

الجزائرية الديمقراطية الشعبية الجمهورية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة 20 أوت 1955 - سكيكدة
UNIVERSITE 20 AOUT 1955-SKIKDA



Département des Sciences de la Nature et de la Vie
Mémoire Présenté en Vue de l'obtention du Diplôme de Master

Filière: Ecologie et environnement

Option: Protection des écosystèmes

Intitulé

**Apport de la géostatistique dans le domaine de
l'environnement**

Présenter par: Zouak Ahmed Guerfi Rokia
Yahia Nada Skender Rania

Membre de jury:

M. ben Ali Rim	Président	Université 20 août Skikda
Boukehla Amel	Directeur de mémoire	Université 20 août Skikda
Hadef Azzedine	Examineur	Université 20 août Skikda

Année universitaire 2021/2022



REMERCIEMENTS

Au terme de ce travail, nous remercions Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté pour mener à bien ce mémoire de fin d'études.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme **BOUKEHLA AMEL**, on la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur, sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire et surtout pour ses qualités humaines.

Nous tenons à remercier sincèrement les membres du jury qui nous font le grand honneur d'évaluer ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à ma formation ou à mon encadrement.



Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A Mon très cher Père

Aucune dédicace ne saurait exprimer L'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

A Ma très Chère Maman

Si Dieu a mis le paradis sous les pieds des mères, ce n'est pas pour rien.

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur. Je t'aime.... tu sais.

A ma Sœur Samah

Aucune dédicace ne peut exprimer mon amour et ma gratitude de t'avoir comme sœur. Je ne pourrais jamais imaginer la vie sans toi, tu comptes énormément pour moi, tu es la sœur qui assure sone rôle comme il faut, je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien le long de mes études, je t'estime beaucoup et je t'aime beaucoup. Je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.

A mon frère Amir

Ces quelques lignes, ne sauraient traduire le profond amour que je te porte. Ta bonté, ton précieux soutien, ton encouragement tout au long de mes années d'étude, ton amour et ton

affection, ont été pour moi l'exemple de persévérance. Je trouve en toi le conseil du frère et le soutien de l'ami. Que ce travail soit l'expression de mon estime pour toi et que Dieu te protège, t'accorde santé, succès et plein de bonheur dans ta vie.

Ma petite sœur Nour El-Houda

Merci d'être là quand ça ne va pas. Merci de de me prêter ton épaule quand j'en ai de besoin. Merci d'apaiser mes pleurs peu importe la situation; tu as toujours les mots qu'il faut et tu sais reconnaître les moments où j'ai simplement besoin d'une oreille attentive pour m'écouter. Merci d'être capable de me brasser quand j'ai besoin d'être réveillée. Puisse Allah te protéger, garder et renforcer notre fraternité. Je te souhaite tout le bonheur du monde.

A mes tantes maternels Touta et Kakou

Je profite de la présente occasion pour vous remercier pour tout le soutien, la sympathie et l'amour que vous m'accordez. Que Dieu le tout puissant vous comble de santé, de bonheur et vous prouve une longue vie pleine de joie.

A mes oncles Houcine , Salah ,Youcef ,Fouad ,Hamza et Mourad

En signe de l'affection et du grand amour que je vous porte, les mots sont insuffisants pour exprimer ma profonde estime. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et de mon attachement indéfectible .Que Dieu vous accorde santé, succès et félicité.

A la mémoire de mon grand-père

Puisse Dieu vous avoir en sa sainte miséricorde et que ce travail soit une prière pour votre âme.

A ma grand-mère Maternel

C'est à la personne la plus idéale dans ce monde, Merci pour tout et que Dieu leur donne bonne santé et longue vie parmi nous.

A mes cousins et cousines

Ghina ,donia,Djouri ,Leticia , Djoumana , Maya , Anais ,Aymen ,Mouhamed,Amar,Aissa et Djoud

Que ce travail soit le symbole de ce que je ressens envers vous. Que dieu vous bénisse et vous accorde longue vie pleine de joie et de réussite.

Une spéciale Dédicace : A mon petit cœur Kenan

Avoir un neveu est le plus beau cadeau qu'une sœur puisse vous faire. Tes petites mains, ton enthousiasme, tes sourires, tes yeux brillants sont incomparables. Tu as apporté beaucoup de bonheur à notre famille. je vous souhaite une vie pleine de santé et du bonheur. Je t'aime

A mes amies Dani, kakou , Nedjla , Ines et Nanus

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des sœurs et des amies sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

A toute ma famille

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

A tous ceux qui j'ai omis involontairement de citer.

Nada

Au sens de gratitude et d'amour ce Je dédie travail :
A Dieu tout puissant Allah qui nous 'a donné la volonté et la puissance pour réaliser
cette étude dont nous souhaiterons qu'elle sera acceptée par lui sobhanaho et qu'il
nous'aide à continuer inchaallah.

Mes chers parents

hocine et fathia source de la vie et d'amour et d'affection.

grâce et remerciement pour leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières
tout au long de mes études, leur encouragement, et surtout de tous leurs sacrifices,
pour avoir sacrifié leurs plus belles années pour nous pour que nous puissions nos
arriver là où nous sommes, c'est grâce à elles.

Ma chere grand-mère paternelle

dahbia que ce modeste travail, soit l'expression des vœux que vous n'avez cessé de
formuler dans vos prières. que Dieu elle préserve santé et longue vie.

Mes très chères sœurs et mes frères

Ayoub pour son soutien et son encouragement et mes petits frères ***iyed.***
kaouthar et amina pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral.

Mes grand frères et sœurs

walid et Nasro et Mourad et saeif et Halima et leur famille qui n'ont cessé d'être
pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

Mes chères très et fidèles Amis tout, particulièrement khaoula.

Toute ma famille :

guerfi et mosbah source d'espoir et de motivation pour leur soutien tout au long de
mon parcours universitaire.

Merci d'être toujours là pour moi.

A mon quadrinome : yahia nada et skender rania et zouak ahmad

A tous ceux qui ont contribués de près ou de loin dans ce travail

ROKIA

*Tout d'abord nous tiens à remercier le bon **ALLAH** pour m'a donné le courage, la force et la volonté pour réussir et de m' avoir éclairci le chemin tout au long de ma vie.*

*A ma mère, je te remercie pour ce que tu m'as inculqué, et les sacrifices que tu as consentis pour moi resteront à jamais gravés dans ma mémoire. Sans ta présence dans ma vie, je n'en serais pas arrivé là où je suis maintenant, que dieu vous protégé pour moi « **FATIHA** ».*

*A mon père, qui à travailler dur et fait tous les efforts et m'a soutenu financièrement et moralement et de tout ce qu'il pouvait, que dieu vous protégé pour moi « **YOUCEF** ».*

*A mon cher frère «**Alla Edine** » et mes sœurs « **Rayane ; Kenza ; Amina ; Halima** » Qu'ils trouvent l'expression de mes grands attachements. Qu'ils trouvent le témoignage de mes immenses affections. En leurs souhaitant la réussite et le bonheur.*

*Un merci spécial à mon mari qui m'a soutenez- moi et restez à mes côté de moi que Dieu vous protège « **Fouad** ».*

*Un merci spécial à tous ceux qui m'ont soutenu et soutenu jusqu'à ce que j'atteigne ce stade, en particulier mes tantes « **Nassima ; Samiha ; Mouna ; Mimia ; Nabila** ».*

*Remerciements particuliers aux parents de mon mari, ma mère « **Zohra** » et mon père « **Aboud** ».*

*Je tien à exprimer ma sincère gratitude à Madame « **Boukahla** » pour l'encadrement qu'elle a apporté à ce travail, ses nombreux conseils, son soutien ainsi que ses qualités humaines.*

Une merci spécial à tous mes enseignants de tous les cycles d'étude.

Une merci spécial à tous mes amis pour la préparation de cette mémoire.

Rania

Je dédie ce mémoire à Mes parents

Ma mère

qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, L'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père

*qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ;
Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.*

Ahmed

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Liste des abréviations

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Résumé

Abstract

ملخص

Introduction.....01

Chapitre I : Etude Bibliographique

I.1. Historique02

I.2. Définition de la géostatistique.....03

I.3. Modèles géostatistique03

I.4. Les variables régionalisés et leurs moments.....04

I.4.1. La variable régionalisé04

I.4.2. Moments et stationnarité05

a- Moment d'ordre 1.....05

b- Moment d'ordre 2.....05

I.4.3. L'hypothèse de stationnarité06

a- Stationnarité d'ordre 2.....06

b- L'hypothèse intrinsèque07

II. Analyse variographique07

II.1. Le variogramme07

II.1.1. Le variogramme théorique08

II.1.2. Le variogramme expérimentale08

II.1.3. Propriété du variogramme10

II.1.4. Paramètres du variogramme.....11

II.1.5. Isotropie et anisotropie.....12

II.1.5.1 Isotropie12

II.1.5.2. Anisotropie12

a- anisotropie géométrique12

b- anisotropie zonale13

II.1.6. le variogramme de surface13

II.1.7. Modèles théoriques et ajustement des variogrammes.....14

II.1.7.1. Les Modèles à palier14

Sommaire

II.1.7.2. Les modèles sans palier	15
III. Méthodes géostatistiques.....	17
III.1. Géostatistique linéaire (paramétrique)	17
III.1.1.le krigeage ordinaire.....	17
III.1.2. Le krigeage simple	18
III.1.3. Le krigeage universel	18
III.2. Géostatistique non linéaire (non paramétrique).....	19
III.2.1. Le krigeage d'indicatrice	19
III.2.2. Le krigeage disjonctif	20
III.3. Géostatistique multi variables	20
III.3.1. Le Co-krigeage	20
III.4. Propriétés de krigeage	21

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

I. Exemples des travaux géostatistique réalisés dans le domaine de l'environnement en Algérie.....	22
I.1.Exemple(1) : Etude géostatistique de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Belkebir, 2010).....	22
I.1.1.Démarche d'étude.....	22
I.1.2.Résultats.....	23
I.1.2.1.variographie.....	23
I.1.2.2. krigeage.....	23
I.2. Exemple(2) : Application de krigeage d'indicatrices dans la cartographie de la salinité des eaux souterraines du moyen –Chélif (Douaoui, Bradai) 2007.....	25
I.2.1.Démarche d'étude.....	25
I.2.2.Résultats.....	26
I.2.2.1.Variographie.....	26
A.variographie des indicatrices.....	27
I.2.2.2.krigeage.....	28
A.Krigeage ordinaire.....	28
B.krigeaged'indicatrices.....	28
I.3.Exmple(3) : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols le	

Sommaire

cas du périmètre Biskra ; Algérie (Abdenmour, Douaoui, Bradai, Bennacer, Pulido) 2013.....	30
I.3.1.Démarche d'étude.....	30
I.3.2.Résultats.....	31
I.3.2.1.variographie.....	31
A.variographie des indicatrices.....	31
I.3.2.2. krigeage.....	33
A.Krigeage ordinaire.....	33
B.Krigeage d'indicatrice.....	34
I.4.Exemple(4) : Apport de la géostatistique non-paramétrique à la cartographie des concentrations du fluor dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) – Hassi Messaoud (Sud algérien) (Kechiched, Djeghoubbi, Fougou, Nezli et Haddane) 2013.....	36
I.4.1.Démarche d'étude.....	37
I.4.2.Résultats.....	38
I.4.2.1.Variographie.....	38
A. Variographie des indicatrices.....	38
I.4.2.2.Krigeage.....	39
A.Krigeage d'indicatrice.....	39

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk.

I. Introduction.....	42
I.1.Démarche d'étude.....	42
I.1.1.variographie.....	42
I.1.2.Krigeage.....	43
A. Krigeage d'indicatrice des teneurs en uranium.....	43
B. Paramètres de krigeage.....	43
C. Méthodologie de travail	45
I-2-Cartographie des indicatrices krigées en U.....	49

Liste des abréviations

Liste des abréviations

BRGM : Bureau de Recherche Géologique et Minière.

CEA : commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

a : Portée du semi-variogramme.

C(0) : Palier du semi-variogramme.

C0 : Effet de pépite.

e : Erreur d'estimation.

FA : Fonction aléatoire.

VA : Variable Aléatoire.

VR : Variable Régionalisé.

Prob : probabilité.

Var : Variance.

h : Pas du variogramme ou distance entre deux observations.

$\gamma_{th}(\mathbf{h})$: Variogramme théorique.

$\gamma_e(\mathbf{h})$: Variogramme expérimental.

E [] : Espérance mathématique.

KO : Krigeage ordinaire.

KI : krigeage indicatrice

Z*: Estimateur.

θ : Angle directionnel du variogramme.

μ : Paramètre de Lagrange.

λ : Pondérateur.

\mathbf{R}^n : espace dimensionnel.

N (h ; θ) : le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

n: Points expérimentaux.

λ_i : Le poids du point x.

γ_{brut} : Le variogramme brut.

γ_{reel} : Le variogramme réel.

NO₃ : Nitrate.

CE : conductivité électrique.

P : probabilité.

CT : Complexe terminal.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

Liste des abréviations

ADE: algérienne des eaux.

GPS: système de positionnement global.

U : uranium.

Liste des figures

Figures	Titres	Page
Figure 01	Répartition des variables régionalisées.	03
Figure 02	Représentation schématique des points de mesure de la variable dans l'espace.	07
Figure 03	Schéma de calcul du variogramme expérimental.	09
Figure 04	illustre la méthodologie de calcul du variogramme de l'exemple.	09
Figure 05	Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi variogramme expérimental (croix).	10
Figure 06	Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.	10
Figure 07	Les caractéristiques du graphe $\gamma(x, h)$ en fonction de h.	10
Figure 08	Graphe d'un variogramme de surface - cas d'anisotropie.	12
Figure 09	Paramètre du semi-variogramme.	12
Figure 10	Anisotropie géométrique ou elliptique.	13
Figure 11	Ellipse des portées-Anisotropie géométrique.	13
Figure 12	Anisotropie zonale.	13
Figure 13	Schéma d'un modèle sphérique.	14
Figure 14	Schéma d'un modèle exponentiel.	15
Figure 15	Schéma d'un modèle Gaussien.	15
Figure 16	Schéma d'un modèle en puissance.	16
Figure 17	Schéma Modèle à effet de trou.	16
Figure18	Carte de localisation des points dans plaine de Mitidja (Mai 2010).	22
Figure19	Variogramme d'iso-teneurs en nitrates de la Mitidja Est (Mai 2010).	23
Figure20	Carte d'iso-teneurs en nitrates contenus dans les eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja Est (Mai 2010).	24
Figure21	Localisation des points d'eau.	25
Figure 22	Ajustées à un variogramme expérimental à modèle exponentiel.	26
Figure23	Ajustées à un variogramme expérimental à modèle sphérique.	28
Figure 24	La carte estimée par krigeage ordinaire.	28
Figure 25	La carte de la CE obtenue par krigeage d'indicatrice.	29
Figure 26	Estimation par krigeage d'indicatrices aux différents seuils de CE.	29
Figure 27	Le variogramme omnidirectionnel expérimental de la conductivité électrique des sols.	31

Liste des figures

Figure 28	Prévision de la carte de salinité en appliquant KO.	33
Figure 29	La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 0,6$ dS m-1.	34
Figure 30	La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 1$ dS m-1.	35
Figure 31	La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 2$ dS m-1.	35
Figure 32	La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 4$ dS m-1.	36
Figure 33	Le variogramme de surface d'indicateur du fluor I(2 mg/l).	39
Figure 34	Le variogramme horizontal moyen d'indicateur du fluor I (2 mg/l) Krigeage d'indicateurs.	39
Figure35	Carte des d'indicateurs (probabilités) krigées pour une concentration du fluor supérieure ou égale 2mg/l. (Mai, 2013).	40
Figure36	Variogramme expérimental de U.	43
Figure37	Situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk.	45
Figure38	Carte des teneurs d'indicateurs de dans les blocs d'exploitation du niveau n°1 du gisement de – Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale-	50
Figure39	Carte des indicateurs de U dans les blocs d'exploitation du niveau n° 2 du gisement de Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale –	51
Figure40	Carte indicateurs de U dans les blocs d'exploitation du niveau n° 3 du gisement de Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale –	52
Figure41	Carte des indicateurs de U dans les blocs d'exploitation du niveau n° 4 du gisement de Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale.	53

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Tableaux	Titre	Page
Tableau 1	Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux des fonctions indicatrices de la CE.	27
Tableau 2	Caractéristique des semi-variogramme pour les seuils KI.	32
Tableau 3	Plages de probabilité des zones dépassant les seuils obtenus par KI.	32
Tableau 4	La superficie et le pourcentage de chaque classe obtenus par Krigeage Ordinaire .Classes Superficies (ha).	34
Tableau 5	Codage binaire des concentrations du fluor analysées en Mai 2013.	38
Tableau 6	Paramètres de krigeage.	44
Tableau 7	Statistiques des indicatrices krigées en U pour les quatre niveaux.	44

Résumé

Diverses sciences dans différentes disciplines nécessitent d'interpoler de nombreux phénomènes environnementaux. La géostatistique, avec son étape d'analyse structurale, est largement utilisée à cette fin.

Reflétant l'évolution des sociétés occidentales, une « géostatistique environnementale » s'est développée depuis plus d'une décennie.

Dans la présente étude plusieurs travaux élaborés dans le domaine de l'environnement en Algérie ont été synthétisés (Apport de la géostatistique à la cartographie de : la salinité des eaux souterraines, la salinité des sols, concentrations du fluor dans les eaux de la nappe du CT).

Une application géostatistique non paramétrique (Krigage d'indicatrices) à été faite dans le gisement de phosphate de Kef Es sennoun (Djebel Onk –Tébessa, SE Algérie), afin de cartographier des indicatrices krigées en uranium qui ont permis de visualiser la répartition des blocs estimés pour chacun de quatre niveau d'exploitation.

Mots clés : interpoler, géostatistique non paramétrique, environnemnt, krigage d'indicatrices, cartographie.

ملخص:

تتطلب العلوم المختلفة في مختلف التخصصات إقام العديد من الظواهر البيئية. يستخدم الإحصاء الجيولوجي بخطوة التحليل الإنشائي على نطاق واسع لهذا الغرض.

تعكس تطور المجتمعات الغربية، تم تطوير "الإحصاء الجغرافي البيئي" لأكثر من عقد من الزمان .

في هذه الدراسة، تم تجميع العديد من الأعمال التي تم تطويرها في مجال البيئة في الجزائر (مساهمة الإحصاء

الجيولوجي في رسم خرائط: ملوحة المياه الجوفية ، ملوحة التربة ، تركيزات الفلور في مياه مجمع المحطة)

تم إجراء تطبيق إحصائي غير معلمي (مؤشرات كريغينغ) في ترسبات الفوسفات في كف السنون (جبل أونك - تبسة ، جنوب شرق الجزائر) ، من أجل رسم خرائط لمؤشرات كريغينغ في اليورانيوم مما جعل من الممكن تصور توزيع الكتل يقدر لكل من أربعة مستويات من الاستغلال.

الكلمات المفتاحية: الاستيفاء ، الإحصاء الجغرافي اللامعلمي ، البيئة ، مؤشر كريغ ، رسم الخرائط.

ABSRACT

Various sciences in different disciplines require the interpolation of many environmental phenomena. Geostatistics, with its structural analysis step, is widely used for this purpose.

Reflecting the evolution of Western societies, “environmental geostatistics” has been developed for more than a decade.

In the present study, several works developed in the field of the environment in Algeria have been synthesized (Contribution of geostatistics to the mapping of: the salinity of groundwater, the salinity of soils, concentrations of fluorine in the waters of the CT).

A non-parametric geostatistical application (Kriging of indicators) was made in the phosphate deposit of Kef Es sennoun (Djebel Onk –Tébessa, SE Algeria), in order to map kriged indicators in uranium which made it possible to visualize the distribution of the blocks estimated for each of four levels of exploitation.

Keywords: interpolation, nonparametric geostatistics, environment, indicator kriging, cartography.

Introduction Générale

Introduction

La géostatistique constitue une branche très importante de la statistique spatiale. Développée à partir de préoccupations très pratiques (recherche minière), elle a fait l'objet, sous l'impulsion de Georges Matheron et de ses collègues de l'école des Mines de Fontainebleu, de très importants développements méthodologiques. Les méthodes géostatistiques visent à décrire des phénomènes naturels corrélés dans l'espace et éventuellement le temps, à quantifier l'incertitude d'estimations de plusieurs phénomènes réalisées à partir d'un échantillonnage. Elles sont appliquées dans des domaines variés : mine, pétrole, hydrogéologie, topographie, météorologie, pédologie, halieutique, financeetc.

La géostatistique environnementale traite d'une grande diversité de milieux et de phénomènes, à différentes échelles d'observation et dans un contexte multi variable.

Ce mémoire met l'accent sur une sélection de travaux traitant des applications environnementales de la géostatistique en algérie où les auteurs cherchent à quantifier certaines pollutions. Développées dans des contextes différents (l'estimation minière ou pétrolière, l'hydrogéologie).

Une application de la géostatistique non paramétrique a été faite sur l'uranium du gisement de phosphate de Kef Sennoun Djebel Onk.

