



**Ministère de l'enseignement supérieur
et de la recherche scientifique**

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de technologie

Département de GENIE CIVIL



MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

FILIERE : Génie Civil SPECIALITE : Géotechnique

Par: KECHROUD Ali & BOUFISSIOU Mohammed

THEME

**LA PREDICTION SPATIALE PAR KRIGEAGE DES
PROPRIETES DES SOLS**

Validation sur un cas réel (Carte de salinité à Matmar –wilaya de Relizane)

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

BEAGRAA Larbi, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

TALLAH Naoui, M.C.B, Université Med Boudiaf - M'sila, Examineur

KHEMISSA Mohamed, Prof., Université Med Boudiaf - M'sila, Encadreur

SEDDIKI Ahmed, M.C.B, Université Med Boudiaf - M'sila, Co- Encadreur

Promotion : 2020/2021

Remerciements

Nous adressons nos mes remerciements aux personnes qui nous ont aidé dans la réalisation de ce mémoire. Nous remercions en premier lieu notre encadreur Mr. Khemissa Mohamed, professeur au Département de génie à l'université de Msila, pour ses conseils, ses encouragements et surtout sa disponibilité. Nous remercions également notre Co encadreur M. Seddiki Ahmed, Docteur au Département de génie à l'université de Msila, pour sa disponibilité absolue durant notre stage.

Enfin, Nous tenons à ne pas passer sous ombre le support de nos familles, notamment celui de nos parents pour leurs encouragements et leur présence aimante.

Nos remerciements et non des moindres, vont au personnel de la faculté de technologie à l'université Mohamed Boudiaf à Msila pour leurs sollicitudes à notre égard et particulièrement au Chef du département de génie civil.

Résumé

Diverses sciences dans différentes disciplines nécessitent d'**interpoler** de nombreux paramètres. La **géostatistique**, avec son étape d'analyse structurelle, est largement utilisée à cette fin. A l'aide de semi-variogrammes, cette étape précieuse peut être utilisée pour évaluer la corrélation et la dépendance des données. Cependant, un mauvais choix du modèle de **variogramme** peut biaiser tous les résultats de **prédiction**.

La présente étude montre comment l'utilisation d'un modèle de semi-variogramme inadapté peut sérieusement fausser les résultats d'une analyse prédictive.

L'influence de la sélection du modèle de semi-variogramme est mise en évidence et enrichie par des cartes thématiques élaborées à l'aide de trois **modèles** différents (gaussien, sphérique et exponentielle).

Pour éviter un tel inconvénient, une approche méthodique pour sélectionner le modèle le plus approprié, basée sur le calcul et l'analyse des indicateurs statistiques tel que la variance et l'écart type de l'erreur résiduelle, est proposé. Cela peut réduire l'effet indésirable de la sélection du modèle de semi-variogramme sur une opération d'**interpolation** utilisant la technique de **krigeage**.

Mots clés : géostatistique, variogramme, prédiction, modèles, interpolation, Krigeage.

Abstract

Various sciences in different disciplines require interpolating many parameters. Geostatistics, with its structural analysis step, is widely used for this purpose. Using semivariogram, this valuable step can be used to assess the correlation and dependence of the data. However, a wrong choice of the variogram model can bias all the prediction results.

The present study shows how the use of an unsuitable semivariogram model can seriously skew the results of a predictive analysis.

The influence of the selection of the semivariogram model is highlighted and enriched by thematic Maps developed using three different models (Gaussian, spherical and exponential).

To avoid such a drawback, a methodical approach to select the most appropriate model, based on the calculation and analysis of statistical indicators such as the variance and the standard deviation of the residual error, is proposed. This can reduce the undesirable effect of selecting the semivariogram model on an interpolation operation using the kriging technique.

Keywords: Geostatistics, variogram, prediction, models, interpolation, Kriging.

ملخص

تتطلب العلوم المختلفة في مختلف التخصصات استيفاء العديد من الخصائص. تستخدم الجيوإحصائية التحليل الإنشائي على نطاق واسع لهذا الغرض. باستخدام المتباين النصفية، يمكن استخدام هذه الخطوة القيمة لتقييم الارتباط والاعتماد على البيانات. ومع ذلك، يمكن أن يؤدي الاختيار الخاطئ لنموذج المتباين إلى تحيز جميع نتائج التنبؤ.

توضح الدراسة الحالية كيف يمكن أن يؤدي استخدام نموذج شبه مخطط غير مناسب إلى تحريف نتائج التحليل التنبؤي بشكل خطير. حيث يتم تسليط الضوء على تأثير اختيار نموذج شبه المخطط وإثرائه من خلال خرائط موضوعية تم تطويرها باستخدام ثلاثة نماذج مختلفة.

لتجنب مثل هذا العيب، تم اقتراح منهج لاختيار النموذج الأنسب، بناءً على حساب وتحليل المؤشرات الإحصائية مثل التباين والانحراف المعياري للخطأ. مما يمكن من تقليل من التأثير غير المرغوب فيه لاختيار نموذج المتباين النصفية على عملية الاستيفاء باستخدام تقنية "كريجينغ".

الكلمات المفتاحية: الجيوإحصائية، متباين نصفية، التنبؤ، نماذج، استيفاء، "كريجينغ".

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

ملخص

RÉSUMÉ

ABSTRACT

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

Introduction Générale..... 1

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre Premier.....	4
Généralités sur les Systèmes d'Information Géographique.....	4
I.1. Introduction.....	4
I.2. Définitions de Système d'Information Géographique (SIG).....	4
I.3. L'information géographique IG.....	5
I.4. Les principales composantes d'un SIG.....	6
I.5. Les fonctionnalités d'un SIG (les 5 A).....	6
I.6. Domaines d'application des SIG.....	7
I.7. Le SIG idéal.....	8
I.8. Quelques logiciels SIG.....	8
I.9. Les données dans les SIG.....	11
I.10. Mode d'acquisition des données géographiques.....	14
I.11. Les avantages des SIG.....	15
I.12. Les inconvénients des SIG.....	15
Chapitre Deuxième.....	17
Les Méthode d'Interpolation Spatiale.....	17
II.1. Méthodes d'interpolation.....	17
II.2. Méthodes probabilistes.....	19
II.3. Krigeage.....	19
II.4. Le Variogramme.....	20

Chapitre Troisième	26
Outils Numérique Utilisés.....	26
III.1. Introduction	26
III.2. Présentation de l'interface du logiciel.....	26
III.3. Ouverture d'autres cartes	29
III.4. Créer une grille x, y, z	29
III .5. Les Méthodes de quadrillage (Gridding Methods)	30
III.6. Les méthodes de quadrillage comprennent	30
III.7. Composants du variogramme.....	34
III.8. Montage du variogramme surfer	37

SIMULATION NUMERIQUE

Chapitre quatrième	40
Validation à un cas Pratique	40
IV.1. Présentation de la zone d'étude.....	40
IV.2. Données utilisées.....	40
IV.3. La prédiction Spatiale de la conductivité électrique aux points « non mesurés »	42
IV.4. La Variographie	43
IV.5. Le Krigeage.....	46
IV.6. Comparaison des résultats des méthodes d'Interpolation	47
IV.7. Validation croisée	47
IV.8. Synthèse	50
 Conclusions Générales	 51
 Références Bibliographique	 53

Liste des Figures

Figure I.1. Superposition des couches constituant un SIG	5
Figure I.2. Exemples de système de localisation par satellite (GPS)	5
Figure I.3. Principales composantes d'un SIG	6
Figure I.4. Abstraction	6
Figure I.5. Partage sur une seule machine	7
Figure I.6. Partage sur plusieurs postes de visualisation.....	7
Figure I.7. Stockage sur plusieurs sites	7
Figure I.8. Images satellitaires dans logiciel GRASS GIS.....	8
Figure I.9. Carte sur le web dans Map Serve	9
Figure I.10. Création d'une forme géométrique (Polygone) dans QGis.....	9
Figure I.11. Base de données PostgreSQL	10
Figure I.12. Fenêtre principale de DIVA-GIS en vue Données	10
Figure I.13. Présentation d'ArcGIS Pro	11
Figure I.14. : Types de données dans un SIG	11
Figure I.15. Mode vecteur.....	12
Figure I.16. Mode Raster	13
Figure I.17. Exemple d'importation de fichiers vers le SIG	14
Figure I.18. Carte géographique dans le SIG.....	15
Figure II.1. Résumé des méthodes d'interpolation déterministes	17
Figure II.2 Les méthodes d'interpolation probabiliste	19
Figure II.3. Schéma type d'un variogramme	21
Figure II.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental.....	22
Figure II.5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental(croix)	23
Figure II.6. Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement	23
Figure II.7. Modèle type de semi-variogramme exponentiel	23
Figure II.8. Modèle type de semivariogramme gaussien	24
Figure II.9. Modelé type de semi-variogramme sphérique.....	24
Figure III.1. Barre des menus	26
Figure III.2. différentes cartes possibles.....	27
Figure III.3. Worksheet Surfer	27
Figure III.4. Grille ouverte	28
Figure III.5. Carte de contour.....	28
Figure III.6. 3D Surface Map.....	29
Figure III.7. Les options de quadrillage.	29
Figure III.8. Distance inverse à une puissance grille	30
Figure III.9. Modified Shepard's Method grille	31
Figure III.10. Triangulation with Linear Interpolation grille	31
Figure III.11. Métriques de données grille	32
Figure III.12. Grille de krigeage.....	33
Figure III.13. Boîte de dialogue Options avancées de krigeage.....	33
Figure III.14. Composants du variogramme.....	34
Figure III.15. La Fenêtre des Propriétés du modèle expérimental.....	34

<i>Figure III.16. La boîte de dialogue Propriétés</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.17. Les modèles de variogramme</i>	<i>35</i>
<i>Figure III.18. Statistiques.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.19. L'éditeur de grille</i>	<i>36</i>
<i>Figure III.20. Les paramètres du variogramme.....</i>	<i>37</i>
<i>Figure IV.1. Situation de la zone d'étude Mina par rapport à la wilaya de Relizane et à L'Algérie.....</i>	<i>41</i>
<i>Figure IV.2. Statistique de la série d'altitudes.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV.3. Choix du modèle du semi-variogramme</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.4. Modèle variographique expérimental (noir) et mathématique ajusté (bleu)</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.5. Superposition des (03) modèles variographique mathématique ajusté (bleu) et le modèle expérimental (noir)</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.6. Cartes des isovaleurs (CEps) obtenues par interpolation par Krigeage</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV.7. Cartes de surface en 3D selon le modèle choisi.....</i>	<i>49</i>

Introduction Générale

La recherche environnementale est toujours basée sur des échantillons, mais dans l'ensemble, les résultats des mesures représentent la continuité de l'espace d'échantillonnage. La plupart des chercheurs veulent savoir quelle valeur peut représenter le lieu (Webster 2014). Même avec les mêmes données d'entrée, l'application de différentes méthodes d'interpolation peut produire des résultats différents (Amante 2016, Drouin 2010, Daniel 2008).

De plus en plus d'applications d'interpolation sont apparues dans divers domaines. Selon le modèle mathématique sur lequel elles reposent, les méthodes d'interpolation se répartissent généralement en deux catégories (Arnaud 2000) :

- les méthodes déterministes basées sur des propriétés purement mathématiques (généralement géométriques), sans tenir compte du phénomène physique qui nous intéresse. A partir des valeurs mesurées environnantes, l'interpolation permet de déterminer les valeurs de résultat (Johnston 2001). Les interpolateurs tels que TIN (réseau triangulaire irrégulier), IDW (pondération par l'inverse de la distance) et LPI (interpolation polynomiale locale) sont classés comme méthodes déterministes.
- les méthodes géostatistiques qui font appel à des modèles probabilistes et découlent de l'analyse statistique des données considérées.

Danie Krige, un ingénieur minier d'Afrique du Sud, a d'abord proposé le concept d'une moyenne mobile pour surmonter le problème de surestimation des réserves minières par le système. Pour célébrer le mineur pionnier, le professeur Matheron a inventé le terme "Krigage" pour la méthode qu'il a développée (Sarma 2009).

En considérant la corrélation spatiale et en la modélisant, la géostatistique peut prédire assez correctement les variables environnementales avec une variance minimale et connue, contrairement à d'autres méthodes. La technique de prédiction par Krigage, nécessite un modèle mathématique pour décrire la covariance spatiale, généralement exprimée sous forme de variogramme, et grâce à sa forme paramétrée il est devenue l'outil principal de la géostatistique (Webster. 2015).

Les logiciels de modélisation, de géospécialisation et d'interpolation les plus cités sont ArcGis d'ESRI et Surfer de Gold Software. Le fonctionnement de ces logiciels est basé sur des techniques d'interpolation déterministes et géostatistiques.

Le krigeage est différent de toutes ces techniques, en raison de sa caractéristique impartiale d'être le meilleur estimateur linéaire sans biais (BLU Best Linear Unbiased) (Brenot 1975). Il est de loin la méthode la plus utilisée à cet effet dans tous les domaines des sciences de l'environnement dans le monde (Diodato 2004, Joseph 2007, Arétouyap 2016, Gharbia 2016).

La fiabilité de l'interpolation et de la prédiction passe par une étape préliminaire importante qui est l'analyse structurale centrée sur le variogramme. Cette étape est si importante que pour de nombreuses versions de Golden Surfer, les utilisateurs sont responsables du choix du modèle de variogramme approprié. En cas de doute entre plusieurs modèles de variogrammes, il est alors recommandé de les tester à l'aide de la méthode dite validation croisée qui consiste à retirer une à une chaque donnée et à la réestimer à partir des N-1 données restantes. La validation croisée permet d'évaluer si un des modèles retrouve mieux lors de l'estimation les valeurs mesurées. Il est également conseillé d'examiner l'impact pratique du choix du modèle sur l'estimation par krigeage et l'incertitude associée pour évaluer leur sensibilité (Bechler 2013).

L'objectif de cette étude est d'expliquer brièvement l'impact du choix du modèle de variogramme sur l'estimation par krigeage et l'incertitude associée afin d'en évaluer la sensibilité, et comment choisir le modèle le plus approprié. De tester les modèles de variogrammes par validation croisée ce qui permet de réduire l'effet du mauvais choix du modèle sur l'interpolation par la technique du krigeage.

L'organisation de ce travail s'est articulée comme suit :

Une synthèse bibliographique qui comprend 03 chapitres :

- Premier chapitre : Généralités sur les SIG ;
- Deuxième chapitre : Les méthodes d'interpolation spatiale
- Troisième chapitre : Outils numérique utilisés

Deuxième partie sur la simulation numérique par le logiciel Surfer et comprend :

Quatrième chapitre : Validation a un cas Réel Carte de salinité d'une parcelle située dans le périmètre irrigué de la Mina, Relizane.

Nous terminerons ensuite par une conclusion générale.

Première partie

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre Premier

***GENERALITES SUR LES SYSTEMES
D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE***

GENERALITES SUR LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

I.1. Introduction

Un système d'information géographique (SIG) est un système informatique permettant à partir de diverses sources, de rassembler et organiser, de gérer, d'analyser et recombinaison, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace.

Un système d'information géographique est aussi un système de gestion de base de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées.

C'est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Un système d'information géographique est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision.

I.2. Définitions de Système d'Information Géographique (SIG)

Il existe plusieurs définitions de Système d'Information Géographique (SIG), mais nous focalisant uniquement sur les définitions les plus importantes :

1. La définition de l'économiste Didier (1990) "Un SIG est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision".
2. Selon le Comité Fédéral de Coordination Inter-agences pour la Cartographie Numérique aux États-Unis (1988) "Un SIG est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus conçu pour permettre : la collection, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation, l'affichage des données à référence spatiale, afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion".
3. Selon la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection : "Un SIG est un système informatique qui permet à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace".

