des eaux souterraines par rapport à la contamination naturelle et anthropique. Cette étude a inclus 20 échantillons d'eaux souterraines provenant de différents endroits pour évaluer leurs caractéristiques.

Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau de la nappe libre d'El-Oued (GWQI) variaient de 99 à 574, avec une moyenne de $194,26 \pm 112,11$; Environ 90 % des échantillons d'eau souterraine analysés dans cette zone d'étude ont été classés comme étant de mauvaise et très mauvaise qualité d'eau impropre à la consommation.

Les valeurs de l'Indice de pollution par les nitrates (NPI) variaient de -0,93 à 15,5. Environ 50 % des sites échantillonnés nécessitent un traitement avant consommation. Cette contamination par les nitrates résulte des activités humaines, notamment l'élimination des déchets en zones ouvertes et l'infiltration des eaux usées.

Conclusion Générale

IV Conclusion Générale

La zone d'étude fait partie de la wilaya d'El-Oued, elle fait partie du grand Erg oriental, qui se caractérise par un ensemble de dunes de sable d'altitudes varie entre 64 m et 100 m. La surface de la zone d'étude est occupée par les massifs dunaires, les Ergs, les zones urbaines, les Ghouts, les zones agricoles irriguées et les zones d'eau libre. Le climat de la région est saharien avec un hiver chaud, le bilan hydrique montre que la recharge par la pluie efficace est négligeable. De point de vu géologique la zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional, à sa base, on trouve des formations paléozoïques marines surmontées en discordance par des formations continentales de Secondaire et de Tertiaire épaisses de quelques milliers de mètres et en fin le Quaternaire y succède. La zone d'étude fait partie au système aquifère du Sahara septentrional (SASS), ce dernier est constitué de trois aquifères, un aquifère libre, et deux aquifères captifs; (le Complexe Terminal (CT) et le Continentale Intercalaire (CI)). L'interprétation des coupes hydrogéologiques réalisées sur la base de logs de forages d'eau, montre que l'aquifère libre d'El Oued est constitué de sables, de grés à ciment gypseux friable et des argiles sableuses. L'examen de la carte piézométrique, montre que l'écoulement de la nappe se fait en général de Sud vers le Nord. Caractérisation hydrogéochimique des eaux de l'aquifère permet de dire que : Les eaux sont caractérisées par une forte salinité. La répartition spatiale des éléments chimiques montre que le chimisme est fortement lié à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques. Les teneurs en nitrates observées dans les eaux de la ville d'El-Oued sont plus riches en nitrates. Celles-ci, compte tenu de leur faible profondeur, sont les plus vulnérables. Dans ces eaux, les teneurs moyennes varient de 1 ,34 mg/l à 331 mg/l, avec une moyenne de 72,22 mg/l. Ces teneurs sont supérieures à la directive OMS (50 mg/l) pour une eau de boisson. Les valeurs de l'indice de qualité de l'eau de la nappe libre d'El-Oued (GWQI) variaient de 99 à 574, avec une moyenne de $194,26 \pm 112,11$; Environ 90 % des échantillons d'eau souterraine analysés dans cette zone d'étude ont été classés comme étant de mauvaise et très mauvaise qualité d'eau impropre à la consommation. Les valeurs de l'Indice de pollution par les nitrates (NPI) variaient de -0,93 à 15,5. Environ 50 % des sites échantillonnés nécessitent un traitement avant consommation. Cette contamination par les nitrates résulte des activités humaines, notamment l'élimination des déchets en zones ouvertes.

Bibliographies:

[01] **ALIAT Hocine 2014**, Etude hydrogéologique et hydrochimique de la région de Taibet (SE Algérie), MEMOIRE DE FIN D'ETUDE En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master en Géologie, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA.

[02] **ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) de Constantine** : Coupes stratigraphiques des forages, données climatiques et l'étude géophysiques.

[03] **ARMSTRONG M., (1984)**. Improving the estimation and modelling of the variogram. G. Verly and al. editors, Geostatistics for Natural Resources Characterization, pp. 1-19. D. Reidel, Dordrecht, NL.

[04] **BENCHOUK M., (1994)**. Analyse Factorielle Krigeante de Données de Prospection Géochimique Multi-élémentaire ; Prospection de l'Or de Fourou, Mali (Zone sur Echantillonnée Nord-Est). Mém. de Magistère. Ecole Nationale Polytechnique.

[05] **BOUZERRA F. et SAIBI H.,(2000)**. Contribution à l'étude hydrogéologique du Plateau de Mostaganem. Approche de la vulnérabilité des eaux souterraines à la pollution. Mem. Univ. Houari Boumediene, Alger.

[06] **BECHERAIR LAID - HMAITI AICHA -MAAMRI ABD EL MALEK 2021**; Etat de lieu et diagnostique d'un forage destiné à l'AEP (Cas du forage Ghamra Nord EL-Oued), Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique, Université - El-Oued.

[07] **BEN YAZZA Abd elmalek, 2014**, EVALUATION DES FACIES HYDRO-CHIMIQUE DESEAUXSOUTERRAINES DE LAREGIOND'IN-SALAH (WILAYA DETAMANRASSET), Mémoire MASTER PROFESSIONNEL Domaine : Sciences techniques Filière: Hydraulique, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.

[08] **BETTA Bachir, GHANIA Fatah 2020**, Caractérisation des paramètres hydrogéologiques pour identifier l'évolution des teneurs en nitrates des eaux souterraines de la commune d'El-Oued MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique, Université - El-Oued.

[09] **BOULIFA Khaled 2012**; Synthèse hydrogéologique sur la region d'El-Oued Sahara nord oriental – Est Algérien; Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister en Géologie; Université Constantine 1.

-
- [10] **CHAUVET P., (1999).** Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. P364
- [11] **CHILES J.P. et DELFINER P., (1999).** Geostatistics : Modeling spatial uncertainty, Wiley Series in Probability and Statistics, Wiley.
- [12] **DELHOMME J.P, (1976).** Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau (variabilité spatiale des grandeurs hydroclimatiques et hydrogéologiques & précision de leur connaissance). Thèse de doct. Ing. Université Pierre et Marie Curie Paris-6.
- [13] **Chekima Hamza – Rahal zakaria 2019,** Etude de la variation de niveau piézométrique de la nappe phréatique dans la commune d'El-Oued à l'aide de (SIG). MEMOIRE DE FIN D'ETUDE En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master en Géologie, Univ.H.Lakhdar El Oued
- [14] **ISAAKS E. H. and SRIVASTA R. M., (1989).** – Applied Geostatistics. Oxford University Press, N.Y., U.S.A.
- [15] **GASMI Med Lazhar SOUALAH Mohammed 2019 ;** Evaluation de la productivité d'un aquifère du complexe terminal et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives cas de la région de Oued-Souf, MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique; Université - El-Oued.
- [16] **GOUBA Aicha .- CHOULAIA N-BERROKECH F 2022 ;** Evaluation Contribution à la régionalisation stochastique paramètres physico-chimiques des eaux souterraines (application à la daïra de Guémar Wilaya d'EL-oued) MEMOIRE Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique; Université - El-Oued.
- [17] **KHECHANA Salim 2014;** Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien); Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.
- [18] **ZINE Hacem. DJEOUADI Nouredinne .MESSAI AHMED Yakoub, 2021,** Détermination de la qualité des eaux souterraines de la vallée d'El-Oued (SE, Algérie), utilisation de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) et l'indice de pollution organique (IPO) et la cartographie, Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique, Université - El-Oued.