



HAL
open science

Cours de système d'information géographique

Yacine Kouba

► **To cite this version:**

Yacine Kouba. Cours de système d'information géographique. Master. Aménagement urbain, Université Larbi Ben M'hidi O.E.B., Algérie. 2018, pp.105. cel-01878296

HAL Id: cel-01878296

<https://hal.science/cel-01878296>

Submitted on 20 Sep 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université LARBI BEN M'HIDI -OEB-
Faculté des Sciences de la terre et d'Architecture
Département de Géographie et d'Aménagement du territoire



**COURS DE SYSTEMES D'INFORMATION
GEOGRAPHIQUE
PREMIERE ANNEE MASTER AMENAGEMENT
ET PROJETS DE VILLE**

Présenté par :
Yacine KOUBA

Année universitaire : 2017-2018

AVANT PROPOS

Depuis plus de trente ans, le développement de l'informatique a entraîné des modifications importantes pour la géographie et la cartographie. La production de données s'est accélérée, grâce à de nouvelles méthodes de collecte et d'acquisition. Le traitement des données localisées s'est largement développé, avec la saisie numérique des données graphiques, cartes et plans, avec les systèmes de gestion de bases de données et les capacités de stockage des systèmes informatiques. Enfin, de nombreux aspects de la cartographie ont été automatisés et les techniques de production complètement modifiées, avec en corollaire une accélération de la diffusion et de l'utilisation de données géographiques.

Les systèmes d'information géographique ont la particularité de faire appel à de nombreux domaines scientifiques et techniques tel que la géodésie, les systèmes de gestion de bases de données, le traitement d'images, l'algorithmique géométrique, la modélisation et l'interpolation géométrique, la statistique, la cartographie automatique, l'analyse spatiale, etc. Les systèmes d'information géographique ont aussi la particularité de regrouper différentes méthodes et techniques informatiques qui leur permettent de modéliser, de saisir sous forme numérique, de stocker, de gérer, de consulter, d'analyser, de représenter des objets ou des collections d'objets géographiques, avec la spécificité de prendre en compte les caractéristiques spatiales de ces objets au même titre que les attributs descriptifs qui y sont attachés.

Ce polycopié est consacré à l'étude des différents concepts autour des systèmes d'information géographique. Il prend en compte le fait que les étudiants seront confrontés lors de leurs futures activités à des problématiques de gestion d'information géographique. Le polycopié présente les différentes clés qui leur permettront de remplir soit des fonctions techniques autour du SIG soit de gérer des projets traitant de données géographiques (gestion de prestataires, maîtrise

d'ouvrage, management d'équipe SIG, composante SIG d'un projet plus général, etc.)

Ainsi à l'issue de ce cours, les étudiants seront capables de :

- Comprendre la notion de l'information géographique numérique.
- Comprendre les concepts de bases des SIG.
- Découvrir les fonctionnalités des SIG.
- Utiliser efficacement les outils SIG de traitements de données urbaines mis à leur disposition dans le cadre de leur vie professionnelle.
- Découvrir la variété de domaines d'application.
- Pratiquer sur le logiciel SIG Arc GIS.

Table des matières

I. Généralités	1
I.1. Définitions des Systèmes d'Information Géographique (SIG)	1
I.2. Historique de SIG	2
I.3. L'information géographique (IG)	2
I.4. Les principales composantes d'un SIG	3
I.5. Les fonctionnalités d'un SIG (les 5 A)	4
I.6. Domaines d'application des SIG	5
I.7. Le SIG idéal	5
I.8. Quelques logiciels SIG	6
I.8.1. Logiciels libres	6
I.8.2. Logiciels Gratuits	7
I.8.3. Logiciels Commerciaux	7
II. Les données dans les SIG	8
II.1. Types de données dans les SIG	8
II.1.1. Données spatiales	8
II.1.2. Données associées	11
II.2. Mode d'acquisition des données	12
II.2.1. Import de fichiers	12
II.2.2. Levés topographiques (par l'utilisation d'un Théodolite)	13
II.2.3. Photos aériennes	13
II.2.4. Images satellites	15
II.2.5. Global Positioning System (GPS)	16
II.2.6. Digitalisation	16
II.2.7. Scannage de plans	17
II.3. Base de données géographique	17
III. Notions spatiales fondamentales	19
III.1. Systèmes de référence géographique	19
III.1.1. Coordonnées géographiques	19
III.1.2. Géoïde, Ellipsoïde et Datum	19
III.1.3. Exemples de systèmes de référence géographique	21
III.2. Systèmes Projections cartographiques	21
IV. Analyse spatiale	26
IV.1. Quelques définitions de l'analyse spatiale	26
IV.2. Analyse spatiale en mode vecteur	26
IV.2.1. Opérateurs danalyse spatiale en mode vecteur	26

IV.3. Analyse spatiale en mode raster.....	34
IV.3.1. Opérateurs raster.....	34
V. Interpolation des données spatiales.....	42
V.1. Définition.....	42
V.2. L'interpolation déterministe globale	44
V.3. L'interpolation déterministe locale.....	44
V.3.1. Polygones de Thiessen	45
V.3.2. Méthodes d'interpolation à partir d'une triangulation	47
V.3.3. Méthodes d'interpolation barycentriques.....	48
V.3.4. Les splines	50
V.4. L'interpolation stochastique.....	52
V.4.1. Le krigeage.....	52
VI. Modèle numérique de terrain/d'altitude	54
VI.1. Définitions	54
VI.2. Représentation.....	54
V.2.2. Semis irrégulier de points ou TIN (Triangular Irregular Network)	55
VI.2.3. Représentation maillée (grille, matrice, raster).....	56
VI.3. Formats et résolution	56
VI.4. Modes d'acquisition de l'altitude.....	57
VI.4.1. Acquisition directe par des méthodes de topométrie : Levés sur le terrain de topométrie.....	57
VI.4.2. Numérisation (vectorisation) de courbes de niveau provenant de cartes.....	58
VI.4.3. Restitution photogrammétrique de photographies aériennes.....	58
VI.4.4. Radargrammétrie	60
VI.4.5. Laser grammétrie ou altimétrie par «laser à balayage».....	61
VI.5. Les erreurs du MNT.....	64
VI.6. Comparatif de validité.....	65
VI.7. Quelques sources de MNT/MNA.....	65
VI.8. Variables du relief dérivées.....	66
VI.8.1. Pente, orientation.....	66
VI.8.2. Concavité, convexité.....	66
VI.9. Variables thématiques dérivées.....	66
VI.9.1. Visibilité.....	67
VI.9.2. Ombre portée et ombre projetée.....	67
VI.9.3. Taux d'ensoleillement	68
VI.9.4. Ligne de drainage.....	69

VI.9.5. Limites de bassin versant hydrologique	70
VI.10. Domaines d'application	70
VI.10.1. Usages du MNA	70
VI.11. Usages du MNA	72
VII. Création des cartes d'aptitudes	75
VII.1. Etape 1 : définition du problème	75
VII.2. Etape 2 : décomposition du problème	76
VII.2.1. Où sont les emplacements dont le terrain est relativement plat ?	76
VII.2.2. L'utilisation du sol est-elle appropriée dans ces emplacements ?	76
VII.2.3. Ces emplacements sont-ils assez proches d'installations récréatives ?	77
VII.2.4. Sont-ils assez éloignés des écoles existantes ?	77
VII.3. Etape 3 : exploration des jeux de données en entrée	78
VII.4. Etape 4 : exécution de l'analyse	79
VII.4.1. Classement des zones à proximité d'installations récréatives avec l'outil Reclassification	81
VII.4.2. Classement des zones éloignées des écoles existantes	83
VII.4.3. Classement des pentes du terrain	84
VII.4.4. Classement des occupations du sol	86
VII.4.5. Regroupement des cartes d'aptitude	87
VII.4.6. Superposition pondérée	90

I. Généralités

I.1. Définitions des Systèmes d'Information Géographique (SIG)

De nombreuses définitions d'un Système d'Information Géographique (SIG) existent. Parmi celles-ci, nous pouvons nous référer aux quatre définitions suivantes :

1) La définition française est due à l'économiste Didier (1990), dans une étude réalisée à la demande du Conseil National de l'Information Géographique (CNIG) : « Un SIG est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision ».

2) Selon le Comité Fédéral de Coordination Inter-agences pour la Cartographie Numérique aux États-Unis (1988), la version américaine de la définition est : « Un SIG est un système informatique de matériels, de logiciels et de processus conçu pour permettre : la collection, la gestion, la manipulation, l'analyse, la modélisation, l'affichage des données à référence spatiale, afin de résoudre des problèmes complexes d'aménagement et de gestion ».

3) Selon la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection : « Un SIG est un système informatique qui permet à partir de diverses sources, de rassembler, d'organiser, de gérer, d'analyser, de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace ».

4) « Un SIG, dans une définition étroite, est un système informatique pour la saisie, la manipulation, le stockage et la visualisation des données spatiales numériques. Dans une définition plus large, il est un système numérique d'acquisition, de gestion, d'analyse, de modélisation et de visualisation de données spatiales aux fins de la planification, l'administration et le contrôle de l'environnement naturel et aux applications socio- économiques » (Konecny, 2003).

I.2. Historique de SIG

Les premiers SIG opérationnels sont apparus dans les années 1960 au Canada et aux Etats Unis. Le pionnier est indiscutablement le Canadian Geographic Information System (1964) qui rassemble des informations relatives à l'usage du sol, et des données concernant l'environnement, sur une grande partie du territoire canadien. Deux autres réalisations avant-gardistes méritent d'être mentionnées : le New York Land Use Information System (1967) et le Minnesota Information System (1969). Depuis cette époque, les coûts et les difficultés techniques ont considérablement diminué.

I.3. L'information géographique (IG)

L'information géographique est une information ayant une référence au territoire soit sous forme

1. de coordonnées
2. de nom de lieu
3. d'adresse postale ou autre.

Elle peut être dupliquée sans dégradation, circule et s'échange à grande vitesse via les réseaux de communication, se combine avec d'autres informations en vue d'en créer de nouvelle.

Les informations géographiques sont acquises, stockées, analysées visualisées et distribuées à l'aide de système d'information géographique (Coordination de l'information géographique et des systèmes d'information géographique, 2001, Suisse).

L'information géographique peut être définie comme une information relative à un objet ou à un phénomène du monde terrestre, décrit plus ou moins complètement :

- par sa nature, son aspect, ses caractéristiques divers.
- Et par son positionnement sur la surface terrestre.

Exemple : l'information géographique sur une route se caractérise par : son nombre de voies, son revêtement, son nom, sa longueur, sa localisation, etc.

Le premier groupe de données est appelé aussi attributs ou encore données sémantiques, tandis que le second groupe est appelé données géométriques.

L'information géographique est de plus en plus présente dans notre quotidien sous une forme numérique (Figure I.1).



Figure I.1 : Exemples de système de localisation par satellite (GPS).

I.4. Les principales composantes d'un SIG

Un SIG comporte au moins sept composantes (Figure I.2) :

- Une base de données à caractère spatiale et thématique
- Un système de représentation cartographique
- Un système de saisie numérique
- Un système de base de données géographique
- Un système d'analyse spatiale
- Un système de traitement d'images
- Un système d'analyse statistique

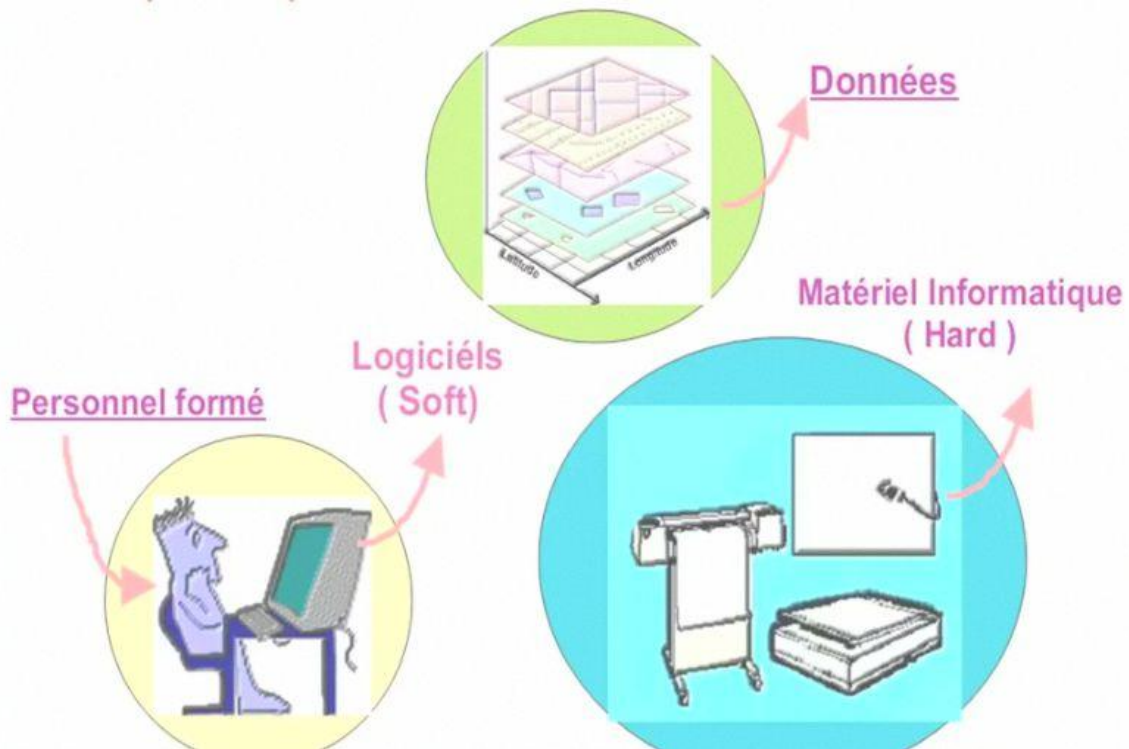


Figure I.2 : Les principales composantes de SIG.

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

Les systèmes d'information géographique peuvent être constitués pour répondre à différentes demandes comme le système universel n'existe pas, il faut les adapter selon les objectifs fixés.

Toutefois ils ont en commun des fonctionnalités que l'on retrouve dans chaque système regroupées en 5 familles sous le terme «5A» pour Abstraction, Acquisition, Archivage, Affichage et Analyse.

Ces termes résument les fonctionnalités que tous les systèmes doivent assurer mais cachent leur diversité : différents modèles mis en œuvre, nombreuses applications, présentation multiples des données, variété des informations et capacités de stockage.

Abstraire : Concevoir un modèle qui organise les données par composants géométriques et par attributs descriptifs ainsi qu'à établir des relations entre les objets.

Acquérir : Fonctions de numérisation et d'importation de données.

Archiver : Transfert de données de l'espace de travail (en cours d'utilisation) vers l'espace d'archivage (Stock).

Analyser : Analyser des données (méthodes quantitatives et statistiques) et analyse spatiale (opérateurs topologiques).

Afficher : Visualiser l'information géographique (Cartes, tables, document texte, etc.).

I.6. Domaines d'application des SIG

Les SIG sont utilisés pour gérer et étudier une gamme très diversifiée de phénomènes et de réseaux de phénomènes. Les domaines d'application sont :

- **Pour les grandes échelles**

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

- **Pour les échelles moyennes et petites**

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

I.7. Le SIG idéal

Idéalement un SIG doit atteindre plusieurs objectifs et pour ce faire posséder certaines qualités. Il doit être :

- **Rentable** (en fonction du mandat de l'organisme).
- **Pertinent** (les résultats plutôt que sur les méthodes de production).

- **Flexible** (capable d'évoluer).
- **Sécuritaire** (construit de façon modulaire pour minimiser les erreurs et protéger l'information confidentielle).
- **Performant** (contrôle de la qualité et efficacité des traitements).
- **Indépendant** (du matériel et des logiciels afin d'en assurer l'évolution de la portabilité).
- **Coopératif** (bien définir les rôles et les responsabilités des services et des individus impliqués).
- **Motivant** (impliquer les utilisateurs a toutes les étapes de la conception et de l'utilisation).
- **Progressive** (éviter les achats massifs d'équipements et limiter la saisie initiale des données afin de réduire les risques d'erreur et les couts).
- **Documenter** (rédaction de la documentation parallèlement au développement du système).

I.8. Quelques logiciels SIG

I.8.1. Logiciels libres

GRASS GIS : Logiciel de SIG libre, aussi connu pour avoir été le plus gros projet géomatique Open Source. Il regroupe des fonctionnalités de traitement et d'analyse d'images de télédétection ainsi que des fonctionnalités à base topologique.

Map Server : Logiciel libre de publication de carte sur internet. Il peut être utilisé pour réaliser des applications web, mais également pour publier des services web.

QGIS : Logiciel de cartographie. Il est disponible sous Linux (KDE), Mac OS X, ou Windows. Il permet la visualisation "à la volée" des couches de données ainsi que leur modification. Il permet notamment l'élaboration de fichiers destinés à être publiés sur Map Server. Il présente une ergonomie qui le rend très simple à utiliser.

PostGIS : Extension pour la base de données PostgreSQL, qui permet de faire des requêtes spatiales.

uDig, gvSIG : SIGs libres développés en Java pour Linux et Windows.

I.8.2. Logiciels Gratuits

DIVA-GIS : Offre des outils d'analyse statistiques et géo-spatiale pour la caractérisation des attributs numériques des bases de données associées aux objets.

AutoDEM : Logiciel de SIG permettant d'extraire des informations sur des cartes topographiques numérisées. En particulier, il offre des outils pour créer des modèles numériques de terrains (MNT) à partir de courbes de niveaux. Il supporte de nombreux formats pour chaque type de couche (images, MNT, courbes de niveaux, toponymes).

I.8.3. Logiciels Commerciaux

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

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

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

II. Les données dans les SIG

II.1. Types de données dans les SIG

Tous les objets spatiaux peuvent être décrits par 4 classes de propriétés :

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

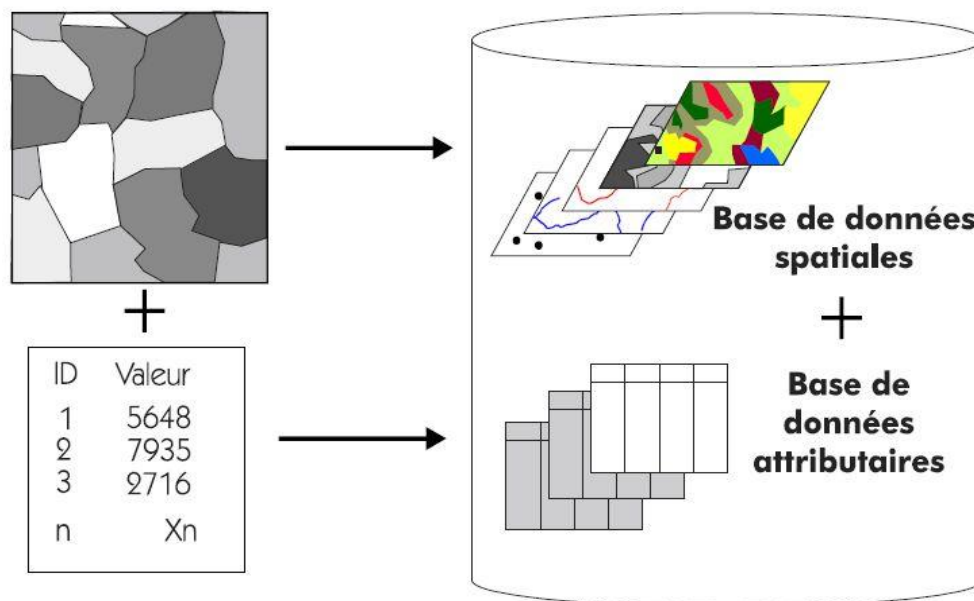


Figure II.1 : Types de données dans un SIG.

II.1.1. Données spatiales

Elles déterminent les caractéristiques spatiales d'une entité géographique où sont représentés et identifiés tous les éléments graphiques (Figure II.1) :

- La localisation : coordonnées par rapport à une échelle graphique de référence.
- La forme : point, ligne, surface.
- La taille : longueur, périmètre, surface.

Sur le plan informatique, il existe essentiellement 2 modes de représentation des données :

- **Mode vecteur** : Les données vecteur sont un ensemble d'objets géographique représentés chacun par des primitive graphiques : le point, ligne et polygone.

Exemples de données vectorielles :

- a) Les données surfaciques : comme un parcellaire ou tout autre zonage thématique, sont représentés par des polygones (Figures I.2).
- b) Les données linières ou filaires : comme les réseaux techniques, les cours d'eau ou les voies, sont représentés par des lignes (Figure II.3).

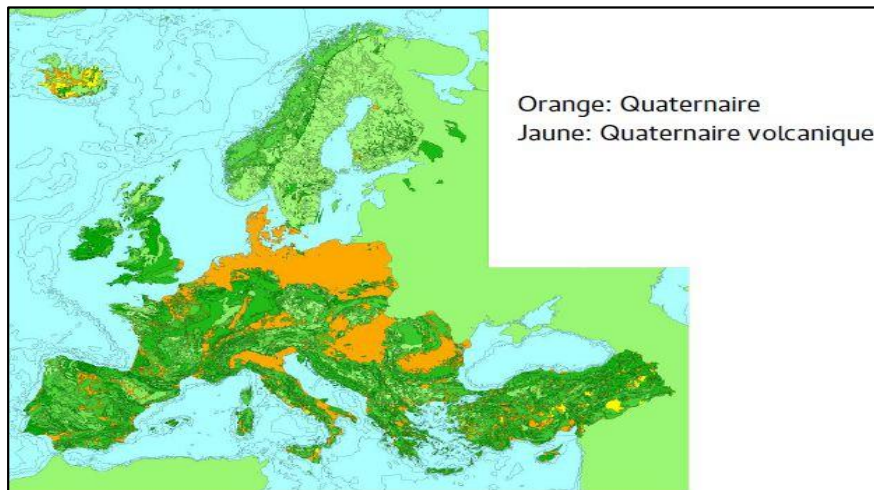


Figure II.2 : Exemples de données surfaciques (carte géologique de l'Europe).

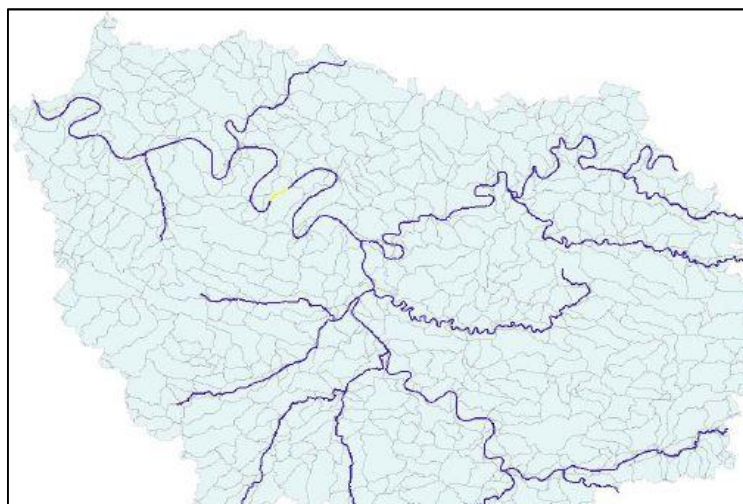


Figure II.3 : Exemple de données linières (Réseau hydrographique).

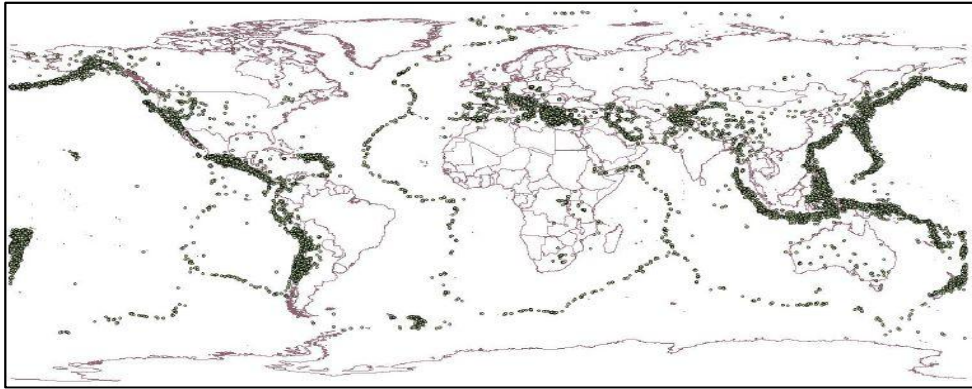


Figure II.4 : Exemple de données ponctuelles (les épicentres de séisme en 2002 et 2003).

- c) Les données ponctuelles : comme les puits, les points de sondage, les sièges d’exploitation, sont représentés par des points (Figure II.4).
- **Mode raster :**
 - La valeur numérique attribuée à chaque cellule correspond à la valeur d’attribut (Figure II.5).
 - Les démarcations se produisent aux limites des ensembles de cellules de même valeur ne correspond pas nécessairement aux frontières des entités sur le terrain.

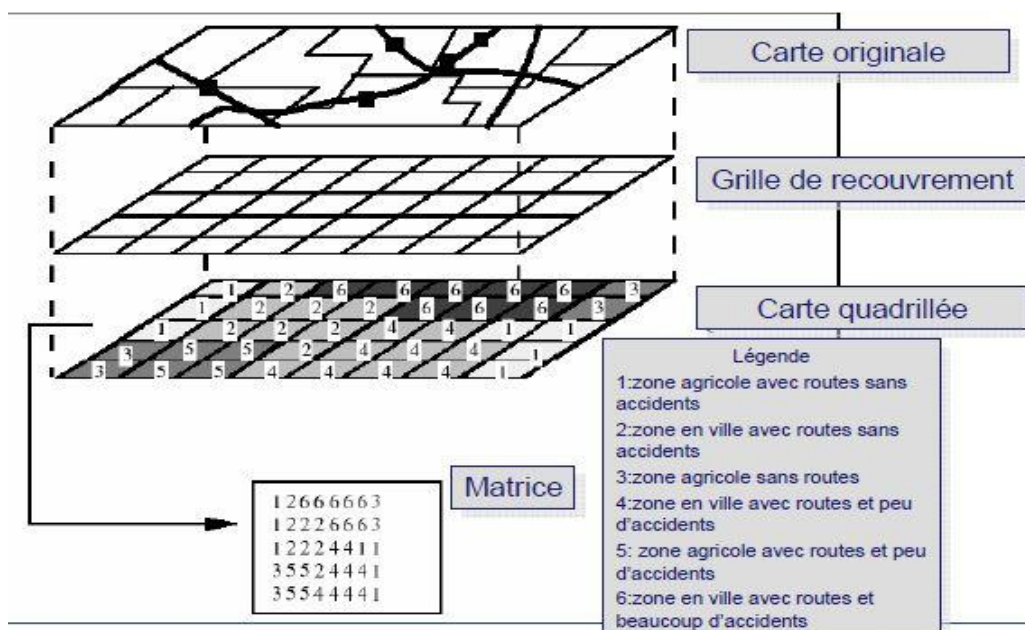


Figure II.5 : Représentation schématique d’une carte raster.

On peut distinguer deux types de données Raster :

- ✓ Les images (utilisées essentiellement pour la représentation cartographique ; Figure II.6 (a)) :

Exemple : photo aérienne, l'information continue dans la matrice de pixel concerne la couleur de représentation de l'information. Cette information n'est pas directement accessible.

- ✓ Les grilles ou grids (utilisé pour le calcul et la modélisation Figure II.6 (b)).

Exemple : Modèle numérique de terrain. L'information continue dans la matrice de pixel concerne une valeur quantitative (ex : altitude). Cette information peut être vue et modifiée dans la table attributaire.

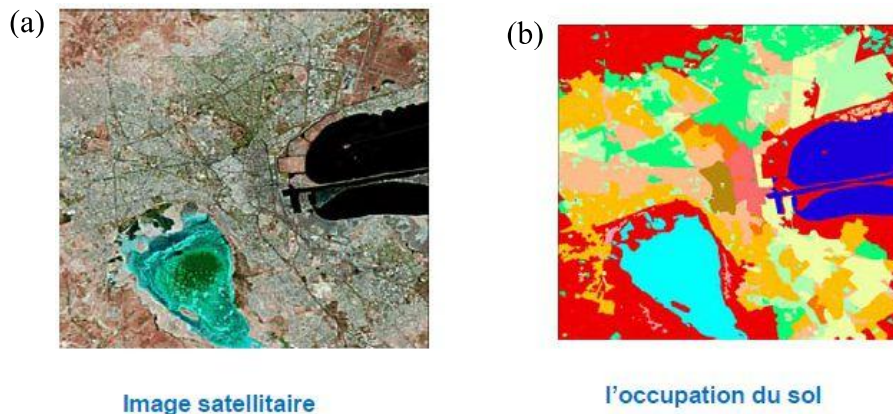


Figure II.6 : Exemples (a) d'une image satellitaire et (b) une grille raster.

II.1.2. Données associées

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

a) Données de classification

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

b) Données d'identification

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

c) Données attributaires

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

II.2. Mode d'acquisition des données

L'acquisition des données géographiques consiste au regroupement de diverses sources permettant la saisie des données géographiques dans le but de leurs intégrations dans un système à référence spatiale. A partir du moment où l'on a défini les informations nécessaires à notre besoin, il reste à régler la question du choix du mode d'acquisition des données. Nous présentons dans ce qui suit les principales méthodes d'acquisition de données.

II.2.1. Import de fichiers

Les SIG offrent généralement trois types de moyens d'importer les données :

- Importer une base de données structurée dans un format interne à un SIG. Ce moyen convient entre les SIG d'un même type mais est plus délicat entre des SIG de types ou de versions différentes.
- Importer un fichier à plat, simple fichier textes contenant toutes les informations structurées de façon simple. Néanmoins un important travail de structuration des données est nécessaire pour coïncider avec la structure interne du SIG.
- Passer par une des normes d'échange disponible sur le marché. Ce troisième moyen est le plus économique à long terme.

