

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université Echahid Hamma Lakhdar-El-Oued



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MEMOIRE

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Master en

Hydraulique Option : Ouvrages hydrauliques

THEME:

***Contribution à la régionalisation stochastique des
paramètres physico-chimiques des eaux souterraines
(application à la daïra de Guémar Wilaya d' EL-oued)***

Sous la direction de:

-Dr. Mme: ZAIR Nadjet .

Présenté par :

- GOUBA Aicha
- GHOULIA Nadjet
- BERROUKECH Fatma

Promotion: 2022

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, merci Notre bon Dieu qui nous a donné la santé et la force.

Nous voudrions remercier de notre promoteur le Docteur : ZAIR Nadjat , pour avoir proposé ce thème et d'avoir suivi et dirigé ce travail. Et tous les enseignants du département de génie Civil et l'Hydraulique notamment : Dr GHOMRI Ali et Dr MILOUDI Abdelmonem ,

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail : Dr KHELIEL Ossama , Ms HANANOU Ahmed, Ms GHERAB Othman pour leurs aides et soutiens, Merci encore 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. 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.

Les données sélectionnées pour cette étude ont été extraites de l'ensemble des résultats d'analyse effectuées en 2021 sur l'eau de la nappe du complexe terminale. Les échantillons prélevés sur 22 points du réseau implantés dans les communes de Guemar, Taghzout et Ourmas pour la surveillance de la qualité chimique des eaux souterraines.

Les variables retenues pour l'étude sont: Na^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , K^+ , SO_4^{-3} , Cl^- , HCO_3^- .

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 déterminer l'organisation spatiale des paramètres hydrochimiques des eaux souterraine de la région d'étude et l'intensité des liaisons qui peuvent s'établir entre elle, ces aspects structuraux peuvent être abordés par le biais du krigeage et notamment par l'examen des variogrammes des variables elle-même.

Les traits structuraux marquent que l'on peut dégager de l'examen des variogrammes des variables étudié est relatifs à des points observés .

Des points qui présentent une similitude de comportement relativement aux variables mesurées et qui sont spatialement proches fournissent des informations qui se recourent sans doute, La superpositions de la majorité des cartes soit krigées soit observées entre eux ne diminuerait guère le contenu informatif du réseau .

Mots clés: hydrochimie, krigeage, variogramme, eaux souterraines, El-oued

ملخص

تتمتع منطقة الواد حاليًا بموارد مائية محدودة جدًا نسبيًا ، والتي يتم تمثيلها فقط بالمياه الجوفية من طبقات المياه الجوفية. بعد تحليل الوضع الحالي لطبقة المياه الجوفية وبيئتها ، تم تصميم برنامج عمل لرصد الاختلافات ، اعتمادًا على العوامل الصخرية والمناخية.

تم استخراج البيانات المختارة لهذه الدراسة من جميع نتائج التحليل التي أجريت في عام 2021 على المياه الجوفية لمجمع المحطة. عينات مأخوذة من 22 نقطة من الشبكة الواقعة في بلديات قمار وتغزوت وأورماس لمراقبة الجودة الكيميائية للمياه الجوفية. المتغيرات التي تم الاحتفاظ بها للدراسة هي: Na^+ ، Ca^{+2} ، Mg^{+2} ، K^+ ، SO_4^{-3} ، Cl^- ، HCO_3^- .

تمت معالجة البيانات وتمثيلها باستخدام أدوات حديثة: التحليل الإحصائي ورسم الخرائط والرسومات الآلية ، بالإضافة إلى الإحصاء الجغرافي. تهدف هذه الدراسة إلى تحديد التنظيم المكاني للمعلمات الهيدروكيميائية للمياه الجوفية في منطقة الدراسة وشدة الروابط التي يمكن إنشاؤها بينها ، ويمكن التعامل مع هذه الجوانب الهيكلية من خلال "الكريجية وعلى وجه الخصوص من خلال فحص المتغيرات من المتغيرات نفسها.

السمات الهيكلية التي يمكن للمرء أن يستخلصها من فحص المتغيرات للمتغيرات المراد دراستها تتعلق بالنقاط الملحوظة.

توفر النقاط التي لها سلوك مشابه بالنسبة للمتغيرات المقاسة والتي تكون قريبة من الناحية المكانية معلومات تتداخل بلا شك ، ولن يؤدي تراكم غالبية الخرائط إما "الكريجية أو الملحوظة بينهما إلى تقليل المحتوى الإعلامي للشبكة.

LISTE DES ABREVIATIONS

ABHS: Agence de Bassin Hydrographique Sahara

ADE: Algérienne Des Eaux

APC : Assemblai populaire communale

AEA : Alimentation en Eau d'Agriculture.

AEP : Alimentation en Eau Potable.

ANRH: Agence Nationale des Ressources Hydriques

CI: Continental Intercalaire

CT: Complexe Terminal

DSA : Direction des Services Agricoles.

DRE : Direction des Ressources en Eau

GIRE : Gestion Intégrée de la Ressource en Eau.

OMS : Organisation Mondiale de la Santé.

ONM : Office National Météorologique

Sommaire

I.1.INTRODUCION	2
I.2.PRESENTATION DE LA ZONE	2
I.2.1. Situation géographique	2
I.2.2.Topographie de la région	4
I.2.3.Situation climatologique	4
I.2.3.1.Pluviométrie	5
I.2.3.2.Température	5
I.3.GEOLOGIE REGIONALE	6
I.3.1.ITHOSTRATIGRAPHIE	7
I.3.1.1.Les formations du Secondaire	7
I.3.1.1.1. Trias.....	7
I.3.1.1.2. Jurassique	7
A.Jurassique inférieur (Lias)	7
B.Jurassique moyen (Dogger)	8
C.Jurassique supérieur (Malm).....	8
I.3.1.1.3. Crétacé	8
I.3.1.1.4. Néocomien	8
I.3.1.1.5. Barrémien	8
I.3.1.1.6. L'Aptien	8
I.3.1.1.7. L'Albien.....	8
I.3.1.1.8. Vraconien	9
I.3.1.1.9. Cénomanién	9
I.3.1.1.10. Turonien.....	9
I.3.1.1.11. Sénonien	9
I.3.1.2.Les formations de Tertiaire	9
I.3.1.2. 1.Miopllocène	9
A.Niveaux argileux	10
B.Niveaux grésos sableux.....	10
C.Niveaux argileux	10
D.Niveau sableux.....	10
I.3.1.3.Formations du Quaternaire	10

I.4.Hydrogéologie	11
I.4.1. Nappes aquifères de la région d'étude.....	12
I.4.1. 1. Nappe phréatique	12
I.4.1. 2. Nappe du Complexe Terminal (CT)	13
I.4.1. 2. 1. Nappes des sables	13
I.4.1. 2. 2. Nappes de calcaires	14
I.4.1. 3. Nappe du Continental Intercalaire (CI)	14
I.5.CONCLUSION	15
II.1.Introduction	17
II.2.Piézométrie.....	17
II.2.1.Inventaire des points d'eau	17
II.2.2.Evolution de la piézométrie	20
II.3.Détermination des paramètres hydrodynamiques.....	23
II.4.Conclusion.....	26
III.1.Introduction	27
III.2.Description sommaires des paramètres physico chimiques.....	27
III.2.1.Paramètres physiques	28
III.2.1.1.Potentiel d'hydrogène (pH)	28
III.2.1.2.La conductivité électrique (CE)	28
III.2.1.3.La température (T° C)	29
III.2.2.Les éléments chimiques majeurs	29
III.2.2.1.Le calcium (Ca²⁺)	29
III.2.2.2.Le magnésium (Mg²⁺)	29
III.2.2.3.Le sodium (Na⁺).....	29
III.2.2.4.Le potassium (K⁺).....	29
III.2.2.5.Les chlorures (Cl⁻).....	29
III.2.2.6.Les sulfates (SO₄²⁻)	30
III.2.2.7.Les bicarbonates (HCO₃⁻).....	30
III.3.Détermination des principaux faciès hydrochimiques	30
III.3.1.Représentation graphique des faciès hydrochimiques	30
III.3.1.1. Diagramme de PIPER	31
III.3.1.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF	32
III.4. Cartographie hydro-chimique.....	33
III.5. Etude de l'origine du chimisme des eaux souterraines	44

III.5.1. Facies caractéristiques	44
III.5.2. Origine des éléments chimiques.....	45
III.5.2.1. Les éléments Ca^{+2} , SO_4^{-2} et HCO_3^-	45
III.5.2.2. Les éléments Na^+ , Cl^-	47
III.5.2.3. Les éléments HCO_3^- , SO_4^{-2} , Cl^-	48
III.5.2.4. Les éléments SO_4^{-2} , Cl^-	49
III.6. Aptitude des eaux à l'irrigation.....	49
III.6. 1.Classification des eaux par la méthode de Richards.....	50
III.6. 2.Classification des eaux par la méthode de Wilcox	51
III.7. Conclusion	52
IV.1.INTRODUCION	59
IV.2. Krigeage :.....	60
IV .2.1Krigeage simple	61
IV .2.2.Krigeage ordinaire :	62
IV .2.3.Krigeage universel ou à tendance externe.....	63
IV .3.Krigeage par point et krigeage par bloc :	64
IV .4.Résultats et interprétation :	65
IV .4.1.Interpolation des teneurs en sodium Na en mg/l :.....	65
IV .4.2.Interpolation des teneurs en calcium Ca en mg/l :	68
IV .4.3.Interpolation des teneurs en magnésium Mg en mg/l :.....	71
IV .4.4.Interpolation des teneurs en potassium K en mg/l :.....	74
IV .4.5.Interpolation des teneurs en chlore Cl en mg/l :	77
IV .4.6.Interpolation des teneurs en chlore SO4 en mg/l :	80
IV .4.7.Interpolation des teneurs en chlore HCO3 en mg/l :	83
IV .5.Comparaison entre les deux cartes (krigées et réelle) pour toute les paramètres chimiques :	86
Conclusion Générale	87
Bibliographies	

Liste des figures

Figure N°01: Situation géographique de la zone d'étude	3
Figure N°02: Carte topographique de la vallée du Souf Source : DRE d'El-Oued, 2016.....	4
Figure N°03: Répartition mensuelle de la température (1976-2018)	6
Figure N°04: Carte géologique de la zone d'étude (extrait d'après la carte du Sahara Septentrional G. Busson 1970).....	11
Figure N°05: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO, 1972)	12
Figure N°06 : Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar.....	18
Figure N°07: Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar.....	19
Figure N°08/A: Carte du niveau statique de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021).....	21
Figure N°08/B: Carte piézométrique de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021)	22
Figure N°09: Diagramme de Piper des eaux souterraines d'eau de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	24
Figure N°10: Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	31
Figure N°11: Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	32
Figure N°12: Carte de chlorure des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.	34
Figure N°13: Carte de bicarbonate des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	35
Figure N°14: Carte des sulfates des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	37
Figure N°15: Carte de calcium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	38
Figure N°16: Carte de sodium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	36
Figure N°17: Carte de potassium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	40
Figure N°18: Carte de PH des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	41
Figure N°19: Carte de CE des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar de l'année 2021	42
Figure N°20: Carte de magnésium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar de l'année 2021	43

Figure N°21 (A, B): Evolution et distribution des faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	45
Figure N°22 (A, B): Détermination l'origine de calcium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	46
Figure 23 (A, B): Détermination l'origine de sodium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	47
Figure N° 24 (A, B): Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique des eaux souterraines de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	48
Figure N°25: Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique des eaux de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021	49
Figure N°26: Diagramme de Richards des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar pour l'année 2021	50
Figure N°27: Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar pour l'année 2021	51
Figure N°28: Principe de l'interpolation.....	60
Figure N°29: Les paramètres du variogramme	61
Figure N°30: Krigeage simple et tendance et résidus correspondants	62
Figure N°31: Krigeage ordinaire et tendance et résidus correspondants	63
Figure N°32: Krigeage par régression et tendance et résidus correspondants	64
Figure N°33: Variogramme moyen des teneurs en Na (mg/l) 2021.....	67
Figure N°34: Carte interpolée par krigeage des teneurs en Na (mg/l).....	68
Figure N°35: Variogramme moyen des teneurs en Ca (mg/l) 2021	70
Figure N°36: Carte interpolée par krigeage des teneurs en Ca (mg/l).....	70
Figure N°37: Variogramme des teneurs en Mg (mg/l)	72
Figure N°38: Carte interpolée par krigeage des teneurs en Mg (mg/l).....	73
Figure N°39: Variogramme des teneurs en K (mg/l)	75
Figure N°40: Carte interpolée par krigeage des teneurs en K (mg/l)	76
Figure N°41: Variogramme des teneurs en Cl (mg/l)	78
Figure N°42: Carte interpolée par krigeage des teneurs en Cl (mg/l)	79
Figure N°43: Variogramme des teneurs en SO ₄ (mg/l)	81
Figure N°44: Carte interpolée par krigeage des teneurs en SO ₄ (mg/l)	82
Figure N°45: Variogramme des teneurs en HCO ₃ (mg/l).....	84
Figure N°46: Carte interpolée par krigeage des teneurs en HCO ₃ (mg/l).....	85

Liste des tableaux

Tableau N°01: Répartition mensuelle de la pluviométrie (1976-2018)	5
Tableau N°02: Répartition mensuelle de la température (1976-2018)	6
Tableau N°03: Inventaire des points d'eau de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar.	17
Tableau N°04: Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar (2021).....	23
Tableau N°05: Variation des paramètres physico-chimiques des points d'eau de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar (2021).....	28
Tableau N°06: Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar (2021).....	30
Tableau N°07: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Na en 2021	65
Tableau N°08: Paramètres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en sodium.....	68
Tableau N°09: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Ca (mg/l) en 2021	69
Tableau N°10: Paramètres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en calcium.....	71
Tableau N°11: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Mg (mg/l) en 2021	71
Tableau N°12: Paramètres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en magnésium.....	74
Tableau N°13: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de K (mg/l) en 2021	75
Tableau N°14: Paramètres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en potassium.....	76
Tableau N°15: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Cl (mg/l) en 2021	77
Tableau N°16: Paramètres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en Chlore	79
Tableau N°17: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de SO ₄ (mg/l) en 2021.....	80
Tableau N°18: Caractéristique statistique des valeurs mesurées de HCO ₃ (mg/l) en 2021	83

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Les méthodes géostatistiques se sont développées dans différentes directions qui leur sont propres, et qui n'ont eu plus que de lointains rapports avec la statistique usuelle. Si, en toute généralité, la géostatistique a été définie comme étant l'étude des variables numériques réparties dans l'espace, il serait clair alors que des problèmes essentiellement géostatistiques ont été abordés depuis fort longtemps, et ce dans différents domaines, qu'ils soient, minier, météorologique ou forestier, etc.

Ce sont d'une part, les problèmes techniques parfois forts terrent à terre, et d'autre part l'arsenal de méthodes mathématiques, qui permettent l'application de la géostatistique.

Un travail précédent utilisant une approche géostatistique a été réalisé sur la vally d'El-oued. L'étude avait porté sur la variographie, notamment sur le traitement de données dans le but de décrire le comportement hydrochimique prise comme variable.

Nous nous proposons, en exploitant la même base de données (données des paramètres hydrochimiques qu'ont utilisé de modéliser les variogrammes avec plus de précision. Ensuite, de faire une validation croisée à partir des variogrammes dans le but d'estimer les données pour qu'ils soient représentés dans des cartes de valeurs hydrochimiques krigées.

Notre étude est scindée en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'étude des contextes géographique et géologique de la région d'étude en présentant les caractéristiques géologiques, et hydroclimatologique.
- Le deuxième chapitre de l'hydrogéologique de la nappe du CT des communes de Guemar, Taghzout et Ourmas en définissant les paramètres hydrodynamiques et interprétant sa piézométrie.
- Le troisième chapitre 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,
- Enfin, dans le quatrième et dernier chapitre, nous nous proposons d'exposer nos résultats et leur interprétation accompagnés des valeurs des paramètres employés à l'élaboration.



CHAPITRE I

REPRESENTATION DE LA REGION

I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on va donner un aperçu historique sur la région d'étude, puis on donne quelques informations sur ses différents composants climatiques.

La géologie est un moyen d'investigation très utile en hydrogéologie car elle permet de la détermination des horizons susceptibles être aquifères.

La région d'étude est exactement dans la partie Nord de la plateforme saharienne caractérisée par des formations détritiques particulièrement sableuses, elles apparaissent sous forme de dunes et anti dunes. Car le sous-sol de la région étant sableux et assurant l'infiltration et la circulation souterraines des eaux, est essentiellement représenté par des formations sablo- gréseuses du Continental Intercalaire, et des accumulations sableuses Fulvio- lacustres de tertiaire continental. Sur l'ensemble de la région d'El-Oued, les formations Mio-pliocènes sont recouvertes par une considérable épaisseur de dépôts Quaternaires présentés sous forme de dunes donnant naissance à un immense Erg qui lui-même fait partie de l'extension du grand Erg oriental.

I.2. PRESENTATION DE LA ZONE

I.2.1. Situation géographiques:

El oued est située dans le Sahara algérien, c'est une Wilaya depuis 1984 et couvre une superficie totale de 37751.20 km², la population est de 660175 habitants (DPSB2021), se trouve à environ 700 km au Sud- Est d'Alger (Figure I.1) et 350 km à l'Ouest de Gabes (Tunisie). Elle est limitée:

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

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

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

CHAPITRE I. REPRESENTATION DE LA REGION

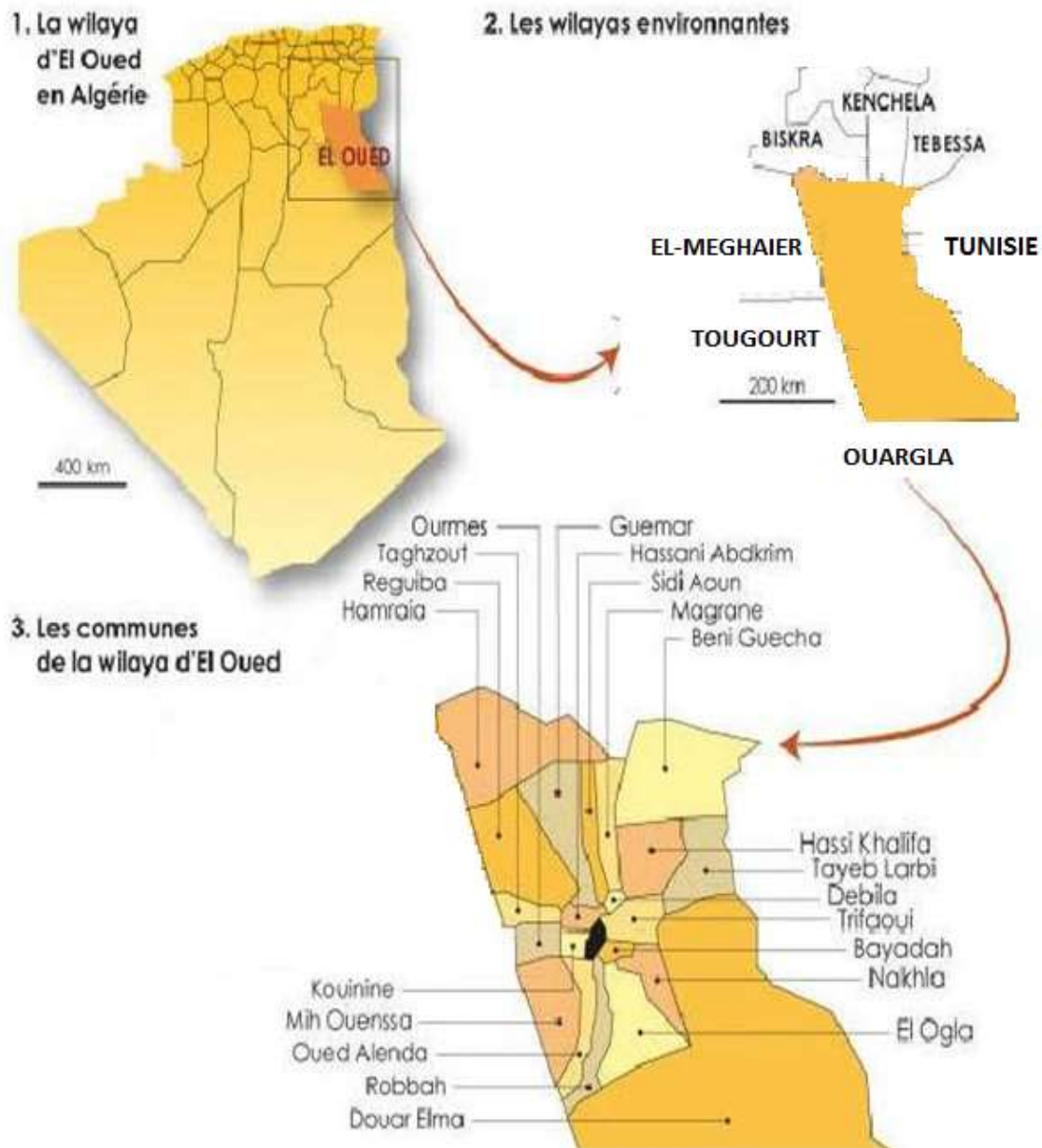


Figure N°01 : Situation géographique de la zone d'étude

La zone d'étude situ de nord de la vallée d'oued Souf Daira de Guemar. Elle occupe une superficie 1846 Km² englobent une population de 88195 habitant (DPSB2021).

I.2.2. Topographie de la région :

La région de Oued Souf appelée aussi région du Bas-Sahara caractérisée par une faible altitude au Sud-est du pays. Le point le plus haut se trouve à la cote 125m dans la ville Bayada (Essoualah), alors que le point le plus bas se trouve à la cote -26m à commune de Hamraia (ANRH 2020).

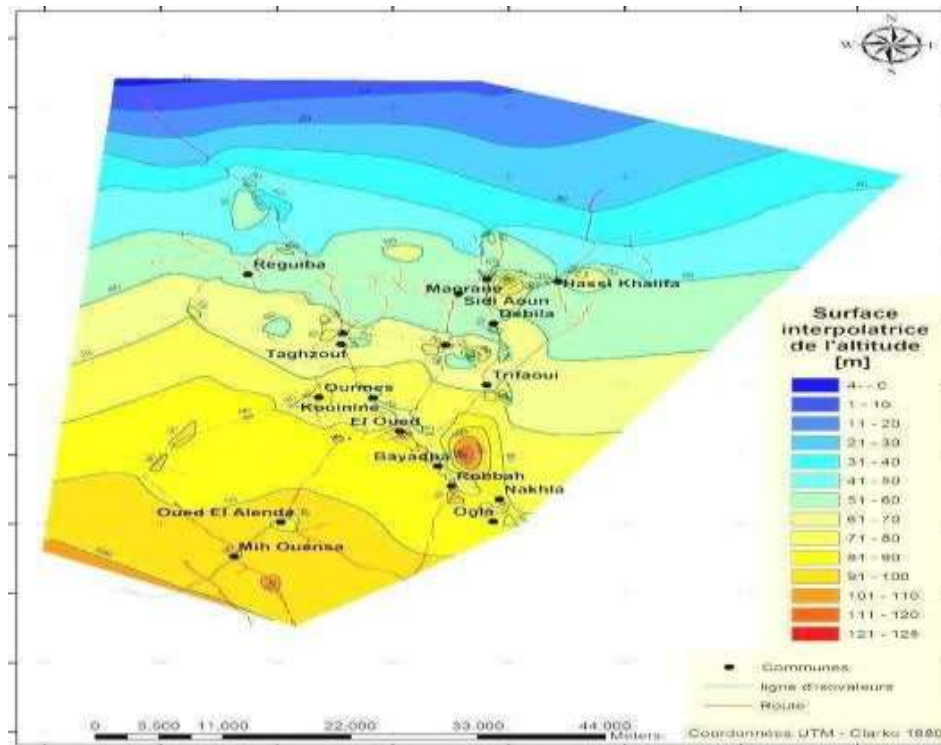


Figure N°02: Carte topographique de la vallée du Souf Source : DRE d'El-Oued, 2016

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

I.2.3. Situation climatologique

Le climat est de type saharien, caractérisé par un été chaud et sec, un hiver plutôt doux, une faible pluviométrie et une forte évaporation.

La caractérisation du climat de la zone d'étude a été établie sur la base des données climatiques disponibles de la station météorologique O.N.M. d'EL OUED pour la période allant de 1976 à 2018.

I.2.3.1. Pluviométrie :

L'étude pluviométrique présente un intérêt considérable dans l'hydro climatologie qui sert à obtenir une description des régimes pluviométriques d'une part et d'autre part son rôle sur l'écoulement.

Tableau N° 1 : Répartition mensuelle de la pluviométrie (1976-2018)

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Total
p (mm)	5.37	7.18	9.06	6.24	14.66	6.92	8.05	6.67	4.78	1.45	0.48	1.98	72.84

Source: (ONM 2019)

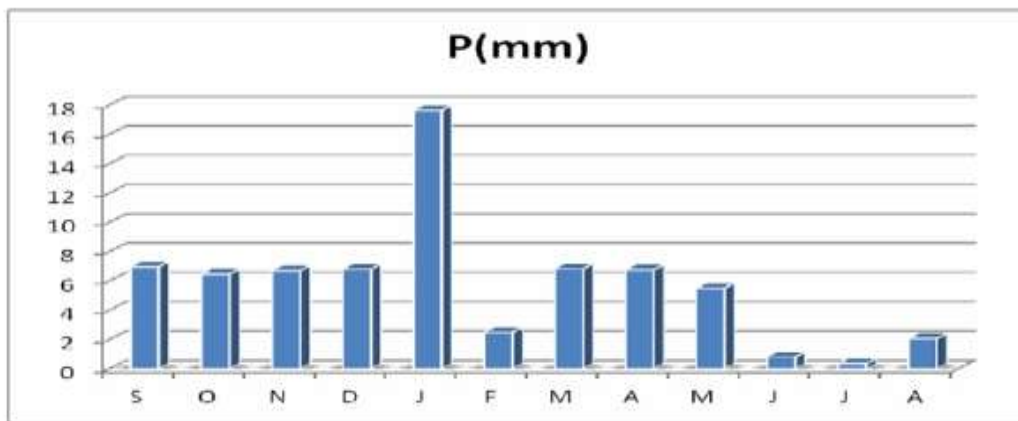


Figure N°03: Répartition mensuelle de la pluviométrie (1976-2018)

La moyenne annuelle des précipitations enregistrées au cours des 42 années est faible, elle est estimée 72.84 mm, avec un maximum des jours de pluies au mois des janvier 14.66 mm et un minimum de 0.48 mm jours de pluies au mois de juillet.

Sa répartition à travers les mois et les saisons se fait d'une manière irrégulière, la période la plus pluvieuse est la période à partir du mois de septembre au mois de mars.

I.2.3.2. Température :

La température est un paramètre important dont il faut tenir compte pour la caractérisation d'une région donnée. Le tableau suivant représente la répartition moyenne mensuelle de la température.

