

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud MAMMERI, Tizi-Ouzou



Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département d'Automatique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme

de MASTER ACADEMIQUE EN AUTOMATIQUE
OPTION : COMMANDE DES SYSTEMES

Thème

**Représentation 3D des images satellitaires en
utilisant le Modèle Numérique de Terrain.
Application à la région de Tizi-Ouzou.**

Proposé et dirigé par :

Mr. Y. Messar.

Présenté par :

NESSAH Mohand.

Soutenu le : 08 / 07 / 2013

Promotion 2013

Remerciements

*Je tiens compte à exprimer ma gratitude à mon promoteur,
Monsieur Youcef MESSAR pour m'avoir encadré et guidé
tout le long de ce projet, pour ses conseils judicieux
et minutieusement prodigués.*

*Mes remerciements s'adressent aussi aux membres du
jury qui ont consacré du temps pour la lecture et
le jugement de notre travail.*

Dédicaces

A mes très chers parents

A mes frères et sœurs

A tout mes proches

A tout mes amis

N. Mohand

Introduction générale	1
Contexte et enjeux	1
Objectif	2
Plan du mémoire	2

Première Partie: Notions générales.

1. Chapitre 1: Modélisation du terrain.

1.1. Introduction.....	3
1.2. Altitude et forme de terrain.....	3
1.3. Représentation du terrain.....	4
1.4. La géomatique.....	5
1.5. Modélisation géographique.....	5
1.5.1. Modélisation de la Terre.....	5
1.5.2. Projections cartographiques de la Terre.....	6
1.5.3. Classement des projections.....	6
1.6. Conclusion partielle.....	7

2. Chapitre 2: Les SIG

2.1. Introduction.....	8
2.2. Définition de SIG	8
2.3. Le rôle des SIG.....	8
2.4. Les modes de représentation.....	8
2.4.1. Le mode RASTER	8
2.4.2. Le mode VECTEUR.....	9
2.5. Les types de données	9
2.5.1. Les informations Localisées	9
2.5.1.1. L'objet géographique	9
2.5.1.2. Les coordonnées terrestres.....	10
2.5.1.3. La notion d'échelle	10
2.5.2. Les données raster.....	10
2.5.3. Les données Vecteur	11
2.5.4. Les données alphanumériques.....	11
2.5.5. La 3ème dimension.....	11
2.5.6. Les métadonnées	11
2.6. Les fonctions de SIG.....	12
2.6.1. Abstraction.....	12
2.6.2. Acquisition	12
2.6.3. Archivage	13
2.6.4. Analyse	13
2.6.5. Affichage.....	13
2.7. Conclusion partielle.....	14

3. Chapitre 3: La photogrammétrie et la topographie.

3.1. Introduction.....	15
3.2. La photogrammétrie	15
3.2.1. Définition.....	15
3.2.2. Fonctionnement de base.....	15
3.2.3. Types d'utilisation.....	15
3.2.4. Types de photogrammétrie	16
3.2.5. Images terrestres, aériennes et spatiales.....	16
3.2.6. Essence de la photogrammétrie	16
3.2.7. Définition du rapport B/H (base/hauteur)	17
3.3. Les cartes topographiques.....	17
3.3.1. Définition.....	17
3.3.2. Les courbes de niveau.....	18
3.3.3. Analyse du relief à partir des courbes de niveau	18
3.4. Représentation 3D des images multispectrales en utilisant le MNT.....	19
3.4.1. Représentation 3D des terrains	19
3.4.2. Le MNT.....	20
3.4.3. Plaquage de l'image sur le MNT.....	20
3.5. Cartes d'orientation, cartes d'ensoleillement ou carte d'ombrage	20
3.6. Conclusion partielle.....	21

Deuxième Partie: Les Modèles Numériques du Terrain (MNT).

4. Chapitre 4: Présentation du MNT.

4.1. Introduction.....	22
4.2. Définition du MNT	22
4.3. Domaine d'application du MNT	22
4.4. Résolution du MNT	23
4.5. Différence entre MNT et MNE.....	23
4.6. Formats du MNT	23
4.6.1. Les courbes de niveau.....	24
4.6.2. Réseau de triangles irréguliers	25
4.6.3. Le format Raster	25
4.6.3.1. Grille, carré régulière.....	25
4.6.3.2. Grille, carrée irrégulière	26
4.7. Elaboration d'un MNT.....	26
4.7.1. Les phases nécessaires pour la construction du MNT	27
4.7.1.1. acquisition des données.....	27
4.7.1.2. Ré-échantillonnage	27
4.7.2. L'interpolation du MNT.....	28
4.7.2.1. Utilisations de l'interpolation	28

4.7.2.2.	Types d'interpolation (suivant le résultat).....	28
4.7.2.3.	Interpolation lors de construction du MNT.....	29
4.7.2.4.	Interpolation lors de l'utilisation du MNT.....	29
4.8.	Conclusion partielle.....	29

5. Chapitre 5: Production du MNT.

5.1.	Introduction.....	30
5.2.	Utilisation de l'analyse stéréoscopique des images SPOT.....	30
5.2.1.	Le couple stéréoscopique.....	31
5.2.1.1.	L'acquisition du couple stéréoscopique.....	31
5.2.1.2.	La nature de l'image.....	31
5.2.1.3.	Le type de scène.....	31
5.2.2.	Synthèse du MNT stéréoscopique (SPOT).....	32
5.2.2.1.	modèle projectif linéaire parallèle.....	32
5.2.2.2.	Modèle de capture sous deux angles différents (SPOT).....	34
5.2.2.3.	La géométrie épipolaire.....	35
5.2.2.4.	La rectification stéréoscopique.....	36
5.2.2.5.	Définition de la disparité.....	37
5.2.2.6.	La mise en correspondance: Calcul de la disparité.....	38
5.2.2.7.	Reconstitution.....	39
5.2.3.	Résumé des étapes pour la fabrication du MNT SPOT.....	39
5.3.	Processus de création d'un MNT à partir d'une carte topographique Numérisée.....	40
5.3.1.	Extraction des courbes de niveau.....	41
5.3.1.1.	segmentation des cartes topographiques (segmentation couleur).....	41
5.3.2.	Reconstruction des courbes de niveau.....	42
5.3.2.1.	Squelettisation des courbes de niveau.....	42
5.3.2.2.	Reconstruction des lignes interrompues.....	43
5.3.3.	Cotation (Etiquetage) des courbes de niveau.....	43
5.3.4.	Interpolation du MNT.....	43
5.4.	Conclusion partielle.....	44

6. Chapitre 6: Evaluation du MNT.

6.1.	Introduction.....	45
6.2.	Les différentes techniques d'interpolation.....	45
6.2.1.	Famille 1 : méthodes déterministes.....	45
6.2.1.1.	Polygone de Thiessen.....	45
6.2.1.2.	Les méthodes de triangulation.....	46
6.2.1.2.1.	Interpolation linéaire.....	48
6.2.1.3.	Méthodes barycentriques.....	50
6.2.1.3.1.	Inverse des distances (IDW).....	50

6.2.1.3.2.	Interpolation des plus proches voisins.....	51
6.2.1.3.3.	Interpolation bilinéaire	52
6.2.1.4.	Discussion des méthodes déterministes	53
6.2.2.	Famille 2 : Méthodes stochastiques	53
6.2.2.1.	la fonction aléatoire.....	53
6.2.2.2.	Le Variogramme	54
6.2.2.3.	Propriétés du variogramme.....	54
6.2.2.4.	La méthode de krigeage.....	55
6.2.2.5.	Discussion de la méthode.....	55
6.2.3.	Discussion des deux familles d'interpolation	55
6.3.	Type d'échantillonnage et codage des altitudes.....	56
6.3.1.	Forme de la maille.....	56
6.3.1.1.	Echantillonnage régulier	56
6.3.1.2.	Echantillonnage semi-régulier	56
6.3.1.3.	Echantillonnage irrégulier.....	56
6.3.2.	Choix de la taille de maille en fonction de l'échelle de cartographie.....	56
6.3.3.	Codage des altitudes.....	57
6.4.	Les éléments influençant la qualité du MNT.....	58
6.4.1.	Influence du Format	58
6.4.1.1.	Le format raster	58
6.4.1.2.	Les TIN (Format vecteur).....	59
6.4.2.	Influence de l'interpolation	59
6.4.2.1.	Influence de l'interpolation IDW	60
6.4.2.2.	Influence de l'interpolation du plus proche voisin	61
6.4.2.3.	Influence de l'interpolation TIN	61
6.5.	Conclusion partielle.....	62

Troisième Partie: Expérimentation.

7. Chapitre 7: Réalisation et discussion des résultats.

7.1.	Introduction.....	63
7.2.	Logiciels utilisés.....	63
7.3.	Présentation de la zone d'étude.....	63
7.4.	Quelques Informations caractéristiques	65
7.5.	Processus de base pour la création de notre MNT	67
7.5.1.	Acquisition des données.....	67
7.5.2.	La table à digitaliser	67
7.5.3.	Ré-échantillonnage	67
7.5.4.	Interpolation des courbes de niveau	68
7.5.5.	Présentation des algorithmes mise au point	68
7.5.5.1.	Interpolation par le plus proche voisin	68

7.5.5.2.	Interpolation par l'inverse des distances pondérées (IDW)	69
7.5.5.3.	Interpolation à partir d'un réseau de tringles (TIN)	70
7.6.	Expérimentations et interprétation des résultats	72
7.6.1.	Bilan et analyse des résultats.....	72
7.6.1.1.	Les résultats de la méthode du plus proche voisin (p-p-v).....	72
7.6.1.2.	Les résultats de la méthode IDW.....	73
7.6.1.3.	Les résultats de la méthode TIN	74
7.6.2.	Analyse des erreurs	75
7.6.3.	Comparaison des trois méthodes.....	76
7.6.3.1.	Caractéristiques des méthodes.....	76
7.6.3.2.	Les points communs.....	76
7.7.	Synthèse d'une vue en trois dimensions	77
7.8.	Conclusion partielle.....	78
Conclusion générale.....		79
Perspectives		80
Travaux futurs.....		80
Bibliographie.....		82

Introduction générale:

Contexte et enjeux:

Dans le cadre de l'applications de la réalité virtuelle, un aspect important repose sur la capacité de reproduire la topographie de la région visualisée en 3 dimensions. Cette description topographique se réalise à l'aide d'un modèle numérique de terrain (MNT) qui contient un ensemble de points de la surface représentée et leurs altitudes respectives. Si les nouvelles technologies d'acquisition de la topographie via des radars embarqués permettent, aujourd'hui, de générer des modèles de terrains relativement fiables pour toutes les régions du globe, leur coût reste un frein à une utilisation très localisée. Dans des domaines qui s'intéressent à l'histoire géologique, humaine, architecturale, etc., la reproduction de la topographie ancienne d'un territoire joue un rôle important. Depuis plusieurs siècles, la cartographie, en offrant une vue stratégique des territoires, a été un enjeu majeur des civilisations humaines. Les cartes topographiques, caractérisées par leur représentation schématique à l'aide de courbes de niveau, ont longtemps été le seul moyen d'appréhender les caractéristiques morphologiques d'un territoire. Ces cartes constituent donc une ressource d'informations gigantesque sur l'état actuel ou ancien de la Terre, et l'extraction automatisée de ces informations reste un challenge important.

Durant les deux dernières décennies, la production de Modèles Numériques de Terrain (MNT) a subi d'importantes évolutions en réponse à une demande croissante pour des besoins scientifiques et industriels. De nombreux satellites d'observation de la Terre, utilisant des capteurs tant optiques que radar, ont permis de produire des MNT couvrant la plupart de la surface terrestre. L'imagerie stéréoscopique constitue avec le radar une des principales technologies permettant de recueillir des données utiles à la reconstitution 3D et de calculer automatiquement des MNT. Le principe général, utilisé en photogrammétrie et en vision par ordinateur, est relativement simple et s'appuie sur une analogie avec le système visuel humain: à partir de deux vues "planes" d'une scène, il est possible de reconstituer sous certaines conditions une information tridimensionnelle. Dès lors, en utilisant des images satellitaires ou aériennes recouvrant de grandes zones géographiques (120 km par 60 km avec une résolution de 5 m pour SPOT 5), des modèles numériques de terrain peuvent être produits de manière automatique et en un temps relativement court. Ces évolutions ont fourni des MNT à différentes échelles pour tout utilisateur. Les applications basées sur la géomorphologie ont profité de ces progrès. En effet, ces applications exploitent les formes du terrain dont le MNT constitue une donnée de base. Les utilisateurs de ces bases de données cartographiques sont multiples : l'armée est un des acteurs historiques de ce marché, mais il faut également citer l'aviation civile, les collectivités locales qui désirent gérer l'aménagement de leur territoire, et un certain nombre d'activités économiques de haute technologie comme les **télécommunications** qui ont besoin de données récentes pour optimiser la position de leurs relais de téléphonie mobile.

Dans ce mémoire, le travail s'est porté sur le recours à des MNT afin d'obtenir des informations sur la répartition des altitudes de notre région d'étude, afin de quantifier le relief et reproduire la topographie de la région visualisée en 3 dimensions. Donc on a principalement insisté sur la conception et la réalisation de quelques algorithmes d'interpolation qui permettent de mettre en évidence les caractéristiques des différentes techniques existantes. Enfin, préparer le MNT pour son utilisation.

Objectif:

L'objectif de notre travail est d'adopter l'une des approches décrite plus haut afin de produire un Modèle Numérique de Terrain pour une zone délimitée de la région de Tizi-Ouzou, on s'intéresse à celle qui sert à manipuler et à perfectionner les courbes de niveau. On commence tout d'abord par l'extraction de ces lignes représentant la forme et l'altitude du terrain, qui sont considérées comme un MNT défaillant, puis le développement de quelques algorithmes d'interpolation nous autorise à reproduire ce modèle d'altitude d'une façon à remplir les trous et assurer la continuité de ses données. Par la suite, on aura l'occasion d'établir un jugement sur la qualité des résultats obtenus, en effectuant un test comparatif visuel. Enfin, la déduction des performances de différentes techniques d'interpolation qu'on a développées et leur degré d'adaptation au relief de notre zone d'étude va nous permettre de faire le choix d'une méthode qui répond mieux à nos besoins.

Plan du mémoire:

Toutes ces interrogations et plus, sont abordées en détail dans nos 7 chapitres présentés dans ce mémoire et qui sont répartis en trois parties.

Dans la première partie, on a abordé quelques notions générales, qui ont un rapport avec l'étude et la fabrication des MNT, donc on l'a débuté par la fidélité liée à la représentation du terrain et on a défini le concept de la géomatique (**Chapitre 1**), puis on a donné quelques notions de bases sur les Systèmes d'Information Géographique (**Chapitre 2**) qui sont des systèmes informatiques usant du MNT comme une information primordiale. Par la suite, on a achevé cette partie par l'introduction à la photogrammétrie et à la présentation de la photographie pour finir avec la représentation des scènes en 3D et ce, en utilisant le MNT (**Chapitre 3**).

La deuxième partie, on l'a consacré à l'étude des Modèles Numériques de Terrain d'une façon très détaillée, commençant par la description du MNT (**Chapitre 4**), jusqu'à son élaboration (**Chapitre 5**), dont on a présenté deux méthodes différentes, l'une est ancienne et simple (interpolation des courbes de niveau), l'autre fait partie des méthodes modernes évoluées (traitement de l'imagerie stéréoscopique produit par les satellites SPOT). Dans le **Chapitre 6**, on a présenté quelques techniques d'interpolations qui sont largement utilisées dans le domaine de l'analyse spatiale et on a introduit aussi quelques idées sur l'échantillonnage et le codage des altitudes, ainsi que les éléments qui peuvent réduire la qualité finale du MNT.

Dans la partie 3 (**Chapitre 7**), on a décrit notre zone d'étude et les courbes de niveau appropriées, ensuite, on a exposé les algorithmes d'interpolation mise au point d'une façon détaillée, puis on a terminé le chapitre avec la comparaison entre les résultats obtenus par les trois différentes approches d'interpolations et la déduction des avantages et inconvénients pour chacune d'entre elles.

Enfin, on a plaqué une image satellitaire de la zone d'étude, sur l'un des MNT interpolé pour une synthèse d'une vue en trois dimensions.

Première partie:
Notions générales.

Chapitre 1:

Modélisation du terrain.

1.1. Introduction

Le système solaire est composé de plusieurs planètes dont la surface présente différentes formes. La Terre est l'une de ces planètes ayant ses propres caractéristiques d'altitude et de forme. La représentation de ces caractéristiques sur des cartes ou sur ordinateur est depuis longtemps, un outil d'aide à la prise de décision et à d'une meilleure compréhension des phénomènes naturels. Pour cela, les outils et les méthodes permettant cette représentation se sont développés au fil du temps. De plus, la géomorphologie s'est évoluée afin de répondre au besoin de différentes applications d'étude de la surface terrestre. Le terrain est une surface continue qui s'étale sur différentes altitudes et présente une diversité de formes. Il est composé du relief ayant des caractéristiques morphologiques variées. Par définition, le relief est n'importe quel objet physique de la surface de la terre ayant une forme caractéristique et reconnaissable [1]. Dans ce chapitre, nous introduisons les notions d'altitude et de forme du terrain, par la suite les méthodes de représentation du terrain.

1.2. Altitude et forme de terrain

Le relief est similaire à un signal bidimensionnel continu. Sa modélisation numérique exige un échantillonnage de points tridimensionnels. Chaque point est caractérisé par une position planimétrique et altimétrique. Cette position est calculée par rapport à une référence et elle n'a aucun sens si cette référence n'est pas précisée. En planimétrie, la référence est un repère souvent relié à un système de coordonnées. En altimétrie, cette référence est le plus souvent une surface qui représente le niveau moyen de la mer appelée géoïde et donc on parle de l'altitude. Elle peut être aussi un ellipsoïde qui est une approximation du géoïde et, dans ce cas on parle d'une hauteur ellipsoïdale. Ces coordonnées planimétriques et altimétriques définissent la position d'un point dans l'espace par rapport à un repère tridimensionnel. La mesure de cette position est possible par plusieurs techniques telles que la photogrammétrie et l'interférométrie d'images radar. En effet, ces techniques fournissent un échantillon de points tridimensionnels repartis sur une zone. Afin de bien modéliser la morphologie du relief, la répartition des points doit respecter le théorème de Shannon [2]. Donc la fréquence d'échantillonnage doit être au moins égale à deux fois la fréquence maximale:

$$f_{éch} \geq 2f_{max} \quad (1.1)$$

Si la fréquence d'échantillonnage est égale à la fréquence maximale, la morphologie du terrain sera totalement déformée. Une fréquence égale aux quatre tiers de la fréquence maximale provoque une perte de plusieurs détails de la morphologie. Par contre, une fréquence d'échantillonnage égale au moins au double de la fréquence maximale conserve la forme du terrain.

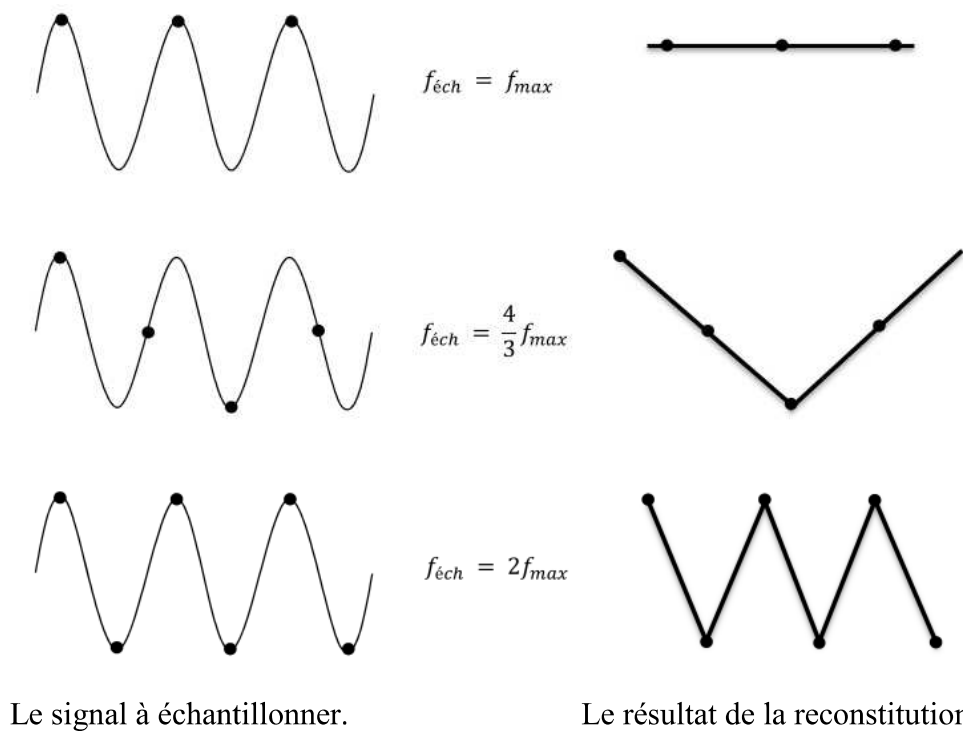


Figure 1.1: Fréquence d'échantillonnage en fonction de la fréquence maximale.

1.3. Représentation du terrain

La représentation du relief a commencé depuis longtemps sur des cartes. Cette représentation s'effectuait de différentes manières. Le problème des anciennes cartes est que le relief représenté n'est pas réaliste et l'information d'altitude ne figure pas sur ces cartes mais des formes du terrain sont représentées. Donc, la méthode de représentation du relief est très importante pour conserver l'information sur les formes du terrain.

En numérique, on distingue deux méthodes très utilisées, les courbes de niveau numérisées et les MNT. Les courbes de niveau sont des courbes équidistantes en altimétrie, dont chacune passe par des points de même altitude. Elles sont surtout utilisées dans les cartes topographiques pour représenter le relief du terrain. La capacité de ces courbes à bien représenter le relief du terrain dépend de la répartition des points lors d'une numérisation et de la distance altimétrique qui sépare les courbes. Si ces points sont repartis de façon à respecter le théorème de Shannon, le relief au niveau de ces courbes sera bien représenté. Cependant, aucune information sur le terrain n'est disponible entre ces courbes. Un modèle numérique du terrain est un modèle qui représente l'altitude du terrain sur la base d'une maille régulière ou irrégulière. Il est obtenu par différentes techniques tel que la photogrammétrie ou l'interpolation de courbes de niveau qu'on va voir dans la suite de ce mémoire. Les échantillonnages régulier et irrégulier peuvent ne pas respecter le théorème de Shannon. Dans ce cas, la représentation des formes du terrain est affectée. L'avantage d'une maille régulière est la commodité du stockage car le fichier numérique est de format raster et il contient implicitement les coordonnées planimétriques. Par contre, pour respecter le théorème de Shannon, une petite taille de maille est exigée (car on aura plusieurs échantillons) mais cela augmente le volume des données. Une maille irrégulière est plus adaptée à la représentation des formes du terrain.

La visualisation du MNT dépend de l'information que l'on veut montrer. Ainsi, l'altitude est souvent représentée en niveau de gris (hypsométrie). Cette représentation (MNT) est adéquate pour l'altitude mais pas pour les formes du terrain. Pour mieux visualiser les formes, la méthode de l'ombrage est utilisée. Elle consiste à éclairer le MNT depuis une position définie.

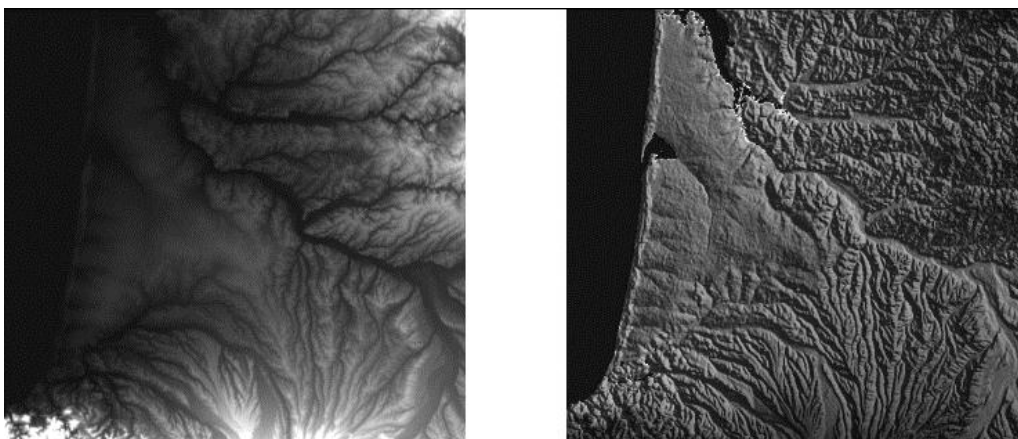


Figure 1.2: MNT affiché sous forme d'image en niveaux de gris.

le même MNT avec l'effet d'ombrage.

1.4. La géomatique

La géomatique est la discipline qui s'intéresse à associer l'information avec un territoire géographique donné. Plus précisément, elle associe différents domaines et techniques telles que la cartographie, la topographie, les systèmes d'information géographiques, l'imagerie aérienne, les techniques de positionnement (par GPS par exemple), etc...Son but est de permettre la représentation, l'analyse et l'intégration des données géographiques. La géomatique repose sur trois grandes activités distinctes :

- **La collecte** : qui est l'acquisition d'une représentation numérique du territoire (ex: MNT) ;
- **Le traitement** : s'effectue avec les logiciels SIG ;
- **La diffusion** : on peut le faire sur différents medias, navigateurs INTERNET, terminaux mobiles communiquant etc...

1.5. Modélisation géographique

1.5.1. Modélisation de la Terre

Le géoïde est la surface équipotentielle du champ de pesanteur terrestre qui coïncide au mieux avec le niveau moyen des mers (Figure 1.3). Le géoïde est donc un modèle physique de la Terre décrivant son champ de gravité. La surface de ce géoïde étant irrégulière, sa modélisation est complexe. L'ellipsoïde géodésique est une surface mathématique simple approximant le géoïde.

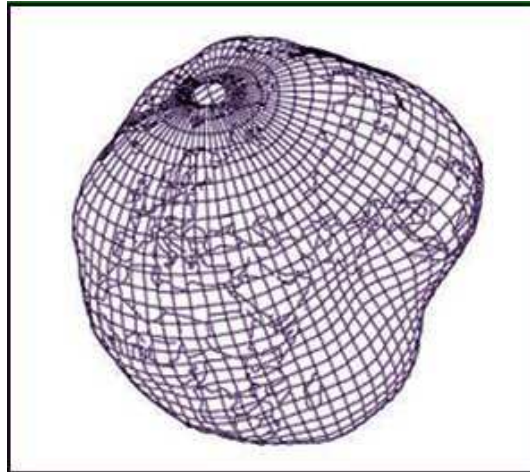


Figure 1.3: Vue 3D du géoïde de la Terre.

1.5.2. Projections cartographiques de la Terre

Les projections cartographiques sont des techniques permettant de représenter la surface ellipsoïdale de la Terre sur la surface plane d'une carte.

Tout point de la surface peut donc se projeter sur un ellipsoïde géodésique et défini par sa **latitude** : angle orienté dans le méridien du point entre l'Equateur et la normale à l'ellipsoïde en ce point autrement dit: distance d'un point (lieu) par rapport à l'équateur; et sa **longitude** : angle orienté entre le plan méridien d'origine (Greenwich, par convention) et le plan méridien du point en question autrement dit: distance du méridien d'un point (lieu) au méridien choisi comme point de départ (Greenwich). L'**altitude** du point représente quant à lui sa distance au niveau moyen de la mer et donc au géoïde. En cartographie, les coordonnées géographiques sont transformées en coordonnées rectangulaires planes dans un repère affiné à deux dimensions via une projection cartographique.

Le procédé mathématique qui permet le passage de l'ellipsoïde au plan se nomme : système de représentation plane ou système de projection ou projection. Cette transformation ne va pas sans déformation (linéaire, surfacique, angulaire).

1.5.3. Classement des projections

Les projections sont ainsi classées selon les propriétés qu'elles conservent :

- Les projections *équivalentes* conservent les surfaces. Elles sont utilisées pour des données à petite échelle.
- Les projections *conformes* conservent localement les angles, donc les formes. Elles sont utilisées pour des données à grande échelle de type topographiques.
- Les projections *équidistantes* conservent les distances entre les méridiens.
- Les autres projections, qui ne conservent ni les angles ni les surfaces, sont dites *aphylactiques*. Mais elles sont un compromis compensant au mieux les altérations, utilisées pour les représentations de type planisphère.

Donc il existe plusieurs type de projections cartographique, mais leurs principal inconvénient est aucune de ces projections peut permettre un résultat exact en toute circonstance. Donc chaque type de projection doit être utilisé en fonction d'un usage précis.

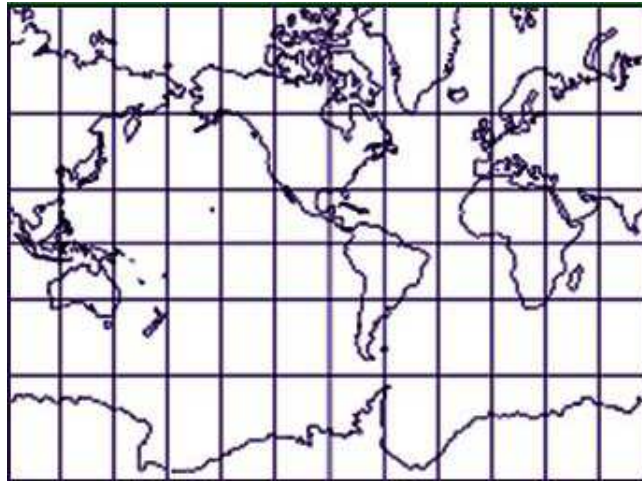


Figure 1.4: Exemple de projections cartographiques de la Terre.

1.6. Conclusion partielle

D'après ce chapitre, nous avons montré le lien entre le relief comme signal bidimensionnel et le théorème de Shannon, donc la prise en considération du théorème nous assure une modélisation et une représentation fidèle du terrain. Ainsi, on a introduit quelques notions générales sur la géomatique et la modélisation géographique de la terre.

Chapitre 2:
Les Systèmes d'Informations
Géographiques.