II.2.2. Levés topographiques (par l'utilisation d'un Théodolite)

Un théodolite (Figure II.7) est un instrument de géodésie complété d'un instrument d'optique, mesurant des angles dans les deux plans horizontal et vertical afin de déterminer une direction. Il est utilisé pour réaliser les mesures d'une triangulation (mesure des angles d'un triangle). Cet appareil permet d'obtenir le tracé de proche en proche à partir d'un point de référence. Les géomètres vont sur le terrain et utilise la lunette visée permettant de mesurer des distances et des angles horizontaux et verticaux. L'appareil peut enregistrer un code en plus de la position d'un point. Le code permet d'identifier le point relevé, ce qui facilite le travail de dessin à l'ordinateur. Toutes sortes d'objets peuvent avoir leur code (coins, portes de bâtiments, trottoirs, tampons, fossés, etc.).



Figure II.7 : Exemple d'un théodolite.

II.2.3. Photos aériennes

L'ensemble de clichés fusionnés permet d'obtenir une photo complète d'une zone (Figures II.8, II.9, II.10). Les clichés photographiques obtenus nous permettent de déterminer les coordonnées et l'altimétrie des points.

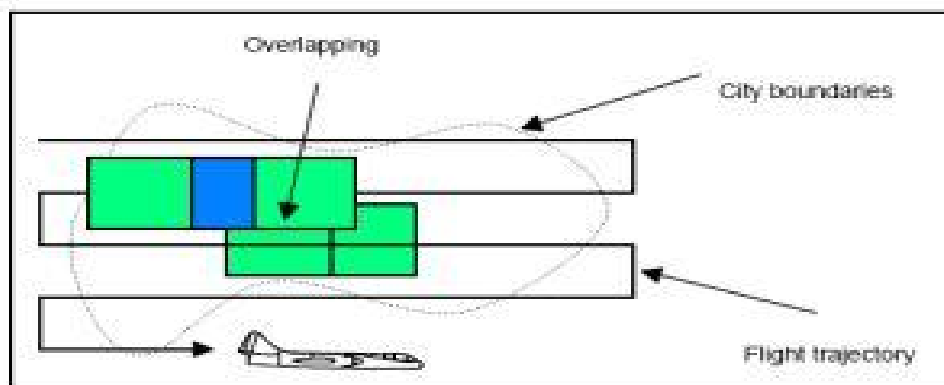
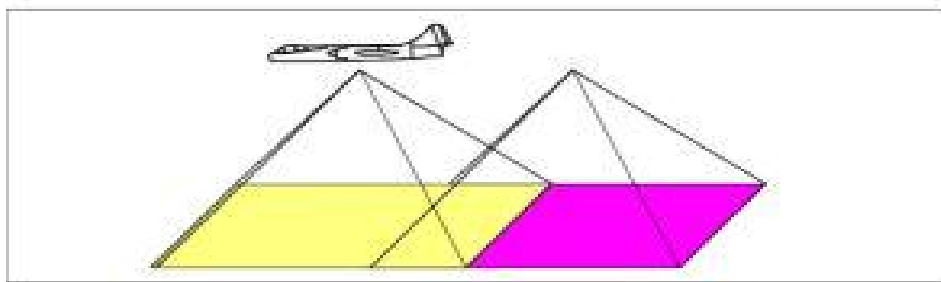


Figure II.8 : Ensemble de clichés effectués à plusieurs kilomètres d'altitude.

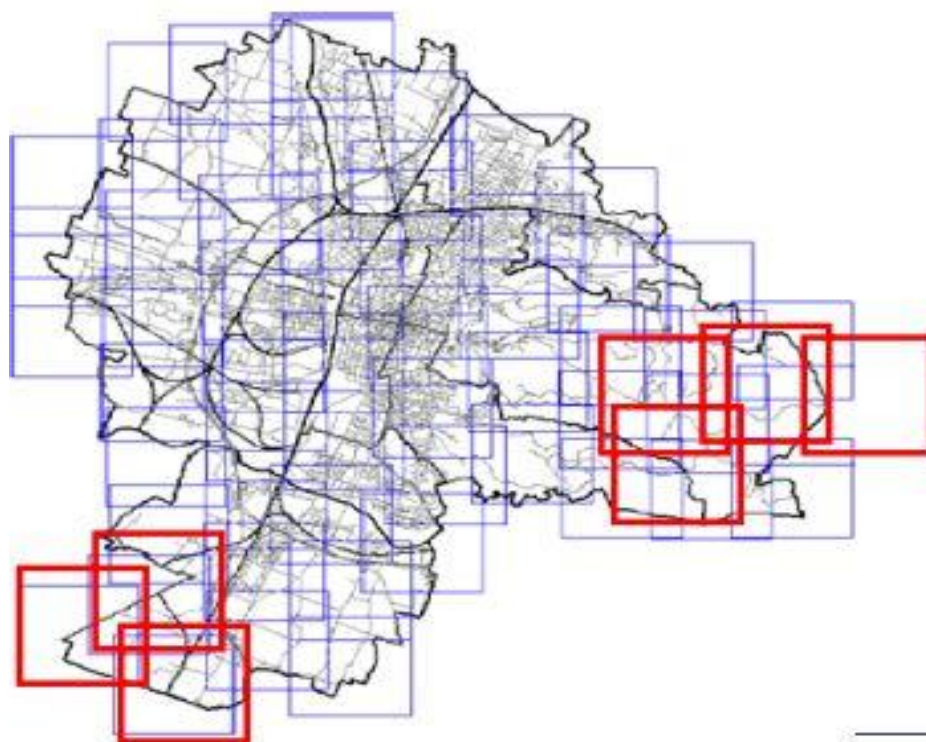


Figure II.9 : Exemple de canevas de photos aériennes.

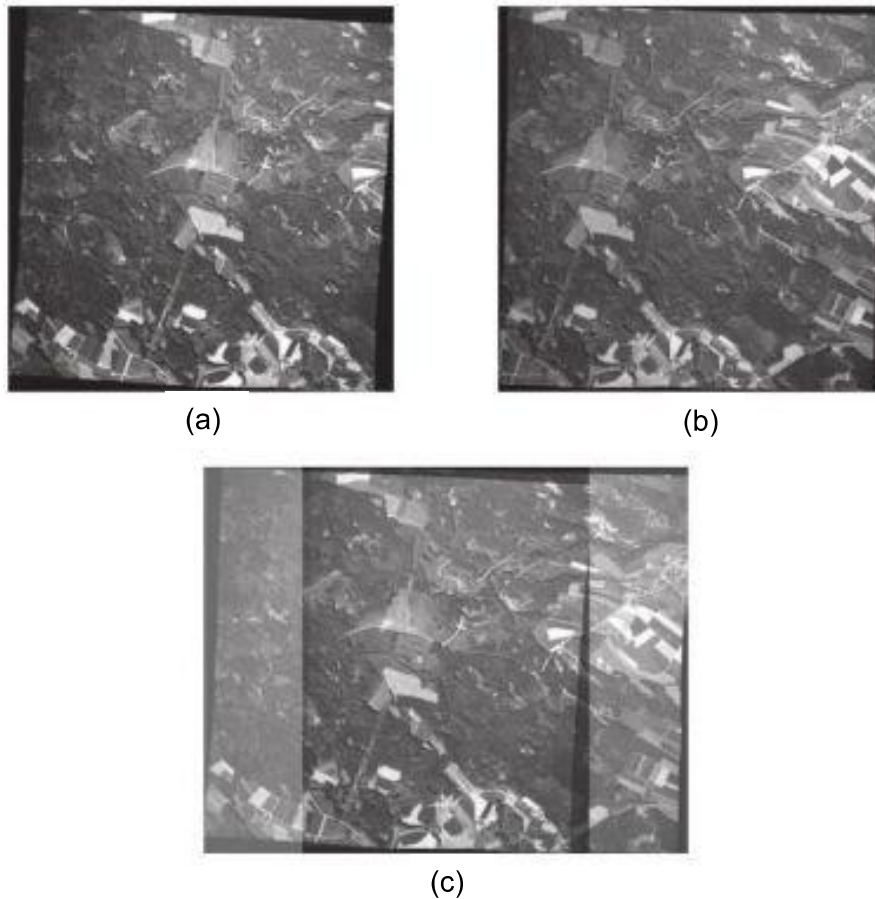


Figure II.10 : Couple de stéréoscopique et leur zone de recouvrement :
(a) cliché 1 ; (b) cliché 2 ; (c) zone de recouvrement des cliché 1 et 2.

II.2.4. Images satellites

Les satellites d'observation de la terre, fournissent des données transmises sous forme d'images numériques en mode raster (Figure II.11). Les données doivent subir certains traitements rectificatifs avant de les intégrer dans un SIG.



Figure II.11 : Image satellite prise par le satellite Ikonos.

II.2.5. Global Positioning System (GPS)

Le système GPS (Figure II.12 (a)) permet le calcul à l'aide des stellites (Figure II.12 (b, c)) la position (coordonnées avec une précision de quelques centimètres voire même quelques millimètres).

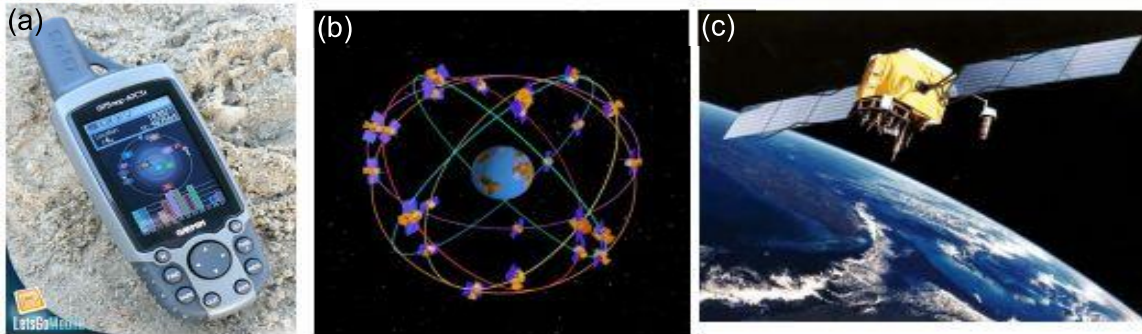


Figure II.12 : (a) système de localisation par satellite (GPS) et satellites (b et c).

II.2.6. Digitalisation

La digitalisation (Figure II.13) est adaptée à la représentation vectorielle. Ce mode de saisie permet de conserver la précision des informations présentes dans le document de base. Un traitement préalable sur les documents de base peut s'avérer nécessaire si ceux-ci sont trop chargés.

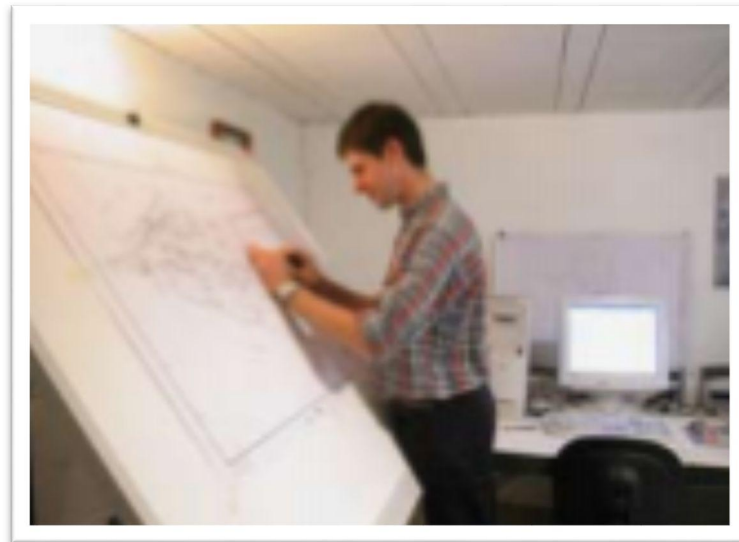


Figure II.13 : Une table de digitalisation.

II.2.7. Scannage de plans

Convient parfaitement à la représentation raster (Figure II. 14). Ce mode de saisie est rapide et peu coûteux. L'inconvénient de cette méthode est la retranscription des erreurs dues au support d'origine (déformation du papier, épaisseur du trait, etc.). Si la donnée est scannée et géoréférencée c'est de la donnée «raster ».

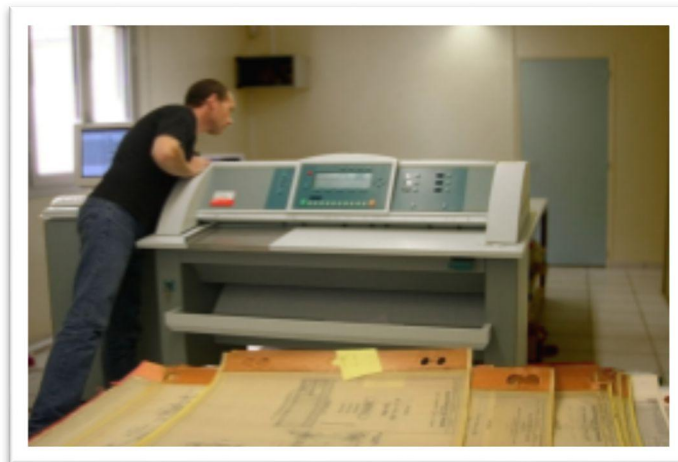


Figure II. 14 : Scanner automatique, utiliser pour le scannage de plans.

II.3. Base de données géographique

Les SIG intègre une base de données (Figure II.15) qui permet de stocker les données spatiales et les données attributaires. La base est constituée d'une série de couches d'information géographique organisées de façon efficace pour être

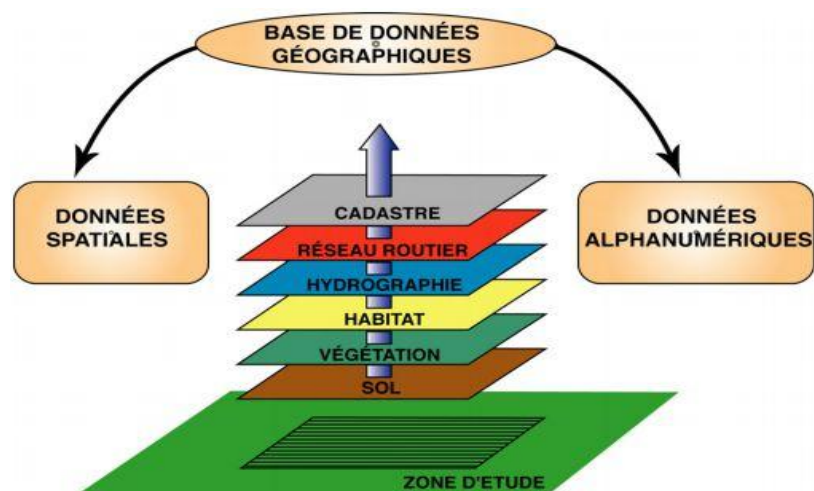


Figure II.15 : Représentation schématique d'une base de données géographique (ensemble de couches superposables).

utilisée par une ou plusieurs applications. Il faut noter que les données doivent être rendues « superposables », c'est-à-dire dans le même système de coordonnées ou dans des systèmes compatibles (une « transformation géographique » permettant de passer d'un système à l'autre).

III. Notions spatiales fondamentales

III.1. Systèmes de référence géographique

III.1.1. Coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques d'un point de la surface terrestre sont sa longitude et sa latitude.

Longitude (lambda) : La longitude λ (Figure III.1 (a)) d'un point est l'angle formé par le plan méridien contenant ce point avec un plan méridien pris comme origine.

La longitude se compte de 0 à 180 degrés (ou de 0 à 200 grades) à l'est et à l'ouest de la méridienne origine.

Latitude (phi) : La latitude ϕ (Figure III.1 (a)) d'un point est l'angle formé par la normale à l'ellipsoïde passant par ce point et le plan de l'équateur. Elle se compte de 0 à 90 degrés (ou de 0 à 100 grades) au nord et au sud de l'équateur.

Azimut (Az) : L'azimut (noté Az) (Figure III.1 (b)) d'une direction AB

est l'angle que forme cette direction avec le méridien du lieu, c'est-à-dire le nord géographique. La direction du nord géographique est caractérisée dans l'hémisphère nord par l'étoile polaire, qui est presque alignée sur l'axe des pôles.

III.1.2. Géoïde, Ellipsoïde et Datum

III.1.2.1. Un géoïde

Est une représentation de la surface terrestre plus précise que l'approximation sphérique ou ellipsoïdale (Figure III.2). Il correspond à une équipotentielle du

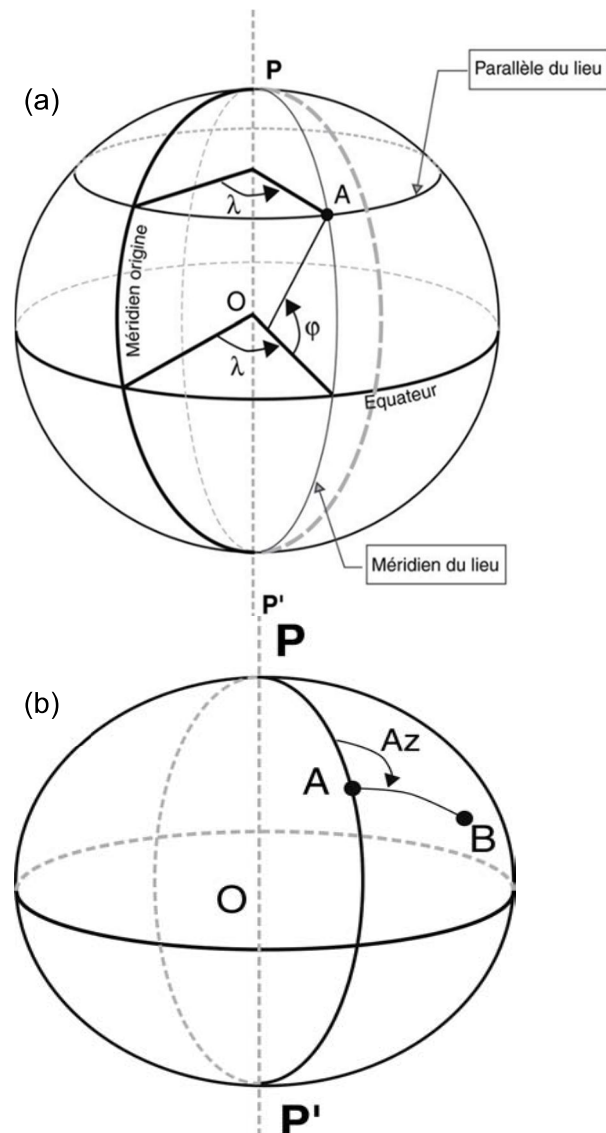


Figure III.1 : représentation de longitude, latitude et azimut.

champ de gravité terrestre, choisie de manière à coller au plus près à la « surface réelle ». Il sert de zéro de référence pour les mesures précises d'altitude. Mais cette surface irrégulière est difficile à utiliser dans les calculs, et on préfère alors utiliser un ellipsoïde.

III.1.2.2. Un ellipsoïde

Est une surface régulière qui lorsqu'elle est bien choisie (centre, dimensions, orientation, etc.) s'écarte au maximum de quelques dizaines de mètres du géoïde (Figure III.2). L'ellipse est un ovale doté d'un grand axe (l'axe plus long) et d'un petit axe (l'axe plus court). Pour l'ellipsoïde terrestre, le demi-grand axe est le rayon entre le centre de la Terre et l'équateur, alors que le demi-petit axe est le rayon entre le centre de la Terre et le pôle.

III.1.2.3. Un datum (ellipsoïde local ; Figure III.2)

Est créé sur l'ellipsoïde sélectionné et peut incorporer des variations locales d'altitude. Le datum et l'ellipsoïde sous-jacents par rapport auquel les coordonnées d'un jeu de données sont référencées peuvent changer les valeurs de coordonnées.

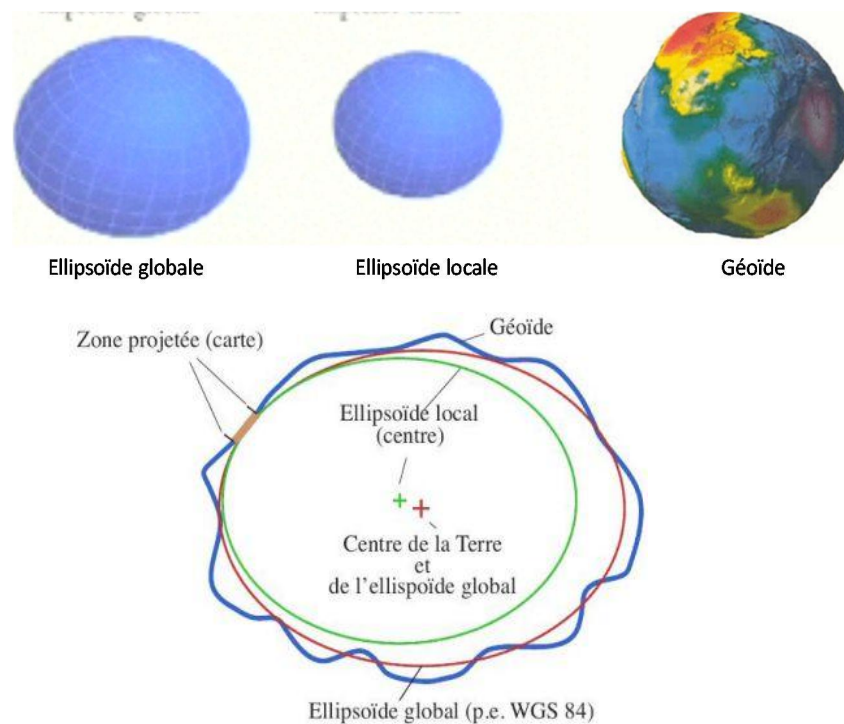


Figure III.2 : Géométrie des surfaces de référence terrestre.

III.1.3. Exemples de systèmes de référence géographique

a) Exemple d'ellipsoïde

- WGS84 : utilisé par le système GPS
- IAG-GRS80 : utilisé en France
- NAD83 : utilisé en Amérique du Nord.

Les deux premiers ellipsoïdes sont quasi-identiques (même demi-axe et même aplatissement).

b) Exemple de système de référence (datum)

- Nouvelle triangulation de la France (NTF) : officiel jusqu'en décembre 2000 ; basé sur l'ellipsoïde Clarke 1880 IGN. Le point fondamental est au Panthéon à Paris.
 - Réseau géodésique français (RGF) 1993 : basé sur l'ellipsoïde IAG-GRS80. Officiel depuis 2000.
 - European Datum (ED) 50 : système européen, basé sur l'ellipsoïde Hayford 1909. Anciennement utilisé en Europe.
 - ETRS89 : basé sur IAG-GRS80. Officiel en Europe.
 - World Geodetic System (WGS84) : système mondial (pas de point fondamental), mis au point par le Département de la Défense des États-Unis et utilisé par le GPS, basé sur l'ellipsoïde WGS84. Peu Précis. Une version précise existe : ITRS
- RGF 1993, ETRS89 et WGS84 sont compatibles pour l'essentiel des applications.

III.2. Systèmes Projections cartographiques

Projections géographiques : Permet de représenter la sphère ou l'ellipsoïde sur une surface qui peut être un plan ou déroulable en un plan (cylindre, cône, etc.).
Mathématiquement : transformation (lon. lat.) à (x, y). x et y sont exprimés en mètre par rapport à l'origine (Figure III.3).

Il existe un grand nombre de types de projection présentent toutes des défauts et des avantages (Bugayevskiy et Snyder, 1995). Il faut donc choisir la meilleure en fonction de l'application :

- en fonction de l'étendue de la carte (monde, continent, pays, régions, etc.). Plus l'étendue est grande, plus les déformations sont importantes. Mais souvent, on attend des cartes de faible étendue d'être très précises (ex : cadastre).
- en fonction du type de traitement/d'affichage : en statistique : conservation des aires, en navigation : conservation des angles.
- en fonction de la région (ex : polaire ou non).
- pour des raisons légales, historiques, et/ou de disponibilité des informations (ex : cadre européen).

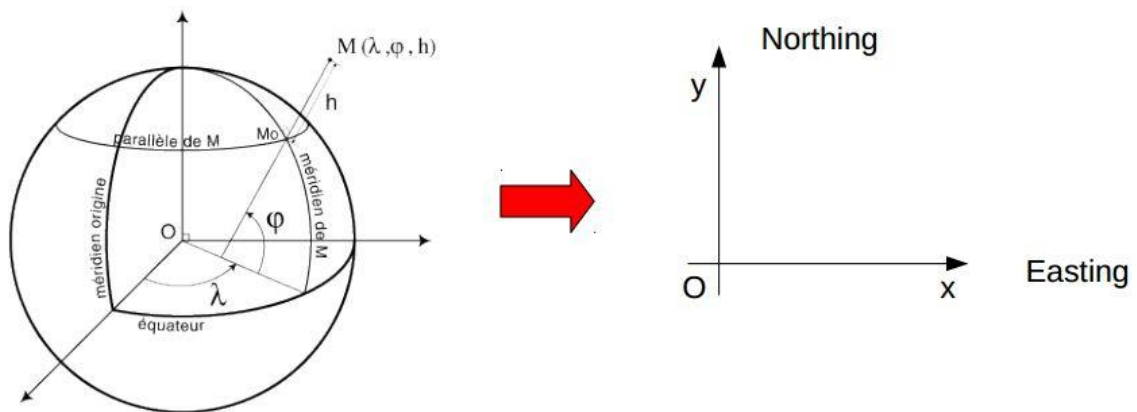


Figure III.3 : La transformation de (lon. lat.) à (x, y), x et y sont exprimés en mètre par rapport à l'origine.

Les projections peuvent être classées selon la surface sur laquelle on fait la projection (Figure III.4).

- *Les projections cylindriques* : la surface de référence à la forme d'un cylindre, tangent ou sécant à l'ellipsoïde.
- *Les projections coniques* : la surface projetée est un cône tangent ou sécant à la sphère.
- *Les projections azimutales (sur un plan)* : consiste à projeter une portion de l'ellipsoïde sur un plan tangent à la sphère (ce type de projection est aussi appelé projection perspective ou projection zénithale).

- Les projections uniques (toutes les autres) : il n'y a pas nécessaire de “surface” d'ailleurs.

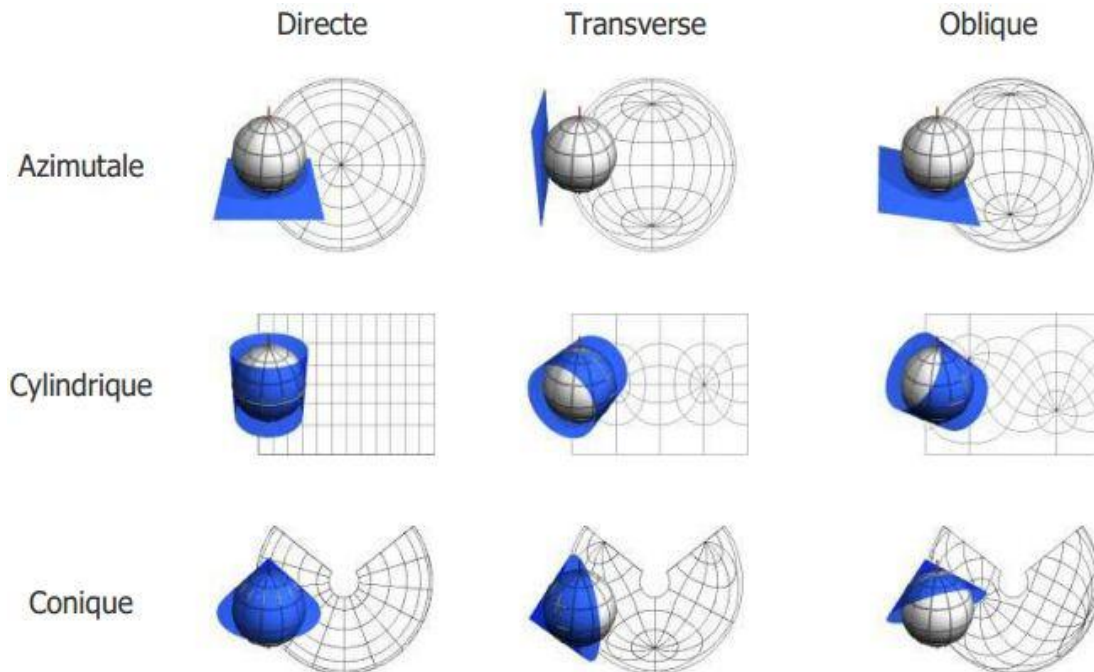


Figure III.4 : Les types de projections cartographiques .

Chacune des projections peut être en plus : direct, transverse, oblique (Figure III.4). Cette classification ne donne pas suffisamment d'information pour caractériser complètement un type de projection.

Propriétés importantes des projections :

- ✓ Projection équivalente : conserve localement les aires (ex : Figure III.5 (c)).
- ✓ Projection conforme : conserve localement les angles, donc les formes (ex : Figures III.5 (b) et (d)).
- ✓ Projection aphyllactique : ne conserve ni les angles (conforme) ni les surfaces (équivalente). Les projections équidistantes (ne déforme pas les distances) (ex : Figure III.5 (a)) sont classées dans cette catégorie.

Parfaitement conforme et équivalent est impossible. Les projections ont divers degrés de conformité ou d'équivalence, et ceci dépend du lieu (Tableau III.1).