CHAPITRE I. REPRESENTATION DE LA REGION

Tableau N°02 : Répartition mensuelle de la température (1976-2018).

mois	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	Moy
Tmoy	30.29	24.19	17.5	12.43	11.77	14.3	18.51	22.2	27.61	32.24	35.03	29.47	22.96

Source: (ONM 2019)

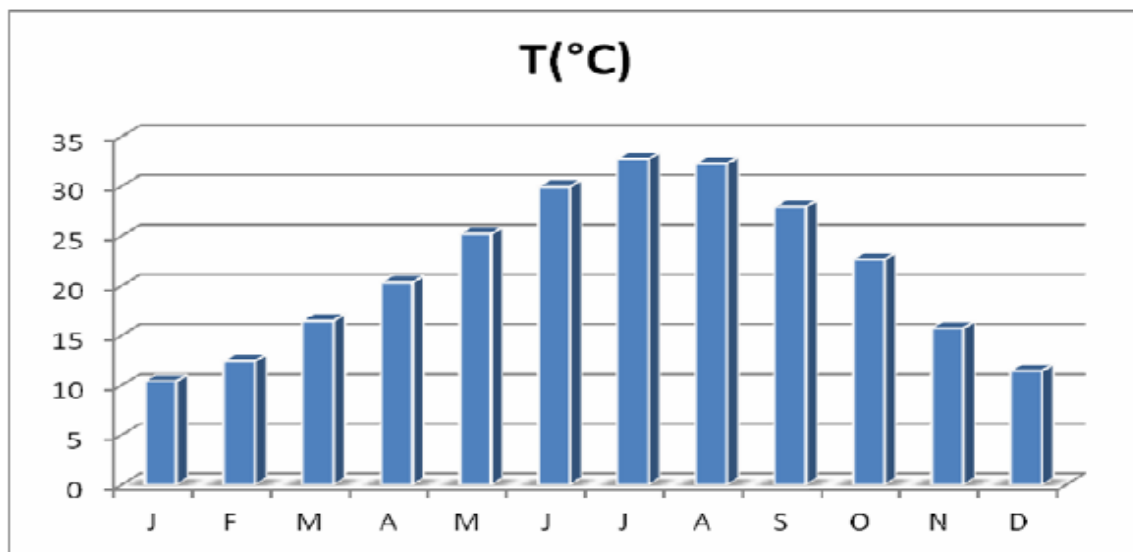


Figure N°03: Répartition mensuelle de la température (1976-2018)

La température moyenne annuelle dans la zone du projet est de **22.96°C**. La température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois de juillet avec **35,03°C** et la plus basse est observée au mois de janvier (**11.77°C**).

Les températures maximales sont d'une façon générale élevées tous les mois de l'année sauf en hiver, ce qui indique un climat chaud.

Les températures minimales sont supérieures à 0°, ce qui indique que les basses températures ne constituent pas une contrainte pour les cultures.

I.3.GEOLOGIE REGIONALE

Le Sahara a subit au cours des temps géologiques plusieurs périodes de stabilité et d'instabilité qui ont conduit à la structure actuelle.

Les principaux traits de la structure géologique et la reconstitution paléogéographique du Sahara sont:

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

Ce régime continental dure jusqu'au milieu de la période crétacé: soit entre 175 et 100 million d'années.

Le développement des grès a été particulièrement abondant de l'Hauterivien à l'Albien et à ce dernier étage surtout.

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

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

I.3.1. ITHOSTRATIGRAPHIE

I.3.1.1. Les formations du Secondaire

I.3.1.1.1. Trias

Les formations triasiques reposent transgressivement sur la surface érodée des roches sédimentaires et effusives de la série inférieure. Il est constitué d'argile rouge avec abondants amas de gypse et de chlorure de sodium, le tout intercalé de coulées basaltique. On trouve également des grés fin, argileux, à rares passées de calcaires dolomitique. Cette formation curieuse n'a pu s'élaborer que sous un climat spécial, probablement subdésertique.

I.3.1.1.2. Jurassique

Il est représenté par des sédiments lagunaires, marins et continentaux et fait partie de la formation du Continental Intercalaire.

A. Jurassique inférieur (Lias)

Constitué essentiellement d'anhydrites à passées d'argile, calcaires et de sel blanc rose, on peut trouver également des calcaires oolithiques et des marnes.

B. Jurassique moyen (Dogger)

Représenté essentiellement d'anhydrites et par une alternance de calcaire, de grés souvent glauconieux et d'argiles bariolées.

C. Jurassique supérieur (Malm)

C'est une série argilo-gréseuse à passées de calcaire, d'anhydrites et dolomies, la présence de glauconie est bien caractéristique.

I.3.1.1.3. Crétacé

Comme on l'a déjà remarqué dans l'étude de la géologie régionale, le Crétacé (jusqu'au Cénomaniens) est représenté dans la majeure partie du Sahara algérien par des faciès continentaux du Continental intercalaire.

I.3.1.1.4. Néocomien

Il est représenté par des sédiments continentaux bariolées grés-argileux avec quelques passées d'anhydrite.

I.3.1.1.5. Barrémien

Cet étage est généralement percé par tous les forages de Continental Intercalaire réalisés dans le bas de Sahara. Il présente une alternance de grés avec passage d'argiles et parfois des intercalations de calcaire dolomitique, on a également des sables avec présence de silex. D'après les forages d'El-oued l'épaisseur moyenne est variable (entre 200 et 240 mètres).

I.3.1.1.6. L'Aptien

Il est principalement constitué de formations dolomitiques, marneuses et marnocalcaires. D'après les coupes géologiques des forages de la région, cet étage est le seul dont l'épaisseur ne dépasse pas les 30 mètres.

I.3.1.1.7. L'Albien

Il formé d'une alternance de marnes, de grés, de sables et surtout par des ~~clais~~ avec passages de silex et d'argiles. Sa 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.

A l'Est de la région d'étude l'épaisseur de cet étage varie de 100 à 150 m, par endroits elle peut atteindre 200 mètres.

I.3.1.1.8. Vraconien

Il constitue une zone de transition entre l'Albien greso-sableux et le Cénomaniens argilo-carbonaté. Cet étage est constitué principalement d'une alternance irrégulière de niveaux argilo-dolomitiques.

On trouve aussi des argiles sableuses et de rares passées de grés à ciment calcaire. Les niveaux argileux que contient cet étage présentent une importance, car ils constituent la couverture de l'Albien. L'épaisseur varie entre 250 et 300 mètres.

I.3.1.1.9. Cénomaniens

Constitué par une alternance de dolomies, de calcaire dolomitique, de marnes dolomitiques, d'argiles et d'anhydrites.

Ces formations donnent à cet étage le caractère d'un écran imperméable. La limite inférieure est caractérisée par les évaporites, les dolomies, qui la distinguent nettement de la limite supérieure dont les formations sont les évaporites et les calcaires.

I.3.1.1.10. Turonien

La nature lithologique de ses formations est dolomies microcristallines compactes avec des intercalations de calcaire sénoniens et parfois des marnes. Il constitue la base du Complexe Terminal, son épaisseur varie, par endroit, elle dépasse parfois les 650 mètres.

I.3.1.1.11. Sénonien

Les différentes études géologiques effectuées à travers le Sahara Algérien montrent une différence, du point de vue faciès, entre le sénonien lagunaire situé à la base et le Sénonien carbonaté situé à la partie supérieure.

I.3.1.2. Les formations de Tertiaire

L'Eocène est carbonaté à sa base, sa partie supérieure est marquée par des argiles de type lagunaire, formées par des argiles et sables, parfois on rencontre du gypse et gravier. L'épaisseur de cet horizon varié entre 150 et 200 mètres.

I.3.1.2. 1. Miopliocène

Les coupes de sondages captant cet horizon, montre que le Miopliocène est constitué par un empilement de niveaux alternativement sableux, sablo-argileux avec des intercalations gypseuses

des passées de grès.

Il est en discordance indifféremment sur le Primaire d'une part et sur le Crétacé inférieur, le Turonien, le Cénomaniens et l'Eocène d'autre part, il appartient à l'ensemble appelé communément Complexe Terminal (C.T)

Il existe quatre niveaux :

A. Niveaux argileux

Il est peu épais et existe uniquement dans la zone centrale du Sahara oriental. Avec l'Eocène lagunaire, les argiles de la base du Miopliocène constituent une barrière peu perméable entre les nappes du Sénon-Eocène carbonatées et celle du Pontien sableux.

B. Niveaux grés sableux

C'est le plus intéressant sur le plan hydrogéologique, son épaisseur reste presque régulière sur toute l'étendue du Sahara oriental. A sa base, on trouve parfois des graviers alors que le sommet se charge progressivement d'argiles. C'est à ce niveau que se rattache le principal horizon aquifère du Complexe Terminal.

C. Niveaux argileux

Il ne présente pas un grand intérêt du point de vue hydrogéologique, ce niveau renferme des lentilles sableuses qui peuvent former le quatrième niveau sableux Miopliocène.

D. Niveau sableux

Ce niveau constitue le deuxième horizon aquifère du Complexe Terminal. Du point de vue hydrogéologique, ces niveaux sableux présentent un grand intérêt car ils correspondent pour ainsi dire à la nappe des sables du Complexe Terminal.²

I.3.1.3. 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 éolien d'où on trouve la formation des alluvions sableuses et argileuses.

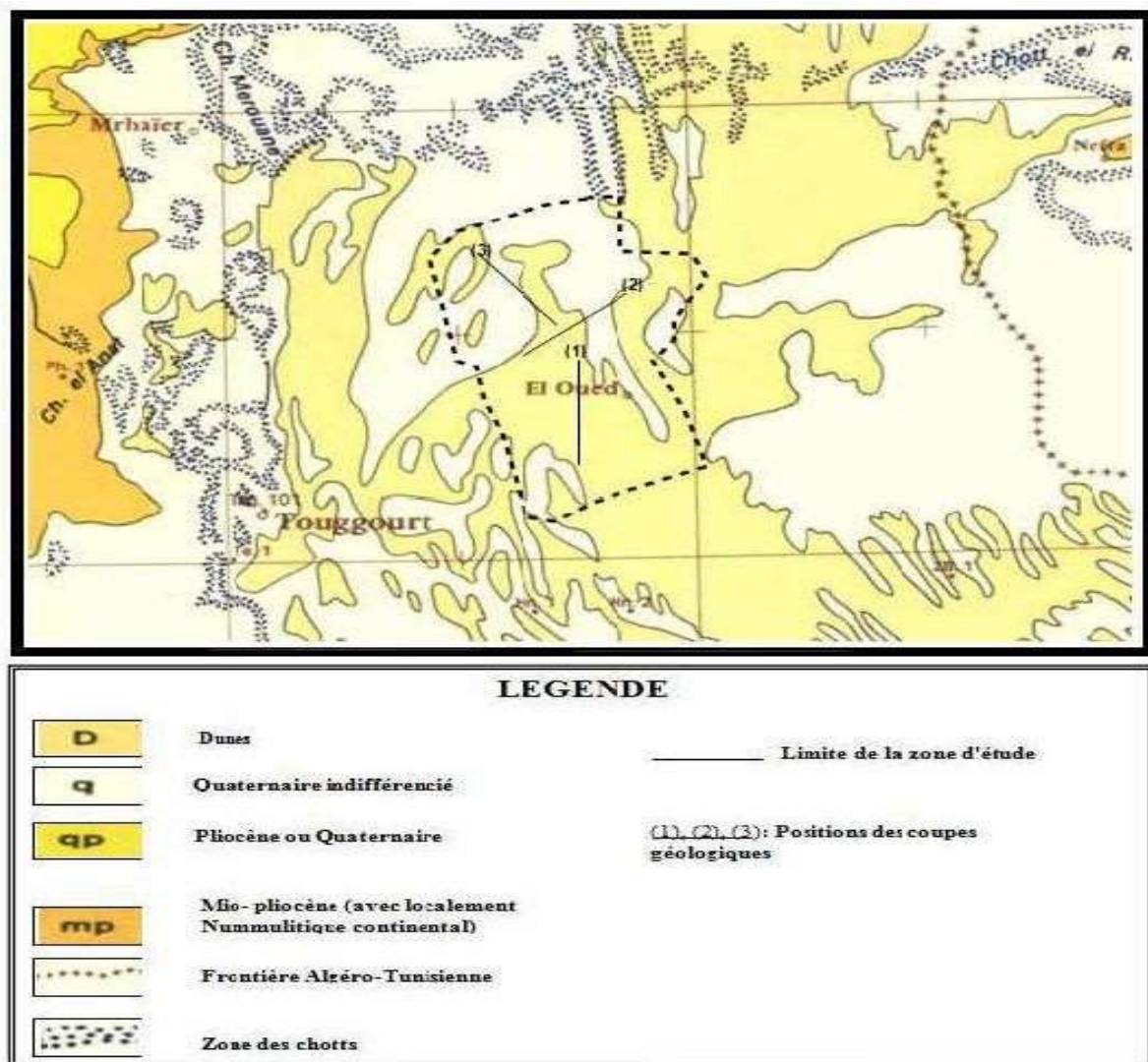


Figure N°04: Carte géologique de la zone d'étude (extrait d'après la carte du Sahara Septentrional G. Busson 1970).



I.4. Hydrogéologie :

L'étude hydrogéologique a pour finalité la planification de l'exploitation des ressources en eaux souterraines, ceci après avoir une idée sur le comportement et l'évolution de la surface piézométrique, ainsi sur le comportement hydrodynamique et les conditions aux limites de ces ressources.

Le dimensionnement de la couche mouillée et l'estimation du volume du réservoir nécessitent la mise en évidence :

- Des niveaux piézométriques grâce à la carte piézométrique.
- De la carte de substratum de l'aquifère.
- Des paramètres hydrodynamiques de la nappe (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emmagasinement, porosité).

I.4.1. Nappes aquifères de la région d'étude :

Du point de vue hydrogéologique, la région d'El Oued est représentée par deux systèmes aquifères, à savoir : le Complexe Terminal et le Continental Intercalaire. Ces deux systèmes sont surmontés par une nappe libre appelée nappe phréatique.

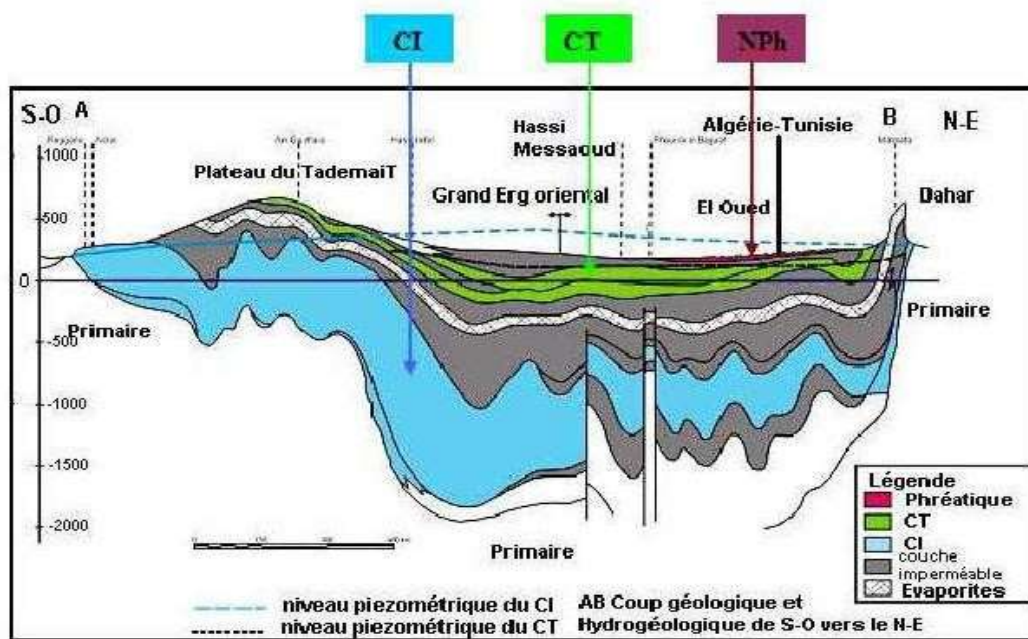


Figure N°05: Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO, 1972)

I.4.1. 1. Nappe phréatique :

La nappe phréatique présente dans toute la région du Souf, correspond essentiellement à la partie supérieure des formations continentales déposées à la fin du Quaternaire ; elle se localise à des profondeurs variant entre 00 et 60 mètres.

Vu sur son importance, cette nappe représente la source principale en eau des palmeraies; elle est surtout exploitée par des puits traditionnels qui selon les enquêtes sont en nombre de 39125 puits autorisés. (DRE El oued 2019)

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

La nappe phréatique dans la région du Souf est principalement alimentée par les eaux utilisées par les populations (les eaux d'irrigation, industrielles et domestiques) et la source absolue de ces dernières est des nappes profondes du Complexe Terminal et Continentale Intercalaire (Marc Cote, 1998).

I.4.1. 2. Nappe du Complexe Terminal (CT) :

Ce terme regroupe sous une même dénomination, un ensemble de nappes aquifères qui sont situés dans la formation géologique différentes : Sénonien carbonaté, Eocène et Miopliocène sableux.

D'après CORNET 1964, nous rappelons l'existence des 03 nappes dont les deux premières correspondent respectivement aux nappes de sables d'âge Miocène (Pontien) et pliocène, alors que la dernière à l'Eocène inférieur.

I.4.1. 2. 1. Nappes des sables :

Au sein de ces niveaux sableux, vient s'engendrer deux nappes captives, dont la première correspond à la formation supérieure du Complexe Terminal appelée communément réservoir du « Sub-Souf ». Cette nappe constituée de sables grossiers et faisant partie du Complexe Terminal mène progressivement vers le Nord du Sahara en direction de la fosse Sud artésienne, dans la région d'étude elle se trouve à 280 mètres de profondeur.

Il faut mentionner également l'existence d'une deuxième nappe de sables d'âge Pontien.

Au-dessus des bancs supérieurs de la nappe des calcaires en contact avec les marnes de l'Eocène inférieurs et des graviers siliceux constituant donc une deuxième nappe captive en continuité avec la nappe du Pontien du Sud Tunisien, la profondeur de cette nappe varie entre 400 et 450 mètres. Quant à l'épaisseur utile de cette nappe, elle est de 50 mètres environ.

L'écoulement des eaux dans ces deux dernières nappes se fait du Sud-Ouest vers le Nord- Est, autrement dit vers la zone des chotts (Melghir et Merouane).

Dans la zone à fortes exploitations telle que la ville d'El-Oued, l'extraction des eaux se fait par pompage.

I.4.1. 2. 2. Nappes de calcaires :

Le Complexe Terminal possède une litho-stratigraphie plus complexe ; les forages captant cette nappe nous montrent l'existence de deux niveaux servant de repère pour la classification des eaux souterraines ; du Sud au Nord, nous observons l'existence d'un premier niveau calcaire mieux individualisé, parfois il est purement calcaire, quelque fois il est formé par des calcaires gypseux. Il correspond au niveau inférieur. Le niveau supérieur, principalement représenté par des calcaires siliceux, est considéré comme une zone de transition entre la nappe des calcaires et celle des sables. Dans l'ensemble, ces deux niveaux sont séparés par des formations tantôt marneuses, tantôt sableuses avec des passées d'argile rouge.

I.4.1. 3. Nappe du Continental Intercalaire (CI) :

Le terme « C.I » 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 compris entre la base Trias et le sommet de l'Albien.

Le traitement manquant du réservoir aquifère du Continental Intercalaire est son volume considérable dû à la fois à son extension sur plus de 600 000 Km² et son épaisseur moyenne de plusieurs centaines de mètres. Bien que l'intérêt majeur de ce système Aquifère soit constitué par les grandes quantités d'eaux qui ont été stockées au cours des périodes pluvieuses du Quaternaire et qui peuvent maintenant être exploitées ; il reçoit encore de nos jours une alimentation naturelle par les eaux météoriques et présente donc un fonctionnement hydraulique caractérisé par une alimentation, un écoulement et une série d'exutoire.

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

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

foggaras ont pris la relève. L'eau non captée s'évapore dans un chapelet de sebkhas qui occupent le fond des dépressions du Gourara, du Touat et du Tidikelt. Par ailleurs, des transferts verticaux à partir du Continental Intercalaire vers le Complexe Terminal existent peut-être à la faveur des fractures qui jalonnent en Amguid-El Biod. Sur le reste du domaine, mis à part la zone de communication possible avec le Complexe Terminal sur le Grand Erg Occidental, le toit de la formation, constitué d'une épaisse couche d'argile et d'anhydrite, est parfaitement imperméable et isole complètement les deux réservoirs, L'exploitation du Continental Intercalaire s'est d'abord effectuée, depuis de longs siècles des exutoires artificiels, par le système traditionnel des foggaras, introduit sur la bordure du plateau du Tademaït dès le Xe siècle (UNESCO, 1972a ;BRL-BNEDER, 1992).

La formation du Continental Intercalaire est représentée par des dépôts continentaux sablo-gréseux et sablo-argileux du Crétacé Inférieur. C'est un système aquifère multicouches dont la profondeur atteint localement 2000 mètres et dont la puissance varie entre 200 et 400 m. Elle est exploitée par trois forages artésiens. La commune d'El-Oued exploite cet aquifère par deux forages artésiens pour l'AEP d'un débit cumulé de 340 l/s et une température avoisinant les 70°C (DRE El oued 2019).

I.5. CONCLUSION

Le climat de la région semblable au désert algérien, est caractérisé par un climat désertique caractérisé par:

- Chaleur extrême et sécheresse en été ;
- Froid en hiver ;

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

Ces conditions ont favorisé la formation dans le Souf et dans tout le bas Sahara de plusieurs formations aquifères à comportement hydrodynamique variable en fonction de leurs faciès. La stratigraphie de la région est caractérisée par des séries sédimentaires allant de crétacé inférieur jusqu'aux dépôts de Quaternaire. Les formations du Quaternaire récentes forment l'aquifère détritique de la nappe phréatique, il est surtout sableux à gréseux avec parfois du gypse et des

CHAPITRE I. REPRESENTATION DE LA REGION

argiles localisées particulièrement dans la partie Nord-est où il se termine par une croûte gypseuse, son substratum est argileux imperméable parfois très peu sableux à son sommet ou alors gypsifère en totalité.

Le système aquifère est constitué de trois nappes : nappe libre (phréatique), et deux nappes captives (nappe de complexe terminal et nappe de continentale intercalaire).

Chapitre II

HYDROGEOLOGIE

II.1.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 la Daira qui regroupant la commune de Guemar, et les communes de Taghzout et Ourmas. La région d'étude englobe 24 points d'eau, ces points d'eau répartis dans les trois communes de la Daira.

II.2.Piézométrie

II.2.1.Inventaire des points d'eau

Dans la présente étude, 22 points d'eau en Complexe Terminale ont été recensés ont presque même profondeur sont destinées à l'exploitation pour l'alimentation en eau potable.

Tableau N°03: Inventaire des points d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daira de Guémar.

N°	Nom de forage	Commune	N°	Nom de forage	Commune
1	Beb Elgharbi	Guémar	12	Erg Essouari	Guémar
2	El dhahraouia	Guémar	13	Taghzout centre -2-	Taghzout
3	Sif Nacer	Guémar	14	Cite El estiklal	Taghzout
4	Beb El chargui	Guémar	15	Ben Djrou	Taghzout
5	El houd	Guémar	16	Bagouza	Taghzout
6	Dmitha	Guémar	17	05 Juillet	Taghzout
7	Ghamra 2	Guémar	18	El hadhoudi-Leguiret	Ourmes
8	Miha saleh	Guémar	19	Ourmes 1 bis-El estiklal	Ourmes
9	20 Aout 1955	Guémar	20	Abaidi Elhabib	Ourmes
10	19 Mai 1956	Guémar	21	Route Hadhoudi	Ourmes
11	Miha Atia	Guémar	22	Berbri 1 er Novembre	Ourmes

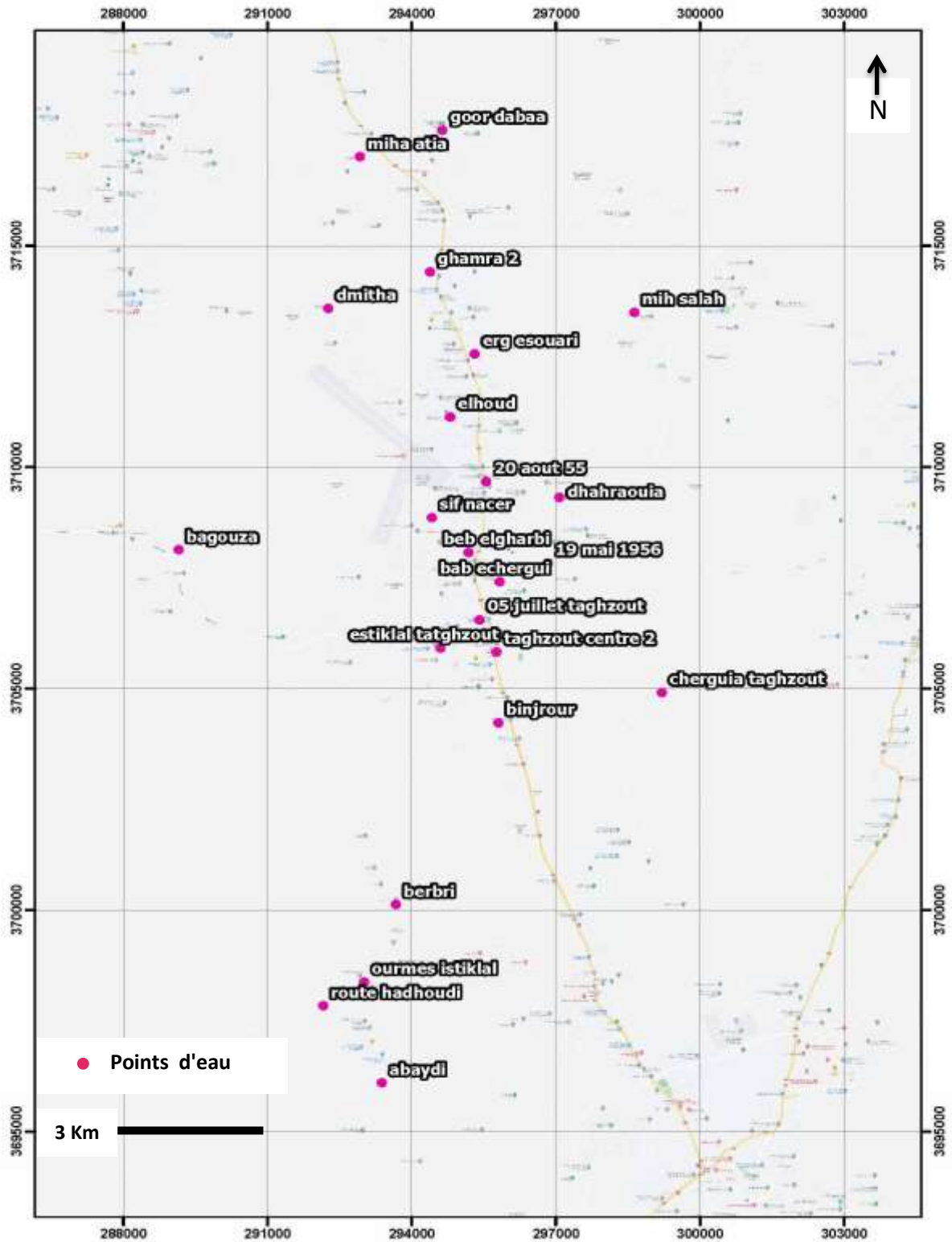


Figure N°06: Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar pour l'année 2021.

CHAPITRE II.HYDROGEOLOGIE

Un réseau de points d'inventaire représentatif de toute la nappe a été utilisé pour l'établissement des cartes piézométrique et hydrogéochimique (Figure N°07).