Pour cela notre mémoire est structuré en trois grands chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à une bibliographie raisonnée des problèmes abordés et des principaux modèles utilisés en géostatistique environnementale.
- Le deuxième chapitre comprend la présentation des travaux des différents auteurs qui ont appliqué la géostatistique dans le domaine de l'environnement et enfin
- Le troisième chapitre est consacré à une application de la géostatistique non paramétrique.

Ce travail s'achèvera par une conclusion générale

Chapitre I

Etude bibliographique

I-1-Historique

La géostatistique, initiée par Georges Matheron au Bureau minier de l'Algérie puis au (BRGM) et au (CEA), a pris son essor avec la création du Centre de géostatistique et de morphologie mathématique à l'École des Mines de Paris en 1967. Son fort développement a conduit à le scinder en deux entités, le Centre de Géostatistique et le Centre de Morphologie Mathématique.

Dès le départ il s'agissait de développer les éléments théoriques et méthodologiques permettant de répondre à des besoins de l'industrie. Si initialement les applications concernaient exclusivement la mine, elles se sont rapidement élargies au pétrole et à d'autres domaines comme la météorologie, la cartographie marine, l'halieutique, la pollution de l'air, de l'eau et des sols, etc.

Du point de vue théorique, dans un premier temps, en gros jusqu'en 1985, la géostatistique s'est intéressée principalement aux fonctions aléatoires gaussiennes (ou aux méthodes linéaires, qui se placent dans un cadre beaucoup plus large, mais dont on sait qu'elles ont de bonnes propriétés dans le cas gaussien). Les travaux se sont orientés ensuite vers les fonctions aléatoires non gaussiennes, notamment pour la simulation conditionnelle d'ensembles aléatoires, pour représenter par exemple des faciès lithologiques.

La géostatistique est utilisée dans plusieurs domaines parmi lesquels :

➤ L'environnement

- Etude des Sites et Sols pollués (pollution métallique ou organique) ;
- Etude des hétérogénéités des sites ;
- Etude de la caractérisation de sols pollués dans le cadre de sites présentant un échantillonnage suffisamment dense.
- affiner la cartographie d'un phénomène (concentration en polluant par exemple) en prenant compte des informations auxiliaires qui lui sont liées (image satellite).

➤ Estimation des champs de perméabilité

- Estimation de la charge et de la transmissivité avec prise en compte des conditions aux limites dans la modélisation. Simulations géostatistiques de la perméabilité et autres ;

➤ La Géotechnique

- Etude de la quantification par simulation des incertitudes sur le comportement de gros ouvrages et Simulation géostatistique de paramètres géotechniques.

➤ L'agronomie

Chapitre I : Etude bibliographique

-Estimation et cartographie de la pluviométrie, application à la classification de sols, composition granulométrique, chimique,... des sols.

➤ La modélisation démographique

-Géostatistique sur les données de recensement.

➤ Le pétrole

-Modélisation géométrique: elle consiste à interpoler les surfaces servant de limites ou de surface de référence pour les unités en tenant compte de toutes les informations disponibles: cotes des toits mesurées aux puits, données de pendage et d'orientation et contraintes d'inégalités, facteurs de forme donnés par les couvertures sismiques. L'interpolation de ces surfaces géologiques doit pouvoir utiliser les données provenant de sondages déviés (ou horizontaux) et prendre en compte la structure géologique.

-Caractérisation de réservoir : Elaborer des méthodes de simulations conditionnelles des variables pétro physiques (porosité, perméabilité) en accord avec la géologie.

➤ La santé

-En épidémiologie et hygiène industrielle.

I-2-Définition de la géostatistique

La géostatistique est définie comme “ *théorie des variables Régionalisés et des Fonctions Aléatoires* ” (Matheron) l’a défini la géostatistique de la façon suivante: «est l’application du formalisme des fonctions aléatoires à la reconnaissance et à l’estimation des phénomènes naturelles». (Matheron, 1971)

(Chauvet) est définie la géostatistique comme des phénomènes naturelles répartie dans l’espace (phénomènes régionalisés) et/ou dans le temps minéralisation...etc.)(Chauvet, 1999).

I-3-Modèles géostatistiques

Soit un phénomène régionalisé mesurable dans chacun des points x_i de l’espace de définition (Figure.01):

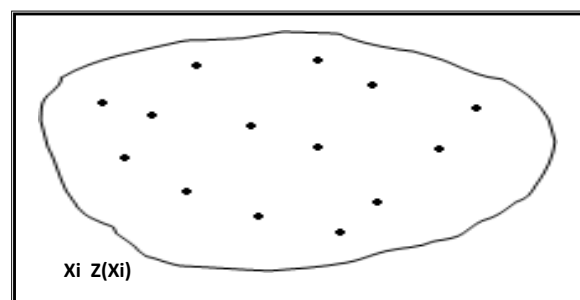


Figure 01. Répartition des variables régionalisées.

- Si en x_i , la variable régionalisée $Z(x_i)$ est considérée comme valeur unique (valeur vraie): la géostatistique étudiera la corrélation spatiale de cette variable et leur structure dans l'espace: c'est la **Géostatistique dite Transitive, le modèle primaire** (Chauvet, 1999).
- Si au point x_i , $Z(x_i)$ est une variable aléatoire, plusieurs réalisations sont alors possibles et chaque valeur $Z(x_i)$ est une réalisation particulière de $Z(x_i)$. L'ensemble des variables aléatoires formerait la fonction aléatoire (F.A) $Z(X)$.

La géostatistique des fonctions aléatoire est dite **Géostatistique Intrinsèque** modèle **topo-probabiliste** (Chauvet, 1999).

Le phénomène naturel étudié par la géostatistique peut être stationnaire ou non. Si Les moyennes des variables aléatoires aux différents points x_i de l'espace de définition sont égales, alors on dit que le phénomène naturel est **stationnaire** sinon il est **non stationnaire**.

I -4-Les variables régionalisées et leurs moments

I-4-1- la variable régionalisée

Une variable est dite (régionalisée) lorsque les valeurs qu'elle prend dépendent de sa position dans l'espace. (Narboni, 1979).

La variable régionalisé (V.R) quantifie des grandeurs mesuré sur l'espace géographique. L'espace dans lequel cette variable prend ses valeurs est appelé champ. Exemple de variable régionalisé : teneur, épaisseur ... etc.

Une variable régionalisée peut se définit par deux caractères (Arnaud et Emery, 2000).

- **aspect aléatoire** : qui explique les irrégularités locales.
- **aspect structuré** : qui reflète les tendances du phénomène à grande échelle.

Dans l'espace étudié, nous disposons d'un certain nombre d'échantillons. Ainsi au point x_i la valeur mesurée de notre variable (teneur, densité...).

Une variable aléatoire (V.A) est une variable qui prend un certain nombre de valeurs Numériques selon une certaine loi de probabilité pour toutes les implantations (X) intérieurs au gisement.

La première hypothèse importante consiste à considérer $Z(x_i)$ comme une réalisation de la variable aléatoire $Z(x_i)$.

La seconde hypothèse consiste à regrouper l'ensemble des variables aléatoires $Z(x_i)$ dans une fonction, la fonction aléatoire (F. A) $Z(x)$.

La fonction aléatoire $Z(x)$ permet de traduire mathématiquement le double caractère de la variable régionalisée $Z(x)$.

I -4-2- Moments et stationnarité

Considérons la FA $Z(x)$. Pour chaque ensemble de k points dans \mathbf{R}^n (espace dimensionnel) $\{x_1, x_2, \dots, x_k\}$ appelés points supports, il correspond à un vecteur de VA à k composantes

$$\{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_k)\}.$$

Ce vecteur de VA est caractérisé par la fonction de distribution à k variables

$$F_{x_1 \dots x_k}(Z_1, \dots, Z_k) = \mathbf{Prob} \{Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k\}.$$

L'ensemble de toutes ces fonctions de distribution, pour tous les entiers positifs k et pour chaque choix possible de points supports dans \mathbf{R}^n , constitue la « loi spatiale » de la FA $Z(x)$ (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978 in BENCHOUK (1994)). Dans les applications de géostatistique, les données généralement disponibles sont suffisantes pour inférer toute la loi spatiale. En géostatistique linéaire, seulement les deux premiers moments de la FA sont utilisés ; autrement dit, aucune distinction n'est faite entre deux FA $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ qui possèdent les mêmes moments d'ordre un et deux : les deux fonctions sont considérées représenter le même modèle.

A-Moment d'ordre 1

Considérons une VA $Z(x)$ au point x . si la fonction de distribution de $Z(x)$ possède une espérance (et nous supposons qu'elle en possède), alors cette espérance est généralement fonction de x et est écrite (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978 in BENCHOUK (1994)).

$$\mathbf{E} \{Z(x)\} = \mathbf{m}(x)$$

B- Moment d'ordre 2

Les trois moments d'ordre deux considérés en géostatistique sont comme suit (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).

- **La variance** : ou plus précisément la « variance à priori » de $Z(x)$. de la même façon que pour $m(x)$, la variance est généralement fonction de x

$$\text{Var} \{Z(x)\} = E \{[Z(x) - m(x)]^2\}$$

- **La covariance** : Il est montré que si deux VA $Z(x_1)$ et $Z(x_2)$ ont des variances aux points x_1 et x_2 alors elles possèdent une covariance qui est fonction de x_1 et x_2 ; elle est écrite

$$C(x_1, x_2) = E \{[Z(x_1) - m(x_1)] [Z(x_2) - m(x_2)]\}$$

- **Le variogramme** : La fonction variogramme est définie comme étant la variance des incréments $[Z(x_1) - Z(x_2)]$, et est écrite

$$2\gamma(x_1, x_2) = \text{Var} \{Z(x_1) - Z(x_2)\}$$

La fonction $\gamma(x_1, x_2)$ est donc le (demi-variogramme).

I-4-3-L'hypothèse de Stationnarité

La covariance apparaît ainsi comme une fonction dépendant simultanément des deux implantations x_1 et x_2 . S'il on était effectivement ainsi, l'inférence statistique de cette fonction Requiert plusieurs réalisations du couple de variables aléatoires $\{Z(x_1) ; Z(x_2)\}$.

Par contre si cette fonction ne dépendait que du vecteur $h=x_1-x_2$, alors l'inférence statistique Redevient possible : tous les couples $\{Z(x_k), Z(x_k')\}$ dont l'interdisant (x_k-x_k') est égale au vecteur h pourraient être considérés comme des réalisations différentes du couple de variable aléatoire $\{Z(x_1), Z(x_2)\}$.

a)-Stationnarité d'ordre 2

En fait, dans la théorie des variables régionalisées, on se limite généralement à faire l'hypothèse de la stationnarité d'ordre 2, dans laquelle on impose seulement aux deux premiers moments de la loi (cites précédemment) d'être invariants par translation c'est-à-dire que :

L'espérance mathématique soit une constante :

$$E [Z(x)] = m(x) = m ; \quad \text{indépendante de } x.$$

La covariance entre deux points x_1 et x_2 existe et ne dépend que de l'interdisant h .

On note alors:

$$C(h) = E [Z(x)-m] [Z(x+h)-m]$$

$$C(h) = E \{Z(x+h) Z(x)\} - m^2 ; \quad \forall x$$

L'hypothèse de stationnarité est très forte, elle suppose l'existence d'une covariance et donc d'une variance a priori finie. Or cela se vérifie très rarement étant donné qu'il existe des

phénomènes physiques et aussi des fonctions aléatoires (F. A) dont le pouvoir de dispersion est infini, ce qui peut la rendre trop restrictive.

En conséquence, on peut affaiblir légèrement l'hypothèse de stationnarité en l'existence du variogramme (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978).

b) L'hypothèse Intrinsèque

On se contentera donc de faire l'hypothèse que pour tout vecteur h , l'accroissement $Z(x+h)-Z(x)$ possède une espérance mathématique et une variance indépendante du point x .

On supposera ainsi :

$$E [Z(x+h)-Z(x)] = 0$$

$$Var [Z(x+h)-Z(x)] = 2 \gamma(h) ; \forall x$$

Dans ce cas, on dira d'une F.A satisfaisant cette hypothèse, est une fonction aléatoire intrinsèque.

La fonction $\gamma(h)$ s'appelle " demi-variogramme " mais appelée communément variogramme (MATHERON, 1971, 1973 in BENCHOUK(1994).

II - Analyse variographique

II-1-Le variogramme

Soit une variables aléatoire, $z(x)$ et $z(x+h)$ mesurées en 2 points « x » et « $x+h$ », la variabilité entre ces deux points (Figure.2) se caractérise par une fonction notée $2\gamma(h)$ appelée variogramme (Journel et Huijbregts, 1978).

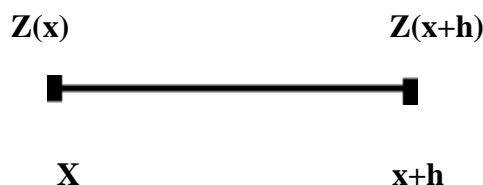


Figure 2. Représentation schématique des points de mesure de la variable dans l'espace.

Le variogramme est défini comme étant l'espérance quadratique de la variable aléatoire $[z(x) - z(x+h)]$ soit:

$$E=[Z(x) - Z(x + h)]^2 = 2\gamma(h)$$

En général, le variogramme $\gamma(h)$ (ou semi-variogramme) est une fonction à la fois du point x et du vecteur h mais l'estimation de se variogramme nécessite plusieurs réalisations. Cependant, nous ne disposons que d'une réalisation soit le couple $[z(x), z(x+h)]$ de mesures effectuées aux

points x et $x+h$ d'où l'introduction de l'hypothèse intrinsèque "le variogramme ne dépend que du vecteur h en module et en direction non pas du point x ". En admettant cette hypothèse, le variogramme sera estimé par la formule:

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2$$

Où x_i et $x+h_i$ sont des localisations des échantillons, la sommation est étendue à tous les couples de points $(x_i, x+h_i)$ distants de h . $N(h)$ représente le nombre de couples de points. Le nombre de couples $[z(x), z(x+h)]$ est séparé par une distance h suivant une direction 0°

II-1-1-Le variogramme théorique

Soit Z la variable considérée distribuée dans un domaine 1D (dimension), 2D ou 3D. La formulation théorique du semi-variogramme $\gamma_{th}(h)$ fait appel à la notion de variance (Var) appliquée à la différence entre deux observations $Z(x)$ et $Z(x+h)$ séparées par une distance h . Ce qui donne le semi-variogramme théorique, pour tout x dans G :

$$\gamma_{th}(h) = \frac{1}{2} \text{var} [(z(x) - z(x+h))]$$

II- 1-2-Le variogramme expérimental

Dans la pratique, il n'est pas possible de calculer le variogramme théorique tel qu'il est décrit, car on ne dispose que des échantillons. Pour l'approcher, une expression du semi-variogramme expérimental est plus pratique.

Le semi-variogramme permet de mesurer la variabilité à différentes échelles d'une variable régionalisée $z(x)$, en calculant la différence entre deux échantillons z_1 et z_2 situés en deux points x_1 et x_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée γ_e s'écrit :

$$\gamma_e = \frac{(z_2 - z_1)}{2}$$

Pour voir si l'azimut décrit par les deux points considérés a un effet quelconque, on fait dépendre γ_e de la distance et de l'orientation de la paire de points.

$$\gamma_e = \frac{1}{2} ((z(x) - z(x+h))^2)$$

Chapitre I : Etude bibliographique

En formant la moyenne des dissemblances γ entre les valeurs pour toutes les $N(h)$ paires de points reliées par un vecteur h donné pour une maille donnée, on obtient la notion de semi-variogramme expérimental (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978 in BENCHOUK (1994)).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [(z(x) - z(x+h))^2]$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h .

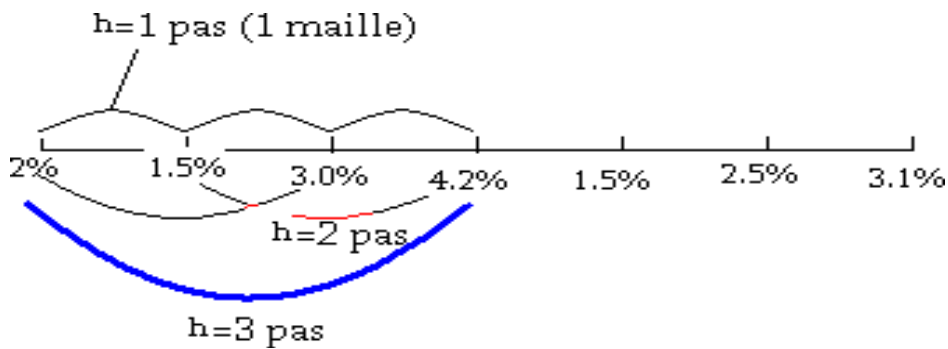


Figure. 3. Schéma de calcul du variogramme expérimental.

On peut aussi calculer le variogramme selon certaines directions spécifiques à l'aide d'une expression particulière du variogramme :

$$\gamma(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_{i=1}^{N(h, \theta)} [(z(x) - z(x+h))^2]$$

Où $N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ .

Exemple

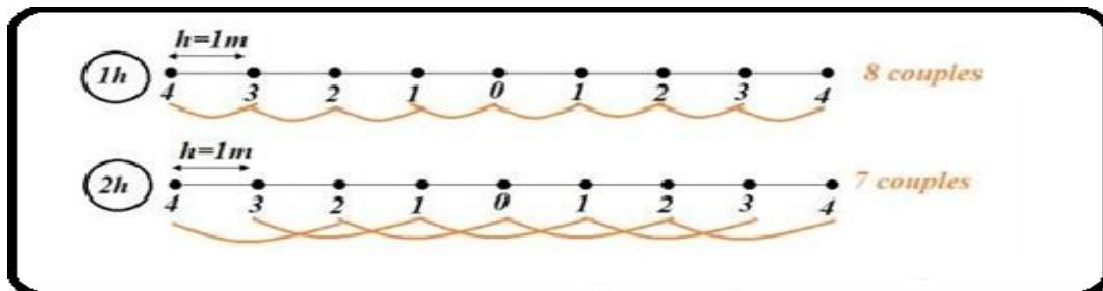


Figure 4- illustre la méthodologie de calcul du variogramme de l'exemple.

Pour $h=1m$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot 8} [(4-3)^2 + (3-2)^2 + (2-1)^2 + (1-0)^2 + (0-1)^2 + (1-2)^2 + (2-3)^2 + (3-4)^2] = 0.5 \text{ ppm}$$

Pour $h=2m$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot 7} [(4-2)^2 + (3-1)^2 + (2-0)^2 + (1-1)^2 + (0-2)^2 + (1-3)^2 + (2-4)^2] = 1.71 \text{ ppm}$$

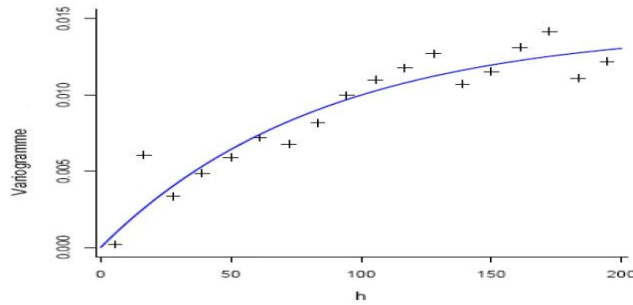


Figure 5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) de semi-variogramme à un semi-variogramme expérimental (croix).

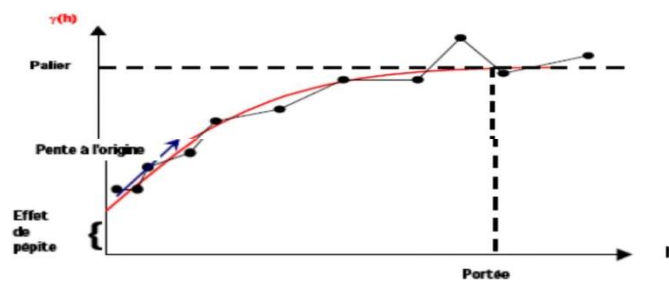


Figure 6. Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement.

II-1-3- propriétés du variogramme

En général, le variogramme peut être présenté sous forme graphique: Le graphe de $\gamma(h)$ a les caractéristiques suivantes (Figure. 07):

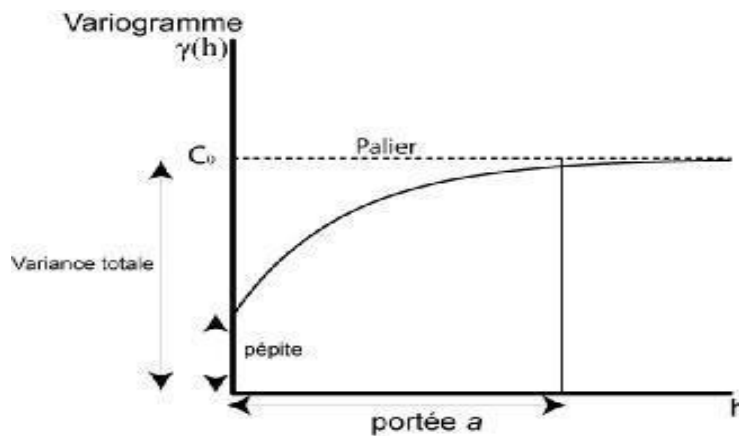


Figure 7. Les caractéristiques du graphe $\gamma(x, h)$ en fonction de h .

