



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar



Faculté de Technologie

Département d'Hydraulique et de Génie Civil

MEMOIRE

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

Option : Ouvrages hydraulique

**THEME : La régionalisation spatiale par l'application des méthodes
déterministes et géostatistiques des propriétés des sols
(cas de la région d'El-Oued)**

Dirigé par :

DR : ZAIRNadjet

Présenté par :

ALALEI Ismail

HABI Imadeddine

Promotion :2023/2024

شكر وتقدير

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

السلام عليكم ورحمة الله تعالى وبركاته أما بعد نود أن نعبر عن شكرنا العميق وامتناننا لله تعالى الذي أتاح لنا هذه الفرصة الرائعة لتعلم لغة تختلف عن لغتنا الأم، مما سمح لنا بكتابة هذه الأطروحة نود أيضاً أن نقدم الشكر لجميع استاذتنا الاعزاء الذين كانوا المنبع الاول لتعلمنا ومعرفتنا والذين ساهموا في تطوير فهمنا ومهاراتنا في هذا المجال

أمي وأبي الحبيبان،

أي كلمات الامتنان يمكنني أن أبدأ بها، وكيف يمكن لكلماتي أن تعبر عن مشاعري الصادقة تجاهكما. رسائلكما هي تعبكم ومعايناتكما معنا، وكم من الدفء والحب والحنان قدمتما لنا! كم تحملتما معي! أمي، أنت زهرة حياتي، وأبي، أنت شمعة طريقي. أسأل الله أن يجعلكما في أعلى الجنة ويجزيكما عنا كل خير. أشكركما من أعماق قلبي

وفي هذا السياق، نود أن نعبر عن أعمق الامتنان للمشرفة على هذا العمل زعيير

نجاة على جهودها الكبيرة وتعاونها المثمر ومعلوماتها الهامة التي كانت هي المفتاح

الاول لنجاح هذا البحث العلمي وتطوير معرفتنا في هذا المجال

ونشكر بحرارة التعاون بين جامعة الشهيد حمه لخضر ومختبر فاتيلا ب الذي سهل

لنا عملية معايرة وتحليل التربة .

وأخيراً، نود أن نعبر عن شكرنا الخاص لكل من رئيس القسم د. ميلودي عبد

المنعم وكل طاقمه الاداري الذي وقضو على قدم وساق لتوفير لنا كل وسائل المساعدة

في تطوير هذا العمل، فالتعاون والجهود المشتركة هي ما يسهم في تقدم المجتمع
وتطوير المعرفة ونجاح الأمة.

نعد بأن نستمر في العمل من أجل العلم والوطن، ونتطلع إلى المزيد من التقدم
والنجاح في المستقبل

والله ولي التوفيق

Résumé

Le but de cette étude est d'utiliser des méthodes géostatistiques pour évaluer les variations géographiques des valeurs de conductivité électrique, de sodium et de calcium de sol à partir des données de 20 échantillons de sol de la région d'étude. Surfer 19 est utilisé pour évaluer les variations spatiales des valeurs de conductivité électrique, de sodium et de calcium de sol en appliquant les méthodes IDW, RBF et Krigeage universel (UK) avec validation croisée, aboutissant à l'estimation de valeurs de trois propriétés physico-chimiques de sol (Na^+ , Ca^{+2} et CE).

Cette étude vise à tester différentes méthodes d'interpolation déterministe (telles que la méthode de pondération inverse de la distance (IDW), la méthode de la fonction de base radiale (RBF)) et la méthode géostatistique (krigeage universel) pour la cartographie des paramètres physico-chimiques de sol de la région d'El-Oued. Compte tenu des différences significatives obtenues dans les estimations basées sur les méthodes utilisées, il est intéressant d'évaluer les cartes de répartition spatiale des paramètres physico-chimiques en comparant leurs qualités prédictives grâce au calcul de l'erreur moyenne d'estimation.

Les résultats indiquent la supériorité de la technique de l'inverse de distance pondérée (IDW) sur les estimations de RBF et de krigeage universel (KU) pour les données de conductivité électrique (CE) et les données de calcium (Ca^{+2}), avec des erreurs d'estimation de R^2 environ 0,046 et R^2 d'ordre 0,102 respectivement. Par contre pour les données de sodium (Na^+) la méthode du krigeage universel (KU) s'est révélée plus représentative que les deux autres méthodes avec des erreurs d'estimations $R^2 = 0,009$.

Mots clés : Méthodes déterministes, Méthodes géostatistiques, paramètres physico-chimiques de sol, El oued

Abstract

The goal of this method is used to optimize geostatistical variations in electrical conductivity values, sodium and calcium of the solution in the donation of 20 containers of electricity in the region. Surfer 19 is used to evaluate the spatial variations of electrical conductivity values, sodium and calcium in the solution and apply IDW methods, RBF and Krigeage Universal (UK) with cross-validation, about the estimation of the values of three physical parameters. - sol chemicals (Na^+ , Ca^{+2} and CE).

This can be used to test different interpolation methods (telling the ponding inverse distance (IDW) method, the radial base function (RBF) method) and the geostatistical (universal krigeage) method for the cartography. Physical parameters in the region of El-Oued. Compare the different significant differences in the basic estimates on the methods used, it is important to value the spatial discretization cards of the physical parameters and compare the highest quality values with the estimation method.

The results indicate the superiority of the inverse pond distance (IDW) technique on the estimates of RBF and universal krigeage (KU) for the données of conductive electricity (CE) and the données of calcium (Ca^{+2}), The error rate of R^2 environment is 0.046 and R^2 value is 0.102 respectively. For the donation of sodium (Na^+) the method of universal storage (KU) is the most reliable solution to the methods with erroneous estimates $R^2 = 0.009$.

Keywords: Deterministic methods, Geostatistical methods, physicochemical soil parameters, El-Oued

ملخص

المعلومات الفيزيائية والكيميائية للتربة. يستخدم Surfer 19 لتقييم الاختلافات المكانية في الناقلية الكهربائية للتربة وقيم الصوديوم والكالسيوم من خلال تطبيق طرق المسافة المرجحة العكسية IDW ووظائف أساسيات شعاعية RBF و كريجينج العالمي UK مع التحقق المتبادل، مما يؤدي إلى تقدير قيم ثلاث خصائص فيزيائية والكيميائية للتربة (صوديوم و كالسيوم و الناقلية الكهربائية).

تهدف هذه الدراسة إلى اختبار طرق الاستيفاء الحتمية المختلفة (مثل طريقة وزن المسافة العكسية (IDW)، وطريقة دالة الأساس الشعاعي (RBF)) والطريقة الجيوإحصائية (الكريجينج العالمي) لرسم خرائط المعلومات الفيزيائية والكيميائية للتربة في منطقة الوادي. ونظراً للاختلافات الكبيرة التي تم الحصول عليها في التقديرات المبنية على الطرق المستخدمة، فمن المثير للاهتمام تقييم خرائط التوزيع المكاني للمعلومات الفيزيائية والكيميائية من خلال مقارنة صفاتها التنبؤية من خلال حساب متوسط خطأ التقدير.

تشير النتائج إلى تفوق تقنية موزونة المسافة العكسية (IDW) على تقديرات RBF والكريجينج العالمي (KU) لبيانات التوصيل الكهربائي (EC) وبيانات الكالسيوم (Ca^{+2})، مع وجود أخطاء تقدير تبلغ تقريباً 0.046 و 0.102 على التوالي. من ناحية أخرى، بالنسبة لبيانات الصوديوم (Na^{+}) أثبتت طريقة كريجينج العالمية (KU) أنها أكثر تمثيلاً من الطريقتين الأخريين مع وجود أخطاء في التقدير 0.009.

الكلمات المفتاحية: الطرق الحتمية، الطرق الجيوإحصائية، معلومات التربة الفيزيوكيميائية، الوادي

Sommaire

Titre	Page
Remerciement	i
Résumé	ii
Abstract	iii
ملخص	iv
Sommaire	v
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	xi
Liste des Abréviations	xii
Introduction Général	1
Chapitre 1 Présentation générale de la zone d'étude	4
I- Présentation de la zone d'étude	5
I.1 Situation géographique 'El-Oued	6
I.2 Cadre social et économique de Souf	7
I.2.1 L'artisanat	7
I.2.2 Le commerce	7
I.2.3 L'industrie	8
I.2.4 L'agriculture	8
I.3le sol de zone d'étude	17
I.4. Conclusion	19
Chapitre 2 les méthodes et les outils numériques	20
Introduction	21

II.1. Les méthodes d'interpolation spatiale	21
II.1.1 Méthodes déterministes	21
II.1.2. Méthodes géostatistique	22
II.2. Outils numériques	23
II.2.1. Introduction	23
III.3 Présentation de l'interface du logiciel	24
II.3.1. Mise en forme le fichier Excel	25
II.3.2. Affichage des points	25
II.3.3. Créer une grille x, y, z	27
II.3.4. Distance inverse à une puissance	27
II.4. Krigeage	28
II.5. Composants du variogramme	29
II.6. Échantillonnage	47
II.7. Conclusion :	50
CHAPITRE 3 VALIDATION DE CAS REEL	51
Introduction	52
III.1. Principaux composants du sol	52
III.2. Données et méthodes	53
III.2.1. Analyse des données	53
III.2.2. Analyse statistique des données	56
III.3. Résultat et discussion	57
III.3.1. Interpolation des paramètres physico-chimiques (CE, Na ⁺ et Ca ⁺⁺) du sol à l'aide des méthodes déterministes	57
III.4. Interpolation des paramètres physico-chimiques (CE, Na ⁺ et Ca ⁺⁺) du sol à l'aide des méthodes géostatistiques (Krigeage universel KU)	61

III.4.1. Interpolation des valeurs de conductivités électriques (CE) par la méthode de krigeage universel (KU) :	62
III.4.2. Interpolation des valeurs de sodium (Na^+) par la méthode de krigeage universel (KU) :	63
III.4.3. Interpolation des valeurs de calcium (Ca^{+2}) par la méthode krigeage universel (KU) :	65
III.5. Test et validation le choix du model :	67
III.5.1. Le test par la validation croisée :	67
III.5.2. Le test par l'analyse des résiduels :	69
III.6. Conclusion :	81
Conclusion générale	82
Références Bibliographiques	83

Liste des figures

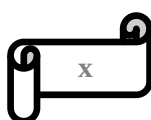
Titre	Page
Figure 1 : Situation géographique d'El-Oued 2023 et la zone d'étude	7
Figure 2 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).	11
Figure 3 : Histogramme précipitations moyennes mensuelles (mm) (ONM 1989-2017)	12
Figure 4 : Variation mensuelles de l'humidité relative moyenne (ONM 1989-2017).	13
Figure 5 : Variation mensuelle de l'Evaporation moyenne (mm) (ONM 1989-2017).	14
Figure 6 : Histogramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (m/s) (ONM 1989-2017).	15
Figure 7 : les type de sol dans la zone d'étude	19
Figure 8 : Schéma des méthodes d'interpolation spatiale	21
Figure9 : schéma des méthodes de krigeage	23
Figure10 : Barre des menus	24
Figure 11 : Différentes cartes possibles.	24
Figure12 : Work Sheets Surfer	25
Figure13 : Grille ouverte	26
Figure14 : Carte de contour	26
Figure15 :3D Surface Map	26
Figure16 : Les options de quadrillage	27
Figure17 : Distance inverse à une puissance grille	28
Figure 18 : Grille de krigeage	28
Figure19 : Boîte de dialogue Options avancées de krigeage	29
Figure20 : Composants du variogramme	29
Figure21 : La Fenêtre des Propriétés du modèle expérimental	30
Figure22 : La boîte de dialogue Propriétés	31
Figure23 : Les modèles de variogramme	31
Figure24 : Statistiques	32
Figure25 : L'éditeur de grille	32
Figure26 : Les paramètres du variogramme	33
Figure 27 : les échantillons dans sac refermables	47
Figure 28 : Dispositif d'agitation magnétique avec les échantillons dans le jar	48

Liste des tableaux

Figure 29 : les boites avec du papier de filtration	48
Figure 30 : MULTIMETRE DE COUNDUCTIVITE CE ET PH METRE	49
Figure 31 : Analyse exploratoire des données de la conductivité électrique du sol de la région d'étude (Mars 2024) (CE en $\mu\text{S/cm}$).	54
Figure 32 : Analyse exploratoire des données de sodium du sol de la région d'étude (Mars 2024) (Na^+ en Cmol/kg).	55
Figure 33 : Analyse exploratoire des données du calcium du sol de la région d'étude (Mars 2024) (Ca^{++} en Cmol/kg).	55
Figure 34: Carte de conductivité électrique du sol (CE) en $\mu\text{S/cm}$ obtenue par la méthode IDW	58
Figure 35: Carte de conductivité électrique du sol (CE) en $\mu\text{S/cm}$ obtenue par la méthode RBF	58
Figure 36: Carte de sodium du sol (Na^+) en Cmol/kg obtenue par la méthode IDW	59
Figure 37: Carte de sodium du sol (Na^+) en Cmol/kg obtenue par la méthode RBF	60
Figure 38: Carte de calcium du sol (Ca^{+2}) en Cmol/kg obtenue par la méthode IDW	61
Figure 39: Carte de calcium du sol (Ca^{+2}) en Cmol/kg obtenue par la méthode RBF	61
Figure 40: L'interface de la modélisation du variogramme	62
Figure 41: Carte de conductivité électrique du sol (CE) en $\mu\text{S/cm}$ obtenue par la méthode du krigeage universel (KU)	63
Figure 42: L'interface de la modélisation du variogramme	64
Figure 43: Carte de sodium du sol (Na^+) en Cmol/kg obtenue par la méthode du krigeage universel (KU)	65
Figure 44: L'interface de la modélisation du variogramme	66
Figure 45: Carte de calcium du sol (Ca^{+2}) en Cmol/kg obtenue par la méthode du krigeage universel (KU)	67
Figure 46: (a, b, c). Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (ou résidus) pour chaque modèle pour les valeurs de CE.	72
Figure 47: (a, b, c). Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (ou résidus) pour chaque modèle pour les valeurs Na^+ .	75
Figure 48 : (a, b, c). Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (ou résidus) pour chaque modèle pour les valeurs Ca^{+2} .	76 & 77
Figure 49 : Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisées	78

Liste des tableaux

pour conductivité électrique (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$.	
Figure 50 : Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisées pour sodium (Na^+) en Cmol/kg	78
Figure 51 : Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisées pour sodium (Na^+) en Cmol/kg .	79
Figure 52 : Superpositions des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées de la conductivité électrique, pour la méthode IDW, RBF, et le Krigeage universel (KU).	79
Figure 53 : Superpositions des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées de sodium, pour la méthode IDW, RBF, et le Krigeage universel (KU).	80
Figure 53: Superpositions des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées de calcium, pour la méthode IDW, RBF, et le Krigeage universel (KU).	81

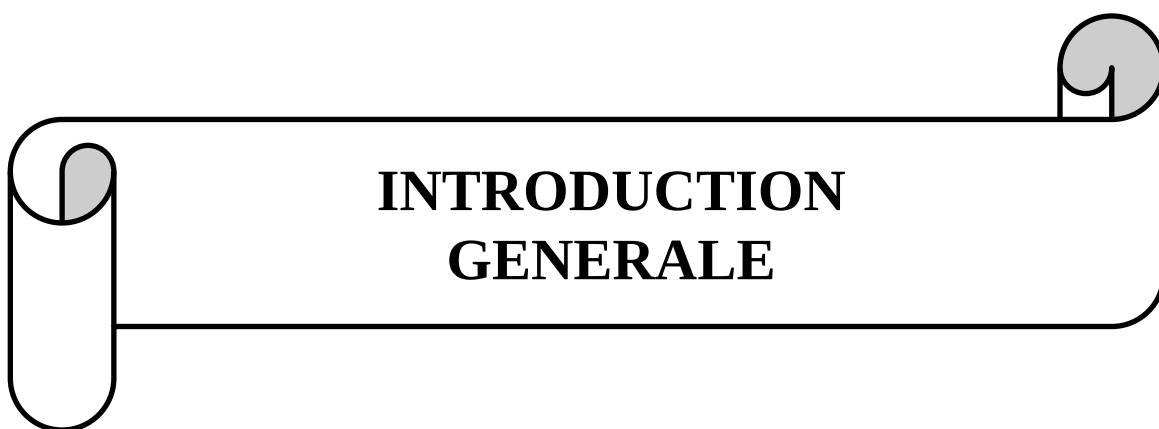


LISTE DE Tableaux

Titre	Page
Tableau 1 : Résumé des résultats obtenus	10
Tableau 2 : Les températures moyennes mensuelles (ONM 1989-2017)	11
Tableau 3 : Les précipitations moyennes mensuelles (ONM 1989-2017)	12
Tableau 4 : Humidité relative moyenne mensuelle (ONM 1989-2017)	13
Tableau 5 : Evaporation moyenne mensuelle (mm) (ONM 1989-2017).	13
Tableau 6 : Vitesses du vent moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).	14
Tableau 7 : données des précipitations et des températures moyennes mensuelles	15
Tableau 8 : Bilan hydrique d'après Thorntwaite (ONM 1989-2017)	16
Tableau 9 : Etude statistique des valeurs mesurées de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), de Na^+ (Cmol/kg) et de Ca^{++} (Cmol/kg) du sol (2024).	56
Table 10 : Résultats de l'analyse de validation croisée des valeurs de CE.	68
Table 11 : Résultats de l'analyse de validation croisée des valeurs de Na^+ .	68
Tableau 12 : Analyse statistique des résidus de chaque méthode d'interpolation pour La conductivité électriques (CE)	69
Tableau 13 : Résultats de l'analyse de validation croisée des valeurs de Ca^{+2} .	70
Tableau 14 : Analyse statistique des résidus de chaque méthode d'interpolation pour Du sodium (Na^+)	73
Tableau 15 : Analyse statistique des résidus de chaque méthode d'interpolation pour Du calcium (Ca^{+2})	76

Liste des Abréviations

DSA : Direction de Service Agricole d'El-Oued
ADE : Algérienne Des Eaux.
AEA : Alimentation en Eau d'Agriculture.
DPSB : Direction Programmation et Suivi Budget.
AEI : Alimentation en Eau d'Industrie.
AEP : Alimentation en Eau Potable.
Ku : Kriging Universal
Idw : distance inverse aux puissances
FBR : fonction de base radial
ONM : L'Office National de Météorologie



INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale :

Comprendre les propriétés physiques et chimiques du sol est essentiel dans de nombreux domaines des sciences agricoles, environnementales et techniques. La détermination des caractéristiques des sols revêt une grande importance pour améliorer la gestion des ressources naturelles et parvenir à un développement durable.

Le géologue et l'hydrogéologue appliquent le nom de sol aux couches meubles superficielles notamment à toute l'épaisseur surmontant les nappes souterraines, non saturée d'eau en permanence. C'est dans cette zone que les échanges d'eau et des solutés surviennent.

Le sol se forme par l'action directe de l'atmosphère, de la biosphère et du climat sur la lithosphère, il se situe donc à l'interface entre ces différentes composantes de l'environnement et c'est ce qui rend son rôle si important et sa pollution si dangereuse.

Le sol est l'environnement où tous déséquilibrent ou pollution peut avoir des conséquences sur les différentes composantes de l'écosystème. de plus certaines activités humaines agressent le sol et altèrent ses propriétés.

L'activité humaine est responsable de la dégradation et la salinisation des sols qui sont alors rendus impropres à l'agriculture. L'Organisation des Nations Unis pour l'alimentation et l'agriculture estime que 20% des terres irriguées dans le monde sont des sols touchés par des problèmes de salinité.

Chaque année, ce sont 10 millions d'hectares de terres agricoles qui sont détruits dans le monde par la salinisation des sols.

Le changement climatique, l'utilisation excessive des eaux souterraines, l'utilisation croissante d'eau d'irrigation de mauvaise qualité, l'irrigation massive dans une zone à climat semi-aride à aride et un manque de lixiviation des sols peuvent intensifier ce phénomène de salinisation des sols.

Le degré de sévérité de cette dégradation va dépendre aussi de la nature du sol (sableux, argileux...) et de sa situation, selon qu'il est soumis au vent, à l'humidité, etc. A cela s'ajoute la déforestation (liée aux trois quarts à l'expansion agricole), qui accroît également la détérioration des sols en accélérant leur érosion. Ainsi chaque année, des millions d'hectares disparaissent, deviennent impropres à l'agriculture ou perdent leurs fonctions positives

Introduction générale

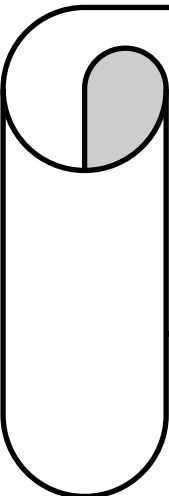
d'épuration de l'eau de régulation des cours d'eau ou accumulation de carbone.

L'analyse de sol permet de comprendre la structure et la fertilité de sol grâce à 4 paramètres : la texture, l'acidité, le profil organique et l'état minéral de la terre. Une fois les échantillons prélevés, au bon endroit et au bon moment, il s'agit de les faire analyser par un laboratoire. L'étude des résultats de cette analyse permet de piloter la fertilisation, d'adapter ses pratiques agricoles, d'identifier le type de travail de sol à adopter et d'optimiser sa stratégie de culture. Ainsi, l'analyse de sol peut vous permettre d'améliorer vos rendements et réaliser des économies de carburant, d'engrais, de produits phytosanitaires etc...

Ce travail se concentre sur l'étude et l'analyse des caractéristiques physico-chimiques des sols de la région d'El oued, à l'aide de méthodes déterministes et géostatistiques. L'accent est mis sur l'impact du choix des modèles sur l'exactitude des résultats, soulignant l'importance cruciale du choix du modèle optimal.

La recherche comprend plusieurs parties, de la revue des méthodes utilisées à la simulation pratique et à la validation des résultats. Une conclusion générale résume les résultats et met en évidence les contributions potentielles de cette recherche à la compréhension du lien entre l'analyse géostatistique et l'estimation des caractéristiques des sols dans la région de la vallée.

Ce travail vise à enrichir les connaissances sur les méthodes efficaces d'analyse et d'estimation des propriétés des sols, afin d'orienter les décisions et politiques agricoles et environnementales au niveau local et régional.



Chapitre 1 Présentation générale de la zone d'étude

I- Présentation de la zone d'étude :

La wilaya d'El Oued est située au nord-est du Sahara algérien, délimitée au nord par les wilayas de Tbessa, Khenchela et Biskra, à l'ouest par El M'Ghair et Touggourt, au sud par Ouargla, et à l'est par la Tunisie. Elle se trouve au nord de la mer des dunes du grand erg oriental.

Autrefois appelée Souf, la région vivait principalement de la phoeniciculture et d'une agriculture vivrière dans des cuvettes appelées Ghouts. Après l'indépendance, les habitants se sont tournés vers l'artisanat et le commerce, devenant parmi les commerçants et entrepreneurs les plus importants du pays.

Bien que la phoeniciculture reste importante, le secteur tertiaire domine aujourd'hui l'économie locale, occupant la majorité des actifs. La région connaît aussi un développement dans l'agro-alimentaire orienté vers l'exportation. L'artisanat y est très actif, notamment le tissage de burnous, haïk, couvertures et tapis.

Malgré un climat austère, El Oued est une ville commerçante dynamique, connue pour son marché animé et son rôle de pôle d'échanges commerciaux entre le nord et le sud du pays.

L'introduction d'El Oued, également connue sous le nom d'Oued Souf, est une commune de la wilaya d'El Oued, servant de capitale. El Oued, située dans le nord-est du Sahara algérien, est devenue un centre urbain important au 19e siècle, devenant la capitale du Souf. La région a une histoire riche remontant à des siècles, avec une population mêlant des tribus arabes et berbères. Notamment, El Oued est passé d'une focalisation sur les palmiers-dattiers et l'agriculture de subsistance à l'adoption d'activités artisanales et commerciales après l'indépendance. Récemment, il y a eu un regain d'activités agricoles, notamment la culture de cultures telles que les pommes de terre, les dattes et les légumes. La région abrite également la zone industrielle de Kouinine, où se trouvent des entreprises comme Parfums Wouroud.

Le thème de mémoire de fin d'étude, portant sur la régionalisation spatiale par l'application des méthodes déterministes et géostatistiques des propriétés des sols, est un sujet d'étude important pour la région d'El Oued. La production agricole nationale conditionne directement la sécurité alimentaire du pays, et l'étude des sols dans la région d'El Oued est essentielle pour comprendre les potentialités et les limites de l'agriculture dans cette zone.

L'étude pédoclimatique de la région d'El Oued met en avant la présentation de la wilaya, les reliefs, le climat, la répartition de la surface, les ressources hydriques et les sols dans la région. Elle souligne l'importance de l'adaptation de la culture de blé dur dans la région, ce qui

est particulièrement pertinent dans le contexte actuel où la sécurité alimentaire est une préoccupation majeure.

En résumé, l'introduction d'El Oued met en avant l'importance de la région dans le contexte algérien, ainsi que l'importance de l'étude des sols pour comprendre les potentialités et les limites de l'agriculture dans cette zone.

I.1 Situation géographique d'El-Oued

La wilaya d'El Oued se trouve au Sud-est de l'Algérie. Elle devint une commune depuis 1957, une wilaya depuis janvier 1984, ce découpage pour but de faciliter les conditions de vie sociale, culturelle, professionnelle et de limiter les difficultés dues à l'isolement, aujourd'hui, elle compte douze daïras et trente communes jusqu'en 2019, puis, respectivement, onze et vingt-deux depuis cette date à la suite de la création de la wilaya d'El M'Ghair3. Ses limites sont les suivantes :

- Au nord, par les wilayas de Tébessa, Khenchela et Biskra
- L'Ouest par la wilaya de MGHEIR et Touggourt
- Au sud et par la wilaya de Ouargla ;
- Et l'Est par la Tunisie.

LA LIMITATION DE CETTE ZONE

La zone d'étude est située dans la zone de la vallée, plus précisément sur la route nationale N16 qui traverse le centre-ville. Cette zone est similaire à la zone Gazal d'or et à la route S-N-T-V dans la vallée, et nous avons choisi cette zone car elle offre plusieurs vastes zones de terrain qui permettent un échantillonnage clair, comme on peut le voir sur Google Maps. Ces échantillons permettront d'expliquer les caractéristiques du sol et de l'environnement de cette région.

La zone d'étude est située dans la vallée de l'Oued Sof , une zone agricole dominée par l'agriculture et l'horticulture phéniciennes comme la pomme de terre et la tomate. L'agriculture a connu de grands succès ces dernières années, faisant de la région un acteur majeur dans ce domaine.

