



**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 :

ZOURIG Meryem & KORICHI Inas

THEME

**EFFET DE LA METHODE D'INTERPOLATION SUR
L'ETABLISSEMENT D'UNE CARTE DE PREDICTION**

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

Soutenu devant le jury composé de Messieurs :

MAHAMED Abdelkrim, M.C.A, Université Med Boudiaf - M'sila, Président

HAMITOUCHE Amar, M.A.A, 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 tenons à rendre un grand hommage à nos professeurs qui n'ont jamais cessé de travailler dur pour assurer le bon déroulement de notre formation.

Il s'agit du Professeur KHEMISSE Mohamed et de M. SEDDIKI Ahmed, qui nous ont apporté leur ferme soutien.

Résumé

Le modèle numérique de terrain (MNT) est la représentation numérique de la **topographie** du terrain. C'est une pièce maitresse permettant l'extraction de nombreux paramètres tels que la pente, les profils en long et en travers, le calcul des cubatures, etc. Ces paramètres sont régulièrement utilisés comme outils de décision dans la gestion des études. Pour générer un MNT on part de données vectorielles (points, lignes, surfaces) contenant des informations de hauteur (élévation), que l'on interpole pour avoir une surface continue XYZ. La précision du modèle de terrain généré dépend du mécanisme **d'interpolation** utilisé. Il est donc nécessaire d'étudier la performance comparée des différentes méthodes dans ce contexte. Nous avons comparé entre eux les techniques d'interpolation déterministe, à savoir : l'inverse de la distance pondérée (IDW), le Voisin Naturel et la triangulation et avec la méthode géostatistique qui est 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, vectorielles, données, interpolation, Krigeage, SIG.

Abstract

The digital terrain model (DEM) is the digital representation of the topography of the terrain. It is a masterpiece allowing the extraction of many parameters such as slope, longitudinal and cross sections, calculation of cubature, etc. These parameters are regularly used as decision tools in the management of studies. To generate a DEM, we start from vector data (points, lines, surfaces) containing height information (elevation), which we interpolate to have a continuous surface XYZ. The accuracy of the generated terrain model depends on the interpolation mechanism used. It is therefore necessary to study the comparative performance of the different methods in this context. We compared with each other the deterministic interpolation techniques, namely: the inverse of the weighted distance (IDW), the Natural Neighbor and the triangulation and with the geostatistical method which is the Kriging.

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

Keywords. DEM, topography, vectors, data, interpolation, Kriging, GIS.

ملخص

نموذج التضاريس الرقمي هو التمثيل الرقمي لتضاريس التضاريس. إنها تحفة فنية تسمح باستخراج العديد من المعلومات مثل المنحدر والمقاطع الطولية والعرضية وحساب المكعبات وما إلى ذلك. تستخدم هذه المعلومات بانتظام كأدوات قرار في إدارة الدراسات. لإنشاء نموذج التضاريس الرقمي، نبدأ من بيانات المتجه (النقاط، الخطوط، الأسطح) التي تحتوي على معلومات الارتفاع، والتي نقوم بإدخالها للحصول على سطح مستمر (س، ع، ص).

تعتمد دقة نموذج التضاريس المولدة على آلية الاستيفاء المستخدمة. لذلك من الضروري دراسة الأداء المقارن للطرق المختلفة في هذا السياق. قارنا مع بعضنا البعض تقنيات الاستيفاء الحتمية، وهي: معكوس المسافة الموزونة والجوار الطبيعي والتثليث والطريقة الجيوإحصائية كريجينغ. أخيراً، تمت مناقشة الطرق المستخدمة لتشتيت أخطاء النموذج في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية.

الكلمات الدالة: نموذج التضاريس الرقمي، طبوغرافيا، شعاعي، بيانات، استيفاء، كريجينغ، نظم المعلومات الجغرافية.

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Synthèse Bibliographique

Chapitre Premier.....	5
Systèmes d'Information Géographique	5
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition d'un système d'information	5
I.3. Définition d'un système d'information géographique.....	5
I.4. Les composantes d'un SIG	6
I.5 Structure d'un le SIG :	8
I.6 Les fonctionnalités d'un SIG (les 5 A)	9
I.7 Domaine d'application des SIG	10
I.8 Les données dans les SIG	11
Chapitre Deuxième	17
Le Modèle Numérique de terrain	17
II.1. Introduction	17
II.2. La Grille du Modèle Numérique de Terrain (MNT)	17
II.3. Différents types de maillage	18
II.4. MNT ou MNE ou MNS.....	18
II.5. Acquisition des données altimétriques	19
II.6. Création du modèle numérique de terrain MNT	20
Chapitre Troisième	23
La prédiction Spatiale	23
III.1. Donnée spatiale	23
III.2. Propriétés particulières des données spatiales.....	23
III.3. Définition de la prédiction Spatiale.....	23
III.4. L'Interpolation Spatiale.....	23
III.5. Domaines d'application.....	24
III.6. Visualisation du relief	25
III.7. Les Méthodes d'interpolation.....	26
III.8. Méthodes d'interpolation utilisées	27

Simulation Numérique

Chapitre quatrième	39
Application à l'établissement du MNT de la zone de Bichara à Maadid	39
IV.1. Présentation de la zone d'étude.....	39
IV.2. Données utilisées.....	40
IV.3. La prédiction Spatiale des altitudes	42
IV.4. Synthèse	49
Conclusions Générales	50
Références Bibliographique	52

Liste des Figures

<i>Figure I.1 Schéma du Système d'Information Géographique.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.2. Les composants d'un SIG</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.3. Structure d'un SIG</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.4. Les fonctionnalités d'un SIG</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.5. Les cinq fonctionnalités d'un SIG - 5A –</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.6. Types de données dans un SIG.....</i>	<i>12</i>
<i>Figure I.7. Modes de représentation des données dans un SIG.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.8. Représentation des Données en mode Vecteur (aspect sémantique)</i>	<i>15</i>
<i>Figure I.9. Représentation en Mode Raster</i>	<i>15</i>
<i>Figure II.1. Grille d'un modèle de terrain</i>	<i>17</i>
<i>Figure II.2. Propriétés du Maillage</i>	<i>18</i>
<i>Figure II.3. Différents types de modèles numériques de terrain.....</i>	<i>19</i>
<i>Figure II.4. Recueillement des données altimétrique a/ Numérisation(vectorisation) b/ Stéréoscopie</i>	<i>20</i>
<i>Figure III.1. Principe de l'interpolation</i>	<i>24</i>
<i>Figure III.2. Passage du discontinu (Points) Vers le Continu (Surface) Par interpolation</i>	<i>24</i>
<i>Figure III.3. Visualisation du relief sous format vectoriel et matriciel en a/2D et en b/3D</i>	<i>25</i>
<i>Figure III.4. Les deux niveaux d'abstraction en interpolation spatiale.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.5. Interface du logiciel Surfer 16.3.1.....</i>	<i>27</i>
<i>Figure III.6. Exemples de carte réalisée par le logiciel Surfer.....</i>	<i>29</i>
<i>Figure III.7. Options de la méthode Inverse de la distance IDW</i>	<i>30</i>
<i>Figure III.8. Comparaison entre des méthodes IDW (à gauche) et voisin naturel (à droite).....</i>	<i>31</i>
<i>Figure III.9. Création de la triangulation à partir des points sélectionnés.....</i>	<i>32</i>
<i>Figure III.10. Options de la méthode Local Polynomial</i>	<i>33</i>
<i>Figure III.11. Options de la méthode Krigeage</i>	<i>34</i>
<i>Figure II.12. Paramètres par défaut d'un variogramme</i>	<i>35</i>
<i>Figure IV.1. Situation de la commune de Maadid par rapport à la wilaya de Msila.....</i>	<i>39</i>
<i>Figure IV.2. Mont et site archéologique Kalâa des Béni Hammad</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV.3. Localisation de la zone d'étude « Mechta Bichara » à Maadid.....</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV.4. Statistique de la série d'altitudes.....</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV.5. Paramètres de la méthode d'interpolation IDW</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV.6. Cartes des courbes de niveau obtenues par les méthodes d'interpolation déterministes.....</i>	<i>44</i>
<i>Figure IV.7. Carte des courbes de niveau obtenue par la méthode d'interpolation Géostatistique</i>	<i>45</i>
<i>Figure IV.8. Comparaison entre les différentes méthodes d'interpolation utilisées</i>	<i>46</i>
<i>Figure IV.9. Cartes de surface en 3D</i>	<i>47</i>
<i>Figure IV.10. Image google comparable à la surface 3D obtenue par interpolation</i>	<i>48</i>

Introduction Générale

Le MNT (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. Même si le MNT représenté sous forme de triangles irréguliers présente certains avantages (Peucker et al., 1978), dans la grande majorité des cas, le MNT est représenté comme un ensemble de mailles régulières, caractérisées chacune par une valeur d'altitude, dans le but d'en faciliter la manipulation et le stockage en mémoire de l'ordinateur pendant les calculs.

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.

Selon Carter (1988), un MNT, même de meilleure exactitude, reste une approximation de la réalité du terrain. Par conséquent, il contient toujours des erreurs. Ces erreurs se propagent inévitablement dans les différentes applications qui l'utilisent et peuvent influencer considérablement les résultats finaux (Huang et al., 2005 ; Oksanen et al., 2005).

La génération d'un MNT nécessite l'acquisition de données spatiales soit sous forme de données altimétriques, soit sous forme de données photogrammétriques. 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.

Dès lors, il est d'une grande importance que nous nous intéressions de près à ces nouvelles technologies, ainsi qu'à l'analyse des erreurs des MNT qui en sont issues afin de les quantifier d'une part et d'autre part, d'identifier les méthodes permettant de les propager à travers une application.

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.

L'accent est particulièrement mis sur les nouvelles méthodes d'acquisitions des données altimétriques de hautes densités qui permettent de générer des MNT de haute résolution spatiale¹ dont la précision altimétrique est de quelques centimètres.

Le MNT n'étant pas exempt d'erreurs, nous présentons également les méthodes géostatistique tel que le Krigeage qui produisent probablement les meilleures cartes mais sont un peu plus lentes.

Première partie

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Chapitre Premier

SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE
(SIG)

SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE

1.1. Introduction

Les besoins en cartographie dans le quotidien des décideurs ont fait apparaître les systèmes d'information géographique (SIG). L'objectif du SIG est de produire des données géographiques dans le but d'effectuer des traitements sur les informations géo localisées pour visualiser des cartes et prendre des décisions. C'est une des missions fondamentales du SIG que de fournir aux décideurs l'information pertinente à la prise de décision.

Ce chapitre met le point sur les concepts fondamentaux des SIG et leurs intérêts dans la gestion des différents réseaux.

1.2. Définition d'un système d'information

- En effet, dans la mesure où c'est un « ensemble organisé de ressources : matériel, logiciel, personnel, données, procédures... permettant d'acquérir, de traiter, stocker, communiquer des informations (sous formes données, textes, images, sons...) dans des organisations. »
- Une définition d'un SI d'un point de vue systémique essaie de le situer par rapport à d'autres systèmes existants (système opérationnel et système de pilotage). Un SI est chargé, en effet, de stocker et de traiter les informations relatives au « système opérant » afin de les mettre à disposition du « système de pilotage ».

