



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET  
POPULAIRE MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPERIEUR ET  
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Echahid Hamma Lakhdar  
El-Oued

Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique & de génie civil

MEMOIRE

*Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master en  
Hydraulique Option : Ouvrages hydrauliques*

THEME :

**Détermination de la qualité des eaux souterraines de la  
vallée d'El-Oued (SE, Algérien), utilisation de l'indice  
de qualité des eaux souterraines (GWQI) et l'indice de**

**Dirigé par :**

□ Mme. ZAIR Nadjet.

**Présenté Par :**

- Mr. ZINE Hacem
- Mr. DJEOUADI Nouredinne
- Mr. MESSAI AHMED Yakoub

Dr. MIGA Nabil

Dr. ZAIR Nadjat

Dr. MILOUDI Abdelmonem

Maitre de conférences A

Maitre de conférence A

Maitre de conférence A

Président

Encadreur

Examineur


*Promotion : Juin 2022*



## *DEDICACE*

*À Nos parents Pour les sacrifices déployés à nos égards ; pour leur patience Leur amour et leur confiance en nous Ils ont tout fait pour notre bonheur et notre réussite. Qu'ils trouvent dans ce modeste travail, le témoignage de notre Profonde affection et de notre attachement indéfectible. Nulle dédicace ne puisse exprimer ce que nous leur devons Que dieu leur réserve la bonne santé et une longue vie. À Nos amis E témoignage de nos sincères reconnaissances pour les efforts Qu'ils ont consentis pour nous soutenir au cours de nos études. Que dieu nous garde toujours unis*

*À Toute personne qui nous a aidé à faire notre projet.*





## REMERCIEMENTS

*Nous tenons à remercier avant tout le bon Dieu tout puissant de nous avoir donné le courage et la force d'élaborer ce travail.*

*C'est avec beaucoup de reconnaissance que nous adressons nos sincères remerciements à l'égard de notre promoteur le Docteur ZAIR Nadjjet pour avoir proposé ce thème et d'avoir suivi et dirigé ce travail, nous le remercions infiniment, pour son aide, ses conseils, ses orientations ainsi que ses remarques et ses critiques qui nous ont été d'un apport précieux, nos remerciements s'étendront aussi aux membres du jury qui ont accepté de juger notre travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à tous nos professeurs de l'université d'El-Oued qui ont contribué à notre formation durant notre parcours universitaire.*

*Enfin à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude sans oublier les responsables de l'ADE d'El Oued et Mr. Mahawet Ali, REDWANI Nacer, SEGHIERI Mohamed Lamine de la DRH d'El Oued pour son aide et soutien.*

*Et encore merci à tous.*

# RESUME

La région d'El-Oued possède actuellement des ressources hydriques relativement très limitées, et qui ne sont représentées, uniquement, que par les eaux souterraines des nappes aquifères. 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. Suite à l'analyse de la situation actuelle de la nappe et de son environnement, un programme d'action a été conçu pour mener un suivi des variations, en fonction de la lithologie et des facteurs climatiques. Nous avons ainsi pu étudier l'évolution des paramètres physicochimiques au cours de deux campagnes (2018 et 2021).

Le traitement et la représentation des données ont été menés en faisant appel à des outils modernes : Analyse statistique, cartographie et graphisme automatique, ainsi que la géostatistique. Cette étude est pour évaluer la qualité et l'état de la pollution organique des eaux souterraine de la commune d'El - Oued et la commune de Kouinine, en se basant sur l'indice de qualité de l'eau (GWQI) et l'indice de pollution organique (IPO) selon les utilisations de l'eau potable et d'irrigation. L'objectif de l'indice est de transformer des données complexes sur la qualité de l'eau en informations compréhensibles et utilisables par le public.

Le suivi des indices de qualité (GWQI) et de pollution organique (IPO), des eaux souterraines au cours de cette étude montre que les eaux souterraines de la zone d'étude restent à 5 % de bonne qualité et sans effet des paramètres hydro chimiques et une pollution organique (IPO) nulle à faible pour toutes usages, et de 95% des forages ont de qualité d'eau modérée à très modérée et une pollution organique faible. Toutefois, les forages affichent une détérioration croissante de la qualité de leurs eaux en fonction de la pression démographique des communes et l'influence de la géologie des nappes réservoir. Ainsi les eaux de la zone d'étude sont de mauvaise qualité à eau non potable avec une pollution organique modérée dans la commune de Kouinine et utiliser seulement en irrigation.

**Mots clés :** Eau souterraines, GWQI, IPO, El-Oued.

# ABSTRACT

The El-Oued region currently has relatively very limited water resources, which are only represented by groundwater from aquifers. In recent years, an economic boom, particularly agricultural, has taken place, which has led, on the one hand, to an increase in water needs and has caused, on the other hand, the deterioration of water quality. Following the analysis of the current situation of the aquifer and its environment, an action program was designed to monitor the variations, depending on the lithology and climatic factors. We were thus able to study the evolution of the physicochemical parameters during two campaigns (2018 and 2021).

Data processing and representation were carried out using modern tools: statistical analysis, cartography and automatic graphics, as well as geostatistics. This study is to assess the quality and state of organic pollution of groundwater in the commune of El - Oued and the commune of Kouinine, based on the water quality index (GWQI) and the organic pollution index (OPI) according to the uses of drinking and irrigation water. The objective of the index is to transform complex water quality data into information that is understandable and usable by the public.

The monitoring of quality indices (GWQI) and organic pollution (IPO) of groundwater during this study shows that groundwater in the study area remains at 5% good quality and without effect of hydrochemical parameters. and zero to low organic pollution (IPO) for all uses, and 95% of forges have moderate to very moderate water quality and low organic pollution. However, the boreholes show an increasing deterioration in the quality of their water according to the demographic pressure of the municipalities and the influence of the geology of the reservoir aquifers. Thus, the waters of the study area are of poor quality with non-potable water with moderate organic pollution in the municipality of Kouinine and used only for irrigation.

**Keywords:** Groundwater, GWQI, IPO, El-Oued.

## الملخص

تتمتع منطقة الواد حالياً بموارد مائية محدودة جداً نسبياً، والتي يتم تمثيلها فقط بالمياه الجوفية من طبقات المياه الجوفية. في السنوات الأخيرة، حدث انتعاش اقتصادي، ولا سيما الزراعة، مما أدى، من ناحية، إلى زيادة الاحتياجات المائية وتسبب، من ناحية أخرى، في تدهور جودة المياه. بعد تحليل الوضع الحالي لطبقة المياه الجوفية وبيئتها، تم تصميم برنامج عمل لرصد الاختلافات، اعتماداً على العوامل الصخرية والمناخية. وهكذا تمكنا من دراسة تطور المعلمات الفيزيائية والكيميائية خلال حملتين (2018 و2021).

تمت معالجة البيانات وتمثيلها باستخدام أدوات حديثة: التحليل الإحصائي ورسم الخرائط والرسومات الآلية، فضلاً عن الإحصاء الجغرافي. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم جودة وحالة التلوث العضوي للمياه الجوفية ببلدية الواد وبلدية كوينين بالاعتماد على مؤشر جودة المياه (GWQI) ومؤشر التلوث العضوي (OPI) حسب استخدامات الشرب. ومياه الري. الهدف من المؤشر هو تحويل بيانات جودة المياه المعقدة إلى معلومات مفهومة وقابلة للاستخدام من قبل الجمهور.

أظهر رصد مؤشرات الجودة (GWQI) والتلوث العضوي (IPO) للمياه الجوفية خلال هذه الدراسة أن المياه الجوفية في منطقة الدراسة تظل بجودة جيدة بنسبة 5٪ وبدون تأثير للمعايير الهيدروكيميائية، ومن صفر إلى تلوث عضوي منخفض (IPO) للجميع الاستخدامات، و95٪ من المسبوكات ذات جودة مياه معتدلة إلى معتدلة للغاية وتلوث عضوي منخفض. ومع ذلك، فإن الآبار تظهر تدهوراً متزايداً في جودة مياهها وفقاً للضغط الديموغرافي للبلديات وتأثير جيولوجيا خزانات المياه الجوفية. وبالتالي فإن مياه منطقة الدراسة ذات نوعية رديئة مع المياه غير الصالحة للشرب مع تلوث عضوي معتدل في بلدية كوينين وتستخدم فقط للري.

**الكلمات المفتاحية:** المياه الجوفية، GWQI، IPO، الوادي.



<b>I.5.1.3.</b> L'Albien	16
<b>I.5.1.4.</b> Le Vraconien	17
<b>I.5.1.5.</b> Le Cénomanién	17
<b>I.5.1.6.</b> Le Turonien	17
<b>I.5.1.7.</b> Sénonien.	17
<b>I.5.1.7.1.</b> Sénonien lagunaire	17
<b>I.5.1.7.2.</b> Sénonien carbonaté	17
<b>I.5.2.</b> Formation de la Tertiaire	18
<b>I.5.2.1.</b> L'Eocène	18
<b>I.5.2.2.</b> Le Mio-pliocène	18
<b>I.5.3.</b> Formations du Quaternaire	19
<b>I.5.4.</b> Interprétation des coupes géologiques	19
<b>I.5.4.1.</b> Coupe N°1	19
<b>I.5.4.2.</b> Coupe N°2	20
<b>I.5.4.3.</b> Coupe N°03	22
<b>I.5.5.</b> Tectonique	23
<b>I.5.6.</b> Relief	23
<b>I.</b> Conclusion	24

## **CHAPITRE II : HYDROGEOLOGIE**

<b>II.</b> Introduction	26
<b>II.1.</b> Identification géologique de l'aquifère.	27
<b>II.1.1</b> Identification des formations litho stratigraphique	27
<b>II.1.2</b> Identification des formations hydrogéologiques et des aquifères	28
<b>II.2.</b> Ressources en eau souterraines.	28
<b>II.2.1</b> Hydrogéologie de la région	28
<b>II.2.2</b> Types d'aquifères	31
<b>II.2.3</b> Description qualitative du fonctionnement hydraulique	31



<b>II.3.</b> Zone de recharge et exutoire	32
<b>II.3.1</b> La recharge	32
<b>II.3.2</b> L'exutoire	33
<b>II.4.</b> Détermination des paramètres hydrodynamiques	33
<b>II.4.1.</b> Débits spécifiques	33
<b>II.4.2.</b> La transmissivité	34
<b>II.4.2.1</b> L'approximation logarithmique de Cooper-Jacob	34
<b>II.4.2.2</b> La transmissivité (méthode de Theis)	35
<b>II.4.3.</b> Le coefficient d'emmagasinement	36
<b>II.4.4.</b> La perméabilité	37
<b>II.4.5</b> La porosité efficace $n_e$	37
<b>II.4.6</b> Caractérisation piézométrique des aquifères	39
<b>II.4.7</b> Rayon d'action	41
<b>II.4.8</b> Estimation le besoin d'eau prélèvements selon l'inventaire 2004	41
<b>II.</b> Conclusion.	42

### **CHAPITRE III : HYDROCHIMIE**

<b>III.</b> Introduction	45
<b>III.1.</b> Echantillonnage et analyse hydro-chimique	45
<b>III.2.</b> Moyens et méthodes d'analyse	46
<b>III.2.1.</b> Mesures in situ	46
<b>III.2.2.</b> Analyses au Laboratoire	46
<b>III.3.</b> Description sommaire des paramètres physico chimiques	47
<b>III.3.1.</b> Paramètres physiques	48
<b>III.3.1.1.</b> Potentiel d'hydrogène (PH)	48
<b>III.3.1.2.</b> La conductivité électrique (CE)	48
<b>III.3.2.</b> Les éléments chimiques majeurs	48
<b>III.3.2.1.</b> Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	48
<b>III.3.2.2.</b> Le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	48
<b>III.3.2.3.</b> Le sodium ( $\text{Na}^+$ )	48
<b>III.3.2.4.</b> Le potassium ( $\text{K}^+$ )	48

<b>III.3.2.5.</b> Les chlorures ( $\text{Cl}^-$ )	49
<b>III.3.2.6.</b> Les sulfates ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	49
<b>III.3.2.7.</b> Les bicarbonates ( $\text{HCO}_3^-$ )	49
<b>III.4.</b> Détermination des principaux faciès hydro-chimiques	49
<b>III.4.1.</b> Représentation graphique des faciès hydro-chimiques	50
<b>III.4.1.1.</b> Diagramme de PIPER	50
<b>III.4.1.2.</b> Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF	51
<b>III.5.</b> Cartographie hydro-chimique	52
<b>III.5.1.</b> Les chlorures (figures III.6)	53
<b>III.5.2.</b> Les bicarbonates (figures III.7)	53
<b>III.5.3.</b> Les sulfates (figures III.8)	54
<b>III.5.4.</b> Le calcium (figures III.9)	55
<b>III.5.5.</b> Le sodium (figures III.10)	56
<b>III.6.</b> Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines	57
<b>III.6.1.</b> Faciès caractéristiques	58
<b>III.6.2.</b> Origine des éléments chimiques	59
<b>III.6.2.1.</b> Les éléments $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{SO}_4^{-2}$ et $\text{HCO}_3^-$	59
<b>III.6.2.2.</b> Les éléments $\text{Na}^+$ , $\text{Cl}^-$	60
<b>III.6.2.3.</b> Les éléments $\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{-2}$ , $\text{Cl}^-$	61
<b>III.6.2.4.</b> Les éléments $\text{SO}_4^{-2}$ , $\text{Cl}^-$	62
<b>III.7.</b> Aptitude des eaux à l'irrigation	62
<b>III.7.1.</b> Classification des eaux par la méthode de Richards	63
<b>III.7.2.</b> Classification des eaux par la méthode de Wilcox	65
<b>III.</b> Conclusion	68

**CHAPITRE IV : DETERMINATION DE LA QUALITE DES EAUX SOUTERR  
AINE DANS LA REGION EL-OUED A PAR L'APPLICATION L'INDICE  
(GWQI ET IPO)**

<b>IV. Introduction</b>	71
<b>IV.1. L'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI)</b>	71
<b>IV.1.1. Définition l'indice GWQI</b>	71
<b>IV.1.2. Méthode de calcul l'inde GWQI</b>	71
<b>IV.2. L'indice de pollution (IPO)</b>	72
<b>IV.2.1. Définition l'indice IPO</b>	72
<b>IV.2.2. Méthode de Calcul de l'Indice de pollution organique (IPO)</b>	73
<b>IV.3. Calcul des indices GWQI et IPO et évaluation de la qualité des eaux</b>	75
<b>IV.3.1. Indice de qualité de l'eau GWQI</b>	75
<b>IV.3.2. Indice de pollution organique IPO</b>	79
<b>IV.4. Discussion</b>	82
<b>IV.5. Sensibilité des indices GWQI et IPO</b>	83
<b>IV.5.2. Influence des paramètres hydro chimiques sur l'indice GWQI et IPO</b>	84
<b>IV .5.2.1. Effet entre GWOI et SO4*</b>	85
<b>IV .5.2.2. Effet entre GWOI et Na</b>	85
<b>IV .5.2.3. Effet entre GWOI et Cond</b>	85
<b>IV .5.2.4. Effet entre GWOI et Mg</b>	86
<b>IV .5.2.5. Effet entre IPO et PO4</b>	86
<b>IV .5.2.6. Effet entre IPO et NO3</b>	87
<b>IV.6. Interpolation des cartes par le krigeage</b>	87
<b>IV. Conclusion</b>	90
Conclusion générale	92
Références bibliographiques	94
Annexe N° 01	96
Annexe N° 02	97

# LISTE DE TABLEAUX

Titre	Page
<b>Tableau I.1</b> : Estimation de la population.	6
<b>Tableau I.2</b> : Répartition mensuelle de la température (1996-2020).	9
<b>Tableau I.3</b> : Précipitations mensuelles, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	9
<b>Tableau I.4</b> : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	13
<b>Tableau I.5</b> : Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	14
<b>Tableau I.6</b> : Insolation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020).	15
<b>Tableau II-1</b> : Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued (D'après DHW , 2005).	29
<b>Tableau II-2</b> : Les Débits spécifiques pour les deux sites.	34
<b>Tableau II-3</b> : Valeurs de transmissivité donnée par les 2 méthodes (en m <sup>2</sup> /s)	36
<b>Tableau II-4</b> : résultats de la perméabilité (en m/s) calculés par les trois méthodes :	37
<b>Tableau II.5</b> : Les résultats des Perméabilités verticales et horizontal	37
<b>Tableau II.6</b> : Valeurs de la porosité efficace calculée par la méthode de Moench.	38
<b>Tableau II.7</b> : valeurs des porosités efficaces des différentes aquifères	38
<b>Tableau II.8</b> : Niveau piézométrique de la nappe CT en 2018	39
<b>Tableau II.9</b> : le volume soutiré des forages par usage par zone (ANRH, 2005)	41
<b>Tableau II.10</b> : Répartition des forages par usage avec les volumes respectifs (ANRH, 2005)	41
<b>Tableau II.11</b> : Estimation les besoin agricoles, industriel et domestique	42
<b>Tableau III.1</b> : Répartition et fréquence des prélèvements hydro-chimiques	45
<b>Tableau III.2</b> : Variation des paramètres physico-chimique (2021-2018).	47

<b>Tableau III.3</b> : Faciès chimiques des eaux souterraines de la plaine d'étude.	50
<b>Tableau III.4</b> : Evolution des classes d'irrigation selon Richards.	64
<b>Tableau III.5</b> : Evolution des classes d'irrigation selon Wilcox.	67
<b>Tableau IV.1</b> : qualité des eaux souterraines selon GWQI	72
<b>Tableau IV.2</b> : Grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001)	73
<b>Tableau IV.3</b> : Méthode détermination IPO A l'aide du logiciel Aquakit	74
<b>Tableau IV.4</b> : Les poids relatifs des paramètres physicochimiques Selon les normes de l'OMS.	75
<b>Tableau IV.5 (A, B)</b> : Classification de la qualité des eaux souterraines selon GWQI 2018,2021.	76
<b>Tableau IV.6</b> : Calcul de l'indice IPO des eaux souterraines de la zone d'étude pendant la campagne de l'année 2018 et 2021.	79
<b>Tableau IV.7</b> : Les données statistique des valeurs de GWQI 2021 de la zone d'étude.	83
<b>Tableau IV.8</b> : Corrélacion entre les dix paramètres GWQI.	84
<b>Tableau IV.9</b> : Corrélacion entre les trios paramètres d'IPO.	84

# LISTE DE FIGURES

Titre	Page
<b>Figure I.1</b> : Situation géographique de la wilaya d'El-oued	4
<b>Figure I.2</b> : Situation géographique de la zone d'étude	5
<b>Figure I.3</b> : Répartition Générale des Terres (Source :D.S.A /W.d'El-Oued).	8
<b>Figure I.4</b> : Température moyenne mensuelle à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020	9
<b>Figure I.5</b> : Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020	10
<b>Figure I.6</b> : Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN» pour la région d'El oued.	11
<b>Figure I.7</b> : Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1996-2020)	12
<b>Figure I.8</b> : Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	13
<b>Figure I.9</b> : L'humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	14
<b>Figure I.10</b> : Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)	15
<b>Figure I.11</b> : Plan Géologique de Grand Erg Oriental, (Khechana, S. 2014).	19
<b>Figure I.12</b> : Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages(A.N.R.H, 1989)	20
<b>Figure I.13</b> : Coupe géologique N° 3 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logslithologiques des forage	21
<b>Figure I.14</b> : Coupe géologique N° 3 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logs lithologiques des forage	22
<b>Figure II.1</b> : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972)	26
<b>Figure II.2</b> : Courbe débit spécifique / Rabattement (à Kouinine).	34
<b>Figure II.3</b> : Essai de pompage longue durée à Kouinine	35
<b>Figure II.4</b> : Courbe de la remontée (à Kouinine)	36

<b>Figure II.5</b> : Essai de pompage à longue durée à Kouinine Interprété par la méthode de Moench.	38
<b>Figure II.6</b> : Carte piézométrique de la commune EL-Oued et Kouinine en 2018	40
<b>Figure III.1</b> : Carte des points d'eau échantillonnés.	46
<b>Figure III.2</b> : Diagramme de Piper des eaux souterraines dans la plaine (2018).	51
<b>Figure III.3</b> : Diagramme de Piper des eaux souterraines dans la plaine (2021).	51
<b>Figure III.4 (A, B)</b> : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF (2018)	52
<b>Figure III.5 (A, B)</b> : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF (2021)	52
<b>Figure III.6</b> : Carte de chlorure des eaux souterraines de la plaine 2021	53
<b>Figure III.7</b> : Carte de bicarbonate des eaux souterraines de la région d'étude 2021	54
<b>Figure III.8</b> : Carte des sulfates des eaux souterraines de la plaine 2021	55
<b>Figure III.9</b> : Carte de calcium des eaux souterraines de la plaine 2021.	56
<b>Figure III.10</b> : Carte de sodium des eaux souterraines de la plaine 2021.	57
<b>Figure III.11 (A, B)</b> : Evolution et distribution des faciès chimiques.	58
<b>Figure III.12 (A, B)</b> : Détermination l'origine de calcium.	59
<b>Figure III.13 (A, B)</b> : Détermination l'origine de sodium.	60
<b>Figure III.14 (A, B)</b> : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.	61
<b>Figure III.15</b> : Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique.	62
<b>Figure III.16 (A, B)</b> : Diagramme de Richards pour l'année 2018 et 2021.	64
<b>Figure III.17</b> : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation dans la région d'étude selon la classification de Wilcox (2021)	65
<b>Figure III.18 (A, B)</b> : Diagramme de Wilcox pour l'année 2018 et 2021	66
<b>Figure III.19</b> : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation dans la région d'étude selon la classification de Wilcox (2021).	67

<b>Figure IV.1(A, B) :</b> Carte thématique de l'indice de GWQI (2018,2021) des eaux souterraines de la zone d'étude	77
<b>Figure IV.2 :</b> Indicateur géologique pour l'indice GWQI en 2021.	79
<b>Figure IV.3 (A, B) :</b> Carte thématique de l'indice de pollution organique IPO des eaux souterraines pendant les campagnes 2018, 2021.	81
<b>Figure IV.4 :</b> Valeur et classe l'indice de pollution organique sans DBO5 en 2021.	82
<b>Figure IV.5 :</b> Courbe effet entre GWOI et SO4.	85
<b>Figure IV.6 :</b> Courbe effet entre GWOI et Na	85
<b>Figure IV.7 :</b> Courbe effet entre GWOI et Cond.	85
<b>Figure IV.8 :</b> Courbe effet entre GWOI et Mg.	86
<b>Figure IV.9 :</b> Courbe effet entre GWQI et Ca.	86
<b>Figure IV.10 :</b> Courbe effet entre IPO et PO4.	86
<b>Figure IV.11 :</b> Courbe effet entre IPO et NO3.	87
<b>Figure IV.12 (A, B) :</b> Vario gramme des valeurs de l'indice GWQI 2018 et 2021	89
<b>Figure IV.13 (A, B) :</b> Krigeage de la GWQI maximale 2018, 2021 dans l'espace géographique	89



# LISTE DES ABREVIATIONS

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydriques

CI : Continental Intercalaire

CT : Complexe Terminal

DSA : Direction des Services Agricoles.

DRH : Direction des Ressources Hydriques.

FAO: Food and Agriculture Organization.

ONM : Office National Météorologique.

ADE : Algérienne Des Eaux.

DHW: Downs Hoel Water.

GWQI: Le Ground Water Quality Index.

IPO : L'indice de pollution organique

B&G : Bounar et Garde

DRE : Direction des Ressources en Eaux

# **Introduction générale**

# Introduction générale

L'eau est un élément indispensable à la vie et revêt une importance capitale pour toute activité humaine. L'eau peut être rare à certains endroits, comme les zones arides et semi-arides, ou tout simplement de mauvaise qualité dans d'autres régions. Il est certain que l'augmentation de la demande en eau pour les activités humaines accentuera les contraintes sur cette ressource. En outre, les facteurs naturels, telle que la sécheresse ou les contraintes géologiques, ont un effet sur l'approvisionnement en eau potable et sa distribution.

Il est donc essentiel de quantifier et d'analyser la quantité et la qualité des réserves en eau et de trouver le moyen de gérer cette ressource pour en assurer la durabilité.

Dans ce contexte, la présente étude vient enrichir les anciens travaux de recherche, et ce pour donner un aperçu scientifique sur l'état actuel de la nappe de commune EL-Oued et Kouinine.

La région d'étude a connu un accroissement démographique et une expansion économique importante. Ce qui a augmenté la demande en eau et a conduit à la surexploitation des eaux souterraines. La qualité des eaux de la région a subi ces dernières années une détérioration sensible, à cause de rejets domestique non contrôlés et à l'utilisation intensive et irrationnelle des engrais. Ces facteurs ont modifié le chimisme de l'eau et l'ont rendu impropre aux usages souhaités à certains endroits.

Dans cette étude, nous allons essayer de mieux comprendre l'impact des paramètres climatiques et lithologiques sur la qualité de cette ressource souterraine et d'optimiser l'interprétation des analyses physico-chimiques en utilisant des moyens adéquats.

Ce travail s'est attelé à répondre aux préoccupations suivantes :

- Quel est l'état actuel de la qualité chimique des eaux souterraines de la nappe ?
- Quels sont les mécanismes physico-chimiques régissant l'évolution des éléments chimiques dans le temps et dans l'espace (influence de la lithologie et des facteurs climatiques sur le chimisme de la nappe) ?
- Quels sont les différents polluants chimiques existant dans l'eau ainsi que leur origine ?

Afin de répondre à ces préoccupations, nous allons adopter la méthodologie suivante :

- Etude du cadre naturel et hydrodynamique.
- Etude des paramètres physiques et chimiques de l'eau.

- Etude des dépendances et relations entre les divers paramètres physico-chimiques de l'eau.
- Etude des mécanismes d'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines.
- Etude des polluants et de leur origine.

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

- La première partie est consacrée à l'étude des contextes géographique et géologique de la région d'étude en présentant les caractéristiques géologiques, et hydroclimatologique.
- La deuxième partie traite de l'hydrogéologie de la nappe du CT de commune Kouinine et EL-Oued en définissant les paramètres hydrodynamiques et interprétant sa piézométrie.
- La troisième partie concerne l'étude de l'évolution des paramètres chimiques dans le temps et dans l'espace en abordant les mécanismes de l'acquisition de la minéralisation des eaux souterraines,
- La quatrième partie concerne la détermination de la qualité d'eau souterraine à l'aide l'application des indices de qualité GWQI et l'indice de pollution organique IPO.
- En fin nous terminerons par une conclusion générale sur la qualité des eaux souterraines dans la région d'étude.

# **CHAPITRE I**

## **APERCU GENERALE SUR LA REGION D'ÉTUDE**

## I. Introduction

Dans ce chapitre, nous traiterons des généralités sur la zone d'étude, les caractéristiques les plus importantes de cette région, en termes de géographie, géologiques, démographie, climat, activité économique et agricole.

### I.1.Situation Géographique

La wilaya d'El-Oued est située dans le Sahara est d'Algérie, willaya depuis 1984, couvert une superficie totale de 37652 Km<sup>2</sup> (1), et une population de 700905 habitants, se trouver à environ 650Km ou Sud -Est d'Alger (figure I.1), et 350 Km à l'Oust de Gabes (Tunisie). Après le nouveau découpage administratif publié dans le dernier numéro du Journal Officiel du 18 décembre 2019, n°78, l'arrêté présidentiel précisant les noms, le siège et la numérotation des Etats nouvellement créés, et ce après avoir été signé par le Président de la République, Monsieur Abdelmadjid Tebboune, elle est limitée par :

- Les Wilayas de Biskra, Khenchela et Tébessa au nord,
- La Tunisie à l'est,
- Les Wilayas d'El Meghair et Touggourt à l'ouest,
- La Wilaya de Touggourt au Sud.

Notre zone d'étude présente la vallée d'El-Oued, à 7° E et 33.5° N. Cette dernière ce n'est pas un bassin versant mais une unité de ressources en eau qui est délimité par :

- Le grand erg oriental au sud,
- Une série de chotts au nord et à l'est,
- Oued Righ et ligne de palmeraie de Biskra à Touggourt à l'ouest. [1]

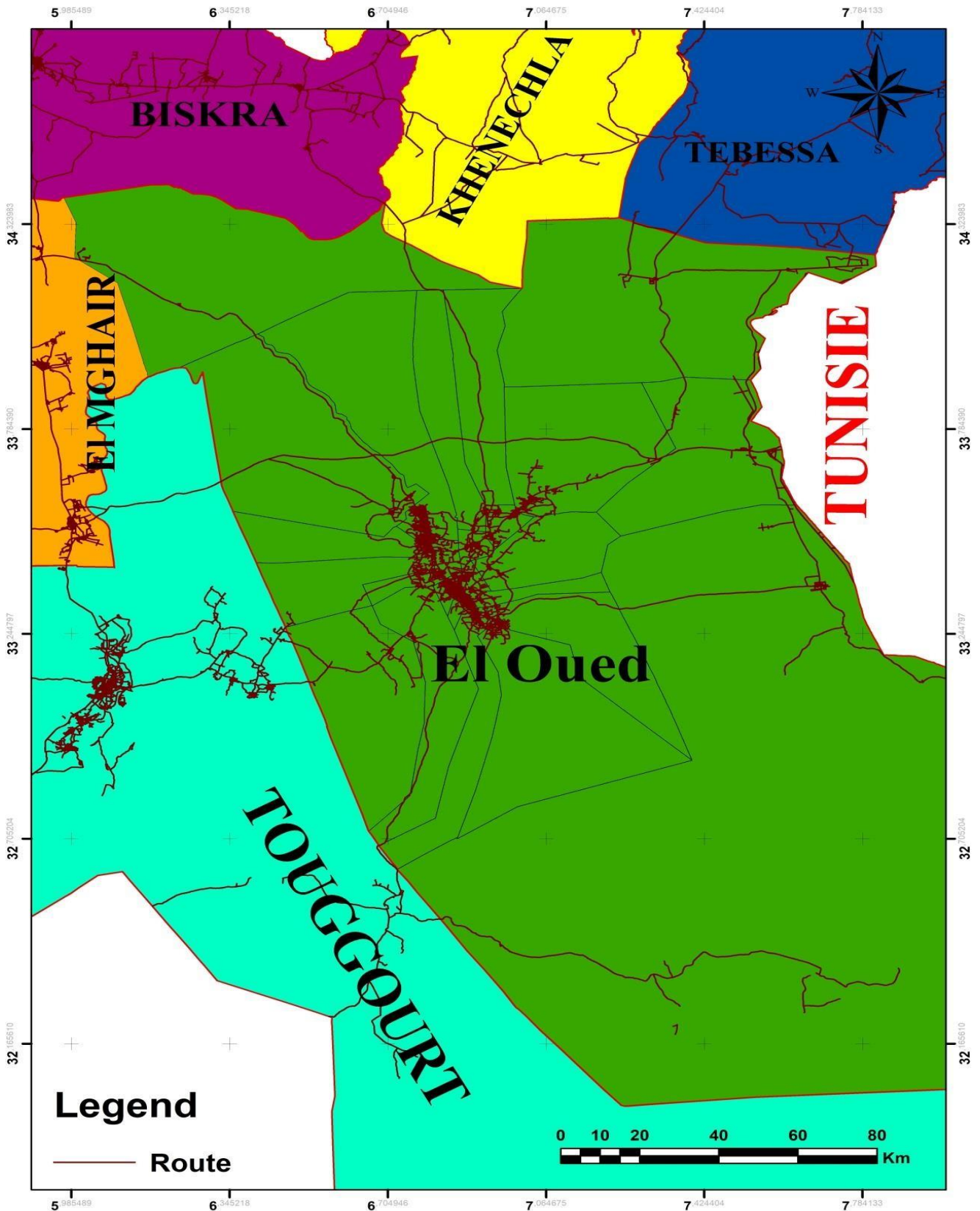
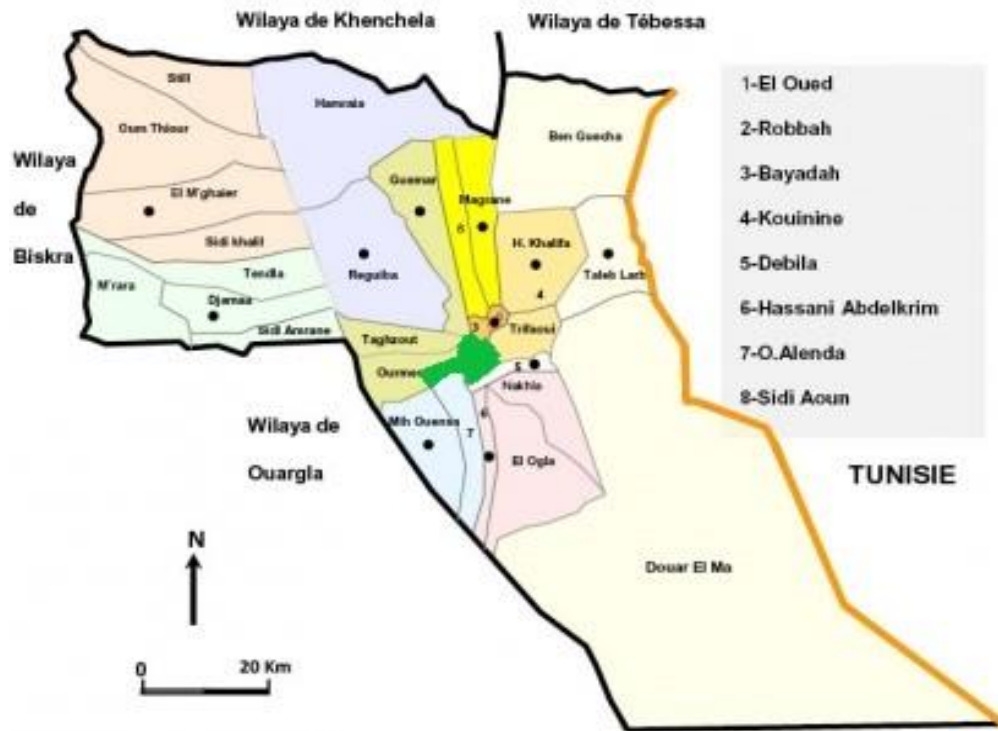


Figure I.1: Situation géographique de la wilaya d'El-Oued

Réaliser par MILOUDI Abdelmomen 2022



**Figure I.2 : Situation géographique de la zone d'étude  
présenté par le couleur vert.**

**I.2. Evolution De La Population :**

La zone d'étude comprend 18 communes qui représentent une population totale de 661470 habitants, dont la superficie occupée est de 11738 Km<sup>2</sup>.

Selon le tableau 1, nous remarquons que la commune la plus peuplée est celle d'El-Oued (2 478,51 hab/km<sup>2</sup>), suivie par la commune de Hassani Abdelkerim (566,21 hab/km<sup>2</sup>), par contre la commune d'El-Ogla à la plus faible densité de population (6,53 hab/km<sup>2</sup>).