- 1- Il passe par l'origine (pour $h=0$; $Z(x+h)=Z(x)$).
- 2- C'est en général une fonction croissante de h .
- 3- Dans la plupart des cas, il croît jusqu'à une certaine limite appelée "**palier**", puis il s'aplatit.
- 4- La distance à laquelle le variogramme atteint le palier est appelée "**Portée**".

II-1-4- Paramètres du variogramme

Pour faire l'analyse spatiale d'une propriété, trois paramètres sont importants à considérer dans ce graphique. Ce sont la constante ou l'effet de pépité, le palier et la portée.

- **L'effet de pépité (nugget effect)** : c'est la valeur de $\gamma(h)$ quand $h=0$, correspond La variance propre de l'échantillon. Il englobe l'incertitude due à l'échantillonnage et aux erreurs de mesure. L'effet pépité doit être estimé par extrapolation des premières valeurs du semi-variogramme. Plus la classe de distance (Ah) est large, plus on aura un semi-variogramme lisse, mais aussi un effet pépité plus grand. (McBratney, et Webster, 1986).
- **Le palier (sill)** : est la valeur de semi-variogramme qui correspond à la portée. Prendre uniquement la valeur de la variance de l'échantillon conduit à une estimation biaisée du palier, $\gamma(h)$ devient constant avec l'évolution de h . (McBratney, et Webster, 1986).
- **La portée (range)** : La valeur de h pour laquelle $\gamma(h)$ atteint le palier s'appelle la portée, indique la distance à laquelle le semi-variogramme se stabilise autour d'une valeur limite, cette distance mesure la zone d'influence d'une information $z(s)$. En fait, au-delà de la distance h la variable aléatoire $Z(s+h)$ est sans corrélation avec $Z(s)$. La portée tend à augmenter avec la grandeur du jeu de donnée (McBratney, et Webster, 1986).

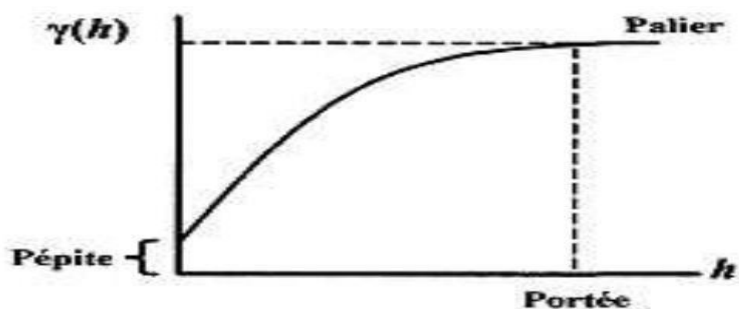


Figure 8 : Paramètre du semi-variogramme.

II-1-5-Isotropie et anisotropie

II-1-5-1-Isotropie

Le semi-variogramme ne dépend que de h , le vecteur de translation entre les points s et $s+h$. Ce vecteur contient de l'information sur la distance entre ces deux points, par l'intermédiaire de sa norme, ainsi que sur l'orientation de h . Si le semi-variogramme ne dépend en fait que de la norme de h , il est dit isotrope. S'il dépend aussi de la direction du vecteur de translation, il est alors anisotrope.

II-1-5-2-Anisotropie

Lorsque le variogramme est calculé pour tout couple de points, dans certaines directions, il révèle parfois des différences de comportement : c'est-à-dire des paliers différents et/ou des portées différentes, il y a dans ce cas une anisotropie. On en distingue deux principaux types: l'anisotropie géométrique et l'anisotropie zonale.

a)- Anisotropie géométrique (Elliptique)

Dans le cas de deux variogrammes directionnels qui ont les mêmes paliers et des portées différentes (Figure.9), on dit qu'il y a une anisotropie géométrique. Pour déterminer une éventuelle présence anisotropie géométrique, on trace l'ellipse des portées (Figure.10) (JOURNEL et HUIJBREGTS, 1978 in BENCHOUK (1994)).

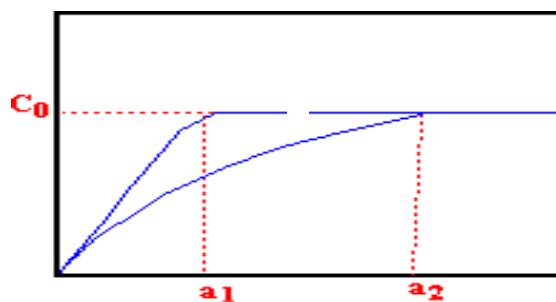


Figure 9. Anisotropie géométrique ou elliptique.

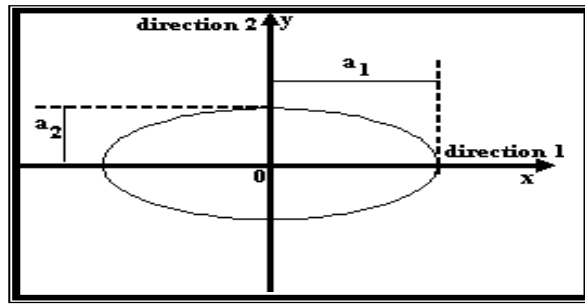


Figure 10. Ellipse des portées-Anisotropie géométrique.

b)- Anisotropie zonale (stratifiée)

On dit qu'il y a une anisotropie zonale lorsque deux variogrammes directionnels ont des paliers et des portées différentes (Figure11) (ISAAK et STRIVASTAVA, 1989 in BENCHOUK (1994)).

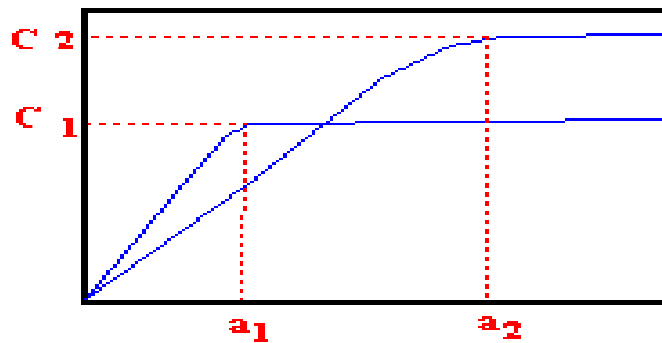


Figure 11. Anisotropie zonale.

II-1-6- Le variogramme de surface

Il existe le variogramme à 2D dit de surface (Pannatier 1996). Ce dernier permet de visualiser le comportement anisotropique ou non de la variable régionalisée étudiée. La représentation de la surface nécessite la segmentation de l'espace dans chacune des composantes h_x et h_y en un nombre d'intervalles donnés. Le résultat est la variation de $\gamma(h)$ dans un diagramme bivarié où la valeur de $\gamma(h)$ est donnée par la couleur. Le nombre de couple est inscrit à l'intérieur du panneau (Figure. 12). La surface résultante est symétrique.

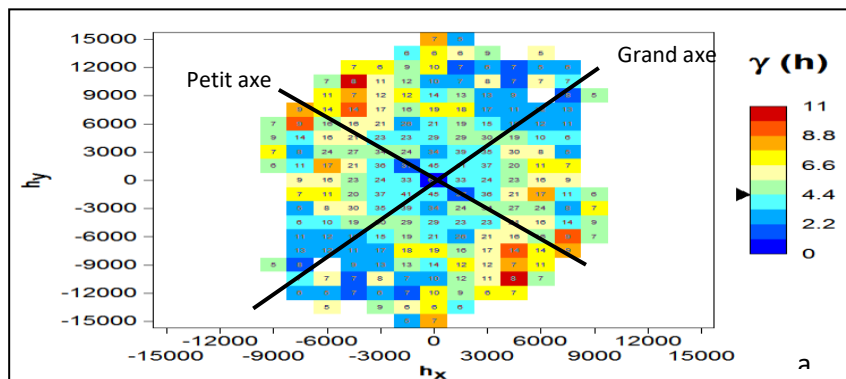


Figure 12 .Graphe d'un variogramme de surface - cas d'anisotropie.

II 1-7- Modèles théoriques et ajustement des variogrammes

Une fois le variogramme expérimental calculé, il faut alors déterminer un modèle mathématique qui lui correspond tout en étant opérationnel et simple à l'emploi.

C'est l'ajustement du variogramme expérimentale. Les modèles théoriques d'usage courant sont classés en modèles avec ou sans palier (Journel et Huijbregts, 1978).

II-1-7-1 Les Modèles à palier

Il existe ceux avec comportement linéaires à l'origine et ceux avec comportement paraboliques à l'origine

➤ Comportement linéaires à l'origine:

a)- Modèle Sphérique

$$\gamma(h) = \left\{ C_0 + C \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h^3}{a^3} \right) \right], \text{ si } h \leq a \right.$$

$$\left. \gamma(h) = C_0 + C, \text{ si } h > a \right.$$

Sa forme correspond bien à une croissance presque linéaire jusqu'à une certaine distance, puis une stabilisation. La tangente à l'origine rencontre la droite du palier à un point d'abscisse $h=2a/3$ (figure 13). Il est le modèle le plus fréquent qui est utilisé pour les teneurs, épaisseur ...etc.

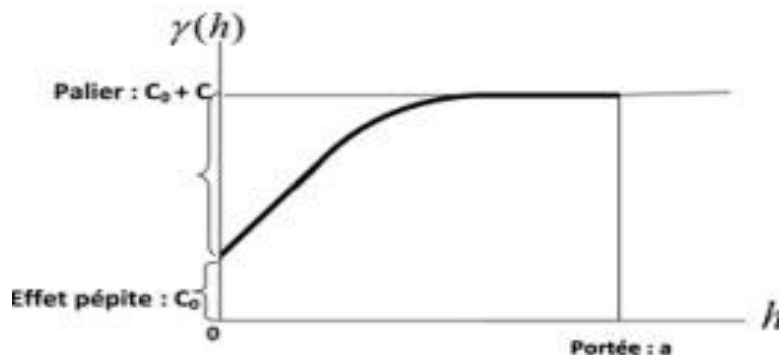


Figure 13. Schéma d'un modèle sphérique.

b. Modèle Exponentiel

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-\frac{h}{a}} \right], \text{ si } h \geq 0$$

La tangente à l'origine rencontre la droite du palier à l'abscisse a (Figure 14).

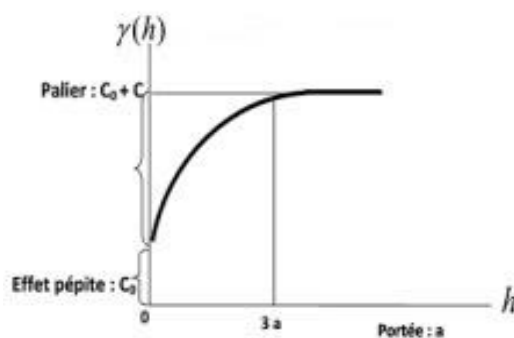


Figure 14. Schéma d'un modèle exponentiel.

➤ Comportements paraboliques à l'origine :

c)- Modèle Gaussien

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}} \right], \text{ si } h \geq 0$$

Le modèle gaussien représente un phénomène extrêmement continu.

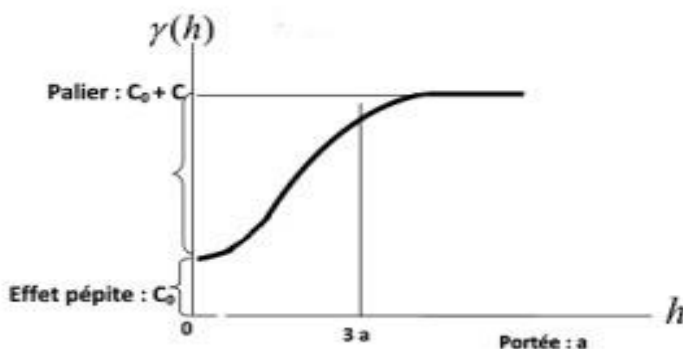


Figure 15. Schéma d'un modèle Gaussien.

II-1-7-2 Les modèles sans palier

a. Modèle en puissance

$$\gamma(h) = h^\lambda \text{ avec } 0 < \lambda < 2$$

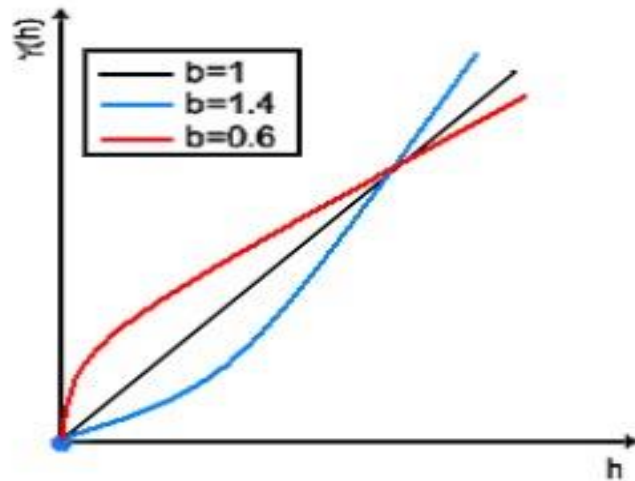


Figure 16. Schéma d'un modèle en puissance.

b)- Modèle logarithmique

$$\gamma(h) = a \cdot \log(h) \dots \forall h > 0, \dots a = \text{constant} > 0$$

c)- Modèle à effet de trou

$$\gamma(h) = 1 - \frac{\sin(h)}{h} \dots \forall h > 0, \gamma(h) = \frac{h^2}{6} \dots h \rightarrow \infty$$

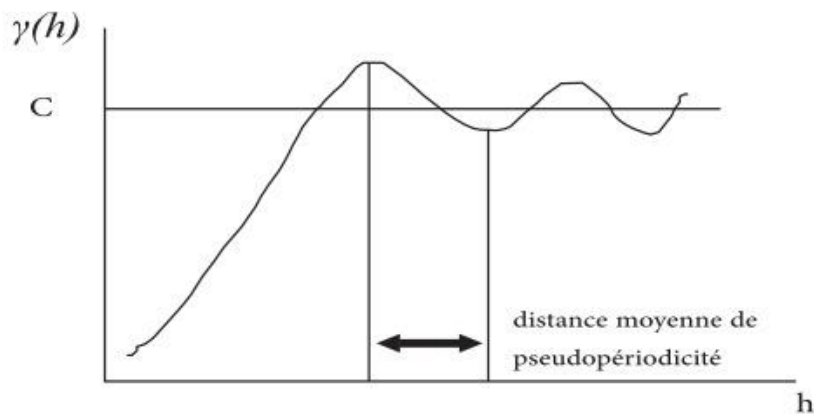


Figure 17: Schéma Modèle à effet de trou.

III-Méthodes géostatistiques

La géostatistique se réfère aux méthodes d'analyse probabiliste pour étudier des phénomènes corrélés dans l'espace appelés phénomène régionalisé à ce titre elle fournit des différents outils pour répondre aux problèmes posés.

Le krigeage est une méthode stochastique d'interpolation spatiale qui prévoit la valeur d'un phénomène naturel en des sites non échantillonnés par une combinaison linéaire sans biais et à variance minimale des observations du phénomène en des sites voisins. (Baillargeon, 2005) La méthode du Krigeage dérive son nom de l'ingénieur de mines qui dans les années 50 a Commencé à appliquer ce type d'interpolation aux recherches minière.

La méthode a connu successivement une grande diffusion et plusieurs variantes ont été définies dans les dernières années. Krige a développé une série de méthodes statistiques empirique afin de déterminer la distribution spatiale de minerais à partir d'un ensemble de forage. (Azzouzi, 1993).

En 1963 Matheron a formalisé l'approche en utilisant les corrélations entre les forages pour estimer la répartition spatiale, Le krigeage est une méthode d'estimation d'un phénomène Connu en un certain nombre de points (Delhomme, 1976).

III-1- géostatistique linéaire (paramétrique)

Il existe trois types d'estimateur de krigeage tel que le krigeage ordinaire, le Krigeage simple et le krigeage universel (Journel et Huijbregts, 1978).

III-1-1-Le Krigeage ordinaire

Dans le cas où la F.A est stationnaire $E\{z(x)} = m$: moyenne inconnue.

Le formalisme de Lagrange permet de minimiser la variance d'estimation et le système de krigeage ordinaire sera :

$$\left(\begin{array}{c} \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(V_i, V_j) + \mu = \bar{\gamma}(V_j, V) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{array} \right) \forall i = 1 \text{ à } N \dots \text{et } \dots j = 1 \text{ à } N$$

μ : Paramètre de Lagrange

λ : Pondérateurs

On calcule les pondérateurs λ_i de ZV et alors :

$$Z_V = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z_i$$

Le non-biais est vérifié par la condition : $\sum_{i=1}^N \lambda_i = 1$

La variance de krigeage ordinaire est de la forme suivante:

$$\sigma_k^2 = \sum_{i=1}^N \lambda_i \bar{\gamma}(v_i, V) + \mu \bar{\gamma}(V, V)$$

Le système de krigeage ordinaire est un système à N+1 équations à N+1 inconnues qui sont les N pondérateurs λ_i et le paramètre de Lagrange μ .

Le krigeage ordinaire (paramétrique) est donc :

- ❖ Un système de krigeage paramétrique est un système à N+1 équations à N+1 inconnues qui sont les N pondérateurs λ_i , et le paramètres de Lagrange μ .
- ❖ Le krigeage est un estimateur linéaire **sans biais** et un **interpolateur exact** (Webster and Oliver, 2007).

III-1-2- Le Krigeage simple

Les valeurs de la variable $Z(x)$ connues en n points expérimentaux: $x_1, x_2, x_2, x_3, \dots, x_n$ et l'on désire estimer une quantité Z_0 qui peut être, en fait, toute fonctionnelle linéaire de la variable. Pour estimer Z_0 , on adopte une moyenne pondérée des n données disponibles: (Matheron, 1970).

$$Z_0^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i (x_i)$$

Où **n**: points expérimentaux

λ_i : Le poids du point x_i .

Le problème est donc de trouver les poids λ_i qui donneront la meilleure estimation possible.

III-1-3- Le Krigeage universel

C'est la forme la plus large où on ne peut supposer que la moyenne est constante, on dit alors qu'il existe une dérive. La difficulté principale résulte de l'étude du variogramme.

Rappelons que le variogramme expérimental dit aussi *brut* s'écrit :

$$\gamma_{brut}(h) = \gamma_{reel}(h) + \frac{1}{2} [E(z(x+h)) + z(x)]^2$$

$\gamma_{brut}(h)$: variogramme brut est le seul terme accessible directement grâce aux points expérimentaux.

$\gamma_{reel}(h)$: le variogramme réel est donc tel que :

$$y_{\text{reel}}(\mathbf{h}) = y_{\text{brut}}(\mathbf{n}) - \frac{1}{2} [\mathbf{E}(z(\mathbf{x} + \mathbf{h})) + z(\mathbf{x})]^2$$

Dans le cadre du Krigeage universel, il faut bien garder à l'esprit que le variogramme brut n'est qu'une image déformée du variogramme réel (ou *sous-jacent*).

Cette déformation est due à la dérive. Il faut donc simultanément étudier la dérive que l'on suppose généralement être une fonction simple variant relativement lentement (Matheron, 1970).

III-2- Géostatistique non-linéaire (non paramétrique)

Il existe deux types de d'estimateur de krigeage tel que le krigeage d'indicatrices et le krigeage disjonctif.

III-2-1-Le krigeage d'indicatrices

Le krigeage d'indicatrices permet de traiter des variables nominales ou qualitatives. C'est une approche non paramétrique reposant sur une transformation préalable de la variable étudiée en indicatrices prenant la valeur 0 et 1 selon des seuils choisis de la variable (Walter, 1993 ; Douaoui, 2005). L'analyse spatiale par ce type de krigeage se fait non pas sur la variable elle-même mais sur la transformée de cette variable par codage binaire dite fonction indicatrice.

La procédure de mise en œuvre du krigeage d'indicatrices se fait suivant les quatre étapes suivantes :

a- Le codage des valeurs mesurées par rapport à une valeur seuil choisie. On obtient ainsi des variables qui sont codées soit en 0 soit en 1.

Les valeurs seuils dépendent, en général, de la distribution statistique de la variable, mais dans certains cas, les limites de nuisance ou de toxicité (normes de potabilité d'une eau d'irrigation par exemple) Seront déterminantes pour le choix de ces seuils.

b- Le calcul du variogramme des fonctions indicatrices au seuil donné détermine la Structure spatiale.

$$\gamma^*(\mathbf{h}, \mathbf{c}) = \frac{1}{2N}(\mathbf{h}) \sum_{i=1}^{N(\mathbf{h})} [I(\mathbf{x}_i, \mathbf{c}) - I(\mathbf{x}_i + \mathbf{h} \pm \Delta\mathbf{h}, \mathbf{c})]^2$$

Ou : $\mathbf{N}(\mathbf{h})$ est le nombre de couples d'observations distants de $\mathbf{h} \pm \Delta\mathbf{h}$

c- Après ajustement du variogramme des fonctions indicatrices à un modèle théorique,

On effectue le krigeage linéaire en un point (\mathbf{x}_0), des $I(\mathbf{x}_i, \mathbf{c})$ par l'équation :

$$\mathbf{I}^*(\mathbf{x}_0, \mathbf{c}) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \mathbf{I}(\mathbf{x}_i, \mathbf{c})$$

n : le nombre de points expérimentaux pris en compte dans l'estimation

λ_i : le poids affecté aux points expérimentaux

Cette dernière formule appliquée donne des valeurs comprises entre 0 et 1 qui est une estimation en un point donné de la probabilité que la valeur Z_i soit inférieure ou égale à la valeur seuil « Z_c » choisie. En combinant ces estimations, on peut obtenir en tout point la probabilité que la variable soit égale à une valeur seuil déterminée.

d- La dernière étape consiste à estimer la valeur $Z(x_0)$ de la propriété Z en un point

Quelconque x_0 connaissant sa fonction de densité. Cela peut se faire par le calcul de l'espérance mathématique de la valeur de la propriété en suivant la procédure suivante :

(i) La différence entre les estimations des fonctions indicatrices pour deux valeurs

Seuil consécutives permet de calculer la probabilité correspondant en tout point.