2.1. Introduction

Un système d'information est un ensemble de processus s'appliquant à des données brutes afin de produire une information pertinente en vue de prise de décision. Un système d'information géographique utilise indifféremment des données avec ou sans référence spatiale et comprend des modules d'analyse spatiale. Il est conçu afin de permettre la manipulation, l'analyse, la modélisation, la gestion et la représentation de données à référence spatiale, en vue de résoudre des problèmes complexes de gestion et de planification. La fonction première des SIG est d'enregistrer des informations sur un territoire, mais on peut rencontrer des systèmes qui ne font pas ça.

2.2. Définition de SIG

Un SIG (Système d'Information Géographique) est l'ensemble des informations géographiques qui décrivent un objet et qui indiquent sa position géographique à la surface de la Terre. Ces informations ont double composantes : une composante graphique comportant la description de la forme de l'objet géographique et sa localisation dans un référentiel cartographique, ainsi qu'une composante attributaire qui décrit l'objet (description géométriques, caractéristiques thématiques).

2.3. Le rôle des SIG

Le SIG est un système informatique permettant, à partir de diverses sources et en se basant sur des primitives graphiques telles que des points, des arcs, des polygones ou des images, (à ces primitives, sont associées des informations qualitatives telles que leur nature par exemple : routes, réseau ferroviaire, forêt etc., ou toute autre information contextuelle) de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de proposer une représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial où des informations sont localisées géographiquement, contribuant ainsi à la gestion de l'espace.

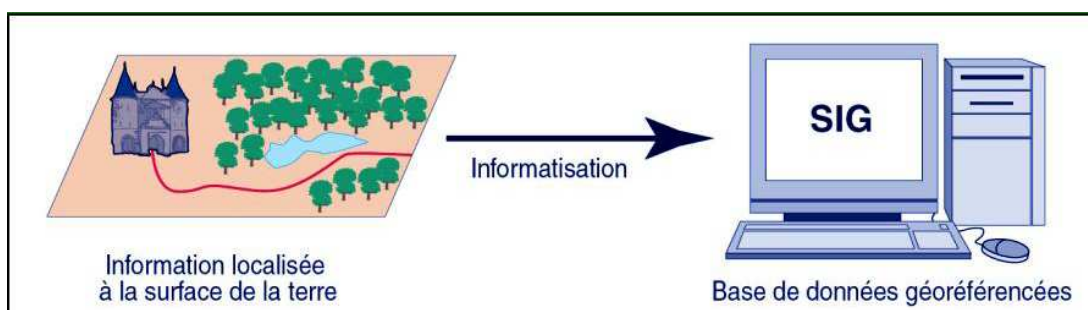


Figure 2.1: Le système d'information géographique.

2.4. Les modes de représentation

Dans un SIG, les informations géographiques sont représentées en deux modes, le mode dit Raster et Vecteur.

2.4.1. Le mode RASTER

Une couche raster (appelée aussi maillée ou tramée) est une couche dans laquelle les données sont stockées sous forme de tableaux à 2 dimensions auxquels sont associés des informations colorimétriques ou altimétriques. Il s'agit le plus souvent d'une image, d'un plan, d'une photo numérisée ou d'une carte d'élévations. Les représentations « raster » sont affichées dans le SIG comme des images.

2.4.2. Le mode VECTEUR

Les objets des couches vecteurs sont représentés par des points, des lignes, des polygones, des polygones à trous ou des chaînes de caractères. Ces couches peuvent contenir par exemple des données décrivant les frontières de zones urbanisées ou forestières, des tracés routiers ou la toponymie d'un lieu. L'opération consiste à convertir une couche raster en une couche vecteur s'appelle la vectorisation. L'opération inverse est appelée la rastérisation.

- **Les points**

Ils définissent des localisations d'éléments séparés pour des phénomènes géographiques trop petits pour être représentés par des lignes ou des surfaces qui n'ont pas de surface réelle comme les points cotés.

- **Les lignes**

Les lignes représentent les formes des objets géographiques trop étroits pour être décrits par des surfaces (ex : rue ou rivières) ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau.

- **Les polygones**

Ils représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme des pays, des parcelles, des types de sols...

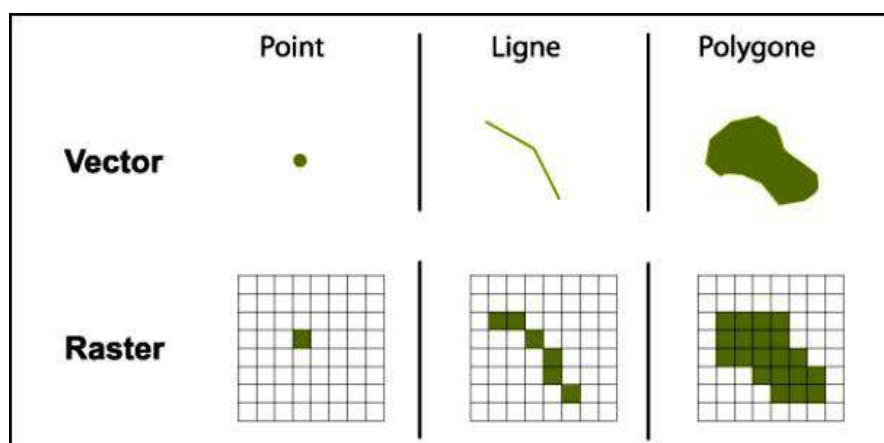


Figure 2.2 : Les modes de représentation sous SIG.

2.5. Les types de données

Les données géographiques sont constituées de quatre composantes :

2.5.1. Les informations Localisées

Les informations Localisées sont les données géométriques reflétant la forme et à la localisation des objets ou phénomènes.

2.5.1.1. L'objet géographique

Il est à la base du SIG, et est le support d'autres données et/ou le référentiel permettant de positionner d'autres objets. La donnée est géographique dès lors qu'elle est localisable directement par des coordonnées, ou indirectement par des données littérales de type adresse, numéro de commune, numéro de borne kilométrique, code postal, numéro de parcelle cadastrale etc..

2.5.1.2. Les coordonnées terrestres

La terre est une sphère, mais une sphère imparfaite :

- Le Géoïde est la forme théorique qui se rapproche le plus de la surface réelle de la terre c'est à dire le niveau moyen des mers. Il sert de référence pour déterminer les altitudes.
- L'ellipsoïde est la surface mathématique qui se rapproche le plus de la forme du géoïde ; grâce à ce dernier, on peut calculer les coordonnées géographiques en LONGITUDE et en LATITUDE.

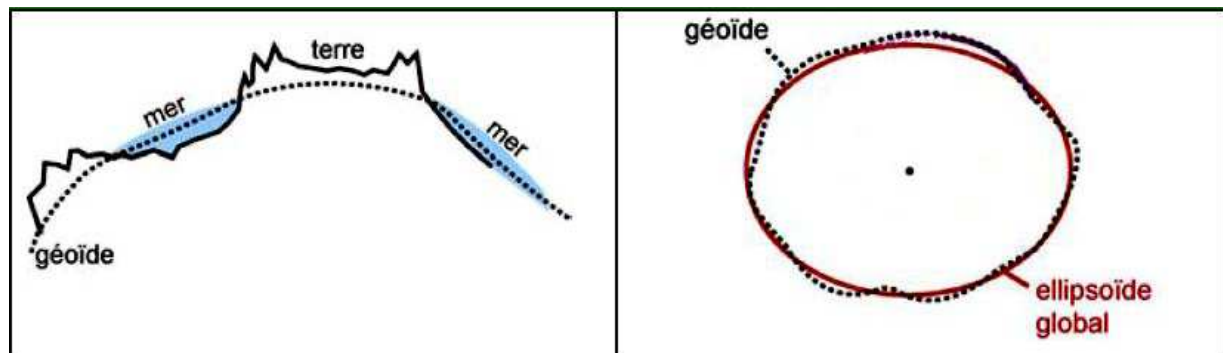


Figure 2.3: le géoïde

l'ellipsoïde.

2.5.1.3. La notion d'échelle

L'échelle est le rapport existant entre une longueur réelle et sa représentation sur la carte, autrement dit: le rapport entre les dimensions ou distances marquées sur un plan avec les dimensions ou distances réelles. La donnée numérique et les outils de zoom des logiciels permettent une grande liberté dans les échelles de visualisation de la donnée. Avec les SIG, on parle plutôt d'échelle d'utilisation, c'est-à-dire, le ratio entre l'échelle à laquelle la donnée a été numérisée et les limites de son exploitation.

2.5.2. Les données raster

Donnée où l'espace est divisé de manière régulière en ligne et en colonne; à chaque valeur ligne/colonne (pixel) sont associées une ou plusieurs valeurs décrivant les caractéristiques de l'espace. Donc, ces données renvoient à l'ensemble des attributs descriptifs des objets et phénomènes à l'exception de la forme et de la localisation.

- **Photo aérienne**

La photo est la base de nombreuses données géographiques.

A partir d'appareil photo ou de caméra aéroportée (avion, ballon...) il est possible d'avoir de nombreux détails de la surface de la terre. Elle peut être scannée, numérique (directement intégrable sur un disque dur), orthorectifiée (corrigée des déformations d'échelle dues aux différentes altitudes, à l'assiette de l'avion...). La précision de la photo aérienne dépend de la dimension du plus petit détail visible (notion de résolution).

- **Plan scanné ou carte scannée**

C'est la représentation d'une information déjà interprétée. Ceci montre ses limites. Par contre, la carte scannée est un bon référentiel visuel car elle est souvent issue de carte papier destinée au grand public.

2.5.3. Les données Vecteur (données graphiques)

Pour représenter les objets à la surface du globe, les SIG utilisent trois objets géométriques qui sont le point, la ligne et la surface dont on a déjà parlé dans la section (2.3.2).

- **Le point:** L'objet le plus simple, il peut représenter à grande échelle des arbres, des bornes d'incendie, des collecteurs d'ordures... Mais à des échelles plus petites de type carte routière au 1/1 000 000ème, il représente une capitale régionale.
- **La ligne:** La ligne représente les réseaux de communication, d'énergie, hydrographiques, d'assainissement etc.. Elle peut être fictive, en représentant l'axe d'une route, ou virtuelle en modélisant des flux d'information, d'argent etc..
- **La surface ou polygone:** Elle peut matérialiser une entité abstraite comme la surface d'une commune ou des entités ayant une existence géographique comme une forêt, un lac, une zone bâtie etc..
- **L'objet complexe:** Les objets complexes sont constitués par la combinaison des trois objets géométriques précédents.

2.5.4. Les données alphanumériques

La donnée alphanumérique ou attributaire ou sémantique, est une information textuelle, qualitative ou quantitative. Elle décrit l'objet géométrique. Elle est souvent de nature démographique (exemple, recensement de la population), administrative (numéro officiel de la commune), économique (nombre de salariés, types d'entreprises etc.), sociale (nombre de places en crèche, dans un hôpital), ou commerciale (adresse des commerces, type du commerce). Les données alphanumériques peuvent être gérées par un logiciel « SIG » ou par un logiciel de gestion de données.

2.5.5. La 3ème dimension

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT):

A chaque couple x et y (position d'un pixel dans l'image matricielle) est associé un z (altitudes correspondantes à chaque pixel, qui sont stockées dans le MNT) ce qui permet de créer un squelette du relief sur lequel on peut draper des images satellites ou des photos aériennes où les objets du sursol, maisons, arbres etc.. Des modèles, plus élaborés prennent en compte les objets du sursol en intégrant un 2ème z, ce sont les Modèle Numérique d'Élévation (MNE).

2.5.6. Les métadonnées

Les métadonnées sont les informations associées aux données, autrement dit, elles sont les étiquettes des bases de données. Donc les métadonnées comprennent des informations sur le producteur de la donnée, ses conditions de création ou de diffusion (interdiction, restriction, accès libre) sa qualité, son extension géographique. Ces renseignements ont pour but de favoriser l'utilisation et la diffusion de la donnée en précisant les caractéristiques et les précautions d'emploi à respecter.

On distingue trois types de métadonnées :

Métadonnées pour la découverte : un minimum d'information permettant d'identifier les données pouvant correspondre à ses besoins ;

Métadonnées pour le catalogage: renseignement plus précis permettant de servir de spécification, de contrôle lors d'une livraison ;

Métadonnées pour l'exploitation: permet à l'utilisateur d'appréhender la donnée et de mieux connaître ses limites d'exploitation.

2.6. Les fonctions de SIG

Le SIG englobe 5 fonctions principales :

2.6.1. Abstraction

C'est la modélisation, l'intellectualisation du monde réel suivant différents prismes et la définition des données. Le but de modéliser est de se faire comprendre par le plus grand nombre en construisant un Schéma Conceptuel de Données (SCD) permet de définir les objets (classes d'objets), leurs attributs ainsi que leurs relations. L'outil SIG doit être capable de transcrire et de stocker la modélisation.

2.6.2. Acquisition

C'est la saisie des informations géographiques sous forme numérique.

Les techniques d'acquisition sont:

- **Acquisition à partir de documents existants**

Du papier (plan, carte) au numérique, à partir d'une planche à numériser ou du scannage de la donnée sur l'écran de l'ordinateur, on numérise des objets dessinés sur le plan en données vecteurs. L'inconvénient de cette méthode est la retranscription des erreurs dues au support d'origine (déformation du papier, épaisseur du trait etc.).

- **Acquisition à partir de photos**

De la photo (scannée) ortho-rectifiée à la donnée vecteur, c'est une des principales sources pour une numérisation précise sur de grands territoires (la constitution de la donnée topographique de l'IGN pour l'ensemble du territoire se fait par photogrammétrie). La précision de la donnée est en relation avec la précision de la photo. Ce type d'acquisition nécessite soit des enquêtes terrain soit des croisements avec d'autres données pour qualifier la donnée ; la photo est une simple collection de pixels.

- **Acquisition à partir d'image satellite**

L'image satellite constitue la principale source d'information pour l'occupation du sol grâce à la télédétection. La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

- **Acquisition à partir de donnée alphanumérique**

La donnée littérale permet de créer de la donnée (géocodage) ou de l'enrichir.

- **Acquisition à partir du terrain**

Généralement utilisée pour des chantiers de petite taille ou en complément d'autres techniques. Levé G.P.S. (Global Positioning System) système de positionnement, à l'échelle du Globe, sur un ensemble de satellites artificiels. Levé à la planchette. Levé avec théodolite (mesure des angles) et/ou distancemètre.

2.6.3. Archivage

- **La gestion**

Les données acquises, il faut être capable de les stocker et de les retrouver facilement. C'est une des fonctions les moins visibles pour l'utilisateur. Elle dépend de l'architecture du logiciel avec la présence intégrée ou non d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) relationnel ou orienté objet.

- **L'environnement de travail**

Nous ne sommes plus dans « l'espace stockage » mais dans « l'espace travail ». Cela concerne l'espace pour la gestion du projet (l'organisation), mais aussi l'ergonomie du logiciel (interface).

2.6.4. Analyse

La raison d'être des systèmes d'information géographique n'est pas la constitution de plan ou de carte ni la gestion de données mais d'être un outil au service de l'information géographique qui assure la manipulation et l'interrogation de ces données.

- **Analyse spatiale à partir de la sémantique**

Description qualitative et/ou quantitative d'un espace à partir de données alphanumériques stockées dans l'objet géométrique ou dans une base de données externe via un lien. Cette analyse peut se faire par requête, par calcul. La cartographie en est souvent le support.

- **Analyse spatiale géométrique**

Cette analyse se base sur la position de l'objet, sa forme, et les relations qui existent éventuellement. La distance entre objets est une des fonctionnalités simples de l'analyse spatiale. On peut travailler sur les relations entre les objets, par exemple en sélectionnant suivant une distance, une intersection, un positionnement, sans modifier les objets. On peut travailler sur la topologie quand elle existe. On peut manipuler de la donnée en la découpant, la joignant, l'excluant.

2.6.5. Affichage

C'est la restitution de l'information géographique sous forme graphique, dont le but est de permettre à l'utilisateur d'appréhender des phénomènes spatiaux dans la mesure où la représentation graphique respecte les règles de la cartographie.

L'affichage sert à communiquer :

- Sur un ordinateur lors de l'élaboration d'une étude.
- Sur Internet en respectant des contraintes de poids, de couleur, de format, ...
- Sur papier pour des documents de travail, des rapports, des documents de promotion, ...

Si l'affichage n'est pas le cœur du système, il reste un élément très important grâce au pouvoir de communication de la carte.

2.7. Conclusion partielle

D'après ce chapitre, on constate que le SIG est un système informatique qui permet de gérer et interpréter une large base de données, comportant des informations de sources et de types différents, dont le but premier est la gestion de l'espace. Donc, il s'avère un outil très puissant au travers sa capacité à représenter la réalité sous la forme de cartes thématique par couches d'informations.

Chapitre 3:
La photogrammétrie et la
topographie.

3.1. Introduction

La représentation des formes du terrain consiste à traduire, dans un plan bidimensionnel, la surface topographique tridimensionnelle. Plusieurs formes de représentations du relief sont utilisées: les points cotés, les courbes de niveau, l'estompage ou les vues en perspective. Avec le développement de la cartographie numérique et les systèmes d'information géographique, l'information altimétrique sous forme numérique offre une souplesse et une flexibilité considérables. Cette forme numérique du relief s'appelle Modèle Numérique du Terrain (MNT). Les MNT permettent une description de la topographie du terrain et constituent une base de données altimétriques à partir de laquelle on peut dériver une multitude de produits : les courbes de niveau, les cartes de pentes, d'exposition ou d'inter visibilité, les volumes, les vues en perspective... Les techniques qui permettent d'acquérir les données de base pour la génération de modèles numériques de terrain sont très variées et incluent entre autres le levé topographique direct, la photogrammétrie, l'interférométrie radar, le laser altimètre et la numérisation de courbes sur des cartes existantes. Quoique qu'ils existent depuis près de 40 ans, les MNT n'ont gagné autant en popularité, rapidité de génération et précision qu'avec l'automatisation qu'a permis le développement de la photogrammétrie digitale.

3.2. La photogrammétrie

3.2.1. Définition

La photogrammétrie est une technique de mesure pour laquelle les coordonnées en trois dimensions des points d'un objet sont déterminées par des mesures faites en deux images photographiques (ou plus) prises à partir de positions différentes. Dans cette technique, les points communs sont identifiés sur chaque image. Une ligne de vue (ou rayon) peut être construite de la position de l'appareil photographique au point de l'objet. C'est l'intersection de ses rayons qui détermine la position tridimensionnelle du point. La photogrammétrie est utilisée dans différents domaines, tels que la production de cartes topographiques, l'architecture, les investigations de police, la géologie et par les archéologues pour reproduire rapidement des plans de sites vastes et complexes [3].

3.2.2. Fonctionnement de base

Il s'agit en général d'un document photographique, c'est-à-dire un enregistrement de l'intensité et de la couleur des radiations du spectre visible ou invisible, réfléchi par l'objet considéré. La photographie est une technique permettant de fixer une image sur une surface sensible à l'aide de la lumière et des objets qui la reflètent. Le mot image, du latin imago, désigne la représentation visuelle d'un objet par différents moyens ou supports, dessin, image numérique, peinture, photographie, etc.

3.2.3. Types d'utilisation

On peut classer l'utilisation de la photogrammétrie en deux catégories :

- Une approche radiométrique, où la nature de l'objet est étudiée.
- Une approche géométrique, où la forme de l'objet est étudiée.

La première catégorie est plus couramment appelée photo-interprétation ou télédétection. C'est là qu'on trouve la plus grande variété dans le matériel de base. La deuxième catégorie est la photogrammétrie à proprement parlé (détermination de la forme et des dimensions d'un objet). Les deux domaines étaient historiquement assez éloignés. Mais plus récemment, un rapprochement évident s'est produit et la différenciation n'est maintenant plus aussi aisée. L'apparition du numérique a modifié les habitudes de travail et a conduit à ce rapprochement.

3.2.4. Types de photogrammétrie

On peut cataloguer les applications photogrammétriques selon plusieurs critères : l'origine des images, le mode de traitement utilisé ou la géométrie:

- **L'origine des images**

Terrestres (axe $\pm$ horizontal, distance de 0 à 100 m), aériennes (axe $\pm$ vertical, distance de 100 à 10'000 m) ou spatiales / satellitaires (axe $\pm$ vertical, distance de 200 à 800 km).

- **Mode de traitement**

Analogiques, numériques.

- **Modèles mathématiques**

Géométrie conique ou géométrie cylindro-conique.

3.2.5. Images terrestres, aériennes et spatiales

La différence la plus immédiate est certainement la résolution géométrique (taille réel d'un pixel). Mais les progrès technologiques diminuent les écarts et cette différence a tendance à ne plus être aussi significative. Les images terrestres se différencient des autres principalement par la direction de la prise de vue qui est en général horizontale (ou proche de l'horizontale) alors que les images aériennes et spatiales sont verticales. Pour le reste, ces images une fois apprêtées sont très semblables et sont traitées de façon similaire.

3.2.6. Essence de la photogrammétrie

La photogrammétrie est l'art de passer de deux modèles 2D du paysage à un modèle 3D. De façon très raccourcie, on peut écrire: $2D + 2D = 3D$. Donc pour restituer un objet (une photographie) en 3D, il doit être mesuré deux fois sous deux angles différentes et assurer le recouvrement.

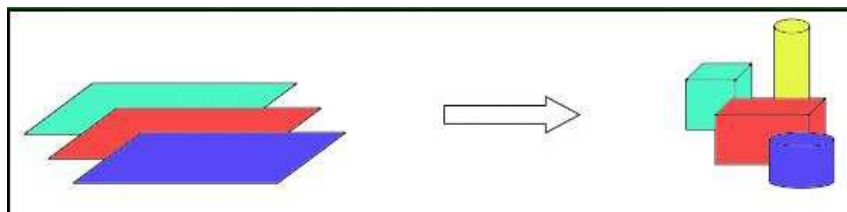


Figure 2.1 : Obtention des objets 3D à partir d'objets 2D.

3.2.7. Définition du rapport B/H (base/hauteur)

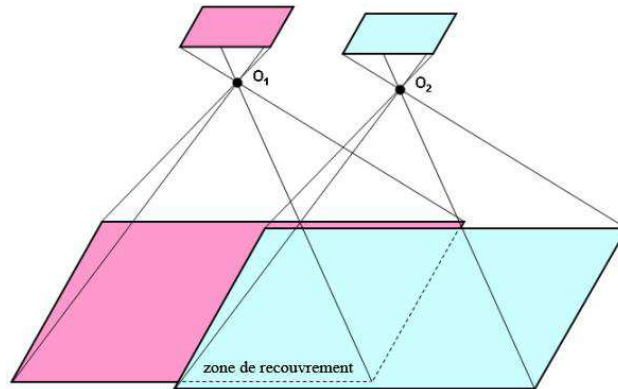


Figure 2.2: principe de la projection photogrammétrique.

- O_1 et O_2 sont les centres de projection.
- La distance entre O_1 et O_2 est appelée base (b en millimètres dans l'espace image ou B en mètres dans l'espace objet).
- La distance entre O_1 ou O_2 et le plan objet est appelée Hauteur H .
- La distance O_1 au plan image est appelée hauteur h .
- Le rapport B/H est une caractéristique essentielle, elle est conditionnée par l'angle d'ouverture et le recouvrement des deux photos. Il est identique dans l'espace objet et dans l'espace image
- Dans l'espace objet, on détermine la base en fonction de la hauteur.
 $H = 3000 \text{ m} \Rightarrow B = 780 \text{ m}, B/H = 0.26$
- Dans l'espace image, on règle la hauteur en fonction de la base.
 $b = 65 \text{ mm} \Rightarrow h = 250 \text{ mm}$
- Ces deux valeurs ne sont pas anodines:
 65 mm est l'écartement moyen entre les yeux d'un humain.
 250 mm est le punctum proximum de convergence (PPC), qui est le point le plus proche pour voir simple l'image des deux yeux (En Anglais least distance of distinct vision LDDV).

3.3. Les cartes topographiques

3.3.1. Définition

La topographie est l'art de la mesure puis de la représentation sur un plan ou une carte des formes et détails visibles sur le terrain, qu'ils soient naturels, tel que le relief, ou artificiels tels que les routes ou bâtiments. Son objectif est de déterminer la position et l'altitude de n'importe quel point situé dans une zone géographique donnée.

Une carte topographique est une carte représentant la topographie d'une région géographique donnée de manière précise et détaillée. Sur une telle carte, le relief du terrain est représenté sous la forme de courbes de niveau ou de points cotés. Donc les courbes de niveaux servent à représenter la topographie d'un terrain sur des plans appelées cartes topographiques.

3.3.2. Les courbes de niveau

Les courbes de niveau sont des lignes imaginaires placées sur une carte de géographie, qui joignent tous les points situés à la même altitude. Plus les courbes de niveau sont rapprochées, plus la pente est forte. Entre deux courbes de niveau successives, on admet que la pente est régulière. La distance verticale qui sépare deux courbes de niveau successives s'appelle l'équidistance. Sur une carte, on peut distinguer 3 types de courbes de niveau :

- ❖ **les courbes directrices, principales ou maitresses** dessinées avec un trait épais continu et repérées par une indication d'altitude.
- ❖ **les courbes "traditionnelles"** dessinées en trait fin continu.
- ❖ **les courbes intermédiaires**, dessinées avec des traits discontinus sur la carte et qui se situent à la demi-équidistance. On les représente sur la carte uniquement lorsque la pente n'est pas régulière entre deux courbes de niveau "traditionnelles" ou entre une courbe directrice et une courbe "traditionnelle".

3.3.3. Analyse du relief à partir des courbes de niveau

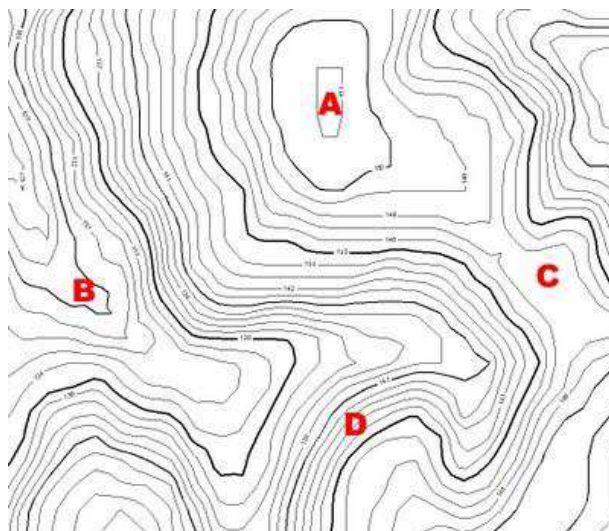


Figure 2.3: Description du relief à travers les courbes de niveau.

En A: un sommet, ou point haut. Il est facile à repérer car les courbes se referment sur elles même. En cercles concentriques la courbe la plus au centre contient le point haut. Le sommet est arrondi, la distance entre les courbes avoisinantes étant plus grandes. Si l'on visualisait un pic, les courbes seraient beaucoup plus rapprochées jusqu'au point haut. Si on inversait le relief, "A" serait une dépression fermée.

En B: c'est un vallon, où se concentrent les écoulements. On parle de talweg. Les courbes forment des "V" emboîtés. A cet endroit, on peut trouver de l'eau sous forme de cours d'eau, permanent ou temporaires ou des vallons secs. Si on inversait le relief, "B" serait sur une ligne de crête.

En C: c'est un col, placé sur une ligne de crête entre deux bassins versants. Les courbes de valeurs identiques sont parallèles de part et d'autre. C'est une zone quasi plane.

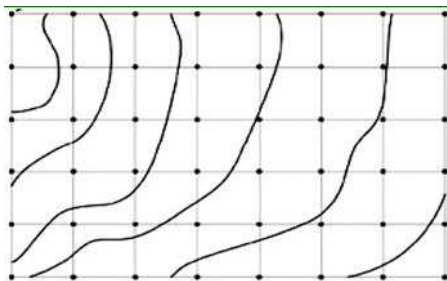
En D: c'est une zone de forte pente.

3.4. Représentation 3D des images multispectrales en utilisant le MNT

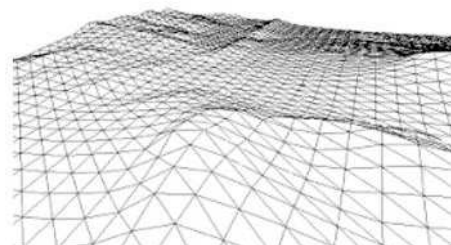
Les systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des outils appréciés dans le domaine de l'aide à la décision dans de nombreuses entreprises et institutions. Ces SIG permettent en effet de combiner des données textuelles, des données vectorielles et des images (rasters). L'utilisation de données comme des photographies satellitaires, des cartes scannées ou de modèles numériques de terrains implique de mettre en place des stratégies de stockage et de visualisation de ces données. De plus, la visualisation en trois dimensions d'un terrain implique de lier les images du sol, appelées textures, avec la géométrie du terrain, appelée modèle numérique de terrain (MNT). Ce lien est possible grâce aux coordonnées géoréférencées de ces éléments (longitude /latitude) qui dépendent du système de projection utilisé. Toutes ces informations sont en général stockées et synchronisées dans trois fichiers différents, ou bien dans un seul fichier compressé, afin de permettre une visualisation en 3D.

3.4.1. Représentation 3D des terrains

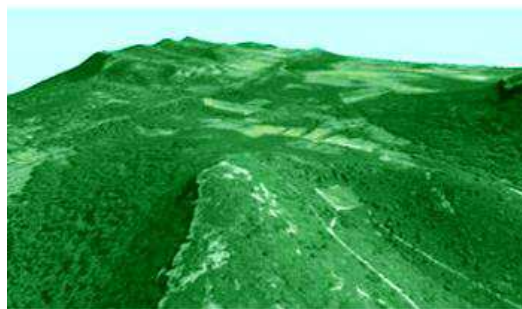
La représentation de terrains en trois dimensions est une composante importante pour la mise en place d'environnements graphiques extérieurs virtuels. Nous pouvons, par exemple, citer les simulateurs de vols et de conduite et de façon plus générale les jeux vidéo 3D. Dans le cadre de notre travail, on s'intéresse à la visualisation 3D des terrains. Ceci nous amène à combiner deux types de données [4]. Nous utilisons tout d'abord un champ d'altitudes (MNT). Chaque altitude correspond à une élévation (Figure 2.3-a). Celles-ci sont utilisées afin de générer la géométrie du terrain, en les connectant par exemple sous la forme de triangles (Figure 2.3-b). Nous devons ensuite plaquer une image sur ces triangles afin d'obtenir la visualisation voulue (Figure 2.3-c).