Tableau I-1 : Estimation de la population... [1]

N°	Commune	Population(hah)	Superficies(km <sup>2</sup> )	Densité de la population (hab/km <sup>2</sup> )
01	El-Oued	190 845	77	2 478,51
02	Kouinine	14 825	116	127,80
03	Reguiba	60 935	1966	30,99
04	Guemmar	59 430	1264	47,02
05	Taghzout	19 000	539	35,25
06	Ourmes	7 755	443	17,50
07	Debila	34 920	78	447,69
08	HassaniAbdelkerim	32 840	58	566,21
09	Hassi Khalifa	44 410	1112	39,94
10	Trifaoui	11 645	474	24,57
11	Magrane	32 885	618	53,21
12	SidiAoun	16 315	480	33,99
13	Robbah	30 385	499	60,89
14	Nakhla	18 475	700	26,39
15	El-Ogla	8 835	1352	6,53
16	Bayadha	44 730	139	321,80
16	MihOuansa	24 500	1111	22,05
18	OuedAllenda	8 740	712	12,27
<b>Total</b>		<b>661470</b>	<b>11738</b>	<b>56.35</b>

Situation Au 31/12/2020 (D.P.S.B /W.d'El-Oued.)

### I.3. Activité économique d'El-Oued :

Les manifestations de la vie quotidienne traduisent un système d'organisation qui tient compte des possibilités économiques, de la vocation agricole, commerciale et artisanale. Les principales activités, exercés dans la région d'El-Oued sont :

#### ❖ La commerce :

Grâce à la position géographique entre trois Etats (Algérie, Tunisie, Libye), El-Oued a acquis une position stratégique exceptionnelle, La ville d'El-Oued seule compte 13409 commerçants.

On peut dire que la ville d'El-Oued est un centre d'échange commercial, très actif, ainsi elle constitue le centre d'achat de toute la région d'El-Oued, d'où l'importance de son marché.

**❖ L'artisanat :**

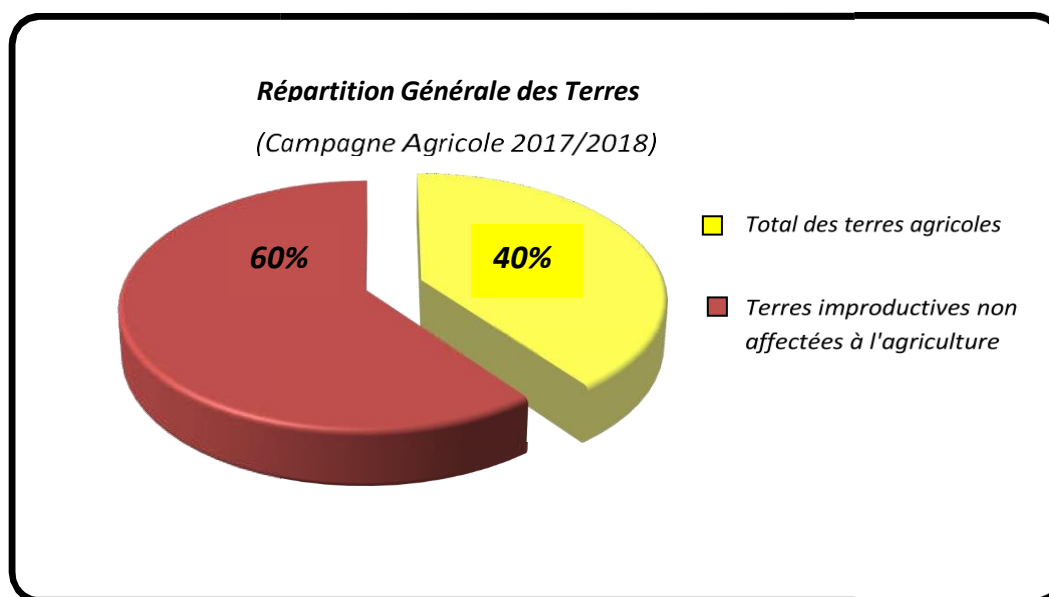
El-Oued à toujours était un centre artisanal, notamment pour les objets liés à Artisanats de production de biens et l'Artisanats d'art. Il s'agit des tailleurs, des tapissiers, des maçons, des cordonniers, des menuisiers, des bijoutiers et des forgerons.

**❖ L'industrie :**

L'industrie a connu un développement remarquable ces derniers temps, le nombre de travailleurs ayant atteint 12133 travailleurs [04]. Par 7% de l'effectif total, cela se traduit par l'émergence de plusieurs pôles multi-activités dans ce domaine de nombreuses industries ainsi que l'augmentation du nombre des petites et moyennes entreprises (PME) productrices. Les communes de (Kouinine, Taghzout) sont à l'avant-garde en termes de pourcentage élevé de travailleurs employés Secteur industriel. Où la municipalité (Kouinine) arrive en tête du classement des travailleurs totaux, et cela est dû à la zone industrielle L'installation moderne sur le sol de la commune, dans laquelle plusieurs investissements ont été enregistrés, on retrouve alors la ville (Taghzout) en deuxième place sur le total des travailleurs, en raison de la propagation de petits ateliers, ainsi qu'à proximité de la région Zone Activité à (Kouinine) de la commune de (Taghzout).

**❖ L'agriculture :**

L'état de la vallée étudiée se distingue par son caractère agricole, les terres exploitées représentant 40 % de la superficie totale (15060,8 km<sup>2</sup>) comme le montre le Figure I.3. Ces dernières décennies Souf a connue le développement de cultures maraîchères de plein champ, essentiellement la pomme de terre. La wilaya d'El- Ouedest classée première zone productrice en pomme de terre au niveau national où elle alimente le marché national à environ 40 %

**Figure I.3 : Répartition Générale des Terres (D.S.A /W.d'El-Oued).**

Dans la région d'étude, la rareté des précipitations et l'augmentation de la demande sur l'eau, pour l'alimentation en eau potable, l'irrigation et pour l'industrie, nécessite le recours des ressources en eau souterraines, les prélèvements des eaux de complexe terminal et de continentale intercalaire augmentent chaque année.

#### **I.4. Situation Climatologique :**

Le climat de la région est considéré comme un climat désertique et se caractérise par un été chaud et sec. La température atteint parfois 54 ° C, et un hiver froid et sec où la température atteint un peu temps jusqu'à 3 ° C. Nous avons obtenu toutes les données liées au climat (pluie, température, humidité, etc.) de la station conditions météorologiques à l'aéroport de Guemmar pour la période allant de 1996 à 2020 Il se résume comme suit :

##### **I.4.1. La Température :**

En raison de la nature de la région, la chaleur est très importante, car c'est l'un des facteurs les plus importants qui jouent un rôle précis l'activité agricole de la zone.

D'après ce qui est montré dans le tableau I.2 représentatif des variations mensuelles de température et la figure I.4, on note que la valeur maximale a été enregistrée au mois d'août à 43,90 ° C et la valeur la plus basse a été enregistrée au mois de janvier à 5,6 ° C.

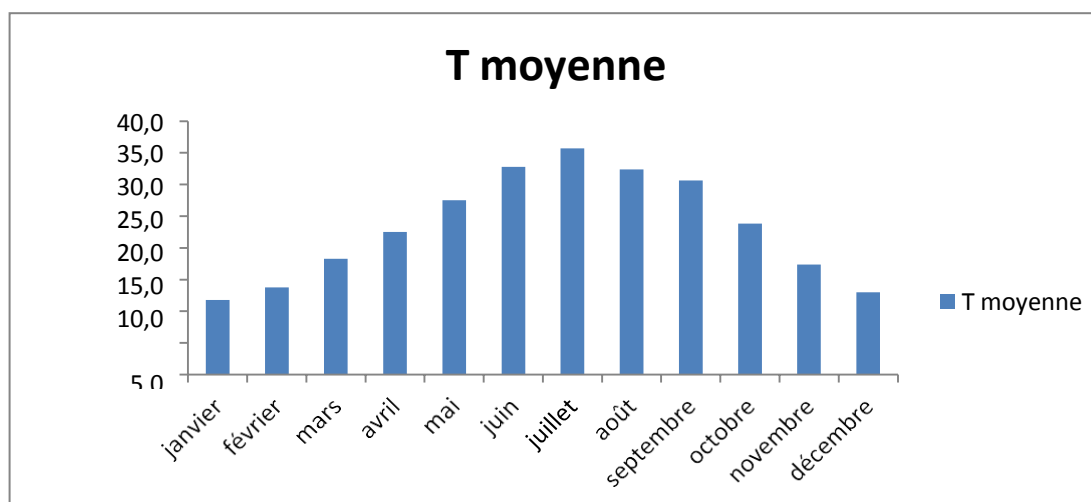
Autrement dit, une différence de température de plus de 35 ° C, ce qui est une grande différence qui a un effet direct sur les cultures.

La température annuelle moyenne pour la période (1996-2020) est estimée à 23,3 ° C.

**Tableau I.2 : Répartition mensuelle de la température (1996-2020).**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>Max</b>	17,9	20,9	25,6	30,1	35,5	41,3	43,9	37,5	38,0	30,1	23,8	19,4
<b>Min</b>	5,6	6,7	10,9	14,9	19,5	24,3	27,5	27,3	23,3	17,6	10,9	6,5
<b>Moy</b>	11,8	13,8	18,3	22,5	27,5	32,8	35,7	32,4	30,7	23,8	17,4	13,0

(ONM2021)

**Figure I.4 : Température moyenne mensuelle à la station de Guemmar au cours lapériode 1996 - 2020****I.4.2. La Précipitation :**

La région d'Oued Souf est caractérisée par des faibles précipitations en général, elle enregistre la plus grande valeur en hiver et la plus faible en été.

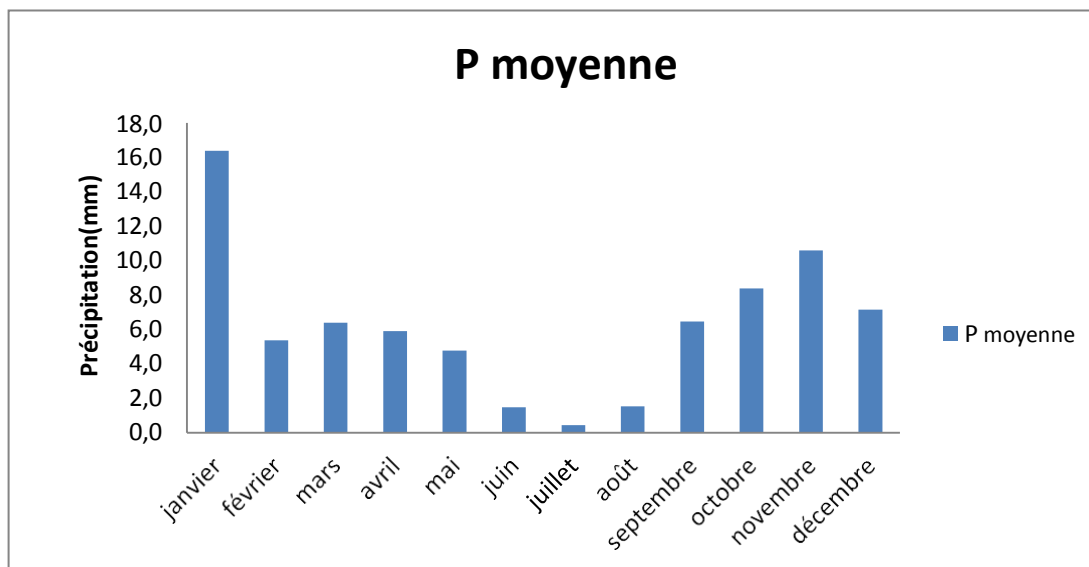
La précipitation annuelle moyenne est estimée (0.4 :16.4) mm, ce qui est une valeur faible dans une zone dans laquelle elle est située la valeur d'évaporation est très élevée car la valeur d'évaporation maximale a été enregistrée en juillet, en plus de la spécificité sols sableux à haute perméabilité.

La pluviométrie est définie comme une fluctuation observée d'année à autre et de mois à autre, avec des périodes exceptionnels là où la pluie tombe, provoquant la perte de grandes surfaces agricoles.

**Tableau I.3 : Précipitations mensuelles, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
<b>P(mm)</b>	16,4	5,4	6,4	5,9	4,8	1,5	0,4	1,5	6,5	8,4	10,6	7,2

(ONM 2021)



**Figure I.5 : Précipitations moyenne mensuelles enregistrées à la station de Guemmar au cours la période 1996 – 2020**

#### **I.4.3. Détermination des périodes sèches et de l'étage bioclimatique de la région d'El-Oued :**

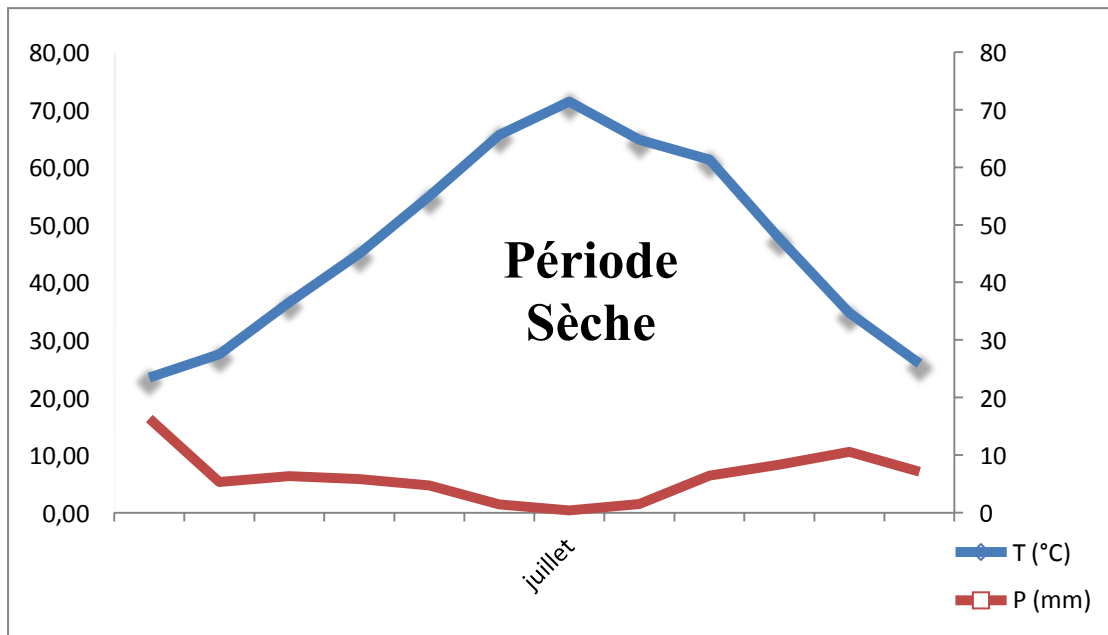
Le diagramme d'ombrothermique de GAUSSEN permet déterminer les périodes sèches et humides d'une région quelconque à partir des séries de précipitation et de température (paramètres en valeurs moyennes mensuelles). Le principe de calcul est selon l'équation suivante (Saad Allah, 2018) :

$$P = 2T$$

P : Précipitation moyenne mensuelle (mm)

T : température moyenne mensuelle (°C)

Si la courbe des précipitations est au-dessus de la courbe de la température la période est humide si non elle est sèche. On constate, d'après figure I.6 suivant, que la région d'El-Oued est totalement sèche tout au long de l'année, aucune période humide n'était observée. Ceci confirme l'aspect saharien de la région.



**Figure I.6 : Diagramme ombrothermique de « GAUSSEN »  
pour la région d'El-Oued.**

### Diagramme d'Emberger

Pour déterminer les types de climat de la zone méditerranéenne, Le Emberger (1955) a proposé la détermination d'un quotient pluviométrique  $Q_2$  (figure I-5). Ce quotient dépend de la précipitation moyenne annuelle et les moyennes des températures min et max, respectivement des mois les plus froids et les plus chauds (Bouselsal, 2016).

$$Q_2 = 3.43 \times \frac{P}{M - m}$$

$Q_2$ : facteur des précipitations d'Emberger

$P$  : Précipitation moyenne annuelle (mm)

$M$  : moyenne des max du mois le plus chaud (°C).

$m$  : moyenne des min du mois le plus froid (°C).

Pour le cas de la station de El-Oued au cours la période 1996 - 2020, on trouve

Pour

$$Q_2 = \frac{3.43 \times 75}{35.7 \times 11.8} = 10.76 \text{ mm/C}^\circ$$

t (m)=11.8 °C que la région se trouve dans l'étage bioclimatique

« saharienne très chaud », voir figure I.7.

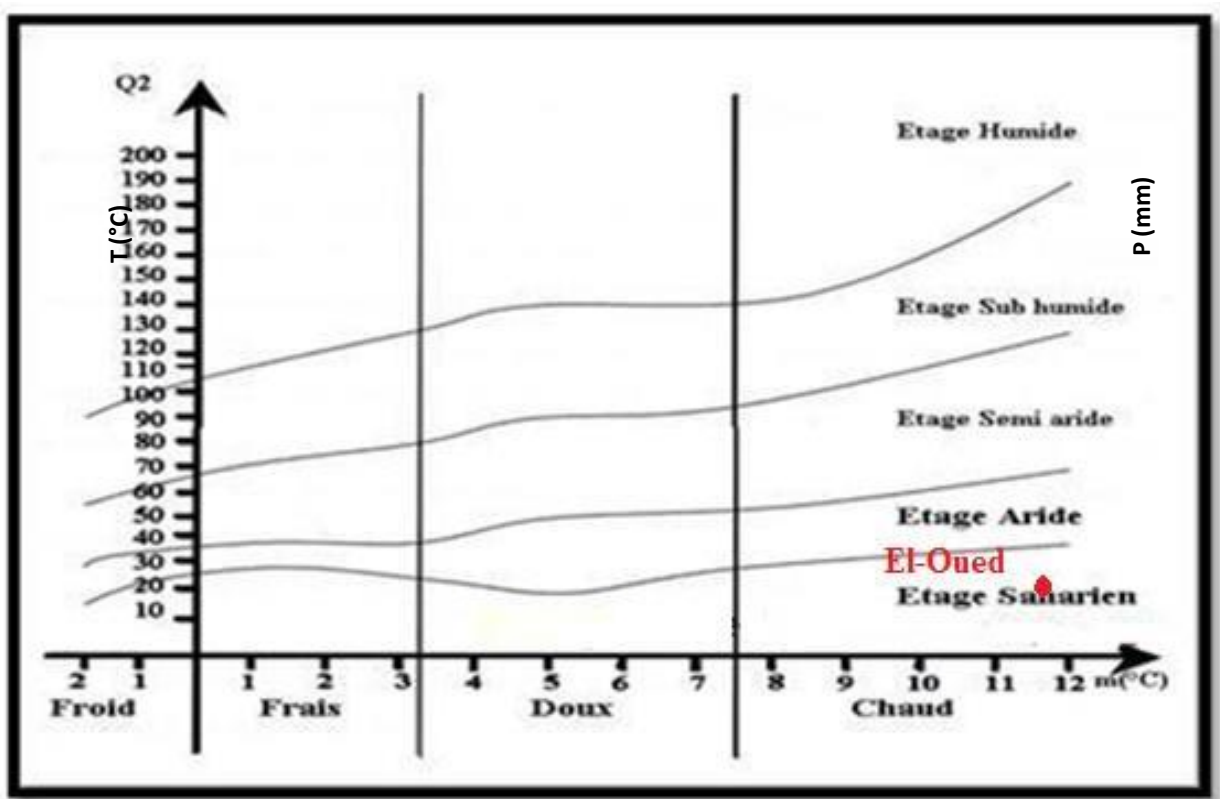


Figure I.7 : Diagramme d'Emberger de la station d'El-Oued (1996-2020)

#### L'indice d'aridité de De Martonne (1926) :

L'indice d'aridité de De Martonne ( $\text{mm}/^{\circ}\text{C}$ ) est un indicateur utile pour caractériser le phénomène d'aridité en exprimant le caractère restrictif pour certaines formations végétales (Koussa, 2017) :

$$\text{IDM} = P / (T + 10) \quad \text{où}$$

P : est la quantité annuelle de précipitations,

T : est la température moyenne annuelle de l'air.

De Martonne a proposé six grands types de climats selon les valeurs de cet indice.

- $\text{IDM} < 5$  Aridité absolue désert sans culture,
- 5 à 10 déserts (aride) désert et steppe ; aucune culture sans irrigation,
- 10 à 20 semi-aride formations herbacées, steppes ou savanes. Irrigation nécessaire pour les cultures exigeant de l'humidité,

- 20 à 30 semi-humide prairie naturelle ; irrigation généralement non nécessaire,
- 30 à 40 humide les arbres jouent un rôle de plus en plus grand dans le paysage,
- IDM > 40 humide la forêt est partout la formation climatique. Les cultures de céréales tendent à être remplacées par les herbages.

Cet indice ne doit être utilisé que pour un découpage en grandes zones climatiques.

Pour notre cas nous avons calculé cet indice comme suit :

$$IDM = p / T + 10 = 75 / 23.30 + 10 = 2.25 > 5 \text{ (climat hyper aride).}$$

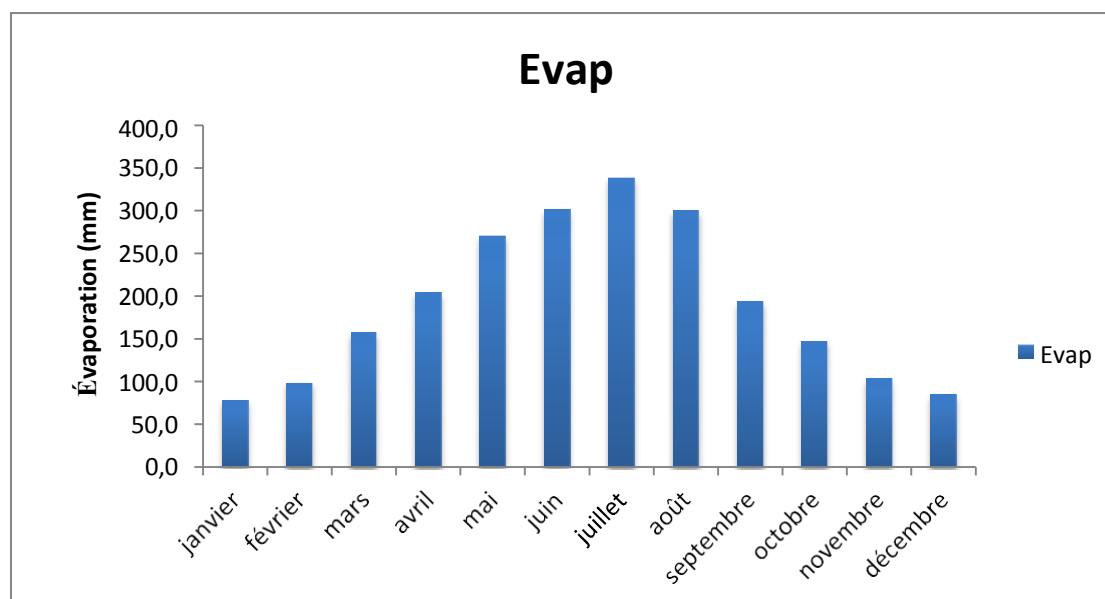
#### I.4.4. L'évaporation :

Le facteur d'évaporation a enregistré des valeurs importantes ces dernières années entre (84.7–339,4) mm Son interprétation est la suivante : l'intensité de la chaleur et des précipitations, car ces deux facteurs ont connu une augmentation significative sans oublier l'effet celle sur le couvert végétal représente les changements relatifs d'évaporation pour la période (1996-2020).

**Tableau I.4 : Evaporation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Evapor (mm)	99,4	157,5	157,5	204,2	270,7	301,3	339,4	300,2	193,9	147,3	103,2	84,7

(ONM2021)



**Figure I.8 : Evaporation moyenne mensuelle pour la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**



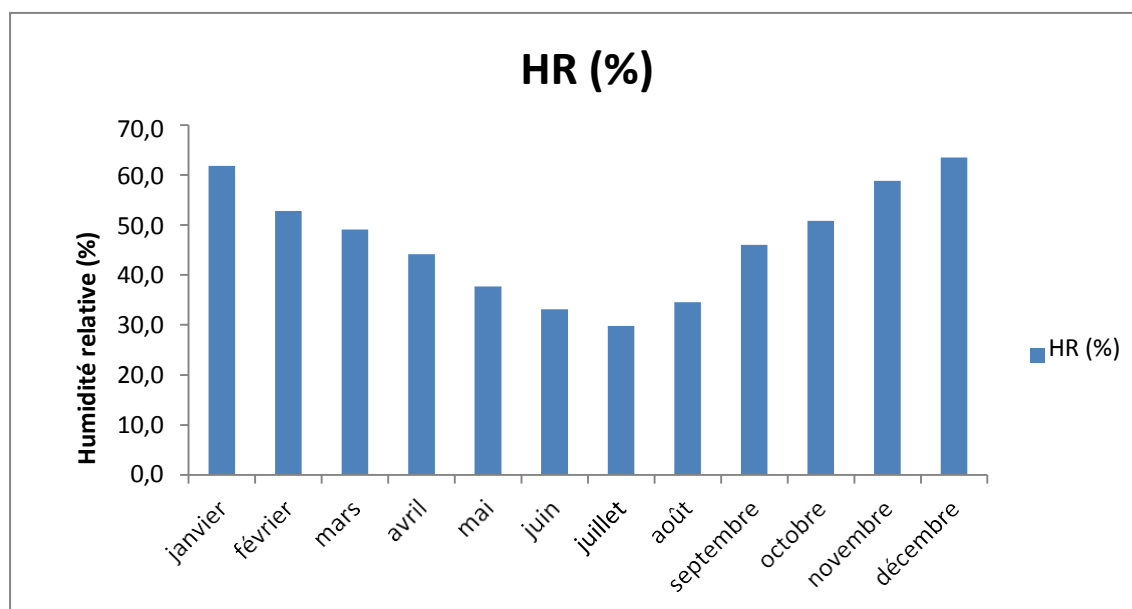
#### I.4.5. L'humidité :

L'humidité est liée à la température et à la présence de plans d'eau, et elle varie selon les saisons. La zone où l'on peut dire que la wilaya d'El-Oued connaîtra Cinqmois humides d'octobre à le mois de février où le taux d'humidité dépasse 50%, le maximum du mois de décembre est de 63.5%.

**Tableau I.5 : Humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Humidité %	61,8	52,8	49,1	44,2	37,7	33,2	29,8	34,6	46,0	50,8	58,9	63,5

(ONM2021)



**Figure I.9 : L'humidité relative moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**

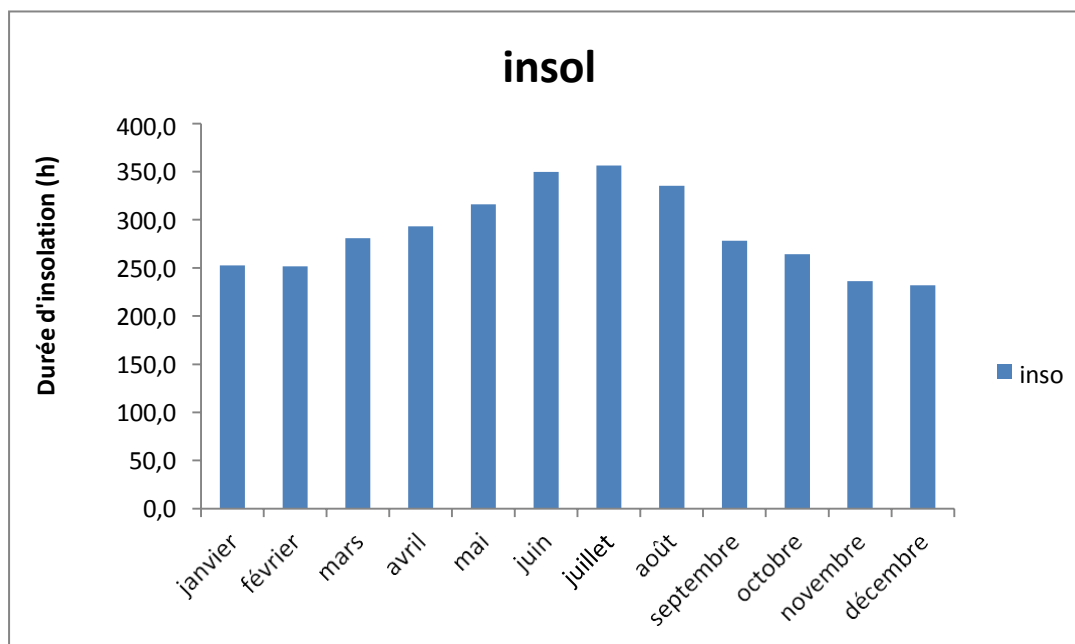
#### I.4.6. La durée d'insolation :

L'insolation est la durée d'apparition du Soleil, elle est exprimée en heurs. Elle varie en fonction de latitude et le taux de couverture nuageux. La région d'El-Oued reçoit une quantité d'insolation relativement très forte. On note que le mois de juillet et le plus ensoleillé d'une durée mensuelle de 356,2 heures et que le mois de décembre et le mois le moins ensoleillé d'une durée de 232 heures. Voir Tableau I.6 et figure I.10.

**Tableau I.6 : Insolation moyenne mensuelle, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**

Mois	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Ensol (Heur)	252,4	251,6	280,8	293,1	316,1	349,8	356,2	335,45	278,1	264,3	236,2	232

(ONM2021)



**Figure I.10 : Durée d'insolation moyenne, enregistrées à la station de Guemmar au cours de la période (1996-2020)**

#### I.4.7. Le Vent :

Selon la rose des vents, observée pour les vents dans une direction est-nord-est, Il est le dominant suivi des vents du sud-ouest et se caractérise par sa température élevée et est connu localement sous le nom de al-shehili.

Dans la zone d'étude, les vents jouent un rôle important en raison de leur surface lorsqu'ils travaillent pour former des dunes Sablonneux. Dans la région, on distingue trois types de vents :

##### ❖ Al-Shehili

Il souffle en été du côté sud, et il est chargé d'air chaud, donc il fonctionne pour se soulever de la température, qui affecte négativement les cultures car elle accélère les processus d'évaporation et de transpiration, et ses plages de vitesse entre 10 - 17 km/h

**❖ Al Dhahrawi**

Sa vitesse varie entre 13-16 km / h, car il a des vitesses élevées, qui souffle au printemps dans la direction du nord-ouest est qu'il paralyse la circulation et travaille à enterrer les Ghitans avec du sable.

**❖ El-bahri**

Ce sont des vents qui soufflent à l'automne, qui sont chargés d'un degré d'humidité considérable, avec une direction Est - Ouest, la vitesse varie entre 10 et 11 km / h.

**I.5. Géologiques 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 une autre.

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

**I.5.1. Formation de la Secondaire :****I.5.1.1. Le Barrémien :**

Cet étage est capté par tous les forages du continental intercalaires réalisés dans cette région ; il présente une lithologie d'alternance de grès avec passages d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on rencontre également des sables avec présence de silex. L'épaisseur moyenne de cet étage est de l'ordre de 200 à 230 mètres (Sahraoui, 2016).

**I.5.1.2. L'Aptien :**

Comme le Barrémien, ce dernier est constitué principalement par des formations dolomitiques, marneuses et marno-calcaires. D'après les coupes géologiques des forages réalisés dans la région, l'Aptien est le seul étage dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres (Boulifa, 2012).

**I.5.1.3. L'Albien :**

Cet étage est constitué par une alternance de marnes, de grès de sables et par des calcaires avec passages de silex et d'argile. La limite inférieure est constituée par le toit de la barre aptienne, alors que sa limite supérieure se caractérise par l'apparition des faciès argilo carbonatés. D'après les coupes de sondages des forages Albien, l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 mètres ; dans d'autres endroits elle peut atteindre 200 mètres (Sahraoui, 2016).

**I.5.1.4. Le Vraconien :**

C'est une zone de transition entre l'Albien sableux et le Cénomaniens argilo- carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques. On rencontre aussi des sables avec passages des grès à ciment calcaires.

Cet étage constitue la couverture de l'albien par des niveaux argileux. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude varie entre 250 m et 300 m.

**I.5.1.5. Le Cénomaniens :**

Les forages réalisés dans cette région ont montré que cet étage est constitué par une alternance de dolomies, de calcaires dolomitiques, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites. La limite inférieure de cet étage est caractérisée par l'apparition d'évaporites et de dolomies qui le distingue nettement, tandis que sa limite supérieure caractérisée par l'apparition d'évaporites et de calcaires correspond à la base du Turonien. L'épaisseur de cet étage dans toute la zone d'étude est environ 120 m (Bouselsal, 2016)

**I.5.1.6. Le Turonien :**

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

**I.5.1.7. Sénonien :**

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

**I.5.1.7.1. Sénonien lagunaire :**

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

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

**I.5.1.7.2. Sénonien carbonaté :**

Ce second sous étage est constitué par des dolomies, des calcaires dolomitiques, avec des intercalations marno-argileuses et en grande partie par des calcaires fissurés et de dolomies

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

## **I.5.2. Formation de la Tertiaire :**

### **I.5.2.1. L'Eocène :**

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

### **I.5.2.2. Le Mio-pliocène :**

Ce dernier repose en discordance indifféremment sur le primaire, d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autres 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 et de calcaires. Cet horizon est composé de quatre niveaux :

- Niveau Argileux :

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

- 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).

- Niveau Argilo-Sableux

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

- 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.5.3. Formations du Quaternaire :

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

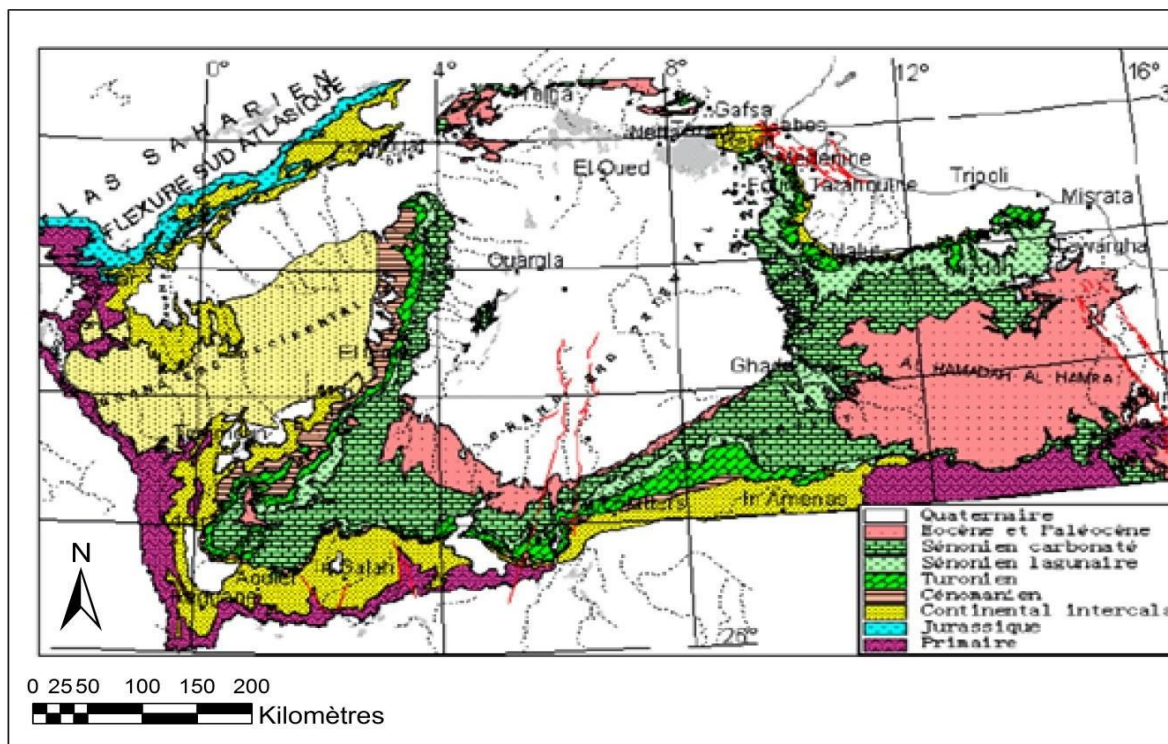


Figure I.11 : Plan Géologique de Grand Erg Oriental. [1].

