



**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 :

HAMOUCHE Oussama & MAATOUG Abdallah

THEME

**ANALYSE COMPARATIVE DES METHODES
D'INTERPOLATION SPATIALE POUR GENERER DES MNT**

(Application à l'établissement du MNT de la commune de Maadid -wilaya de Msila)

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

RAHMOUNI ZINE EL ABIDINE, Prof, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

MEDDAH ABDELAZIZ, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Examineur

SEDDIKI AHMED, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Encadreur

Promotion : 2021/2022

Remerciements

*Nous tenons à rendre un grand hommage à nos
enseignants qui n'ont jamais cessé de travailler
dur pour assurer le bon déroulement de notre
formation.*

*Il s'agit du surtout de Mr. SEDDIKI Ahmed,
qui nous a apporté son ferme soutien.*

Résumé

Le **MNT** ou Modèle Numérique de Terrain représente numériquement la **topographie** d'un terrain. Il s'agit d'une pièce de base, à partir de laquelle certains paramètres de nom sont extraits, tels que les pentes, les profils en long et en travers, les cubes, etc. Pour créer un modèle numérique de terrain, on part des **données** vectorielles (points, lignes, surfaces) contenant des informations d'élévation, que l'on saisit pour obtenir une surface continue (x, y, z).

Notre étude a examiné la précision des modèles généraux de terrain en fonction des différentes méthodes d'**interpolation** utilisées. En conséquence, nous avons examiné les performances des différentes méthodes dans ce contexte.

Notre comparaison incluait les méthodes **déterministes** tel que l'inverse de la distance pondérée (IDW), le plus proche Voisin, la courbure minimale et les méthodes géostatistiques telles que le **krigeage**.

Enfin, les méthodes utilisées pour disperser les erreurs du MNT dans les applications **SIG** (Système d'Information Géographique) sont évoquées.

Mots-clés. MNT, topographie, données, déterministes, Krigeage, SIG.

Abstract

The **DEM** or Digital Terrain Model represents the **topography** of a terrain. This is a basic part, from which some name parameters are taken, such as slopes, longitudinal and cross sections, cubes, etc. To create a digital terrain model, we start from vector **data** (points, lines, surfaces) containing elevation information, which we enter to obtain a continuous surface (x, y, z).

Our study investigated the accuracy of general terrain models as a function of the different interpolation methods used. Accordingly, we examined the performance of the different methods in this context.

Our comparison included **deterministic** methods such as Inverse Distance Weighted (IDW), Nearest Neighbor, Minimum Curvature, and geostatistical methods such as **Kriging**.

Finally, the methods used to disperse DEM errors in **GIS** (Geographic Information System) applications are discussed.

Keywords. DEM, topography, data, deterministic, kriging, GIS.

ملخص

نموذج التضاريس الرقمي هو جزء أساسي يسمح باستخراج العديد من المعطيات، مثل المنحدرات والمقاطع الطولية والعرضية والمكعبات وما إلى ذلك. لإنشاء نموذج التضاريس الرقمي، نبدأ من بيانات المتجه (النقاط، الخطوط، الأسطح) التي تحتوي على معلومات الارتفاع، والتي نقوم بإدخالها للحصول على سطح مستمر (x, y, z).

بحثنا في دراستنا هذه دقة نماذج التضاريس العامة كدالة لطرق الاستيفاء المختلفة المستخدمة. وعليه، قمنا بفحص أداء الطرق المختلفة في هذا السياق.

تضمنت مقارنة طرقاً حتمية مثل قياس المسافة العكسية، وأقرب الجار، والحد الأدنى للانحناء، والطرق الإحصائية.

أخيراً، تمت مناقشة الطرق المستخدمة لتشتيت أخطاء نموذج التضاريس الرقمي في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية.

الكلمات الدالة. نموذج التضاريس الرقمي، الطبوغرافيا، بيانات، الحتمية، كريجينج، نظم المعلومات الجغرافية.

Sommaire

Introduction Générale	1
Chapitre Premier	3
Les Modèles Numérique de Terrain MNT	3
I.1. Introduction	3
I.2. Définitions du Modèle Numérique du Terrain MNT	3
I.3. Différents types de Modèle Numérique du Terrain	4
I.4. Création d'un Modèle Numérique du Terrain	5
I.5. Méthodes de construction d'un MNT	5
I.6. Domaines d'utilisation du MNT	7
I.7. Conclusion	8
Chapitre Deuxième	11
Les Méthodes d'Interpolation Spatiale	11
II.1. Introduction	11
II.2. Définitions	11
II.3. Méthodes d'interpolation	12
II.4. Conclusion	17
Chapitre Troisième	20
Outils Numérique Utilisés	20
III.1. Présentation du logiciel Golden Surfer	20
III.2. Types de carte	21
III.3. Méthode d'interpolation implémentées dans surfer	22
III.4. Méthode d'interpolation Déterministes implémentées dans surfer	22
III.5. Méthode d'interpolation Géostatistique implémentée dans surfer	26
Chapitre quatrième	31
Application à l'établissement du MNT de la commune de Maadid	31
IV.1. Présentation de la zone d'étude	31
IV.2. Données utilisées	33
IV.3. La prédiction Spatiale des altitudes	34
IV.4. Synthèse	40
Conclusions Générales	41
Références Bibliographique	43

Liste des Figures

<i>Figure I.1. Rendu en 3D d'un Modèle numérique du terrain MNT</i>	4
<i>Figure I.2 Schématisation de la différence MNT/MNS</i>	4
<i>Figure I.3. Numérisation des courbes de niveau et interpolation de l'altitude à chaque maille</i> ...	6
<i>Figure I.4. Processus de création d'un MNT à partir d'une carte numérisée</i>	6
<i>Figure I.5. Structure d'un maillage de type Raster</i>	7
<i>Figure III.1. Interface du logiciel Surfer 16.3.1</i>	20
<i>Figure III.2. Exemples de carte réalisée par le logiciel Surfer</i>	21
<i>Figure III.3. Options de la méthode Inverse de la distance IDW</i>	23
<i>Figure III.4. Comparaison entre des méthodes IDW (à gauche) et voisin naturel (à droite)</i>	24
<i>Figure III.5. Création de la triangulation à partir des points sélectionnés</i>	25
<i>Figure III.6. Options de la méthode Local Polynomial</i>	26
<i>Figure III.7. Options de la méthode Krigeage</i>	27
<i>Figure II.8. Paramètres par défaut d'un variogramme</i>	28
<i>Figure IV.1. Situation de la commune de Maadid par rapport à la wilaya de Msila</i>	31
<i>Figure IV.2. Mont et site archéologique Kalâa des Béni Hammad à Maadid</i>	32
<i>Figure IV.3. Localisation de la zone d'étude Maadid</i>	32
<i>Figure IV.4. Statistique de la série d'altitudes</i>	34
<i>Figure IV.5. Paramètres de la méthode d'interpolation IDW</i>	35
<i>Figure IV.6. Cartes des courbes de niveau obtenues par les méthodes d'interpolation déterministes</i>	36
<i>Figure IV.7. Carte des courbes de niveau obtenue par la méthode d'interpolation Géostatistique-Kriging</i>	37
<i>Figure IV.8. Comparaison entre les « colors reliefs » des différentes méthodes d'interpolation utilisées</i>	38
<i>Figure IV.9. Cartes de surface en 3D</i>	39
<i>Figure IV.10. Image Google en 3D de la commune de Maadid</i>	40

Introduction Générale

Le modèle numérique de terrain est une représentation numérique et mathématique de l'altitude d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique, dans un système référentiel bien défini.

Le MNT reste l'une des plus importantes sources de données utilisées pour l'extraction de nombreux paramètres utilisés tels que la pente, la direction d'écoulement de l'eau, l'indice topographique, etc. Cependant, il reste une représentation spatiale de la réalité.

La génération d'un MNT nécessite l'acquisition de données spatiales soit sous forme de données altimétriques. Les moyens d'acquisition de ces données ont beaucoup évolué de nos jours et permettent d'acquérir des données de haute densité (plusieurs points par m²) sur des zones de plusieurs hectares.

Cette étude passe en revue les notions des systèmes d'information géographique, les différentes méthodes d'interpolation spatiale et la présentation de l'outil numérique utilisé qui est le fameux logiciel Surfer de la grande firme mondiale qui est Golden Software.

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 :

- 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. 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.

L'objectif de cette étude est de comparer brièvement l'impact du choix de la méthode d'interpolation sur la prédiction des valeurs inconnues et l'incertitude associée afin d'en évaluer la sensibilité.

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

Une synthèse bibliographique qui comprend 03 chapitres :

- Premier chapitre : le modèle numérique de terrain ;
- 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 : application à l'établissement du modèle numérique de terrain de la commune de Maadid, wilaya de Msila.

Nous terminerons ensuite par une conclusion générale.

Première partie

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre Premier

LES MODELES NUMERIQUE DE TERRAIN MNT

LES MODELES NUMERIQUE DE TERRAIN MNT

1.1. Introduction

Un modèle numérique de terrain permet de modéliser une zone géographique et principalement son relief. Le relief est le facteur révélateur et explicatif prépondérant des phénomènes survenus à la surface de la Terre. Il a fortement conditionné et orienté l'appropriation de l'espace géographique par les sociétés humaines. Il occupe, de ce fait, une place majeure en analyse spatiale et dans toute discipline dont l'objet concerne les activités humaines ou des phénomènes naturels. Ce chapitre présente un bref historique des modes d'acquisition de l'altitude, puis expose les méthodes qui permettant de dériver les indicateurs descriptifs du relief.

1.2. Définitions du Modèle Numérique du Terrain MNT

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation informatique d'une zone géographique et de son relief. Un MNT élémentaire peut se réduire à un tableau de nombres représentant la distribution spatiale des altitudes d'un terrain. On l'appelle alors aussi modèle numérique d'élevation (MNE ou Digital Elevation Terrain, DEM). Les débouchés pratiques de ces modèles sont innombrables. Ils sont notamment utilisés en réalité virtuelle, en géologie, en ingénierie civile et militaire, en hydrographie, dans les systèmes d'informations géographiques (SIG), en géomorphologie, etc.

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la topographie d'une zone terrestre sous une forme adaptée à son utilisation par un ordinateur numérique (ordinateur) et une méthode pour stocker et représenter de grandes quantités de données sur toute la surface d'un territoire : Altitudes/élévation/relief/profils

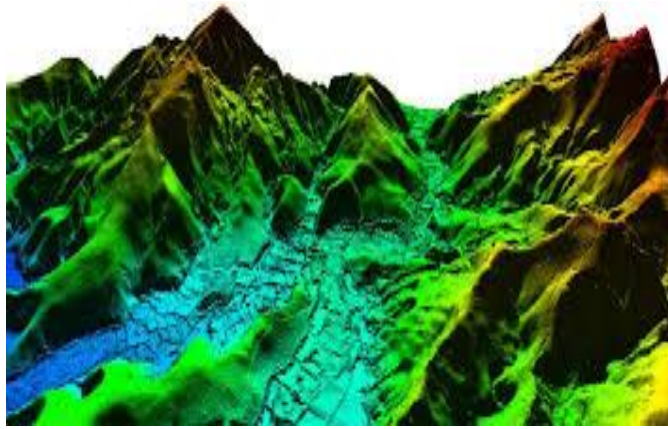


Figure I.1. Rendu en 3D d'un Modèle numérique du terrain MNT

I.3. Différents types de Modèle Numérique du Terrain

Il existe de nombreux types de modèles numériques, y compris des modèles bien connus :

Un MNE (Modèle Numérique d'Élévation) est un terme générique pour désigner à la fois un MNT ou un MNS et représente un ensemble de points où la valeur de la donnée altimétrique (Z) prime sur les deux autres composantes horizontales (X et Y).