Le SIG est une représentation du monde réel. Pour passer du monde réel à sa représentation, on organise les données selon leur thème comme il est représenté dans la Figure I.1 :

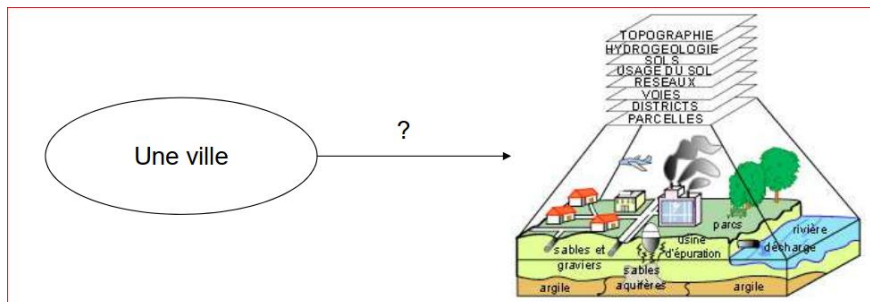


Figure I.1. Superposition des couches constituant un SIG

I.3. L'information géographique IG

L'IG est une donnée ayant une référence spatiale soit sous forme de :

1. Coordonnées géographiques
2. Nom de lieu
3. L'adresse postale ou autre.

Elle peut être dupliquée sans détérioration, s'échange à haute vitesse au travers des réseaux de web, se cumule avec différentes informations en vue d'en produire de nouvelle.

L'IG est obtenue, déposée, analysée, affichée et partagée à l'aide de système d'information géographique (SIG). C'est une information liée à un objet ou à un phénomène, décrit plus ou moins complètement :

1. Par ses caractéristiques diverses (c.-à-d. sa nature et son aspect).
2. Par son emplacement sur la terre. Le premier groupe de données est appelé aussi attributs, alors que le second groupe est appelé données géométriques. Par exemple l'IG sur une route se définit par son nombre de voies, son revêtement, son nom, sa grandeur et son positionnement sur la surface terrestre. Il faut signaler que l'IG est de plus en plus présente dans notre vie sous une forme numérique (Figure I.2).



Figure I.2. Exemples de système de localisation par satellite (GPS)

1.4. Les principales composantes d'un SIG

Selon ESRI France (ESRI, 2018) un Système d'Information Géographique (Figure I.3) est composé de et :

- Matériel informatique (hardware) : ordinateur(pc)
- Logiciels (software)
- Données (Information Géographique : L'information géographique peut, soit être constituée en interne, soit acquise auprès de producteurs de données.
- Personnel formé

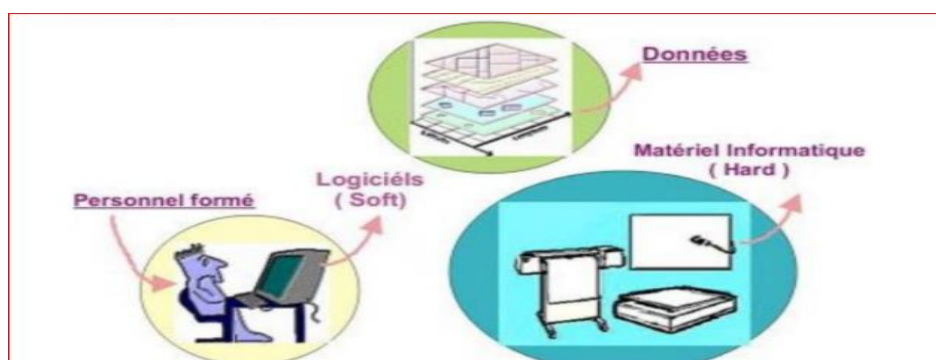


Figure I.3. Principales composantes d'un SIG

1.5. Les fonctionnalités d'un SIG (les 5 A)

Les SIG sont créés pour répondre à différentes demandes et comme le système commun n'existe pas, il faut les ajuster selon les objectifs établis. Néanmoins il faut dire qu'il y'a 5 fonctionnalités "on les appelle les 5A » que tous les SIG doivent assurer :

Abstraire : Concevoir un modèle qui arrange les données par constituants géométriques et par attributs descriptifs, et qui permet aussi d'établir des relations entre les objets (Figure I.4).

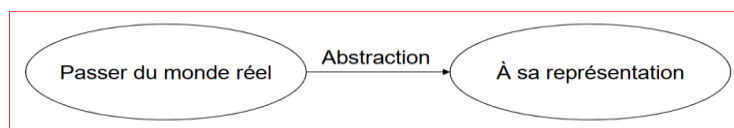


Figure I.4. Abstraction

Acquérir : Le logiciel doit posséder des fonctionnalités de digitalisation et d'importation de données ;

Archiver : Le logiciel doit avoir une grande capacité de stockage des données. Stockage des données géométriques et attributaires.

- **Une seule machine :**

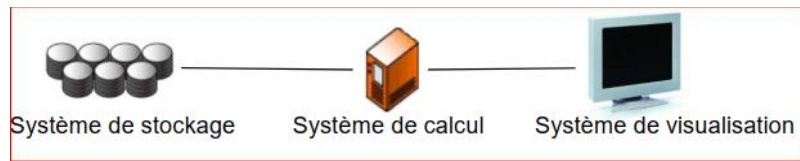


Figure I.5. Partage sur une seule machine

- **Partage sur plusieurs postes de visualisation :**

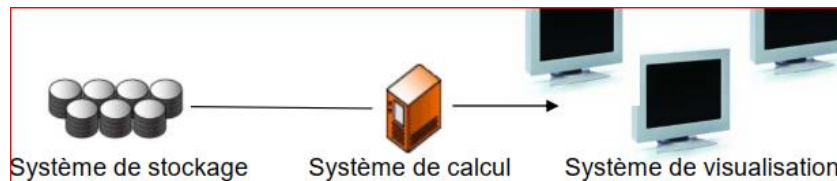


Figure I.6. Partage sur plusieurs postes de visualisation

- **Stockage sur plusieurs sites :**

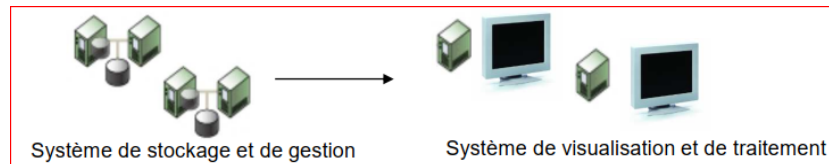


Figure I.7. Stockage sur plusieurs sites

Analyser : Capacité d'analyser les données géographiques (méthodes quantitatives et statistiques, opérateurs topologiques, etc.).

Afficher : Capacité d'affichage de l'information géographique sous forme de Cartes, tables, graphes, etc.

I.6. Domaines d'application des SIG

Les SIG peuvent être utilisés pour étudier plusieurs phénomènes, entre autres on peut citer :

- **Pour les grandes échelles :**

- La gestion foncière et cadastrale : ex. recensement des propriétés privées et le calcul de leurs surfaces.
- La planification urbaine : ex. réalisation des cartes d'occupation des sols et plans d'aménagement urbain.
- La gestion des réseaux : ex. réseau d'assainissement, approvisionnement en eau potable, gaz, électricité, téléphone, etc.
- La gestion des espaces verts naturels ou urbains : ex. parcs naturels et jardins publics.

- **Pour les échelles moyennes et petites :**

- L'identification des meilleurs endroits pour l'emplacement d'une nouvelle ressource ou ce que n'appelle carte d'aptitude.
- Les études d'ingénierie routière : ex. constructions de routes ou d'autoroutes.
- Les applications liées à la prévention des risques naturels.

I.7. Le SIG idéal

Le SIG idéal possède certaines qualités qu'on cite ci-dessous :

Rentable : en fonction de l'autorisation de l'organisation.

Pertinent : notamment pour les résultats.

Flexible : il faut qu'il soit capable d'évoluer.

Sécuritaire : il protège l'information confidentielle.

Compétitif : vérification de la qualité et le rendement des traitements.

Autonome : notamment le logiciel, afin d'assurer l'évolution de la portabilité.

Coopératif : les tâches et les fonctions des différents services et individus impliqués, il faut qu'elles soient bien définies.

Motivant : la conception et l'utilisation doivent être gérées par l'utilisateur.

Documenter : la documentation doit être écrite conjointement au développement du logiciel.

I.8. Quelques logiciels SIG

I.8.1. Logiciels libres

GRASS GIS : Il rassemble des propriétés de traitement d'images satellitaires et des fonctionnalités à base topologique. (Figure I.8).

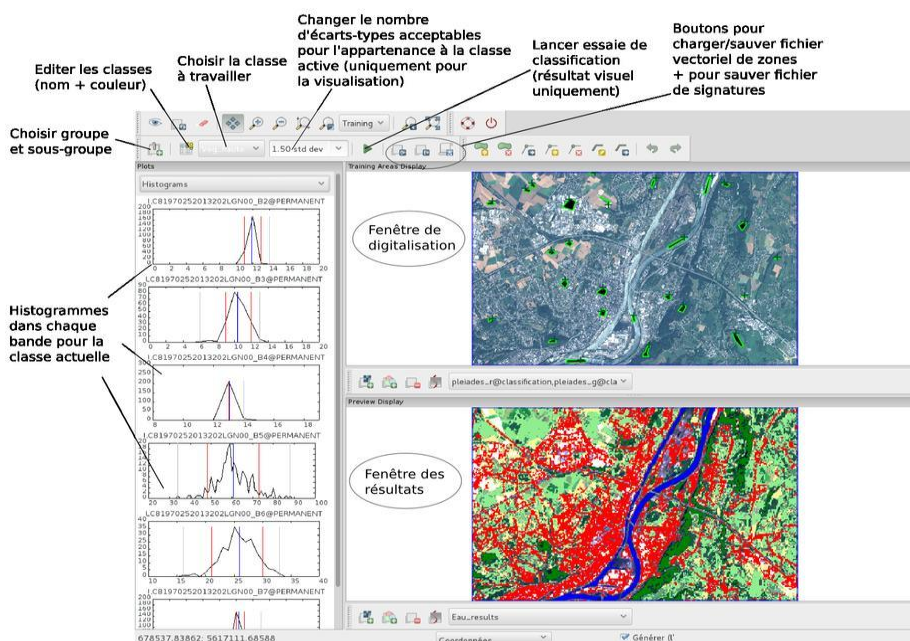


Figure I.8. Images satellitaires dans logiciel GRASS GIS

Map Server : Logiciel libre d'édition des cartes sur le web. (Figure I.9).

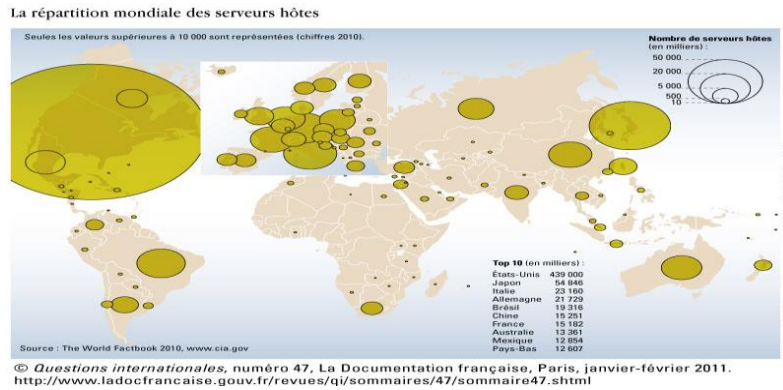


Figure I.9. Carte sur le web dans Map Serve

QGIS : Il permet de visualiser les cartes ainsi que leurs transformations. Il présente une qualité qui le rend très simple à utiliser. (Figure I.10.)

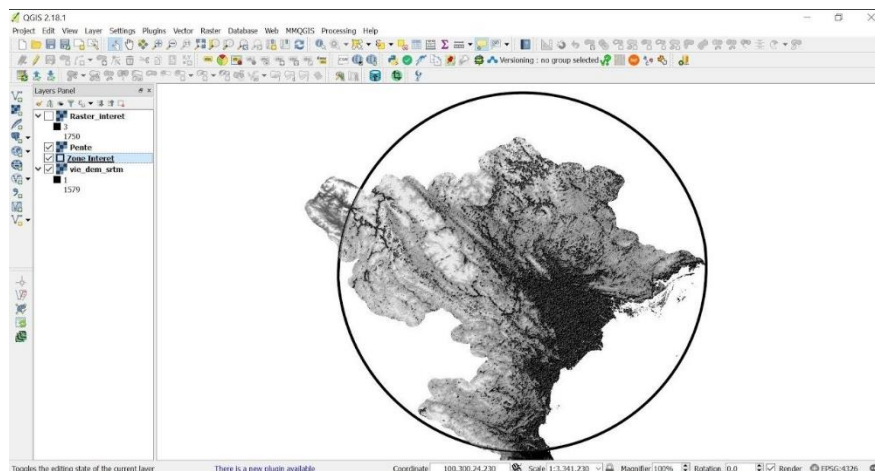


Figure I.10. Création d'une forme géométrique (Polygone) dans QGIS

PostGIS : C'est une extension pour la base de données PostgreSQL, qui permet de faire des requêtes SQL et spatiales. (Figure I.11.).

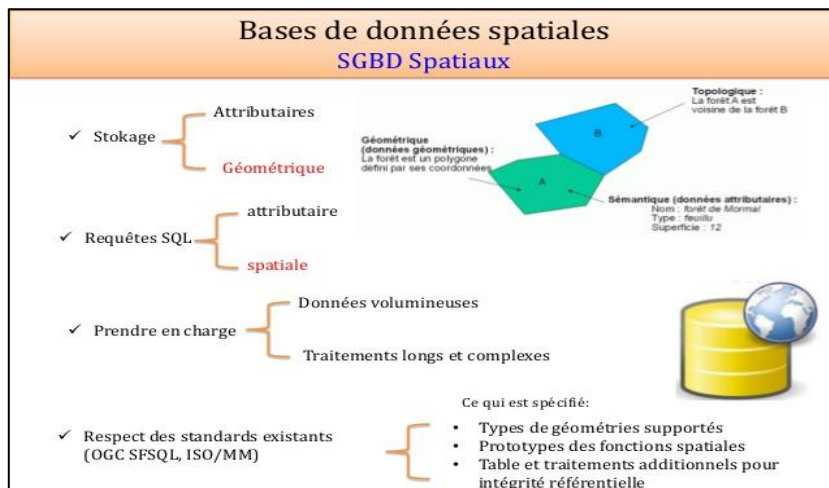


Figure I.11. Base de données PostgreSQL

I.8.2. Logiciels Gratuits :

DIVA-GIS : Offre des outils d'analyse statistique et géostatistique de l'information géographique. (Figure I.12.).