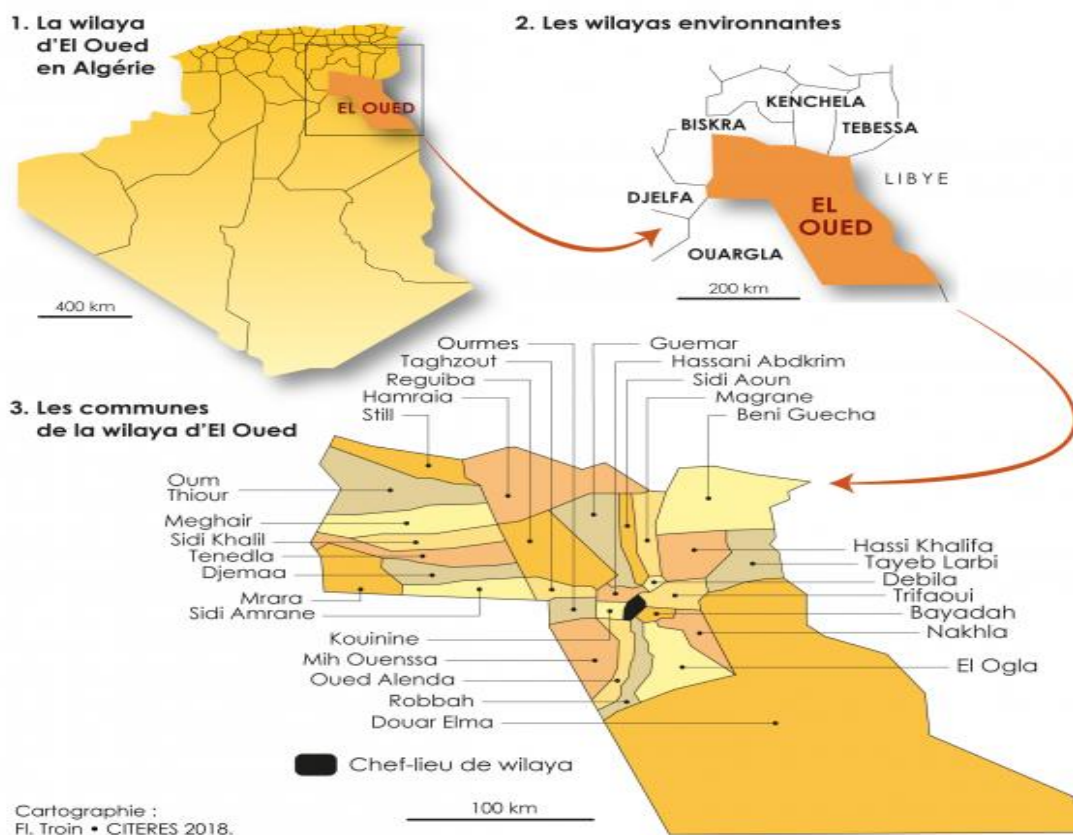


Figure1 : Situation géographique de la zone d'étude

I.2 Cadre social et économique de Souf :

Les manifestations de la vie quotidienne traduisent un système d'organisation qui tient compte des possibilités économiques, de la vocation agricole, commerciale et artisanale.

Si nous voyons successivement les principales activités, nous donnons un aperçu général sur l'économie du Souf.

Celles-ci s'articulent autour de l'agriculture, qui sera étudiée en premier lieu et les activités des transformations et commerciales qui sont traitées par la suite :

I.2.1. L'artisanat :

El Oued à toujours était un centre artisanal, notamment pour les objets liés à l'ancienne technologie de l'agriculture. On note les activités artisanales, il s'agit des ailleurs, des tapisiers, des maçons, des cordonniers, des menuisiers, des bijoutiers, des forgerons.

I.2.2. Le commerce :

Tout soufi est commerçant dans l'âme, la ville d'el Oued compte 7000 registres de commerces, et 10000 l'ensemble du Souf. Grâce à la position géographique entre trois Etats (Algérie, Tunisie, Libye), le Souf a acquis une position stratégique exceptionnelle, on peut dire que la ville d'el Oued est un centre d'échange commercial, très actif, ainsi elle constitue

le centre d'achat de toute la région du Souf d'où l'importance de son marché.

Cette activité commerciale se traduit également par le grand axe commerçant qui, sur plus de 15km, s'allonge le long de la Route Nationale de Kouinine-Robbah où la densité commerciale y est forte au centre 15 à 20 établissements pour 100 m pour décroît vers les extrémités 4 à 5.

I.2.3. L'industrie :

Dans la foulée du commerce, un phénomène tout nouveau est apparu au Souf : l'industrie, depuis la décennie 1980, de petites unités privées se sont montées. Une spécialité est apparue, celle des parfums et cosmétique. Au domaine cosmétique sont venues s'ajouter 3 autres branches d'activité : l'agro-alimentaire, les plastique, les matériaux de construction, les boissons. Au total, aujourd'hui plus de 1600 personnes travaillent dans l'industrie.

Bref inventaire des unités industrielles du Souf :

- ✓ Parfums et cosmétique 20 unités
- ✓ Transformation du plastique 15 unités
- ✓ Fabrication carrelage 7 unités
- ✓ Transformation aluminium 6 unités
- ✓ Insecticides et détergents 4 unités
- ✓ Semoulerie, pâtes alimentaire 3 unités ;
- ✓ Unité déminéralisation eau 2 unités ;
- ✓ Unité de fabrication de peinture 1 unité ;
- ✓ Unité de fabrication des boissons 1 unité ;

I.2.4. L'agriculture :

L'agriculture est la principale activité de la région pour l'homme du Souf comme culture dominante, la Pomme de terre, le tabac (Guemar), le palmier dattier dans les Ghouts.

Les Ghouts saharienne fonctionne comme un agro-système, reposant sur la trilogie eau/habitat/palmeraie ; pour faire venir les eaux à eux, les soufis ont imaginé d'aller à elle, d'excaver suffisamment le sable pour que l'épaisseur restante soit 2m, planter alors les palmiers dans solde façon à ce qu'il sa il lent puiser l'eau par leur propre racine, c'est le principe de la culture Bour (en sec), on n'importe pas d'eau d'irrigation mais le palmier va chercher lui-même ce dont le besoin.

Les limites de ces Ghouts atteignent la frontière libyenne au sud et voisinent avec les Monts des Nemamchas, suivant une ligne passant par Negrien, s'étire à l'est à la frontière tunisienne et à l'ouest par l'immense oasis d'Oued Righ.

La Wilaya d'El Oued dispose d'une superficie agricole totale égale à 1591869 hectares mais la superficie réellement exploitée est 51437 hectares, la superficie irriguée est égale à 49982 hectares. (DSA : Direction de Service Agricole d'El-Oued en 2010).

I.2.4.1 Possibilités d'extension :

La mise en valeur en irrigué dans la région d'Oued Souf est possible le long de la frontière Algéro-Tunisienne, qui ne présente pas actuellement de problèmes particuliers d'aménagement. Quant à l'extension ou à la création de zones mise en valeur dans la vallée du Souf, il est à déconseiller

Dans l'immédiat, car l'irrigation par les nappes du CT et du CI ne font qu'aggraver la situation de la nappe phréatique, mais il est recommandé d'utiliser cette dernière pour l'irrigation de nouvelles parcelles. L'utilisation des eaux de cette nappe pour l'agriculture permettra de rabattre le plan d'eau, qui est actuellement proche de la surface du sol.

I.2.4.2 L'élevage :

Les animaux domestiques les plus élevés sont : les chèvres, les ovins, les chameaux, les chevaux, les mulets, les ânes, les poulets, les pigeons.

Souf	Population (Hab.)	Superficie (Km ²)	Densité Hab./Km ²	Superficie Agricole Km ²
Total	679064	44586	15.23	15918.69

Tableau1 : Résumé des résultats obtenus

I.2.4.2.1 Situation Topographique**I.2.4.2.2 Nature topographique de la région d'étude :**

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

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

I.2.4.2.3 Pente de terrain

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

I.2.4.2.4 Relief :

Le relief est très accidenté et couvert de chaînes des dunes surtout la partie sud-ouest, atteignant 100m d'hauteur, et reposant sur une formation quaternaire de plusieurs dizaines de mètres de sable fin éolien, compact, homogène et uniforme avec l'existence d'un nombre important de cratères creusés par l'homme (Ghouts) et des acquêtes (vide entre les dunes : hounds).

Dans le sud du Souf, on rencontre des dunes immenses et bien différenciées, atteignant parfois 200m de hauteur ; on les appelle les Ghroudes

I.2.4.2.5 Contexte Climatologique :

Dans cette étude, nous sommes appuyés sur les données de l'Office national de météorologie (1989-2017) enregistrées par la station météorologique de l'aéroport de Guemar, El-Oued.

I.2.4.2.6 Température :

Le climat désertique sec est connu pour des changements de température extrêmes entre la nuit et le jour, atteignant parfois 21°C à l'ombre. En hiver, la température descend à 3°C et monte à midi à 25°C à l'ombre. En été, la région connaît des températures élevées atteignant parfois 49°C à l'ombre. Le tableau suivant présente la température moyenne dans la région du Souf au cours de la période (1989-2017).

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Tmoy
T(C°)	27,94	26,65	22,7	18,45	16,42	18,43	22,5	28,35	32,23	37,95	38,74	38,28	27,39

Tableau2 : Les températures moyennes mensuelles (ONM1989-2017)

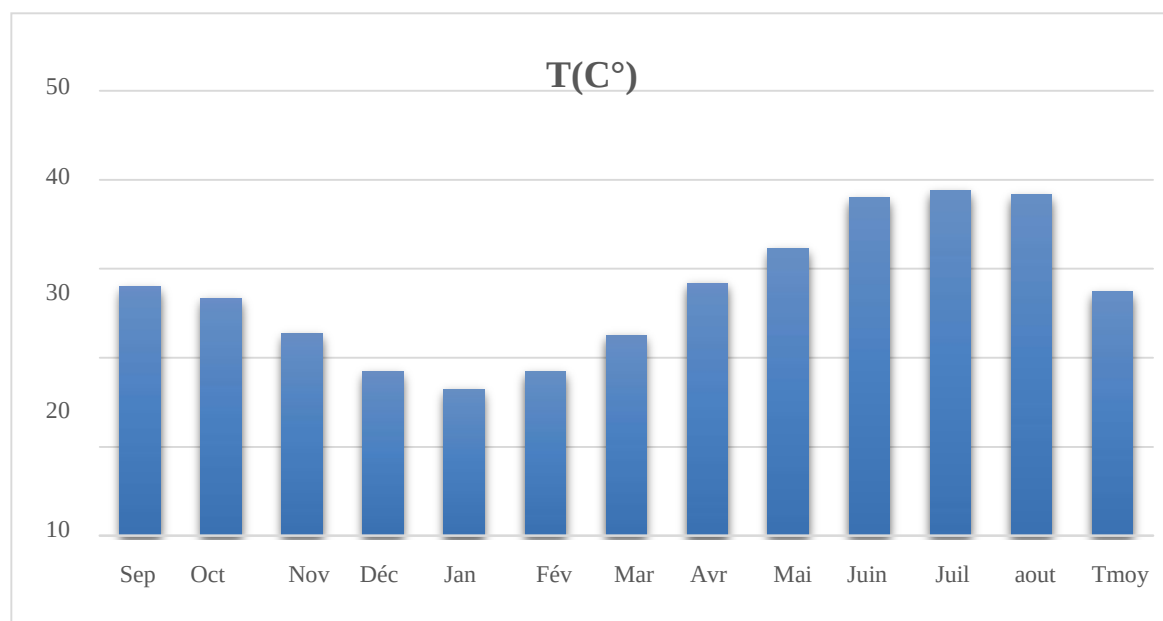


Figure2 : Histogramme des températures moyennes mensuelles (ONM1989-2017).

I.2.4.2.7 La précipitation :

Les dépressions de mousson en été, les eaux dépressions accompagnant la migration vers le sud des fronts polaires en hiver, et les bas niveaux du désert soudanais qui traversent notre désert du sud au nord pendant la période intermédiaire, sont les principales origines des précipitations dans les régions sahariennes. (Dubief1963)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Pmoy (mm)	6,96	6,46	6,7	6,8	17,64	6,32	6,83	6,76	5,51	0,81	0,36	2,07
Pmoycum	73.22mm											

Tableau3 : Les précipitations moyennes mensuelles (ONM1989-2017)

On note que la pluviométrie est très faible, puis que le maximum a été en janvier(17,64mm) et le plus bas en juillet(0,36mm), ce qui explique la dépendance totale de la population aux eaux souterraines.

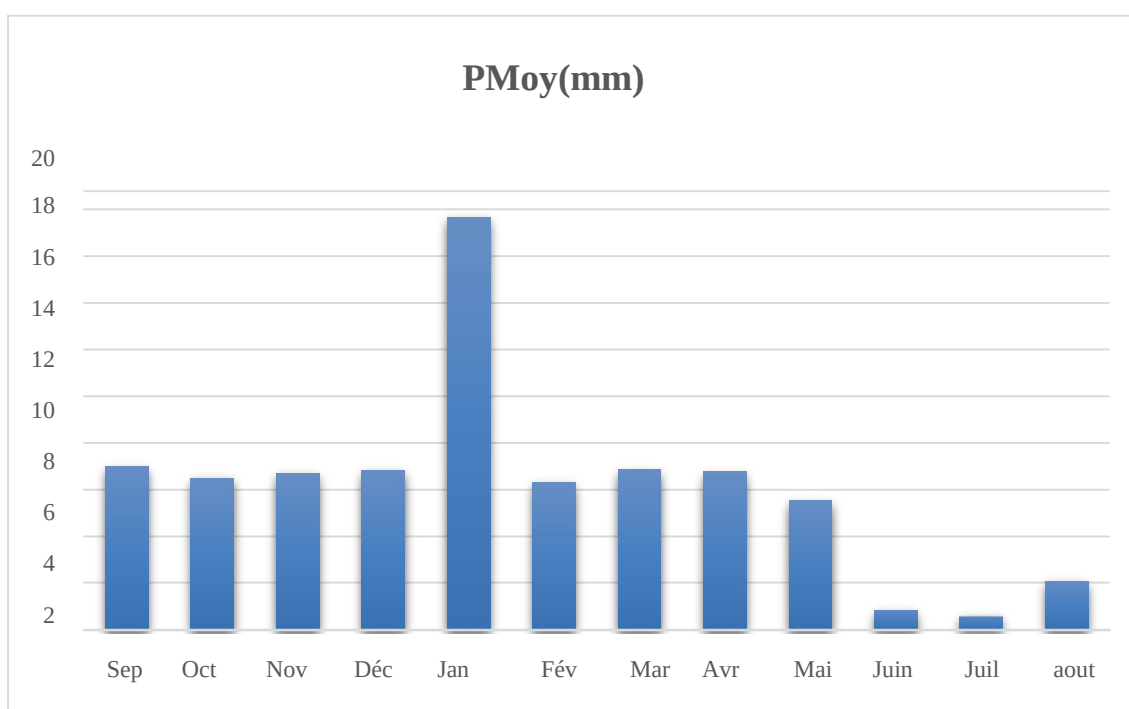


Figure3 : Histogramme précipitations moyennes mensuelles (mm) (ONM 1989-2017)

I.2.4.2.8 L'Humidité :

L'Histogramme (Figure 4) nous permet de distinguer les mois secs des mois humides. On note que les mois humides (HR > 49%) sont : octobre, novembre, décembre, janvier et février. Tandis que les mois secs sont les mois restants de l'année.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
HR(%)	44,58	51,01	56,74	64,21	64,24	53,25	46,56	42,28	36,98	32,04	29,91	32,93

Tableau4 : Humidité relative moyenne mensuelle (ONM1989-2017)

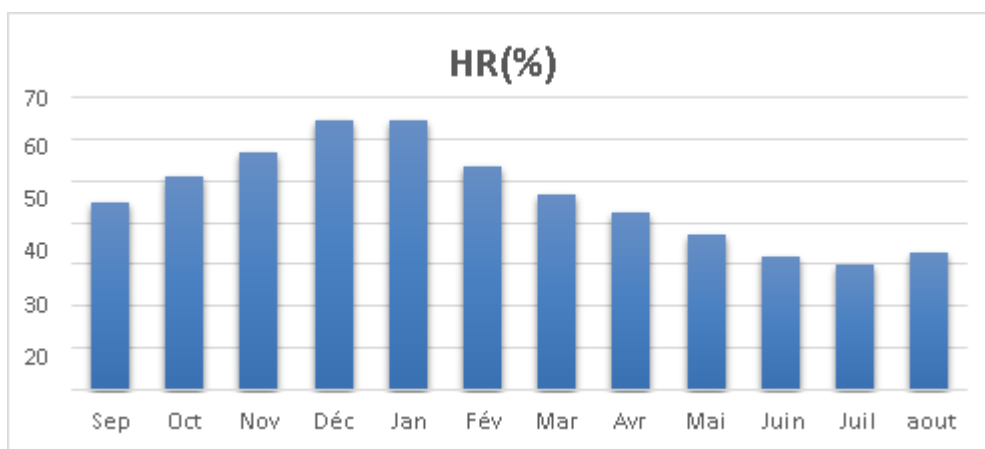


Figure4 : Variation mensuelles de l'humidité relative moyenne (ONM1989-2017).

I.2.4.2.9 L'Evaporation :

On note que l'évaporation atteint sa valeur maximale en été, atteignant 28,56mm en juillet, tandis que sa valeur la plus basse est de 6,97 mm en janvier, en raison de la nature de la région, caractérisée par des étés chauds et secs et des hivers froids.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Evap(mm)	13,56	10,87	9,76	8,03	6,97	11,43	15,82	19,47	23,03	26,87	28,56	19,43
Evap cum	193.8mm											

Tableau5 : Evaporation moyenne mensuelle(mm)(ONM1989-2017).

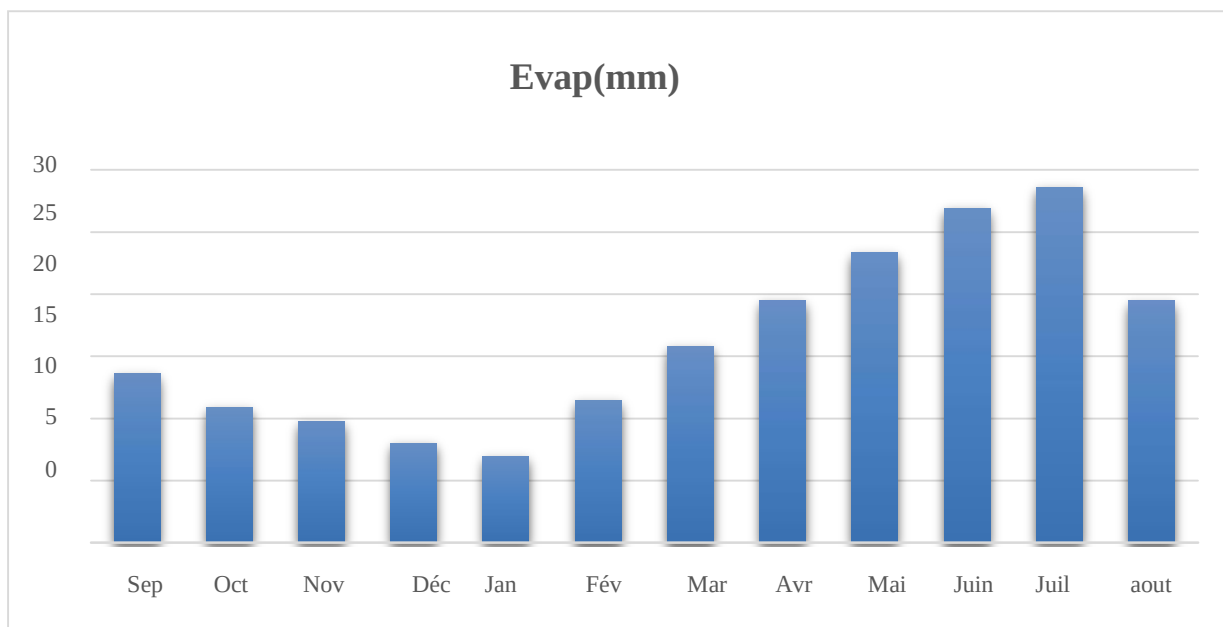


Figure5 : Variation mensuelle de l'Evaporation moyenne (mm) (ONM1989-2017).

I.2.4.2.10 Le Vent :

On peut dire que la vitesse moyenne mensuelle du vent varie entre 1,68 et 3,83m/s pour les mois de décembre et avril respectivement, avec une vitesse moyenne annuelle de 2,39m/s.

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout
Vent(m/s)	2,45	1,78	1,45	1,68	1,83	2,91	2,34	3,83	3,57	2,23	2,07	2,49

Tableau6 : Vitesses du vent moyennes mensuelles (ONM 1989-2017).

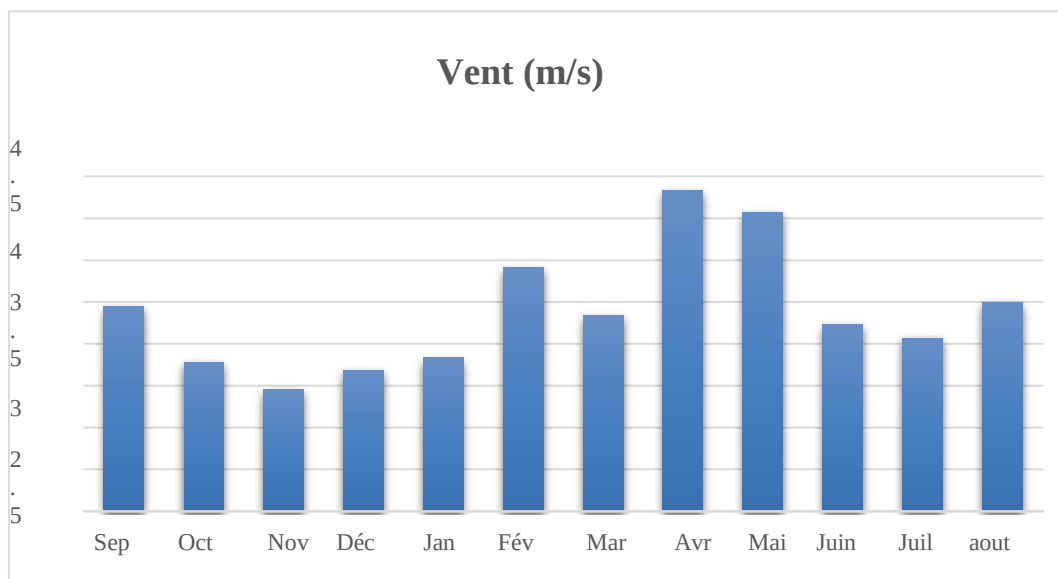


Figure6 : Histogramme des vitesses du vent moyennes mensuelles (m/s)

(ONM1989-2017).

I.2.4.2.11 La courbe pluviaux-thermique :

Suivant Gaussen et Bagnoles (inRkiouak,1996), un mois est dit sec lorsque $P < 2T$ avec P la Précipitation et T la température. La variation de ces deux paramètres au cours d'une année hydrologique moyenne est figurée sur le diagramme ombro-thermique (Figure11). On en déduit que la période sèche est étendue pendant tous les douze mois.

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct.	Nov.	Déc
Pmoy(mm)	17.64	6.32	6.83	6.76	5.51	0.81	0.36	2.07	6.96	6.46	6.7	6.8
2T(C°)	32.84	36.86	45	56.7	64.46	75.9	77.48	76.56	55.88	53.3	45.4	36.9

Tableau 7 : Données des précipitations et des températures moyennes mensuelles

(ONM1989-2017)

I.2.4.2.12 Le bilan hydrique :

$P = ETR + EX$ est la formule générale du bilan hydrique. Dans lequel :

P : Précipitation en(mm) ; ETR : la lame d'eau évaporée réellement en(mm). EX : Excédent ; $EX = R \times I$; R ruissellement ; I : infiltration.

Le Tableau suivant résume le calcul du bilan hydrique par la méthode de Thorntwaite.

Mois	Tp	IT	CL	ETPC	Pr	BH	CH	VR	RU	ETPR	Def	Exc
S	27,94	13,53	1,03	88,55	6,96	-81,59	-0,92	0,00	0,00	6,96	81,59	0
O	26,65	12,60	0,97	72,03	6,46	-65,57	-0,91	0,00	0,00	6,46	65,57	0
N	22,70	9,88	0,86	38,85	6,70	-32,15	-0,83	0,00	0,00	6,70	32,15	0
D	18,45	7,22	0,81	19,25	6,80	-12,45	-0,65	0,00	0,00	6,80	12,45	0
J	16,42	6,05	0,87	14,41	17,64	3,23	0,22	3,23	3,23	14,41	0,00	0
F	18,43	7,21	0,85	20,14	6,32	-13,82	-0,69	-3,23	0,00	9,55	10,59	0
M	22,50	9,75	1,03	45,28	6,83	-38,45	-0,85	0,00	0,00	6,83	38,45	0
A	28,35	13,83	1,10	98,94	6,76	-92,18	-0,93	0,00	0,00	6,76	92,18	0
M	32,23	16,80	1,21	161,93	5,51	-156,42	-0,97	0,00	0,00	5,51	156,42	0
J	37,95	21,51	1,22	270,83	0,81	-270,02	-1,00	0,00	0,00	0,81	270,02	0
J	38,74	22,19	1,24	293,42	0,60	-292,82	-1,00	0,00	0,00	0,60	292,82	0
A	38,28	21,80	1,16	264,51	2,07	-262,44	-0,99	0,00	0,00	2,07	262,44	0
Annuel	27,39	162,37		1388,15	73,46	-1314,69				73,46	1314,69	0

Tableau8 : Bilan hydrique d'après Thorntwaite(ONM1989-2017)

I.3. Le sol de la zone étude

I.3.1 Introduction

Le sable à El-Oued, une région du désert du Sahara en Algérie, joue un rôle crucial dans la formation du paysage et l'économie locale. Composé principalement de α -quartz et de calcite, le sable présente une texture fine et une nature éolienne, indiquant son origine soufflée par le vent. Cette texture de sable unique a influencé le développement de techniques agricoles spécialisées comme la méthode Ghout, reconnue par l'UNESCO, où des palmiers sont plantés au-dessus de la nappe phréatique dans des cavités entre les dunes de sable. Malgré l'environnement aride, la région s'est transformée en un pôle agricole prospère, produisant une variété de cultures telles que des dattes, des pommes de terre, des tomates, des arachides et des oignons. Des technologies modernes, telles que l'irrigation goutte à goutte et l'agriculture mécanisée, ont été utilisées pour améliorer la productivité et la durabilité de l'agriculture. Le terrain sablonneux, autrefois dominé par les dunes, abrite désormais de vastes terres agricoles irriguées par des sources d'eau souterraine, mettant en valeur l'intégration réussie de pratiques traditionnelles avec des méthodes agricoles modernes à El-Oued.

I.3.2 Les caractéristiques de sable d'El oued

Le sable dans la région d'El Oued est principalement composé d' α -quartz (SiO_2), représentant environ 97,6% du sable, avec une petite quantité de calcite (CaCO_3) également présente. Les dunes de sable dans la région sont formées par les courants d'air dominants, créant des dunes parallèles suivant la direction du vent. L'agriculture de la région, soutenue par le climat ensoleillé, permet une production et une exportation de cultures toute l'année, telles que les pommes de terre, les tomates, les cacahuètes et les oignons. Des techniques agricoles traditionnelles comme la méthode Ghout, reconnue par l'UNESCO, impliquent la plantation de palmiers juste au-dessus de la nappe phréatique dans les cavités entre les dunes de sable. De plus, des technologies modernes sont utilisées pour l'irrigation, la pollinisation, la fertilisation et la récolte, améliorant ainsi l'efficacité et la productivité de l'agriculture.

En résumé, le sable dans la région d'El Oued est principalement composé d' α -quartz et de calcite, formant la base du paysage désertique qui a été transformé en un pôle agricole prospère grâce à des pratiques agricoles innovantes et des technologies modernes.

I.3.3 La texture du sable à El-Oued

D'après les informations fournies dans les résultats de recherche, la texture du sable à El-Oued a plusieurs effets clés sur l'environnement local

I.3.4 Nature éolienne du sable :

Les grains de sable à El-Oued présentent une micro-texture qui indique une origine éolienne (transportée par le vent). Cela signifie que le sable a été façonné et transporté par les vents dominants de la région.

I.3.5 Stabilité du sable :

L'analyse thermique a montré que le sable à El-Oued est relativement stable, même à des températures élevées allant jusqu'à 800°C....Cela suggère que le sable a une structure robuste et bien définie.

I.3.6 Composition minérale :

Le sable est principalement composé de quartz α à grains fins (SiO_2), avec de faibles quantités de calcite (CaCO_3). Cette composition minérale contribue aux propriétés uniques du sable.

I.3.7 Impact sur l'agriculture :

La texture fine et stable du sable, combinée à la présence de sources d'eau souterraines, a permis le développement de techniques agricoles spécialisées comme la méthode Ghout dans la région d'El-Oued.

Cela a transformé l'environnement désertique autrement difficile en une zone agricole productive, soutenant les cultures et la culture des palmiers dattiers.

I.3.8 Susceptibilité à l'érosion éolienne :

La nature éolienne du sable signifie qu'il est sujet à être soulevé et transporté par les forts vents désertiques, ce qui peut entraîner une érosion éolienne et la migration des dunes.