1.3. Définition d'un système d'information géographique

- Un SIG ou Système d'Information Géographique est un système d'information capable d'organiser, saisir, stocker, mettre à jour, manipuler, analyser et de présenter des données alphanumériques spatialement référencées, ainsi que de produire des plans et des cartes. Ses usages couvrent les activités géomatiques de traitement et diffusion de l'information géographique. On

peut enfin définir un SIG comme étant un système informatisé capable de représenter sous forme numérique un territoire ou une partie d'un territoire (figure I.1.).

1.4. Les composantes d'un SIG

Un système d'information géographique SIG est constitué de 5 composants majeurs :

1. Les logiciels ;
2. Les données ;
3. Les matériels informatiques ;
4. Les savoir-faire ;
5. Les utilisateurs.



Figure I.1 Schéma du Système d'Information Géographique

I.4.1 Les logiciels

- ils assurent les six fonctions suivantes :

- ☐ Saisie des informations géographiques sous forme numérique (acquisition),
- ☐ gestion de base de données (archivage),
- ☐ manipulation et interrogation des données géographiques (analyse),

- ☐ Mise en forme et visualisation (affichage),
- ☐ Représentation du monde réel (abstraction),
- ☐ La prospective (anticipation).

I.4.2 Les données

Les données géographiques sont importées à partir de fichiers ou saisies par un opérateur. Une donnée est dite « géographique » lorsqu'elle fait référence à un (ou plusieurs) objet(s) localisé(s) à la surface de la terre. Ses coordonnées sont définies par un système de référence spatiale.

I.4.3 Les matériels informatiques

Le traitement des données se fait à l'aide des logiciels sur un ordinateur de bureau, un ordinateur durci ou sur une tablette directement sur le terrain.

L'ordinateur de terrain avec appareil photo, GPS et laser télémètre permet la cartographie et la collecte des données.

La construction de la carte en temps réel et la visualisation de la carte sur le terrain augmentent la productivité et la qualité du résultat.

Des systèmes client-serveur en intranet, extranet voire via internet facilitent ensuite, et de plus en plus, la diffusion des résultats.

I.4.4 Les savoir-faire

Un système d'information géographique fait appel à une connaissance technique et à divers savoir-faire, et donc divers métiers, qui peuvent être effectués par une ou plusieurs personnes. Le spécialiste doit mobiliser des compétences :

- ☐ En géodésie (connaissance des concepts de système de référence et de système de projection),
- ☐ En analyse des données, des processus et de modélisation (analyse merise, langage umL par exemple),

- En traitement statistique,
- En sémiologie graphique et cartographique (ensemble des règles d'un système graphique de signes pour la transmission d'une information. C'est un système de signes, rigoureux et simple, que chacun peut apprendre à utiliser et qui permet de mieux comprendre des cartes),
- En traitement graphique.
- Il doit savoir traduire en requêtes informatiques les questions qu'on lui pose.

I.4.5 Les utilisateurs

Il ne faut jamais perdre de vue que les systèmes d'information géographiques leurs sont dédiés. Il peut s'agir, suivant les objectifs de celui-ci du grand public, de techniciens ou d'ingénieurs.

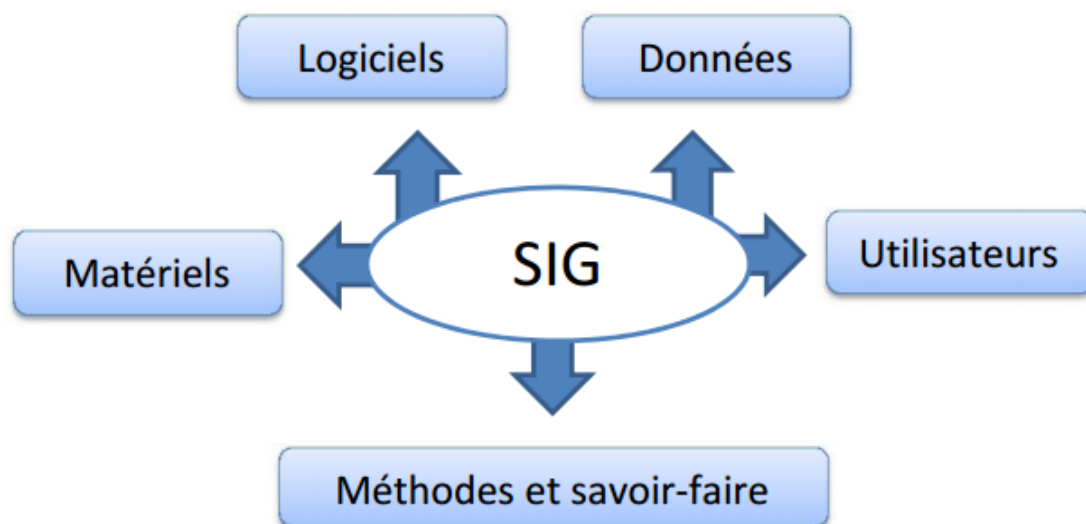


Figure I.2. Les composants d'un SIG

I.5 Structure d'un le SIG :

La figure I.2 met en évidence quatre groupes de fonctionnalités au-dessous d'une couche d'applications : l'acquisition des données géographiques d'origines diverses, la gestion pour le stockage et la recherche des données, l'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation et enfin la présentation des résultats sous forme cartographique.

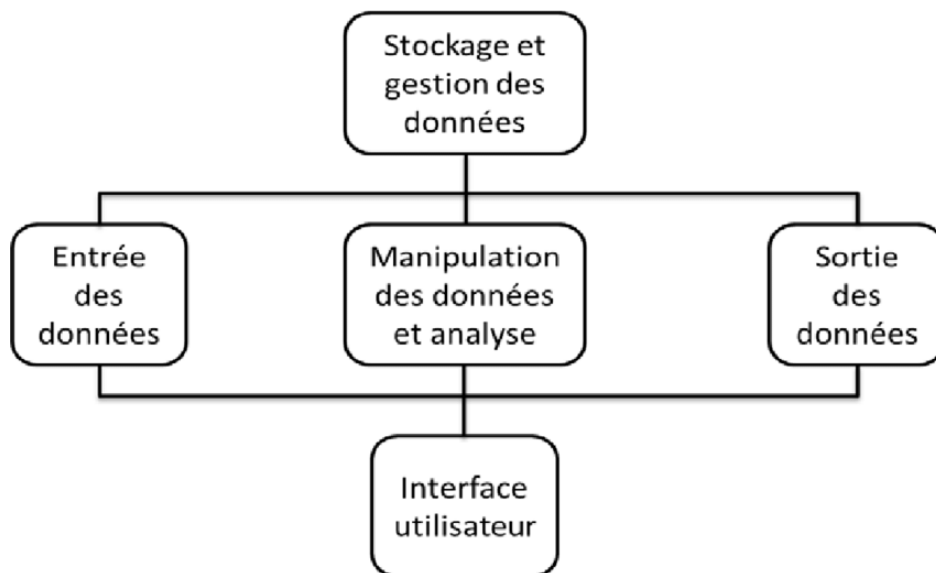


Figure I.3. Structure d'un SIG

I.6 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.

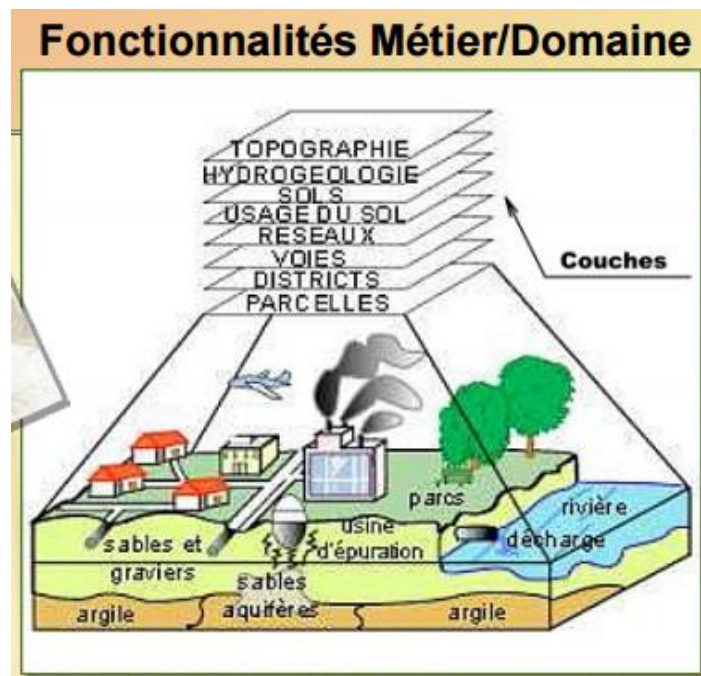


Figure I.4. Les fonctionnalités d'un SIG

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.
- **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.
- **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.



Figure I.5. Les cinq fonctionnalités d'un SIG - 5A –

I.7 Domaine d'application des SIG

Les approches ont mis en évidence le fait qu'un système d'information géographique est un outil de gestion et d'aide à la décision. C'est un outil de gestion pour le technicien qui doit au quotidien assurer le fonctionnement d'une activité.

Le SIG doit aussi être un outil d'aide à la décision pour le décideur (directeur, administrateur) qui doit bénéficier de sa puissance et disposer de cartes de synthèses pour prendre les meilleures décisions. C'est cette finalité qui permet d'employer le terme de système d'information et de donner aux SIG les domaines d'applications suivants :

I.7.1 Pour les grandes échelles

- La gestion foncière et cadastrale (recensement des propriétés, calcul de surfaces).
- La planification urbaine (plan d'occupation des sols et d'aménagement).
- La gestion des transports (voies de circulations, signalisation routière).
- La gestion des réseaux (assainissement, AEP, gaz, électricité, téléphone ...).
- La gestion du patrimoine (espaces verts, parcs, jardins ...).
- Les applications topographiques (travaux publics et génie civil).

I.7.2 Pour les échelles moyennes et petites :

- Les études d'impact (implantation d'un centre commercial ou d'une école).
- Les études d'ingénierie routière (constructions de routes ou d'autoroutes).
- Les applications liées à la sécurité civile (prévention des risques naturels et technologiques).
- La gestion des ressources naturelles (protection de l'environnement, études géologiques, climatologiques ou hydrographiques).

I.8 Les données dans les SIG

-Les données tiennent une grande place dans les projets de SIG. En effet, elles demandent une forte implication (qu'elle soit technique pour leur définition ou économique pour leur acquisition).

De fait, certains les définissent comme la solution SIG elle-même. Pour d'autres toutefois, elles ne sont qu'une composante, servant à « alimenter » le logiciel, dans le cadre d'une ou plusieurs

applications. Dans les faits, elles sont complémentaires des applications qu'elles aident à réaliser et des logiciels qui les exploitent. Applications, logiciels et données forment ainsi les trois principales composantes techniques des SIG.

Enfin, les données mettent en œuvre les concepts théoriques liés à l'information géographique dans des problématiques pratiques comme leur acquisition, leur mise à jour, leur qualité ou leur diffusion...

I.8.1 Les Types de données dans un SIG

- Le Généralement pour qu'un objet spatial soit bien décrit et prêt à être utilisé par un SIG, trois informations doivent être fournies :

- sa position géographique dans l'espace
- sa relation spatiale avec les autres objets spatiaux : topologie
- son attribut, c'est à dire ce qu'est l'objet avec un caractère d'identification (code)

Les systèmes d'information géographique permettent de traiter les données spatiales et associées (figure I.6).