CES points étant la réalisation d'une variable aléatoire discrète notée \mathbf{X} , comme les seuils ont été calculés aux valeurs supérieures, le calcul se fait alors :

Probabilité ($\mathbf{X}=\mathbf{c}$) = Probabilité ($\mathbf{X} \geq Z_c$) – Probabilité ($\mathbf{X} \geq Z_{c+1}$).

Avec : z_c et z_{c+1} sont les valeurs seuil consécutives

- En combinant les valeurs seuils correspondant aux différentes classes, on obtient une version discrétisée de la fonction de répartition qui représente l'espérance mathématique du rang du seuil de la variable au point échantillonné. L'espérance mathématique est calculée comme suit :

$$E(Z) = Z_c + 2Z_{c+1} + 3Z_{c+2} + 4Z_{c+3} + 5Z_{c+4}$$

III-2-2- le krigeage disjonctif

L'estimation d'un point à estimer se fait par une fonction plus générale qu'une simple combinaison linéaire des valeurs aux points observés. Cette technique permet de tracer des cartes de probabilité qu'une variable dépasse un seuil donné. Elle est donc souvent utilisée dans des problèmes de pollution.

III-3-Géostatistique multi variable

III-3-1-Le Co-krigeage

Cette méthode prend en considération la structure de dépendance spatiale des données auxiliaires. La prévision $\hat{Z}(s_0)$ de $Z(s_0)$ qui doit être aussi une combinaison linéaire de $Z(s_0)$ est de la forme :

$$\hat{Z}(s_0) = a + \sum_{i \in V(s_0)} \lambda_{i,0} Z(s_i) + \sum_{j=1}^q \sum_{i \in V(s_0)} \lambda_{i,j} \omega_j(s_{i,j})$$

La modélisation de la fonction d'intérêt $Z(\cdot)$ de cette technique est :

$$Z(s) = \mu_0(s) + \delta_0(s)$$

$$W_j(s) = \mu_j(s) + \delta_j(s) \text{ pour } j \in \{1, \dots, q\}, \forall s \in D$$

Où $\mu_j(\cdot)$: des structures déterminées des espérances

$\delta_j(\cdot)$: des fonctions aléatoires d'espérance nulle et de stationnarité conjointe de structure de dépendance connue.

Cette méthode prend en considération la structure de dépendance spatiale des données auxiliaires pour trouver les $\lambda_{i,j}$.

Il exploite la corrélation pouvant exister entre deux variables. Il est utilisé quand on dispose de deux variables corrélées entre elles, l'une étant difficile à acquérir (par exemple, mesure physique de laboratoire), l'autre étant facile d'accès (par exemple, observation de terrain). Le Co-krigeage Permet de cartographier une variable peu échantillonnée en utilisant les observations plus nombreuses d'une variable facile d'accès.

III-4-Propriétés du Krigeage

- Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais.
- Le krigeage est un interpolateur exact, i.e. chaque point connu estimé à une valeur connue.
- Le krigeage tient en compte la taille du champ à estimer et la position des Points entre eux.
- Le krigeage présente un effet d'écran.
- Le krigeage est un estimateur presque sans-biais conditionnel. Ce qui implique que l'estimateur utilisé (le krigeage) est plus lisse que la valeur à estimer.
- En général, le krigeage effectue un lissage ; ce qui nous donne Des estimations moins variables que les points qu'on cherche à estimer.
- Le krigeage est transitif.
- Le krigeage tient en compte la continuité du phénomène étudié en cas d'utilisation du variogramme tels que l'effet de pépite ou anisotropie.

Chapitre II

**Apport de la géostatistique dans le domaine de
l'environnement**

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

I-Exemples des travaux géostatistique réalisés dans le domaine de l'environnement en Algérie.

Plusieurs travaux géostatistiques ont été élaborés dans le domaine de l'environnement. Dans la présente étude nous avons cité quelque un.

I-1-Exemple(1) : Etude géostatistique de la pollution par les nitrates dans la Mitidja (Belkebir, 2010).

I-1-1-Démarche d'étude

La Mitidja Est rencontre des problèmes de non-conformité vis-à-vis des nitrates. 49.83% des échantillons dépassent la norme de 50 mg/l. Le centre le plus touché est celui de Rouiba, où des dépassements sont observés depuis les années 2000 sur les champs captant de Bouréah, Réghaïa et Rouiba. La présente étude fait appel à la géostatistique (krigeage) pour tracer la carte de la répartition spatiale des nitrates dans la nappe alluviale de la Mitidja Est. L'étude géostatistique a été faite sur l'ensemble des 37 échantillons avec des prélèvements denses sur la zone Ouest et l'Est de la Mitidja. (Figure 18).

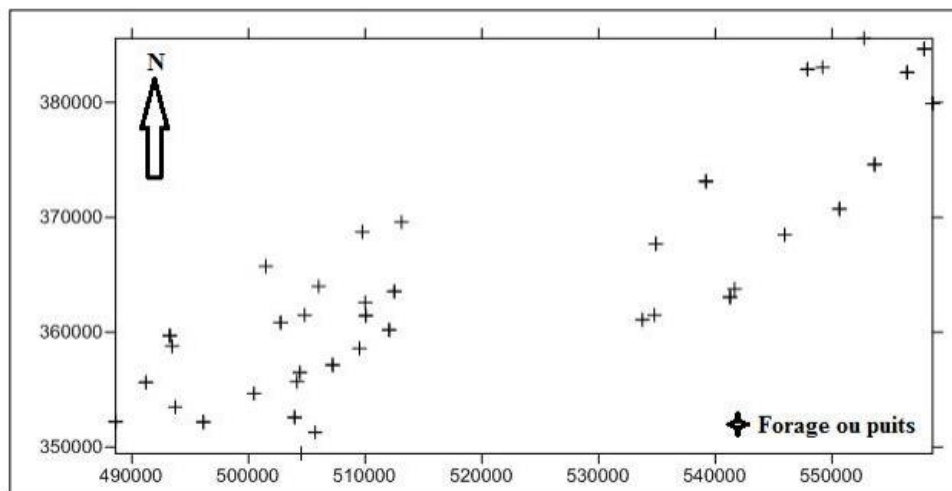


Figure18:Carte de localisation des points dans plaine de Mitidja(Mai2010).

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

I-1-2-Résultats

I-1-2-1-variographie

La construction du variogramme est basée sur le logiciel SURFER 11, il est nécessaire de l'ajuster par une fonction mathématique. Cette fonction fournit les valeurs du variogramme dans la direction 0° (figure 18).

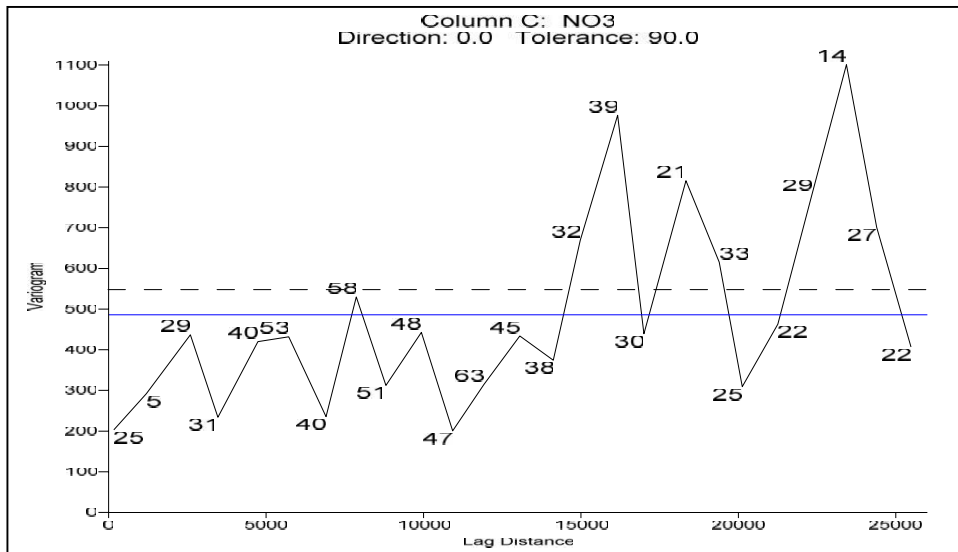


Figure19: Variogramme d'iso-teneurs en nitrates de la Mitidja Est (Mai 2010).

I-1-2-2- krigeage

La technique d'interpolation effectuée est le Krigeage basé sur l'analyse variographique en tenant compte du type du variogramme expérimental obtenu, la portée et la variance.

La répartition spatiale des nitrates dans la nappe alluviale de la Mitidja Est pour l'année 2010 est représentée dans la figure 20.

Les teneurs en nitrates varient entre 5mg/l et 100mg/l. 50% des échantillons analysés ont des teneurs supérieures à 50mg/l durant cette période.

La carte des teneurs en NO_3 (Figure 20), montre que les teneurs sont réparties selon trois zones:

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

- La première avec de faibles teneurs inférieurs à 30mg/l, se situe dans toute la partie Ouest de la plaine, et englobe Bordj El Kiffan, el Harrach.
- La deuxième avec des teneurs entre 30 et 50 mg/l, au centre de la plaine.
- La troisième zone englobe Rouiba et Réghaïa au Nord-est et Meftah et, Khemis el Khechna au Sud-est, où les teneurs dépassent 50 mg/l.

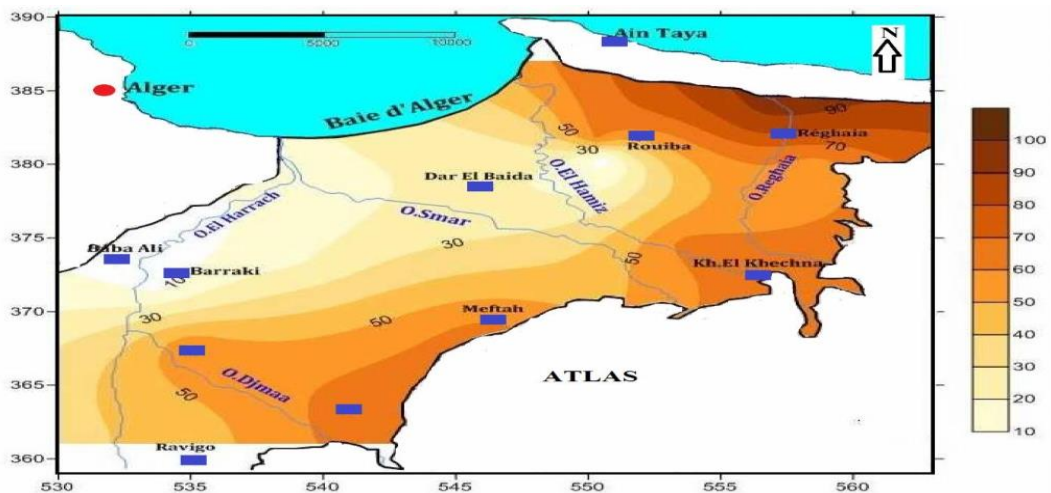


Figure20: Carte d'iso-teneurs en nitrates contenus dans les eaux souterraines de la plaine alluviale de la Mitidja Est (Mai 2010).

Les résultats obtenus par Belkebir montre que : Les eaux souterraines de la nappe alluviale de la Mitidja Est, présentent dans certaines régions des teneurs importantes en nitrate (NO_3) dépassant par endroit les 200 mg/l, ce qui est assez relativement élevé à la norme qui est de 50 mg/l.

Dans cette plaine, les causes principales de la pollution par les nitrates dans les zones vulnérables sont les suivantes:

- Les pratiques des cultures maraîchères et céréalières qui nécessitent des doses importantes d'engrais azotés.
- Les réseaux d'assainissement qui se déversent directement dans les oueds (exemple Oued Réghaïa et Oued Hamiz), ainsi que les rejets des petites agglomérations dépourvues de réseau d'assainissement.

I-2- Exemple(2) : Application de krigeage d'indicateurs dans la cartographie de la salinité des eaux souterraines du moyen –Chélif (Douaoui, Bradai) 2007.

Dans ce travail le but était de cartographier la salinité des eaux souterraines de la plaine du Moyen-Chélif dont on a recourt souvent à ces eaux pour assurer aussi bien l'irrigation que la consommation domestique et pour son intérêt en tant qu'indicateur de la qualité des eaux souterraines par l'information qu'elle apporte sur leurs minéralisations globales (Rodier,1996).

I-2-1-Démarche d'étude

Deux méthodes géostatistiques utilisées est le krigeage d'indicateurs qui est une méthode géostatistique non paramétrique et qui a été appliqué pour optimiser l'estimation spatiale de la salinité de ces eaux et contribuer ainsi à une meilleure connaissance de sa qualité et le krigeage ordinaire pour cartographier la variabilité spatiale.

Les échantillons analysés sont prélevés des puits domestiques et forages dont la profondeur moyenne est de 50 m. Ils sont localisés dans les trois nappes superficielles du Moyen-Chélif. Ils correspondent à la moyenne annuelle de l'année 2002 et sont au nombre de 72 échantillons (figure21). La salinité a été estimée par la conductivité électrique (CE dS/m) à 25°C.

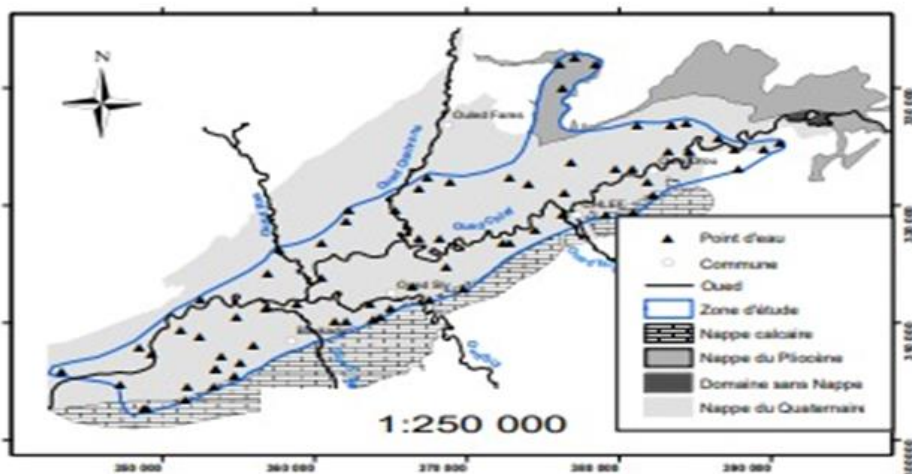


Figure21 : Localisation des points d'eau.

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

I-2-2- Résultats

Les résultats montrent que sur l'ensemble des 72 échantillons, la moyenne de la (C.E) (conductivité électrique) calculée est égale à 3,22 dS/m. Cette valeur dépasse largement la limite de 1 dS/m au-delà de laquelle la minéralisation devient élevée, et la limite tolérable d'une eau destinée à la consommation est atteinte (Rodier, 1996). C'est également le cas d'une eau destinée à l'irrigation où la limite de 2,25 dS/m à partir de laquelle la salinité devient importante et peut nuire à la plante et au sol (USSL Staff, 1954).

Le nombre des échantillons dont la (C.E) dépasse 2,25 dS/m est égal à 52 échantillons ; soit 69,4 % de l'ensemble des 72 échantillons. La classe inférieure à 1 dS/m renferme 5 échantillons seulement contre 11 échantillons de salinité supérieure à 5 dS/m.

I-2-2-1-Variographie

Les valeurs de la conductivité électrique ont été calculées et ajustées à l'aide d'un modèle exponentiel avec un effet de pépité de 2,66 dS/m, un palier de 3,80 dS/m² et une portée de 21300 m (figure 22). La valeur élevée de l'effet de pépité, qui représente près des deux tiers de la variance totale calculée, exprime une variabilité locale importante de la (C.E) qui aura sa part d'influence sur la qualité d'estimation. Le palier, quant à lui par sa valeur élevée, exprime également une hétérogénéité spatiale élevée.

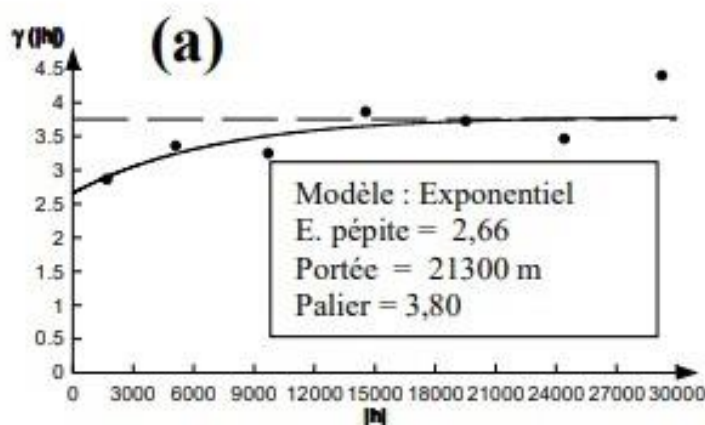


Figure 22 : Ajustées à un variogramme expérimental à modèle exponentiel.

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

A-variographie des indicatrices

Quatre valeurs seuils ont été choisies : CE = 1, 2,25, 3 et 5 dS/m. Les deux premières valeurs correspondent aux limites tolérées respectivement pour l'eau potable et l'eau d'irrigation (Rodier, 1996). Les deux dernières valeurs traduisent une restriction forte à dangereuse en cas d'irrigation (Rodier, 1996 ; Ayers et Westcot, 1988). A partir de ces quatre seuils, cinq classes de CE (< 1, 1-2,25, 2,25-3, 3-5 et > 5 dS/m) ont été retenues.

Les variogrammes des fonctions indicatrices obtenues pour les quatre seuils choisis sont reportées dans le (tableau 1).

Tableau 1. Paramètres d'ajustement des variogrammes expérimentaux des fonctions indicatrices de la CE.

Seuils	Modele	Effet de pépite	Palier	Portée
CE>1 dS/m	Sphérique	0,0434	0,0726	15000
CE>2,25 dS/m	Exponentiel	0,114	0,228	10800
CE>3 dS/m	Sphérique	0,135	0,270	4400
CE>5 dS/m	Sphérique	0,0660	0,138	9000

Le variogramme moyen expérimental calculé sur la valeur de l'espérance mathématique de la CE des fonctions indicatrices s'ajuste à un modèle sphérique avec un effet de pépite égale à 0,168, un palier de 0,648 et une portée de 10639 m (figure24). Il montre une meilleure continuité que le variogramme moyen de la (C.E) (krigeage ordinaire) et un effet de pépite nettement plus faible que le palier.

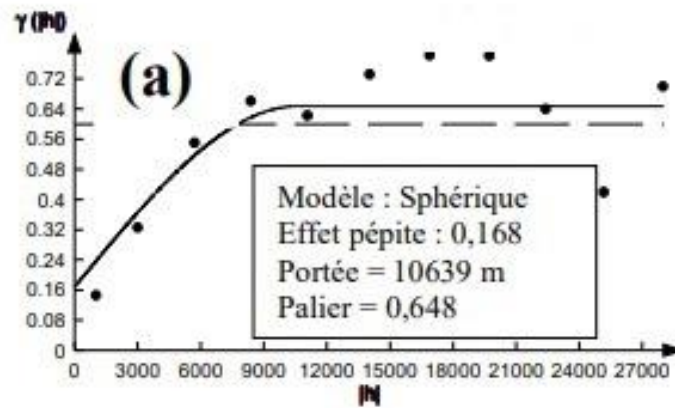


Figure 23 : Ajustées à un variogramme expérimental à modèle sphérique.

I-2-2-2-krigeage

A-Krigeage ordinaire

La carte estimée par krigage ordinaire (figure24) montre une salinité élevée supérieure à 3 dS/m au centre et au nord-ouest de la zone.

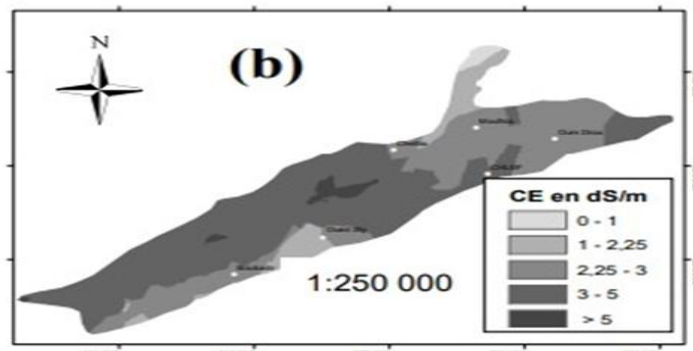


Figure 24 : La carte estimée par krigage ordinaire.