Cela peut avoir un impact sur les infrastructures, l'agriculture et le paysage global de la région.

En résumé, la texture fine, stable et éolienne du sable à El-Oued a permis le développement de l'agriculture spécialisée, tout en rendant la région sujette à l'érosion provoquée par le vent et au déplacement des dunes, façonnant significativement l'environnement local.



Figure 7 : Les type de sol dans la zone d'étude

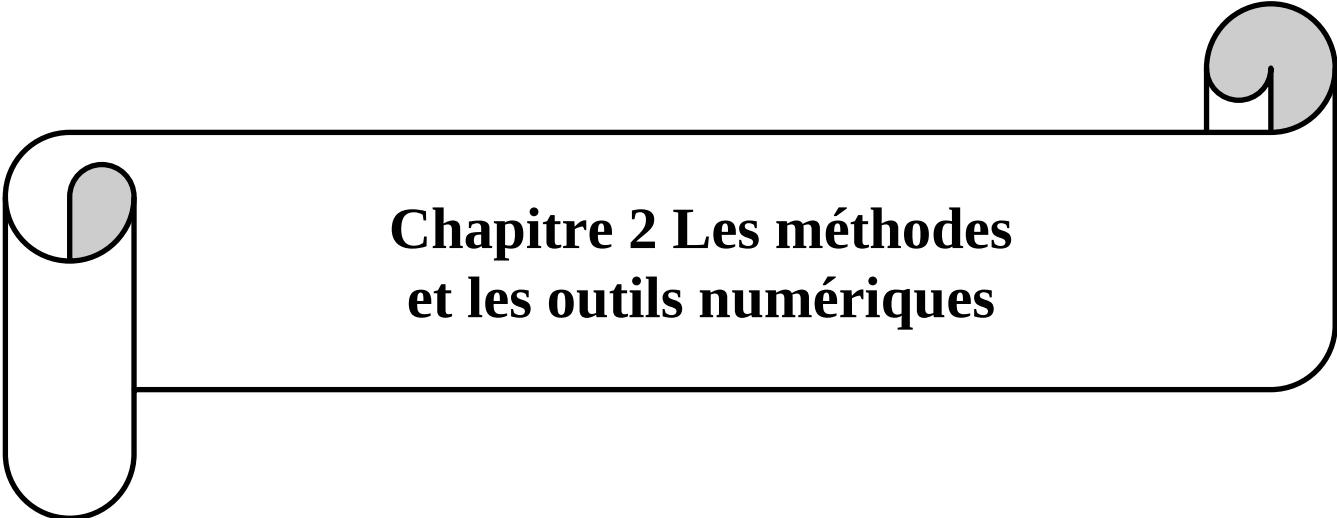
I.3.9 Conclusion :

Met en lumière sa composition géologique diversifiée, comprenant des formations détritiques telles que le sable, le grès, le sable argileux et l'argile.

De plus, l'analyse thermique a démontré la stabilité du sable d'El-Oued même à des températures élevées, soulignant sa résistance et sa robustesse.

Ces caractéristiques du sol, combinées à des pratiques agricoles innovantes comme le Ghout, ont permis de transformer le paysage désertique en une zone agricole prospère, soutenant la culture de diverses cultures et la préservation de l'écosystème oasien.

Ainsi, le sol de la zone d'étude d'El-Oued joue un rôle essentiel dans le développement agricole et la durabilité de la région, illustrant l'interaction complexe entre la géologie, l'hydrogéologie et l'agriculture dans cet environnement désertique.

A decorative graphic consisting of a horizontal scroll with rounded ends. The scroll is white with a black outline. At the top right corner, there is a small, shaded, circular element that looks like a scroll's end. The text "Chapitre 2 Les méthodes et les outils numériques" is centered within the scroll.

Chapitre 2 Les méthodes et les outils numériques

Introduction

Les outils numériques et les méthodes d'interpolation spatiale, notamment la géostatistique, offrent des moyens avancés pour estimer et modéliser des phénomènes spatiaux, en se basant sur des observations et des modèles numériques pour prédire des valeurs inconnues dans des contextes variés tels que la pollution de l'air ou le couplage.

II.1. Les Méthodes de interpolations spatiales

Les méthodes d'interpolation spatiale sont des techniques utilisées pour estimer des valeurs inconnues en se basant sur des données connues (figure 8). On distingue les méthodes déterministes, qui créent des surfaces en se basant sur des points mesurés, et les méthodes géostatistiques, qui utilisent les propriétés statistiques des données pour estimer les valeurs inconnues. En combinant ces approches, il est possible d'obtenir des estimations précises des propriétés des sols dans des régions comme El-Oued, en prenant en compte à la fois les aspects déterministes et géostatistiques de la distribution spatiale des données.

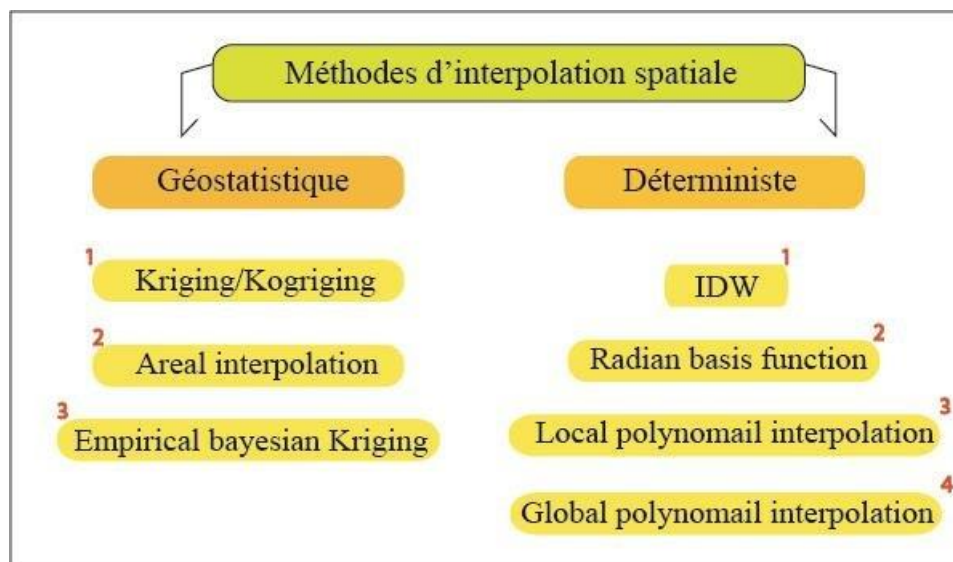


Figure8 : Schéma des méthodes d'interpolation spatiale

II.1.1. Méthodes déterministes

Les méthodes d'interpolation spatiale déterministes se basent sur l'observation que les valeurs les plus proches les unes des autres doivent se ressembler davantage. Elles attribuent donc des poids plus importants aux points connus les plus proches du point inconnu à estimer.

Distance inverse a une puissance ou pondérée (IDW):

L>IDW attribue des poids aux points connus en fonction inverse de leur distance au point inconnu.

Les points plus proches ont un poids plus important que les points éloignés—

L>IDW utilise une moyenne pondérée des valeurs des points connus pour estimer les valeurs inconnues

-C'est une méthode largement utilisée en géographie, cartographie et autres domaines [3]

Fonctions de base radiale (RBF):

Les fonctions de base radiale créent des surfaces à partir des points mesurés, en fonction du degré de lissage, comme l>IDW, elles peuvent être des interpolateurs exacts ou inexacts.

En résumé, les méthodes déterministes se caractérisent par l'utilisation de la proximité spatiale pour attribuer des poids aux points connus et estimer les valeurs inconnues. L>IDW est la méthode la plus répandue, mais d'autres approches comme les polynômes et les fonctions de base radiale sont également utilisées.

II.1.2. Méthodes géostatistique

Les méthodes probabilistes se différencient des méthodes déterministes par le concept du hasard. Elles proposent des modèles probabilistes qui permettent de modéliser les erreurs aléatoires de prévision, dans le but d'aider la prise de décision lors des analyses de risque.

Krigeage universel (KU) :

Le KU est une forme avancée de krigeage qui permet de prendre en compte les tendances globales dans les données, en plus de la structure spatiale. (Figure 9).

Cela permet d'obtenir des estimations plus précises, notamment dans les zones où les données sont rares ou irrégulièrement réparties.

Le KU est particulièrement utile pour cartographier des phénomènes géographiques comme les précipitations, la pollution ou la topographie.

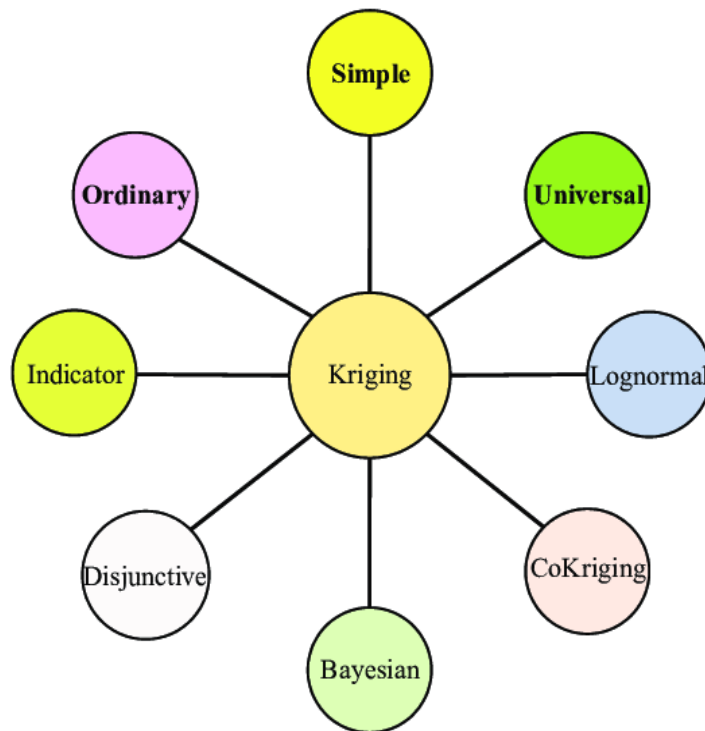


Figure09 : Schéma des méthodes de krigeage

II.2. Outils numériques :

II- 1 Introduction :

Le logiciel Surfer, développé par Golden Software, est un outil complet de cartographie, de modélisation et d'analyse 2D et 3D. Il permet de convertir rapidement et facilement des données XYZ en surfaces 3D représentant des contours, des vecteurs, des images, des reliefs ombrés et des cartes postales. Les principales nouveautés de la version 19 incluent la prise en charge des projections cartographiques, une installation 64-bit, l'export vers Google Earth, un gestionnaire des propriétés amélioré, la numérisation des valeurs Z, la superposition des cartes, et bien plus encore.

Surfer est largement utilisé par des scientifiques, des consultants, des ingénieurs et d'autres professionnels dans des domaines géo spatiaux tels que l'environnement, l'exploitation minière, le pétrole et le gaz, les SIG, les ressources en eau, l'archéologie et l'exploration. Les utilisateurs apprécient sa rapidité, sa facilité d'utilisation et la qualité des images produites. Cependant, certains ont noté un manque d'options de personnalisation et des problèmes de reconnaissance des systèmes de coordonnées.

La version la plus récente de Surfer est la version 27.2.282, avec des mises à jour et des améliorations disponibles pour les utilisateurs disposant d'un abonnement logiciel actif. Il est important de noter que Surfer est un logiciel basé sur Windows, mais peut être exécuté sur Mac, Linux ou Unix en utilisant un émulateur Windows recommandé pour tester la fonctionnalité avant l'achat [5].

II-3. Présentation de l'interface du logiciel :

L'interface se présente comme souvent pour les logiciels de traitement de l'information géographique de la manière suivante.

Une barre des menus en haut (Figure 10).

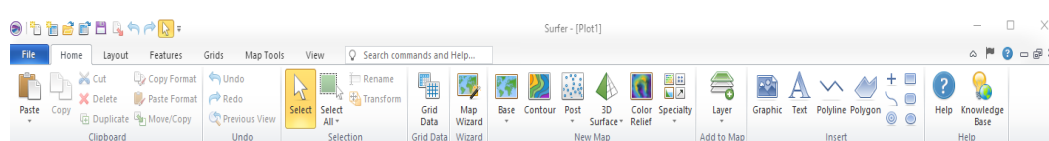
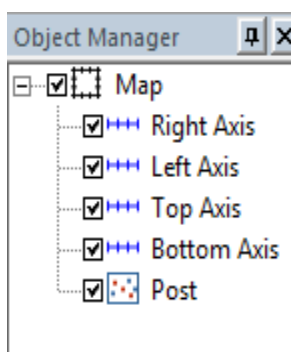


Figure10 : Barre des menus

Nous utiliserons principalement les menus Grid et Maps un cadre principal (plot) dans lequel s'affichera vos cartes au centre, et à gauche, le cadre objet manager (Figure11) dans lequel vous pourrez modifier la disposition de vos données, les afficher ou les supprimer, en modifier la symbologie, etc. Par analogie, cela ressemble aux calques d'adobe illustration ou plus encore aux couches des logiciels de SIG.

a. Object manager



b. plot

A1		42			
	A	B	C	D	
1	42	1			
2	89959,595	2395950,0	-3,398	Irbuse	
3	89958,432	2395950,8	-3,252	Irbuse	
4	89957,311	2395951,8	-3,188	Irbuse	
5	89956,129	2395952,9	-3,028	Irbuse	
6	89955,098	2395953,9	-2,935	Irbuse	
7	89953,846	2395955,2	-2,836	Irbuse	
8	89952,763	2395956,2	-2,755	Irbuse	

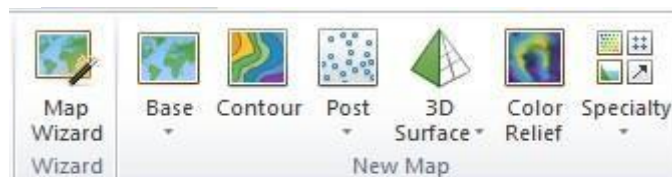
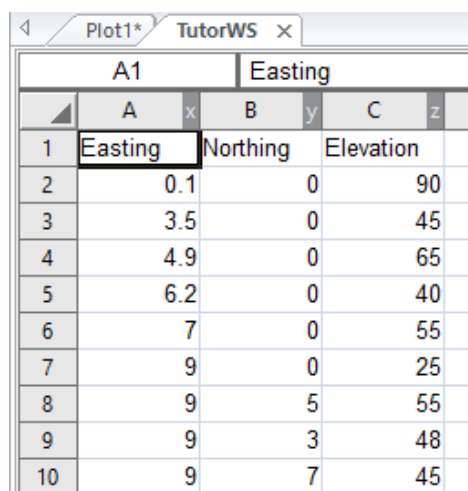


Figure11 : Différentes cartes possibles.

II.3.1. Mise en forme le fichier Excel :

Vos données de terrain une fois téléchargées sont affichées sous Excel (Figure12). Comme pour Profiler, il faudra effectuer un premier traitement sur Excel qui ressemblera fort à celui de Profiler avec néanmoins quelques petites différences.

Supprimez les mêmes colonnes que pour profiler. Vous avez ici une colonne supplémentaire que vous devez garder celle où vous avez indiqué sur le terrain le code du levé, à savoir du semi soudes lignes de ruptures.



	A	B	C
1	Easting	Northing	Elevation
2	0.1	0	90
3	3.5	0	45
4	4.9	0	65
5	6.2	0	40
6	7	0	55
7	9	0	25
8	9	5	55
9	9	3	48
10	9	7	45

Figure12 : Work sheet Surfer

Pour séparer les lignes de ruptures, ouvrez un nouveau document Excel. Sélectionnez toutes vos lignes de rupture et copier/coller les dans la nouvelle feuille. Il est important de les conserver dans le premier fichier, ne les coupez pas.

Vos lignes de rupture ont sûrement des noms différents selon l'endroit où vous les avez relevées sur la plage. Pour une meilleure organisation des données et un affichage optimal sous surfer, il faut indiquer le nombre de lignes que vous avez pour chaque groupe de ligne de rupture.

II.3.2. Affichage des points :

A partir de votre simple fichier Excel (Figure 13), vous pouvez afficher vos points. Allez dans Maps ; contour Maps (Figure14). Les points de votre plage s'affichent dans le plot. Dans Object manager s'affichent les composantes de votre Maps (axes, titre, type d'affichage...).

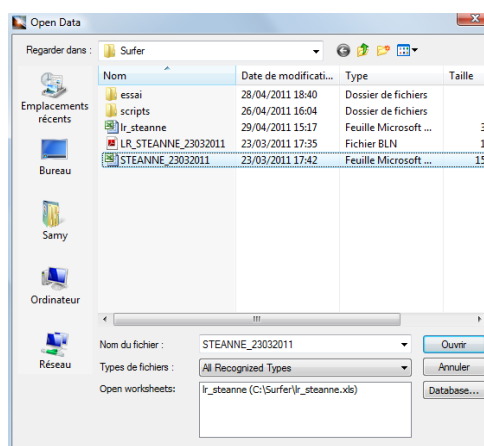


Figure13 : Grille ouverte

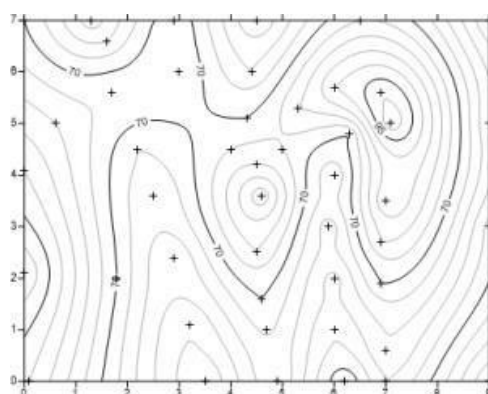


Figure14 : Carte de contour

➤ Ouverture d'autres cartes :

A partir du menu Maps (new), amusez-vous à expérimenter les contour Maps, image Maps, Shaded Relief Maps, grid Victor, 3D wire frame, 3D surface. Toutes ces cartes s'ouvrent à partir d'une grille. A vous de découvrir les spécificités de chacune. Pour plus de précisions sur la manière dont elles sont produites, je vous renvoie au tutoriel et aussi te internet (15).

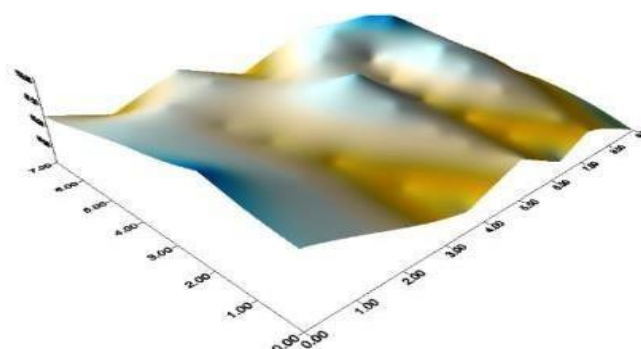
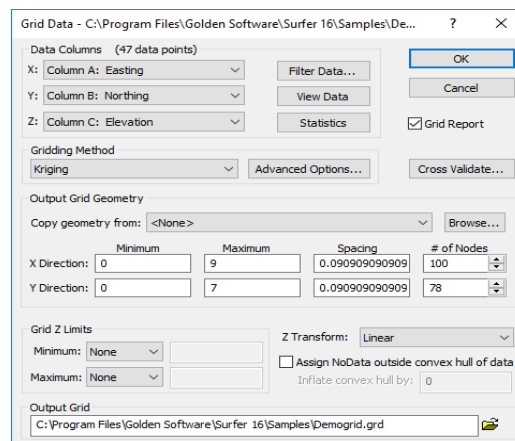


Figure15 : 3DSurface Maps**II.3.3. Créer une grille x, y, z :**

La Fenêtre (Figure16) ci-dessous s'affiche. Les colonnes A, B, C représentent l'emplacement de vos coordonnées x, y, z. Cliquez sur view data pour vous assurer qu'elles correspondent bien. Sice n'est pas le cas, vous pouvez les intervertir.

Le Giddings Méthode correspond à la méthode d'interpolation utilisée. Par défaut, nous utilisons la méthode fiable en ce qui nous concerne, le Kriging.

**Figure16 : Les options de quadrillage****II.3.4. Distance inverse à une puissance :**

Avec la distance inverse à une puissance, les données sont pondérées pendant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre diminue avec la distance du nœud de la grille. La pondération est attribuée aux données via l'utilisation d'une puissance de pondération qui contrôle la façon dont les facteurs de pondération diminuent à mesure que la distance par rapport à un nœud de grille augmente. Plus la puissance de pondération est élevée, moins il y a de points d'effet éloignés du nœud de grille lors de l'interpolation. À mesure que la puissance augmente, la valeur du nœud de grille se rapproche de la valeur du point le plus proche. Pour une puissance plus petite, les poids sont répartis plus un informant entre les points de données voisins (Figure17).

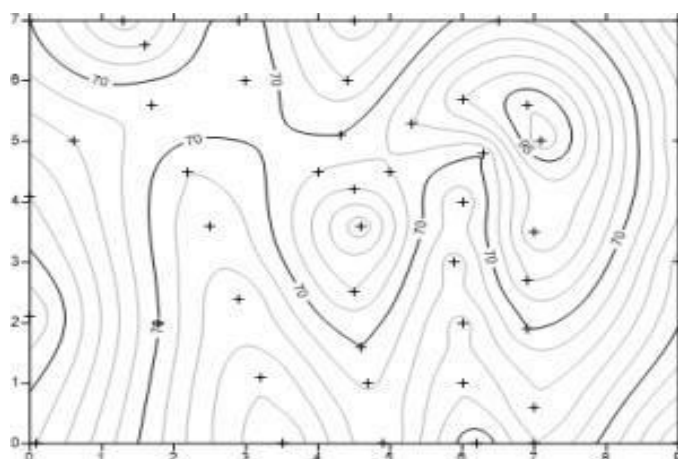


Figure17 : Distance inverse à une puissance grille

II.4. Krigage

Le krigage est une méthode de quadrillage géostatistique qui s'est avérée utile et populaire dans de nombreux domaines. Cette méthode produit des cartes visuellement attrayantes à partir de données irrégulièrement espacées. Le krigage tente d'exprimer les tendances suggérées dans vos données, de sorte que, par exemple, les points hauts puissent être connectés le long d'une crête plutôt qu'isolés par des contours de type bull'seye.

Le krigage (Figure 18) est une méthode de quadrillage très flexible. Vous pouvez accepter les valeurs par défaut du krigage pour produire une grille précise de vos données, ou le krigage peut être personnalisé sur un ensemble de données en spécifiant le modèle de variogramme approprié. Dans Surfer, le krigage peut être un interpolateur exact ou un interpolateur déliage en fonction des paramètres spécifiés par l'utilisateur. Il intègre l'anisotropie et les tendances sous-jacentes de manière efficace et naturelle.

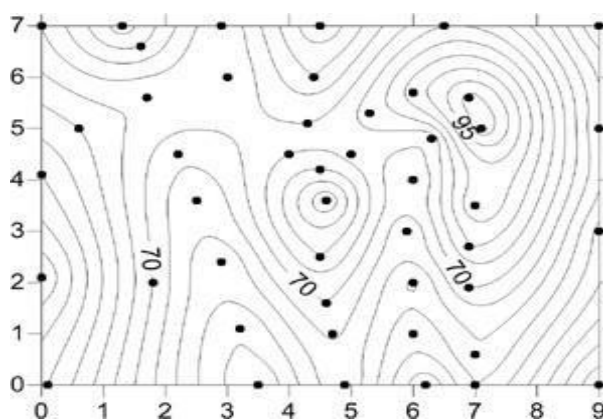


Figure18 : Grille de krigage

Dans la boîte de dialogue (Figure 19) Données de grille, spécifiez Krigeage comme méthode de quadrillage et cliquez sur le bouton Options avancées pour ouvrir la boîte de dialogue Options avancées de données de grille.

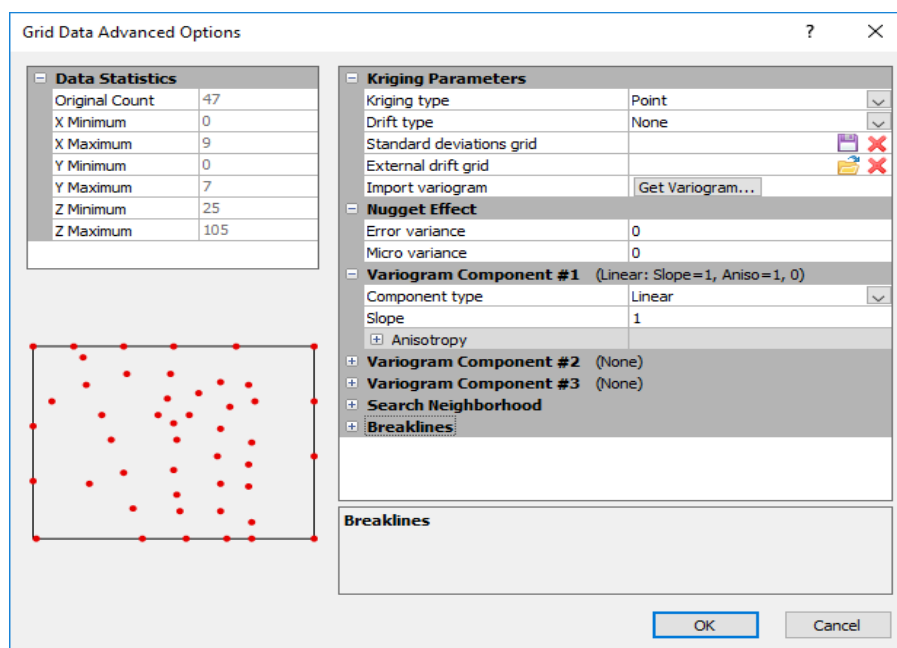


Figure19 : Boîte de dialogue Options avancées de krigeage

II.5. Composants du variogramme :

La figure 20 présente une fenêtre qui permet de choisir les propriétés du krigeage. Si vous n'avez pas modélisé le variogramme, laissez le variogramme réglé sur les valeurs par défaut d'origine (variogramme linéaire ; pente=1, anisotropie=1,0 ; pas d'effet de pépité).

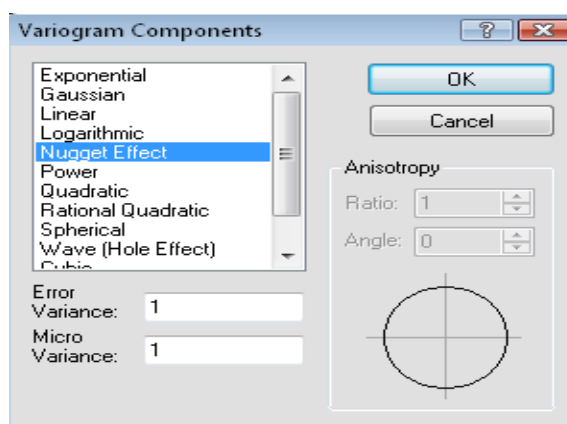


Figure20 : Composants du variogramme

➤ **Liste des modèles de variogramme :**

Les principaux modèles implémentés dans le logiciel Surfer sont : Exponentiel, Gaussien, Linear, Logarithmique, Nugg et Effet, Power, Quadratique, Rational Quadratique, Sphérique, etc.

➤ **Fenêtre expérimentale de variogramme :**

La Fenêtre Expérimental de la Fenêtre Propriétés (Figure 21) contient des paramètres pour le variogramme expérimental tels que la direction du décalage, le type d'estimateur, la distance de décalage maximale, le nombre de décalages, la largeur du décalage et l'échelle verticale

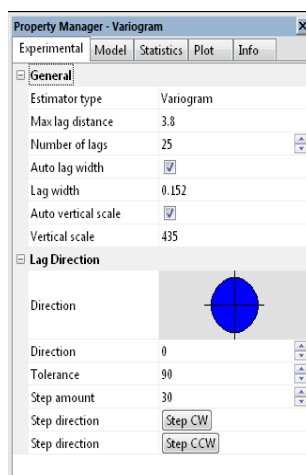


Figure21 : La Fenêtre des Propriétés du modèle expérimental

La Fenêtre Expérimental de la Fenêtre Propriétés (Figure21) contient les paramètres du variogramme expérimental. Le diagramme de la section Direction du décalage montre la direction et la taille de la Fenêtre angulaire du variogramme actuel.