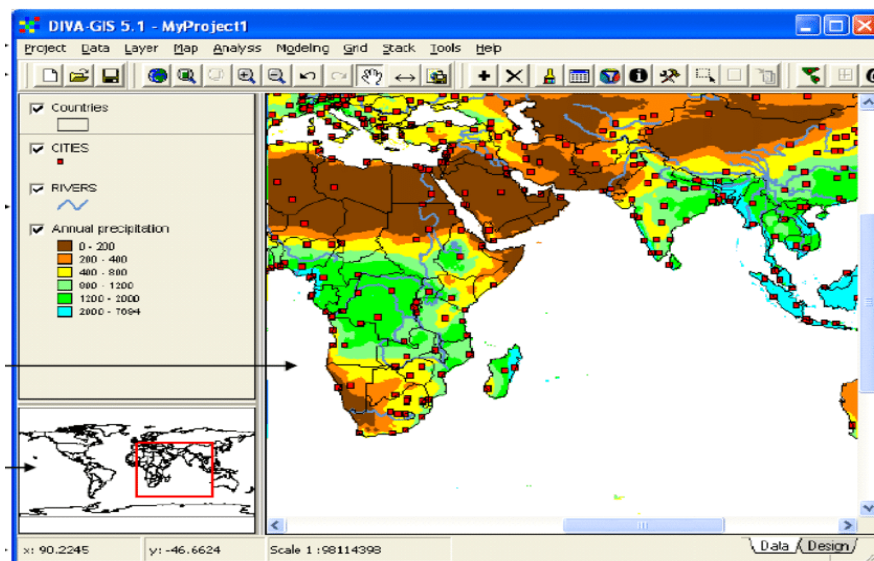


Figure I.12. Fenêtre principale de DIVA-GIS en vue Données

AutoDEM :

Il propose des dispositifs pour générer des modèles numériques de terrains (MNT) à partir de courbes de niveaux. Il supporte plusieurs formats tel que les images raster et les courbes de niveaux de type vectoriel.

I.8.3. Logiciels Commerciaux :

ArcGIS : (ArcInfo, ArcView, etc.) de chez ESRI. (Figure I.13.).

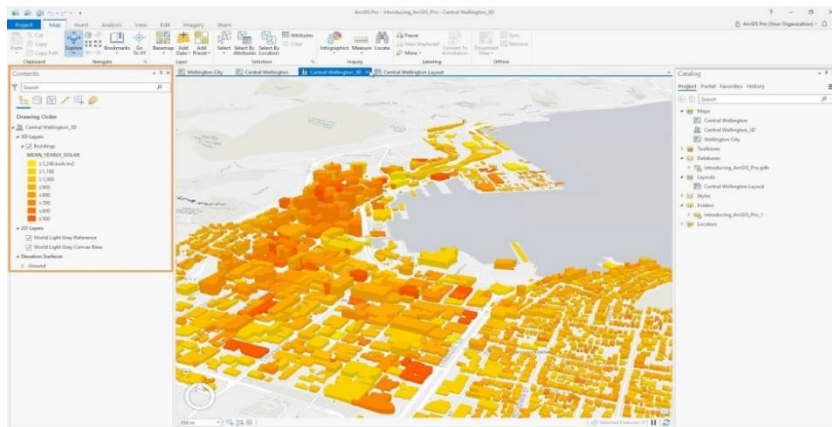


Figure I.13. Présentation d'ArcGIS Pro

GeoMapGIS : Métiers s'appuyant sur l'environnement Autodesk (AutoCAD, AutodeskMap, Autodesk Map Guide, etc.)

Manifold : Logiciel novateur (serveur, géocodage, 3D, script .net, SGBD).

I.9. Les données dans les SIG

I.9.1. Types de données dans les SIG

Toutes les géométries spatiales peuvent être décrites par 4 types de propriétés comme il est représenté dans la figure I.14.:

- Leur position à la surface de la terre.
- Les relations spatiales (topologie).
- Leurs attributs.
- Leurs métadonnées.

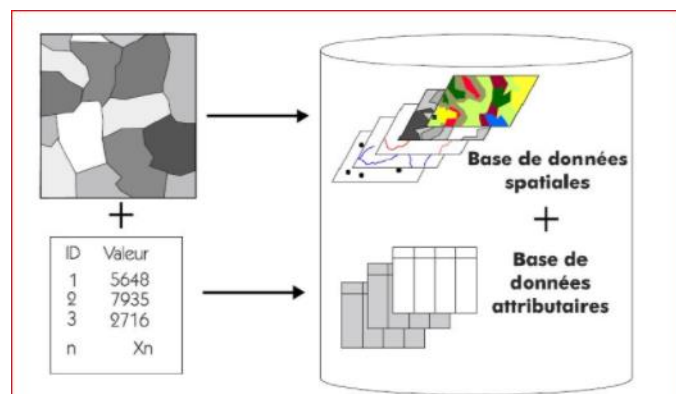


Figure I.14. : Types de données dans un SIG

I.9.2. Données spatiales

Elles déterminent les caractéristiques spatiales d'une entité géographique où sont figurés et reconnus tous les objets graphiques (Figure I.15.) :

- La localisation : sont les coordonnées de l'objet par rapport à un référentiel (méridien de référence).
- La forme : peut-être un point, une ligne, ou un polygone.
- La taille : longueur, périmètre, surface.

Dans les SIG, il y a 2 modes de projection des données géographiques :

Modes de données dans les SIG

Mode vecteur

Ce mode répond au souci de représenter un objet de manière aussi exacte que possible. Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale, on décompose le territoire en couches thématiques (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques. (Figure I.8.2)

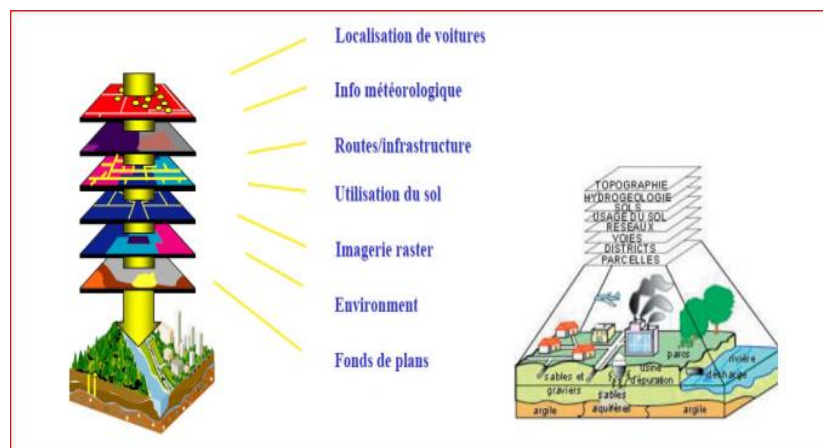


Figure I.15. Mode vecteur

Décomposition du monde réel en couches d'information

Les avantages du mode vecteur sont

- Une meilleure adaptation à la description des entités ponctuelles et linéaires.
- Une facilité d'extraction de détails.
- Une simplicité dans la transformation de coordonnées.

Les inconvénients du mode vecteur sont

- Les croisements de couches d'information sont délicats et nécessitent une topologie parfaite.

Mode raster

Le mode trame ou raster est également appelé modèle matriciel. Contrairement au mode vecteur qui ne décrit que les contours, le mode raster décrit la totalité de la surface cartographique point par point. Il est utilisé principalement dans les systèmes. (Figure I.16.) :

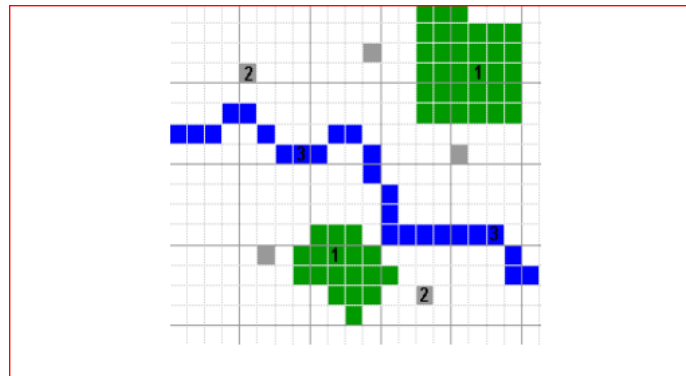


Figure I.16. Mode Raster

Les avantages du mode raster sont

- Meilleure adaptation à la représentation des détails surfaciques.
- Acquisition des données à partir d'un scanner à balayage.
- Meilleure adaptation à certains types de traitements numériques : filtres, classifications.

Les inconvénients du mode raster sont :

- Mauvaise adaptation à la représentation des détails linéaires.
- Obligation de parcourir toute la surface pour extraire un détail.
- Impossibilité de réaliser certaines opérations topologiques, la recherche du plus court chemin dans un réseau par exemple.

I.9.3. Données associées

Les données associées des objets spatiaux complètent la représentation géométrique de l'entité spatiale. En fait, chaque élément de l'espace (c.à.d. point, ligne, ou polygone) reçoit un code d'identification (ID) qui peut être numérique ou littéral.

Ce dernier compose en une étiquette déterminant l'entité spatiale. Parmi les données associées on distingue :

a) Données de classification

Permettent de classer le point, la ligne, ou le polygone dans une classe déterminé tel que le type de parcelle (irrigué, non irrigué), type de route (primaire, secondaire), etc.

b) Données d'identification

Donnent la possibilité de distinguer chaque objet figurant sur la carte, par exemple nom de la commune, numéro de parcelle, numéro de vanne, etc.

c) Données attributaires

Porter une information complémentaire propre à chaque objet identifié, tel que le possesseur de la parcelle, la superficie de la parcelle, etc.

1.10. Mode d'acquisition des données géographiques

L'obtention des données spatiales consiste au rassemblement de différentes sources permettant la saisie des données dans le but de leurs intégrations dans un SIG. Nous exposons dans ce qui suit les différentes méthodes d'acquisition de données spatiales.

1.10.1. Import de fichiers

Il y a généralement trois manières pour importer les données spatiales (Figure I.17.).

Importer une base de données arrangée dans un format interne à un SIG. Cette méthode est valable entre les SIG d'un même type mais elle est compliquée entre des SIG de types ou de versions distinctes.

Importer un fichier texte (txt) contenant tous les renseignements structurés de manière primitive. Il faut noter que cette méthode nécessite un arrangement des données importées pour qu'elles concordent avec la structure interne du SIG.

Passer par une des normes d'échange disponible sur le marché. Ce troisième moyen est le plus économique à long terme

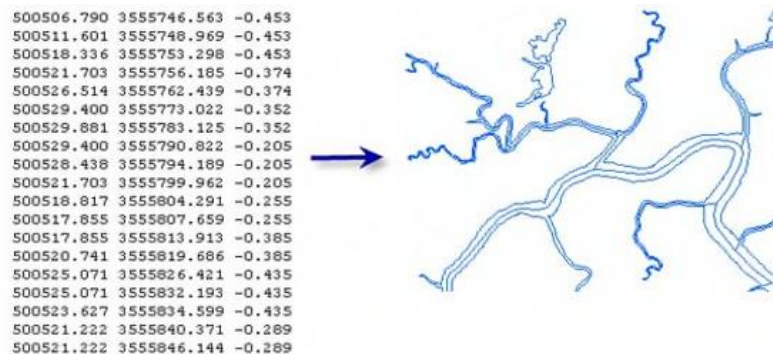


Figure I.17. Exemple d'importation de fichiers vers le SIG

1.10.2. La carte géographique dans le SIG

Qui décrit la forme et les caractéristiques de l'entité tout en la localisant par des coordonnées géographiques ou cartographiques. Une composante attributaire : la légende, qui identifie les entités représentées (figure I.18.).



Figure I.18. Carte géographique dans le SIG

I.11. Les avantages des SIG

- Capacité et fiabilité de stockage
- Rapidité de restitution des données (gain de temps)
- Intégration et combinaison de données de sources différentes
- Précision des processus cartographiques
- Facilité de mise à jour (Outils de suivi)
- Analyse des relations spatiales (Intégration, requête spatiale, Combinaison et superposition de cartes).
- Production de cartes (bon rapport qualité / prix).

I.12. Les inconvénients des SIG

Les principaux inconvénients sont énumérés ci-dessous :

- Le manque de personnel spécialisé et compétant ;
- Coût élevé et problèmes techniques pour l'acquisition des données fiables ;
- Non Standardisation des formats de données ;
- Nécessité d'une mobilisation continue des acteurs.

Chapitre Deuxième

LES METHODE D'INTERPOLATION SPATIALE

LES METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE

II.1. Méthodes d'interpolation

On distingue deux grandes classes : les méthodes déterministes et les méthodes probabilistes. Ces dernières se différencient par le concept du hasard et proposent des modèles probabilistes modélisant les erreurs aléatoires de prévision dans le but d'aider la prise des décisions lors des analyses des risques. Dans ce chapitre, on présente ces méthodes.

II.1.1. Méthodes déterministes

L'idée de base des méthodes déterministes est fondée sur l'observation suivante : les valeurs les plus proches les unes des autres doivent se ressembler plus et par conséquent reçoivent un poids important lors de la modélisation (Figure II.1) présente un résumé des principales méthodes déterministes.

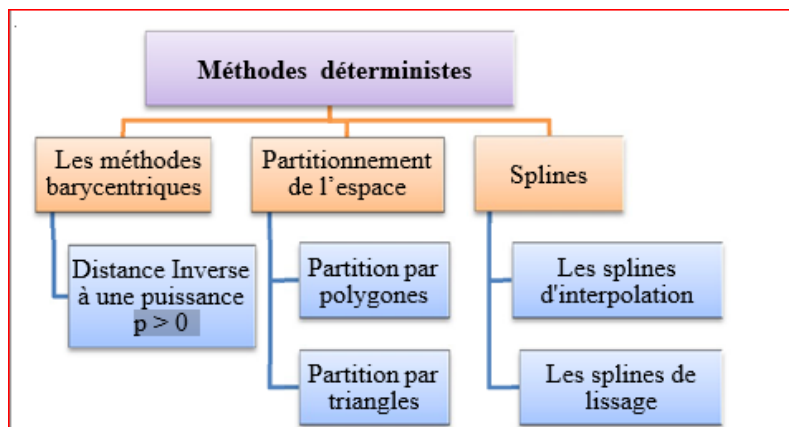


Figure II.1. Résumé des méthodes d'interpolation déterministes

A-Méthodes barycentriques

Les méthodes barycentriques, dans d'autres versions on cite les moyennes mobiles (Ripley B.D 1981) ou encore l'approximation de Kernel (Christakos, 2001), sont très intuitives ; elles estiment la valeur inconnue \hat{z} située S_0 par une simple moyenne pondérée des autres valeurs connues : $\hat{z}(s_i)$: $\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i)$

Avec n est le nombre de données primaires, λ_i sont les poids qui dépendent de la distance euclidienne $h = \|s_i - s_0\|$ entre la position de la valeur observée $Z(s_i)$ et la valeur à estimer (s_i). Plus on s'éloigne de la valeur à estimer, plus le poids λ_i diminue. Un cas particulier se présente pour calculer les λ_i la méthode de l'inverse de distance à une puissance $p > 0$. On peut exprimer $\hat{z}(s_0)$ comme une

combinaison linéaire de plusieurs observations environnantes avec des poids inversement proportionnels au carré de la distance (Goovaerts, 2000b).

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^{de\ s_0} \frac{\frac{1}{\|s_i - s_0\|^p}}{\sum_{i=1}^{nevoisinage\ de\ s_0} \frac{1}{\|s_i - s_0\|^p}}$$

B- Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace

Ces méthodes diffèrent des autres méthodes déterministes par l'utilisation d'une partition Duchamp d'études D lors de la détermination des poids λ_i ainsi que le nombre nécessaire de mesures voisines du point estimé. Comme son nom l'indique, on doit positionner tout d'abord les points cibles (les mesures expérimentales) dans l'espace, puis réaliser l'interpolation spatiale. Pour le positionnement des points, il existe deux types de partitions d'échantillon en régions juxtaposées : une partition par polygones ou par triangles (Baillargeon, 2005).