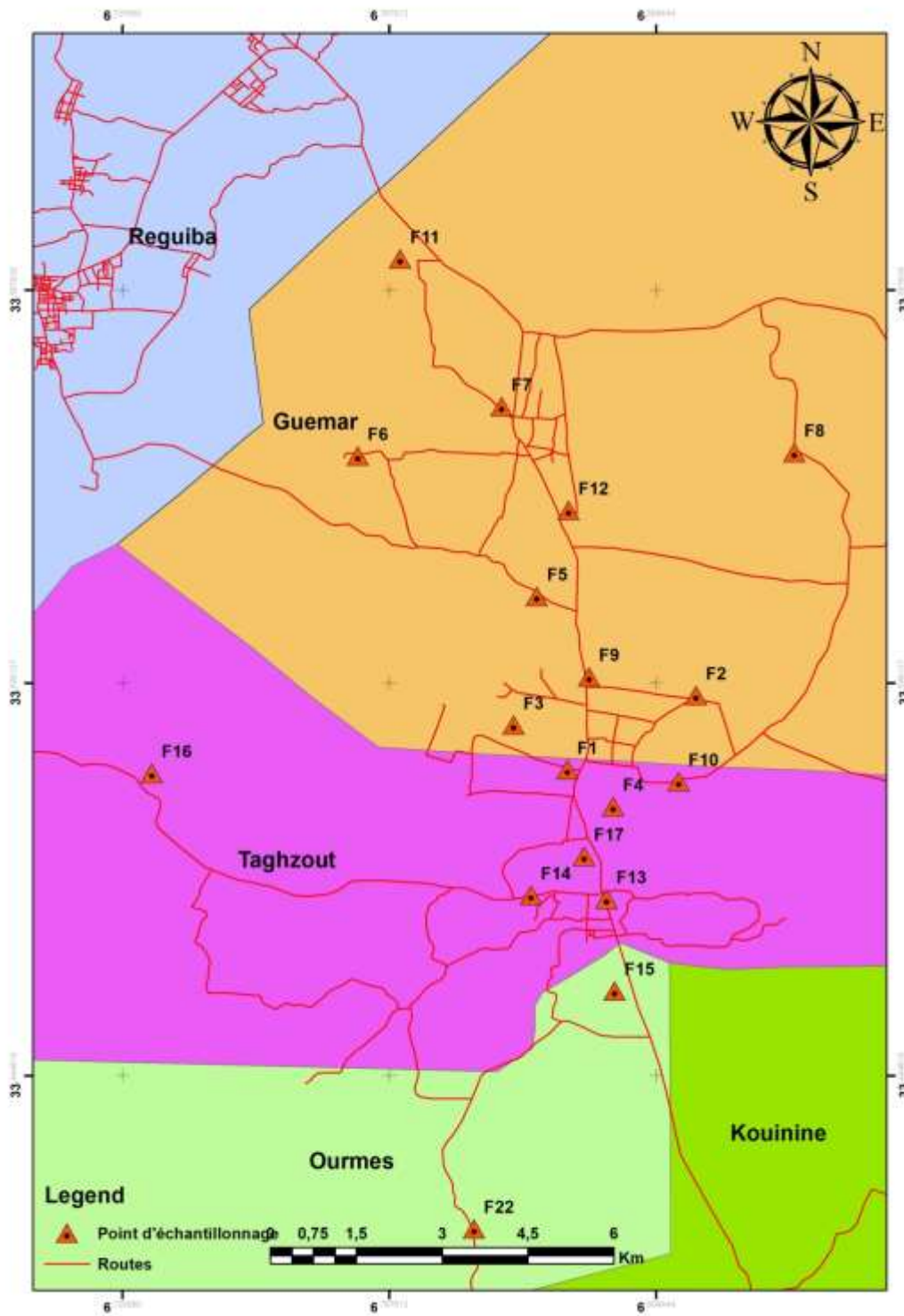



Figure N°07 : Carte d'inventaire des points d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar 2021.

II.2.2.Evolution de la piézométrie

L'établissement d'une carte piézométrique est une étape très important, C'est une figure schématique de la distribution spatiale, elle représente la morphologie de la surface piézométrique des nappes à une période déterminée.

L'analyse des cartes piézométriques permet de définir l'écoulement souterrain et de localiser les zones d'alimentation si a eu lieu et de sorties des eaux de la nappe aquifère des CT et de déterminer le gradient hydraulique qui est un paramètre important dans l'estimation des apports latéraux.

L'établissement cartes piézométriques de l'année 2021, s'est réalisé par interpolation, en utilisant le logiciel de système d'information géographique SIG 

Elles montrent que l'allure générale des courbes ne varie qu'assez peu .

L'observation de la morphologie des cartes piézométriques de l'année 2021 permet de constater que l'écoulement souterrain se fait, en général, de Sud-Ouest vers Nord-Est (Figure N°08/A et B).

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 : SN, OE. Ceci est confirmé par les cartes piézométriques des aquifères CT.

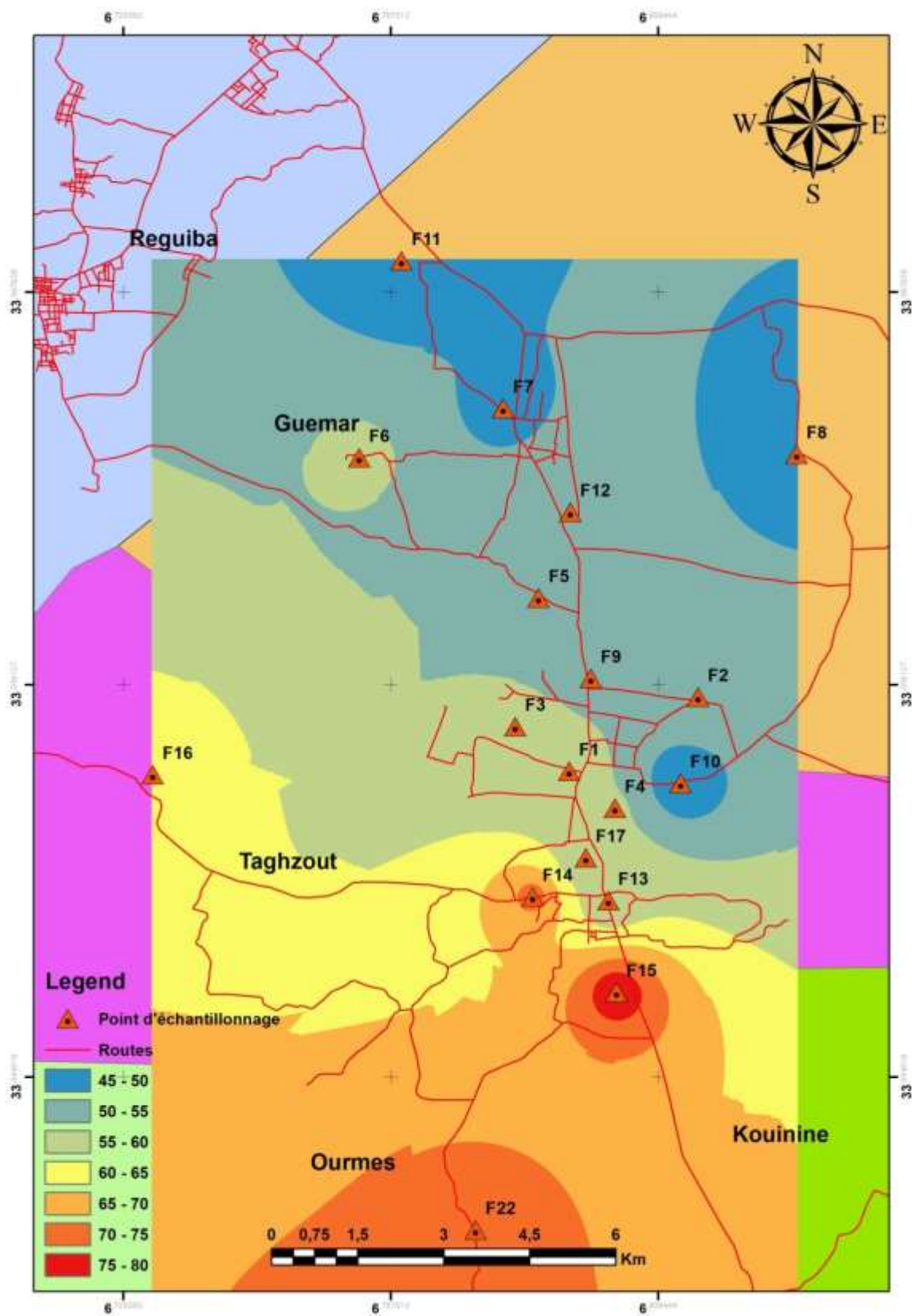


Figure N°08/A: Carte du niveau statique de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021).

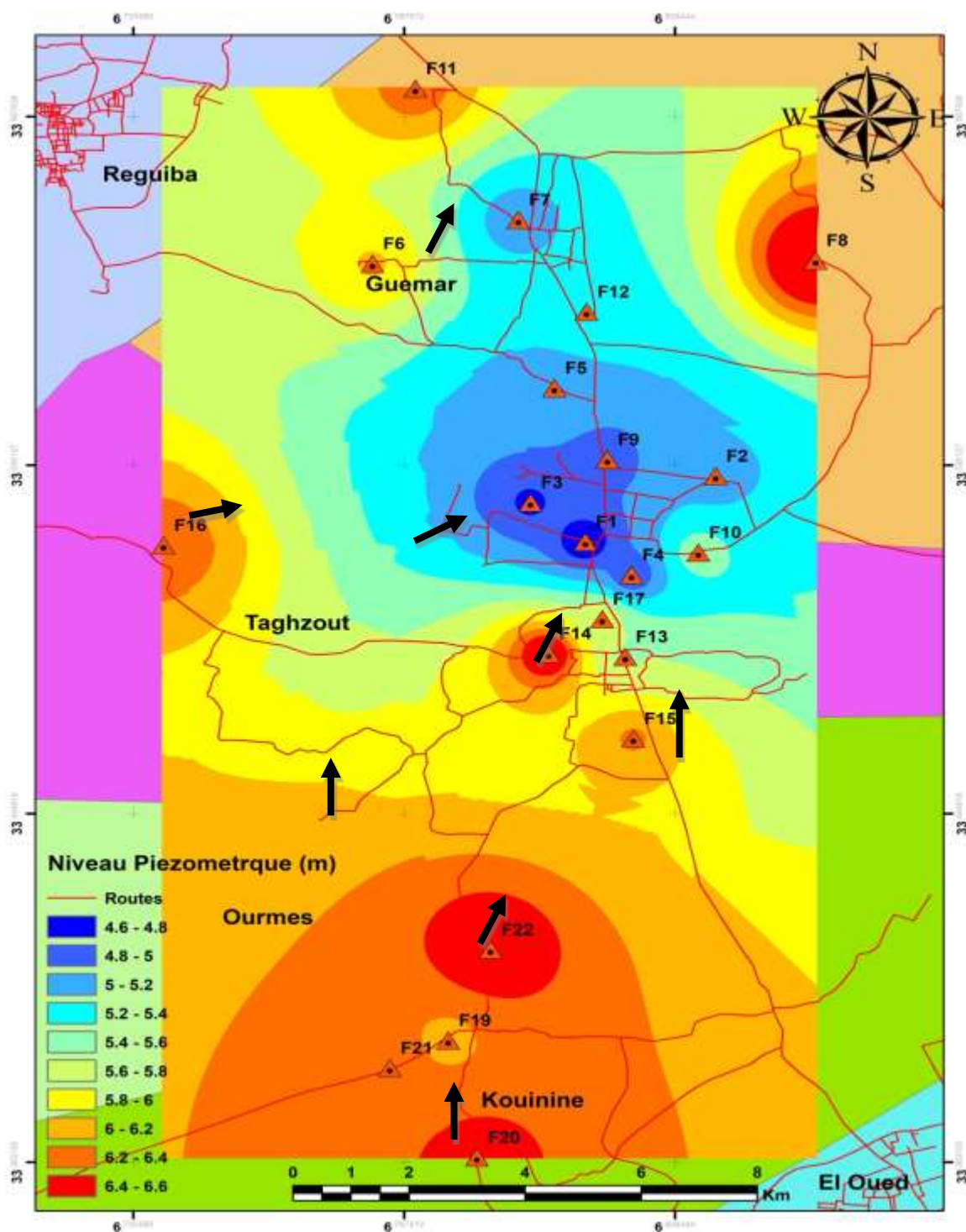


Figure N°08/B: Carte piézométrique de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021).

II.3.Détermination des paramètres hydrodynamiques

Dans le but de déterminer la transmissivité et la perméabilité, nous avons utilisé les résultats des essais de débits des forages. L'interprétation graphique est basée sur l'expression de l'approximation logarithmique de **C.E.Jacob** (1950).

La détermination de la perméabilité a été faite en se basant sur la transmissivité et l'épaisseur de la couche mouillée de l'aquifère. Cette dernière a été estimée en se basant sur les profils géoélectriques et les colonnes lithostratigraphiques des forages.

L'application de la relation suivante a permis la détermination de la perméabilité, dont les résultats sont consignés dans le tableau N°04.

$$K=T/e \quad (01)$$

Où : $T=0.183Q/C \quad (02)$

K : perméabilité (m/s) ;

T : transmissivité (m²/s) ;

e : épaisseur de la couche mouillée aquifère (m).

C = ΔS la tangente de la courbe caractéristique obtenue des essais de pompage des forages en question .

Tableau N°04: Détermination des paramètres hydrodynamiques de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar (2021).

Points d'eau	Q (l/s)	e (m)	T (m ² /s). 10 ⁻³	K (m/s) .10 ⁻⁴
1	44	68	0.015	2.21
3	45	50	0.012	2.40
4	42	66	0.013	1.97
6	40	92	0.017	1.85
8	47	62	0.01	1.61
10	40	66	0.021	3.18
12	40	66	0.015	2.27
14	40	96	0.023	2.40
21	40	53	0.013	2.45

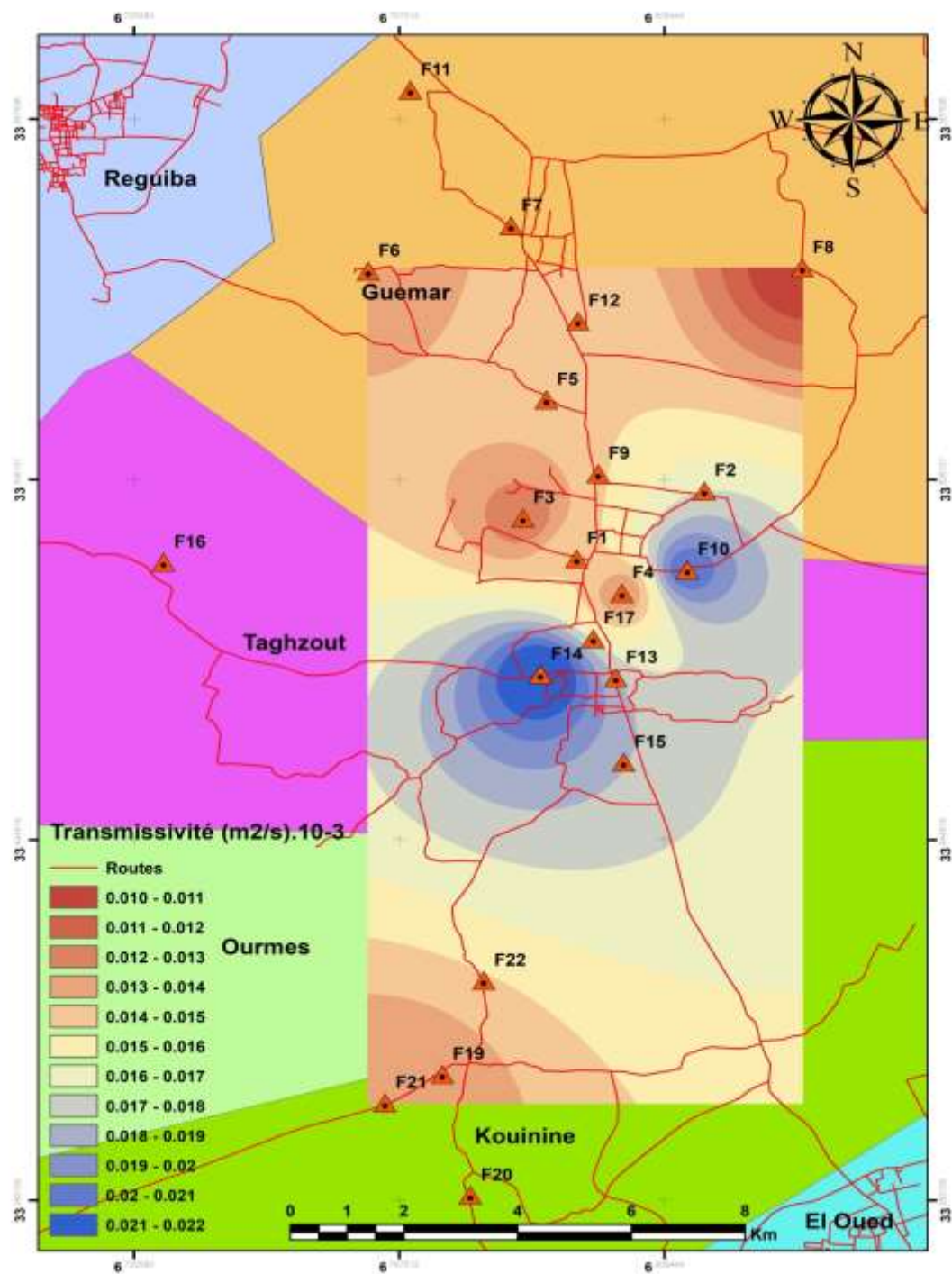


Figure (N°09/A): Carte du transmissivité de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021).

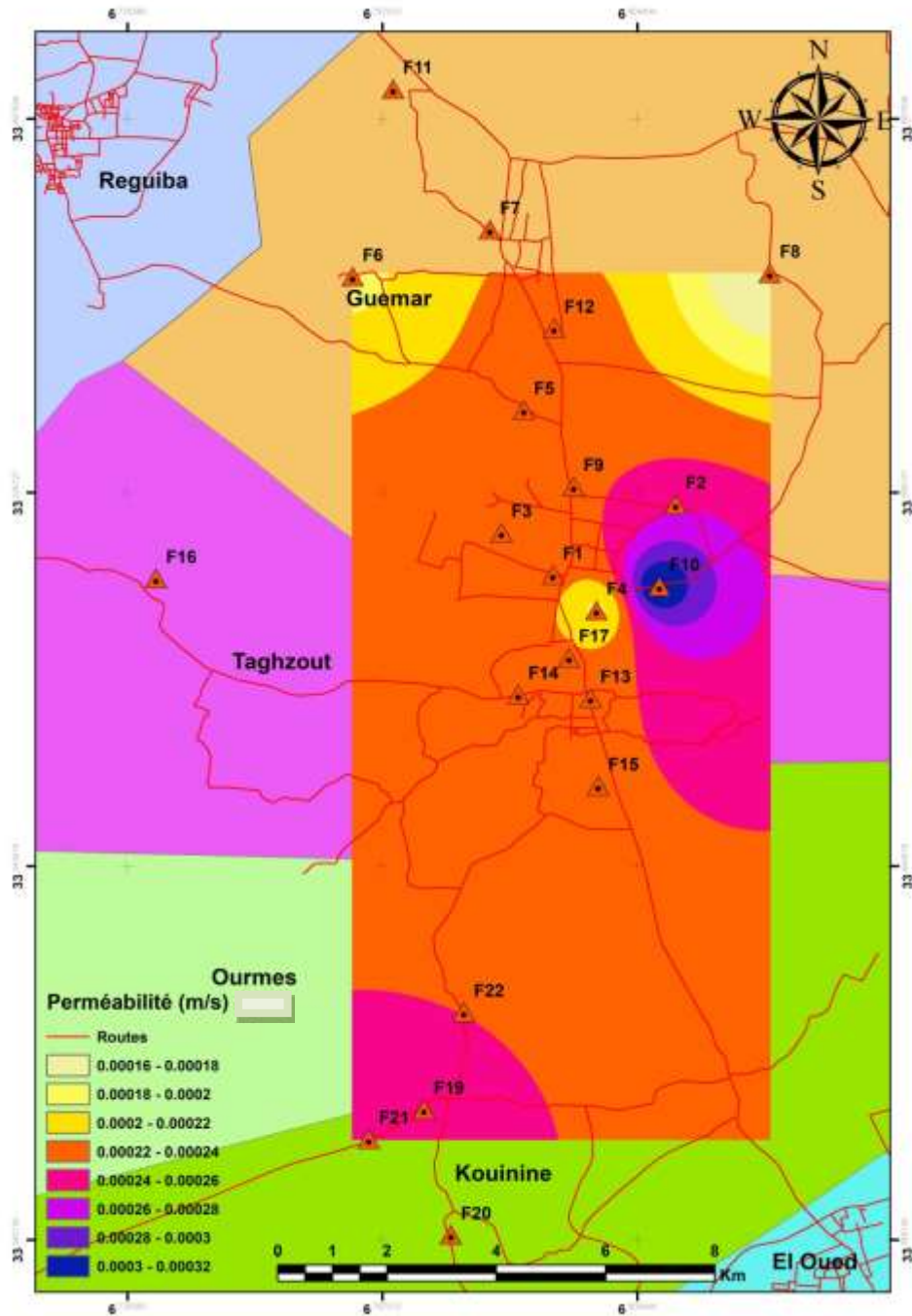


Figure (N°09/B) : Carte de la perméabilité de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021).

II.4.Conclusion

Au terme de ce chapitre nous pouvons dire que :

- L'étude hydrogéologique a permis de connaître l'aquifère de complexe terminale dont les niveaux profonds sont connus par les forages ; l'autre Crétacé Inférieur et Jurassique supérieur.
- L'écoulement se fait principalement dans deux sens du Sud-Ouest vers le Nord-Est, ou d'Ouest vers l'Est avec un gradient hydraulique variable allant de 0.002 à 0.005, Transmissivité moyenne de CT est de : $T = 1.5 \times 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$
- Le coefficient de perméabilité moyenne de CT est de: $K = 2,27.10^{-4} \text{ m/s}$.
- Les valeurs les plus importantes de la perméabilité et de la transmissivité se localisent au centre de la zone et au Nord-Est,

Chapitre III

Hydrogéochimie

III.1. Introduction

La composition chimique d'une eau est importante dans la détermination de sa qualité, donc le domaine de son utilisation pour l'alimentation en eau potable ou l'irrigation, l'industrie... Etc.

Elle est également utile pour visualiser à l'aide de cartes en iso-teneurs, la répartition et l'évolution géographique des concentrations en éléments chimiques dissous.

Dans ce chapitre, nous allons mettre en évidence les caractéristiques chimiques des eaux souterraines des points d'inventaire qui ont été collectés à travers de toute la zone de la Daïra de Guémar, nous notons que les mesures des paramètres physicochimiques ont été effectuées sur 22 forages pour la période de 2021, dans laboratoire d'analyse physico-chimique de l'ADE de la commune d'El-Oued.

✓ Balance ionique

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

$$BI = \frac{\sum c - \sum a}{\sum c + \sum a} \times 100 \quad (03)$$

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

La balance ionique des 22 échantillons, entre 5 et 10%, indique que les analyses sont globalement acceptables.

III.2. Description sommaires des paramètres physico chimiques

Les résultats d'analyse physico-chimique des eaux de la nappe du complexe terminale à travers la Daïra qui regroupant les communes de Guémar, Taghzout et Ourmas, pendant l'année 2021, ont été consignés dans le tableau N°05.

Tableau 05 : Variation des paramètres physico-chimiques des points d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar (2021).

Eléments	Norme OMS	Moy	Max	Min	Ecart-type
HCO ₃ ⁻ (mg /l)	250	156.28	207.4	97.6	39.55
SO ₄ ⁻² (mg /l)	250	675.60	984.8	193.1	169.26
Cl ⁻ (mg /l)	250	855.10	1240.9	648.8	145.71
Ca ⁺² (mg /l)	100	314.77	489	216.4	64.1
Mg ⁺² (mg /l)	50	135.71	206.6	65.6	40.81
Na ⁺ (mg /l)	150	462.82	570	360	65.87
K ⁺ (mg /l)	12	29.59	37	22	3.17
NO ₃ ⁻ (mg /l)	50	23.08	42.9	12.5	7.37
NO ₂ ⁻ (mg /l)	0.1	0,055	0,28	00	0.01
PO ₄ ⁻ (mg /l)	5	0.54	4,01	00	1.06
pH	6.96 <pH<7.8	7.39	7.75	6.96	0.15
Cond (µS.cm ⁻¹)	2500	4171.82	5100	3740	369.59

III.2.1. Paramètres physiques

III.2.1.1. 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; le pH varie entre 6.96 et 7.75.

III.2.1.2. 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 tous les forages dépassent la norme recommandée relative à la potabilité des eaux. Les valeurs maximales sont de l'ordre de 5100 (µS.cm⁻¹), Ce paramètre augmente généralement dans le Nord -Ouest et au sud, avec une moyenne dans le centre de la région notamment Guémar et Taghzout.

III.2.1.3. La température (T° C)

La température mesurée sur les eaux souterraines de la région d'étude, varie de 13,3 à 34,6°C, avec une moyenne proche de 23,5°C.

III.2.2. Les éléments chimiques majeurs

III.2.2.1. Le calcium (Ca²⁺)

La totalité des points de prélèvement présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux. Les valeurs les plus élevées avec un maximum de 489 mg/l sont observées au Sud-ouest de la nappe avec une moyenne de 314.77 mg/l au nord de la daïra.

L'ion Ca²⁺ 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.

III.2.2.2. Le magnésium (Mg²⁺)

Les valeurs du magnésium varient de 65.6 mg/l au Nord à 206.6 mg/l au Sud avec une valeur moyenne de 135.71 mg/l.

III.2.2.3. Le sodium (Na⁺)

La totalité des points de prélèvement présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité des eaux, le sodium présent également des valeurs fortes allant de 360 mg/l à Guémar et Taghzout, et 570 mg/l à l'Est, sud et au nord, avec une valeur moyenne de 462.82 mg/l.

III.2.2.4. Le potassium (K⁺)

Les valeurs de potassium sont de l'ordre de 22 mg/l au forage f8. Les valeurs les plus élevées sont observées aux forages f11 f10 et à la partie Nord Est avec un maximum de 37 mg/l, avec une moyenne de 29.5 mg/l.

III.2.2.5. Les chlorures (Cl⁻)

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 montrent des valeurs importantes qui dépassent la norme de potabilité de l'OMS fixée à 250 mg/l. On signale que tous les forages dépassent cette norme. Le taux des chlorures est très élevé au Nord Est de la Daïra et aux forages f8 f1 et f1 avec

un maximum de 1240.9 mg/l, mais moindre à la partie Ouest, avec une moyenne de 885.1 mg/l.

III.2.2.6. Les sulfates (SO_4^{2-})

Les plus fortes teneurs en sulfates sont enregistrées aux forages f6 et f10 avec un maximum de 984.8 mg/l, avec une moyenne de 675.60 mg/l, alors que les plus faibles valeurs sont enregistrées au forage f8 avec un minimum de 193.1 mg/l.

III.2.2.7. Les bicarbonates (HCO_3^-)

Les teneurs de bicarbonates (HCO_3^-) sont enregistrées pendant l'année 2021 avec une moyenne de 156.28 mg/l et un maximum de 207.4 mg/l se trouve aux forages f7; f8 ;f16 et f10 au Nord-est de la région d'étude.

III.3. Détermination des principaux faciès hydrochimiques

Suivant : $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ les cations présentent l'ordre des concentrations les plus fortes au plus faibles. Le sodium est plus important dans tous les eaux des points d'eau, où il domine les autres cations. 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 50% de la charge anionique dissoute. Ils sont élevés dans toutes les eaux des points d'eau, avec une moyenne de 885.1 mg/l. Les anions se présentent dans l'ordre suivant : $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{NO}_3^-$. Les bicarbonates et les nitrates sont presque toujours modérés dans tous les points d'eau.

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 06:

Tableau N° 06 : Faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar (2021).

Echantillons	Faciès chimique
Nappe de CT 2021	Chloruré sodique 100 %

Les fortes concentrations de Cl^- et Na^+ ont donné un faciès chloruré sodique dominant sur toute la zone d'étude.

III.3.1. Représentation graphique des faciès hydrochimiques

Dans le but de bien identifier les faciès hydrochimiques 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.3.1.1. Diagramme de PIPER:

Le diagramme de Piper est composé de deux triangles représentant la répartition des anions et celle des cations respectivement, et d'un losange représentant la répartition synthétique des ions majeurs.

Les nuages de points concentrés dans un pôle représentent pour les différents échantillons la combinaison des éléments cationiques et anioniques. Les faciès sont représentés sur le diagramme de Piper (figure N°10).