(a) Visualisation de la grille uniforme correspondante de aux élévations (MNT).



(b) Surface 3D triangulée reliant les élévations



(c) Plaquage d'une texture (image) sur le MNT.

Figure 2.3: Plaquage des images sur le MNT et déduction d'une vue en 3D.

3.4.2. Le MNT

Afin de représenter les altitudes correspondant à chaque point d'un terrain en trois dimensions, un champ d'élévation est utilisé. Celui-ci peut par exemple être représenté à l'aide d'une grille régulière dans laquelle on dispose d'une altitude tous les 50 mètres (Figure 2.3-a). Les points sont ensuite reliés afin de former des triangles que l'on pourra ensuite afficher. Une première approche consiste à utiliser un ensemble de triangles irréguliers (TIN : Triangulâtes Irrégulier Network). Un grand nombre de méthodes a été développé afin de créer cet ensemble de triangles, comme par exemple la triangulation de Delaunay.

3.4.3. Plaquage de l'image sur le MNT

Une fois la construction géométrique effectuée, sous la forme des triangles (Figure 2.3-b) à partir du MNT, il faut plaquer sur ces triangles obtenus une image des textures et obtenir enfin une visualisation en 3D de cette image. Ce processus doit se faire à travers un algorithme qui associe la valeur radiométrique ou colorimétrique de chaque pixel de l'image (texture) de position (x, y) à sa valeur d'altitude z correspondante dans le MNT d'une façon à avoir une représentation 3D.

3.5. Cartes d'orientation, cartes d'ensoleillement ou carte d'ombrage

Une information sur l'orientation du sol (exposition pour les cultures, etc.) peut aussi s'avérer utile. L'orientation, qui est une information vectorielle (une direction) peut toutefois être codée plus ou moins finement par une valeur (selon les quatre quadrants des points cardinaux, par exemple : N=1, E=2, S=3, W=4). On imagine facilement alors le procédé qui conduit à des cartes d'orientation (figure 2.5). On veillera à choisir une représentation des ombrages correspondant à une position du Soleil au Nord-Ouest pour garantir une bonne perception du relief par l'œil.

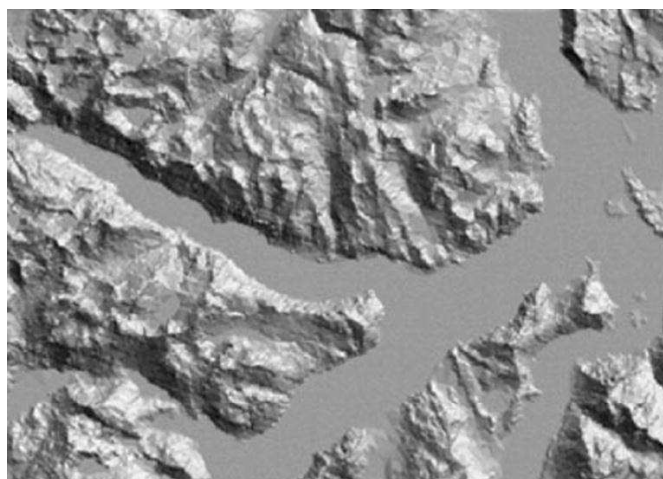


Figure 2.5: Exemple d'une carte d'ombrage.

Le cas des cartes d'ensoleillement n'est qu'un cas particulier, où l'on affecte non pas un codage de l'orientation, mais le produit scalaire de l'orientation avec la direction du Soleil à une date donnée. On obtient alors une simulation de l'éclairage du terrain par le Soleil, les ombres portées en moins. Si l'on voulait visualiser les ombres portées, il faudrait alors déterminer les points du MNT qui ne sont pas visibles pour un observateur qui regarderait le terrain de très haut selon une direction parallèle aux rayons du Soleil. Certains logiciels le permettent, en exploitant des algorithmes très connus dans le monde de l'image de synthèse.

Les cartes d'ombres portées ainsi obtenues s'apparentent à une famille de cartes appelées cartes d'intervisibilité, ou encore covisibilité. Ces cartes représentent, par des polygones, les zones du MNT qu'un observateur, placé en un point quelconque, peut observer. Ces cartes sont utiles pour des études paysagères, par exemple. On peut traiter des cas complexes en calculant la visibilité de plusieurs points, de tronçons, voire de zones.

3.6. Conclusion partielle

Dans ce chapitre on a vu deux sources de données différentes pour la construction des Modèles Numérique de Terrain. La première est la photogrammétrie qui assure les caractéristiques stéréoscopiques des couples d'images afin d'en extraire l'altitude. La seconde est la topographie qui assure des cartes représentant la morphologie du terrain et son altitude, en s'appuyant principalement sur des courbes de niveau. La visualisation du MNT dépend de l'information que l'on veut montrer, donc pour une visualisation presque complète comportant la position et l'altitude des objets géomorphologiques, on adopte la représentation en trois dimensions sous un angle de vue donné, beaucoup de logiciels effectuent ce processus, en plaquant des textures sur le MNT généré et l'établissement un lien entre les coordonnées (XYZ) de chaque point image nous résulte une scène en 3D. Une autre visualisation propose une représentation adéquate pour les formes de terrain, qui est la méthode d'ombrage. Elle permet d'éclairer le MNT depuis une position définie.

Deuxième partie:
Les Modèles Numériques de
Terrain.

Chapitre 4:

Présentation du MNT.

4.1. Introduction

La création de Modèle Numérique de Terrain est un concept qui s'est développé récemment, et l'introduction du terme modèle numérique de terrain (MNT) est généralement attribuée aux deux ingénieurs américains du Massachusetts-Institute of Technology. La définition donnée par eux était comme suit : « le MNT est simplement une représentation statistique des surface continues de la terre par un grand nombre de points choisis avec X, Y et Z connus dans un système de coordonnées arbitraire ».

4.2. Définition du MNT

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) est une représentation informatique d'une zone géographique et de son relief sans construction ni végétation. Un MNT élémentaire peut se réduire à un tableau de nombres représentant la distribution spatiale des altitudes d'un terrain, autrement dit un modèle de représentation d'altitude dans un fichier maillé. La matrice représente des nœuds réguliers en X et Y, chaque nœud contient une valeur d'altitude en Z. Le pas entre chaque maille peut prendre n'importe quelle valeur, il peut être inférieur au mètre ou supérieur à 1000m.

Le MNT peut correspondre à des terres émergées, au milieu sous-marin, ou au fond de rivières ainsi on peut l'établir pour d'autre planète, Mars comme titre d'exemple.

Les applications 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..

4.3. Domaine d'application du MNT

Grâce à la richesse des MNT en information nécessaire à la visualisation, à l'analyse, à l'étude, et à la modélisation des phénomènes reliés aux reliefs, que sont utilisés dans de multiples domaines:

- ❖ Extraction des paramètres du terrain ;
- ❖ Tracés des profils topographiques ;
- ❖ Modélisation de l'écoulement de l'eau ou de la masse du mouvement (par exemple pour les avalanches et glissements de terrain)
- ❖ Création de cartes en relief ;
- ❖ Rendu de visualisation en 3D;
- ❖ Planification du vol 3D;
- ❖ Création de modèles physiques (y compris soulevé des cartes-relief);
- ❖ Rectification géométrique de photographie aérienne ou d'imagerie satellitaire;
- ❖ Réduction (correction du terrain) des mesures de la gravité (gravimétrie, géodésie physique);
- ❖ Systèmes d'information géographique (SIG);
- ❖ Ingénierie et conception des infrastructures;
- ❖ Systèmes de positionnement global (GPS);
- ❖ Simulation de vol;
- ❖ Précision agricoles et forestières;
- ❖ Analyse de surface;
- ❖ Systèmes de transport intelligents;
- ❖ Sécurité Automobile et systèmes avancés d'assistance du conducteur;

4.4. Résolution du MNT

La notion de résolution est fondamentale pour un MNT. Elle correspond à la plus petite distance entre deux éléments distincts. Pour un MNT, on distingue la résolution planimétrique ou résolution spatiale, relative à la position planimétrique des deux points, et résolution altimétrique, relative à l'unité de mesure des valeurs d'altitude.

Par exemple lorsque le MNT est présenté sous forme d'une image matricielle, la résolution planimétrique correspond à la taille du pixel ou de la maille, qui est généralement de l'ordre de quelques mètres ; la résolution altimétrique est bien souvent inférieure, de l'ordre métrique, décimétrique ou centimétrique suivant le mode de mesure de l'altitude. Il faut noter que ces deux résolutions définissent une gamme d'échelles pour l'utilisation de ce modèle.

4.5. Différence entre MNT et MNE

Suivant la technique de construction du MNT, celui-ci représentera uniquement le sol nu, ou bien le sol ainsi que de tous les objets au-dessus du sol : bâtiments, végétation, etc., que l'on appellera sursol ; dans ce cas, l'altitude renseignée par le MNT est celle du toit de l'ensemble des objets de la surface topographique. Pour différencier les modèles suivant l'information fournie, différents termes peuvent être attribués aux modèles numériques obtenus ou disponibles, mais ces termes peuvent prêter à confusion. Certains auteurs emploient le terme **Modèle Numérique de Terrain** (MNT), en Anglais Digital Terrain Model (DTM), lorsque le modèle informe sur les altitudes de la surface topographiques sans les éléments du sursol, qu'ils différencient du terme **Modèle Numérique de Surface** (MNS) lorsque le sursol est pris en compte dans l'information altimétrique, sont également employés les termes de : **Modèle Numérique d'Élévation** (MNE) ou encore **Modèle Numérique d'Altitude** (MNA), en Anglais Digital Elevation Model (DEM).

Remarque

- Pour détecter la hauteur des bâtiments, il ne suffit que de faire la différence entre le MNE et le MNT. La soustraction du MNE par le MNT donne en quelque sorte tout ce qui dépasse du niveau du sol.
- Les MNT sont considérés comme des objets de dimension 2 car, pour un point de coordonnées(X, Y), il n'est pas possible d'attribuer plusieurs valeurs d'altitude [5]. Ceci pose problème dans la représentation de quelques objets comme les ponts.

Le MNT représente une surface complexe dans un espace à trois dimension, on lui attribue par abus de langage une dimension 2,5.

4.6. Formats du MNT

On peut représenter un MNT sous différents formats et suivant son exploitation, il sera nécessaire de passer d'un format à un autre. Généralement, le terrain est subdivisé en éléments de nature géométrique simple formant une tessellation, qui peut être régulière ou irrégulière : pour la tessellation régulière, tous les éléments géométriques sont identiques alors que pour la tessellation irrégulière, les éléments géométriques peuvent varier en taille et en forme. On peut aussi construire des modèles dits hybrides, en combinant des éléments régulier et irrégulier [6].

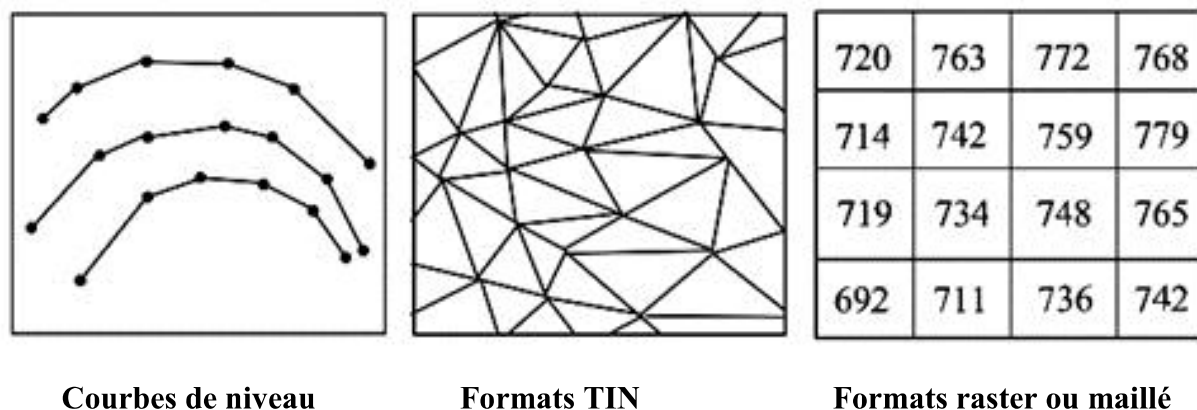


Figure 4.1 : Quelques formats du MNT.

4.6.1. Les courbes de niveau

Ce sont des lignes imaginaires, chacune étant représentée comme un ensemble fini de points constituant une polygline fermée ou ouverte. La différence altimétrique verticale séparant deux courbes de niveau successives s'appelle équidistance (l'équidistance est la même sur toute la carte). Selon les reliefs à représenter l'équidistance varie : dans les régions très accidentées (montagnes par exemple) l'équidistance est de 20 mètres ; par contre dans les régions planes l'équidistance est de 10 mètres. Plus l'équidistance est petite plus la carte est précise.

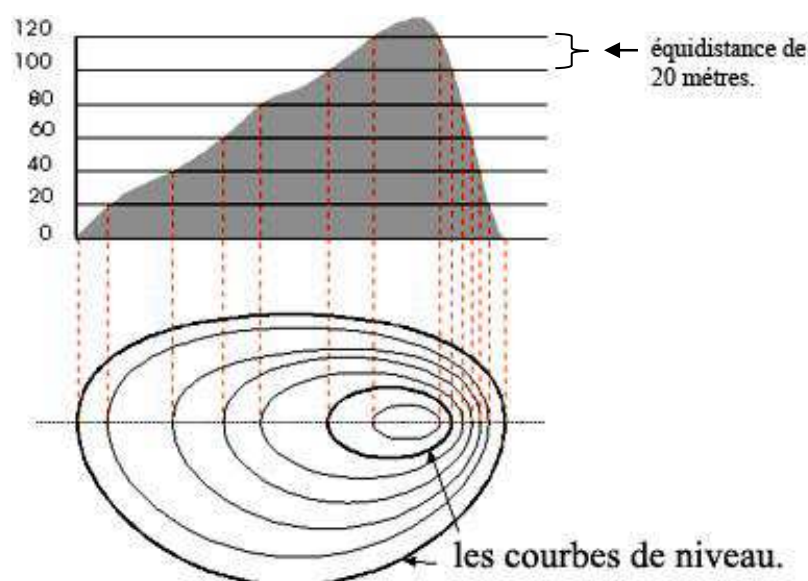


Figure 4.2: Illustration de courbes de niveaux avec une équidistance de 20 mètres.

Sous les courbes de niveau les données sont importantes le long d'une même courbe et nulle entre deux courbes, donc la répartition est **irrégulière**. Cette représentation s'adapte mal à la morphologie du terrain car les points caractéristiques du terrain sont rarement représentés sauf s'ils se retrouvent sur une courbe de niveau.

Remarque: Il faut bien faire la différence entre l'équidistance et la distance horizontale qui sépare les courbes de niveau.

4.6.2. Réseau de triangles irréguliers (RTI) (en Anglais Triangular Irregular Network ou TIN)

La surface topographique est représentée par une succession de facettes triangulaires adjacentes, de forme et de taille variables, construite à partir d'un nuage de points. Les RTI représentent la surface à l'aide d'un ensemble de points irrégulièrement espacés reliés entre eux pour former un réseau de triangles. Les régions accidentées sont représentées avec grand nombre de points et les régions relativement planes sont modélisées avec un petit nombre de points.

Il existe différentes stratégies de création de TIN, d'une manière générale, le TIN est obtenu par triangulation de Delaunay. La surface triangulée définie par des facettes de triangles de taille et forme irrégulières ne se chevauchant pas est donc continue.

Les arêtes du RTI peuvent permettre de capturer la position de certaines caractéristiques géomorphologiques de la surface jouant un rôle important comme les lignes de crêtes (en anglais ridge lines, lignes de points hauts d'un relief séparant deux versants opposés aussi appelées lignes de partage des eaux) ou les lignes de Talweg (lignes reliant les points les plus bas d'une vallée, aussi appelées lignes de collecte des eaux).

Ce support à maille triangulaire apporte une facilité d'interpolation, au sein de la facette. Il offre donc une grande adaptabilité de la quantité d'information stockée en fonction des variations du terrain, et facilite une mise à jour locale [7].

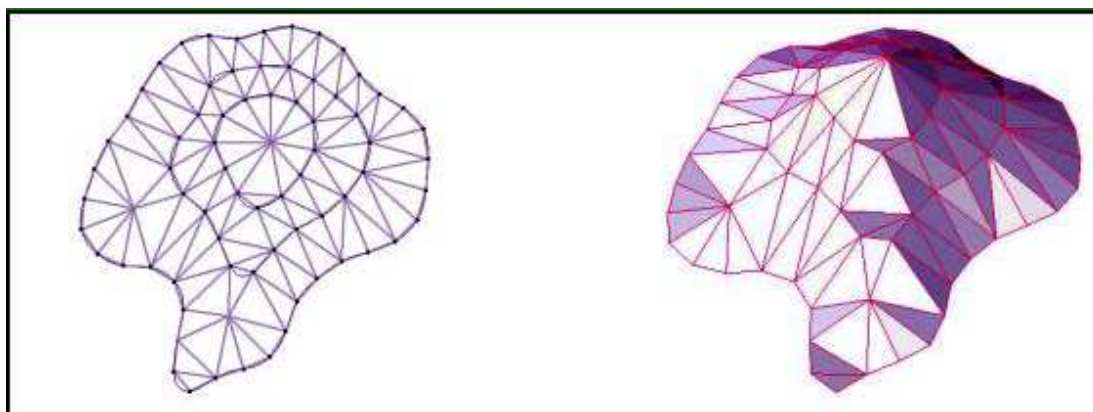


Figure 4.3: Exemple d'un format TIN et sa vue en 3D.

4.6.3. Le format Raster (maillé ou matriciel)

La valeur de l'altitude est donnée en chaque point d'intersection du maillage ou bien la valeur d'altitude attachée à chaque maille est supposée représentée l'ensemble de la surface élémentaire.

On distingue deux types de représentation grille, carré régulière et irrégulière:

4.6.3.1. Grille, carré régulière

Celles-ci permettent un gain de mémoire sur certaines zones puisque le positionnement planimétrique est nécessaire pour un point seulement, les coordonnées des autres points se déduisent de la résolution de la grille. La manipulation des données raster sont faciles et les algorithmes basés sur ces maillages sont simples à implémenter. Mais le point faible de ce type de format est la liaison difficile avec la morphologie du fait de la structure régulière. La représentation des changements brusques de relief est inexistante par contre dans les zones plates est redondante; la représentation des points caractéristiques des paysage est très difficile.

4.6.3.2. Grille, carrée irrégulière

Dans ce type de format, des mailles sont subdivisées à nouveau en quatre mailles carrées afin de permettre un stockage plus précis de l'information (si c'est nécessaire). Il est évident qu'une grille irrégulière est mieux adaptée aux variations du relief et cette adaptation peut être exprimée par la loi de Shannon : la fréquence d'échantillonnage optimale pour un signal, est égale au double de la plus haute fréquence de ce signal. Pour un MNT, la fréquence d'échantillonnage doit donc être augmentée lorsque le terrain est plus accidenté. En fait, le problème de l'optimisation de l'intervalle d'échantillonnage est de déterminer les points critiques de changement de pente. Cette reconnaissance des points et des lignes critiques est délicate et doit utiliser des critères objectifs. Elle peut se baser sur la classification des formes de terrain utilisée pour la généralisation de la surface topographique [8].

Remarque

Les deux formats: les courbes de niveau et les TIN sont relatifs à une représentation vecteur de l'information, par contre la grille régulière et irrégulière sont relatifs à une représentation Raster. [9] par comparaison du format **vecteur** et du **raster** a souligné l'adéquation du vecteur à une analyse en réseau (par ex réseau routière), mais avec une structure de donnée complexe, des croisements cartographiques et une analyse spatiale difficiles. Au contraire le raster représente une structure simple avec des facilités d'analyse spatiale, mais une liaison délicate avec les réseaux et une perte d'information due à la taille des pixels.

Dans le cas des MNT, les qualités du TIN et de la grille sont complémentaire et qu'il peut être nécessaire de passer d'un format à un autre suivant les exigences de l'application, en matière de modélisation et de contraintes de mémoire ou de calcul [10].

4.7. Elaboration d'un MNT

Les méthodes de construction des MNT sont nombreuses, car elles dépendent de la source d'acquisition des données (les levés de terrain, la cartographie, la télédétection..), la technique de saisie des données de référence, la méthode d'interpolation utilisées et le format final du MNT. La construction du MNT s'effectue en deux phases indépendantes: le calcul de la position d'un jeu de points relatif au système cartographique et au système choisis autrement dit: acquisition des données suivant la technique utilisée, puis le ré-échantillonnage de ce jeu de points suivant le format choisi pour représenter le MNT, autrement dit le choix du format initial pour le MNT. Une fois ces phases sont réalisées, on aura un MNT avec des points ou des régions sans valeurs, par conséquent une autre phase est nécessaire pour compléter le MNT, qui consiste à appliquer une technique d'interpolation afin d'estimer l'altitude des points qui n'ont pas été mesurés sur le terrain.

4.7.1. Les phases nécessaires pour la construction du MNT

4.7.1.1. Le calcul de la position du jeu de points (acquisition des données)

Les données nécessaires à la réalisation d'un MNT sont calculées suivant leurs divers types, à partir de sources différentes et suivant des techniques spécifiques de calcul, présentées ci-dessous :

Type de données	Points cotés	Courbes de niveau	Image optique	Image radar	Mesures laser
Source	Cartes, mesures topométriques ou GPS, base de données	Cartes, base de données.	Capteur passif aéroporté, Satellitaire (SPOT)	Capteur actif aéroporté, Satellitaire	Capteur actif aéroporté, Satellitaire
Technique	Digitalisation, Profils altimétriques	Digitalisation, Scannage+ vectorisation	Photogrammétrie, clinométrie	Radargrammétrie, Radar-clinométrie Interférométrie.	Distance optique

Tableau 4.1: Sources et techniques de calcul du positionnement d'un jeu de points de référence.

Les levés terrain, la cartographie et la télédétection sont les trois sources de données les plus utilisées. Une grande part des MNT est générée par la digitalisation des cartes topographiques. Cependant, sur certaines zones, la cartographie est ancienne, incomplète ou inexistante, ce qui nécessite le recours à la télédétection pour obtenir des images aérienne ou satellitaire. L'imagerie aérienne permet de produire des MNT de précision supérieur à l'imagerie spatiale mais sur des zones assez réduites. Grâce à la capacité d'acquisition tout temps du radar, l'imagerie radar est la méthode privilégiée de construction de MNT sur des zones à fort couvert nuageux, ainsi que pour les régions en hautes latitude où le niveau d'ensoleillement trop faible et le couvert nuageux empêchent d'avoir des acquisitions optiques fiables.

4.7.1.2. Ré-échantillonnage (choix du format pour le MNT)

Après la phase d'acquisition on disposera des données incomplètes sur la zone d'étude, donc une méthode d'interpolation est nécessaire pour estimer les altitudes manquantes du terrain. Le choix de la méthode de l'interpolation repose sur le format du MNT, donc avant l'interpolation un ré-échantillonnage est nécessaire.

On général on représente le MNT sous trois structures principales de ré-échantillonnage:

- **Le ré-échantillonnage régulier:** c'est une grille régulière, dont toutes les mailles sont carrées et elles ont la même forme et la même taille.
- **Le ré-échantillonnage semi-régulier :** c'est une grille, dont les mailles sont des parallélogrammes qui peuvent varier en formes et en taille.
- **Le ré-échantillonnage irrégulier :** c'est une grille, dont les mailles ont une forme en général triangulaire et mais d'une taille variable. L'exemple le plus connu est le format TIN ou RTI.

4.7.2. L'interpolation du MNT

Pour un terrain donné, une interpolation est une transformation appliquée à un ensemble de points dans l'objectif d'estimer les altitudes du terrain dans les zones où aucune donnée n'existe, elle établit un lien continu entre les valeurs connues.

4.7.2.1. Utilisations de l'interpolation

L'interpolation est utilisée :

1. Pour construire un MNT à partir de jeu de point de référence et en fonction du format choisi (**interpolation lors de construction du MNT**) ;
2. Pour estimer la valeur d'altitude d'un point qui n'est pas explicitement représenté par le MNT (**interpolation lors de l'utilisation du MNT**) ;
3. Pour changer le format d'un MNT.

4.7.2.2. Types d'interpolation (suivant le résultat)

On peut différencier les méthodes d'interpolation selon leurs effets sur les données initiales en deux types [11]:

- a) Les méthodes d'interpolation exactes qui permettent de conserver les valeurs présentes dans les données initiales dans l'information finale.
- b) Les méthodes d'interpolation approximatives qui induisent une erreur résiduelle en chaque point de l'échantillon initial.

Pour comprendre le processus de l'interpolation, quelques méthodes principales sont schématisées dans la figure suivante (Figure 4.4):

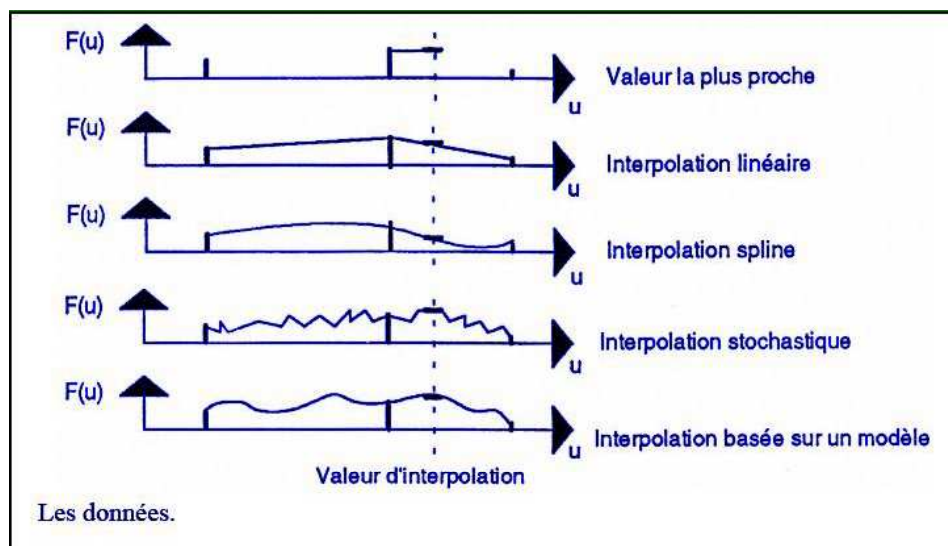


Figure 4.4: Différents Résultats de quelques méthodes d'interpolation.

4.7.2.3. Interpolation lors de construction du MNT

Lors de son élaboration, le calcul des points du MNT final est basé sur l'interpolation des coordonnées tridimensionnelles des points à partir du jeu de points de référence. Le choix de l'interpolation est lié à la source utilisée, à la structure finale du MNT désiré et à la fidélité recherchée par rapport à la surface topographique. Il faut rappeler que le résultat dépend du terrain, de la structure, des points de référence et de la méthode choisie et qu'il n'existe pas une unique méthode d'interpolation supérieure à toutes les autres et convenant pour toutes les applications. D'après [10] le choix d'une méthode est relatif au degré de prise en compte des éléments caractéristiques du relief et au degré d'adaptation de la fonction d'interpolation au terrain.

4.7.2.4. Interpolation lors de l'utilisation du MNT

Le MNT ainsi obtenu, sous forme d'un ensemble de points et/ou de lignes, constitue une approximation du terrain réel. Or le terrain est une surface constituée d'une infinité de points mesurables qui ne peuvent être stockés. L'objectif est donc d'utiliser un modèle qui reproduise à partir de l'échantillon les informations de relief nécessaires à une application donnée, et si possible pour un maximum d'applications différentes. Pour représenter les ondulations du terrain sur l'ensemble de la surface, une fonction d'interpolation est à nouveau utilisée pour recréer artificiellement la continuité de l'information altimétrique. Cette étape repose sur l'hypothèse selon laquelle les variations de relief peuvent être approchées d'une manière satisfaisante par les fonctions mathématiques localisées à de petites surfaces [12]. La validité d'une telle approche dépend de la variabilité locale du relief. Or selon [13], les phénomènes naturels n'apparaissent pas et ne se produisent pas d'une manière régulière et constante dans le temps et dans l'espace. On peut en déduire une impossibilité d'utiliser une unique fonction d'interpolation afin de déduire le relief en tout point. Pourtant, dans la pratique on utilise les mêmes méthodes d'interpolation pour donner une représentation continue du relief, mais les estimations altimétriques obtenues sont plus ou moins précises. Cette représentation peut être améliorée si des informations secondaires sur la variation locale du relief permettent d'adapter la fonction d'interpolation.

4.8. Conclusion partielle

Le MNT, par sa description numérique de l'altitude, est utilisé dans diverses applications pour le calcul de paramètres géomorphologiques ou l'élaboration de produits cartographiques. La technique de production d'un MNT est très variable suivant la source de donnée et le mode de construction, le format et la fonction d'interpolation utilisée, ce qui conduit à une précision altimétrique de l'ordre de décimètre à quelques décimètres. La fidélité avec laquelle le MNT représente la surface topographique dépend également de la variabilité du relief naturel et de la résolution du MNT. Le MNT modélise implicitement la surface topographique à une certaine échelle, correspondant à sa résolution spatiale ; tout calcul mené à partir de ce modèle est relatif à cette échelle de représentation.

Chapitre 5:
Production du MNT.

5.1. Introduction

Les techniques qui permettent de fournir des données utiles à la création d'un MNT sont variées et on trouve parmi elles: le levé topographique, la photogrammétrie, l'interférométrie radar, le laser altimètre, l'interpolation de courbes de niveau à partir de cartes topographiques... La numérisation des courbes de niveau est la technique la plus utilisée, ceci parce que les données numériques de ces courbes sont développées à partir de cartes topographiques. Les courbes de niveau issues des cartes topographiques peuvent être numérisées par une table à digitaliser ou un scanner, ensuite elles seront enregistrées, vectorisées, éditées et étiquetées aux valeurs d'altitude. La capture de données photogrammétriques implique deux méthodes pour l'acquisition de données utiles: la photographie aérienne et l'imagerie numérique par satellite (SPOT). Ces deux méthodes sont employées pour produire des données topographiques précises à haute résolution. Les données produites par un levé topographique sont les plus prises, car cette opération est conçue pour tirer la plupart d'informations de la zone d'étude. Ceci est fait en incorporant un nombre significatif de point sur le terrain. Cependant de tels niveaux élevés d'exactitude, exigent beaucoup de temps et de calcul, donc cette technique est appliquée seulement dans des projets spécifiques impliquant de petites zones. On s'intéresse à deux techniques pour élaborer le MNT, la première est la technique basée sur les données acquises par des stellites SPOT (imagerie satellitaire). La seconde consiste à interpoler les courbes de niveau.