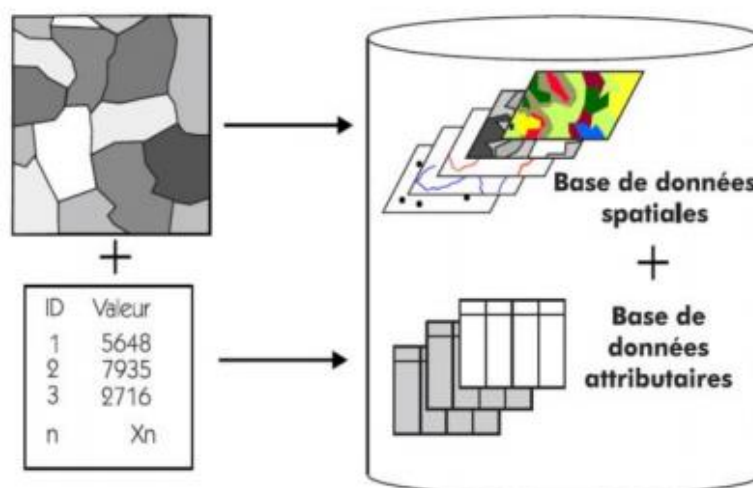


Figure I.6. Types de données dans un SIG

I.8.1.1 Les Données spatiales

- Elles déterminent les caractéristiques spatiales d'une entité géographique où sont représentés et identifiés tous les éléments graphiques :
- La localisation : coordonnées par rapport à une échelle graphique de référence.
- La forme : point, ligne, surface.
- La taille : longueur, périmètre, surface. Les informations font référence à des objets de trois
- Point : est désigné par ses coordonnées et à la dimension spatiale la plus petite.
- Ligne : a une dimension spatiale constituée d'une succession de points proches les uns des autres.
- Polygone (zone ou surface) : est un élément de surface défini par une ligne fermée ou la ligne qui le délimite.

I.8.1.2 Les Données associées

-Les données associées des entités géographiques permettent de compléter la représentation géométrique de l'entité spatiale. Chaque élément de l'espace reçoit un code d'identification qui peut être numérique ou littéral. Ce code constitue en quelque sorte une étiquette caractérisant le point, la ligne ou le polygone.

Parmi ces données il faut distinguer :

- Données de classification : Ces données permettent de ranger le point isolé, la ligne ouverte ou la ligne fermée, dans une catégorie : limite administrative, contour de parcelle, bordure de trottoir, arbre d'alignement, conduite de réseau d'eau...

Souvent ces distinctions seront prises en compte par l'organisation même du travail de saisie. Tout se passe, comme si l'on distinguait plusieurs couches d'informations, que l'on saisit successivement.

- Données d'identification : Ces données permettent d'individualiser chaque objet figurant sur le plan : nom propre de l'objet, par exemple nom de la commune ou numéro permettant de l'identifier : numéro de parcelle, numéro de vanne...

- Données attributaires : Ces données viennent apporter une information supplémentaire, propre à chaque objet identifié : le propriétaire de la parcelle, le diamètre de la conduite d'eau...

I.8.2 Les modes de représentation dans un SIG

- a deux façons de représenter une image sous forme numérique soit en décomposant l'image en carrés de couleurs élémentaires, c'est le mode raster ou matriciel, soit en décomposant l'image en contours principaux et traits caractéristiques, c'est le mode vectoriel. Les apports de chacun des modes sont distincts. Il existe d'ailleurs deux familles spécifiques d'outils se dédiant respectivement à l'un ou à l'autre des modes ; les outils de traitement d'image pour le raster, les SIG pour le vecteur.

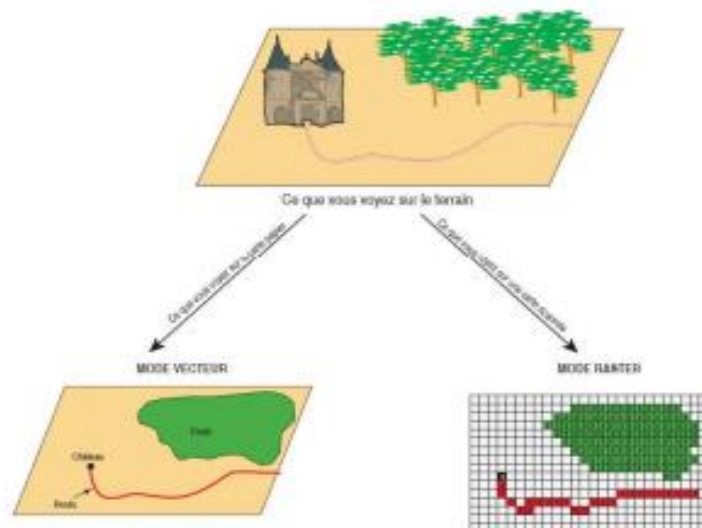


Figure I.7. Modes de représentation des données dans un SIG

I.8.2.1 Les 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. Une couche réunit généralement des éléments géographiques de même type. Les

éléments géographiques (objets spatiaux) peuvent être représentés sur une carte par des points, des lignes ou des polygones.

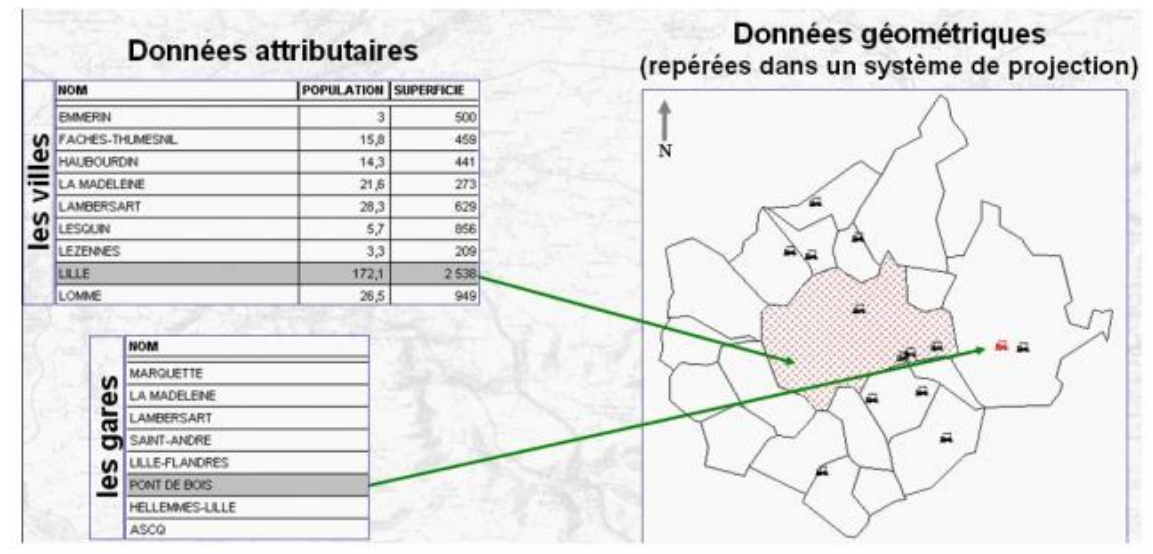


Figure I.8. Représentation des Données en mode Vecteur (aspect sémantique)

I.8.2.2 Les 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 balayage (scanners, capteurs en télédétection ...).

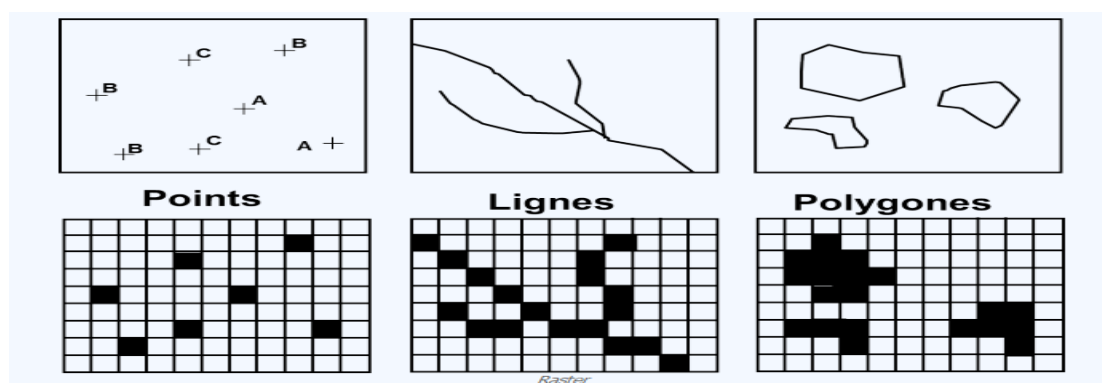


Figure I.9. Représentation en Mode Raster

Chapitre Deuxième

LE MODELE NUMERIQUE DU TERRAIN

LE MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN

II.1. Introduction

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

II.2. La Grille du Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le MNT est constitué d'une grille régulière de points. A chaque point d'intersection de la grille est associée une altitude et la distance entre deux points voisins suivant les axes est appelé le pas du MNT (figure II.).

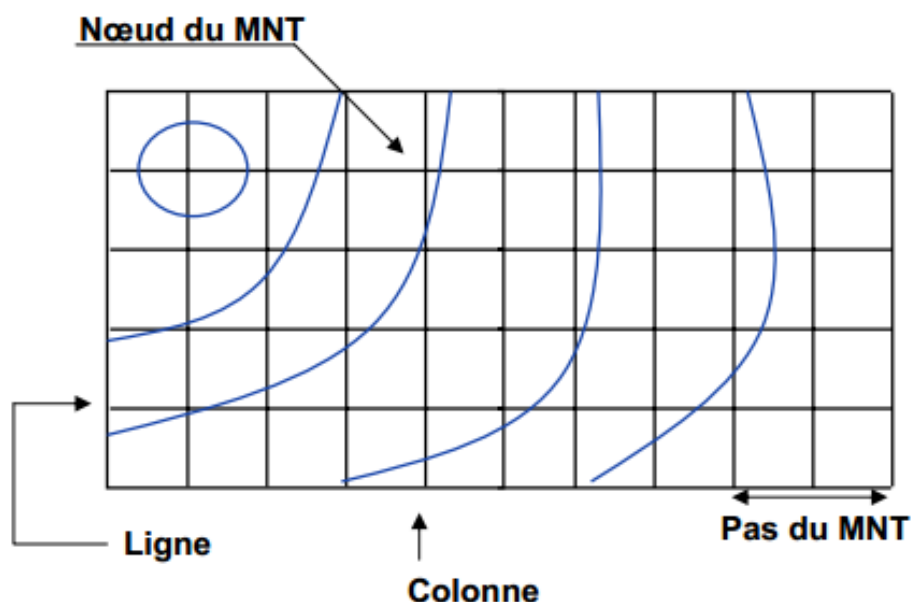


Figure II.1. Grille d'un modèle de terrain

II.3. Différents types de maillage

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

- Maillage régulier carré (raster),
- Maillage triangulaire régulier,
- Maillage triangulaire quelconque (TIN)

La qualité d'un MNT dépend directement de l'intervalle du maillage et de la source des données à partir desquelles il est généré (figure II.2.).