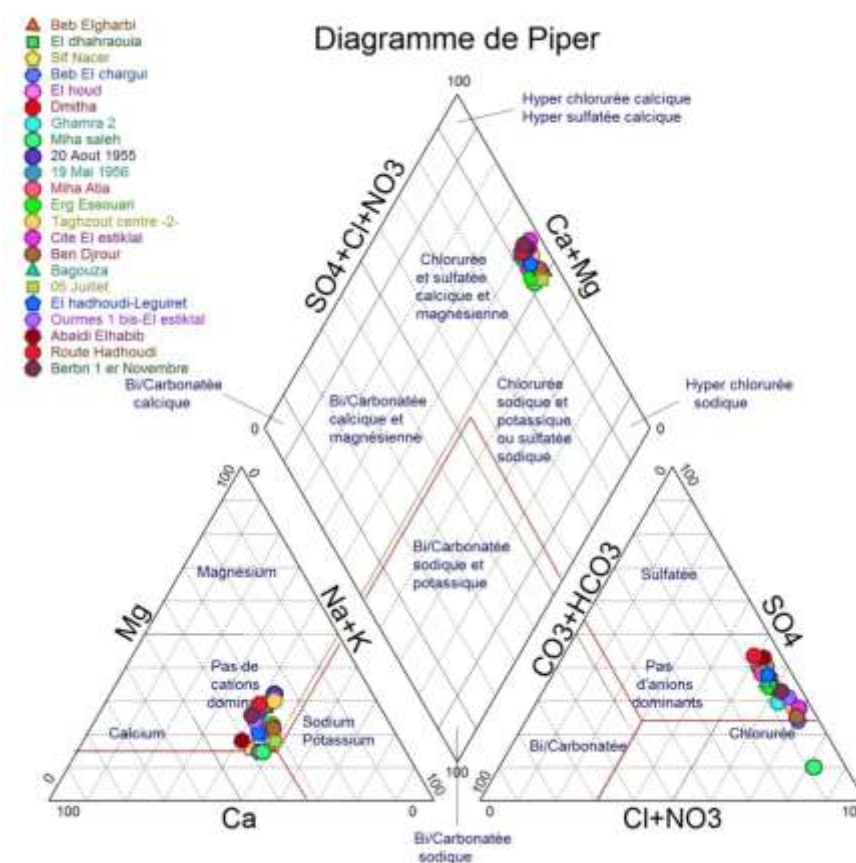


Figure N°10 : Diagramme de Piper des eaux souterraines d'eau de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

D'après les figures N°10 nous remarquons que l'ensemble des nuages de points ne présente pas de dominance anionique ou cationique. Nous signalons la présence d'un faciès chloruré et

sulfatée calcique, dominant, et un faciès magnésienne avec une légère tendance de migration vers le faciès chlorurée sodique. Pas de cation dominant pour la plus part des eaux, tend que le reste migré vers le calcium le chlorure est l'anion dominant pour l' eaux de F12, il n'y a pas d'anion dominant pour la plus part des eaux ,tend que le reste migré vers le chlorure.

III.3.1.2. Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF

C'est un diagramme semi logarithmique Schoeller–Berkaloff est utilisé pour la représentation graphique des analyses chimiques des eaux, la classification tient compte de l'importance des principaux anions et cations et détermine le type de faciès des eaux. Ce type de diagramme permet de représenter plusieurs échantillons d'eau sur le même diagramme, ce qui facilite la comparaison. La ligne brisée est formée en reliant tous les points figurant les différents éléments Chimiques. Lorsque les lignes se croisent, un changement de faciès chimique est mis en évidence. Un groupe d'eau de minéralité variable mais dont les proportions sont les mêmes pour les éléments dissous, donnera une famille de lignes brisées parallèles entre elles

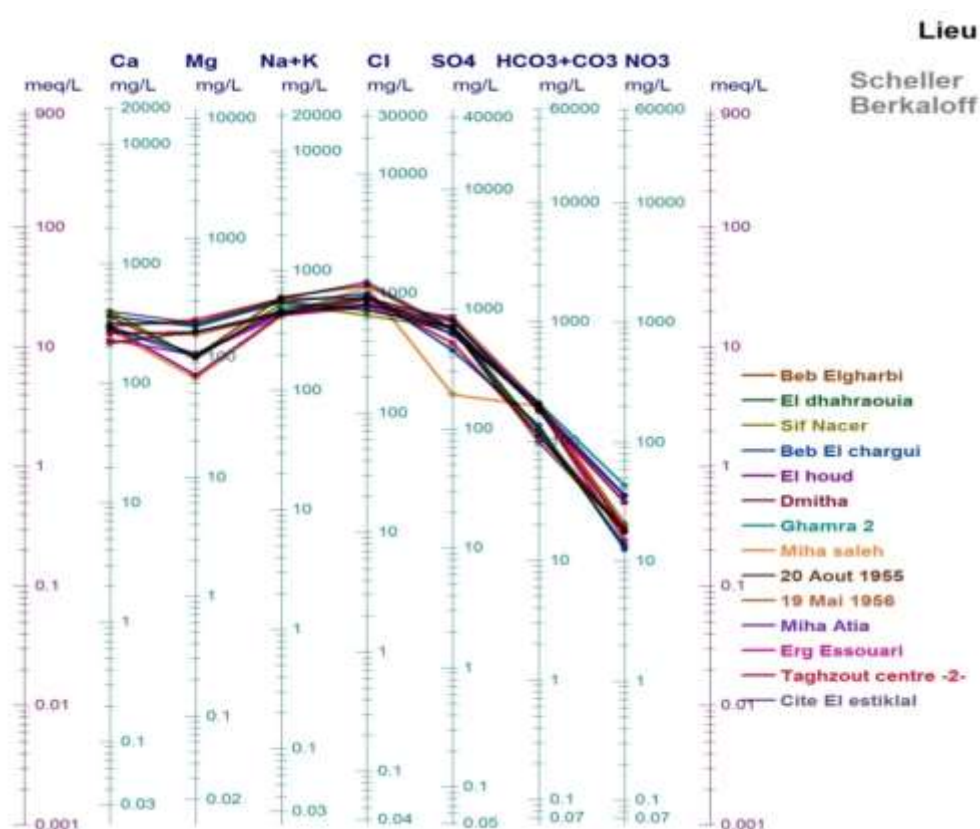


Figure N°11/A : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021

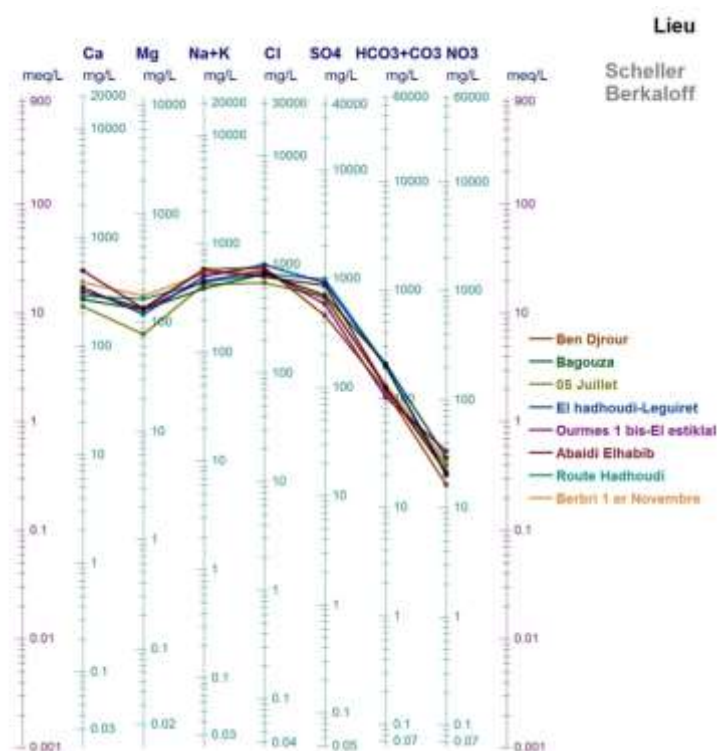


Figure N°11/B : Diagramme de SCHOELLER-BERKALOFF des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

D'après les figures (N°11/A et B) on peut voir une grande ressemblance dans la composition chimique des eaux de complexe terminal de la région d'étude, traduit sur le diagramme par une pseudo-superposition. On constate toujours l'existence d'une même famille d'eau qui est celle des eaux chlorurées, Les fortes concentrations de Cl^- , SO_4^{2-} et Na^++K toujours présentent dans toutes les eaux.

III.4. Cartographie hydro-chimique

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. La cartographie hydrochimique a été illustrée par interpolation triangulaire, en utilisant le logiciel SIG.

III.4. 1. Les chlorures Cl^- (Figures N°12)

L'observation des cartes des chlorures montre que les teneurs varient entre 648.8 et 1240.9 mg/l. Nous avons enregistré des concentrations importantes en chlorures plus de (1000 mg/l), Aux points F14 à la commune de Taghzoute, F1 au centre de la commune de Guémar, F8 Nord-Est et de notre zone d'étude, nous pensons qu'ils tirent leur origine d'un pointement triasique gypsifère,

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 de la zone. Les valeurs des concentrations durant l'année 2021 est due à l'effet du lessivage et de l'évaporation.

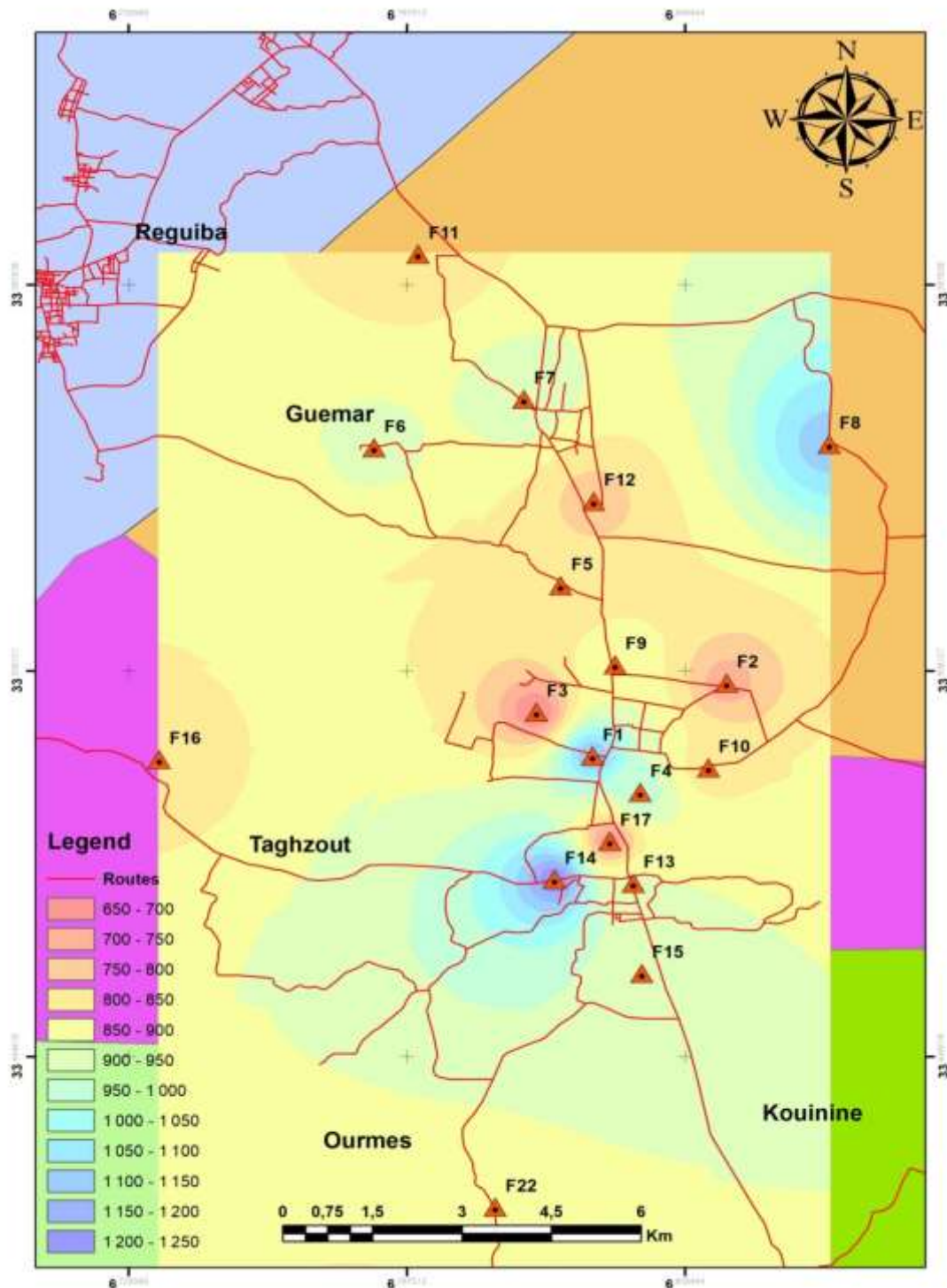


Figure N°12 : Carte de chlorure des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

III.4. 2. Les bicarbonates HCO_3^- (Figures N° 13)

Les concentrations oscillent entre 97.6 et 207.4 mg/l. Nous avons enregistré des concentrations importantes en bicarbonates plus de (200 mg/l), Au points F7 à Ghamra 2 , F10 à la commune de Guémar, F16 au Bagouza à l'ouest du commune de Taghzoute , F21 à commune d'Ourmes. Nous notons que pour quelques points, les valeurs maximales sont rencontrées au niveau des bordures, ceci est dû à la dissolution des formations carbonatées. Les fortes concentrations sont enregistrées ce qui est dû à la dissolution des calcaires en bicarbonates par les pluies acides.

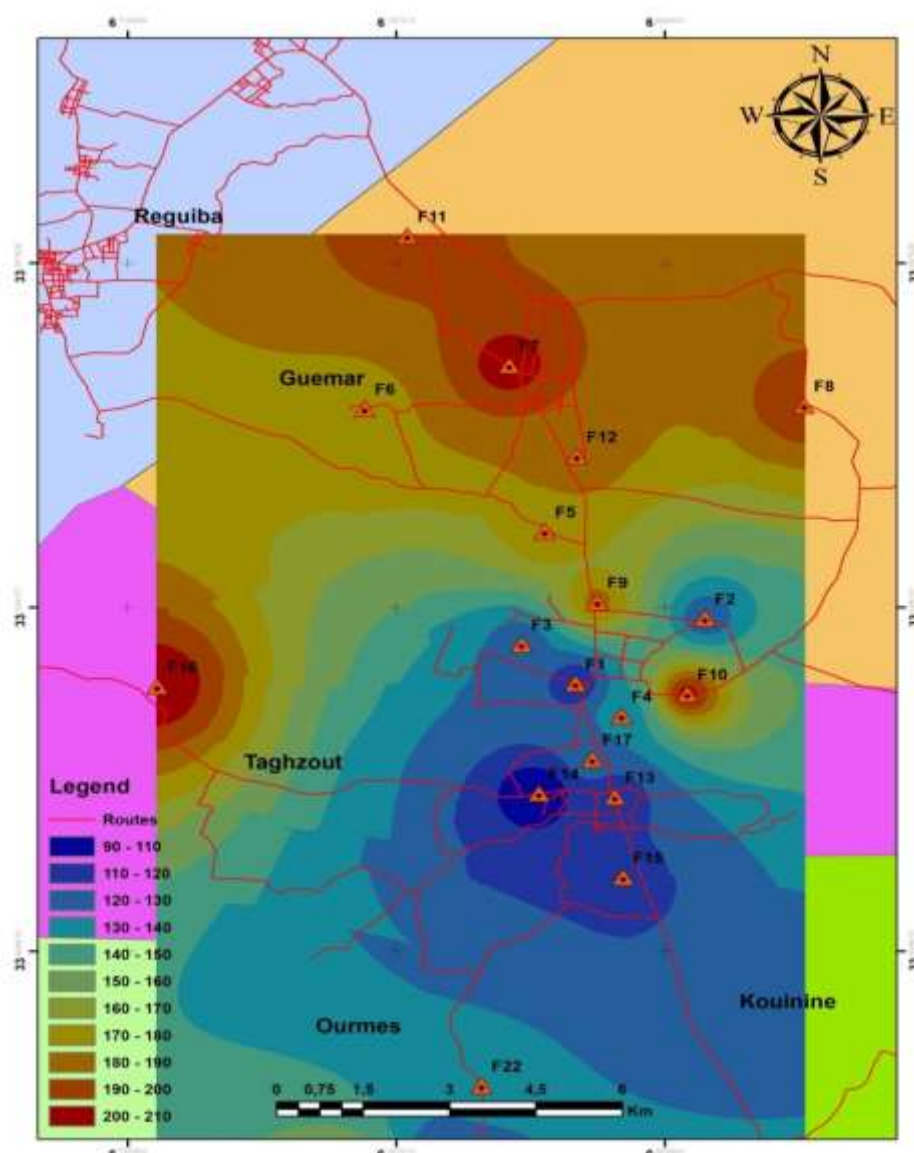


Figure N°13: Carte de bicarbonate des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

III.4. 3. Les sulfates SO_4^{-2} (Figure N° 14)

Les concentrations, en général, oscillent entre 193.1 et 984.8 mg/l. Les fortes concentrations sont enregistrées au F20 et 21 à la commune d'Ourmes , au centre et à l'Est de la nappe à F10 et nord-ouest à Dmitha . Elles sont dues au lessivage des dépôts évaporitiques. Les plus faibles concentrations sont constatées à l'Est nord de la nappe.

III.4. 4. Le calcium Ca^{+2} (Figure N° 15)

Les concentrations oscillent en général entre 216.4 et 489 mg/l. Les fortes teneurs apparaissent au F3, F10 à Guémar F4 à Taghzout et F22 à Ourmes ; la concentration maximale se localisent au niveau de F20 à Ourmes au Sud -ouest de la zone d'étude, nous pensons qu'elles résultent de la dissolution des formations de gypses et de calcaires et des dépôts évaporitiques .

III.4.5. Le sodium Na^+ (Figure N° 16)

Les concentrations varient entre 360 et 470 mg/l. L'observation de carte montre que Les faibles concentrations se localisent dans la zone centrale F14 à Taghzout et F01 à Guémar, le sodium est toujours présent dans l'eau, il provient du lessivage des formations géologique riches en Na cl, il est facilement entraîné en solution en présence de l'eau.

III.4.6. Le potassium K^+ (Figure N° 17)

Les concentrations oscillent entre 22 et 37 mg/l. Nous avons enregistré des concentrations importantes en potassium plus de (12 mg/l), dans tous les forages.

III.4.7. Le Potentiel d'hydrogène PH (Figure N° 18)

Les concentrations oscillent entre 6.96 et 7.39.

III.4.8. La Conductivité électrique CE (Figures N° 19)

Les concentrations oscillent entre 3740 et 5100($\mu\text{S}.\text{cm}^{-1}$). Nous avons enregistré des concentrations importantes en CE plus de (2500 mg/l), dans tous les forages.

III.4.9. Le Magnésium Mg^{+2} (Figure N° 20)

Les concentrations oscillent entre 65.6 et 206.6 mg/l. Nous avons enregistré des concentrations importantes en Magnésium plus de (100 mg/l) presque dans tous les forages.

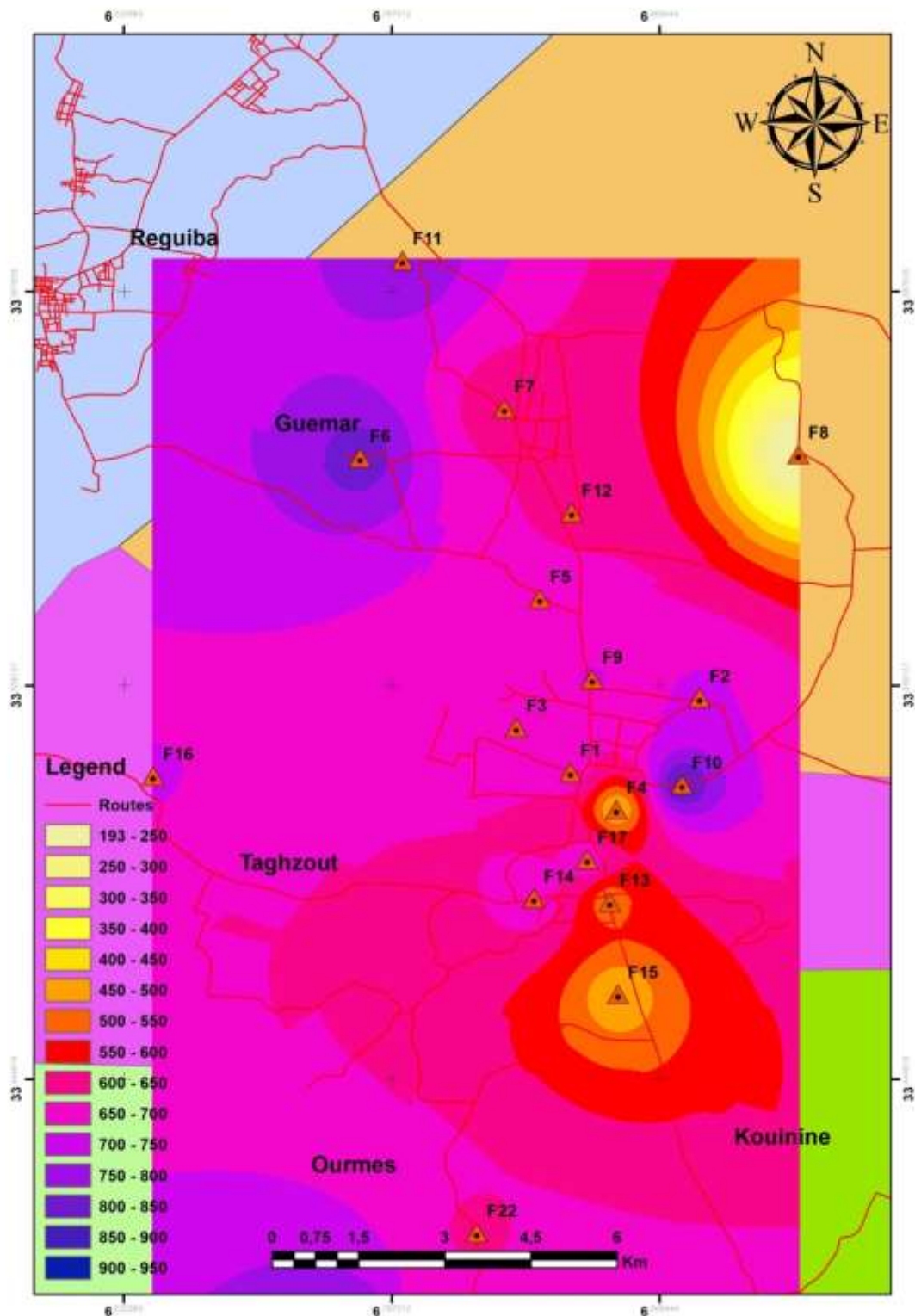


Figure N°14 : Carte des sulfates des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

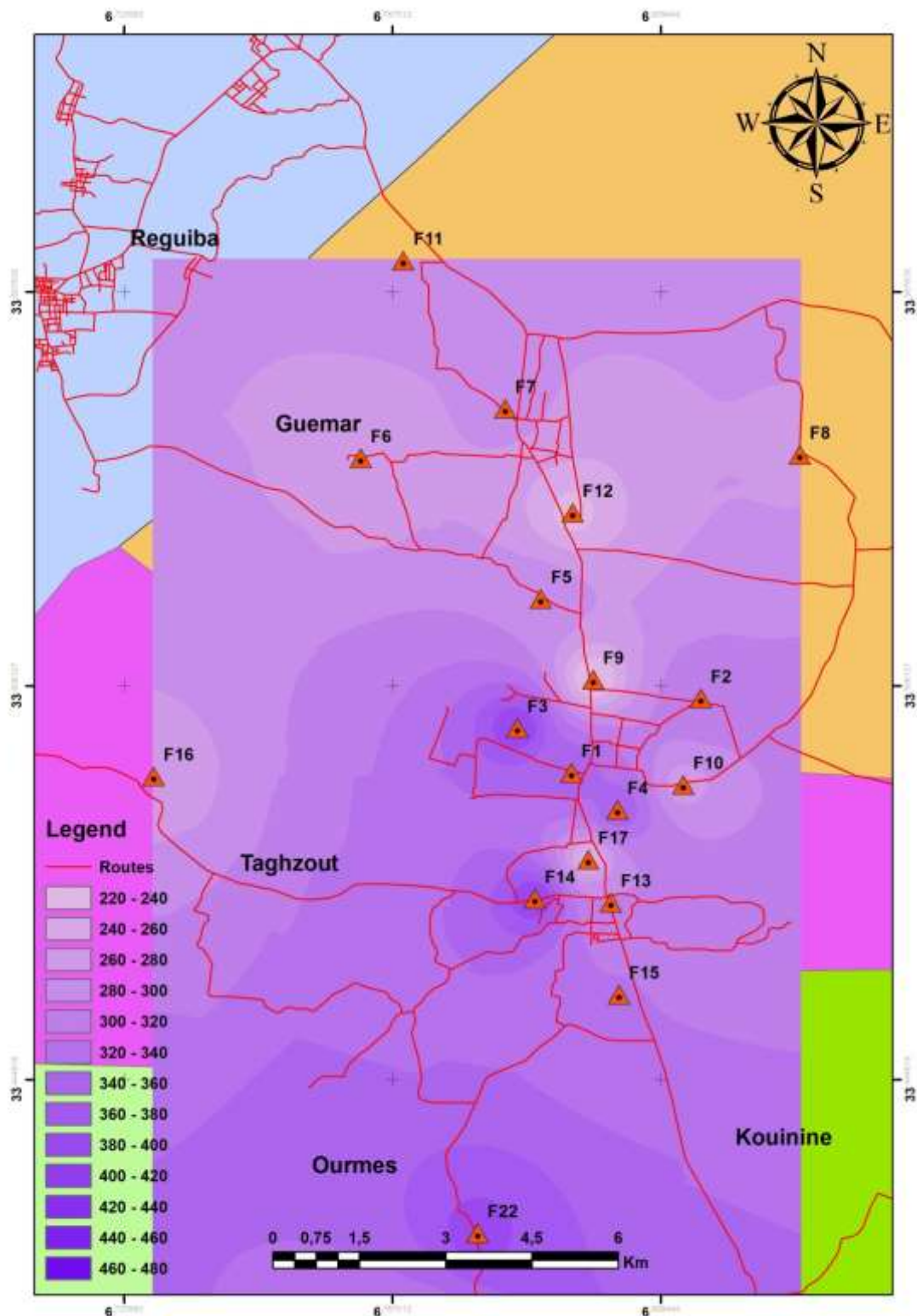


Figure N°15: Carte de calcium des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