5.2. Utilisation de l'analyse stéréoscopique des images SPOT

Mesurer le relief à partir d'images de satellite tel est la possibilité offerte par SPOT depuis 1986. SPOT est un appareil photographique placé en orbite, muni d'un puissant téléobjectif que l'on peut orienter vers la terre dans la direction de la zone à photographier. Pratiquement, cette capacité est obtenue au moyen d'un miroir orientable qui permet au satellite SPOT de regarder soit vers l'Est, soit vers l'Ouest tout en se déplaçant sur son orbite qui joint les deux pôles. Ainsi, grâce à sa visée latérale, SPOT peut observer une même région sous deux angles différents et créer un couple stéréoscopique d'images numériques, dont le traitement informatique permet la restitution du relief. Depuis le lancement du satellite SPOT, l'imagerie satellitaire a remplacé l'imagerie aérienne pour la création de MNT. Cette possibilité est principalement due à la résolution nominale de 10 mètres et la possibilité de prises de vue latérales grâce à son miroir orientable. On reconnaît à l'imagerie satellitaire trois avantages par rapport à l'imagerie aérienne: les données correspondent à des scènes de taille plus importante, elles sont obtenues directement sous forme numérique et le coût financier est beaucoup moins lourd qu'une campagne aérienne de prises de vue.

5.2.1. Le couple stéréoscopique

Le MNT est un fichier altimétrique, présentant le réseau régulier des altitudes d'un domaine géographique. Le MNT SPOT est fabriqué à partir de couples stéréoscopiques d'images panchromatiques ou multispectrales. Le couple doit faire l'objet d'une validation avant la restitution altimétrique.

Pour constituer un couple stéréoscopique, il convient de disposer d'une paire d'images présentant deux propriétés géométriques :

- les deux images doivent avoir une zone de recouvrement.
- la différence entre les deux angles de prise de vue doit être suffisante pour permettre une restitution. Cette différence est mesurée par le rapport b/h - rapport base sur hauteur - qui doit être au moins de l'ordre de 0.5. (Voir chapitre 3).

5.2.1.1. L'acquisition du couple stéréoscopique

La trajectographie SPOT implique que les images doivent être prises à partir de deux angles différents avec un écart de dates d'au-moins 8 jours. Si de plus on ajoute des conditions sur le rapport B/H et sur l'enneigement, on est amené, très souvent, à utiliser des images dont les écarts de prise de vue peuvent être importants. Ceux-ci pouvant aller au-delà d'une saison, des modifications de l'état des cultures ou l'extension des zones urbaines peuvent induire des erreurs importantes lors de la mise en correspondance.

5.2.1.2. La nature de l'image

Les images SPOT utilisées sont situées dans le spectre visible (0,51 μm -0,73 μm). Pour cette raison, elles sont sensibles aux effets atmosphériques, telle que la présence de nuages, de brumes ou de brouillard. Ceci a pour conséquence de détruire complètement l'information stéréoscopique en masquant le sol, ou bien d'introduire un bruit important sous la forme de changements de contraste.

5.2.1.3. Le type de scène

L'information photométrique apportée par une image panchromatique est liée au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre. Elle est par conséquent considérablement influencée par les caractéristiques topographiques des zones accidentées, auxquelles viennent s'ajouter:

- les différents facteurs atmosphériques (nuage, brume, brouillard...) ;
- les conditions d'éclairement (variations saisonnières affectent rayonnement solaire) ;
- la géométrie de visée.

Ces différents facteurs peuvent entraîner des intensités radiométriques très dissemblables sur des surfaces de même nature spectrale ou très similaires sur des surfaces différentes. Donc deux images prises à un mois et demi d'intervalle et correspondent à un changement de saison agricole présentent de brumes, inversion de contraste, changement d'état des cultures...Leurs conséquences sur l'information de disparité affectent non seulement les zones concernées, mais également leurs voisinages du fait des hypothèses de continuité de surface nécessaires pour réaliser la mise en correspondance des points homologues.

5.2.2. Synthèse du MNT stéréoscopique (SPOT)

Nous considérons tout d'abord un modèle particulier de capteur : le modèle projectif linéaire. Puis, nous abordons l'étude de la capture suivant deux angles différents, c'est la technologie utilisée pour les capteurs des satellites SPOT. L'introduction de la géométrie épipolaire permet alors de définir de manière générale la disparité, et parmi les méthodes de calcul, nous présentons les algorithmes reposant sur un critère de corrélation. Enfin, nous indiquons rapidement les principes de la reconstruction d'une scène à partir de la carte de disparité.

5.2.2.1. modèle projectif linéaire parallèle

Considérons un système stéréoscopique particulièrement simple: il est constitué de deux caméras projectives linéaires dont les plans image Π_1 et Π_2 sont parallèles, comme représenté à la figure 5.1. Le centre optique O_i ($i=1, 2$) de caméra est fixe. L'image m_i d'un point physique M est définie par l'intersection entre le rayon $(O_i M)$ et le plan Π_i . Il s'agit du modèle projectif linéaire parallèle. Les deux caméras ont même distance focale f (distance entre le plan image Π_i et le centre optique O_i). Les repères R_1 , et R_2 , ne diffèrent que par la position des deux origines O_1 et O_2 , les axes $(O_1 U_1)$, $(O_2 U_2)$, $(O_1 V_1)$, $(O_2 V_2)$ et $(O_1 Z_1)$, $(O_2 Z_2)$ étant parallèles deux à deux. Enfin, O_2 , est situé sur l'axe $(O_1 U_1)$, et l'on note b son abscisse, qui est également la distance entre les deux centres optiques.

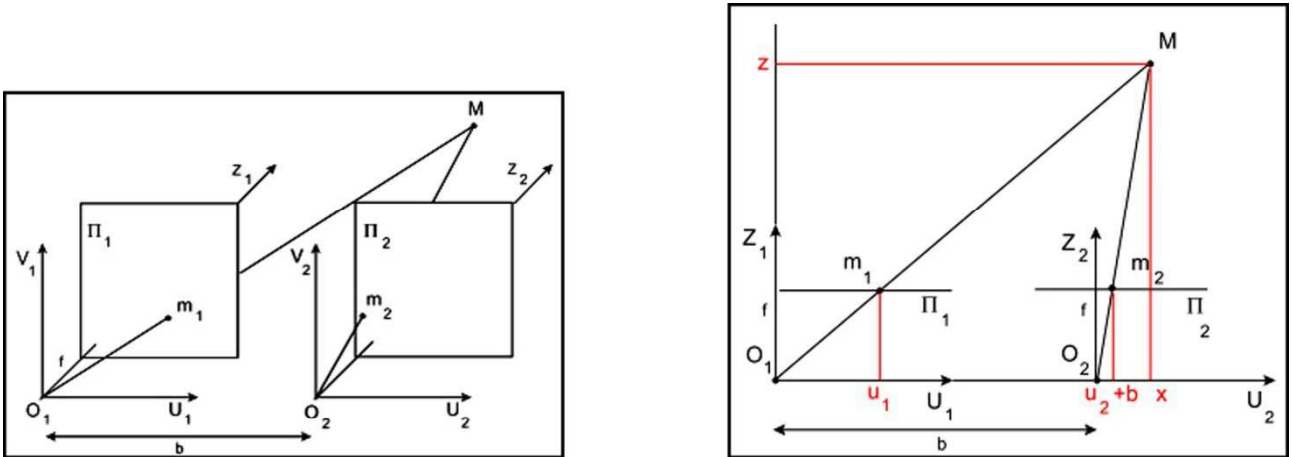


Figure 5.1: Système stéréoscopique avec deux caméras projectives linéaires parallèles et à droite sa vue en haut (vue verticale selon l'axe $(O_1 V_1)$ et $(O_2 V_2)$).

On choisit le repère $R = (O, X, Y, Z) = (O_1, U_1, V_1, Z_1)$ comme repère de la scène, et on considère un point physique M de coordonnées $(x, y, z)^T$ dans R . Ses projections dans les plans image Π_1 et Π_2 sont notées respectivement m_1 , de coordonnées $(u_1, v_1, f)^T$ dans R_1 , et m_2 , de coordonnées $(u_2, v_2, f)^T$ dans R_2 . En appliquant le théorème de Thalès dans les triangles rectangles d'hypoténuse $O_1 M$ et $O_2 M$ respectivement (en rouge sur la figure), on a l'égalité entre les rapports:

L'abscisse de m_2 par rapport à R_2 est: u_2 et par rapport à R_1 est: $u_2 + b$.

$$\frac{f}{z} = \frac{u_1}{x} = \frac{u_2}{x-b} \quad (5.1)$$

On obtient par un raisonnement identique :

$$\frac{f}{z} = \frac{v_1}{y} = \frac{v_2}{y} \quad (5.2)$$

$v_1 = v_2$ car v_1 et v_2 se trouvent sur les axes verticale et qui sont parallèle aux deux plan images Π_1 et Π_2 donc la projection de chacun des images du point M (on parle de m_1 , et m_2) sur les axes V_1 et V_2 respectivement seront égale.

Il y a donc égalité entre les ordonnées : $v_1 = v_2$, et de la relation (5.1) on déduit:

$$\frac{f}{z} = \frac{u_1 - u_2}{b} \quad (5.3)$$

Si l'on définit la disparité d comme la différence entre les deux abscisses:

$$d = u_1 - u_2 \quad (5.4)$$

De la relation (5.3) et (5.4) on déduit:

$$z = \frac{fb}{d} \quad (5.5)$$

En remplaçant cette valeur dans l'équation (5.1), on obtient une expression de l'abscisse x :

$$x = \frac{u_1}{d} b \quad (5.6)$$

De même, l'ordonnée y s'écrit :

$$y = \frac{v_1}{d} b \quad (5.7)$$

On vient de montrer que les coordonnées (x, y, z) dans l'espace du point physique M s'expriment à partir des caractéristiques du système stéréoscopique, qui sont les coordonnées $(u_1, v_1)^T$ et de la disparité d ainsi la distance focale f et la distance entre les deux centres optiques b . Ce sont ces relations qui sont à la base du calcul des propriétés géométriques d'une scène à partir d'un couple d'images stéréoscopiques. Il apparaît notamment qu'une fois les paramètres de la prise de vue connus, les coordonnées spatiales d'un point de l'image $(u_1, v_1)^T$ s'expriment en fonction de la disparité d qu'on va définir en détail par la suite.

5.2.2.2. Modèle de capture sous deux angles différents (SPOT)

Ce système stéréoscopique est composé de deux caméras observant une même scène depuis deux positions différentes. Par référence au système optique humain, l'une est généralement appelée caméra gauche et l'autre caméra droite. Chaque caméra est symbolisée par son centre optique O_i et son plan image Π_i , ($i=1, 2$). On attache à chaque caméra un repère $R_i = (O_i, U_i, V_i, Z_i)$ tel que les axes U_i et V_i soient parallèles au plan Π_i et perpendiculaire à l'axe Z_i . On appelle distance focale, notée f , la distance entre le centre optique et le plan image. On note m_i la projection d'un point physique M sur le plan Π_i .

Les coordonnées de m_i dans R_i sont $(u_i, v_i, f)^T$. L'image I_i produite par la caméra i est constituée par l'ensemble des points image m_i . Dans la suite, un point image m_i est repéré par ses coordonnées (u_i, v_i) dans I_i . Enfin, le couple stéréoscopique est la réunion des deux images I_1 et I_2 . Dans cette configuration un point physique M se projette dans le plan image de chaque caméra. Les deux projections m_1 et m_2 forment un couple de points homologues. Connaissant un repère de l'espace.

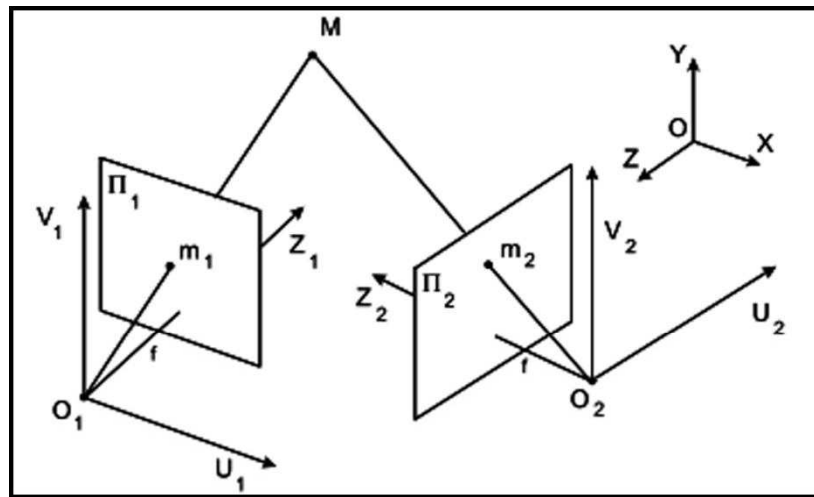


Figure 5.2: Vision stéréoscopique : un point physique M se projette dans le plan image Π_i (avec $i=1, 2$) de chaque caméra ; les deux projections m_1 et m_2 forment un couple de points homologues.

$R = (O, X, Y, Z)$, le problème qui se pose en vision stéréoscopique est de calculer les coordonnées (x, y, z) du point M dans R à partir des coordonnées (u_1, v_1) et (u_2, v_2) de ses projections m_1 et m_2 . On procède généralement en deux étapes successives [14].

- Connaissant le point m_1 de l'image I_1 , quel point m_2 de l'image I_2 lui correspond ?
Il s'agit donc de déterminer l'ensemble des couples de points homologues. C'est l'objet de la mise en correspondance (corrélation).
- Connaissant le couple de points homologues (m_1, m_2) et leurs coordonnées $((u_1, v_1), (u_2, v_2))$ quelles sont les coordonnées du point physique M correspondant dans le repère R ?

5.2.2.3. La géométrie épipolaire

Supposons que la position et l'orientation des caméras est quelconque. Nous allons montrer que le lieu des points homologues à un point donné est une droite.

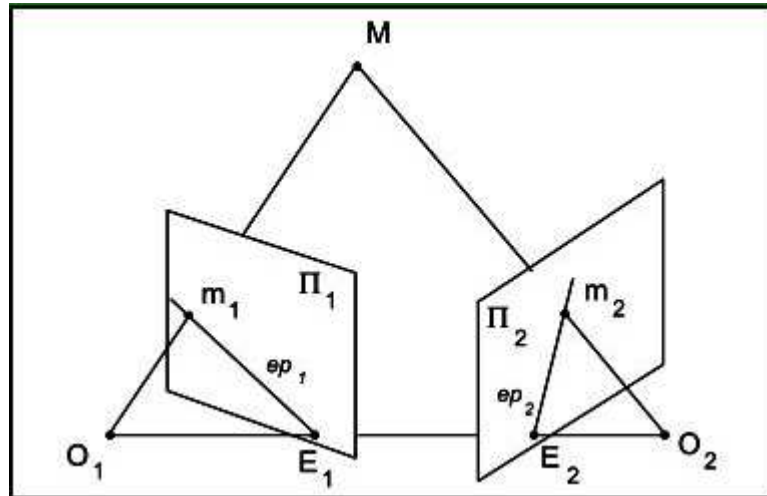


Figure 5.3: Géométrie épipolaire : E_1 et E_2 sont les épipoles, $O_1 M O_2$ est le plan épipolaire défini par M , et ep_1 et ep_2 sont les droites épipolaires.

Considérons le système stéréoscopique de la figure 5.3. Le centre optique O_1 se projette dans le plan Π_2 au point E_2 : cette projection définit l'épipole de la caméra 2 par rapport à la caméra 1. L'image de la droite $(O_1 M)$ dans Π_2 est la droite $(E_2 m_2)$, notée ep_2 . On construit réciproquement l'épipole E_1 , projection de O_2 dans Π_1 , et la droite épipolaire ep_1 de m_2 dans Π_1 . Comme O_1 , m_1 et M sont alignés, c'est aussi l'image de la droite $(O_1 m_1)$ dans Π_2 , que l'on appelle droite épipolaire de m_1 dans le plan image Π_2 .

On vient donc de montrer que pour tout point m_1 de Π_1 son homologue m_2 se situe sur la droite épipolaire ep_2 : autrement dit, pour m_1 fixé, lorsque M appartient à la droite $(O_1 m_1)$, l'image m_2 est située sur la droite ep_2 . Donc la recherche d'un point homologue m_2 dans Π_2 pour m_1 dans Π_1 peut être réduite à une recherche sur la droite épipolaire ep_2 .

Lorsque les plans Π_1 et Π_2 sont parallèles à la droite $(O_1 O_2)$, les épipoles E_1 et E_2 sont projetés à l'infini, et les droites épipolaires deviennent parallèles. C'est le cas du modèle projectif linéaire parallèle de la figure 5.1, où l'on a vu que deux points homologues ont même ordonnée : les droites épipolaires correspondent exactement aux lignes de l'image.

L'utilisation de la géométrie épipolaire montre que la recherche des points homologues dans le modèle projectif linéaire peut être réduite à une recherche le long des droites épipolaires. L'étape de rectification consiste à reprojeter les images du couple sur un plan particulier afin que les droites épipolaires correspondent aux lignes de l'image et que l'on puisse se ramener au cas du modèle projectif linéaire parallèle de la figure 5.1. Après rectification, deux points homologues ont même ordonnée, ce qui simplifie grandement le problème de la mise en correspondance. La rectification est une étape qui ne dépend que de la géométrie du système stéréoscopique et qui peut donc être menée sans aucune information sur la scène observée.

5.2.2.4. La rectification stéréoscopique

On considère un plan de rectification Π' parallèle à la droite formée par les deux centres optiques ($O_1 O_2$). Un tel plan est représenté à la figure 5.3. La projection Π'_i du plan image Π_i ($i = 1, 2$) dans le plan Π' est obtenue en traçant pour chaque point m_i de Π_i l'intersection de la droite ($O_i m_i$) avec le plan Π' . Tout se passe donc comme si on observait le point M avec deux caméras placées en O_1 et O_2 , ayant chacune pour plan image le plan Π' . On est ainsi ramené au cas du modèle projectif linéaire parallèle figure 5.1: les épipoles sont projetées à l'infini et les droites épipolaires sont toutes parallèles aux lignes de l'image.

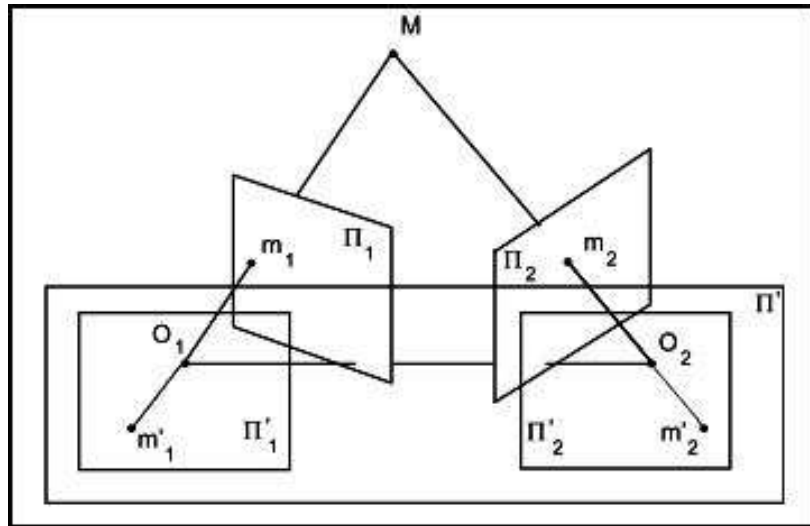


Figure 5.3: Résultat de la rectification du couple stéréoscopique.

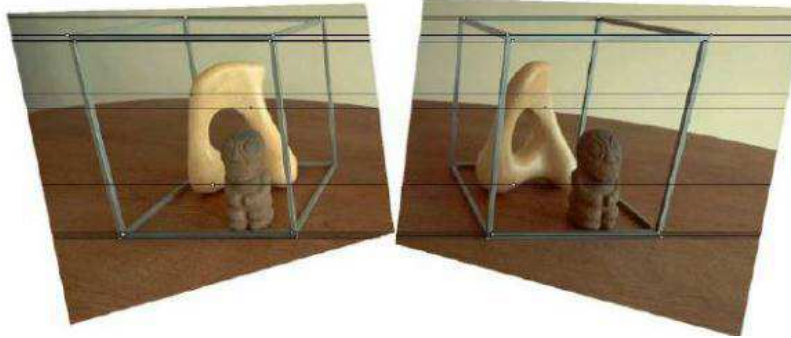
Rectification d'un couple stéréoscopique: chaque plan image Π_i ($i = 1, 2$) est projeté sur un même plan de rectification Π' , parallèle à la droite (O_1, O_2) joignant les deux centres optiques. Dans les nouveaux plans Π'_1 et Π'_2 , les deux points du couple m'_1, m'_2 ont même ordonnée et c'est pareil pour tout le reste des points homologues des deux images du couple.

Deux points homologues dans les nouvelles images ont donc bien même ordonnée. Reste à choisir le plan de rectification, ou, plus généralement, les matrices de projection pour chaque caméra. La condition imposée est l'égalité entre les deux ordonnées après projection. Selon [17] il existe une grande liberté pour le choix de la rectification de la paire de matrice, et celui-ci dépend principalement de l'application visée. Si l'étape suivante est la mise en correspondance, alors le plan de rectification doit être parallèle (Figure 5.3) et ce le cas pour lequel on s'intéresse [18]. Si au contraire un plan dans la scène joue un rôle particulier (comme par exemple le sol pour le déplacement d'un robot), on peut avoir intérêt à rectifier par rapport à ce plan. Notons que la rectification d'un couple stéréoscopique implique un ré-échantillonnage des images initiales.

- Exemple de rectification



Couple d'image avant la rectification



Après la rectification

Figure 5.4: Exemple de rectification d'un couple d'image.

Transformation des deux images pour que les droites épipolaires soient parallèles et alignées, afin de rendre l'opération de la recherche des points homologues sur les droites épipolaires largement simple.

5.2.2.5. Définition de la disparité

Après avoir obtenu les images stéréoscopiques rectifiées I_1 et I_2 . Comme il a été vu précédemment, deux points homologues m_1 de coordonnées (u_1, v_1) , et m_2 de coordonnées (u_2, v_2) , ont même ordonnée, avec $v_1 = v_2$ grâce aux lignes épipolaires mises en parallèle. On peut alors définir la disparité d comme la différence entre les abscisses après rectification. Si l'on choisit l'image I_1 comme référence, la disparité en tout point de coordonnées (u_1, v_1) de l'image I_1 dont le point homologue a pour coordonnées (u_2, v_2) dans l'image I_2 s'écrit :

$$d_1(u_1, v_1) = u_2 - u_1 \quad (5.8)$$

On peut définir symétriquement la disparité par rapport à l'image I_2 , on a ainsi pour tout point de coordonnées (u_1, v_1) de l'image I_2 dont l'homologue a pour coordonnées (u_1, v_1) dans l'image I_1 s'écrit:

$$d_2(u_2, v_2) = u_1 - u_2 \quad (5.9)$$

À tout pixel de l'image I_1 , on peut ainsi faire correspondre une valeur de la disparité, à condition que le pixel homologue existe dans l'image I_2 . On peut donc construire une carte de disparité,

superposable à I_1 , qui permet de calculer les coordonnées des pixels homologues dans l'image I_2 . Symétriquement, on peut construire une autre carte de disparité, superposable à l'image I_2 .

5.2.2.6. La mise en correspondance: Calcul de la disparité

Les calculs précédents ont montré que les coordonnées dans l'espace d'un point physique M se déduisent à partir des coordonnées des points image m_1 et m_2 , et tout particulièrement de la disparité, et des paramètres des deux caméras. En pratique cependant, on dispose seulement des deux images et il faut donc déterminer les couples de points homologues. La disparité s'obtient alors par différence des coordonnées des points homologues. Nous considérons ci-après un couple d'images rectifiées (I_1, I_2).

Pour effectuer la mise en correspondance (calcul de la disparité afin de trouver les points homologues), on traite une méthode qui utilise directement l'intensité enregistrée en chaque pixel (valeur radiométrique), et cherche à déterminer en chaque point d'une image (I_1) son correspondant dans l'autre image (I_2). Cette méthode repose sur l'hypothèse que localement les deux images du couple sont semblables: pour un couple de points homologues, on doit vérifier en effet que les valeurs des pixels sont proches, soit :

$$I_1(u, v) \approx I_2(u + d(u, v), v) \quad (5.10)$$

Il doit donc être possible de reconnaître l'homologue d'un pixel donné. Pour cela un critère de similitude (corrélation) est utilisé, et le pixel homologue est choisi comme celui qui maximise ce critère. Considérons un couple d'images rectifiées. On cherche à calculer la carte de disparité associée à l'image I_1 . Pour un pixel $(u, v)^T$ et une valeur d de la disparité donnés, appelons $C_{u,v}(d)$ la valeur du critère de similitude entre les pixels $(u, v)^T$ et $(u + d, v)^T$. L'estimation de la disparité en $(u, v)^T$ est alors [19] :

$$\hat{d}(u, v) = \arg \max_d C_{u,v}(d) \quad (5.11)$$

Le critère de similitude utilisé est le calcul d'un coefficient de corrélation $C_{u,v}(d)$.

Pour calculer le critère de similitude (corrélation) on considère une fenêtre centrée sur le pixel $(u, v)^T$ et on cherche le déplacement d qui maximise la corrélation $C_{u,v}(d)$.

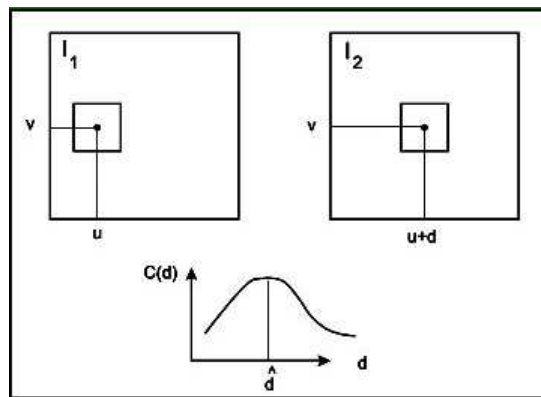


Figure 5.5 : Calcul du critère de corrélation au pixel $(u, v)^T$.

5.2.2.7. Reconstitution

Une fois la phase de corrélation est terminée, on obtiendra une carte de disparité qui est une carte représentant la disparité (la différence d'abscisse: $u_1 - u_2$) de tous les points homologues du couple d'image. Une fois cette carte est disponible on pourra donc déduire les coordonnées de tous les points homologues du couple. En fin on calcul les coordonnées de tous les points physique M , $((X,Y) : \text{la position et } Z: \text{l'altitude})$ à partir des coordonnées des points homologues correspondants. Connaissant les coordonnées (X,Y,Z) , on adopte une méthode de ré-échantillonnage pour reproduire le MNT. Donc pour chaque point de coordonnées altimétrique Z et planimétriques (X, Y) (coordonnées terrain) on lui attribue son correspondant dans une image (pixel) suivant les coordonnées pixel (i : nombre de ligne, j : nombre de colonne), en suite on affecte la valeur d'altitude Z pour le pixel, codé sur 16 ou 32 bits.

5.2.3. Résumé des étapes pour la fabrication du MNT SPOT

Pour établir le MNT on procède généralement suivant les étapes suivantes:

- **Acquisition du couple stéréoscopique**

Le couple stéréoscopique sera produit par l'imagerie satellitaire, donc le satellite SPOT possède tous les outils nécessaires pour capter les deux d'images du couple sous deux angles différents et qui préservent les propriétés stéréoscopiques.

- **Rectification de couple stéréoscopique**

Appliquer une transformation aux deux images pour que leurs droites épipolaires soient parallèles et alignées, afin de rendre la recherche des points homologues sur les droites épipolaires entre les deux images largement facile.

- **La mise en correspondance des couples stéréoscopiques**

La corrélation est une technique qui sert à déterminer les points homologues entre les deux images rectifiées en calculant la disparité.

- **Reconstitution**

Après la phase de la mise en correspondance, on obtient la carte de disparité, qui va nous permettre la détermination des coordonnées des points physique, puis on déduit le MNT en passant des coordonnées terrain aux coordonnées pixel.

5.3. Processus de création d'un MNT à partir d'une carte topographique numérisée

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 niveau. Une courbe de niveau est une courbe décrivant une coupe du terrain à une certaine altitude. Les courbes de niveau sont séparées de leurs voisines par une dénivellation constante. Il existe une grande variété de cartes et chacune renferme un certain nombre d'informations à propos de la zone géographique représentée. On y trouve par exemple les forêts, les zones urbaines, les bâtiments, les routes et les rivières etc. Aussi, des modèles de terrains évolués pourraient indexer toutes ces informations. Cependant on s'intéresse dans notre étude à la seule extraction des courbes de niveau et à leur traitement.

On va présenter le processus nécessaire mise au point pour la création d'un MNT en quatre étapes principales :

1. Extraction des courbes de niveaux de la carte;
2. Reconstruction automatique ou semi-automatique des courbes altérées;
3. Affectation des altitudes pour les courbes de niveau;
4. Interpolation des courbes de niveau.