Un MNT (Modèle Numérique de Terrain) est un MNE où l'ensemble des points correspondent uniquement à l'élévation du terrain en lui-même (la surface théorique du sol).

Un MNS (Modèle Numérique de Sursol) est un MNE où l'ensemble des points représentent le relief (éléments du terrain naturel), tel que (les sommets des arbres) ou encore le sursol (élévation des bâtiments).

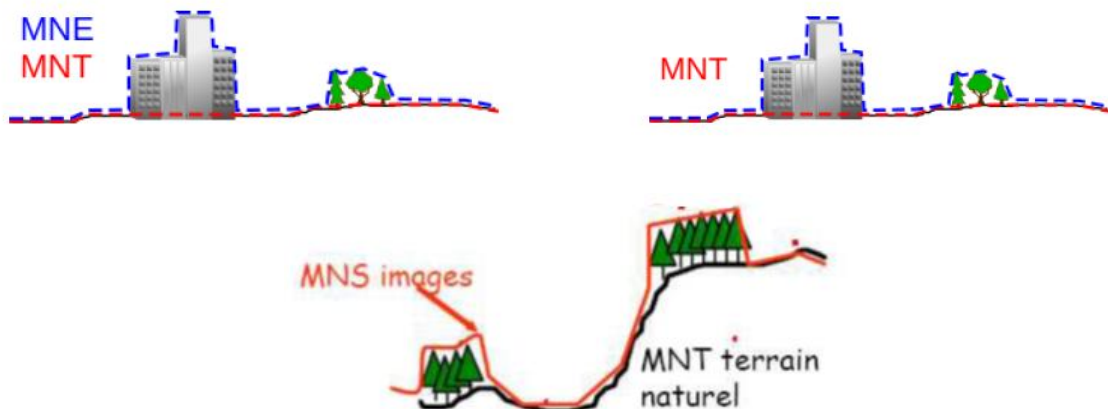


Figure I.2 Schématisation de la différence MNT/MNS

1.4. Création d'un Modèle Numérique du Terrain

De grands instituts tels que l'U.S. Geological Survey (USGS, aux Etats-Unis) proposent de larges bases de données de modèles numériques de terrains à différentes échelles et indexant de nombreuses informations. Cependant ces données sont très coûteuses. Cette solution n'est donc pas envisageable dans le cadre d'applications de recherche ou grand public. De plus, une quantité innombrable de cartes topographiques dessinées manuellement avant l'apparition de l'informatique ne sont disponibles que dans leur version originale papier, et une version numérique pourrait être très intéressante pour des historiens.

1.5. Méthodes de construction d'un MNT

La construction peut se faire de plusieurs manières :

- Numérisation des courbes de niveau d'une carte
- Saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain, mesurées
- Triangulation (géomètres) ou lasergrammétrie (technique permettant de capturer les coordonnées d'un point en x, y, z au moyen d'un laser)
- Stéréoscopie à partir de couples d'images aériennes (photogrammétrie) ou prises par satellite,
- Interférométrie radar,
- Système laser aéroporté (LIDAR).

1.5.1. Numérisation des courbes de niveau d'une carte

La création de modèles numériques de terrain à partir de cartes topographiques papier numérisées est une technique à moindre coût. Le principe repose sur un traitement de l'image numérique. Il s'agit d'en extraire les informations nécessaires et particulièrement les courbes de niveaux et d'effectuer une interpolation de l'altitude à chaque maille (figure I.3).

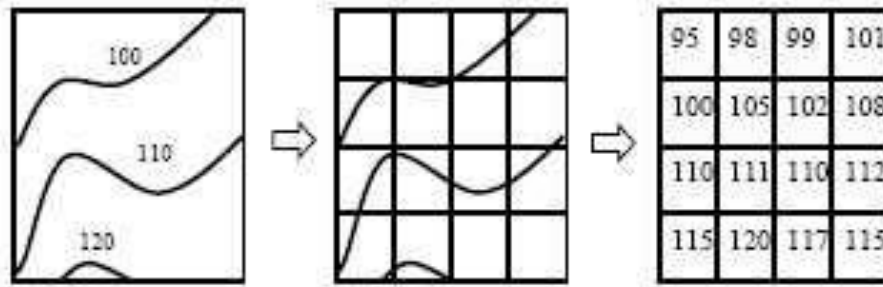


Figure I.3. Numérisation des courbes de niveau et interpolation de l'altitude à chaque maille

L'organigramme schématisé ci-dessous, résume les étapes du processus de création d'un MNT à partir d'une carte numérisée (figure I.4).

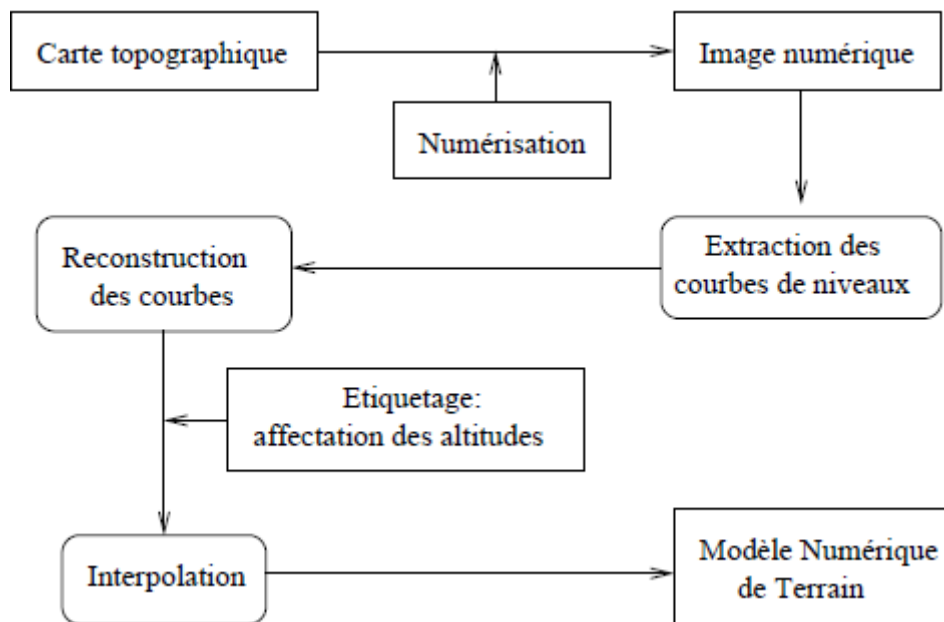


Figure I.4. Processus de création d'un MNT à partir d'une carte numérisée

I.5.2. Saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain, mesurés

Les semis de points obtenus lors des relevés GPS, peuvent être utilisés pour créer des modèles numériques de terrain, mais également des surfaces triangulaires telles que les TIN.

A partir des points dispersés de manière homogène ou non, les méthodes d'interpolation vont créer une grille régulière où l'altitude sera estimée à partir des points les plus proches. Plusieurs

méthodes, plus ou moins adaptées selon les cas, permettent de convertir ces données en une image maillée ou raster.

La précision du MNT va dépendre du semis de points, de sa répartition et de la résolution requise lors du traitement des données, mais elle est également fonction de la qualité des données initiales (levés de terrain, ...) et des processus de traitement de l'information.

I.5.3. Types de maillage utilisé pour numériser un MNT

On peut distinguer les MNT selon le type de maillage utilisé :

- Régulier carré (raster),
- Triangulaire régulier,
- Triangulaire quelconque (TIN)

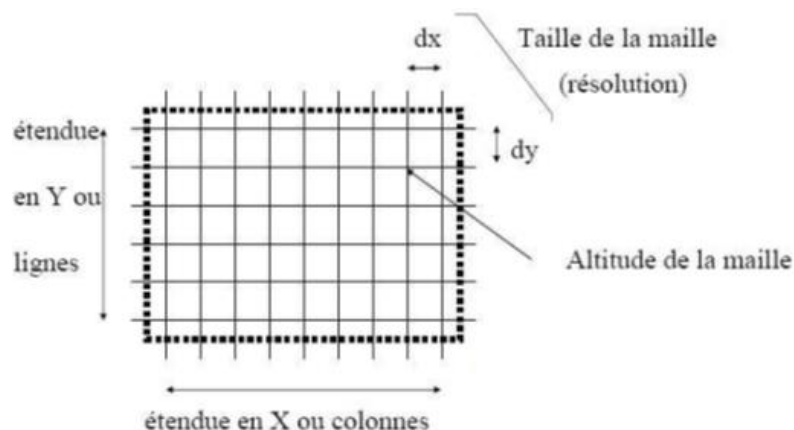


Figure I.5. Structure d'un maillage de type Raster

La qualité d'un MNT dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré.

I.6. Domaines d'utilisation du MNT

Un Modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Ce modèle peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles

(points côtés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules).

Un MNT permet de :

- Reconstituer une vue en images de synthèse du terrain,
- Déterminer une trajectoire de survol du terrain.
- Calculer des surfaces ou des volumes.
- Tracer des profils topographiques.

D'une manière générale, de manipuler de façon quantitative le terrain étudié.

1.7. Conclusion

Le Modèle Numérique du Terrain fournit une information altimétrique, c'est une représentation numérique simplifiée de la surface du territoire, intégrée dans le SIG cette information joue un rôle très important dans les méthodes l'analyse spatiale en particulier pour la prise en compte de la morphologie du terrain.

A partir de l'information altimétrique du MNT des cartes dites dérivées vont pouvoir être calculées, en particulier dans un objectif d'analyse morphologique du milieu : Carte des pentes, des orientations, d'ensoleillement, d'inter visibilité, bassins versants, profils en long et en travers, coupes de terrain.

Chapitre Deuxième

LES METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE

LES METHODES D'INTERPOLATION SPATIALE

II.1. Introduction

Bien sûr, il n'est de toute façon pas possible de collecter des informations sur chaque centimètre carré de parcelle par échantillonnage. C'est pour cela que les méthodes d'interpolation ont tout leur intérêt. Plusieurs techniques d'interpolation existent mais il est quelquefois difficile de comprendre les avantages et inconvénients de chacune des approches. Ce post a pour objectif de présenter les méthodes d'interpolation spatiale les plus utilisées, en tentant de clarifier les avantages, défauts et différences entre ces approches.

II.2. Définitions

L'interpolation est un processus (ou une opération mathématique) consistant à utiliser des points ayant des valeurs connues pour estimer la valeur pour d'autres points (inconnus).

C'est la traduction d'une information disponible pour un nombre de lieux limités vers une information disponible pour tout l'espace.