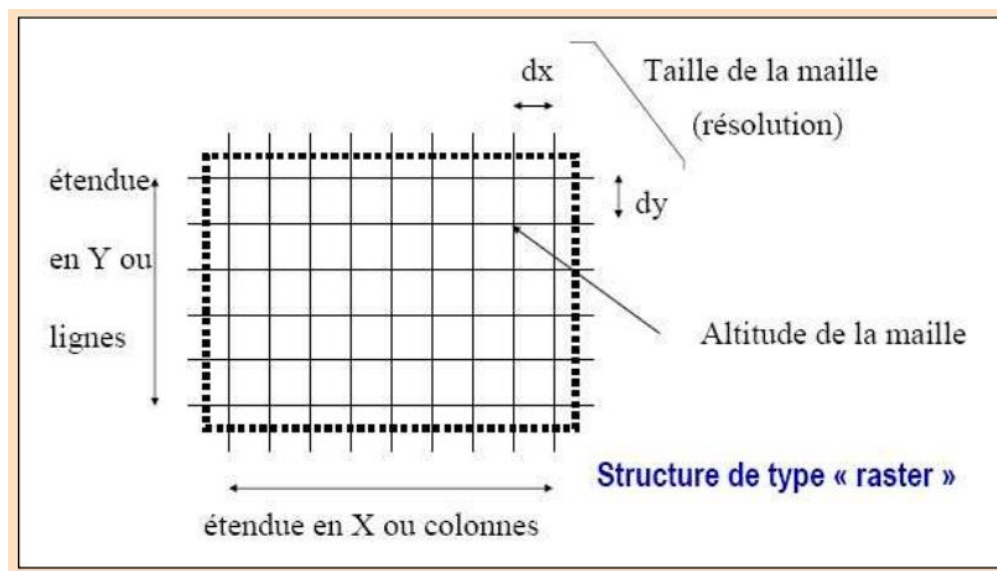


Figure II.2. Propriétés du Maillage

II.4. MNT ou MNE ou MNS

MNT ou MNE (modèle numérique d'élévation) / MNS (modèle numérique de sursol) ?

Un **MNT** représente **la surface théorique du sol** alors qu'un **MNE / MNS** représente la **surface théorique des points hauts** (ex : cime des arbres). Suivant la technique d'acquisition, on obtient un **MNT** ou un **MNE / MNS**... (figure II.3.)

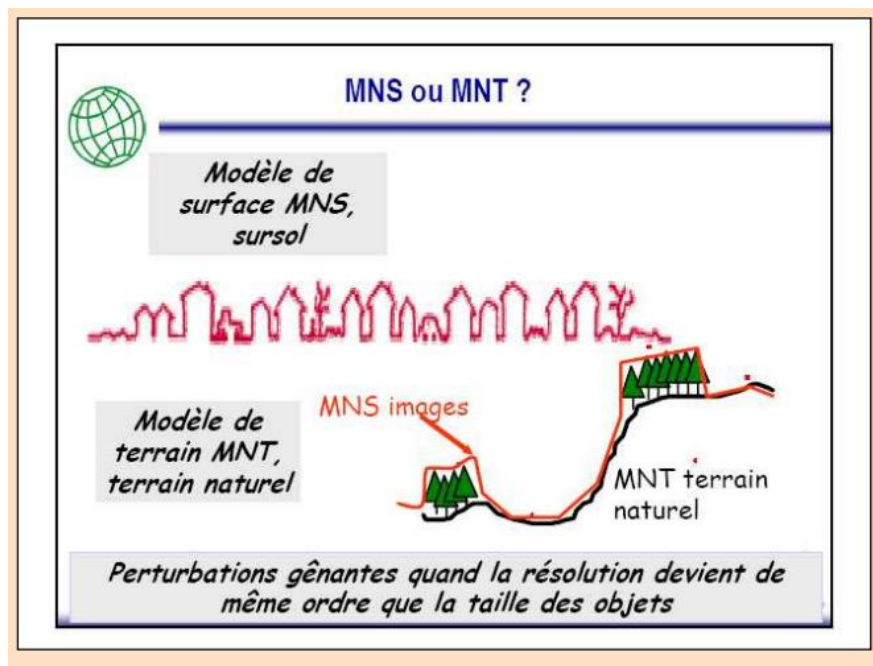


Figure II.3. Différents types de modèles numériques de terrain

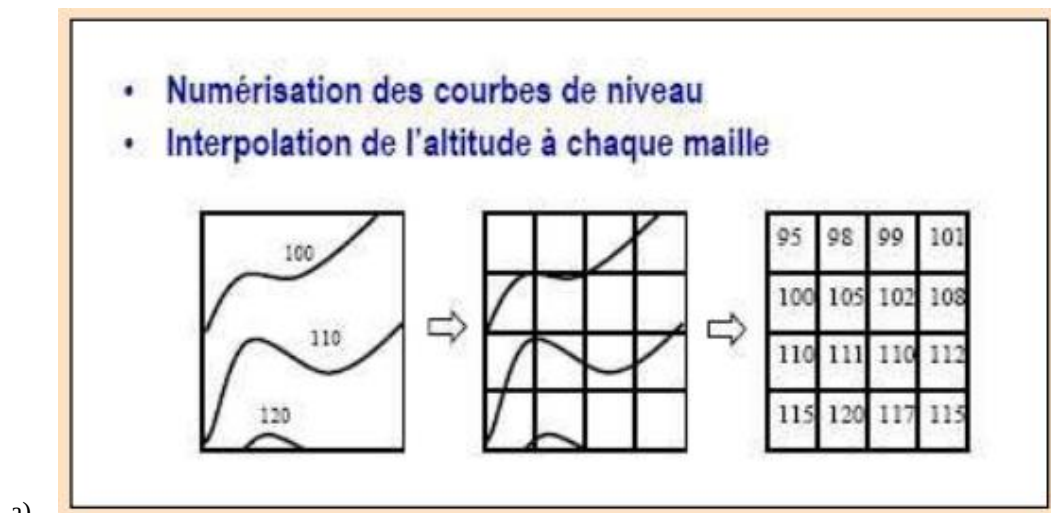
Autres appellations :

- Modèles numériques d'élévation = digital elevation model
- Modèles numériques d'élévation de terrain
- Modèles numériques altimétriques (MNA).

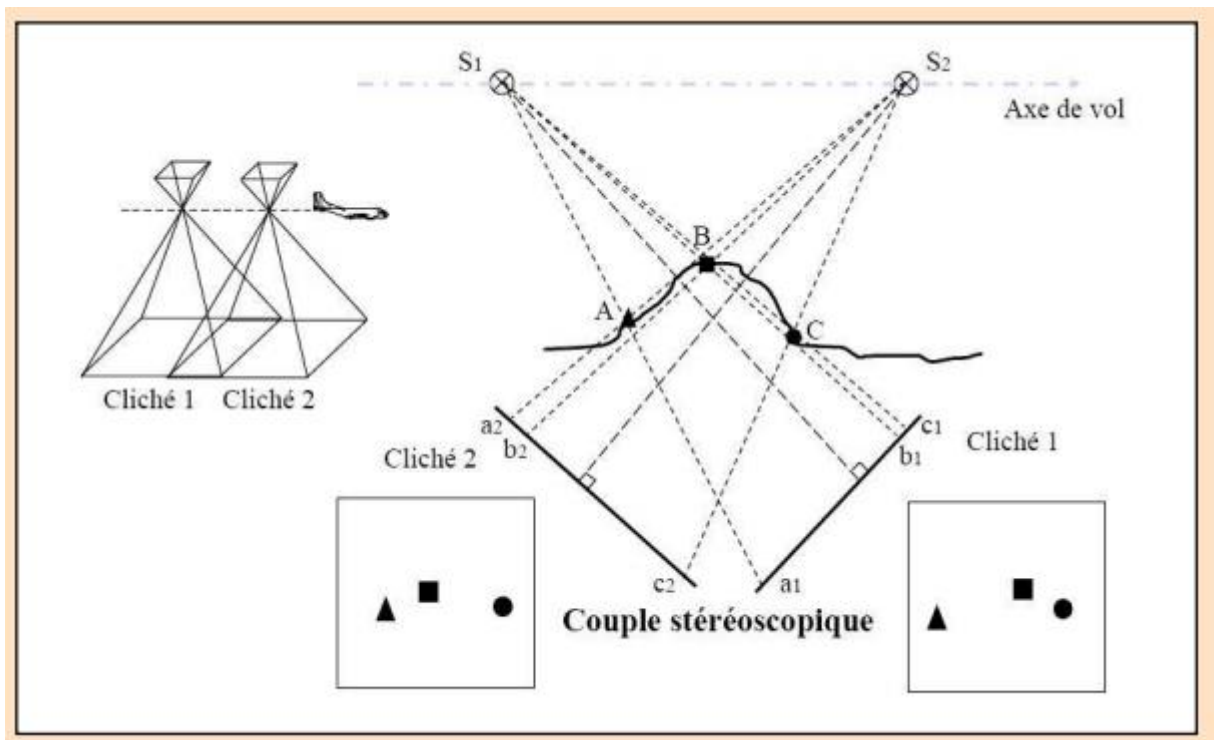
II.5. Acquisition des données altimétriques

Le recueillement des données altimétrique selon plusieurs façons :

- Saisie directe des coordonnées (x, y, z) des points du terrain : Levés sur le terrain ;
- Restitution photogrammétriques de photographies aériennes : Stéréoscopie (figure II.4. b);
- Corrélation automatique d'images satellitaires ;
- Numérisation (vectorisation) de courbes de niveau provenant de cartes (figure II.4.a).



a)



b)

Figure II.4. Recueil des données altimétrique a/ Numérisation(vectorisation) b/ Stéréoscopie

II.6. Création du modèle numérique de terrain MNT

Les semis de points ou les courbes de niveaux obtenus lors des relevés GPS, peuvent être utilisés pour créer des modèles numériques de terrain, mais également des surfaces triangulaires telles que les TIN, à partir de méthodes d'interpolation.

A partir de 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.

Chapitre Troisième

LA PREDICTION SPATIALE

LA PREDICTION SPATIALE

III.1. Donnée spatiale

Toute observation dont on connaît non seulement la valeur, mais aussi la localisation. $\Rightarrow$ Les coordonnées spatiales des objets à traiter constituent une information potentiellement riche pour l'analyse. Trois types de données spatiales : Continues Ponctuelles Surfaciques.

III.2. Propriétés particulières des données spatiales

- Dépendance spatiale : la valeur de l'observation i influence la valeur de l'observation j voisine ;
- Hétérogénéité spatiale : l'influence des variables explicatives sur la variable dépendante dépend de la localisation dans l'espace.

III.3. Définition de la prédiction Spatiale

Il existe une valeur pour la variable d'intérêt en tout point du territoire, mais elle est mesurée uniquement en un nombre discret de points.

Objectifs de l'analyse spatiale des données continues : Prédire la valeur d'une variable en un point où elle n'a pas été échantillonnée, ainsi que la fiabilité de cette prédiction.

III.4. L'Interpolation Spatiale

Comment à partir d'un nombre limité de mesures, peut-on avoir une représentation fidèle et non lissée d'un phénomène localisé dans l'espace ?

Les techniques d'interpolation permettent d'estimer des valeurs situées sur des lieux non échantillonnés, à partir de données mesurées, localisées dans l'espace (figure II.5.).

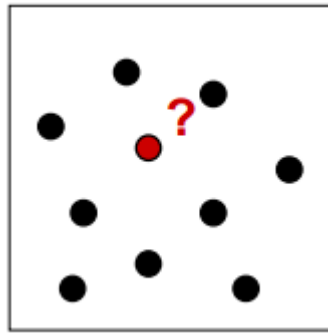


Figure III.1. Principe de l'interpolation

A partir d'un ensemble de points mesurés de manière aléatoire ou non, on peut modéliser une surface continue (figure III.2.).