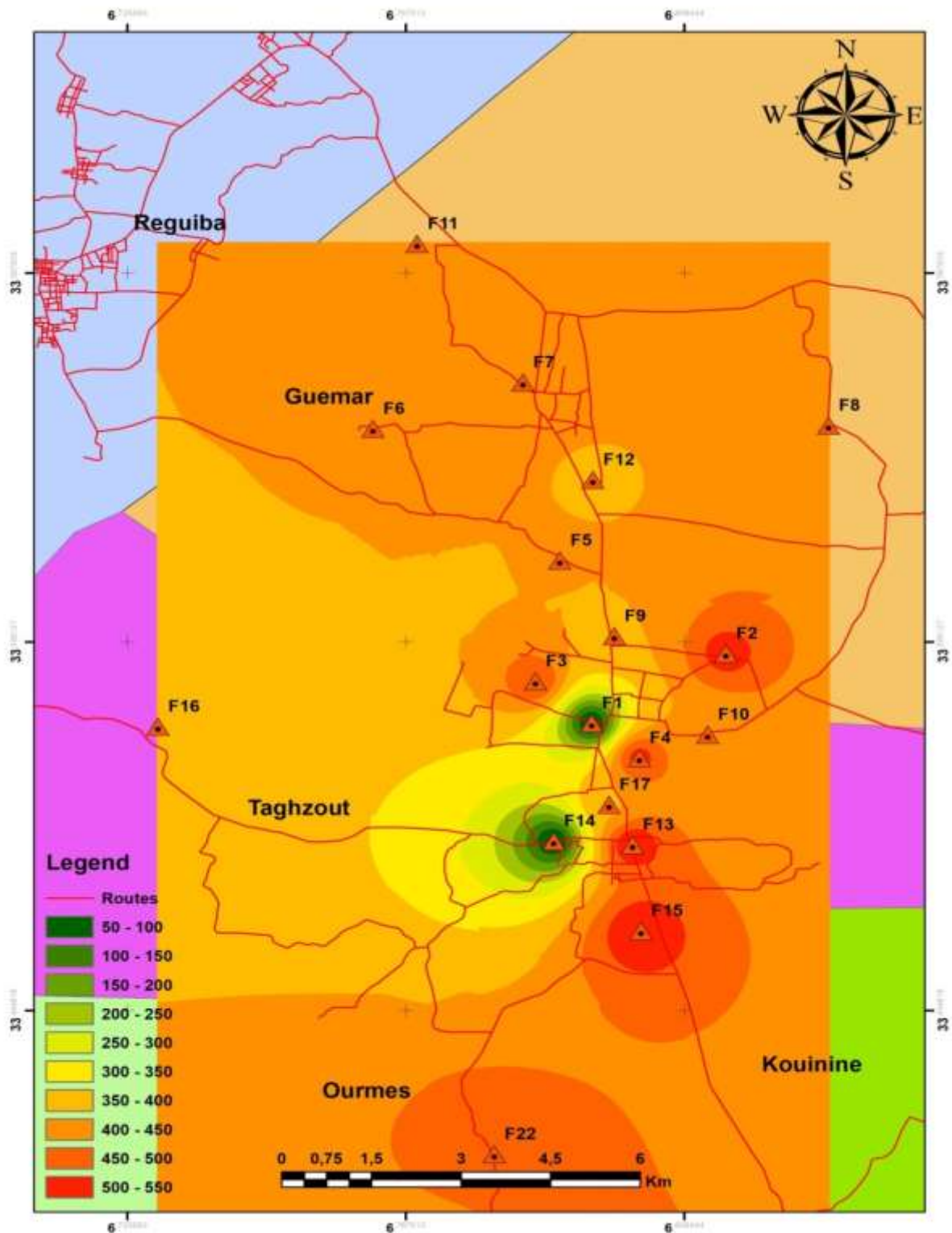


Figure N°16: Carte de sodium des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

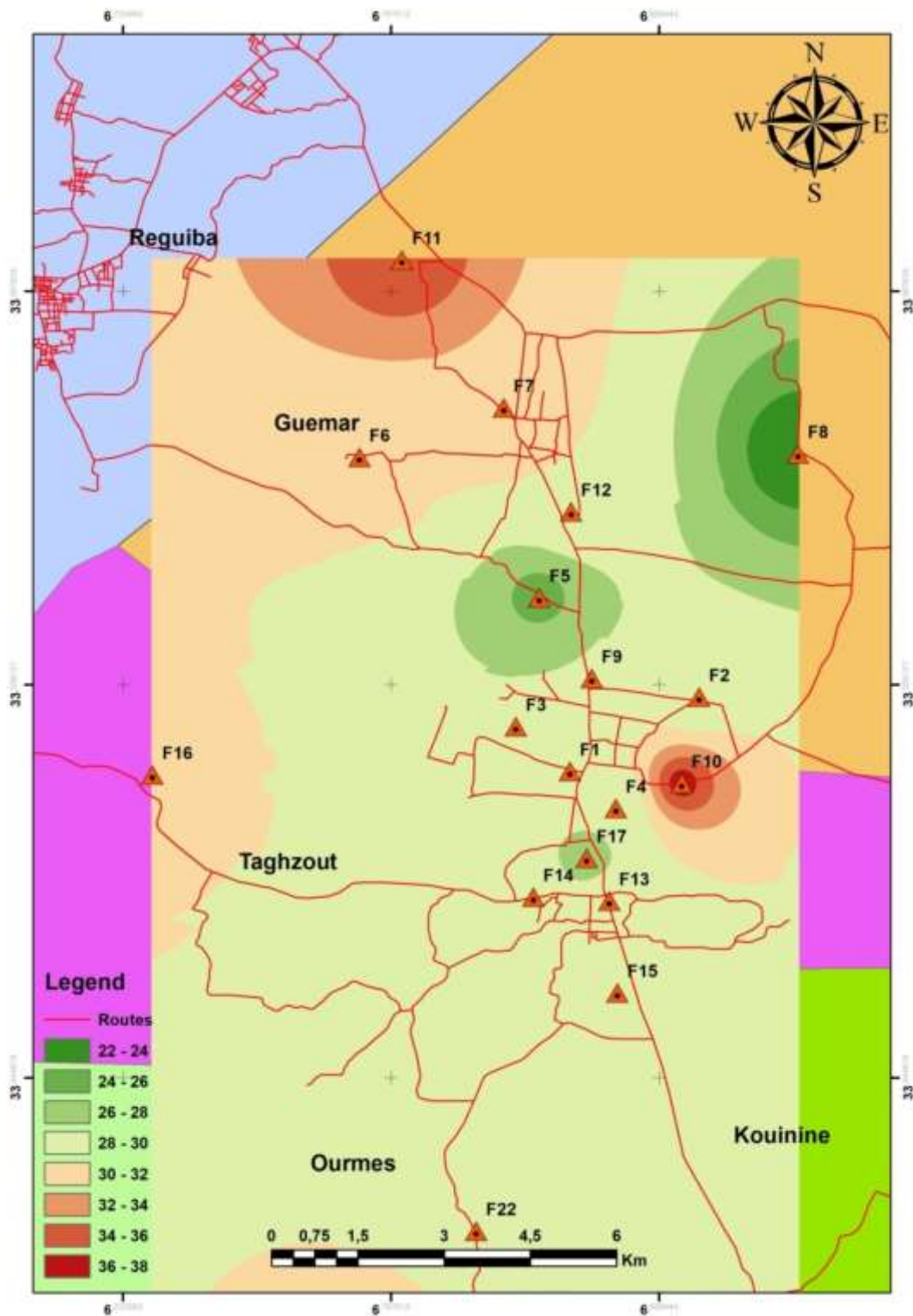


Figure N°17: Carte de potassium des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

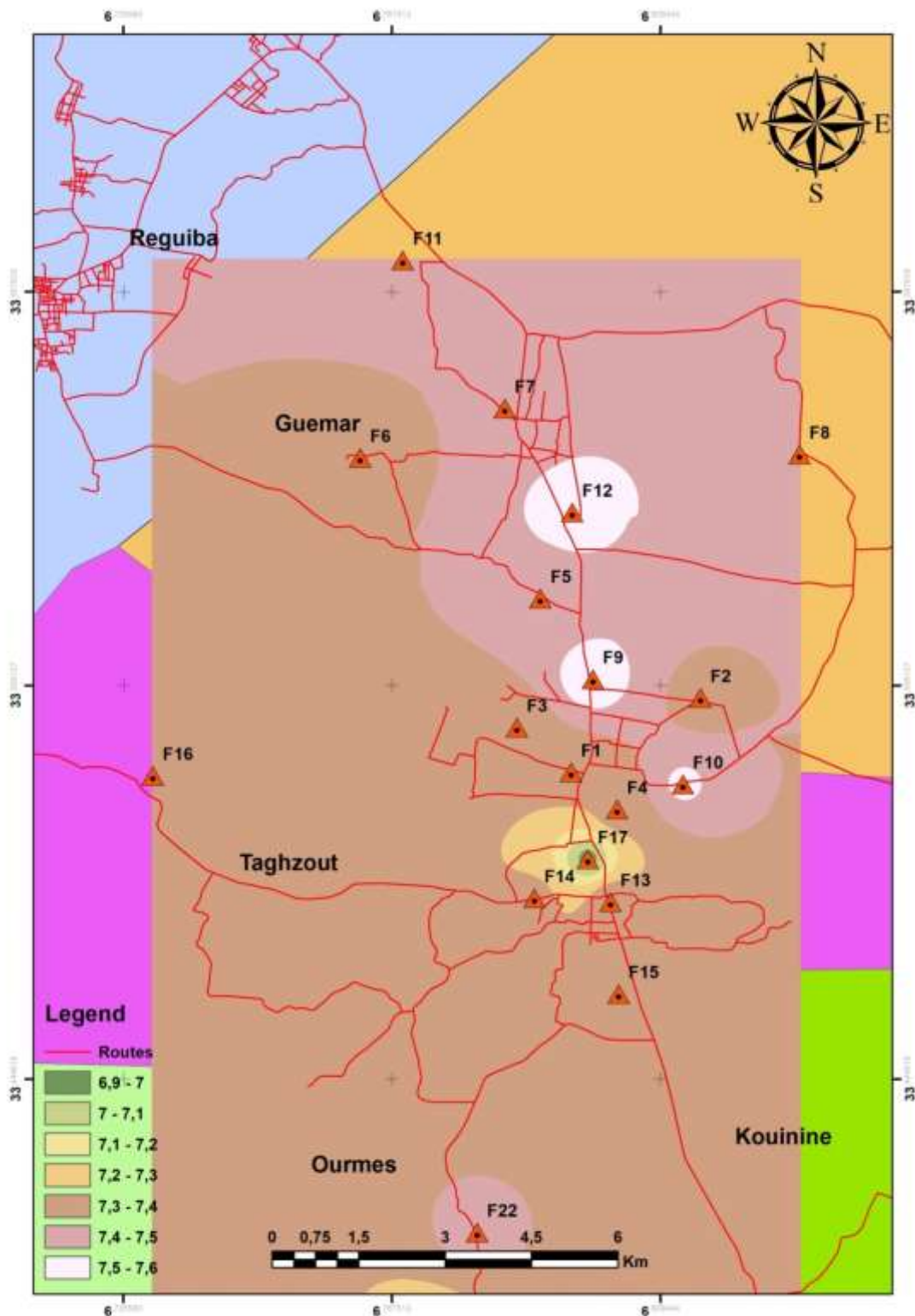


Figure N°18: Carte de PH des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

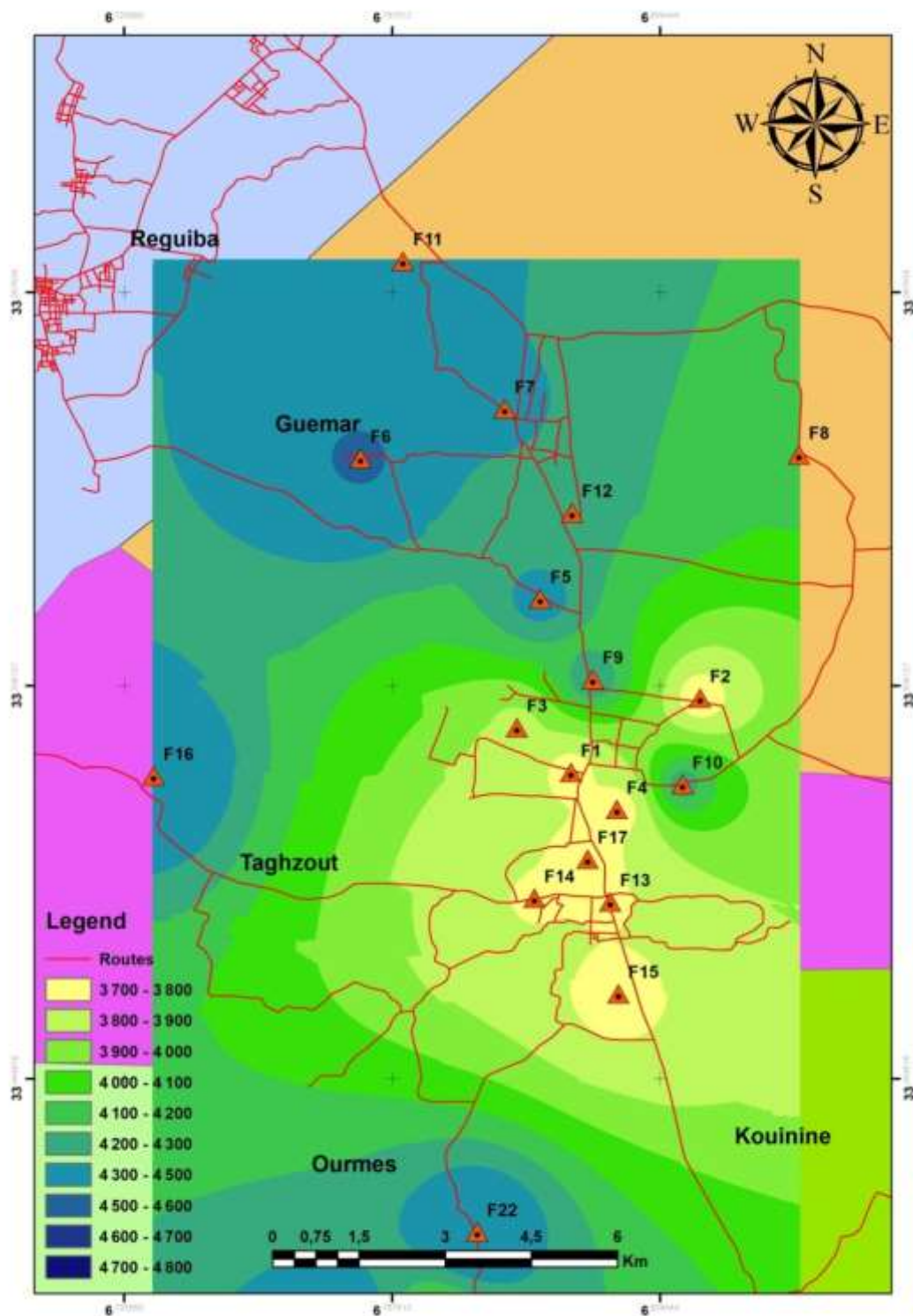


Figure N°19: Carte de CE des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar de l'année 2021.

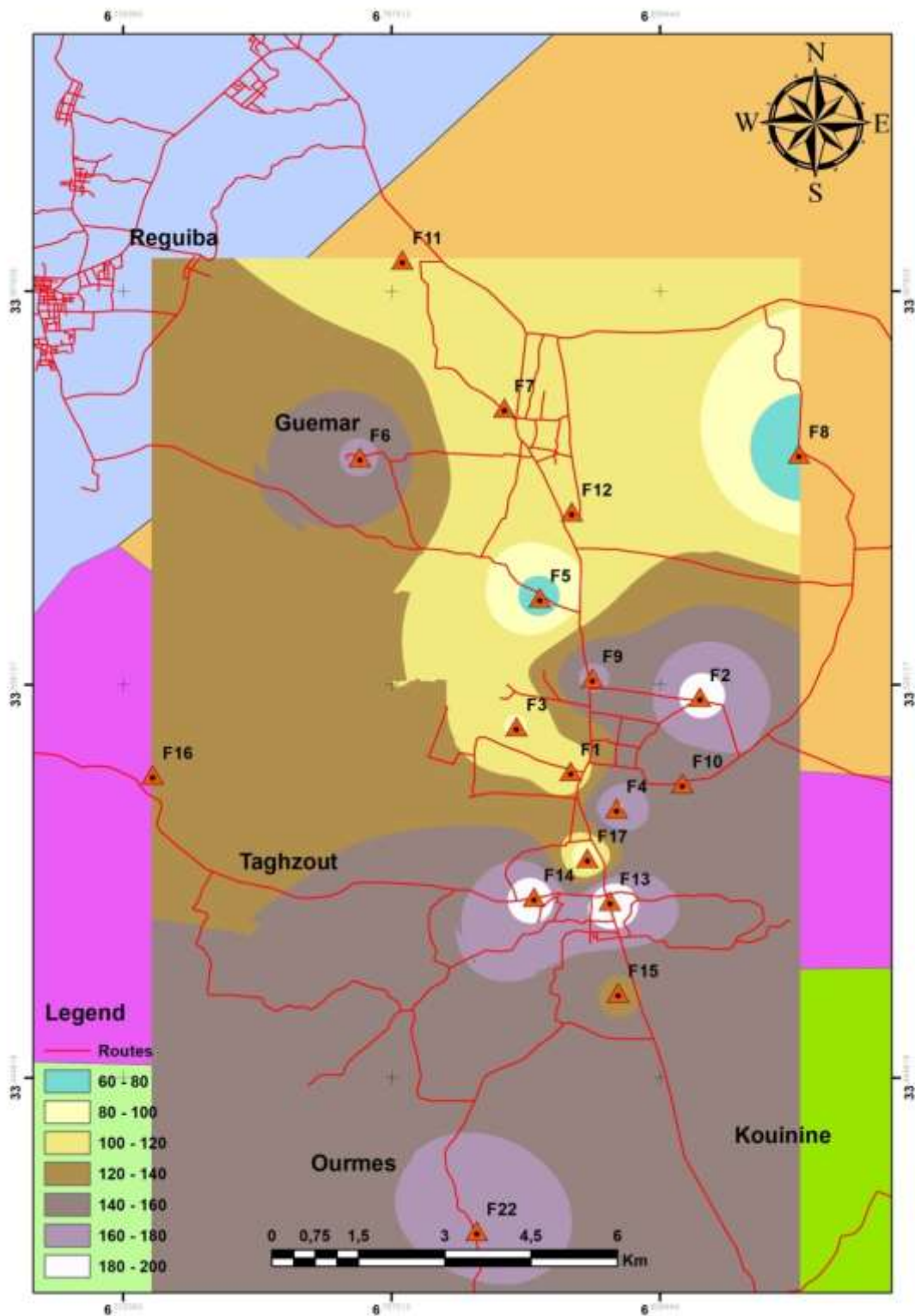


Figure N°20: Carte de magnésium des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar de d'année 2021.

III.5. 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-sodique chloruré calcique, et sulfaté-calcique, par les phénomènes de lessivage et d'évaporation.

les calcaires ont donné le faciès bicarbonaté calcique, confirmant ainsi l'alimentation latérale de la nappe, à partir des bordures calcaires.

Les conditions hydrodynamiques de la nappe ont favorisé l'acquisition de 'un faciès qui est chloruré-sodique.

Les eaux souterraines s'écoulent suivant la direction W-S vers N-E 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.5.1. Facies caractéristiques

A partir de la représentation graphique des faciès chimiques par les diagrammes de Piper et Schoeller-Berkaloff, nous constatons la dominance de faciès : chloruré-sodique,

d'un faciès chloruré et sulfaté calcique, relativement dominant, et un faciès magnésienne.

Ceci est vérifié par les teneurs dominantes des ions suivants : Cl^- , Na^+ , Ca^{+2} , HCO_3^- et SO_4^{-2} . Les deux diagrammes (Figure N°21 (A, B)) utilisent les rapports $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ et $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ (les valeurs sont exprimés en meq/l). L'interprétation de ces deux diagrammes a montré la concentration de rapport d'ion en un pôle indiquant le seule faciès : chloruré-sodique qui caractérisent la nappe à l'exceptions d'un seul point qui indique le faciès chloruré-calcique.

Nous notons l'absence des faciès bicarbonaté sodique, bicarbonaté calcique, sulfaté calcique et sulfaté sodique.

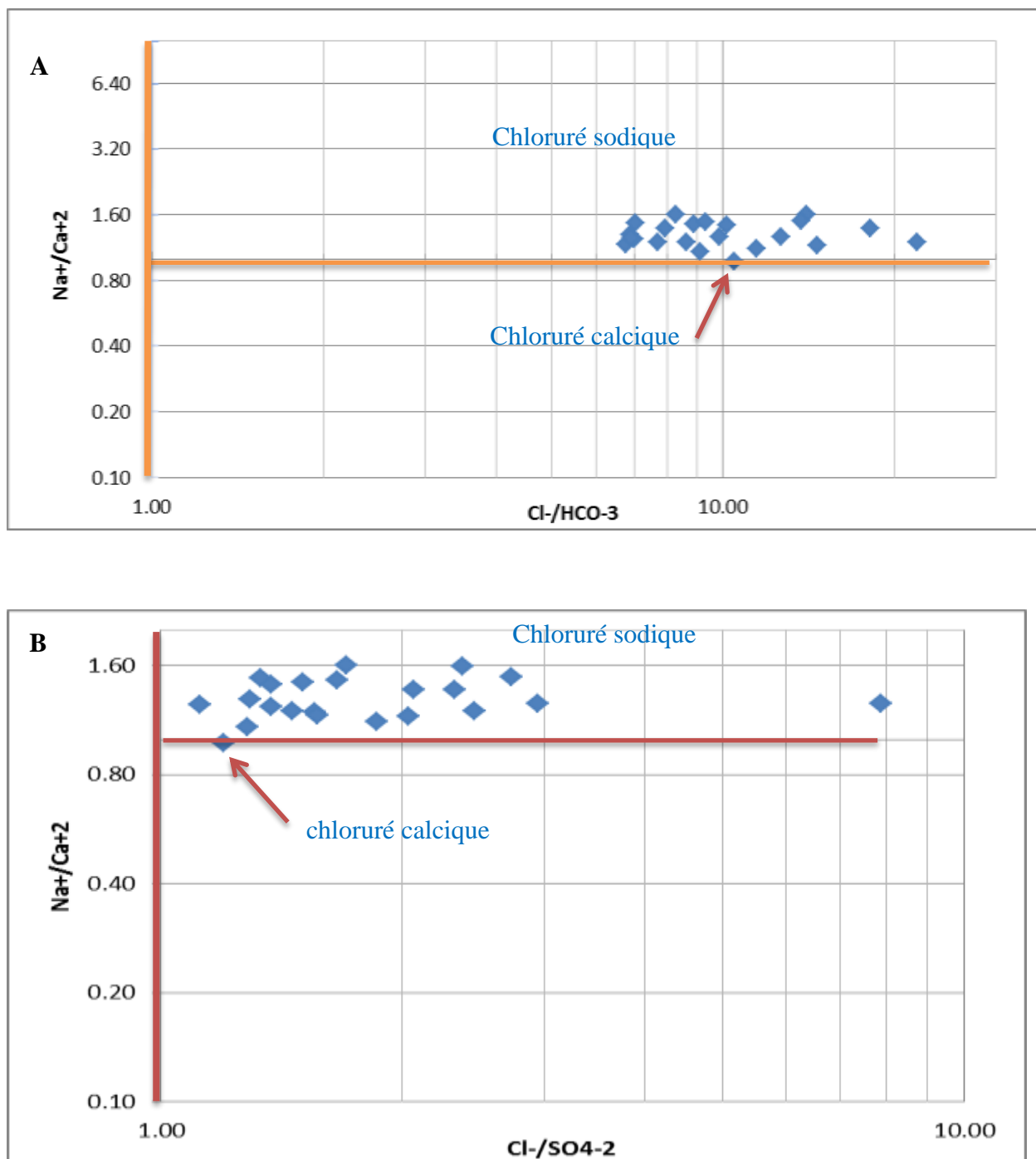


Figure N°21 (A, B) : Evolution et distribution des faciès chimiques des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

III.5.2. Origine des éléments chimiques

Les analyses chimiques ont concerné les points d'eau recensées durant l'année 2021.

III.5.2.1. Les éléments Ca^{+2} , SO_4^{-2} et 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 que toutes les points présentent un excès en Ca^{2+} , provenant de la mise en solution du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ou du CaCO_3 (calcaires).

La représentation graphique de l'évolution du calcium en fonction des bicarbonates + les sulfates montre que l'origine du calcium dans le moitié des points d'eaux ont un origine évaporitique ce qui vérifie que l'élément Ca^{++} provient de la dissolution des calcaires fissurés et des évaporites d'âge Sénonien, et le reste provenant d'origine carbonaté.

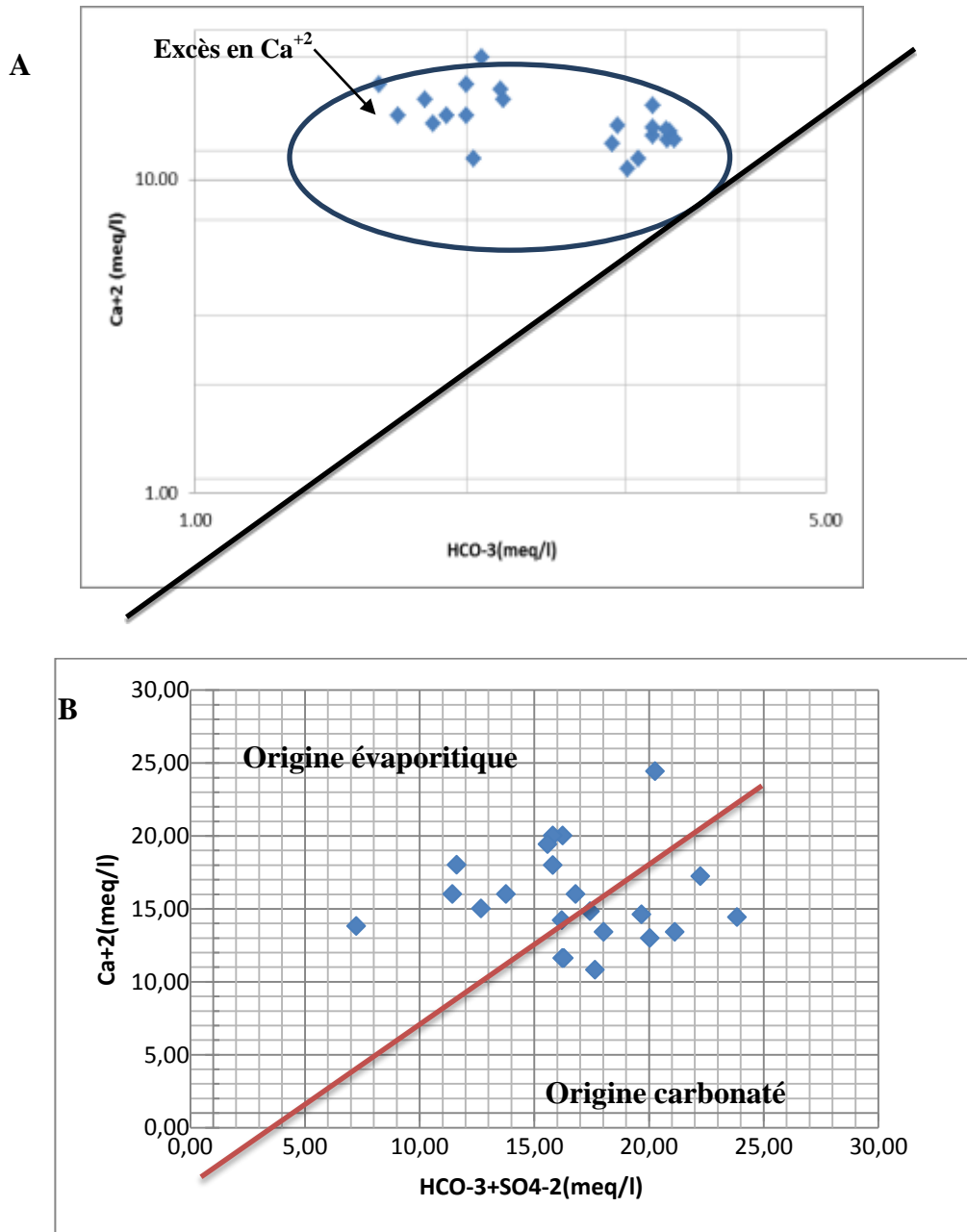


Figure N°22 (A, B) : Détermination l'origine de calcium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

III.5.2.2. Les éléments Na^+ , Cl^-

La présence des deux éléments Na^+ et Cl^- dans les eaux naturelles 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).

Pour avoir une idée sur les éléments dominants, nous avons fait une représentation graphique sur une échelle logarithmique, avec en abscisses la teneur exprimée en milliéquivalents des chlorures, et en ordonnées celle du sodium. L'examen de la figure N° 23 (A) a permis de remarquer que la majorité des points d'eau se trouve au-dessous de la droite d'une pente égale à 1. Dans ce cas, ce sont les chlorures qui l'emportent sur le sodium à cause d'un excès de dissolution de cet élément due à l'écoulement souterrain importante de ces eaux.