### I.5.4. 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) [04].

#### I.5.4.1. 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 (Figure I.12).

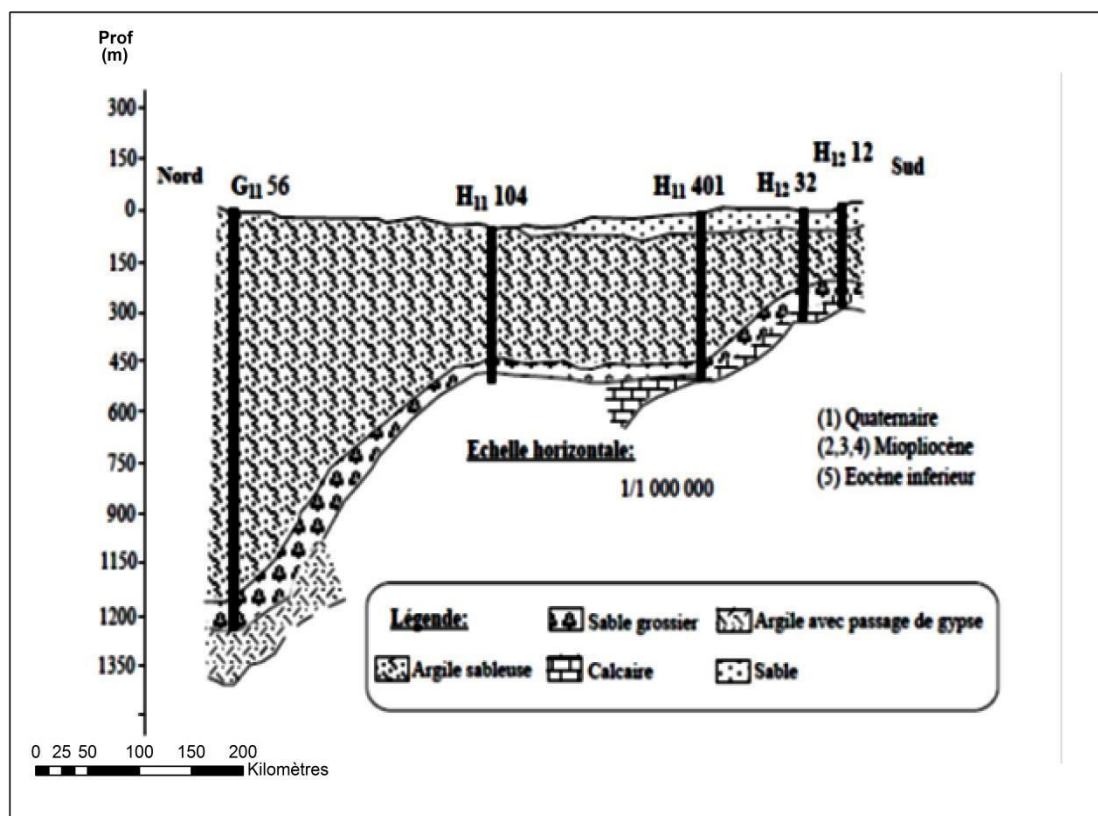


Figure I.12 : Coupe géologique N° 1 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logs lithologiques des forages

#### I.5.4.2. 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 200 m). Cette dernière devient régulière sur tout le reste de la région, au contraire de celle de Quaternaire qui est constituée par des sables qui changent d'une région à une autre (par exemple, au niveau du forage H12-540 l'épaisseur présente presque la moitié de celle de H12 -84) (Figure I.13).



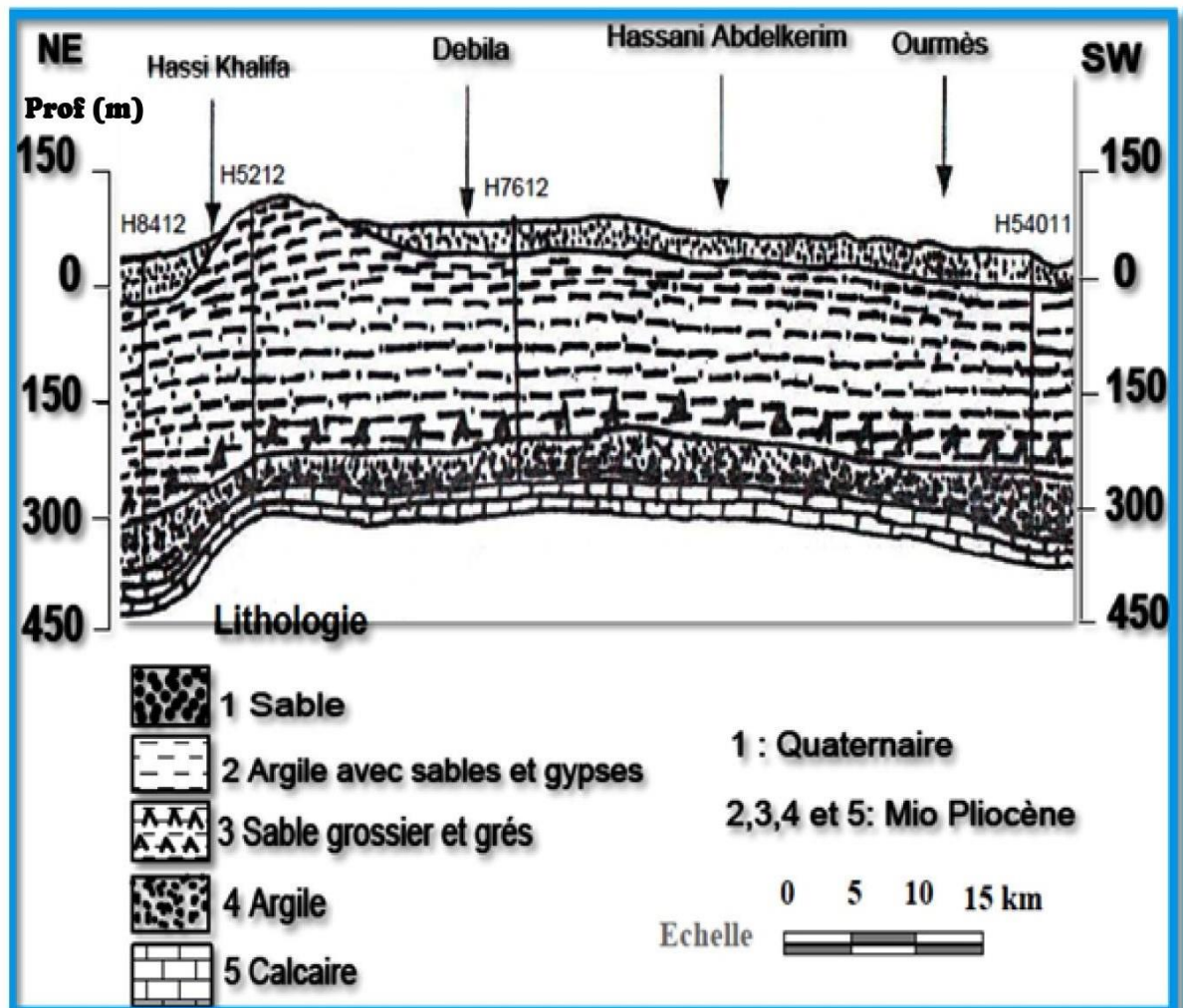


Figure I.13 : Coupe géologique N° 2, Extraite à partir des logs lithologiques des forages (A.N.R.H, 1989)



I.5.4.3. Coupe N°03 :

La coupe N° 3 est orientée du Nord-Ouest vers le Sud-Est, elle est différente des autres surtout du point de vue stratification ; cette dernière entre croisée, ce qui donne naissance à des « biseautages ». Cette situation est bien visible dans les quatre premiers forages. On constate que l'épaisseur des formations quaternaires, est plus importante au Nord-Ouest qu'au Sud-est. (Figure I.14)

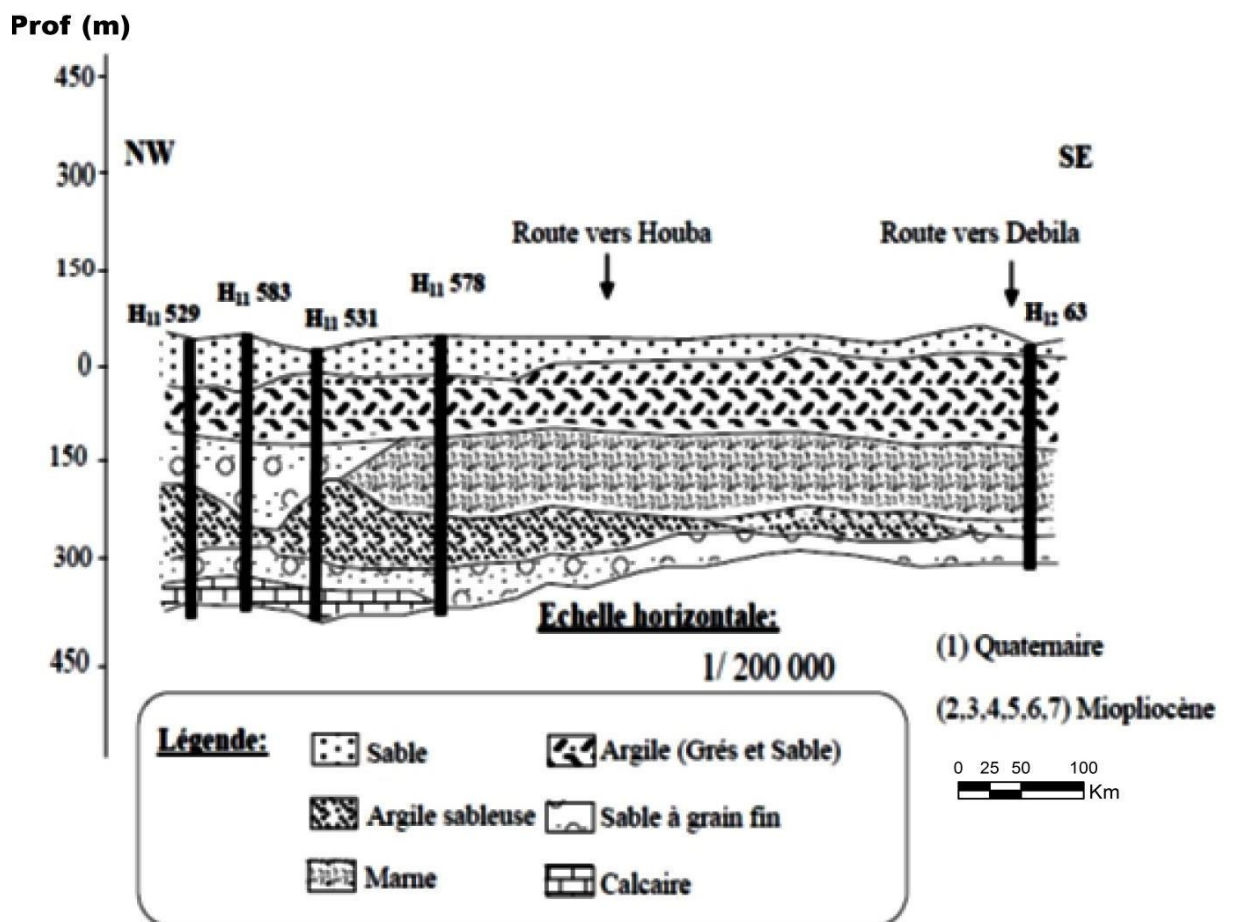


Figure I.14 : Coupe géologique N° 3 (A.N.R.H, 1989) extrait à partir des logs lithologiques des forage.

### **I.5.5. Tectonique :**

La zone d'étude fait partie du bassin sédimentaire du Sahara septentrional dont l'extension couvre une superficie de 780 000 km<sup>2</sup>. Ce bassin, vaste zone d'épandage, constitue une importante dépression topographique, laquelle est sous-tendue par une cuvette structurale en forme de synclinal dissymétrique. La série sédimentaire est marquée, au centre de la fosse, par d'importants accidents tectoniques sub-verticaux.

La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacée forme un vaste synclinal dont le fond a un très grand rayon de courbure. Les courbes sédimentaires semblent s'épaissir du Nord d'El-Oued vers le centre de cette dépression, ce qui montre que l'approfondissement suit de près la sédimentation. Donc si nous désirons retracer l'évènement paléogéographique du Souf, il faut noter qu'au cours de la jeunesse de l'immense dépression au début du Quaternaire et sous l'effet de la sédimentation, le centre de celle-ci (dépression) se déplace en fonction du temps vers le Nord tout en donnant naissance à des nouvelles dépressions correspondant actuellement à la zone des chotts, où leur naissance ne s'est effectuée qu'à la fin du Quaternaire.

Ces caractéristiques ont favorisé la formation dans d'El-Oued et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès.

L'aquifère Quaternaire d'El-Oued présente une épaisseur moyenne de 40 mètres. Son substratum est structuré en de nombreuses dépressions, dômes et sillons. Il affleure au Nord-Ouest de la région de Foulia et se situe à moins de 10 mètres de profondeur aux extrémités Nord-est de la région d'étude. La série sédimentaire lagunaire recouvrant la plate-forme crétacée forme un vaste synclinal dont le fond est doté d'un très grand rayon de courbure.

### **I.5.6. Relief :**

Le relief de la ville d'El-Oued est Caractérisé par l'existence de trois principales formes :

- Une région sableuse : qui se présente sous un double aspect ; l'Erg et le Sahara.
- Une forme de plateaux rocheux : qui s'étend vers le Sud avec une alternance de dunes et de crêtes rocheuses.

- Une zone de dépression : caractérisée par la présence d'une multitude de chotts qui plongent vers l'Est.

Il est à signaler que l'altitude diminue du Sud vers le Nord et de l'Ouest vers l'Est pour devenir négative au niveau des chotts.

### **I. Conclusion :**

Compte tenu de l'immensité de la zone d'étude et de sa distinction avec son climat désertique chaud et sec en été et froid et peu de pluie en hiver et son couvert végétal représenté dans les palmiers et certaines cultures saisonnières comme la culture de pommes de terre et de melons, et avec la présence de certains vents dominants tels que le Sirocco (al-shehili) chaud, qui affecte l'augmentation du phénomène d'évaporation et l'évapotranspiration.

# **CHAPITRE II**

# **HYDROGEOLOGIE**

**II. Introduction :**

Les cartes piézométriques, établies principalement avec des données sur les niveaux piézométriques, représentent à une date et à une période donnée la distribution spatiale des charges et des potentiels hydrauliques dans une nappe donnée. Elles représentent également les conditions aux limites hydrodynamiques. Il est évident que, le régime naturel des eaux souterraines peut être perturbé par la surexploitation des ouvrages de captages (forages et puits) qui constituent une source d'épuisement et de diminution. C'est ce que nous allons confirmer par l'étude hydrogéologique de la nappe de commune de El-Oued et commune de Kouinine. La région d'étude englobe 20 points d'eau, la moitié de ces points d'eau répartis dans la zone d'étude.

D'après les études hydrogéologiques effectuées dans le passé par CORNET (1961 et 1964). (L'UNESCO : 1972), MARGAT (1992), la coupe schématique (Figure (II-1)) établie à partir des coupes de sondages, nous observons l'existence de deux types de nappes (nappe libre et captive).

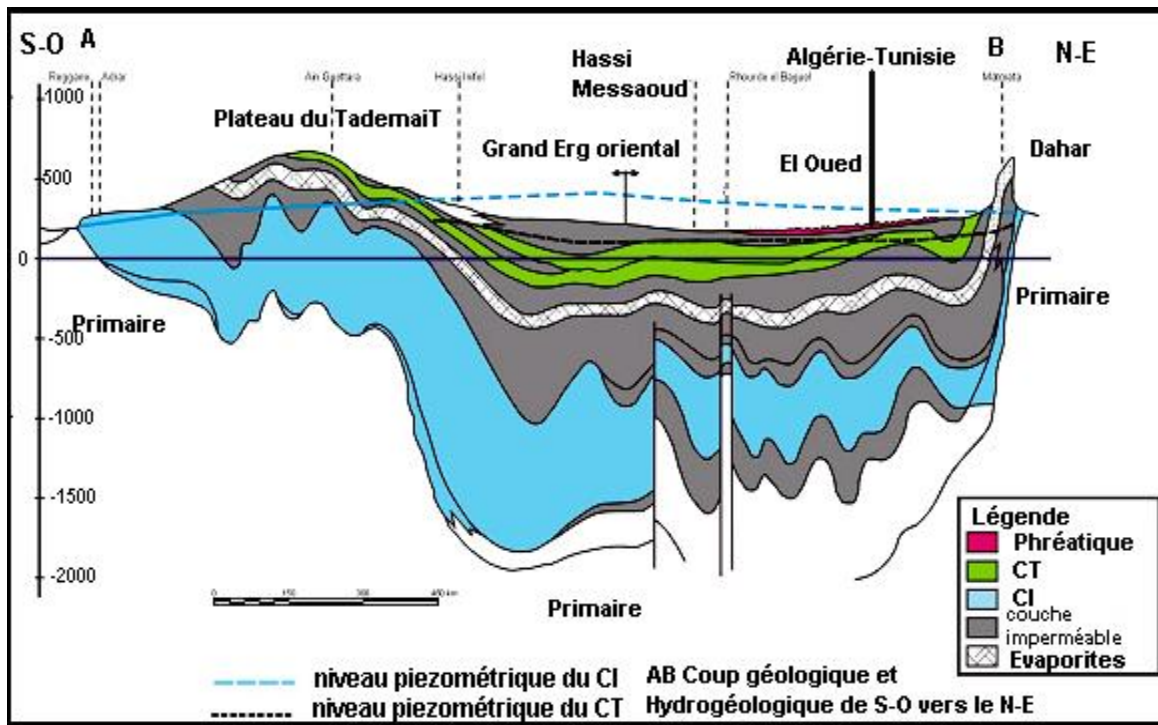


Figure (II.1) : Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (UNESCO, 1972) (ANRH)

## II.1. Identification géologique de l'aquifère :

La géologie, moyen d'étude de l'eau souterraine, est la base fondamentale de l'hydrogéologie. La géologie identifie des formations litho stratigraphique par les caractéristiques des matériaux et la structure du sous-sol. Celle-ci détermine, complétées par des informations sur l'eau souterraine, les formations hydrogéologiques. Les formations hydrogéologiques perméables constituent les gisements d'eau souterraine ou aquifères, dont elles identifient la configuration et la structure du réservoir. La localisation en profondeur et l'extension géographique des zones aquifères, sont étroitement liées à celles des formations hydrogéologiques. Les caractéristiques géochimiques des réservoirs agissent sur la qualité de l'eau souterraine, ce que nous allons voir dans le chapitre de l'étude hydro chimique.

L'identification d'une aquifère repose sur trois critères : géologique, hydrodynamique et hydro chimique. L'alimentation, le stockage et l'écoulement de l'eau souterraine sont imposés, en premier lieu, par la géologie, base fondamentale de l'hydrogéologie. La géologie identifie, par des études stratigraphiques et structurales, des formations litho stratigraphiques. Un aquifère est un système hydrologique identifié par un domaine d'espace souterrain, appelé réservoir qui est caractérisé par trois données :

- Volume ou réserve.
- Localisation, altitude et profondeur.
- Structure lithologique et anatomie identifiée par les caractéristiques physiques (porosité, granulométrie), géochimique (sels solubles) et structurales (déformations, fissurations) des matériaux qui constitue le réservoir.

Il en résulte que l'étude hydrogéologique, dont le but essentiel est l'identification des aquifères, débute par celle des réservoirs.

### II.1.1. Identification des formations litho stratigraphique :

Une formation litho stratigraphique est constituée par un corps de terrain de nature pétrographique homogène : sable, limon, argile, grés, gypse, granite, ...etc.

- **Surfaces limites du réservoir** : Les surfaces limitent du réservoir, inférieur ou substratum, supérieur ou le toit.
- **Structure du réservoir** : La sédimentologie, l'analyse structurale et la géochimie, déterminent les caractéristiques physique et chimique du réservoir, c'est-à-dire sa structure (granulométrie, fissuration, porosité).

**II.1.2. Identification des formations hydrogéologiques et des aquifères :**

Une formation hydrogéologique est une formation litho stratigraphique ou leur combinaison, ayant des fonctions vis-à-vis du stockage et de l'écoulement de l'eau souterraine. Trois ordres de grandeur sont à considérer :

- Un toit ou un substratum ou un semi perméable.
- La combinaison de formations hydrogéologiques perméables et semi perméables, identifiant un aquifère multicouche.
- La combinaison de nombreuses formations hydrogéologique, constituant une structure hydrogéologique.

La caractéristique essentielle d'une formation hydrogéologique est son degré de perméabilité. La perméabilité, aptitude d'un réservoir à conduire l'écoulement de l'eau dans des conditions hydrodynamiques imposées, permet un classement en trois grandes catégories : perméable, semi perméable et imperméable.

**II.2. Ressources en eau souterraines :**

La wilaya d'El-Oued présente des potentialités en eau assez importantes, représentées par trois types d'aquifères, l'un libre correspondant à la nappe phréatique, les deux autres sont captifs, correspondant aux nappes multicouches du complexe terminal et la nappe du continental intercalaire.

**II.2.1. Hydrogéologie de la région :**

Comme presque tout le Sahara septentrional la superposition des Aquifères est la suivante (de haut en bas). Les aquifères existants : D'après le tableau (II-1) récapitulatif de la superposition des aquifères on observe :

Tableau II.1 : Récapitulatif des systèmes aquifères d'El-Oued. (D'après DHW, 2005).  
(ADE)

Nature hydrogéologique		Nature lithologique	Étage		Ère
Niveau perméable	Nappe Phréatique	Sables	Quaternaire		
Niveau Imperméable		Argiles			
1 nappe des sables	Complexe Terminale	Sables	Pliocène		Tertiaire
Semi –perméable		Argiles gypseuses			
2 nappes des sables		Sables grossiers, graviers	Pontien	Miocène	
Niveau imperméable		Argiles lagunaires, marnes	Moyen	Éocène	
Nappe des calcaires (perméables)		Calcaire fissuré	Inférieur		
Semi-perméable	Évaporites, argiles		Sénonien carbonaté	Crétacé	Secondaire
Niveau imperméable	Argiles, marne	Cénomaniens			
Niveau perméable	Sables et Grés	Albien			
Semi-perméable	Calcaire, marne	Aptien			
Niveau perméable	Calcaire, sable	Barrémien			
Nappe Continental Intercalaire					

➤ La nappe phréatique :

Cette nappe est comprise dans des dépôts sableux fins de type éolien d'âge quaternaire, elle existe au niveau de toute la wilaya, elle est constituée à sa partie supérieure par des sables dunaires, tandis que la partie inférieure est constituée par les formations argilo-évaporitiques formant ainsi le toit imperméable de la nappe sous-jacente du complexe Terminal. Sa profondeur peut atteindre 80m, cela varie d'une zone à une autre. Son épaisseur est d'environ 54 mètres du sud de la zone d'étude jusqu'à la région de Guemmar, puis diminue vers le nord pour atteindre une vingtaine de mètres au nord de la zone d'étude. (DRE)



Cette nappe a engendré un problème néfaste pour l'environnement et l'agriculture dans certaines zones de la vallée.

➤ **La nappe du Complexe Terminal (CT) :**

C'est une nappe multicouche. Le CT dans la région existe sous forme de trois nappes, Les deux premières correspondent aux nappes des sables d'âge Mio-pliocène et Pontien, la dernière est celle des calcaires d'âge Senono-Éocène.

❖ **Nappe de sable :**

- **Nappe Moi-pliocène :** Cette nappe d'âge Moi-pliocène c'est une formation du complexe terminal appartenant aux nappes captives en charge sous des toits imperméables formés par plusieurs couches réservoirs, elle est constituée principalement par des sables peu grossiers, des sables argileux, des argiles sableuses ou marneuses, sable et gravier gypseux, se trouvant à une profondeur de 180 m jusqu'à 400m. Cette nappe du Mio-Pliocène couvre presque toute la wilaya. Elle est subdivisée en deux autres nappes séparées par un horizon semi-imperméable qui donne à ce dernier un aquifère de type captif. Le substratum argileux de la nappe sous-jacente correspond au toit de la 3ème nappe du complexe Terminal correspondant à la nappe du calcaire.
- **Nappe du Pontien :** La deuxième nappe des sables est d'âge Pontien (Éocènes supérieur), elle se situe entre la première et la nappe des calcaires. Sa profondeur varie entre 400 et 600 m. Cette dernière est captée par quelques forages dans la région de : Hamraia, Reguiba et Hassi Khalifa. (DRE)

**NB :** Dans la région du Souf, plus de 60 forages exploitent les sables et graviers du Pontien.

- ❖ **Nappe des calcaires (Éocène et Sénonien) :** C'est une nappe qui n'est pas sollicitée, vu sa structure géologique qui ne présente guère d'intérêt, elle est composée de formations calcaires usées de l'éocène inférieur. Sa limite supérieure rencontre l'éocène moyen qui est formé par des argiles lagunaires tandis que sa limite inférieure rentre en contact avec le sénonien lagunaire formé par des évaporites et des argiles. (Éocène inférieur à sénonien carbonaté).

On distingue deux niveaux durs servant de repères pour la classification des eaux souterraines, permis eux il existe le banc de nature calcaire et un autre constitué par des calcaires gypseux et poudingues au-dessus de ces deux bancs ce sont les sables grossiers et graviers

siliceux du Pontien.

Le niveau hydrostatique de la nappe CT dans cette région fluctue entre 10 et 60 mètres selon les zones. Le débit extrait pour cette nappe à la fin de l'année 1998 est de 78 Hm<sup>3</sup>.

➤ **Nappe du Continent Intercalaire (CI) :**

Le terme « CT » correspond ainsi aux formations continentales du Crétacé Inférieur. Cette période se situe entre deux cycles sédimentaires régis par une régression marine suivie d'une transgression du crétacé supérieur. Le Continental Intercalaire, occupe l'intervalle stratigraphique entre la base du Trias et le sommet de l'Albien, c'est le plus important aquifère, sa lithologie est essentiellement des sables et des grès parfois argileux, son mur ainsi que son toit sont constitués par d'épaisses couches d'argile qui lui donnent le type captif. Le réservoir du Continental Intercalaire est contenu dans les formations du crétacé inférieur (Albien et Barrémien). Sa profondeur varie entre 1600 et 2000m. L'épaisseur utile peut atteindre 900 m.

L'importance de cette nappe se fait sentir par son volume considérable qui se manifeste par une très grande extension (600000 km<sup>2</sup>) et son épaisseur moyenne est de plusieurs centaines de mètres. L'intérêt majeur de ce système aquifère offre de très grandes quantités d'eau de bonne qualité par rapport à la nappe précédente. Cet aquifère est à ce jour capté pour l'alimentation en eau potable des agglomérations ainsi que pour l'irrigation des périmètres agricoles.

Cette nappe est exploitée par 3 forages dans la région du Souf, dont 02 sont destinés à l'alimentation en eau potable et 01 pour l'irrigation, Le débit d'exploitation par forage est de 200 l/s. La température des eaux de la nappe de CI est très élevée peut atteindre 60° C. (DRE)

### **II.2.2. Types d'aquifères :**

Un aquifère est un réservoir d'eau souterrain, suffisamment poreux et suffisamment perméable pour être considéré comme une réserve exploitable par l'homme. L'aquifère contient une nappe d'eau (douce) : l'aquifère est donc le contenant, la nappe étant le contenu.

Un aquifère est aussi une formation hydrogéologique, caractérisée par une certaine unité litho stratigraphique (litho- : pierre, roche) et par une certaine unité de fonctionnement vis-à-vis du stockage et de la circulation des eaux souterraines.

### **II.2.3 Description qualitative du fonctionnement hydraulique :**

Les systèmes aquifères multicouches, plus ou moins profonds, peuvent échanger des "flux de drainante" à travers les couches "semi-perméables".

On distingue généralement trois types de couches dans les systèmes aquifères multicouches :

- Les couches "perméables" considérées comme aquifères (sables et graviers), de perméabilité  $K = 10^{-1}$  à  $10^{-4}$  m/s.
- Les couches "semi-perméables" (sables très fins et argileux, limons fins et silts, ...), de perméabilité  $K = 10^{-5}$  à  $10^{-8}$  m/s.
- Les couches imperméables (argiles, argilites, granites peu fracturés...), le coefficient de perméabilité  $K \leq 10^{-9}$  m/s.

### II.3. Zone de recharge et exutoire :

#### II.3.1 La recharge :

L'alimentation des nappes du Sahara septentrional s'effectue pour :

##### ➤ **La recharge de la nappe phréatique :**

La recharge de la nappe phréatique est assurée par infiltration comme suite :

- ❖ Les pluies torrentielles, viennent s'ajouter depuis quelques années.
- ❖ Les eaux d'irrigation, provenant des nappes profondes (Pontien, Barrémien).
- ❖ Les eaux de rejets dues à l'inexistence d'un réseau d'assainissement et d'un exutoire naturel.

**NB :** Ce genre de recharge provoque fortement à la remontée de niveau piézométrique de la nappe.

##### ➤ **La recharge du complexe terminal (CT) :**

- ❖ Sur les bordures relativement arrosées du bassin, par infiltration directe sur les affleurements calcaires (Sénonien, Éocène inférieur, Turonien), ou au travers des nappes d'inféro-flux des oueds : bordure Sud-Atlasique, M'Zab (Algérie). Jebel Tebaga, Dahar (Tunisie), Jebel Nefousa (Libye).
- ❖ Dans les deux grands ergs (Occidental et Oriental) (Algérie), par infiltration de pluies exceptionnelles au travers des formations dunaires perméables (BRL, 1998).
- ❖ À l'Est du Djerid, la partie nord de la "chaîne" des Chotts est considérée comme source de recharge potentielle (EDMUNDS et al, 1997).

Toutes les zones de recharges de CT sont situées hors notre zone d'étude.

##### ➤ **La recharge du continental intercalaire (CI) :**

- ❖ De façon directe par infiltration des eaux de ruissellements qui se produisent sur les zones périphériques d'affleurement, notamment :

- Dans le piémont de l'Atlas saharien (Algérie).
- Dans le massif du Dahar (Tunisie).
- Sur les rebords ouest (Touat, Gourara) et sud (Tidikelt) du plateau de Tademaït (Algérie).
- Sur le rebord Sud du plateau du Tinrhert et sa prolongation (en Libye) ; jusqu'au Jebel Fezzan dans le massif du Nefusa (en Libye), (GEOMATH, 1994).
- ❖ Indirectement dans :
  - Le grand erg occidental à travers des sables dunaires.
  - Du complexe terminal, dans la région du Dahar où il n'existe pas de séparation imperméable entre les deux réservoirs (BRL, 1998a).

**NB :** Toutes les zones de recharges de CI sont situées hors notre zone d'étude.

### II.3.2. L'exutoire :

- ❖ Exutoire artificiel : Les forages et les puits sont considérés comme des exutoires artificiels
- ❖ Exutoire naturel :
  - **Pour la nappe phréatique :** L'exutoire de la nappe phréatique c'est la zone de dépression des chotts qui situe au nord de la vallée.
  - **Pour la nappe du CT :** Les zones exutoires sont principalement centrées sur :
    - ❖ Les Chotts algéro-tunisiens (Chotts Marouan et Melrhir en Algérie situé dans la zone d'étude, et Gharsa-Djérid en Tunisie).
    - ❖ Le Golfe de Syrte entre Misrata et Buwayrat Al Hasun.
  - **Pour la nappe du CI :**
    - ❖ Le Touat-Gourara et le Tidikelt.
    - ❖ L'exutoire tunisien marqué par la faille d'El Hamma,
    - ❖ L'exutoire libyen au niveau d'Ain Tawargha.

**NB :** Il n'existe pas un exutoire pour le CI dans la zone d'étude.

## II.4. Détermination des paramètres hydrodynamiques :

### II.4.1. Débits spécifiques :

Le débit spécifique est déterminé à partir de la droite débits- rabattement à un temps de 21600s (6h). Le rabattement à 4 l/s est de 6,57m, celui à 8,2 l/s est de 12,87m, celui à 9,9 l/s est de 15,65 l/s et celui à 10,9 l/s (essai longue durée) est de 17,69m.

Débits spécifiques (m<sup>2</sup>/s) =débit (m<sup>3</sup>/s) / (rabattement (m)).

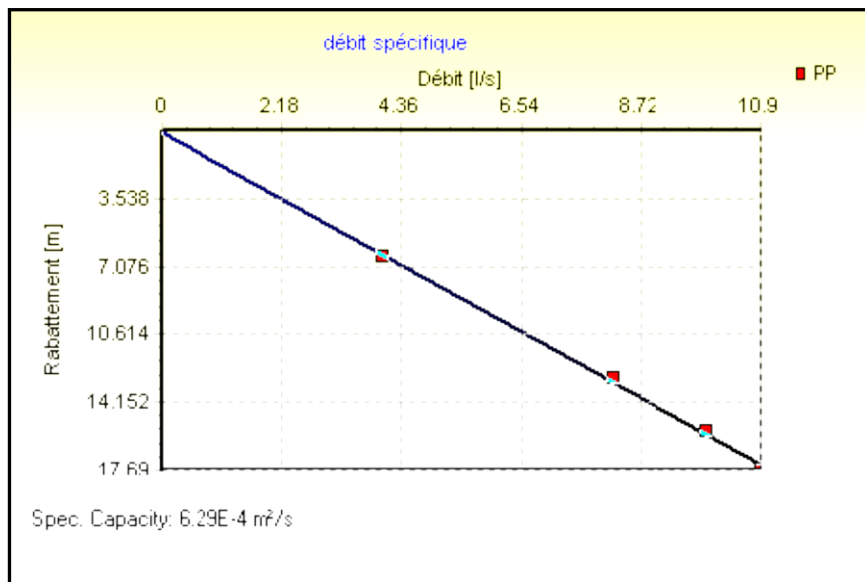
AN :

$$Q_s = \frac{Q}{R} = \frac{10,9 \times 10^{-3}}{17,69} \approx 6,29 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

**Tableau II.2 : Les Débits spécifiques pour les deux sites. (ADE)**

Essai	Débit Spécifique
El-Oued	2,15 x 10 <sup>-3</sup> m <sup>2</sup> /s
Kouinine	6,29 x 10 <sup>-4</sup> m <sup>2</sup> /s

Il est moyen à El-Oued, alors qu'il est faible à Kouinine On rapportant les valeurs des débits spécifiques en fonction du rabattement on obtient la figure (II-2).