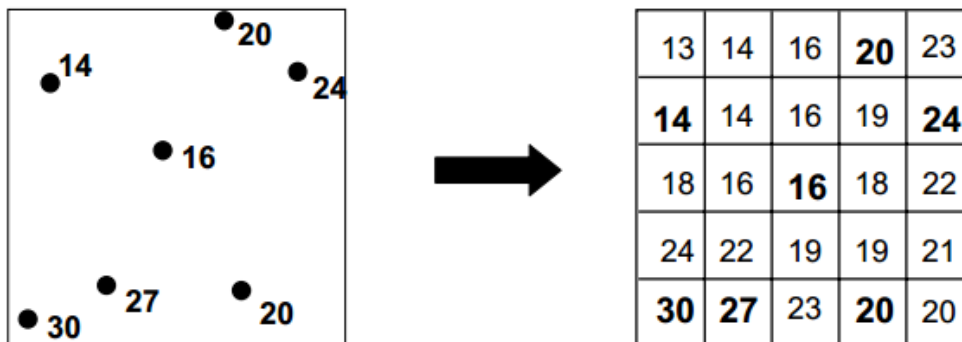


Figure III.2. Passage du discontinu (Points) Vers le Continu (Surface) Par interpolation

III.5. Domaines d'application

Topographie, Hydrologie, Environnement, Aménagement du territoire, etc.

Que peut-on interpoler ?

- Élévation ;
- Température, Précipitations, Concentrations chimiques.

Exemples de facteurs à interpolé

- Perméabilité du sol d'un bassin versant ;
- Altitude d'un semis de points disposés de manière irrégulière dans l'espace ;
- Concentrations en polluants dans différentes régions ;

- Teneur en azote mesurée sur des échantillons de sol répartis géographiquement.

III.6. Visualisation du relief

Le relief peut être visualisé sous format vectoriel en isolignes (courbes de niveaux), sous format matriciel (raster) en 2D ou en 3D (figure III.3.).

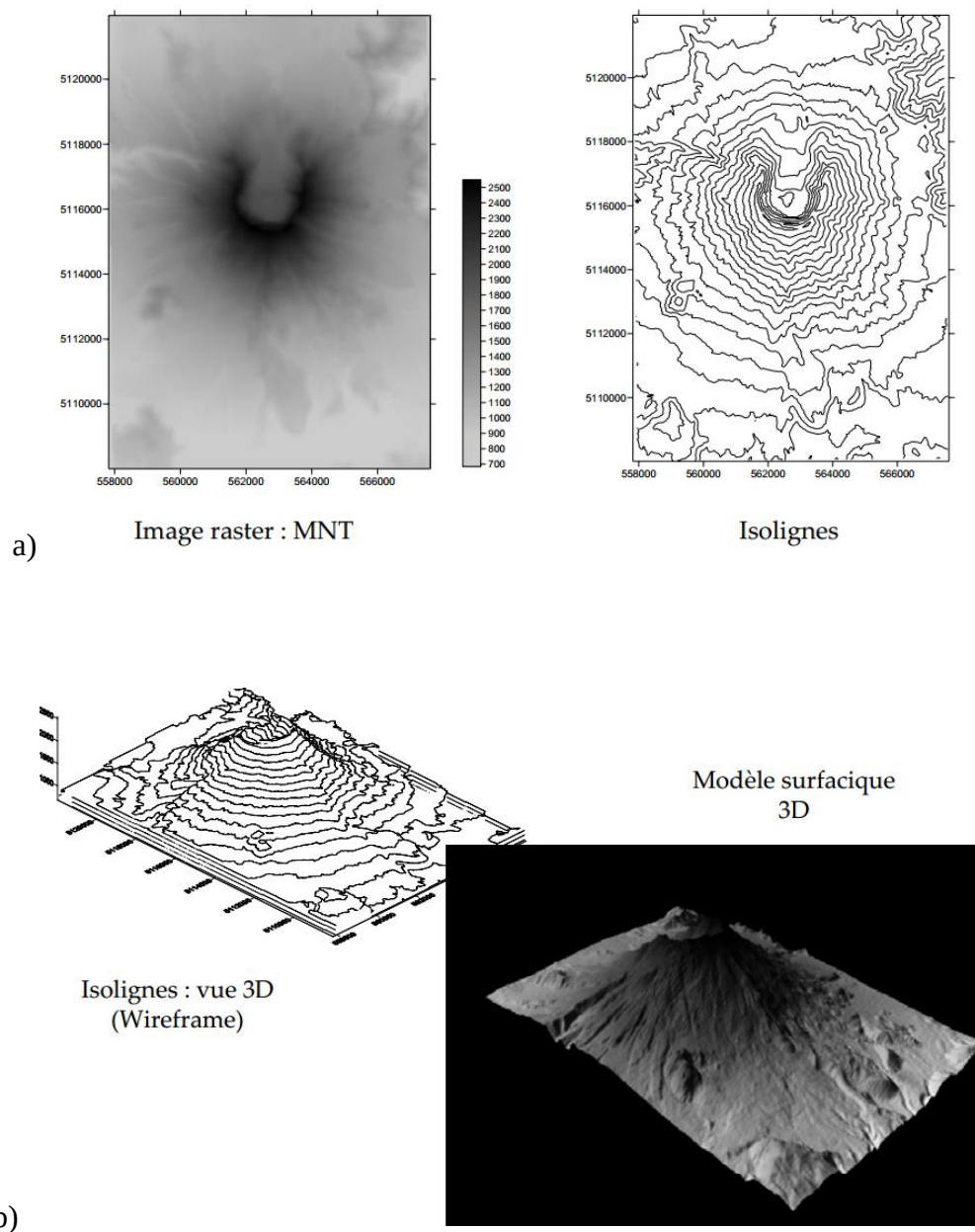


Figure III.3. Visualisation du relief sous format vectoriel et matriciel en a/2D et en b/3D

III.7. Les Méthodes d'interpolation

Le choix de la méthode va dépendre :

- Type de données (facteur étudié) ;
- Type d'échantillonnage (régulier, aléatoire, ...) ;
- Distribution spatiale du semis de points ;
- Temps de traitement ;
- Capacité de l'ordinateur (mémoire vive, disque dur).

III.7.1. Méthodes déterministes :

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

Ex. Triangulation, Inverse des distances (IDW), Splines

Ces méthodes utilisent deux types d'approche

- Approche Globale

- Ensemble du jeu de données utilisé lors de l'interpolation ;
- Permet de représenter des phénomènes montrant de grandes tendances générales.

- Approche Locale

Utilise les valeurs mesurées les plus proches et non l'ensemble.

III.7.2. Méthodes géostatistiques (Stochastiques) :

- Variables aléatoires associées à des probabilités
- Utilisation de fonction aléatoire ;
- Prise en compte de la corrélation spatiale des données ;
- Calcul des erreurs de prédiction, calcul de probabilité.

Ex. Krigage, cokrigage

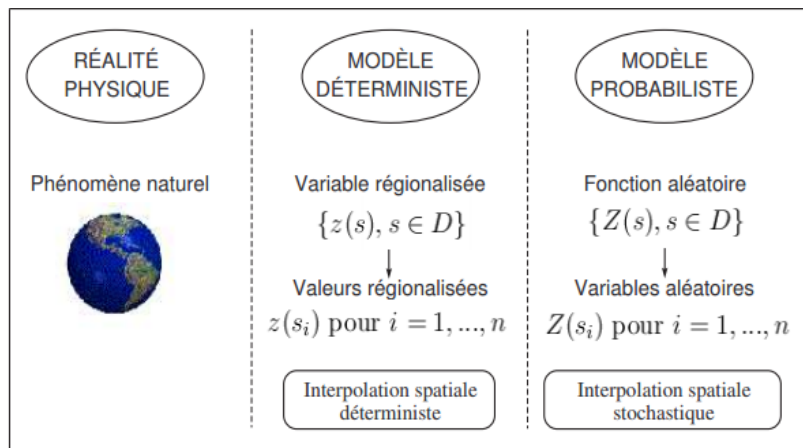


Figure III.4. Les deux niveaux d'abstraction en interpolation spatiale

III.8. Méthodes d'interpolation utilisées

III.8.1. 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.

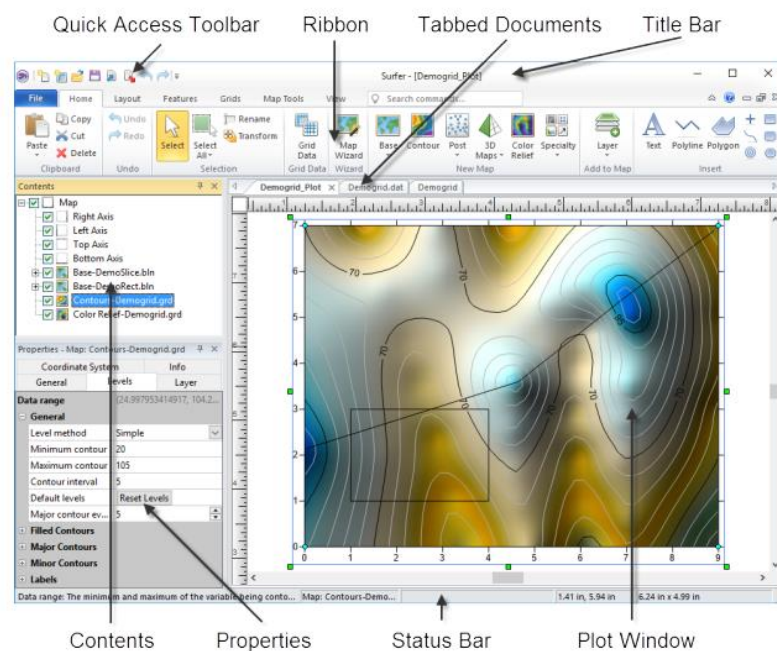


Figure III.5. Interface du logiciel Surfer 16.3.1

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.8.2. Types de carte

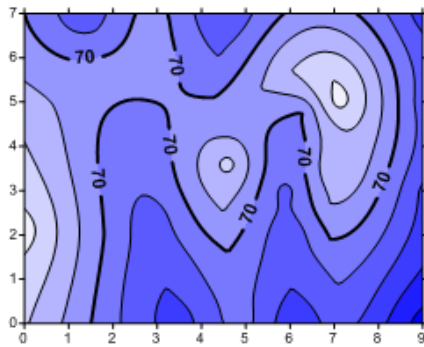
Plusieurs types de cartes différents peuvent être créés, modifiés et affichés avec Surfer. Ces types de cartes incluent les cartes de base, de contour, de poste, de poste classé, de surface 3D, de filaire 3D, de relief de couleur, de valeurs de grille, de bassin versant, de vecteur à 1 grille, de vecteur à 2 grilles et de nuages de points. Des couches de champs de vision peuvent être ajoutées aux cartes existantes. Une brève description et un exemple de chaque carte sont répertoriés ci-dessous.