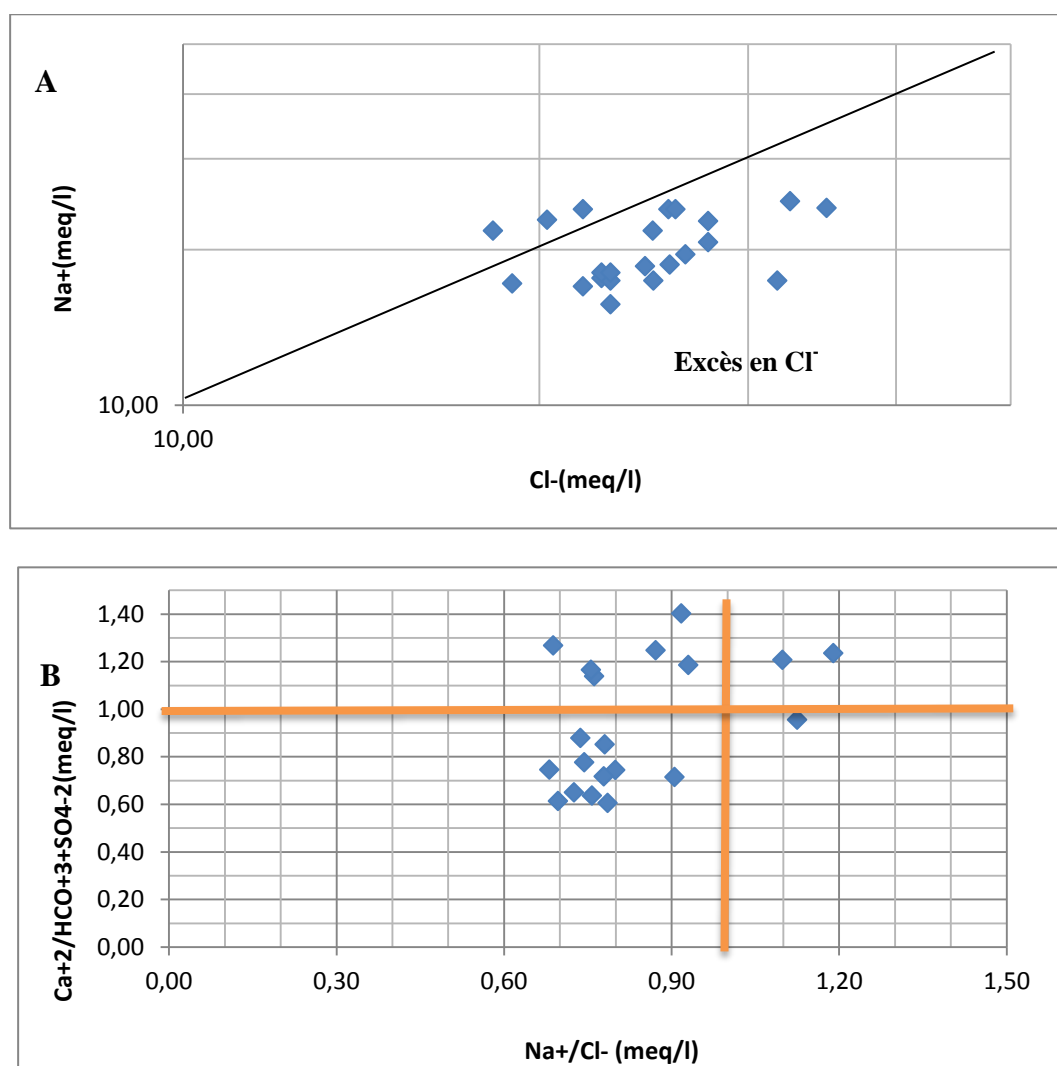


Figure N° 23 (A, B): Détermination l'origine de sodium des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021 .

III.5.2.3. Les éléments HCO_3^- , SO_4^{-2} , 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 N°24A montre 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.

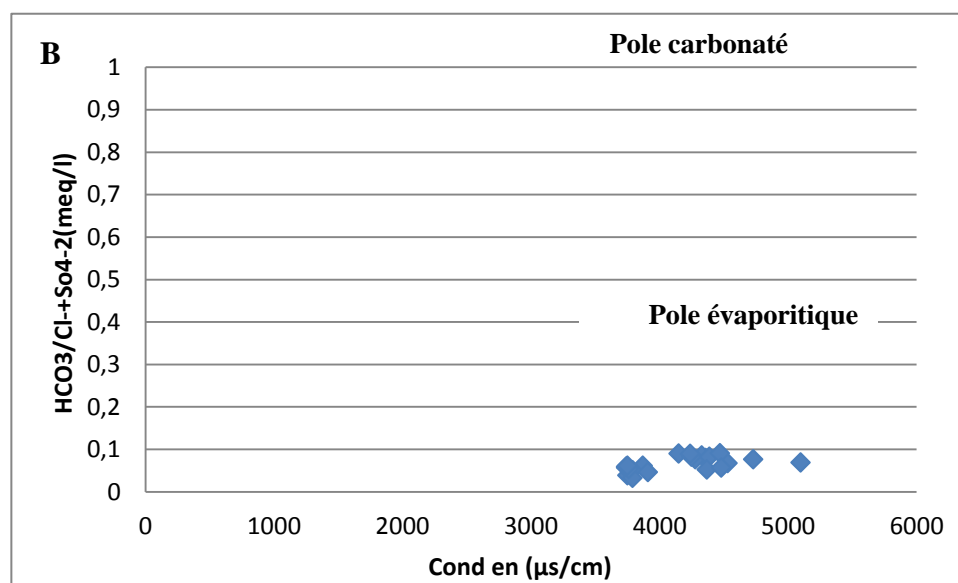
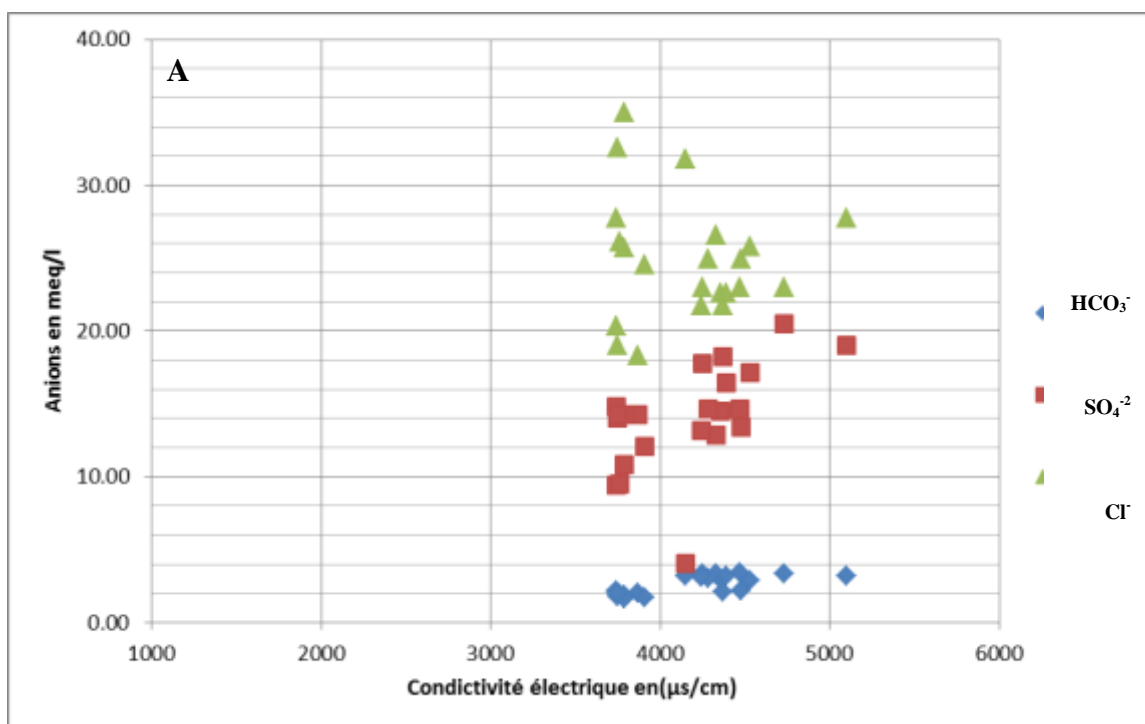


Figure N° 24 (A, B): Evolution des anions en fonction de la conductivité électrique des eaux souterraines de CT des communes de la दौरa de Guémar d'année 2021.

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 N° 24 B). Nous constatons ainsi une diminution logarithmique du rapport en fonction de la conductivité électrique, représente le pôle évaporitique avec une dominance des ions Cl^- et SO_4^{2-} . Ce pôle apparaît pour les fortes conductivités ($>3000 \mu\text{S/cm}$) et rassemble toutes les points d'eaux.

Les valeurs de la conductivité dépassent ($3000 \mu\text{S/cm}$) devient liée plus aux ions évaporitiques (Cl^- et SO_4^{2-}).

III.5.2.4. Les éléments SO_4^{2-} , Cl^-

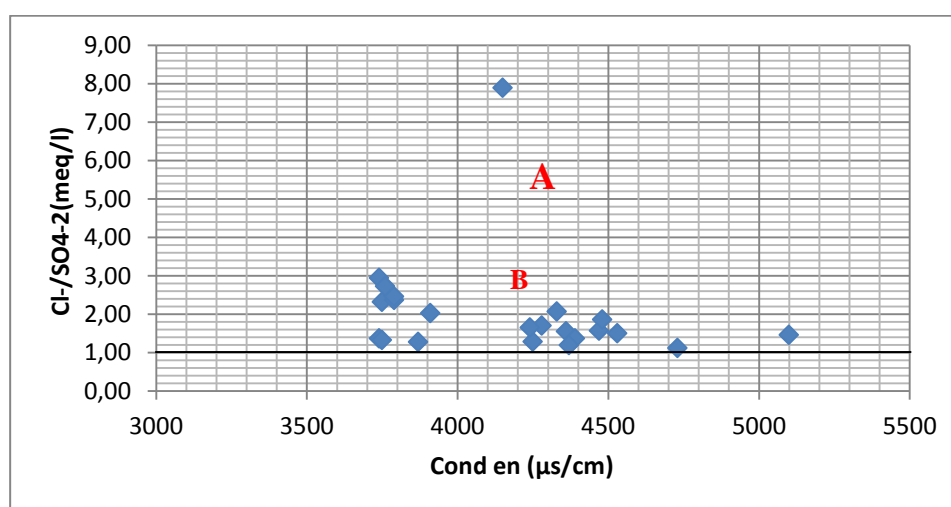


Figure N°25: Evolution des chlorures et sulfates en fonction de la conductivité électrique des eaux de CT des communes de la daïra de Guémar d'année 2021.

Le rapport $\text{Cl}^- / \text{SO}_4^{2-}$ montre que toutes les points d'eau supérieur à 1, indiquant ainsi la dominance des ions Cl^- par rapport à SO_4^{2-} , ce qui confirme la dominance du faciès chloruré calcique et sodique (Figure N°25).

III.6. Aptitude des eaux à l'irrigation

Dans les zones 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 notre zone 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 zone 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 a été établie.

III.6. 1. Classification des eaux par la méthode de Richards

Après avoir reporté tous les points d'eau sur le diagramme de Richards (voir figure N°26), selon la conductivité électrique et la valeur du SAR,

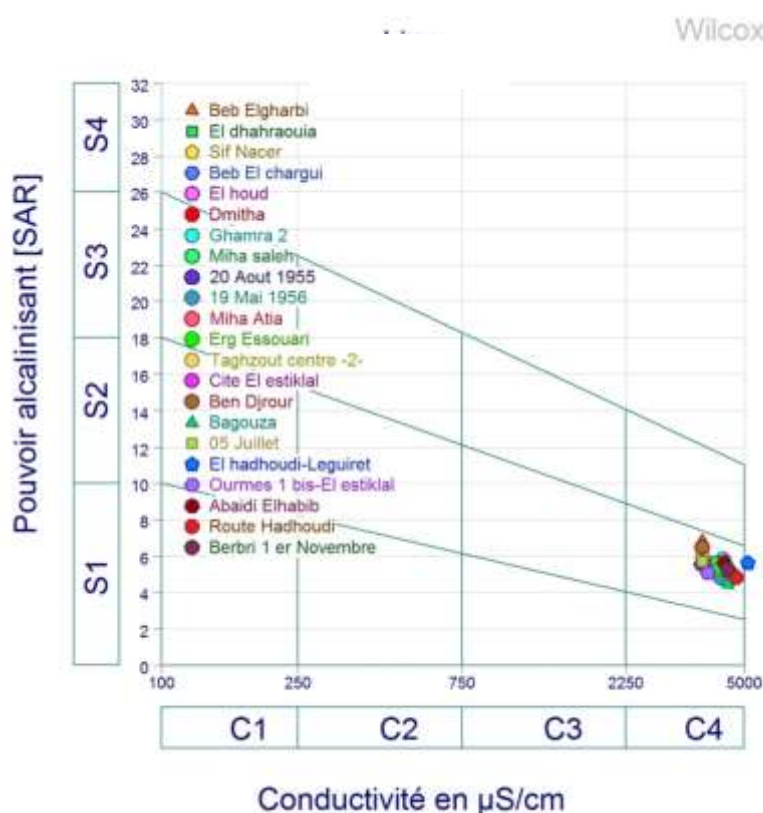


Figure N°26: Diagramme de Richards des eaux souterraines de la nappe de CT des communes de la daïra de Guémar pour l'année 2021.

Nous observons que toutes les eaux se situent dans la classe C4-S2, qui définit une eau de salinité très élevée (C4) qui ne convient pas à l'irrigation en conditions ordinaires. Ces eaux ne peuvent être utilisées que pour l'irrigation des sols perméables avec un bon drainage. À défaut de ces critères l'eau présente un danger d'alcalisation des sols à textures fines. Seules les plantes tolérantes aux sels (dattier, olivier, tabacs, orge, coton, et artichaut...) peuvent être cultivées.

III.6. 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 N°27). Le %Na⁺ est défini par la relation :

$$\text{Na}^+ \% = (\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} + \text{Na}^+ + \text{K}^+) \quad (05)$$

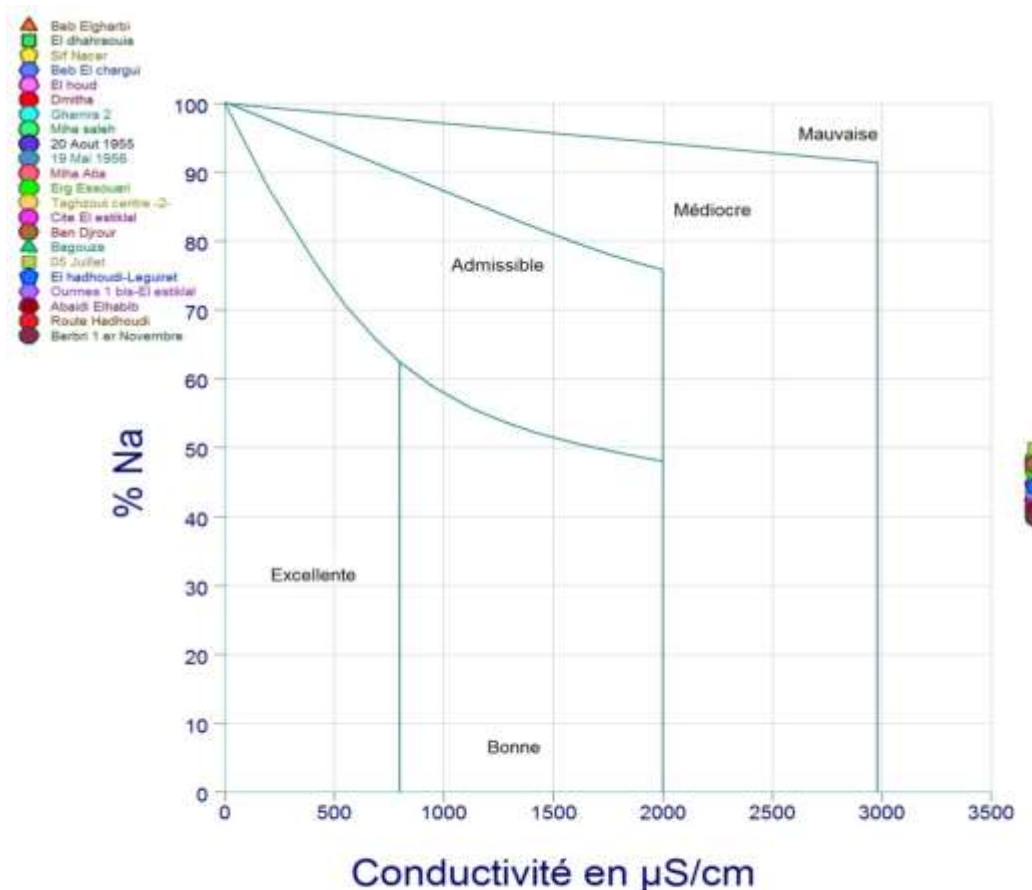


Figure N°27: Diagramme de Wilcox des eaux souterraines de la nappe de complexe terminale des communes de la daïra de Guémar pour l'année 2021.

Les diagrammes montrent que toutes les eaux souterraines de la nappe des communes de la daïra de Guémar selon la classification de Wilcox, appartiennent aux classes Mauvaise (Tableau 24).

Nous constatons que les eaux souterraines subissent une dégradation selon l'effet de la lithologie sur leur qualité.

III.7. Conclusion

L'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe du complexe terminale des communes de la daïra de Guémar pour l'année 2021 permet de dire que :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence d'un faciès dominants, qui est le chloruré 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 (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales de la zone, a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , 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

INTERPOLATION SPATIALE DES
TENEURS DES PARAMETRES
CHIMIQUES PAR LA METHODE DU
KRIGEAGE

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

IV.1.INTRODUCION

L'interpolation est le procédé qui vise à cartographier une variable V_{OV_0} à des positions dans l'espace où aucun échantillon n'est disponible en utilisant un jeu de données d'échantillons dont la position dans l'espace et la valeur de la variable V_{OV_0} sont connues. Ces échantillons peuvent provenir d'une campagne d'échantillonnage sur le terrain ou peuvent être des informations issues de capteurs fixes ou mobiles à l'intérieur d'une parcelle. Généralement, dans les études hydrochimiques de précision, un ensemble d'informations est disponible au sein d'une parcelle (les échantillons) et l'objectif est de construire une carte de cette information sur la totalité de la parcelle. En général, seuls quelques échantillons sont disponibles parce que les campagnes de terrain sont pénibles et chronophages ou parce que le déploiement d'une grande quantité de capteurs serait beaucoup trop cher à mettre en œuvre. Bien sûr, il n'est de toute façon pas possible de collecter des informations sur chaque centimètre carré de parcelle par échantillonnage.

Les techniques d'interpolation spatiale peuvent être séparées en deux principales catégories : les approches déterministes et géostatistiques. Pour faire simple, les méthodes déterministes n'essayent pas de capturer la structure spatiale des données. Elles utilisent seulement des équations mathématiques prédéfinies pour prédire des valeurs à des positions où aucun échantillon n'est disponible (en pondérant les valeurs attributaires des échantillons dont la position dans la parcelle est connue). Au contraire, les méthodes géostatistiques cherchent à ajuster un modèle spatial aux données. Cela permet de générer une valeur prédite à des positions non échantillonnées dans la parcelle (comme les méthodes déterministes) et de fournir aux utilisateurs une estimation de la précision de cette prédiction. Les approches géostatistiques regroupent le krigeage et ses dérivés. Toutes les méthodes d'interpolation sont basées sur le fait que les données spatiales sont auto-corrélées. Tout est relié à tout le reste, mais les choses proches partagent plus de caractéristiques que des choses distantes. Les méthodes d'interpolation peuvent être utilisées pour prédire des valeurs à des positions spécifiques dans l'espace ou peuvent être utilisées sur une grille d'interpolation sur l'ensemble de la parcelle considérée. Cette grille est composée de pixels régulièrement espacés dont la taille peut dépendre de la précision recherchée dans la carte interpolée ou bien de la structure spatiale du jeu de données.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

IV.2. Krigeage :

Le krigeage est l'approche géostatistique la plus utilisée pour réaliser des interpolations spatiales. Les techniques de krigeage sont basées sur la définition d'un modèle spatial entre les observations (défini par un variogramme) pour prédire les valeurs attributaires d'une variable à des positions où aucun échantillon n'est disponible. Une des spécificités du krigeage est qu'il ne considère pas seulement la distance entre les observations (comme pour les méthodes déterministes) mais qu'il essaye aussi de capturer la structure spatiale des données en comparant deux à deux les observations séparées par des distances spatiales spécifiques. L'objectif est de comprendre les relations existantes entre les observations séparées par des distances différentes dans l'espace. Toute cette information est prise en compte par le variogramme. Les méthodes de krigeage utilisent cette information pour attribuer un poids à chaque échantillon avant de réaliser les prédictions. Il faut noter que les techniques de krigeage permettent de préserver les valeurs attributaire des échantillons sur la carte interpolée (Fig.28).

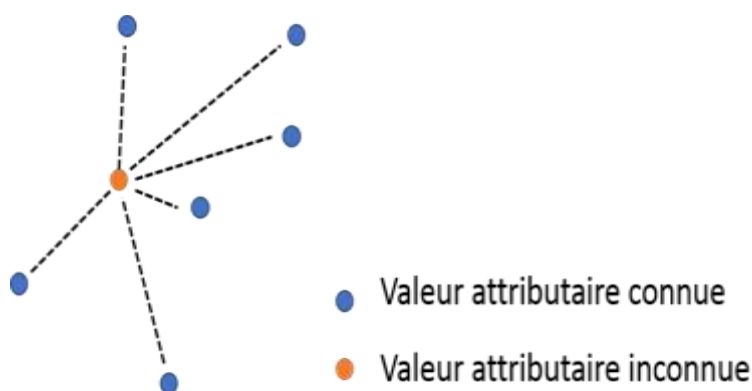


Figure N°28. Principe de l'interpolation

Les méthodes de krigeage considèrent que le processus qui a donné naissance aux données peut être séparé en deux composantes principales : une tendance déterministe (les variations à large échelle) et une erreur auto-corrélée (les résidus):

$$Z(s)=m+e(s)Z(s)=m+e(s) ;$$

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

Où $Z(s)$ est la valeur attributive à la position s dans la parcelle, m est la tendance déterministe qui ne dépend pas de la position des données dans l'espace et $e(s)$ qui est le terme d'erreur auto-corrélée (qui dépend de la position s).

Le variogramme est seulement calculé sur les résidus qui sont supposés être auto-corrélés. En gros, quand on cherche à ajuster un modèle de variogramme aux données, on essaye en réalité d'ajuster ce modèle aux résidus de ces données, après que la tendance ait été enlevée.

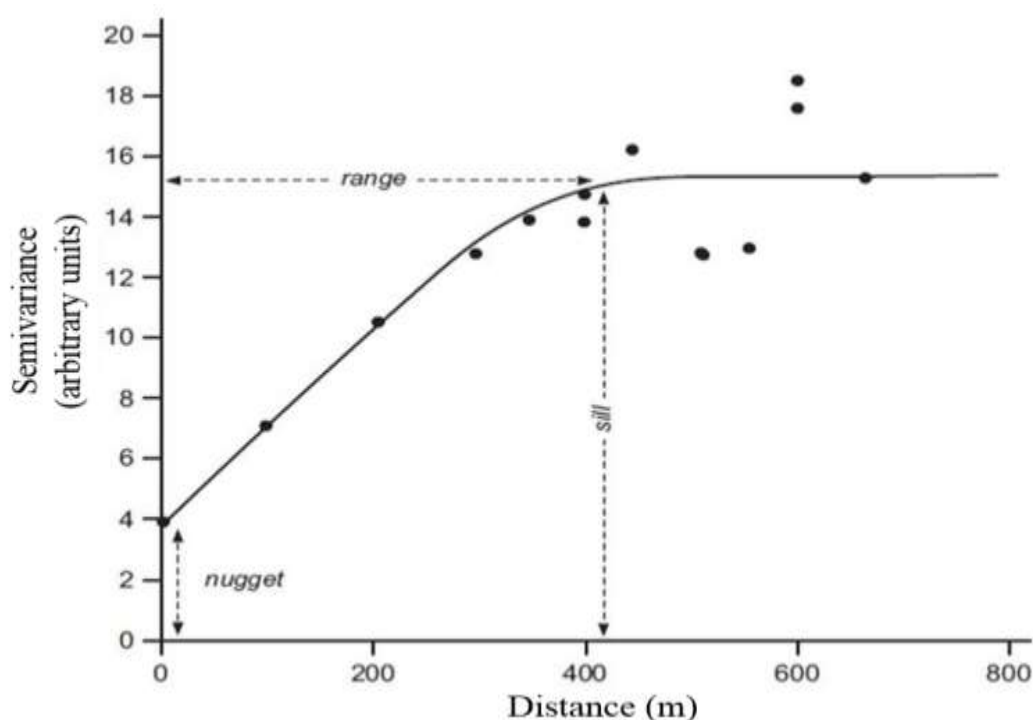


Figure N°29 : Les paramètres du variogramme

Grâce à l'utilisation du variogramme, une carte d'erreur peut être dérivée sur l'ensemble de la parcelle parce que les relations entre deux observations séparées par une distance h sont connues. La carte d'erreur est un outil très utile parce qu'elle donne accès à la qualité de la prédiction sur la totalité de la parcelle. Prenez en compte que la qualité de la carte d'erreur dépend bien évidemment de la qualité d'ajustement du modèle de variogramme aux données.

IV .2.1 Krigeage simple

Comme le nom le laisse à penser, le krigeage simple est la méthode dérivée du krigeage la plus facile à mettre en œuvre. Ici, la tendance déterministe, m , est connue et considérée constante sur la totalité de la parcelle d'étude (Fig. 30).

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

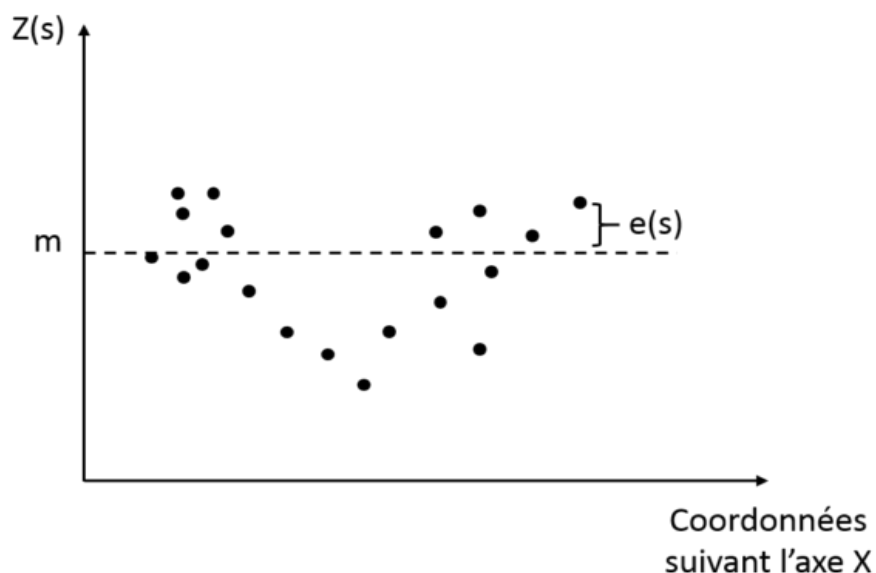


Figure N°30. Krigeage simple et tendance et résidus correspondants

Cette méthode est globale parce qu'elle ne prend pas en compte les variations locales de cette tendance. Néanmoins, s'il n'y a pas de changements brusques dans les attributs de la variable d'intérêt (ou s'il n'y a pas de raisons qu'il n'y en ait), cette hypothèse peut être viable et pertinente.