➤ **Fenêtre modèle :**

La Fenêtre Modèle vous permet de définir un modèle de variogramme spécifique et ses paramètres tels que les composants du variogramme, la variance d'erreur, la micro variance, l'ajustement automatique du variogramme et l'anisotropie.

La Fenêtre Modèle de la boîte de dialogue Propriétés (Figure22) du variogramme vous permet de définir un modèle de variogramme spécifique et ses paramètres. Calculer un variogramme expérimental à partir de vos données est le seul moyen sûr de déterminer quel modèle de

variogramme vous devez utiliser. Il y a de longs chapitres dans de nombreux manuels de géostatistique traitant des outils et des techniques nécessaires pour générer un variogramme

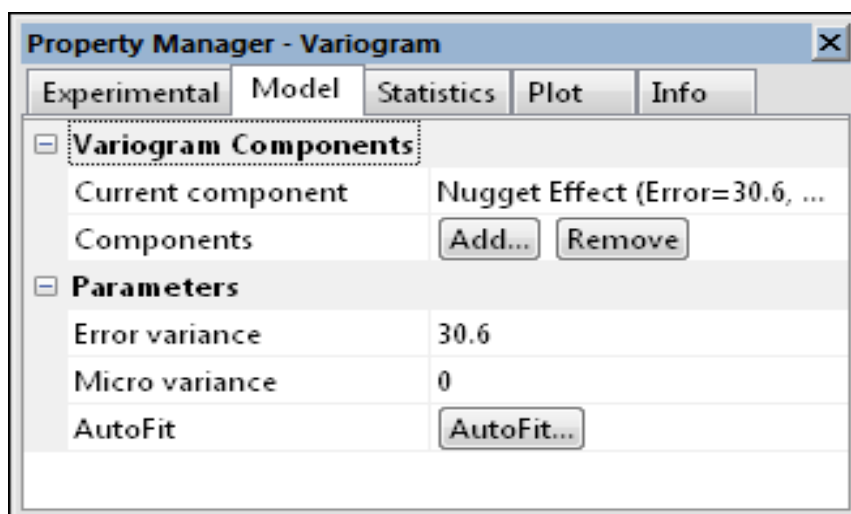


Figure22 : La boîte de dialogue Propriétés

➤ **Graphiques du modèle de variogramme :**

En cas de doute, vous devez utiliser le modèle de variogramme linéaire avec les paramètres par défaut seuil(C)et portée(a). Dans les propriétés du variogramme de la Fenêtre Propriétés, cliquez sur l'onglet Modèle. Cliquez sur le bouton Ajouter pour ouvrir la boîte de dialogue Ajouter un composant. Sélectionnez l'un des composants du modèle de variogramme (Figure23) et cliquez sur le bouton OK.

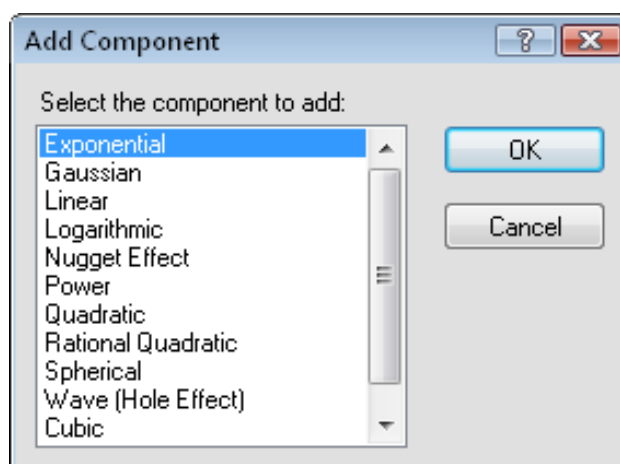


Figure23 : Les modèles de variogramme

➤ Fenêtre Statistiques :

Cliquez sur le bouton Afficher les statistiques de la Fenêtre Statistiques de la Fenêtre Propriétés pour afficher les histogrammes et les nuages de points des données, ainsi que fournir des statistiques sur les données. Pour ouvrir la boîte de dialogue Statistiques, cliquez sur le variogramme existant. Dans la Fenêtre Propriétés, cliquez sur l'onglet Statistiques. Cliquez sur le bouton Afficher les statistiques et la boîte de dialogue Statistiques s'ouvre.

Dans la boîte de dialogue Statistiques, vous pouvez afficher un histogramme X, Y ou Z, afficher des statistiques ou générer un rapport de variogramme (Figure24).

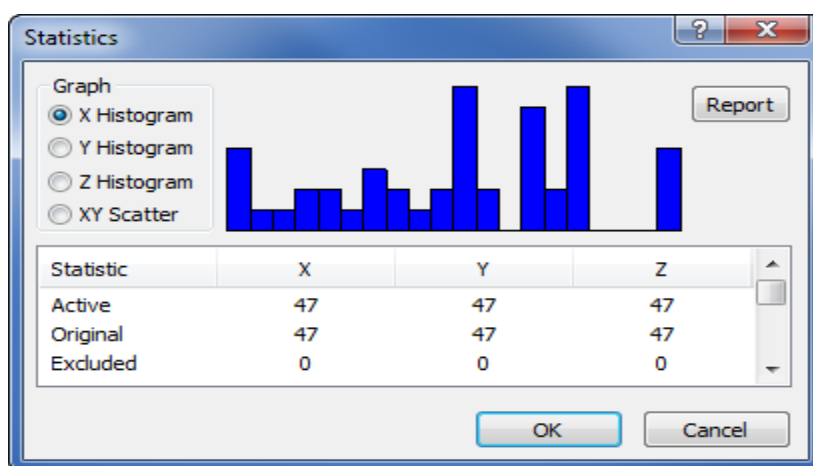


Figure24 : fenêtre Statistiques

➤ Éditeur de grille :

L'éditeur de grille vous permet également d'ouvrir un fichier image et de l'enregistrer en tant que fichier de grille (Figure25).

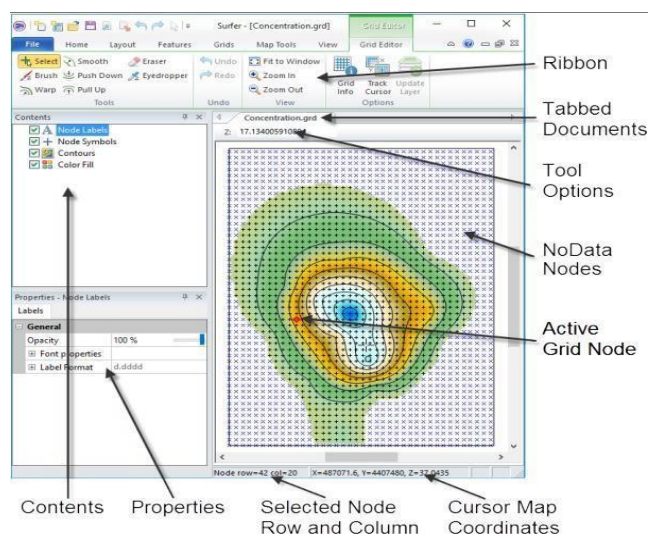


Figure25 : L'éditeur de grille

➤ **Montage du variogramme surfer :**

➤ **Les paramètres du variogramme :**

Le modèle de variogramme spécifie mathématiquement la variabilité spatiale de l'ensemble de données et du fichier de grille résultant. Les poids d'interpolation, qui sont appliqués aux points de données pendant les calculs des nœuds de grille, sont des fonctions directes du modèle de variogramme (Figure26).

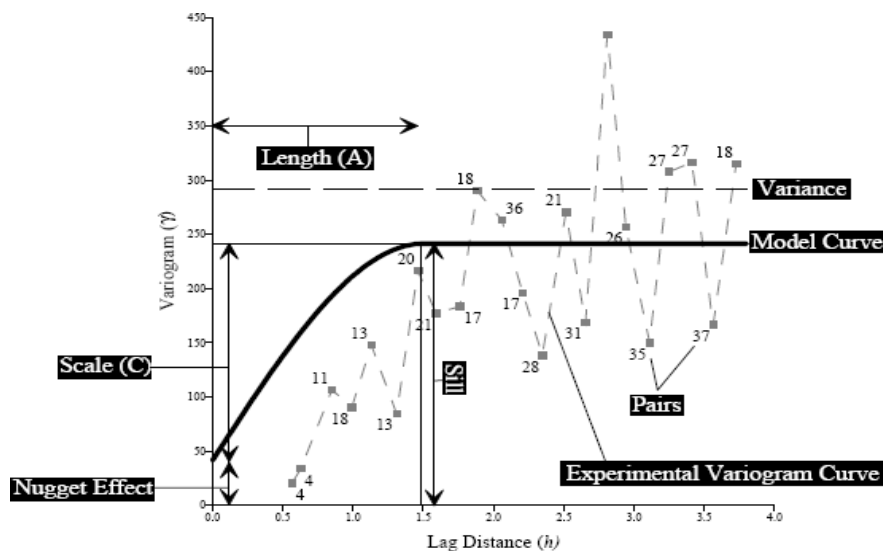


Figure26 : Les paramètres du variogramme

➤ **Effet de pépité :**

L'effet pépité quantifie les erreurs d'échantillonnage et de dosage et la variabilité à courte échelle.

➤ **Le seuil partiel :**

Le seuil partiel(c1) est de la composante verticale structurée du variogramme.

➤ **Le seuil :**

Le seuil est l'échelle verticale totale du variogramme (effet pépité + somme de toutes les échelles des composants). Les modèles de variogramme linéaire, logarithmique et de puissance n'ont pas de seuil.

➤ **La portée :**

La longueur est la plage horizontale du variogramme. (Certains modèles de variogramme n'ont pas de paramètre de longueur ; par exemple, le modèle linéaire a une pente à la place.)

➤ **La variance :**

La variance est l'écart quadratique moyen de chaque valeur par rapport à la valeur moyenne. La variance est indiquée par la ligne horizontale en pointillés dans le diagramme ci-dessus.

Défauts ne sont pas pris en charge lors de la création d'un volume de grille (données XYZC).

En fin, les outils numériques comme Surfer offrent une gamme étendue de fonctionnalités pour l'analyse, la modélisation, et la communication des données géospatiales, permettant aux utilisateurs de mieux comprendre et de présenter leurs résultats de manière efficace et professionnelle à un large public, qu'il soit technique ou non-technique

En conclusion, les méthodes d'interpolation spatiale déterministes telles que l>IDW et les RBF offrent des approches précises pour estimer des valeurs entre des points mesurés, en se basant sur la proximité spatiale. Le krigeage, méthode géostatistique, prend en compte la structure spatiale des données pour des prédictions plus robustes. Ces méthodes, combinées à des outils numériques comme Surfer, permettent une analyse approfondie et une visualisation efficace des données spatiales. Le choix de la méthode dépend de la nature des données et des objectifs de l'étude, et une comparaison des résultats peut guider vers la méthode la plus adaptée. En utilisant ces techniques et outils de manière judicieuse, il est possible d'obtenir des interpolations précises et fiables pour diverses applications en géosciences, environnement, urbanisme, et bien d'autres domaines.

II.6. Échantillonnage

Objectif d'expérience :

Cette étude vise à analyser un sol de la région d'étude et à préparer une solution aqueuse à partir de celui-ci pour étudier certaines de ses principales caractéristiques. Cette expérience a pour objectifs de :

- Évaluer la conductivité électrique du sol, qui reflète sa capacité à transporter les produits chimiques et les ions dans le sol.
- Mesurer la teneur en calcium et en sodium du sol, qui sont des éléments essentiels influençant la fertilité du sol et la croissance des plantes
- Échantillons de terre de différents points - Sacs en plastique refermables - Boîtes de 50 ml avec couvercles
- Petite pelle - Bocal de laboratoire - Agitateur magnétique - Aimants
- Eau distillée - Conductimètre - Balance analytique

Les phase de l'expérience

Phase 1 : Reconnaissance sur le terrain

Dans cette phase, nous déterminons la zone d'étude qui doit avoir des zones de terre avec des caractéristiques différentes et non urbanisées pour la pureté des échantillons. La zone d'étude comprend la route nationale n°30 du Ghazel Dhabbi au premier bassin olympique de Bayadha.

(Figure 27).

Phase 2 : Préparation des échantillons pour analyse

Dans cette phase, les échantillons de terre sont préparés pour l'analyse en suivant les étapes suivantes :

Mesure et préparation des échantillons pour l'agitation magnétique :

Pour mesure et prépare les échantillons pour l'agitions magnétique on va Prélever 10 mg de chaque échantillon de terre à l'aide d'une balance analytique et Placer les échantillons de terre pesés dans un bocal contenant 100 ml d'eau distillée

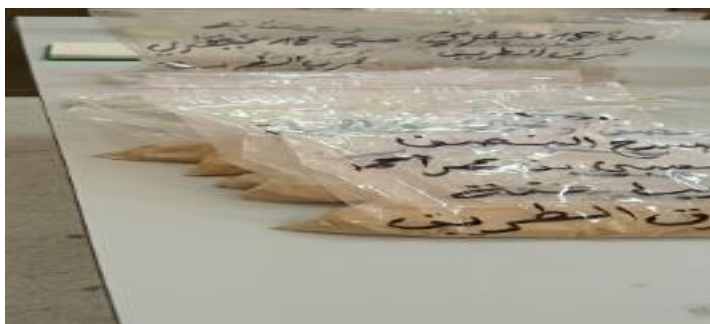


Figure 27 : les échantillons dans sacs refermables

. 2Agitation magnétique :

Pour préparer la solution à l'aide d'un agitateur magnétique, on suit les étapes suivantes :

La solution aqueuse est placée sur le tableau magnétique, puis nous plaçons les aimants dans les bocaux de laboratoire et faisons fonctionner l'appareil à une vitesse de mélange normale (1 ~ 3) pendant 15 minutes pour remuer la solution, puis à une vitesse de mélange rapide. (6 ~ 9) pour terminer le mélange. (Figure28) Ainsi, nous avons terminé l'étape de mélange et la solution aqueuse est prête pour le processus de filtration.

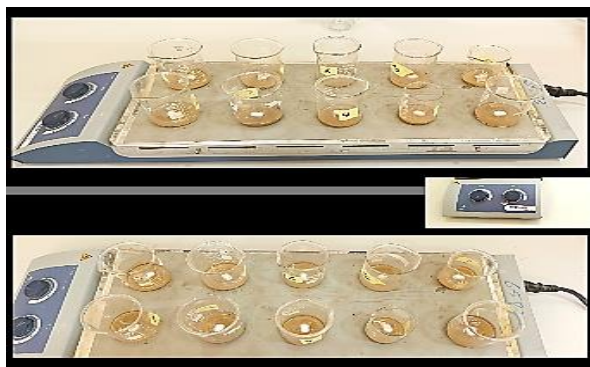


Figure28 : Dispositif d'agitation magnétique avec les échantillons

3. Filtration :

Vous trouverez ci-dessous un résumé des étapes du processus de filtration des échantillons pour analyse. (Figure29).

Préparez 20 boîtes avec du papier filtre. Après cela, nous laissons le mélange reposer pendant 12 à 24 heures. Ensuite, nous effectuons l'extraction aqueuse à l'aide de papier filtre transparent et sans impuretés dans des récipients avec couvercle. Après ces étapes, nous obtiendrons des échantillons filtrés et homogènes, prêts à être analysés.



Figure 29 : Les boîtes avec du papier de filtration

Mesure de la conductivité :

Pour mesurer la conductivité électrique d'un extrait de sol, nous étalonnons le conductimètre à l'aide de solutions étalons avec des valeurs de conductivité connues, puis nettoyons bien la sonde de mesure avec de l'eau déminéralisée avant chaque mesure. (Figure30).

La conductivité de l'eau distillée est mesurée en termes de blancheur de l'appareil pour S'assurer qu'elle est faible (moins de 10 micros siemens/cm), puis nous plaçons l'échantillon d'extrait de sol dans un bocal et insérons la sonde de mesure pour lire la valeur de conductivité électrique de l'eau distillée.

Échantillon sur l'écran de l'appareil et enregistrez-le. Une fois terminé, la sonde est bien rincée avec de l'eau distillée et le processus est répété pour mesurer 20 échantillons différents, en veillant à nettoyer soigneusement la sonde après chaque mesure pour éviter la contamination des échantillons.

La mesure de la perméabilité électrique est l'une des analyses importantes pour évaluer la fertilité et la salinité du sol, en tenant compte du maintien de la propreté de la sonde et de l'exécution des mesures à température constante.



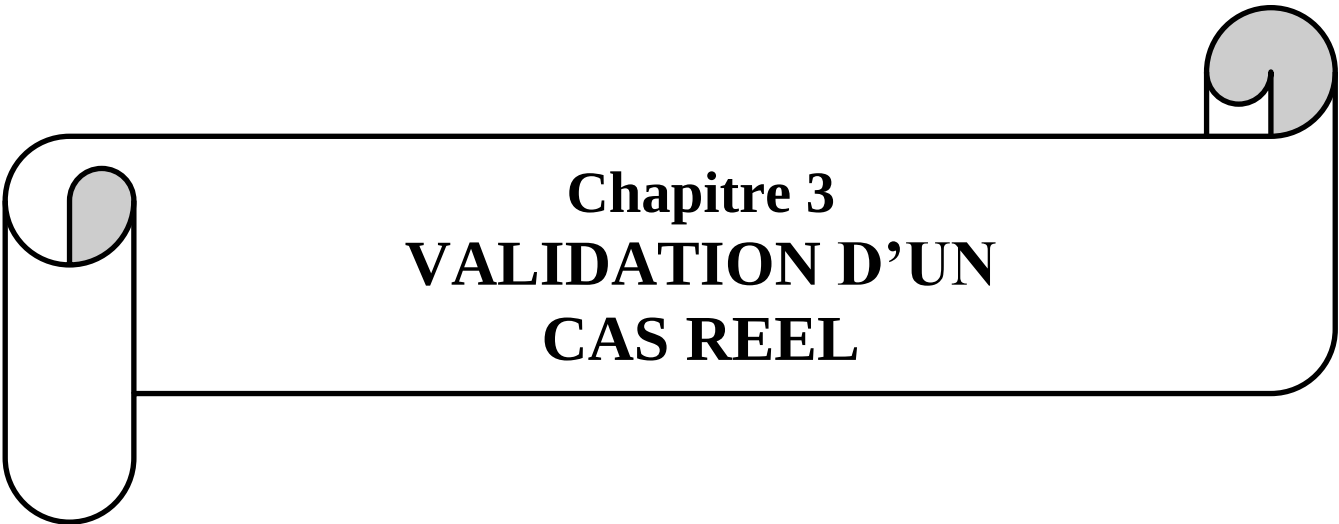
Figure 30 : multimètre de laboratoire conductivité et ph

Pour la phase 2 : Analyse au laboratoire **Fatilib**

FATI LAB utilise les normes ISO pour analyser le calcium et le sodium dans des échantillons de sol en solution aqueuse. Pour le calcium, la norme ISO 6058 est utilisée pour évaluer sa teneur en eau, essentielle pour diverses applications environnementales. Pour le sodium, l'ISO 9964 comprend des méthodes de détermination par spectrométrie d'absorption atomique, applicables à différents types d'échantillons d'eau. Ces normes sont nécessaires pour évaluer les niveaux de ces éléments dans l'eau à des fins de contrôle qualité et d'études environnementales.

II.7. Conclusion :

Enfin, c'est ainsi que se déroulent les étapes de l'expérience pour préparer les échantillons de terre en solution aqueuse prêts pour l'analyse en laboratoire. Cette expérience a couvert les aspects physiques et chimiques, où l'objectif était de tester nos connaissances théoriques et appliquées pour préparer un échantillon de terre en solution aqueuse avec des propriétés physiques et chimiques, et en extraire ses caractéristiques pour l'utiliser dans un variogramme dans le logiciel Surfer 19, permettant aux utilisateurs de créer des cartes, des graphiques et des analyses statistiques à l'aide de données spatiales.

A large, horizontal decorative scroll with a black outline and a light gray fill. The scroll is unrolled in the center, with the ends curling upwards. The text is centered within the unrolled portion.

Chapitre 3

VALIDATION D'UN CAS REEL

Introduction :

Comprendre les propriétés physiques et chimiques du sol est essentiel dans de nombreux domaines des sciences agricoles, environnementales et techniques. La détermination des caractéristiques des sols revêt une grande importance pour améliorer la gestion des ressources naturelles et parvenir à un développement durable.

Dans ce chapitre, nous aborderons l'estimation des valeurs liées aux propriétés chimiques et physiques, à savoir le sodium, le calcium et la conductivité du sol dans la zone d'étude une partie du sud de la région d'El oued, où l'étude a été menée sur 20 échantillons de ce sol et nous en avons discuté dans le chapitre précédent.

III.1. Principaux composants du sol :

Le sol est un système complexe formé de très nombreux composants minéraux et organique soumis à des phénomènes physique, chimique et biologique en constante interaction. Il comprend :

- **Une fraction minérale :**

Faite de fragments de roche issus du sous-sol comprenant, du plus fins au plus gros, des argiles, des limons, des sables, et d'ions comme les anions phosphate, (PO_4^{3-}), sulfates (SO_4^{2-}) et le nitrate (NO_3^-). Les silicates telles les argiles, constituent 95% des roches de la croûte terrestre ; quant au grain de sable, il s'agit d'un cristal de quartz, forme cristalline de la silice.

- **Des organismes vivants :**

Racines, champignons, invertébrés, quelques vertébrés et une multitude de microorganismes qui transforment la matière minérale.

- **De l'humus :**

Matière organique en cours de minéralisation essentiellement issue de la feuille morte, cadavres, excréments.

- **Caractéristiques du sol :**

Le sol comporte trois phases : une phase solide (qui est minérale et organique), une phase liquide ou solution du sol (qui correspond à l'eau et aux éléments dissous), et une phase gazeuse (composé principalement de l'oxygène, de méthane, de dioxyde de carbone).

Le sol est d'abord caractérisé par une texture et une structure qui va fortement conditionner ses propriétés physiques et chimique, notamment celle liées à l'eau.

Des essais ont été effectués au laboratoire FATILABO d'El-Oued au Mars 2024, sur des échantillons prélevés de la zone non saturée, pour déterminer les caractéristiques physicochimiques (Conductivité électrique, le sodium et le calcium) du sol de la zone d'étude. A cet effet 20 échantillons sont prélevés de différents endroits à des profondeurs de 20 cm par la tarière manuelle.

III.2. Données et méthodes :

Pour déterminer les caractéristiques physicochimiques du sol de la zone non saturée de la région d'El-Oued, on a utilisé les données de concentration de calcium, de sodium et de conductivité électrique des sites bien répartie dans le secteur d'étude et les données géographiques spatiales qui déterminent le relief environnant chacune de ces sites.

Pour effectuer cette étude, les données de concentration de ces paramètres de sol inventories sont collectées par 20 échantillons de sol pour la période Mars 2024.

Le traitement des données a été réalisé par des logiciels spécialisés que sont :

- STATISTICA 8.0 qui ont servi à l'étude statistique.
- Surfer 19 qui a permis de faire l'interpolation des données et produire les cartes présentes dans les résultats.

Trois techniques d'interpolation sont effectuées : la méthode de pondération inverse de distance (IDW), méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF) et le krigeage universel (KU) (voir le chapitre précédent).

III.2.1. Analyse des données :

L'évaluation rigoureuse du ou des meilleurs interpolateurs est soumise à une méthode d'analyse statistique et visuelle. Celle-ci intègre de nombreux paramètres et coefficients statistiques et se développe comme suit. Les figures 1,2 et 3 représentent la localisation des données.

Tout d'abord, des graphiques des concentrations de sodium, calcium et conductivité électrique dans sol ont été tracés à l'aide d'une courbe de distribution normale pour chaque donnée (Fig.31, 32 et 33).

L'analyse de la carte d'implantation des données mesurées des valeurs en sodium, calcium et conductivité électrique montre que la moyenne des valeurs dépasse les normes mondiales (0,7 Cmol/kg, 8 Cmol/kg et 500 μ S/cm respectivement) (fig. 30a, fig. 31a et fig.32a).

La distribution des données, illustrée par l'histogramme des figures (fig. 31b, fig. 32b et fig.33b), montre un aspect plus ou moins chahuté, certaines valeurs apparaissant avec une fréquence élevée : ces séries statistiques sont donc plurimodale.

L'examinations de la surface variographique obtenue à partir des données des valeurs en sodium, calcium et conductivité électrique (fig. 31, fig. 32 et fig.33), on observe un comportement anisotrope marqué aux grandes distances, avec une forte variabilité dans la direction 130°.

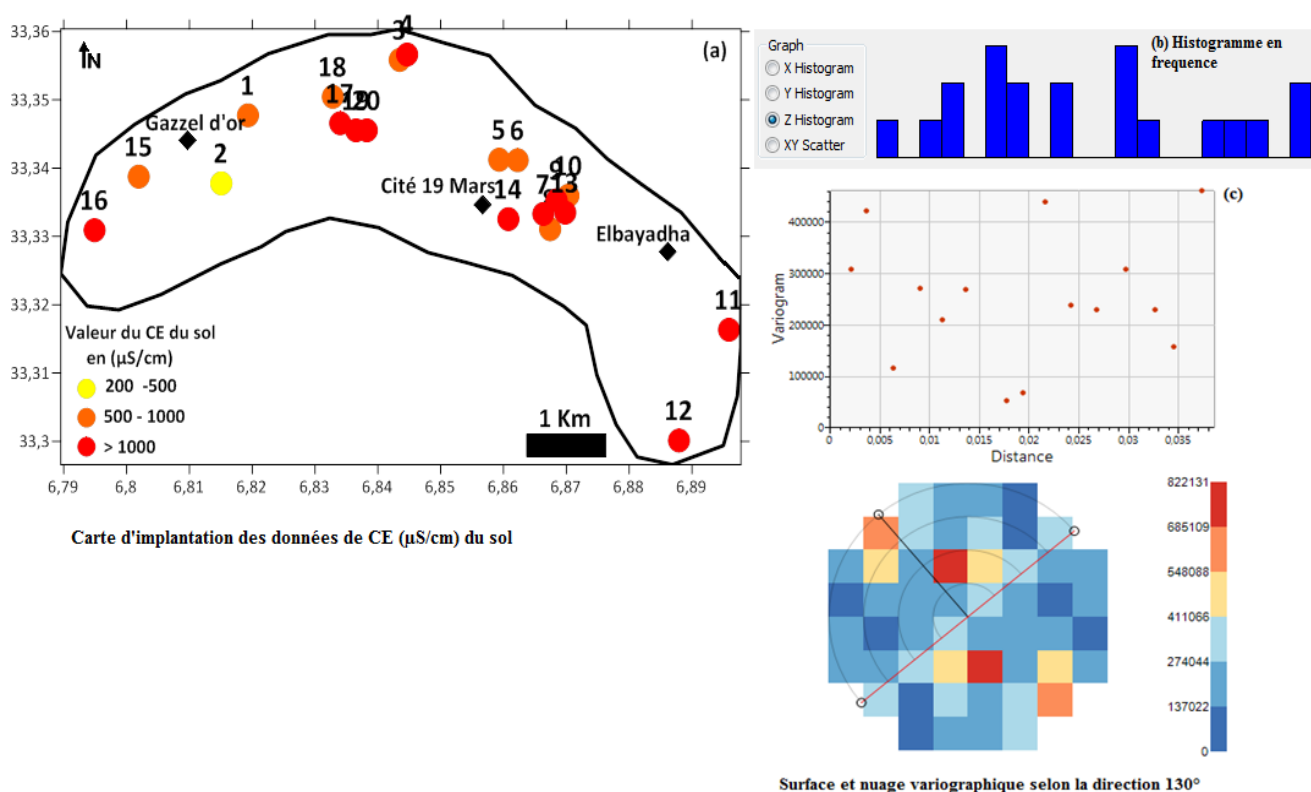


Figure 31 : Analyse exploratoire des données de la conductivité électrique du sol de la région d'étude (Mars 2024) (CE en $\mu\text{S/cm}$).