III.9. Méthode d'interpolation implémentées dans surfer

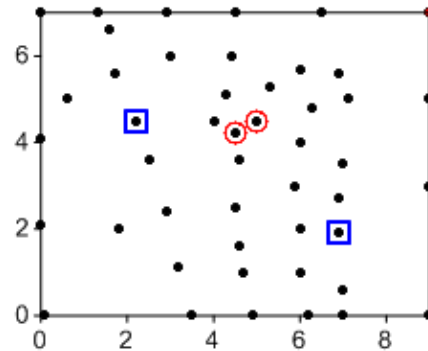
Une suite complète de méthodes de maillage est disponible dans Surfer. La variété des méthodes disponibles fournit différentes interprétations de vos données et vous permet de choisir la méthode la plus appropriée à vos besoins. De plus, les métriques de données vous permettent de cartographier des informations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



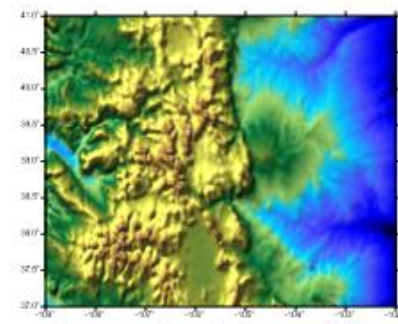
a/Contour Map



b/Post Map



c/3D surface Map



d/Color Relief Map

Figure III.6. Exemples de carte réalisée par le logiciel Surfer

III.9.1. 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.

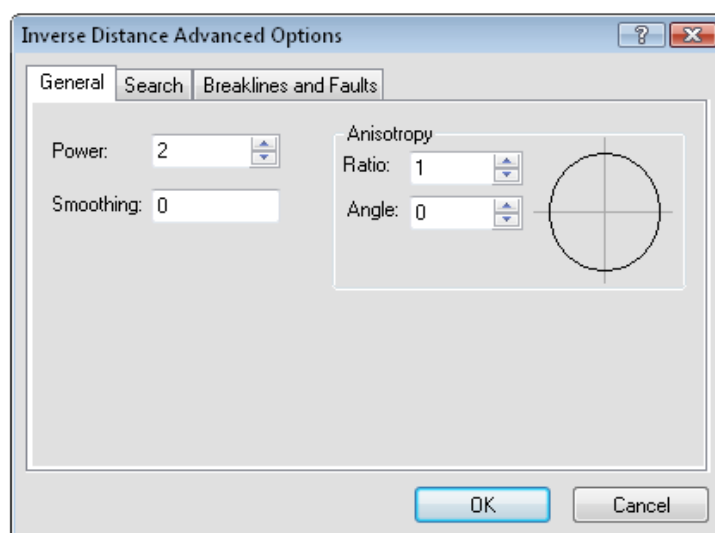


Figure III.7. Options de la méthode Inverse de la distance IDW

III.9.2. 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).

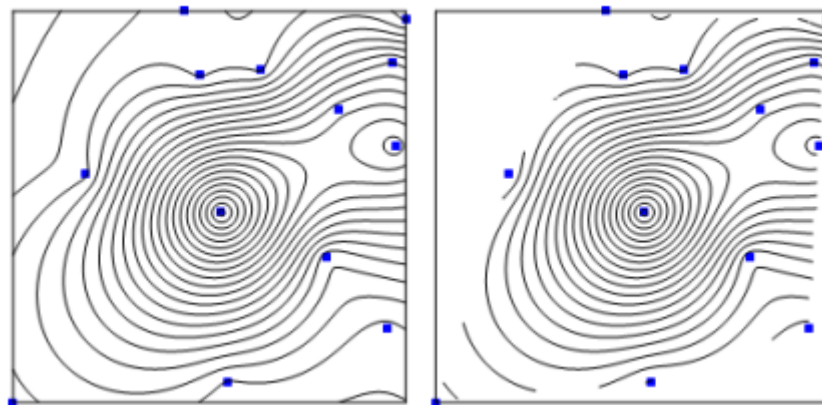


Figure III.8. Comparaison entre des méthodes IDW (à gauche) et voisin naturel (à droite)

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.9.3. 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.9.). 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.

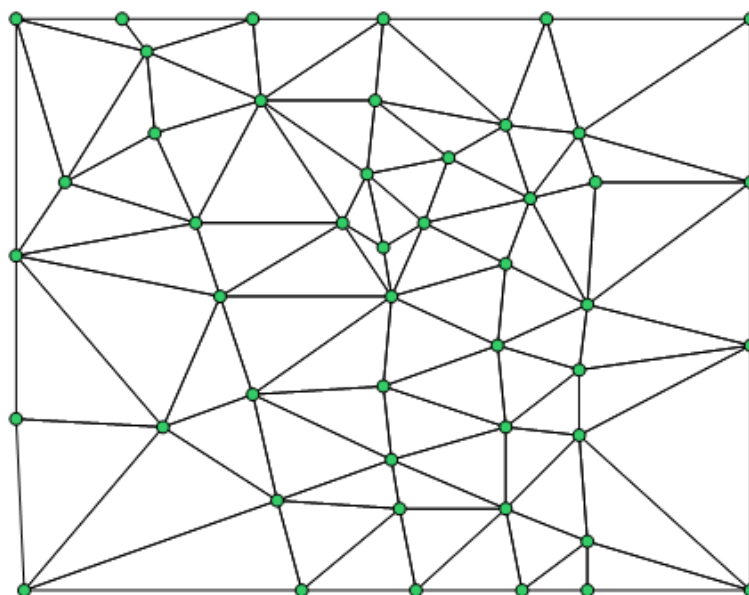


Figure III.9. Création de la triangulation à partir des points sélectionnés

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.9.4. 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.10).

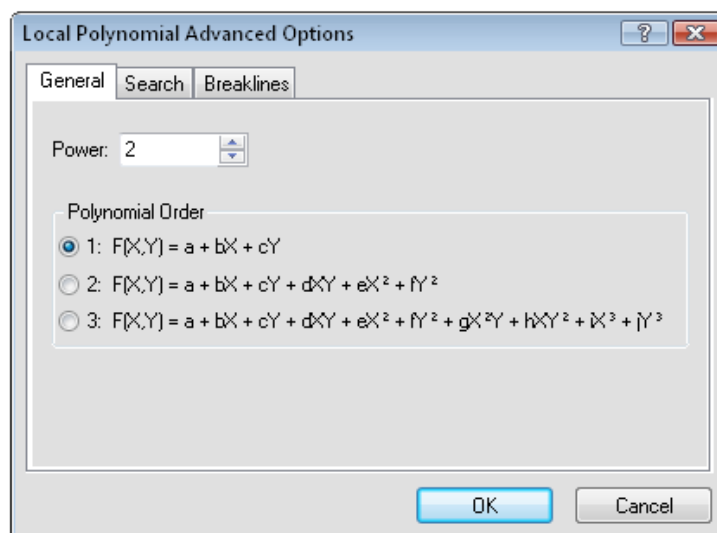


Figure III.10. Options de la méthode Local Polynomial

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

II.9.5. La méthode dite « Kriging »

a/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.11.).

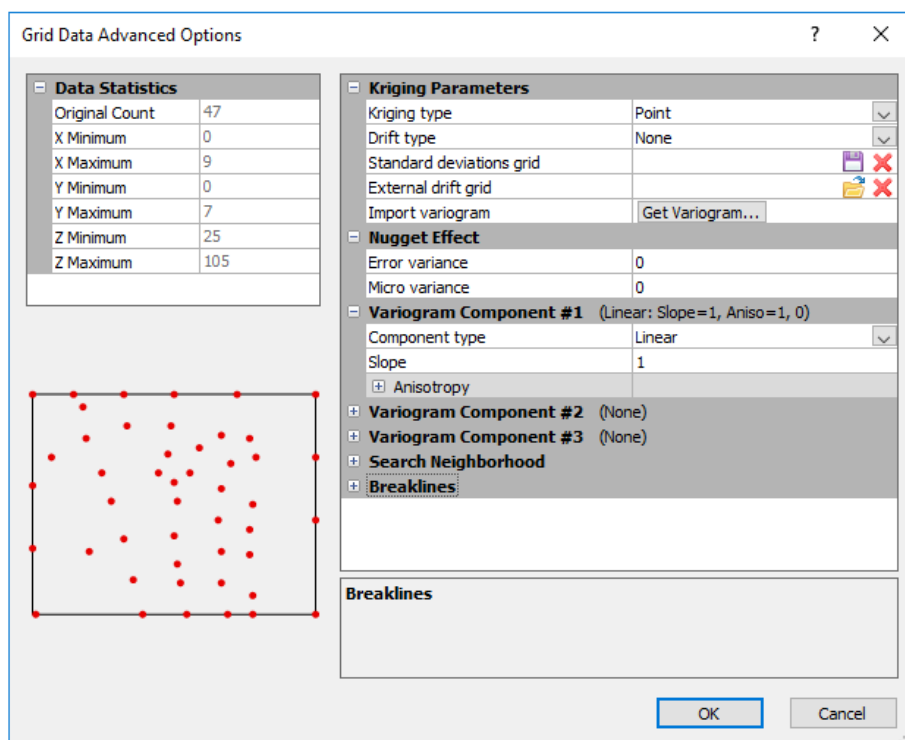


Figure III.11. Options de la méthode Krigeage

b/ 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 variogrammes est de connaître vos données.

La figure III.12 représente un variogramme utilisant les paramètres par défaut et l'exemple de fichier de données VARIO1.DAT.

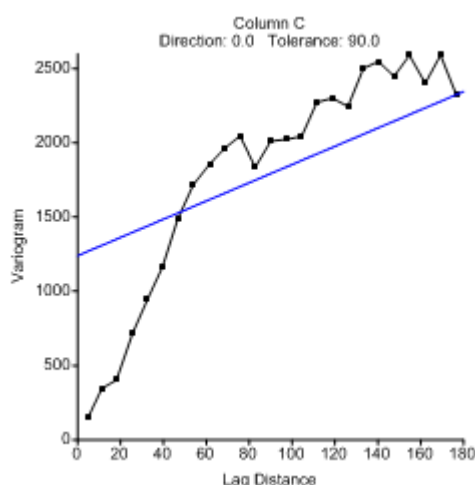


Figure II.12. Paramètres par défaut d'un variogramme

Deuxième Partie

SIMULATION NUMERIQUE

Chapitre Quatrième

APPLICATION A L'ETABLISSEMENT DU MNT
DE LA ZONE DE BICHARA A MAADID

APPLICATION A L'ETABLISSEMENT DU MNT DE LA ZONE DE BICHARA A 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-Arredj 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.).