IV .2.2.Krigeage ordinaire:

Cette méthode est peut-être l'approche de krigeage la plus largement reportée. Contrairement au krigeage simple, cette technique considère que la tendance est constante mais seulement au niveau d'un voisinage local (Fig. 31). Cette hypothèse est intéressante parce qu'elle assure de prendre en compte les variations locales au sein d'une parcelle. Le krigeage ordinaire peut être exprimé de la façon suivante :

$$Z(s)=m(s)+e(s)Z(s)=m(s)+e(s) ;$$

Ici, la tendance dépend de la position spatiale des observations ($m(s)$). Cette tendance constante est considérée inconnue et doit être déterminée à partir du voisinage de données correspondant.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

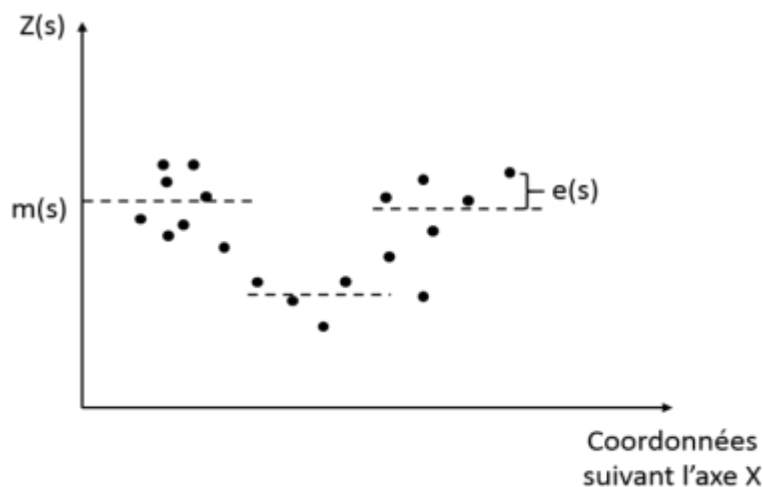


Figure N°31. Krigeage ordinaire et tendance et résidus correspondants

IV .2.3.Krigeage universel ou à tendance externe

Le krigeage par régression a plusieurs noms : le *krigeage universel* ou le *krigeage avec une tendance externe*. Cette méthode est similaire au krigeage ordinaire dans le sens où la tendance n'est pas constante sur la totalité de la parcelle mais dépend de la position des observations dans l'espace. Néanmoins, ici, la tendance est modélisée par une fonction plus complexe, elle n'est pas simplement considérée constante au sein d'un voisinage local (Fig. 32). L'objectif est le même que précédemment : enlever la tendance des données pour que les résidus auto-corrélés puissent être étudiés. A la fin de l'interpolation, la tendance est rajoutée aux résidus interpolés.

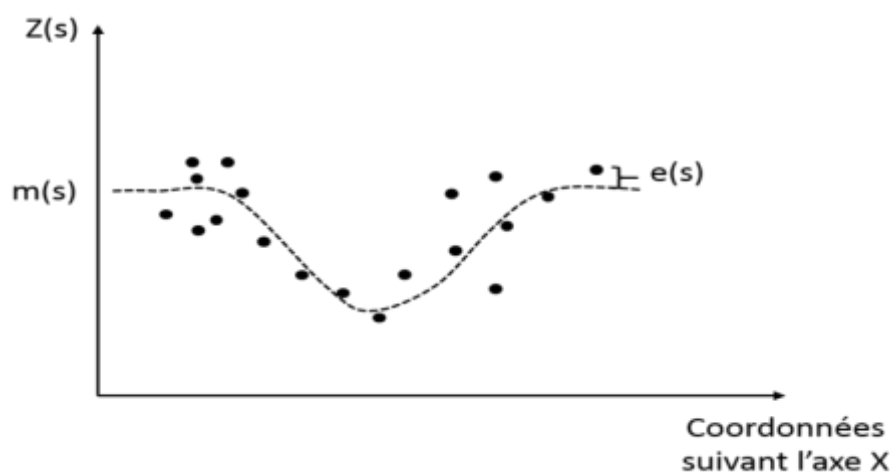


Figure N°32: Krigeage par régression et tendance et résidus correspondants

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

IV .3.Krigeage par point et krigeage par bloc:

Toutes les méthodes de krigeage mentionnées précédemment ont pour vocation de prédire la valeur d'une variable d'intérêt à des positions où aucun échantillon n'est disponible. Ces positions peuvent être considérées comme des points dans l'espace (ou plus précisément comme des pixels de la grille d'interpolation avec un pixel = une valeur). Par conséquent, ces approches de krigeage peuvent être comprises comme des méthodes de *krigeage par point*. Quand l'incertitude de la prédiction est relativement large, on pourrait vouloir chercher à lisser les résultats interpolés en réalisant un krigeage sur une surface plus large qu'un tout petit pixel. Ce type de krigeage est connu sous le nom de *krigeage par bloc*. Cela a l'avantage de diminuer la variance de l'erreur de prédiction parce que l'information est plus grossière (elle est prédite sur un support spatial plus grand). Bien évidemment, avec le block kriging, il y a un risque de perdre de l'information utile mais quand l'incertitude est forte, cette approche peut être très pertinente.

Avant de terminer ce post, il est important de préciser que toutes les techniques d'interpolation qui ont été présentées produisent des résultats relativement similaires dans les cas idéaux (beaucoup d'échantillons disponibles et bien disposés dans la parcelle, peu de bruit dans les données et pas de variations brusques au sein de la parcelle). Néanmoins, quand ces conditions ne sont pas respectées, les méthodes géostatistiques sont intéressantes parce qu'elles permettent de capturer la structure spatiale sur l'ensemble de la parcelle, ce qui conduit généralement à des prédictions plus précises. Ces méthodes sont plus difficiles à mettre en place parce qu'il est nécessaire de construire un modèle spatial et de l'ajuster aux données mais cela peut permettre de mieux caractériser les parcelles. Quand la structure spatiale est faible (lorsque le bruit est important), presque toutes les méthodes d'interpolation auront tendance à lisser les données dans une plus ou moins grande mesure. Cela doit être gardé à l'esprit avant d'interpoler des observations spatiales parce que les cartes interpolées pourraient paraître plus homogènes qu'elles ne le sont vraiment. On peut rajouter que les techniques d'interpolation peuvent être également utilisées pour sous-échantillonner (le plus souvent) ou sur-échantillonner une image ou une carte. L'objectif est de changer la résolution d'une carte ou d'une image disponible.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

IV .4.Résultats et interprétation :

Dans notre étude releva en 2021, 22 points d'eaux. Ces points englobent la quasi-totalité de la zone d'étude. Toutes les figures illustrées dans ce chapitre ont été réalisé par logiciel Surfer 13.

Nous illustrons dans cette partie de travail des cartes des valeurs krigées qui sont représentatives des valeurs calculées par interpolation à partir des données de terrains, obtenue après modélisation des variogramme, selon la méthode de krigeage. L'allure de ce variogramme construit avec un pas de 300 m.

Les données mesurées sont les teneurs des paramètres chimiques des eaux souterraines de la région d'étude.

IV .4.1.Interpolation des teneurs en sodium Na en mg/l:

- Caractéristique statistiques :

Tableau N°07 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Na en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	50
Max	555
Moy	416,54
Médiane (2 ^{ème} quartile)	421
1 ^{er} quartile	400
3eme quartile	500
Erreur standard	28,12
Ecart-type	131,92
Variance	17403,11
Intervalle de confiance 95%	58,50
Intervalle de confiance 99%	79,62
Coefficient de variation	0,316%

Pour 22 points de mesures nous n'avons pas une grande différence entre la médiane (valeur centrée) (421 mg /l) et la moyenne (416,54 mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,316%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 131,92 mg /l.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

- **Variogramme des teneurs en Na (mg/l) :**

La fonction calcule la différence attributive entre des données voisines séparées par une distance hh pour évaluer si ces observations présentent une information similaire.

L'étude variographique a été réalisée en combinaison des trois modèles mathématiques Gaussien, Sphérique et linéaire. L'allure de ce variogramme est présenté dans la figu N°33 . On observe que le variogramme tend vers 0 pour des petites distances. Nous montre l'absence de l'effet de pépite. Nous observons que le pallier partiel n'est pas important par rapport à l'effet pépite, donc la structure spatiale n'est pas forte. Le pallier est la variance du jeu de données et peut être calculé comme la somme de l'effet pépite et du pallier partiel. La courbe (fig : N°33) présente une allure irrégulière.

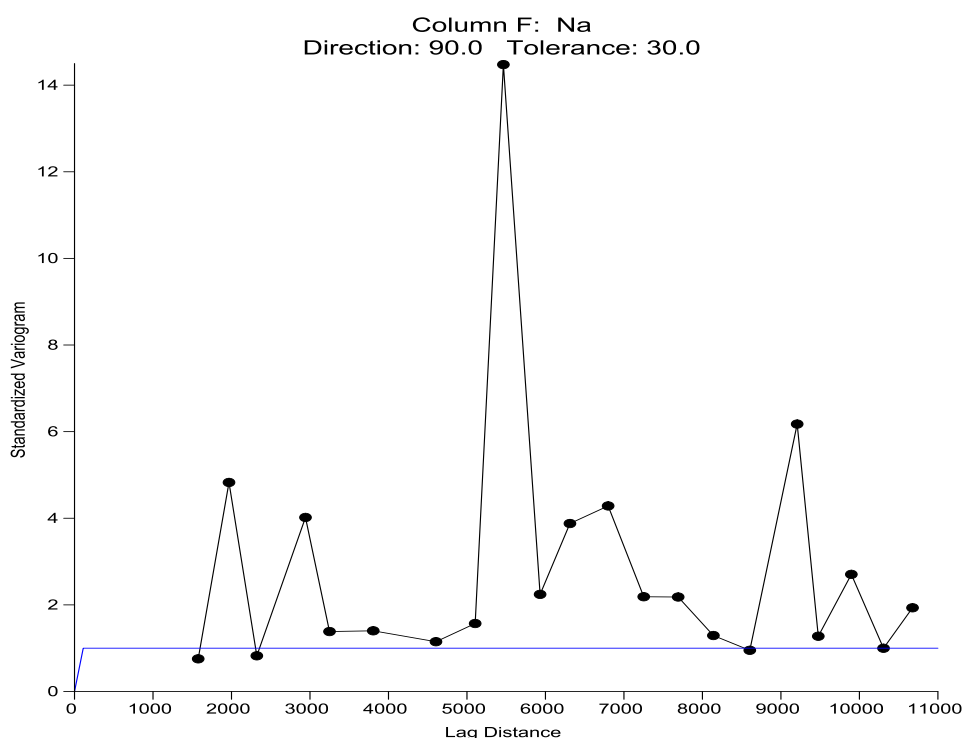


Figure N°33 : Variogramme moyen des teneurs en Na (mg/l) 2021 ;

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneuses en Na établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (fig : N°34) que les concentrations varient entre 50 et 550 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

la plupart de l'aquifère de la plaine, à cause de l'effet de l'évaporation. Les faibles concentrations se localisent centre la zone d'étude.

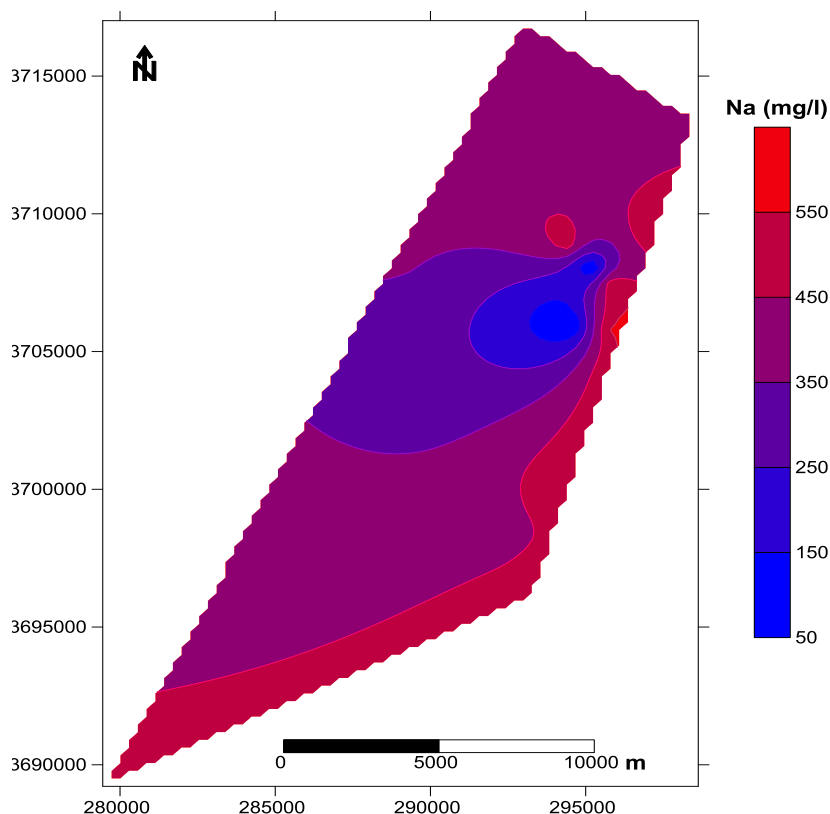


Figure N°34 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en Na (mg/l) ;

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°08 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en sodium

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	577,09	74,07	391,26	73,86	0,188

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 07, on constate :

Que la valeur maximale krigée est proche à la valeur maximale observée ; 577,09 mg/l

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

krigée et 555 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles a peu près identiques : 391,26 mg/l krigée et 416 mg/l mesurée.

IV .4.2. Interpolation des teneurs en calcium Ca en mg/l:

- **Caractéristique statistiques :**

Tableau N°09 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Ca (mg/l) en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	216,4
Max	489
Moy	314,76
Médiane (2 ^{eme} quartile)	298,6
1 ^{er} quartile	268,5
3eme quartile	360
Erreur standard	13,98
Ecart-type	65,60
Variance	4303,83
Intervalle de confiance 95%	29,09
Intervalle de confiance 99%	39,59
Coefficient de variation	0,20%

Pour 22 points de mesures nous avons une petite différence entre la médiane (valeur centrée) (298,6 mg /l) et la moyenne (314,76 mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,20%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 65,60 mg /l.

- **Variogramme des teneurs en Ca (mg/l) :**

L'étude variographique a été réalisée en combinaison des trois modèles mathématiques Gaussien, Sphérique et linéaire. L'allure de ce variogramme construit avec un pas de 1Km est présentée dans la figure N°35. On observe que le comportement du variogramme à l'origine nous montre l'absence de l'effet de pépite. Ceci est dû au fait que le variogramme est capable de capturer l'ensemble de la structure spatiale dans la parcelle. La courbe (fig.35) présente une allure irrégulière.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

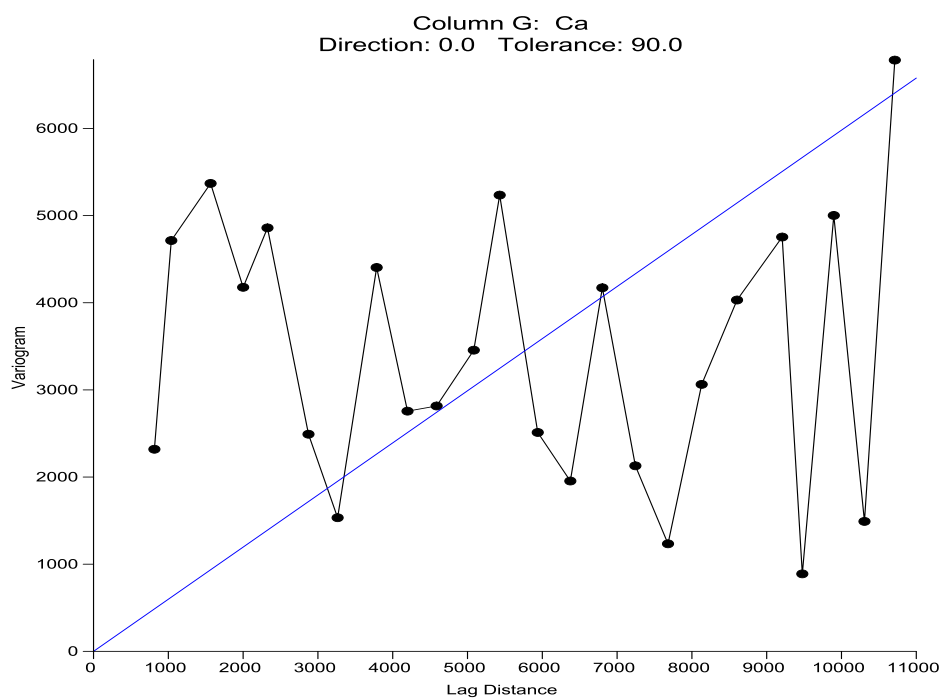


Figure N°35 : Variogramme moyen des teneurs en Ca (mg/l) 2021 ;

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneurs en Ca établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (fig N°36) que les concentrations varient entre 216 mg/l et 489 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 bicarbonate. Les fortes concentrations se localisent centre la zone d'étude.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

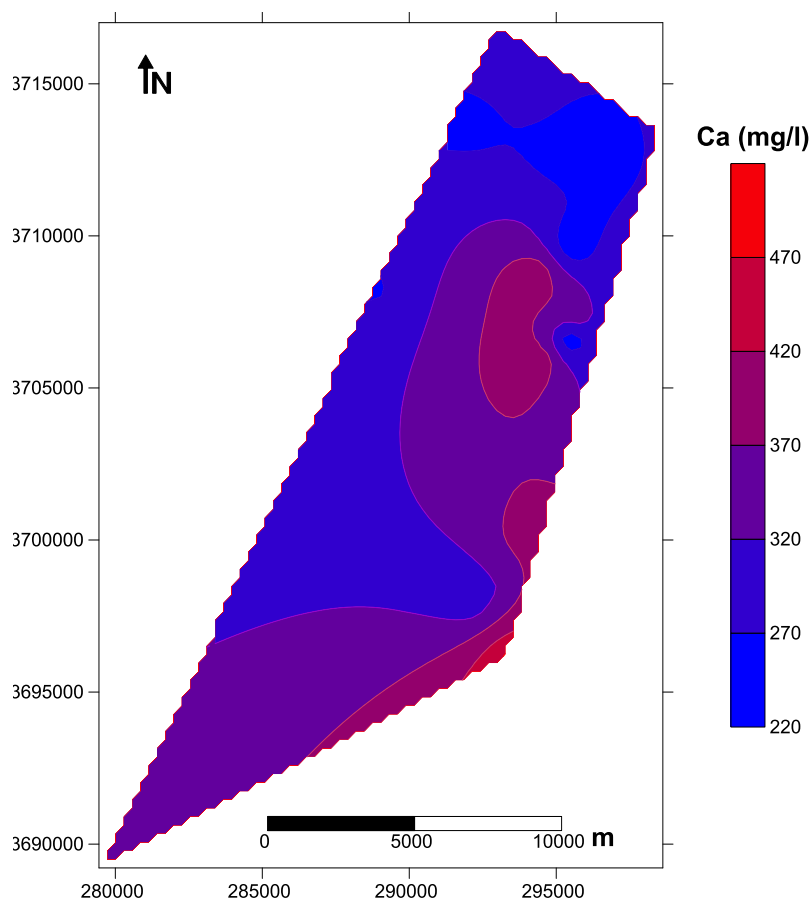


Figure N°36 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en Ca (mg/l) ;

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°10 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en calcium

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	471,61	221	322,88	36,99	0,11

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 09, on constate :

Que la valeur maximale krigée est proche à la valeur maximales observée ; 471,61 mg/l krigée et 489 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles a peu près

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

identiques : 322,88 mg/l krigée et 314,76 mg/l mesurée.

IV .4.3. Interpolation des teneurs en magnésium Mg en mg/l:

- Caractéristique statistiques :

Tableau N°11 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Mg (mg/l) en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	65,6
Max	206,6
Moy	135,16
Médiane (2 ^{ème} quartile)	133,35
1 ^{er} quartile	102
3eme quartile	165,3
Erreur standard	8,89
Ecart-type	41,71
Variance	1740
Intervalle de confiance 95%	18,5
Intervalle de confiance 99%	25,18
Coefficient de variation	0,30%

Pour 22 points de mesures nous n'avons pas une différence entre la médiane (valeur centrée) (133,35 mg /l) et la moyenne (135,35 mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,30%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 41,71mg /l.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

- **Variogramme des teneurs en Mg (mg/l) :**

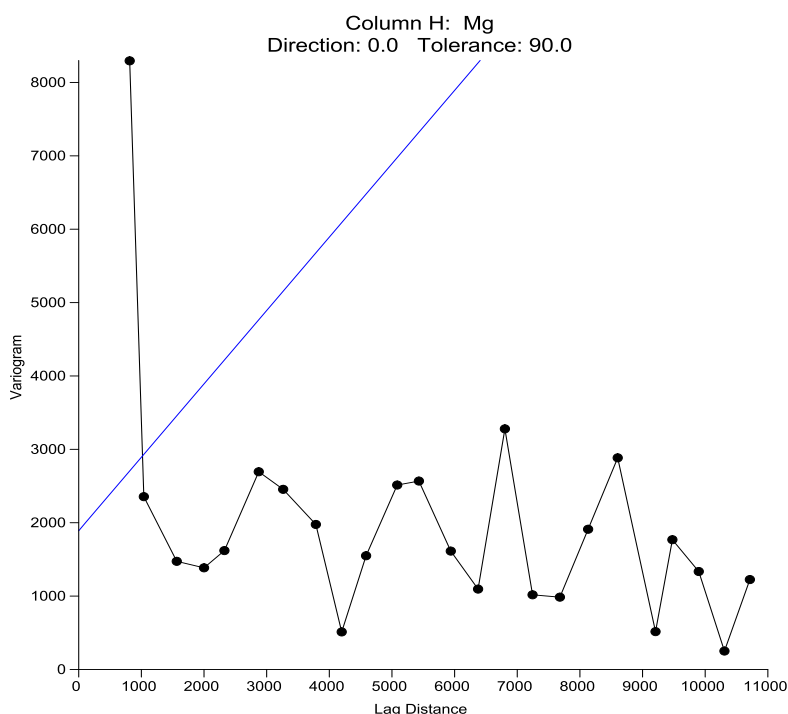


Figure N°37 : Variogramme des teneurs en Mg (mg/l) ;

Nous remarquons que l'anisotropie est bien démontrée par l'allure de la courbe qui se démarquent les uns des autres. Nous remarquons l'existence de l'effet de pépite que la courbe ne commence pas à partir de l'origine. Ceci est dû au fait que le variogramme n'est pas capable de capturer l'ensemble de la structure spatiale dans la parcelle, et ce surtout à petite échelle. (Figure N°37)

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneurs en Mg établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (fig N°38) que les concentrations varient entre 65 mg/l et 206 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère de la vallée. Les fortes concentrations se localisent à l'est de la zone d'étude.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

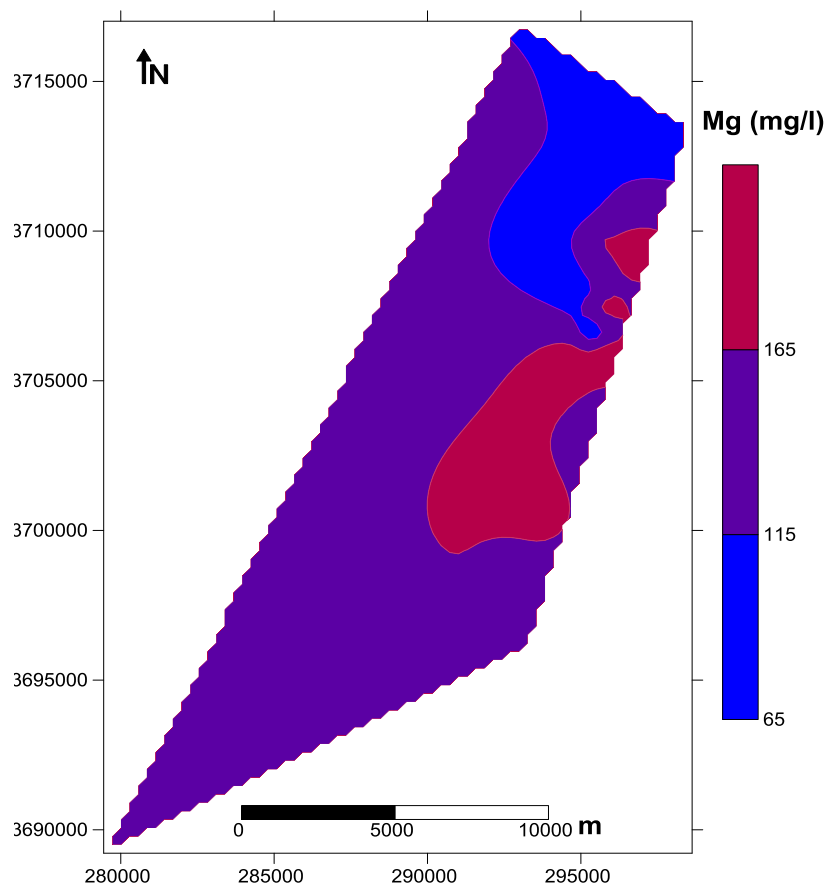


Figure N°38 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en Mg (mg/l) ;

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°12 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en magnésium

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	204,54	68,5	142,04	22,43	0,15

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 11, on constate :

Que la valeur maximale krigée est trop proche à la valeur maximales observée ; 204,54 mg/l krigée et 206 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles a peu près

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

identiques : 142,04 mg/l krigée et 135,16 mg/l mesurée.