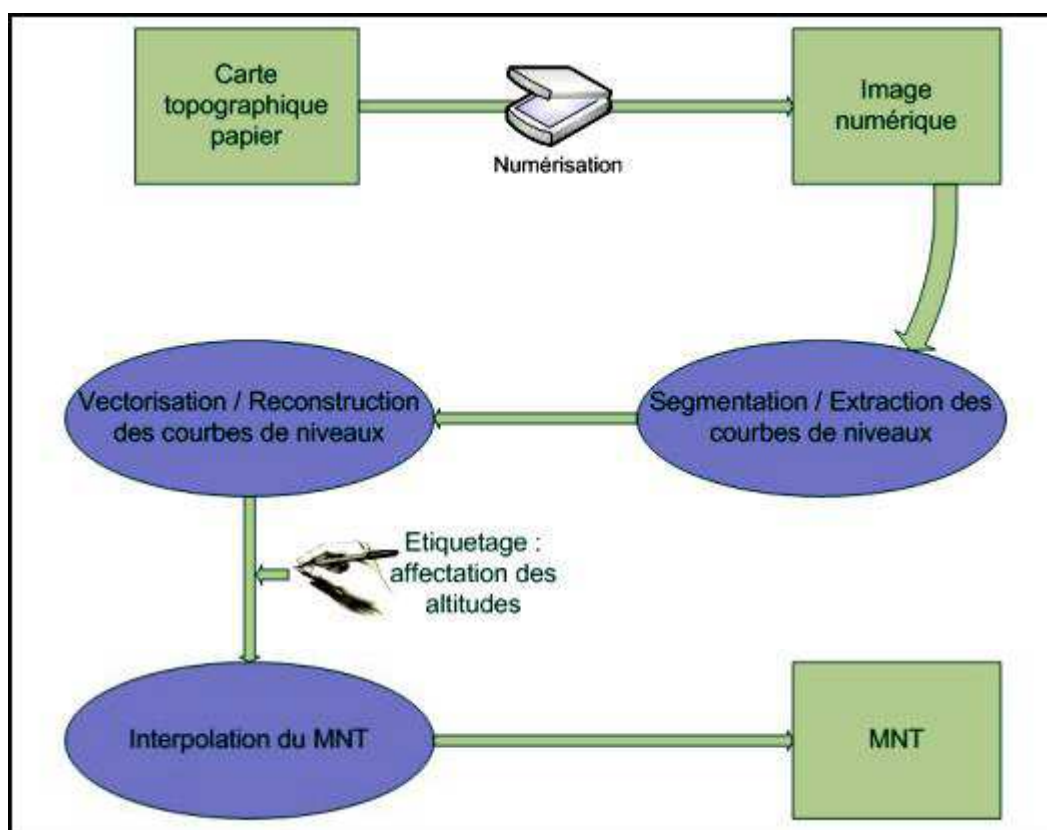


Figure 5.6: Processus de création d'un MNT à partir d'une carte topographique numérisée.

5.3.1. Extraction des courbes de niveau

S'il existe un grand nombre de cartes topographiques de par le monde, il n'existe cependant pas de standard en matière d'écriture de ces cartes, et chaque éditeur peut utiliser ses propres règles d'édition. Généralement, les cartes topographiques contiennent, outre les courbes de niveau, de nombreuses couches d'informations thématiques telles que les routes, les cours d'eau, les bâtiments, les forêts, les toponymes, etc. Le plus souvent, chaque type d'information est caractérisé par une couleur spécifique. Lors de l'impression de la carte, les différentes couches sont mixées dans un certain ordre. Sur la plupart des cartes topographiques en couleur, les courbes de niveau sont tracées en marron ou en orange. Dans cette section on va décrire un processus permettant l'extraction des courbes de niveau sur ce type de cartes. Ce processus consiste en l'application de plusieurs opérations de traitement d'image afin d'isoler les courbes de niveau des autres informations de la carte topographique numérisée. Donc la numérisation des cartes topographique est une étape cruciale pour la suite du traitement car elle permet l'acquisition de la principale information disponible, c'est à dire la couleur caractéristique des courbes.

L'ensemble du processus nécessaire pour l'obtention des courbes de niveau est :

- 1) Segmentation couleur par classification colorimétrique (seuillage) ;
- 2) Application de quelques opérations de la morphologie mathématique (Filtrage, fermeture...).

Ces opérations reposent sur les courbes de niveau de la carte, alors il est capital que celles-ci répondent aux critères suivants sur l'image obtenue par numérisation :

- ❖ les courbes de niveau doivent être suffisamment épaisses;
- ❖ elles doivent être le plus isolées possible les unes des autres ;
- ❖ la couleur qui les caractérise doit être la plus uniforme possible;

Ces réglages doivent donc être effectués en fonction du scanner utilisé, de la qualité de la carte, de son type (topographique seulement, mixte...) ainsi que de son échelle. La résolution de la numérisation doit donc être suffisante.

Cependant, à cause de la difficulté de réaliser une numérisation parfaite, ou à cause de la complexité de la carte, la phase d'extraction peut être extrêmement délicate à paramétrer, voir quasi impossible à réaliser

5.3.1.1. segmentation des cartes topographiques (segmentation couleur)

Généralement on traite les images couleurs RGB 24 bits issues de la numérisation de cartes topographiques. L'espace ou le modèle de couleur RGB est le plus employé pour décrire les images numériques, car il est utilisé pour l'affichage des écrans.

Pour réaliser l'extraction des courbes nous effectuons une segmentation couleur-pixels de l'image par seuillage. On ne conserve que les pixels dont la couleur appartient à un intervalle fixé correspondant à la plage de couleur des courbes de niveau. Cependant le modèle de couleur utilisé pour effectuer la discrimination est essentiel.

- **Classification colorimétrique**

La technique de classification la plus simple est le seuillage. Un seuillage consiste à effectuer un classement binaire des pixels en fonction d'une ou plusieurs valeurs de leurs composantes colorimétriques. Le seuil peut être déterminé automatiquement par analyse de l'histogramme ou manuellement en sélectionnant une plage de couleur représentative de l'objet cartographique à extraire, dans notre cas on s'intéresse à la méthode qui sélectionne uniquement les pixels constituant les courbes de niveau caractérisés par une teinte (les composantes colorimétriques) avec un simple seuillage [15].

- **Traitement avec les outils de la morphologie mathématiques**

Une fois l'image est segmentée et les courbes de niveau sont binarisées, on obtient une image dont on garde que les pixels des objets d'intérêt, c'est-à-dire appartenant à une courbe de niveau, et en négligeant ceux du fond (toute information hors les courbes de niveau). Il convient alors généralement d'appliquer différents algorithmes de traitement d'image tels que les opérations de la morphologie mathématique. D'abord il faut analyser l'image en supprimant les barbulles ou points isolés reconnus à tort comme faisant partie d'une courbe mais qui sont en réalité que du bruit, pour en faire une multitude de techniques peuvent être appliquées, le plus souvent on utilise le filtrage. D'autre part, il arrive également que les courbes obtenues ne soient pas uniformes et que des pixels ont été enlevés par faute de leurs considération comme étant faisant partie du fond alors qu'ils se trouvaient en réalité sur une courbe, donc on aura une perte d'information, pour corriger ce genre de problème on effectue l'opération de fermeture morphologique qui est une délimitation suivie d'une érosion des objets.

5.3.2. Reconstruction des courbes de niveau

Dans la phase précédente où on a extrait les courbes de niveau, on a abouti à des résultats confus et incomplets, dans cette phase on va essayer de corriger ces problèmes concernant les courbes afin de les préparer pour les traitements qui s'en suivent (Cotation ou Etiquetage, Interpolation).

D'abord on doit squelettiser les courbes de niveau afin de leur donner une épaisseur de 1 pixel dont le but, est de faciliter leurs traitements. Puis, on cherche à reconnecter les morceaux de courbes de niveau qui se trouvent isolés soit à la suite d'une erreur dans la phase de segmentation (mauvais choix d'un seuil par exemple), soit du fait de leur non-connexité dans la carte originale à cause d'un objet superposé [16].

Dans tous les cas, cette reconnexion est nécessaire pour faciliter la phase d'affectation des altitudes et pour ne pas perdre de la précision, voire entraîner des erreurs lors de l'interpolation du MNT.

5.3.2.1. Squelettisation des courbes de niveau

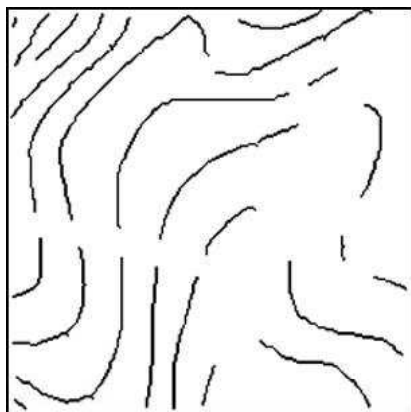
La squelettisation consiste à réduire un objet discret en un ensemble de segments discrets d'épaisseur égale à 1 pixel appelé squelette ou axe médian et centré dans la forme d'origine. Il existe différentes algorithmes qui réalisent cette transformation, par exemple la technique basée sur l'amincissement successif par filtres de morphologie mathématique du type transformation de voisinage qui se résume en un processus d'érosion des objets qui en préserve la connexité (propriétés topologiques).

5.3.2.2. Reconstruction des lignes interrompues

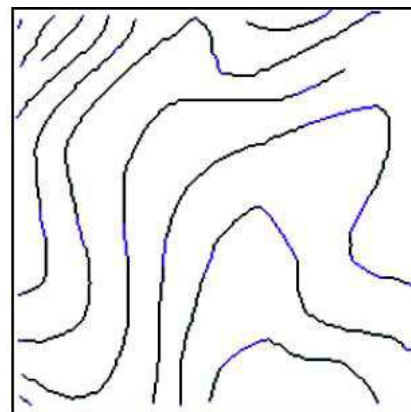
Le but de cette partie est de pouvoir connecter les extrémités des lignes interrompues durant l'extraction des courbes de niveau, donc le grand challenge ici est de chercher à déterminer quelles paires d'extrémités devraient être connectées ensemble, puis les reconnecter.

On peut citer quelques techniques de reconstruction :

- 1) Approches basées image ;
- 2) Approches géométriques ;
- 3) Approches par champ d'orientation ;



Courbes de niveau interrompues.



Après la reconstruction.

Figure 5.7: Reconstruction des lignes des courbes de niveau.

5.3.3. Cotation (Etiquetage) des courbes de niveau

Après la finalisation de l'étape de la reconstruction des courbes, on doit affecter des altitudes à ces courbes, afin de pouvoir satisfaire l'étape d'interpolation.

Le logiciel Idrisi possède toutes les techniques et outils d'affectation de l'altitude pour des courbes de niveau en format raster et obtenir en suite des courbes en format vecteur. Beaucoup d'autres logiciels comme AutoDEM [16] tentent de rendre cette opération automatique afin de minimiser ou encore supprimer le nombre d'intervention de l'opérateur.

Mais le problème principal d'une approche automatique est d'effectuer la cotation des autres courbes à partir de la cotation de quelques courbes particulières. Dans la mesure où le pas entre chaque courbe varie entre plus ou moins un certain pas fixé pour une carte donnée, l'opération peut sembler aisée. En réalité de nombreux cas ambigus peuvent survenir si les courbes initialement cotées ne sont pas bien choisies.

5.3.4. Interpolation du MNT

L'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à estimer la valeur d'un attribut (altitude) inconnu en partant d'autres connus. L'interpolation d'un MNT se fait généralement à base d'une fonction d'interpolation destinée à évaluer et estimer les points d'altitudes inconnues à partir des contraintes initiales (courbes de niveau ou points cotés).

Dans le contexte de notre projet, on utilise l'interpolation pour mettre en œuvre des algorithmes mathématiques afin d'estimer l'altitude des espaces situés entre les courbes de niveau. Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation parmi lesquels il faut faire un choix. Plusieurs sources de

données permettant la construction de modèles numériques de terrain. Les données les plus courantes sont issues généralement de courbes de niveau ou de corrélation à partir d'images satellitaires ou aériennes.

Si cette méthode de construction de MNT se généralise de plus en plus, grâce au nombre croissant de cartes-papier peu chères, à différentes échelles, et intégrant une représentation des courbes de niveau. Pour construire un MNT, représentant une surface continue, à partir de ces données, il est nécessaire d'interpoler la surface du terrain.

Il existe une distinction entre méthodes d'interpolation exacte (les données en entrée restent les mêmes après l'interpolation) et méthode d'interpolation non exactes (les données en entrée sont modifiées par la méthode d'interpolation).

5.4. Conclusion partielle

Dans ce chapitre on constate que les Modèles Numériques de Terrains se présentent sous différentes formes selon les moyens utilisés pour l'acquisition des données de base et pour les manipuler. Donc les données nécessaires à la fabrication du MNT peuvent être de sources diverses. Il existe en effet de nombreuses manières de mesurer l'altitude, mais celles-ci sont plus ou moins bien adaptées au but recherché. Dans notre cas on a présenté deux techniques différentes, la première technique se repose sur l'imagerie stéréoscopique issue des satellites pour l'observation de la terre (SPOT), dont la précision du produit final dépend de plusieurs facteurs, on peut citer la résolution du capteur, la différence angulaire de prise de vue entre les deux images du couple, la proximité radiométrique des deux images etc. La deuxième technique est encore très employée, consiste à interpoler les courbes de niveau issues des cartes topographiques numérisées, cette méthode est précise mais aussi très lente.

Chapitre 6:

Evaluation du MNT.

6.1. Introduction

Les courbes de niveau sont longuement utilisées pour l'étude et la modélisation du terrain, mais l'inconvénient majeur qui accompagne cette représentation concerne l'absence de l'information (altitude) dans les zones situant entre les courbes, en plus, ce problème sera amplifié si la distance qui les sépare est importante et ça nous ne permet pas d'avoir une meilleure description du relief. De ce fait le besoin d'utiliser un fichier d'altitudes continues est paru, mais il est difficile voire impossible de mesurer l'altitude de tous les points de la zone d'étude, alors la raisonnable solution est d'estimer les valeurs manquantes à partir de celles disponibles et ça s'appelle interpolation. On applique une méthode d'interpolation suivant le format du MNT et les résultats recherchés, donc il est judicieux de choisir un format adéquat et une technique d'interpolation appropriée pour le type du terrain à étudier.

6.2. Les différentes techniques d'interpolation

L'interpolation spatiale est une procédure qui consiste à estimer la valeur d'un attribut inconnu en partant d'autres connus. Dans le contexte de notre projet, on utilise l'interpolation spatiale pour mettre en œuvre des algorithmes mathématiques afin d'estimer l'altitude des espaces situés entre les courbes de niveau. Il existe de nombreuses méthodes d'interpolation parmi lesquels il faut faire un choix. Nous distinguons deux familles:

- **Famille 1:** Les méthodes d'interpolation classiques basées sur des algorithmes déterministes.
- **Famille 2:** Les méthodes d'estimation géostatistiques qui s'appuient sur une modélisation probabiliste du phénomène étudié.

6.2.1. Famille 1 : méthodes déterministes (locales)

6.2.1.1. Polygone de Thiessen

L'interpolation par la méthode de Thiessen consiste à affecter à l'ensemble des points d'un polygone donné la valeur de la variable régionalisée correspondante (on parle aussi de plus proche voisin) [20]. On obtient alors une surface discontinue; ces discontinuités n'ont rien à voir avec de possibles discontinuités réelles, mais sont simplement liées à la configuration géométrique des observations. On trouve dans la littérature, différentes méthodes pour pallier ce problème de discontinuités.

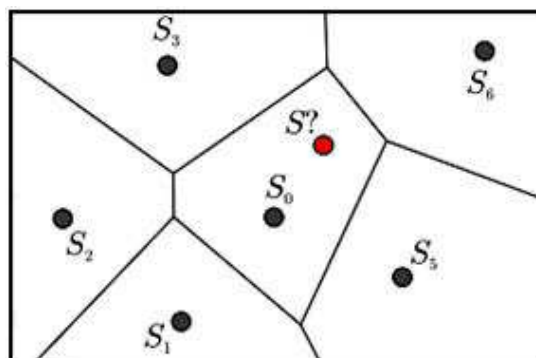


Figure 6.1: Interpolation par la méthode du Thiessen.

6.2.1.2. Les méthodes de triangulation

La triangulation consiste à diviser la surface en triangles disjoints dont les sommets sont les sites d'observation. On calcule alors la valeur en un point donné à partir des valeurs des sommets du triangle auquel il appartient.

La méthode par triangulation est basée sur l'idée qui consiste à n'utiliser que les points voisins du nœud considéré. Quand plus de trois points sont utilisés des problèmes de continuité de la surface résultante peuvent apparaître. Ils sont alors corrigés par l'utilisation d'une méthode de lissage appropriée. Lorsque trois points seulement sont utilisés, la méthode consiste à définir un maillage triangulaire sur la surface étudiée, les points de mesure étant les sommets des triangles. Des interpolations linéaires peuvent ainsi être calculées à l'intérieur de chaque facette triangulaire. Le modèle de terrain obtenu est assez proche de la réalité si le nombre de points de mesure est suffisant. Si nécessaire, les effets de " facettes " peuvent être atténués par un lissage.

Principe

À partir d'un nuage de points quelconque, il est possible de définir un grand nombre de maillages différents.

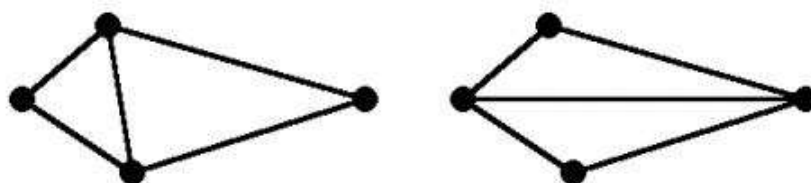


Figure 6.2: Il existe deux maillages possibles pour quatre points de données.

a) Triangulation de Delaunay

L'objectif étant d'approximer l'altitude de nœuds qui se situent dans les triangles, il est souhaitable de choisir une triangulation qui minimise la "longueur" des facettes. Autrement dit, l'interpolation sera d'autant plus réaliste que les formes des facettes se rapprochent du triangle équilatéral. Ce critère est vérifié par la triangulation de Delaunay qui a la propriété de maximiser le plus petit angle de tous les triangles du maillage. Donc, il faut que le cercle circonscrit à chaque triangle ne contienne pas d'autres points de la grille, la figure suivante explique ce principe:

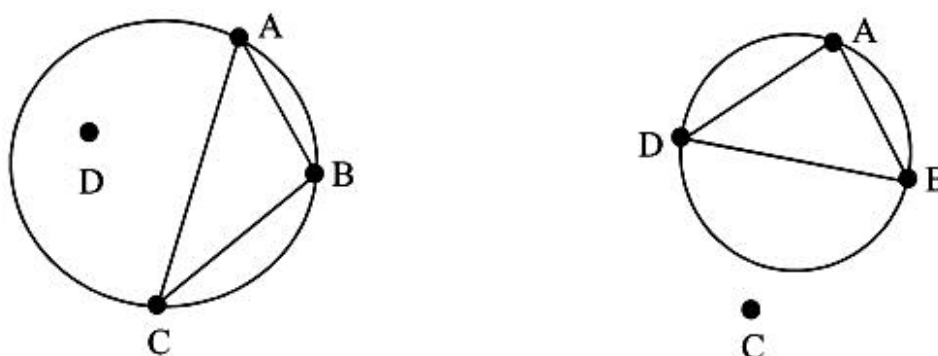


Figure 6.3: Principe de la triangulation de Delaunay (ABC ne respecte pas la contrainte de Delaunay, ABD le respecte).

Cette triangulation particulière peut être réalisée très facilement en utilisant son "duel" mathématique appelé diagramme de Voronoï ou encore tessellation de Dirichlet.

Remarque: On utilise le même principe pour la création du diagramme de Voronoï et la tessellation de Dirichlet.

b) La triangulation de Delaunay avec tessellation de Dirichlet

La figure suivante montre la tessellation de Dirichlet et la triangulation de Delaunay associée pour un nuage de 15 points.

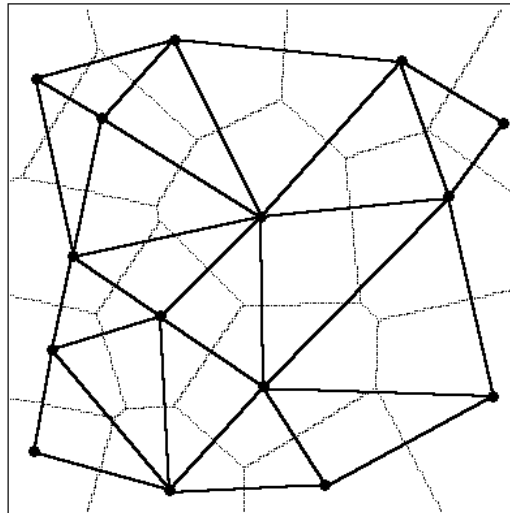


Figure 6.4: Tessellation de Dirichlet et triangulation de Delaunay pour un nuage de 15 points.

La tessellation de Dirichlet consiste en un découpage de l'espace en régions définies autour des points de données. Chaque point du plan est rattaché à la région associée au point de données le plus proche. Deux points de données sont reliés par un segment dans la triangulation de Delaunay, quand leur région respective dans la tessellation de Dirichlet a une frontière commune.

c) La triangulation de Delaunay avec le diagramme de Voronoï

Le diagramme de Voronoï est très utilisé pour construire la triangulation de Delaunay. Ce diagramme consiste à décomposer l'espace en zones d'influence. La zone d'influence d'un point S_i rassemble tous les points plus proches de S_i que des autres points connus. La triangulation de Delaunay s'obtient en joignant les points ayant une arête commune dans le diagramme de Voronoï:

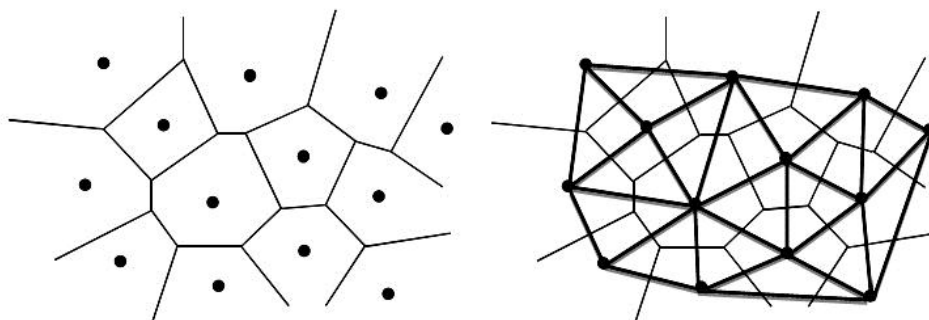


Figure 6.5: Diagramme de Voronoï (gauche) et triangulation de Delaunay (droite).

Suite à la triangulation, l'interpolation s'effectue de différentes manières telle que l'interpolation linéaire.

d) Interpolation

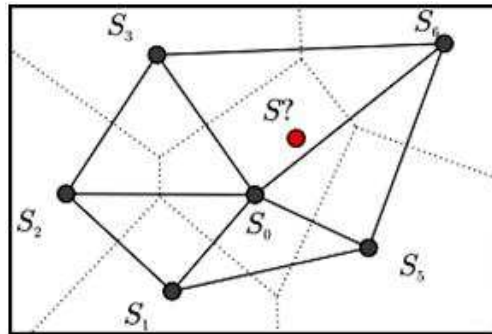


Figure 6.6: Interpolation à base de la triangulation de Delaunay.

Cette phase est la plus rapide. Pour chaque nœud de la grille, on recherche la facette (triangle) d'appartenance, puis l'altitude calculée grâce à l'estimateur choisit, par exemple l'interpolation linéaire, qu'on va définir par la suite. Si aucune facette n'est trouvée (nœud hors maillage) une constante est affectée à l'altitude du nœud.

e) Discussion de la méthode

Cette technique est extrêmement rapide et simple à mettre en œuvre mais souffre de plusieurs défauts. Le principal problème est que des triangles "plats" (i.e. dont les vertex ont tous les 3 la même altitude) peuvent apparaître si les 3 points utilisés sont issus de la même courbe de niveau (toujours le cas lors de la triangulation des courbes de niveau les plus élevées). Le second problème est que si les échantillons sont trop espacés, la triangulation obtenue peut être trop grossière pour être exploitée aussi bien en terme de visualisation qu'en terme d'analyse topographique.

Il existe plusieurs méthodes pour l'interpolation de données à partir d'une triangulation. Ici, on expose l'interpolation linéaire.

6.2.1.2.1. Interpolation linéaire

Supposons que le point S à estimer se trouve à l'intérieur du triangle formé par les sites S_1 , S_2 , S_3 . L'estimation de la valeur de la variable régionalisée au point S par interpolation linéaire s'écrit :

$$Z(S) = \frac{|S_1 S S_2| Z(S_3) + |S_1 S S_3| Z(S_2) + |S_2 S S_3| Z(S_1)}{|S_1 S_2 S_3|} \quad (6.1)$$

Avec :

- $|S_1 S S_2|$: la surface du triangle formé par les points: S_1 , S et S_2 .
- S : le point à estimer.
- $Z(s)$: la valeur estimée pour le point S .
- Z la fonction qui associe l'altitude à un point S de la surface.

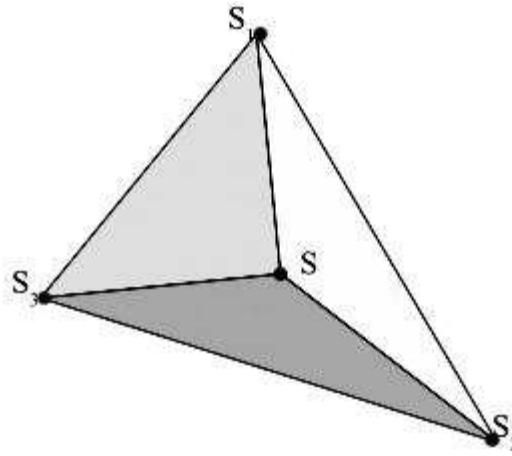


Figure 6.7: Interpolation linéaire.

On peut exprimer l'interpolation de la façon matricielle suivante:

$$Z(S) = \alpha \cdot x + \beta \cdot y + \gamma \quad (6.2)$$

La solution est déterminée à partir d'une combinaison linéaire des valeurs observées aux sommets du triangle en résolvant le système:

$$Z(S_1) = Z_1 = \alpha \cdot x_1 + \beta \cdot y_1 + \gamma$$

$$Z(S_2) = Z_2 = \alpha \cdot x_2 + \beta \cdot y_2 + \gamma$$

$$Z(S_3) = Z_3 = \alpha \cdot x_3 + \beta \cdot y_3 + \gamma$$

L'équation matricielle s'écrit sous la forme suivante:

$$\begin{pmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_1 \\ Z_2 \\ Z_3 \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

- **Caractéristiques de l'interpolation linéaire**

Plus le point auquel on souhaite estimer la valeur est proche de l'un des sommets du triangle, plus la proportion de surface occupée par le triangle opposé à ce sommet est importante; le poids associé est donc plus important et la valeur estimée proche de celle du sommet. Autrement dit plus le point recherché est proche d'un site d'observation plus la valeur affectée à ce point sera proche de la valeur observée en ce site

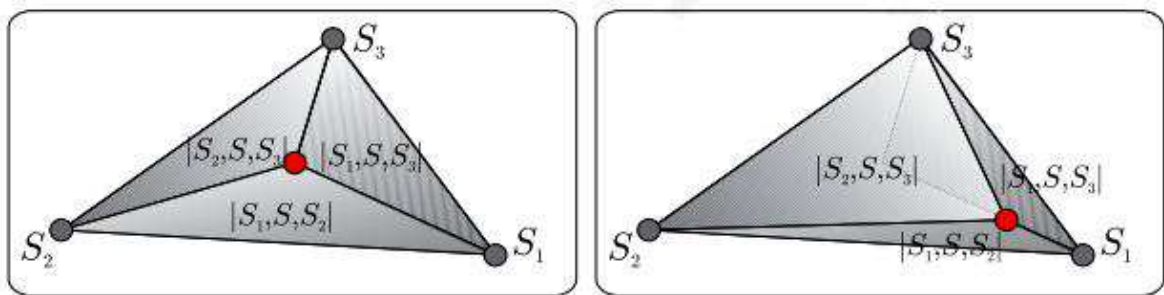


Figure 6.8: Caractéristiques de l'interpolation linéaire.

- l'estimation en S est unique;
- l'estimation est exacte (elle est à base d'une équation mathématique);
- la triangulation ne permet pas d'extrapoler les valeurs au-delà de l'enveloppe convexe des sites d'observation (les points S_1, S_2 et S_3).
- La surface obtenue est continue.

6.2.1.3. Méthodes barycentriques

Les méthodes d'interpolations précédentes ne considèrent, pour estimer la valeur d'un site S , que les sites d'observation immédiatement voisins. Elles ignorent par conséquent une grande partie de l'information disponible. Les méthodes barycentriques permettent de prendre en compte un nombre plus important de données.

6.2.1.3.1. Inverse des distances (IDW)

La technique de l'inverse pondéré de la distance (en anglais Inverse Distance Weighted ou IDW) introduit une méthode simple pour interpoler une fonction 2D à partir d'un ensemble de points irrégulièrement espacés. Cette méthode se base sur une combinaison linéaire des valeurs des points connus en utilisant le principe que l'influence relative d'un point diminue avec la distance de l'endroit où l'on effectue l'observation de la même variable, autrement dit, elle consiste à attribuer un poids inversement proportionnel à la distance entre les sites et le point à estimer.

La première étape est d'effectuer une recherche des sites qui vont intervenir dans l'estimation. En fixant un rayon de recherche dont le centre est la localisation de la valeur à estimer. On ne retiendra que les sites S_i appartenant au cercle.

Dans un deuxième temps on attribue à chaque site S_i retenu un poids (p) inversement proportionnel à la distance entre ce site et le point à estimer S .

Considérons que l'on a retenu n données dans le cercle alors on obtient comme estimateur l'équation suivante:

$$Z(S) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{z(S_i)}{|S_i - S|^p}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{|S_i - S|^p}} \quad (6.4)$$

Cette méthode fonctionne aussi bien avec des points cotés que des courbes de niveau.

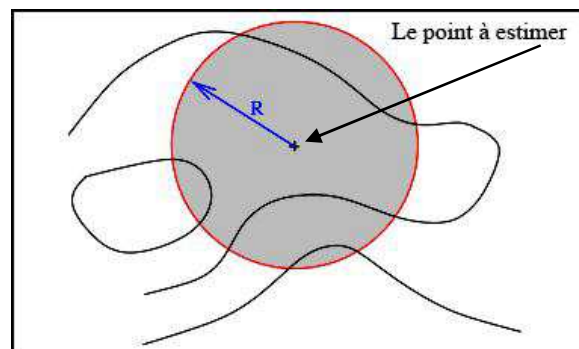


Figure 6.9: IDW basée sur la recherche dans un voisinage dans le rayon R .