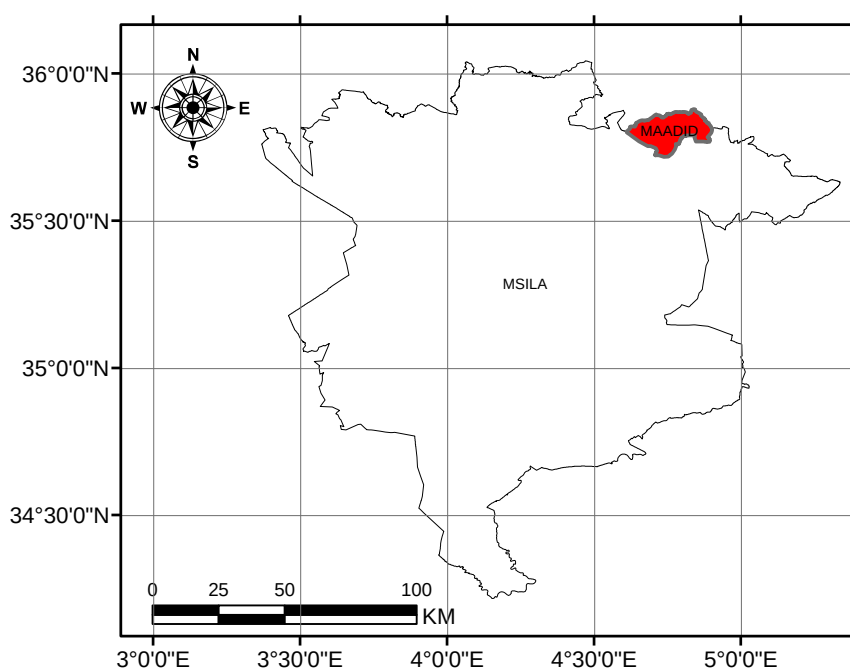


Figure IV.1. Situation de la commune de Maadid par rapport à la wilaya de Msila

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.), elle 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

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

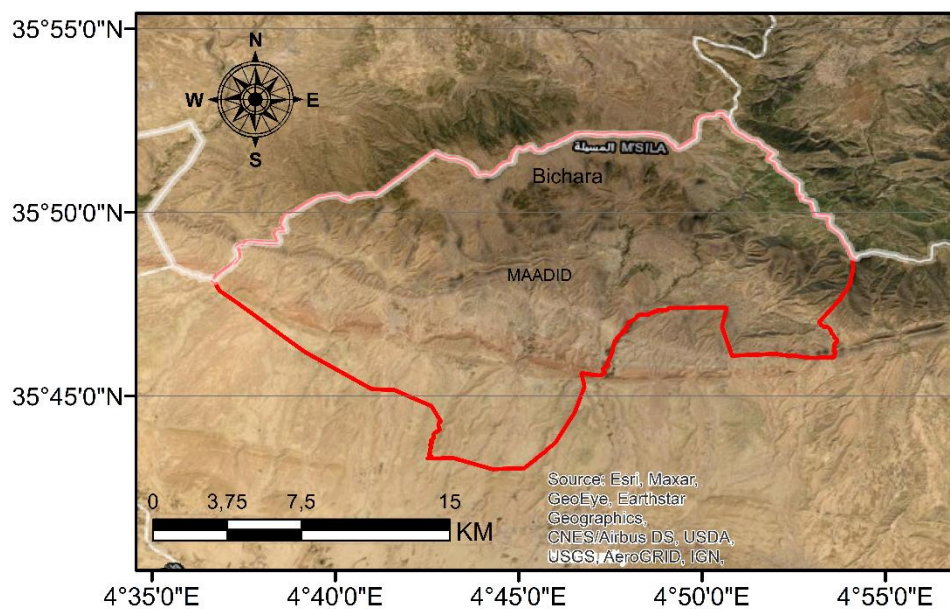


Figure IV.3. Localisation de la zone d'étude « Mechta Bichara » à Maadid

IV.2. Données utilisées

IV.2.1. Données graphiques

Les limites administratives de la région de Béchara, 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	E (m)	N (m)	Z (m)
1	662414,08	3966775,34	1118
2	662040,74	3966676,35	1088
3	662115,75	3966677,72	1064
4	662190,76	3966679,1	1051
...			...

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.

Commande : Data – Statistics d'où les résultats affichés sur la figure IV.4.

Statistics Results	
	ALT
Number of values	183
Sum	186921,369
Minimum	956,515
Maximum	1078,613
Mean	1021,4282459016
Median	1028,469
Variance	935,65617709854
Standard deviation	30,588497463892
Coefficient of variation	0,02995
Skew	-0,402

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.

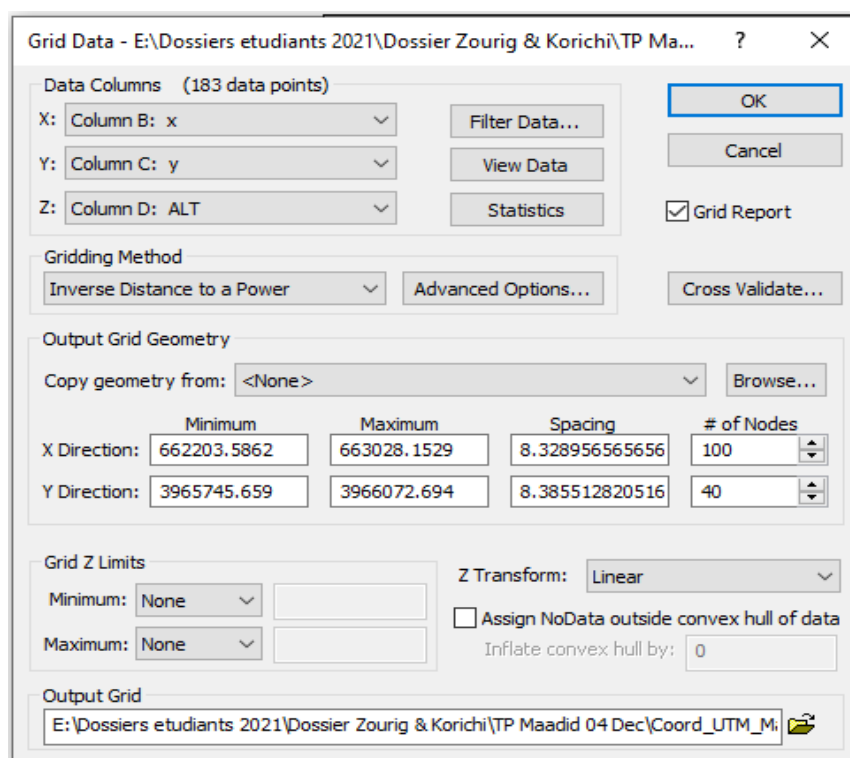


Figure IV.5. Paramètres de la méthode d'interpolation IDW

Les modèles numériques de terrain MNT obtenus par Les méthodes d'interpolation déterministes à savoir : par inverse de la distance « IDW », proche voisin « Natural Neighbor, par triangulation « Triangulation with linear interpolation » sont représentés par des cartes de contours sur la figure IV.6.

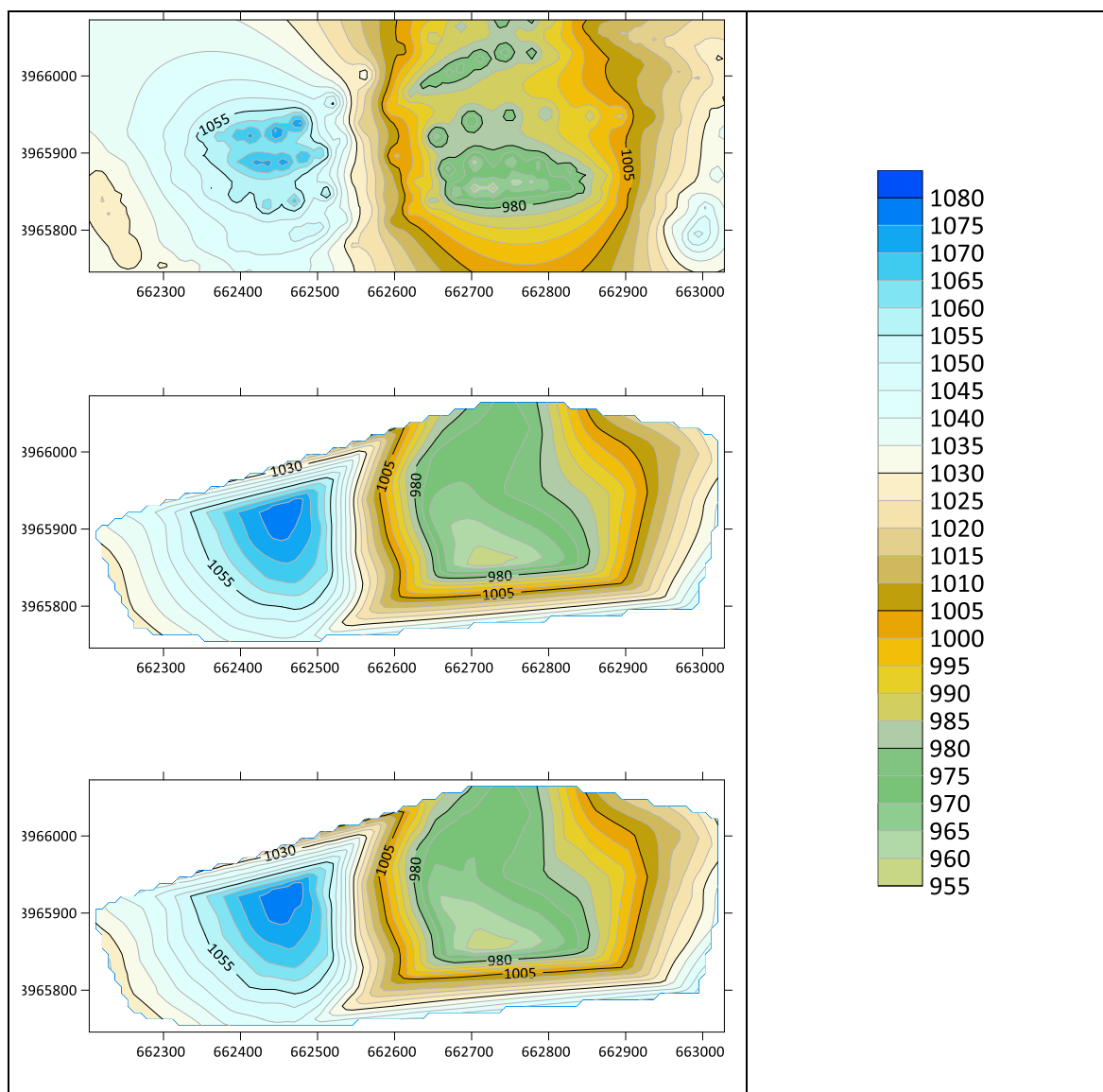


Figure IV.6. Cartes des courbes de niveau obtenues par les méthodes d'interpolation déterministes

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.).

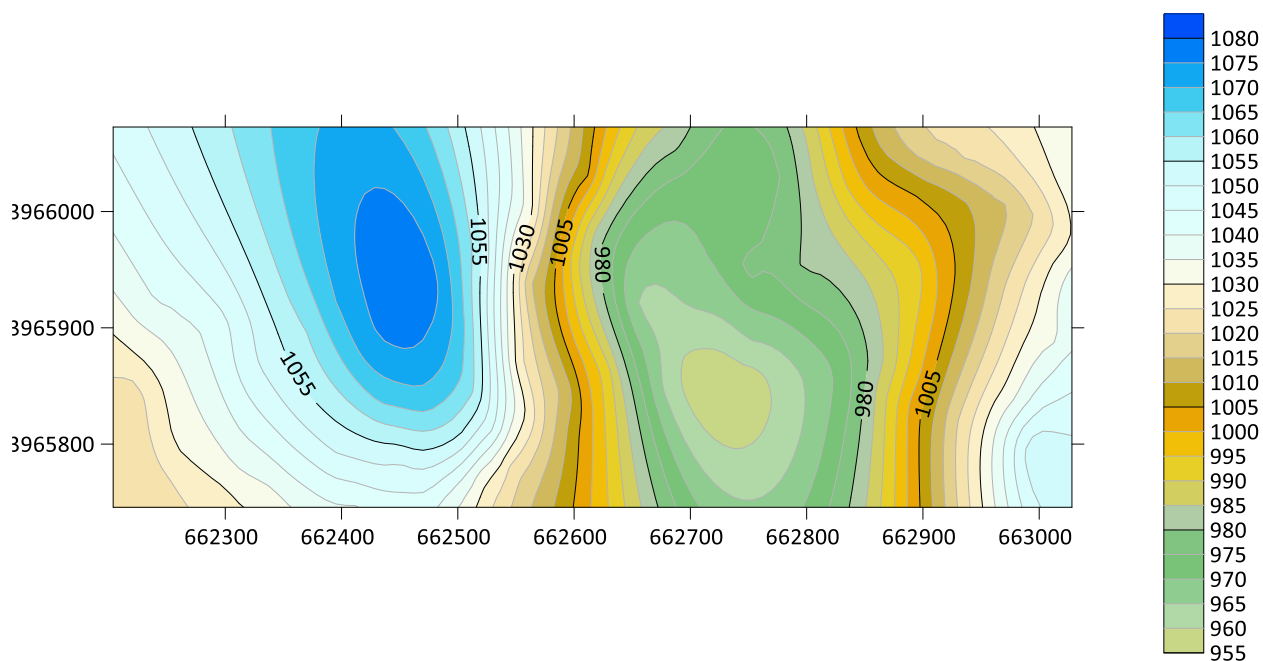


Figure IV.7. Carte des courbes de niveau obtenue par la méthode d'interpolation Géostatistique

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.