Tableau III.1 : Les principaux systèmes de projections utilisés dans le monde

Azimuthal Equidistant Projection	Polyconic Projection
Gnomonic Projection	Miller Cylindrical Projection
Orthographic Projection	Gall Stereographic Projection
Geostationary Projection	Lambert Conformal Projection
Near-Sided Perspective Projection	Lambert Azimuthal Equal Area Projection
Mollweide Projection	Stereographic Projection
Robinson Projection	Equidistant Conic Projection
Sinusoidal Projection	Albers Equal Area Projection
Equidistant Cylindrical Projection	Polar Stereographic Projection
Cassini Projection	Polar Lambert Azimuthal Projection
Mercator Projection	Polar Azimuthal Equidistant Projection
Transverse Mercator Projection	McBryde-Thomas Flat Polar Quartic
Oblique Mercator Projection	van der Grinten Projection

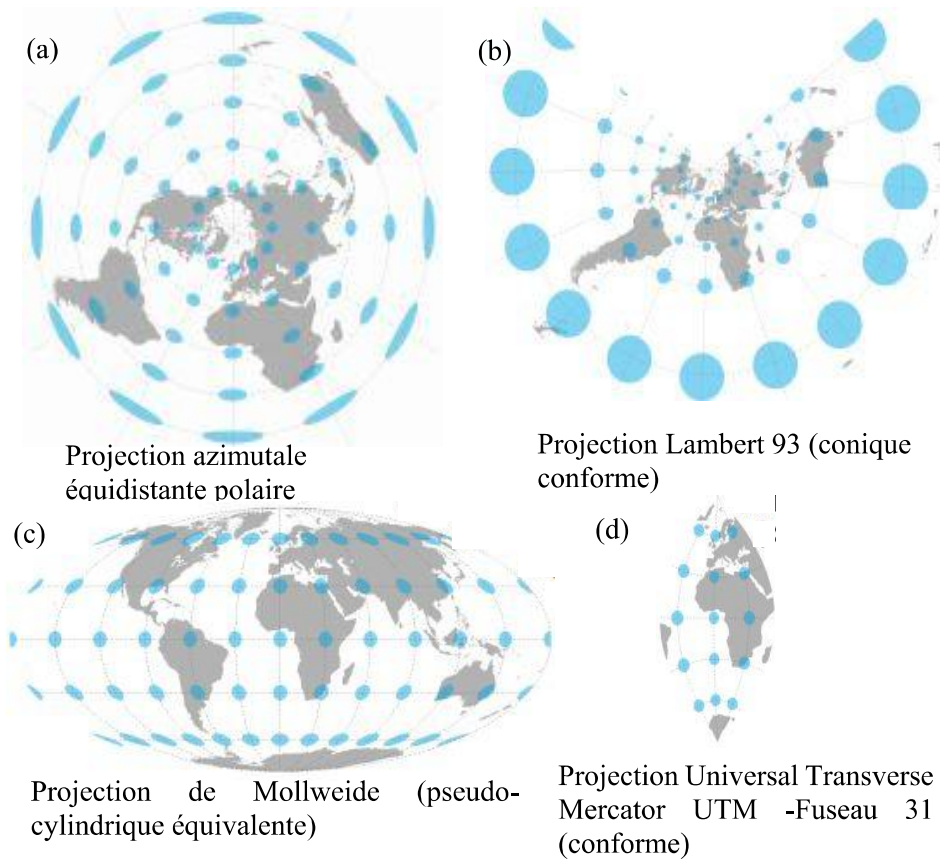



Figure III.5 : Quelques systèmes de projections utilisés dans le monde.

 *Cas particuliers et importants de projection (Universal Transverse Mercator UTM)*

Ce système est un type de projection adaptée aux cartes à haute échelle (fine résolution). Les paramètres de la projection (centre) est variable sur le globe pour chaque zones «prédéfinies». Il y a 20 bandes de latitude (entre 84°N-80°S) et 60 bandes en longitude (1200 zones) (Figure III.6). La plupart des zones sont régulières. Les coordonnées (x, y) donne la position dans une zone. “y” est en mètre par rapport à l'équateur. “x” par rapport au méridien central de la zone. Mais, pour éviter les nombres négatifs, on ajoute un “false easting” de 500000 m à x, et si le point est dans l'hémisphère sud un false northing de 10000000 m. Une coordonnée UTM s'exprime par : Numéro de la zone (Nord ou Sud) ou la lettre de la zone et les coordonnées x et y. C'est une projection qui est conforme. C'est à dire qu'elle représente fidèlement les petites formes et qu'il y a une distorsion très minimale.

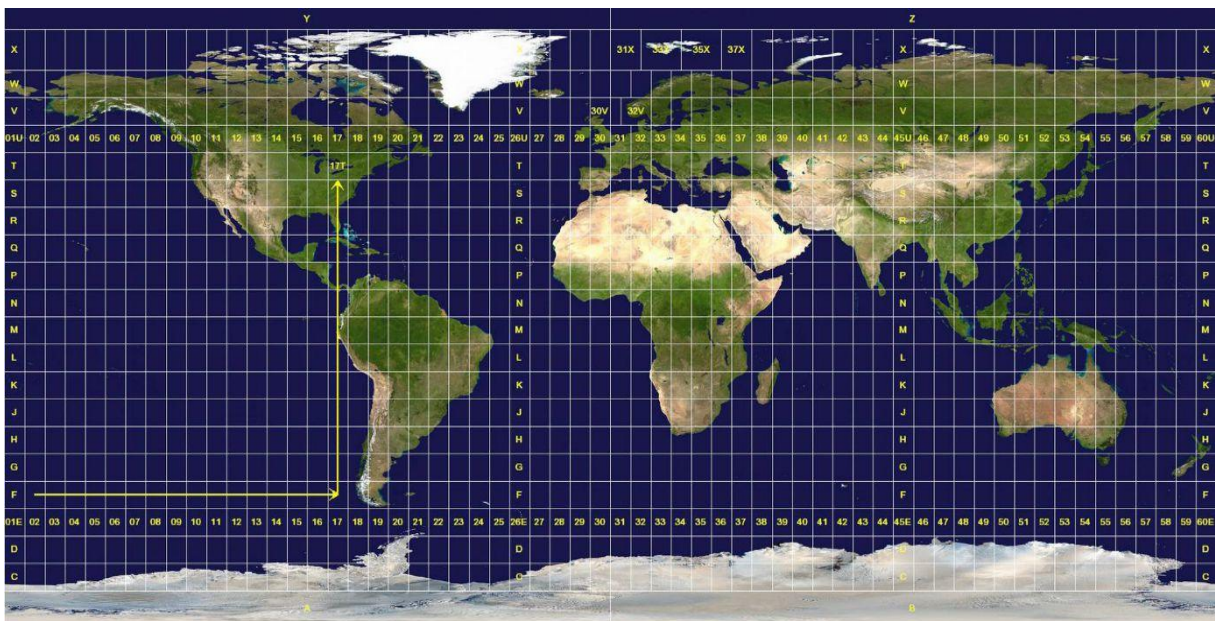


Figure III.6 : Projection Universal Transverse Mercator (UTM).

IV. Analyse spatiale

IV.1. Quelques définitions de l'analyse spatiale

- «étude formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace produit et vécu par les sociétés humaines» (Pumain et Saint-Julien, 2010).
- «Rechercher, dans les caractères d'unités spatiales, ce qui relève de leur position géographique, en particulier relative, ce qui oblige à modéliser la structure spatiale» (Charre, 1995).
- «Ensemble de méthodes mathématiques et statistiques visant à préciser la nature, la qualité, la quantité attachées aux lieux et aux relations qu'ils entretiennent -l'ensemble constituant l'espace- en étudiant simultanément attributs et localisations» (Brunet, Ferras and Théry, 1997).
- «C'est un processus cognitif et itératif qui utilise différents opérateurs, dont un spatial au moins, pour déduire les caractéristiques descriptives ou spatiales d'un phénomène isolé, réel ou simulé dans l'espace» (Champoux et Bédard, 1992).

IV.2. Analyse spatiale en mode vecteur

IV.2.1. Opérateurs d'analyse spatiale en mode vecteur

IV.2.1.1. Opérateurs attributaires

IV.2.1.1.1. Opérateurs arithmétiques

Les opérateurs arithmétiques s'appliquent en règle générale aux attributs de valeur cardinales. Toutefois, l'informatique autorise une utilisation de tels opérateurs pour des attributs de type ordinal et nominal, l'analyse doit donc rester vigilante à ce propos. Le Tableau IV.1 donne la liste des opérateurs arithmétiques. Leur applicabilité selon l'échelle de mesure est marquée par un ●

Tableau IV.1 : Opérateurs arithmétiques.

OPÉRATEUR	DESCRIPTION	CARDINAL	ORDINAL	NOMINAL
+	Opérateur d'addition	●		● (1)
-	Opérateur de soustraction	●		
*	Opérateur de multiplication	●		● (1)
/	Opérateur de division	●		
^	Opérateur exponentiel	●		
MOD	Opérateur modulo	●		

IV.2.1.1.2. Opérateurs logiques (AND/ET, OR/OU)

Les opérateurs logiques permettent de combiner plusieurs conditions (where) au sein de la même requête (Tableau IV.2). Ils sont utilisés dans le but de resserrer ou déléger les résultats d'une requête.

La combinaison d'opérateurs logiques permet d'obtenir des réponses nuancées. Le Tableau IV.3 présente quelques exemples de combinaison et leur résultat dans un diagramme de Venn (Venn, 1880).

Tableau IV.2 : Opérateurs logiques.

Opérateur	Description	Exemple	Diagramme
AND	Opérateur logique « et »	A AND B	
OR	Opérateur logique « ou », appelé également « ou inclusif »	A OR B	
NOT	Opérateur logique « et non »	A NOT B	
XOR	Opérateur logique « ou et uniquement ou », appelé également « ou exclusif »	A XOR B	

Tableau IV.3 : Exemples de combinaison d'opérateurs logiques.

COMBINAISON	DIAGRAMME	EXEMPLE
A AND B AND C		sélectionner les champs irrigués de M. Keharbhai Moti dédiés au coton SELECT * FROM [Cultivated Fields] WHERE [Owner] = "Keharbhai Moti" AND [Crop Type] = "cotton" AND [Irrigation] = 1
(A AND B) OR C		sélectionner les champs de M. Keharbhai Moti dédiés au coton ou les champs irrigués SELECT * FROM [Cultivated Fields] WHERE (([Owner] = "Keharbhai Moti" AND [Crop Type] = "cotton") OR [Irrigation] = 1
A AND (B OR C)		sélectionner les champs de M. Keharbhai Moti dédiés au coton ou irrigués SELECT * FROM [Cultivated Fields] WHERE [Owner] = "Keharbhai Moti" AND (([Crop Type] = "cotton" OR [Irrigation] = 1)
A AND (B XOR C)		sélectionner les champs de M. Keharbhai Moti soit dédiés au coton, soit irrigués, mais pas les deux SELECT * FROM [Cultivated Fields] WHERE [Owner] = "Keharbhai Moti" AND (([Crop Type] = "cotton" XOR [Irrigation] = 1)
(A OR B) NOT C		sélectionner les champs irrigués de M. Keharbhai qui ne sont pas dédiés à la culture du coton SELECT * FROM [Cultivated Fields] WHERE (([Owner] = "Keharbhai Moti" OR [Irrigation] = 1) NOT ([Crop Type] = "cotton"
A OR (B XOR C)		sélectionner les champs qui appartiennent à M. Keharbhai Moti ou qui sont soit irrigués soit dédiés au coton SELECT * FROM [Cultivated Fields] WHERE [Owner] = "Keharbhai Moti" OR (([Irrigation] = 1 XOR ([Crop Type] = "cotton"))

IV.2.1.1.3. Opérateurs de comparaison

Les opérateurs de comparaison confrontent la valeur d'attribut d'un objet à un critère de sélection. Cette comparaison peut être mise en œuvre pour les variables cardinales, ordinales, et nominales. Le Tableau IV.4 reprend les principaux opérateurs de comparaison et définit leur applicabilité, signalée par un ● en fonction de l'échelle de mesure.

Tableau IV.4 : Operateurs de comparaison.

Opérateur	Description	Cardinal	Ordinal	Nominal
=	Opérateur d'égalité	●	●	●
<	Opérateur d'infériorité	●	●	
>	Opérateur de supériorité	●	●	
<=	Opérateur d'infériorité et de supériorité	●	●	
>=	Opérateur de supériorité et d'égalité	●	●	
<>	Opérateur d'inégalité	●	●	●

IV.2.1.2 Opérateurs spatiaux métriques ou dimensionnels

Utilisés pour connaître ce qui est mesurable dans une entité géométrique ou entre plusieurs entités géométriques. Sont basés sur l'information métrique de la géométrie des entités géographiques.

#Information métrique codée (Figure IV.1)

- Position
- Longueur d'un arc
- Périmètre d'un polygone
- Surface d'un polygone

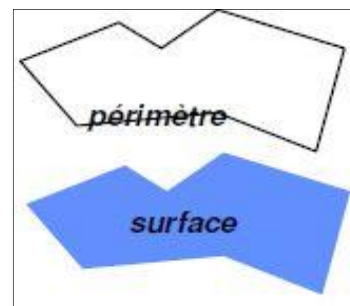


Figure IV.1 : Exemples de l'information métrique codée.

#Information métrique calculée (Figure IV.2)

- Orientation d'un segment
- Distance euclidienne
- Distance de long d'un graph
- Sélection dans un rayon déterminé

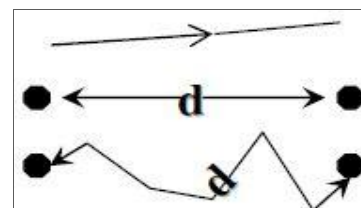


Figure IV.2 : Exemples de l'information métrique calculée.

IV.2.1.3. Opérateurs spatiaux topologique

Sont utilisés pour décrire et distinguer les relations spatiales qui existent entre les entités géométriques.

IV.2.1.3.1. Relation topologique 2D (Tableau IV.5)

Tableau IV.5 : Opérateurs topologique 2D.

OPÉRATEUR	DESCRIPTION	DIAGRAMME
disponible par négation de Touches	Deux objets sont dits disjoints si ni leur bord ni leur corps intérieur ne se touchent	
Adjacent	Deux objets sont dits adjacents si leurs bords uniquement se touchent	
Intersects	Deux objets présentent une intersection si il y a une zone d'intersection non nulle entre leurs corps intérieurs	
Contains	Un objet en contient un autre si son corps intérieur enveloppe entièrement le bords de l'objet contenu	
Touches	Un objet touche un autre si soit son bord soit son corps le touche. Touches correspond à l'union des opérateurs Adjacent, Intersects et Contains.	
pas disponible	Deux objets sont dits égaux si leurs bords et leurs corps intérieurs sont identiques	

IV.2.1.3.2. Opérateurs spatiaux topologiques concernant une couche

#Agrégation : fusion de polygones (Figure IV.3).

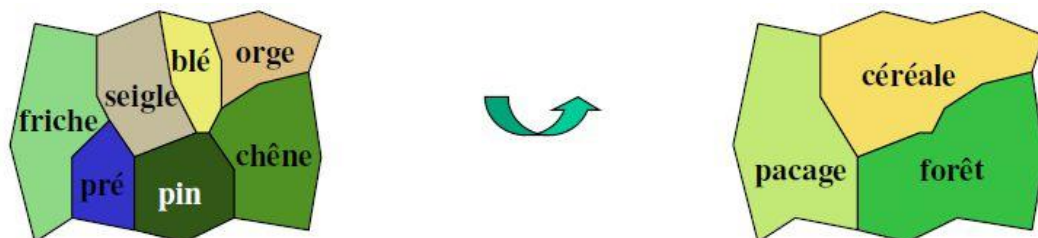


Figure IV.3 : Exemple de fusion de polygones.

#Généralisation : changement de géométrie (Figure IV.4).

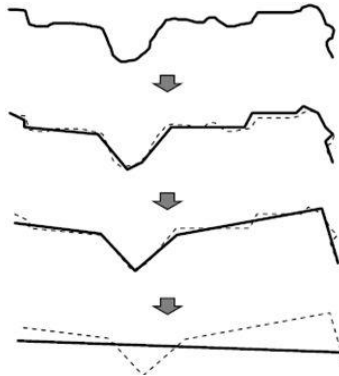


Figure IV.4 : Exemple de généralisation.

#Distance par zone tampon : traitement des inclusions et distances euclidiennes (Figure IV.5).

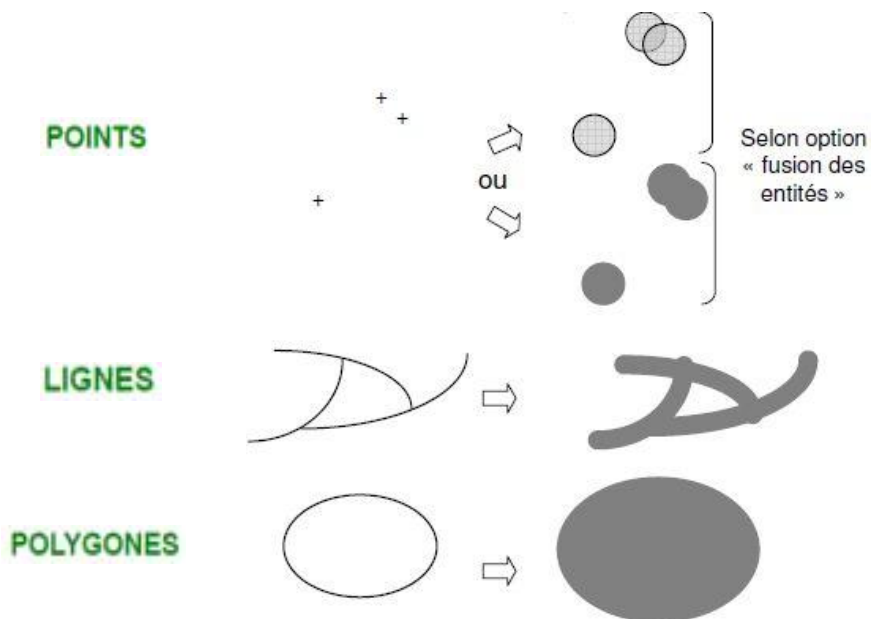


Figure IV.5 : Exemples de la fonction buffer appliquée à un point, une ligne et un polygone.

IV.2.1.3.3. Opérateurs spatiaux topologiques concernant deux couches

+ *Intersection* : cette opération coupe une couche d'entree avec les entités d'une couche de recouvrement pour produire une couche de sortie composée

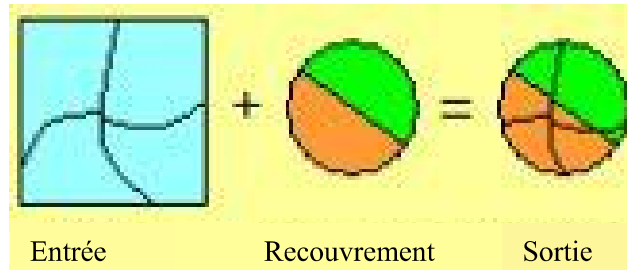


Figure IV.6 : Intersection de deux couches.

entités ayant des attributs de données des deux couches (Figure IV.6).

+ *Union* : cette opération combine les entités d'une couche d'entrée avec les polygones d'une couche de recouvrement, produisant ainsi une couche de sortie contenant les attributs et l'étendue géographique des deux couches (Figure IV.7).

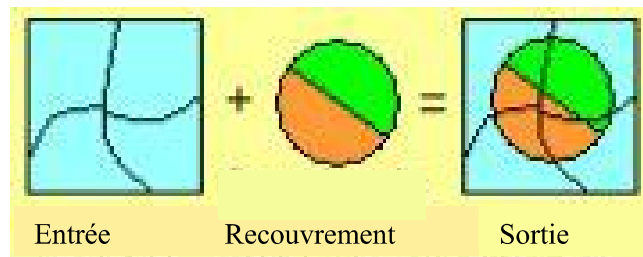


Figure IV.7 : Union entre deux couches.

+ *Différence* (Figure IV.8)

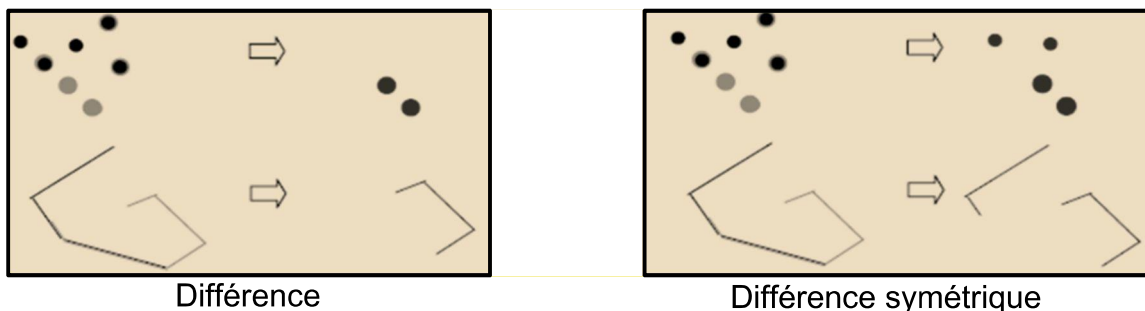


Figure IV.8 : Exemple de différence et différence symétrique.

Fonctions de «découpages-rapiécage» (Figure IV.9)

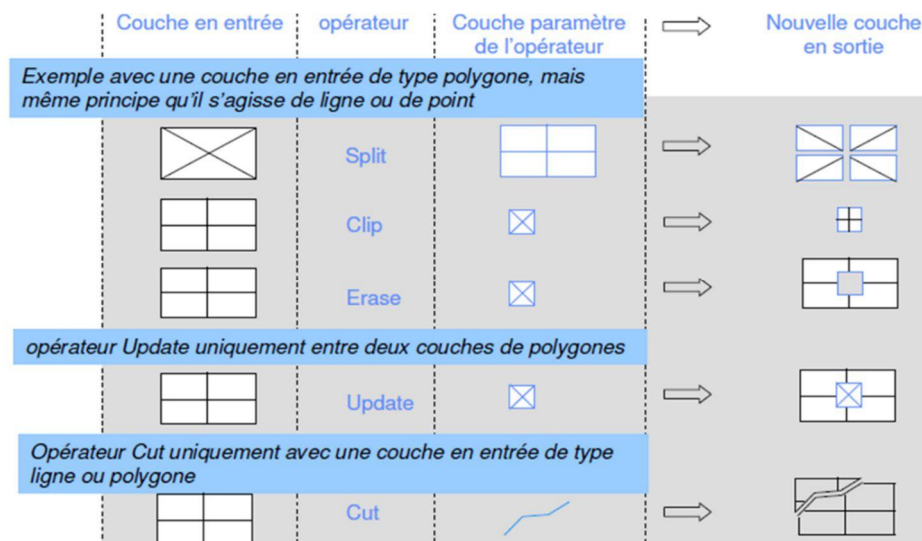


Figure IV.9 : Différents opérateurs de découpage et rapiécage.

IV.2.1.3.4. Opérateurs spatiaux topologiques pour une topologie de réseau

Ces opérateurs (Figure IV.11) permettent le calcul de chemin suivant ces étapes:

- 1) connexion des lignes et nœuds.
- 2) Règles de circulation des flux a travers les différents éléments du réseau (ligne et nœud).
- 3) Affectation éventuelle de poids au différents éléments du réseau.
- 4) Prise en compte momentanée de la fermeture d'une partie de réseau.

• DISTANCE SUR RESEAU : traitement de la continuité

• NOEUDS

• LIGNES = TRONCONS DE RESEAU

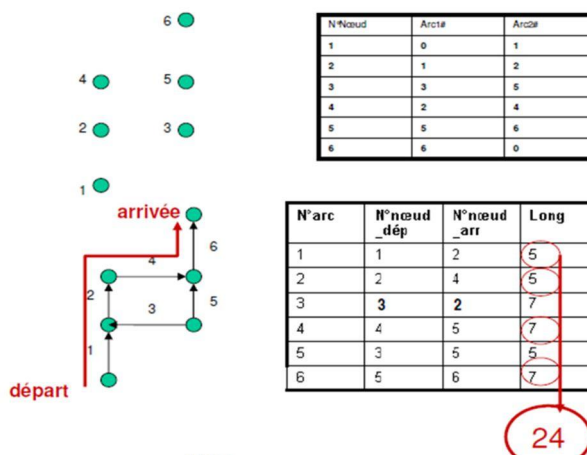


Figure IV.11 : Exemple d'opérateurs spatiaux de calcul de distance

IV.2.1.4. Opérateurs spatiaux statistiques

Les opérateurs statistiques ont pour but de calculer des indicateurs statistiques basés sur les valeurs de champs thématiques. Ils permettent de transformer l'information sous une forme agrégée, comme par exemple la tendance centrale ou la dispersion des valeurs d'attributs des objets. La liste de opérateurs statistiques, proposés par la grand majorité des logiciel SIG, est présentée dans le Tableau IV.6

Tableau IV.6 : Opérateurs statistiques.

Opérateur	Description	Cardinal	Ordinal	Nominal
MAX	Valeur maximale rencontrée	●	●	
MIN	Valeur minimale rencontrée	●	●	
MEAN	Moyenne des valeurs	●		
STDDEV	Ecart type associé à la moyenne	●		
VAR	Variance associée à la moyenne	●		
SUM	Somme des valeurs	●	●	
COUNT	Nombre d'objets décomptés	●	●	●

IV.3. Analyse spatiale en mode raster

IV.3.1. Opérateurs raster

IV.3.1.1. Fonctions locales

Les opérations locales, ou fonctions par cellule, calculent un jeu de données raster en sortie où la valeur en sortie à chaque emplacement (cellule) est une fonction de la valeur associée à cet emplacement dans un ou plusieurs jeux de données rasters (Figure IV.12). Plus précisément, la valeur de la cellule unique, quelles que soient les valeurs des cellules voisines, à une influence directe sur la valeur de la sortie. Une opération par cellule peut s'appliquer à un ou à plusieurs jeux de données raster. Pour un jeu de données simple, des exemples d'opérations par cellule sont les outils trigonométriques, tels que Tan ou les outils logarithmiques, tels que Log2 (Figure IV.13).

Les opérations locales peuvent être effectuées également sur plusieurs rasters en entrée (Figure IV.14). Dans ce cas, une valeur unique sera renvoyée pour chaque cellule en fonction d'une opération effectuée sur la cellule correspondante dans

chacun des rasters en entrée. Un exemple de ce type d'opération est l'utilisation de l'outil statistiques de cellule : pour chaque cellule en sortie, un calcul statistique (tel que la moyenne ou la plage) est effectué sur les valeurs de cellule de tous les rasters en entrée à l'emplacement correspondant (Figure IV.15).

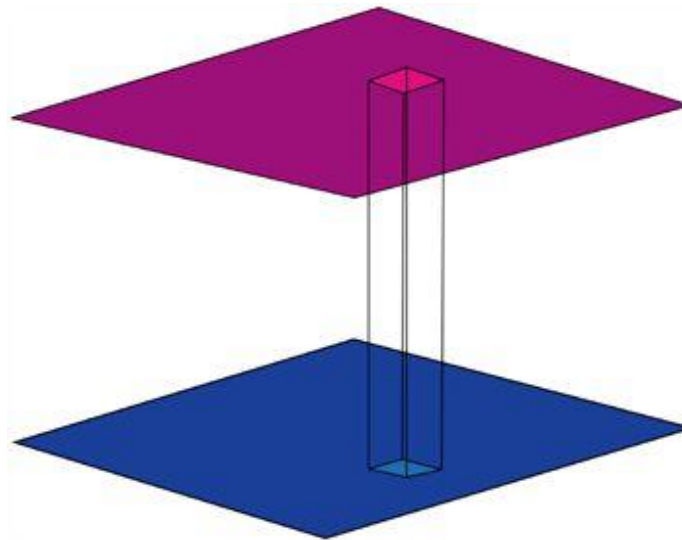


Figure IV.12 : Opération locale dont la valeur en sortie à chaque pixel est une fonction de la valeur associée à ce pixel dans un jeu de donnée raster.

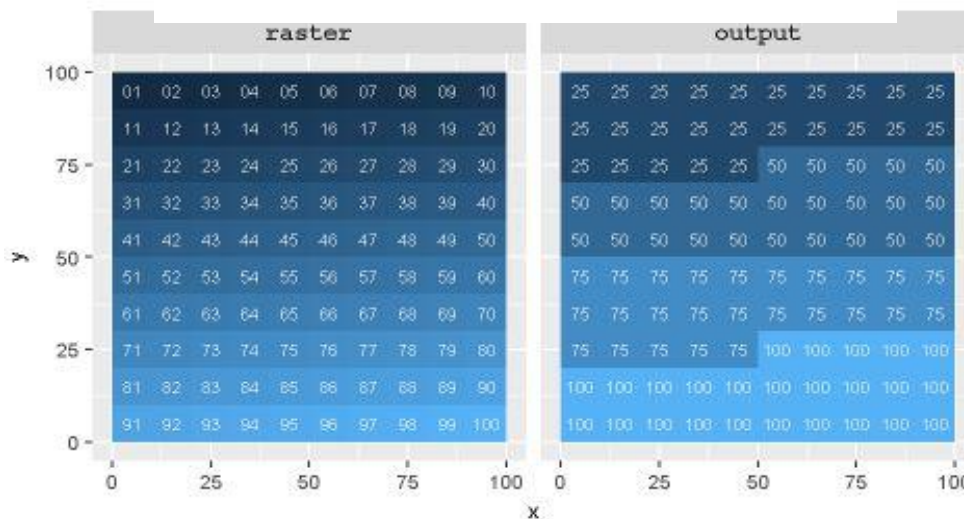


Figure IV.13 : Exemple d'une opération locale ou l'output est le résultat de la reclassification de l'input.

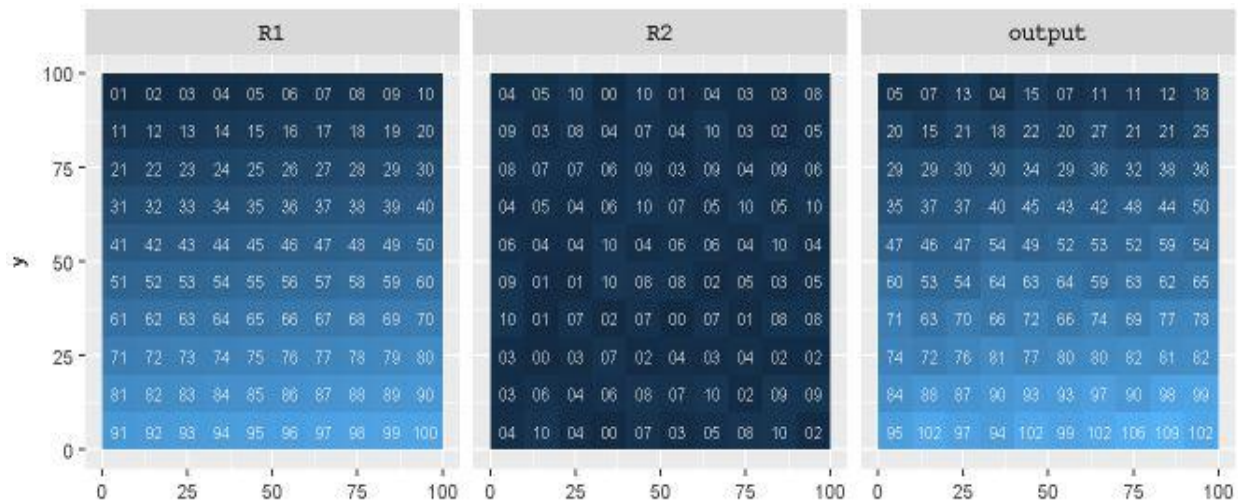


Figure IV.14 : Exemple d'une opération locale ou l'output = (raster1 + raster2).