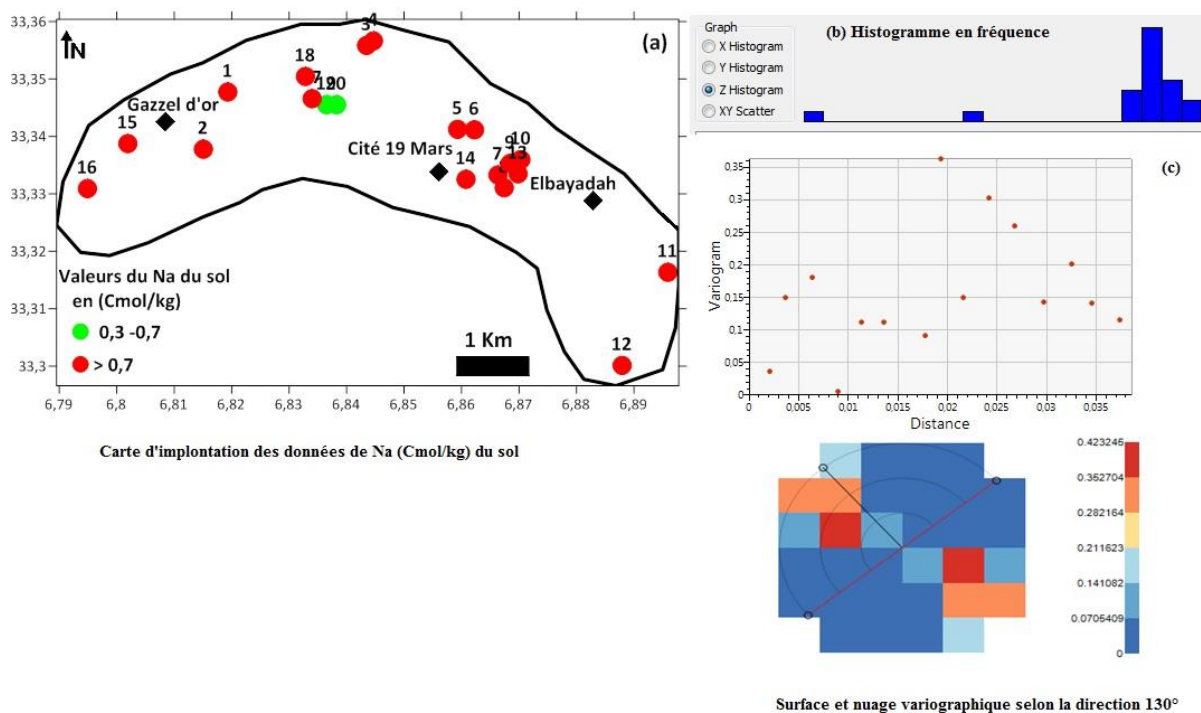


Figure 32 : Analyse exploratoire des données de sodium du sol de la région d'étude (Mars 2024) (Na^+ en Cmol/kg).

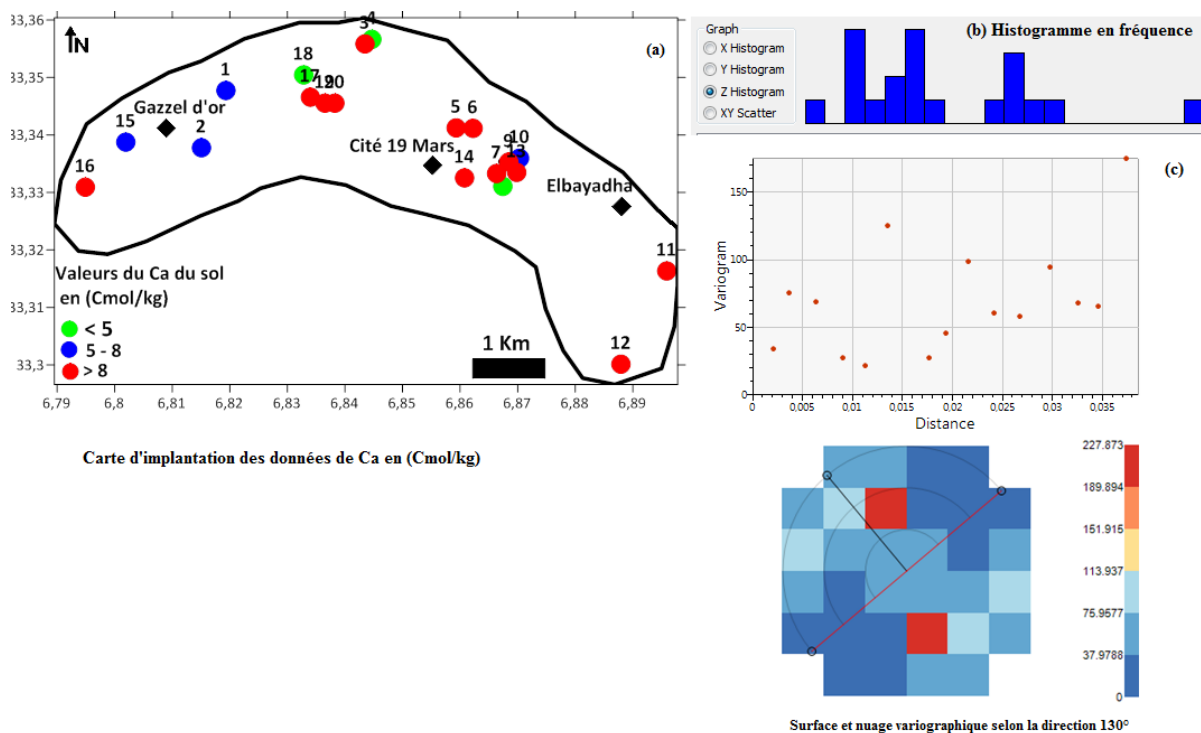


Figure 33 : Analyse exploratoire des données du calcium du sol de la région d'étude (Mars 2024) (Ca^{++} en Cmol/kg).

III.2.2. Analyse statistique des données :

Les traitements statistiques permettent de décrire la distribution des données et caractériser statistiquement la variable étudiée (loi de distribution et moyenne) et leur dispersion (coefficient de variation, variance). Le tableau 1 illustre les résultats statistiques calculés sur les données de la zone d'étude.

Données	Valeurs de la CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Valeurs de Na^+ (Cmol/kg)	Valeurs Ca^{++} (Cmol/kg)
Count	20	20	20
Minimum	360,90	0,1	1,6
1 ^{er} quartile	828,30	1,3	5,8
Median(2 ^{ème} quartile)	1132	1,4	10,5
Moy	1236,37	1,32	12,37
3 ^{ème} quartile	1460	1,5	17,8
Maximum	2190	1,6	33,6
Standard deviation	537,57	0,34	7,58
Oblique coefficient Skewness (SK)	0,30	2,52	0,98
Coefficient of variation (CV)	0,43	0,25	0,61
Kurtosis (K)	1,77	8,88	3,65

Tableau 09 : Etude statistique des valeurs mesurées de CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$), de Na^+ (Cmol/kg) et de Ca^{++} (Cmol/kg) du sol (2024).

Pour 20 sites de mesures, nous avons une valeur minimale de 360 $\mu\text{S}/\text{cm}$ pour la conductivité du sol, 0,1 Cmol/kg et 1,6 Cmol/kg pour sodium et calcium respectivement. Nous avons une différence entre la médiane (valeur centrée) (1132 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1,4 Cmol/kg et 10,5 Cmol/kg pour CE, Na^+ et Ca^{++} respectivement) et la moyenne 1136 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1,32 Cmol/kg et 12,37 Cmol/kg pour CE, Na^+ et Ca^{++} respectivement). Ces valeurs des paramètres physico-chimiques du sol de la région d'étude montrent que l'ensemble de la zone d'étude a une forte salinité.

Le coefficient de variation (CV) est de 0,25 pour les données du sodium ce qui signifie que la dispersion autour de la moyenne est petite, donc les données du sodium sont plus ou moins homogènes dans la zone d'étude. Par contre pour la conductivité électrique et le calcium le coefficient de variation (CV) est de 0,43 et de 0,61 respectivement, ce qui implique que la dispersion autour la

moyenne est moyenne à assez forte, donc ces données sont hétérogènes.

De plus, le coefficient d'obliquité (SK), qui qualifie la répartition plus ou moins étalée des valeurs de la série à droite ou à gauche de l'histogramme, indique une dissymétrie avec un étalement vers les fortes valeurs (droite de l'histogramme) et la valeur de Kurtosis (K) égale à 1,77, 8,88 et 3,65 pour CE, Na^+ et Ca^{++} respectivement montre également une asymétrie dans la distribution des données.

III.3. Résultat et discussion :

III.3.1. Interpolation des paramètres physico-chimiques (CE, Na^+ et Ca^{++}) du sol à l'aide des méthodes déterministes :

Deux types de méthodes ont été réalisés : la méthode de pondération inverse de distance (IDW) et la méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF).

III.3.1.1. Interpolation CE par la méthode de pondération inverse de distance (IDW) et la méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF) :

En comparant les tracés des valeurs de conductivité électriques obtenus par les deux méthodes (fig. 34 et 35) les valeurs qui s'impose est que les valeurs estimées en conductivité électriques sont différentes pour les deux méthodes.

Toutefois, les valeurs de conductivité électriques obtenues par la méthode IDW sont plus lissées que celles obtenues par la méthode RBF, qui présente des valeurs à forte tendance concentrique autour des données.

Ainsi, la forme des iso valeurs de conductivités électriques obtenues reflète bien le fait que la méthode utilisée dépend grandement de la localisation des données par rapport au nœud considéré.

A travers la carte obtenue par la méthode d'IDW nous remarquons que la majeure partie de la zone d'étude contient des valeurs de conductivité électriques entre 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1450 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Quant aux valeurs de conductivité électriques obtenues par la méthode de RBF, elles varient entre 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2600 $\mu\text{S}/\text{cm}$, comme on le constate, les valeurs prédominantes dans la zone d'étude varient entre 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

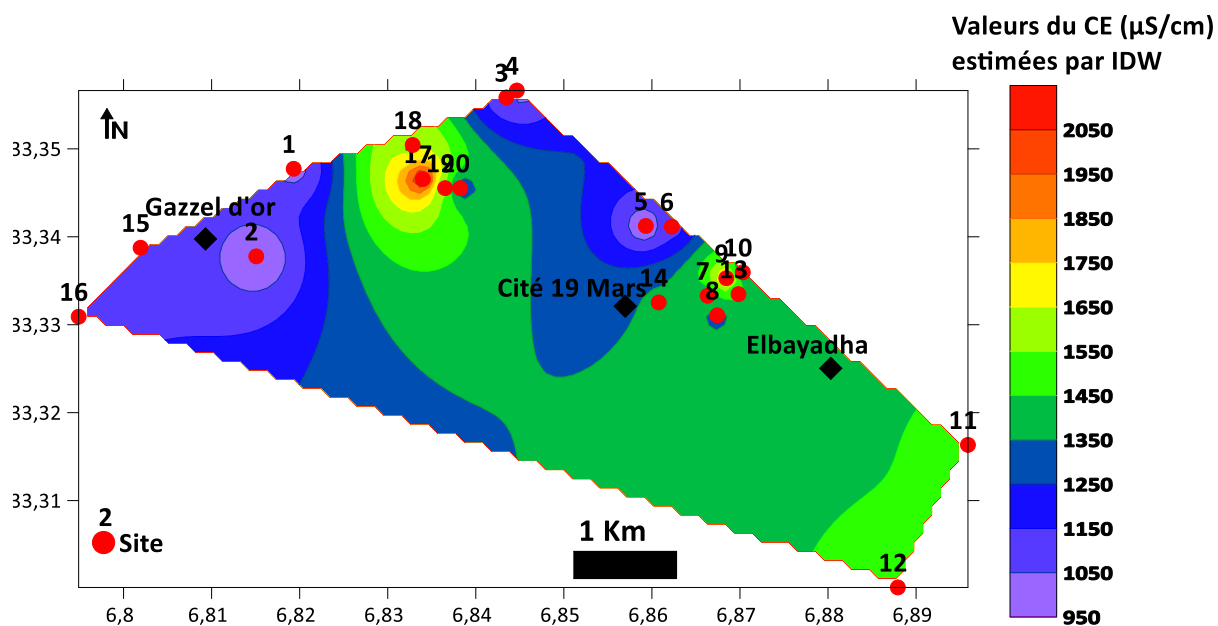


Figure 34 : Carte de conductivité électrique du sol (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$ obtenue par la méthode IDW

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

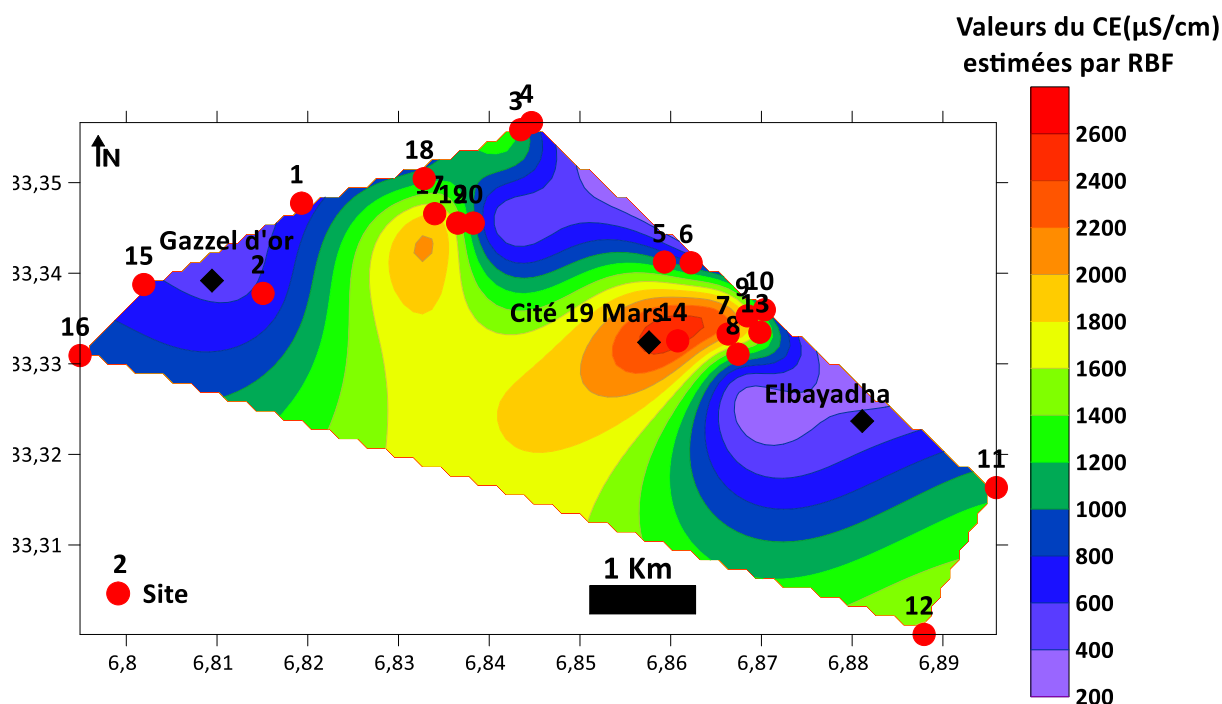


Figure 35 : Carte de conductivité électrique du sol (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$ obtenue par la méthode RBF

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

III.3.1.2. Interpolation Na^+ par la méthode de pondération inverse de distance (IDW) et la méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF) :

En comparant les tracés des valeurs de sodium obtenus par les deux méthodes (fig. 35 et 36) les valeurs qui s'impose est que les valeurs estimées en sodium sont presque similaires pour les deux méthodes.

Toutefois, les valeurs de sodium obtenues par la méthode RBF sont plus lissées que celles obtenues par la méthode IDW, qui présente des valeurs à forte tendance concentrique autour des données.

Ainsi, la forme des iso valeurs de sodiums obtenus reflète bien le fait que la méthode utilisée dépend grandement de la localisation des données par rapport au nœud considéré.

A travers la carte obtenue par la méthode de RBF nous remarquons que la majeure partie de la zone d'étude contient des valeurs de sodium entre 1,25 Cmol/kg et 1,45 Cmol/kg.

Quant aux valeurs de sodiums obtenues par la méthode d'IDW, elles varient entre 0,55 Cmol/kg et 1,5 Cmol/kg, comme on le constate, les valeurs prédominantes dans la zone d'étude varient entre 1,3 Cmol/kg et 1,5 Cmol/kg.

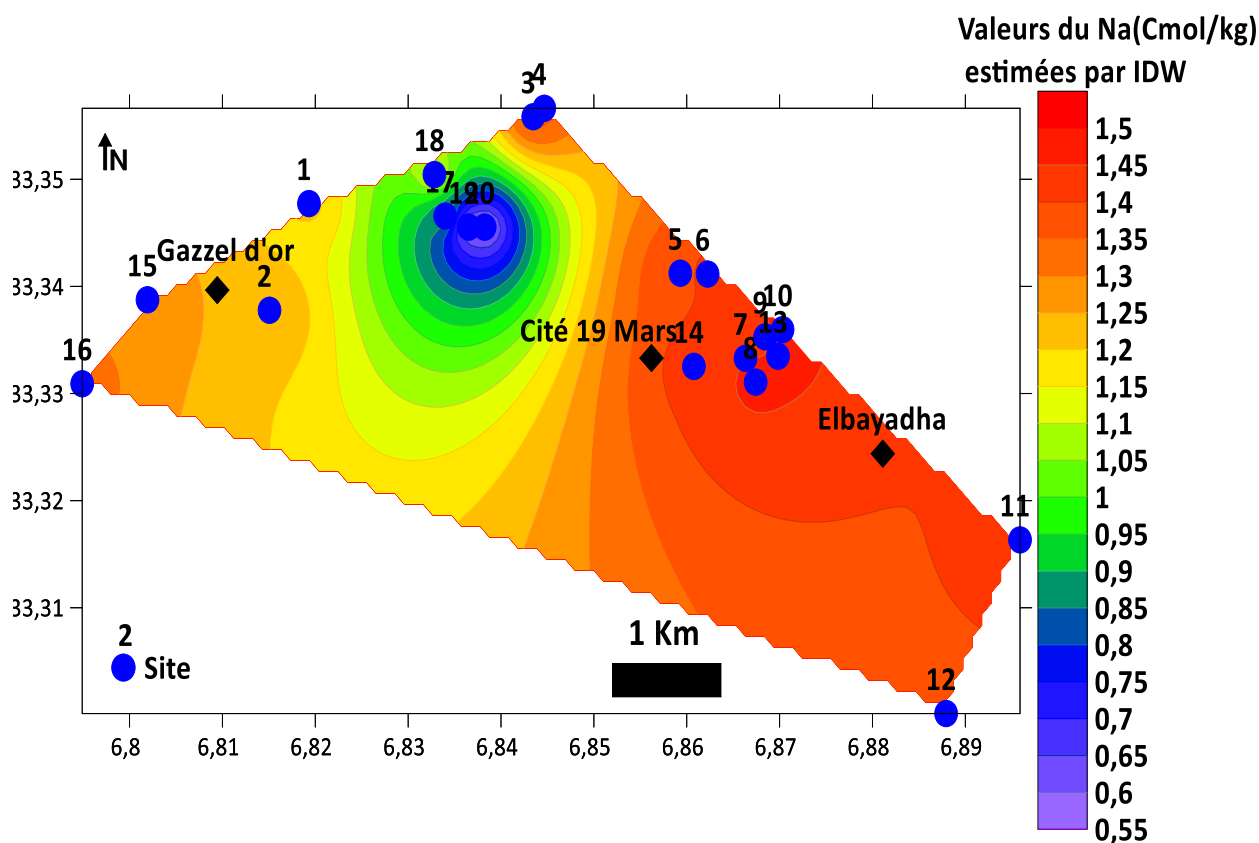


Figure 36 : Carte de sodium du sol (Na^+) en Cmol/kg obtenue par la méthode IDW

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

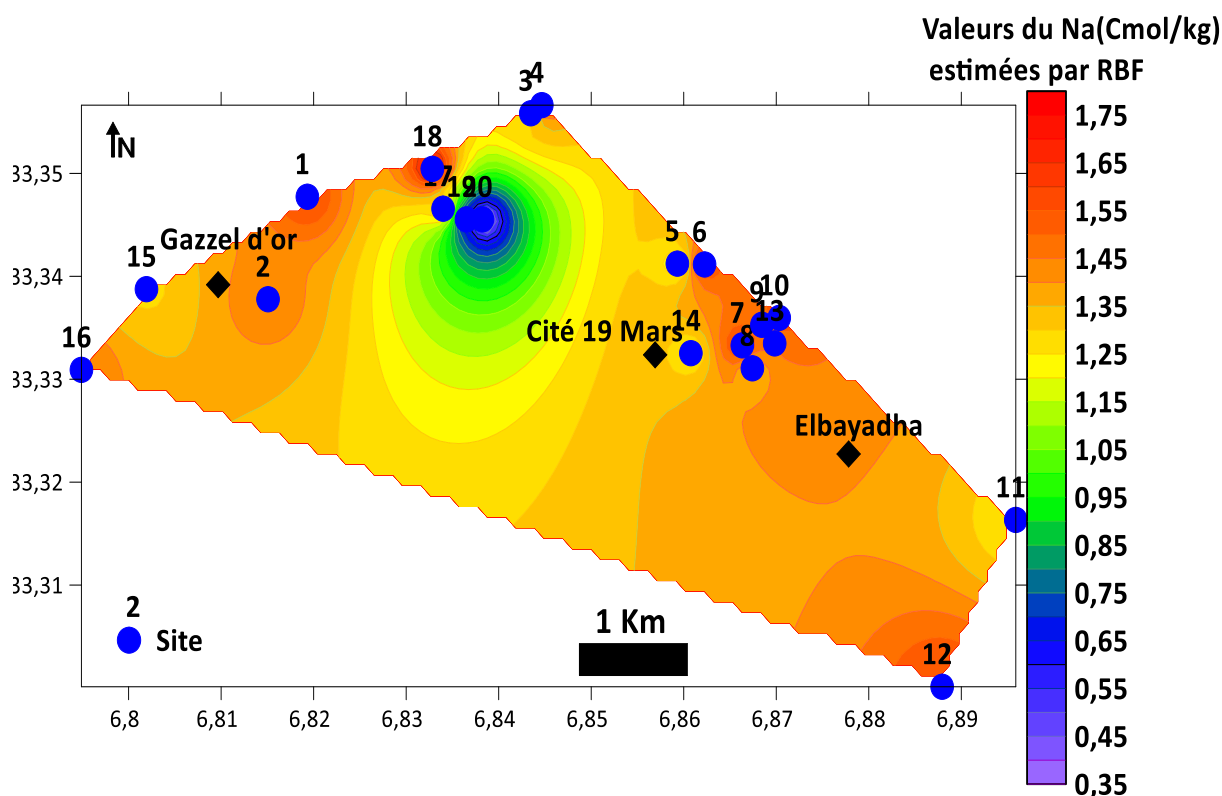


Figure 37 : Carte de sodium du sol (Na^+) en Cmol/kg obtenue par la méthode RBF

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

III.3.1.3. Interpolation Ca^{+2} par la méthode de pondération inverse de distance (IDW) et la méthode des réseaux radiaux de la fonction de base (RBF) :

En comparant les tracés des valeurs de calcium obtenus par les deux méthodes (fig. 38 et 39) les valeurs qui s'impose est que les valeurs estimées en calcium sont différentes pour les deux méthodes.

Toutefois, les valeurs de calcium obtenues par la méthode IDW sont plus lissées que celles obtenues par la méthode RBF, qui présente des valeurs à forte tendance concentrique autour des données.

Ainsi, la forme des iso teneurs en calcium obtenus reflète bien le fait que la méthode utilisée dépend grandement de la localisation des données par rapport au nœud considéré.

A travers la carte obtenue par la méthode d'IDW nous remarquons que la majeure partie de la zone d'étude contient des valeurs de calcium entre 8 Cmol/kg et 16 Cmol/kg.

Quant aux valeurs de calcium obtenues par la méthode de RBF, elles varient entre 2 Cmol/kg et 30 Cmol/kg, comme on le constate, les valeurs prédominantes dans la zone d'étude varient entre 10 Cmol/kg et 18 Cmol/kg.

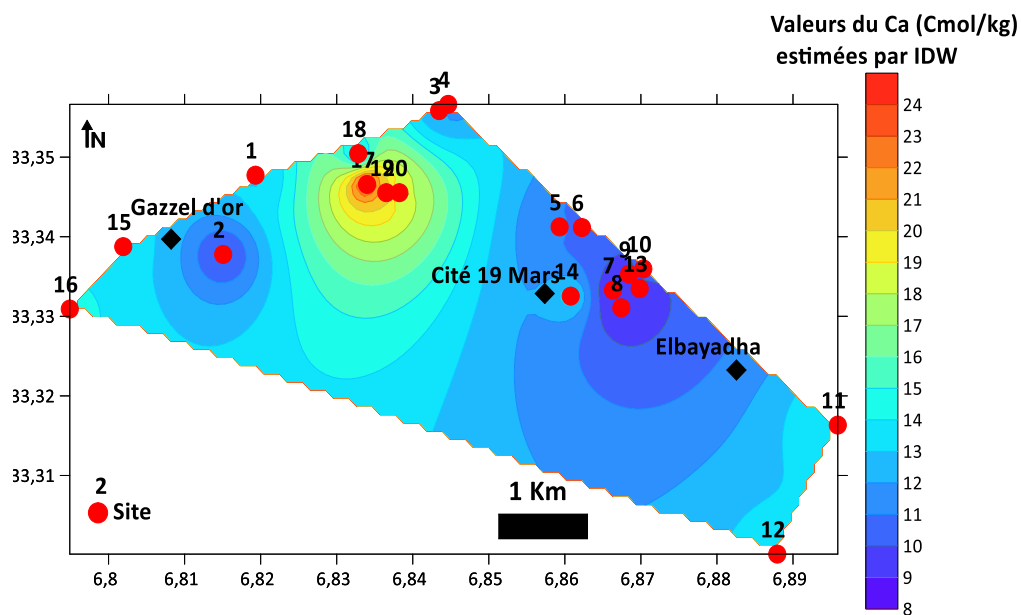


Figure 38 : Carte de calcium du sol (Ca^{+2}) en Cmol/kg obtenue par la méthode IDW

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

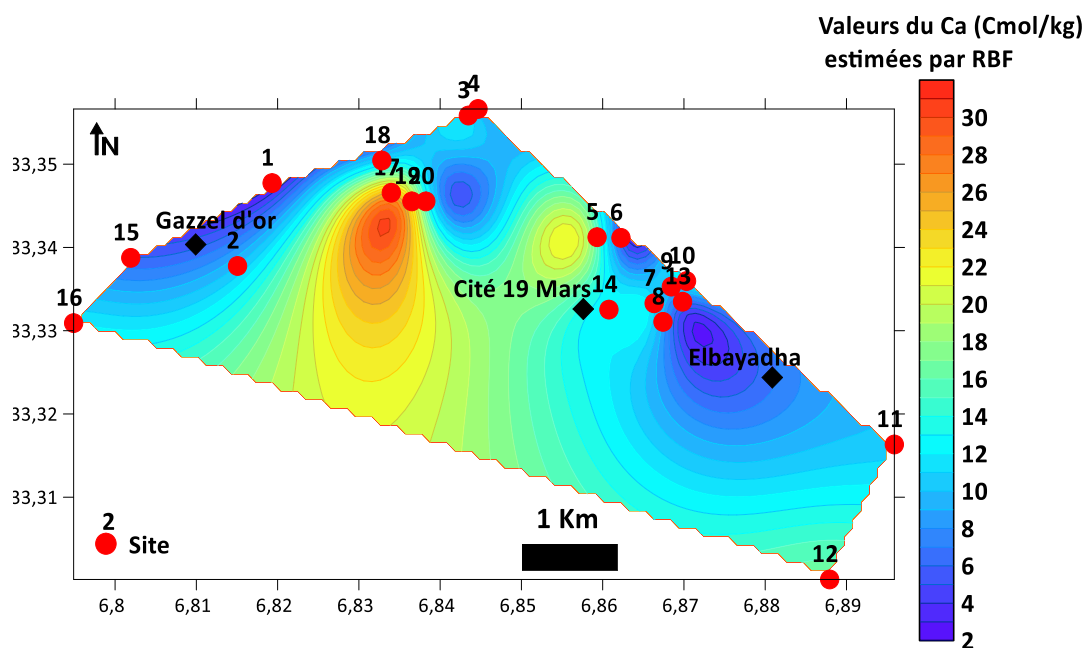


Figure 39 : Carte de calcium du sol (Ca^{+2}) en Cmol/kg obtenue par la méthode RBF

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

III.4. Interpolation des paramètres physico-chimiques (CE , Na^+ et Ca^{++}) du sol à l'aide des méthodes géostatistiques (Krigage universel KU) :

Les outils de l'étude exploratoire montrent que les valeurs de la conductivité électrique (CE)

dans la région d'étude n'est pas une variable stationnaire, ce qui implique que le modèle supposé pour cette variable régionalisée est $Z(x)=Y(x)+m(x)$, comportant une dérive $m(x)$ déterministe et un résidu $Y(x)$ stationnaire d'espérance nulle, dans ce cas le krigeage universel est le plus approprié.