**Figure II.2 : Courbe débit spécifique / Rabattement (à Kouinine). (ADE)**

**II.4.2. La transmissive :**

**II.4.2.1 L'approximation logarithmique de Cooper-Jacob :**

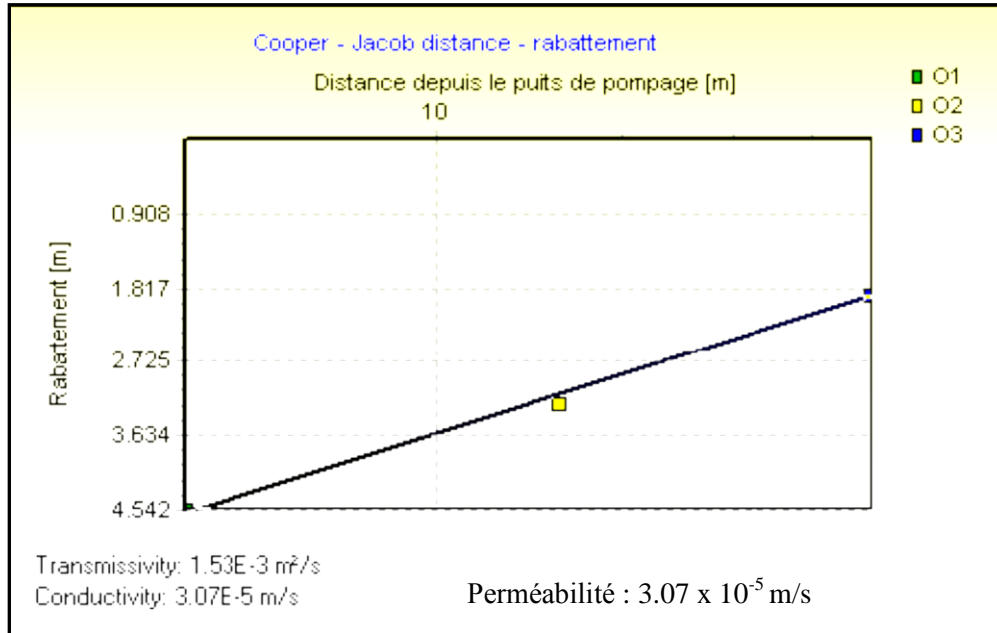
La transmissive est calculée par la pente de la droite représentative l'échelle des coordonnées n'étant pas homogène, la pente est déterminée par l'accroissement des rabattements (ou des profondeurs des niveaux d'eau). Au cours d'un module logarithmique.

$$T = \frac{0,138Q}{C}$$

T : La transmissivité en (m<sup>2</sup>/s).

Q : Le débit (longue durée) en (m3/s).

C : La pente moyenne (%).



**Figure II.3 : Essai de pompage longue durée à Kouinine. (ADE)**

Interprété par la méthode de Cooper-Jacob

**II.4.2.2. La transmissivité (méthode de Theis) :**

L'équation de la remontée, après arrêt du pompage est la suivante :

$$R = \frac{Q}{4\pi T} \times \log \frac{t + t'}{t'} \quad \Leftrightarrow \quad R = \frac{Q}{4\pi S} \times \log\left(1 + \frac{t}{t'}\right)$$

T : La transmissivité en (m2/s).

Q : Le débit (longue durée) en (m3/s).

R : Le rabattement (moyen) en tout point, à partir de l'arrêt du pompage en (m).

t : Le temps écoulé depuis le début du pompage en (s).

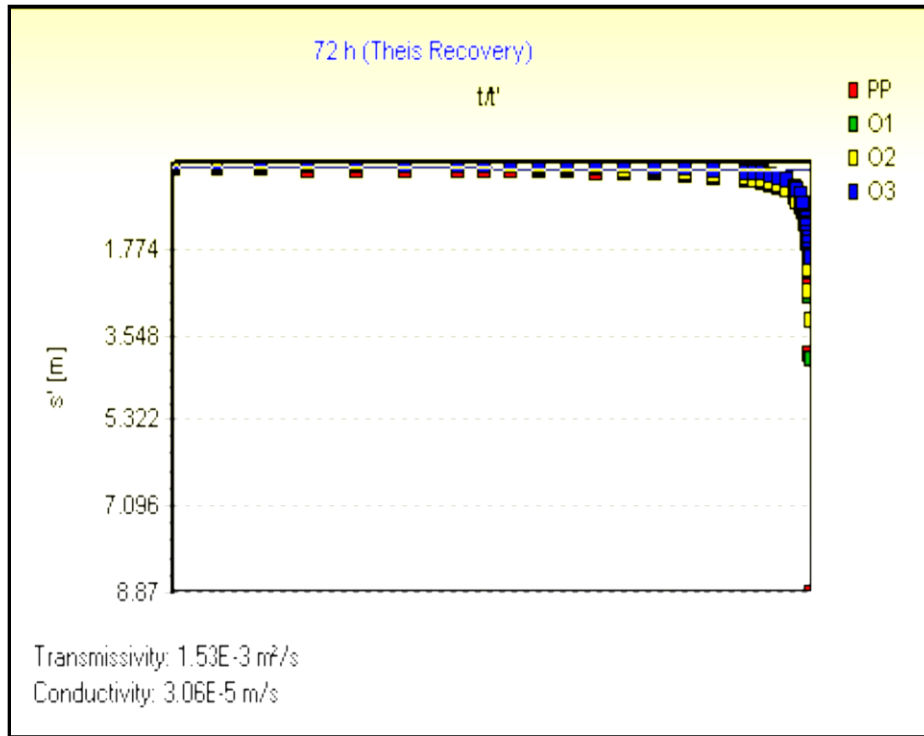
t' : Le temps écoulé depuis l'arrêt du pompage (temps de remontée) en (s).

E : L'épaisseur de l'aquifère (m).

Prenons l'exemple de la station de Kouinine pour le calcul de la transmissivité :

$$Q=10,9 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}, t=72\text{h}=259200 \text{ s}, t'=24\text{h}=86400 \text{ s}, p = 49 \text{ m}, R \approx 0,33\text{m}.$$

La transmissivité (m2/s) :  $\Leftrightarrow T = \frac{10,9 \times 10^{-3}}{4 \times 3,14 \times 0,33} \times \text{Log}\left(1 + \frac{250000}{86400}\right) \approx 1,53 \times 10^{-3}$



**Figure II.4 : Courbe de la remontée (à Kouinine) (ADE)**

Interprétée par la méthode de Theis.

**Tableau II.3 : Valeurs de transmissivité donnée par les 2 méthodes (en m2/s)**

Essai	T (Cooper-Jacob) (m2/s)	T (Theis) remontée (m2/s)	T moyenne (m2/s)
El-Oued	2,5 x 10-3	2,48 x 10-3	2,49 x 10-3
Kouinine	1,53 x 10-3	1,53 x 10-3	1,53 x 10-3
T moyenne			2,01 x 10-3

Les transmissivités sont homogènes sur la même station d’essai et les valeurs sont semblables, que ce soit en pompage ou après l’arrêt de celui-ci.

**II.4.3. Le coefficient d’emménagement :**

Le coefficient d’emménagement S exprimé en (%) et déterminé à partir des courbes des piézomètres, est donné par la formule suivante :

$$S = \frac{(2.25Tt_0)}{X^2}$$

Où T est la transmissivité (m²/s), t<sub>0</sub> est le temps d’intersection entre la droite de descente (ou de remontée) et le niveau piézométrique initial (s), et x est la distance entre l’ouvrage et le

piézomètre concerné (m).

Le coefficient d'emmagasinement est estimé à 84, 23 % dans notre zone d'étude pour un échantillon de sable consolidé au ciment carbonaté (DHW d'El-Oued, 2002).

#### II.4.4. La perméabilité :

Les perméabilités sont homogènes à chaque station d'essai. D'une station à l'autre, les écarts sont peu importants, de l'ordre de 1 à 2 entre les extrêmes avec  $4,91 \times 10^{-5}$  m/s à EL-Oued et  $3,08 \times 10^{-5}$  m/s à Kouinine, ce qui correspond à des perméabilités de sables dunaires.

**Tableau II.4 : Résultats de la perméabilité (en m/s) calculés par les trois méthodes**

Essai	K (Cooper – Jacob) m/s	K (Moench) m/s	K (Hantush-Jacob) m/s	K moyen m/s
El-Oued	$4,9 \times 10^{-5}$	$4,91 \times 10^{-5}$	-	$4,91 \times 10^{-5}$
Kouinine	$3,07 \times 10^{-5}$	$3,08 \times 10^{-5}$	-	$3,08 \times 10^{-5}$
K moyenne	$3,985 \times 10^{-5}$	$3,995 \times 10^{-5}$	-	$3,995 \times 10^{-5}$

La perméabilité moyenne est de  $3,995 \times 10^{-5}$  m/s est du même ordre que la perméabilité moyenne mesurée lors des essais d'infiltration ( $1,6 \times 10^{-4}$  m/s).

**Tableau II.5 : Les résultats des Perméabilités verticales et horizontal.**

Essai	Kh m/s	Kv (Moench) m/s	Kh/Kv
El-Oued	$4,91 \times 10^{-5}$	$4,91 \times 10^{-8}$	1000
Kouinine	$3,08 \times 10^{-5}$	$7,71 \times 10^{-7}$	40

(B&G : 2004)

La perméabilité verticale baisse corrélativement avec une augmentation de l'hétérogénéité.

#### ➤ Perméabilité de CT :

La perméabilité de CT dans la région du souf est comprise entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  m/s pour la nappe la plus exploitée du mi-pliocène ce qui nous donne une valeur moyenne de coefficient de perméabilité  $K = 5,5 \times 10^{-4}$  m/s (DHW : 2002).

#### II.4.5 La porosité efficace ne :

La porosité efficace a été définie pour les nappes libres. Elle est généralement considérée comme équivalente au coefficient d'emmagasinement pour les nappes captives. Elle a été déterminée par la méthode de Moench. Elle est comprise entre 6 % (5,6%) à Kouinine et 7 %



(7,05%) à EL-Oued, soit 6% (6,325%) en moyenne. Ces valeurs sont usuelles pour des sables fins.

**Tableau II.6 : Valeurs de la porosité efficace calculée par la méthode de Moench.**

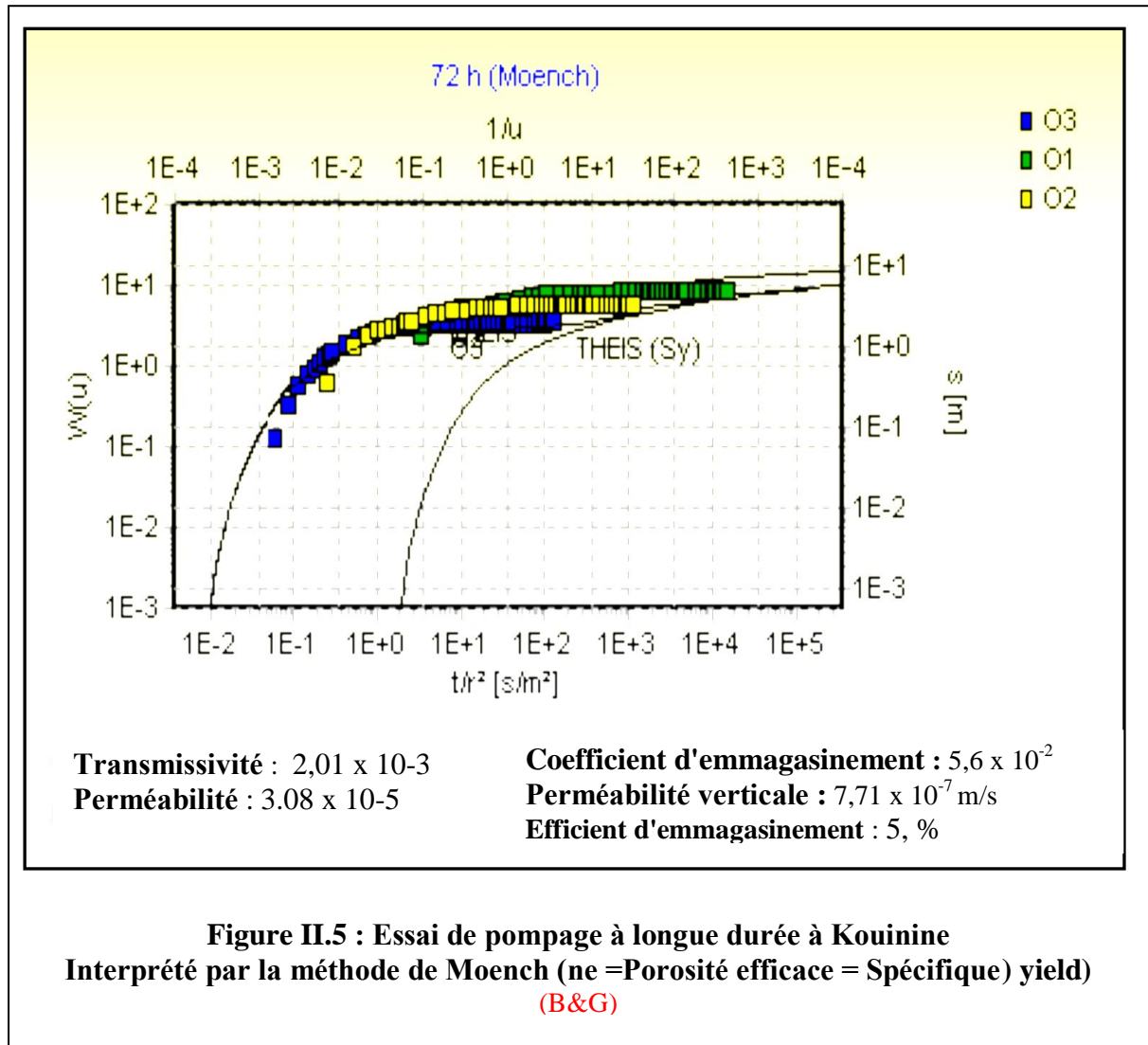
Essai	ne
El- Oued	$7.05 \times 10^{-2}$
Kouinine	$5.6 \times 10^{-2}$

(B&G : 2004)

**Tableau II.7 : valeurs des porosités efficaces des différentes aquifères**

Nappe	Porosité efficace ne
Nappe phréatique	6.325%
CT	5%
CI	5%

(ANRH : 2003)



#### II.4.6. Caractérisation piézométrique des aquifères :

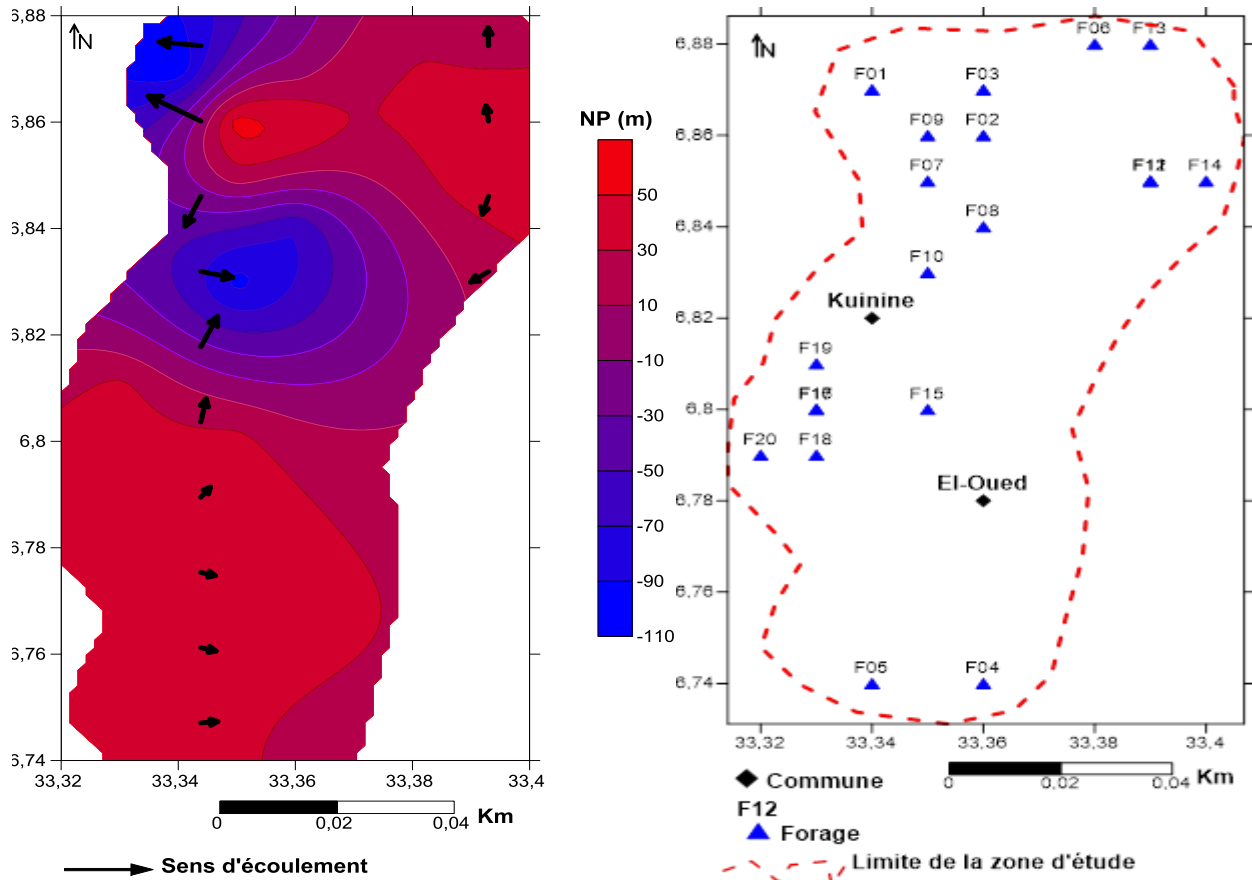
##### ➤ Nappe du Complexe Terminal :

D'après les mesures piézométriques faites en 2018 par l'ANRH on obtient les résultats suivants (Tableau (II-8)) :

**Tableau II.8 : Niveau piézométrique de la nappe CT en 2018.**

Forage	Y	X	Z(m)	NS(m)	NP(m)
F01	6.87	33.34	77	52	-106.56
F02	6.86	33.36	92	45.05	46.95
F03	6.87	33.36	65	51	-2
F04	6.74	33.36	79	55	24
F05	6.74	33.34	76	32	44
F06	6.88	33.38	66	37.5	28.5
F07	6.85	33.35	92	69.5	22.5
F08	6.84	33.36	105	49	-68.36
F09	6.86	33.35	92	33.8	58.2
F10	6.83	33.35	87	52	-96.56
F11	6.85	33.39	72	29.1	42.9
F12	6.85	33.39	68	37.5	30.5
F13	6.88	33.39	76	61	15
F14	6.85	33.4	71	30	41
F15	6.8	33.35	89	52.4	36.6
F16	6.8	33.33	77	40	37
F17	6.8	33.33	78	33.1	44.9
F18	6.79	33.33	72	32	40
F19	6.81	33.33	72	35.8	36.2
F20	6.79	33.32	75	34.3	40.7

(ANRH 2018)



**Figure II.6 : Carte piézométrique de la commune EL-Oued et Kouinine en 2018**

L'étude hydrodynamique et les cartes piézométriques nous a permis de constater que le sens d'écoulement des eaux souterraines est orienté suivant une direction générale Sud-Nord dans tous les aquifères de la région d'étude. On observe les directions dans le CT sont : NO, SE. Ceci est confirmé par les cartes piézométriques des aquifères CT.

Mais on remarque qu'il y a des sens d'écoulement secondaire suivant le gradient hydraulique de la zone. Ces écoulements secondaires ont évidemment des directions diverses mais finissent pas rejoindre le sens principal.

➤ **Nappe du Continental Intercalaire :**

Peu de forages desquels la prise de pression était possible, nous présentons quelques valeurs enregistrées dans le début d'exploitation des forages.

- ❖ El Oued DHW 101. .... P= 21,00 Bars
- ❖ Chouhada DW102 ..... P= 21,70 Bars
- ❖ Sahane Berry H12-85 ..... P=17,00 Bars

On ne peut pas établir une carte piézométrique à partir le niveau piézométrique de deux ou trois

forages pour cela, on propose la carte piézométrique de tout l'aquifère de CI.

➤ **Vitesse d'écoulement :**

La vitesse d'écoulement des eaux demeure variable d'une région à une autre ; la légère variation constatée au niveau des équipotentiels.

$$V = K \times I$$

V : La vitesse d'écoulement.

K : Perméabilité de l'aquifère.

I : la valeur de gradient hydraulique.

Pour calculer la vitesse d'écoulement, on doit tirer la valeur de gradient hydraulique à partir la carte piézométrique et multiplier cette valeur à la perméabilité.

**II.4.7. Rayon d'action :**

Les études faites par la DHW en 2002 montrent que le rayon d'action dans les différentes aquifères égales :

➤ Nappe phréatique : Ra=300m.

➤ Nappe de CT : Ra compris entre 500 et 600m.

**Tableau II.9 : le volume soutiré des forages par usage par zone (ANRH, 2005).**

Zone	Forages d'AEP.				Forages d'Irrigation				Total des forages	Volumes soutirées (Hm <sup>3</sup> /an)
	C T	V (Hm <sup>3</sup> /an)	C I	V (Hm <sup>3</sup> /an)	CT	V (Hm <sup>3</sup> /an)	C I	V (Hm <sup>3</sup> /an)		
Souf	81	37,97	02	10,09	16	9,78	-	-	124	57,84

**Tableau II.10 : Répartition des forages par usage avec les volumes respectifs**

(ANRH, 2005)

REGION	Forages				Volumes soutires (Hm <sup>3</sup> /an)
	AEP		Irrigation		
	CI-CT	V (Hm <sup>3</sup> /an)	CI-CT	V (Hm <sup>3</sup> /an)	
Vallée d'El-Oued	92	52,88	56	20,12	73,01

**II.4.8. Estimation le besoin d'eau prélèvements selon l'inventaire 2004 :**

Les résultats de cet inventaire ont permis de déterminer les volumes soutirés des deux principales nappes CI-CT à travers la vallée de Souf qui sont de 2,11 m<sup>3</sup>/s soit 66,5 millions de

m<sup>3</sup>/an. Ces volumes sont destinés pour les besoins agricoles, industriel et domestiques, l'exploitation par zone est illustrée dans les tableaux (II-11) suivants :

**Tableau II.11 : Estimation les besoins agricoles, industriel et domestique**

Nappe du CI				Nappe du CT			
Zone	V <sub>Expté</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>Explble</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>TOTAL</sub> (m <sup>3</sup> /s)	Zone	V <sub>Expté</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>Explble</sub> (m <sup>3</sup> /s)	V <sub>TOTAL</sub> (m <sup>3</sup> /s)
Souf	0,32	0,02	0,34	Souf	1,51	0,26	1,77

(ANRH 2004)

Sur la base de ces résultats, il a été constaté que :

- La zone du Souf consomme 84% du volume d'eau mobilisé de la nappe du CT et qui est destiné pour l'AEP, tandis que le reste est réparti sur les autres zones.
- Le volume d'eau total soutiré des deux principales nappes CI-CT à travers la vallée de Souf qui sont de 2,11 m<sup>3</sup>/s.

## II. Conclusion :

Dans ce chapitre nous concluons que :

L'étude hydrodynamique nous a permis de constater que le sens d'écoulement des eaux souterraines est orienté suivant une direction générale Sud-Nord.

### ➤ Pour la nappe phréatique :

L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui a été effectué au niveau des 02 stations nous permet de constater que :

- ❖ Le débit spécifique oscille entre  $2,15 \times 10^{-3}$  et  $6,29 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s.
- ❖ La transmissivité moyenne est de l'ordre de  $2,01 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s.
- ❖ La perméabilité moyenne est  $3,995 \times 10^{-5}$  m/s.
- ❖ La porosité efficace (ou le coefficient d'emmagasinement pour la nappe captive) a une valeur moyenne de 6,325 % qui est usuelle pour les sables fins.

### ➤ Pour le CT :

- ❖ Le débit soutiré oscille entre 10 l/s à 55.5 l/s
- ❖ Transmissivité moyenne de CT est  $2.01 \times 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s
- ❖ La perméabilité de CT dans la région du souf est comprise entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  m/s pour la nappe la plus exploité du moi-pliocène ce qui nous donne une valeur moyenne de coefficient de perméabilité  $K = 5.5 \times 10^{-4}$  m/s.

- ❖ La porosité efficace estimée à 5%

➤ **Pour le CI :**

- ❖ Le débit soutiré par forage est 160 l/s
- ❖ La porosité efficace estimée à 5%
- ❖ La piézométrie de CT selon l'inventaire 2018 dans la commune Kouinine et EL-Oued varie entre 106,56 m dans la cité du chouhada et 46,95m dans la cité du 400 logement.
- ❖ Le niveau statique varie entre 30m dans la cité chott et 69,5 dans cité 19 mars.

La puissance de l'ensemble des formations aquifères existantes dans la région (crétacé Inférieur, Mio-pliocène, Éocène et nappe phréatique) dépasse parfois 2000 mètres.

La profondeur moyenne de cette nappe du CT varie entre 200 et 600 mètres. Quant à l'épaisseur utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ.

La profondeur moyenne de cette nappe du CI varie entre 1800 et 2000 mètres, et l'épaisseur moyenne de cette nappe varie entre 300 et 400 mètres et l'épaisseur totale du réservoir dépasse 250 mètres dans la plus grande partie du Sahara Septentrional.

Le CI affleure dans la partie Sud et Sud-ouest par contre plonge vers le Nord –Est.

# **CHAPITRE III**

# **HYDROCHIMIE**

### III. Introduction :

Le chimisme naturel des eaux dépend essentiellement des formations géologiques traversées et du temps de séjour. Le chimisme est principalement régi par les équilibres calco-carboniques ( $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) auxquels viennent se greffer des éléments en provenance de l'environnement alluvial ( $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) et des éléments d'origine biologique ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , et  $\text{NH}_4^+$ ).

L'intérêt principal de cette partie de l'étude est de mieux caractériser la qualité des eaux souterraines de la Commune El-Oued et Kouinine et ses variations dans l'espace et dans le temps, mais aussi de voir l'état du système vis-à-vis de la pollution.

L'étude se base principalement sur les informations de deux campagnes de prélèvement réparties sur le terrain. Comme la plaine de Commune El-Oued et Kouinine est à vocation agricole, un intérêt particulier sera accordé à cet effet. Le tableau III.1, donne une récapitulation des différentes campagnes d'échantillonnage.

**Tableau III.1 : Répartition et fréquence des prélèvements hydro-chimiques.**

Campagne	Années	Nombre d'échantillon	Eléments dosés	Laboratoire d'analyse
01	2018	20	Eléments majeurs, $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$ et $\text{PO}_4^{-3}$ , pH, Cond	Laboratoire (A.D.E) EL-Oued
02	2021	20	Eléments majeurs, $\text{NO}_3^-$ , $\text{NO}_2^-$ et $\text{PO}_4^{-3}$ , pH, Cond	Laboratoire (A.D.E) EL-Oued

#### III.1. Echantillonnage et analyse hydro-chimique :

Les échantillons ont été collectés à travers toute la zone d'étude afin de mieux représenter la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de la nappe aquifère (Figure III.1).



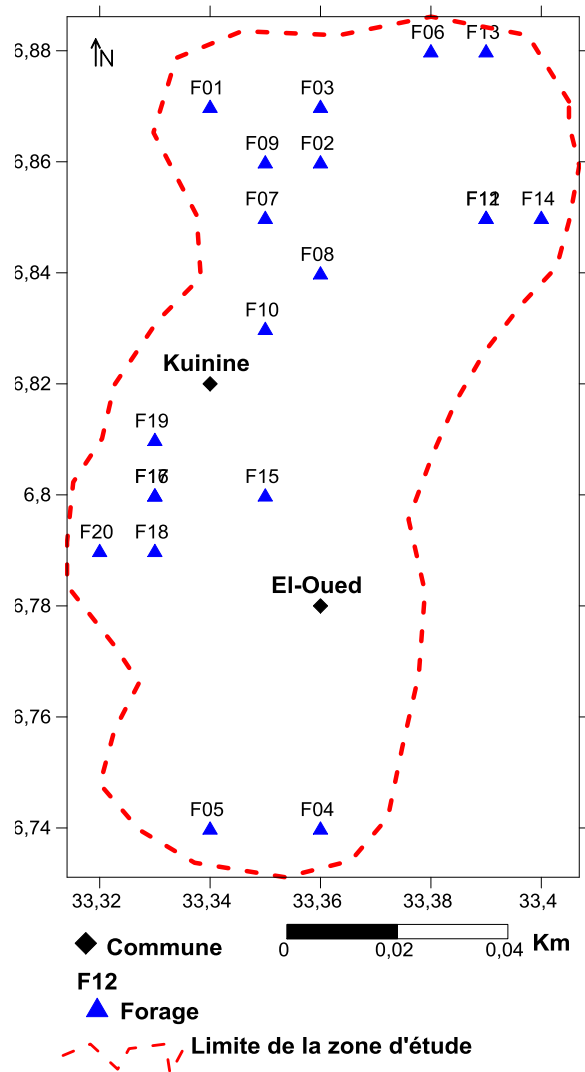


Figure III.1 : Carte des points d'eau échantillonnés.

## III.2. Moyens et méthodes d'analyse :

### III.2.1. Mesures in situ :

Deux paramètres physico-chimiques (pH, conductivité électrique (CE) à 25°C) ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon à l'aide d'une valise multi paramètres de terrain de marque Multi340i (WTW).

### III.2.2. Analyses au Laboratoire :

Nous avons procédé à une analyse complète de tous les éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{HCO}_3^-$ ).

Les polluants résultants des activités agricoles ont fait l'objet d'un suivi particulier ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  et  $\text{PO}_4^{3-}$ ).

Les méthodes analytiques utilisées sont :

- Les méthodes colorimétriques ont permis de déterminer les éléments de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Cl}^-$  et  $\text{HCO}_3^-$ .
- Méthode de spectrophotométrie d'absorption atomique pour les éléments ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$ ). Nous signalons que l'analyse spectrophotométrique a été faite en utilisant un spectrophotomètre DR 2000 (HACH).
- Les analyses isotopiques ont été réalisées au laboratoire d'analyse physico-chimique des matériaux et isotopique (Wilaya de EL-Oued).

Le calcul de la balance ionique permet de déduire la fiabilité des analyses, selon la formule :

$$BI = \frac{\sum c - \sum a}{\sum c + \sum a} \times 100$$

Une erreur inférieure à 10% peut être considérée comme acceptable et peut être commise lors des manipulations techniques.

### III.3. Descriptions sommaires des paramètres physico chimiques :

Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux de la nappe de la commune d'EL-Oued et de kouinine pendant la période d'observation, ont été consignés dans les tableaux III.2.

**Tableau III.2 : Variation des paramètres physico-chimique (2021-2018).**

		Périodes en 2021				Périodes en 2018			
		Moy	Max	Min	Ecart_type	Moy	Max	Min	Ecart_type
Eléments	Norme OMS								
$\text{HCO}_3^-$ (mg/l)	250	148,12	675,46	24,40	127.33	181.538	213.58	143.96	20.18
$\text{SO}_4^{2-}$ (mg/l)	250	586.0264	1004.386	87.84	239.33	701.173	1048.800	407.107	180.47
$\text{Cl}^-$ (mg/l)	250	729.08725	1340.12	120.540	260.34	769.586	1028.16	350.984	210.82
$\text{Ca}^{+2}$ (mg/l)	100	296.191	589.176	48.10	110.79	254.910	316.632	184.386	36.07
$\text{Mg}^{+2}$ (mg/l)	50	120.309	250.341	14.583	54.89	121.039	174.996	58.332	30.34
$\text{Na}^+$ (mg/l)	150	337.85	550	148	95.31	354.750	420	180	68.35
$\text{K}^+$ (mg/l)	12	29.7	38	12	5.20	30.300	38	15	6.92
$\text{NO}_3^-$ (mg/l)	50	14.61285	32.740	0.126	9.99	21.132	46.06	1.556	11.38
PH	6,5<pH<9,5	7.47	8.08	7.26	1.6	7.250	7.44	7.02	1.6
Cond ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	2500	3668	4890	2310	603.65	3586.500	4660	2330	567.30

### III.3.1. Paramètres physiques :

#### III.3.1.1. Potentiel d'hydrogène (PH) :

C'est un paramètre physique qui détermine l'acidité ou l'alcalinité. Les mesures du pH montrent que tous les puits se trouvent dans l'intervalle de norme de potabilité. Pendant la période 2021 le pH varie entre 7.26 et 8.08, alors qu'en période en 2018, les valeurs oscillent entre 7.02 et 7.44, ceci indique que les valeurs varient peu et sont proches des valeurs naturelles.

#### III.3.1.2. La conductivité électrique (CE) :

Elle dépend de la présence des espèces ioniques contenues dans l'eau. Les valeurs mesurées ont été ramenées à 25°C. Les valeurs de la conductivité électrique montrent que la plupart des puits dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux, surtout pendant la période de en 2021. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 4890 ( $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ ).

### III.3.2. Les éléments chimiques majeurs :

#### III.3.2.1. Le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) :

La plupart des points de prélèvement présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 589.176 mg/l, sont observées au niveau des forages F16 et F20 avec une moyenne de 296,191 mg/l. Les valeurs de l'écart-type sont relativement importantes, ce qui traduit une grande variation des teneurs, car l'ion  $\text{Ca}^{2+}$  provient de deux origines naturelles différentes qui sont : La dissolution des formations carbonatées d'âge crétacé et la dissolution des formations gypses et de calcaires. L'écart type le confirment (110,79 mg/l).

#### III.3.2.2. Le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) :

Les valeurs du magnésium varient de 14.583 mg/l à 250.341 mg/l avec une moyenne de 120.309 mg/l. Les variations de concentration sont faibles, les valeurs de l'écart type le confirment (54,89 mg/l).

#### III.3.2.3. Le sodium ( $\text{Na}^+$ ) :

Le sodium présent également de valeurs moyennes à forte allant de 148 mg/l au Sud de la zone d'étude est enregistré aux forages F07, F16 et F20, avec une valeur moyenne de 337.85 mg/l. Les variations de concentration sont fortes, les valeurs de l'écart type le confirment (95.41 mg/l).

#### III.3.2.4. Le potassium ( $\text{K}^+$ ) :

Les valeurs de potassium sont basses, de l'ordre de 12 mg/l. Les valeurs les plus élevées sont observées au niveau des forages F1et F10 avec un maximum de 38 mg/l, pour une moyenne de 29.7 mg/l. (l'écart type le confirment 95.41 mg/l).

**III.3.2.5. Les chlorures (Cl<sup>-</sup>) :**

L'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments chimiques et reste très mobile. Il constitue un bon indicateur de la pollution. Les teneurs enregistrées, pendant toute la période d'observation, montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l. On signale que 95 % des puits dépassent cette norme. Le taux des chlorures est très élevé dans la région d'étude, les teneurs sont de l'ordre de 1340.12 mg/l, avec une moyenne de 729.08 mg/l.