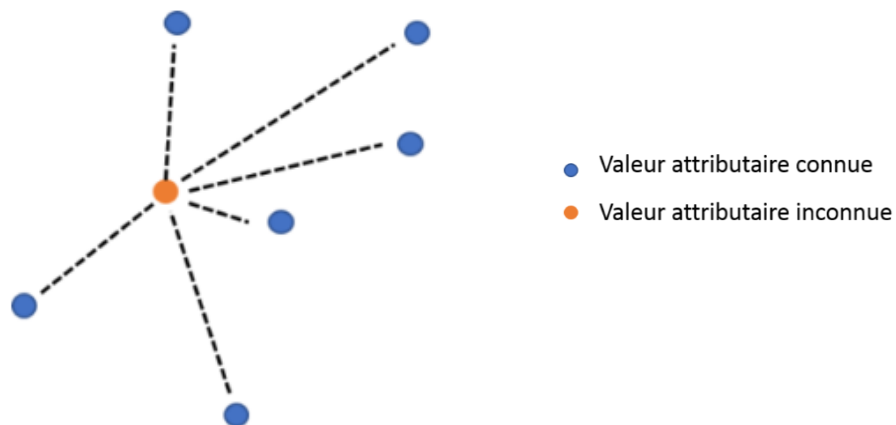


Figure II.1 Principe d'interpolation

II.3. Méthodes d'interpolation

Les techniques d'interpolation spatiale peuvent être séparées en deux principales catégories ou deux grandes familles : les approches déterministes et les approches géostatistiques.

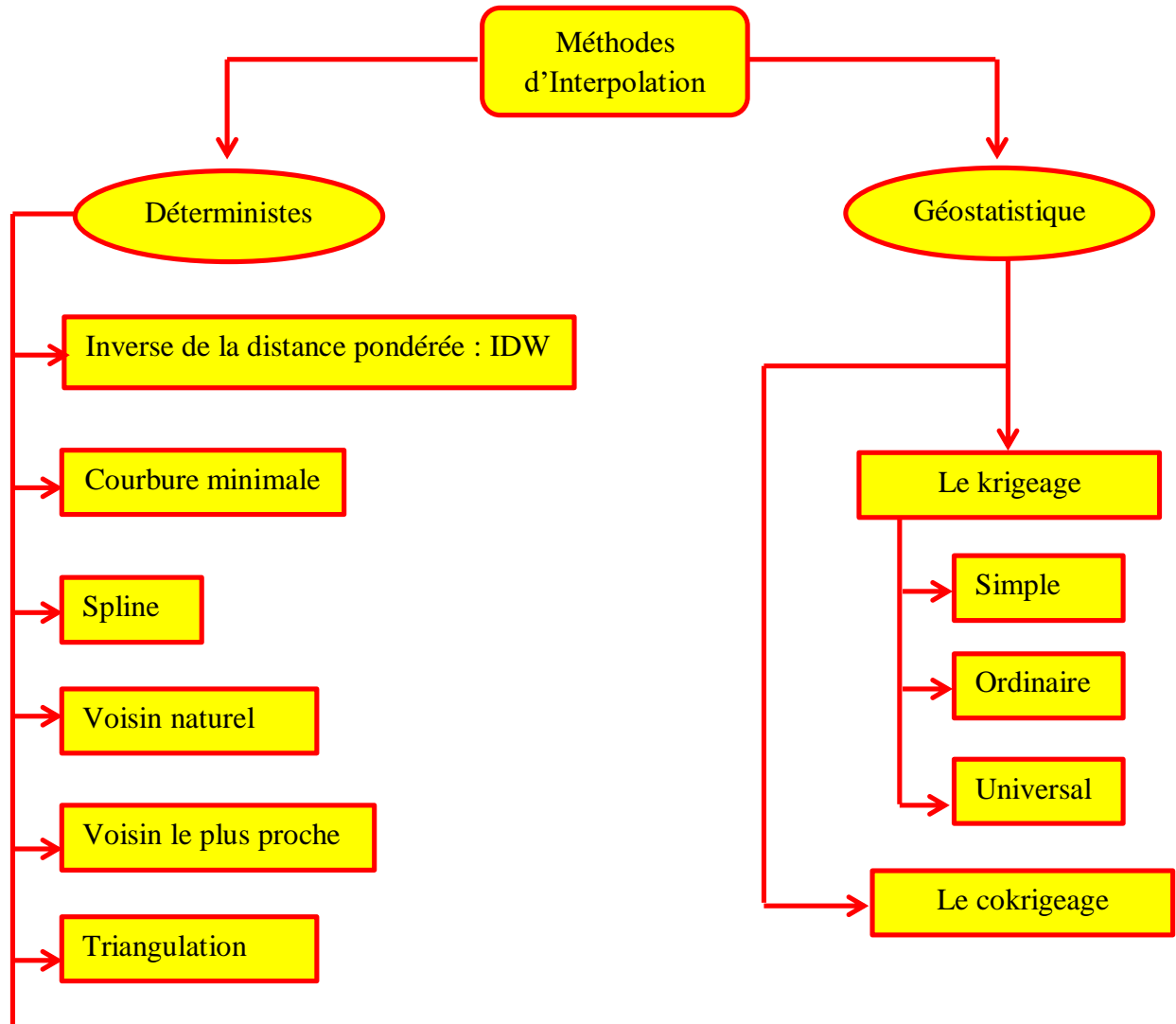


Figure II.2 Techniques d'interpolation

II .3.1 Les approches déterministes

Les approches déterministes sont caractérisées par :

- Modèles mathématiques à plusieurs paramètres
- Prise en compte de la position géométrique des données et de la distance entre les points

Exemples : Inverse des distances (IDW), Splines, le voisin naturel, Triangulation etc.

a- La méthode IDW (Inverse Distance Weight) :

La méthode IDW (inverse de la distance pondérée) est une technique d'interpolation déterministe locale qui calcule la valeur d'un point en effectuant la moyenne des valeurs des points situés dans le voisinage pondéré par l'inverse de la distance au point calculé.

b- La méthode Spline :

Cette méthode utilise une fonction mathématique afin de minimiser la courbure de la surface et produit une surface lisse qui correspond exactement aux points d'entrée.

Le Spline consiste à ajuster une courbe autour des points et à attribuer à la cellule raster la valeur de la courbe. Cette méthode est adaptée aux surfaces de faible variation

2 catégories de fonctions Splines :

Splines d'interpolation qui passent exactement par les points d'observation

Splines de lissage qui passent à proximité de ceux-ci

c- La méthode du voisin naturel :

Cette méthode cherche le sous-ensemble d'échantillons le plus proche à un point et applique une pondération en fonction de la zone où ils se trouvent, et les hauteurs interpolées sont forcément à l'intérieur de la plage de valeurs.

d- L'interpolation par Triangulation :

Elle consiste :

- À diviser l'espace géographique en triangles
- Puis, à interpoler en chaque point.

* **Triangulation de Delaunay** (la plus connue)

Méthode reposant sur la création d'un réseau irrégulier de triangles. Cette méthode ne considère que les points immédiatement voisins. Par conséquent, la totalité de l'information n'est pas prise en compte.

Un cercle qui passe par les sommets d'un triangle de Delaunay ne contient pas d'autres points.

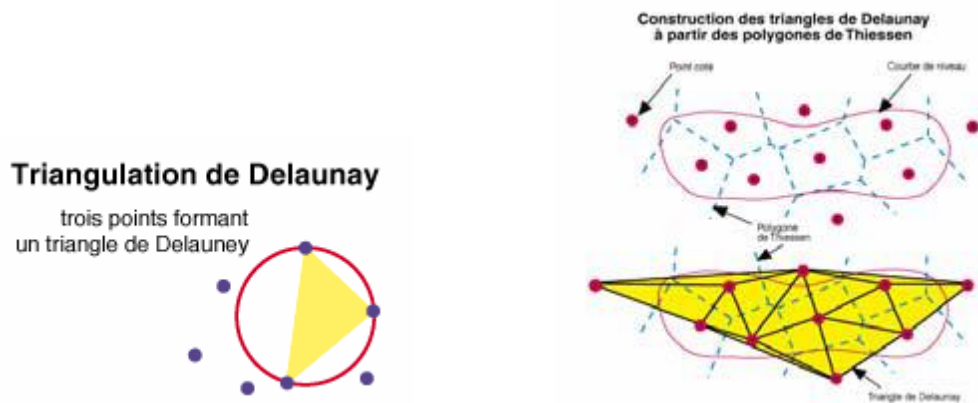


Figure II.3 Technique d'interpolation par triangulation de Delaunay

* **Modèle TIN**

TIN : *Triangular Irregular Network* = Réseaux triangulaires irréguliers

TIN : surface triangulaire représentée par des facettes définies en 3D

Il est constitué de 3 éléments de base :

- sommets ou points
- arêtes : côtés des faces triangulaires
- triangles ou facettes

La construction des facettes d'un TIN suit la méthode de Delaunay qui consiste à créer des triangles les plus équilatéraux possible. Chaque triangle est constitué de telle sorte que le cercle qui passe par ses trois sommets ne contient aucun autre point du TIN.

Un TIN peut être construit directement à partir des points altimétriques (représentation schématique de la réalité) ou à partir de lignes de rupture de pente ou des lignes de crêtes définies en 3D, provenant d'un MNT (grille raster).

Pour optimiser la précision des données, d'autres outils doivent être utilisés, tel que les Méthodes probabilistes ou géostatistiques

II .3.2 Méthodes géostatistiques

- Méthode qui utilise l'information relative à la position des points ;
- Certains paramètres permettent d'améliorer l'estimation des valeurs inconnues.

a- La méthode de krigeage :

Le krigeage permet d'estimer les valeurs d'une variable dans des zones non-échantillonnées, à partir des données voisines.

C'est une méthode d'interpolation géostatistique qui utilise un variogramme. Le variogramme dépend de la répartition spatiale des données plutôt que sur les valeurs réelles. Quand on applique la méthode de krigeage on peut voir des résultats pour des points en entrée différents de la valeur en entrée.