III.4.1. Interpolation des valeurs de conductivités électriques (CE) par la méthode de krigeage universel (KU) :

La première étape consiste à approcher la dérive par une fonction polynomiale dont les paramètres sont estimés grâce aux données, dans ce cas le degré de polynôme est égale à deux et l'angle d'anisotropie est $172,6^\circ$ s'adaptait aux données des valeurs de conductivités électriques (fig.10).

La deuxième étape consiste à définir l'échelle sur laquelle on adapte la dérive. Si on considère une dérive globale (sur la zone entière), alors on tend vers l'extrême « *global* » ; si, au contraire, on a une dérive locale qui ne concerne que de petites portions de la zone, on tend vers « *local* » (Ghazi and al 2014).

La troisième étape consiste à élaborer un modèle de semi variance : en visualisant la surface et le nuage variographique à des pas de distance différents, on identifie un comportement isotrope aux faibles distances. Par la suite un variogramme a été calculé avec un pas égal 1Km et un nombre de pas égal à 35. L'allure du nuage de semi-variance suggère l'utilisation d'un modèle universel (combiné par le model linear, gaussien et sphérique) sans effet de pépite, et une portée d'ordre 0,001 (fig.39).

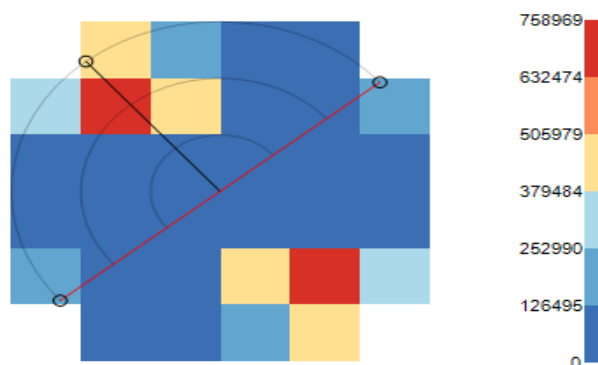
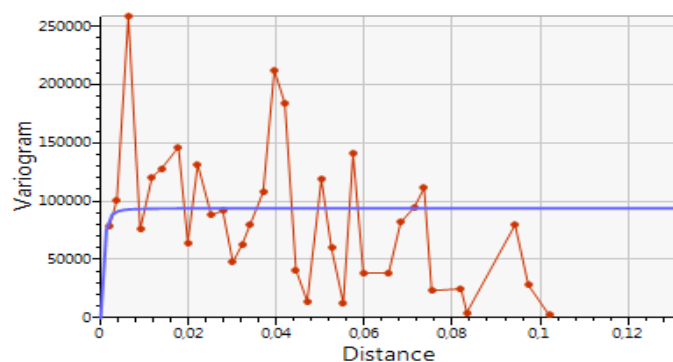


Figure 40. L'interface de la modélisation du variogramme

La carte de répartition spatiale des valeurs de la conductivité électrique (CE) (Fig.40) obtenue par le modèle de Krigeage universel montre que ces valeurs sont limitées à 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1900 $\mu\text{S}/\text{cm}$, comme on le constate, les concentrations prédominantes dans la zone d'étude varient entre 1100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ et 1700 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En plus cette carte montre que la majorité des valeurs de conductivité électrique du sol de la zone d'étude dépassent les normes mondiales, ce qui signifie que le sol du secteur d'étude souffre un problème de minéralisation et de salinisation.

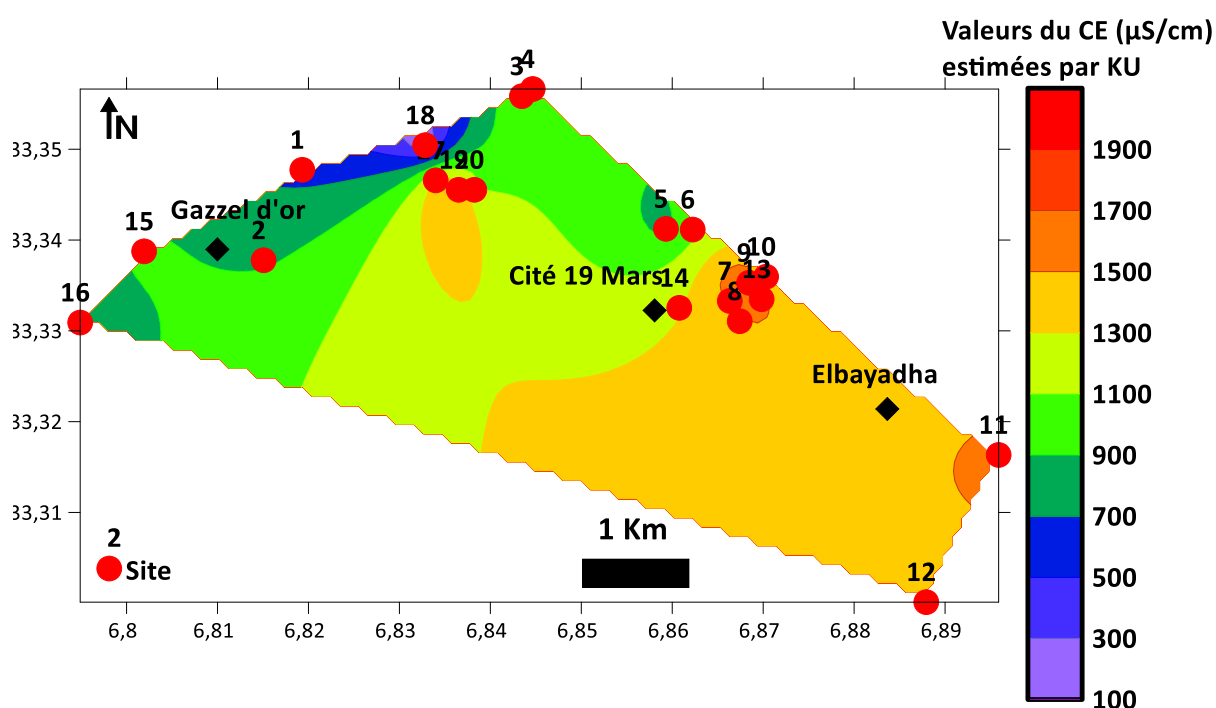


Figure 41 : Carte de conductivité électrique du sol (CE) en $\mu\text{S}/\text{cm}$ obtenue par la méthode du krigeage universel (KU)

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

III.4.2. Interpolation des valeurs de sodium (Na^+) par la méthode de krigeage universel (KU) :

La première étape consiste à approcher la dérive par une fonction polynomiale dont les paramètres sont estimés grâce aux données, dans ce cas le degré de polynôme est égale à deux et l'angle d'anisotropie est $80,54^\circ$ s'adaptait aux données des valeurs de sodium (fig.42).

La deuxième étape consiste à définir l'échelle sur laquelle on adapte la dérive. Si on considère

une dérive globale (sur la zone entière), alors on tend vers l'extrême « *global* » ; si, au contraire, on a une dérive locale qui ne concerne que de petites portions de la zone, on tend vers « *local* ».

La troisième étape consiste à élaborer un modèle de semi variance : en visualisant la surface et le nuage variographique à des pas de distance différents, on identifie un comportement isotrope aux faibles distances. Par la suite un variogramme a été calculé avec un pas égal 1Km et un nombre de pas égal à 59. L'allure du nuage de semi-variance suggère l'utilisation d'un modèle universel (combiné par le model linear, sphérique et gaussien) sans effet de pépite, et une portée d'ordre 0,056 (fig.42).

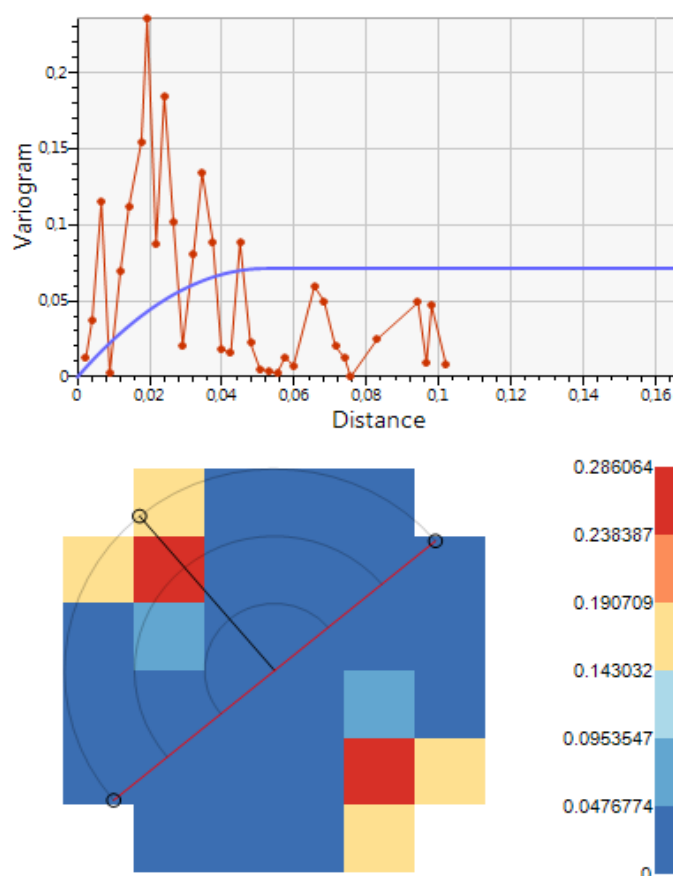


Figure 42. L'interface de la modélisation du variogramme

La carte de répartition spatiale des valeurs sodium (Na^+) (Fig.43) obtenue par le modèle de Krigage universel montre que ces valeurs sont limitées à 0,5 Cmol/kg et 1,5 Cmol/kg, comme on le constate, les concentrations prédominantes dans la zone d'étude varient entre 1,2 Cmol/kg et 1,5 Cmol/kg.

On remarque également sur cette carte que la majorité des valeurs de sodium du sol de la zone d'étude dépassent les normes mondiales, ce qui signifie que le sol du secteur d'étude souffre d'un problème de sodification.

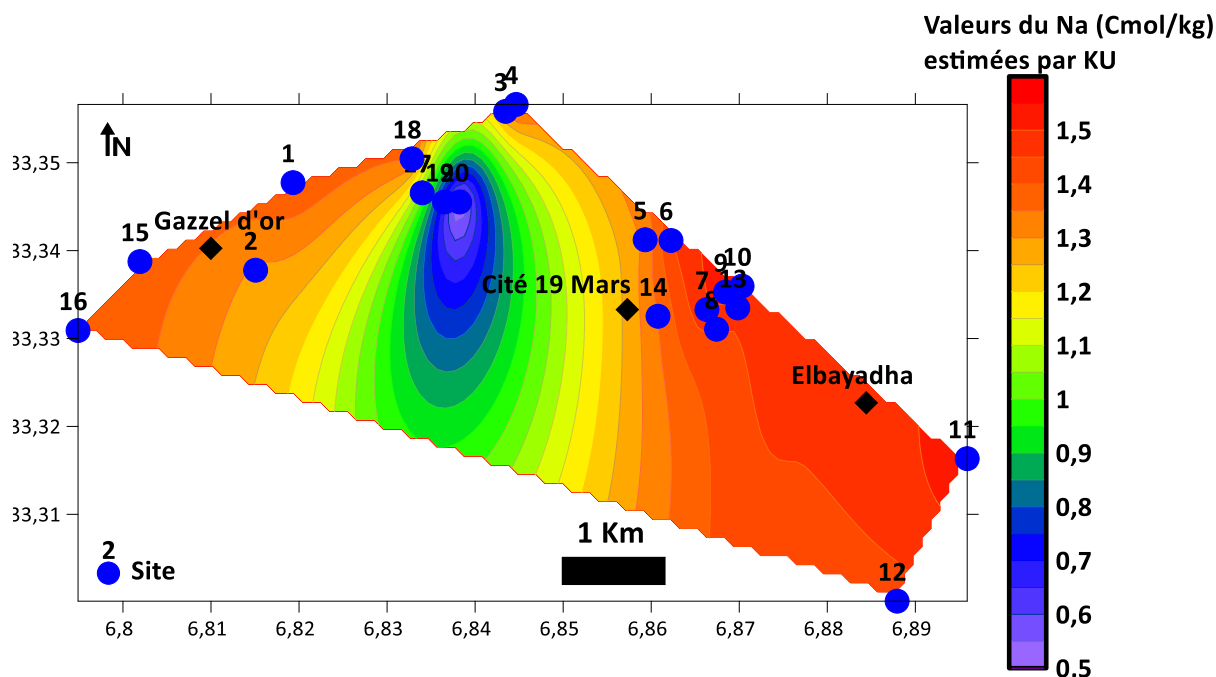


Figure 43 : Carte de sodium du sol (Na^+) en Cmol/kg obtenue par la méthode du krigeage universel (KU)

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

III.4.3. Interpolation des valeurs de calcium (Ca^{+2}) par la méthode krigeage universel (KU) :

La première étape consiste à approcher la dérive par une fonction polynomiale dont les paramètres sont estimés grâce aux données, dans ce cas le degré de polynôme est égale à deux et l'angle d'anisotropie est $09,87^\circ$ s'adaptait aux données des valeurs de sodium (fig.43).

La deuxième étape consiste à définir l'échelle sur laquelle on adapte la dérive. Si on considère une dérive globale (sur la zone entière), alors on tend vers l'extrême « *global* » ; si, au contraire, on a une dérive locale qui ne concerne que de petites portions de la zone, on tend vers « *local* ».

La troisième étape consiste à élaborer un modèle de semi variance : en visualisant la surface et le nuage variographique à des pas de distance différents, on identifie un comportement isotrope aux faibles distances. Par la suite un variogramme a été calculé avec un pas égal 1Km et un nombre de pas égal à 51. L'allure du nuage de semi-variance suggère l'utilisation d'un modèle universel (combiné par le model linear et le model gaussien) sans effet de pépité, et une portée d'ordre 0,02 (fig.44).

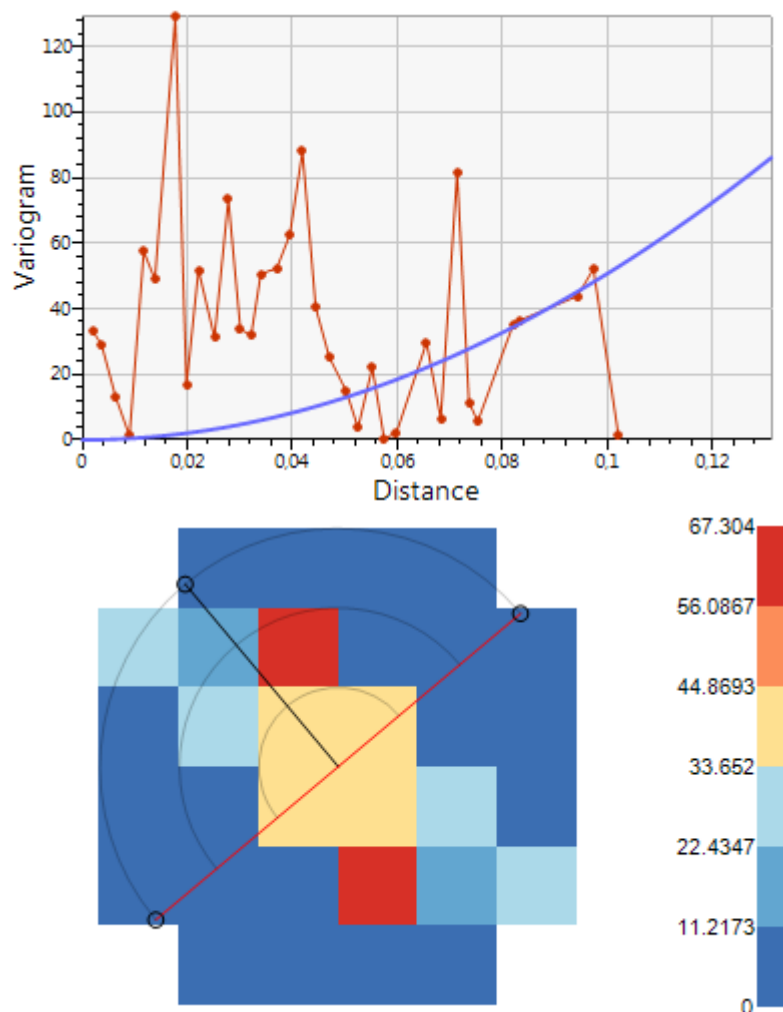


Figure 44. L'interface de la modélisation du variogramme

La carte de répartition spatiale des valeurs de calcium (Ca^{+2}) (Fig.45) obtenue par le modèle de Krigage universel montre que ces valeurs sont limitées entre 4 Cmol/kg et 26 Cmol/kg, comme on le constate, les concentrations prédominantes dans la zone d'étude varient entre 10 Cmol/kg et 16 Cmol/kg.

On remarque également sur cette carte que la majorité des valeurs de calcium du sol de la zone d'étude dépassent les normes mondiales, ce qui implique que le sol du secteur d'étude souffre un problème de minéralisation et salinité.

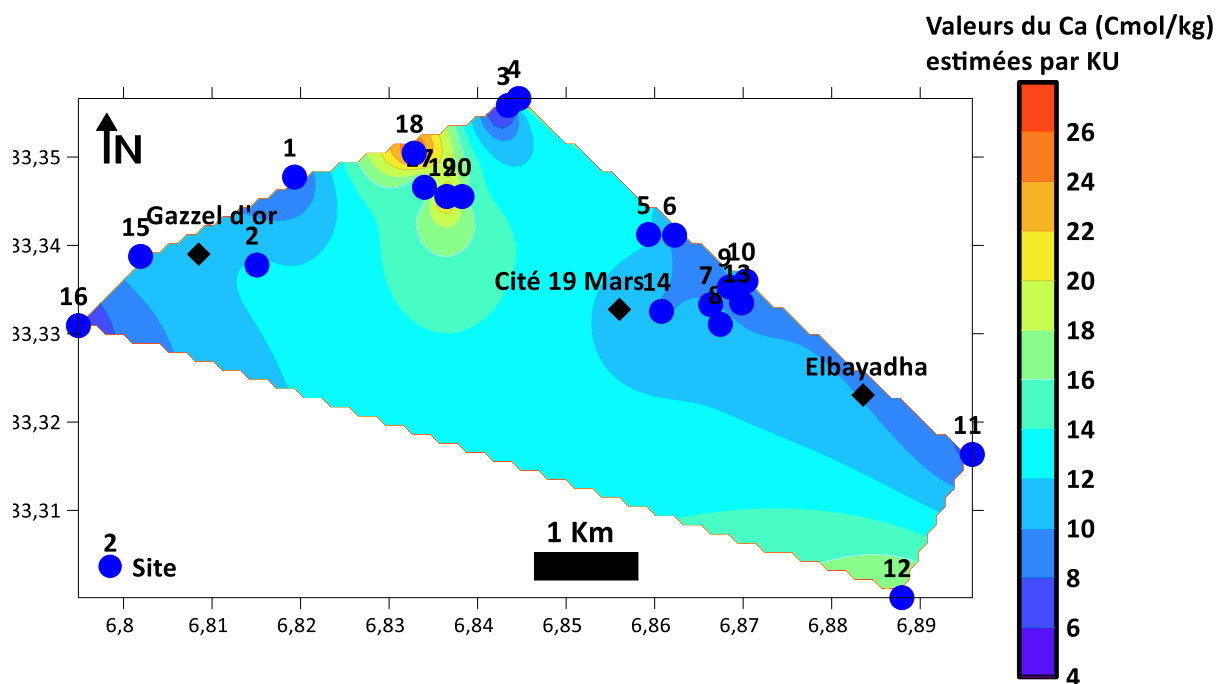


Figure 45 : Carte de calcium du sol (Ca^{+2}) en Cmol/kg obtenue par la méthode du krigeage universel (KU)

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

III.5. Test et validation le choix du model :

La validation des résultats obtenus est une étape essentielle post-interpolation. Les estimations réalisées sont validées selon différentes approches : comparaison entre estimation et mesure sur deux échantillons distincts, validation croisée.

III.5.1. Le test par la validation croisée :

La méthode de la validation croisée ou cross validation permet d'évaluer l'erreur d'estimation pour chaque méthode d'interpolation testée. L'erreur moyenne quadratique (Root Mean square error ou RMSE) est une estimation de la variance de l'erreur de la régression, c'est-à-dire la valeur de l'erreur moyenne de dispersion des données autour de l'axe de régression ou encore la variation des résidus ; plus la RMSE (équation 1) est élevée, plus la dispersion des résidus est large et moins exacte est le modèle. Plus la valeur du RMSE est faible, plus l'estimation de l'interpolateur est bonne. Donc c'est la valeur à minimiser dans le cadre d'une régression.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (Z(xi) - P(xi))^2} \dots\dots\dots (1)$$

Où Z est la valeur observée, P est la valeur prédite, et N est le nombre total d'observations de test.

Le tableau 10 montre que l'erreur standard (ES) présente des valeurs moyennes pour les deux méthodes KU, RBF et légèrement faible pour la méthode de l'IDW. Ce qui est confirmé par les valeurs de l'erreur moyenne (EM) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE). Le coefficient d'obliquité (Sk) indique que les trois méthodes utilisées permettent d'avoir une distribution légèrement symétrique des valeurs interpolées (SK très proche à zéro).

Interpolation méthode	Standard error (ES)	Average error (EM)	RMSE	R	SK	K
IDW	39,53	29	245,40	0,7157	-0,16	1,99
RBF	94,34	31,88	310,39	0,7054	0,20	1,79
KU	68,02	51,12	333,24	0,6591	-0,1	1,82

Tableau10 : Résultats de l'analyse de validation croisée des valeurs de CE.

Pour le coefficient de régression (R) plus la valeur tend vers 1 plus l'interpolation est exacte. Or, pour l'ensemble des techniques testées R est assez forte avec un léger avantage de IDW (R= 71,57%).

Le coefficient de Kurtosis (K) quantifie la déviation de la forme de la distribution par rapport à une distribution normale. Ce coefficient indique que la distribution des valeurs interpolées est anormale pour les trois méthodes avec des valeurs de K loin à 3.

Le tableau 11 montre que l'erreur standard (ES) donne des valeurs faibles pour les deux méthodes IDW, RBF et très faible pour la méthode du krigeage universel (KU). Ce qui est confirmé par les valeurs de l'erreur moyenne (EM) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE). Le coefficient d'obliquité (Sk) indique que les trois méthodes utilisées permettent d'avoir une distribution asymétrique des valeurs interpolées.

Interpolation méthode	Standard error (ES)	Average error (EM)	RMSE	R	SK	K
IDW	0,058	-0,04	1,25	0,8036	-1,24	2,48
RBF	0,052	0,007	1,31	0,8438	-1,09	3,39
KU	0,0012	-0,001	0,10	0,8930	1,03	3,49

Tableau11 : Résultats de l'analyse de validation croisée des valeurs de Na⁺.

Pour le coefficient de régression (R) plus la valeur tend vers 1 plus l'interpolation est exacte. Or, pour l'ensemble des techniques testées R est forte avec un léger avantage de KU (R= 89,30%).

Le coefficient de Kurtosis (K) quantifie la déviation de la forme de la distribution par rapport à une distribution normale. Ce coefficient indique que la distribution des valeurs interpolées est normale pour les deux méthodes de RBF et KU avec des valeurs de K proche à 3, par contre la méthode d'IDW indique que la distribution des valeurs interpolées est anormale avec une valeur de $K = 2,48$ loin à 3.

Le tableau 12 montre que l'erreur standard (ES) donne des valeurs moyennes pour les deux méthodes KU, RBF et faible pour la méthode de l'IDW. Ce qui est confirmé par les valeurs de l'erreur moyenne (EM) et l'erreur moyenne quadratique (RMSE). Le coefficient d'obliquité (Sk) indique que les trois méthodes utilisées permettent (IDW, RBF et KU) d'avoir une distribution légèrement symétrique des valeurs interpolées (les valeurs de SK un peu proche à 0).

Interpolation méthode	Standard error (ES)	Average error (EM)	RMSE	R	SK	K
IDW	0,79	0,09	2,71	0,7484	0,87	2,36
RBF	1,17	0,75	5,35	0,6208	0,75	3,34
KU	1,26	0,28	9,12	0,5685	0,45	1,58

Tableau 12 : Résultats de l'analyse de validation croisée des valeurs de Ca^{+2} .

Pour le coefficient de régression (R) plus la valeur tend vers 1 plus l'interpolation est exacte. Or, pour l'ensemble des techniques testées R est moyenne avec un léger avantage de IDW ($R = 74,84\%$).

Le coefficient de Kurtosis (K) quantifie la déviation de la forme de la distribution par rapport à une distribution normale. Ce coefficient indique que la distribution des valeurs interpolées est anormale pour les deux méthodes de IDW et KU avec des valeurs de K loin à 3, par contre la méthode du RBF indique que la distribution des valeurs interpolées est légèrement normale avec une valeur de $K = 3,34$ proches à 3.

III.5.2. Le test par l'analyse des résiduels :

Le résiduel est la différence entre la valeur observée (Z_i) et la valeur interpolée ou prédite (P_i) dans un emplacement i , ce qui correspond à l'erreur de l'interpolation.

Ainsi, l'étude comparative du résiduel de l'ensemble des techniques d'interpolation spatiale testées permet d'avoir d'importantes informations sur chaque méthode et d'évaluer plus précisément la marge d'erreur qu'elle produite lors de l'interpolation.

Pour le calcul du résiduel il a été tenu compte de la différence entre les valeurs de trois paramètres physico-chimiques (CE , Na^+ et Ca^{+2}) de la base de données initiales avant l'interpolation,

et celles d'une base de données extraites de la grille interpolée aux mêmes emplacements. Cette opération est effectuée pour chaque méthode d'interpolation.

- **Les valeurs résiduelles de la conductivité électriques (CE) :**

Le tableau 13 indique que la distribution de l'erreur est presque symétrique pour la méthode du IDW puisqu'elles présentent les valeurs les plus proches de 3 du coefficient de Kurtosis ($K= 2,88$). Ce qui veut dire que cette méthode tend à homogénéiser l'erreur au niveau de la grille produite par interpolation.

Plus le coefficient SK est proche de zéro ou nul, meilleure est distribution symétrique. Dans le cas que nous étudions, on remarque que les valeurs de ce coefficient (SK) pour les trois méthodes (RBF, IDW et Krigeage) utilisées sont moyennement proches de zéro ($SK= 0, 30$ et $0,36$ et $-0,26$ respectivement), et de là on peut dire que ces trois méthodes est moins biaisé.