**III.3.2.6. Les sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) :**

Les plus fortes teneurs en sulfates sont enregistrées à EL-Oued et Kouinine avec un maximum de 1004.386 mg/l, avec une moyenne de 586.0264 mg/l, suite au phénomène d'évaporation, alors que les plus faibles valeurs sont enregistrées avec un minimum de 87.84 mg/l.

**III.3.2.7. Les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) :**

Les teneurs de bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) sont enregistrées pendant la période en 2018 et 2021 avec une moyenne de 164.829 mg/l et un maximum de 439.52 mg/l. Les concentrations varient faiblement (écart type : 73,75 mg/l).

**III.4. Détermination des principaux faciès hydro-chimiques :**

Suivant : Ca<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> les cations présentent l'ordre des concentrations les plus fortes au plus faibles. Parfois, le sodium est plus important comme dans les eaux des points 1 à 20 où il domine les autres cations (Na<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>+</sup> > K<sup>+</sup>). Le potassium a toujours la concentration la plus faible.

Pour ce qui concerne les anions, les chlorures sont largement les ions dominants, et ils représentent plus de 60% de la charge anionique dissoute. Ils sont particulièrement élevés aux points d'eau 1 à 20, avec une concentration plus de 801.237 mg/l. Les anions se présentent dans l'ordre suivant : Cl<sup>-</sup> > HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup>.

A partir des calculs des quantités en réaction (conversion des concentrations en méq/l) et la classification des ions (formule ionique), les faciès sont représentés dans le tableau III.3 :

**Tableau III.3 : Faciès chimiques des eaux souterraines de la plaine d'étude.**

Campagne d'échantillonnage	Faciès chimique			
	Sulfaté sodique (%)	Sulfaté sodique (%)	Chloruré sodique (%)	Chloruré sodique (%)
2018	30	5	60	5
2021	30	15	55	/

Sur toute la période d'observation, nous remarquons que la répartition des différents faciès dépendait de la lithologie et de l'hydrodynamisme de la nappe aquifère. Le faciès chloruré-calcique et sodique est important et se répand dans la majorité des forages de la zone d'étude. Il s'explique par la présence des formations salées et des marnes gypsifères. Les eaux sulfatées sodiques et calciques qui ne s'observent qu'aux forages F4, F5, F15, F8, F17 et F20 : les formations carbonatées d'âge crétacé y sont présentes.

#### III.4.1. Représentation graphique des faciès hydro-chimiques :

Dans le but de bien identifier les faciès hydro-chimiques et d'avoir une indication sur l'aspect qualitatif des eaux souterraines, la représentation graphique des résultats d'analyses s'avère un outil indispensable. Pour atteindre cet objectif, nous avons eu recours au diagramme de Piper et à celui de Schoeller-Berkaloff. L'établissement de ces diagrammes a été fait en utilisant le logiciel **Diagrammes**, conçu par Roland Simler (Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon).

##### III.4.1.1. Diagramme de PIPER :

Les faciès sont représentés sur le diagramme de Piper (figure III.2, III.3).

##### III.4.1.1.1. Période de 2018 et 2021 :

D'après les figures III-2, III-3, nous remarquons que l'ensemble des nuages de points ne présente pas de dominance anionique ou cationique. Nous signalons cependant la présence d'un faciès chloruré sodique, relativement dominant, et un faciès sulfaté sodique moyen et chloruré calcique faible (5% et 15%) des points d'eau. La présence du sodium s'explique par les marnes gypsifères d'âge triasique qui constituent le substratum de la nappe.

Les points d'eaux qui se situent à l'Est et dans la zone centrale de la plaine présentent un état différent, avec des anions chlorurés dominants, alors que les cations calciques marquent la totalité des échantillons et sont secondés par les cations sodiques. Ceci révèle la dominance de deux faciès hydro-chimiques : chloruré-sodique, sulfaté-sodique avec l'apparition de sous faciès hydro-chimiques : sulfaté-calcique et chloruré- calcique.

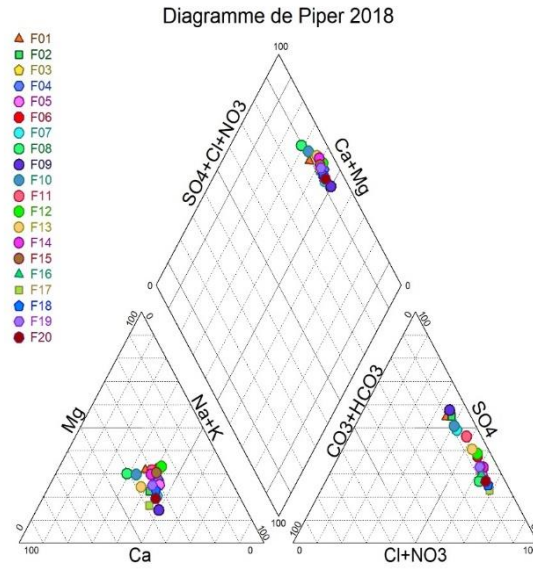


Figure III.2 : Diagramme de Piper des eaux souterraines dans la plaine (2018).

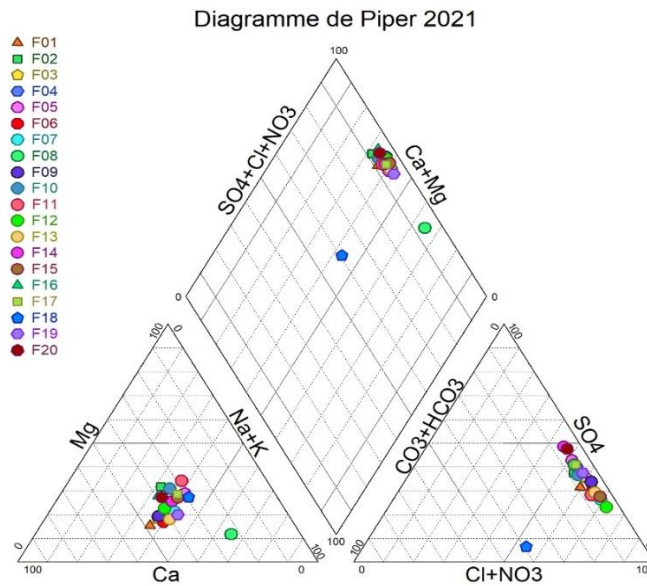


Figure III.3 : Diagramme de Piper des eaux souterraines dans la plaine (2021).

III.4.1.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF :

III.4.1.2.1. Période de 2018 et 2021 (Figures III.4 A, B, III.5 A, B) :

Les fortes concentrations de  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$  et  $Na^+$  ont donné un faciès chloruré sodique et sulfaté sodique dominant, suivi des faciès chlorurés calcique et sulfaté calcique. Les calcaires de la région d'étude, sont à l'origine du faciès calcique. Au Sud - ouest de la plaine (Figures

III.4 et III.5 A) la teneur en sulfates est élevée par rapport à celle des autres anions, ce qui explique l'absence du faciès sulfaté, par contre au centre et à l'est de la plaine (Figure III.4, III.5 B) la teneur en sulfates est moyenne a faible.

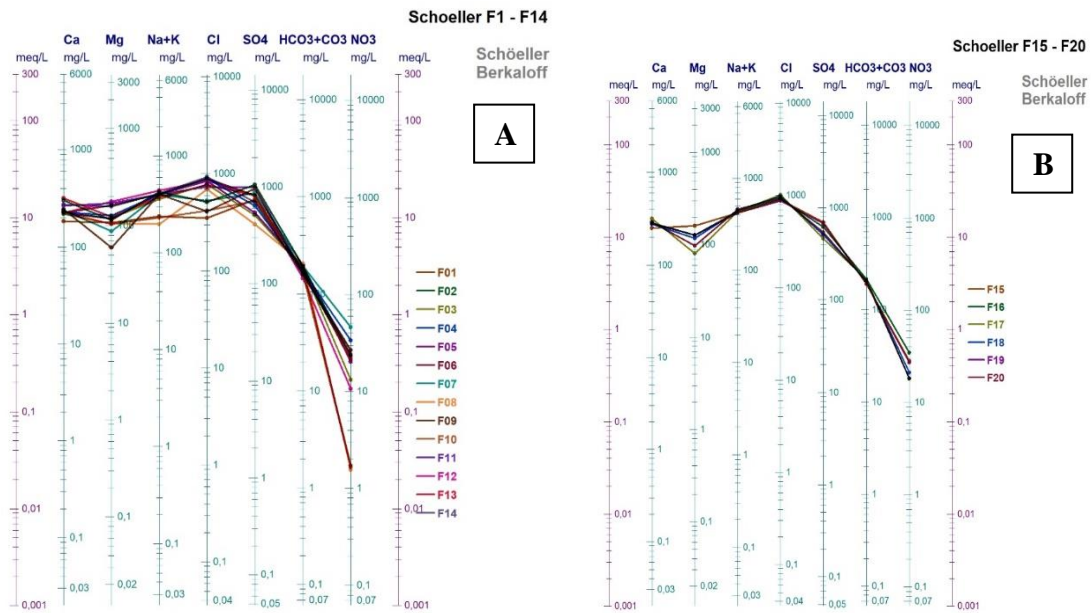


Figure III.4 (A, B) : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF (2018).

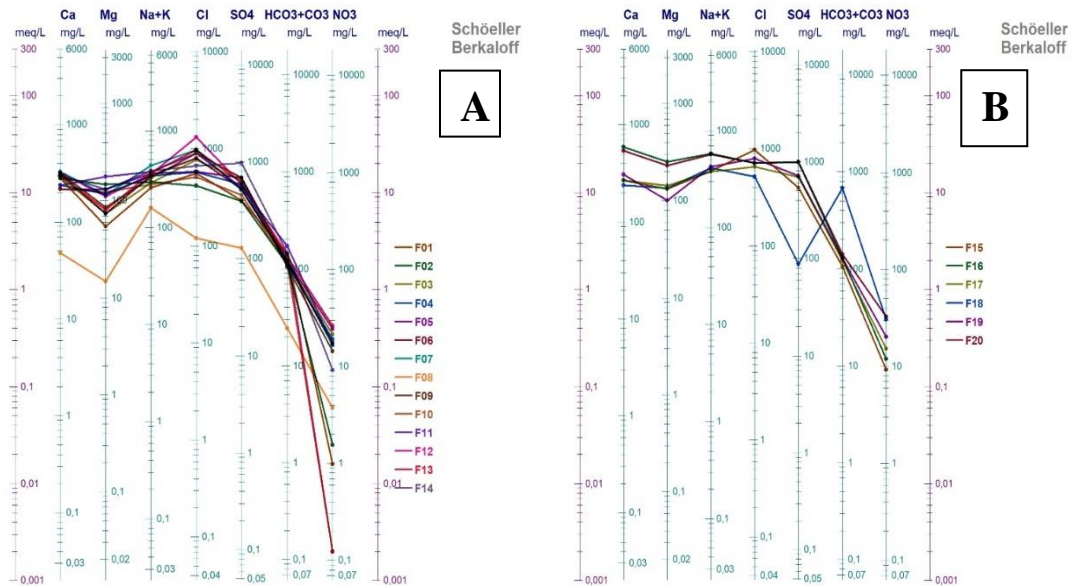


Figure III.5 (A, B) : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF (2021)

### III.5. Cartographie hydro-chimiques :

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 campagne 2021 a montré des teneurs maximales en sels dissous, c'est pourquoi nous les avons prises pour illustrer la variation spatiale des éléments chimiques.



La cartographie hydro-chimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel Surfer 13 (Golden software, 2013).

### III.5.1. Les chlorures (figures III.6) :

L'observation des cartes des chlorures montre que les teneurs varient entre 120 et 1100 mg/l.

Les valeurs des concentrations durant l'année 2021 est due à l'effet du lessivage et de l'évaporation. La zone d'étude, a enregistré des concentrations importantes en chlorures (1000 mg/l). 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 entre 100 et 300 mg/l ; elle est enregistrée dans les forages F8 et F2 (cité 19 Mars et cité 400 logements).

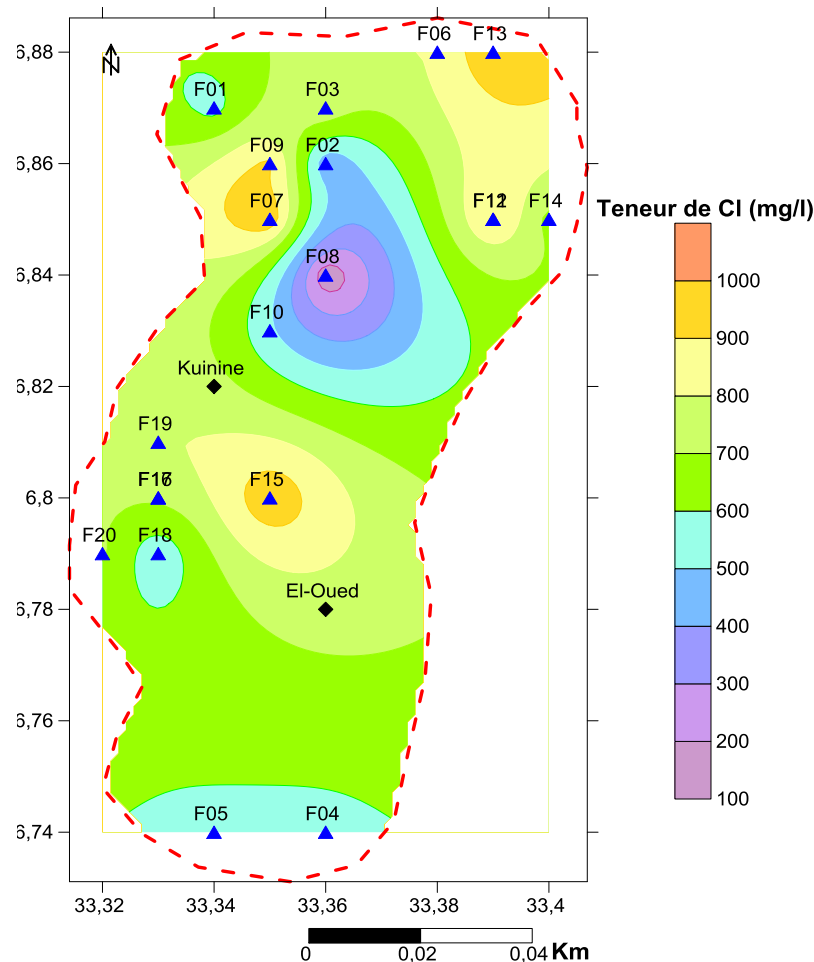


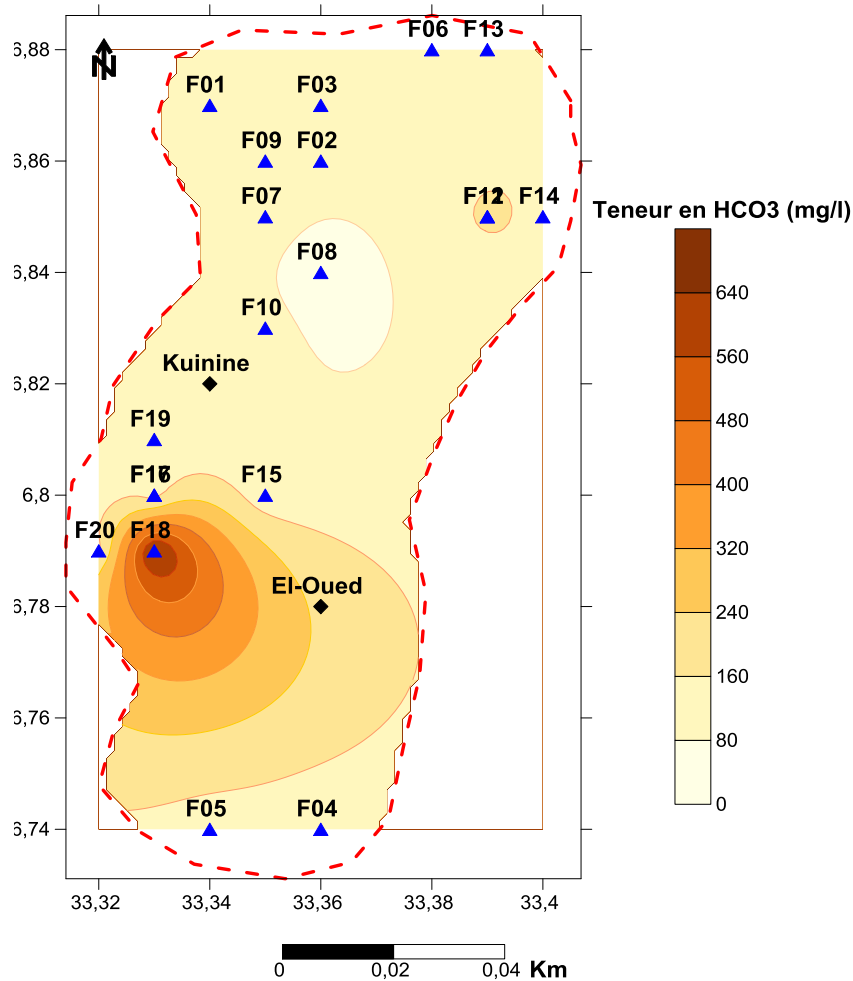
Figure III.6 : Carte de chlorure des eaux souterraines de la plaine 2021.

### III.5.2. Les bicarbonates (figures III.7) :

Les concentrations oscillent entre 24 et 640 mg/l. Nous notons que pour quelques points, les valeurs maximales sont rencontrées au niveau de la zone de Kouinine (F18, F20, F17 et



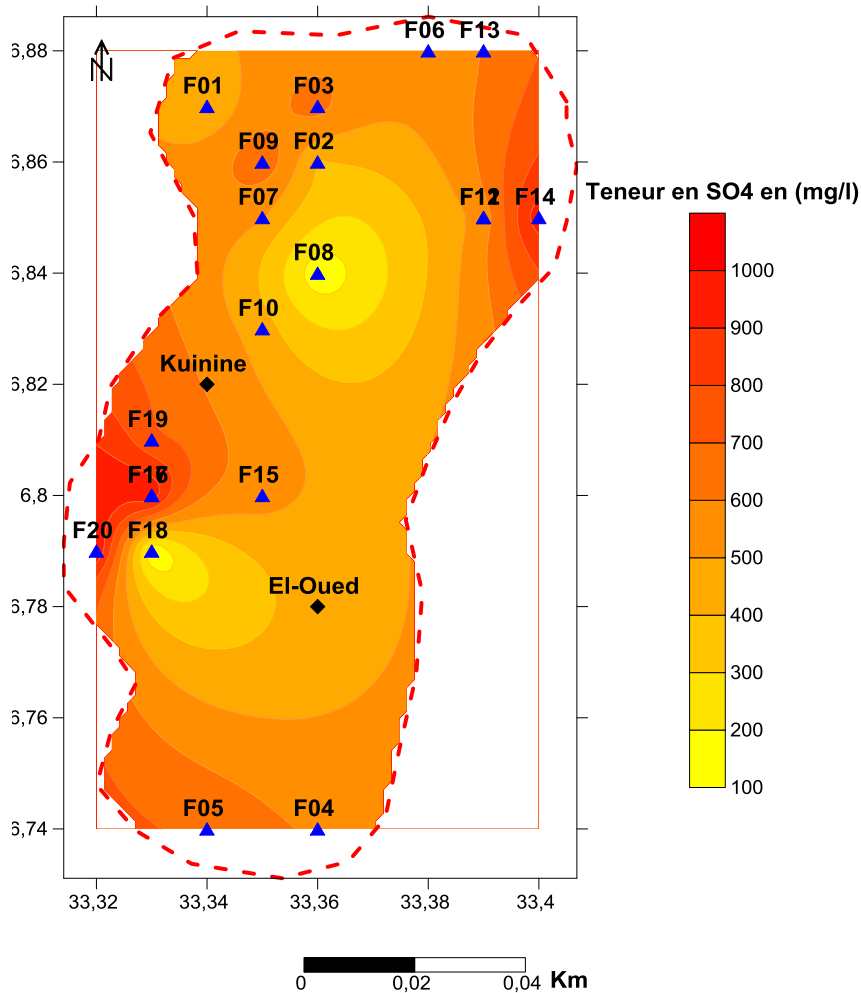
F16), ceci est dû à la dissolution des formations carbonatées. Les faibles concentrations sont enregistrées dans la totalité de la région d'étude. Il est à noter que les teneurs en bicarbonates diminuent dans le sens de l'écoulement des eaux souterraines.



**Figure III.7 : Carte de bicarbonate des eaux souterraines de la région d'étude 2021.**

### III.5.3. Les sulfates (figures III.8) :

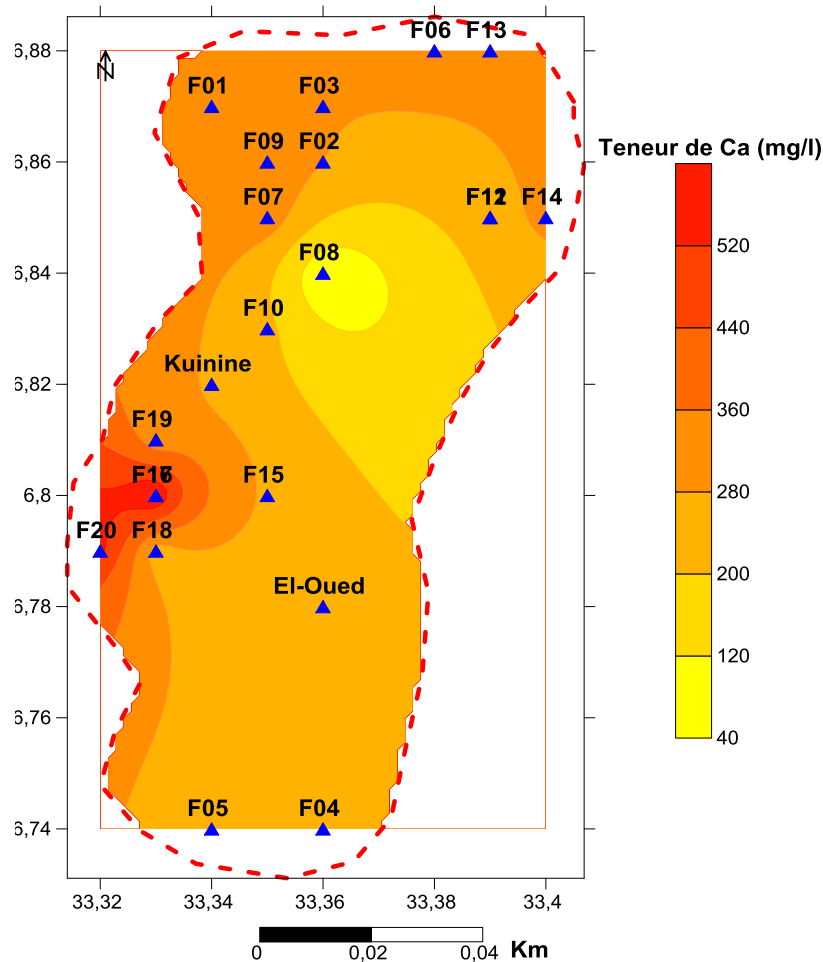
Les concentrations, en général, oscillent entre 100 et 1000 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées, au niveau de la zone de Kouinine et au Nord-Est de la commune d'El-oued. Elles sont dues au lessivage des dépôts évaporitiques. Les plus faibles concentrations sont constatées au niveau des forages F8, F10 et F18 (figure III-8).



**Figure III.8 : Carte des sulfates des eaux souterraines de la plaine 2021.**

#### III.5.4. Le Calcium (figures III.9) :

Les concentrations oscillent en général entre 40 et 520 mg/l. Ces dernières sont relativement faibles au centre de la nappe par rapport aux autres régions, car les eaux souterraines ne sont pas encore minéralisées et proviennent de la dissolution des formations carbonatées de bordures. Nous remarquons que les teneurs croissent dans le sens de l'écoulement. Les fortes teneurs apparaissent au niveau de Kouinine et au Nord de la zone d'étude, nous pensons qu'elles résultent de la dissolution des formations de gypses et de calcaires et des dépôts évaporitiques.



**Figure III.9 : Carte de calcium des eaux souterraines de la plaine 2021.**

### III.5.5. Le sodium (figures III.10) :

Les concentrations varient entre 140 et 540 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère de la plaine, à cause de l'effet de l'évaporation.

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

Les faibles concentrations se localisent au Sud-Ouest et au Nord-Est de la nappe, là où les eaux souterraines sont au début de leur cheminement, c'est-à-dire ne sont pas encore trop minéralisées. Les argiles, qui se trouvent dans la nappe, peuvent donner du sodium par échange de base en fixant un ion  $\text{Ca}^{2+}$  après libération de deux ions  $\text{Na}^+$ .

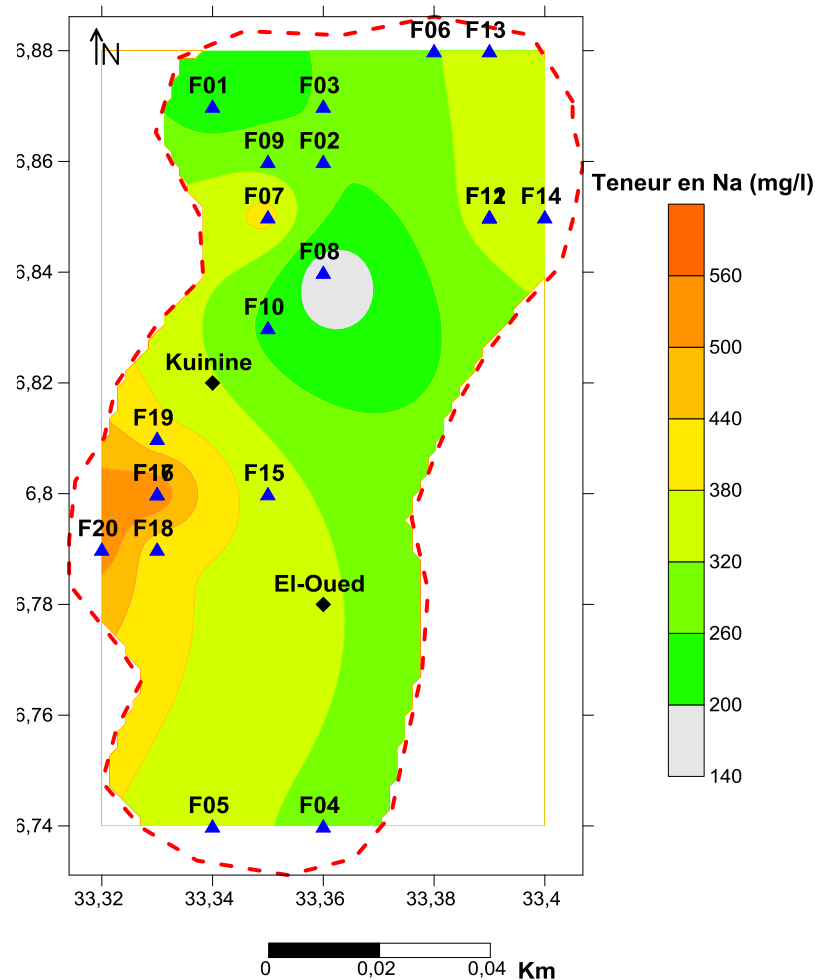


Figure III.10 : Carte de sodium des eaux souterraines de la plaine 2021

### III.6. Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines :

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

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

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

Les conditions hydrodynamiques de la nappe ont favorisé l'acquisition de ces faciès :

La surface piézométrique n'est pas assez profonde ce qui augmente l'effet de l'évaporation.

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

Quelques éléments chimiques ont des origines différentes telles que le calcium et le sodium. Ces faciès se sont-ils stabilisés ou évoluent-ils vers d'autres tendances ?

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

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

### III.6.1. Faciès caractéristiques :

A partir de la représentation graphique des faciès chimiques par les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff, nous constatons la dominance de 2 faciès : le chloruré-sodique et le sulfaté-sodique. Ceci est vérifié par les teneurs dominantes des ions suivants :  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Les deux diagrammes (figures III.11A et III.11B) utilisent les rapports  $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$  et  $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$  (exprimés en meq/l). L'interprétation de ces deux diagrammes a montré la concentration des rapports d'ions en 4 pôles indiquant les 4 faciès, qui caractérisent la nappe. Nous notons l'absence des faciès bicarbonaté sodique et sulfaté sodique.

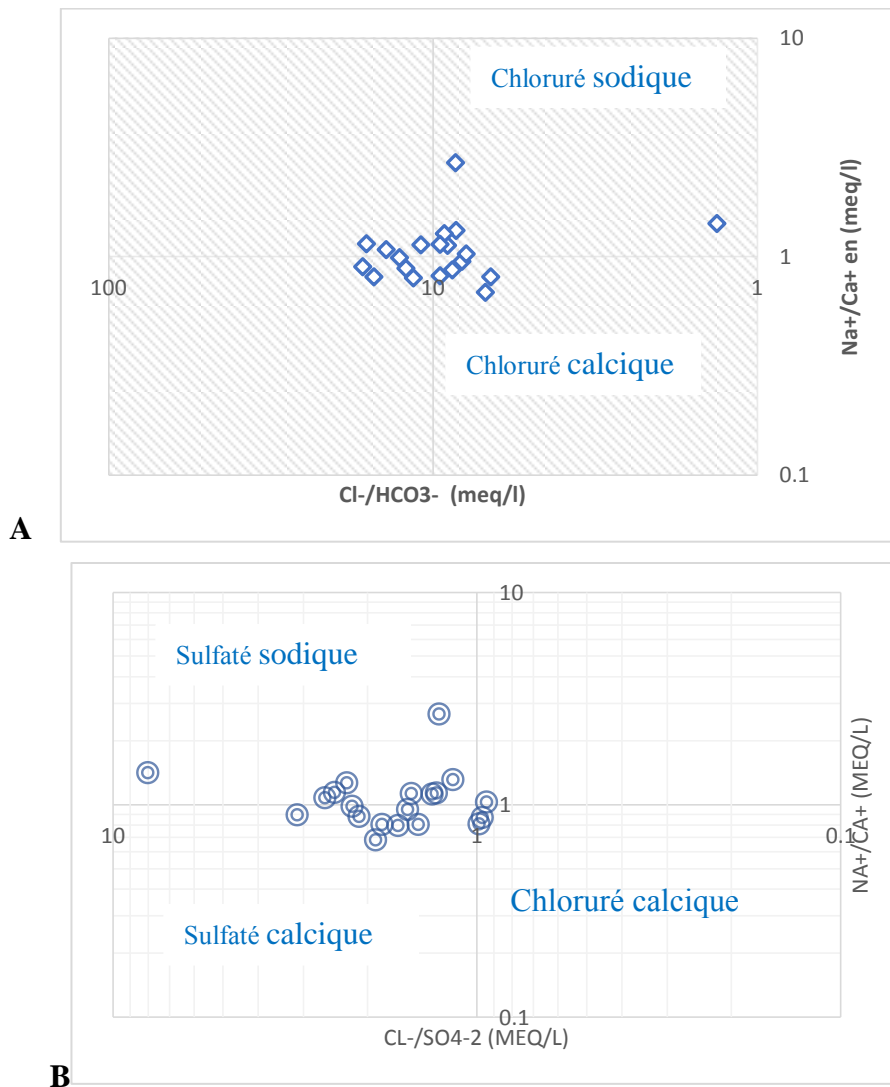


Figure III.11 (A, B) : Evolution et distribution des faciès chimiques.

### III.6.2. Origine des éléments chimiques :

Les analyses chimiques ont concerné les points d'eau relevés durant les différentes campagnes d'échantillonnage.

#### III.6.2.1. Les éléments $\text{Ca}^{+2}$ , $\text{SO}_4^{-2}$ et $\text{HCO}_3^-$ :

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

La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates montre un seul point qui se positionne sur la droite, indiquant l'origine carbonatée des ions de calcium par la dissolution des formations carbonatées d'âge crétacé.

Par contre les autres points présentent un excès en  $\text{Ca}^{2+}$ , provenant de la mise en solution du gypse ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou du  $\text{CaCO}_3$  (calcaires).

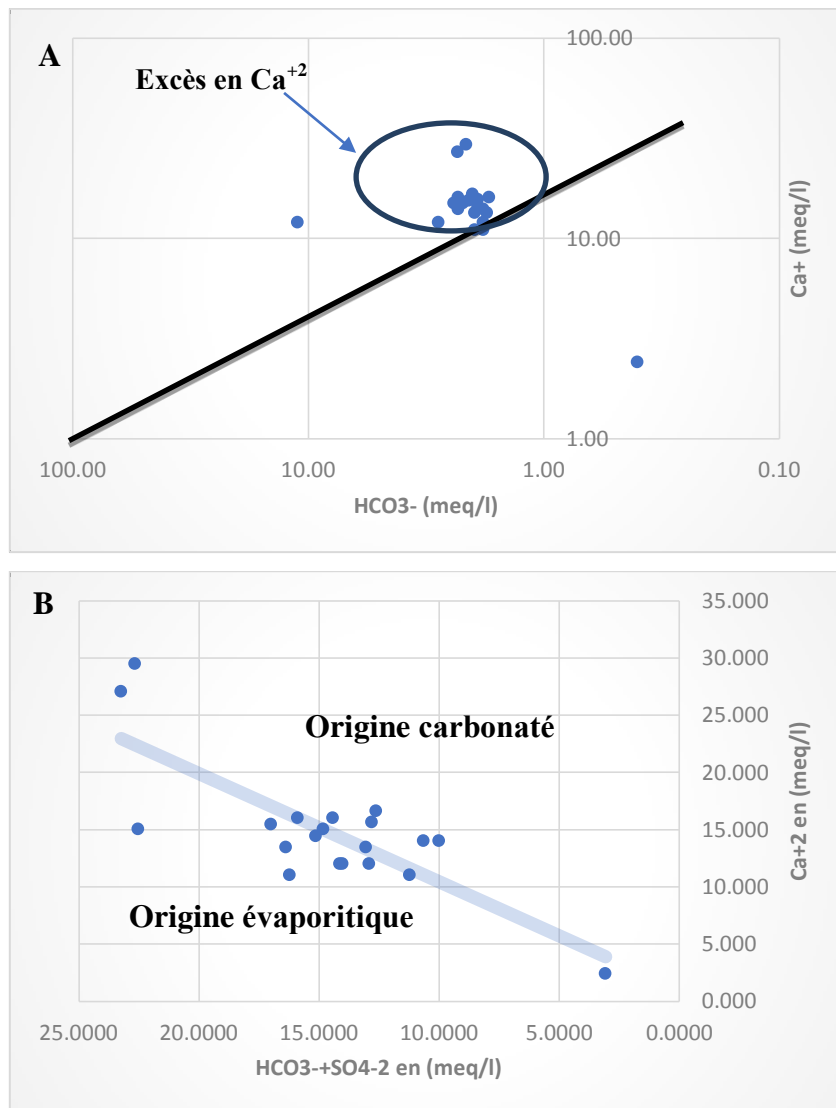


Figure III.12 (A, B) : Détermination l'origine de calcium.