- Plusieurs types de krigeage :
 - Krigeage simple
 - Krigeage ordinaire (le plus utilisé)
 - Krigeage universel : Suppose une tendance importante dans les données (ex. facteur dominant)

Analyse Variographique

Le variogramme représente la corrélation spatiale des données. L'analyse de la structure spatiale permet de :

- Estimer la valeur d'une variable en un site non-échantillonné
- Mesurer la précision de l'estimation
- Cartographier la zone étudiée

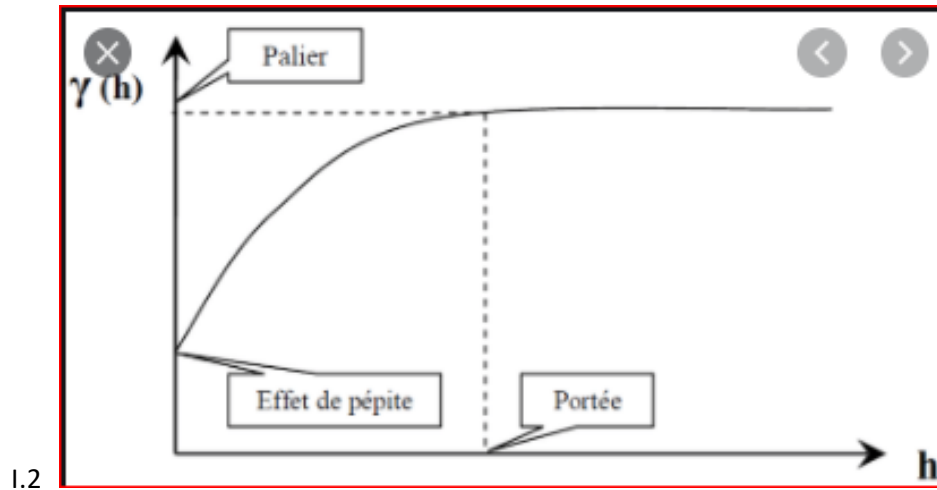


Figure II.3 Schéma type d'un variogramme

Il existe de nombreux types de semivariogramme (γ), les plus utilisés sont : le modèle Sphérique, Exponentiel, Gaussien, Linéaire, etc.

b- Krigeage/Cokrigeage

- Techniques géostatistiques d'estimation locale
- Une analyse variographique doit précéder toute interpolation
- Élaboration d'un modèle de variogramme à partir de l'ensemble des données disponibles
- Krigeage : 1 seule variable
- Cokrigeage : multi variable

c- Limites des méthodes géostatistique

- Nécessitent une bonne maîtrise des outils (pour avoir de bons résultats)
- Imprécision en cas de forte hétérogénéité des données

Synthèse sur les méthodes géostatistiques

Par le biais de fonctions de covariance et de variogramme, la géostatistique permet de modéliser la structure des phénomènes étudiés, L'analyse variographique est une étape prépondérante.

Elle va permettre dans un premier temps le calcul d'un variogramme expérimentale, et dans un second temps sa modélisation.

II.4. Conclusion

D'une manière générale, nous pouvons dire que les méthodes IDW et krigeage s'adaptent plutôt bien, quelles qu'elles soient les variations de terrain. Les autres méthodes sont généralement plus sensibles aux variations.

Tableau II.1 Comparaison des méthodes d'interpolation

Type de pente	Méthode d'interpolation			
	Krigeage	IDW	Spline	Voisin Naturel
douce	****	***	***	****
forte	***	**	**	***
variable	***	**	**	**

Le Krigeage et le Voisin Naturel donnent de très bons résultats, et nous conseillons de les adopter dans ce cas. Dans les zones de forte pente, les différences moyennes sont moins marquées et ont doit les analyser plus au cas par cas. Le Voisin Naturel s'applique mieux sur des petites zones d'étude. Pour le calcul des zones d'écoulement

La méthode du voisin naturel a montré des valeurs quasiment optimales sur des surfaces lisses.

Les méthodes basées sur la Spline adaptent une surface courbe minimale en passant par les points d'entrée. Elle préserve les tendances dans les données de l'échantillon et s'adapte aux changements rapides de gradient ou de pente.

Dans tous les cas, le krigeage donne de bons résultats, même pour les zones de forte déclivité ainsi que pour les zones couvrant des pentes abruptes et douces à la fois. Cette méthode tient compte des structures d'autocorrélation des hauteurs de la zone, afin de définir les poids optimaux. Mais, en contrepartie, la méthode a besoin d'un utilisateur qualifié, possédant de bonnes connaissances en géostatistiques.

Chapitre Troisième

OUTILS NUMERIQUE UTILISES

OUTILS NUMERIQUE UTILISES

III.1. Présentation du logiciel Golden Surfer

Surfer est un programme de cartographie basé sur une grille qui interpole des données XYZ irrégulièrement espacées dans une grille régulièrement espacée. Les grilles peuvent également être importées d'autres sources, telles que le United States Geological Survey (USGS). La grille est utilisée pour produire différents types de cartes, notamment des cartes de contour, de relief en couleur et de surface 3D.

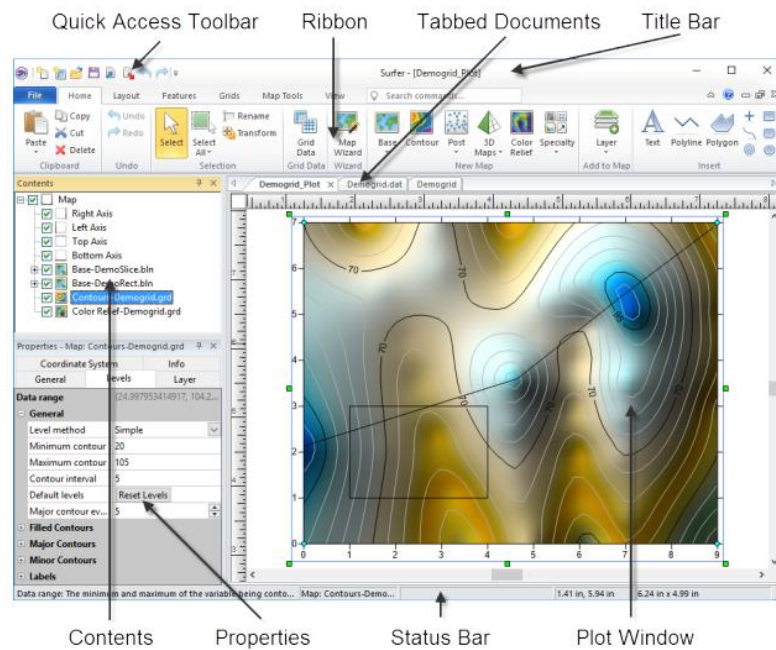


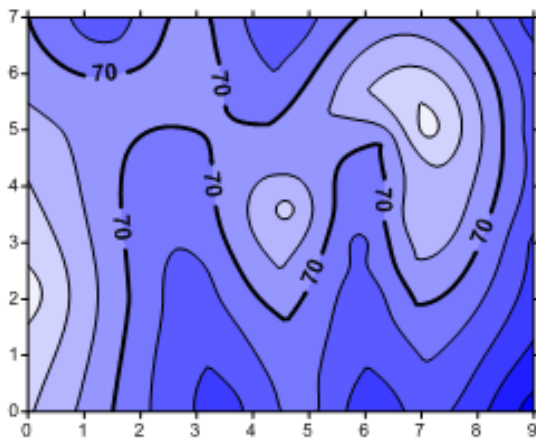
Figure III.1. Interface du logiciel Surfer 16.3.1

De nombreuses options de maillage et de cartographie sont disponibles, vous permettant de produire la carte qui représente le mieux vos données.

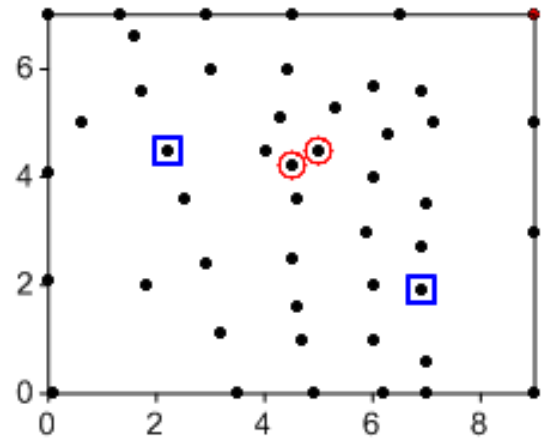
La figure II.9 représente la fenêtre de tracé de Surfer avec les fenêtres Contenu et Propriétés sur la gauche et les onglets de la feuille de calcul et de l'éditeur de grille en haut de la règle horizontale.

III.2. Types de carte

Plusieurs types de cartes différents peuvent être créés, modifiés et affichés avec Surfer. Ces types de cartes incluent les cartes de base, de contour, de poste, de poste classé, de surface 3D, de filaire 3D, de relief de couleur, de valeurs de grille, de bassin versant, de vecteur à 1 grille, de vecteur à 2 grilles et de nuages de points. Des couches de champs de vision peuvent être ajoutées aux cartes existantes. Des exemples de carte sont schématisés sur la figure III.2.



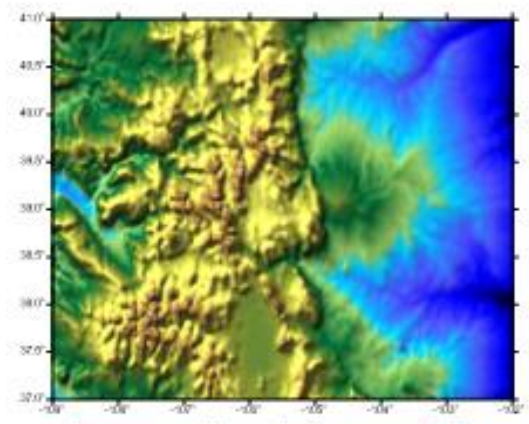
a/Contour Map



b/Post Map



c/3D surface Map



d/Color Relief Map

Figure III.2. Exemples de carte réalisée par le logiciel Surfer

III.3. Méthode d'interpolation implémentées dans surfer

Une suite complète de méthodes de maillage est disponible dans Surfer. La variété des méthodes disponibles fournit différentes interprétations de vos données et vous permet de choisir la méthode la plus appropriée à vos besoins. De plus, les métriques de données vous permettent de cartographier des informations statistiques sur vos données maillées.

- Inverse Distance to a Power
- Kriging
- Minimum Curvature
- Modified Shepard's Method
- Natural Neighbor
- Nearest Neighbor
- Polynomial Regression
- Radial Basis Function
- Triangulation with Linear Interpolation
- Moving Average
- Data Metrics
- Local Polynomial

III.4. Méthode d'interpolation Déterministes implémentées dans surfer

III.4.1. La méthode dite « Inverse Distance to a Power »

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 par rapport au nœud de la grille. La pondération est attribuée aux données grâce à 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 les points d'effet éloignés du nœud de grille ont lors de l'interpolation. Au fur et à mesure que la puissance augmente, la valeur du nœud du réseau 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.

Normalement, la distance inverse à une puissance se comporte comme un interpolateur exact. Lors du calcul d'un nœud de grille, les poids affectés aux points de données sont des fractions et la somme de tous les poids est égale à 1,0. Lorsqu'une observation particulière coïncide avec un nœud de grille, la distance entre cette observation et le nœud de grille est de 0,0 et cette observation reçoit un poids de 1,0, tandis que toutes les autres observations reçoivent un poids de 0,0. Ainsi, le nœud de grille se voit attribuer la valeur de l'observation coïncidente.

L'une des caractéristiques de la distance inverse à une puissance est la génération de « points de repère » entourant la position des observations dans la zone quadrillée. Vous pouvez affecter un paramètre de lissage lors de la distance inverse à une puissance pour réduire l'effet « œil de boeuf » en lissant la grille interpolée.

La distance inverse à une puissance est une méthode très rapide pour le maillage. Avec moins de 500 points, vous pouvez utiliser le type de recherche Toutes les données et le maillage se déroule rapidement.