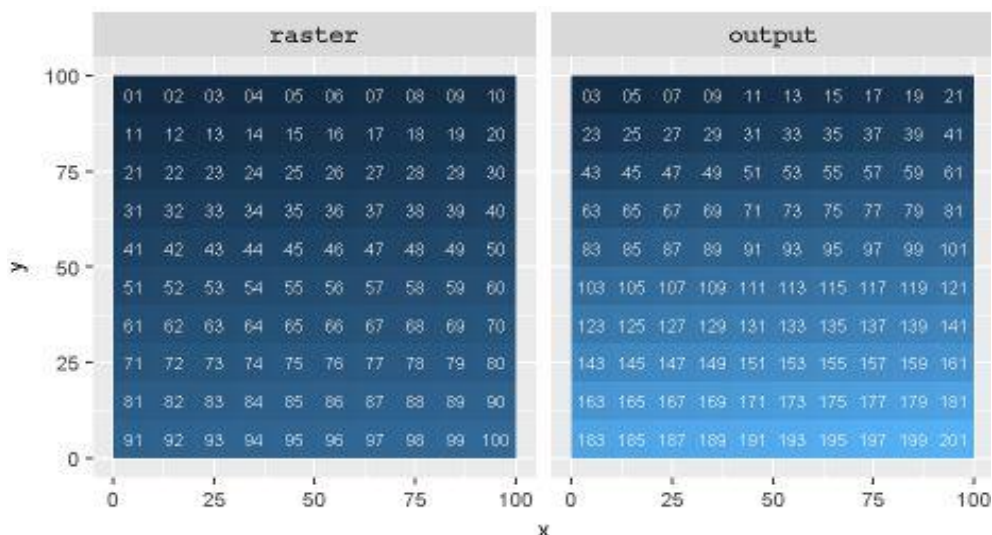


Figure IV.15 : Exemple d'une opération local ou l'output = (2*raster+1).

IV.3.1.2. Fonctions focales

Les opérations focales (ou de voisinage) génèrent un jeu de données raster en sortie dans lequel la valeur en sortie à chaque emplacement de cellule est une fonction de la valeur en entrée à l'emplacement d'une cellule et des valeurs des cellules contenues dans un voisinage spécifié autour de cet emplacement (Figure IV.16). Chaque cellule dans l'entrée étant traitée, le voisinage est essentiellement une fenêtre en mouvement qui se déplace avec elle. La configuration (taille et forme) du voisinage détermine spécifiquement quelles cellules voisines de la

cellule de traitement doivent être utilisées dans le calcul de chaque valeur en sortie (ex : Figures IV.17, IV.18 et IV.19). Le voisinage le plus classique est 3 par 3 cellules, qui comprennent la cellule de traitement et ses 8 voisins les plus proches. Exemple de filtres spatiaux en télédétection ou calcul des pentes ou d'exposition sur un MNT (modèle numérique de terrain).

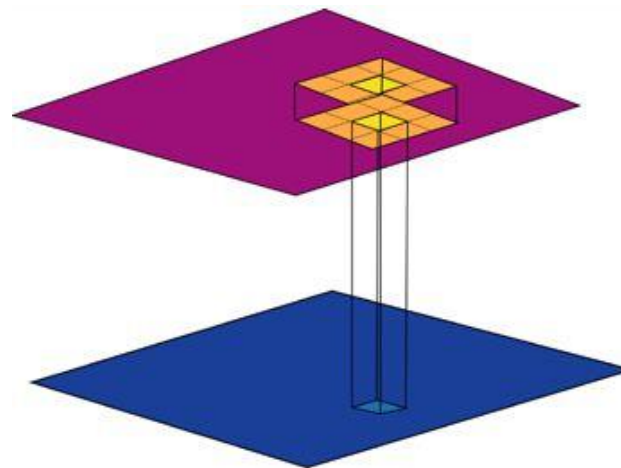


Figure IV.16 : Opération focale dont le voisinage est 3 par 3 cellules.

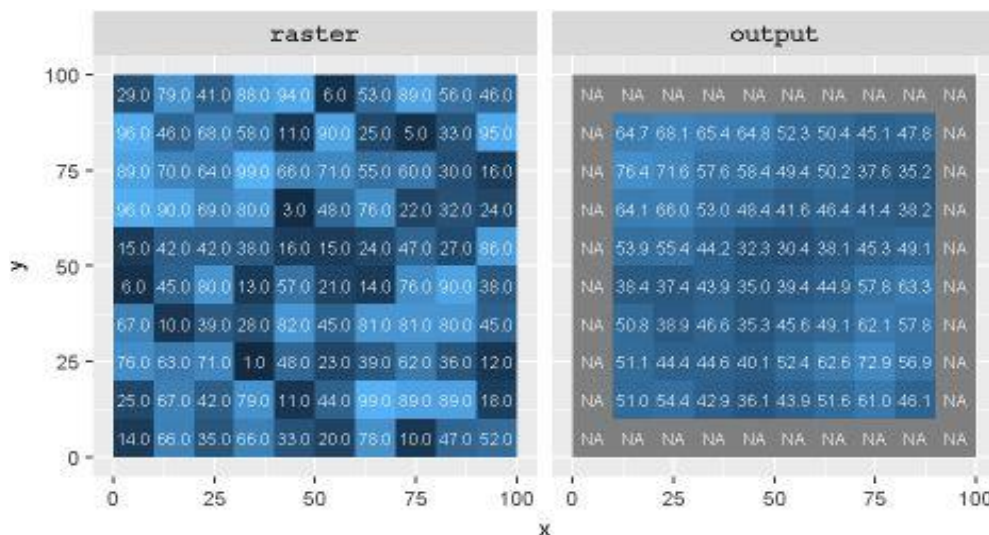


Figure IV.17 : Exemple d'une opération focale où la valeur de chaque pixel de l'output est égale à la moyenne des pixels voisinant ce pixel dans le raster input. Si le pixel focal n'est pas entouré par des pixels, l'output est NA.

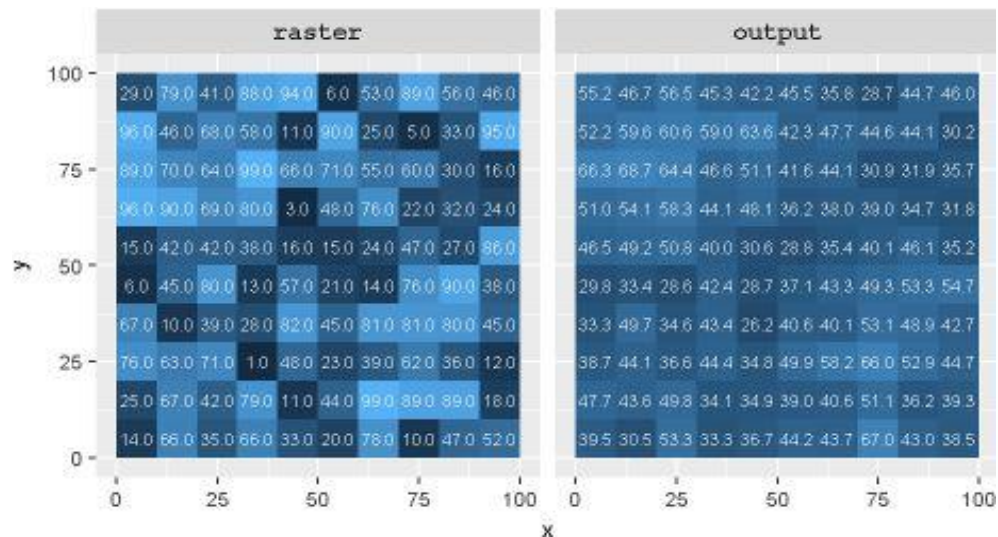


Figure IV.18 : Exemple d'une opération focale ou la valeur de chaque pixel de l'output est calculée par l'application de la fonction kernel dans le raster input.

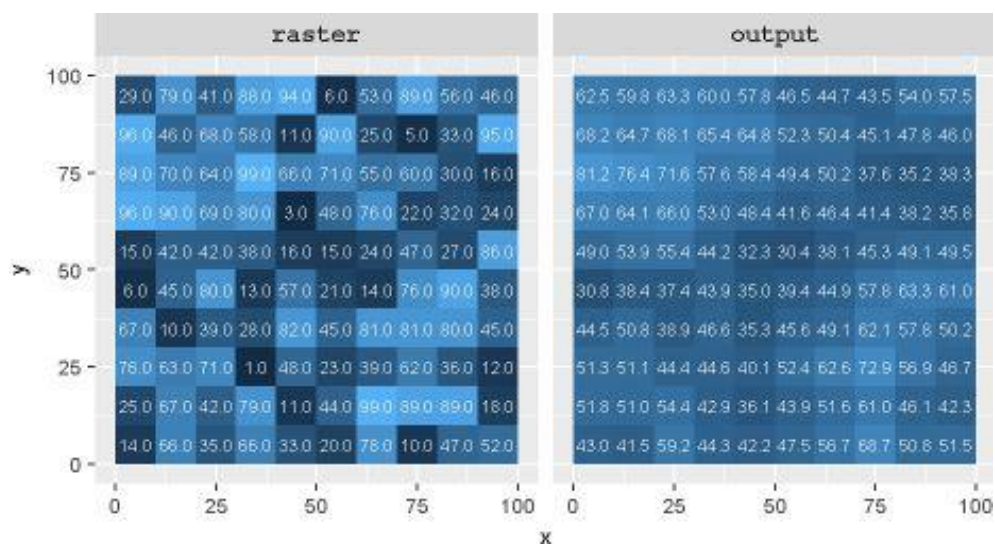


Figure IV.19 : Exemple d'une opération focale ou la valeur de chaque pixel de l'output est égale à la moyenne des pixels voisinant ce pixel dans le raster input. Les pixels focaux non entourés par des pixels, sont ignorés.

IV.3.1.3. Fonctions zonales

Les opérations zonales calculent un jeu de données raster en sortie où la valeur en sortie de chaque emplacement dépend de la valeur de la cellule à l'emplacement et de l'association entre cet emplacement et une zone cartographique (Figure IV.20). Les opérations zonales sont similaires aux opérations focales, à la différence que la définition du voisinage dans une opération zonale correspond à

la configuration des zones mêmes, et non à une forme de voisinage spécifiée. Les zones individuelles peuvent être de toute forme ou taille et peuvent être déconnectées les unes des autres. Les zones peuvent être définies en tant que données raster ou d'entité. Pour les données raster, une zone est constituée de toutes les cellules d'un raster ayant la même valeur. Pour les données d'entité, une zone est constituée de toutes les entités ayant la même valeur attributaire (Figure IV.21).

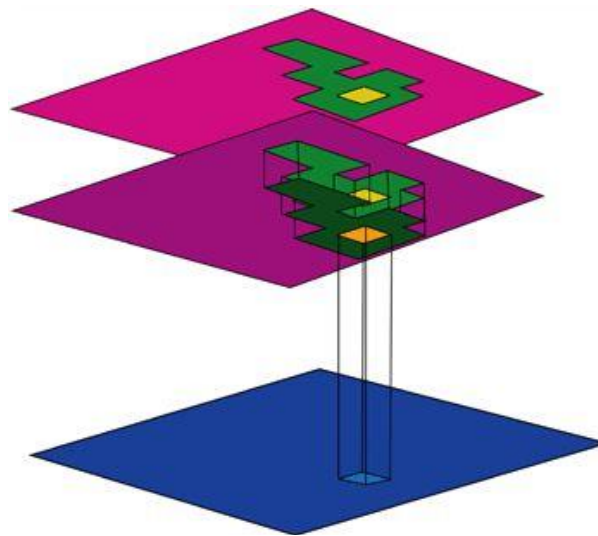


Figure IV.20 : Le calcul du raster de sortie dans une opération zonale.

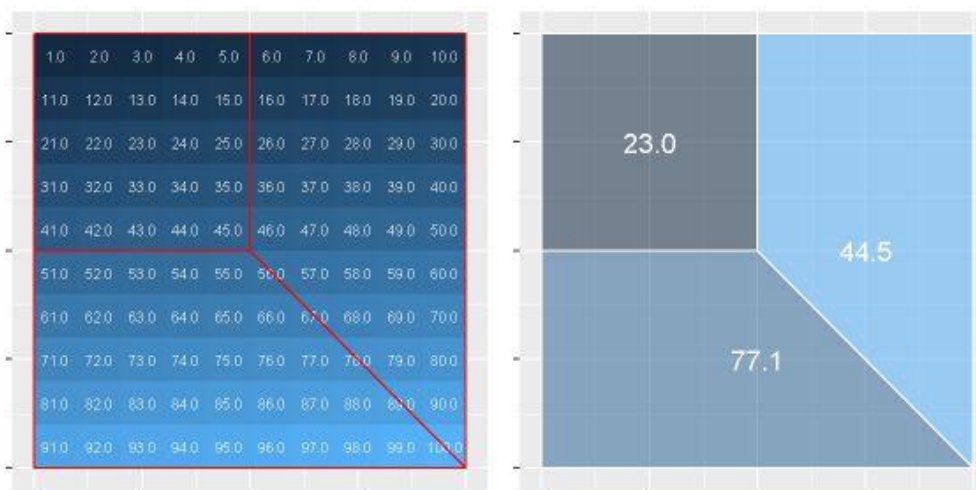


Figure IV.21 : Exemple d'une opération zonale où les valeurs des pixels de raster sortie sont égales à la moyenne des pixels par chacune des zones définies en rouge dans le raster d'entrée.

IV.3.1.4. Fonctions incrémentales ou globales

Les opérations globales calculent un jeu de données raster en sortie dans lequel la valeur en sortie à chaque emplacement de cellule est potentiellement une fonction de toutes les cellules combinées de divers jeux de données raster en entrée. Il existe deux principaux groupes d'opérations globales : distance euclidienne et distance pondérée.

IV.3.1.4.1. Opérations globales de distance euclidienne

Les opérations globales de distance euclidienne affectent à chaque cellule du jeu de données raster en sortie sa distance par rapport à la cellule source la plus proche (Figure IV.22). Un exemple de source peut être l'emplacement à partir duquel démarrer une nouvelle route. La direction de la cellule source la plus proche peut aussi être affectée en tant que valeur de chaque emplacement de cellule dans un jeu de données raster en sortie (Figure IV.23).

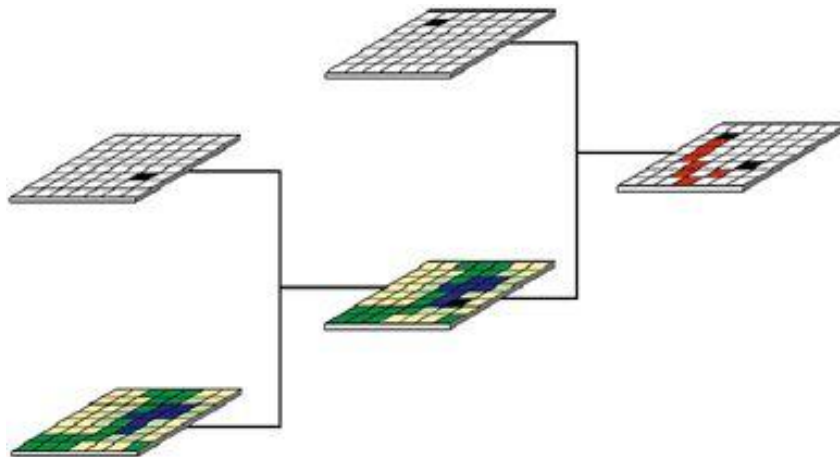


Figure IV.22 : Le calcul de distance euclidienne (exemple d'un opérateur globale).

IV.3.1.4.2. Opérations globales de distance non euclidienne (pondérée)

Les opérations de distance non euclidienne déterminent le coût de déplacement d'une cellule de destination vers la cellule source la plus proche sur une surface, pondéré par un coût en plus de la distance euclidienne. Exemple : la construction d'une route menant du point A au point B, où le chemin le plus court et le plus

direct serait en fait plus cher à construire si la surface est escarpée ou si le sol est trop meuble (marais, par exemple).

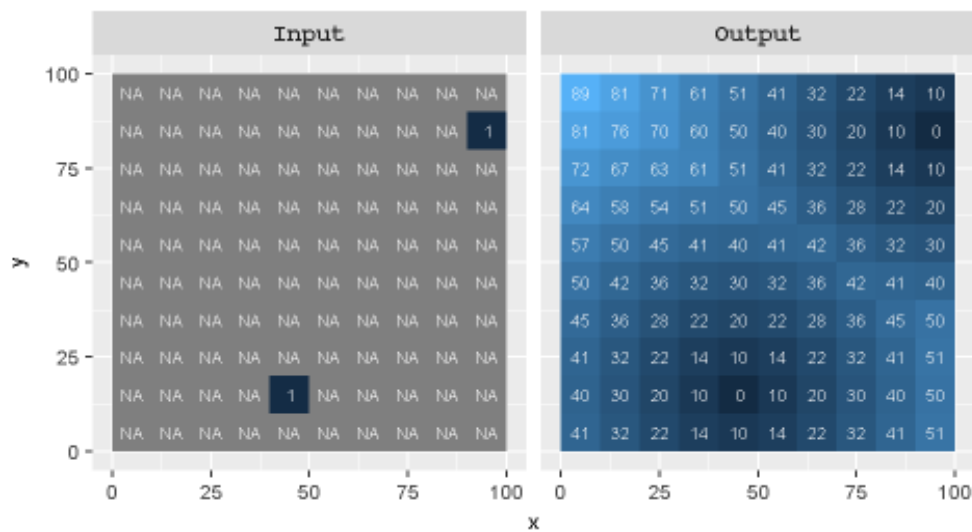


Figure IV.23 : Exemple de fonction globale : la distance euclidienne. Chaque pixel est attribué la valeur de la plus proche distance à l'une des deux locations sources définies dans le raster input.

IV.3.1.5. Opérations d'application

Quelques opérations de modélisation par cellule ont été développées pour résoudre des applications spécifiques. Une opération d'application effectue une analyse qui est spécifique à une discipline. Par exemple, les opérations hydrologiques créent un réseau hydrographique et délimitent un bassin versant. Les opérations locales, focales, zonales et globales sont des opérations générales qui ne sont propres à aucune application. Toutefois, elles rejoignent les opérations d'application en termes de catégorisation, par exemple le fait que même si la pente est habituellement utilisée dans l'application d'analyse des surfaces, elle l'est également techniquement dans une opération focale. Certaines des opérations d'application ont une portée plus générale, comme l'analyse des surfaces, d'autres sont définies plus étroitement, comme les fonctions d'analyse hydrologique.

V. Interpolation des données spatiales

V.1. Définition

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points inconnus (Arnaud et Emery, 2000; Longley, 2005). Par exemple, pour faire une carte des précipitations (pluie) de votre pays, vous ne trouverez pas assez de stations météo réparties uniformément pour couvrir l'entier de la région. L'interpolation spatiale peut estimer la température à des endroits sans données enregistrées en utilisant des relevés de températures connus dans des stations météo à proximité (voir Figure VI.1). Ce type de surface d'interpolation est souvent appelé surface statistique. Les données d'altitude, de précipitations, d'accumulation de neige, de table d'eau et de densité de population sont d'autres types de données qui peuvent être calculées par interpolation.

En raison du coût élevé et des ressources limitées, la collecte de données est généralement menée que dans un nombre limité d'emplacements de points sélectionnés. Dans les SIG, l'interpolation spatiale de ces points peut être appliquée pour créer une surface raster avec les estimations faites pour toutes les cellules raster (Figure V.2).

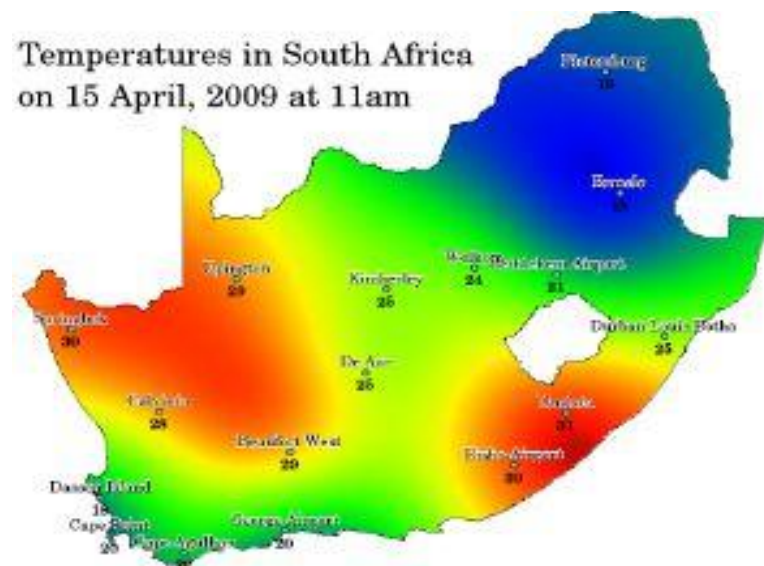


Figure V.1 : Carte de température interpolée avec les stations météo d'Afrique du Sud.

Afin de générer une carte continue, par exemple une carte d'élévation numérique à partir de points d'altitude mesurés avec un appareil GPS, une méthode d'interpolation adaptée doit être utilisée pour estimer de manière optimale les valeurs à ces endroits où aucun des échantillons ou mesures ont été pris (voir Figure V.2). Les résultats de l'analyse d'interpolation peuvent ensuite être utilisés pour les analyses qui couvrent la zone entière et pour la modélisation (Arnaud et Emery, 2000; Longley, 2005).

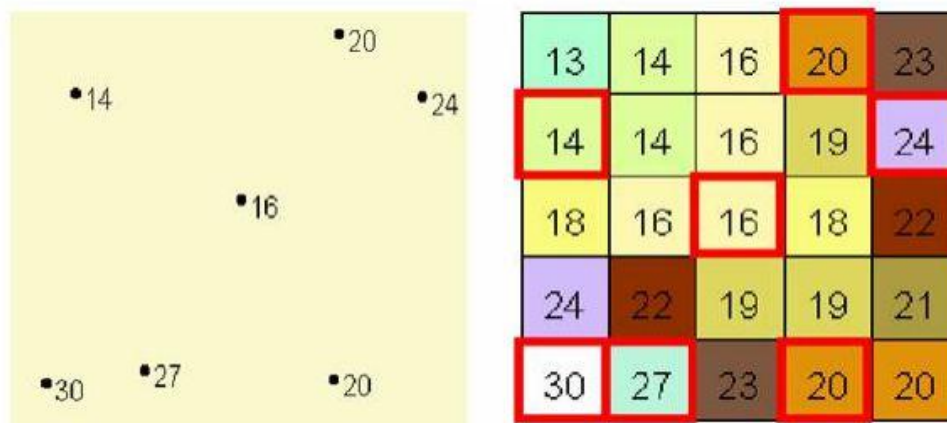


Figure V.2 : A gauche sont les points avec des valeurs connus. Dans la partie droite le raster résultant de l'interpolation des points qui se trouvent à gauche, les valeurs inconnues sont prédites en utilisant une formule mathématique qu'utilisent les valeurs connus des points proches.

On s'intéresse dans ce cours à ces méthodes de prévision. Elles se divisent usuellement en deux groupes, selon les modèles mathématiques sur lesquels elles reposent :

- Méthodes déterministes : elles supposent une modélisation déterministe du phénomène ; ces méthodes se basent alors sur des propriétés purement mathématiques, généralement géométriques, sans tenir compte du phénomène physique qui nous intéresse (Chang, 2008).
- Méthodes stochastiques : elles supposent une modélisation probabiliste du phénomène, dont les observations résultent de la réalisation de variables aléatoires ; ces méthodes font alors appel à des modèles découlant de l'analyse

statistique des données considérées. On parle alors de techniques géostatistiques (Chang, 2008).

On différencie également ces méthodes selon qu'elles soient globales ou locales. Une méthode globale consiste à calculer la moyenne de la variable généralisée sur le champ à partir de l'ensemble des observations disponibles ; une méthode locale réalise une estimation de cette moyenne sur une partie plus réduite du champ, voire en un site ponctuel.

V.2. L'interpolation déterministe globale

L'estimation globale vise à estimer la moyenne arithmétique d'un ensemble d'observations (valeurs de la variable régionalisée) dans un domaine géographique (le champ) (Arnaud et Emery, 2000). Cette estimation n'est pas triviale puisque les observations ne sont pas forcément représentatives et peuvent présenter une densité différente en fonction de la zone du champ, donnant alors une influence trop importante à certaines parties de la zone étudiée. Deux solutions sont alors envisageables. La première consiste en une sélection des données observées. Le problème réside alors dans le choix des observations à prendre en compte. Aucun critère objectif ne peut permettre d'être certain ni de la qualité ni de la pertinence des observations choisies. Une seconde solution consiste à pondérer l'ensemble des observations lors du calcul de la moyenne. Nous allons ici nous intéresser à des méthodes globales basées sur cette solution.

V.3. L'interpolation déterministe locale

Nous nous intéressons ici aux méthodes déterministes pour l'estimation locale et ponctuelle d'une valeur de la variable régionalisée. Cette estimation sera réalisée à partir de combinaisons linéaires des observations en tenant compte de leur disposition les unes par rapport aux autres mais aussi de la distance entre le secteur à estimer et les points de données.

V.3.1. Polygones de Thiessen

#Notation : On définit une variable régionalisée comme étant une fonction numérique prenant ses valeurs dans une région limitée, appelée champ. Par la suite, on utilisera les notations suivantes :

- z , la variable régionalisée.
- D , le champ de la régionalisation, c'est à dire le domaine dans lequel la variable régionalisée est définie.
- $\vec{s} \in D$, le vecteur de coordonnées (x, y, z) qui indique la position d'un site dans le champ D .
- $z(\vec{s})$, la valeur prise par la variable régionalisée z au site $\vec{s} \in D$.
- $z(V)$, la valeur moyenne de z sur le domaine $V \subset D$.
- n , le nombre de sites où la variable a été mesurée.
- $z(\vec{s}_1), \dots, z(\vec{s}_n)$, les valeurs prises par z aux sites d'observation $\vec{s}_1 \dots \vec{s}_n$.
- $\hat{z}(\vec{s}_0)$, une estimation de $z(\vec{s}_0)$ avec $\vec{s}_0 \in D$

Pour tous les points d'observation du champ, on définit un polygone d'influence tel que chaque point du polygone est plus proche du point d'observation que de tout autre site :

$$\forall \vec{s} \in \mathcal{P}_i, \forall \vec{s}_j \in \mathcal{D} \setminus \mathcal{P}_i, \|\vec{s}_i - \vec{s}\| \leq \|\vec{s}_j - \vec{s}\|$$

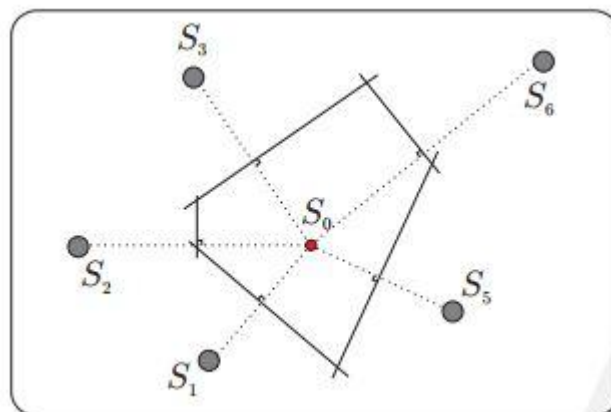


Figure V.3 : Construction des polygones de Thiessen.

D est alors partitionné en une famille de polygones convexes, nommés polygone de Thiessen (aussi appelés polygones de Voronoi ou cellules de Dirichlet (Arnaud et Emery, 2000)) (voir Figure V.3).

Les observations groupées vont ainsi se voir affecter un polygone d'influence de petite surface, les données isolées un polygone de grande surface (Figure V.4). Notons que le découpage de Thiessen dépend uniquement de la configuration

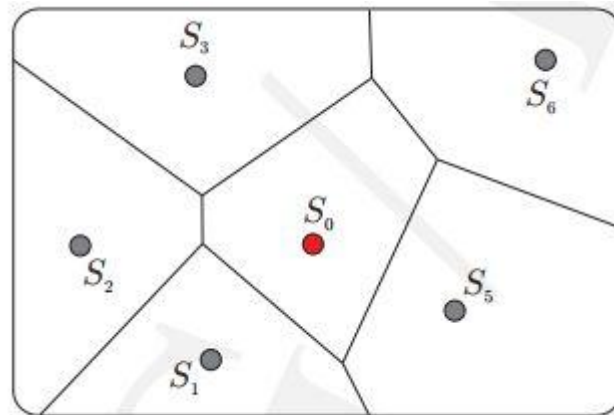


Figure V.4 : Découpage en polygones de Thiessen.

géométrique et non pas des valeurs observées. Les polygones ne sont pas nécessairement fermés dans certaines directions de l'espace : il faut ainsi limiter la partition aux frontières de D , ou fixer une distance d'influence limite. Les surfaces des polygones de Thiessen ainsi obtenus vont alors permettre la pondération des observations pour le calcul de la moyenne de la variable régionalisée sur le champ d'étude :

$$|D| = \sum_{i=1}^n |P_i|$$

Où $|P_i|$ est l'aire du polygone P_i associée au site \vec{s}_i et $|D|$ l'aire du champ :

Par construction, les zones à observations denses sont les zones à polygones de Thiessen de surface moindre : l'influence de ces zones est donc limitée.

$$\hat{z}(\mathcal{D}) = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i|}{|\mathcal{D}|} z\vec{s}_i$$

V.3.2. Méthodes d'interpolation à partie d'une triangulation

La méthode d'interpolation par triangulation consiste à diviser le champ en triangles disjoints, dont les sommets sont les sites échantillonnés, puis à interpoler à l'intérieur de chaque triangle.