B- krigage d'indicateurs

La carte de la (C.E) obtenue par krigage d'indicateurs (figure25) montre la même répartition spatiale globale de la salinité que celle obtenue par krigage ordinaire, avec toutefois des différences dans le contour et la taille des superficies.

La cartographie de la (C.E) des eaux souterraines de la plaine du Moyen-Chéouli a montré l'état avancé de la vulnérabilité de ces eaux à la salinité. En effet et selon l'estimation faite par le krigage d'indicateurs, moins de 3 % seulement de la superficie totale de la zone renferment des eaux souterraines d'une salinité inférieure à 1 dS/m, alors que 60 % de cette

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

superficie est supérieure à 3 dS/m.

Enfin, l'emploi du krigeage d'indicateur a permis d'améliorer la cartographie de la salinité des eaux souterraines du Moyen-Chélif par une meilleure évaluation des superficies en optimisant les estimations des valeurs extrêmes (problème des sous-estimations), et une meilleure qualité de précision en diminuant l'incertitude (intervalle de confiance).

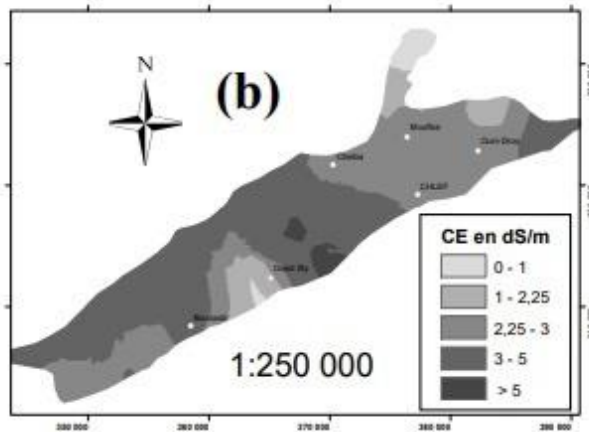


Figure 25 : La carte de la CE obtenue par krigeage d'indicateur.

L'estimation spatiale des fonctions indicatrices aux quatre seuils de la salinité choisis montre la probabilité de dépassement de chaque limite.

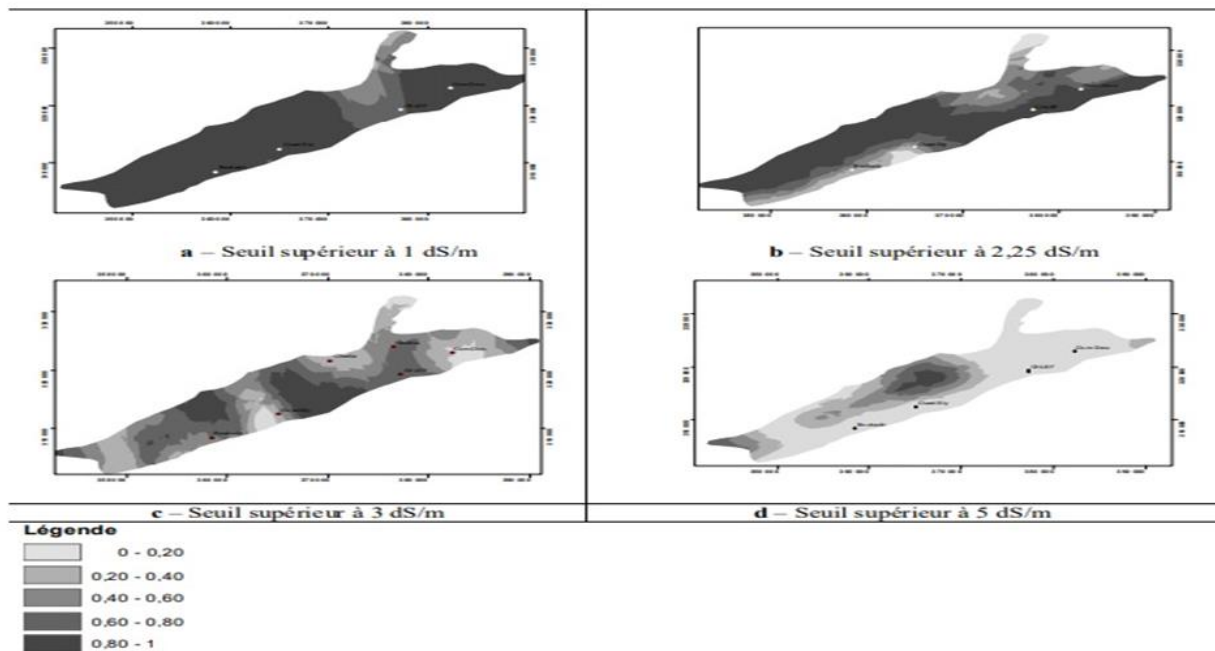


Figure 26 : Estimation par krigeage d'indicateurs aux différents seuils de CE.

I-3-Exmple(3) : Application des techniques de krigeage pour la cartographie de la salinité des sols le cas du périmètre Biskra ; Algérie (Abdenour, Douaoui, Bradai, Bennacer, Pulido) 2013.

La salinisation des sols est l'une des formes de dégradation des terres qui entrave la croissance de la végétation en influant sur la qualité des sols, ce qui affecte la durabilité de l'agriculture et réduit la disponibilité en eau pour la plante et par conséquent la production agricole. Cette dégradation pourrait aller jusqu'à rendre les terres stériles si les sels facilement dissous s'accumulent en quantité excessives dans les horizons de surface des sols des régions arides et semi-arides (Fan et al., 2011; Bui, 2013; Aragüés et al., 2015; Cassel et al., 2015; Gorji et al., 2015). Cartographier la probabilité de dépassement des seuils critiques de la salinité du sol.

I-3-1-Démarche d'étude

Le choix d'une méthode d'interpolation est très important pour une analyse spatiale de la qualité du sol. L'objectif principal de cette étude réalisé par (Abdenour et al.2019) est de prédire la salinité du sol dans le périmètre irrigué d'El Ghrous. Pour cela, deux types de krigeage ont été appliqués: le krigeage ordinaire pour cartographier la variabilité spatiale et le krigeage d'indicateurs pour cartographier la probabilité de dépassement des seuils critiques de la salinité du sol.

Cette étude a été menée dans la région d'El Ghrous .Le périmètre irrigué a une superficie de 9324 ha et une altitude allant de 130 m à 200 m. La salinisation des sols dans cette zone s'est accélérée ces dernières années en raison de l'utilisation accrue des eaux souterraines pour répondre aux besoins en eau d'irrigation (Abdenour et al, 2019).

L'échantillonnage a été effectué dans la période d'octobre à novembre 2017 avec 190 points pour mesurer la conductivité électrique du sol. La position exacte des points des sols en latitude et en longitude a été déterminée par le système de positionnement global (GPS). Nous avons adopté un échantillonnage semi-aléatoire dans la zone d'étude.

Les échantillons de sol ont été prélevés à une profondeur de 0 à 15 cm, là où l'accumulation de sel est la plus importante. Chaque échantillon a été séché à l'air, broyé, tamisé avec un tamis de 2 mm et conservé dans un sac en plastique jusqu'à l'analyse. Ensuite, nous avons mesuré la (C.E) du sol au laboratoire en utilisant la méthode de l'extrait dilué au 1/5 (USSLS, 1954).

I-3-2-Résultats

I-3-2-1-variographie

Dans cette étape de travail, différents modèles ont été testés et évalués. L'ajustement du variogramme expérimental omnidirectionnel de la (C.E) des sols (Figure 27) indique que le modèle exponentiel était le plus adapté à la (C.E) des sols. L'effet de pépite (C_0) est de $0,023(\text{dS m}^{-1})^2$, le palier ($C_0 + C$) est de $0,298 (\text{dS m}^{-1})^2$, et la portée est égale à 560 m.

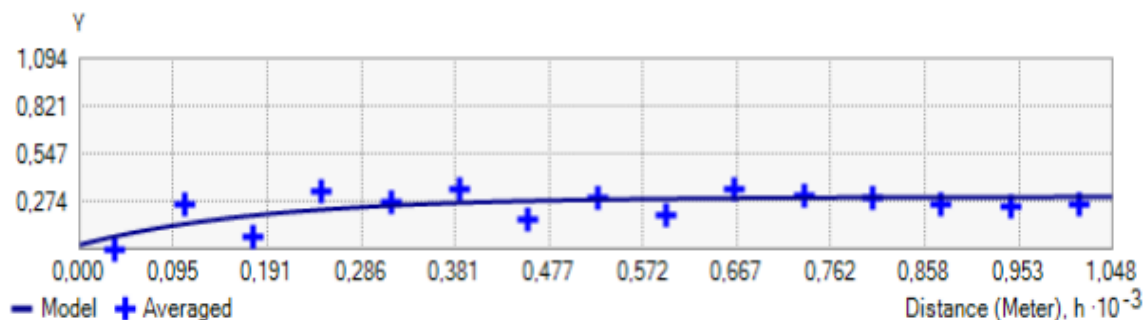


Figure27: Le variogramme omnidirectionnel expérimental de la conductivité électrique des sols.

A-variographie des indicatrices

Pour les $CE > 0,6$ et $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$, le modèle sphérique a été ajusté comme étant le modèle le plus approprié pour ces deux seuils par rapport aux autres types d'ajustement, tandis que pour les $CE > 1$ et $CE > 2 \text{ dS m}^{-1}$, le modèle exponentiel s'est mieux ajusté.

Les rapports ($C_0 / C_0 + C$) sont illustrés dans le (tableau 2) ci-dessous : le modèle sphérique pour les deux seuils de 0,6 et 4,0 a une forte dépendance spatiale avec respectivement 21,72% et 23,1%. Les autres modèles exponentiels correspondant aux seuils de 1 dS m^{-1} et 2 dS m^{-1} ont une dépendance spatiale moyenne avec respectivement 40.6 % et 42.22 %

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

Tableau2. Caractéristique des semi-variogramme pour les seuils KI.

Seuils (%)	Model	portée(m)	palier	Effet pépite	Ratio
0.6	Sphérique	415.93	0.0313	0.0068	21.72
1	Exponentiel	782.46	0.138	0.056	40.57
2	Exponentiel	1000	0.225	0.095	42.22
4	Sphérique	550	0.039	0.009	23.07

Selon l'étude menée par (Bradai et al, 2016), nous avons choisi la probabilité de 50 % comme degré de signification du débordement : plus de 99 % de la zone étudiée a dépassé le seuil de 0,6 dS m⁻¹, 84 % de la zone avait la plus forte probabilité (0,75-1,0) de dépasser 1 dS m⁻¹ (la valeur seuil minimale pour la salinité) et plus de 10 % de la zone avait une forte probabilité (0,5-0,75) pour la même valeur de seuil. Près d'un quart de la zone de ce périmètre dépasse la valeur seuil de CE > 2 dS m⁻¹, principalement située dans la partie nord de la zone d'étude. En revanche, un faible pourcentage de la zone (3%) dépassant le seuil correspondant à la valeur (C.E) de 4 dS m⁻¹ ; elle est située autour des endroits où des valeurs extrêmement élevées ont été mesurées. Le (tableau 3) indique les zones de chaque intervalle de probabilité de chaque seuil.

Tableau3. Plages de probabilité des zones dépassant les seuils obtenus par KI.

Probabilité	CE > 0.6 dS m⁻¹		CE > 1 dS m⁻¹		CE > 2 dS m⁻¹		CE > 4 dS m⁻¹	
	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)	(ha)	(%)
0.00-0.25	1.17	0.01	51.69	0.55	4070.69	43.65	8616.04	92.40
0.25-0.50	39.75	0.42	453.90	4.86	2939.05	31.51	447.64	4.80
0.50-0.75	279.23	2.99	980.85	10.51	1910.41	20.48	242.62	2.60
0.75-1.00	9004.55	96.56	7838.51	84.05	404.56	04.33	18.40	0.19

I-3-2-2- krigeage

A-Krigeage ordinaire

La carte obtenue par le krigeage ordinaire montre que la conductivité électrique entre 1 et 2 dS m⁻¹ (classe 3) est dominante ; elle occupe pratiquement plus de la moitié du périmètre (53%) qui représente 5 025 ha, surtout dans le centre et le sud de la zone d'étude. Par contre, le nord-ouest de la zone a une (C.E) supérieure à 2 dS m⁻¹ et inférieure à 4 dS m⁻¹ qui représente la classe 4 cette dernière est également présente au centre et au sud de la zone. Les sols non salés (CE <0,6 dS m⁻¹) représentent un très faible pourcentage (1,5%) situés dans le nord-est (figure 28). C'est le cas aussi pour les sols extrêmement salins dont la CE > 4 dS m⁻¹ ne représente que 1,3% (tableau 4). Cette classe, située au sud-ouest et un peu au sud, apparaît sous forme de taches dispersées. La distribution spatiale de la salinité du sol est illustrée dans la (figure 28).

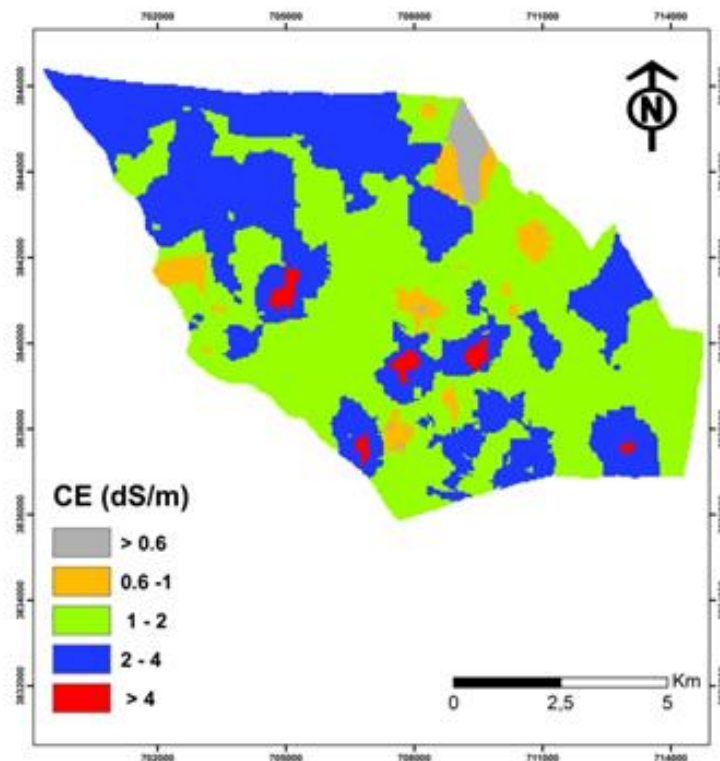


Figure 28: Prédiction de la carte de salinité en appliquant KO.

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

Tableau4. La superficie et le pourcentage de chaque classe obtenus par Krigeage Ordinaire .Classes Superficiels (ha).

Classes	Superficiels (ha)	Pourcentage %
C 1	139,2275	1.49
C 2	383,0224	4.10
C 3	5025,504 5	3.89
C 4	3659,274 3	9.24
C 5	117,6873	1.26
Somme	9324,7152	100.00

B-Krigeage d'indicatrice

Les quatre seuils de salinité qui ont été sélectionnés sont les limites supérieures de la classification de (Durand, 1983) pour les mesures de la (C.E) à l'extrait aqueux 1/5. Les seuls retenus, 0,6, 1, 2 et 4 dS m⁻¹, ont été appliqués pour établir des cartes de probabilité de salinité pour les sols d'El Ghrous. Les valeurs des mesures de la (C.E) sont converties en variables indicatrices discrètes avec une valeur de "1" ou "0", l'indice "1" indique une valeur supérieure au seuil choisi et inversement pour l'indice "0" (Arslan 2012).

Les cartes de probabilité pour les quatre seuils sont présentées dans les figures 29, 30, 31 et 32 ci-dessous.

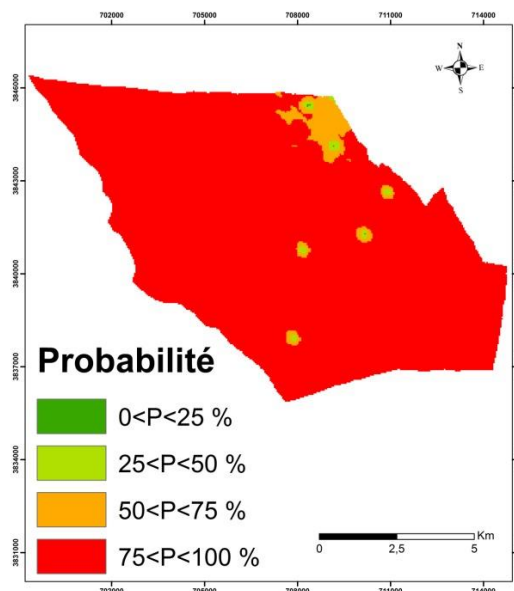


Figure 29 : La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec CE > 0,6 dS m⁻¹.

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

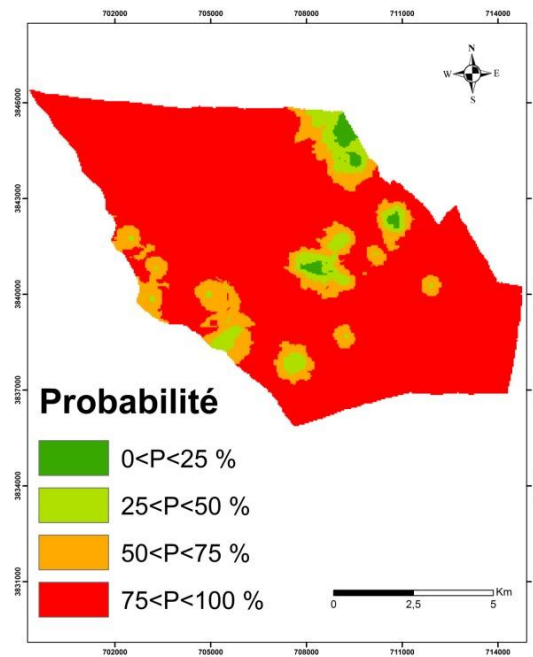


Figure 30 : La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 1 \text{ dS m}^{-1}$.

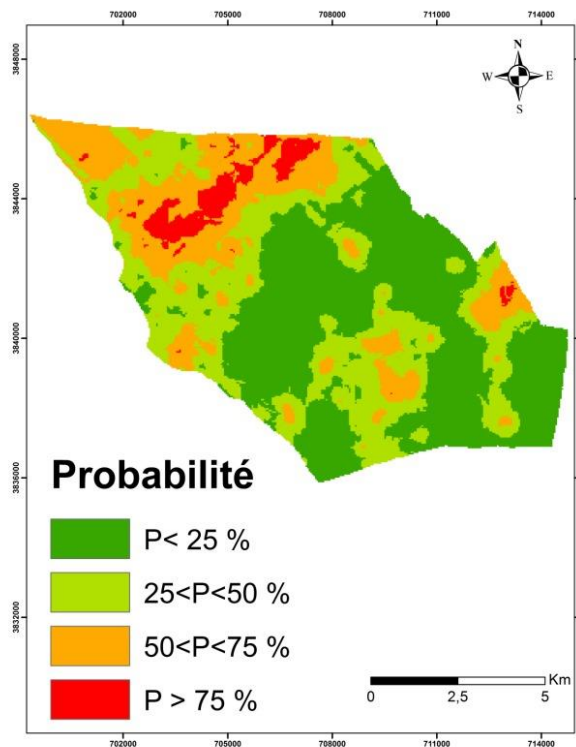


Figure 31 : La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 2 \text{ dS m}^{-1}$.

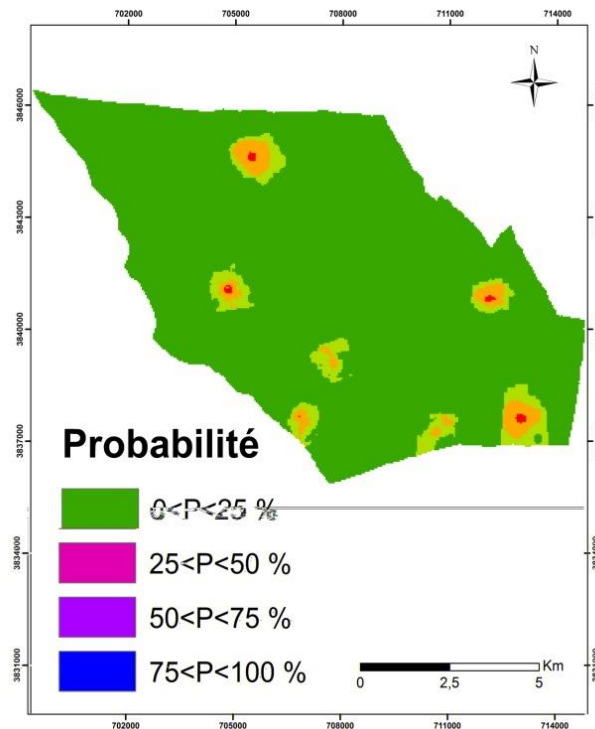


Figure 32 : La carte de probabilité de la distribution spatiale de la salinité du sol avec $CE > 4 \text{ dS m}^{-1}$.