Pour être moins dépendant d'un paramètre de rayon, une autre technique propose de détecter les points les plus proches pouvant être détectés en lançant des rayons dans différentes directions (entre 4 à 64 directions) autour du point d'intérêt (le point à estimer) :

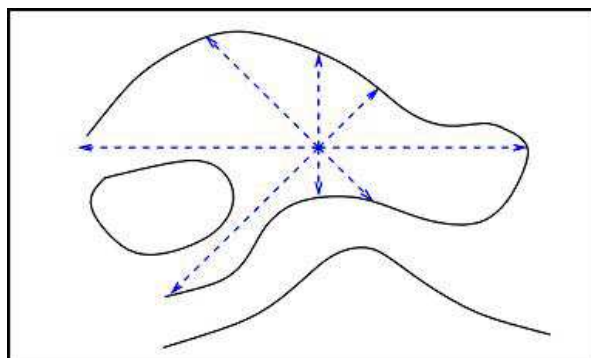


Figure 6 .10: IDW basée sur la recherche dans 8 directions.

Pour l'interpolation de courbes de niveau, la première méthode ne donne pas de très bons résultats de par la difficulté de fixer le paramètre de rayon. Si le rayon est trop petit, des zones de plateaux (zones plates) sont générées, si le rayon est trop large, l'algorithme sera compliqué.

La seconde méthode est plus précise si un grand nombre de rayons est envoyé. Cependant, dans de nombreux cas, des zones plates peuvent être générées : par exemple dans une courbe n'en englobant pas une autre.

- **Discussion de la méthode**

Cette méthode d'interpolation est exacte, rapide, simple à implémenter et fournit une surface continue. Les valeurs interpolées sont limitées par les valeurs minimale et maximale du champ d'observation, la pondération étant positive. (L'opérateur peut donc intervenir au choix des points à interpoler en fixant le rayon par exemple). Encore, cette méthode est pratique pour estimer en temps réel l'altitude d'un point sélectionné par le pointeur souris dans une application SIG. Cependant elle présente quelques inconvénients. Elle est indifférente à la configuration géométrique des observations, seule la distance compte. Elle prend en compte uniquement la distance qui sépare les sites entre eux. Cela donne un poids important au groupement de données, alors qu'il n'est pas nécessairement justifié.

6.2.1.3.2. Interpolation des plus proches voisins

Cette méthode d'interpolation est la plus simple. Elle consiste à calculer l'altitude d'un point en se basant sur les points les plus proches et en utilisant différentes fonctions de calcul [21]. Ces fonctions dépendent du nombre des points utilisés. En effet, si on considère le seul point le plus proche, la valeur du point à interpoler correspond à celle du point voisin. Si on considère les deux points les plus proches, la valeur du point à interpoler correspond au résultat de l'interpolation linéaire de ces deux points.

Cette méthode est la plus rapide et simple à implémenter, mais elle présente une faible précision, en particulier dans les zones de fortes variations du relief.

6.2.1.3.3. Interpolation bilinéaire

L'interpolation bilinéaire nécessite un échantillonnage régulier des sites d'observation. On cherche les quatre points entourant le point d'intérêt. On effectue alors une interpolation à l'aide de l'inverse des distances. L'interpolation est exacte et restitue une surface continue. Les calculs sont rapides.

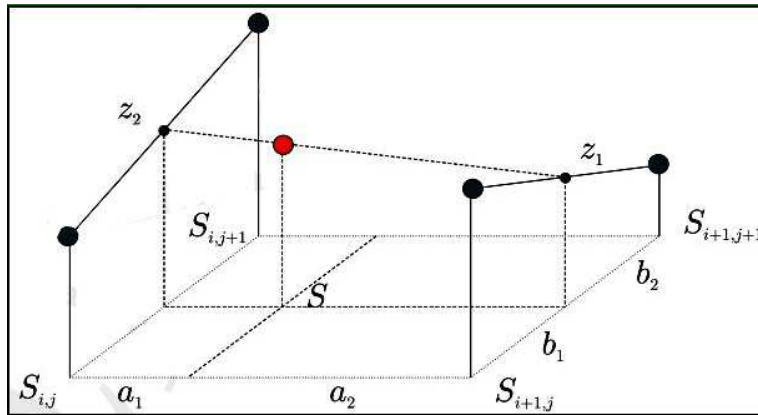


Figure 6.11: Interpolation bilinéaire.

Le terme bilinéaire signifie que la fonction est linéaire suivant les deux axes de coordonnées mais l'interpolation elle-même n'est pas linéaire. En se basant sur la figure 6.11 on peut constater qu'elle consiste à interpoler linéairement dans la première direction, ensuite dans la seconde direction. La valeur du point S est donnée par l'équation suivante :

$$Z(S) = \frac{a_1 Z_1 + a_2 Z_2}{a_1 + a_2} \quad (6.5)$$

Avec :

$$Z_1 = \frac{b_1 Z_{i+1,j+1} + b_2 Z_{i,j+1}}{b_1 + b_2} \quad (6.6)$$

$$Z_2 = \frac{b_1 Z_{i+1,j} + b_2 Z_{i,j}}{b_1 + b_2} \quad (6.7)$$

Cette méthode nécessite un échantillonnage régulier des sites d'observation, ce qui la rend inutilisable dans la majorité des cas.

6.2.1.4. Discussion des méthodes déterministes

Les méthodes déterministes ont la caractéristique de traiter uniquement les données étudiées. Toutes définissent la valeur recherchée en un point comme une combinaison linéaire pondérée des mesures disponibles. Ce sont des méthodes implémentées dans la plus part des logiciels de Système d'Information Géographique (SIG). Ces techniques présentent néanmoins des défauts. Elles ignorent la structure spatiale de la variable et produisent du coup des surfaces interpolées très lisses. Des situations locales très spécifiques peuvent alors être omises (zones de fortes ou de très faibles valeurs). Nous prenons le risque d'aboutir à des cartes peu réalistes. Enfin, aucun critère statistique pour juger de la précision de ces cartes n'est formulé. Si l'on veut optimiser la précision des estimations, il faudra utiliser d'autres outils qui feront appel à des modèles probabilistes. La géostatistique et le Krieger en font partie.

6.2.2. Famille 2 : Méthodes stochastiques

La géostatistique (interpolation stochastique) utilise également une combinaison linéaire des données observées, mais à la différence des méthodes déterministes d'interpolation, elle tient compte à la fois de l'information relative à leur position et du caractère aléatoire du phénomène étudié.

Alors on s'intéresse désormais à l'utilisation de modèles probabilistes pour la description du comportement de la variable régionalisée (on définit une variable régionalisée comme étant une fonction numérique prenant ses valeurs dans une région limitée). L'utilisation de telles méthodes doit nous permettre également d'évaluer la précision d'une estimation. On utilise à la fois les valeurs observées et l'information de position pour améliorer l'estimation dans le contexte spatial. On utilise donc un modèle probabiliste pour décrire le phénomène naturel à l'aide d'un processus aléatoire.

6.2.2.1. la fonction aléatoire

Le concept de fonction aléatoire fournit des outils permettant d'analyser le caractère à la fois incertain (confus) et structuré (par exemple zones plus riches que d'autres) d'un phénomène, permettant ultérieurement d'estimer les valeurs en des sites inconnus. La fonction aléatoire permet de prendre en compte le fait que la variable régionalisée peut prendre des valeurs très erratiques (inconstantes, difficiles à prédire, ne sont pas fixes).

Soit $z(s)$ la valeur prise par la variable régionalisée z au site s . On l'interprète comme une réalisation d'une variable aléatoire $Z(s)$ définie en s . On appelle alors fonction aléatoire (aussi appelée processus aléatoire ou processus stochastique) la famille des variables aléatoires $\{Z(s) / s \in D\}$.

Chaque valeur $z(s)$ de la variable régionalisée z est donc interprétée comme une réalisation de la variable aléatoire $Z(s)$ définie en s .

La fonction aléatoire représente l'ensemble des variables aléatoires qui interprète la variable régionalisée. La fonction aléatoire se réalise donc à base de la variable régionalisée.

Avec:

- z : la variable régionalisée (fonction numérique).
- s : le site d'observation.
- $z(s)$: une valeur prise par la variable régionalisée z au point s .
- D : domaine sur lequel la variable régionalisée est définie.
- h : la distance qui sépare deux points
- $Z(s)$ variable aléatoire.

6.2.2.2. Le Variogramme

Deux observations situées l'une près de l'autre devraient en moyenne se ressembler davantage que deux observations éloignées. La différence entre les valeurs prises par deux variables aléatoires est $Z(s)-Z(s+h)$. C'est également une variable aléatoire dont on peut calculer la variance. Cette variance devrait être plus petite lorsque les points sont rapprochés (les valeurs se ressemblent plus en moyenne) et plus grande lorsque les points sont éloignés. On appelle variogramme la demi-variance de cette différence:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \text{var} (z(s+h) - z(s)) \quad (6.8)$$

Le variogramme mesure la « variabilité spatiale », c'est-à-dire la dissemblance entre les valeurs en fonction de leurs séparations.

Remarques

- Un variogramme peut se calculer non seulement pour une distance donnée mais aussi pour direction θ donnée : $\gamma_{\theta}(h)$
- La covariance mesure la ressemblance entre les valeurs en fonction de leur éloignement alors que le variogramme mesure la dissemblance entre les valeurs en fonction de leur éloignement.

6.2.2.3. Propriétés du variogramme

Le variogramme est une fonction de h , croissante et souvent caractérisé par trois paramètres:

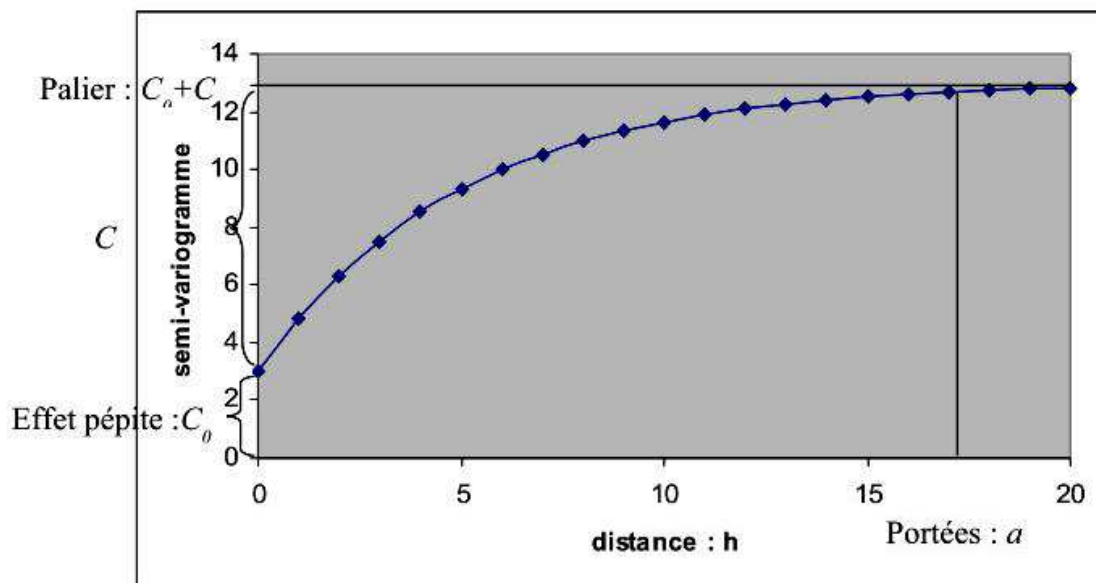


Figure 6.12: Le Variogramme.

Remarque : plus la fonction croît, moins les observations se ressemblent.

L'effet de pépité: Le comportement à l'origine du variogramme reflète le degré de régularité spatiale de la variable régionalisée. Si le variogramme présente un saut brusque à l'origine (effet de pépité), cela indique une absence partielle de corrélation entre les valeurs prises en deux sites très proches. C'est-à-dire qu'il y a une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines.

La portée (a): Distance où deux observations ne se ressemblent plus du tout. Leur covariance est nulle.

Le palier : Valeur du variogramme pour la distance égale à la portée (a).

Après avoir modélisé le variogramme, ce dernier peut être utilisé dans une procédure de «Krigage» afin d'estimer les valeurs des point non mesurés.

6.2.2.4. La méthode de krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation géostatistique applicable à des données spatiales. Elle s'appuie sur le variogramme.

Nous cherchons à estimer la valeur d'une variable régionalisée z en un point s quelconque du domaine D à partir des mesures observées $z(s_i)$ dans ce domaine, $i=1, \dots, n$ (n : nombre de points observés). Les poids de ces observations (données) sont pondérés suivant leur distance, valeur, corrélation (dissemblance) et structure.

Le krigeage est un interpolateur optimal (il minimise l'erreur d'estimation).

Le krigeage est un interpolateur linéaire sans biais. Il prend en compte la géométrie des données, les caractéristiques de la régionalisation et de la variance. Son but est de lisser les données [22].

6.2.2.5. Discussion de la méthode

La méthode de krigeage est précédée par l'estimation d'une fonction variographique. C'est cette fonction qui va tenir compte à la fois de la géométrie des données, des caractéristiques de la régionalisation et de la précision de l'estimation. Il est donc important de souligner que la qualité de l'estimation et l'appréciation de sa précision reposent uniquement sur le modèle variographique utilisé. Il doit par conséquent, être le plus cohérent possible avec ce qui a été observé.

6.2.3. Discussion des deux familles d'interpolation

Nous avons abordé deux types de méthodes pour la résolution des problèmes d'interpolation spatiale :

- **Les méthodes déterministes locales:** elles sont basées sur des propriétés purement géométriques de l'échantillon d'observation et ne permettent pas une évaluation de leur précision. Il est de plus généralement difficile de conclure quant à la fiabilité globale d'une technique déterministe.
- **Les méthodes stochastiques:** elles font appel à un modèle censé mieux s'adapter aux données observées. Ce modèle permet l'estimation de la variable en des sites non échantillonnés après l'étude de la distribution spatiale (variogramme) de la variable.

Nous venons de voir quelques méthodes d'interpolations et il existe encore un grand nombre. Il est difficile de préconiser une méthode plutôt qu'une autre. C'est pourquoi il est conseillé d'utiliser systématiquement la validation croisée qui donne les moyens de comparer les diverses méthodes. Les techniques déterministes ont l'avantage de pouvoir être automatisé, mais à l'inverse du krigeage (méthode stochastique), elles ne prennent pas en compte la structure spatiale du phénomène étudié. Leur but est avant tout d'aboutir à une carte esthétique des valeurs estimées en produisant des surfaces à aspect très lisse.

6.3. Type d'échantillonnage et codage des altitudes

6.3.1. Forme de la maille

Le nuage de points tridimensionnels obtenu n'est pas régulier et contient des trous. Ainsi, il faut le ré-échantillonner et utiliser une méthode d'interpolation pour avoir le maillage souhaité. De plus, il faut choisir la forme et la taille de la maille du MNT. Il existe plusieurs structures de maillage dont chacune a des particularités quant à la représentation du terrain:

6.3.1.1. Echantillonnage régulier

Cet échantillonnage correspond à une grille régulière, dont la maille a une certaine forme, que ce soit carrée, rectangulaire, triangulaire ou hexagonale. Cet échantillonnage a plusieurs avantages qui sont la simplicité du stockage, la présence implicite des coordonnées planimétriques et la visualisation directe sous forme d'image.

6.3.1.2. Echantillonnage semi-régulier

Il consiste en une grille régulière avec sélection des points utiles. Un exemple très fréquent de cet échantillonnage est celui composite. Il est composé de deux types d'échantillonnage, sélectif et progressif. L'échantillonnage sélectif consiste à sélectionner les lignes importantes à la modélisation du terrain comme les lignes de crête, celles de talweg. Ensuite, l'échantillonnage progressif consiste à fractionner d'une manière itérative les facettes jusqu'à ce que la courbure interne devienne inférieure à un certain seuil.

6.3.1.3. Echantillonnage irrégulier

C'est un échantillonnage où la maille n'est pas de forme constante. Il permet d'avoir une adaptation totale au relief du fait que les mailles de la grille ont des formes et des tailles différentes. L'exemple le plus employé de ce type d'échantillonnage est le TIN, réseau irrégulier de triangles dont les points connus sont les sommets des triangles. Pour construire les triangles, on utilise généralement l'algorithme de triangulation de Delaunay

6.3.2. Choix de la taille de maille en fonction de l'échelle de cartographie

D'une manière générale, chaque application exige une échelle adaptée afin d'avoir les détails répondant à ses besoins. Par définition, la superficie lisible minimale d'une carte correspond au plus petit objet discernable sur cette carte. On suppose que la superficie minimale lisible sur une carte en papier est de 1×1 mm (c'est-à-dire $L = 1$ mm). Puisque l'échelle est définie comme étant le rapport entre la dimension de la carte et celle du terrain, la valeur de la superficie lisible minimale au sol dépend de l'échelle utilisée comme le montre la figure suivante (Figure 6.13):

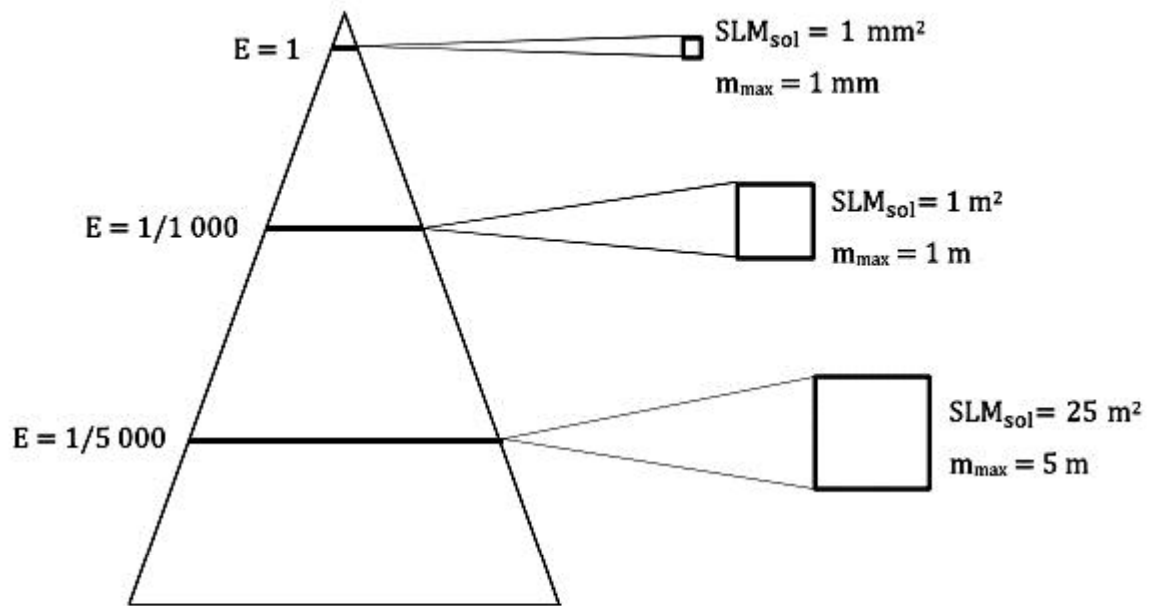


Figure 6.13: Surface lisible minimale (SLM) au sol et taille de maille maximale (m_{max}) selon différente échelle (E).

On peut se demander quelle est la taille de maille du MNT à produire en fonction de l'échelle de la carte à produire pour une application donnée. Considérons qu'on a un MNT ayant une maille carrée ($m \times m$) et que le plus petit objet discernable de la carte est aussi carré ($L \times L$). Pour pouvoir créer une carte il faut avoir des données ayant une résolution spatiale au sol plus élevée ou égale à celle de la carte à générer. Ainsi, la taille de la maille du MNT a pour valeur maximale :

$$m_{max} = L/E \quad (6.9)$$

La taille de maille maximale représente la limite au-dessus de laquelle le MNT ne sera pas utile pour une application donnée.

Si on prend le troisième exemple de la figure 6.13, on a $E=1/(5000 \text{ m})$, $L=1\text{mm}=1 \times 10^{-3}\text{m}$.

$$m_{max} = L/E = 1 \times 10^{-3} / (1/5 \times 10^3) = 10^{-3} \times 5 \times 10^3 = 5 \text{ m}.$$

Alors un objet qui occupe $5\text{m} \times 5\text{m}$ (25 m^2) de surface au maximum dans la réalité on le représente sur une maille de $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ (L) dans la carte suivant l'échelle de $1/5000$.

6.3.3. Codage des altitudes

Les altitudes dans un MNT sont codées numériquement en octets. Le nombre d'octets est fixé en fonction de recommandations telles que la précision numérique requise. Ainsi, si les données sont entières, deux octets (16 bits) peuvent suffire pour les stocker et si ces données sont réelles, il faut un nombre plus élevé d'octets (4 octets= 32 bits). Par exemple, sur un octet, $2^8 = 256$ niveaux peuvent être utilisés pour coder l'altitude. Sur 2 octets ce nombre s'élève à $2^{16} = 65536$ niveaux. Si le terrain a une altitude maximale de 6553 m, pour stocker toutes les altitudes avec un octet, chaque niveau doit représenter un domaine d'altitudes de 26 m ($\frac{6553}{8}$). Avec 2 octets, ces

domaines seront de l'ordre de 10 cm ($\frac{6553}{65536}$). Dans ce cas, le stockage des données sur un octet déforme fortement la morphologie du MNT. En effet, on aura des formes en marche d'escalier. Ainsi, ce paramètre fait aussi partie des facteurs qui influencent la qualité de la représentation morphologique du terrain.

6.4. Les éléments influençant la qualité du MNT

De nombreux phénomènes influencent la qualité des MNT et par conséquent la qualité des informations que l'on peut tirer de ces produits. La précision des données utilisées dans l'élaboration d'un MNT est évidemment très importante pour obtenir un modèle de qualité. Plus cette précision sera élevée, plus le modèle construit aura des chances d'être proche de la réalité. Excepté la précision des échantillons de départ, de nombreux autres éléments vont influencer la qualité du MNT et par conséquent l'application finale qu'on veut réaliser.

6.4.1. Influence du Format

6.4.1.1. Le format raster

- **Avantage**

Le passage des coordonnées pixel (ligne i, colonne j) aux coordonnées terrain est très facile à réaliser. Pour cela il suffit de connaître les coordonnées terrain (x_0, y_0) du point qui correspond au premier pixel de la matrice ($i=0$ et $j=0$) et le pas d'échantillonnage (d_x et d_y).

Cette fonction simple de passage, permet un stockage réduit, ce qui rend plus aisée la gestion des MNT raster. Le volume nécessaire pour le stockage d'un MNT raster est égal à :

$V = \text{Nombre de pixel du MNT} * \text{Nombre d'octets par pixel}.$

La discrétisation d'une surface en pixel facilite les analyses de voisinage et le croisement des informations. De ce fait les algorithmes mis en place jusqu'à présent fonctionnent la plupart du temps avec des données raster. Ces algorithmes sont plus simples que ceux des données de type vecteur et les résultats obtenus sont jugés satisfaisant même si ce format entraîne des approximations. Des logiciels ont bien réalisés dans le but de traiter des informations de type vecteur, mais la complexité des algorithmes a dissuadé beaucoup d'entreprise de développer de tels outils et le raster reste le format que l'on rencontrera neuf fois sur dix dans les logiciels SIG.

Malgré ses avantages le format raster possède des inconvénients:

- **Inconvénient**

Le format raster ne s'adapte pas à morphologie du relief (crête, talweg, forte variation de terrain..) pour une zone donnée. Il est possible de choisir une taille de maille (en mètres) comprise entre 0 et l'infini. La taille de la maille est aussi appelée «pas d'échantillonnage» de la grille raster. Sur une zone très plate avec de faibles variations de terrain, une grande taille de maille conviendra parfaitement et il n'y aura pas de problèmes d'adaptation au terrain. À l'opposé, si le terrain comprend de fortes variations de relief, il faut choisir un petit pas d'échantillonnage afin de retranscrire correctement le terrain et de ne pas perdre d'information topographiques. Donc une taille de maille mal choisie peut entraîner deux phénomènes opposés : si la maille est trop grande, il y aura un lissage excessif des formes de terrain et une suppression des plus fortes pentes et si la maille est trop petite, une redondance des informations et parfois même des difficultés de stockage.

6.4.1.2. Les TIN (Format vecteur)

Parmi les différents formats vecteurs utilisés pour modéliser le relief, le Réseau Irrégulier des triangles ou (TIN), est très connu et de plus en plus très utilisé pour la représentation du terrain. Malheureusement, la complexité des algorithmes à mettre en œuvre présente un obstacle important au développement d'outils (logiciels) basés sur ce format.

- **Avantage**

Les TIN permettent de représenter la surface topographique par une succession de facettes triangulaires adjacentes, de formes et de tailles variables construites à partir d'un nuage de points. Ce format permet la plus forte prise en compte de la morphologie du terrain, en choisissant correctement les échantillons de départ, on peut faire en sorte que les triangles s'appuient sur ces points. Donc pour permettre une meilleure triangulation de ces points, On utilise souvent la triangulation de Delaunay et le diagramme de Voronoï. De ce fait les crêtes et les talwegs sont bien représentés et, contrairement au format raster, le phénomène de lissage du terrain ne se produit pas. Les pentes du MNT sont restituées fidèlement.

Les sommets et les fonds de vallées sont placés correctement sur le MNT.

- **Inconvénient**

L'inconvénient le plus important que possède le format TIN est sa complexité, par conséquent, il est difficile à gérer et les opérations effectuées sur ce type de format prennent beaucoup plus de temps que sur un raster.

6.4.2. Influence de l'interpolation

Le choix de l'interpolation est lié au type de la source des données utilisée, la structure finale désirée du MNT et à la fidélité recherchée par rapport à la surface topographique. Il faut noter que le résultat final du MNT dépend essentiellement de la méthode d'interpolation utilisée, on se contentera dans notre étude de présenter les plus utilisées:

Plus proche voisin, IDW et TIN.

6.4.2.1. Influence de l'interpolation IDW

Pour appliquer cette méthode, il faut d'abord fixer le nombre de points à partir desquels sera réalisée l'estimation. Ensuite, cette méthode va attribuer à ces points un poids inversement proportionnel à la distance les séparant du point à estimer. Le nombre de points intervenant dans l'estimation doit être fonction de la densité des données de départ. Donc on prend un nombre important de points si la densité des données de départ est forte et dans le cas contraire, où on a la densité faible et que l'on demande d'estimer l'altitude des nœuds de la grille à partir de plusieurs points, alors des points trop éloignés du site à estimer seront pris en compte et l'altitude interpolée ne sera pas conforme à la réalité, alors on doit limiter le nombre de points dans ce cas.

En faisant varier l'exposant p dans la formule d'estimation IDW (formule 6.4), on obtient une grande gamme de valeurs pour le système de pondération.

Quand p tend vers 0, l'estimation converge vers la moyenne arithmétique des altitudes des points considérés pour l'estimation (moyenne des proches voisins). Quand p tend vers l'infini, l'influence des points proches est très supérieure à celle des points éloignés. En général les valeurs employées pour le paramètre p sont 1 ou 2.

Cette méthode d'interpolation est exacte et fournit une surface continue. Les valeurs interpolées sont limitées par les valeurs minimales et maximales du champ d'observation, la pondération étant positive. Cependant elle présente quelques inconvénients. Elle est indifférente à la configuration géométrique des observations, seule la distance compte. Elle a tendance de donner beaucoup d'importance à l'altitude du point le plus proche, alors que ça n'est pas nécessairement justifié.

Par conséquent cela nous amène à produire des MNT, dont les courbes de niveau sont décalées par rapport à leurs emplacements initiaux. Ainsi la présence des structures en forme « d'œil de bœuf » autour des points qui servent à l'estimation [20]. Dans ce cas on peut observer soit des pics soit des dépressions qui sont deux structures morphologiques que l'on n'a aucune raison de rencontrer autour des points d'observations.

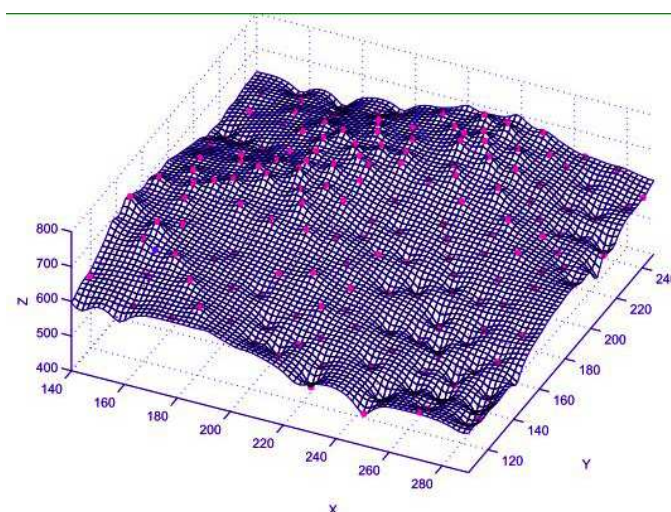


Figure 6.14: Vue 3D d'une interpolation IDW. On peut remarquer les « œil de bœuf » qui se paraient comme des pics et dépressions.

6.4.2.2. Influence de l'interpolation du plus proche voisin

Cette méthode consiste à attribuer la valeur d'altitude du point connu le plus proche au point considéré (le point à interpoler) si on considère qu'un seul point (le plus proche). Si on considère plusieurs points (les plus proches), la valeur du point à interpoler correspond au résultat de l'interpolation linéaire de ces points. Cette méthode est rapide, simple à implémenter et elle permet de garder l'emplacement initial des courbes de niveau, donc les lignes des courbes de niveau ne décalent pas après l'opération de l'interpolation, contrairement à la méthode d'IDW. Mais cette méthode est infidèle et imprécise, en particulier dans les zones à forte variation du relief, car elle engendre des surfaces discontinues. Ces discontinuités n'ont rien avoir avec de possibles discontinuités réelles, mais sont simplement liées à la configuration géométrique des observations. Donc les résultats de cette méthode seront peu esthétiques en raison des nombreuses discontinuités. Si on travaille avec des courbes de niveau très éloignées, l'interpolation du plus proche voisin va produire des surfaces plates causées par l'affectation de la même valeur d'altitude pour plusieurs points inconnus voisins.