La construction des triangles n'est pas unique, différentes approches sont donc proposées :

IV.3.2.1. Triangulation de Delaunay

La triangulation de Delaunay (Delaunay, 1924) est définie comme le diagramme dual du diagramme de Thiessen. C'est à dire on peut à partir du diagramme de Thiessen construire un nouveau diagramme où cette fois, on relie par un segment toutes les paires de sites dont les régions de Thiessen correspondantes sont adjacentes (les points séparés par une arête de Thiessen) (voir Figure V.5).

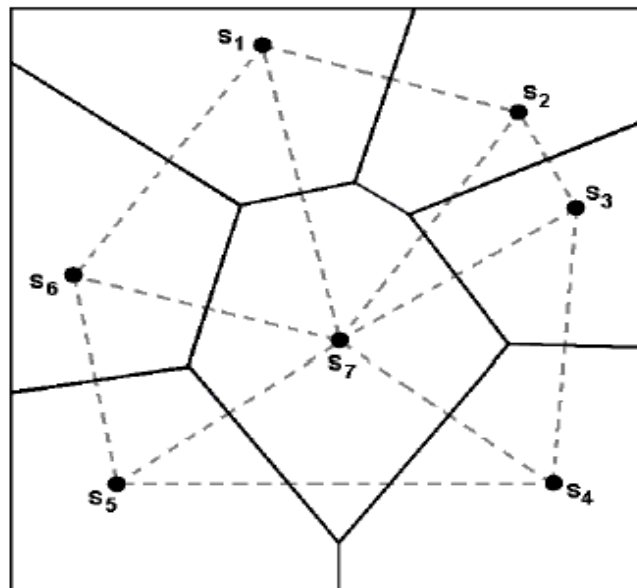


Figure V.5 : Polygones de Thiessen (lignes pleines) accompagnés de la triangulation de Delaunay associée (lignes pointillées).

IV.3.2.2. Interpolation linéaire

On considère le triangle (s_1, s_2, s_3) contenant le point d'intérêt s (voir Figure V.6). Chaque site d'observation reçoit un poids égal à la proportion de surface occupée par le triangle qui lui est opposé : plus le point recherché est proche d'un site d'observation plus la valeur de la variable régionalisée est proche de la valeur observée en ce site (Bossier, 2013).

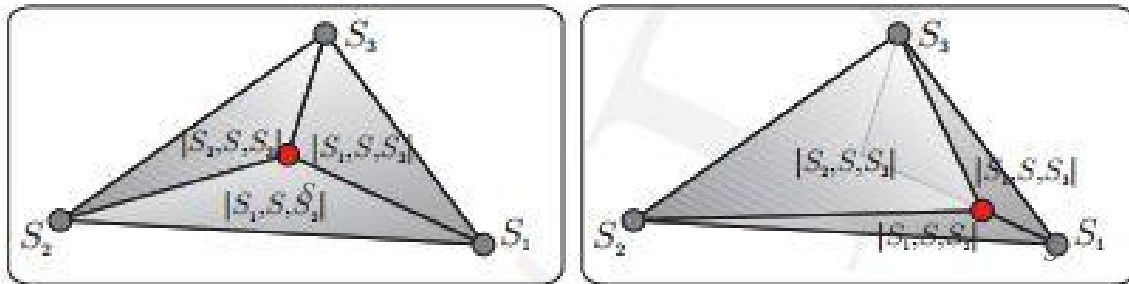


Figure V.6 : Interprétation géométrique de l'interpolation linéaire.

V.3.3. Méthodes d'interpolation barycentriques

Les méthodes d'interpolations précédentes ne considèrent, pour estimer la valeur d'un site, 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.

V.3.3.1. Méthode d'interpolation Voisin naturel

L'algorithme utilisé par l'outil d'interpolation Voisin naturel recherche le sous-ensemble d'échantillons en entrée le plus proche d'un point désigné et lui applique une pondération sur la base de surfaces proportionnelles afin d'interpoler une valeur (Sibson, 1981). Cette méthode est également connue sous le nom d'interpolation de Sibson. Ses propriétés de base sont son caractère local (utilisation d'un seul sous-ensemble d'échantillons entourant un point désigné) et la garantie que les hauteurs interpolées se situent dans la plage des échantillons utilisés. Il ne déduit aucune tendance et ne produit pas de sommets, dépressions, crêtes ou vallées autres que ceux déjà représentés par les échantillons en entrée.

La surface passe par les échantillons en entrée ; elle est lisse partout, sauf aux emplacements correspondant à ces échantillons.

Les voisins naturels de n'importe quel point sont ceux qui sont associés aux polygones de Voronoï (Thiessen) voisins (voir Figure V.7). Au départ, un diagramme de Voronoï est constitué de tous les points donnés, représentés par les polygones de couleur vert olive. Un nouveau polygone de Voronoï, de couleur beige, est ensuite créé autour du point d'interpolation (étoile rouge). La proportion de superposition entre ce nouveau polygone et les polygones initiaux est alors utilisée comme pondération (ESRI, 2018a).

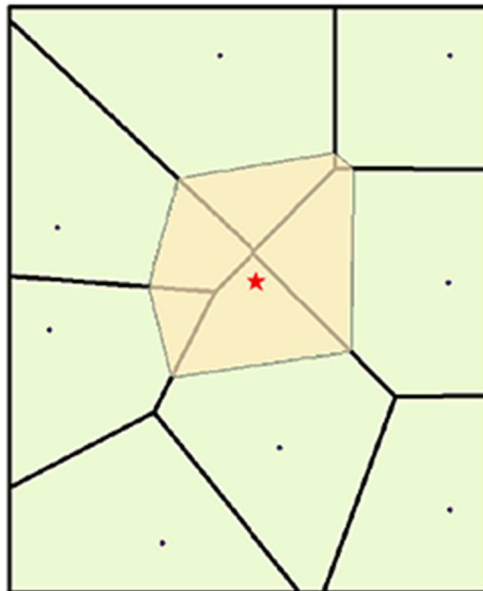


Figure V.7 : Exemple de polygone de Voronoï créé autour du point d'interpolation.

Par comparaison, un outil d'interpolation basée sur la distance, tel que la pondération par l'inverse de la distance (voir V.3.3.2), affecterait des poids identiques au point le plus septentrional et au point nord-est, étant donné qu'ils sont situés à la même distance du point d'interpolation. L'interpolation par voisins naturels, en revanche, attribue respectivement des poids de 19,12 pour cent et 0,38 pour cent sur la base du pourcentage de superposition (ESRI, 2018a).

V.3.3.2. Méthode de l'inverse des distances

La première étape est d'effectuer une recherche des sites qui vont intervenir dans l'estimation. On peut par exemple se fixer un rayon de recherche dont le centre est la localisation de la valeur à estimer. On ne retiendra que les sites appartenant au cercle. Dans un deuxième temps on attribue à chaque site retenu un poids inversement proportionnel à la distance entre ce site et le point à estimer (Despaigne, 2006) (voir Figure V.8).

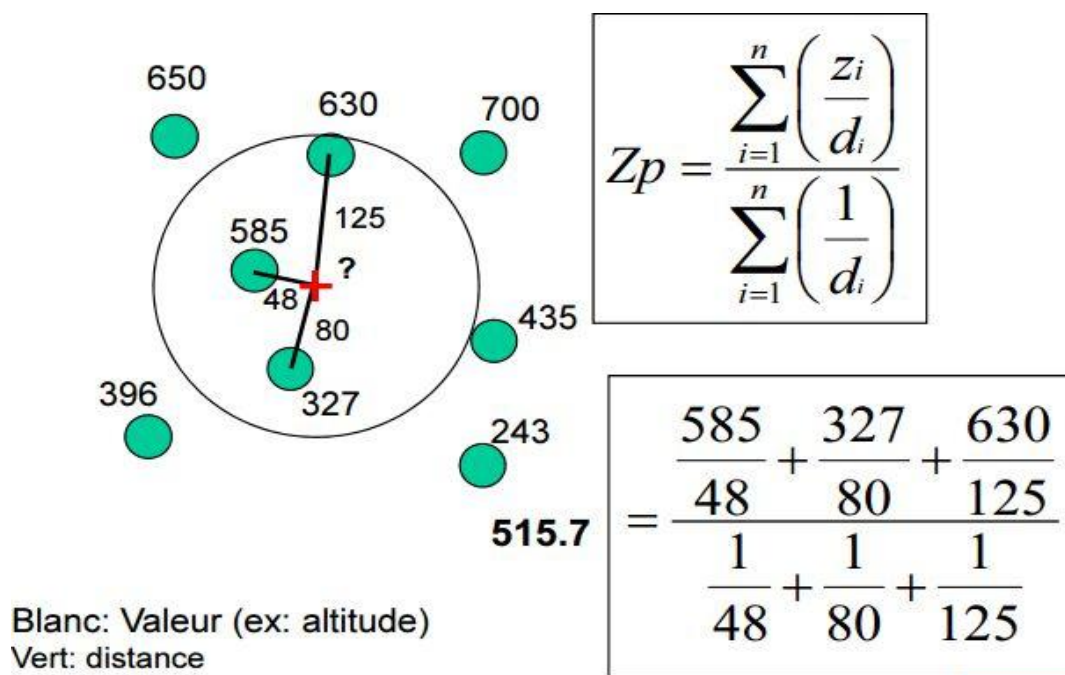


Figure V.8 : Exemple d'application de la méthode de l'inverse des distances.

V.3.4. Les splines

Ce type d'interpolation ne s'effectue pas point par point comme avec les méthodes barycentriques. L'idée est plutôt d'ajuster une surface sur tout le champ D. Une spline est en fait une famille de fonctions régulières de courbure minimale (Bossert, 2013). Il existe deux catégories de splines :

Les splines d'interpolation (voir Figure V.9) contraintes de passer par les points d'observation : on désire obtenir une fonction qui soit la plus lisse possible tout en restituant les valeurs mesurées aux différents sites d'observation.

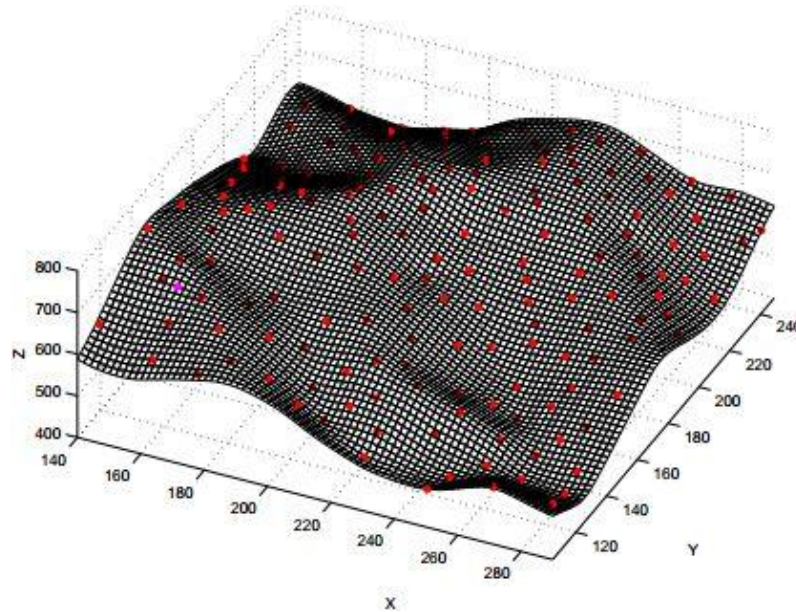


Figure V.9 : Interpolation par spline d'interpolation : application sur un champ d'observations - vue en perspective.

Les splines de lissage (voir Figure V.10) qui passent seulement à proximité des points : Il peut être judicieux dans certaines situations (mesures présentant une incertitude importante) de chercher une surface qui s'approche au mieux des observations tout en restant la plus lisse possible.

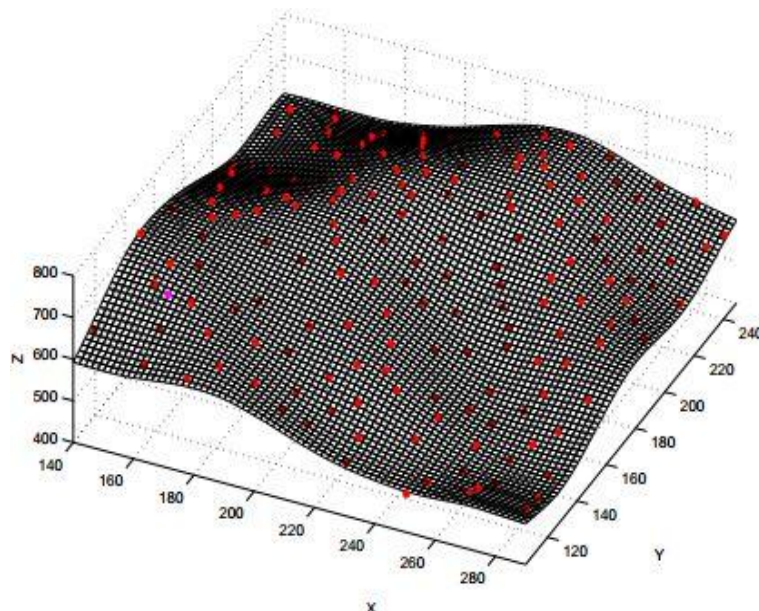


Figure V.10 : Interpolation par spline de lissage : application sur un champ d'observations - vue en perspective.

V.4. L'interpolation stochastique

Contrairement aux méthodes déterministes, les méthodes stochastiques incorporent le concept de hasard. Elles proposent toutes un modèle probabiliste incluant un ou des termes d'erreurs aléatoires pour formaliser le comportement du phénomène naturel à l'étude (Arnaud et Emery, 2000). Grâce à cette modélisation, des erreurs de prévision peuvent être calculées.

V.4.1. Le krigeage

Le krigeage est une méthode d'interpolation applicable à des données spatiales. Elle s'appuie sur la géostatistique linéaire, notamment le variogramme. La théorie du krigeage a été développée par un mathématicien français «G. Matheron» (Matheron, 1976) à partir des travaux de l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige (Krige, 1981). Dans les années 50, Krige a développé une série de méthodes statistiques empiriques afin de déterminer la distribution de minerais à partir d'un ensemble de forages.

L'outil Krigeage présuppose que la distance ou la direction liant les points d'échantillonnage reflète une corrélation spatiale pouvant expliquer les variations de la surface. L'outil Krigeage applique une fonction mathématique à tous les points, ou certains points déterminés, situés dans un rayon précis. Il détermine la valeur en sortie de chaque emplacement (voir Figure V.11). Le krigeage est un processus multiple ; il comprend l'analyse statistique exploratoire des données, la modélisation des variogrammes, la création de la surface et éventuellement l'exploration de la surface de variance (Bossier, 2013). L'outil Krigeage est particulièrement adapté aux cas où l'on sait qu'il existe dans les données une corrélation spatiale de distance ou une déviation directionnelle (Bossier, 2013).

Différents types de krigeage coexistent. Citons entre autres, le krigeage simple (pour une fonction aléatoire d'espérance connue), le krigeage ordinaire (le plus communément utilisé), le krigeage universel (prise en compte d'une dérive), le cokrigeage (lorsque l'on considère différents phénomènes liés) (Arnaud et Emery, 2000; Hengl, Heuvelink et Rossiter, 2007).

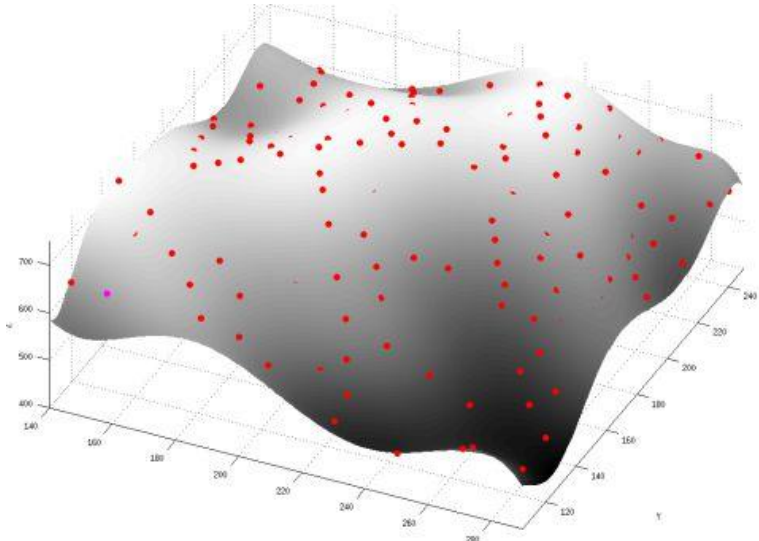


Figure V.11 : Interpolation par krigeage : application sur un champ d'observations - vue en perspective.

VI. Modèle numérique de terrain/d'altitude

VI.1. Définitions

Un Modèle numérique de terrain (MNT) correspond à une représentation sous forme numérique du relief d'une zone géographique (voir Figure VI.1). Ce modèle peut être composé d'entités vectorielles ponctuelles (*points cotés*), linéaires (*courbes de niveau*), surfaciques (*facettes*) ou représenté en mode raster (*cellules*).

Un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) est une représentation des élévations sur un terrain comprenant les plantes et les bâtiments (voir Figure VI.1).

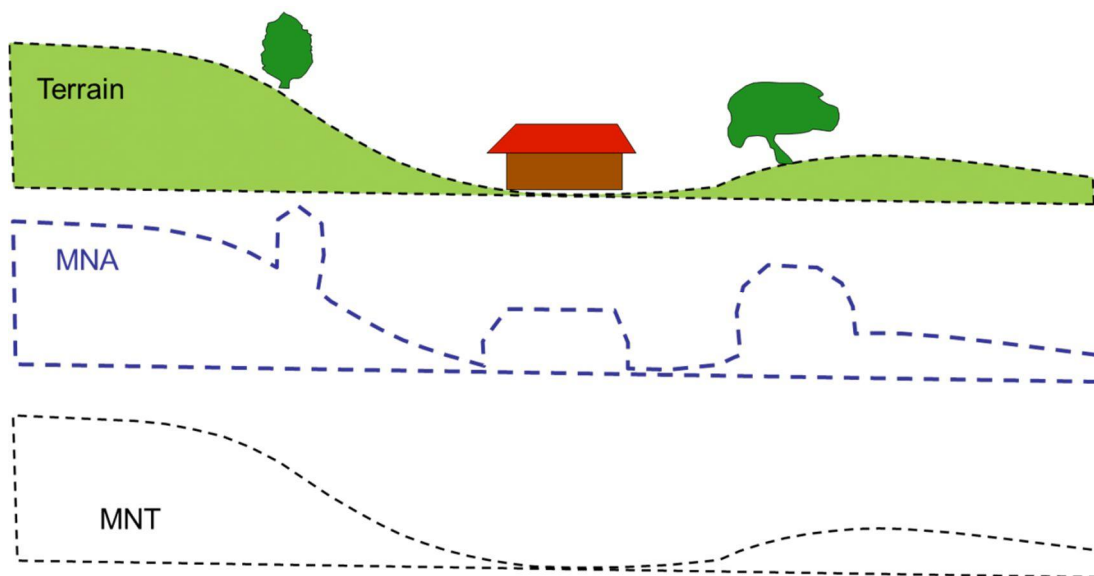


Figure VI.1 : MNA vs MNT.

VI.2. Représentation

VI.2.1. Courbes de niveau

Le premier modèle d'altitude est celui bien connu des courbes de niveau (voir Figure VI.2). Celle-ci offre, pour un lecteur de la carte avisé, une représentation suggestive du relief. Sous forme numérique, ce sont des objets linéaires dont l'attribut est l'altitude. Ce modèle est cependant peu satisfaisant car tout calcul de variables dérivées, telle la pente, est fastidieux et exige beaucoup de transformations (Caloz et Collet, 2011).

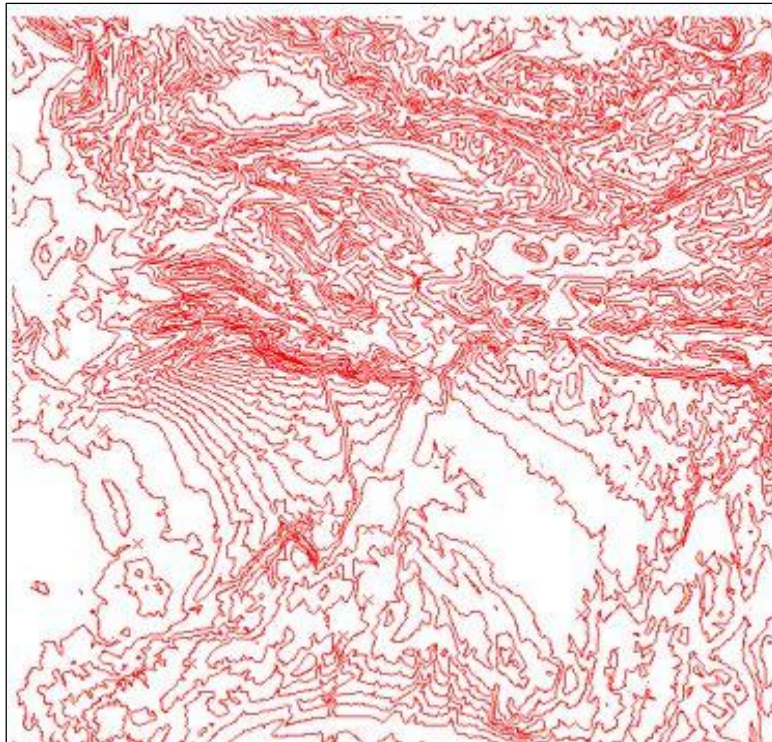


Figure VI.2 : Courbes de niveau (intervalle de 100 mètres).

V.2.2. Semis irrégulier de points ou TIN (Triangular Irregular Network)

Un semis irrégulier de points (Figure VI.3) apparaît lorsque l'altitude est mesurée ponctuellement soit de manière aléatoire, soit en suivant les lignes de structure du relief ou des points particuliers. Le cas le plus fréquent est celui d'un levé à grande échelle cartographique pour l'implantation d'une route ou d'un ouvrage. Il est

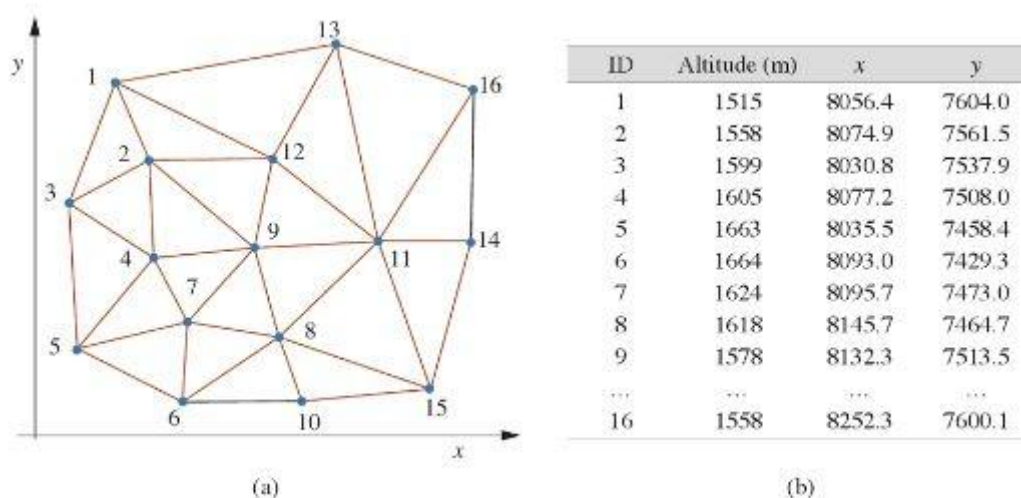


Figure VI.3 : Modèle numérique d'altitude sous forme (a) d'un semis de points irrégulier (TIN) (b) d'un tableau de coordonnées.

exceptionnel qu'un tel modèle soit formé de points mesurés. Généralement, il est produit par interpolation d'un semis de points irréguliers de sorte que la précision dépend du modèle d'acquisition et de la procédure d'interpolation (Caloz et Collet, 2011).

VI.2.3. Représentation maillée (grille, matrice, raster)

Dans ce modèle, les points sont disposés selon une structure régulière de manière à former une grille. La résolution devient la cote de la maille. Les coordonnées de chaque point localisent, soit les nœuds de la grille, soit le plus fréquemment, le centre de la maille (voir Figure VI.4).

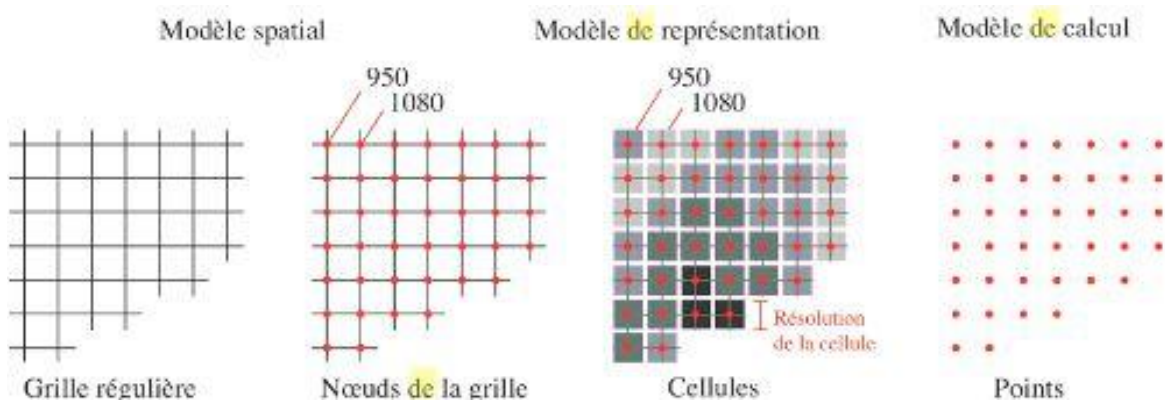


Figure VI.4 : Modèle numérique sous forme d'une grille régulière.

VI.3. Formats et résolution

Le MNT et le MNA peuvent se décliner en plusieurs formats :

Vectoriel: .xyz, .dwg, .dxf, .shp.

Raster : ASCII Grid, Mapinfo Grid, .tif, .kmz, .png.

La résolution du MNT ou du MNA peut varier selon les projets (50 cm, 1m, 5m, etc.). Cette résolution dépend du besoin du client. La fréquence des points laser émis par le système Lidar et l'altitude de vol sont adaptées de manière à obtenir une densité de points suffisante (souvent plusieurs points par m²) et donc une résolution conforme au cahier des charges.

VI.4. Modes d'acquisition de l'altitude

VI.4.1. Acquisition directe par des méthodes de topométrie : Levés sur le terrain de topométrie

Levé par théodolite : Lever (ou levé) a pour objectif de récolter des données existantes sur le terrain en vue de leur transcription, à l'échelle, sur carte. L'ensemble des informations obtenues, un semis de points, peut aussi avoir cette dénomination de lever. Deux opérations conjointes sont nécessaires pour pouvoir situer chaque point suivant trois axes X, Y (plan) et Z (altitude) : le lever planimétrique et le lever altimétrique.

Les opérations de lever sont réalisées à l'aide d'un appareil de mesure (le théodolite).

Mesures par GPS : Le principe de fonctionnement de GPS est le suivant : Un ensemble d'une vingtaine de satellites (Navstar, lancés par l'armée américaine) orbite vers 20 000 km d'altitude. Ceux-ci émettent en permanence des signaux radioélectriques, à des fréquences de l'ordre de 1,2 et 1,5 GHz pour lesquels chaque bit d'information est émis à une date extrêmement bien connue. Ces bits par ailleurs décrivent la position du satellite concerné ; au niveau du sol, on emploie un récepteur, dont le travail consiste à observer avec précision la date de réception de ces mêmes bits, et à décoder ceux-ci. Le fonctionnement général du système est le suivant : les satellites sont tous recalés sur la même échelle de temps, par contre le récepteur ne dispose pas au départ d'une heure précise. Il y a donc quatre paramètres inconnus au niveau du récepteur : ses coordonnées x, y et z, ainsi que son décalage temporel avec l'échelle de temps t des satellites. On observe donc simultanément au moins quatre satellites, ce qui permet de calculer sa position, connaissant celle des satellites. Ce type de fonctionnement, compte tenu des différentes limites physiques du système, peut donner en temps réel une précision de l'ordre de la dizaine de mètres en absolu

VI.4.2. Numérisation (vectorisation) de courbes de niveau provenant de cartes

La création de modèles numériques de terrain à partir de cartes topographiques papier (Figure VI.5) numérisées est une technique à moindre cout. Le principe repose sur un traitement de l'image numérique. Il s'agit d'en extraire les informations nécessaires et particulièrement les courbes de niveaux. Une courbe de niveau est une courbe décrivant une coupe du terrain à une certaine altitude. Les courbes de niveaux sont séparées de leurs voisines par une dénivellation constante.



Figure VI.5 : Une carte topographique américaine en courbes de niveau. Équidistance des courbes de 20 mètres.

VI.4.3. Restitution photogrammétrique de photographies aériennes

La photogrammétrie est l'ensemble des techniques et méthodes permettant de restituer la géométrie d'un objet à partir d'un couple de clichés, pris dans des positions différentes, de cet objet.