IV .4.4. Interpolation des teneurs en potassium K en mg/l:

- Caractéristique statistiques :

Tableau N°13 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de K (mg/l) en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	22
Max	37
Moy	29,59
Médiane (2 ^{ème} quartile)	29
1 ^{er} quartile	28
3eme quartile	32
Erreur standard	0,69
Ecart-type	3,24
Variance	10,53
Intervalle de confiance 95%	1,43
Intervalle de confiance 99%	1,45
Coefficient de variation	0,10%

Pour 22 points de mesures nous avons une simulation entre la médiane (valeur centrée) (29 mg /l) et la moyenne (29,59mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,10%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 3,24 mg /l.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

- **Variogramme des teneurs en K (mg/l) :**

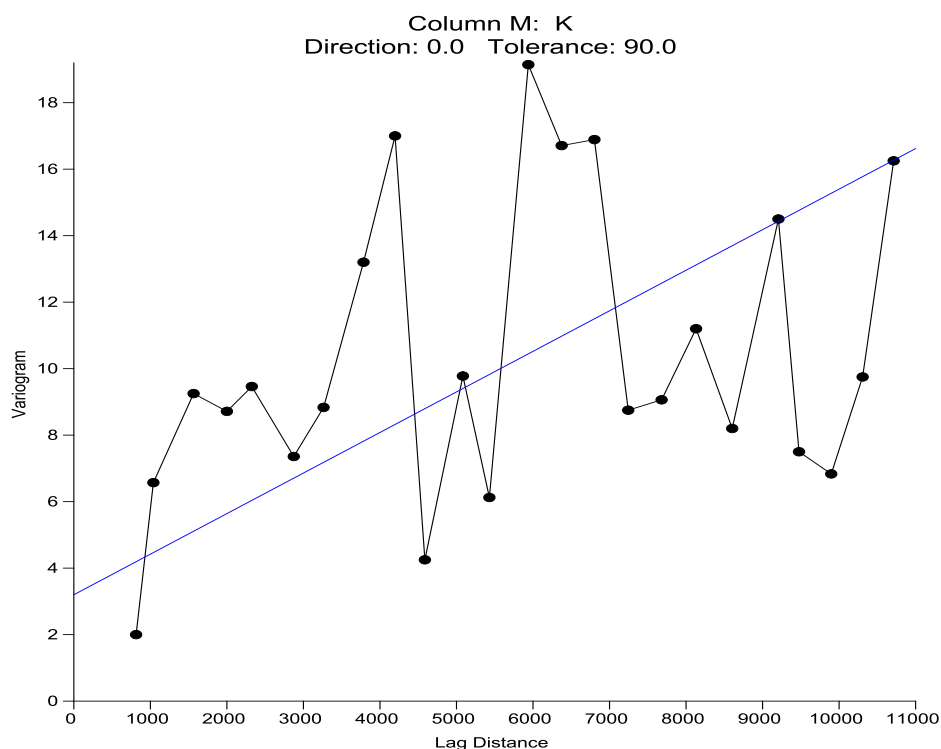


Figure N°39 : Variogramme des teneurs en K (mg/l) ;

Nous remarquons que l'anisotropie est bien démontrée par l'allure de la courbe qui se démarquent les uns des autres. Nous remarquons l'existence de l'effet de pépite que la courbe ne commence pas à partir de l'origine. Traduisant l'hétérogénéité du champ du valeurs et la coexistence dans une même zone de points a des faibles et fortes teneurs. (Fig N°39)

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneuses en K établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (Fig. N°39) que les concentrations varient entre 22 mg/l et 32 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère de la plaine.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

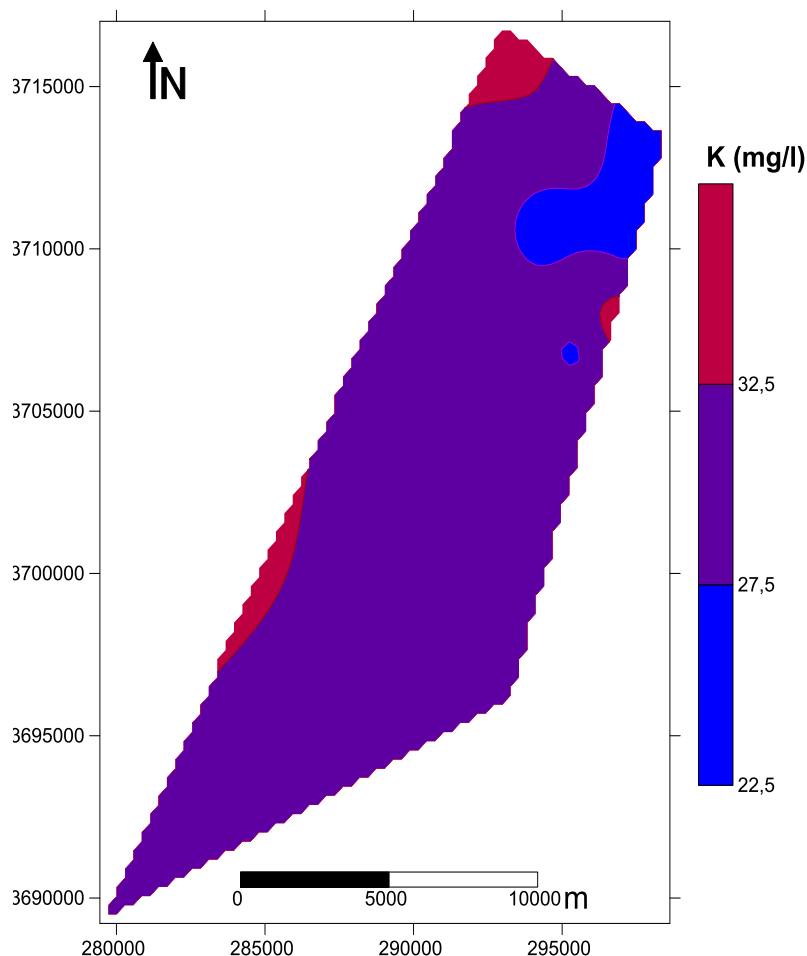


Figure N°40 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en K (mg/l)

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°14 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en potassium

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	35,67	22,79	30,58	1,79	0,058

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 13, on constate :

Que la valeur maximale krigée est trop proche à la valeur maximale observée ; 35,67 mg/l krigée et 37 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles a peu près identiques : 30,58 mg/l krigée et 29,59 mg/l mesurée.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

IV .4.5. Interpolation des teneurs en chlore Cl en mg/l:

- Caractéristique statistiques :

Tableau N°15 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de Cl (mg/l) en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	648,8
Max	1240,9
Moy	885,10
Médiane (2 ^{ème} quartile)	878,7
1 ^{er} quartile	801,2
3eme quartile	943
Erreur standard	31,79
Ecart-type	149,13
Variance	22240,9
Intervalle de confiance 95%	66,13
Intervalle de confiance 99%	90,01
Coefficient de variation	0,16%

Pour 22 points de mesures nous avons une petite différence entre la médiane (valeur centrée) (878,7 mg /l) et la moyenne (885,10 mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,16%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 149,13 mg /l.

- Variogramme des teneurs en Cl (mg/l) :

Nous remarquons que l'anisotropie est bien démontrée par l'allure de la courbe qui se démarquent les uns des autres. Nous remarquons l'existence de l'effet de pépite que la courbe ne commence pas à partir de l'origine. Ceci est dû au fait que le variogramme n'est pas capable de capturer l'ensemble de la structure spatiale dans la parcelle, et ce surtout à petite échelle. (Fig N°41 .)

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

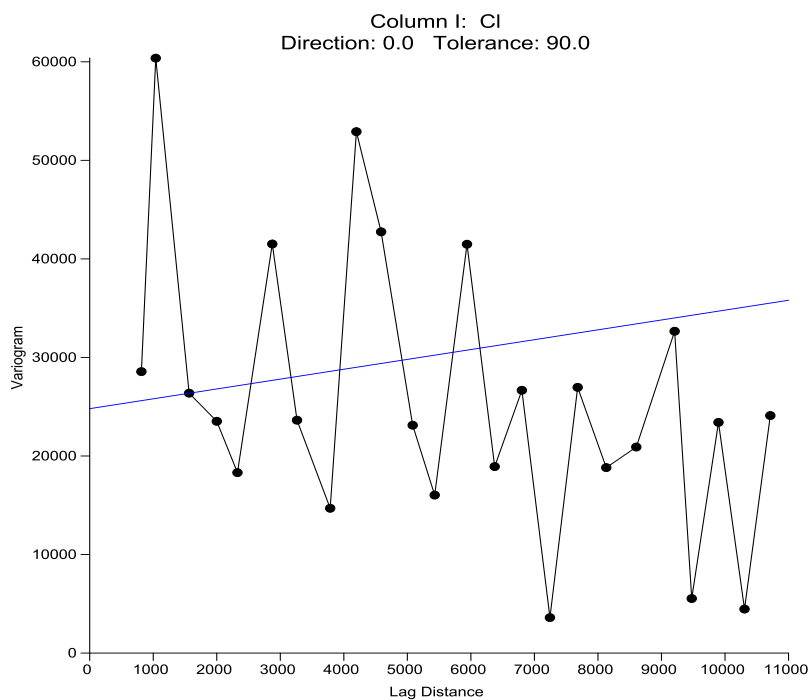


Figure N°41 : Variogramme des teneurs en Cl (mg/l) ;

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneuses en Cl établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (fig N°42) que les concentrations varient entre 640 mg/l et 1200 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère de la vallée.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

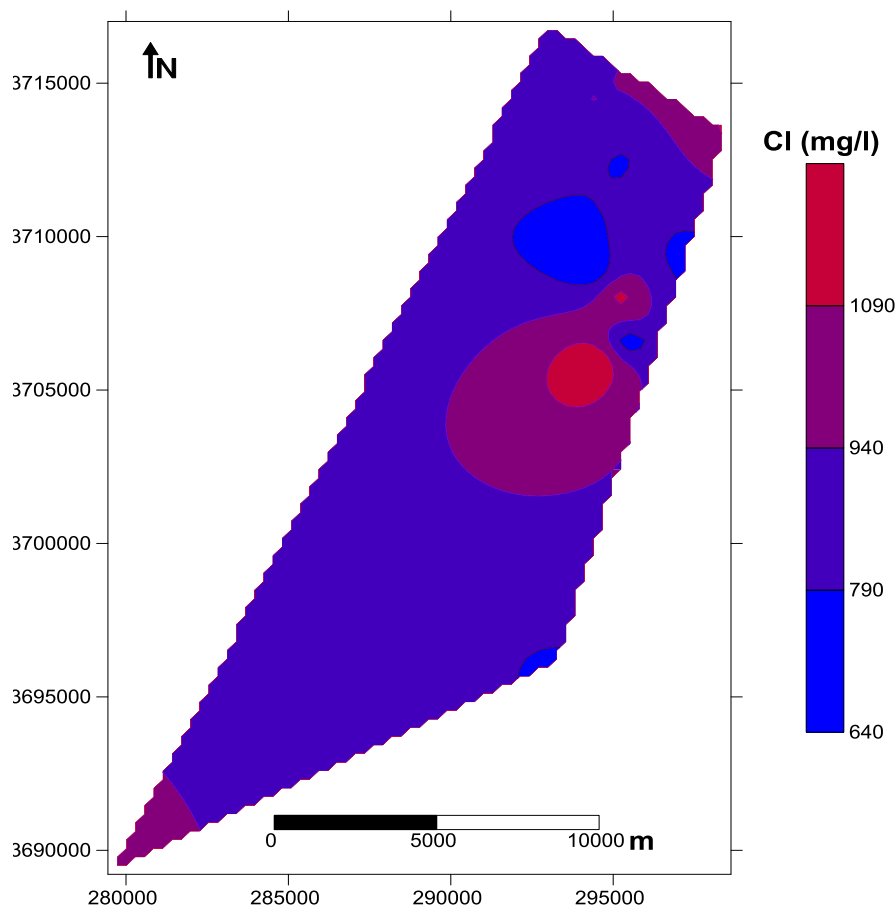


Figure N°42 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en Cl (mg/l)

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°16 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en Chlore

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	1217,98	652,27	891,25	70,84	0,079

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 15, on constate :

Que la valeur maximale krigée est trop proche à la valeur maximale observée ; 1217,98

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

mg/l krigée et 652,27 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles a peu près identiques : 891,25 mg/l krigée et 885,10 mg/l mesurée.

IV .4.6. Interpolation des teneurs en chlore SO4 en mg/l:

- **Caractéristique statistiques :**

Tableau N°17 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de SO4 (mg/l) en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	193,1
Max	984,5
Moy	675,6
Médiane (2^{eme} quartile)	683,75
1^{er} quartile	616,1
3eme quartile	789,9
Erreur standard	36,93
Ecart-type	173,24
Variance	30013,71
Intervalle de confiance 95%	76,82
Intervalle de confiance 99%	104,56
Coefficient de variation	0,25%

Pour 22 points de mesures nous avons une petite différence entre la médiane (valeur centrée) (683,75 mg /l) et la moyenne (675,6 mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,25%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 173,24 mg /l.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

- **Variogramme des teneurs en SO4 (mg/l) :**

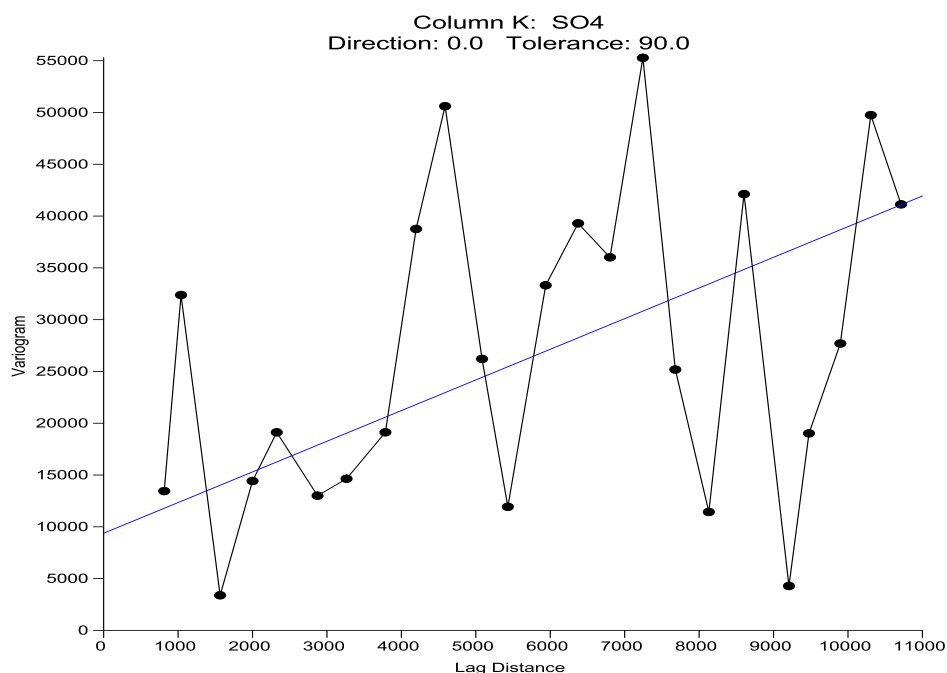


Figure N°43 : Variogramme des teneurs en SO4 (mg/l) ;

Nous remarquons que l'anisotropie est bien démontrée par l'allure de la courbe qui se démarquent les uns des autres. Nous remarquons l'existence de l'effet de pépite que la courbe ne commence pas à partir de l'origine. Traduisant l'hétérogénéité du champ les valeurs et la coexistence dans une même zone de points à des faibles et fortes teneurs. . (Fig N°43)

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneuses en SO4 établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (Fig N°44) que les concentrations varient entre 200 mg/l et 1000 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère de la plaine.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

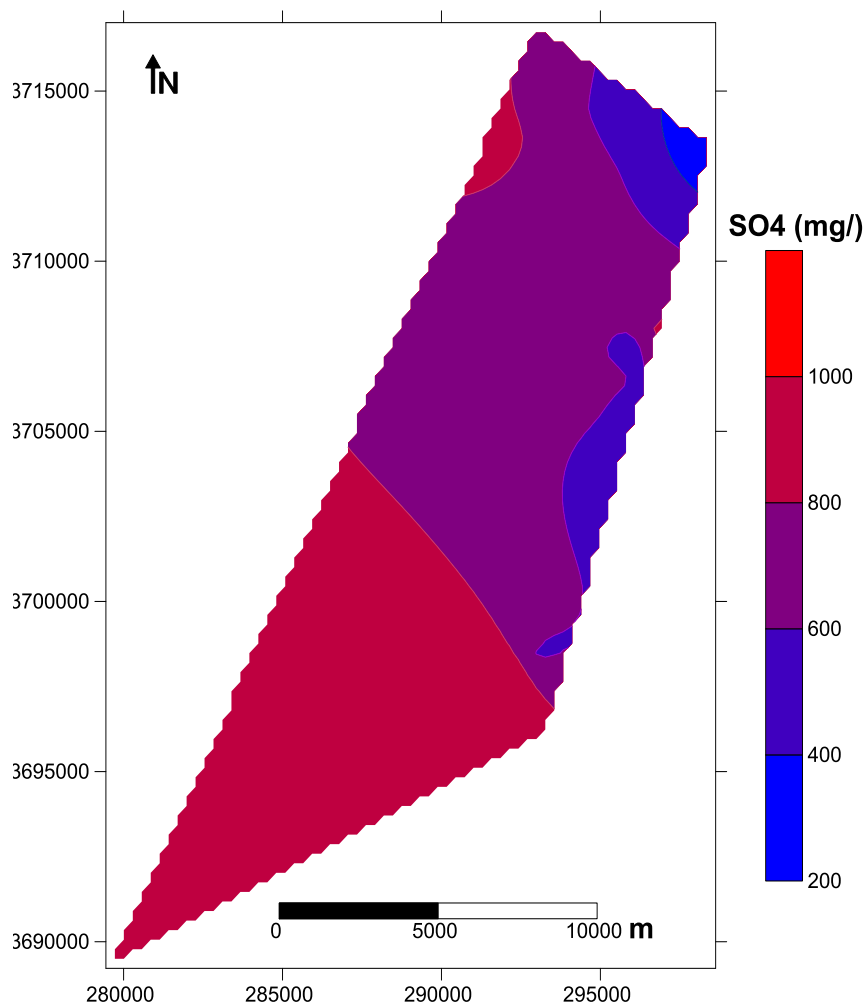


Figure N°44 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en SO4 (mg/l)

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°18 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en Sulfaté

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type (mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	1217,98	652,27	891,25	70,84	0,079

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 16, on constate :

Que la valeur maximale krigée est trop proche à la valeur maximale observée ; 1217,98 mg/l krigée et 652,27 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles à peu près identiques : 891,25 mg/l krigée et 885,10 mg/l mesurée.

IV .4.7. Interpolation des teneurs en chlore HCO₃ en mg/l:

- **Caractéristique statistiques :**

Tableau N°18 : Caractéristique statistique des valeurs mesurées de HCO₃ (mg/l) en 2021

Données	Valeurs
Nombre de points de mesure	22
Min	97,6
Max	207,4
Moy	156,28
Médiane (2 ^{ème} quartile)	155,45
1 ^{er} quartile	122
3eme quartile	196,22
Erreur standard	8,62
Ecart-type	40,47
Variance	1638,30
Intervalle de confiance 95%	17,94
Intervalle de confiance 99%	24,43
Coefficient de variation	0,25%

Pour 22 points de mesures nous avons une simulation entre la médiane (valeur centrée) (155,45mg /l) et la moyenne (156,28 mg/l). Le coefficient de variance traduit une dépression relative de 0,25%, alors que l'écart-type une dispersion absolue de 40,47 mg /l.

- **Variogramme des teneurs en HCO₃ (mg/l) :**

L'étude variographique a été réalisée en combinaison les trois modèle mathématiques Gaussien, Sphérique et linéaire. L'allure de ce variogramme construit avec un pas de 1Km est présenté dans la figures N°45 . On observe que le comportement de variogramme à l'origine nous montre l'absence l'effet de pépite. Ceci est dû au fait que le variogramme est

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

capable de capturer l'ensemble de la structure spatiale dans la parcelle. La courbe (fig N°45.) présente une allure irrégulière.

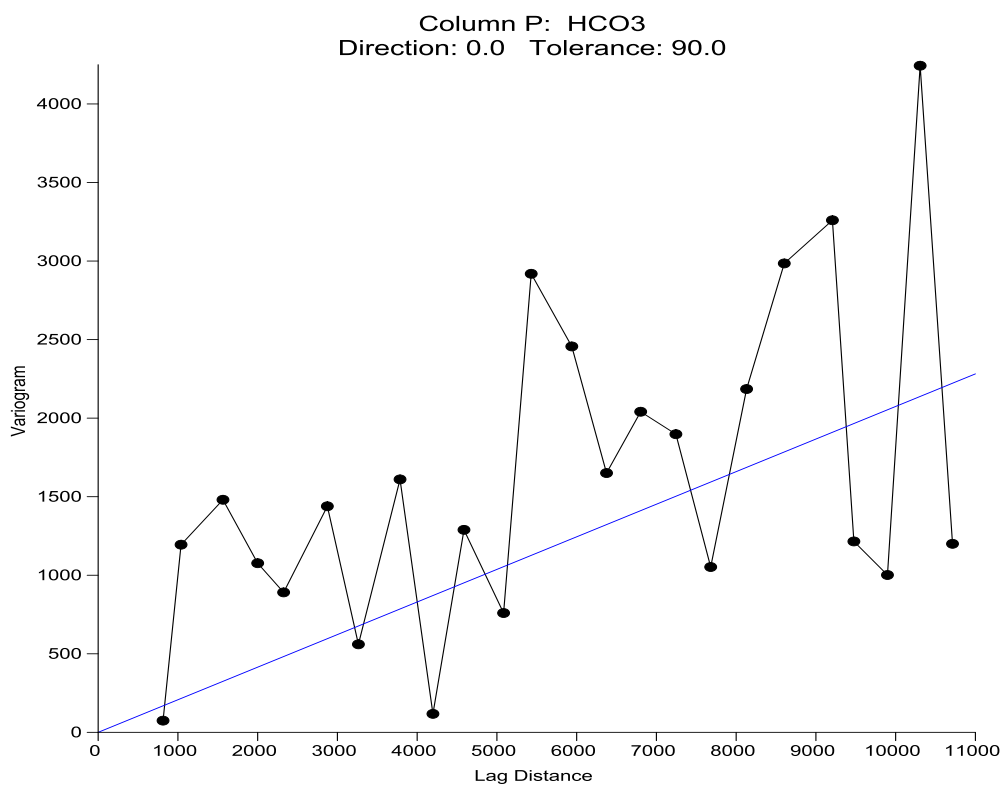


Figure N°45 : Variogramme des teneurs en HCO₃ (mg/l) ;

Nous remarquons que l'anisotropie est bien démontrée par l'allure de la courbe qui se démarquent les uns des autres. Nous remarquons l'existence de l'effet de pépite que la courbe ne commence pas à partir de l'origine. Ceci est dû au fait que le variogramme n'est pas capable de capturer l'ensemble de la structure spatiale dans la parcelle, et ce surtout à petite échelle. (Fig N°45)

- **Carte interpolée par krigeage :**

Nous avons observé que la carte des teneurs en HCO₃ établie en utilisant le krigeage universel suit cette tendance. Nous pouvons remarquer (Fig N°46) que les concentrations varient entre 95 mg/l et 210 mg/l. L'observation de la carte montre que les concentrations sont importantes dans la plupart de l'aquifère de la plaine. Les faibles concentrations se trouvent dans la partie est de la zone d'étude.

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

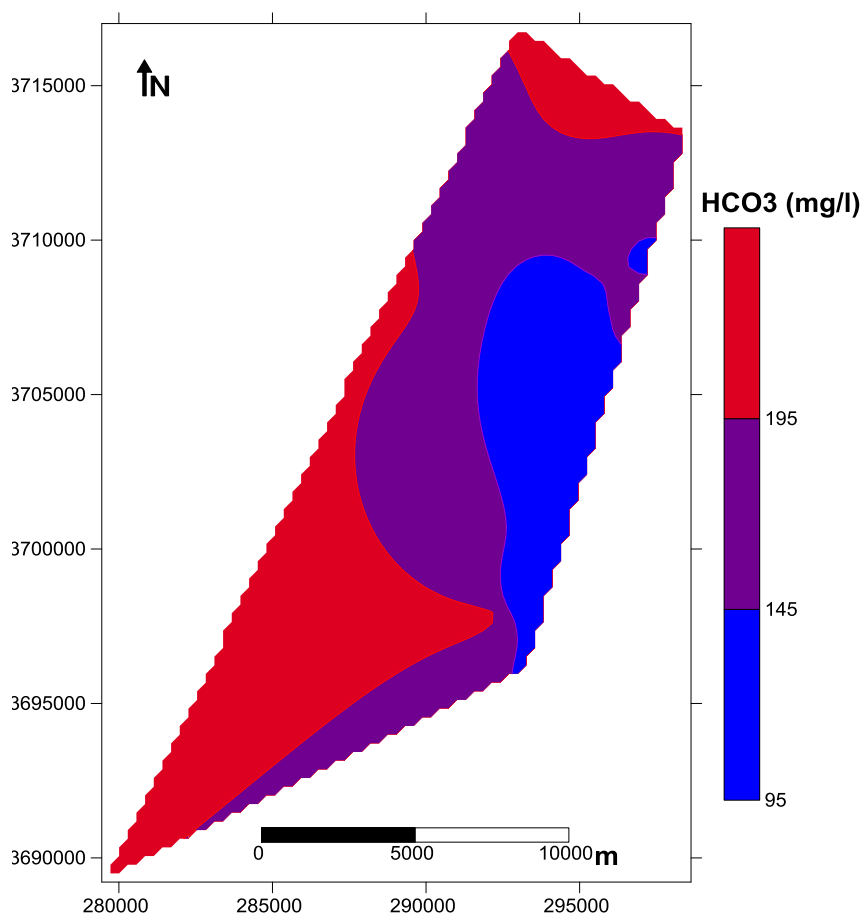


Figure N°46 : Carte interpolée par krigeage des teneurs en HCO₃ (mg/l)

Les caractéristiques statistiques du champ des valeurs krigées sont indiquées au tableau suivant :

Tableau N°19 : Parametres statistiques globaux des valeurs Krieger des teneurs en bicarbonaté

Nombre de point	Max (mg/l)	Min (mg/l)	Moy (mg/l)	Ecart-type(mg/l)	Coefficient de variation (%)
2612	209,03	99,42	175,67	28,92	0,16

Il ya eu 2612 valeurs estimées sur 4288 nœuds, l'estimation n'ayant pas été faite aux endroits où la densité de points était trop faible.

Si l'on compare ce tableau au tableau 18, on constate :

Que la valeur maximale krigée est trop proche à la valeur maximale observée ; 1217,98

CHAPITRE IV. INTERPOLATION SPATIALE DES TENEURS DES PARAMETRES CHIMIQUE PAR LA METHODE DU KRIGEAGE

mg/l krigée et 652,27 mg/l observée, et les valeurs moyennées sont quant à elles a peu près identiques : 891,25 mg/l krigée et 885,10 mg/l mesurée.

IV .5.Comparaison entre les deux cartes (krigées et réelle) pour toute les paramètres chimiques :

Nous avons observé que toutes les cartes des concentrations des paramètres chimiques établis en utilisant le krigeage et les cartes des valeurs mesurés donnent des résultats similaires. Par exemple, des échantillons avec des concentrations faibles dans la carte des valeurs expérimentaux, ont été trouvés dans les mêmes zones ayant dans la carte interpolée par krigeage, alors que les échantillons estimer avec des fortes teneurs, sont étroitement situés dans les zones de concentration fortes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

La zone d'étude représentée par la daïra de Guémar faisant partie de la vallée de Oued Souf .S E Algérien caractérisé par un climat désertique.

Au terme de ce travail nous pouvons dire que :

L'étude hydrogéologique a permis de connaître l'aquifère de complexe terminale dont les niveaux profonds sont connus par les forages ; l'autre Crétacé Inférieur et Jurassique supérieur.

L'écoulement se fait principalement dans deux sens du Sud-Ouest vers le Nord-Est, ou d'Ouest vers l'Est avec un gradient hydraulique variable allant de 0.002 à 0.005.

L'étude hydrogéochimique des eaux de la nappe du complexe terminale de la daïra de Guémar pour l'année 2021 montre que :

Les eaux sont caractérisées par une forte salinité et par la présence d'un faciès dominants, qui est le chloruré 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 (Na^+ , Cl^- , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^-), qui caractérisent les formations géologiques principales de la zone , a montré la dominance des ions salifères (Na^+ , Cl^-) et des ions gypsifères (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) par rapport à ceux carbonatés (Ca^{2+} , 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.

Nous avons observé que toutes les cartes des concentrations des paramètres chimiques établis en utilisant le krigeage et les cartes des valeurs mesurés donnent des résultats similaires. Par exemple, des échantillons avec des concentrations faibles dans la carte des valeurs expérimentaux, ont été trouvés dans les mêmes zones ayant dans la carte interpolée par krigeage, alors que les échantillons estimer avec des fortes teneurs, sont étroitement situés dans les zones de concentration fortes.

Bibliographies:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

[10] **CHAUVET P., (1999).** Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Les Presses de l'Ecole des Mines de Paris. P364

[11] **CHILES J.P. et DELFINER P., (1999).** Geostatistics : Modeling spatial uncertainty, Wiley Series in Probability and Statistics, Wiley.

[12] **DELHOMME J.P, (1976).** Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau (variabilité spatiale des grandeurs hydroclimatiques et hydrogéologiques & précision de leur connaissance). Thèse de doct. Ing. Université Pierre et Marie Curie Paris-6. p176, fig. 61

[13] **ISAAKS E. H. and SRIVASTA R. M., (1989).** – Applied Geostatistics. Oxford University Press, N.Y., U.S.A.

[14] **GASMI Med Lazhar SOUALAH Mohammed 2019** ; Evaluation de la productivité d'un aquifère du complexe terminal et approche statistique pour la détermination des tranches de profondeurs potentiellement productives cas de la région de Oued-Souf, MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme du Master en Hydraulique; Université - El-Oued.

[15] **Vayana DOMINIQUE2009**; Etudes de données physico-chimiques des eaux du secteur Nord du Piton des Neiges Ile de La Réunion; MASTER1 GEOSPHERE ; Office de l'eau – Réunion.

[16] **KHECHANA Salim 2014**; Perspective et méthode de la gestion intégrée des ressources en eau dans une zone hyper-aride. Application sur la vallée d'Oued-Souf (Sud-Est algérien); Thèse Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences; UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA.

[17] **ZINE Hacem. DJEOUADI Nouredinne .MESSAI AHMED Yakoub, 2021,** 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 pollution organique (IPO) et la cartographie, Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en Hydraulique, Université - El-Oued.