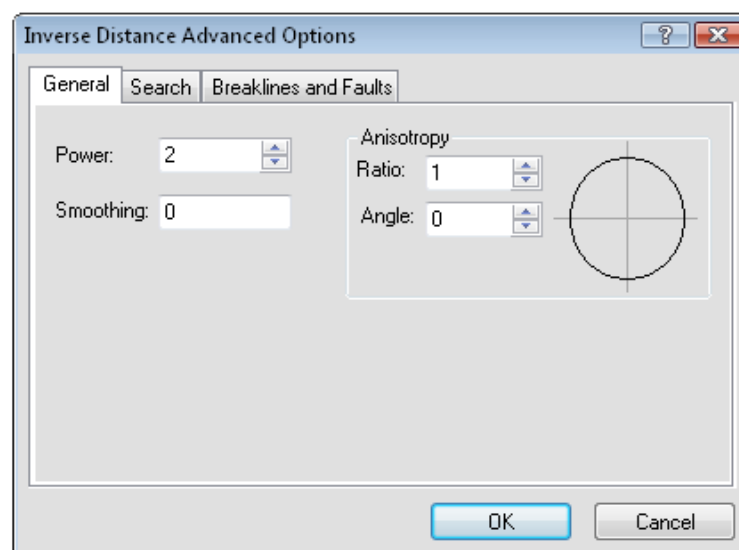


Figure III.3. Options de la méthode Inverse de la distance IDW

III.4.2. La méthode dite « Natural Neighbor »

La méthode Voisin naturel interpole les valeurs de la grille en pondérant les points de données voisins en fonction de zones proportionnelles. Considérons un ensemble de polygones de Thiessen (le dual d'une triangulation de Delaunay). Si un nouveau point (cible) était ajouté à l'ensemble de données, ces polygones de Thiessen seraient modifiés. En fait, certains polygones diminueraient en taille, tandis qu'aucun n'augmenterait en taille. La zone associée au polygone de Thiessen de la cible qui a été extraite d'un polygone existant, est appelée la « zone empruntée ». L'algorithme d'interpolation du Voisin Naturel utilise une moyenne pondérée des observations voisines, où les poids sont proportionnels à la « surface empruntée ».

La méthode du voisin naturel n'extrapole pas les contours au-delà de l'enveloppe convexe des emplacements de données (c'est-à-dire le contour des polygones de Thiessen).

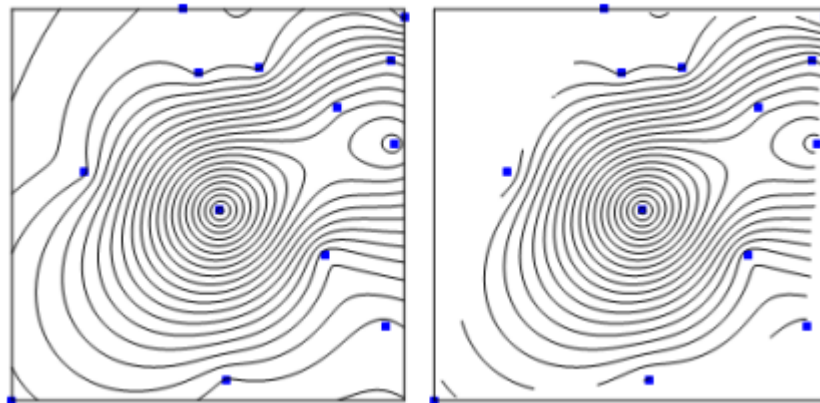


Figure III.4. Comparaison entre des méthodes IDW (à gauche) et voisin naturel (à droite)

La carte de gauche montre les contours générés par la distance inverse à une méthode de puissance. La carte de droite montre les contours générés par la méthode du voisin naturel. Les contours ne sont pas extrapolés au-delà de la limite des polygones de Thiessen avec la méthode de maillage des voisins naturels.

III.4.3. La méthode dite « Triangulation with Linear Interpolation »

La méthode de triangulation avec interpolation linéaire de Surfer utilise la triangulation de Delaunay optimale. L'algorithme crée des triangles en traçant des lignes entre les points de données. Les points d'origine sont connectés de telle sorte 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.5.). Cette méthode est un interpolateur exact.

Chaque triangle définit un plan au-dessus des nœuds de grille situés à l'intérieur du triangle, l'inclinaison et l'élévation du triangle étant déterminées par les trois points de données d'origine définissant le triangle. Tous les nœuds de grille dans un triangle donné sont définis par la surface triangulaire. Étant donné que les données d'origine sont utilisées pour définir les triangles, les données sont respectées de très près.

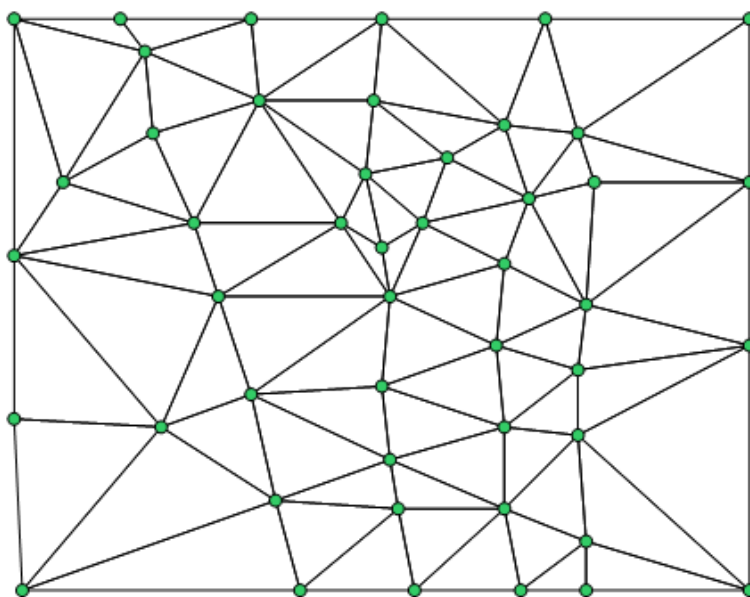


Figure III.5. Création de la triangulation à partir des points sélectionnés

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

II.4.4. La méthode dite « Local Polynomial »

La page générale de la boîte de dialogue Options avancées de distance inverse vous permet de définir les paramètres à utiliser lors du maillage avec la distance inverse à une méthode de maillage (figure III.6).

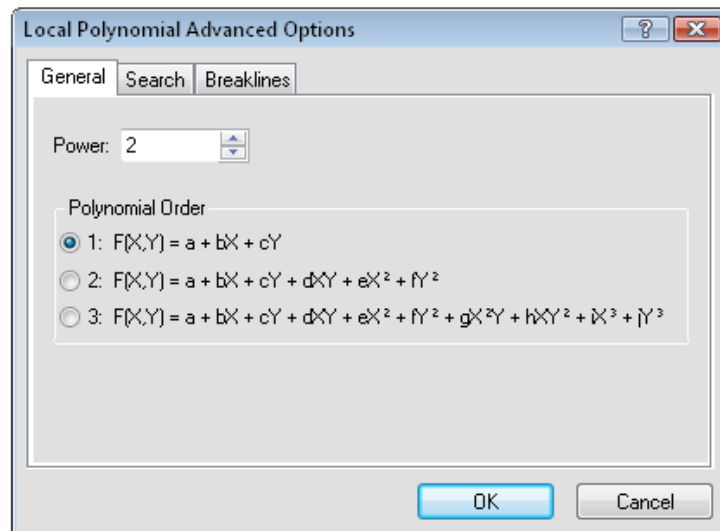


Figure III.6. Options de la méthode Local Polynomial

Choisissez une puissance et un ordre polynomial dans la boîte de dialogue Options avancées du polynôme local.

III.5. Méthode d'interpolation Géostatistique implémentée dans surfer

III.5.1. Définition du Krigeage

Le Krigeage est une méthode de maillage géostatistique qui s'est avérée utile et populaire dans de nombreux domaines. Cette méthode produit des cartes visuellement attrayantes à partir de données espacées de manière irrégulière. 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 œil de bœuf.

Le Krigeage est une méthode de maillage très flexible. Vous pouvez accepter les valeurs par défaut du Krigeage pour produire une grille précise de vos données, ou le Krigeage peut être adapté sur

mesure à un ensemble de données en spécifiant le modèle de variogramme approprié. Dans Surfer, le Krigeage peut être soit un interpolateur exact, soit 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.7).

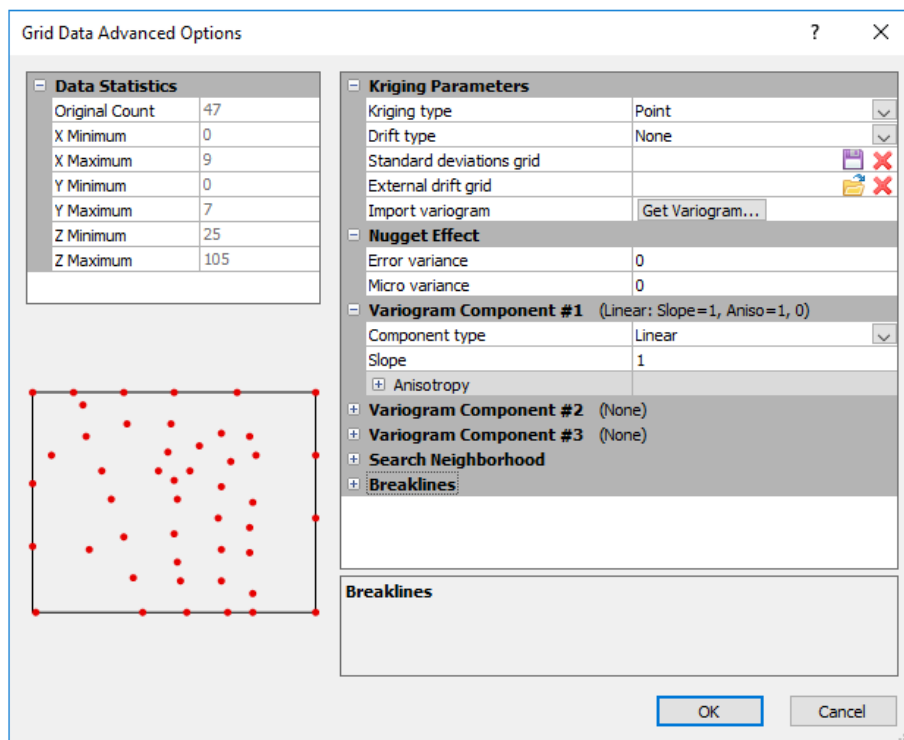


Figure III.7. Options de la méthode Krigeage

III.5.2. Le variogramme

Surfer comprend un sous-système de modélisation de variogramme étendu. Cette capacité a été ajoutée à Surfer en tant qu'outil d'analyse de données intégré. L'objectif principal du sous-système de modélisation de variogramme est de vous aider à sélectionner un modèle de variogramme approprié lors du maillage avec l'algorithme de Krigeage. La modélisation du variogramme peut également être utilisée pour évaluer quantitativement la continuité spatiale des données même lorsque l'algorithme de Krigeage n'est pas appliqué.