Dans le premier cas, on définit un polygone pour chaque observation (mesure expérimentale) de façon que chaque point inclus, soit le plus proche du point de mesure que pour les autres polygones à côté. Une de ces méthodes est le partitionnement par polygone de Thiessen (Kergreis et Claude, 1991). Elle permet d'évaluer des moyennes spatiales sur un domaine à partir d'informations ponctuelles. La valeur de l'observation la plus proche est affectée au polygone défini par le vecteurs s_0 :

$$\hat{z}(s_0) = z(s_\alpha) \text{ avec } |s_0 - s_\beta| < |s_0 - s_\alpha| \text{ Quel que soit } \alpha \neq \beta$$

En revanche, pour le deuxième cas, on aura une partition par triangulation où on découpe l'échantillon sous forme de triangles dont les sommets sont des points de mesure. Il suffit donc de relier le point de la mesure à estimer par les trois sommets du triangle qui le contient. Ensuite, le triangle principal est divisé en trois petits triangles. Comme on considère uniquement les valeurs mesurées qui interceptent le triangle de la valeur à estimer, le poids λ_i de chaque valeur mesurée est proportionnel à la surface d'intersection.

C-Splines

Les Splines sont des fonctions qui minimisent l'énergie de flexion sous certaines contraintes d'ajustement (Dubrule, 1983). On distingue essentiellement deux types de Splines : les Splines d'interpolations qui obligent la courbe de passer par tous les points de mesures et les Splines de lissages qui passent à proximité de toutes les mesures sans être forcées de passer par tous ces points (Matheron, 1975) Les travaux de Hastie (Hastie, 1990) ont abouti à des fonctions qui permettent la représentation d'une Spline dans l'espace bidimensionnel tout en contrôlant le passage proximité

des points des mesure de façon à minimiser la courbure. On note aussi l'existence de plusieurs variantes comme les splines multi-quadratiques de Hardy (Hardy, 1971) et les splines régularisées avec tension (Ripley B.D 1981). Finalement, on mentionne les splines la placiennes étudiées également par Hastie et qui utilisent des sous-modèles linéaires pour effectuer une interpolation spatiale multivariable.

II.2. Méthodes probabilistes

L'utilisation des modèles probabilistes, pour décrire le comportement d'une variable aléatoire permet d'évaluer l'incertitude de la valeur estimée. Parmi les méthodes recensées en littérature, on cite la régression, le krigeage et les simulations stochastiques, comme la montre (Figure II.2).

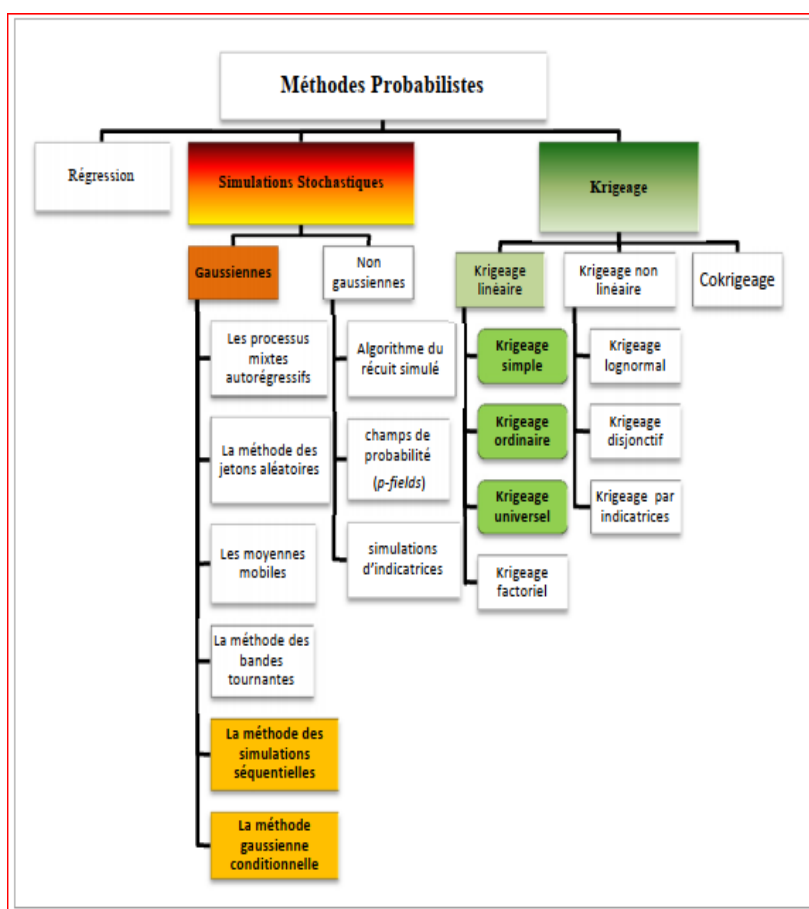


Figure II.2 Les méthodes d'interpolation probabiliste

II.3. Krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale qui prend en compte la structure de dépendance spatiale des données. Le krigeage se caractérise par une interpolation tout en conservant une variance minimale. Les poids des coefficients de krigeage dépendent de la localisation des observations et surtout des structures de dépendance spatiale. La structure de la

dépendance de la fonction aléatoire est déterminée à partir de l'étude Vario graphique travers le modèle du semi variogramme Plusieurs types de krigeage ont été étudiés en littérature :

- Simple (KS)
- Ordinaire (KO)
- Universel

II.3.1. Krigeage ordinaire (KO)

On a vu que le krigeage simple requiert la connaissance de la moyenne pour déterminer les poids de l'estimateur et pour estimer sa variance.

La résolution d'un système de krigeage ordinaire est un problème d'optimisation. On doit trouver les poids en minimisant l'erreur quadratique moyenne.

II.3.2. Propriétés du krigeage

Les principales propriétés et caractéristiques associées au krigeage sont :

- ✓ Linéaire, sans biais, à variance minimale, par construction.
- ✓ Interpolateur exact : si l'on estime un point connu, on retrouve la valeur connue.
- ✓ Présente un effet d'écran : les points les plus près reçoivent les poids les plus importants. Cet effet d'écran varie selon la configuration et selon le modèle de variogramme utilisé pour le krigeage. Plus, l'effet de pépite est important, moins il y a d'effet d'écran.
- ✓ Tient compte de la taille du champ à estimer et de la position des points entre eux.
- ✓ Par l'utilisation du variogramme, tient compte de la continuité du phénomène étudié (effet de pépite, anisotropie, etc.).

II.4. Le Variogramme

La géostatistique a des visées plus modestes. On veut estimer des paramètres statistiques à partir des données et non imposer un modèle à priori qui aurait toutes les chances de s'avérer inadéquat. Les paramètres que l'on cherchera à estimer ne sont pas la fonction de distribution conjointe, ni même la fonction de distribution variable (i.e. les v.a. considérées deux à deux) mais simplement les deux premiers moments (moyenne, variance, covariance) des v.a. prises deux à deux. On ne peut donc estimer les paramètres statistiques sans formuler certaines hypothèses. Ces hypothèses ont uniquement pour but de permettre l'estimation des paramètres statistiques de notre modèle à partir des données. On les appelle hypothèses de stationnarité du second ordre ; elles visent essentiellement à "détacher" les deux premiers moments de localisations précises en permettant

des translations des emplacements x et $x+h$. La covariance (et le Variogramme) devienne donc des fonctions dépendant uniquement de la distance séparant les points d'observation et non plus de leur localisation exacte.

II.4.1. Variogramme théorique

Le semi-variogramme théorique est défini comme :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x) - Z(x+h)] = \frac{1}{2} E \left[(Z(x) - Z(x+h))^2 \right]$$

Cette fonction, habituellement croissante en fonction de h , synthétise beaucoup d'informations concernant le comportement conjoint des variables aléatoires et concernant "la continuité" de la minéralisation.

Ainsi, pour les modèles de variogramme montrant un seuil, on a (figure II.3.) :

A-Portée a : Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout en moyenne, elles ne sont plus liées (covariance nulle) linéairement. À cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance de la variable aléatoire.

B-Palier $\sigma^2 = C_0 + C$: Variance de la v.a. (Var($Z(x)$)) Écarts les plus grands, en moyenne entre deux v.a.

C- Effet de pépite C_0 : Variation à très courte échelle, erreurs de localisation, erreurs d'analyse et précision analytique.

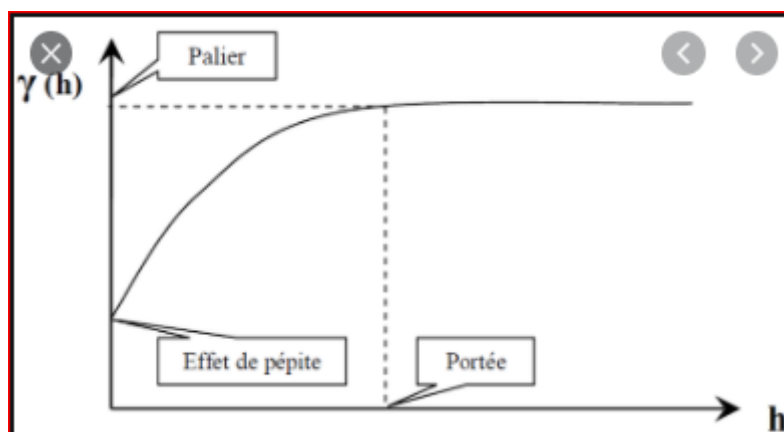


Figure II.3. Schéma type d'un variogramme

II.4.2. Le semi-variogramme expérimentale

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 (x), en calculant la différence entre deux échantillons x_1 et x_2 situés deux points z_1 et z_2 d'un domaine spatial. Cette différence notée s'écrit :

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

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.

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

En formant la moyenne des dissemblances 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.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_i^{N(h)} [(Z(x) - Z(x + h))^2]$$

Où : $N(h)$ représente le nombre de paires d'observations séparées par la distance h . (Graphique II.4.) :

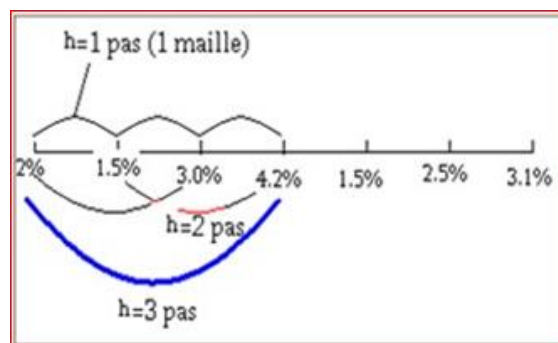


Figure II.4. Schéma de calcul du variogramme expérimental

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

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

$N(h, \theta)$: est le nombre de paires de points séparés d'une distance h dans la direction θ . (Figure II.5.) :

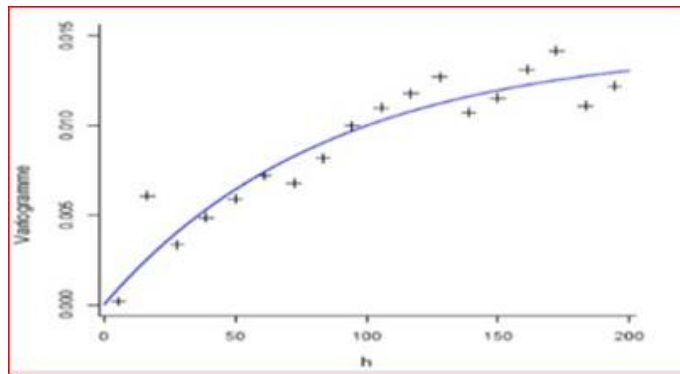


Figure II.5. Ajustement d'un modèle théorique (courbe) à un modèle expérimental(croix)

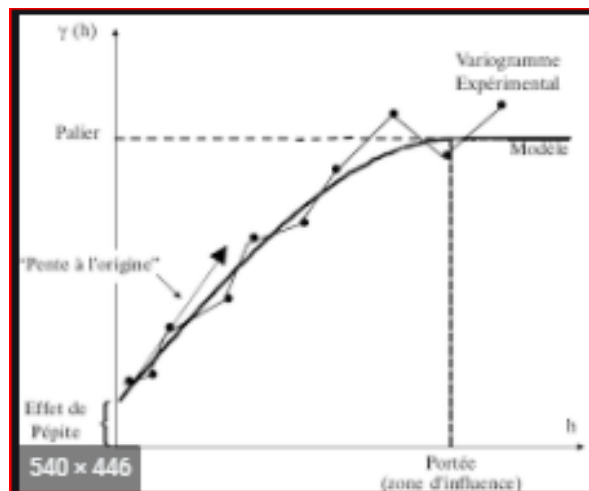


Figure II.6. Graphe d'un variogramme expérimental et son modèle d'ajustement

Il existe un nombre important de modèles de semivariogramme, nous mentionnons les plus importants aux modèles suivants :

A-Modèle exponentiel

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-3\frac{h}{a}\right) \right]$$

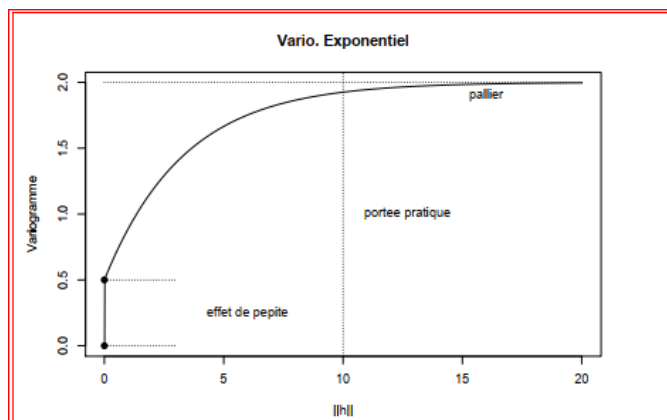


Figure II.7. Modèle type de semi-variogramme exponentiel

B-Modèle gaussien :

$$\gamma(h) = C \left[1 - \exp\left(-3 \left(\frac{h}{a}\right)^2\right)\right]$$

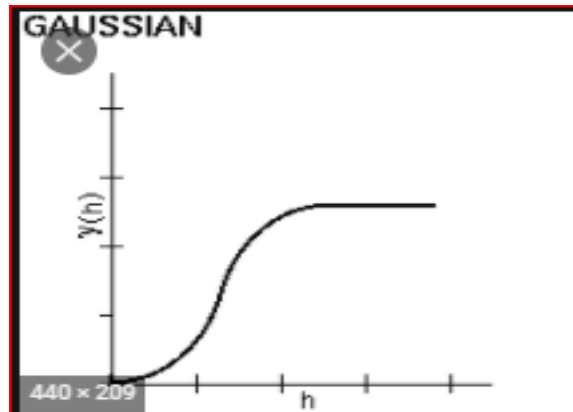


Figure II.8. Modèle type de semivariogramme gaussien

C-Modèle sphérique :

$$\gamma(h) = \begin{cases} c \left[\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \right] & \text{si } 0 < h < a \\ C & \text{si } h \geq a \end{cases}$$

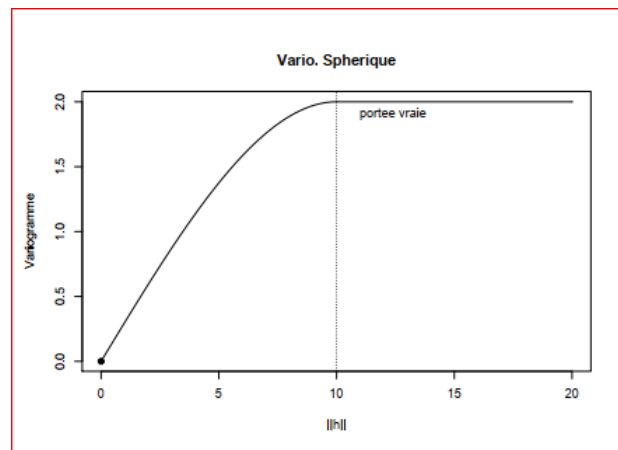


Figure II.9. Modelé type de semi-variogramme sphérique

Chapitre Troisième

OUTILS NUMERIQUE UTILISE

LOGICIEL SURFER

OUTILS NUMERIQUE UTILISES

III.1. Introduction

Le logiciel Surfer 16, conçu par Golden Software, vous permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données que vous aurez récoltées sur le terrain via DGPS. Le principe de Surfer est le suivant : le logiciel vous permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières de vos points x, y, z afin de les ordonner. C'est à partir de ces grilles qu'on pourra créer plusieurs types de cartes : base Map, contour Map, 3D surface, vector et bien d'autres.