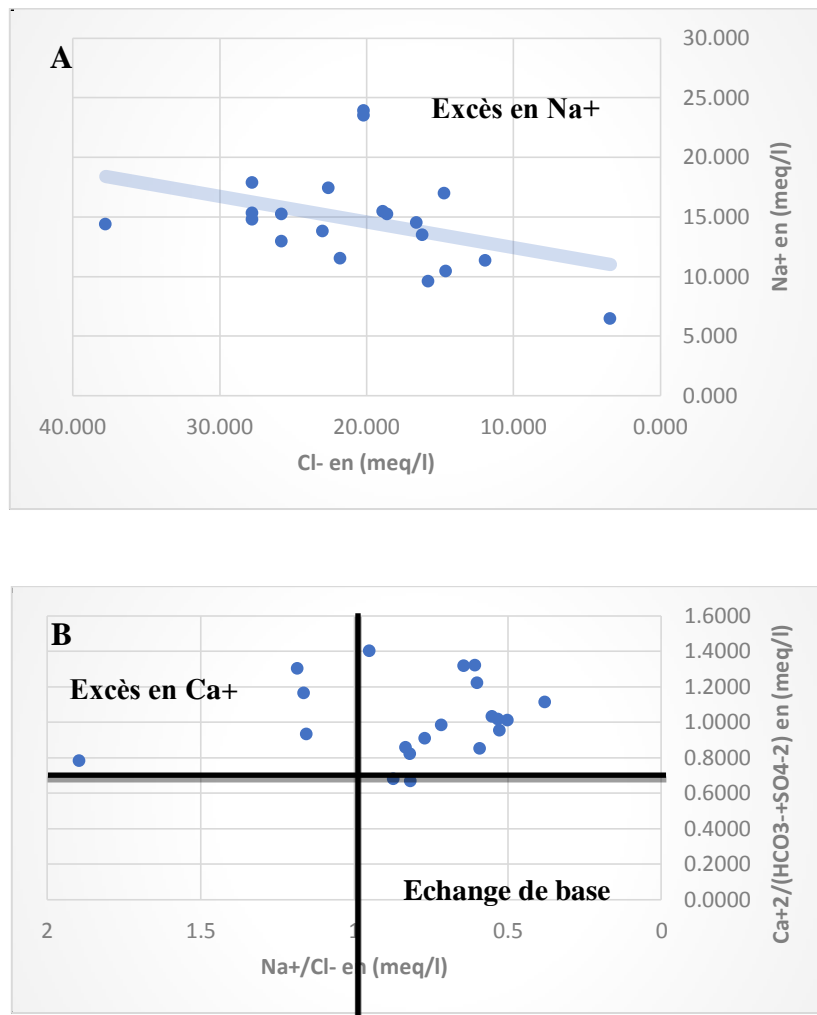
**III.6.2.2. Les éléments  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  :**

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

La représentation graphique de l'évolution du  $\text{Na}^+$  en fonction de  $\text{Cl}^-$  (figure III.13A) a montré un excès des teneurs en  $\text{Na}^+$ , qui s'explique par l'existence d'une autre origine pour les ions sodium (autre que l'halite).

L'augmentation des teneurs en  $\text{Na}^+$  qui a accompagné les faibles teneurs en  $\text{Cl}^-$  est due au phénomène d'échange de base (figure III-13B), car les argiles du substratum peuvent libérer des ions  $\text{Na}^+$  après avoir fixé le  $\text{Ca}^{2+}$ .

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



**Figure III.13 (A, B) : Détermination l'origine de sodium**

III.6.2.3. Les éléments  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  :

Après avoir fait le point sur les origines des cations, on a essayé de représenter l'évolution des anions en fonction de la conductivité. L'interprétation de la figure III.14 A montré que la conductivité électrique évolue plus avec les chlorures et les sulfates qu'avec les bicarbonates, ce qui indique une influence prépondérante des formations salifères.

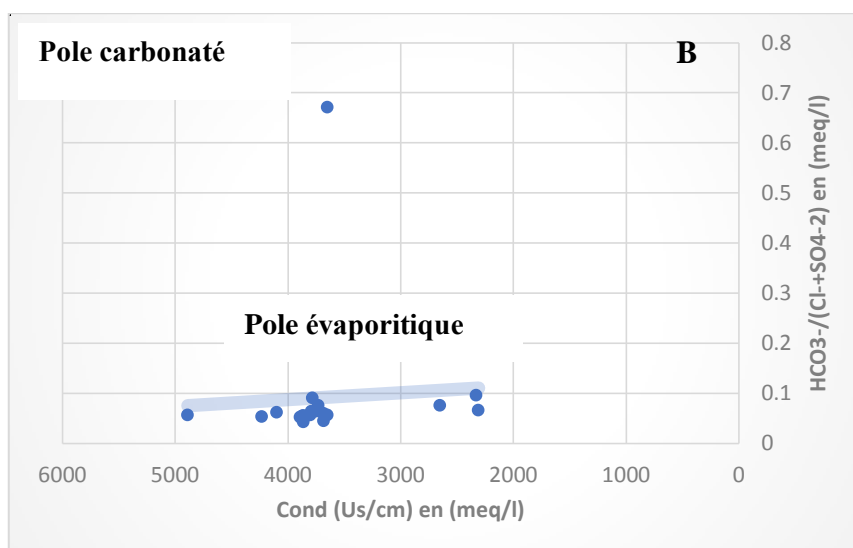
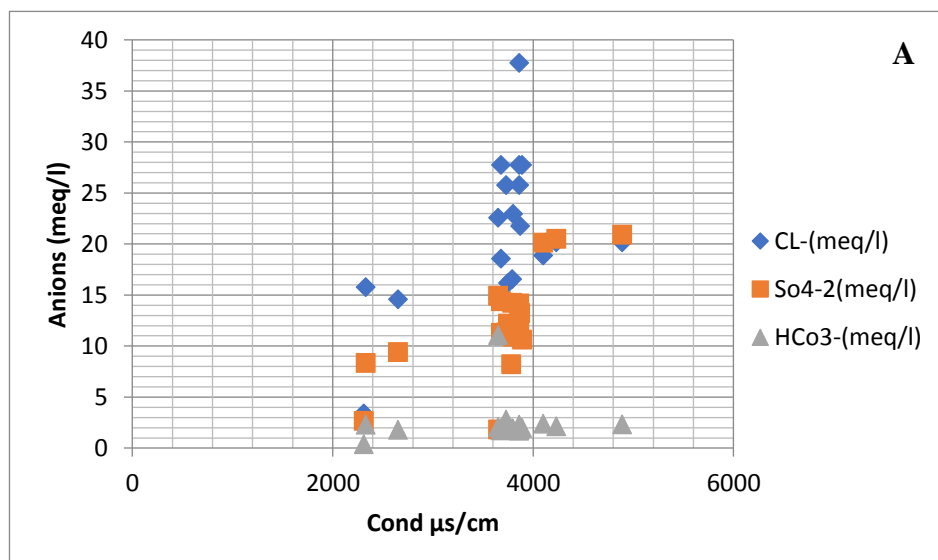


Figure III.14 (A, B) : Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique.

L'examen de la relation  $\text{HCO}_3^- / (\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$  permet d'observer les facteurs qui influencent la variation de la conductivité des eaux (Figure III.14B).

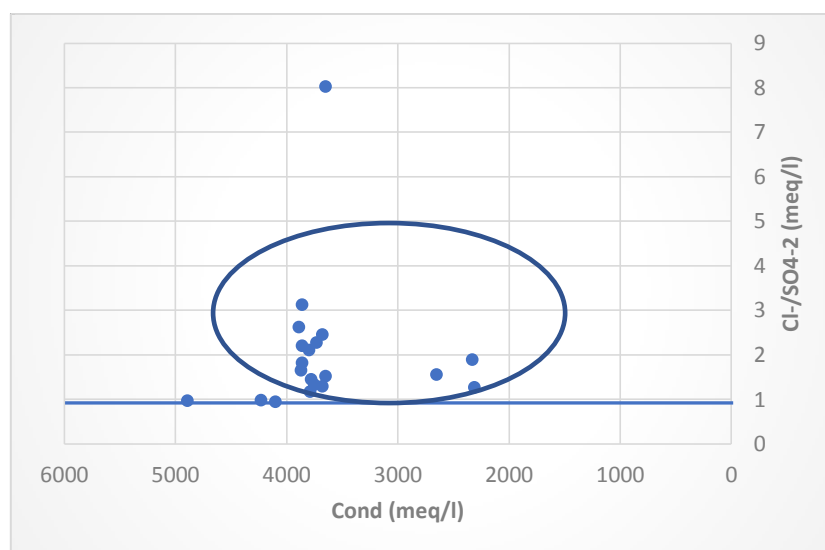
Nous constatons ainsi une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité électrique, un seul pôle est observé :

L'un est représenté le pôle évaporitique avec une dominance des ions  $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ . Ce pôle



apparaît pour les fortes conductivités ( $>2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) et rassemble plus de 90% des points d'eaux. Les valeurs faibles de la conductivité ( $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ) s'observent dans les régions éloignées des affleurements des évaporites du Trias et sont liées aux ions bicarbonates. Par contre, lorsqu'elles dépassent  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , la conductivité devient liée plus aux ions évaporitiques ( $\text{Cl}^-$  et  $\text{SO}_4^{2-}$ ).

#### III.6.2.4. Les éléments $\text{SO}_4^{2-}$ , $\text{Cl}^-$ :



**Figure III.15 : Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique.**

Le rapport  $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$  montre que la majorité des points d'eau supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions  $\text{Cl}^-$  par rapport à  $\text{SO}_4^{2-}$ , ce qui confirme la dominance du faciès chloruré sodique (Figure III.15). Quelques points d'eau présentent des valeurs du rapport ( $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ ) inférieures à 1, indiquant une origine gypsifère et évaporitiques.

#### III.7. Aptitude des eaux à l'irrigation :

Dans les zones arides et semi-arides, l'approvisionnement en eau d'irrigation constitue l'un des facteurs déterminants dans la production agricole, aussi bien dans l'intensification des cultures, que dans l'extension des surfaces irriguées. Pour les régions tempérées, les eaux superficielles constituent la principale source d'eau d'irrigation ; alors que dans les zones arides, où cette ressource est rare ou inexistante, il est fait appel aux eaux souterraines.

Le développement de l'agriculture dans ces zones rencontre actuellement, en dehors de la rareté des ressources hydriques, de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation et d'alcalinisation des sols. Cette dernière est due aux échanges ioniques (du sodium, du calcium et du magnésium) entre l'eau et le sol irrigué.

L'accumulation des sels hydrosolubles dans le sol d'enracinement influe négativement sur la croissance des plantes, nous avons recensé deux séries d'effets de la salinité (M. De FORGES, 1972) : les uns portent sur les végétaux, les autres sur le sol. En effet, ces sels causent des changements de la perméabilité et de l'aération du sol d'une part, et d'autre part ils provoquent des perturbations du métabolisme des plantes et du processus osmotiques de ces dernières. Comme la région d'étude est à vocation agricole et les risques de salinisation des sols se font sentir, une étude d'aptitude des eaux à l'irrigation s'avère nécessaire, car cette région se caractérise par une faible pluviométrie, une forte évaporation et une eau souterraine trop chargée en chlorures et en sulfates. Les risques qu'encourt cette plaine imposent une bonne connaissance des régimes hydriques et salins afin de pouvoir assurer une durabilité d'utilisation des ressources en eau et des sols.

Dans la présente approche, l'estimation de quelques paramètres de salinité en rapport avec l'usage agricole pour les quatre campagnes saisonnières a été établie.

### **III.7.1. Classification des eaux par la méthode de Richards :**

Après avoir reporté tous les points d'eau des différentes campagnes sur le diagramme de Richards (voir figures III.16 A, B), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR, nous avons dégagé trois classes :

Le classe C2S1 renferme des eaux admissibles pour l'irrigation des cultures tolérantes aux sels, sur des sols bien drainés ou de bonne perméabilité et la salinité doit être contrôlée, Elles représentent environ de 5 % des points d'eaux (F08). Le C4S1 renferme des eaux médiocres pour l'irrigation, représente les forages qui se situent au niveau des forages F1, F2 et F10 de la plaine et dans la région d'étude, Elles représentent environ de 15 % des points d'eaux. Alors que la classe C4-S2 renferme des eaux mauvaises pour l'irrigation représente un pourcentage de 80 % (F3, F4, F5, F6, F7, F9, F11, F12, F13, F14, F15, F17, F18, F19, F20.).

Les eaux de la nappe aquifère de la plaine d'EL-Oued et Kouinine présentent, en général, les mêmes qualités pour l'irrigation au cours de toute la période d'observation (Tableau III.16). La dégradation observée est due au gypse et aux argiles d'une part, et l'effet de l'évaporation d'autre part (augmentation des concentrations).

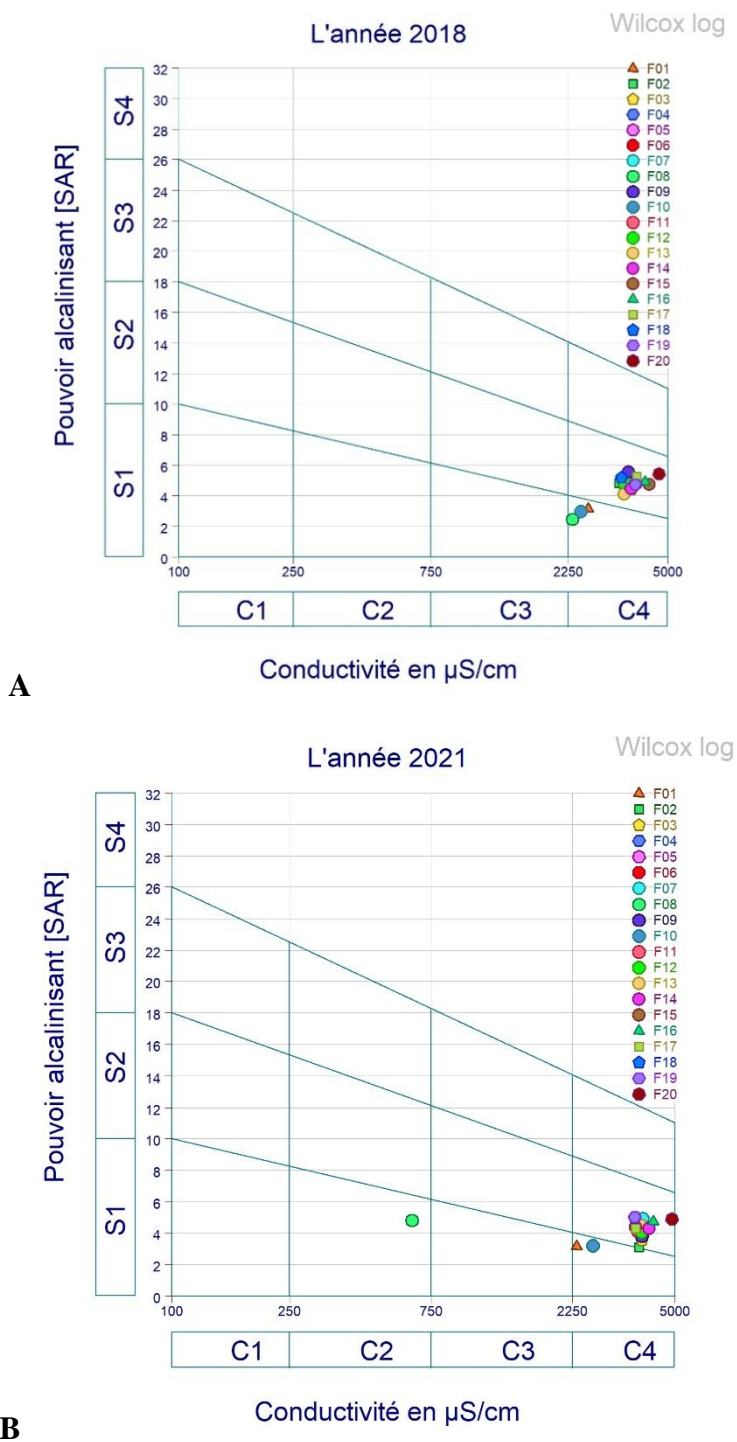
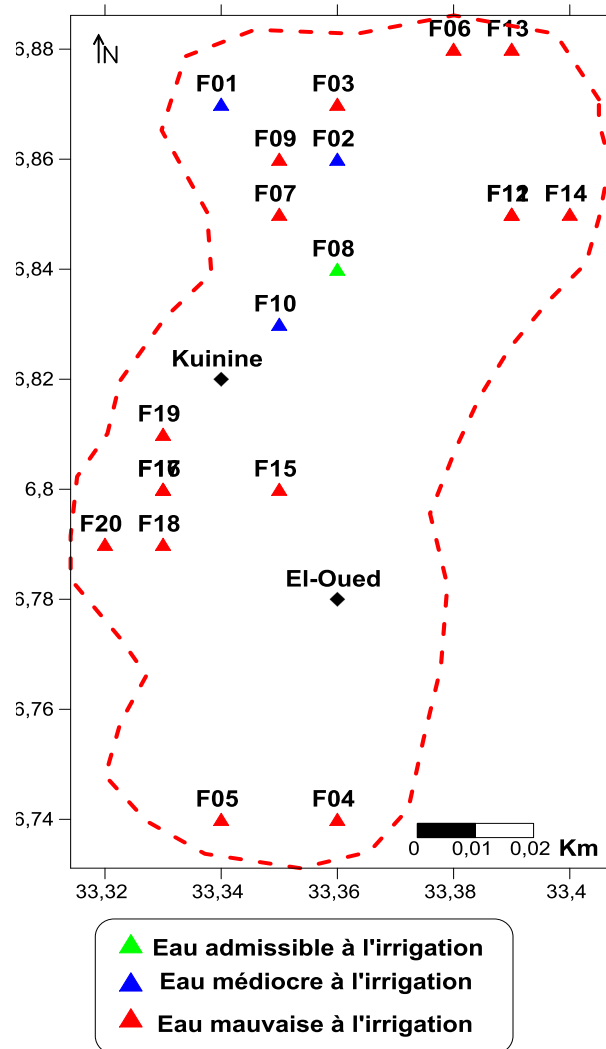


Figure III.16 (A, B) : Diagramme de Richards pour l'année 2018 et 2021.

Tableau III.4 : Evolution des classes d'irrigation selon Richards.

	2018	2021
C2S1	00%	05%
C4S1	15%	15%
C4S2	85%	80%

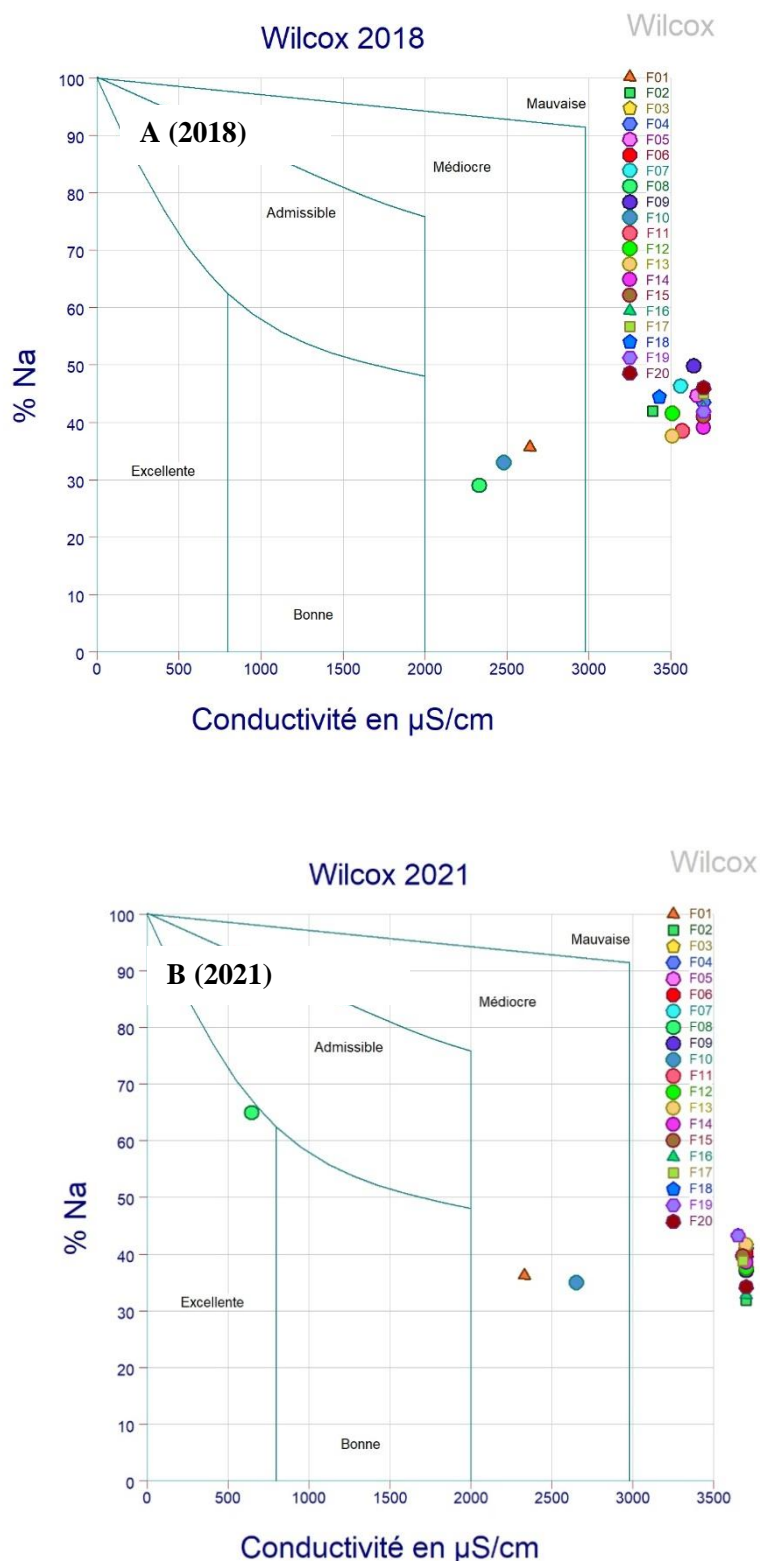


**Figure III.17 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation dans la région d'étude selon la classification de Wilcox (2021).**

### III.7.2. Classification des eaux par la méthode de Wilcox :

Généralement, les plantes supportent mal les sols saturés en sodium. La classification de Wilcox fondée sur la conductivité électrique et la teneur en sodium dans l'eau exprimée en pourcentage. La représentation des différents échantillons sur ce diagramme permet la caractérisation des eaux pour leur aptitude à l'irrigation (Figures III.18). Le %Na<sup>+</sup> est défini par la relation :

$$\text{Na}^+ \% = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+ + \text{K}^+)$$



**Figure III.18 (A, B) : Diagramme de Wilcox pour l'année 2018 et 2021.**

Les diagrammes couvrant toute la période d'observation montrent que les eaux souterraines de la nappe d'EL-Oued et Kouinine selon la classification de Wilcox, appartiennent aux trois classes : Bonne (Excellente), Médiocre et Mauvaise (Tableau III.5).

**Tableau III.5 : Evolution des classes d'irrigation selon Wilcox.**

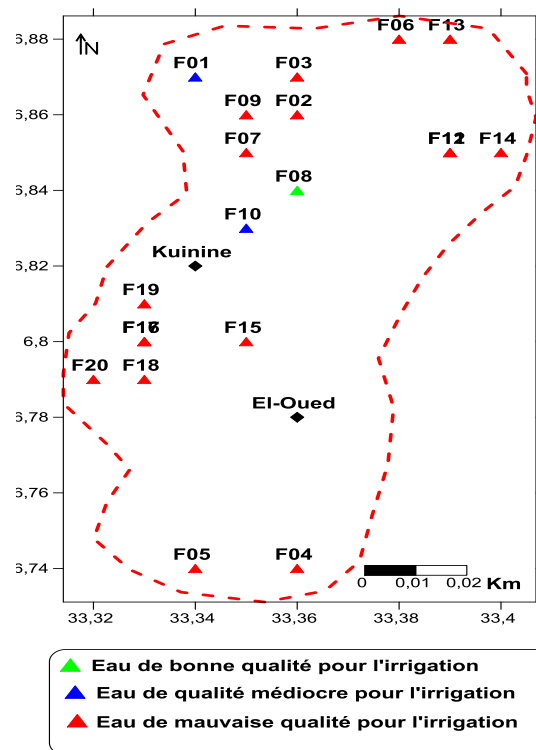
	2018	2021
<b>Excellente</b>	<b>00%</b>	<b>5%</b>
<b>Médiocre</b>	<b>15%</b>	<b>10%</b>
<b>Mauvaise</b>	<b>85%</b>	<b>85%</b>

La classe Bonne regroupe les eaux qui sont faiblement minéralisées et se rencontre dans la région commune d'EL-Oued.

La classe Médiocre regroupe les eaux plus minéralisées que celles des classes précédentes, elle se manifeste à EL-Oued.

La classe Mauvaise regroupe les eaux qui se situent au niveau de Kouinine et EL-Oued, Elle est la plus répandue dans la nappe (85%).

Nous constatons que les eaux souterraines subissent une dégradation selon le sens de l'écoulement, montrant ainsi l'effet de la lithologie sur leur qualité (Figure III.18).



**Figure III.19 : Carte d'aptitude des eaux à l'irrigation dans la région d'étude selon la classification de Wilcox (2021).**

En examinant les deux cartes d'aptitude des eaux à l'irrigation établies à l'aide des deux méthodes de Richards et Wilcox, nous remarquons qu'elles présentent presque la même distribution de la qualité. En effet, la classe 'admissible', donnée par la première méthode,

correspond à celles 'bonne', donnée par la deuxième méthode. La classe médiocre' et 'mauvaise' est déterminée par les deux classifications.

### III. Conclusion :

L'étude hydro-chimique des eaux de la nappe d'EL-Oued et Kouinine permet de dire que : Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de deux faciès dominants, qui sont le chloruré sodique, le sulfaté sodique.

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

L'évolution des éléments chimiques ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), qui caractérisent les formations géologiques principales de la plaine, a montré la dominance des ions salifères ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) et des ions gypsifères ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) par rapport à ceux carbonatés ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) 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 classification de Richards et celle de Wilcox ont prouvé la dégradation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

**CHAPITRE IV  
DETERMINATION  
DE LA  
QUALITE  
DES EAUX  
SOUTERRAINES  
DANS LA  
REGION D'EL-OUED  
ET KOUININE  
PAR L'APPLICATION  
LES INDICES (GWQI  
ET IPO)**



#### IV. Introduction :

L'eau souterraine est l'une des sources d'eau les plus importantes dans la région d'EL-Oued et Kouinine (Wilaya d'EL-Oued, située au Sud-Est de l'Algérie.), car elle est largement utilisée à des fins domestiques, industrie et agricoles. Le but de ce chapitre est de déterminer et d'évaluer la qualité des eaux souterraines de la région d'étude et leur état de pollution organique à l'aide l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) et l'indice de pollution (IPO), afin d'identifier les endroits avec la meilleure qualité pour l'approvisionnement en eau potable dans la zone d'étude.

A cet effet, 20 échantillons d'eau souterraine en 2018 et 2021, ont été collectés et analysés chimiquement pour différents éléments qui affectent la qualité de l'eau. Ces éléments sont : le calcium, le sodium, le magnésium, le chlorure, le potassium, le bicarbonate, le nitrate, le sulfate, la conductivité électrique et les valeurs de pH pour l'indice GWQI et des ammoniums, nitrites, nitrates et des phosphates pour l'indice IPO.

#### IV.1. L'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) :

##### IV.1.1. Définition l'indice GWQI :

Est une technique essentielle pour délimiter la qualité des eaux souterraines et son aptitude à la consommation. Le GWQI est défini comme une technique d'évaluation, qui fournit l'influence composite de différents paramètres de qualité de l'eau, sur la qualité globale de l'eau destinée à la consommation humaine. L'indice de qualité de l'eau (GWQI) a été calculé pour évaluer l'influence des activités naturelles et anthropiques sur la base de plusieurs paramètres chimiques des eaux souterraines.

*The Ground Water Quality Index* (GWQI) a été très utilisé pour déterminer la qualité des eaux souterraines, à des fins de l'indice de qualité des eaux souterraines (GWQI) est un outil très utile pour communiquer des informations sur la qualité globale de l'eau. La qualité de l'eau est très variable selon le type et la quantité de sels qui y sont dissous. Ces sels proviennent de sources naturelles.

##### IV.1.2. Méthode de calcul l'inde GWQI :

Trois étapes sont suivies pour calculer le GWQI. Dans un premier temps, chaque paramètre s'est vu attribuer un poids ( $w_i$ ) en fonction de son importance par rapport à la qualité globale de l'eau destinée à la consommation, un poids maximum de 5 a été attribué au paramètre nitrate en raison de son importance dans l'évaluation de la qualité de l'eau. Dans la deuxième étape, le poids relatif est calculé à partir de l'équation suivante :

$$W_i = w_i / \sum_{i=1}^n w_i$$

**$W_i$**  : Le poids relatif.

**$w_i$**  : le poids de chaque paramètre.

Dans la troisième étape, une échelle de notation (score) de la qualité ( $Q_i$ ) pour chaque paramètre est attribuée en divisant sa concentration par sa concentration standard respective fixée sur la norme de l'OMS en 2011 sur la qualité de l'eau de consommation humaine.

$$Q_i = (C_i/S_i) \times 100$$

: La notation est basée sur la concentration du paramètre.

**C<sub>i</sub>** : La concentration de chaque paramètre chimique dans l'échantillon d'eau en mg/l.

**S<sub>i</sub>** : La norme d'eau potable de l'OMS pour chaque paramètre chimique en mg/l.

Calculer le GWQI, la somme des produits de  $W_i$  et de  $q_i$  donne l'indice de qualité de l'eau pour chaque échantillon.

$$GWQI = \sum_{i=1}^n Q_i \times W_i$$

**GWQI** : Le Ground Water Quality Index

**Q<sub>i</sub>** : La notation est basée sur la concentration du paramètre.

**W<sub>i</sub>** : Le poids relatif.

**N** : Nombre de paramètre.

Cinq classes de qualité peuvent être identifiées selon les valeurs de l'indice de qualité de l'eau GWQI (Tableau.1).

**Tableau IV.1 : qualité des eaux souterraines selon GWQI [6]**

Class indice	Type d'eau
< 50	Excellent
50-100	Bonne
100-200	Médiocre
200-300	Très Médiocre
300 <	Non Potable

## IV.2. L'indice de pollution (IPO) :

### IV.2.1. Définition l'indice IPO :

L'indice de pollution organique (IPO) de Leclercq (2001) a été également utilisé pour évaluer la charge organique dans les points de d'eaux. Dont le principe de l'IPO est de répartir les valeurs des éléments polluants en 05 classes (Tableau 2). Cet indice s'obtient au moyen des valeurs des ammoniums, nitrites, nitrates et des phosphates.

Tableau IV. 2. Grille des classes de l'indice de pollution organique (Leclercq, 2001) [4]

Classe	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (µg/l)	IPO	Pollution organique
5	<0,1	<6	<15	4,6-5,0	Nulle
4	0,1-0,9	6-10	16-75	4,0-4,5	Faible
3	1-2,4	11-50	76-250	3,0-3,9	Modérée
2	2,5-6	51-150	251-900	2,0-2,9	Forte
1	>6	>150	>900	1,0-1,9	Très forte

#### IV.2.2. Méthode de Calcul de l'Indice de pollution organique (IPO) :

Le principe du calcul est de répartir les valeurs des trois éléments polluants en cinq classes et de déterminer, à partir des valeurs obtenues dans l'étude, le numéro de classe correspondant pour chaque paramètre en se servant des données moyennes du tableau 2. L'indice de pollution organique final est la moyenne des classes de pollution pour l'ensemble des paramètres (Tableau.2). Aussi déterminer cet indice a l'aide du logiciel Aquakit, deux petits programmes Aquexmono et Aquexmulti établis à partir d'un tableur Excel permettent d'extraire les données d'Aquakit et de les présenter en graphiques pour faciliter les interprétations (tableau 3).

Tableau IV.3 : Méthode détermination IPO a l'aide du logiciel Aquakit (Source logiciel Aquakit)

A l'aide d'un document vierge	A l'aide du logiciel Aquakit
<p>Ouvrez le fichier aquexsimple.xls</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❑ Encodez dans les zones bleues.</li> <li>• Vous pouvez soit imprimer la zone d'impression, soit enregistrer dans un autre fichier</li> </ul>	<p>Ouvrez le fichier Aquexmono.xls.</p> <p>Les données de la station choisie doivent être prélevées dans la base de données Aquadonn :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Appuyez sur CTRL a pour ouvrir le fichier Aquadonn</li> <li>• Sélectionnez la ligne contenant les données de la station en cliquant sur l'en-tête de ligne</li> <li>• Soit choisissez les commandes Edition/copier, soit cliquez sur</li> <li>• Choisissez les commandes Fenêtres/Aquexmono.xls</li> <li>• Sélectionnez la ligne 2 en cliquant sur l'en-tête de ligne n°2</li> <li>• Soit choisissez les commandes Edition/coller, soit cliquez sur</li> </ul> <p>Le descriptif de la station doit être prélevé dans la base de données Aquasta :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Appuyez sur CTRL r pour ouvrir le fichier Aquasta.</li> <li>• Sélectionnez les champs C et D de l'enregistrement désiré.</li> <li>• Soit choisissez les commandes Edition/copier, soit cliquez sur</li> <li>• Choisissez les commandes Fenêtres/Aquexmono.xls</li> <li>• Positionnez-vous dans la cellule B9 it choisissez les commandes Edition/coller, soit cliquez sur</li> </ul>

### IV.3. Calcul des indices GWQI et IPO et évaluation de la qualité des eaux :

#### IV.3.1. Indice de qualité de l'eau GWQI :

La qualité globale des eaux des forages de la région d'étude (commune d'El- oued et Kouinine) a été évaluée par la méthode de GWQI. Le poids relatif ( $W_i$ ) de chaque paramètre physico-chimique et la constante de proportionnalité  $k$  ont été calculés en premier lieu en utilisant les valeurs moyennes de la norme standard de l'OMS des eaux potables (2011) des paramètres physico-chimiques étudiés (Tab.4). En effet, 9 paramètres importants dans l'étude de la qualité des eaux de surface : pH, CE, Ca, Na, Mg, K, Cl, HCO<sub>3</sub> et SO<sub>4</sub> ont été pris en compte dans le calcul de la valeur de GWQI.

Les valeurs calculées de  $W_i$  sont données dans le tableau 4 :

**Tableau IV.4. Les poids relatifs des paramètres physicochimiques Selon les normes de l'OMS**

Paramètres	Si : Norme l'OMS (mg.l <sup>-1</sup> )	1/Si	Poids	Poids relatif (W <sub>i</sub> )
PH	6,5-9,5	0.125	4	0,13
Ca	100	0.01	2	0,06
Mg	50	0.02	1	0,03
Na	150	0.0066	2	0,06
Cl	250	0.004	3	0,10
SO <sub>4</sub>	250	0.004	4	0,13
NO <sub>3</sub>	50	0.02	5	0,16
K	12	0.083	2	0,06
HCO <sub>3</sub>	250	0.004	3	0,10
CE (μS.cm <sup>-1</sup> )	2500	0.0004	4	0,13
		Σ (1/Si)=0.277 k=1/Σ (1/Si)=3.61	Total = 30	

L'indice de qualité des eaux souterraines GWQI a été classé dans le tableau 5 (A, B).