6.4.2.3. Influence de l'interpolation TIN

De tels MNT ont pour caractéristique principale de s'appuyer sur un semis de points de mesure disposés de façon irrégulière sous forme de triangles et dont la densité peut augmenter en fonction de la complexité du relief et de la précision recherchée.

- **Avantage**

Précision maximale par rapport au raster. Pour un modèle raster, la représentation des courbes de niveau produit des lignes brisées en escalier, compte tenu de la forme rectangulaire ou carrée des mailles. Cet aspect, lignes brisées, peut se révéler inesthétique, mais aussi il est considéré comme une perte d'information, une chose est sûre ce problème ne se produit pas dans les TIN.

L'interpolation TIN ne laisse aucun trou, donc toutes les cellules inconnues auront une valeur d'altitude quel que soit la densité des mesures.

- **Inconvénient**

La valeur d'altitude calculée pour un point inconnu à l'intérieur d'un triangle en se basant sur ses trois sommets, dépend des dimensions des trois triangles formés par ces quatre points. Pour une triangulation faite à partir de courbes de niveau numérisées, on tombe souvent sur le problème des facettes plates causées par la construction de triangles s'appuyant sur trois points d'une même courbe de niveau (même altitude).

La figure suivante (Figure 6.15) montre ce phénomène:

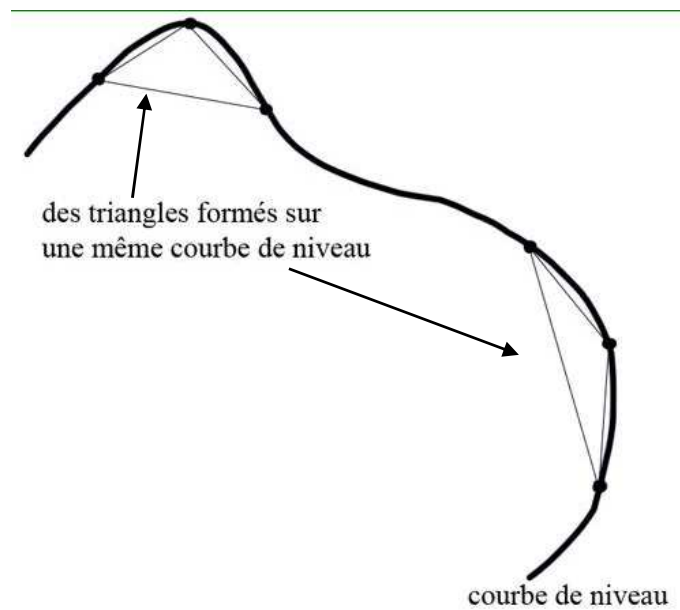


Figure 6.15: Construction de triangles sur une même courbe de niveau.

Ainsi si les échantillons sont trop espacés, la triangulation obtenue peut être trop grossière pour être exploitée aussi bien en terme de visualisation qu'en terme d'analyse topographique.

6.5. Conclusion partielle

On a débuté ce chapitre par la présentation, la classification et la discussion de quelques méthodes d'interpolation les plus fréquemment utilisées dans le domaine d'analyse spatiale.

Puis on a introduit les différents types d'échantillonnage qu'on peut rencontrer, suivant la forme du maillage du MNT ainsi le lien entre la taille de la maille et l'échelle cartographique ensuite on a mentionné le codage des altitudes. En fin on a abordé les éléments qui peuvent influencer la qualité du MNT et par conséquent l'application finale qu'on veut réaliser. Alors on s'est limité à l'influence du format final du MNT, en citant les avantages et inconvénients de chacun, ainsi l'effet que peut apporter la méthode d'interpolation utilisée.

Troisième partie:
Expérimentation.

Chapitre 7:
Réalisation et discussion des
résultats.

7.1. Introduction

La connaissance et la présence du Modèle Numérique de Terrain est de plus en plus devient pertinente dans différent domaines qui ont un rapport avec la géométrie et la structure de la terre en général, donc le MNT est considéré comme une information indispensable et nécessaire pour l'étude et la gestion d'un espace donné. Dans le cadre de notre projet on s'intéresse à une zone délimitée de la région de Tizi-Ouzou, dans un premier temps, il s'agit de construire les courbes de niveau de notre région d'étude, un processus qui a déjà fait avec le logiciel **Roots** qui travaille selon une logique topologique en gérant une table de numérisation. Une fois les courbes de niveau sont numérisées et stockées sous le format vecteur, seront transformées vers le format Raster avec le logiciel **Idrisi** sous Windows. Le raster est le format adéquat pour la mise en place de nos algorithmes car sa surface discrétisée en pixel facilite les analyses de voisinage et le croisement des informations. Dans un deuxième temps on applique nos différents algorithmes d'interpolation, puis en discutant les résultats on peut estimer le degré de performance de chaque technique.

7.2. Logiciels utilisés

Roots:

Il sait gérer la table à numériser et travaille sous une logique topologique: les points saisis sont regroupés en chaînes, qui a leur tour forment des polygones. Il est utilisé pour numériser les cartes et attribuer les identificateurs correspondants aux éléments saisis.

IDRISI

Il permet de transformer une information vectorielle en information image (Raster), il permet aussi de plaquer des images multispectrales avec le MNT interpolé pour synthétiser une vue en trois dimensions. Dans notre cas on va plaquer une image satellitaire de la zone d'étude sur le MNT interpolé pour une visualisation en 3D.

7.3. Présentation de la zone d'étude

Notre région d'étude se situe dans la partie Nord Est de la daïra de Tizi-ouzou. Elle couvre toute la surface allant de djebel Belloua jusqu'à la zone industrielle de Oued-Aissi. Les données sont représentées sur une carte topographique (Figure 7.1). Celle-ci couvre une étendue de 10400 m de largeur et de 13000 m de longueur.

Les délimitations

- Au nord: par l'Oued Sébaou situé au pied du versant nord du djebel Belloua.
- Au sud: par la ligne de crête du versant montagneux de Hasnaoua et Bouhinoune.
- A l'est: par l'espace de la zone industrielle de Oued-Aissi.
- A l'ouest par la ville de Boukhalfa.

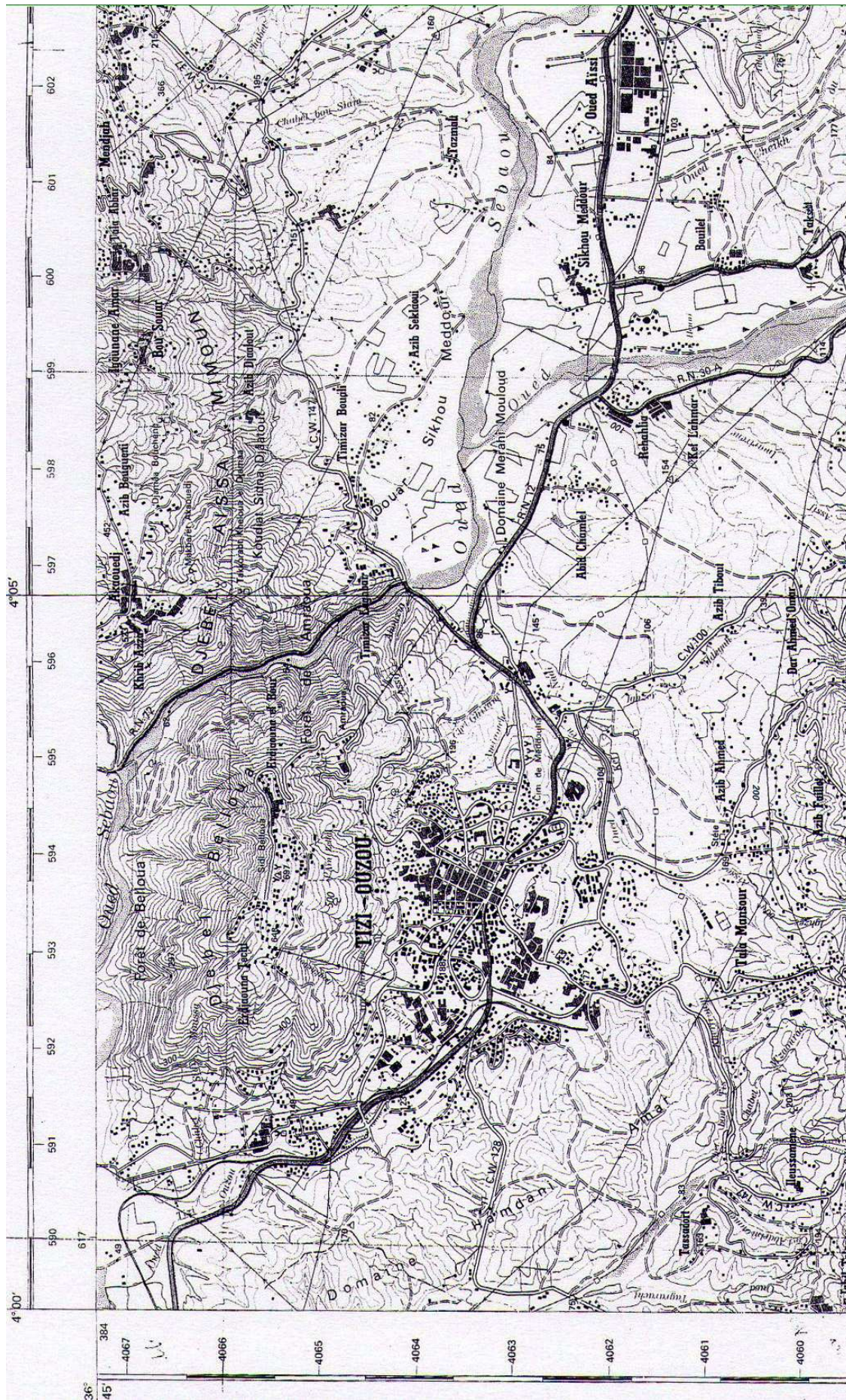


Figure 7.1: La carte topographique de la zone d'étude (Tizi-Ouzou).

7.4. Quelques Informations caractéristiques

- **Formats de fichiers**

Roots: fichiers exploitables uniquement par le logiciel lui-même.

Extension: .rot

IDRISI (32 Bits):

	En-tête	Données
Vecteur	.DVC	.VEC
Image	.RDC	.RST
Attribut	.DVL	.VAL
Palettes		.PAL

Tableau 7.1: *Extensions des fichiers manipulés sous Idrisi.*

- Le système de coordonnées pour le géoréférencement: **UTM-31n.**
- Coordonnées géographiques (pour les quatre extrémités de la carte):
Xmin=5894 m; Xmax=6024 m; Ymin=4057 m; Ymax=4067 ,4 m.
- Unité de mesure: **Mètre (m).**
- Résolution de la carte papier: **30m x 30m.**
- Taille de l'image raster: **520 lignes x 650 colonnes.**

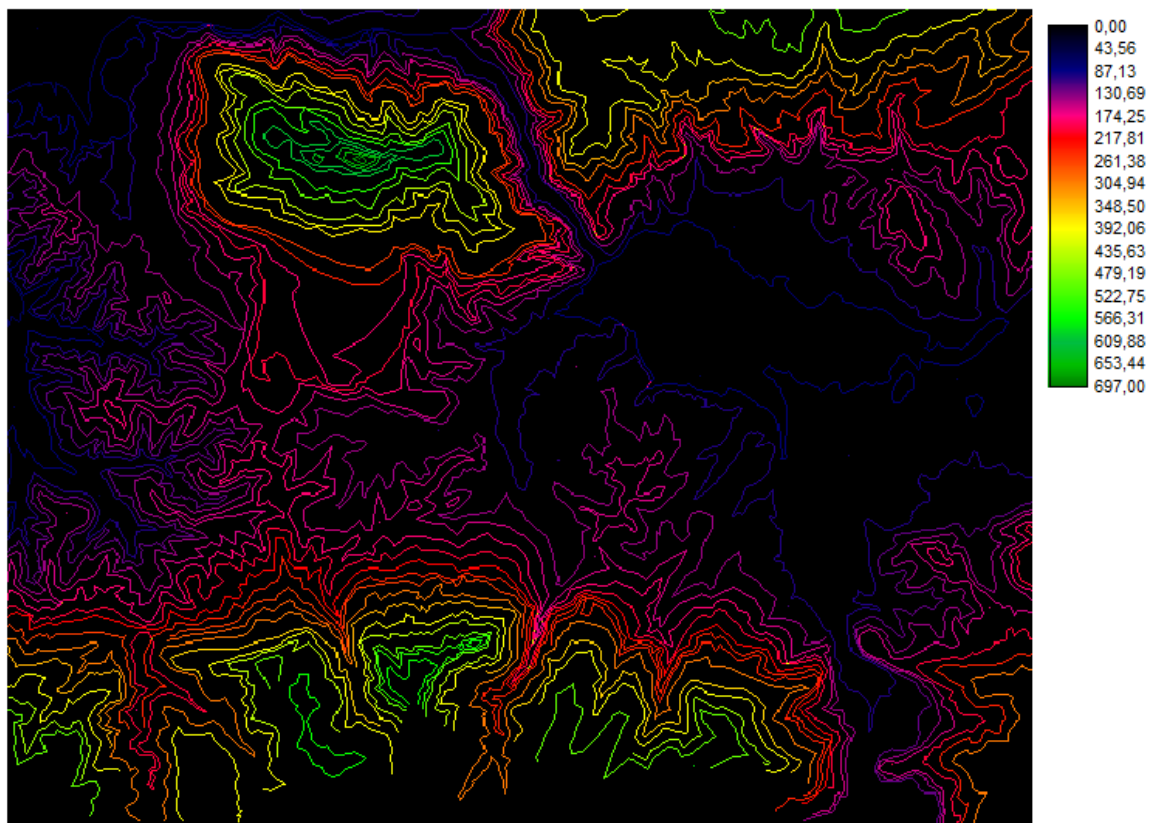
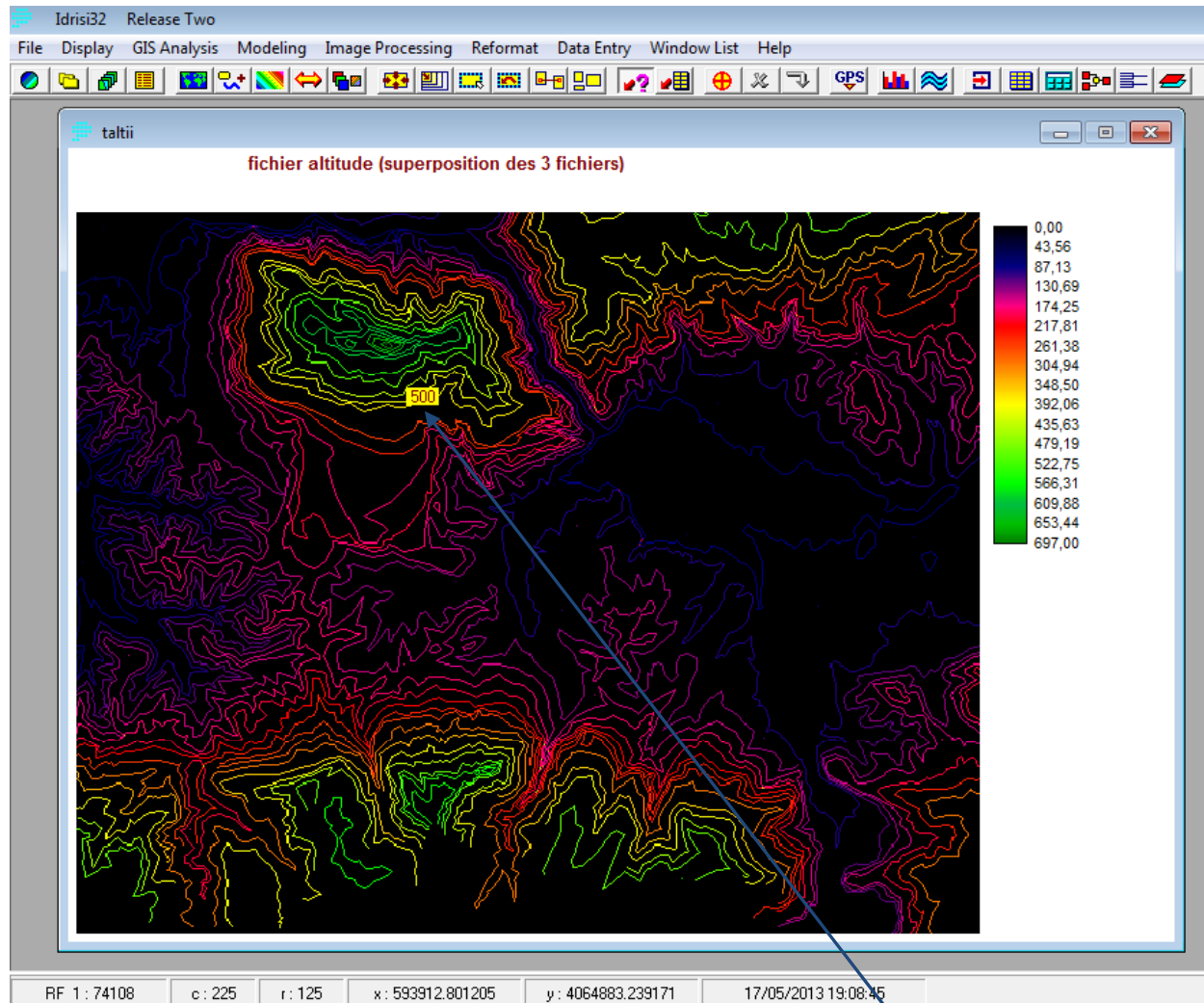


Figure 7.2: *les courbes de niveau de la zone d'étude.*

- La figure 7.2 : représente les courbes de niveau numérisées, issues de la carte topographique représentée dans la figure 7.1 à l'échelle 1/50 000, de la zone d'étude. Chaque ligne de niveau est représentée avec une couleur caractéristique, cette couleur est relative à une altitude pour chacune des courbes. A droite de la figure, une échelle traduit les couleurs et leurs altitudes correspondantes.
- **Remarque:** les surfaces représentées en noir concernent les zones qui ne possèdent pas d'altitude.



Les coordonnées planimétriques (x, y) du point sélectionné et de 500 m d'altitude (z).

Figure 7.3: Chargement des courbes de niveau avec le logiciel Idrisi 32 sous format Raster.

7.5. Processus de base pour la création de notre MNT

7.5.1. Acquisition des données

A partir de la carte topographique (figure 7.1), on digitalise les courbes de niveau à l'aide d'une tablette à digitaliser. Par carte topographique, on sous-entend une carte géographique où la morphologie du terrain est représentée par des courbes de niveau qui peuvent être ouvertes ou fermées et qui représentent une altitude fixe.

7.5.2. La table à digitaliser

La table à digitaliser est connectée à un ordinateur et constituée d'une facette glacée et d'une souris. Son fonctionnement est le suivant:

- Mettre la carte topographique sur la facette glacée;
- Introduire la résolution;
- Introduire l'altitude de chaque courbe;
- Parcourir toute la courbe en cliquant avec la souris, afin d'attribuer l'altitude correspondante en tout point, le long de la ligne de la courbe.

En travaillant avec le logiciel **Roots**, le résultat de cette opération est un fichier vecteur d'extension .rot. Ce fichier sera converti par le logiciel Idrisi en un fichier raster.



Figure 7.4: Table de numérisation utilisée pour numériser les données cartographiques.

7.5.3. Ré-échantillonnage

Après la phase d'acquisition, on disposera des données brutes, l'étape suivante consiste à uniformiser les données par une opération de ré-échantillonnage et donner un format final pour le MNT (régulier ou irrégulier) sur lequel repose le choix de la méthode d'interpolation.

Donc avant l'interpolation un ré-échantillonnage est nécessaire.

7.5.4. Interpolation des courbes de niveau

La fiabilité du MNT est très importante car la qualité et la fidélité du travail final sont liées directement à sa précision. C'est pourquoi qu'on ait eu donné une grande importance pour son élaboration, notamment l'interpolation.

Il existe une multitude de méthodes et techniques d'interpolation et aucune d'entre elles n'est meilleure qu'une autre, mais leurs choix s'effectuent suivant beaucoup de critères comme le format du MNT et les performances des résultats recherchées.

Dans notre cas le choix s'est porté sur trois approches, en mailles régulières et irrégulières, qui font partie des méthodes les plus largement utilisées:

- Interpolation par le plus proche voisin.
- Interpolation par l'inverse pondéré de la distance (IDW).
- Interpolation à partir d'un réseau de tringles (TIN).

7.5.5. Présentation des algorithmes mise au point

7.5.5.1. Interpolation par le plus proche voisin

On rappelle que cette technique est la plus simple en terme de temps de calcul, son implémentation et sa conception. Elle consiste à affecter la valeur d'altitude du point connu pour le point d'intérêt, à condition d'avoir une distance minimale possible entre ces deux points. Donc on peut concevoir une multitude d'algorithmes pour la résolution de ce problème. Dans notre cas, notre algorithme lance un masque de 3 lignes x 3 colonnes dont le centre est un point inconnu, s'il trouve parmi les 8 points voisins une valeur d'altitude au maximum, il l'affecte pour notre point, sinon il lance un autre masque de 5 x 5 en faisant le même traitement. On peut suivre le lancement des masques d'une façon croissante bien sûr, mais on s'est limité à deux masques, car les résultats obtenus sont satisfaisants.

Algorithme détaillé

nl, nc, i, j

masque1 [3] [3], masque2 [4] [4]

Mat1 [nl] [nc], Mat2 [nl] [nc]

Pour i allant de 0 à (nl-1) faire

 Pour j allant de 0 à (nc-1) faire

 Si (Mat1[i] [j] = 0) alors

 Lancement d'un masque 3x3 (masque1)

 Si (masque1 > 0) alors

 ↓ Mat1[i] [j] ← masque1

 Fin si

 Sinon si (masque1=0) alors

 Lancement d'un masque 5x5 (masque2)

 Si (masque2 > 0) alors

 ↓ Mat1[i] [j] ← masque2

 Fin si

 Fin sinon si

 Fin si

↓

```

    Fait
Fait
Pour i allant de 0 à (nl-1) faire
    ↓
    Pour j allant de 0 à (nc-1) faire
        ↓
        Mat2 [i] [j]=Mat1[i] [j]
        ↓
    Fait
↓
Fait

```

7.5.5.2. Interpolation par l'inverse pondéré de la distance (IDW)

On rappelle que cette méthode peut être élaborée de différentes façons, selon la manière d'effectuer la recherche des sites qui vont intervenir dans l'estimation. Par exemple en fixant un rayon de recherche dont le centre est la localisation de la valeur à estimer. On ne retiendra que les sites appartenant au cercle. En lançant un masque de dimension variable et on prend que les sites appartenant à ce masque ou bien une autre technique qui propose la détection des points les plus proches, en lançant des rayons dans différentes directions, entre 4 à 64 directions, autour du point à estimer. Notre algorithme se repose sur cette dernière approche, donc il effectue une recherche suivant les directions des 4 voisins du point d'intérêt.

Algorithme détaillé

nl, nc, i, j, k, l, p1, p2, p3, p4, a, b, c, d, d1, d2, d3, d4, e1, e2, e3, e4, p

Mat1[nl] [nc], Mat2 [nl] [nc]

```

Pour i allant de 0 à (nl-1) faire
    ↓
    Pour j allant de 0 à (nc-1) faire
        ↓
        Si (Mat1[i] [j] = 0) alors
            ↓
            Pour k allant de i à (nl-1) faire
                ↓
                Si (Mat1 [k] [j] > 0) alors
                    ↓
                    a ← Mat1[k] [j]
                    Calcul de la distance d1
                    
$$p1 \leftarrow \frac{a}{(d1)^p}$$

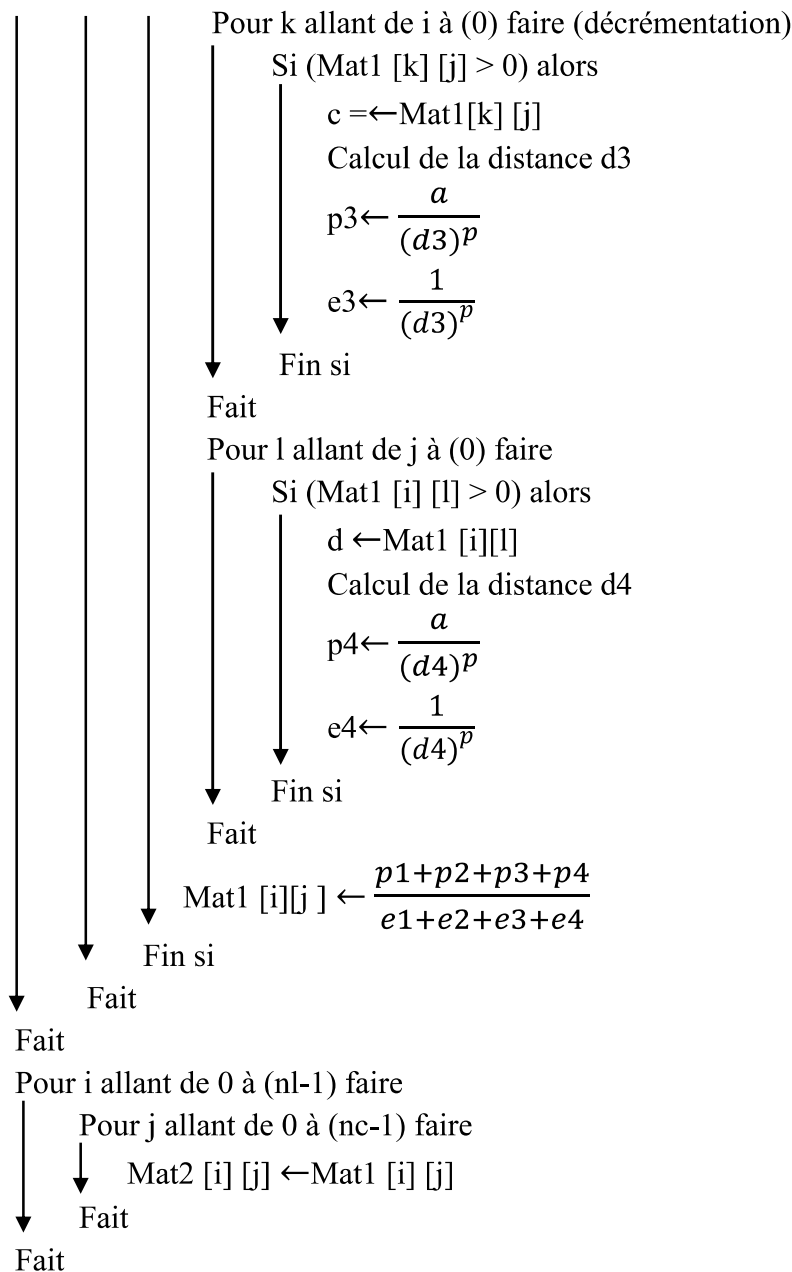
                    
$$e1 \leftarrow \frac{1}{(d1)^p}$$

                    ↓
                Fin si
            ↓
        Fait
        Pour l allant de j à (nc-1) faire
            ↓
            Si (Mat1 [i] [l] > 0) alors
                ↓
                b ← Mat1[i] [l]
                Calcul de la distance d2
                
$$p2 \leftarrow \frac{b}{(d2)^p}$$

                
$$e2 \leftarrow \frac{1}{(d2)^p}$$

                ↓
            Fin si
        ↓
    Fait

```



7.5.5.3. Interpolation à partir d'un réseau de triangles (TIN)

On rappelle que la triangulation d'un MNT consiste à générer un maillage de triangles dont les vertex (sommets) font partis des échantillons disponibles et les techniques de triangulation ne font pas nécessairement usage de l'interpolation proprement dite. La technique classique la plus utilisée est celle qui consiste à générer une triangulation de Delaunay, puis pour chaque nœud de la grille, on recherche le triangle (facette) d'appartenance, ensuite l'altitude calculée grâce un estimateur choisit, en utilise souvent l'interpolation linéaire.

Notre programme consiste à faire une autre triangulation qui consiste à chercher les trois proches sommets (points) formant le triangle d'appartenance pour chaque point d'intérêt et lancer l'interpolation linéaire en même temps.

Algorithme détaillé

nl, nc, i, j, k, l, a, b, c, u, v, d1, d2, d3, T1, T2, T3

Mat1 [nl] [nc], Mat2 [nl] [nc]

Pour i allant de 0 à (nl-1) faire

 Pour j allant de 0 à (nc-1) faire

 Si (Mat1[i] [j]=0) alors

 Pour k allant de i à (nl-1) faire

 Si (Mat1 [k] [j] > 0) alors

 a ← Mat1[k] [j]

 Calcul de la distance d1

 Pour l allant de j à (nc-1) faire

 Si (Mat1 [i] [l] > 0) alors

 b ← Mat1[i] [l]

 Calcul de la distance d2

 Pour u allant de i à (0) faire

 Pour v allant de j à (0) faire

 Si (Mat1 [u] [v]>0) alors

 c ← Mat1[u] [v]

 Calcul de la distance d3

 Fin si

 Fait

 Fait

 Fin si

 Fait

 Fin si

 Fait

 Calcul des surfaces des trois triangles T1, T2, T3

 Mat1[i] [j] ← $\frac{(T1*c)+(T2*b)+(T3*a)}{T1+T2+T3}$

 Fin si

 Fait

Fait

Pour i allant de 0 à (nl-1) faire

 Pour j allant de 0 à (nc-1) faire

 Mat2 [i] [j] ← Mat1 [i] [j]

 Fait

Fait

7.6. Expérimentations et interprétation des résultats

Dans cette section, on va décrire les résultats qu'on a obtenus avec l'implémentation des trois méthodes précédemment déterminées. L'analyse visuelle est certainement le meilleur critère pour juger la qualité ces modèles, en effectuant un test comparatif visuel des résultats des différentes techniques d'interpolation qu'on a développées.

7.6.1. Bilan et analyse des résultats

Notre zone d'étude est un espace parfait pour le test et l'implémentation des algorithmes d'interpolation, car on trouve des plateaux, des zones montagneuses ainsi des surfaces à forte variations de relief, donc on a presque toutes les formes géométriques possibles que peut prendre le terrain.