La fonction de modélisation de variogramme de Surfer est destinée aux utilisateurs de variogramme expérimentés qui ont besoin d'apprendre les fonctionnalités de modélisation de

variogramme de Surfer. L'utilisateur novice du variogramme peut trouver utiles les quatre auteurs suivants : Cressie (1991), Isaaks et Srivastava (1989), Kitanidis (1997) et Pannatier (1996).

La modélisation du variogramme n'est pas une tâche facile ou directe. Le développement d'un modèle de variogramme approprié pour un ensemble de données nécessite la compréhension et l'application de concepts et d'outils statistiques avancés : c'est la science de la modélisation de variogramme. De plus, le développement d'un modèle de variogramme approprié pour un ensemble de données nécessite une connaissance des astuces, pièges, pièges et approximations inhérents à l'ajustement d'un modèle théorique aux données du monde réel : c'est l'art de la modélisation de variogramme. L'habileté avec la science et l'art sont toutes deux nécessaires pour réussir.

Le développement d'un modèle de variogramme approprié nécessite de nombreuses décisions correctes. Ces décisions ne peuvent être correctement prises en compte qu'avec une connaissance intime des données disponibles et une compréhension compétente de la genèse des données (c'est-à-dire des processus sous-jacents à partir desquels les données sont extraites). La règle cardinale lors de la modélisation de variogramme est de connaître vos données.

La figure III.8 représente un variogramme utilisant les paramètres par défaut et l'exemple de fichier de données VARIO1.DAT.

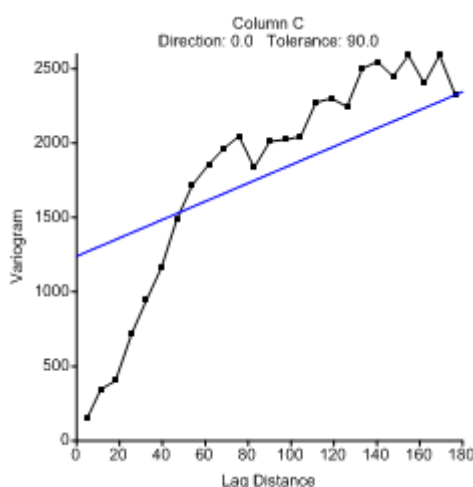


Figure II.8. Paramètres par défaut d'un variogramme

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

Chapitre Quatrième

APPLICATION A L'ETABLISSEMENT DU MNT

DE LA COMMUNE DE MAADID

APPLICATION A L'ETABLISSEMENT DU MNT DE LA COMMUNE DE MAADID

IV.1. Présentation de la zone d'étude

La wilaya de M'Sila a une superficie de 18 175 km². Elle est limitée par les wilayas de Médéa, Bouira, Bordj-Bou-Argeridj et Sétif au nord, Batna à l'est, Djelfa à l'ouest et Biskra au sud. Sa population est de 1 029 447 habitants.

M'Sila est une wilaya en Algérie à la latitude 35°42'00,00" Nord et la longitude 4°33'00,00" Est (figure IV.1.).

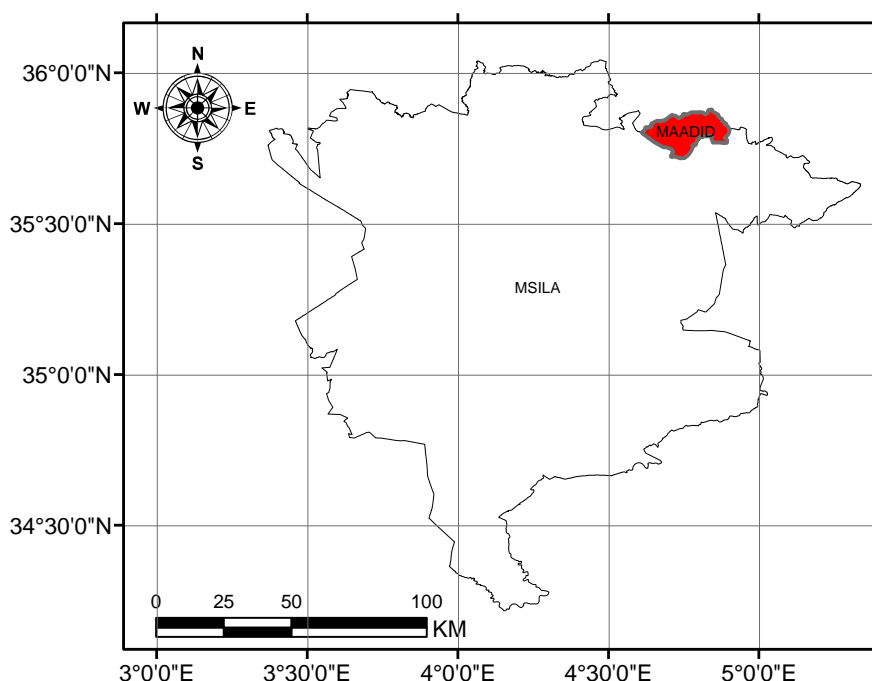


Figure IV.1. Situation de la commune de Maadid par rapport à la wilaya de Msila

Les monts du Hodna sont une chaîne montagneuse d'Algérie située dans le centre-est du pays. Ils forment une diagonale orientée ouest-nord-ouest / est-sud-est, reliant l'Atlas tellien et l'Atlas saharien, et dominant le chott el Hodna. Maadid est une région montagneuse située au nord Est du chef-lieu de la wilaya de Msila connue surtout par le patrimoine mondial de l'UNESCO, la Kalâa des Béni Hammad (figure IV.2.).

La centre de la commune de Maadid est caractérisée par ses Coordonnées géographiques :

Latitude : 35.8148 Nord ; Longitude : 4.7989 Est et Altitude de Maadid : 919 m



Figure IV.2. Mont et site archéologique Kalâa des Béni Hammad à Maadid

La zone d'étude est la commune de Maadid caractérisée par son relief très accidenté avec des monts très élevés à proximité de l'oued de Maadid (figure IV.3.).

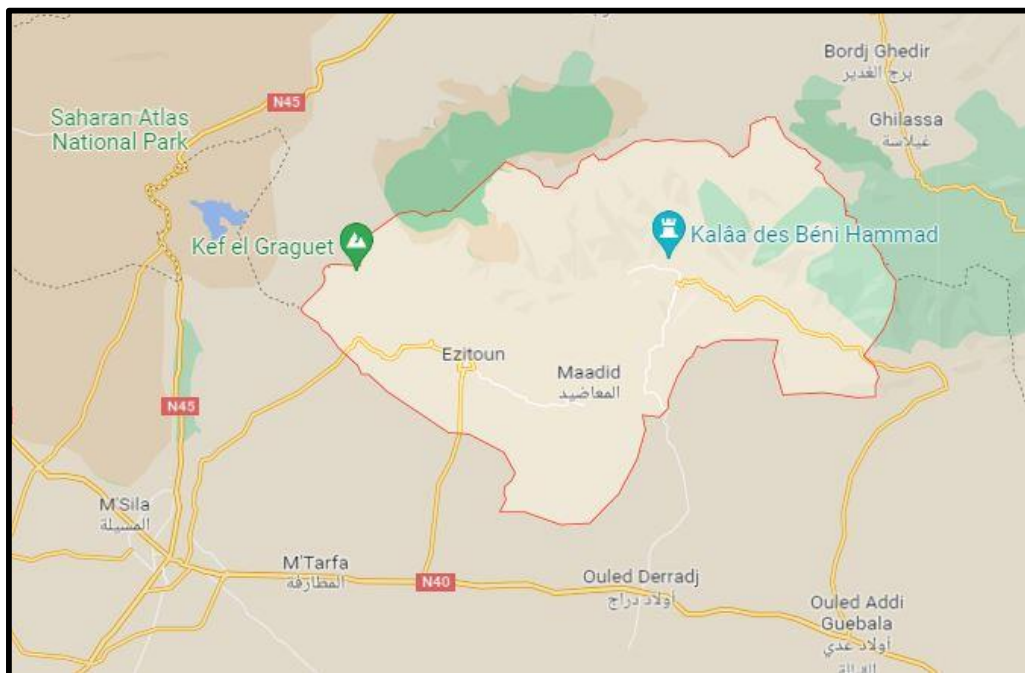


Figure IV.3. Localisation de la zone d'étude Maadid

IV.2. Données utilisées

IV.2.1. Données graphiques

Les limites administratives de la commune de Maadid, de la wilaya de Msila et de toutes l'Algérie sont fournies sous fichiers de forme dite « Shapefile ».

IV.2.2. Données tabulaires

Les données attributaires sont importées sous format d'un fichier CSV (N, x, y, z) d'Excel à partir d'un fichier Google earth de forme (KML) en deux dimensions.





Les altitudes des points sont obtenues à l'aide d'un utilitaire en ligne (GPS Visualiser) comme représenté sur le tableau IV.1.

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

Pt	Longitude (dd)	Latitude (dd)	Z (m)
1	4.8414	35.8786	1647
2	4.8397	35.8783	1670
3	4.8400	35.8783	1668
4	4.8403	35.8783	1663
...

Le processus de traitement s'effectue des données depuis l'entrée jusqu'à l'obtention de la carte en sortie comme encadré dans le tableau VI.2.

Tableau IV.2. Processus de traitement des données depuis l'entrée à la sortie

Outils numérique				
Type de fichier	KML	XLSX	CSV	GRID
Type de données	Vecteur	Table	Table	Carte

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

A l'aide du logiciel surfer on détermine directement les paramètres statistiques de la colonne altitude du fichier d'entrée. Les résultats statistiques sont affichés sur la figure IV.4.

Statistics Results	
	Altitude
Number of values	335301
Sum	352974636
Minimum	532
Maximum	1848
Mean	1052.7097622733
Median	977
Mode	623
Variance	128690.52026226
Standard deviation	358.7346097915
Coefficient of variation	0.34077
Skew	0.38
Kurtosis	-446.162

Figure IV.4. Statistique de la série d'altitudes

IV.3. La prédiction Spatiale des altitudes

Pour déterminer les altitudes des points « non mesurée » à partir des « points mesurées » on a utilisé les méthodes d'interpolation implémentées 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 (déterministes ou géostatistique) ;
- pour le Krigeage l'établissement du variogramme et nécessaire ;
- génération de la carte (contour) ou toutes autres formats de représentation.

IV.3.2. Les méthodes d'Interpolation par les Déterministes

IV.3.2.1. Interpolation par les méthodes Déterministes

Pour chaque méthode d'interpolation une grille est réalisée, le résultat est enregistré dans un fichier 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, les résultats est sauvegardé dans un fichier texte de format « Dat ».

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

a/ Interpolation par la méthode « IDW »

La méthode « Inverse Distance to a Power » implémentée dans Surfer (avec un « power=2 ») est l'équivalente de la méthode IDW d'ArcGIS, après affectation des données selon les colonnes le logiciel peut exécuter plusieurs taches, statistique ou géostatistique.