Les possibilités d'utilisation sont nombreuses. Avant de commencer, sachez qu'il existe un tutoriel complet dans le logiciel dans lequel chaque manipulation possible est expliquée. Il existe également un lien vers le site officiel de Golden Software sur lequel vous trouverez quelques vidéos pédagogiques, des explications et des forums bien fournis.

Le but à travers ce tutoriel est de faire gagner du temps aux nouveaux stagiaires qui prennent le relais du réseau de surveillance de l'action 6 afin de leur éviter de longues recherches. Cependant, gardez à l'esprit que ces outils existent.

III.2. Présentation de l'interface du logiciel

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

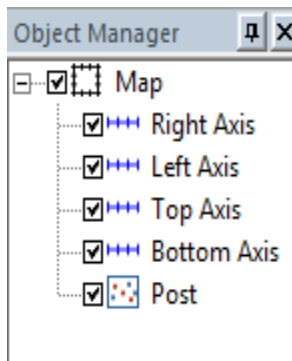
Une barre des menus en haut (Figure III.1).



Figure III.1. Barre des menus

Nous utiliserons principalement les menus Grid et Map un cadre principal (plot) dans lequel s'affichera vos cartes au centre, et à gauche, le cadre objet manager (Figure III.2) dans lequel vous pourrez modifier la disposition de vos données, les afficher ou les supprimer, en modifier la symbologie, etc. Par analogie, cela ressemble aux calques d'Adobe Illustration ou plus encore aux couches des logiciels de SIG.

a. object manager



b. plot

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

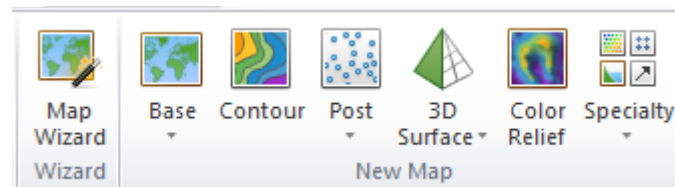


Figure III.2. différentes cartes possibles.

III.2.1. Mise en forme le fichier Excel

Vos données de terrain une fois téléchargées sont affichées sous Excel (Figure III.3.). Comme pour Profiler, il faudra effectuer un premier traitement sur Excel qui ressemblera fort à celui de Profiler avec néanmoins quelques petites différences.

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

	A1	Easting		
	A	B	C	z
1	Easting	Northing	Elevation	
2	0.1	0	90	
3	3.5	0	45	
4	4.9	0	65	
5	6.2	0	40	
6	7	0	55	
7	9	0	25	
8	9	5	55	
9	9	3	48	
10	9	7	45	

Figure III.3. Worksheet Surfer

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

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

III.2.2. Affichage des points

A partir de votre simple fichier Excel (Figure III.4), vous pouvez afficher vos points. Allez dans Map ; contour Map (Figure III.5). Les points de votre plage s'affichent dans le plot. Dans Object manager s'affichent les composants de votre Map (axes, titre, type d'affichage...).

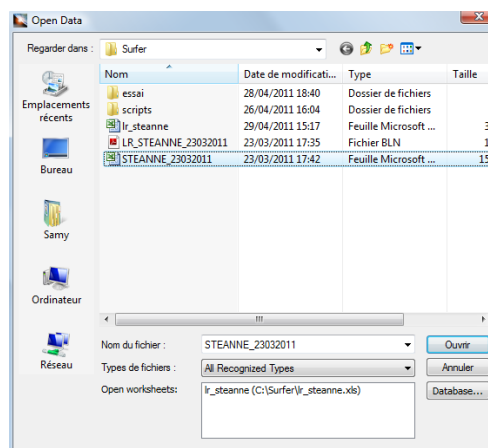


Figure III.4. Grille ouverte

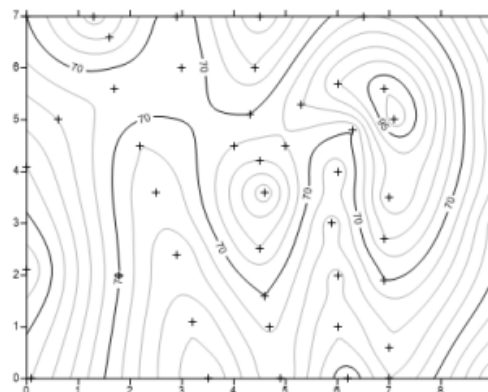


Figure III.5. Carte de contour

III.3. Ouverture d'autres cartes

A partir du menu Map (new), amusez-vous à expérimenter les contour Map, image Map, Shaded Relief Map, grid vector, 3D wireframe, 3D surface. Toutes ces cartes s'ouvrent à partir d'une grille. A vous de découvrir les spécificités de chacune. Pour plus de précisions sur la manière dont elles sont produites, je vous renvoie au tutoriel et au site internet (Figure III.8).

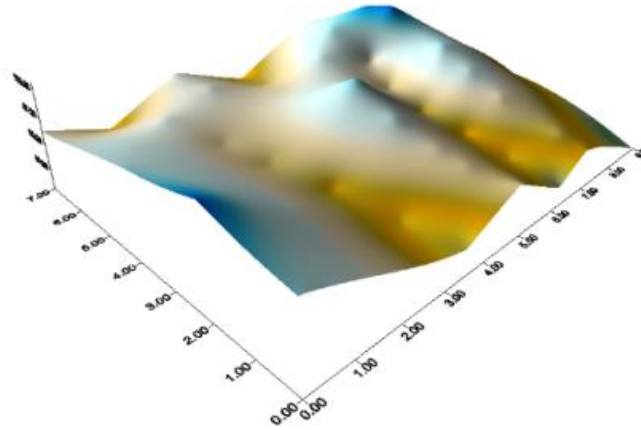


Figure III.6. 3D Surface Map

III.4. Créer une grille x, y, z

La Fenêtre (Figure III.7.) ci-dessous s'affiche. Les colonnes A, B, C représentent l'emplacement de vos coordonnées x, y, z. Cliquez sur view data pour vous assurer qu'elles correspondent bien. Si ce n'est pas le cas, vous pouvez les intervertir.

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

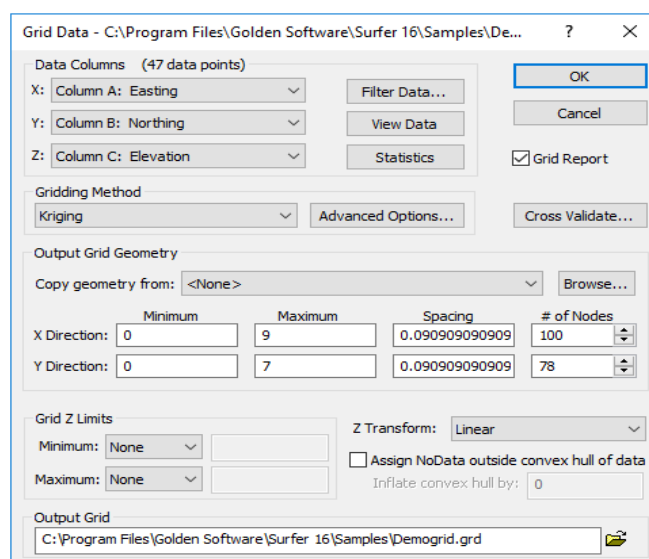


Figure III.7. Les options de quadrillage.

III.5. Les Méthodes de quadrillage (Gridding Methods)

Les paramètres de la méthode de grille contrôlent les procédures d'interpolation. Lorsque vous créez un fichier de grille, vous pouvez généralement accepter la méthode de quadrillage par défaut et produire une carte acceptable. Chaque méthode aboutit à une représentation différente de vos données. Il est avantageux de tester chaque méthode avec un ensemble de données typique pour déterminer la méthode de quadrillage qui vous fournit l'interprétation la plus satisfaisante de vos données.

III.6. Les méthodes de quadrillage comprennent

- Distance inverse à une puissance
- Le krigeage
- Minimum Curvature
- Voisin naturel
- Voisin le plus proche
- Régression polynomiale
- Triangulation avec interpolation linéaire

III.6.1. Distance inverse à une puissance

Avec la distance inverse à une puissance, les données sont pondérées pendant l'interpolation de telle sorte que l'influence d'un point par rapport à un autre diminue avec la distance du nœud de la grille. La pondération est attribuée aux données via l'utilisation d'une puissance de pondération qui contrôle la façon dont les facteurs de pondération diminuent à mesure que la distance par rapport à un nœud de grille augmente. Plus la puissance de pondération est élevée, moins il y a de points d'effet éloignés du nœud de grille lors de l'interpolation. À mesure que la puissance augmente, la valeur du nœud de grille se rapproche de la valeur du point le plus proche. Pour une puissance plus petite, les poids sont répartis plus uniformément entre les points de données voisins (Figure III.8.).

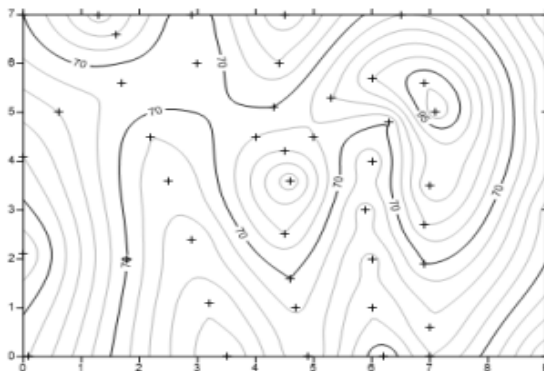


Figure III.8. Distance inverse à une puissance grille

III.6.2. Méthode de Shepard modifiée

Utilise une méthode des moindres carrés pondérés par la distance inverse. En tant que telle, Inverse Distance to a power modifiés est similaire à la distance inverse à un interpolateur de puissance, mais l'utilisation des moindres carrés locaux élimine ou réduit l'apparence « dans le mille » des contours générés. La méthode de Shepard modifiée peut-être soit un interpolateur exact, soit un interpolateur de lissage. Comme le montre dans la figure ci-dessous (Figure III.9.).

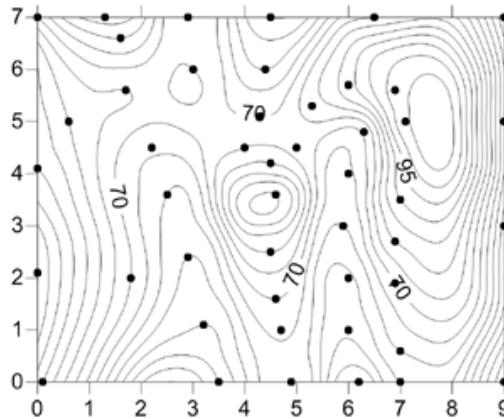


Figure III.9. Modified Shepard's Method grille

III.6.3 Triangulation avec interpolation linéaire

La méthode de triangulation avec interpolation linéaire de Surfer utilise la triangulation de Delaunay optimale. L'algorithme crée des triangles en dessinant des lignes entre les points de données. Les points d'origine sont connectés de telle manière qu'aucune arête de triangle ne soit coupée par d'autres triangles. Le résultat est un patchwork de faces triangulaires sur l'étendue de la grille (Figure III.10.). Cette méthode est un interpolateur exact.

La triangulation avec interpolation linéaire fonctionne mieux lorsque vos données sont uniformément réparties sur la zone de la grille. Les ensembles de données qui contiennent des zones clairsemées donnent des facettes triangulaires distinctes sur la carte.

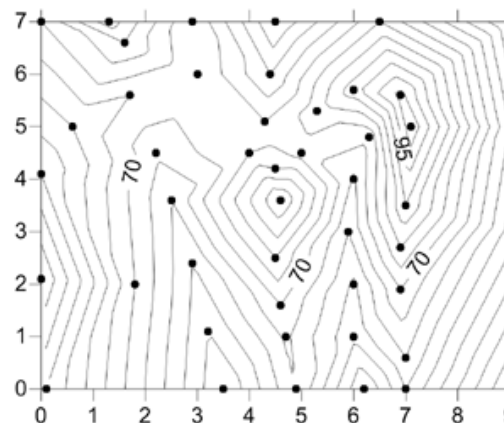


Figure III.10. Triangulation with Linear Interpolation grille

III.6.4 Métriques de données

La collecte de méthodes de quadrillage de métriques de données crée des grilles d'informations sur les données nœud par nœud. Les méthodes de quadrillage des métriques de données ne sont pas, en général, des interpolateurs moyens pondérés des valeurs Z. Par exemple, vous pouvez obtenir des informations telles que :

- Le nombre de points de données utilisés pour interpoler chaque nœud de grille. Si le nombre de points de données utilisés est assez égal à chaque nœud de grille, alors la qualité de la grille à chaque nœud de grille peut être interprétée
- L'écart type, la variance, le coefficient de variation et l'écart absolu médian des données à chaque nœud de la grille. Ce sont des mesures de la variabilité dans l'espace de la grille et sont des informations importantes pour l'analyse statistique
- La distance au point de données le plus proche. Par exemple, si les valeurs XY d'un ensemble de données sont des emplacements d'échantillonnage, utilisez la métrique de données Distance au plus proche pour déterminer les emplacements des nouveaux emplacements d'échantillonnage. Une carte de contour de la distance au point de données le plus proche, quantifie où une densité d'échantillonnage plus élevée peut être souhaitée

Data Metrics grille dans la figure ci-dessous (Figure III.11.)

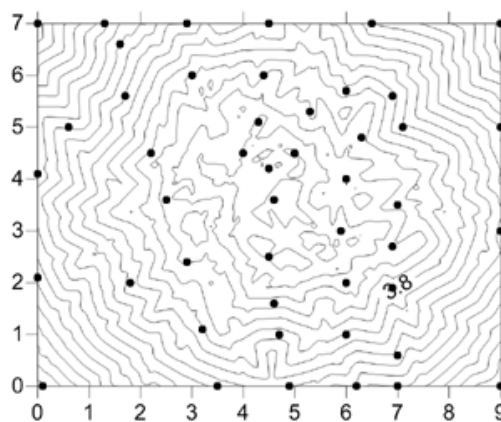


Figure III.11. Métriques de données grille

III.6.5. Le krigeage

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

Le krigeage (Figure III.12) est une méthode de quadrillage très flexible. Vous pouvez accepter les valeurs par défaut du krigeage pour produire une grille précise de vos données, ou le krigeage peut être personnalisé sur un ensemble de données en spécifiant le modèle de variogramme approprié. Dans Surfer, le krigeage peut être un interpolateur exact ou un interpolateur de lissage en fonction des paramètres spécifiés par l'utilisateur. Il intègre l'anisotropie et les tendances sous-jacentes de manière efficace et naturelle.

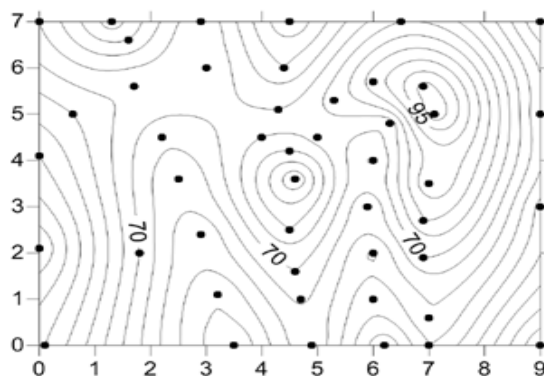


Figure III.12. Grille de krigeage

Dans la boîte de dialogue (Figure III.13.) Données de grille, spécifiez Krigeage comme méthode de quadrillage et cliquez sur le bouton Options avancées pour ouvrir la boîte de dialogue Options avancées de données de grille.