Tableau IV.5 (A, B) : Classification de la qualité des eaux souterraines selon GWQI 2018 / 2021.

2018			2021		
Forage	GWQI	Classes	Forage	GWQI	Classes
F01	98.228	Bonne	F01	127.525	Mediocre
F02	110.422	Mediocre	F02	134.523	Mediocre
F03	117.082	Mediocre	F03	160.905	Mediocre
F04	138.138	Mediocre	F04	151.35	Mediocre
F05	142.992	Mediocre	F05	160.187	Mediocre
F06	154.611	Mediocre	F06	158.748	Mediocre
F07	160.939	Mediocre	F07	172.254	Mediocre
F08	165.306	Mediocre	F08	56.837	Bonne
F09	169.116	Mediocre	F09	171.064	Mediocre
F10	173.732	Mediocre	F10	129.425	Mediocre
F11	176.229	Mediocre	F11	169.558	Mediocre
F12	180.275	Mediocre	F12	182.464	Mediocre
F13	183.293	Mediocre	F13	175.184	Mediocre
F14	190.016	Mediocre	F14	181.046	Mediocre
F15	192	Mediocre	F15	166.191	Mediocre
F16	197.402	Mediocre	F16	220.843	Très Mediocre
F17	201.534	Mediocre	F17	163.306	Mediocre
F18	211.971	Très Mediocre	F18	151.373	Mediocre
F19	218.82	Très Mediocre	F19	174.133	Mediocre
F20	229.745	Très Mediocre	F20	227.870	Très Mediocre

Après le calcul de l'indice global de qualité GWQI pour les deux périodes 2018,2021 en utilisant les résultats d'analyses physico-chimiques et les valeurs standards de l'OMS des eaux potables (2011), la classe de qualité des eaux est déterminée pour les 20 échantillons relatifs (Tableau 5 A, B). Ainsi, la classe de qualité bonne a été identifiée, pour les eaux se situent au niveau d'El -Oued centre (F1), (F8). La classe de qualité médiocre a été enregistrée respectivement au niveau de la commune d'El- Oued (Figure 2). Ainsi la classe très médiocre a été trouvée respectivement au niveau de la commune de Kouinine (F17, F18, F19, et F20. (Figure 1A, B)

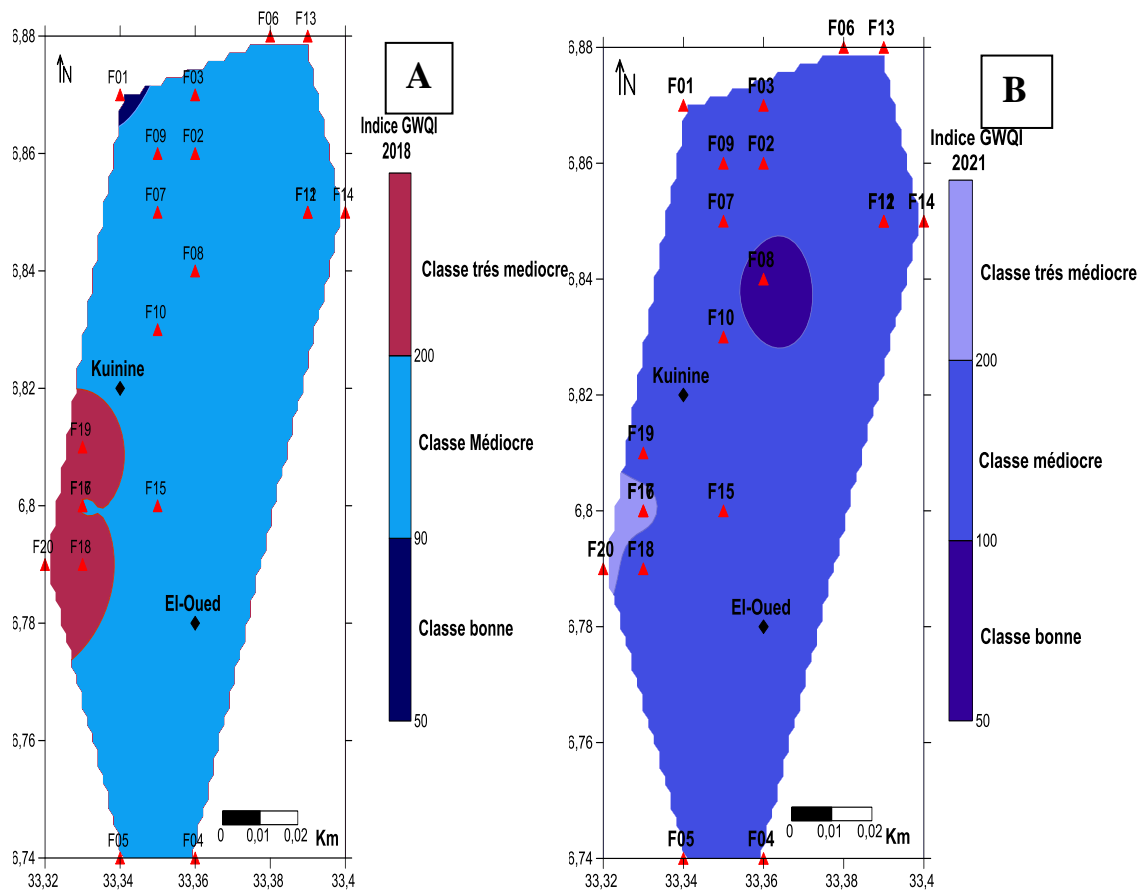
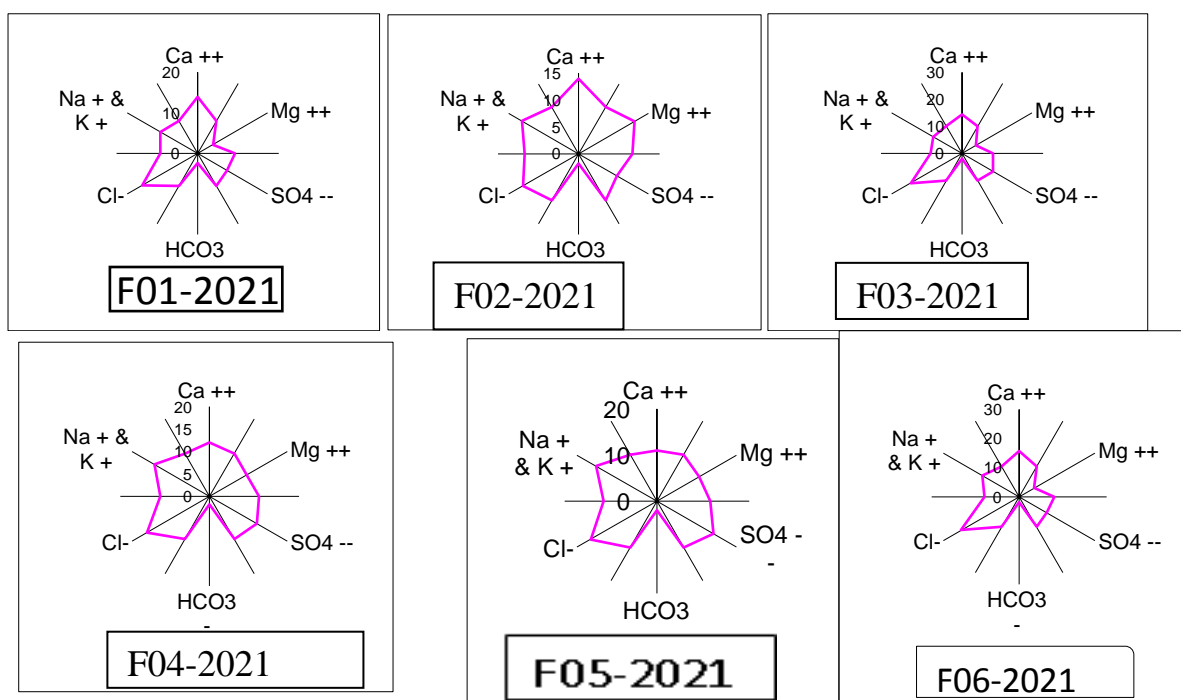
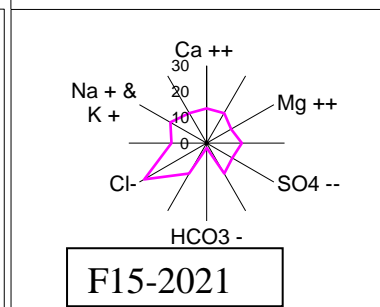
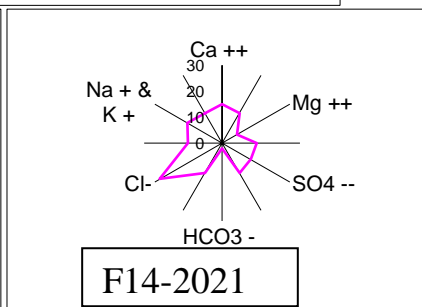
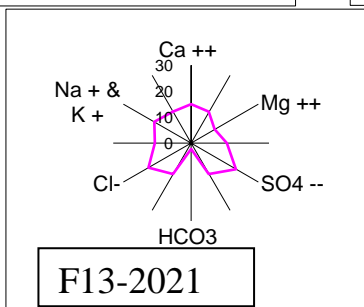
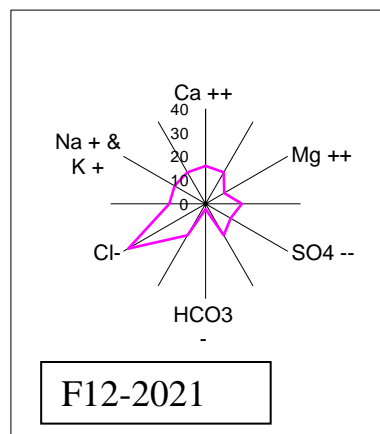
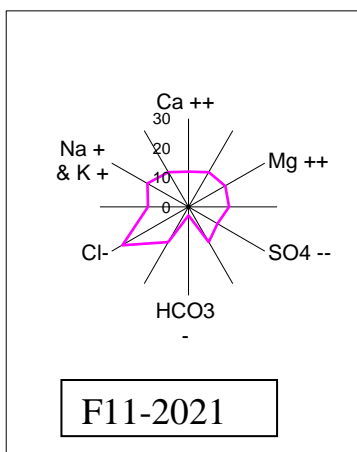
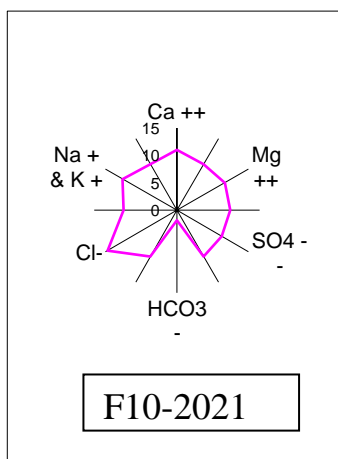
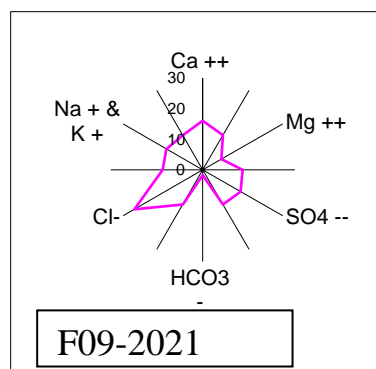
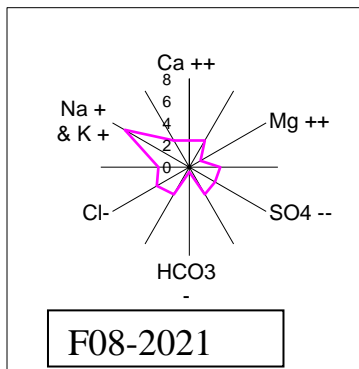
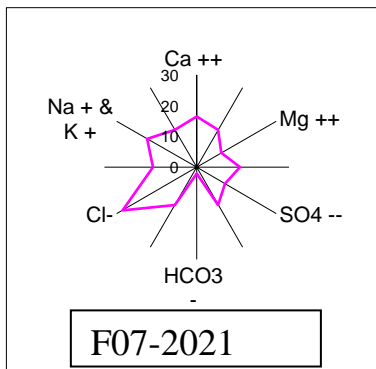


Figure IV.1 (A, B) : Carte thématique de l'indice de GWQI (2018,2021) des eaux souterraines de la zone d'étude.







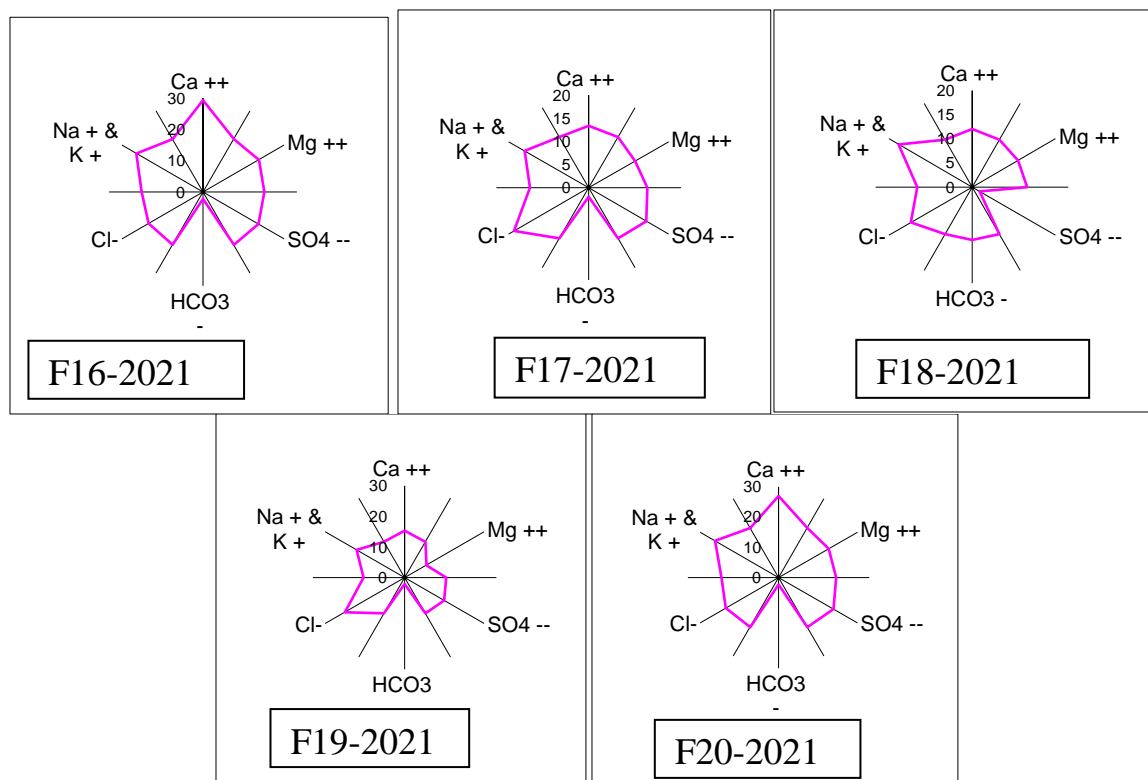


Figure IV. 2 : Indicateur géologique pour l'indice GWQI en 2021.

**IV.3.2. Indice de pollution organique IPO :**

Après le calcul de l'indice de pollution organique IPO en utilisant les résultats d'analyses des paramètres indicateur de pollution (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NO<sub>2</sub><sup>-</sup> et NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), la classe de qualité des eaux est déterminée pour les 20 échantillons relatifs (Tableau 6 et Fig.3A, B). Ainsi, trois classes de pollution organique (pollution organique nulle, faible et modérée). Le suivie d'analyse dans les différents points d'eau a fait l'objet d'un traitement de données par l'établissement des cartes thématiques de pollution organique des eaux souterraines de deux communes El oued et Kouinine durant les deux période 2018 et 2021. Il renseigne sur la distribution spatio-temporelle de la qualité des eaux souterraines par le biais de l'indice de pollution organique IPO.

La classe de pollution organique modérée a été identifiée au niveau des forages (F16, F20) en 2021, (F15) en 2018. Les classes de nulle et faible pollution organique occupent toute la région d'étude (Tableau 6 et Figure 3A, B).

**Tableau IV. 6. Calcul de l'indice IPO des eaux souterraines de la zone d'étude pendant la campagne de l'année 2018 et 2021.**

2018		
Forage	IPO	Classes
F01	4.33	Faible
F02	4.67	Null
F03	4.33	Faible
F04	4.67	Null
F05	4.33	Faible
F06	4.33	Faible
F07	4.33	Faible
F08	4	Faible
F09	4.33	Faible
F10	4.33	Faible
F11	5	Null
F12	4.67	Null
F13	4.67	Null
F14	4.67	Null
F15	3.67	Modérée
F16	4	Faible
F17	4.33	Faible
F18	5	Null
F19	4.33	Faible
F20	4.67	Null

2021		
Forage	IPO	Classes
F01	4.33	Faible
F02	4.33	Faible
F03	4.33	Faible
F04	4.33	Faible
F05	4.33	Faible
F06	4.33	Faible
F07	4.67	Null
F08	4.33	Faible
F09	4.33	Faible
F10	4.33	Faible
F11	4.67	Null
F12	4.33	Faible
F13	4.67	Null
F14	4.67	Null
F15	4.33	Faible
F16	3.67	Modérée
F17	4.33	Faible
F18	4.33	Faible
F19	4.33	Faible
F20	3.67	Modérée

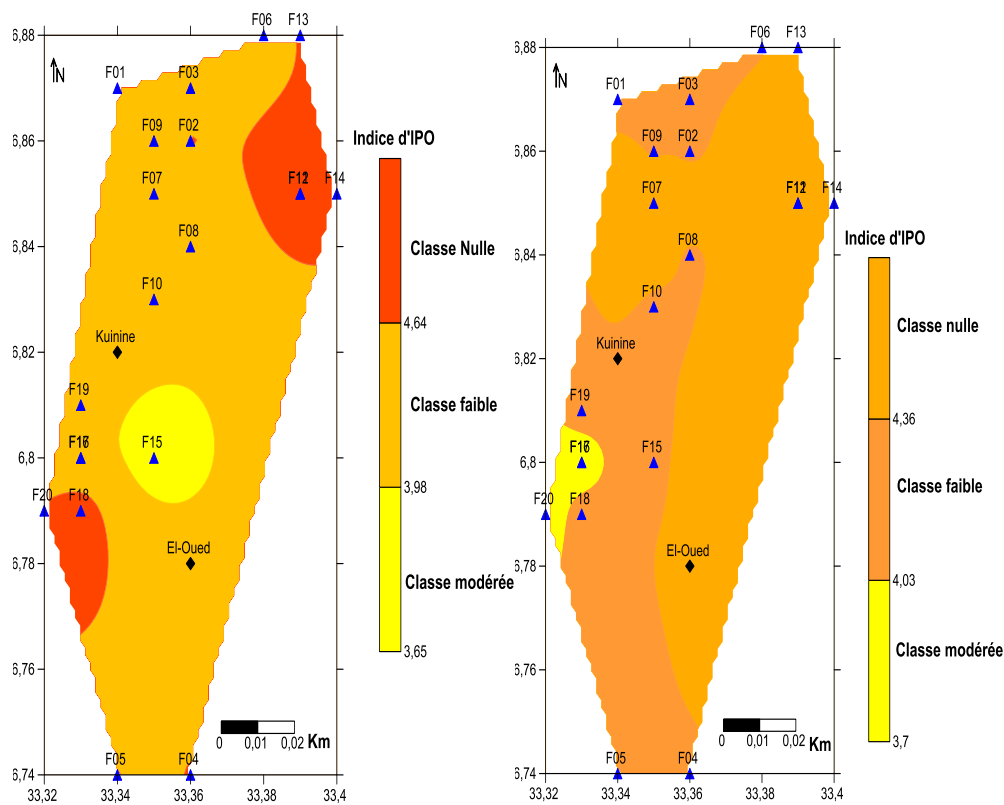
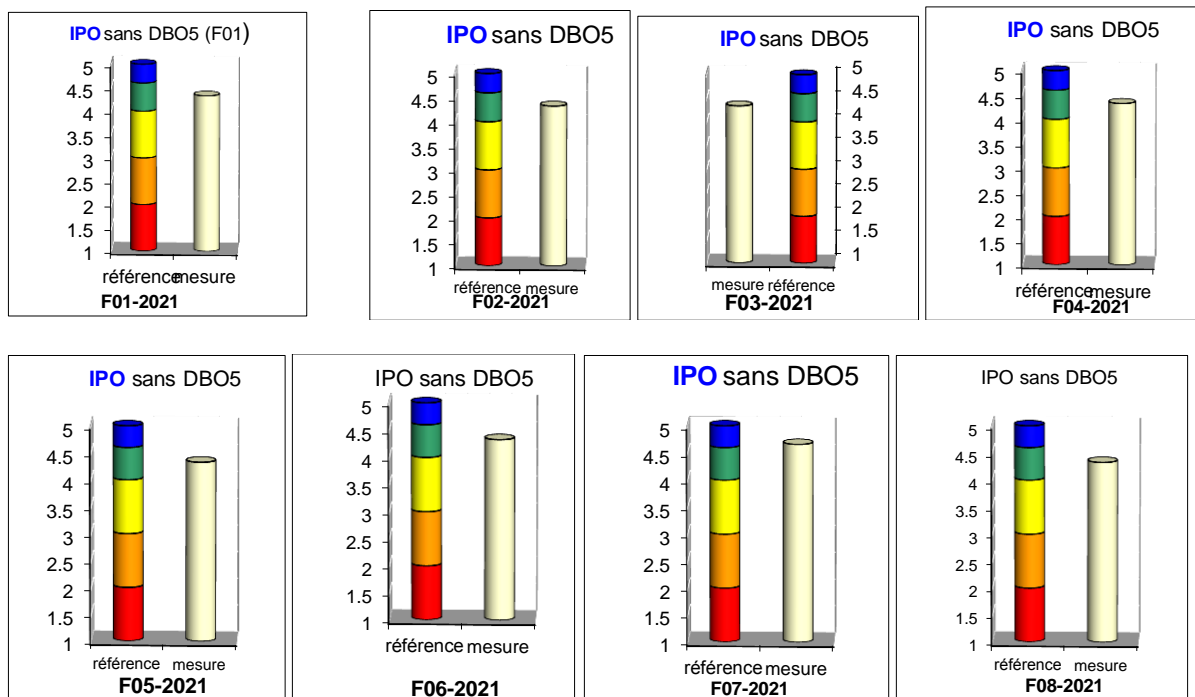
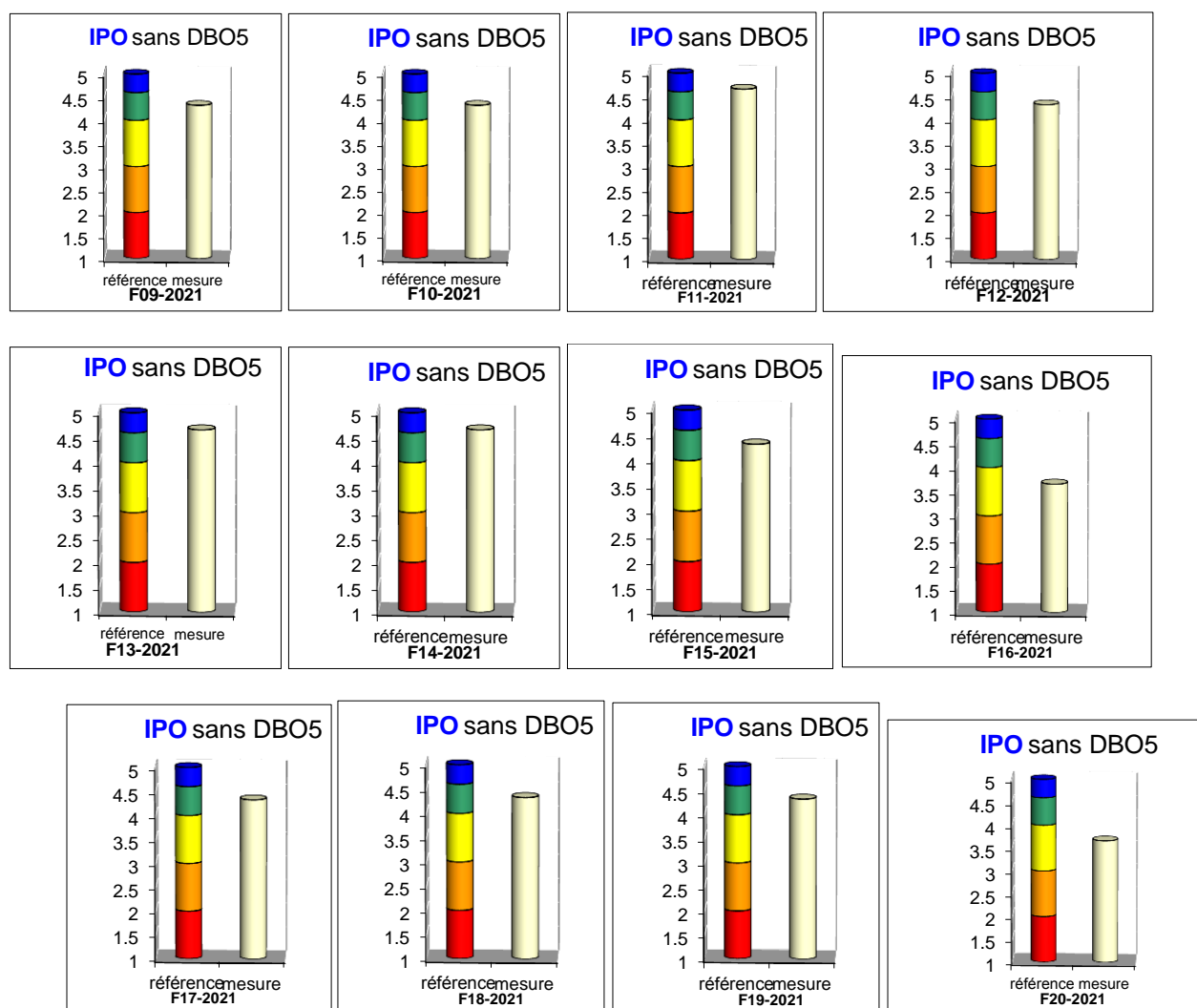


Figure IV.3 (A, B) : Carte thématique de l'indice de pollution organique IPO des eaux souterraines pendant les campagnes 2018, 2021.





**Figure IV.4 : Valeur et classe l'indice de pollution organique sans DBO5 en 2021.**

#### IV.4. Discussion :

Le résultat de l'analyse des cartes (GWQI) confirme que : plus de 5 % des eaux souterraines de la zone d'étude relèvent de la catégorie "Bonne eau", 85 % et 10 % " Médiocre eau" et " Catégories d'eau "très Médiocre " respectivement.

L'indice de qualité de l'eau GWQI indique que la majorité des forages (F2, F3, F4, F5, F6, F7, F9, F10, F11, F12, F13, F14, F15, F16, F17, F18, F19, F20), soit 80% des forages, restent de médiocre qualité à très médiocre ( $100 < GWQI \leq 200$ ) et ( $200 < GWQI \leq 300$ ). Cette dégradation de qualité d'eau est fortement liée à la lithologie de la nappe, suite à la dissolution des formations carbonatées et des formations évaporitiques (Figure 2) et peut être aux rejets industriels au niveau de forage F20.

L'état de pollution organique des eaux souterraine de la région d'étude, calculé à partir de l'indice de pollution organique IPO, montrent que 90% des forages présentent une pollution organique nulle à faible ( $4 \leq IPO \leq 5$ ), L'exception apparaît au niveau du forage F15 durant la période 2018 et F16, F20 durant la période de 2021 avec un pourcentage de 10% des points d'eaux, qui indiquent une pollution

organique modérée (IPO =3,5) (Tableau 6 et Figure 3A, B).

Cette faible pollution est surtout liée au type d'aquifère (nappe captive), qui ne dépasse pas les normes de l'OMS pour toute utilisation, ces faibles teneurs sont probablement dues à l'impact de la zone vadose est composé de trois types de lithologies : argile, marnes, argile silteuse.

La dégradation de la qualité des eaux au niveau des stations F15, F16, F20 respectivement de la commune de Kouinine est due aux rejets d'origine domestiques et industrielle.

#### IV.5. Sensibilité des indices GWQI et IPO :

Les résumés statistiques des paramètres des hydro chimiques calculés en utilisant l'indice GWQI et IPO, respectivement, sont présentés dans le tableau 7.

**Tableau IV.7 : Les données statistique des valeurs de GWQI 2021 de la zone d'étude.**

Données	Valeurs IPO 2018	Valeurs IPO 2021	Valeurs GWQI 2018	Valeurs GWQI 2021
<b>Nombre des points de mesures</b>	20	20	20	20
<b>Min</b>	3,67	3,67	98,228	56,83
<b>1<sup>er</sup> quartile</b>	4,33	4,33	48,8015	151,36
<b>Médiane</b>	4.33	4,33	174,905	164,74
<b>3<sup>eme</sup> quartile</b>	4.67	4,33	194,2414	174,65
<b>Max</b>	5	4,67	229,745	227,87
<b>Moyenne</b>	4.433	4,332	174,9805	161,73
<b>Ecart-type</b>	0,32	0,26	35,7	35,14
<b>Variance</b>	0.10	0,07	1274,7994	1235,35
<b>Coefficient de variation</b>	7%	6%	20%	21%
<b>Intervalle de confiance 95%</b>	0,153	0,123	16,7	16,44
<b>Intervalle de confiance 99%</b>	0,209	0,169	22,84	22,48
<b>Erreur standard</b>	0,073	0,059	7,98	7,85

Nos données sont réparties dans toute l'aire de la commune d'El oued et de Kouinine. Les valeurs de deux indices GWQI et IPO sur une étendu de 76 et 1,3. La valeur de la médiane et la moyenne est quasi identique. L'écart-type représentatif des valeurs est de 35,14 et 0, 3 pour GWQI et IPO respectivement. Nous avons obtenu une dépression relative des données de 21% pour GWQI et 7% pour IPO. L'allure de cette dépression est légère avec une erreur standard de 7,85 et 0,065.

Le résumé de la corrélation entre les neuf paramètres GWQI est indiqué dans le tableau IV.8.

**Tableau IV.8 : Corrélation entre les dix paramètres GWQI.**

	GWQI	PH	Cond	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3	NO3
GWQI	1	-0.2	<b>0.87</b>	<b>0.88</b>	<b>0.74</b>	0.9	0.3	0.63	0.81	0.09	0.46
PH	-0.19	1	-0.24	-0.09	-0.35	-0	0.4	-0	-0.1	-0.09	-0.29
Cond	<b>0.87</b>	-0.2	1	<b>0.71</b>	0.66	<b>0.8</b>	0.1	0.49	0.69	0.1	0.58
Ca	<b>0.88</b>	-0.1	<b>0.71</b>	1	<b>0.73</b>	<b>0.8</b>	0.3	0.39	<b>0.74</b>	0	0.28
Mg	<b>0.74</b>	-0.4	0.66	<b>0.73</b>	1	<b>0.8</b>	0.3	0.14	0.58	0.17	0.27
Na	<b>0.89</b>	-0.4	<b>0.79</b>	<b>0.84</b>	<b>0.82</b>	1	0	0.38	0.65	0.24	0.54
K	0.3	0.35	0.06	0.27	0.25	0	1	0.23	0.21	0.01	-0.18
Cl	0.63	-0	0.49	0.39	0.14	0.4	0.2	1	0.37	-0.06	1
SO4	<b>0.81</b>	-0.1	0.69	<b>0.74</b>	0.58	<b>0.7</b>	0.2	0.37	1	-0.37	0.23
HCO3	0.09	-0.1	0.1	0	0.17	0.2	0	-0.1	-0.4	1	0.42
NO3	0.46	-0.2	0.59	0.28	0.27	0.5	-0	0.11	0.23	0.42	1

Forte corrélation peut être observée entre GWQI et conductivité électrique ( $r = 0,87$ ) ; entre la GWQI et la concentration de Ca ( $r = 0,88$ ) ; l'impact de la concentration Na ( $r = 0,89$ ) ; aussi la concentration de sulfate SO4 ( $r = 0,81$ ), la concentration de magnésium Mg ( $r = 0,74$ ).

Modéré corrélation peut être observée entre la GWQI et chlorure ( $r = 0,63$ ) ; entre GWQI et la concentration de NO3 ( $r = 0,046$ ).

Très faible corrélation peut être observée entre GWQI et bicarbonate HCO<sub>3</sub> ( $r = 0,09$ ) et potassium K.

Faible corrélation inverse peut être observée entre GWQI et pH ( $r = -0,19$ ).

Le résumé de la corrélation entre les quater paramètres IPO est indiqué dans le Tableau IV.9.

**Tableau IV.9 : Corrélation entre les trios paramètres d'IPO.**

	IPO	NO3	NO2	NH4	PO4
IPO	1	-0.1	-0	0.29	-0.86
NO3	-0.13	1	-0.37	0.58	-0.1
NH4	-0.01	-0.4	1	0.27	-0.1
NO2	0.28	0.58	-0.07	1	-0.1
PO4	<b>-0.86</b>	0.27	-0.1	-0.1	1

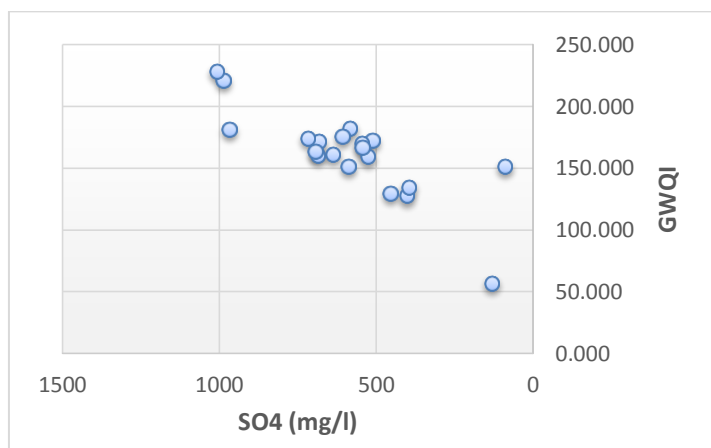
On remarque une faible corrélation entre les trois paramétrés et NH<sub>4</sub>, NO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub> et IPO ; aussi très fort corrélation inverse entre PO<sub>4</sub> et l'IPO.

#### IV.5.2. Influence des paramètres hydro chimiques sur l'indice GWQI et IPO :

Afin d'identifier l'influence de GWQI et IPO paramètres et les indices calculés de la calculé (GWQI) et (IPO), les rapports statistiques ont été utilisées pour identifier l'effet de ces paramètres

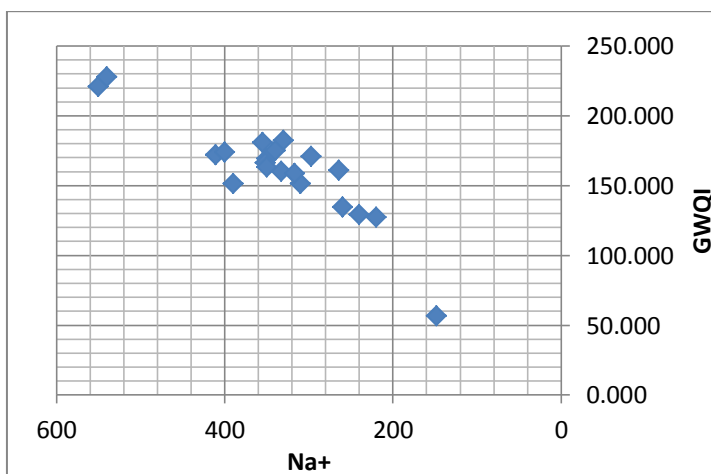
hydro-chimiques sur les indices calculées (Figure 5, 6, 7, 8, 9,10 et11).