La valeur du RMSE qui est élevée dans le cas du krigeage universel ($404,91$) et faible pour le cas du model IDW ($RMSE= 393,70$), et de là on peut dire que cette méthode est plus précise et moins biaisée

Interpolation Methods	Min (m)	Max(m)	Standard error (ES)	Standard déviation (SD)	Kurtosis coefficient (K)	SK	RMSE
DWI	-448,36	1006,31	87,83	392,82	2,88	0,26	385,65
RBF	-513,7	1051	88,81	397,17	2,28	0,30	393,70
KU	-861,41	551,68	90,94	406,69	1,90	-0,26	404,91

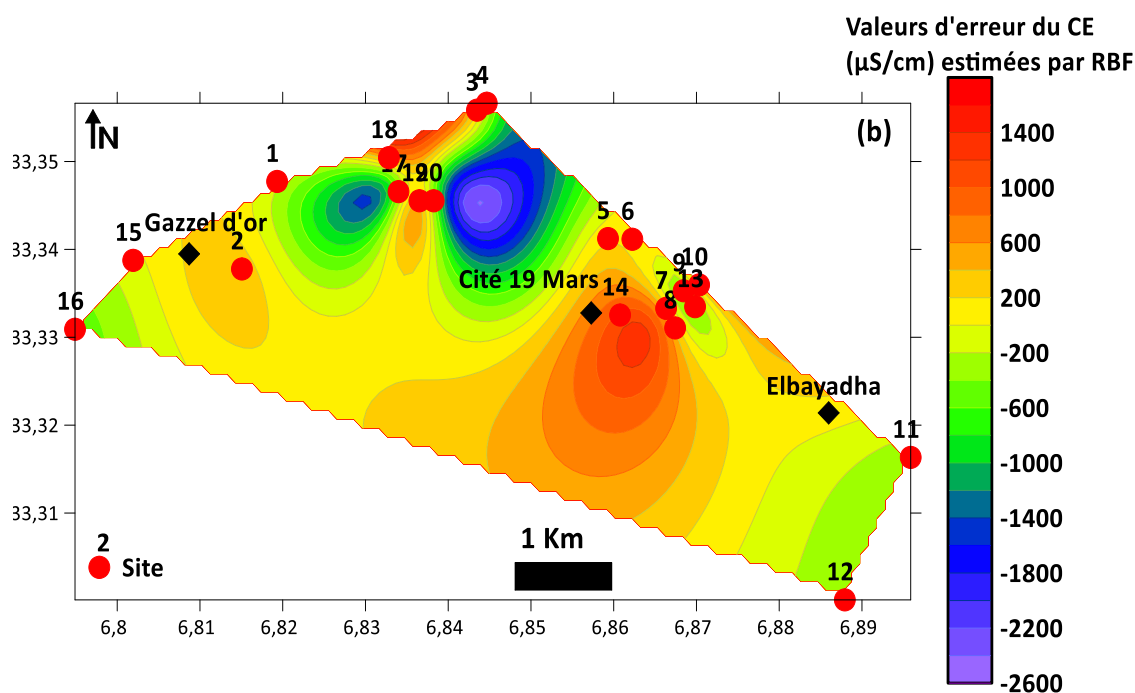
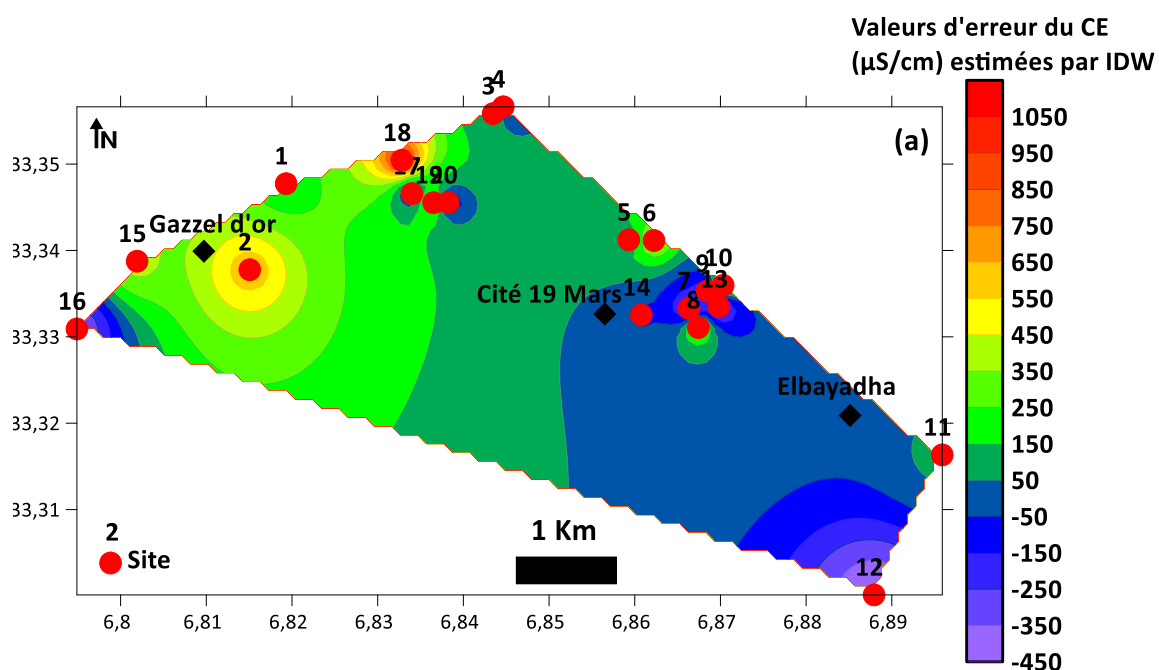
Tableau 13 : Analyse statistique des résidus de chaque méthode d'interpolation pour la conductivité électriques (CE)

Les bases de données des valeurs résiduelles établies précédemment sont exploitées visuellement pour produire des cartes de la distribution des erreurs d'interpolation (ou résiduels) pour chaque méthode étudiée (Figure 46).

Les résidus des valeurs de la conductivité électriques (CE $\mu S/cm$) issus de trois méthodes d'interpolation sont alors calculés pour 20 sites d'échantillonnage. Ils sont ensuite interpolés par IDW, RBF et krigeage universel (KU) (Figure 46a, b, c).

L'erreur de modélisation, issue de la première et deuxième méthode (IDW+KU), varie de $450 \mu S/cm$ et $1050 \mu S/cm$ et $-861,41 \mu S/cm$ à $551,68 \mu S/cm$ respectivement, ce qui indique une moyenne surestimation des valeurs de la conductivité électrique pour une vaste superficie de la zone

d'étude (figure 46 a, c). La troisième méthode (RBF) présente des résidus d'étendue plus large par rapport à la première et à la deuxième méthode. Ce qui nous conduit à constater que le model de l'inverse distance pondéré est adéquate à l'interpolation des teneurs en nitrates.



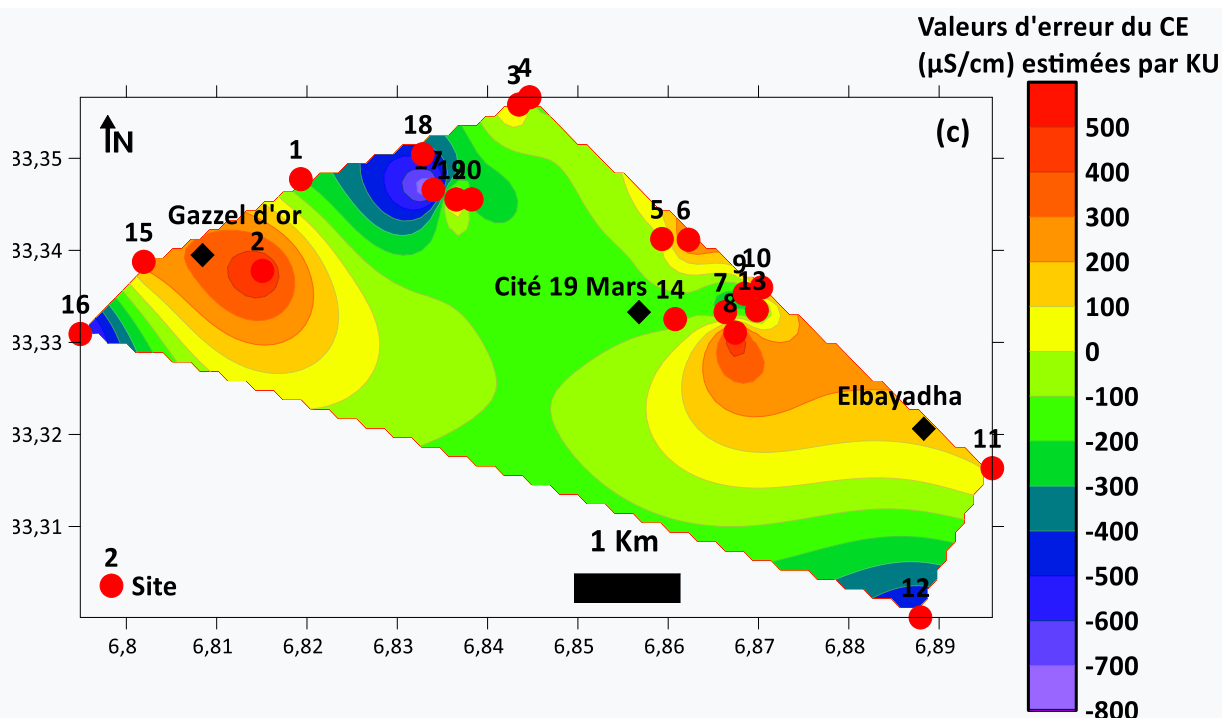


Figure 46 (a, b, c). Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (ou résidus) pour chaque modèle pour les valeurs de CE.

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

- Les valeurs résiduelles du sodium (Na^+) :

Le tableau 14 indique que la distribution de l'erreur standard (ES) est presque symétrique pour les trois méthodes puisqu'elles présentent les valeurs les plus proches de zéro. Ce qui veut dire que ces trois méthodes tendent à homogénéiser l'erreur au niveau de la grille produite par interpolation.

Plus le coefficient SK est proche de zéro ou nul, meilleure est distribution symétrique. Dans le cas que nous étudions, on remarque que les valeurs de ce coefficient (SK) pour les deux méthodes du radial basic fonction (RBF) et krigeage universel (KU) utilisées est moyennement proches de zéro ($\text{SK}=0,43$, $\text{SK}=0,48$ respectivement) et de là on peut dire que ces deux méthodes est plus précis et moins biaisé.

Pour le RBF, la différence entre le minimum et le maximum du résiduel est la plus faible ($0,7 \text{Cmol/kg}$) ainsi que pour la valeur du RMSE qui est faible dans les trois cas du (DWI, RBF et KU).

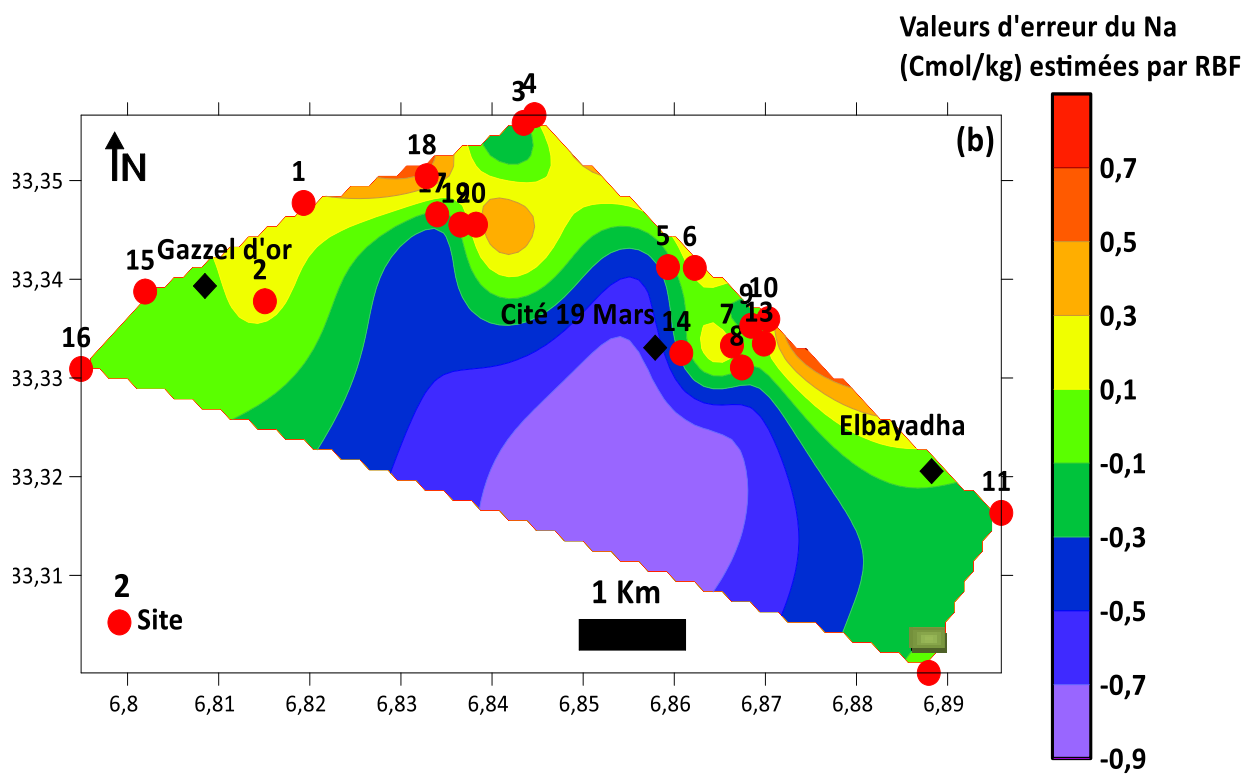
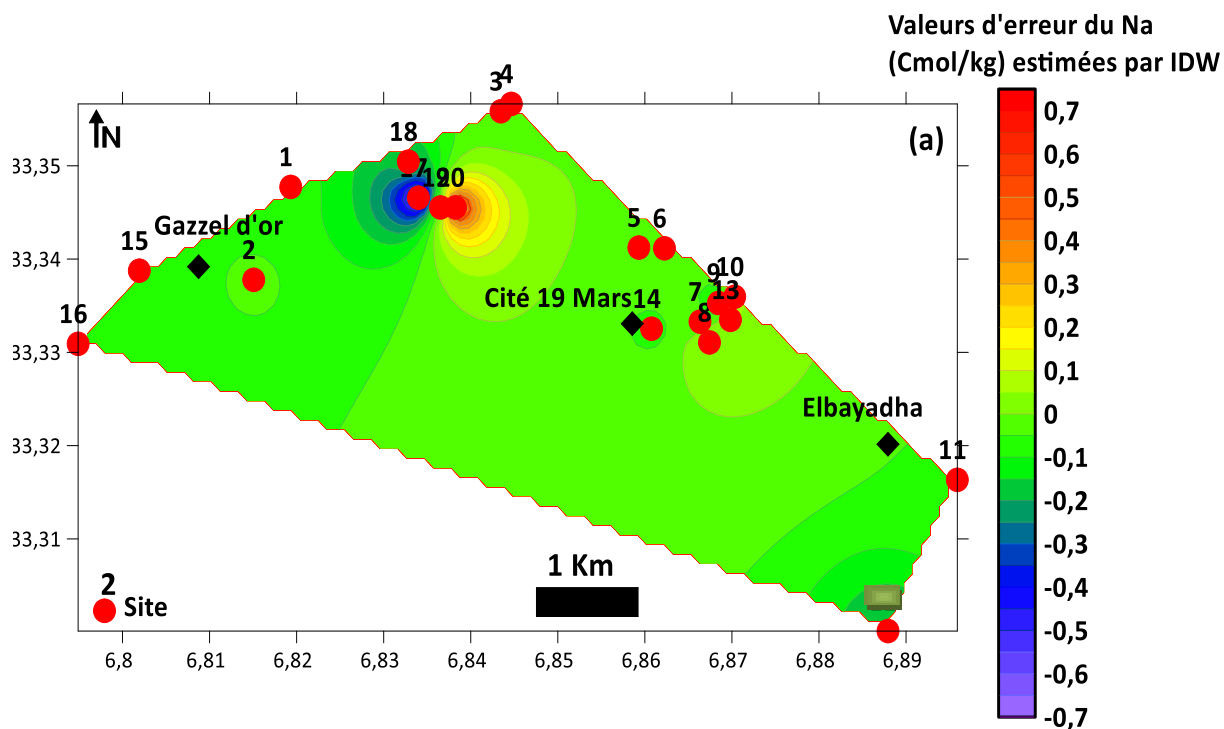
Interpolation Methods	Min (m)	Max(m)	Standard error (ES)	Standard déviation (SD)	Kurtosis coefficient (K)	SK	RMSE
DWI	-0,71	0,76	0,056	0,25	6,21	0,68	0,24
RBF	-0,25	0,45	0,041	0,18	2,32	0,43	0,18
KU	-0,55	0,65	0,048	0,21	6,70	0,48	0,21

Tableau 14 : Analyse statistique des résidus de chaque méthode d'interpolation pour du sodium (Na^+)

Les bases de données des valeurs résiduelles établies précédemment sont exploitées visuellement pour produire des cartes de la distribution des erreurs d'interpolation (ou résiduels) pour chaque méthode étudiée (Figure 47).

Les résidus des valeurs sodium (Na^+ Cmol/kg) issus de trois méthodes d'interpolation sont alors calculés pour 20 sites d'échantillonnage. Ils sont ensuite interpolés par IDW, RBF et krigeage universel (KU) (Figure 47a, b, c).

L'erreur de modélisation, issue de la première et deuxième méthode (RBF+KU), varie de -0,7 Cmol/kg à 0,9 Cmol/kg et -0,55 Cmol/kg à 0,65 Cmol/kg respectivement, ce qui indique une moyenne surestimation des valeurs de la conductivité électrique pour une vaste superficie de la zone d'étude (figure 47b, c). La troisième méthode (IDW) présente des résidus d'étendue plus large par rapport à la première et à la deuxième méthode. Ce qui nous conduit à constater que le model de RBF et KU sont adéquate à l'interpolation des teneurs en sodium.



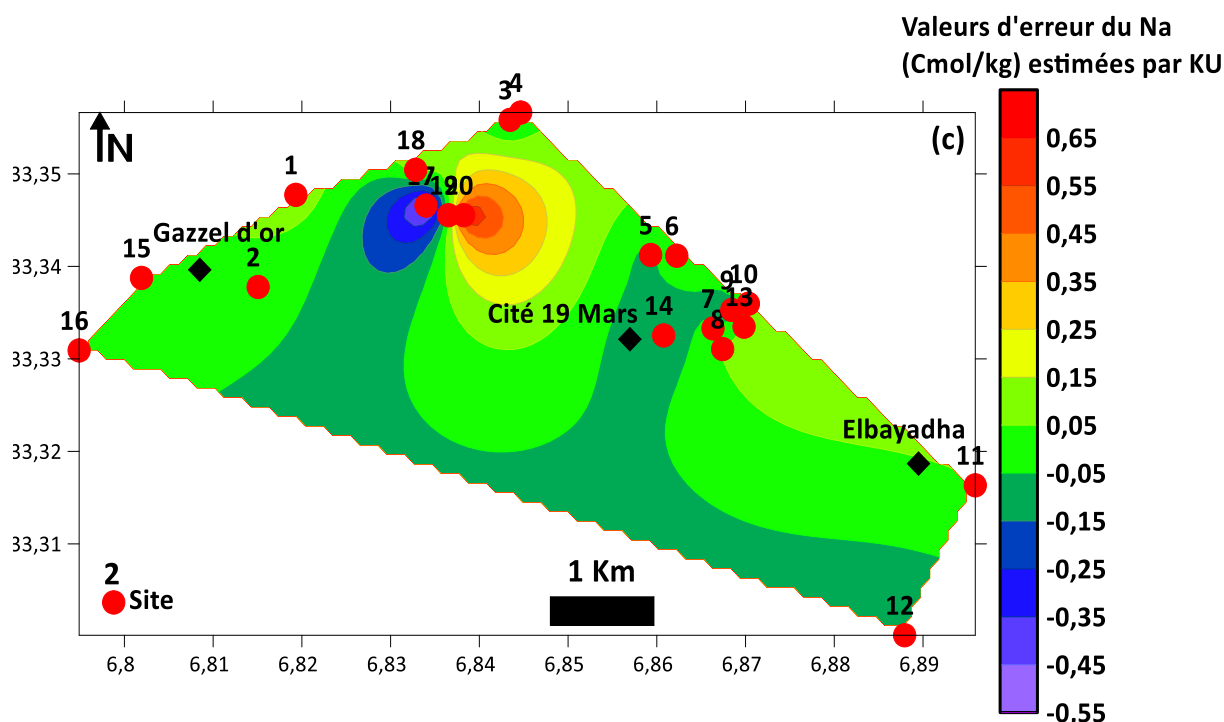


Figure 47 (a, b, c). Cartes de distribution des erreurs d'interpolation (ou résidus) pour chaque modèle pour les valeurs Na^+ .

Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

- Les valeurs résiduelles du calcium (Ca^{+2}) :

Le tableau 15 indique que la distribution de l'erreur est presque asymétrique pour les trois méthodes (IDW, RBF et KU) puisqu'elles présentent les valeurs les plus loin de zéro.

Plus le coefficient SK est proche de zéro ou nul, meilleure est la distribution symétrique. Dans le cas que nous étudions, on remarque que les valeurs de ce coefficient (SK) pour les trois méthodes (RBF, IDW et Krigeage) utilisées sont proches de zéro (SK= 0, 025, -0,013 et 0,036 respectivement), et de là on peut dire que ces trois méthodes sont moins biaisées avec un avantage de la méthode d'IDW.

La valeur du RMSE qui est élevée dans le cas du krigeage universel (10,72) et moyenne pour le cas du modèle IDW (RMSE= 5,21), et de là on peut dire que cette méthode est plus précise et moins biaisée.

Interpolation Methods	Min (m)	Max(m)	Standard error (ES)	Standard déviation (SD)	Kurtosis coefficient (K)	SK	RMSE
DWI	-9,62	9,08	1,18	5,30	1,90	-0,013	5,21
RBF	-8,84	7,96	1,33	5,97	1,25	0,025	5,86
KU	-22,12	22,45	2,45	10,99	2,52	-0,036	10,72

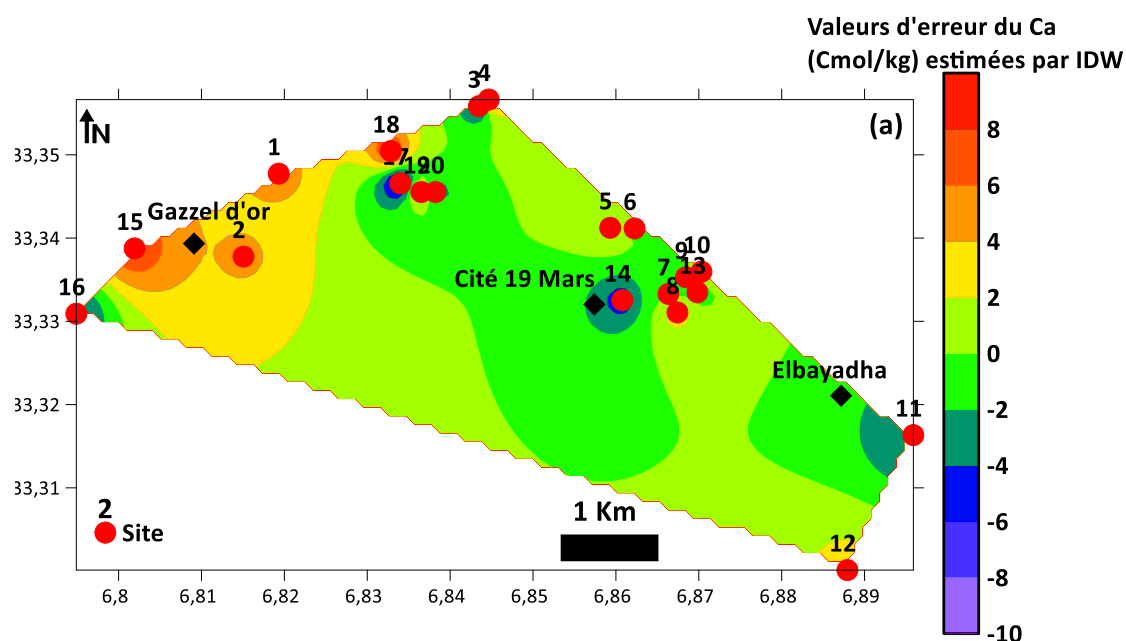
Tableau 15 : Analyse statistique des résidus de chaque méthode d'interpolation pour du calcium (Ca^{+2})

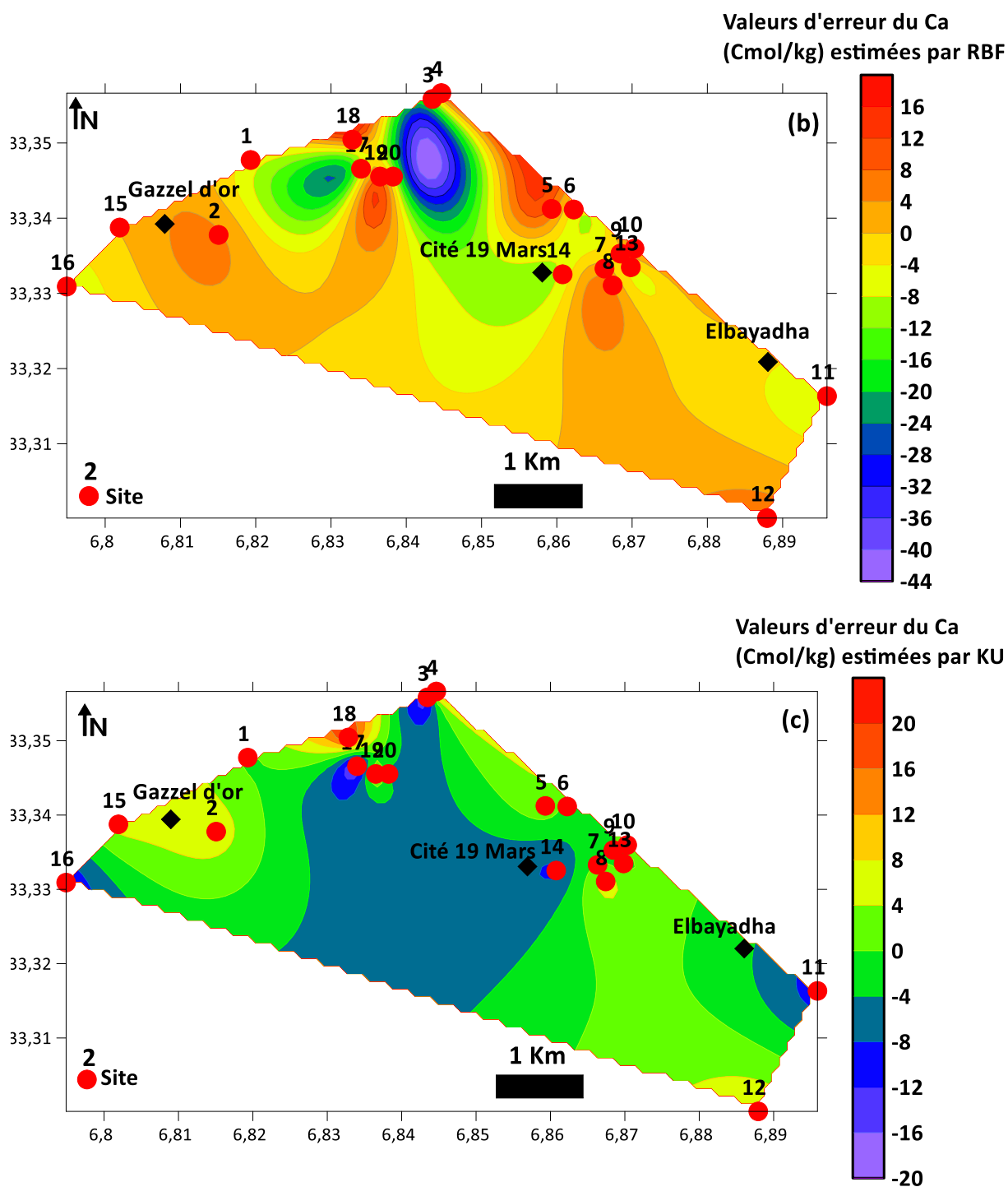
Les bases de données des valeurs résiduelles établies précédemment sont exploitées visuellement pour produire des cartes de la distribution des erreurs d'interpolation (ou résiduels) pour chaque méthode étudiée (Figure 48).