7.6.1.1. Les résultats de la méthode du plus proche voisin (p-p-v)

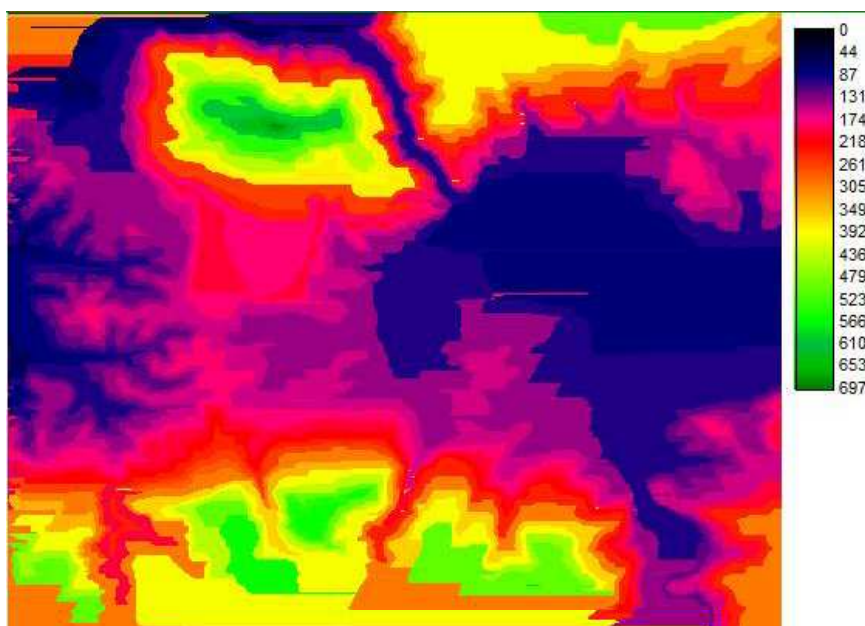


Figure 7.5: Résultat d'interpolation par le plus proche voisin.

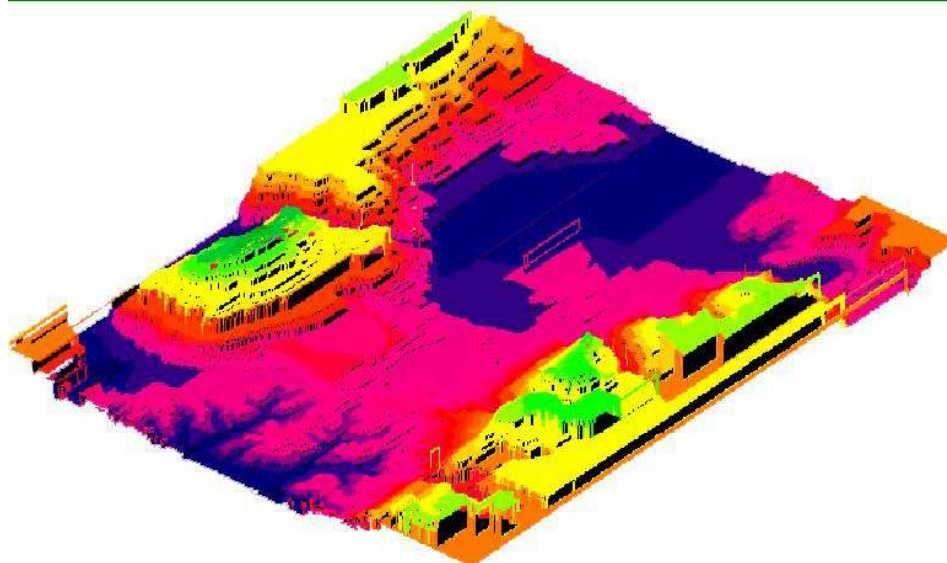


Figure 7.6: représentation du résultat d'interpolation en 3D.

❖ **Interprétation**

A partir de la figure 7.5 on remarque

- Le MNT est lisse : —————→ car les couleurs sont homogènes (pas de bruit).

A partir de la figure 7.6 on remarque

- Un effet d'escalier et des zones en noir: —————→ car les valeurs interpolées ne sont pas continues (effet de discontinuité).
- Des surfaces plates: —————→ car l'interpolation affecte la même valeur pour plusieurs points inconnus.

7.6.1.2. Les résultats de la méthode IDW

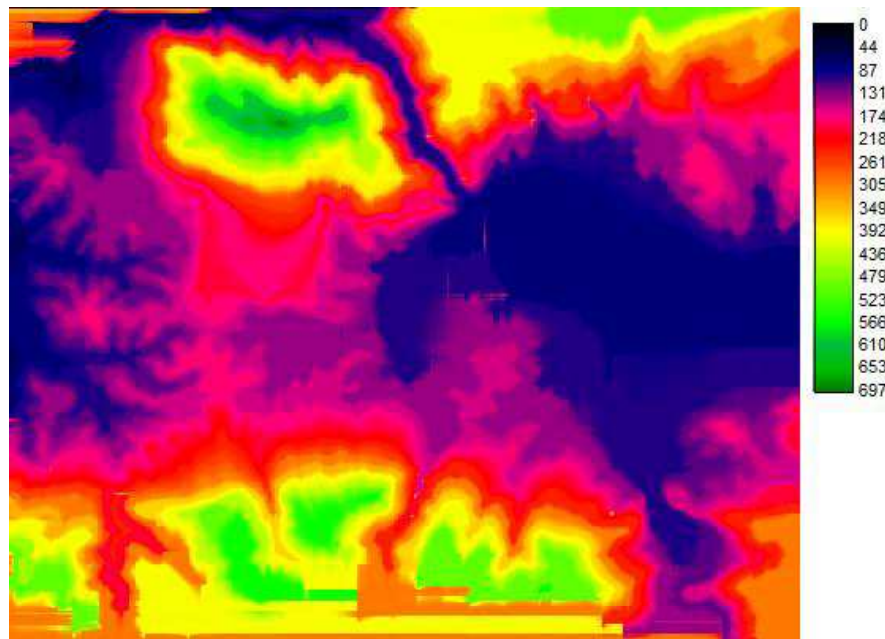


Figure 7.7: Résultat d'interpolation IDW.

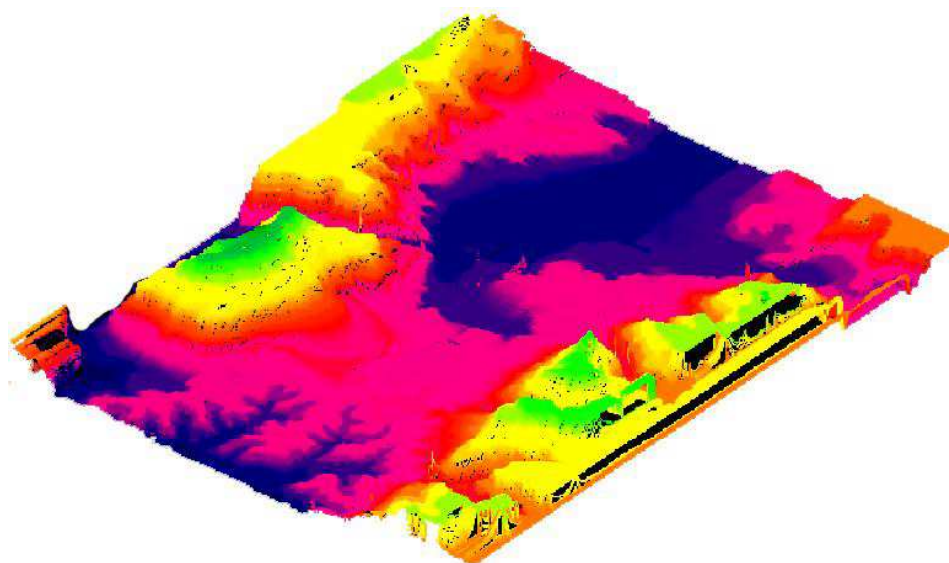


Figure 7.8: Représentation du résultat d'interpolation IDW en 3D.

❖ **Interprétation****A partir de la figure 7.7 on remarque**

- Le MNT est lisse, mais pas autant que celui obtenu par le p-p-v. —————→ car on ne voit pas une homogénéité totale des couleurs, par rapport à la méthode de plus proche voisin.
- la surface du MNT est continue —————→ car on ne peut pas distinguer les limites où les couleurs de la palette changent (contours), contrairement au cas du plus proche voisin.

A partir de la figure 7.8 on remarque

- L'absence des surfaces plates et l'effet escalier. —————→ car on dispose des valeurs continues grâce à la moyenne pondérée de l'estimateur IDW.

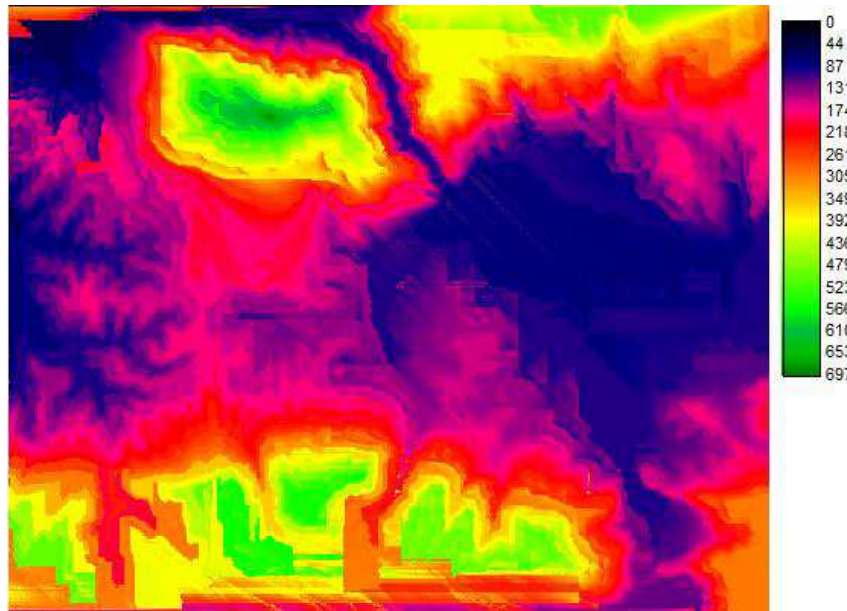
7.6.1.3. Les résultats de la méthode TIN

Figure 7.9: résultat de l'interpolation TIN.

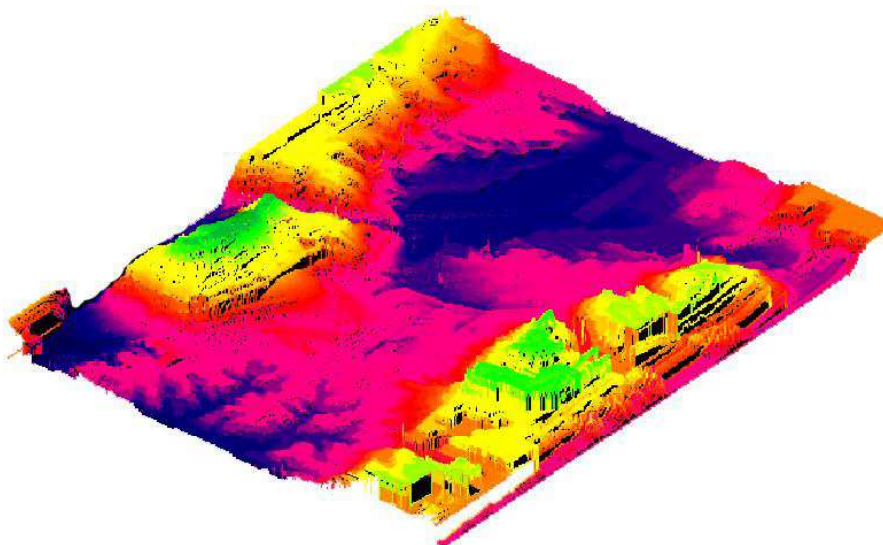


Figure 7.10 : Représentation du résultat de l'interpolation TIN en 3D.

❖ Interprétation

A partir des figures 7.9 et 7.10 on peut remarquer

- Le résultat de la méthode TIN n'est pas lisse, en le comparant avec les résultats des deux méthodes précédentes (p-p-v et IDW).
- La continuité des valeurs est meilleure que celle de la méthode p-p-v, mais c'est la méthode IDW qui nous donne une continuité parfaite.
- Des détails (les ondulations et les variations du terrain) sont bien représentés sur la surface en 3D, ce qui rend la méthode d'interpolation TIN la plus précise et la plus adaptée aux variations du relief.

7.6.2. Analyse des erreurs

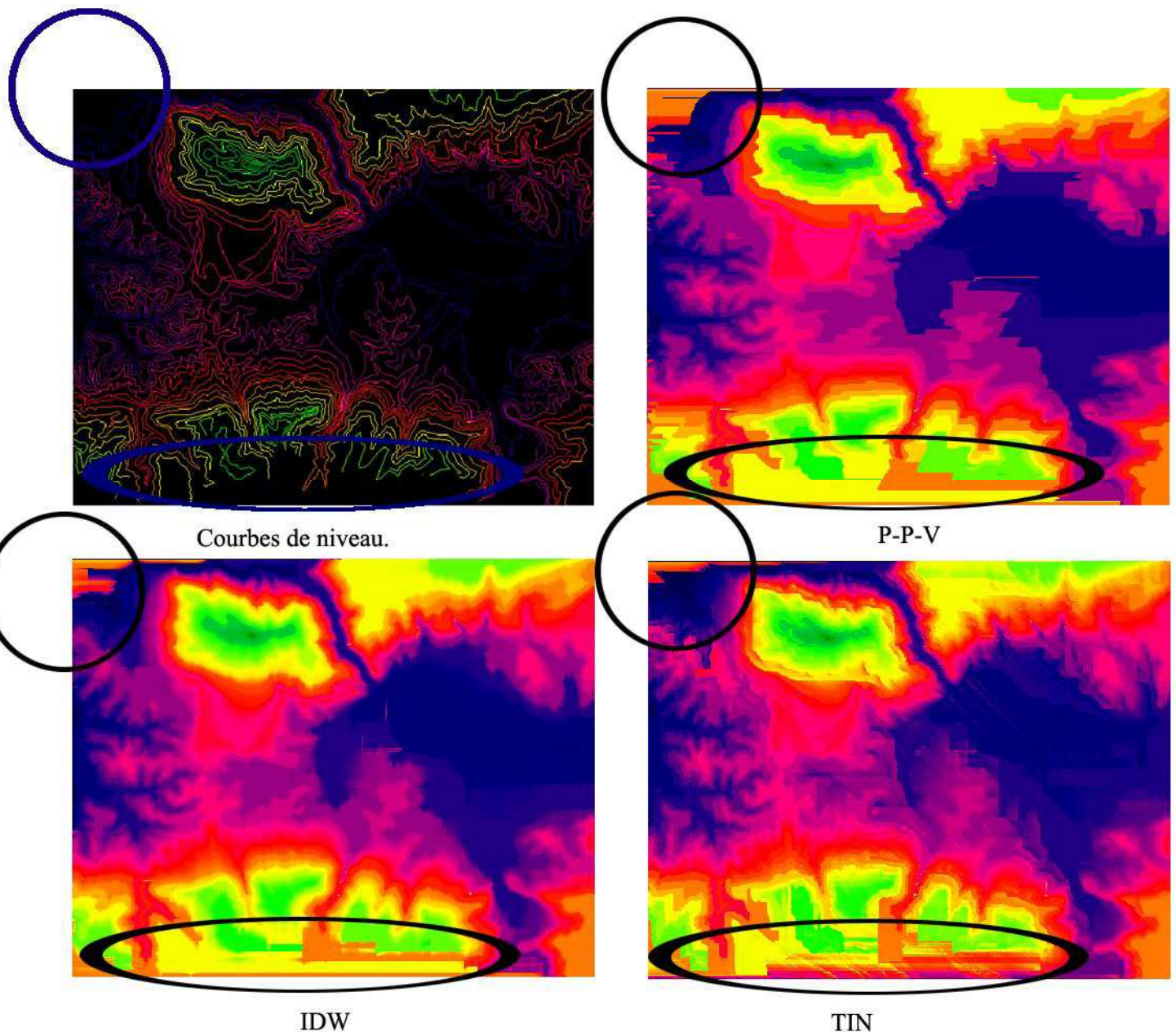


Figure 7.11: Localisation des zones d'erreurs pour les trois méthodes d'interpolation.

- D'après les différents résultats on constate que les positions des zones d'erreurs récurrentes sur les trois différentes surfaces des MNT obtenues sont similaires.
- On remarque que ces zones d'erreurs se trouvent dans les lieux où il y avait un manque d'information sur les structures importantes du terrain c.-à-d. là où on dispose des courbes de niveau interrompues et aussi la présence de courbes très éloignées.
- On remarque aussi que le degré de l'erreur est en accord croissant avec le degré de variation du relief, donc plus la forme du terrain paraît compliquée plus l'erreur relative devienne importante. ça nous amène à supposer que la répartition spatiale des erreurs les plus importantes n'est pas dépendante du choix de l'interpolation mais du type de relief.
- On définit par erreur la différence entre l'altitude mesurée sur le MNT (altitude interpolée) et l'altitude réelle. La figure 7.11 illustre les positions de ces erreurs.

7.6.3. Comparaison des trois méthodes

7.6.3.1. Caractéristiques des méthodes

Ce tableau illustre le degré d'efficacité de chaque méthode suivant quatre contraintes en nombre d'étoiles (plus le nombre d'étoile est élevé plus la méthode est efficace).

Méthode	Temps de calcul	lissage	Continuité de la surface	Adaptation aux variations du relief
Le plus proche voisin	★★★	★★★	★	★
IDW	★★	★★	★★★★	★★★
TIN	★	★	★★★	★★★★

Tableau 7.2: Tableau qui illustre le degré de performance des 3 méthodes étudiées.

7.6.3.2. Les points communs

Toutes les méthodes produisent des artefacts à proximité de MNT à cause d'un manque de continuité de leur fonction d'interpolation car les courbes de niveau sont découpées aux extrémités du MNT.

Des plateaux (surfaces plates) sont générés dans les régions définies par des courbes n'englobant pas d'autres courbes.

7.7. Synthèse d'une vue en trois dimensions

Après l'obtention et la comparaison des trois différents résultats, on a constaté que chacune des méthodes utilisées est caractérisée au moins par une performance. Donc le p-p-v nous a assuré le lissage, IDW résulte la continuité des valeurs et TIN s'adapte à la morphologie du relief.

Mais, d'une façon générale c'est la technique IDW qui englobe toutes ces caractéristiques. De ce fait on va choisir le MNT IDW pour la représentation en 3D (Figure 7.13).



Figure 7.12: Image satellitaire de la zone d'étude.



Figure 7.13: plaquage de l'image satellitaire sur le MNT obtenu avec l'interpolation IDW.

7.8. Conclusion partielle

Finalement, de notre étude, nous pouvons classer les trois méthodes d'interpolation étudiées et développées selon deux familles pour un usage concernant la visualisation:

- la première tend à reconstruire un modèle de terrain lisse (c'est le cas des interpolations par le plus proche voisin et IDW) adapté pour une région peu montagneuse ou constituée de montagnes anciennes érodées.
- la seconde famille (dont l'interpolation par la triangulation ou TIN) permettent de reproduire des caractéristiques morphologiques importantes. Les modèles ainsi obtenus sont bien adaptés pour la reproduction de zones montagneuses.

Conclusion générale:

Dans ce mémoire qui s'articule en trois parties, nous avons tout d'abord abordé quelques notions générales sur les informations et les systèmes géoréférenciés (à référence spatiale), par la suite, nous avons introduit les Modèles Numériques de Terrain pour adopter quelques méthodes d'interpolation permettant leur production et leur exploitation. Appliqués à notre zone d'étude, nous avons réussi à produire une image satellitaire en trois dimensions (3 D) et ce, en combinant l'information spectrale et le modèle d'altitude planimétrique.

C'est dans la première partie que nous avons introduit des notions générales concernant quelques domaines différents pour compléter la compréhension de notre travail. Nous avons montré qu'une bonne modélisation de la morphologie du relief s'effectue principalement en respectant le théorème de Shannon, ainsi, on a inclus un aspect bref sur la géomatique et la modélisation géographique. Le SIG comme un système informatique conçu pour la résolution des problèmes complexes de gestion et d'analyse spatiale, utilise des Modèles Numérique de Terrain comme une information élémentaire, notamment pour la représentation plus ou moins réaliste de l'environnement spatial ou des informations localisées géographiquement. Afin de générer ces formes numériques de terrain (MNT), il existe plusieurs disciplines de mesure et de traitement, chacune possède ces propres moyens, on a cité deux d'entre elle: La photogrammétrie, un procédé pour lequel la troisième dimension (altitude) sera déterminées par des mesures faites en deux images photographiques prises à partir de positions différentes et l'utilisation de la topographie en s'appuyant sur les courbes de niveau qui sont des lignes imaginaires joignant les points situés à la même altitude. Une fois le MNT est préparé, beaucoup de stratégies de stockage et de visualisation de ces données sont envisageables. La visualisation en trois dimensions d'un terrain implique de lier les images du sol (image satellitaire ou aérienne) avec le MNT et les cartes d'ombrage ou d'ensoleillement qui consiste à éclairer le MNT depuis une position définie qui peut varier de 0 à 360 ° selon l'emplacement de l'observateur. La première technique fera l'objet de perspectives de notre travail.

Dans la deuxième partie, nous avons commencé par la présentation du Modèle Numérique de Terrain d'une façon intégrale, puis on a passé à sa production. Notre recherche est basée sur deux démarches pour la conception et la production du MNT. La première est la technique fondée sur les couples d'images acquises par des stellites SPOT (imagerie stéréoscopique), qui entre dans le cadre de la capture des données photogrammétriques. La seconde consiste à interpoler les courbes de niveau qui se réalise elle-même selon deux manières. La première consiste en la numérisation des cartes topographique et l'extraction automatique ou semi automatique des ces courbes, suivie d'un étiquetage (affectation des altitudes) et d'interpolation, c'est l'approche que nous avons simplement étudiée. L'autre consiste à placer une carte topographique sur une table à digitaliser connectée à un ordinateur et constituée d'une facette glacée et d'une souris, pour digitaliser les courbes. Nous avons adopté cette dernière largement détaillée le chapitre 7. Après l'acquisition des données (altitudes), on avait disposé d'un MNT brut et défaillant, donc on doit le rééchantillonner suivant un format adéquat et estimer les valeurs manquantes avec l'établissement d'un lien continu entre les valeurs connues, on parle bien de l'interpolation. Donc, l'interpolation est une phase nécessaire et importante. Pour cela, nous avons présenté les méthodes les plus largement utilisées dans ce domaine, commençant par la présentation et la discussion des méthodes déterministes et en suite, les méthodes probabilistes. Le choix du format du MNT et de la technique d'interpolation va

affecter sans doute d'une façon positive ou négative le résultat final. Il est donc primordial de bien choisir ces deux facteurs soigneusement pour assurer la fidélité du produit final.

Enfin, dans la troisième partie, nous avons présenté la zone d'étude en tant que carte topographique et courbes de niveau sous le logiciel Idrisi 32 bits. Les méthodes d'interpolation ont un impact sur la morphologie du modèle généré, de ce fait, on proposé trois techniques d'interpolation qui ont permis de mettre en évidence les caractéristiques des celles existantes, pour pouvoir faire une comparaison entre elles et déduire celle qui nous convient. L'interpolation par le plus proche voisin, par l'inverse des distances pondérées (IDW) et par un réseau de triangles (TIN), sont les techniques qu'on a reproduit et on a illustré les trois algorithmes correspondant. Après avoir obtenu les trois différents résultats, nous avons constaté: si la méthode est lissante, les pentes et les courbures locales seront sous-estimées et dans le cas contraire, on aura une adaptation de la méthode aux variations du relief. Par conséquent, on a conclu que l'impact de ces méthodes dépend aussi de la superficie de la zone à interpoler. A la fin, nous avons plaqué une image satellitaire captée sous le logiciel SIG Google Earth de la zone d'étude sur le MNT obtenu avec la méthode IDW, pour une visualisation en 3D. On a choisit le MNT IDW car c'est lui qui englobe le lissage et l'adaptation à la morphologie du terrain.

Pour conclure, ce mémoire m'a permis de découvrir des domaines de recherches très différents: géomatique et SIG, la topographie, l'imagerie stéréoscopique, analyse de document, interpolation de surface, représentation des images en 3D.

Perspectives:

Comme perspective, nous visons à approfondir l'étude de l'impact des méthodes d'interpolation sur les formes du terrain en fonction de la morphologie du terrain. Cet impact doit également être étudié en fonction de la taille et de la forme de la zone interpolée.

Travaux futurs:

Parmi les divers domaines d'application du MNT et de l'information géographique en général, on s'intéresse à celui concernant l'évaluation des télécommunications. Le développement des réseaux de télécommunications mobiles ces dernières années nécessite des opérateurs de télécommunication une prise en compte de plus en plus fine de la réalité du milieu de propagation des ondes radioélectriques. La demande en communications radiomobile étant surtout concentrée en milieux urbanisés, la localisation des antennes devient plus complexe du fait de l'influence des formes urbaines et des types d'occupation des sol associés. Afin d'offrir un service de téléphonie radiomobile de bonne qualité à leur abonnés, les opérateurs effectuent des études techniques, pour optimiser le système (les relais de base, les antennes, etc.) et le réseau (la couverture du territoire, l'implantation des antennes sur le terrain). Pour ce faire, Il faut étudier et modéliser la zone géographique concernée en disposant de services techniques qui effectuent des mesures du signal radio sur le terrain et mettent au point les outils d'ingénierie informatique permettant de visualiser et de prévoir la couverture radioélectrique pour une cette zone.

Les infrastructures de télécommunications (antennes relais, tours hertziennes, réseaux filaires, etc.) sont intimement liées à l'espace terrestre : leur implantation, leur localisation dépendent d'une part du relief (localisation des tours hertziennes et des antennes en hauteur, réseaux filaires

localisés le long des voies de communication, etc.), et d'autre part, de la localisation de la population (desserte des personnes). Donc, pour modéliser l'espace terrestre de manière optimale, les informations géographiques sont indispensables pour décrire la morphologie de ces zones géographiques.

L'information géographique que possèdent les **Modèles Numériques de terrain** (MNT) ainsi ceux de surface (MNS) joue un rôle très important, et ceci aussi bien dans le déploiement des infrastructures de télécommunication (choix de la localisation des infrastructures), que dans les logiciels de visualisation et de modélisation du réseau de télécommunication [propagation du signal radio, état du trafic, flux de communications, délimitation des zones sensibles (parcs naturels, aéroport, écoles, hôpitaux, etc)].

Bibliographie:

- [1] Bates, R.L et Jackson, J.A., 2005. Glossary of Geology. 5th edition. American Geological Institute, New York, 800 pp.
- [2] Polidori, L. et El Hage, M., 2012. Interprétation géomorphologique du théorème de Shannon. Revue XYZ. N°133, pp. 21-23, 4e trimestre 2012.
- [3] support de cours « Éléments de photogrammétrie Cours de photo-interprétation » de François Gervais diffusé sur Internet par la HEIG-VD.
- [4] R. Raffin S. Thon, G. Gesquiere. Visualisation 3D de feux de forêts sur des modèles numériques de terrain de l'IGN. Dans Rencontre GEO-RISQUE 2006 "La cartographie des risques naturels", Montpellier (France), février 2006
- [5] Laurini, R. & Milleret-Raffort, F., 1993. Les bases de données en géomatique, ed Hermès Paris, 340p.
- [6] Kettal, E-Y., 1996. Système Expert d'Information Géographique Orienté Objet (SEIGO2) Application à l'écoulement de l'eau sur les terrains. Thèse, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 235p.
- [7] Falcidieno, B., Pienovi, C., & Spagnulo, M., 1993. Geometric reasoning on topographic surfaces Proceedings of the 4th European Conference on GIS, EGIS'93, Genoa, Italy, pp494-502.
- [8] Polidori, L., 1991. Validation de Modèles Numériques de Terrain: application à la cartographie des risques géologiques. Thèse, Université de Paris VII, 84 p.
- [9] Burrough, P.A., 1986. Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Oxford University Press, 193 p.
- [10] Weibel, R.& Heller, M., 1991. Digital Terrain Modelling. In: Geographical Information System: Principles and Applications, Edited by D.J. Maguire, M.F. Goodchild & D.W. Rhind , Longman, London, vol. 1, pp 269-297.
- [11] Lam, N.S.N., 1983. Spatial interpolation methods: a review. The American Cartographer, pp 129-149.
- [12] Monier, P., 1997. Caractérisation du terrain en vu de son traitement numérique : application à la généralisation de l'orographie. Thèse, Université Louis Pasteur, Strasbourg I, 215 p.
- [13] Rost, AA., 1987. Digital terrain analysis employing x-y-z point vectors as input data. Proceedings of the International Symposium on Computer-Assisted Cartography , March 29-April 3, 1987, Baltimore (MD), USA, PP 228-237.

- [14] Faugeras, O., Three-Dimensional Computer Vision. Massachussets Institute of Technology Press, 1993.
- [15] P. Arrighi and P. Soille. From scanned topographic maps to digital elevation models. In Proceedings of Geovision'99, 1999.
- [16] Joachim, P., 2007 Création semi-automatique de modèles numériques de terrains: Visualisation et interaction sur terminaux mobiles communicants. Thèse, Université BORDEAUX1, 189 p.
- [17] F. Devernay. Vision stéréoscopique et propriétés différentielles des surfaces. Ph D thesis, Ecole Polytechnique, 1997.
- [18] R.I. Hartley. Theory and practice of projective rectification. International Journal of Computer Vision, 35(2) :115–127, november 1999.
- [19] D. Scharstein and R. Szeliski. Stereo matching with non-linear diffusion. In International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, pages 343–350, 1996.
- [20] Arnaud, M. & Emery, X., 2000. Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et géostatistiques, 209 p, Hermes science.
- [21] Mitas, L., Mitasova, H., 1999. Spatial interpolation. In: Longley, P., Goodchild, M.F., Maguire, D.J., Rhind, D.W. (Eds.), Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, vol. 1. Wiley, pp. 481–492.
- [22] Baillargeon, S., Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitation, Mémoire de M. Sc., Université LAVAL, 2005.