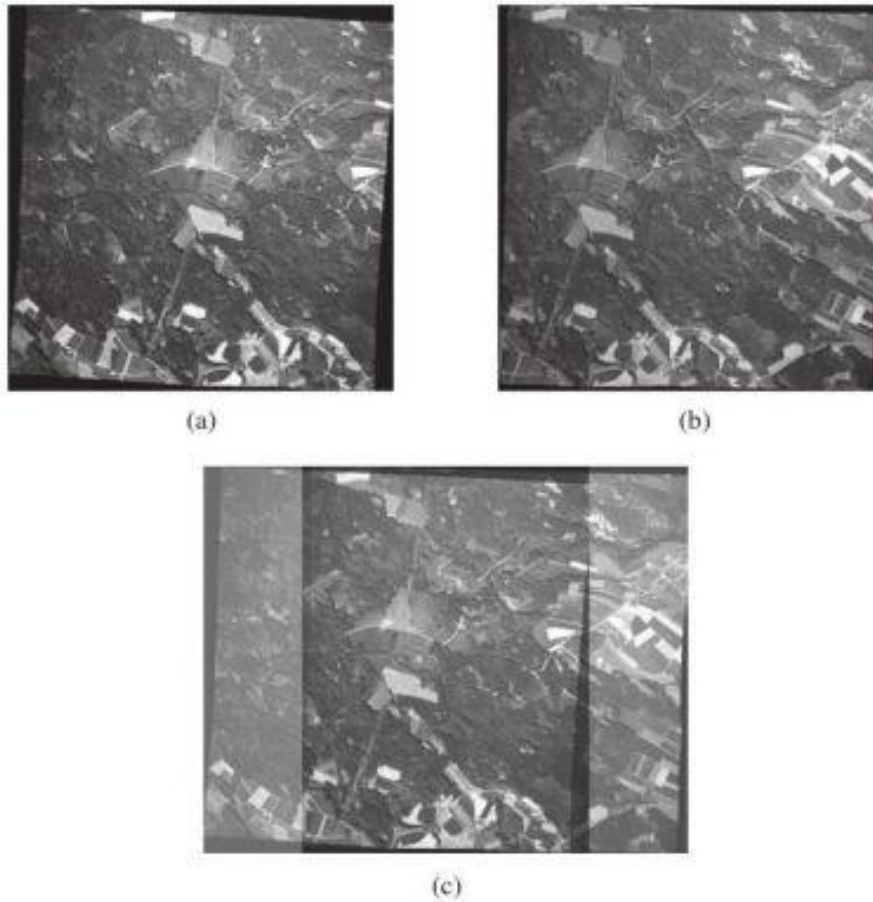


Figure VI.6 : Couple de stéréoscopie et leur zone de recouvrement :
 (a) cliché 1 ; (b) cliché 2 ; (c) zone de recouvrement des cliché 1 et 2.

La photogrammétrie dispose de deux images planes d'un même lieu mais prise sous deux angles différents. Les deux images forment le couple stéréoscopique duquel, grâce à des repères identifiables au sol, on calcule l'altimétrie et la planimétrie, c'est-à-dire le positionnement de tout objet au sol dans les trois dimensions x , y , z . Sur les mêmes relations géométriques entre clichés et réalité, on crée également un orthoimage, c'est-à-dire une image sur laquelle les distances horizontales sont représentées comme sur une carte topographique. La Figure VI.6 illustre l'usage d'un couple de topographies couvrant partiellement la même zone géographique.

Pour une restitution photogrammétrie d'une zone territoriale, on dispose au sol de repères géoréférencés sous forme de plaques réfléchissantes de manière à les rendre facilement identifiables sur les clichés. Ce procédé est dénommé

aérotriangulation exige de connaître parfaitement la position relative des clichés lors de la prise du vue.

La photogrammétrie utilise ce que n'appelle le restituteur photogrammétrique (voir Figure VI.7), avant cet appareil était analogique. Mais, la puissance des ordinateurs a permis la mise au point de restituteurs dits analytiques.

Actuellement toutes les fonctions de restitutions sont intégrées dans un logiciel ou les points homologues sur les clichés numériques sont obtenus par corrélation automatique.

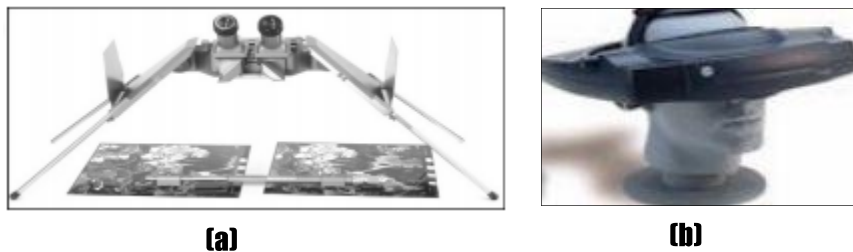


Figure VI.7 : Restituteur photogrammétrique (a) analogique, (b) numérique.

VI.4.4. Radargrammétrie

Dans son principe, la radargrammétrie est similaire à la photogrammétrie, elle est également basée sur l'existence d'un couple stéréoscopique et de l'appariement stéréoscopique par l'identification de paires de point homologues. La nature des images radar produites par des radiomètres à ouverture synthétique (ROS ou en anglais SAR ; Figure VI.8) est cependant très différente, de sorte que la procédure de restitution altimétrique et les équations associées sont propres à ce système. Pour deux trajectoires de même altitude, ce qui est généralement le cas pour un radar embarqué sur un satellite, le paramètre principal est le rapport B/H ou B est l'écartement entre les deux trajectoires et H la hauteur sur sol. Le radar imageur est un système dit actif. Le relief est « éclairé » par une impulsion d'un rayonnement électromagnétique du domaine des hyperfréquences de fréquences comprises entre 5 et 20 GHz et d'une durée de l'ordre de quelques dizaines de microsecondes (37.5 us pour le radar ERSI).

L'éclairage étant latéral, les zones situées dans l'ombre projetée ne renvoient aucun signal. Pour une restitution altimétrique complète, il est donc nécessaire de disposer souvent de plusieurs images (Caloz et Collet, 2011). D'autres artefacts dus à la nature très particulière des images radar surviennent également et exigent des corrections.

Depuis 2009, on dispose d'une couverture mondiale gratuite d'un MNT dénommé GDEM (Global Digital Elevation Model) de résolution 30m. Il a été réalisé en exploitant les couples d'images stéréoscopiques acquises par le satellite ASTER dépendant de la NASA et du ministère japonais de l'économie, du commerce et de l'industrie. Les données sont téléchargeables sur site de la NASA.

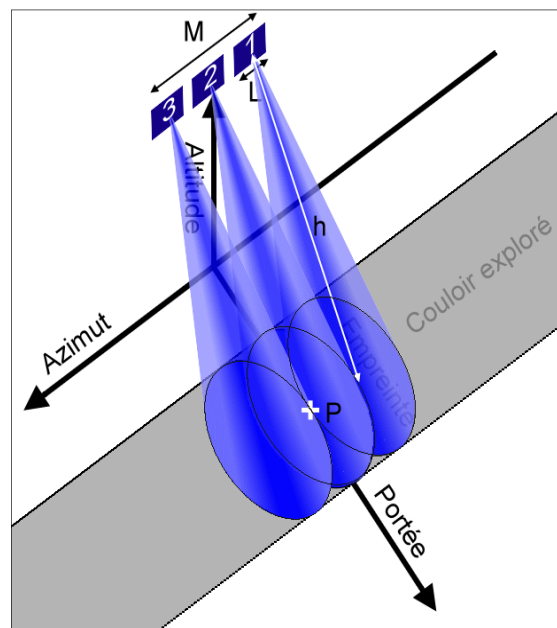


Figure VI.8 : Principe de fonctionnement du RSO. Le point P est illuminé plusieurs fois par le radar en mouvement.

VI.4.5. Laser grammétrie ou altimétrie par «laser à balayage»

L'acquisition de l'altimétrie par « laser de balayage » est une technique de mesure de la position d'un point de la surface du territoire dans les trois dimensions (x, y, z). Le système électronique mesure le temps d'aller-retour et l'intensité d'un faisceau laser émis de la plateforme -généralement aéroportée. La connaissance

de la position précise de la plateforme et la mesure des temps d'aller-retour des impulsions laser permettent de calculer la position des points ou, plutôt, des surfaces qui ont réfléchi le signal.

L'altitude sur sol de l'avion et son attitude sont repérées avec une très haute précision par un système de GPS différentiel (Figure VI.9).

Plusieurs échos du signal émis peuvent être mesurés selon la nature de la couverture du sol. En couverture forestière, une 1^{ère} réflexion est produite par des parties hautes de l'arbre. Si la fermeture végétale n'est pas complète, une partie du signal atteint des couches plus basses, voire le sol, et est à son tour réfléchi. Certains radiomètres enregistrent jusqu'à quatre échos pour un même rayon (Figure VI.10).

La longueur d'onde du faisceau est généralement comprise entre 0.8 et 1 μm , c'est-à-dire dans le proche infrarouge, l'intensité du signal de retour est porteuse d'information sur les propriétés du couvert surtout végétale car celui-ci réfléchit bien ces longueurs d'onde.

L'enveloppe supérieure des réflexions prend la dénomination de modèle numérique d'altitude (MNA), alors que l'enveloppe inférieure, qui correspond en grande majorité aux échos provenant du sol, conserve le nom de MNT. Ces deux modèles sont illustrés par un profil des échos laser (Figure VI.11) et par leur état de surface (Figure VI.12). Dans le but d'obtenir une acquisition rapide et une couverture maximale du territoire, le faisceau laser est le plus souvent orienté par un miroir rotatif, mais d'autres dispositifs existent. Cette technique permet de garantir un balayage de part et d'autre de la ligne de vol et de couvrir une tranche de sol appelée la fauchée. L'homogénéité de la distribution des points sur le territoire est garantie par un recouvrement partiel des lignes de vol et par des lignes de vol perpendiculaires entre elle. La densité de points au sol est fonction de l'altitude de vol adoptée et de la technologie laser utilisée (Caloz et Collet, 2011). On observe souvent plusieurs mesures par m^2 .

L'acquisition sur de vastes zones est réalisée par des équipements aéroportés. L'altitude de vol est d'environ 1000 m sur sol et la fauchée de l'ordre de 600 m. La précision altitudinale dépend de divers paramètres, notamment de la rugosité du sol (Caloz et Collet, 2011).



Figure VI.9 : Principe de l'acquisition de l'altimétrie par balayage laser.

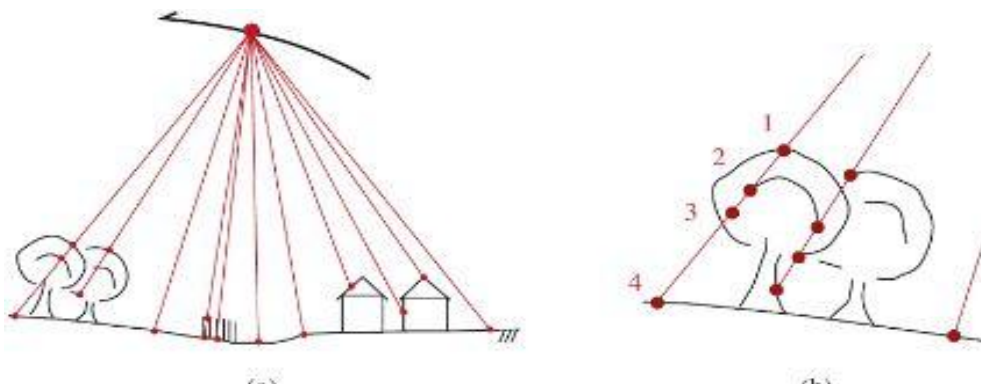


Figure VI.10 : Schéma d'une réflexion à plusieurs échos (a) profil d'un balayage laser ; (b) échos multiples possibles en couverture végétale.

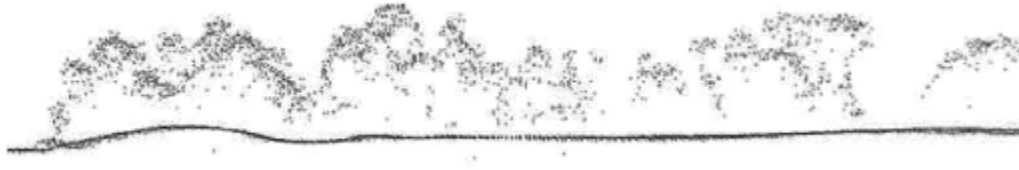


Figure VI.11 : Profil vertical d'échos laser MNA : enveloppe supérieure ; MNT : enveloppe inférieure.

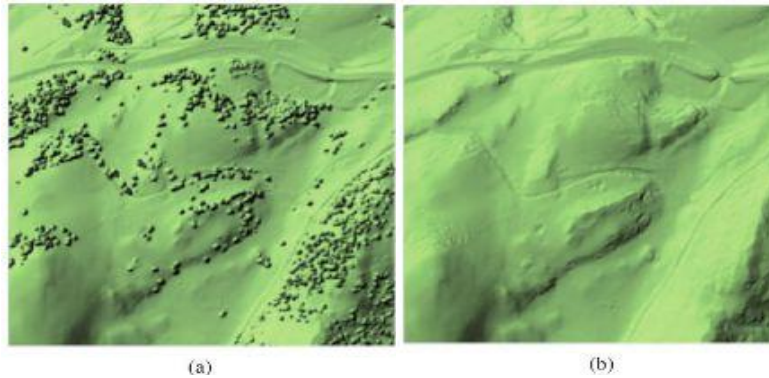


Figure VI.12 : portion de (a) modèle numérique d'altitude (MNA), (b) modèle numérique de terrain (MNT).

VI.5. Les erreurs du MNT

Les sources d'erreurs du MNT sont variées et incluent principalement l'exactitude des points de contrôle, la densité et la distribution des données sources, la situation géographique de la zone d'étude, les méthodes utilisées pour générer le MNT et la microtopographie de la zone d'étude (Heritage *et al.*, 2009; Caloz et Collet, 2011). Pike (2002) identifie trois types d'erreurs (différence entre la valeur altimétrique d'une maille et la valeur réelle observable sur le terrain) dans les MNT : les erreurs systématiques, les erreurs aléatoires et les fautes. Les erreurs systématiques résulteraient du processus de génération du MNT et peuvent être éliminées ou réduites si leurs sources sont identifiées. Les fautes résulteraient des erreurs commises lors de la collecte des données. Elles sont identifiables et éliminées normalement pendant les phases de traitement des données avant leur utilisation. Les erreurs aléatoires du MNT sont cependant inévitables (Ouedraogo, 2014).

VI.6. Comparatif de validité

Trois caractéristiques principales permettent d'avoir un aperçu rapide d'un modèle numérique de terrain et de juger de son adéquation à un besoin particulier

1. Sa résolution, c'est-à-dire la distance entre deux points adjacents du MNT ;
2. Sa couverture géographique : les zones géographiques pour lesquelles des données sont disponibles ;
3. La qualité des données : elle dépend de l'application ou non de traitements de correction des données après leur récupération (Koehl *et al.*, 2008). En effet, certaines méthodes d'acquisition laissent des artefacts dans les données (des zones brouillées sur des lignes côtières du fait de l'écume des vagues qui fausse les échos radar, des « trous » lorsque des nuages étaient présents lors d'un relevé satellitaire, etc.).

VI.7. Quelques sources de MNT/MNA

Tableau VI.1 : Caractéristiques de quelques formats disponibles sur le Web.

Nom	Résolution	Couverture géographique	Éditeur	Post-traitements
<u>DEM</u> <u>ASTER (en)</u>	30 m	La Terre entière (sur demande)	<u>NASA</u>	non
<u>GTOPO30 (en)</u>	30" d'arc (~ 1 km)	La Terre entière	<u>USGS/NASA</u>	oui
<u>SRTM-3</u>	90 m	80 % des terres émergées	<u>NASA/NIMA</u>	non
<u>SRTM-1</u>	30 m	Mars (hors zones polaires)	<u>NASA IGN, Spot Image</u>	oui
<u>SRTM-1</u>	30 m	États-Unis	<u>NASA/NIMA</u>	non
Reference3D	30 m	54 millions de km ² , 80 millions en 2014	<u>IGN, Spot Image</u>	oui
Alos World DEM	5 m	La Terre entière (sur demande)	ALOS JAXA	oui

VI.8. Variables du relief dérivées

VI.8.1. Pente, orientation

La pente se définit comme l'«inclinaison d'une surface par rapport au plan horizontal» (Petit Robert) et l'orientation est une «direction déterminée par rapport aux points cardinaux».

VI.8.2. Concavité, convexité

Une surface est dite convexe ou concave (Figures VI.13 et VI.14) lorsqu'elle est située toute entière du même côté d'un plan tangent. Dans le premier cas, la courbure est positive, dans l'autre négative (Caloz et Collet, 2011).

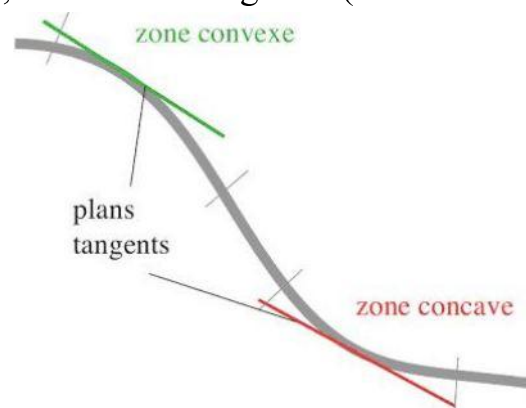


Figure VI.13 : Convexité et concavité.

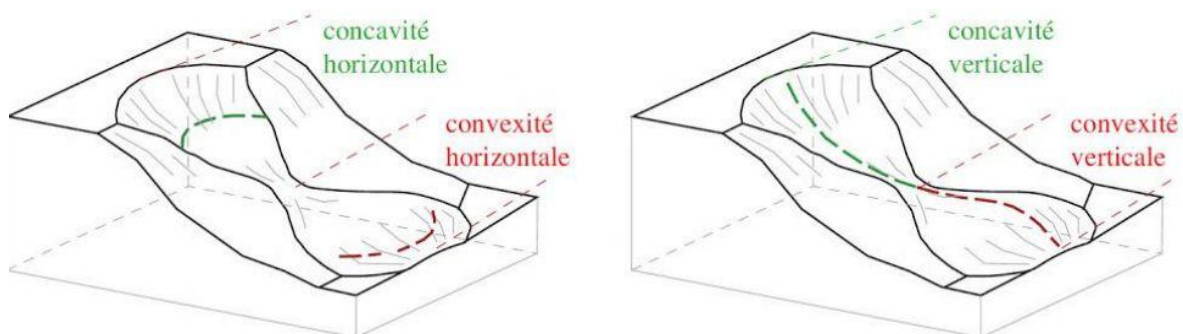


Figure VI.14 : Concavité et convexité horizontales- Concavité et convexité verticales.

VI.9. Variables thématiques dérivées

L'altitude constitue également la variable primaire pour déterminer des zones qui du fait de leur situation, de leur orientation et de leur pente sont recherchées où, au contraire, évitées. Plusieurs thèmes sont ainsi dérivés de la variable altitude

dont les principaux sont la visibilité, l'ombre portée, l'ombre projetée, le taux d'ensoleillement, les lignes de drainage et les limite de bassin versant.

VI.9.1. Visibilité

L'analyse de visibilité s'attache à déterminer les zones visibles de point de vue données. La technique se base sur l'analyse des lignes de vue par rapport au relief (Figure VI.15).

Cette fonction intervient fréquemment dans l'analyse du paysage (Caloz et Collet, 2011). Du quelles zones une nouvelle construction sera-t-elle visible ? Qu'est-ce-qui apparait dans le champ visuel à partir d'un lieu donné ?

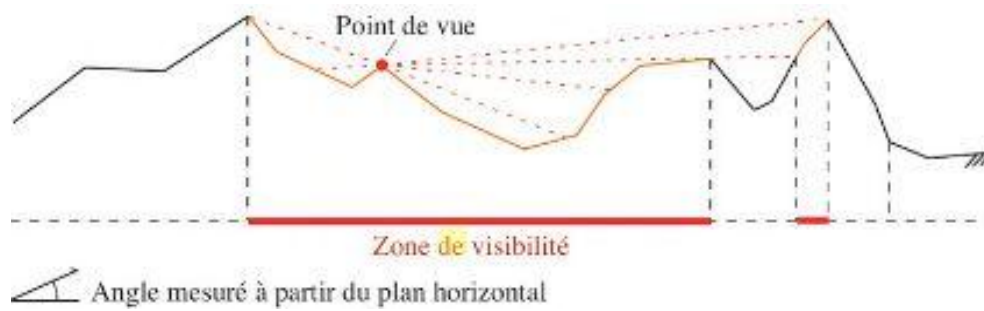


Figure VI.15 : Détermination de zones visibles d'un point de vue.

VI.9.2. Ombre portée et ombre projetée

Ombre portée : L'ombrage des modèles numériques de terrain permet de représenter l'information d'altitude sous une forme offrant la perception du relief. La technique mise en œuvre est le calcul de ligne de vue dans une direction donnée à partir de la position de la source lumineuse. Cependant, on se contente souvent de griser, selon l'intensité de la pente, les zones d'orientations opposées à celle de la source lumineuse, par exemple le soleil présentant une inclinaison supérieure à celle des rayons solaires (Caloz et Collet, 2011). L'ombre est dit portée (Figure VI.16).

Ombre projetée : Si l'on détermine l'ombre réelle produite par le relief écran à l'éclairement solaire, l'ombre est dite projetée (Figure VI.17).

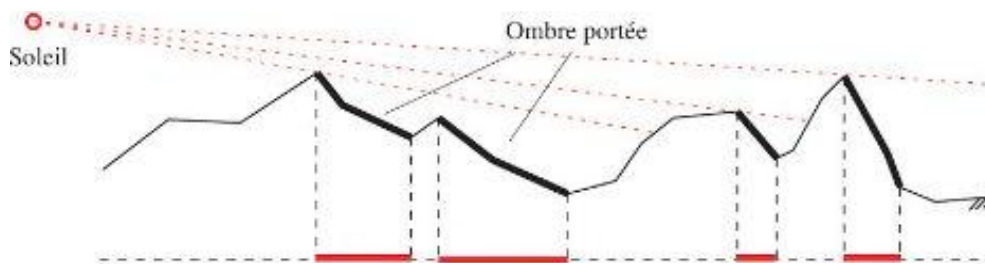


Figure VI.16 : Représentation schématique de l'ombre portée.

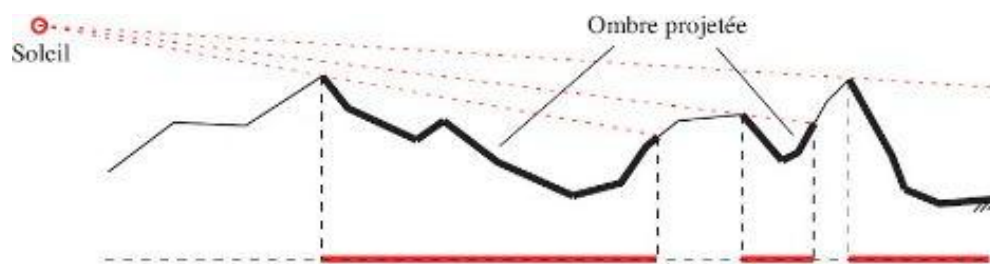


Figure VI.17 : Représentation schématique de l'ombre projetée.

VI.9.3. Taux d'ensoleillement

L'analyse de rayonnement potentiel, c'est-à-dire de l'ensoleillement reçu sans tenir compte d'une éventuelle couverture nuageuse, repose sur une approche similaire à celle utilisée pour le calcul des ombrages, elle prend en considération les ombres projetées.

Chaque maille, correspondant à un point du MNT, reçoit un ensoleillement qui dépend de la hauteur du soleil, de la transparence de l'atmosphère, de la pente et de l'orientation ainsi que la ligne d'horizon. Le résultat est donné en kWh/m², il ne tient pas compte de la nébulosité, celle-ci ne peut être connue pour chaque pixel durant la période examinée. Il s'agit donc de l'énergie potentielle reçue du soleil (Caloz et Collet, 2011).

La Figure VI.18 reproduit l'énergie radiative potentielle de soleil reçue sur le relief. Les zones orientées sud reçoivent naturellement davantage de rayonnement solaire.

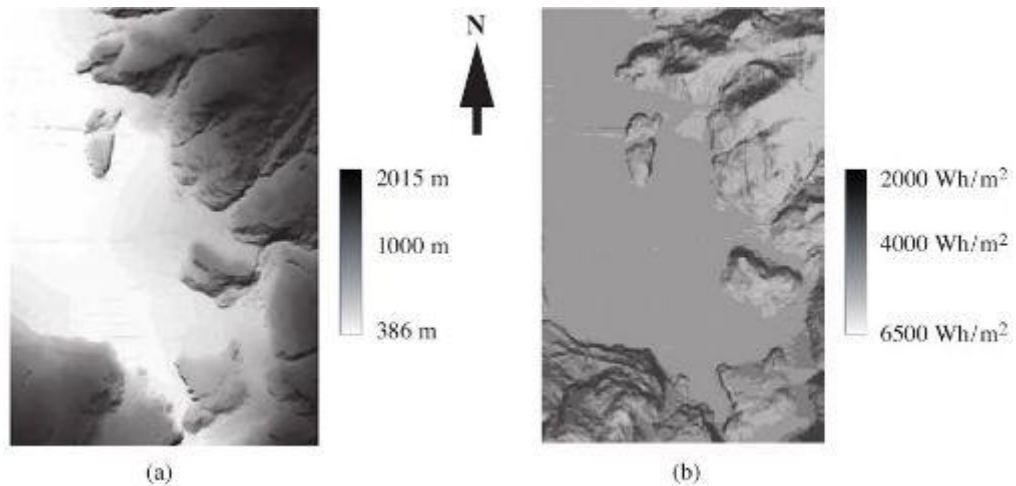


Figure VI.18 : Ensoleillement calculée à l'aide de MNT (a) MNT ; (b) énergie solaire cumulée durant une journée.

VI.9.4. Ligne de drainage

Une ligne de drainage est le chemin théorique qu'une goutte d'eau tombant sur le relief est censée parcourir jusqu'à l'exutoire du bassin versant. On suppose évidemment que la surface est lisse et imperméable (Caloz et Collet, 2011).

On calcule la pente en chaque point du MNT (Figure VI.19). On part ensuite de chaque point haut du bassin versant (point appartenant à la ligne de crête). Les lignes d'écoulement sont déterminées de proche en proche selon la ligne de plus forte pente. De l'ensemble des lignes ainsi tracées on déduit la densité de drainage.

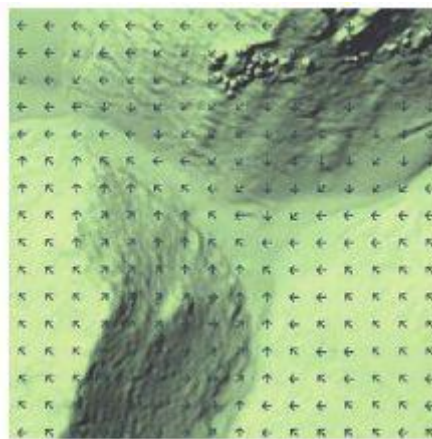


Figure VI.19 : Ligne d'écoulement selon la plus forte pente.

VI.9.5. Limites de bassin versant hydrologique

La détermination automatique de bassin versant à l'aide de MNT (voir Figure VI.20) se divise en deux catégories. La première détermine les lignes de crête à partir d'un exutoire en suivant de proche en proche les points de l'altitude plus élevée. La deuxième construit le bassin versant, également à partir de l'exutoire, en agrégeant les points voisins élevés (Caloz et Collet, 2011).



Figure VI.20 : Des bassins versants délimités à partir d'un MNT.

VI.10. Domaines d'application

VI.10.1. Usages du MNT

VI.10.1.1. Topographie

Le MNT sert principalement à représenter les formes topographiques d'un site (Figure VI.21). La schématisation 3D de la surface du sol, sans construction ni végétation, aboutit à la création d'un référentiel topographique très précis.

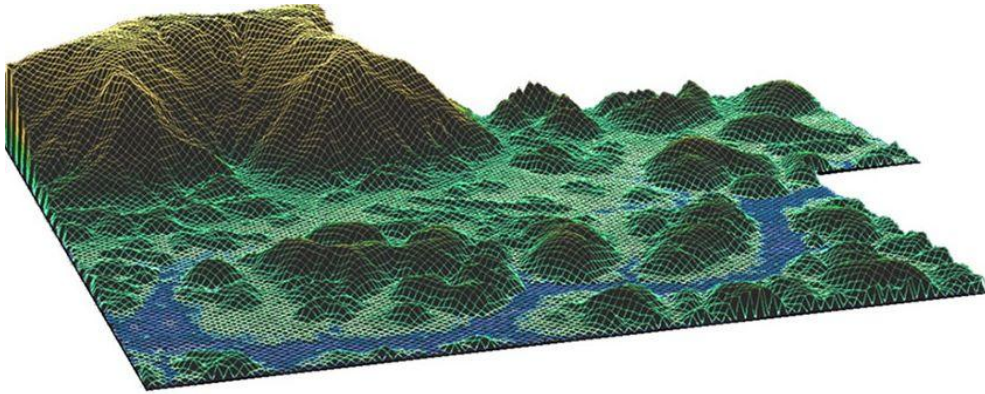


Figure VI.21 : MNT représente les formes topographiques de site.

VI.10.1.2. Hydrologie

Le MNT est un outil fiable permettant la compréhension des formes et mouvements hydrologiques (Figure VI.22). Il permet le repérage des cours d'eau, des zones humides, talwegs, fossés, etc. De plus, ce modèle est utile pour l'élaboration de Plan de Prévention des Risques Inondations (PPRI), il permet de détecter les bassins versants et la direction des écoulements, de réaliser une modélisation hydraulique et de créer une simulation des inondations.

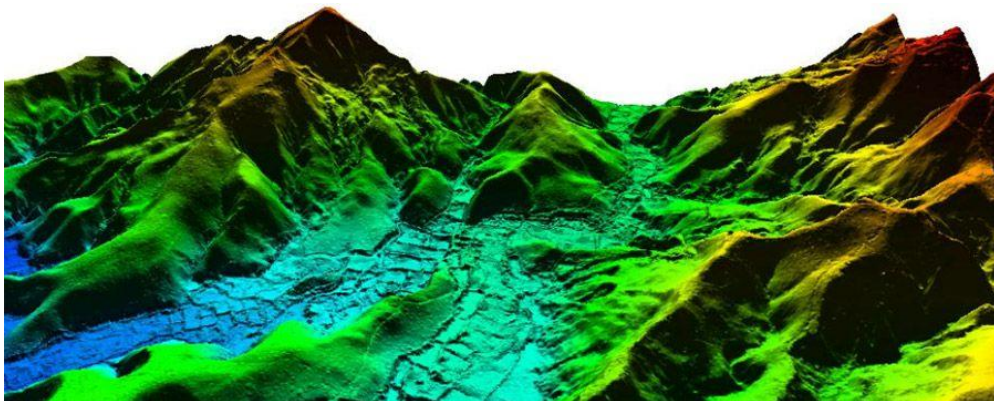


Figure VI.22 : MNT permet la compréhension des formes et mouvements hydrologiques.