A Biskra, dans le Sud-est de l'Algérie, de vastes zones sont touchées par des problèmes d'irrigation liés aux eaux souterraines qui provoquent la salinisation des sols. La commune d'El Ghrous, qui couvre 3,2 % de la superficie irriguée de la wilaya et représente 3,8 % de la superficie agricole utile (DSA, 2013), est l'une des zones qui sont touchées par la salinisation.

I- 4- Exemple(4) : Apport de la géostatistique non-paramétrique à la cartographie des concentrations du fluor dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT) – Hassi Messaoud (Sud algérien) (Kechiched, Djeghoubbi, Foufou, Nezli et Haddane) 2013.

La ville de Hassi Messaoud a connu un développement rapide de l'habitation qui ne cesse pas à augmenter surtout auprès les entreprises. L'eau, facteur clé pour toute utilisation domestique ou industrielle. Il devient un enjeu primordial dans le volet quantité que qualité.

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

La ville de Hassi Messaoud s'approvisionne des puits de la nappe du Complexe Terminal (C.T). Ces eaux qui ne sont pas renouvelables nécessitent une exploitation sélective en fonction de sa qualité d'une façon rationnelle. Le fluor, un des éléments contrôlant la potabilité des eaux. Les normes algériennes fixent une concentration maximale à 2mg/l. Pour cela la connaissance de sa répartition spatiale dans les eaux de la nappe est nécessaire, surtout, pour implanter des futurs forages d'eau et de leur exploitation.

I-4-1-Démarche d'étude

La nappe du (C.T) au niveau de la ville de Hassi Messaoud a été reconnue à l'aide des forages d'eau .Au total Seize (16) forages ont fait l'objet d'un échantillonnage en Mai 2013. Ces échantillons ont été analysés sur le fluor et les paramètres physicochimiques à niveau du laboratoire de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) et l'Algérienne des eaux (ADE) d'Ouargla, selon les techniques standards.

L'objectif de cette étude se focalise sur l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique, pour la cartographie des concentrations du fluor au sein de la nappe du (C.T), au niveau de la ville de Hassi Messaoud. L'utilisation du krigeage d'indicatrices est favorisée par rapport le krigeage ordinaire ou d'autres méthodes déterministes tel que : la méthode d'inverse des distances et la triangulation linéaire simple. Ceci est à cause la non-stationnarité des données d'une part et à l'effet hydrodynamique des eaux d'autre part. La méthode de (K.i) utilisée dans ce travail repose, sur le codage binaire (0,1) des concentrations du fluor des points de mesures par rapport un seuil limite (cut-off). Dans notre cas la norme algérienne maximale de 2 mg /l a été Utilisée. Les concentrations ≥ 2 mg/l sont codées par la probabilité(1), les concentrations < 2 mg/l sont codées par la probabilité(0). L'étude géostatistique non-paramétrique (variographie et krigeage d'indicatrices) est ramenée sur ce codage.

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

Tableau.5 : Codage binaire des concentrations du fluor analysées en Mai 2013.

N forage	F (mg/l)	Codage I(2)
4	1.63	0
6	2.34	1
7	1.57	0
8	2.71	1
11	2.93	1
12	2.28	1
13	2.25	1
14	1.6	0
15	2.46	1
16	1.73	0
17	2.12	1
18	2.26	1
19	2.1	1
20	2.13	1
21	1.97	0
22	1.86	0

I-4-2-Résultats

I-4-2-1 Variographie

A-Variographie des indicatrices

Les variogrammes ont été construits et ajustés à l'aide du logiciel Variowin2. 21. Le variogramme de surface a été établi dans le plan horizontal, il montre une anisotropie dont le grand axe est orienté NW-SE tandis que, le petit axe a une direction SW-NE. (Figure 33). Le variogramme horizontal moyen des d'indicatrices de I (2 mg/l) a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée $a = 2592$ (m), d'un effet de pépite $C_0 = 0.012$ (mg /l2), et d'un palier $C = 0.261$ (mg/l2). (Figure 34).

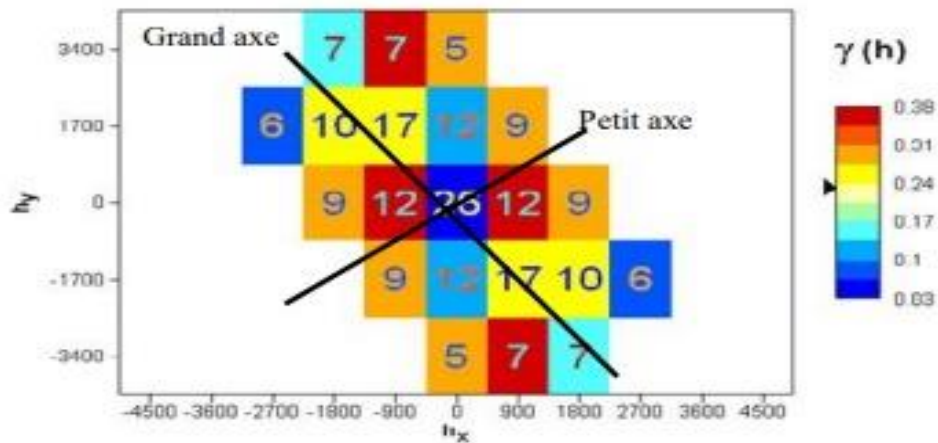


Figure 33: Le variogramme de surface d'indicateur du fluor I (2 mg/l).

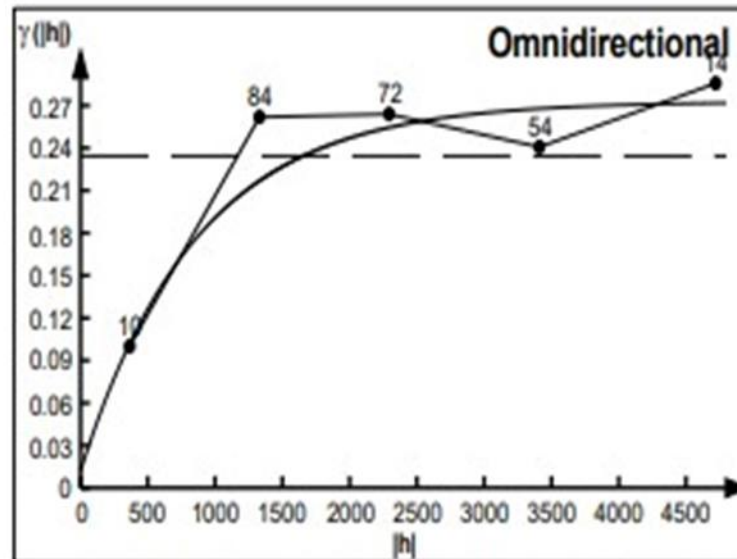


Figure 34 : Le variogramme horizontal moyen d'indicateur du fluor I (2 mg/l)
Krigage d'indicateurs.

I-4-2-2- Krigage

A-Krigage d'indicateur

Les résultats de l'étude variographique ont été utilisés pour l'élaboration du plan de krigage d'indicateurs. Une discrétisation de la nappe en maillage de 200*200 m a été faite. La cartographie des résultats de krigage a été effectuée par classe à l'aide logiciel Surfer, 9 du golden software (Figure35). Cette cartographie d'indicateurs présente un modèle numérique qui montre la probabilité de la concentration de 2mg/l en chaque nœud de maille à

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

deux (2) dimensions.

Qualitativement, on constate que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau dont la probabilité de concentration du fluor égale ou supérieure à 2 mg/l est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). La partie Sud-Ouest, au niveau des forages F14, F04 et F21, est caractérisée par des eaux dont la probabilité d'avoir cette concentration varie de 0 à 0.25 (soit en pourcentage 0 à 25%), c'est la zone dont l'eau présente une faible concentration du fluor.

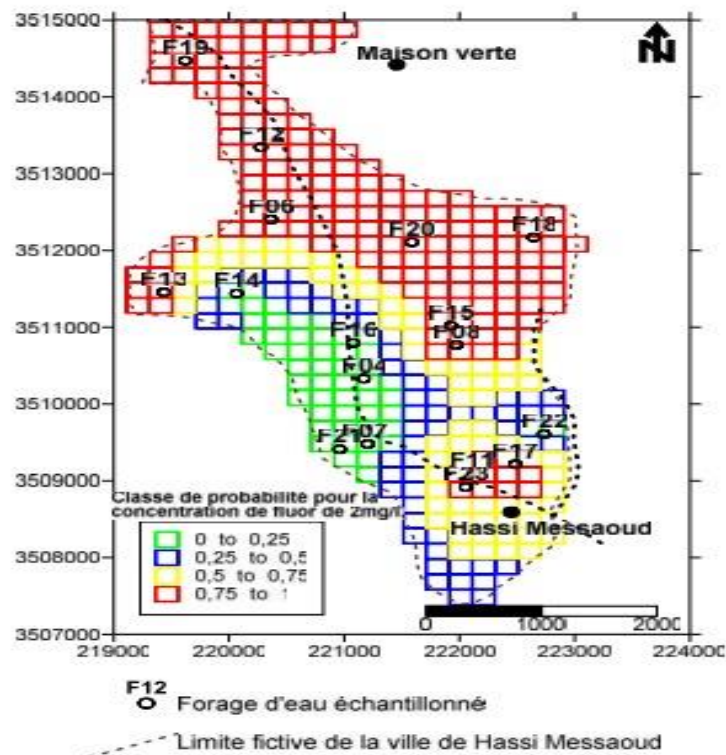


Figure 35: Carte des d'indicatrices (probabilités) krigées pour une concentration du fluor supérieure ou égale 2mg/l. (Mai, 2013).

La carte obtenue représente un modèle probabiliste de la répartition du fluor dans la nappe du Complexe Terminal à Hassi Messaoud. Elle aide à la prise de décision quant à l'implantation et/ou l'exploitation des eaux en question.

La variance de krigeage augmente au fur et à mesure de l'éloignement aux observations (forages) induisant une erreur qui doit être prise en considération lors l'implantation des nouveaux forages pour réduire la variance et par conséquent, la diminution de l'erreur sur l'estimation.

Cette étude représente une contribution à la cartographie géostatistique d'indicatrices des

Chapitre II : Apport de la géostatistique dans le domaine de l'environnement

éléments, en particulier le fluor, au sein de la nappe du (C.T) de Hassi Messaoud. La méthode utilisée repose sur la méthode géostatistique non paramétrique, qui consiste à choisir une concentration limite (cut-off), un codage binaire (0,1) des observations en fonction du (cut-off), puis, la construction et l'ajustement du variogramme d'indicateurs et l'établissement du plan de krigeage d'indicateurs. La cartographie des résultats obtenus représente un modèle numérique de la probabilité d'avoir la concentration du fluor de 2 mg/l (concentration maximale de fluor à la norme algérienne). Cette cartographie a montré que la partie Nord de la nappe est caractérisée par une eau avec une forte probabilité d'avoir d'une concentration de fluor égale ou supérieur à 2 mg/l. Elle est de 0.75 à 1, soit en pourcentage (75% à 100%). Cette probabilité diminue graduellement avec une direction NE-SW. Cette étude présente des perspectives pour implanter sélectivement les futurs forages d'eau et de leur exploitation en fonction de ces cartes. Le krigeage d'autres éléments est recommandé.

Chapitre III

Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

I-Introduction

Les minerais de phosphates contiennent des éléments tels que l'uranium en tant que sous-produit qu'il convient d'éliminer afin de préserver l'environnement d'une part et éventuellement l'utilisation de l'uranium récupéré dans le domaine nucléaire civil d'autre part. L'Algérie possède des réserves considérables en phosphates atteignant deux milliards de tonnes, qui se localisent dans la région de Djebel Onk au Sud Est de l'Algérie. Le gisement de Kef Es Sennoun en fait partie. Il constitue le gîte principal actuellement exploité par l'entreprise SOMIPHOS-FERPHOS.

Le présent travail consiste à estimer les concentrations uranifères et connaître leur répartition dans les différents types de minerai de phosphate afin d'en tenir compte lors de l'exploitation et d'adopter la méthode d'enrichissement la plus appropriée. Dans ce but une étude géostatistique a été faite sur l'uranium de Djebel Onk pour cartographier les différents niveaux d'exploitation.

I-1-Démarche d'étude

L'objectif de cette étude se focalise sur l'utilisation de la méthode géostatistique non-paramétrique (krigeage d'indicatrices), pour la cartographie de la répartition des concentrations d'uranium au sein de minerai de phosphate, au niveau de gisement de Kef Es Sennoun (Djebel Onk –Tébessa, SE Algérie). La méthode est basée sur le codage binaire (0,1) des concentrations d'uranium. Le codage s'effectue en fonction d'une concentration limite (cut-off = 40ppm) En effet, les concentrations $\geq 40\text{ppm}$ sont codées par la probabilité (1), les concentrations $<40\text{ppm}$ sont codées par la probabilité (0). L'étude géostatistique non-paramétrique (variographie et krigeage d'indicatrices) est ramenée sur ces indicatrices.

I-1-1-Variographie

Le variogramme expérimental moyen horizontal (Figure36) des indicatrices de U, a été construit et ajusté par un modèle de régionalisation exponentiel de portée (**a**) égale à 470 m. d'un effet de pépité (**C₀**) égale à $0.0001(\text{ppm})^2$ et de palier (**C**) égale à $0.012(\text{ppm})^2$.

$$\gamma(h) = 0.0001 + 0.012 \exp -h/470$$

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

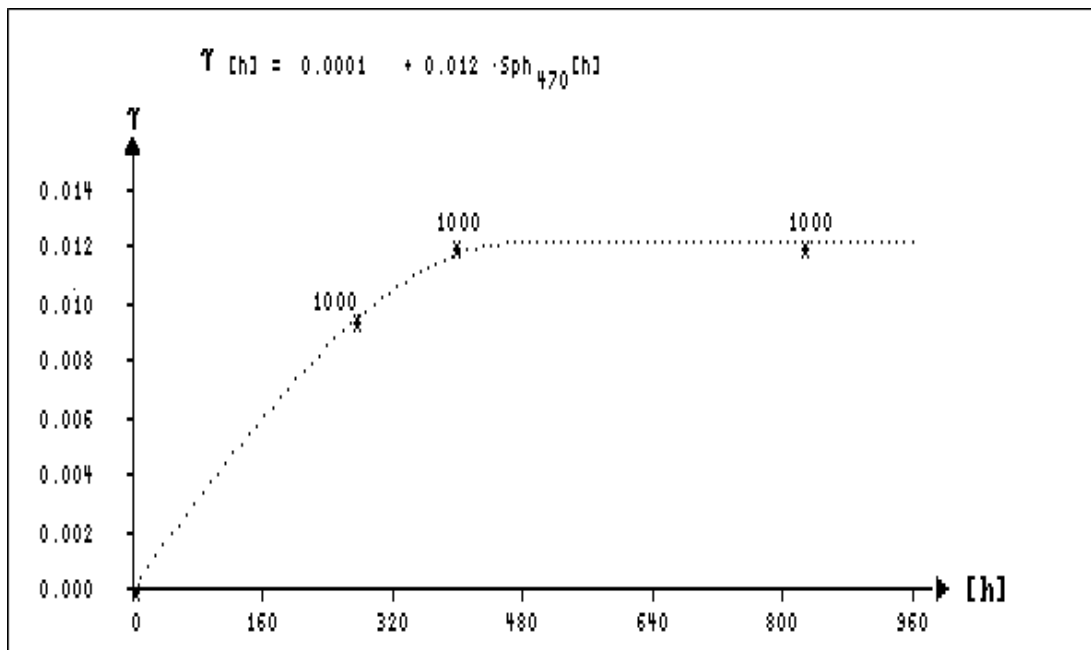


Figure36 : Variogramme expérimental de U.

I-1-2- Krigeage

A- Krigeage d'indicatrice des teneurs en uranium

Le krigeage indicatrice est une procédure d'interpolation qui fournit à partir des données disponibles, une estimation optimale non linéaire et non biaisée. Le krigeage a plusieurs avantages parmi ceux-ci :

- Lors de l'estimation, le krigeage intègre la structure spatiale des données sous forme d'un modèle de variogramme
- C'est un interpolateur exact.
- Il fournit une information sur l'erreur d'estimation, permettant donc d'évaluer la précision de l'estimation.

B-Paramètres de krigeage

Le krigeage indicatrice à trois dimensions a été établi avec des paramètres précis (tableau 6), dans le but d'estimer les teneurs en U dans les blocs d'exploitation (100x 20 x 10 m³) à partir de l'ensemble des données des sondages.

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

Tableau 06. Paramètres de krigeage.

	Axe X	Axe Y	Axe Z
Var	X	Y	Z
Origine	50	10	785
Taille des blocs	100	20	10
Nombre de blocs	29	80	4
Rayon de recherche	R ₁ = 470	R ₂ = 470	R ₃ = 12

Pour notre plan de krigeage et en fonction de la composition lithologique, chimique et conditions d'exploitation le gisement de Kef Es Sennoun a été divisé en **4** niveaux:

- **Niveau 1** : de 815 m de profondeur. Dont les dimensions des blocs d'exploitation sont 100 m de longueur, 20 m de largeur et 10 m d'épaisseur, qui correspond à la sous couche IIT.
- **Niveau 2** : de 805m de profondeur. Dont les dimensions des blocs d'exploitation sont (100 x 20 x 10) m³ et qui correspond à la première partie de la couche principale de Phosphate.
- **Niveau 3** : de 795m de profondeur. Dont les dimensions des blocs d'exploitation sont (100 x 20 x 10) m³ et qui correspond à la deuxième partie de la couche phosphatée Principale.
- **Niveau 4** : de 780 m de profondeur. Dont les dimensions des blocs d'exploitation sont (100 x 20 x 10) m³ et qui correspond à la sous-couche II.

Les résultats de krigeage sont donnés sous forme de tableau. (Tableau7)

Tableau 07. Statistiques des teneurs krigées en U pour les quatre niveaux.

Elément	\bar{X}	S ²	σ^2_k	N.B
I (U) (ppm)	0.831	0.059	3.227	5172

\bar{X} : La moyen.

S²:La variance.

σ^2_k : La variance de krigeage du bloc minier.

NB : le nombre de blocs.

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

C-Méthodologie de travail

Les minerais de phosphates contiennent des éléments tels que l'uranium en tant que sous-produit qu'il convient d'éliminer afin de préserver l'environnement d'une part et éventuellement l'utilisation de l'uranium récupéré dans le domaine nucléaire civil d'autre part. L'Algérie possède des réserves considérables en phosphates atteignant deux milliards de tonnes, qui se localisent dans la région de Djebel Onk au Sud Est de l'Algérie. Le gisement de Kef Es Sennoun en fait partie. Il constitue le gîte principal actuellement exploité par l'entreprise SOMIPHOS-FERPHOS.

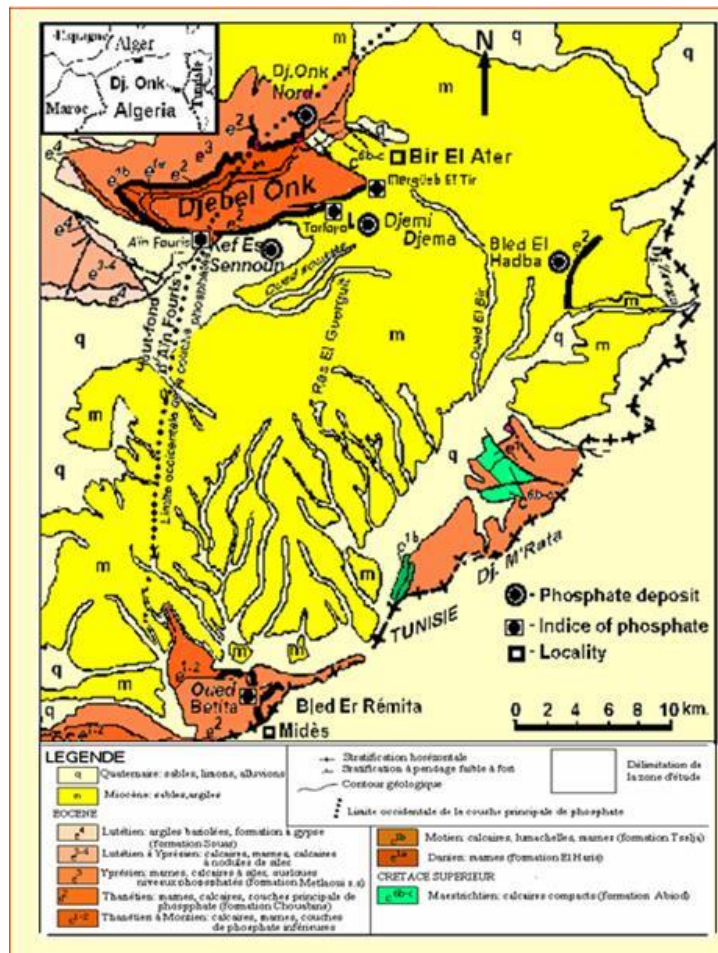


Figure 37 : Situation géographique et géologique des gisements de Djebel Onk.