Le voisin Naturel « Natural Neighbor » génère de bons contours à partir d'ensembles de données contenant des données denses dans certaines zones et des données éparses dans d'autres.

La triangulation avec interpolation linéaire est rapide. Pour de petits ensembles de données, la triangulation avec interpolation linéaire génère des faces triangulaires distinctes entre les points de données.

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.

Le Krigeage est la seule méthode qui peut extrapoler les valeurs de la grille au-delà de la plage Z de vos données.

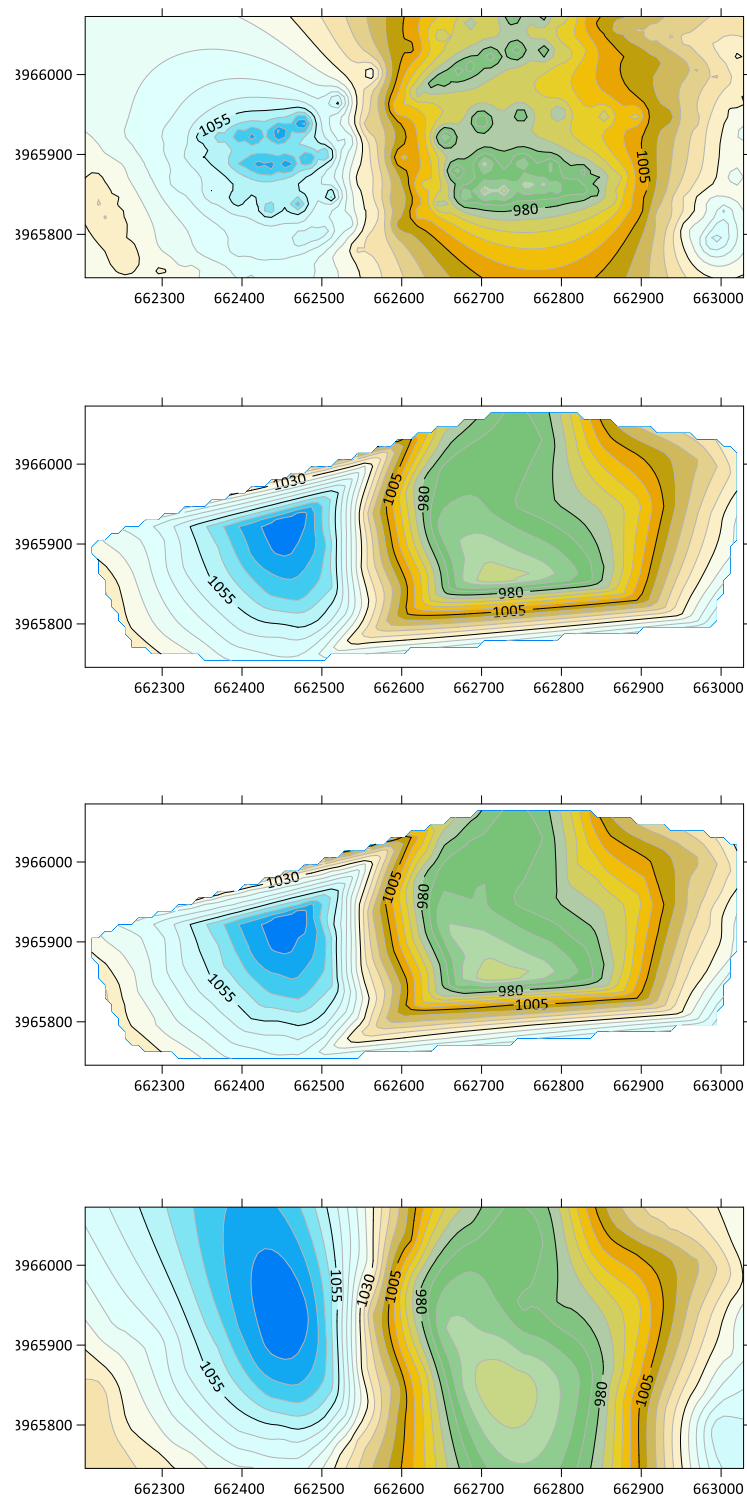


Figure IV.8. Comparaison entre les différentes méthodes d'interpolation utilisées

De haut en bas : IDW – Voisin naturel – triangulation et Krigage

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, un oued et les rives.

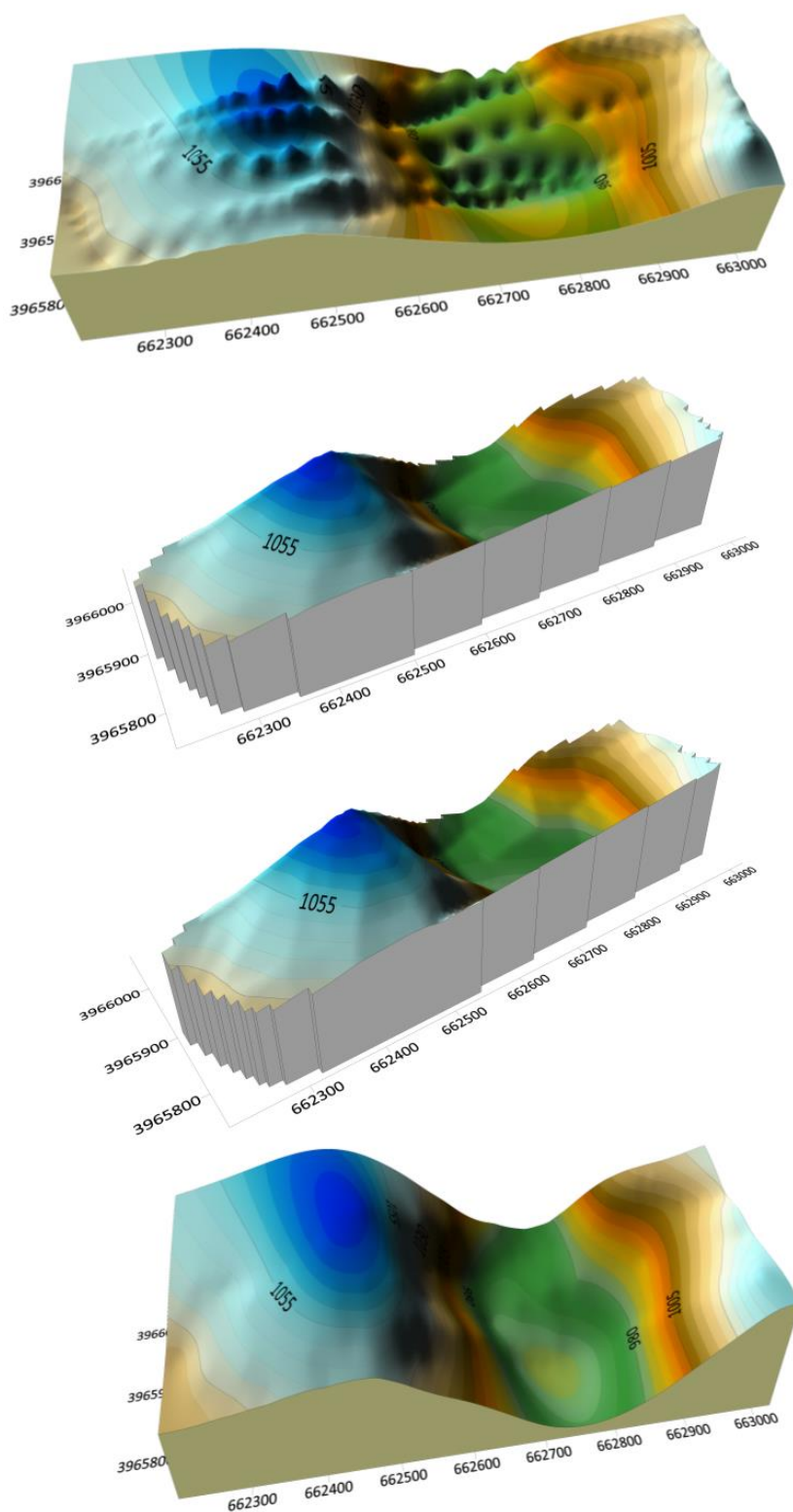


Figure IV.9. Cartes de surface en 3D

De haut en bas : IDW – Voisin naturel – triangulation et Krigeage



Figure IV.10. Image google comparable à la surface 3D obtenue par interpolation

A partir des fichiers résultats de l'interpolation (*. GRID), nous dressons le tableau des paramètres statistiques suivant (tableau IV.3. :

Tableau IV.3. Paramètres statistiques selon la méthode d'interpolation

	IDW	Voisin Naturel	Triangulation	Krigeage
Minimum	956,595	956,990	956,595	956,569
Maximum	1075,754	1077,995	1075,754	1078,843
Moyenne	1019,301	1015,930	1019,301	1019,468
Médiane	1023,793	1018,622	1023,793	1023,713
Variance	616,490	995,769	616,490	1243,294
Écart-type	24,829	31,556	24,829	35,260
Erreur Standard	0,393	0,598	0,588	0,558
Coef, de Variation	0,024	0,031	0,031	0,035

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, Voisin Naturel ou par triangulation n'extrapolent pas les valeurs de la grille au-delà de la plage Z de vos données.

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

Conclusions Générales

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 cotés), linéaires (courbes de niveau), surfaciques (facettes) ou représenté en mode raster (cellules). Il permet de reconstituer une vue en images de synthèse du terrain, de calculer des surfaces ou des volumes, de tracer des profils topographiques et d'une manière générale, de manipuler de façon quantitative le terrain étudié.

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.

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.

La méthode **de triangulation** a de très bonnes performances quand il s'agit du calcul de crêtes.

Dans les zones à faible pente, 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 on doit les analyser plus au cas par cas. Le **Voisin Naturel** s'applique mieux sur des petites zones d'étude.

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

La méthode du voisin naturel s'adapte sur 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. Par le biais du variogramme (ou covariance), elle permet de modéliser la structure du phénomène étudié.

Mais, en contrepartie, la méthode a besoin une bonne maitrise 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>

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

Manuel Golden Software Surfer 16.3.1

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.

Sarközy F. "GIS functions - Interpolation", Periodica Polytechnica Civil Engineerings, vol. 43, n° 1, 1999, 63-86.

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

Spatial Analysis (2010) J.M. Floch, Détection des disparités socio-économiques : l'apport de la statistique spatiale (2012) L. Anselin Spatial Econometrics : Methods and Models (2013) A.

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

Traitement et visualisation des données tridimensionnelles <http://www.unites.uqam.ca/dgeo/GEO7511/htm/section11.htm>.
Technologie MNT (Computa maps) http://www.computamaps.com/fr_tech_dtm.php