VI.10.1.3. Géologie

Le MNT sert également à la caractérisation des zones géologiques à ciel ouvert telles que les carrières, les zones minières (Figure VI.23) et aurifères, etc. L'analyse des données topographiques permet aux exploitants de calculer les

volumes d'extraction (Évaluation précise des cubatures) et de prévoir l'aménagement futur de ces zones (définition des bassins versants et réhabilitation des sites après exploitation).

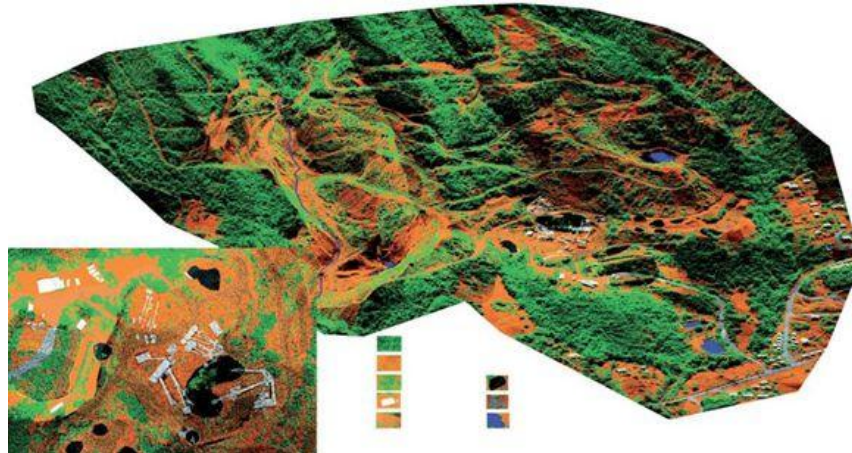


Figure VI.23 : MNT caractérise une zone minière ce qui permet de calculer les volumes d'extraction de sol.

VI.10.1.4. Archéologie

Le MNT permet de mettre en évidence les microreliefs liés aux activités humaines anciennes (anciens chemins, murets, restes de bâtiments, etc.) (Figure VI.24).

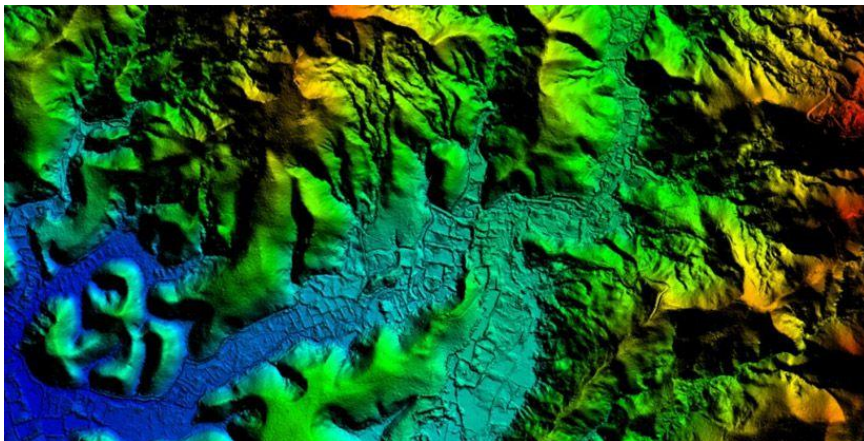


Figure VI.24 : MNT représente les microreliefs liés aux activités humaines anciennes.

VI.11. Usages du MNA

VI.11.1. Gestion forestière

Le produit MNA permet de caractériser précisément la surface de la canopée (Figure VI.25). De plus, en connaissant le MNA, on peut en déduire un modèle

numérique de la canopée ($MNC=MNA-MNT$). Des caractéristiques dendrométriques des peuplements forestiers et des volumes de biomasse peuvent alors être calculés. Plus que jamais, ces outils deviennent une référence pour les gestionnaires des milieux naturels et professionnels de l'agroforesterie.

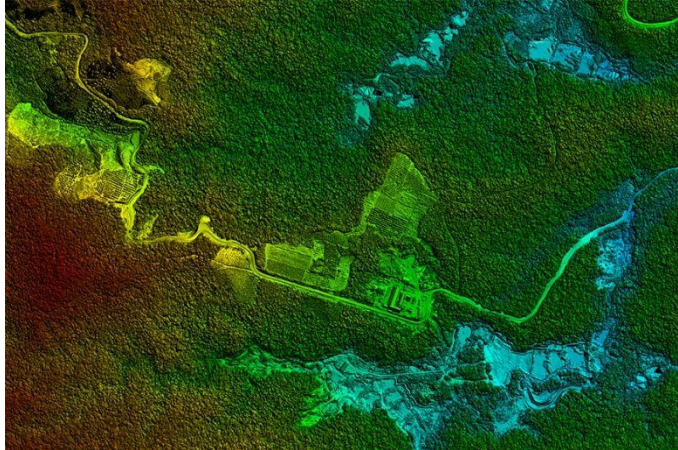


Figure VI.25 : MNA permet de caractériser précisément la surface de la canopée.

VI.11.2. Urbanisme

Le MNA sert également à repérer distinctement les formes anthropiques d'un site (Figure VI.26). La restitution du modèle de l'enveloppe urbaine est nécessaire aux aménageurs des collectivités territoriales dans le but d'analyser le tissu existant et de prévoir les évolutions en terme d'aménagement (exemples : projets routiers, aménagement de grande ampleur type ZAC, etc.)

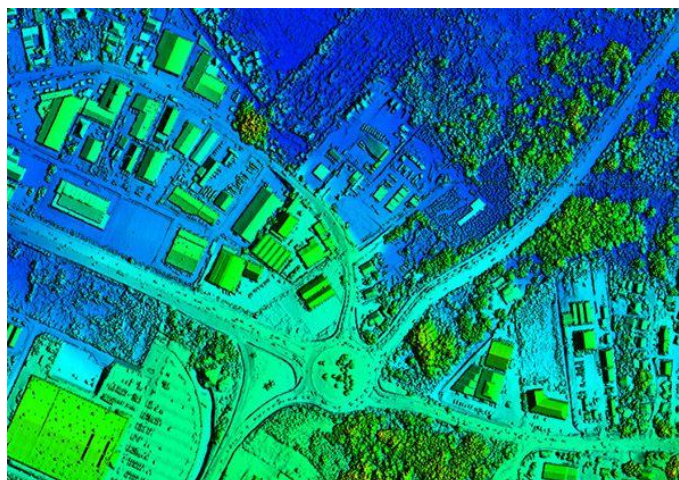


Figure VI.26 : MNA repérer distinctement les formes anthropiques d'un site.

VI.11.3. Télécommunications

Le MNA peut aussi servir aux gestionnaires des réseaux aériens (pylônes électriques, antennes, etc.) (Figure VI.27). Par un repérage des obstacles physiques ou de visibilité, le MNA est un outil adapté pour prévoir les aménagements nécessaires au développement des réseaux futurs.

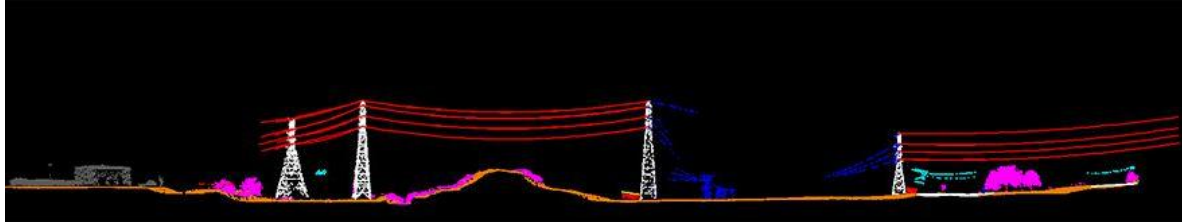


Figure VI.27 : MNA utilise pour la gestion des réseaux de pylônes électriques

VII. Création des cartes d'aptitudes

Une carte d'aptitude est la réponse à la question : Où se situe le meilleur emplacement pour une nouvelle ressource ? Le résultat que vous recherchez est une carte représentant tous les sites candidats (classés du plus approprié au moins approprié) qui conviendraient à l'installation d'une nouvelle ressource. Cette carte est une carte d'aptitude classée car elle montre une plage relative de valeurs indiquant le degré d'adéquation de chaque emplacement sur la carte, en tenant compte des critères que vous entrez dans votre étude (ESRI, 2018b).

VII.1. Etape 1 : définition du problème

Pour résoudre un problème spatial, vous devez commencer par définir clairement le problème à résoudre ainsi que l'objectif à atteindre. Commencez avec un concept du résultat d'étude recherché pour visualiser le type de carte que vous souhaitez obtenir.

➤ *L'exemple d'étude* (ESRI, 2018b)

La ville de Stowe, Vermont, USA, a connu une augmentation substantielle de la population. Les données démographiques suggèrent que cette augmentation est liée aux familles avec enfants qui déménagent vers la région, profitant des nombreux centres de loisirs situés dans l'entourage. Il a été décidé qu'une nouvelle école doit être créée pour décharger les écoles existantes et en tant qu'urbaniste, vous avez été chargé de rechercher un site potentiel.

Votre problème consiste à rechercher le meilleur emplacement pour le site d'un nouvel établissement scolaire. Le résultat que vous recherchez est une carte représentant tous les sites candidats (classés du plus approprié au moins approprié) qui conviendraient à la construction d'un nouvel établissement scolaire. Cette carte est une carte d'aptitude classée car elle montre une plage relative de valeurs indiquant le degré d'adéquation de chaque emplacement sur la carte, en tenant compte des critères que vous entrez dans le modèle.

VII.2. Etape 2 : décomposition du problème (ESRI, 2018b)

Une fois le problème énoncé, nous le scindons jusqu'à identifier les étapes nécessaires pour le résoudre. Ces étapes correspondent aux objectifs à remplir. Lorsque nous définissons les objectifs, nous devons penser à comment nous allons les évaluer. Comment va-t-on évaluer la meilleure zone pour le nouvel établissement ? Dans cet exemple de recherche de site, il est préférable de le situer près d'installations récréatives, car la plupart des familles qui ont emménagé dans l'agglomération ont de jeunes enfants qui souhaitent avoir des activités de loisirs. De plus, il est important d'être à l'écart des écoles déjà présentes de manière à les répartir dans toute la ville. L'établissement doit être construit sur un terrain approprié qui soit relativement plat. Davantage d'objectifs pourraient bien sûr être inclus dans cet exemple, comme la recherche d'une surface assez grande pour l'école et son terrain, ou la recherche d'une surface avec la plus haute densité d'enfants d'un âge donné, mais ce modèle est simplifié pour l'exemple.

Pour atteindre ces objectifs, nous devons connaître les informations suivantes :

- Où sont les emplacements dont le terrain est relativement plat ?
- L'utilisation du sol est-elle appropriée dans ces emplacements ?
- Ces emplacements sont-ils assez proches d'installations récréatives ?
- Sont-ils assez éloignés des écoles existantes ?

VII.2.1. Où sont les emplacements dont le terrain est relativement plat ?

Pour trouver les zones dont le terrain est relativement plat, vous devez créer une carte qui affiche la pente du terrain. Ici, le modèle de processus passe par le calcul de la pente du terrain. A partir de la couche Altitude, l'outil Pente de la toolbox Spatial Analyst, permet de calculer la pente pour chaque cellule du raster.

VII.2.2. L'utilisation du sol est-elle appropriée dans ces emplacements ?

Vous devez déterminer les caractéristiques d'un type d'utilisation du sol approprié sur lequel construire l'école. Ce processus est subjectif et fonction de votre problème. Ici, les terres agricoles sont considérées comme les terrains de construction les moins chers et donc privilégiés. Viennent ensuite les terres

stériles, puis les zones à arbustes, les forêts et les zones déjà construites. Aucun modèle de processus n'est impliqué ici, seulement l'identification du jeu de données d'utilisation du sol en entrée et la détermination du type d'utilisation du sol le plus approprié.

VII.2.3. Ces emplacements sont-ils assez proches d'installations récréatives ?

Vous savez qu'il est préférable de construire l'école à proximité d'installations récréatives. Vous devez donc créer une carte qui affiche les distances par rapport à ces installations pour situer éventuellement l'école dans les zones avoisinantes. Ici, le modèle de processus passe par le calcul des distances depuis les installations récréatives. Pour calculer les distances en ligne droite (distance Euclidienne) nous utilisons l'outil Spatial Analyst -> Distance -> Distance Euclidienne, puis nous vectorisons le résultat pour obtenir la couche DistanceRecre.

VII.2.4. Sont-ils assez éloignés des écoles existantes ?

Il est préférable de situer l'école à l'écart des établissements déjà présents pour éviter d'empiéter sur leurs zones de captation. Vous devez donc créer une carte indiquant la distance par rapport aux écoles existantes. Ici, le modèle de processus passe par le calcul de la distance par rapport aux écoles existantes.

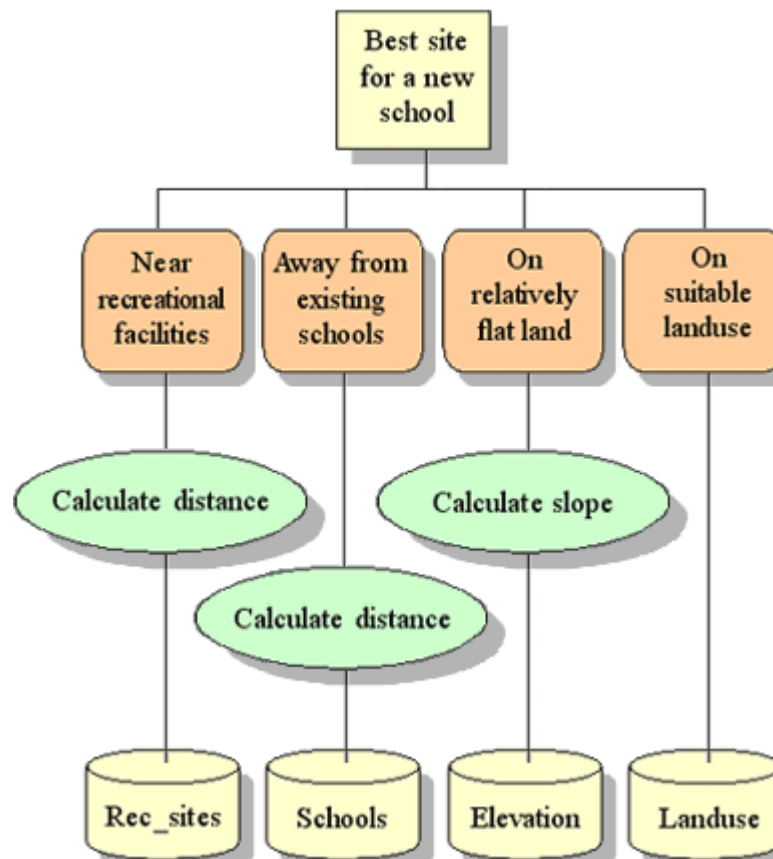


Figure VII.1 : Identifier les outils nécessaires et les données en entrée.

VII.3. Etape 3 : exploration des jeux de données en entrée (ESRI, 2018b)

Après avoir scindé le problème en plusieurs objectifs et modèles de processus et après avoir déterminé les jeux de données nécessaires, vous devez explorer ces derniers pour en comprendre le contenu. Pour ce faire, vous devez identifier les attributs contenus dans les jeux de données et entre les jeux de données qui contribuent le plus à la résolution du problème et à la recherche de tendances dans les données.

L'exploration des données vous mettra sur la voie quant aux zones appropriées pour situer l'école, à la pondération des attributs en entrée et aux modifications à apporter au processus de modélisation. Les données vous indiquent les emplacements des écoles existantes et des installations récréatives et, le jeu de données d'altitudes vous donne une indication des altitudes les plus élevées. Le jeu de données d'utilisation du sol vous informe sur les types d'utilisation du sol

présents dans la zone concernée et sur leur emplacement par rapport aux autres jeux de données.

VII.4. Etape 4 : exécution de l'analyse

Vous avez déterminé vos objectifs, les éléments et leurs interactions, les modèles de processus et les jeux de données nécessaires. Vous êtes donc prêt à effectuer l'analyse.

- *Création d'une carte d'aptitude*

La création d'une carte d'aptitude vous permet d'obtenir une valeur d'aptitude pour chaque emplacement sur la carte.

Une fois que vous avez créé les couches nécessaires (dans cet exemple, les couches sont Pente, Distance par rapport aux installations récréatives, Distance par rapport aux écoles et Utilisation du sol) à votre analyse, comment ces couches créées sont-elles associées pour créer une carte classée des surfaces potentielles pour situer l'école ? Vous devez comparer les valeurs des classes entre les couches. Pour ce faire, une méthode consiste à assigner des valeurs numériques aux classes contenues dans chaque couche de la carte ou à les reclassifier (Mitchell, 1999).

Chaque couche de la carte est classée par son degré d'aptitude en tant qu'emplacement pour la nouvelle école. Par exemple, vous pouvez affecter une valeur à chaque classe de chaque couche, selon une échelle de 1 à 10, 10 étant le meilleur classement.

Cette échelle s'appelle une « échelle d'aptitude ». Utilisez la valeur NoData pour écarter les zones qui ne doivent pas être prises en compte. Le fait d'affecter à toutes les mesures la même échelle numérique leur donne la même importance dans la détermination des emplacements les plus appropriés. Au départ, le modèle est élaboré de cette manière. Par la suite, lorsque vous testerez d'autres scénarios, des facteurs de pondération pourront être appliqués aux couches pour approfondir l'exploration des données et de leurs relations.

- *Création d'échelles d'aptitude*

Comme le montre cet exemple, de nombreuses échelles sont synthétiques. Il s'agit souvent d'un classement, du plus approprié au moins approprié. Ce classement s'appuie sur quelque chose de mesurable, comme la distance par rapport aux écoles, mais, en définitive, il s'agit d'une mesure subjective déterminant le degré d'aptitude d'une certaine distance par rapport à une école pour placer une autre école.

Il existe des échelles naturelles qui sont communément associées à certains objectifs. Le coût en est un bon exemple, mais doit être défini suffisamment en détail. Dans une étude sur l'aptitude d'un bâtiment, un objectif de coût immobilier faible serait mesuré sur une échelle en dollars. Veillez à définir l'échelle de manière adéquate. Pour un élément aussi connu que le dollar, il faut prendre en compte d'autres variables, par exemple s'il s'agit de dollars américains, australiens ou d'un taux de change entre devises.

De nombreuses échelles ne sont pas des relations linéaires bien qu'elles soient souvent présentées de cette manière pour gagner du temps et réaliser des économies ou parce que toutes les options n'ont pas été envisagées. Par exemple, si vous affectez une échelle à une distance de déplacement, un déplacement de 1, 5 ou 10 kilomètres ne serait pas classé comme une aptitude de 10, 5 et 1 si le déplacement se faisait à pied. Certaines personnes jugeront qu'une marche de 5 kilomètres n'est que deux fois plus fatigante qu'une marche de 1 kilomètre, et d'autres dix fois plus.

Lorsque vous élaborez une échelle d'aptitude, demandez l'avis de personnes bien informées pour identifier les deux extrêmes d'un scénario et autant de points intermédiaires que possible. Ces personnes doivent bien connaître l'objectif à l'étude. Par exemple, il est plus intéressant de demander à des usagers leur opinion sur le temps qu'ils souhaiteraient mettre pour se rendre de leur domicile à leur travail, que de demander à un agent les heures à laquelle la circulation est la plus mauvaise.

VII.4.1. Classement des zones à proximité d'installations récréatives avec l'outil Reclassification

Pour situer l'école près des installations récréatives, vous devez connaître la distance qui les sépare. L'outil Distance euclidienne de Spatial Analyst crée ce type de carte en calculant la distance en ligne droite (euclidienne) entre un emplacement et les installations récréatives les plus proches. Il en résulte un jeu de données raster dans lequel chaque cellule représente la distance aux installations récréatives les plus proches. Pour donner un rang à la carte, utilisez l'outil Reclassification. Puisqu'il est souhaitable de situer l'école près des installations récréatives, affectez la valeur 10 aux distances éloignées de ces installations et la valeur 1 aux distances qui s'en rapprochent. Puis classez les distances intermédiaires linéairement comme le montre l'illustration suivante (Figure VII.2).

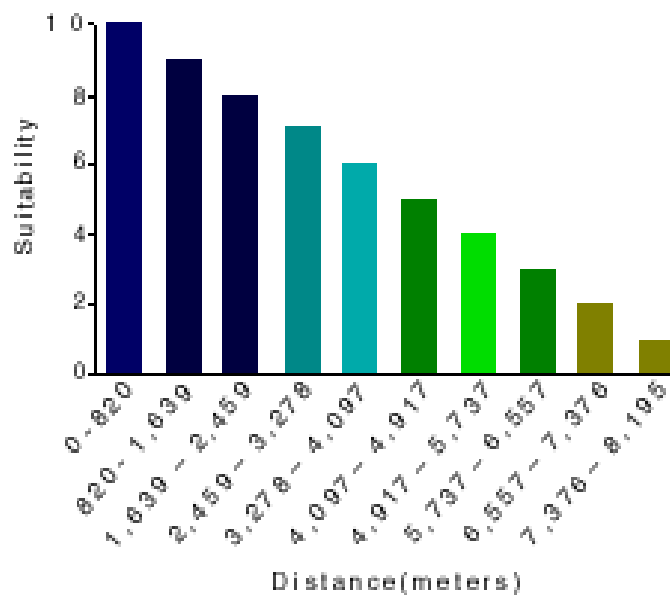


Figure VII.2 : Classement des zones à proximité d'installations récréatives.

Le résultat obtenu est le suivant (Figure VII.3):

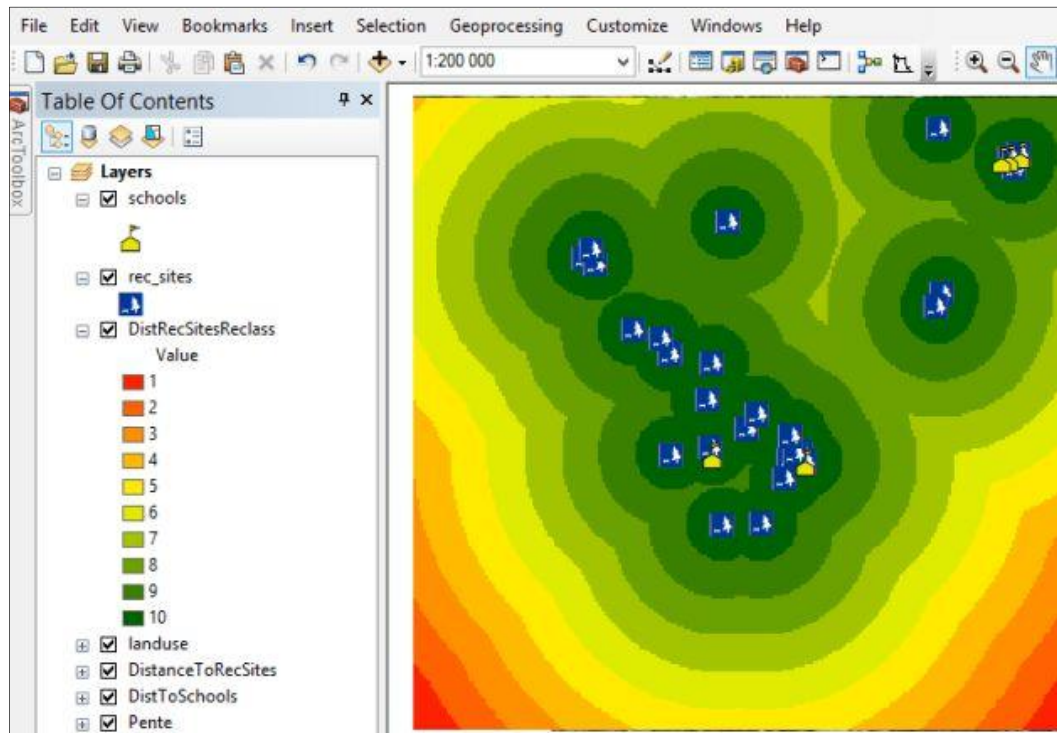


Figure VII.3 : Résultat de classement des zones à proximité d'installations récréatives.

Ce résultat nous apparaît tout à fait cohérent. Nous avons une zone d'étude, des distances concentriques par rapport à nos cibles, et un dégradé régulier de valeurs au fur et à mesure que nous nous éloignons de nos cibles.

Mais la question est : est-ce que ça répond à la question posée ?

Les zones vertes, c'est à dire les zones les plus propices selon ce critère, dépendent de l'emplacement des sites récréatifs. Mais pas seulement. Elles dépendent de notre zone d'étude : on aurait choisi une zone plus vaste, elles seraient plus grandes, on aurait limité notre zone, elles seraient plus petites. Elles dépendent aussi de notre choix arbitraire de faire 10 zones. On aurait choisis d'en faire 7, elles seraient plus grandes, et si on avait choisi d'en faire 12 elles seraient plus petites.

La question posée est de trouver des sites, car les parents souhaitent que la nouvelle école soit proche d'un site récréatif. En tant que parent, je vais trouver

qu'un site récréatif est proche ou loin en fonction de bien de critères personnels, mais sûrement pas en fonction de la surface totale du projet d'aménagement !

VII.4.2. Classement des zones éloignées des écoles existantes

Nous avons créé un jeu de données raster dans lequel chaque cellule représente la distance à l'école la plus proche (DistToSchools). Pour donner un rang à la carte, utilisez l'outil Reclassification. Puisqu'il est souhaitable de situer l'école à l'écart des écoles existantes, affectez la valeur 1 aux distances proches de ces écoles et la valeur 10 aux distances qui s'en éloignent. Puis classez les distances intermédiaires linéairement comme le montre l'illustration suivante (Figure VI.4).

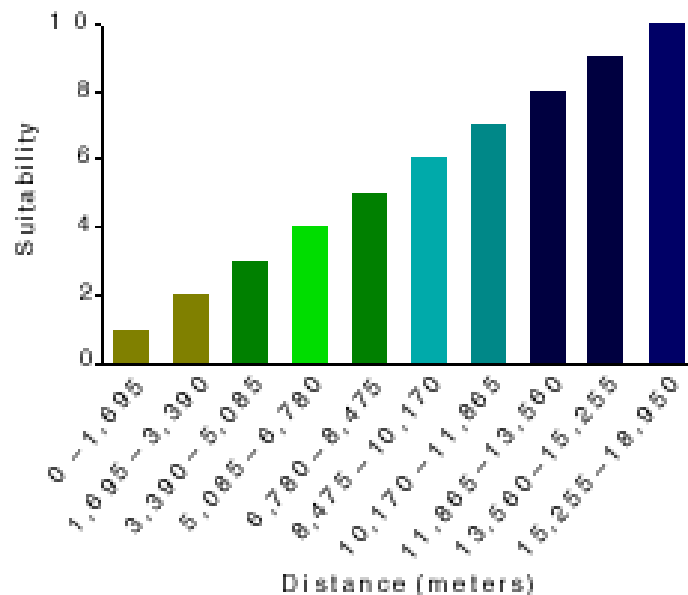


Figure VI.4 : Classement des zones éloignées d'écoles.

Le résultat obtenu est le suivant (Figure VII.5) :

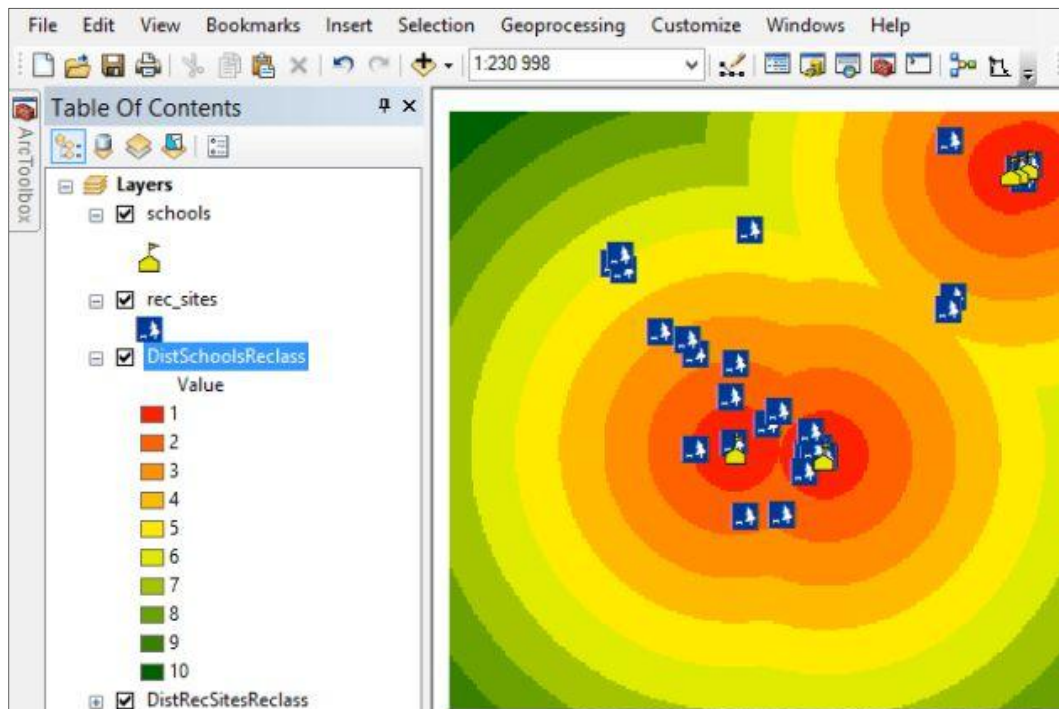


Figure VII.5 : Résultat de classement des zones éloignées d'écoles.