Les résidus des valeurs de calcium (Ca^{+2} Cmol/kg) issus de trois méthodes d'interpolation sont alors calculés pour 20 sites d'échantillonnage. Ils sont ensuite interpolés par IDW, RBF et krigeage universel (KU) (Figure 48 a, b, c).

L'erreur de modélisation, issue de la première et deuxième méthode (RBF et KU), varie de

-44 Cmol/kg à 16 Cmol/kg et -20 Cmol/kg à 20 Cmol/kg respectivement, ce qui indique une forte surestimation des valeurs du calcium pour une vaste superficie de la zone d'étude (Figure 48 b, c). La troisième méthode (IDW) présente des résidus d'étendue plus réduit par rapport à la première et à la deuxième méthode (Figure 48 a). Ce qui nous conduit à constater que le model de IDW est adéquate à l'interpolation des teneurs en calcium.





Il est à noter que le point 12 est masqué en raison de sa distance par rapport aux autres points.

Le nuage de points des valeurs mesurées en fonction des valeurs estimées de conductivité électrique (Fig. 49) montre que le modèle de l'inverse de la distance pondéré (IDW) est rectiligne et plus

précis et moins biaisé par rapport à deux model.

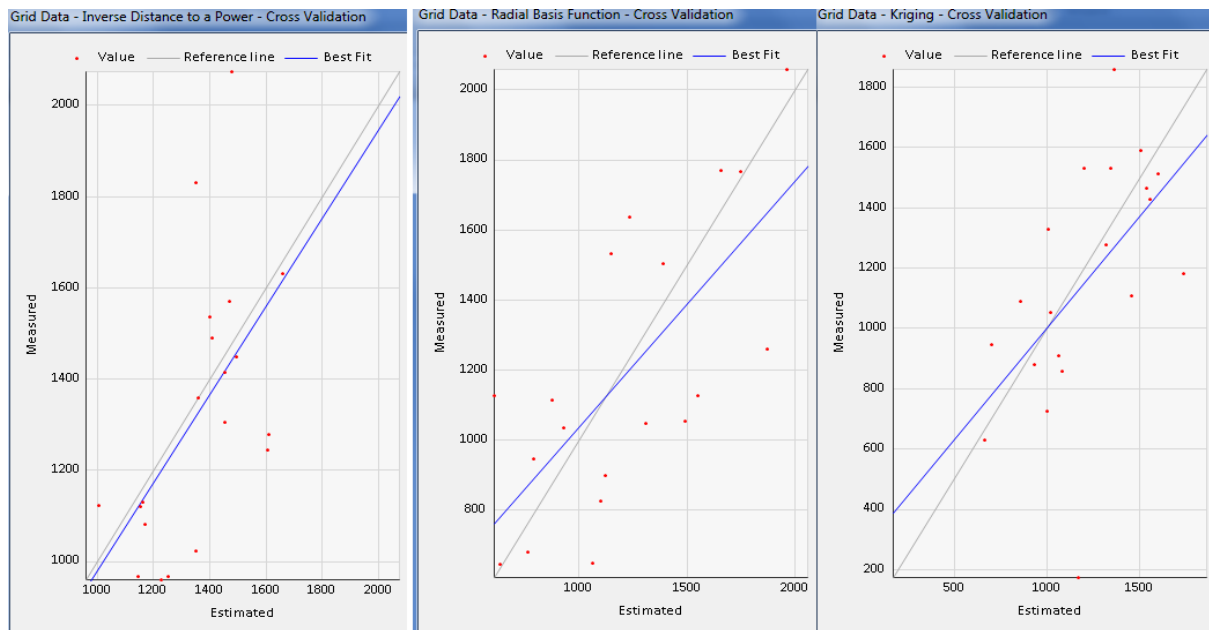


Figure 49: Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisées pour conductivité électrique (CE) en $\mu\text{S/cm}$.

Le nuage de points des valeurs mesurées en fonction des valeurs estimées de sodium (Fig. 50) montre que presque les trois model est rectiligne et plus précis et moins biaisé avec un avantage du model de krigage universel (KU).

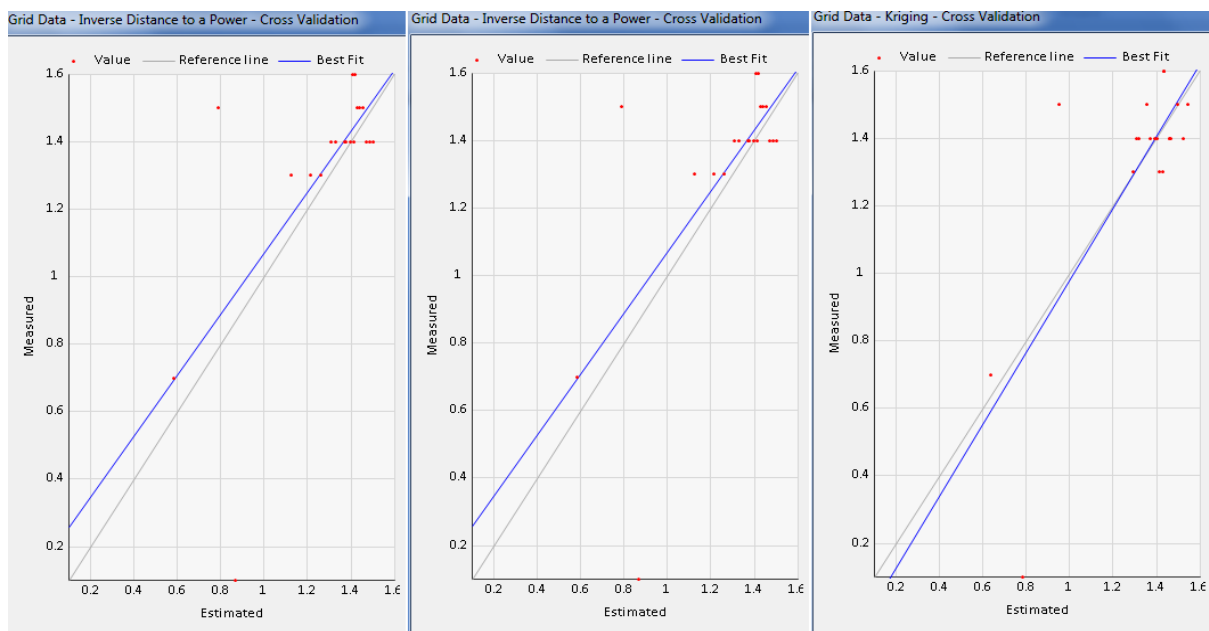


Figure 50: Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisées pour sodium (Na^+) en Cmol/kg .

Le nuage de points des valeurs mesurées en fonction des valeurs estimées de calcium (Fig. 51) montre que le model d'IDW est légèrement rectiligne et moins biaisé par rapport aux deux autres model (RBF et KU).

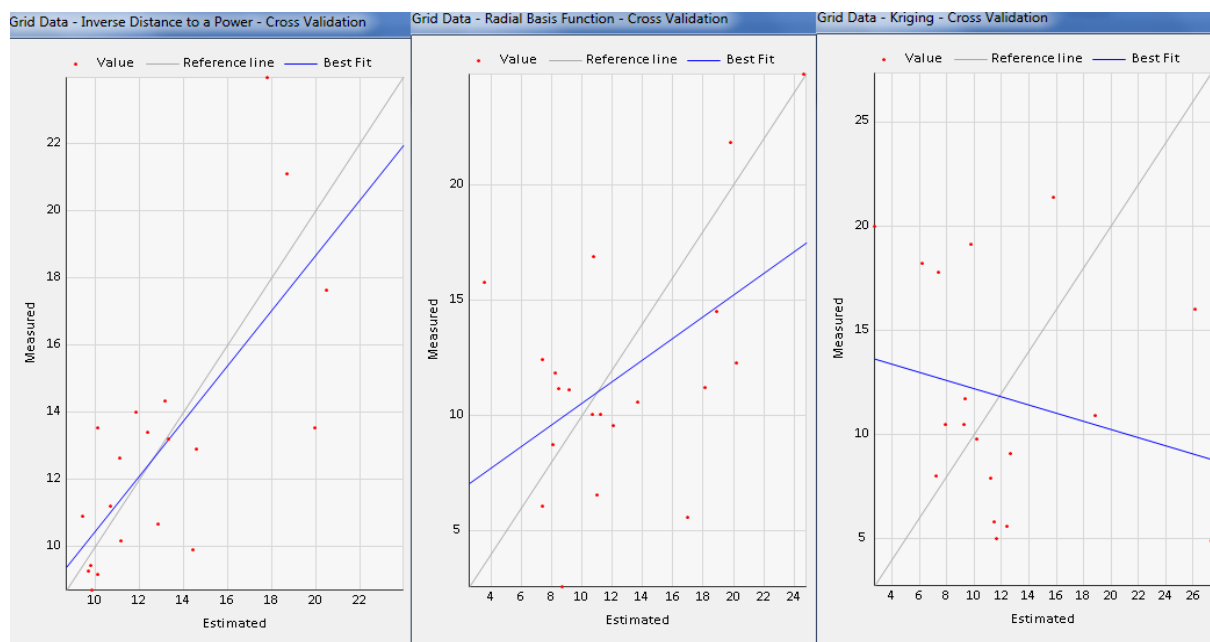


Figure 51: Comparaison des trois méthodes d'interpolation par validation croisées pour sodium (Na^+) en Cmol/kg.

Par ailleurs, la superposition des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées, pour les trois méthodes, montre que le nuage pour la méthode de l'inverse du distance pondérée (IDW) est légèrement mieux groupé autour de la droite $y = 0$ avec un coefficient de l'ordre de 0,046 contre 0,203 pour la méthode RBF et 0,456 pour la méthode de krigeage universel (KU) (Fig. 52). En conclusion, la méthode l'inverse de la distance pondérée (IDW) s'est révélé plus représentative que les deux autres méthodes.

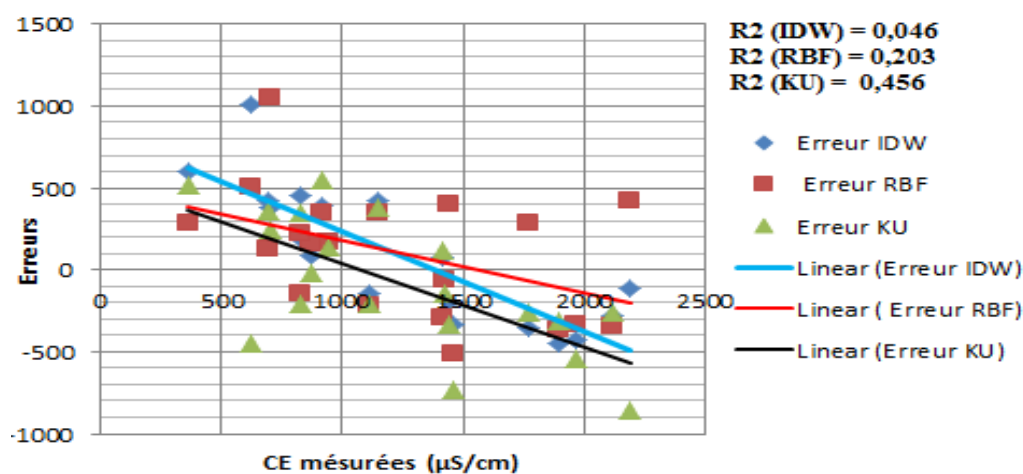


Figure 52 : Superpositions des nuages des erreurs de CE commises lors de l'interpolation en

fonction des valeurs mesurées de la conductivité électrique, pour la méthode IDW, RBF, et le Krigeage universel (KU).

Par ailleurs, la superposition des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées, pour les trois méthodes, montre que le nuage pour la méthode de krigeage universel (KU) est mieux groupé autour de la droite $y = 0$ avec un coefficient de l'ordre de 0,009 contre 0,043 pour la méthode RBF et 0,081 pour la méthode de l'inverse distance (IDW) (Fig. 53). En conclusion, la méthode krigeage universel (KU) s'est révélée plus représentative que les deux autres méthodes.

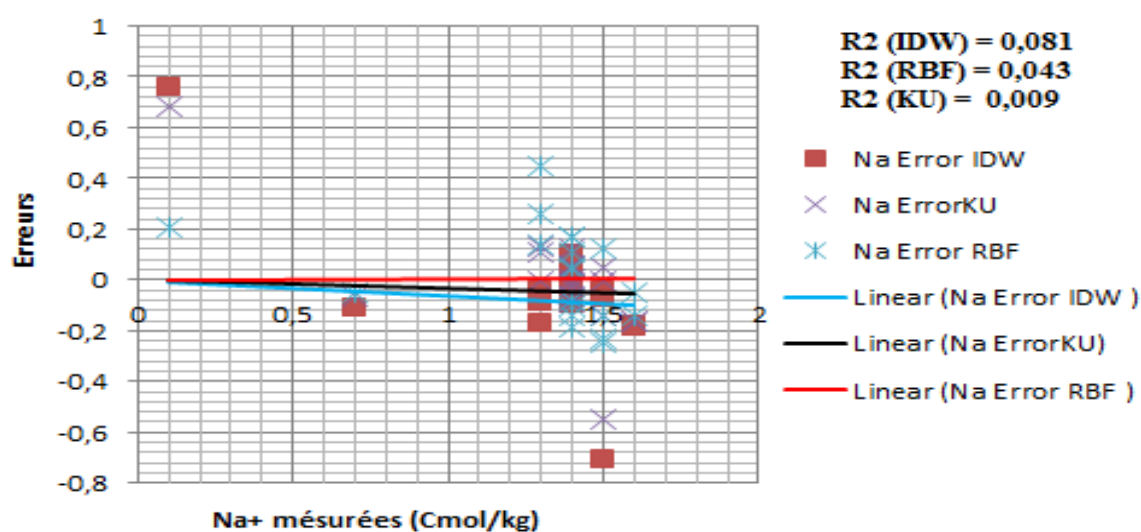


Figure 53: Superpositions des nuages des erreurs de Na^+ commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées de sodium, pour la méthode IDW, RBF, et le Krigeage universel (KU).

Par ailleurs, la superposition des nuages des erreurs commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées pour les trois méthodes (figure 54), montre que le nuage pour la méthode de l'inverse distance pondérée (IDW) est légèrement mieux groupé autour de la droite $y = 0$ avec un coefficient de l'ordre de 0,102 contre 0,180 pour la méthode RBF et 0,208 pour la méthode de krigeage universel (KU) (Fig. 53). En conclusion, la méthode l'inverse distance pondérée (IDW) s'est révélée plus représentative que les deux autres méthodes.

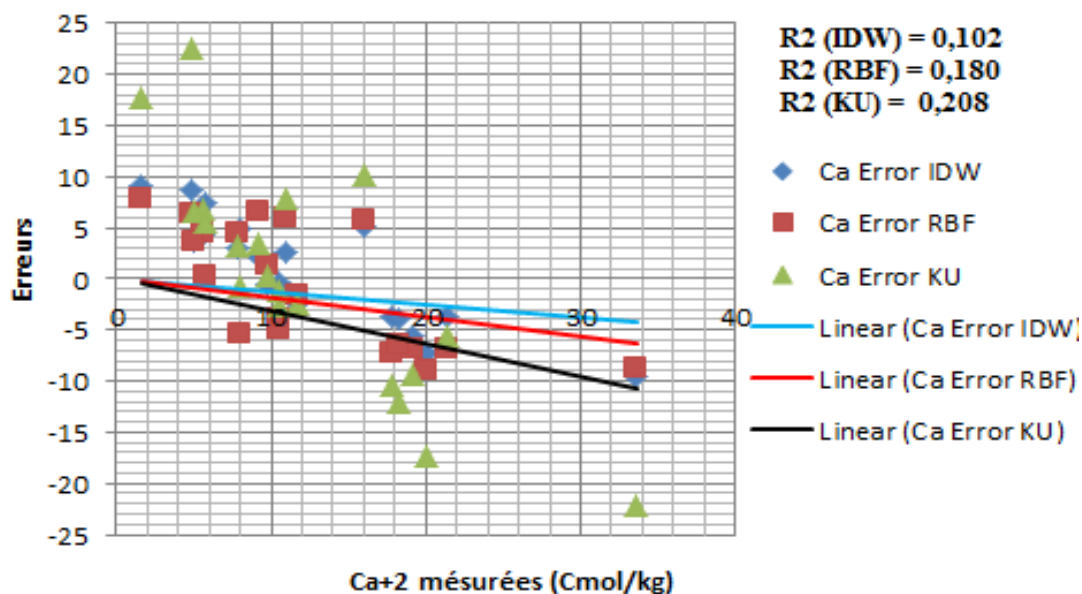


Figure 54 : Superpositions des nuages des erreurs de Ca^{+2} commises lors de l'interpolation en fonction des valeurs mesurées de calcium, pour la méthode IDW, RBF, et le Krigeage universel (KU).

III.6. Conclusion :

L'usage conjoint de méthodes géostatistiques et de modèles déterministes montre que l'interpolation géostatistique permet de produire une carte plus réaliste que celle obtenue par les méthodes d'interpolation déterministes seules.

De plus, l'approche géostatistique permet de quantifier l'incertitude associée à la carte et de définir les zones sous échantillonnées.

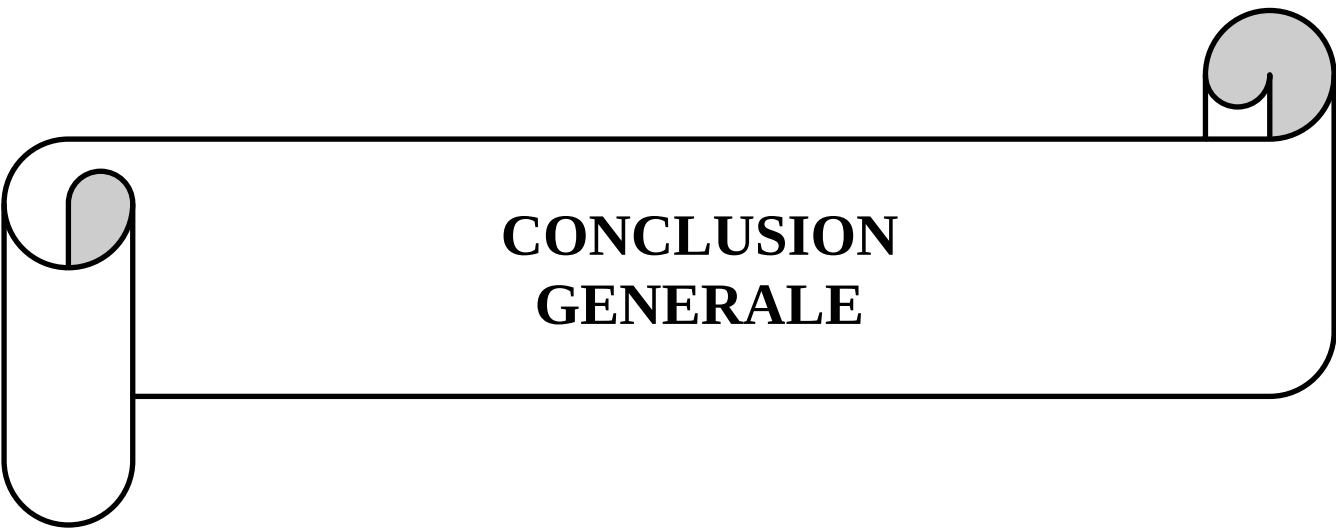
De cette étude nous pouvons conclure ce qui suit :

Les particularités géomorphologiques influencent considérablement la marge d'erreur de l'interpolation.

L'ensemble des interpolateurs montre qu'il existe une relation linéaire entre les valeurs observées et celles interpolées.

Il est clair que les méthodes testées ne produisent pas les mêmes résultats et qu'une interprétation visuelle comparative des données mesurées ne le permet pas.

La méthode l'inverse de la distance pondérée (IDW) s'est révélé plus représentative que les deux autres méthodes pour les données de CE et les données de Ca^{+2} , par contre on retrouve que la méthode de krigeage universel (KU) est plus représentative que les deux autres méthodes pour les données de Na^{+} .

A large, horizontal decorative scroll graphic with a black outline and a light gray fill. It has a rounded left end and a rounded right end. The text "CONCLUSION GENERALE" is centered within the scroll.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale :

La régionalisation spatiale des propriétés des sols, en particulier dans la région d'El-Oued, peut être réalisée de manière efficace en combinant les méthodes déterministes et géostatistiques d'interpolation.

Les approches géostatistiques ont été largement utilisées comme outils utiles pour prendre des décisions concernant la gestion des paramètres physico-chimiques de sols.

Les méthodes déterministes (IDW, RBF) telles que l'interpolation basée sur l'étendue de similitude ou le degré de lissage, permettent de créer des surfaces à partir de points mesurés en fonction de la distance ou de fonctions de base radiale.

D'autre part, les méthodes géostatistiques, comme le krigeage, exploitent les propriétés statistiques des points mesurés pour quantifier l'autocorrélation spatiale et prendre en compte la configuration spatiale des points d'échantillonnage.

Dans le cas spécifique de la région d'El-Oued, où les propriétés des sols peuvent varier significativement, l'utilisation conjointe de ces méthodes permettrait de modéliser de manière précise la distribution spatiale des variables telles que la teneur, la densité, la granulométrie, etc.

Ces méthodes offrent la possibilité d'estimer les valeurs des propriétés des sols dans des zones non échantillonnées, de prédire des valeurs pour des blocs de sols, ou même d'estimer des valeurs globales pour la région entière.

En conclusion, La méthode l'inverse de la distance pondérée (IDW) s'est révélé plus représentative que les deux autres méthodes pour les données de CE et les données de Ca^{+2} , par contre on retrouve que la méthode de krigeage universel (KU) est plus représentative que les deux autres méthodes pour les données de Na^{+} .

L'application des méthodes déterministes et géostatistiques d'interpolation pour la régionalisation spatiale des propriétés des sols dans la région d'El-Oued permettraient une analyse approfondie et une modélisation précise des variations des sols, offrant ainsi des informations essentielles pour la gestion et l'aménagement du territoire agricole dans cette région spécifique.

A decorative horizontal scroll graphic with a black outline and a light gray fill. It features rounded ends and a small circular detail on the left side. The text is centered within the scroll.

**Références
Bibliographiques**

Références bibliographiques

- 1- Adolphe-Laurent Joanne, Géographie de l'Algérie (avec une carte de l'Algérie et 23 gravures), Paris, Hachette Livre, 1899, 172 p. (lire en ligne).
- 2- Hirich, Abdelaziz & Choukr-Allah, Redouane. (2018). Introduction of alternative crops on salt affected soils of Foug Eloued Perimeter, Laayoune, Morocco.
https://www.researchgate.net/publication/324770479_Introduction_of_alternative_crops_on_salt_affected_soils_of_Foug_Eloued_Perimeter_Laayoune_Morocco
- 3- Hamid Zoubir & Mansouri Abdelrazak 2022/2023. Estimation spatiale des données hydrogéologiques Par krigeage dans la nappe aquifère cas d'El Oued université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued promotion
- 4- KERROUCHE Soumaia KHALAIFA Karima REHOUMA Sana 2012/2013 Etude de l'adaptation de la culture de blé dur (Triticum durum) au conditions pédoclimatiques de la région d'El Oued université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued
- 5- BERRAH Said 2008/2009. Contribution à l'étude spatiale de la remontée de la nappe phréatique : problèmes posés et conséquences sur le système agricole " Ghout" à Oued Souf UNIVERSITÉ KASDI Merbah -OUARGLA
- 6- DRICHE Nesrine LOUAFI Oum kalthoum DRIDI Aya ZAHANI Asala 2021/2022. Variation du régime alimentaire du *Cyrtopodion scabrum*, HEYDEN, 1827 (Rough bent-toed gecko) et *Tarentola deserti*, BOULENGER, 1891 (Tarente du désert) dans la région d'Oued UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL-OUED
- 7- Nacer Kherici 2014 Effets de la remontée des eaux de la nappe phréatique sur l'homme et l'environnement : cas de la région d'El-Oued (Sud-Est Algérie) Wiles
https://www.researchgate.net/figure/situation-geographique-de-la-zone-detude_fig1_279931555
- 8- Jacques Fontaine Territoires sahariens algériens à l'aube du XXI^e siècle
- 9- Au pays des sables, Isabelle Eberhardt, Paris Éditions Joelle Losfeld, 2002
- 10- Richesses de la France, janvier 1962 n° 50, sous la Direction de Si Boubakeur, le département des Oasis, Le Souf & El oued, Bordeaux imprimeries Delmas.
- 11- Saïd Belguidoum 17 janvier 2021, « Urbanisation et urbanité au Sahara », *Méditerranée*, vol. 99, n° 3, 2002 (DOI 10.3406/medit.2002.3261, lire en ligne, consulté le)
- 12- Nassima Moftah 1,2 · Amina Hani 1,2 · Abdelghani Merdas 3 · Shawki Sadiq 4 · Ali Sediri 17 November 2021. A holistic approach to characterize the siliceous sands of the Oued (eastern Algeria) for potential industrial applications
- 13- L. Bedadia , M. T. Bentezza TMREES 17, 21-24 April 2017 International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, , Beirut

Lebanon

14- Meftah Nassima ChaoukiSadik Ali Sdiri October 2021 Arabian Journal of Geosciences 14(21)October 2021 DOI:[10.1007/s12517-021-08591-1](https://doi.org/10.1007/s12517-021-08591-1)

15- Nassima Muftah&Amina Hani& Abdel-GhaniMirdassa 05-05-2023

16- [Daniel Lepădatu](#)accessed 21 May, 2024]Optimisation des procédés de mise en forme par approche couplée plans d'expériences, éléments finis et surface de réponse https://www.researchgate.net/figure/Principales-methodesdeterministes_fig39_30515383

17- Christine POINOT-SALANON & Anne NICOLAS & Michel SOLDEVILA10 juil. 2013*Méthodes de calcul neutronique des cœurs*

18- Arthur VidardOct 2011. Méthodes déterministes d'analyse de sensibilité. Journée de l'Atelier Modélisation du Cluster Environnement : Méthodes d'analyse de sensibilité, , Grenoble, France. {hal-00648574}

19- Benoît Humez Cours de Méthodes Déterministes en Finance (ENPC) Société Générale – Recherche Quantitative

20- [Bernard Beauzamy](#)1 Mar. 2004Méthodes probabilistes pour l'étude des phénomènes réels Société de Calcul Mathématiques

21- [B. Bathelot](#), modifié le 05/04/2017Méthode d'échantillonnage probabiliste <https://www.definitions-marketing.com>

22-Davis, John C. (1986), Statistiques et analyse de données en géologie, John Wiley and Sons, New York.

23-Franke, R. (1982), Interpolation de données dispersées : test de certaines méthodes, Mathématiques des calculs, v. 33, n. 157, p. 181-200

24- [B. Bathelot](#), modifié le 05/04/Méthode d'échantillonnage raisonnée <https://www.definitions-marketing.com>

25- Arnaud M., Emery X.. 2000. Paris : Hermès, 221 p..Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques

26- y [Xavier EMERY](#) & [Michel ARNAUD](#) september 20, 1970stimation et interpolation spatiale méthodes déterministes et géostatistiques Paperback

27- Pierre bosser 2011/2012 interpolation spatiale école national des science géographique (ENSG / DPTS France)

28- <https://www.goldensoftware.com/products/surfer>

29- <https://www.capterra.fr/software/106531/surfer>