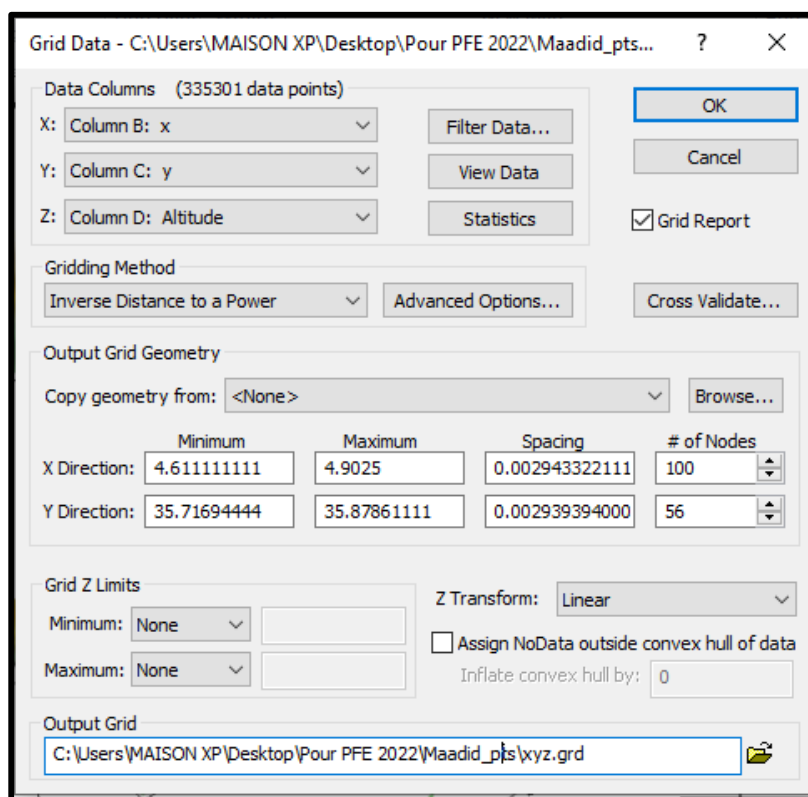


Figure IV.5. Paramètres de la méthode d'interpolation IDW

b/ Autres méthodes d'interpolation déterministes

Après visualisation de plusieurs cartes obtenues, on constate que les méthodes du voisin naturel et celle de la triangulation ne donnent pas une représentation fiable du terrain.

Les modèles numériques de terrain MNT obtenus par Les méthodes d'interpolation déterministes retenues, à savoir : par inverse de la distance « **IDW** », voisin le plus proche « **Nearest Neighbor** », et par Courbure minimale « **Minimum Curvature** » sont représentés par des cartes de contours sur la figure IV.6.

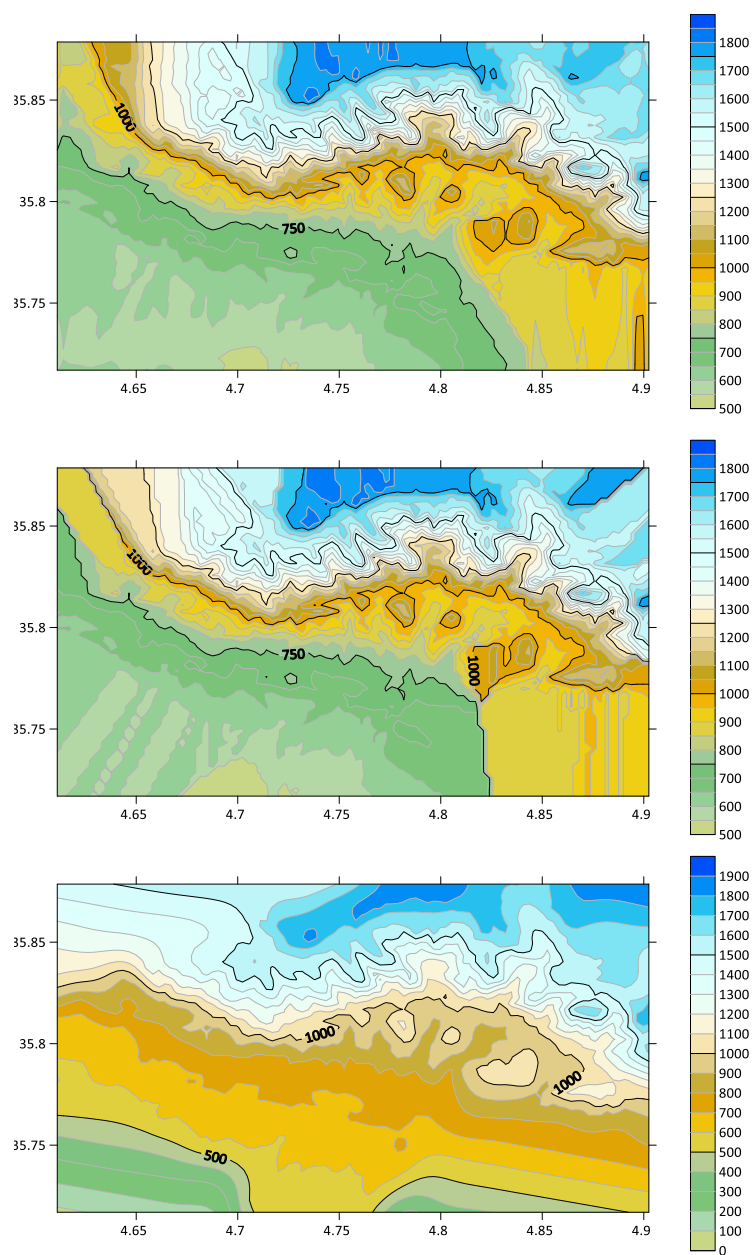


Figure IV.6. Cartes des courbes de niveau obtenues par les méthodes d'interpolation déterministes

IV.3.2.2. Interpolation par la méthode Géostatistique

Après réalisation et ajustement du variogramme une interpolation par Krigeage est effectuée pour obtenir le modèle numérique du terrain sous forme de courbe de niveau (figure IV.7.).

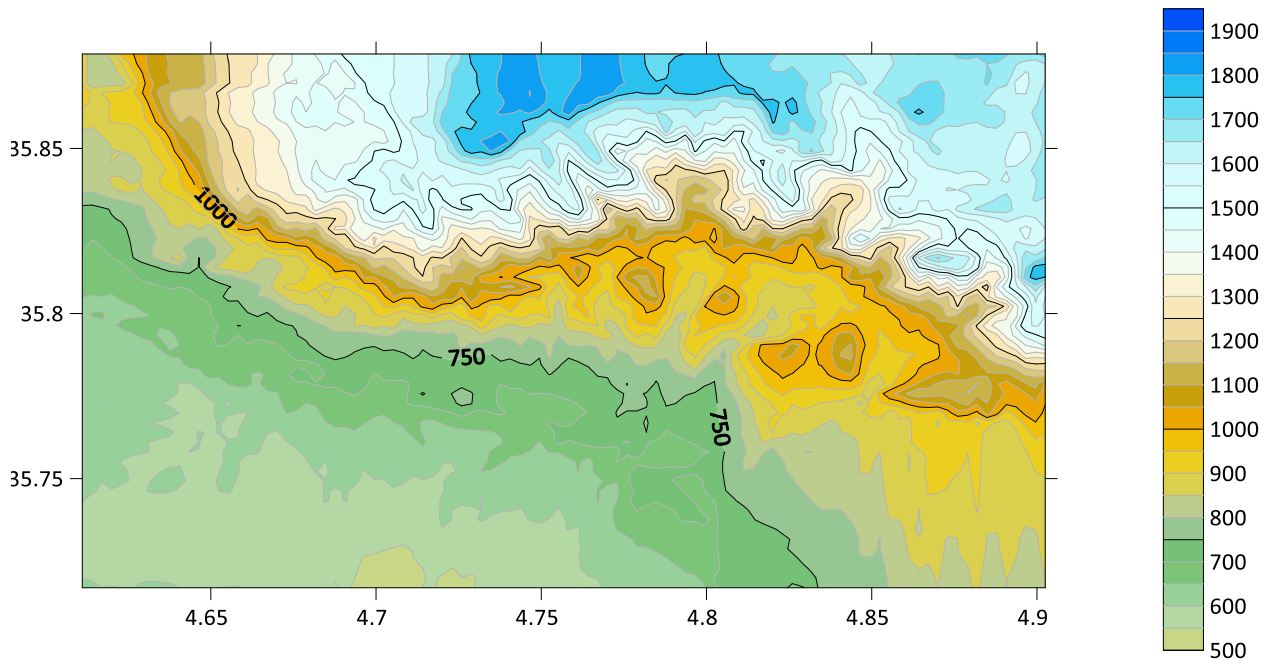


Figure IV.7. Carte des courbes de niveau obtenue par la méthode d'interpolation Géostatistique-Kriging

IV.3.2.3. Comparaison des résultats des méthodes d'Interpolation

Selon le temps pris par l'opération, l'allure des courbes de niveaux et leur topologie on constate que (figure IV.6.) :

La distance inverse est rapide mais a tendance à générer des motifs "en œil de bœuf" de contours concentriques autour des points de données.

La méthode de maillage du plus proche voisin attribue la valeur du point le plus proche à chaque nœud de la grille. Dans notre cas les données sont presque sur une grille avec seulement quelques valeurs manquantes, cette méthode est efficace pour combler les trous dans les données.

La courbure minimale est largement utilisée dans les sciences de la terre. La surface interpolée générée par Courbure minimale est analogue à une fine plaque linéairement élastique traversant chacune des valeurs de données avec une flexion minimale. Elle génère la surface la plus lisse possible. La courbure minimale n'est cependant pas un interpolateur exact.

Le Krigeage est la méthode de maillage génère une bonne carte pour la plupart des ensembles de données. Pour les ensembles de données plus volumineux, le Krigeage est plutôt lent. C'est la seule méthode qui peut extrapoler les valeurs de la grille au-delà de la plage Z de vos données.