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

Une étude géostatistique sur l'uranium de phosphate de kef sennoun a été faite. La méthode géostatistique utilisée est le krigeage d'indicatrice. L'objectif de cette étude se focalise sur l'utilisation de la méthode géostatistique non paramétrique, pour la cartographie des concentrations d'uranium dans les différents niveaux d'exploitation.

La méthode de (K.i) utilisée dans ce travail repose, sur le codage binaire (0,1) des concentrations de l'uranium des points de mesures par rapport un seuil limite (cut-off). Dans notre cas 40ppm a été Utilisée. Les concentrations ≥ 40 ppm sont codées par la probabilité (1), les concentrations < 40 ppm sont codées par la probabilité (0). L'étude géostatistique non-paramétrique (variographie et krigeage d'indicatrices) est ramenée sur ce codage.

Le logiciel utilisé est le **geostat tool box** qui est un logiciel de calcul statistique et géostatistique, le type de fichier utilisé est un fichier **.ddh**

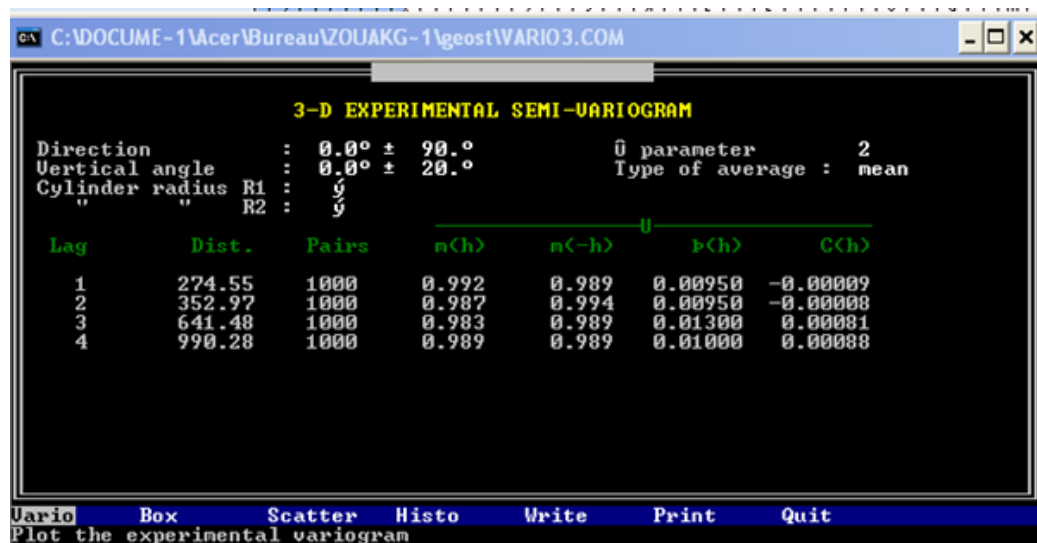
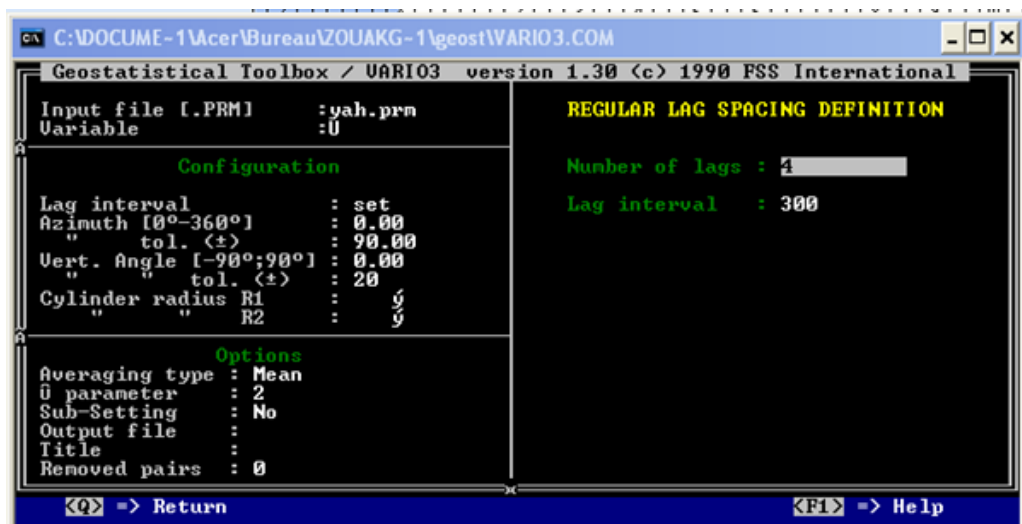
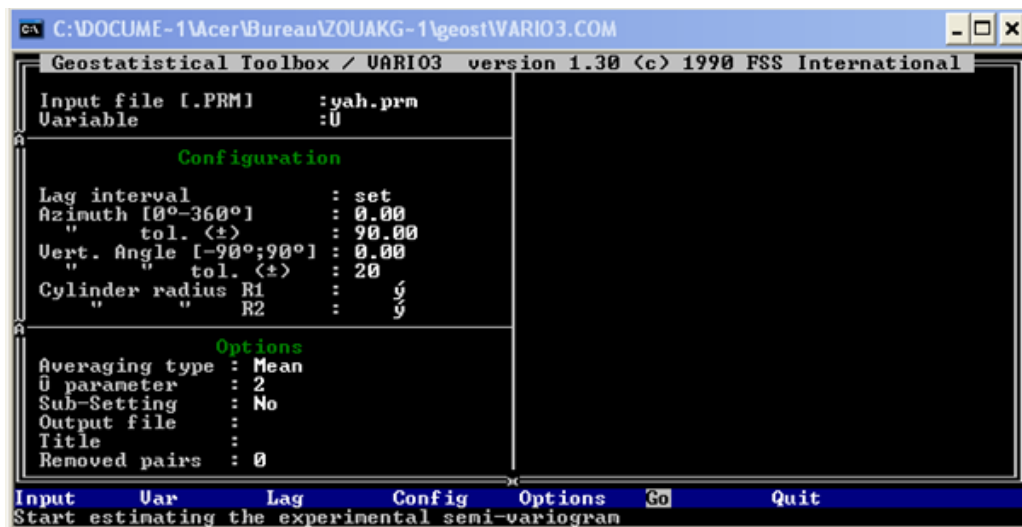
Donnees	de	carotte						
g								
NS								
P205								
CO2								
CaO								
MgO								
X								
Y								
Z								
I(u)								
2	2	0	659.99	820	0	-70	31	
2	18.33	20.13	41.56	6.94	0	683.59	820	0
2	17.81	23.43	42.2	7.83	0	683.93	819.06	0
2	22.19	12.98	45.04	2.94	0	684.27	818.12	1
2	27.12	11.88	46.02	1.64	0	684.62	817.18	1
2	26.89	11.88	46.04	2	0	684.96	816.24	1
2	26.41	12.98	45.1	2.14	0	685.3	815.3	1
2	26.13	12.98	45.52	2.67	0	685.64	814.36	1
2	26.79	11.88	45.4	1.54	0	685.98	813.42	1
2	27.26	11.88	45.3	1.48	0	686.33	812.48	1
2	23.83	16.28	43.84	3.9	0	686.67	811.54	1
2	28.97	11.78	47.02	1.02	0	687.01	810.6	1
2	26.78	8.03	46	1.8	0	687.35	809.66	1
2	26.08	11.33	45.3	2.47	0	687.69	808.72	1
2	26.1	13.53	45.46	2.79	0	688.04	807.79	1
2	28.56	6.93	46.8	2.09	0	688.38	806.85	1
2	28.01	8.03	46.48	1.37	0	688.72	805.91	1

Le logiciel comporte plusieurs modules ou programmes de calculs :

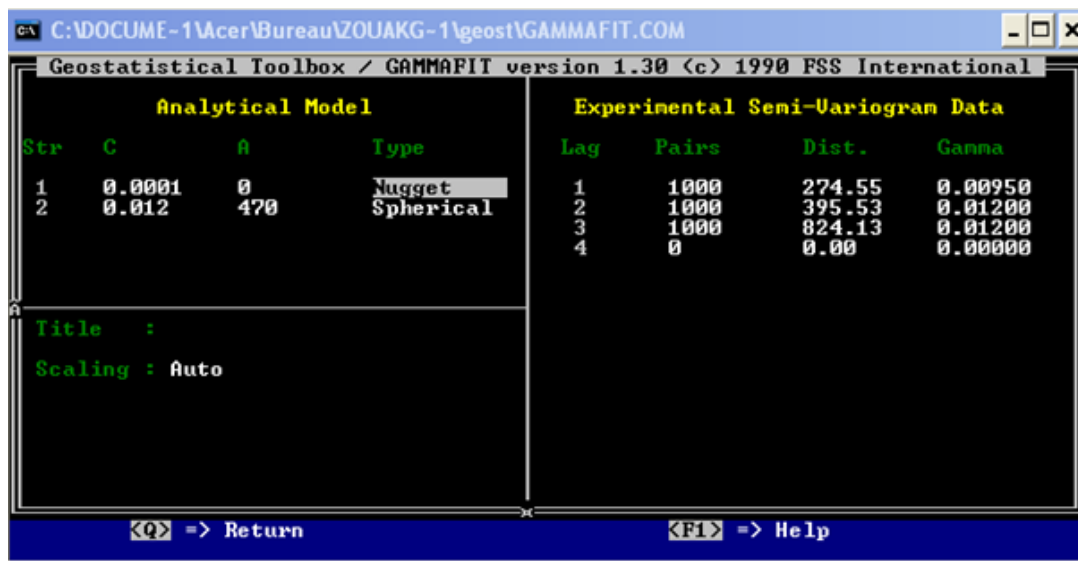
- **Le programme Prevar3** : pour la préparation du fichier pour le calcul des variogramme



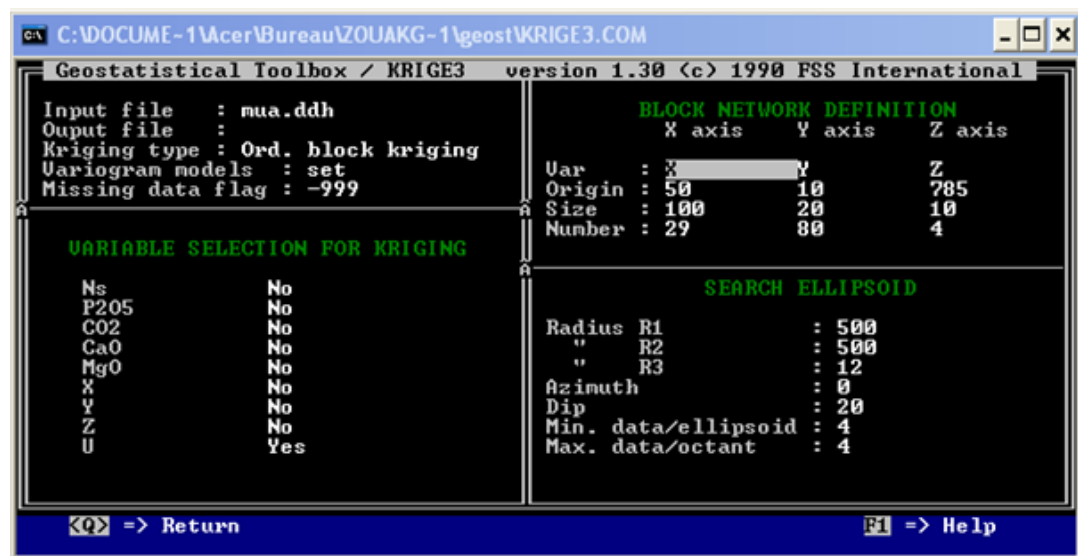
Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk



Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

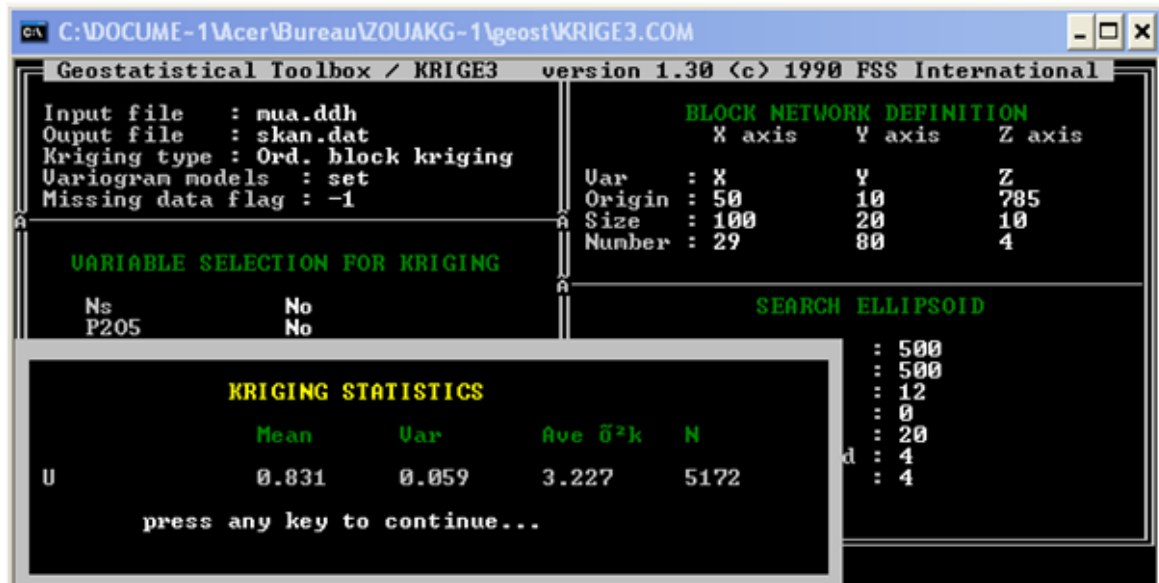


□ Le programme Krige 3 : pour le krigeage



VARIOGRAM MODEL DEFINITION							
Variable : U							
Str	C	a1	Ruv	Ruv	0	p	Type
1	0.0001	0	1.00	1.00	0.00	0.00	Nugget
2	0.012	470	1.00	0.00	0.00	90.00	Spherical
3	3.9	12	1.00	0.00	0.00	90.00	Exponent.

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk



I-2-Cartographie des indicatrices krigées en U

Les résultats de l'étude variographique ont été utilisés pour l'élaboration du plan de krigeage d'indicatrices.

La cartographie des résultats de krigeage a été effectuée par classe à l'aide logiciel Surfer. Cette cartographie d'indicatrices présente un modèle numérique qui montre la probabilité de la concentration de 40 ppm en Uranium. La cartographie a permis de bien visualiser la répartition des blocs ainsi que les zones les plus riches, les cartes des teneurs des blocs ou plans d'exploitation des quatre niveaux du gisement pour les indicatrices d'uranium.

Les cartes obtenues ci-dessous peuvent être lu de la manière suivante :

- Les blocs en bleu sont les blocs qui ont 0 à 25% de leurs volumes qui ont une concentration supérieur ou égale à 40ppm en uranium.
- Les blocs en jaune sont les blocs qui ont 25 à 50% de leurs volumes qui ont une concentration supérieur ou égale à 40ppm en uranium.
- Les blocs en violet sont les blocs qui ont 50 à 75% de leurs volumes qui ont une concentration supérieur ou égale à 40ppm en uranium.
- Les blocs en rouges sont les blocs qui ont 75 à 100% de leurs volumes qui ont une concentration supérieur ou égale à 40ppm en uranium.

Chapitre III : Apport de la géostatistique non paramétrique à la cartographie d'uranium dans le gisement de phosphate de Djebel Onk

La méthode de cartographie utilisée est la cartographie par classe. Afin de bien visualiser la répartition des blocs ainsi que les zones les plus riches, les cartes des teneurs des blocs ou plans d'exploitation des quatre niveaux du gisement pour les teneurs de P₂O₅ et U krigés estimés par régression multiple (puisque'il présente le meilleur modèle) ont été établies.

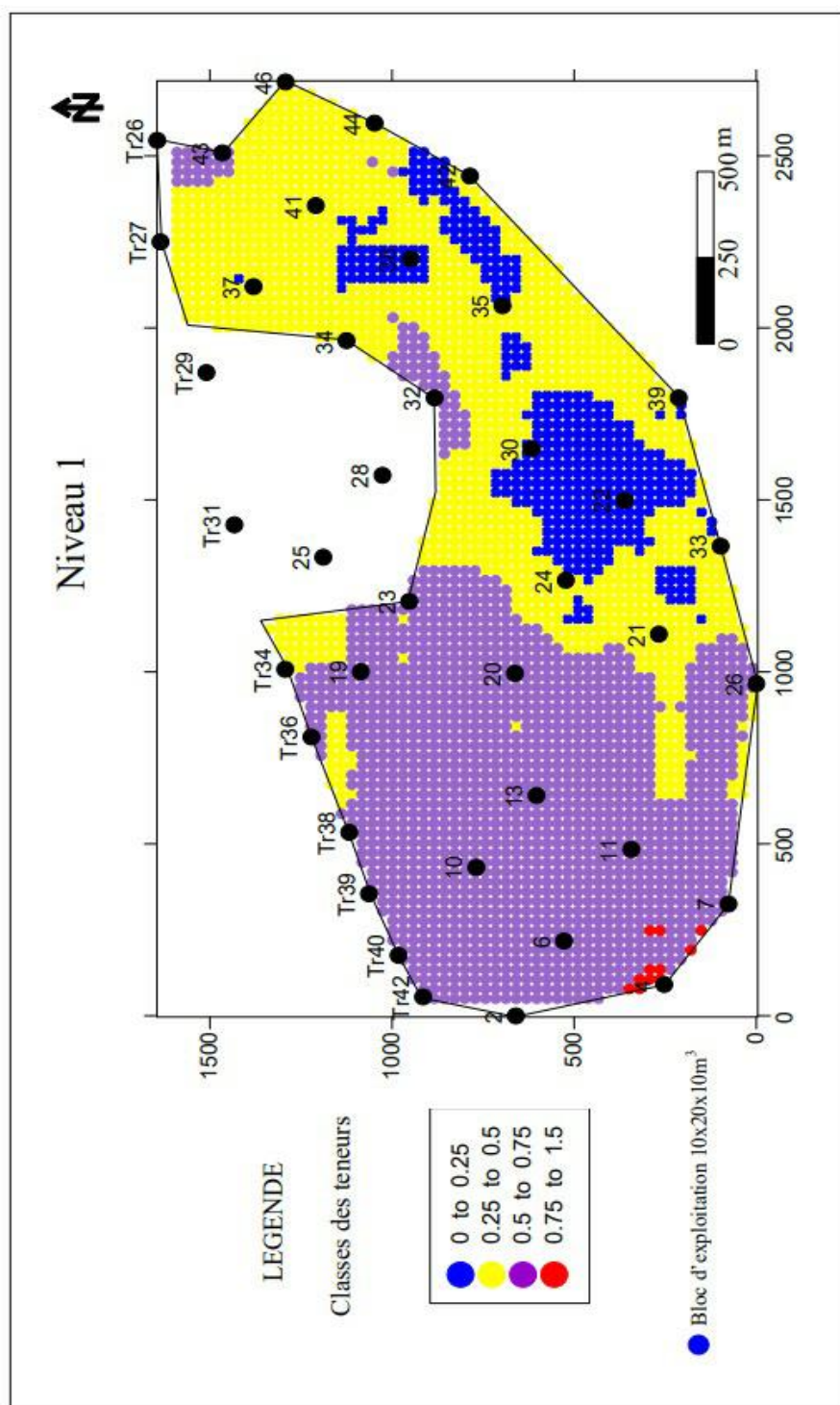


Figure38 : Carte des teneurs d'indicatrices de dans les blocs d'exploitation du niveau n° 1 du gisement de - Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale - Niveau 1

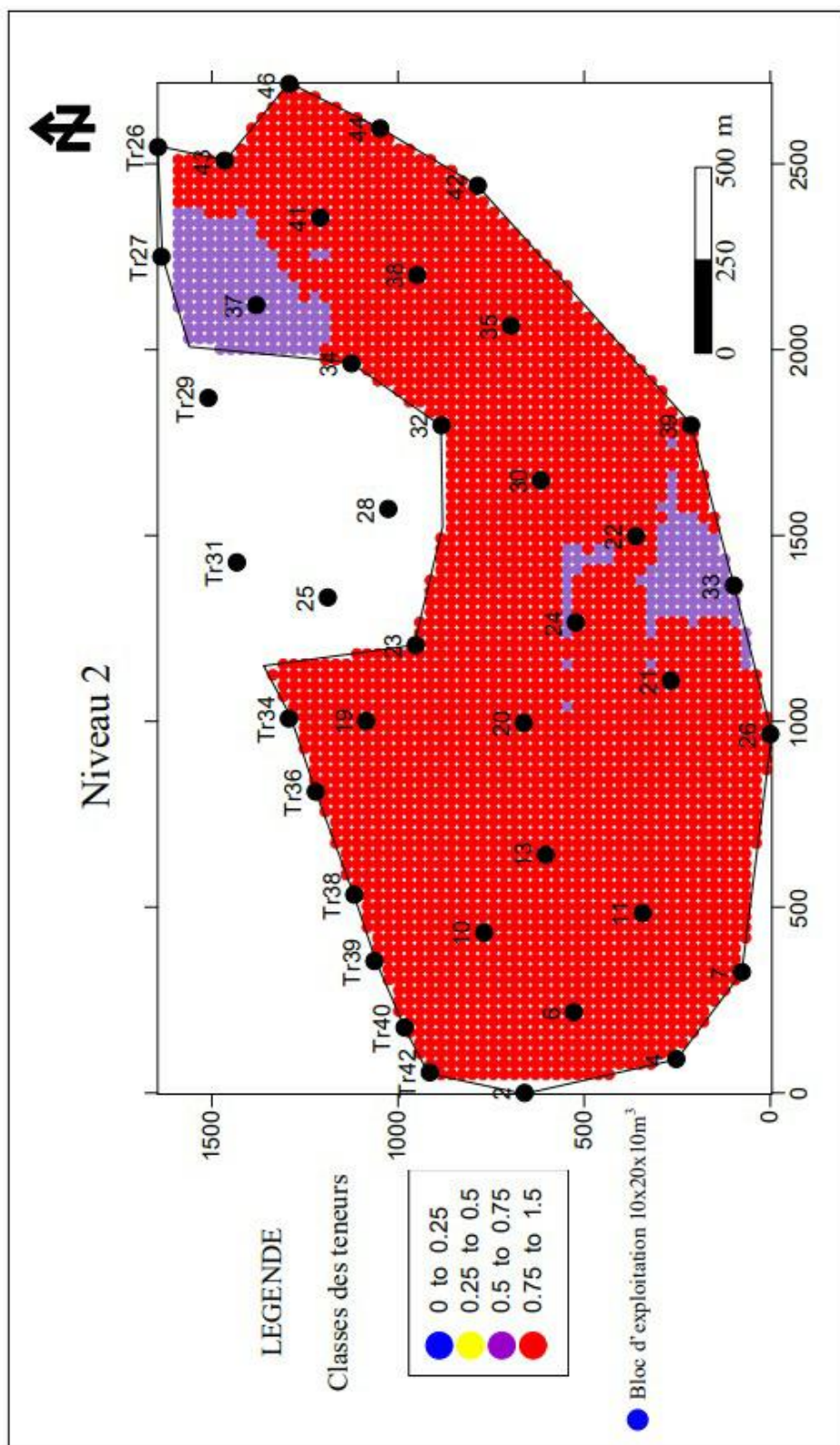


Figure 39 : - Carte des indicatrices de U dans les blocs d'exploitation du niveau n° 2 du gisement de Kef Es-Sennoun - DjebelOnk - Algérie Orientale - Niveau 2.