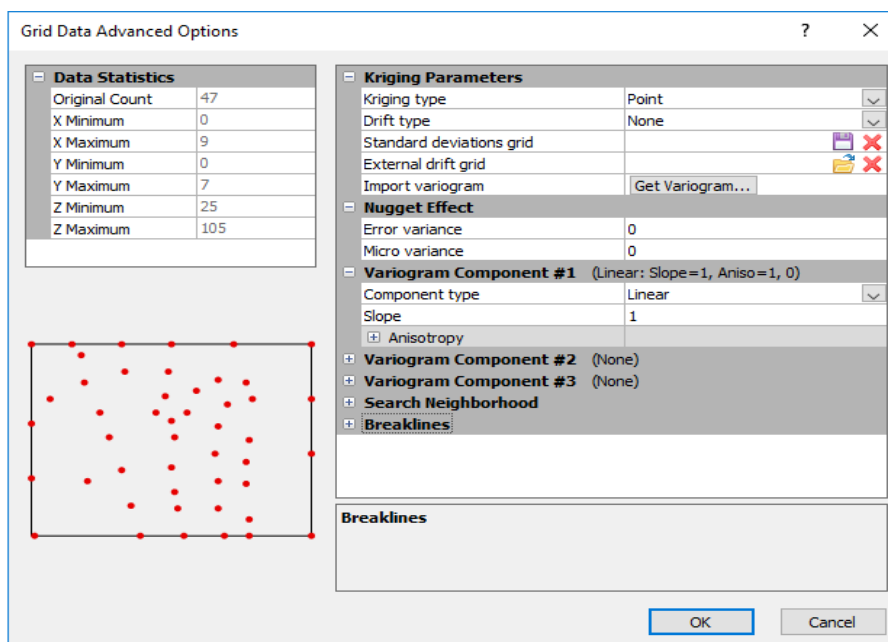


Figure III.13. Boîte de dialogue Options avancées de krigeage

III.7. Composants du variogramme

La figure (III.14.) présente une fenêtre qui permet de choisir les propriétés du krigeage. Si vous n'avez pas modélisé le variogramme, laissez le variogramme réglé sur les valeurs par défaut d'origine (variogramme linéaire ; pente = 1, anisotropie = 1,0 ; pas d'effet de pépite).

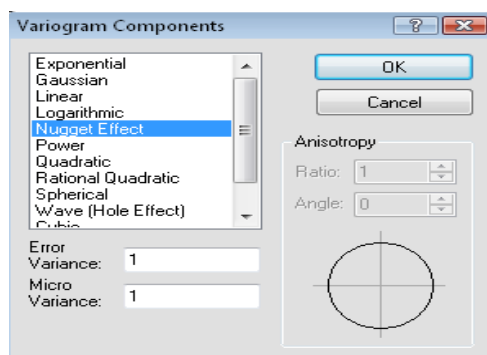


Figure III.14. Composants du variogramme

III.7.1. Liste des modèles de variogramme

Les principaux modèles implémentés dans le logiciel Surfer sont : Exponential, Gaussian, Linear, Logarithmic, Nugget Effect, Power, Quadratic, Rational Quadratic, Spherical, etc.

III.7.2. Fenêtre expérimentale de variogramme

La Fenêtre Expérimental de la Fenêtre Propriétés (Figure 3.15.) contient des paramètres pour le variogramme expérimental tels que la direction du décalage, le type d'estimateur, la distance de décalage maximale, le nombre de décalages, la largeur du décalage et l'échelle verticale

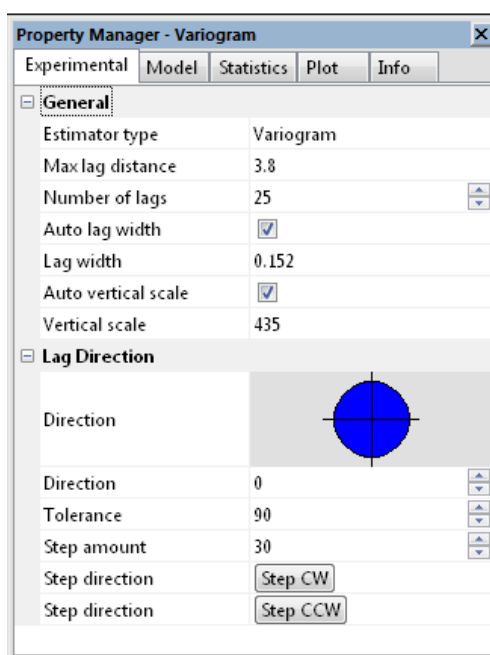


Figure III.15. La Fenêtre des Propriétés du modèle expérimental

La Fenêtre Expérimental de la Fenêtre Propriétés (Figure III.15.) contient les paramètres du variogramme expérimental. Le diagramme de la section Direction du décalage montre la direction et la taille de la Fenêtre angulaire du variogramme actuel.

III.7.3. Fenêtre modèle

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

La Fenêtre Modèle de la boîte de dialogue Propriétés (Figure III.16.) du variogramme vous permet de définir un modèle de variogramme spécifique et ses paramètres. Calculer un variogramme expérimental à partir de vos données est le seul moyen sûr de déterminer quel modèle de variogramme vous devez utiliser. Il y a de longs chapitres dans de nombreux manuels de géostatistique traitant des outils et des techniques nécessaires pour générer un variogramme

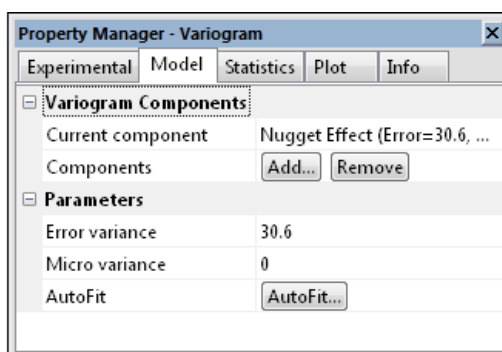


Figure III.16. La boîte de dialogue Propriétés

III.7.4. Graphiques du modèle de variogramme

En cas de doute, vous devez utiliser le modèle de variogramme linéaire avec les paramètres par défaut seuil (C) et portée (a). Dans les propriétés du variogramme de la Fenêtre Propriétés, cliquez sur l'onglet Modèle. Cliquez sur le bouton Ajouter pour ouvrir la boîte de dialogue Ajouter un composant. Sélectionnez l'un des composants du modèle de variogramme (Figure III.17.) et cliquez sur le bouton OK.

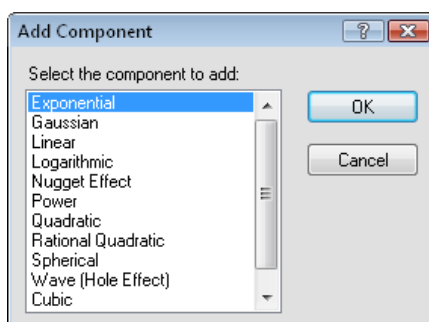


Figure III.17. Les modèles de variogramme

III.7.5. Fenêtre Statistiques

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

Dans la boîte de dialogue Statistiques, vous pouvez afficher un histogramme X, Y ou Z, afficher des statistiques ou générer un rapport de variogramme (Figure III.18.).

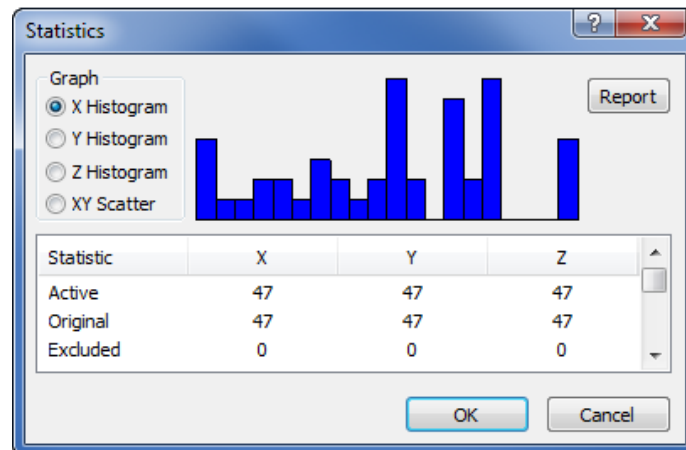


Figure III.18. Statistiques

III.7.6. Éditeur de grille

L'éditeur de grille vous permet également d'ouvrir un fichier image et de l'enregistrer en tant que fichier de grille (Figure III.19.).

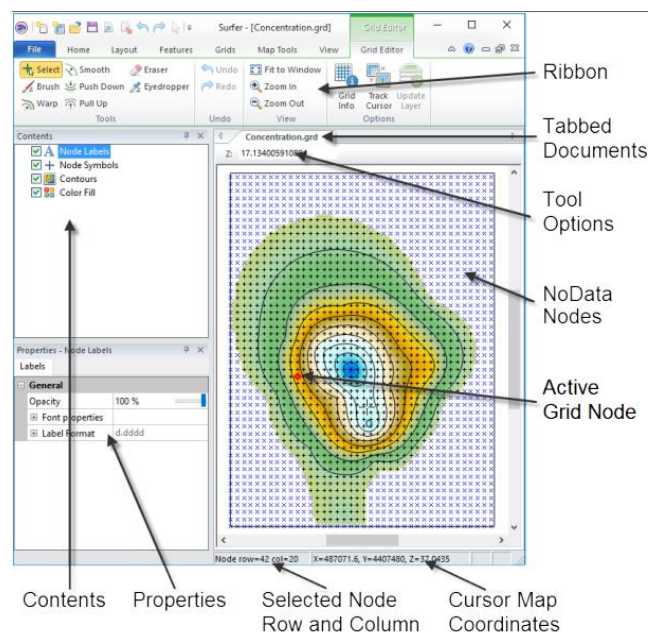
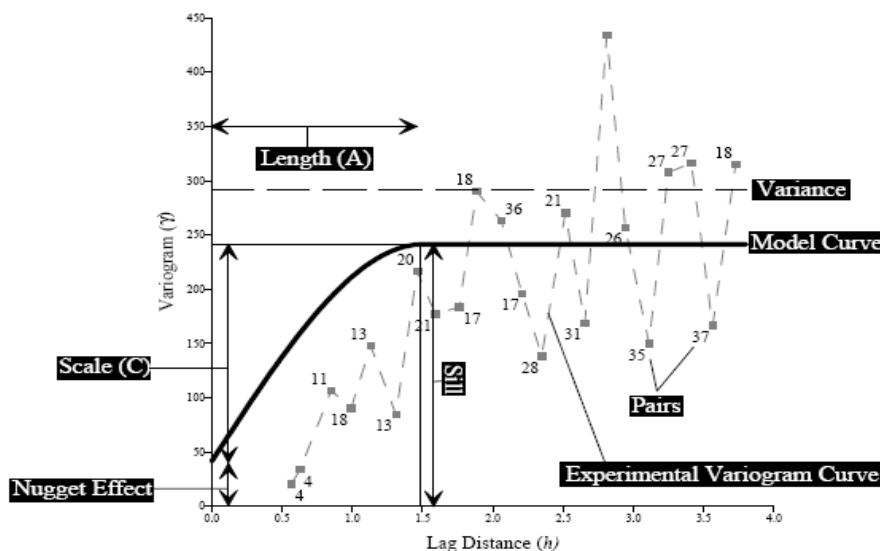


Figure III.19. L'éditeur de grille

III.8. Montage du variogramme surfer

III.8.1.les paramètres du variogramme

Le modèle de variogramme spécifie mathématiquement la variabilité spatiale de l'ensemble de données et du fichier de grille résultant. Les poids d'interpolation, qui sont appliqués aux points de données pendant les calculs des nœuds de grille, sont des fonctions directes du modèle de variogramme (Figure III.20)



III.8.1.a. Effet de pépité

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

III.8.1.b. Le seuil partiel

Le seuil partiel (c_1) est de la composante verticale structurée du variogramme.

III.8.1.c. Le seuil

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

III.8.1.d. La portée

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

III.8.1.e. La variance

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

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

Chapitre Quatrième

VALIDATION SUR UN CAS REEL

CARTE DE SALINITE D'UNE PARCELLE SITUEE DANS LE

PERIMETRE IRRIGUE DE LA MINA, RELIZANE

VALIDATION SUR UN CAS REEL

Carte de salinité d'une parcelle située dans le périmètre irrigué de la Mina, Relizane

IV.1. Présentation de la zone d'étude

Dans cette analyse, nous avons utilisé un ensemble de données spatiale de la salinité, sur une parcelle cultivée, située au niveau de la plaine de Mina dans la wilaya de Relizane en Algérie (INSID,2008). La figure IV.1, représente la position des 64 points relevés sur le site de la plaine de Mina à la l'Est de la commune El Matmar dans la wilaya de Relizane situé à l'ouest Algérien (ANRH, 2003).

IV.2. Données utilisées

IV.2.1. Données graphiques

Les limites administratives des communes de la wilaya de Relizane et de toute l'Algérie sont fournies sous fichiers de forme dite « Shapefile ». Afin de limiter la zone d'étude dans la région de Mina, un fichier de forme (shapefile) est géoréférencé dans le même système de coordonnées de référence.

IV.2.2. Données tabulaires

L'acquisition des données a été réalisé sur terrain à l'aide d'un GPS type Garmin, pour les coordonnées géographiques des points, la prospection sur terrain a nécessité l'utilisation du conductivimètre électromagnétique (EM38) et des prélèvements d'échantillons de sols.

Les échantillons de sol prélevés ont été codés et mis dans des sachets en plastique bien fermés, et envoyés pour les analyses de laboratoire à l'Institut National des Sols, Irrigation et Drainage (INSID) d'El Matmar (Relizane). La meilleure méthode consiste à intervenir après des pluies importantes qui homogénéisent les profils hydriques des sols (Job. J.O., et al. 1990).

Les données attributaires sont organisées dans un fichier Excel sous format (N, x, y, Conductivité électrique ou son logarithme) (tableau IV.1).

Tableau IV.1. Extrait de la table des données format EXCEL

N	x (m)	y (m)	CE _{ps}	LogCE
P1	273730.83	3960403.53	9.72	0.988
P2	273781.06	3960402.25	6.93	0.841
P3	273831.3	3960400.96	9.8	0.991
...