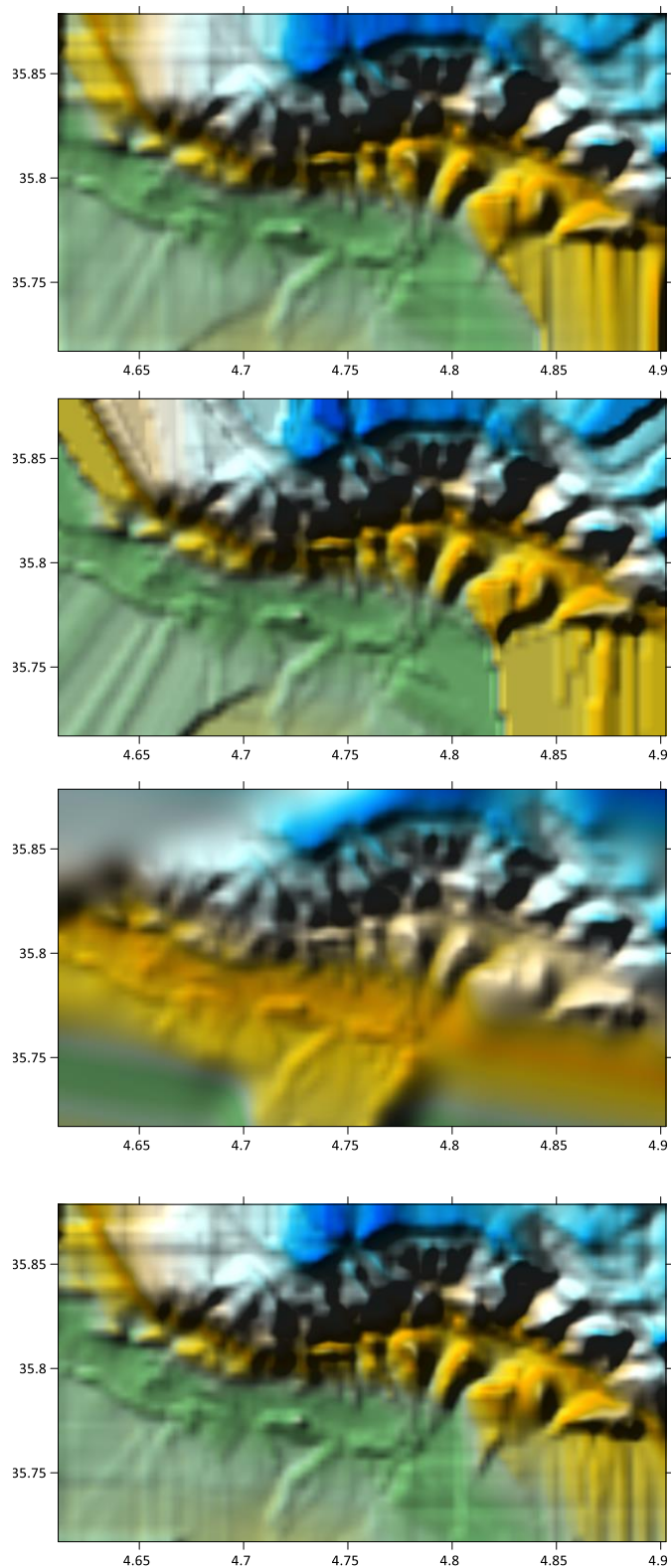


Figure IV.8. Comparaison entre les « colors reliefs » des différentes méthodes d'interpolation utilisées

De haut en bas : IDW – Plus proche voisin – Courbure minimale et Krigeage

Ces résultats sont confirmés sur les représentations en 3D (figure IV.9.) et en comparaison avec les images Google Earth en trois dimensions (figure IV.10), le relief est constitué d'une colline, des oueds et des rives.

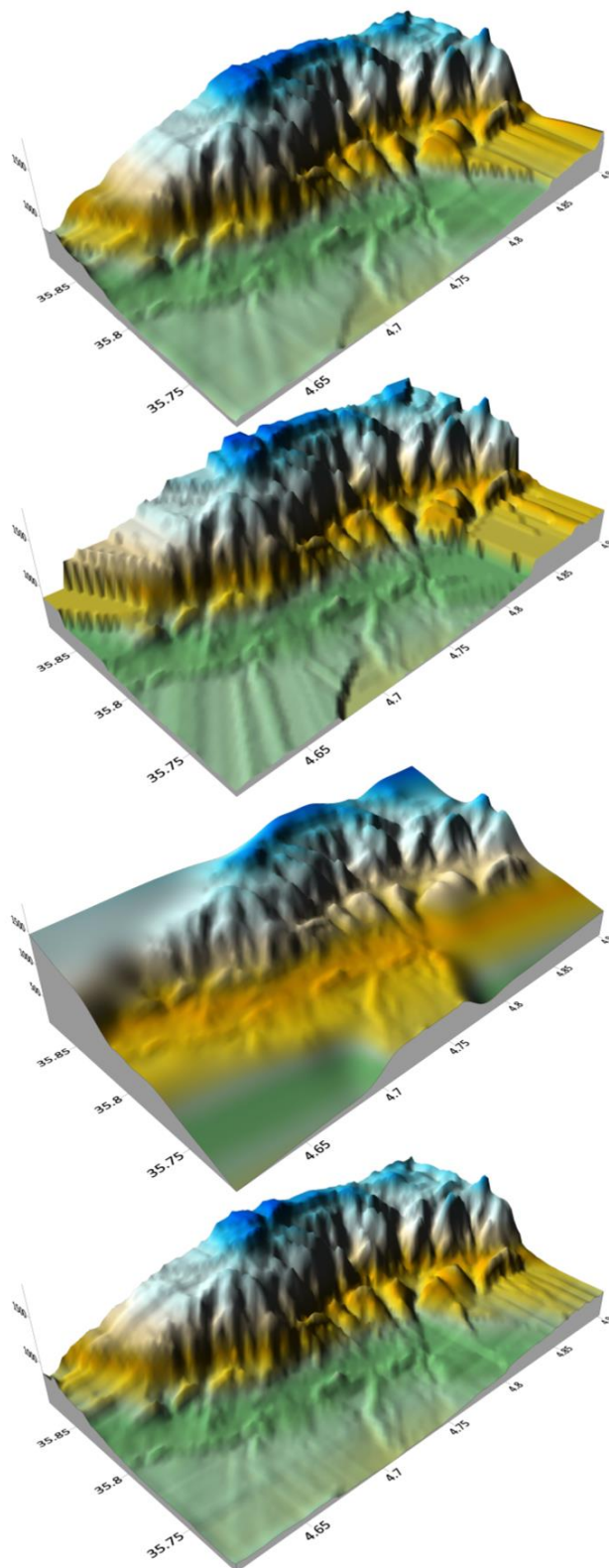


Figure IV.9. Cartes de surface en 3D

De haut en bas : IDW – Plus proche voisin – Courbure minimale et Krigage



Figure IV.10. Image Google en 3D de la commune de Maadid

IV.4. Synthèse

Le choix judicieux de la méthode de prédiction spatiale par une méthode d'interpolation déterministe ou géostatistique doit se faire selon plusieurs critères :

- la taille de l'échantillon étudié ;
- le type d'opération interpolation ou extrapolation ;

A l'opposé de la méthode de Krigeage, les méthodes déterministes IDW, plus proche voisin ou par Courbure minimale n'extrapolent pas les valeurs de la grille au-delà de la plage Z des données.

Malgré qu'il soit lent le Krigeage est la méthode de maillage génère une bonne carte.

Conclusions Générales

Un Modèle numérique de terrain (DEM) est une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique. Il peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (points cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules).

La prédiction spatiale est un processus (ou une opération mathématique) consistant à utiliser des points ayant des valeurs connues pour estimer la valeur pour d'autres points (inconnus).

La variété de méthodes d'interpolation disponibles permet différentes interprétations des données et de choisir la méthode la plus appropriée aux besoins de l'utilisateur.

Ces méthodes peuvent être séparées en deux principales catégories : les approches déterministes et les approches géostatistiques.

L'outil numérique Surfer nous a permis d'établir un modèle numérique sous forme d'une carte des courbes de niveau et en 3D selon la méthode d'interpolation utilisée dans la prédiction spatiale et de prévoir l'erreur commise.

La méthode géostatistique par krigeage donne de bons résultats, même pour les zones de forte déclivité ainsi que pour les zones couvrant des pentes abruptes et douces à la fois.

Les méthodes géostatistiques tiennent en compte des structures d'autocorrélation des hauteurs de la zone, afin de définir les poids optimaux. Mais, en contrepartie, ces méthodes ont besoin d'un utilisateur qualifié, possédant de bonnes connaissances en géostatistiques.

D'après notre modeste étude, nous pouvons dire que les méthodes **IDW** et **Krigeage** s'adaptent plutôt bien, quelles qu'elles soient les variations de terrain. Les autres méthodes sont généralement plus sensibles aux variations.

Dans les zones à faible pente, le **Krigeage** et le plus proche **Voisin** donnent de très bons résultats, et nous conseillons de les adopter dans ce cas. Dans les zones de forte pente, les différences moyennes sont moins marquées et on doit les analyser plus au cas par cas.

La méthode du plus proche **Voisin** a montré des valeurs quasiment optimales sur des surfaces lisses.

Dans tous les cas, le **Krigeage** donne de bons résultats, même pour les zones de forte déclivité ainsi que pour les zones couvrant des pentes abruptes et douces à la fois. Par le biais du variogramme, elle permet de modéliser la structure du phénomène étudié.

Mais, en contrepartie, la méthode a besoin une bonne maîtrise des outils pour avoir de bons résultats et qu'elle est imprécise en cas de forte hétérogénéité des données. C'est pourquoi l'analyse variographique est prépondérante.

Références Bibliographique

Arnaud (M.), Emery (X.), 2000. Estimation et interpolation spatiale, Méthodes déterministes et méthodes géostatistiques. Hermès Science Europe, 2000, 221p.

Baddeley, E. Rubak, R. Turner Spatial Point Patterns (2015) Brunsdon, C., Fotheringham, A. S., Charlton, M. E. Geographically weighted regression: a method for exploring spatial nonstationarity (1996).

Interpolation spatiale. Méthodes d'interpolation <http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/ggr-13470/htm/Semaine10.htm>

Kechroud A. et Boufessiou M. (2021), la prédiction spatiale par krigeage des propriétés des sols, validation sur un cas réel (Carte de salinité à Matmar –wilaya de Relizane). Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

Matheron G. La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris, Fascicule 5, 1970, p. 212.

N.L. Cressie Statistics for spatial data (1993) M. Hannoun Un survol des méthodes élémentaires en statistique spatiale (2000) M. Fischer, A. Getis Handbook of applied.

Phillips D.L. - Dolph J. - Marks D. "A comparison of geostatistical procedures for spatial analysis of precipitation in mountainous terrain", Agriculture and Forest Meteorology, vol. 58, 1992, 119-141.

Rhind D. "A skeletal overview of spatial interpolation techniques", Computer Applications, vol. 2, n° 3/4, 1975, 293-309.

Sandra Aussel et Laure Saligny (2005), Géomatique, Analyse & Modélisation Spatiale en Archéologie. Support de cours - Conception d'un MNT à partir de relevés GPS.

Sibson R. "A Brief Description of Natural Neighbor Interpolation, Interpreting Multivariate Data", John Wiley and Sons, Barnett editor, New York, 1981, 21-36.

Zourig M. et Korichi I. (2021), Effet de la méthode d'interpolation sur l'établissement d'une carte de prédiction, application à l'établissement du MNT de la zone de Bichara à Maadid -wilaya de Msila. Mémoire de Master en géotechnique à l'université de M'sila.

Sites internet

Traitement et visualisation des données tridimensionnelles
<http://www.unites.uqam.ca/dgeo/GEO7511/htm/section11.htm>

Interpolation spatiale. Méthodes d'interpolation
<http://www.ggr.ulaval.ca/Cours/ggr-13470/htm/Semaine10.htm>

Le krigeage : la méthode optimale d'interpolation spatiale (Yves Gratton)
http://www.iag.asso.fr/pdf/krigeage_juillet2002.pdf

Statistiques et Interpolations dans les SIG (Laurent Drapeau)
<http://www.faocopemed.org/vldocs/0000028/publi10.pdf>

Technologie MNT (Computa maps)
http://www.computamaps.com/fr_tech_dtm.php

http://isa.univ-tours.fr/download/ET2005_AT9.pdf

Manuel Golden Software Surfer 16.3.1