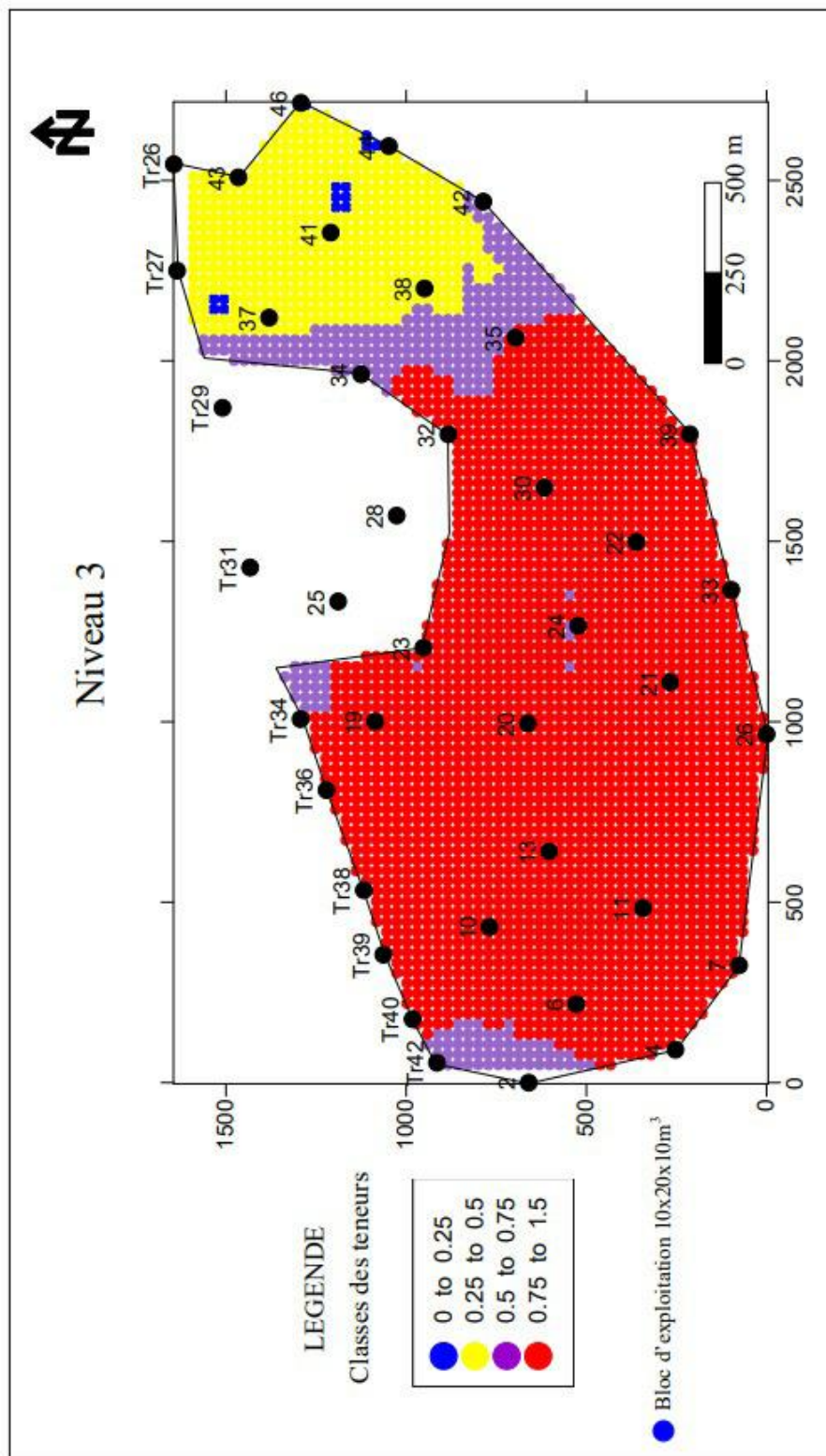


Figure 40 : - Carte indicatrices de U dans les blocs d'exploitation du niveau n° 3 du gisement de Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale - Niveau 3

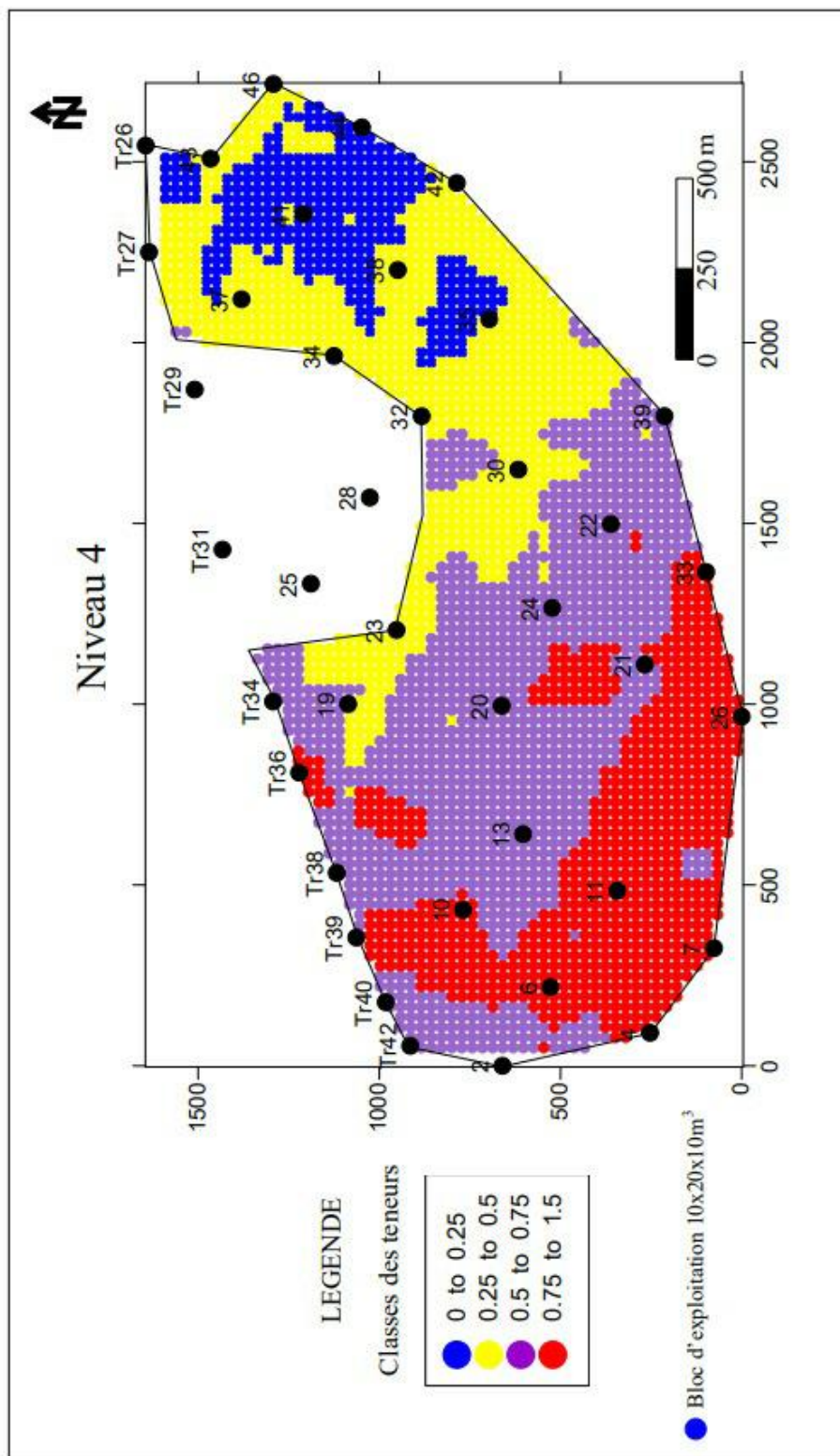


Figure41 : Carte des indicatrices de U dans les blocs d'exploitation du niveau n° 4 du gisement de Kef Es-Sennoun - Djebel Onk - Algérie Orientale. Niveau 4

Conclusion Générale

Conclusion

Au cours de notre travail, on a eu comme objectif de montrer l'intérêt des outils géostatistiques de cartographier et d'analyser des différents phénomènes environnementaux.

La géostatistique est une méthode d'interpolation spatiale basée sur le krigeage. Cette méthode est précédée par une étude variographique. La quantité et la précision d'une estimation reposent sur la validité et la cohérence d'une étude variographique. Cette dernière tient en compte à la fois de la géométrie et la précision des échantillons, ainsi que des caractéristiques de la régionalisation.

Une recherche bibliographique a permis d'étudier les bases des techniques d'interpolations spatiales et notamment celle du krigeage ordinaire et d'indicateurs. Ces dernières ont été présentées d'un point de vue théorique et appliquée.

La géostatistique environnementale offre une grande diversité de sujets, de l'analyse exploratoire aux développements théoriques. Elle est aujourd'hui utilisée pour cartographier des différentes pollutions au niveau local (Algérie) tel que (la salinité des eaux souterraines, la salinité des sols, concentrations du fluor dans les eaux de la nappe du CT et la pollution par les nitrates) à l'aide d'une série des méthodes d'interpolation géostatistiques qui peuvent être réalisées en mode linéaire (le krigeage ordinaire) et non linéaire (le krigeage d'indicateurs). La synthèse de ces exemples examinés enrichit ainsi les connaissances et approfondit notre compréhension des phénomènes.

Notre étude est de but d'estimer les réserves en phosphates de gisement de Kef Es Sennoun par la méthode géostatistique. L'exploration des données, l'ajustement de variogramme et l'utilisation de krigeage d'indicateurs nous a permis d'obtenir les cartes de la répartition des teneurs en uranium et les blocs pour chacun des quatre niveaux d'exploitation.

Cette étude reste ouverte à d'autres perspectives.

Références Bibliographique

Références Bibliographique

- **Abdenmour, M. Douaoui, A. Bradai, A. Bennacer, A. Pulido, F,** Application of kriging techniques for assessing the salinity of irrigated soils: the case of El Ghrous perimeter, Biskra, Algeria. SJSS. SPANISH JOURNAL OF SOIL SCIENCE. En ligne. July 2019. Volume 9, Consulté le 27 février 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/publication/334458535>.
- **Abdenmour, Mohamed, Amine. (2021):** Variabilité spatio-temporelle de la salinisation des sols du périmètre irrigué du Ziban (Biskra) – Apport de la géostatistique et de la télédétection: THESE Présentée En vue de l'Obtention du Diplôme De Doctorat: hydro-pédologie en régions arides, DEPARTEMENT DES SCIENCES AGRONOMIQUES, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA, 115p.
- **Aragüés, R., Medina, E., Zribi, W., Clavería, I., Álvaro-Fuentes, J., Faci, J. (2015):** Soil salinization as a threat to the sustainability of deficit irrigation under present and expected climate change scenarios. Irrigation science 33, 67-79.
- **Arnaud M et Emery X., 2000.** Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques .Hermès Sciences Publications. Paris. France.221p
- **Arslan, H. (2012):** Spatial and temporal mapping of groundwater salinity using ordinary kriging and indicator kriging: The case of Bafra Plain, Turkey. Agricultural Water Management 113, 57-63.
- **Ayers, R, S. Westcot, D, W. (1988):** La qualité de l'eau en agriculture. Bulletin FAO d'irrigation et de drainage. 29 Rév. 1, 165p.
- **Azouzi, B. (1993) :** Contribution à la cartographie automatique des grandeurs hydrogéologiques, Application à la Mitidja. Thèse de Magistère, Ed. INA d'El Harrach, Alger.163p.

Références Bibliographique

- **Baillargeon, S. (2005) :** Le krigeage, revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale des données de précipitations. , Thèse pour l'obtention du grade de Maître sciences, Ed. Université Laval, Canada. West Lafayette, IN, 43 p.
- **Belaribi, Fatiha et Yousfi, Latifa. (2017) :** Etude géostatistique de la variabilité spatiale de la pluviométrie annuelle dans la plaine du bas au moyenne chélif.Nord- ouest d'Algérie : Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master : eau et bioclimatologie, Département de sciences biologie, Université Djillali Bounaama de khemis Miliana, 49p.
- **Belekbir, Yassin. (2015) :** Approche géostatistique de l'impact des changements climatique sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines (cas de la Mitidja) : Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master : Aménagement et ouvrages Hydrotechniques, Département aménagement et génie hydraulique, école nationale supérieur d'hydraulique-Arbaoui Abdellah-, 80p.
- **Belkai, Hadjila et Ben Hamiche, Assia. (2015) :** Evaluation géostatistique des ressources minières «cas de gisement de Kef Es Sennoun » : Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du Diplôme de Master : Exploitation minière, Département des Mines et géologie, Université Abderrahmane Mira de Béjia, 79p.
- **Benchouk, M. (1990) :** Analyse Factorielle Krigeante de Données de prospection Géochimique Multi-élémentaire ; Prospection de l'or de Fourou, Mali (Zone sur Echantillonnée Nord- est). Mémoire de Magister Ecole Nationale Polyte.
- **Boufroua, Roukia et Koukou, Yousra. (2020) :** Evaluation de technique du krigeage à la Cartographie de caractéristiques physico-chimique des eaux souterraines cas d'application le synclinal d'Ain Elbel-Sidi Makhoulouf. Djelfa Algérie : Projet de Fin d'Etude préparé En vue de l'obtention du diplôme de MASTER : Hydraulique Urbaine, Département de Sciences et Technologie, Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf – M, 62p.

Références Bibliographique

- **Bouhamza, Fatima Zohra et Djeghab, Sara. (2018)** : Estimation géostatistique des paramètresPéto physique de la zone 1B -HASSI MESSOUD : Mémoire de Master Professionnel : Géologie pétrolière, DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DEL'UNIVERSO, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA, 51p.
- **Bradaï, A., Douaoui, A., Bettahar, N., Yahiaoui, I. (2016)**: Improving the prediction accuracy of groundwater salinity mapping using indicator Kriging method. Journal of Irrigation and Drainage Engineering 142, 04016023.
- **Bui, E., (2013)**: Soil salinity: a neglected factor in plant ecology and biogeography.Journal of arid environments 92, 14-25.
- **BURGESST, M. et WEBSTER, R. (1980a)** : Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semi-variogram and punctual kriging. J. of Soil Sci., 31: 315-331 (parametres de varogramme).
- **Cassel, F., Goorahoo, D., Sharmasarkar, S, (2015)**: Salinization and yield potential of a saltladen Californian soil: an in situ geophysical analysis. Water, Air, & Soil Pollution 226, 422.
- **Delhomme, JP. (1976)** : Applications de la théorie des variables régionalisées dans les sciences de l'eau. Thèse de Doc. Ing. Ecole des Mines de Paris. Université de Paris VII. 130p.
- **Douaoui, A. (2005)** : Variabilité spatiale de la salinité en relation avec certaines caractéristiques des sols de la plaine du Bas-Chélif. Apport de la géostatistique et de la télédétection. Thèse Doct. D'état, INA – Alger. 230p.
- **Douaoui, A et Bradaï, H. (2007)** : Application du krigeage d'indicatrices dans la cartographie de la salinités eaux souterraines du moyen-cheliff.
- **Douaoui A Bradaï, H**, Application du krigeage d'indicatrices dans la cartographie de la salinités eaux souterraines du moyen-cheliff .En ligne. January 2007, Consulté le 24 février 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/publication/258847036>.

Références Bibliographique

- **DSA. (2013) :** Rapport annuelle des activités agricoles. Biskra, Algérie: Direction Des Services Agricoles.
- **Durand, J. (1983):** The irrigable soils agency Cultural and Technical Cooperation. Academic Press France.
- **Fan, G., Qiang, H., Xiaoyi, S., Zhenglong, Y. (2011) :** Study on dynamic changes of the soil salinization in the upper stream of the Tarim river based on RS and GIS. Procedia Environmental Sciences 11, 1135-1141.
- **Gorji, T., Tanik, A., Sertel, E. (2015):** Soil salinity prediction, monitoring and mapping using modern technologies. Procedia Earth and Planetary Science 15, 507-512.
- **ISAAKS E.H and SRIVASTA R.M,(1989).**-Applied Geostatistics. Oxford University Press,N.Y.,U.S.A.
- **JOURNAL, A.HUIJBREGTS, G. (1978) :** Mining geostatistics, Academic Press, London, U.K
- **Kechiched, Rabah. Nezli, imed eddine. Foufou, Atif. Haddane,abdennour.** Apport de la géostatistique non-paramétrique à la cartographie des concentrations du fluor dans les eaux de la nappe du Complexe Terminal (CT)- Hassi Messaoud (Sud algérien). Le Séminaire International sur L'Hydrogéologie et l'Environnement. En ligne. November 2013. 10.13140/2.1.2745.4726,consulté le 4 Mai 2022. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/publication/265912891>.
- **MARCOTTE, D. (2000) :** Traitement statistique des données géologiques. Cours GLQ3402 (géostatistiques). Ecole Polytechnique de Montréal.
- **Mourah, Nawel. (2011) :** Interpolation géostatistique le krigeage : Mémoire pour l'obtention du diplôme de Magistère : probabilités et statistiques, département des sciences fondamentales, Université 20 aout Skikda 1955, 83p.
- **Pannatier, Y. (1996) :** (VARIOWIN) Software for Spatial Data Analysis in (2D) SpringerVerlag, 91p. ISBN 0-387-94679-9. chnique.

Références Bibliographique

- **Rodier, J. (1996)** : L'analyse de l'eau : eau naturelle-eau résiduaire-eau de mer, Dunod, 1384p.
- **SAHRI, Leila. (2005)** : Etude géologique et géostatistique du champ filonien aurifère s'ISSELFANE (HOGGAR Occidentale-Algerie) : Thèse présenté pour l'obtention du grade de Magister : spécialité Géologie Minière, Département des sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement du territoire, Université de HOUARI BOUMEDIENE-ALGER, 90p.
- **Torchi, Rayane et Boubekour, Asma. (2021)** : Cartographie des champs de concentration du nitrate dans la plaine d'Ain Oussara Djelfa : Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER : Hydraulique urbaine, Département de Génie civil et Hydraulique, Centre Universitaire Abdelhafide Boussouf – Mila, 38p.
- **USSLS, U. (1954)**: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Washington: United States Department of Agriculture.
- **U.S.S.L. Staff, (Unated State Salinity Laboratory Staff). (1954)**: Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, US Department of Agriculture, Handbook n°60, U. S. Gov. Print. Office, Washington DC.
- **Walter, C. (1993)** : L'estimation des propriétés du sol par krigeage d'indicateurs confrontée à celle dérivée d'une carte pédologique. Science du sol, Vol. 31,4, 215-231.
- **Webster, R., Oliver, M.A., 2007.** Geostatistics for environmental scientists. John Wiley & Sons.