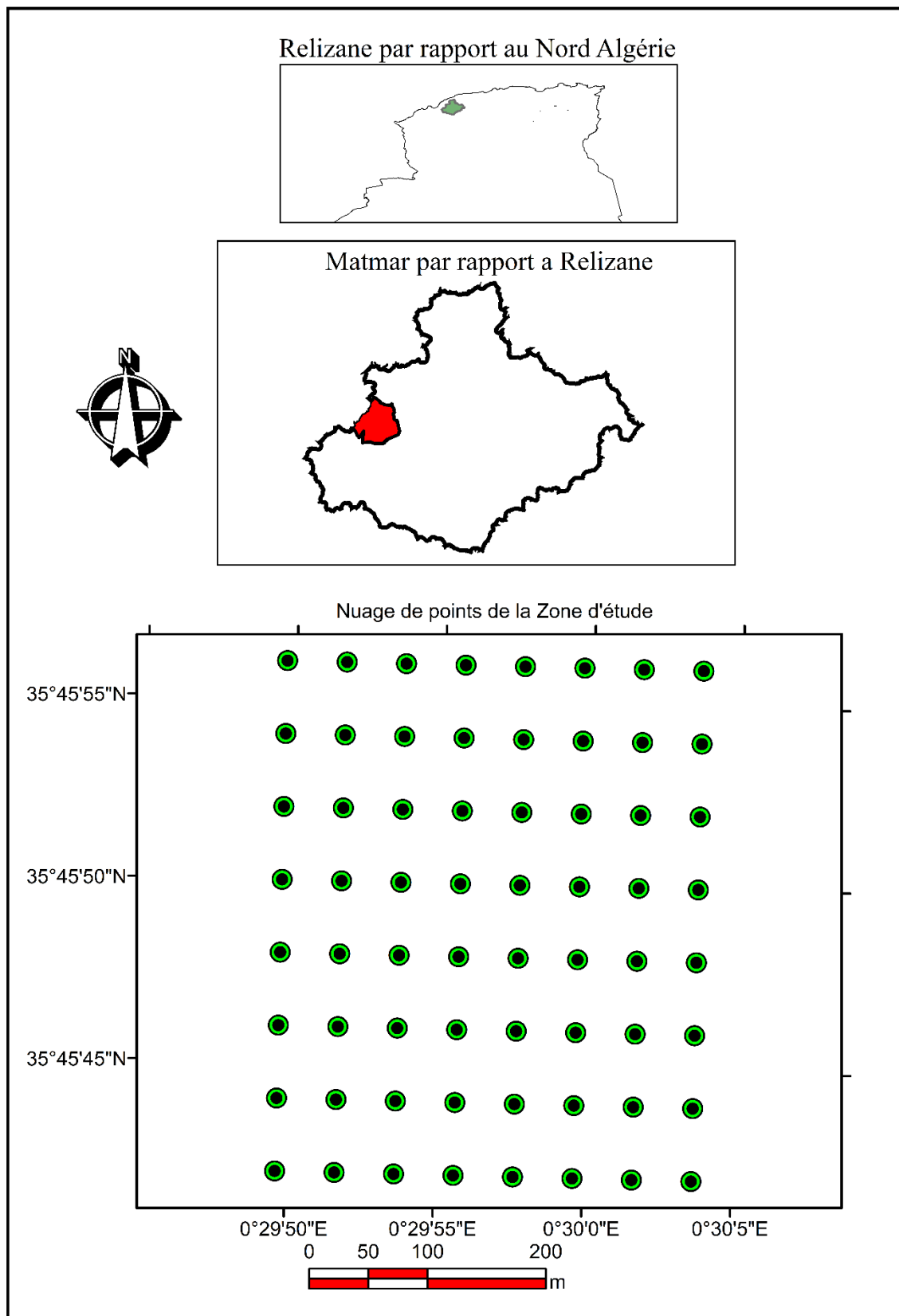


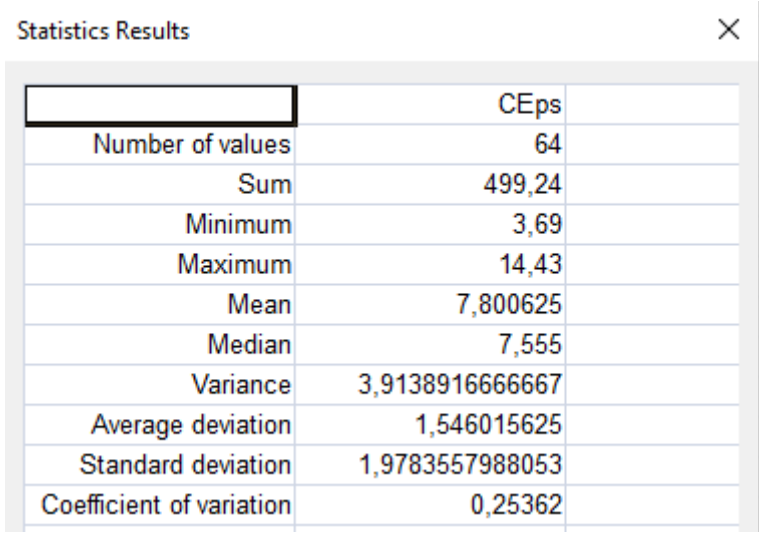
Figure IV.1. Situation de la zone d'étude Mina par rapport à la wilaya de Relizane et à L'Algérie

IV.2.3. Analyse statistique de la série des altitudes des points mesurés :

Un fichier de données sous format Excel, comprenant les coordonnées UTM et le paramètres d'étude qui est la conductivité électrique (CE) a été introduit sous format de points dans système d'information géographique (SIG) à l'aide du logiciel Golden Surfer Version 16.3 (Golden Software 2019).

A l'aide du logiciel Surfer on détermine directement les paramètres statistiques de la colonne conductivité électrique (CE_{ps}) du fichier d'entrée.

Commande : Data – Statistics d'où les résultats affichés sur la figure IV.2.



	CEps
Number of values	64
Sum	499,24
Minimum	3,69
Maximum	14,43
Mean	7,800625
Median	7,555
Variance	3,9138916666667
Average deviation	1,546015625
Standard deviation	1,9783557988053
Coefficient of variation	0,25362

Figure IV.2. Statistique de la série d'altitudes

IV.3. La prédiction Spatiale de la conductivité électrique aux points « non mesurés »

Pour déterminer la conductivité électrique aux points « non mesurée » à partir des « points mesurées » on a utilisé la méthode d'interpolation « Kriging » implémentée dans le logiciel Golden Software Surfer 16.3.

IV.3.1. Les étapes de l'interpolation spatiale

Pour prédire les valeurs des altitudes inconnues des points de la surface étudiée on doit suivre les étapes suivantes :

- importer le fichier Excel données dans le logiciel ;
- la création d'une grille (GRId_Datas) ;
- le choix de la méthode d'interpolation (Kriging) (figure IV.3);

- l'établissement du variogramme ;
- l'ajustement du modèle du variogramme ;
- génération de la carte (contour) ou toutes autres formats de représentation.

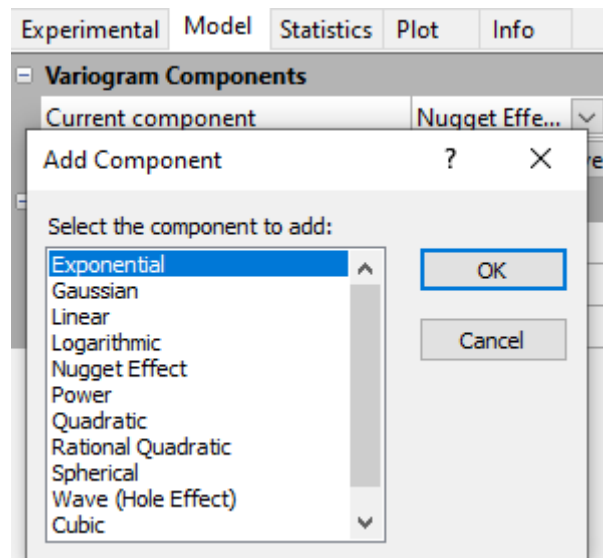


Figure IV.3. Choix du modèle du semi-variogramme

IV.3.2. Les résultats de d'Interpolation par Krigeage

Le modèle de variogramme choisi et ajusté permet le passage à l'interpolation par krigeage, le résultat est enregistré dans un fichier graphique sous format « Grid ».

Une validation croisée permet de vérifier la fiabilité de la prédiction en recalculant l'altitude d'un point mesurée en supposant qu'elle est inconnue et de déterminer le résidu correspondant, le résultat est sauvegardé dans un fichier texte de format « Dat ».

Ensuite une carte d'isovaleurs est régénérée par les courbes de niveau à l'aide de l'outil « New Contour Map ».

IV.4. La Variographie

Afin de comparer les résultats de prédiction par krigeage, on a utilisé les modèles de variogramme les plus utilisés à savoir « model Exponential, Gaussian et Spherical ».

Les (03) variogrammes expérimentaux « Exponential, Gaussian et Spherical » (points reliés par une ligne brisée en noir) et variogrammes mathématique correspondant (en bleu) sont représentés sur la figure IV.4.

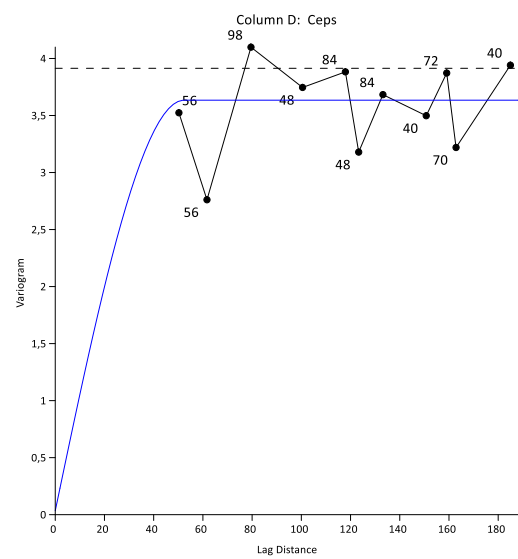
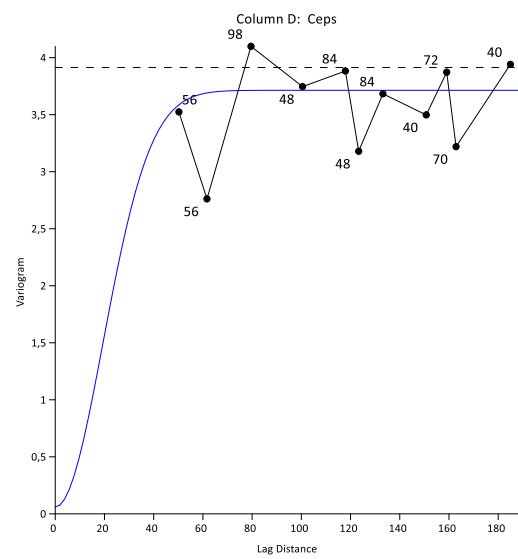
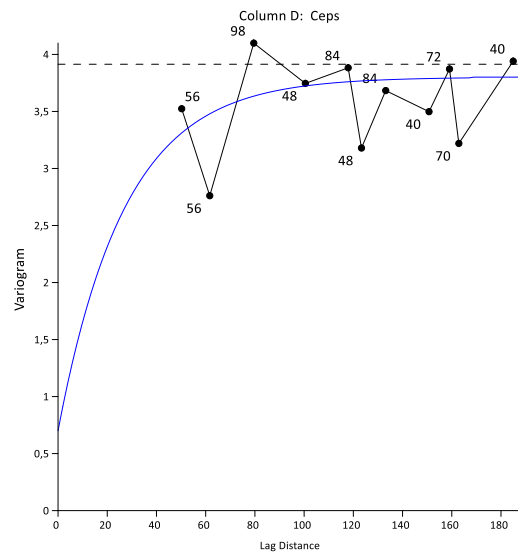


Figure IV.4. Modèle variographique expérimental (noir) et mathématique ajusté (bleu)

Dans haut en bas : modèle Exponentiel, de Gauss et Sphérique

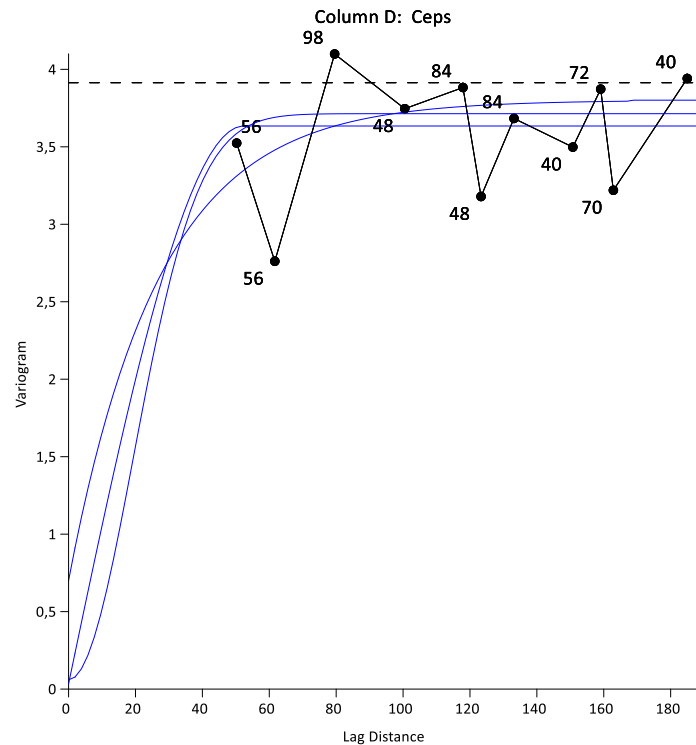


Figure IV.5. Superposition des (03) modèles variographique mathématique ajusté (bleu) et le modèle expérimental (noir)

Les propriétés des trois modèles utilisés sont les suivantes (tableau IV.2.) :

- Même seuil ou palier (Scale / Partiel sill) ;
- Même portée (Lenght) ;
- Les mêmes effets de pépites (Nugget) pour les modèles de Gauss et Sphérique ;
- Un effet de pépité différents pour le modèle Exponentiel.
- L'anisotropie (Anisotropy)

Tableau IV.2. Propriétés des trois modèles de variogramme

Modèle	Seuil partiel (c_1)	Pépité (c_0)	Seuil total (c_0+c_1)	Portée (a)	Anisotropie
Exponential	3.100	0.00100	3.100100	52.00	2.00
Gaussian	3.654	0.05979	3.71379	52.85	2.00
Spherical	3.600	0.03427	3.603427	59.76	1.73

De point de vue paramètres, dans notre cas, le modèle le plus ajusté aux variogramme expérimental est le modèle de Gauss.

IV.5. Le Krigeage

Après le choix du modèle de semi-variogramme, l'interpolation par krigeage nous permet d'établir des cartes de prédiction en isovalues de la conductivité électrique (figure IV.5.).

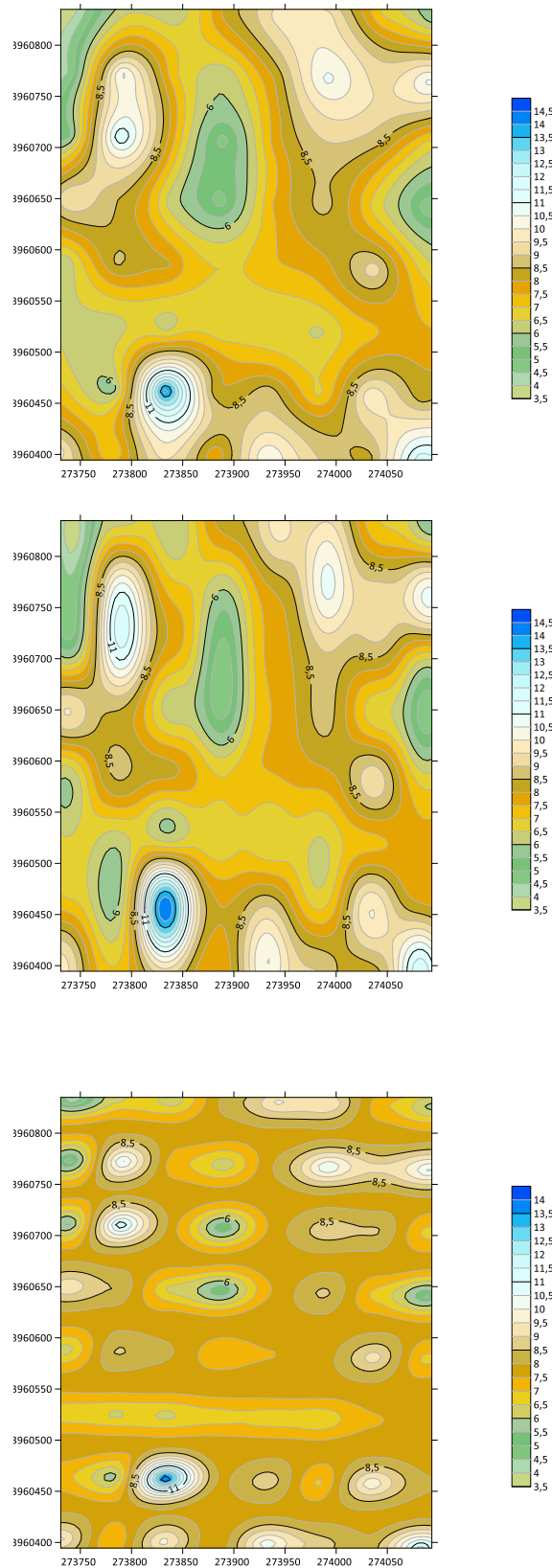


Figure IV.6. Cartes des isovalues (CEps) obtenues par interpolation par Krigeage
Dans l'ordre de haut en bas : modèle Exponentiel, de Gauss et Sphérique

IV.6. Comparaison des résultats des méthodes d'Interpolation

Ces modèles tentent d'ajuster au mieux la croissance du variogramme pour les courtes distances (excepté le premier point), et tiennent en compte des oscillations du variogramme expérimental pour les grandes distances.