**IV.5.2.1. Effet entre GWQI et SO4 :**



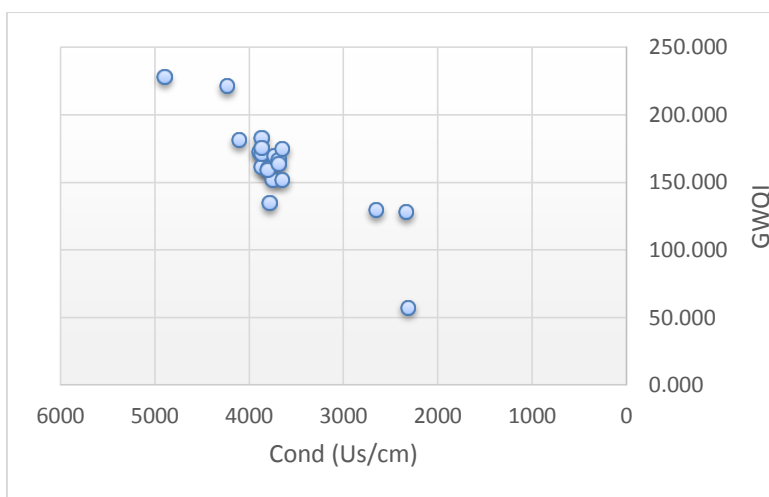
**Figure IV. 5 : Courbe effet entre GWQI et SO4.**

**IV.5.2.2. Effet entre GWQI et Na :**



**Figure IV.6 : Courbe effet entre GWQI et Na.**

**IV .5.2.3. Effet entre GWQI et Cond :**



**Figure IV.7 : Courbe effet entre GWQI et Cond.**

IV .5.2.4. Effet entre GWQI et Mg :

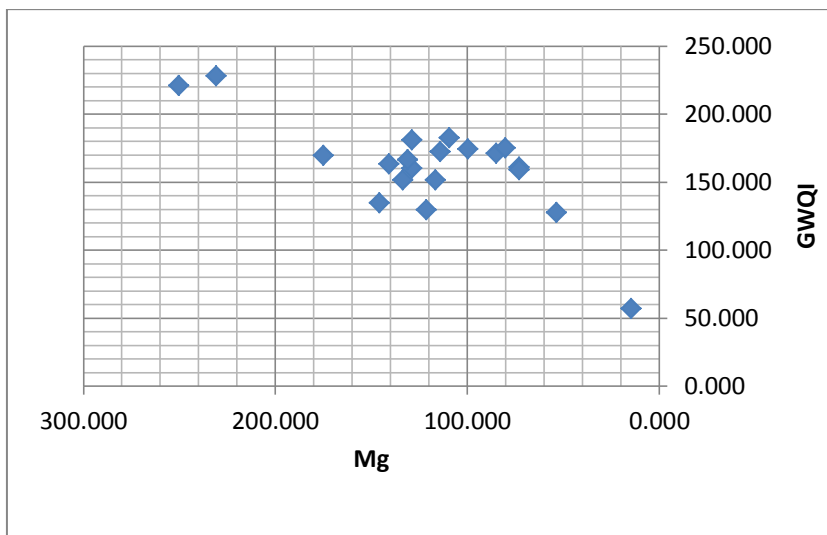


Figure IV.8 : Courbe effet entre GWQI et Mg.

IV .5.2.5. Effet entre GWQI et Ca :

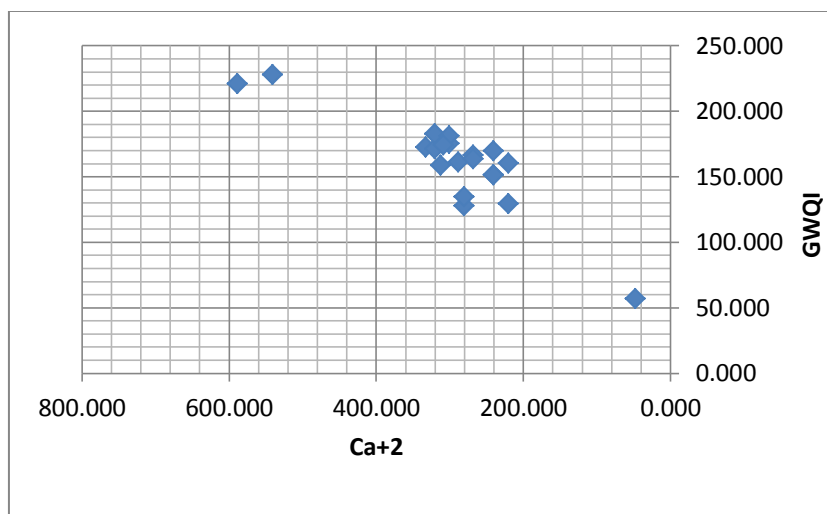


Figure IV.9 : Courbe effet entre GWQI et Ca.

IV.5.2.5. Effet entre IPO et PO4 :

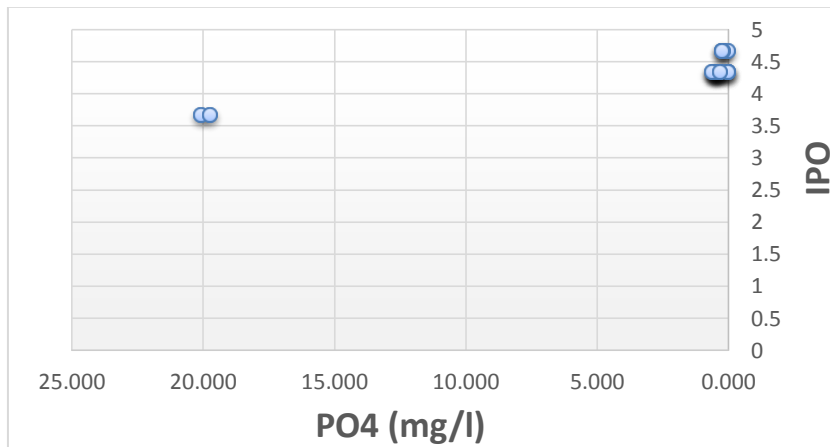
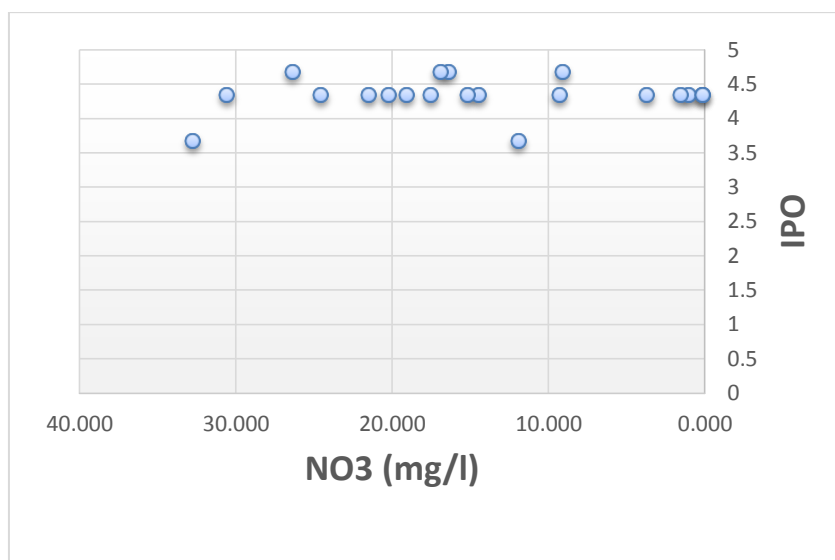


Figure IV.10 : Courbe effet entre IPO et PO4.



#### IV.5.2.6. Effet entre IPO et NO<sub>3</sub> :



**Figure IV.11 : Courbe effet entre IPO et PO4**

Dans la méthode GWQI les paramètres qui sont en corrélation plus avec l'indice de qualité sont les paramètres de sodium, calcium, sulfates et conductivité électrique. Cependant, dans la méthode IPO aucune liaison entre l'indice de pollution organique et les polluants organiques. Comme on peut le voir dans ce contexte, la lithologie reste le facteur prédominant selon l'indicateur de la relation entre la lithologie de l'aquifère.

#### IV.6. Interpolation des cartes par le krigeage :

La théorie de base du Krigeage, et par extension de l'approche géostatistique, est que les données sont continuées dans l'espace, soit de manière uniforme, on parlera alors d'isotropie, ou de manière sélective (anisotropie), angulaire ou par distance d'influence. La variance intersites dépend ainsi de la distance entre les sites (Goovaerts 1999). Pour s'assurer que les données répondent à ce critère, il est nécessaire de générer un Vario gramme préalablement à l'estimation par Krigeage. Quand la forme du Vario gramme est connue, il devient possible d'estimer les valeurs pour les sites où l'on ne dispose pas de données en appliquant un modèle sur le Vario gramme pour interpoler les valeurs là où on ne dispose pas de mesure.

❖ **Dépendance spatiale**

Pour décrire l'organisation spatiale d'une variable Z l'information disponible consiste-en des valeurs de Z à n sites. L'organisation spatiale des données est généralement donnée par le

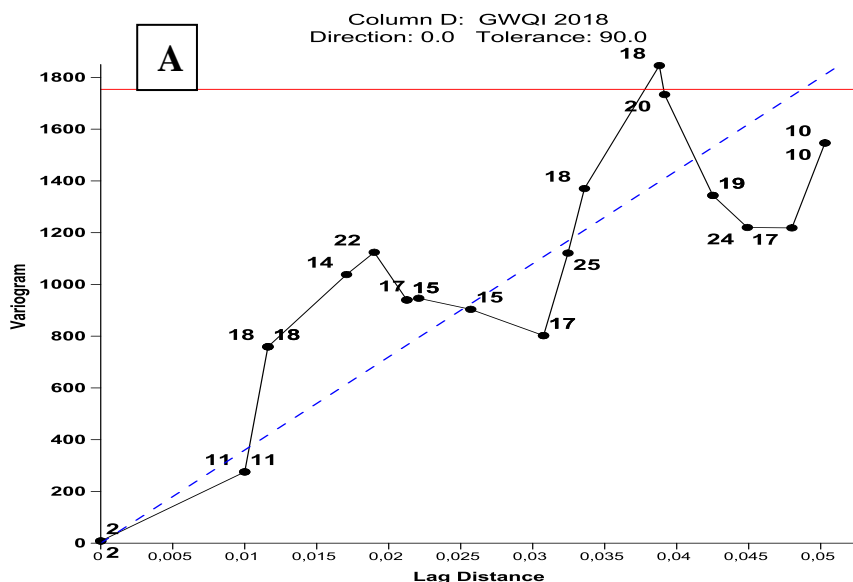
Vario gramme (équation 1), qui mesure la dissimilitude des données séparées d'une distance h.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (xi - yi)^2$$

Un Vario gramme peut être caractérisé par 3 paramètres : l'effet de pépite, le seuil et la distance d'influence, correspondant au début de la courbe et la distance au-delà de laquelle il n'y a plus de dépendance spatiale. Plus le nombre de données disponible est grand, plus le Vario gramme sera précis (Figure A.B). Les résultats de cette étude sont présentés dans les figures 11A, B et 12A, B.

Nous avons remarqué que le système du krigeage prend bien en considération les points suivants :

- Positions relatives du domaine à estimer et des points expérimentaux ;
- Positions relatives des points expérimentaux entre eux ;
- Structure du phénomène à travers le Vario gramme ;



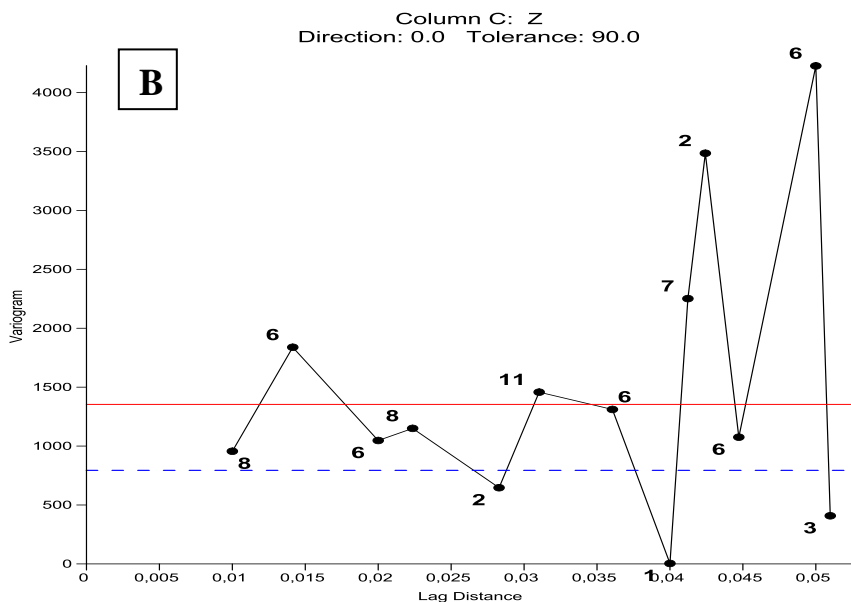


Figure IV.12 (A, B) : Vario gramme des valeurs de l'indice GWQI 2018 et 2021

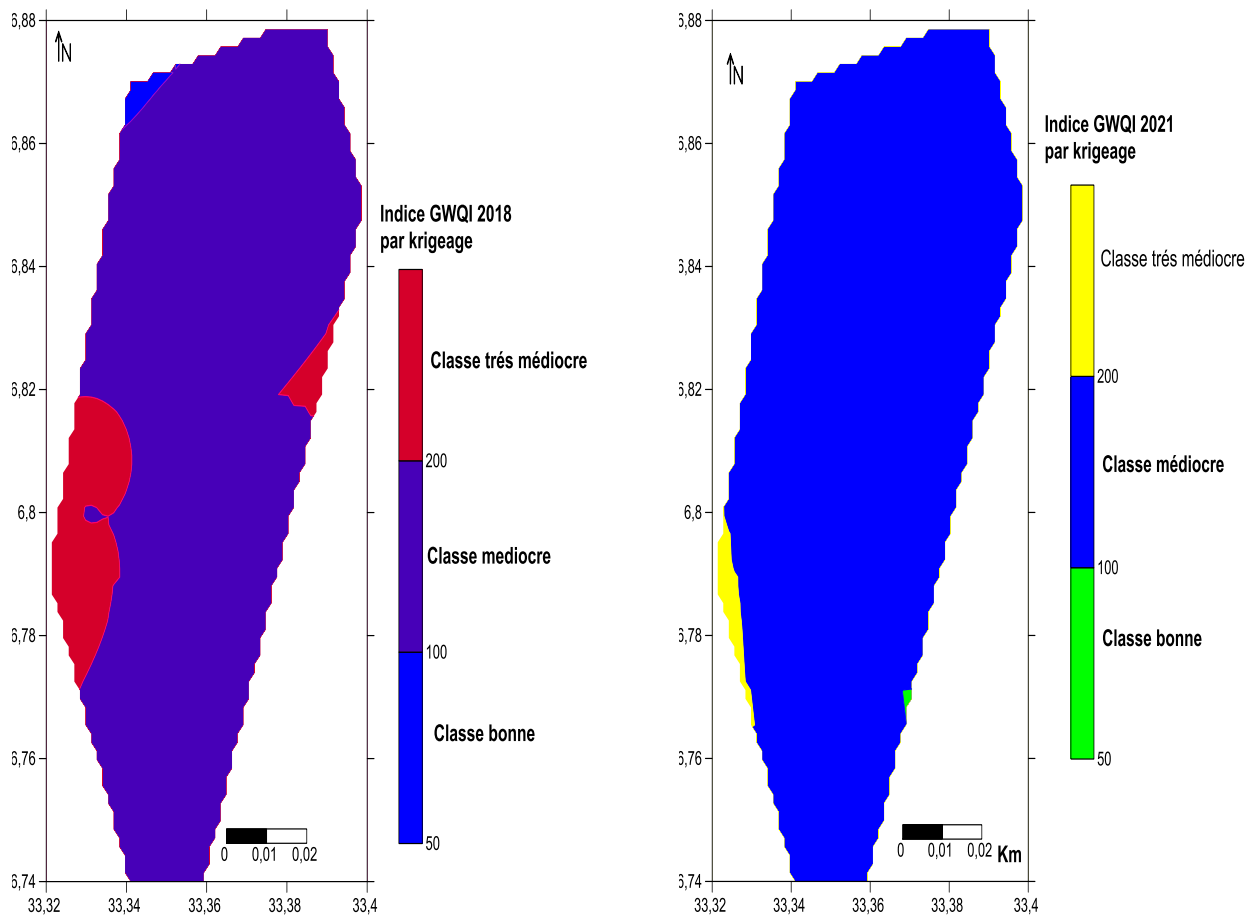


Figure IV .13A, B : Krigeage de la GWQI maximale 2018, 2021 dans l'espace géographique

Nous avons observé que la carte de l'indice GWQI établie en utilisant le krigeage suit ces tendances. Par exemple, des échantillons avec de la classe modérée dans la carte des valeurs de GWQI expérimentaux, ont été trouvés dans les zones ayant une qualité modérée dans la carte interpolée par krigeage, alors que les échantillons estimer avec la classe très médiocre, sont étroitement situés dans les zones de qualité d'eau très médiocre.

#### **IV. Conclusion :**

La qualité des eaux de surface et souterraine s'est fortement dégradée, limitant ainsi le potentiel réel en eau et aboutissant à des impacts sanitaires et écologiques importants. Le suivi des indices de qualité (GWQI) et de pollution organique (IPO), des eaux souterraines au cours de cette étude montre que les eaux souterraines de la zone d'étude restent à 5 % de bonne qualité et sans effet des paramètres hydro chimiques et une pollution organique (IPO) nulle à faible pour toutes usages. Toutefois, les forages affichent une détérioration croissante de la qualité de leurs eaux en fonction de la pression démographique des communes et l'influence de la géologie des nappes réservoir. Ainsi les eaux de la zone d'étude sont de mauvaise qualité à eau non potable avec une pollution organique modérée dans la commune de Kouinine et utiliser seulement en irrigation.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Compte tenu de l'immensité de la zone d'étude et de sa distinction avec son climat désertique chaud et sec en été et froid et peu de pluie en hiver et son couvert végétal représenté dans les palmiers et certaines cultures saisonnières comme la culture de pommes de terre et de melons, et avec la présence de certains vents dominants tels que le Sirocco (al-shehili) chaud, qui affecte l'augmentation du phénomène d'évaporation et l'évapotranspiration.

L'étude hydrodynamique nous a permis de constater que le sens d'écoulement des eaux souterraines est orienté suivant une direction générale Sud-Nord.

L'interprétation des essais de pompage par paliers et à longue durée qui a été effectué au niveau des 02 stations nous permet de constater que :

- ❖ Le débit soutiré oscille entre 10 l/s à 55.5 l/s
- ❖ Transmissivité moyenne de CT est  $2.01 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$
- ❖ La perméabilité de CT dans la région du souf est comprise entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$  m/s pour la nappe la plus exploitée du moi-pliocène ce qui nous donne une valeur moyenne de coefficient de perméabilité  $K = 5.5 \times 10^{-4}$  m/s.
- ❖ La porosité efficace estimée à 5%

L'étude hydro chimique des eaux de la nappe d'EL-Oued et Kouinine permet de dire que : Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence de deux faciès dominants, qui sont le chloruré sodique, le sulfaté sodique.

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

L'évolution des éléments chimiques ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ), qui caractérisent les formations géologiques principales de la plaine, a montré la dominance des ions salifères ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ) et des ions gypsifères ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ) par rapport à ceux carbonatés ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) 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 classification de Richards et celle de Wilcox ont prouvé la dégradation de la qualité des eaux destinées à l'irrigation.

La qualité des eaux de surface et souterraine s'est fortement dégradée, limitant ainsi le potentiel réel en eau et aboutissant à des impacts sanitaires et écologiques importants. Le suivi

## *Conclusion générale*

---

des indices de qualité (GWQI) et de pollution organique (IPO), des eaux souterraines au cours de cette étude montre que les eaux souterraines de la zone d'étude restent à 5 % de bonne qualité et sans effet des paramètres hydro-chimiques et une pollution organique (IPO) nulle à faible pour toutes usages. Toutefois, les forages affichent une détérioration croissante de la qualité de leurs eaux en fonction de la pression démographique des communes et l'influence de la géologie des nappes réservoir. Ainsi les eaux de la zone d'étude sont de mauvaise qualité à eau non potable avec une pollution organique modérée dans la commune de Kouinine et utiliser seulement en irrigation.

# **Références bibliographiques**



## Références bibliographiques

---

### Références bibliographiques

- [01] ANRH (Agence Nationale des Ressources Hydrauliques) de Constantine : Coupes stratigraphiques des forages, données climatiques et l'étude géophysiques.
- [02] Assine, S., Bernoussi, A.S. and Haddouchi, B.Y. (2007), "Vulnerability map to pollution of underground waters, test performed in the plain of GHARB (Maroc)", *Scientific Magazine of Water*, Vol. 20 No. 2, pp. 185-199.
- [03] AYERS, R., S. & WESTCOT, D.W. 1988. Water quality in agriculture. FAO irrigation and drainage bulletin, 29, 1: 165, FAO, Rome.
- [04] Belahcen Med H, Khetta Salah Eddine, Iachhab Med Fouzzi (2021) ; Contribution à l'adaptation de formules empiriques calculant les paramètres climatiques de bilan hydrique dans les régions arides, Mémoire de Master Ouvrage hydraulique, Université EL-Oued.
- [05] BENZAIAN Imane Fazilet 2009 ; Etude par krigeage de données piézométriques de la nappe du plateau de Mostaganem ; Mémoire magistère en Hydrogéologie. Page 11
- [06] CORNAS S. (2002) : "Guide pratique de l'échantillonnage des eaux souterraines. Société suisse d'hydrogéologie ", 80 pages
- [07] H. and Ahmed Ragab, A.R. (2011), "Vulnerability of the groundwater in the quaternary aquifer at El Shalal - Kema area, Aswan, Egypt", *Arabian Journal of Geosciences*, Vol. 6 No. 2, pp. 337-358
- [08] Kherci, N. and Bousnoubra, H. (2012), "State of vulnerability to pollution of the big reservoirs of groundwater in the region of Annaba-Bouteldja (NE Algeria)", *Geographia Technica*, No. 2, pp. 1-13.
- [09] Martinez-Bastida, J.J., Arauzp, M. and Valladolid, M. (2010), "Intrinsic and specific vulnerability of groundwater in central Spain: The risk of nitrate pollution", *Hydrogeology Journal*, Vol. 18, pp. 681-698.
- [10] R.Rajesh, L.Elango, K.Brindha; Method for assessing the ground water quality; department génie civil, université Berlin Germany.
- [11] ROBERT, M., 1998. The degradation of irrigated soils and water resources: a threat to the future of agriculture and to the environment of the southern Mediterranean

## Références bibliographiques

---

countries. *Etude et Gestion des Sols*, 5, 4 : 217-226.

[12] Rouabhia A, E K,Djabri L. Irrigation and the risk of saline pollution(2010), "Example of groundwater of the miocene aquifer of the plain of EL MA EL ABIOD",*Larhyss Journal*.

[13] SUMNER, M.E., 1993. Sodic soils- new perspectives. *Australian Journal of Soil Research*, 31: 683-750.

[14] Tinivella, F., Medini, L., Zaharaki, D. and Komnitas, K. (2015), "Assessment of groundwater contamination risk in an agricultural area in north Italy", *Information processing in agriculture*, Vol. 2 No. 2, pp. 109- 129.

[15] TINTRAMBLAYY, CAPRA H, SAINT-HILAIRE A, (2008). Modélisation géostatistique de l'eau du Rhone, INRS-ETE, Rapport de recherche R-1015,34pages et 3 annexes, ISBN 978-2-89146583-0.

[16] Voudouris, S.K. (2015), "Groundwater vulnerability and pollution risk assessment of porous aquifers to nitrate: Modifying the DRASTIC method using quantitative parameters", *Journal of Hydrology*, Vol. 525, pp. 13-25.

[17] ZAIR Nadjat, CHAB Salah, OUAKOUC Abdelkader; *Determination of Ground water quality in Oum El-Bouaghi Region, Using the Ground water quality index (GWQI)*; Rapport.

[18] ZAIR Nadjat, MILLOUDI Abdelmonem, ATTAOUI Badra, KHECHKOUCHE Abdelrahmane; Evaluation of water quality and contamination of the Zemna vally Sub-bassin in Skikda (Northe eastern of Algeria). Page 239,241.

[19] Zair, N., Chaab, S. and Bertrand, C. "Aquifer vulnerability to pollution of Oum El-Bouaghi region in North East of Algeria", *Management of Environmental Quality*, 28 (3), (2017), 384-399.

# **ANNEXES**

# ANNEXES

## Annexe 01: Détermination l'indicateurs géologiques et l'indicateur de pollution établir a partir d'un tableur Excel permettent d'extraire les bonnes d'aquakit.

Localisation: Forage 1

Température: 20.0      Débit: 100      m<sup>3</sup>/s      conductivité: 2330      μS/cm

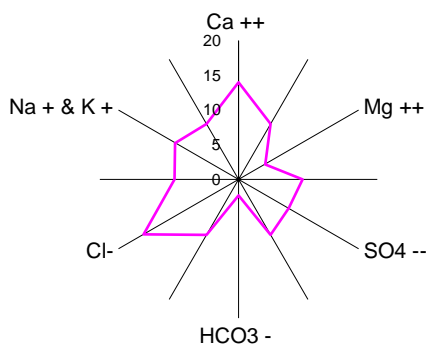
### Composition chimique globale

	mg/l	meq/l
Ca <sup>++</sup>	280.6	14.000
Mg <sup>++</sup>	53.5	4.400
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.000	0.000
K <sup>+</sup>	38.0	0.972
Na <sup>+</sup>	220.0	9.569
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	140.3	2.300
Cl <sup>-</sup>	560.2	15.801
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	400.2	8.334
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1.0	0.016
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0.110	0.002
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.000	0.000

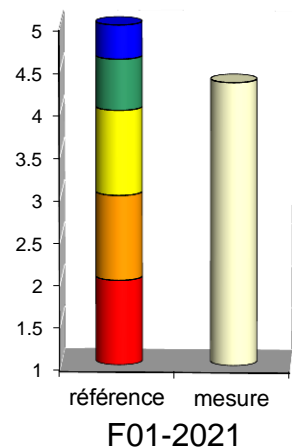
### Indicateurs de pollution

		Classe	Pollution
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (μg N /l)	0	5	Nulle
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (μg N /l)	33	3	Modéré
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (μg P /l)	0	5	Nulle
DBO <sub>5</sub> (mg O <sub>2</sub> /l)	1.6	5	Nulle
<b>IPO:</b>	avec DBO5 :	4.50	Faible
	sans DBO5:	4.33	Faible

### Indicateurs géologiques



### IPO sans DBO5 (F01)



## ANNEXES

Annexe 02 : L'analyse de 20 forages dans deux campagnes 2018, 2021 dans commune Kouinine et EL-Oued.

**Pour année 2021**

Forage	Lieu de Prélèvement	PH	Cond Us/cm	CA+2 mg/l	MG+2 mg/l	Na + mg/l	K+ mg/l	NH4+ mg/l	CL- mg/l	So4- mg/l	HCo3- mg/l	NO-2 mg/l	NO-3 h	Po4- mg/l
F01	E-B Forage Chouhada Albien C/ Chouhada	7.74	2330	280.560	53.471	220	38	0.115	560.157	400.200	140.30	0.000	0.983	0.179
F02	E-B Forage 400 Logt C/ 400 Logts	7.39	3780	280.560	145.830	260	36	0.104	421.890	394.200	109.80	0.000	1.53	0.505
F03	E-R forage Sidi Messtour C/Sidi Messtour	7.46	3870	288.576	72.915	264	29	0.000	772.875	635.49	115.90	0.002	21.480	0.484
F04	E-R forage Bouhmid 02 C/Bouhmid 02	7.36	3750	240.480	116.664	310	31	0.000	574.338	586.5	109.8	0.000	19.080	0.481
F05	E-B forage Bouhmid 01 C/Bouhmid 01	7.46	3790	220.44	128.816	333	31	0.000	588.519	684.26	119.56	0.000	24.528	0.32

## ANNEXES

F06	E-B Forage /Nadour C/Nadour	7.38	3800	312.62	72.910	317	29	0.025	815.419	523.5	115.9	0.000	17.520	0.299
F07	E-B Forage 19 Mars C/ 19 Mars	7.37	3890	332.664	114.233	411	27	1.104	985.593	510	122	0.000	16.392	0.000
F08	E-R Château 19 Mars C/19 Mars	8.08	646	48.10	14.583	148	12	0.025	120.540	128.63	24.40	0.000	3.69	0.000
F09	E-B forage Nassim C/ Nassim	7.49	3860	320.64	85.067	297	30	0.000	914.687	680.5	103.7	0.000	14.44	0.550
F10	E-B Forage Route TouggourteAlbien C/Route Touggourte	7.27	2650	220.440	121.52	240	38	0.126	517.613	452.5	109.8	0.015	0.126	0.470
F11	E-R Forage Universitaire universite C/ Chott	7.48	3730	240.48	174.996	350	30	0.000	914.687	543.658	170.8	0.000	16.914	0.196
F12	E-B Forage jardin	7.42	3860	320.64	109.372	330	30	0.000	1340.12	581.3	140.3	9.63	0.153	0.000

## ANNEXES

	C/ Chott													
F13	E-B Forage 08 mai01 C/ 08 mai	7.39	3860	300.6	80.206	340	30	0.000	985.593	605.5	134.2	0.000	26.403	0.230
F14	E-B Forage Pole Universitaire C/Pole Universitaire	7.37	4100	300.6	128.816	355	29	0.00	670.000	966.1	146.4	0.00	9.090	0.221
F15	E-B Forage Mih Bahi C/Athamine	7.26	3680	268.536	131.247	352	31	0.000	985.593	542.54	106.14	0.000	9.300	0.361
F16	E-R château Guirir commune Kuinine	7.56	4230	589.176	250.341	550	29	0.01	716.15	985.096	130.060	0.000	11.920	#####
F17	E-B Forage Centre commune Kuinine	7.43	3680	268.536	140.969	350	29	0.000	659.425	691.84	119.560	0.00	15.160	0.412
F18	E-R Château 01 Novembre	7.56	3650	240.480	133.677	390	27	0.000	521.159	87.84	675.46	0.000	30.555	0.64

## ANNEXES

	C/Kuinine													
F19	E-R Forage BARK commune Kuinine	7.37	3650	308.616	99.650	400	29	0.000	801.237	716.485	126.880	0.000	20.256	0.302
F20	E-R Forage Zone Industrielle commune Kuinine	7.57	4890	541.080	230.897	540	29	0.016	716.15	1004.386	141.520	0.000	32.740	####

(ADE)

### Pour Année 2018

Forage	Lieu de Prélèvement	PH	Cond Us/cm	CA+2 mg/l	MG+2 mg/l	Na + mg/l	K+ mg/l	NH4+ mg/l	CL- mg/l	So4- mg/l	HCo3- mg/l	NO-2 mg/l	NO-3 mg/l	Po4- mg/l
F01	E-B Forage Chouhada Albien C/ Chouhada	7.3	2640	184.386	106.942	220	19	0.188	350.984	734.400	179.340	0.017	1.732	0.042
F02	E-B Forage 400 Logt C/ 400 Logts	7	3390	300.6	114.233	390	34	0	514.068	1048.800	191.54	0.006	23.88	0.077
	E-B Forage													



## ANNEXES

F03	Sidi Messtour C/Sidi Messtour	7.3	3730	220.440	119.094	330	27	0.026	787.056	510.211	183	0.024	13.29	0.092
F04	E-B forage Bouhmid 02 C/Bouhmid 02	7.2	3920	228.456	126.386	370	30	0.015	900.506	639.054	170.8	0.034	33.60	0.046
F05	E-B forage Bouhmid 01 C/Bouhmid 01	7.23	3660	228.456	116.664	375	30	0.019	843.780	539.114	189.1	0.017	20.24	0.156
F06	E-B Forage Nadour C/Nadour	7.3	3810	224.448	160.413	375	30	0.035	897.962	813.938	165.920	0.010	21.34	0.435
F07	E-B Forage 19 Mars C/ 19 Mars	7.2	3560	240.480	87.498	365	32	0.000	528.249	862.080	191.50	0.018	46.06	0.185
F08	E-R Forage 19 Mars Albien C/ 19 Mars	7	2330	232.464	102.081	180	15	0.149	700.499	407.107	203.74	0.019	1.556	0.096
F09	E-B forage Nassim C/ Nassim	7.3	3640	244.488	58.332	375	28	0.063	414.8	955.200	156.16	0.025	26.72	0.213
F10	E-B forage Albien Rt touggourt	7.10	2480	220.44	104.511	215	15	0.213	420.360	713.225	158.6	0	1.672	0.068

## ANNEXES

	C/ Route touggourt													
F11	E-B Forage Universitaire universite C/ Chott	7.3	3570	264.528	167.704	375	30	0	744.513	988.800	167.14	0	26.82	0.021
F12	E-B Forage jardin C/ Chott	7.2	3510	224.448	174.996	400	38	0	857.962	811.200	143.96	0	10.68	0.053
F13	E-B Forage 08 Mai C/08 Mai	7.30	3510	316.632	121.525	340	32	0	772.878	816.000	165.92	0	23.16	0.073
F14	E-B forage pole universitair C/ Cott université	7.23	3710	272.544	155.552	375	33	0	943.049	691.200	156.16	0	23.97	0.099
F15	E-B Forage Mih Bahi C/Athamine	7.3	4300	248.496	157.982	390	31	0.041	914.687	691.200	189.10	0.011	28.320	2.845
F16	E-R château Guirir commune Kouinine	7.42	4150	284.568	126.386	400	37	0.00	928.87	616.593	213.580	0.019	34.790	0.562
F17	E-B Forage Centre commune Kouinine	7.32	3880	316.632	80.206	405	32	0.041	1028.2	462.615	213.500	0.013	18.255	0.658
F18	E-R Château 01 Novembre	7.43	3430	276.552	116.664	410	38	0.137	999.774	510.592	202.52	0	21.11	0.015

## ANNEXES

F19	C/Kouinine E-R Forage BARK commune Kuinine	7.3	3850	280.560	126.386	385	38	0.000	886.33	673.580	189.100	0.000	27.180	0.258
F20	E-R Forage Zone Industrielle commune Kuinine	7.44	4660	288.576	97.220	420	37	0.068	957.23	538..55	200.080	0.029	18.255	0.011

(ADE)