Il arrive en pratique que les variogrammes montrent une ordonnée non nulle à l'origine, que l'on appelle effet de pépité. Cet effet de pépité peut provenir de fortes variations locales des valeurs de la propriété ou être attribué soit à des erreurs de mesure, soit au fait que les données n'ont pas été récoltées à un intervalle de mesure suffisamment petit pour pouvoir observer la structure sous-jacente continue du phénomène. Un comportement avec effet de pépité est donc très courant dans l'analyse spatiale des données. Néanmoins, pour la présente étude, un effet de pépité très faible voire nulle a été introduit pour modéliser le variogramme expérimental.

IV.7. Validation croisée

Une fois les modèles de variogramme choisis, la procédure de validation croisée permet de comparer l'impact de ces différents modèles sur les résultats de l'estimation. Le principe de cette technique de validation des modèles de variogramme est le suivant : une mesure $z(x_j)$ est temporairement soustraite du jeu de données $(z(x_i))_{i=1, p}$. La valeur de z en ce point x_j est alors réestimée par krigeage en utilisant l'information sur les points de mesure restants $(z(x_i))_{i \neq j}$ et le modèle de variogramme $\gamma_z(h)$. Notons $z^*(x_j)$ cette estimation. Suite à la résolution du système de krigeage, la variance théorique de l'erreur d'estimation en ce point x_j peut être calculée, notons-la σ_j^2 . Cette opération, menée pour tous les points $(x_i)_{i=1, p}$ pris un à un, permet de comparer l'erreur d'estimation expérimentale (différence entre la valeur réestimée par krigeage $z^*(x_j)$ et la valeur réelle mesurée $z(x_j)$) et l'erreur d'estimation due au modèle de variogramme à travers les résultats de l'erreur moyenne, l'écart type, l'erreur standardisée et l'erreur moyenne quadratique.

La moyenne de l'erreur, qui doit tendre vers zéro, permet de vérifier si le krigeage est effectivement non-biaisé.

La variance de l'erreur standardisée, qui doit se rapprocher de 1, correspond au rapport entre les variances expérimentale et théorique de krigeage. Elle permet de vérifier que les erreurs de krigeage sont cohérentes avec la variance calculée. Les points x_i pour lesquels l'erreur standardisée $(z^*(x_i) - z(x_i)) / \sigma_i$ est comprise dans l'intervalle $[-2.5 ; 2.5]$ (par analogie au cas de la loi normale centrée réduite, où cet intervalle contient 95% des valeurs) sont dits robustes. Le tableau IV.3 reprend les valeurs des expressions citées ci-dessus obtenues par validation croisée sur les valeurs de la conductivité électrique du site étudié, pour les trois modèles de variogrammes choisis.

Tableau IV.3. Comparaison des résultats statistiques de la validation croisée pour les (03) modèles de variogrammes choisis

<i>Modèle</i>	<i>Moyenne de l'erreur</i>	<i>Ecart Type</i>	<i>RMS</i>	<i>Erreur standard</i>
<i>Exponentiel</i>	<i>0.0059</i>	<i>2.02</i>	<i>2.00</i>	<i>0.2526</i>
<i>Gaussien</i>	<i>0.0023</i>	<i>1.88</i>	<i>1.86</i>	<i>0.2349</i>
<i>Sphérique</i>	<i>0.0003</i>	<i>2.00</i>	<i>1.99</i>	<i>0.2509</i>

Ces résultats statistiques varient d'un modèle à l'autre.

- Pour les trois modèles, la condition de non-biais semble vérifiée puisque la moyenne des erreurs est faible (≈ 0).
- L'écart type de l'erreur est de l'ordre de 2, signe que l'erreur de krigeage expérimentale est légèrement supérieure à l'erreur théorique.
- L'erreur standardisée, très faible (< 0.26), montre une erreur de krigeage non importante.

Cette procédure de validation croisée indique une bonne adéquation entre le modèle de variogramme Gaussien et les valeurs expérimentales de la conductivité électrique du site du Mina.

Afin de se trouver dans les conditions les plus proches possible des sites de la Mina, le champ de conductivité électrique du cas synthétique sera construit sur base des paramètres de ce modèle Gaussien, de portée $a = 52.85$ mètres et d'un seuil $c = 3.654$, noté :

$$\gamma(h) = 3.654(1 - \exp(-0.001h^2))$$

Pour lequel la longueur de corrélation : $\lambda_{Gauss} = a/\sqrt{3} = 30m$

Ces résultats sont confirmés sur les représentations 3D (figure IV.7.), on distingue :

- le relief du modèle Exponentiel présente des saillies ;
- le modèle Sphérique présente des dépressions ;
- le modèle Gaussien est régulier et présente une surface lisse.

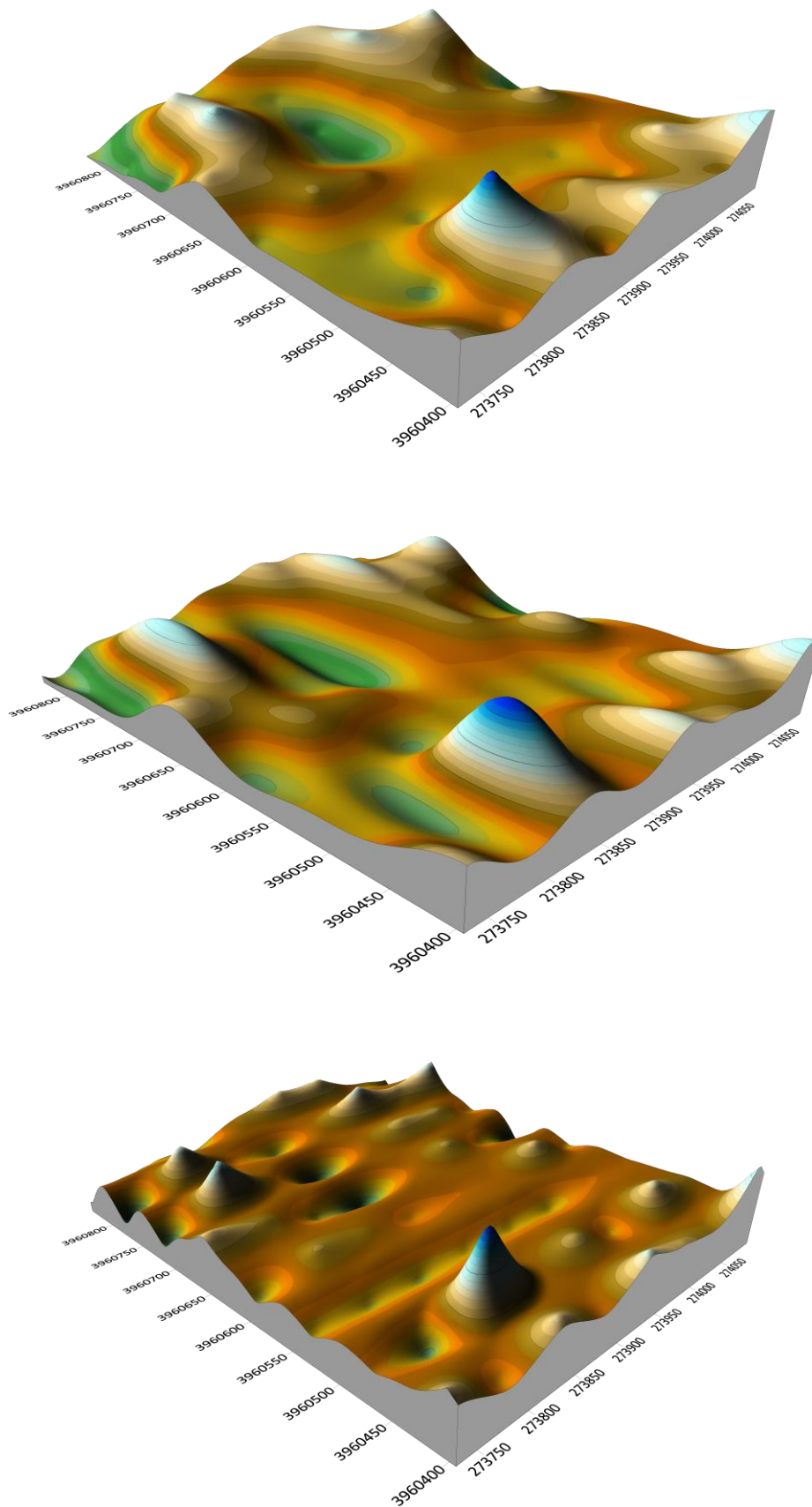


Figure IV.7. Cartes de surface en 3D selon le modèle choisi

De haut en bas : Exponentiel - Gaussien – Sphérique

IV.8. Synthèse

Dans le cas particulier de cette étude, les valeurs interpolées à l'aide des modèles gaussien, sphérique et exponentiel variaient dans le même intervalle (3,5–14,5 (ds/m)). Mais en général, chaque modèle de semi-variogramme fournit un résultat distinct. Les cartes thématiques n'ont pas la même tendance de variation. Les valeurs minimale et maximale sont presque dans les mêmes régions respectivement d'une carte à l'autre. Ces observations sont conformes aux résultats publiés par de nombreux autres auteurs (Webster R, Oliver MA 2007, Chilès JP, Delfiner P 2012). Il est donc évident que la qualité et la fiabilité d'une interpolation par krigeage dépendent fortement de la structure l'analyse des données de terrain, c'est-à-dire le modèle semi-variogramme. Les performances prédictives des modèles ajustés sont vérifiées sur la base d'essais de validation croisée.

Le tableau IV.2 montre que le modèle gaussien est le mieux ajusté. Cela concorde avec et les figures IV.6 et IV.7 ce qui illustre que ce même modèle s'accommode le plus avec le semi-variogramme expérimental. En effet, avant de pouvoir utiliser cette méthode statistique basée sur la théorie des variables régionalisées, on doit créer un modèle semi-variogramme, qui déterminera la fonction d'interpolation.

Conclusions Générales

La présente étude met en évidence les effets du modèle de semi-variogramme sur les opérations de prédiction ou d'interpolation utilisant la technique de krigeage.

Un mauvais choix du modèle de semi-variogramme peut fausser les résultats de l'évaluation, de prévision ou de prédiction.

Afin d'éviter cet inconvénient, une méthode basée sur le calcul et l'analyse des indicateurs statistiques de position ou de dispersion est proposée.

Il est donc nécessaire de bien l'appliquer dans le test de validation croisée afin de sélectionner le modèle de semi-variogramme le plus approprié avant l'analyse prédictive.

Cependant, on ne peut pas effectuer de mesure en continu, les paramètres à estimer sont mesurés de manière discrète, puis afin d'obtenir des informations continues, la méthode de krigeage est utilisée.

De nos jours, cette technique basée sur le semi-variogramme est utilisé par tant de scientifiques dans divers domaines que la protection civile (Zamani A, Mirabadi A (2011) 2011), la météorologie (Caridad RP, Jury MR 2013), la géochimie (Gorai AK, Kumar S 2013, Meli'i JL, et al. 2013, Arétouyap Z, et al. 2014, Nshagali BG 2015).

Si les auteurs ne tiennent pas compte de la priorité impact du modèle semi-variogramme dans de telles enquêtes, l'enquête sera sommaire et résultats mensongers.

Ceci explique l'importance du présent travail qui aborde la question de la sélection du modèle de semi-variogramme approprié.

Cette étude devrait avoir diverses applications et impacts sur l'environnement, le retrait et le gonflement du sol, les paramètres de stabilisation du sol, l'influence sur le type de sols et par conséquent sur l'accélération sismique et le choix de liants appropriés pour la construction de structures en béton armé.

Références Bibliographique

ANRH., 2003. Suivi et modélisation de la salinité des sols dans le périmètre irrigué de la Mina
43 p.

ARMSTRONG, Margaret (1998). Basic linear geostatistics. Springer Science & Business Media.

BENFATMA Khawla (2017). « Caractérisation de l'Etat actuel de la salinité. Perspectives d'amélioration de la gestion hydro agricole au niveau d'une parcelle située dans le périmètre irrigué de la Mina, Relizane ». Master en agronomie à l'Université Abdelhamid Ibn Badis à Mostaganem.

CHAUVET, Pierre (2008). Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Presses des MINES.

CHILES, Jean-Paul et Pierre DELFINER (2009). Geostatistics: modeling spatial uncertainty. T. 497. John Wiley & Sons.

DIGGLE, Peter J, Paulo J RIBEIRO JR et Ole F CHRISTENSEN (2003). « An introduction to model-based geostatistics ». Spatial statistics and computational methods. Springer, p. 43–86.

INSID. « Caractérisation de l'état actuel de la salinité dans le périmètre irrigué de la Mina.» Relizane, 2008.

JOLY, Daniel et al. (2009). « Interpolation par régressions locales : application aux précipitations en France ». L'Espace géographique 38.2, p. 157–170.

LLLOYD, Christopher D et Peter M ATKINSON (2004). « Increased accuracy of geostatistical prediction of nitrogen dioxide in the United Kingdom with secondary data ». International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 5.4, p. 293–305.

MMATHERON, Georges et al. (1965). Les variables régionalisées et leur estimation. Masson et Cie.

MMATHERON, Georges (1978). Estimer et choisir : essai sur la pratique des probabilités. Ecole nationale supérieure des mines de Paris.

PEBESMA, Edzer J (2001). « Gstat user's manual ». Dept. of Physical Geography, Utrecht University, Utrecht, The Netherlands.

PPLANT, Richard E (2012). Spatial data analysis in ecology and agriculture using R. cRc Press.

RIBEIRO JR, Paulo J et Peter J DIGGLE (2006). « geoR: Package for Geostatistical Data Analysis An illustrative session ». *Artificial Intelligence* 1, p. 1–24.

RIBEIRO JR, Paulo Justiniano et Peter J DIGGLE (2004). « Model Based Geostatistics ». Springer Series in Statistics.

ROSSITER, David G (2017). « An introduction to geostatistics with R/gstat Version 3.7, 12-May2017. »

ROSSITER, DG (2007). « Co-kriging with the gstat package of the R environment for statistical computing ». Web: <http://www.itc.nl/rossiter/teach/R/R ck. pdf>.

SCHABENBERGER, Oliver et Carol A GOTWAY (2017). *Statistical methods for spatial data analysis*. CRC press.

WALLER, Lance A et Carol A GOTWAY (2004). *Applied spatial statistics for public health data*. T. 368. John Wiley & Sons.

ZUUR, AF et al. (2009). « Mixed effects models and extensions in ecology with R. Gail M, Krickeberg K, Samet JM, Tsiatis A, Wong W, editors ». New York, NY : Springer Science and Business Media.