Les mêmes remarques que pour l'éloignement des sites récréatifs peuvent être faites pour le résultat de ce critère. L'éloignement des écoles existantes n'est pas un concept lié à la taille de notre zone d'étude.

VII.4.3. Classement des pentes du terrain

Pour éviter des pentes raides et rechercher les zones dont le terrain de construction est relativement plat, vous devez connaître la pente du site à rechercher. L'outil Pente crée ce type de carte en identifiant pour chaque cellule le taux de variation maximal des valeurs de chaque cellule par rapport aux cellules voisines. Pour donner un rang à la carte, utilisez l'outil Reclassification. Puisqu'il est préférable de situer l'emplacement sur un terrain relativement plat, affectez la valeur 1 aux emplacements dont la pente est raide et la valeur 10 aux emplacements dont la pente est moindre. Puis, classez les valeurs intermédiaires linéairement comme le montre l'illustration suivante (Figure VII.6).

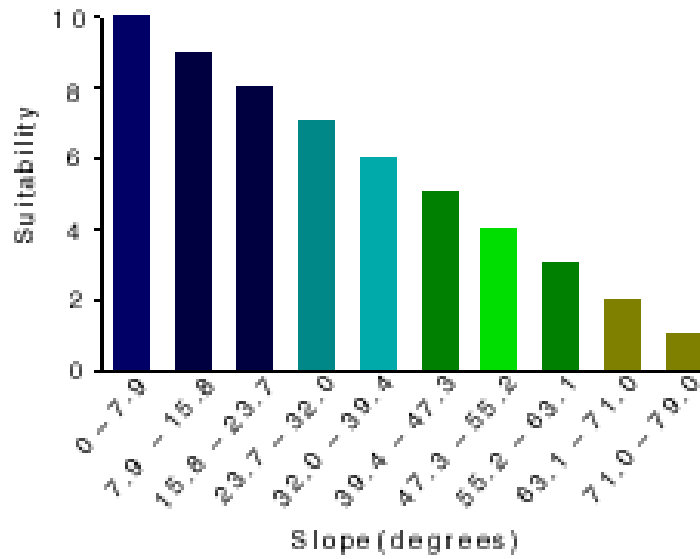


Figure VII.6 : Classement des zones dont le terrain est relativement plat.

Le résultat obtenu est le suivant (Figure VII.7):

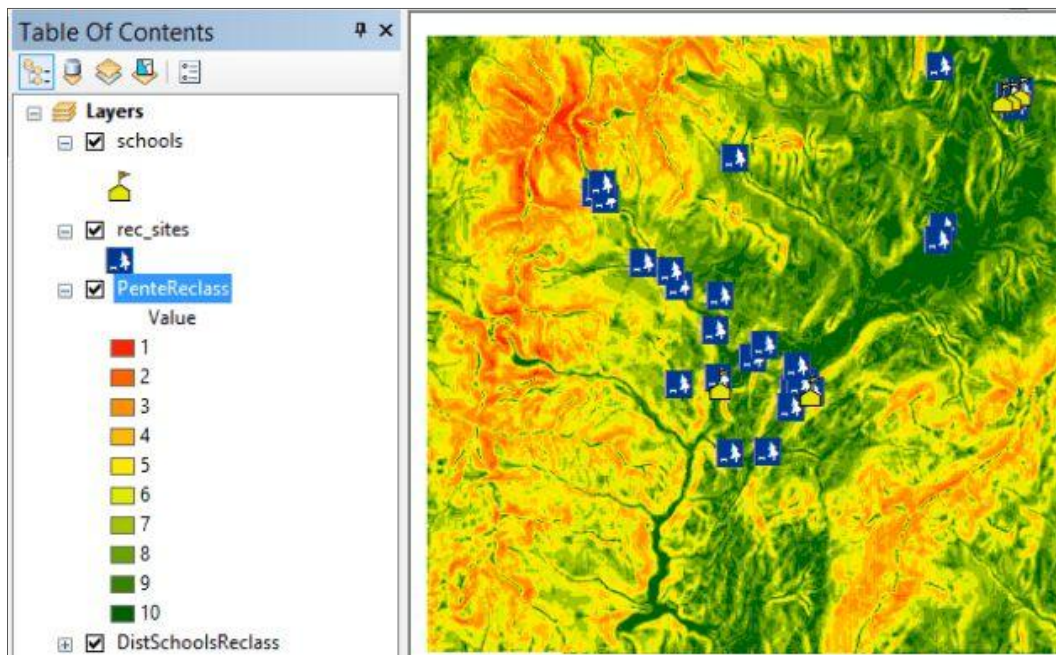


Figure VII.7 : Résultat de classement des pentes du terrain.

Étant donné que la pente est une donnée directement issue du terrain, à différence des deux critères précédents (distances des écoles et des centres de récréation) la distribution est nettement moins régulière.

VII.4.4. Classement des occupations du sol

Pour donner un rang à la carte représentant les types d'utilisation du sol, utilisez l'outil Reclassification. Puisqu'il est préférable de construire sur certains types d'utilisation du sol en raison des coûts, vous devez déterminer le mode de classement des valeurs. Le classement des valeurs de distance ou de pente est une procédure qui reste assez simple. Vous devez déterminer si des distances courtes ou longues sont préférables et si des pentes raides ou moins raides sont souhaitables, puis classer le reste des valeurs linéairement ou spécifier une distance ou une pente maximale à prendre en compte. Ici, vous devez déterminer les types d'utilisation du sol les plus appropriés. Ce processus est subjectif car il dépend de votre étude. Le plus simple est de décider ce qui est le mieux approprié et ce qui l'est le moins. Ensuite, classez par ordre de préférence les types d'utilisation du sol restants (Figure VII.8). Procédez ainsi jusqu'à ce que tous les types d'utilisation du sol soient classés. Les utilisations du sol de type eau et marécages ont été exclues de l'analyse car vous ne pouvez pas construire sur de l'eau et devez respecter certaines restrictions quant aux constructions sur des marécages. L'illustration ci-dessous indique le classement des types d'utilisation du sol.

Agriculture → terres agricoles → 10

Barren land → Terres arides → 6

Brush/transitional → zone arbustive/de transition → 5

Forest → forêt → 4

Built up → construite → 3

Water → plan d'eau → 0

Wetlands → zones humides → 0

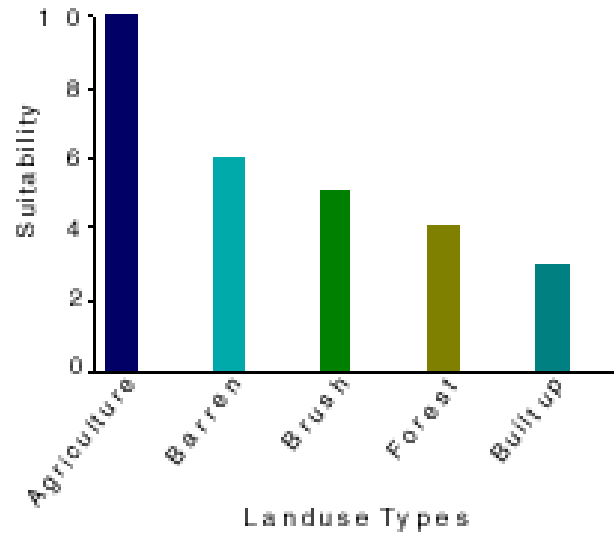


Figure VII.8 : Classement des zones dont le type d'utilisation du sol est approprié.

Le résultat obtenu est le suivant (Figure VII.9) :

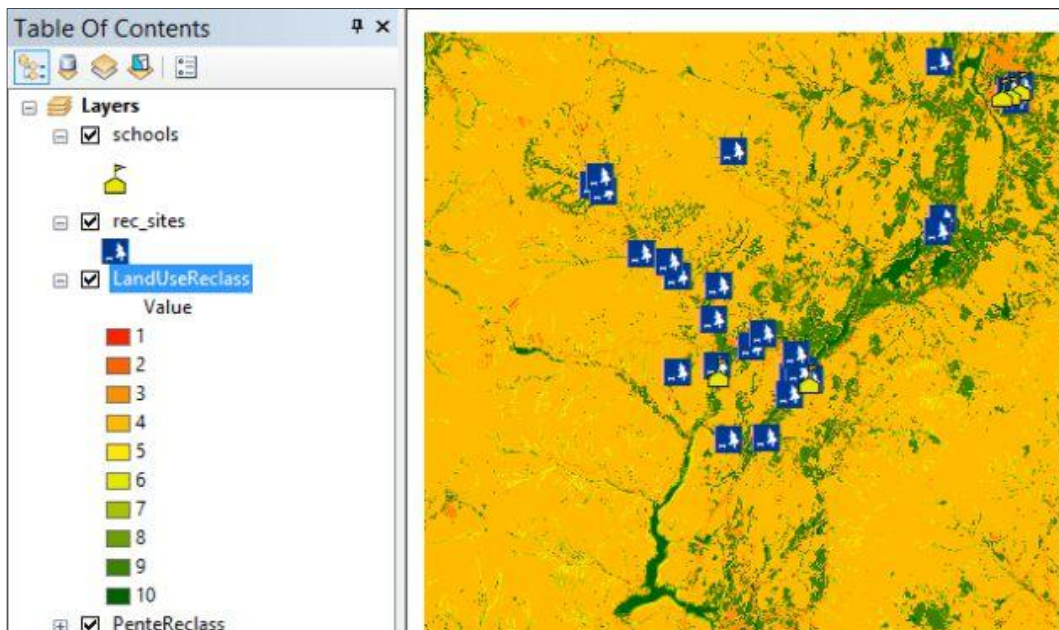


Figure VII.9 : Résultat de classement des occupations du sol.

VII.4.5. Regroupement des cartes d'aptitude

La dernière étape du modèle d'aptitude consiste à regrouper les sorties reclassifiées (cartes d'aptitude) de Distance par rapport aux installations récréatives, Distance par rapport aux écoles existantes, Pente et Utilisation du sol.

Pour prendre en compte le fait que certains objectifs pèsent plus que d'autres dans le modèle d'aptitude, vous pouvez pondérer les jeux de données. Vous donnez aux jeux de données plus importants un pourcentage d'influence (pondération) plus élevé. Si tous les jeux de données sont d'importance égale, vous pouvez attribuer à tous la même pondération.

Dans l'exemple, vous savez, d'après l'examen du problème, que le premier objectif à remplir est de situer l'école près d'installations récréatives, et le deuxième est de la situer à l'écart des écoles existantes. Les pourcentages d'influence suivants seront attribués aux cartes d'aptitude. Les valeurs entre parenthèses correspondent au pourcentage divisé par 100 pour normaliser les valeurs. Ces dernières sont attribuées à chaque carte d'aptitude :

- Distance par rapport aux installations récréatives : 50%
- Distance par rapport aux écoles : 25%
- Pente : 12,5%
- Types d'utilisation du sol : 12,5%

La carte d'aptitude *Distance par rapport aux installations récréatives* à une influence de 50 % (0,5) sur le résultat final, et la carte *Distance par rapport aux écoles* une influence de 25 % (0,25). Les facteurs *Pente* et *Types d'utilisation du sol* ont tous les deux une influence de 12,5 % (0,125). Comme dans l'affectation d'échelles d'aptitude, l'affectation de pondérations est un processus subjectif qui dépend des objectifs les plus importants de votre étude.

Analyse de la pondération

Ce que vous venez de lire paraît logique, et même intelligent. Ne soyez pas froissé si vous êtes un adepte des pondérations, mais essayons de voir un peu sous la surface.

Qu'est-ce que ça peut bien vouloir dire cette transformation mathématique d'importance d'un critère en valeur de poids ?

Et surtout, n'oublions pas que le destinataire du résultat sera forcément un décideur à qui nous allons fournir une carte pour l'aider à prendre sa décision.

Nous avons bien compris que les critères de distance par rapport aux écoles existantes et aux centres récréatifs sont, pour le décideur, plus importantes que le type de terrain (pente et occupation). En appliquant ces pondérations nous allons, nous croyons, respecter ce raisonnement du décideur.

Alors, comme un exemple vaut mieux qu'un long discours, prenons en deux :

1- Un site qui est excellent suivant les trois critères : distance aux écoles (valeur = 10), distance aux centres récréatifs (valeur = 10) et pente (valeur=10), elle aura comme résultat cumulé des trois critères (valeur du critère multipliée par le poids):

$$0,5 \times 10 + 0,25 \times 10 + 0,125 \times 10 = 8,75$$

Si l'occupation du sol est la meilleure (agriculture =10) on aura comme résultat final

$$8,75 + 1,25 = 10$$

Si l'occupation du sol est la pire (construit =3) on aura comme résultat final

$$8,75 + (0,125 \times 3) = 9,125$$

Vous croyez le décideur capable de trancher entre 9,125 et 10 ? Au point de se rendre compte que le deuxième choix implique des inconvénients majeurs ? Vous trouvez que ça apparaît au premier coup d'œil ?

Alors prenons un autre exemple encore plus flagrant :

2- Un site qui est excellent suivant les trois critères : distance aux écoles (valeur = 10), distance aux centres récréatifs (valeur = 10) et occupation du sol (valeur=10), elle aura comme résultat cumulé des trois critères :

$$0,5 \times 10 + 0,25 \times 10 + 0,125 \times 10 = 8,75$$

Si la pente est de 30° elle aura une valeur de 7. Le résultat final sera

$$8,75 + (0,125 \times 7) = 9,625$$

Là, on frise la perfection. On est à quelques poussières du site idéal !

Pourtant une pente de 30° correspond à un pourcentage de pente de 57% qui est plus que le double de la limite possible pour un projet de construction !

Comment pensez-vous qu'une telle proposition va être perçue par le décideur ? Alors, pendant le croisement des critères nous allons exclure des valeurs du critère Pente, avec l'option Restricted de la superposition pondérée. Ceci va empêcher de proposer les sites avec les pentes de plus de 30%. Sauf qu'alors, les seules valeurs acceptables du critère seront 10, 9 et 8, les autres étant exclues. Et donc que, tous les autres critères étant constants, entre la meilleure pente et la pire, le résultat final ne variera que de 0,25

Contribution du critère pente au total si pente =10 -> $10 * 0.125 = 1,25$

Contribution du critère pente au total si pente =8 -> $8 * 0.125 = 1,00$

Vous pourrez essayer de changer les poids, autant que vous voudrez, on trouvera toujours une inadéquation des résultats avec le raisonnement humain. Tout simplement parce que nous ne pondérons pas des critères dans nos têtes. Confondre le fait que nous donnons une importance différente à des critères avec le fait de leur affecter un poids chiffré c'est une fausse bonne idée.

Nous y reviendrons un peu plus loin. Tout d'abord, finissons l'exercice avec Spatial Analyst.

VII.4.6. Superposition pondérée

ETAPES :

1. Ouvrez l'outil Superposition pondérée. (Outils Spatial Analyst -> Superposition -> Superposition pondérée ; voir Figure VII.10)

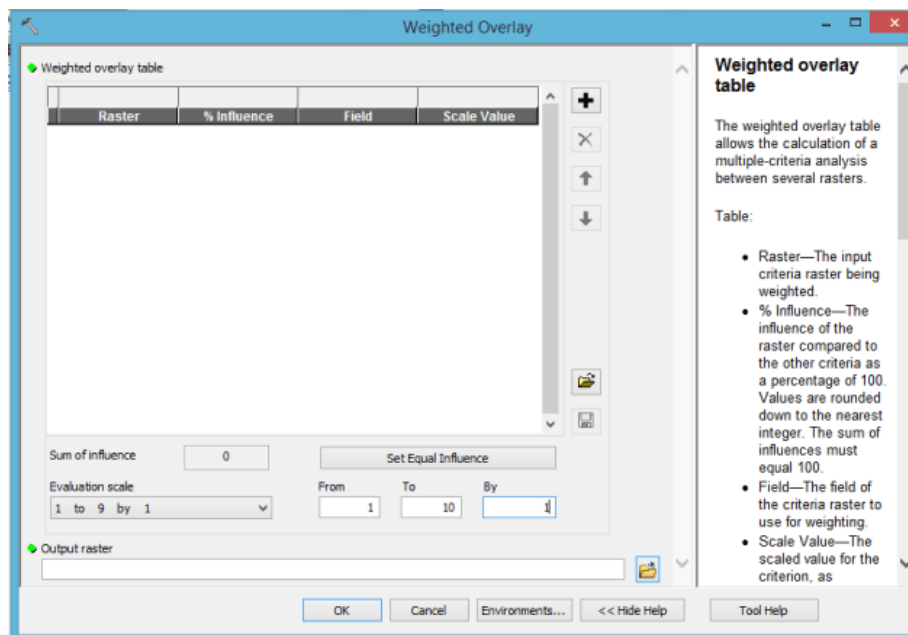


Figure VII.10 : Outil de superposition pondérée.

2. Tapez 1, 10 et 1 dans les zones de texte *De*, *A* et *Par*. L'échelle d'évaluation par défaut va de 1 à 9 par pas de 1. Une échelle de 1 à 10 a été utilisée lors de la reclassification des jeux de données, avant d'ajouter des rasters en entrée à l'outil Superposition pondérée, vous devez donc définir les échelles d'évaluation de 1 à 10 par pas de 1. Cela signifie que vous évitez de devoir mettre à jour les valeurs d'échelle après avoir ajouté vos jeux de données en entrée.
3. Cliquez sur Appliquer
4. Ajoutez la couche *PenteReclass* à l'outil **Superposition pondérée**.
 1. Cliquez sur le bouton **Ajouter une ligne de raster**.
 2. Pour le **Raster en entrée**, sélectionnez *PenteReclass* dans la liste déroulante et laissez le champ en entrée défini sur *Valeur*.
 3. Cliquez sur **OK**

Le raster est ajouté à la Table de superposition pondérée. La colonne *Champ* affiche les valeurs des données *PenteReclass*. La colonne *Valeur d'échelle* reproduit la colonne *Champ* car l'Echelle d'évaluation a été configurée pour

comprendre la plage des valeurs de chaque raster en entrée. A ce stade, vous pouvez modifier les *Valeurs d'échelle* pour chaque classe, mais pour cette entrée les valeurs ont déjà été pondérées convenablement lors de la reclassification. Répétez l'étape précédente pour chacun des jeux de données reclassés : *LanduseReclass*, *DistSchoolsReclass* et *DistRecSitesReclass*.

Pour l'entrée *PenteReclass*, dans la colonne *Valeur d'échelle*, cliquez sur la cellule ayant la valeur 1.

Cliquez sur la flèche de liste déroulante, faites défiler l'affichage, puis cliquez sur *Restreint*.

De cette façon, qu'elles soient les valeurs des autres couches, la valeur résultante sera 0.

Répétez cette opération pour les valeurs 2 et 3 (voir Figure VII.11).

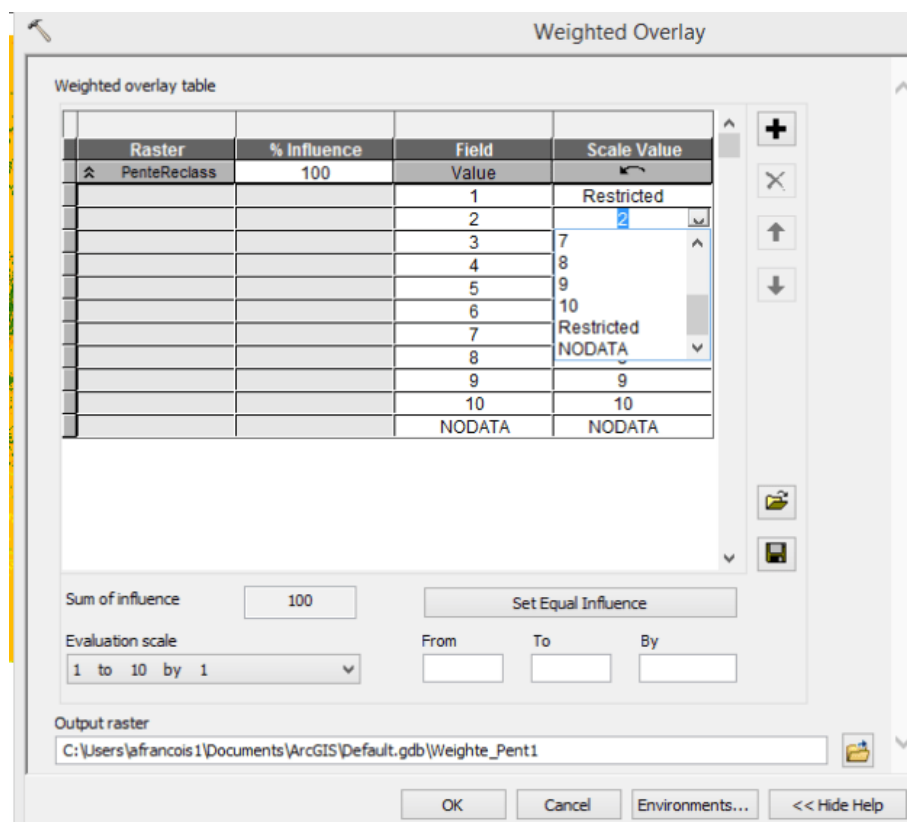


Figure VII.11 : Tableau de Superposition pondérée avec la carte *PenteReclass* ajouté.

Pour la couche *LandUseReclass*, définissez la *Valeur d'échelle* qui représente *Water* et *Wetlands* (0) sur *Restreint*.

Vous affectez maintenant un pourcentage d'influence à chaque raster, selon l'importance (ou la pondération) de chacun dans la carte d'aptitude finale.

Dans la colonne *% Influence*, saisissez les pourcentages pour chacun des rasters en entrée (voir Figure VII.12):

DistSchoolsReclass sur 25

DistRecSitesReclass sur 50

PenteReclass sur 13

LlandUseReclass sur 12

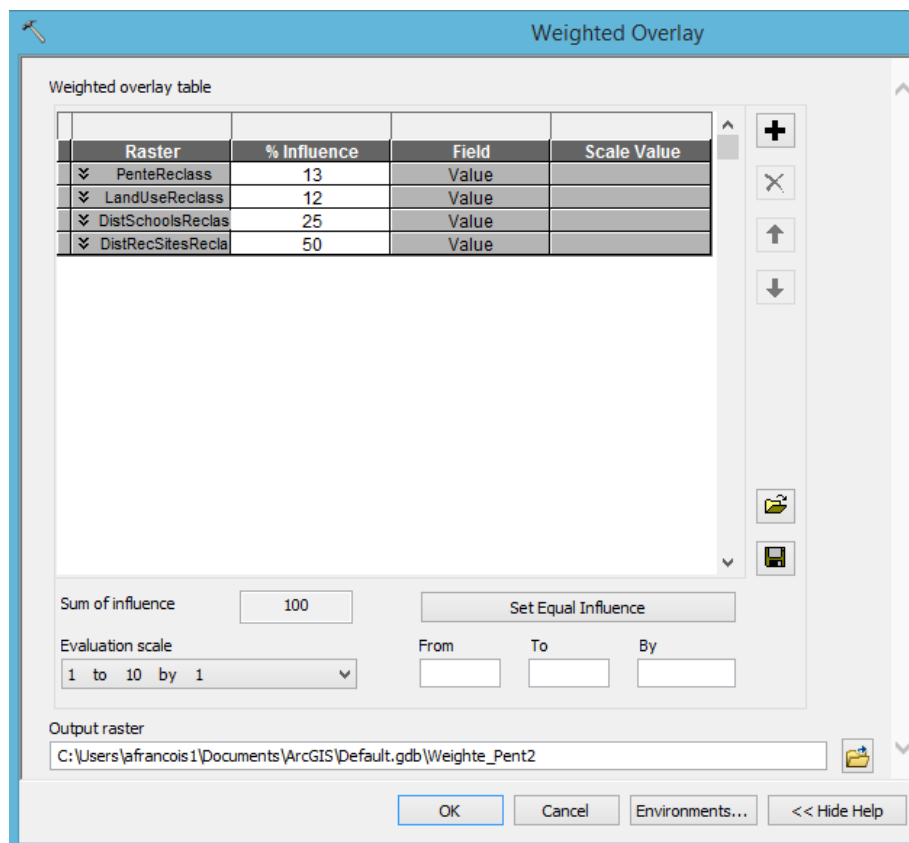


Figure VII.12 : Tableau de Superposition pondérée avec tous les rasters ajoutés ainsi que le pourcentage d'influence de chaque raster.

Cliquez sur OK pour exécuter l'outil.

Le résultat final, notre carte d'aptitude, apparaît ainsi (Figure VII.13) :

Les zones en bleu sont les zones exclues (issues de la commande Restricted de superposition pondérée).

Les zones vertes sont les zones les plus propices.

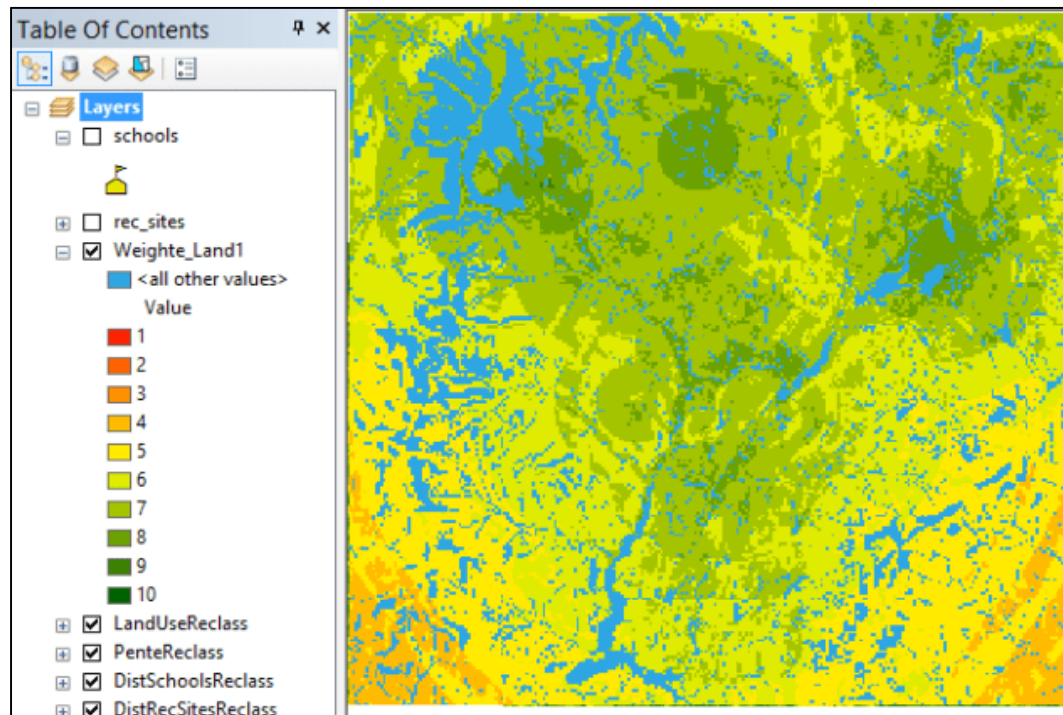


Figure VII.13 : Carte d'aptitude montre les zones les plus propices pour situer l'école.

Bibliographie

- Arnaud, M. and Emery, X. (2000) *Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatistiques*. Hermes Science.
- Bosser, P. (2013) *Cours : Introduction à l'interpolation spatiale et aux géostatistiques*. Available at: <http://cours-fad-public.ensg.eu/course/view.php?id=68> (Accessed: 27 March 2018).
- Brunet, R., Ferras, R. and Théry, H. (1997) *Les mots de la géographie dictionnaire critique*. 3e éditio. RECLUS.
- Bugayevskiy, L. M. and Snyder, J. P. (1995) *Map projections : a reference manual*. London ;;Bristol PA: Taylor & Francis.
- Caloz, R. and Collet, C. (2011) *Analyse spatiale de l'information géographique*. Lausanne: Presses polytechniques et universitaires romandes, collection Ingénierie de l'Environnement.
- Champoux, P. and Bédard, Y. (1992) 'Notions fondamentales d'analyse spatiale et d'opérateurs spatiaux', *Revue des sciences de l'information géographique et de l'analyse spatiale*, 2, pp. 187–208.
- Chang, K.-T. (2008) *Introduction to geographic information systems*. 4th ed. New York: McGraw-Hill.
- Charre, J. (1995) *Statistique et territoire*. Edited by G. R. (2000). Reclus.
- Delaunay, B. (1924) 'Sur la sphère vide', in *Congrès international des mathématiciens*, pp. 695–700.
- Despaigne, W. (2006) *Méthodes géostatistique pour l'interpolation et la modélisation en 2d/3d des données spatiales*. Université de Bretagne Sud.
- Didier, M. (1990) *Utilité et valeur de l'information géographique*. Paris: Economica, c1990.
- ESRI (2018a) *Fonctionnement de Voisin naturel—Aide | ArcGIS Desktop*. Available at: <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/tool-reference/3d-analyst/how-natural-neighbor-works.htm> (Accessed: 27 March 2018).
- ESRI (2018b) *Utilisation du modèle conceptuel pour créer une carte d'aptitude—*

- ArcGIS Help* | *ArcGIS for Desktop*. Available at: <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.3/guide-books/extensions/spatial-analyst/solving-problems/using-the-conceptual-model-to-create-suitability.htm> (Accessed: 27 March 2018).
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M. and Rossiter, D. G. (2007) 'About regression-kriging: From equations to case studies', *Computers & Geosciences*. Pergamon, 33(10), pp. 1301–1315. doi: 10.1016/J.CAGEO.2007.05.001.
- Heritage, G. L. *et al.* (2009) 'Influence of survey strategy and interpolation model on DEM quality', *Geomorphology*. Elsevier, 112(3–4), pp. 334–344. doi: 10.1016/J.GEOMORPH.2009.06.024.
- Koehl, M. *et al.* (2008) 'SIG 3D ET 3D dans les SIG : Application aux modèles patrimoniaux', in *GéoÉvénement 2008*. France, pp. 1–15.
- Konecny, G. (2003) *Geoinformation : remote sensing, photogrammetry, and geographic information systems*. Second edi. Taylor & Francis.
- Krige, D. G. (1981) *Lognormal-de Wijsian Geostatistics for Ore Evaluation*. Johannesburg: Kelvin House.
- Longley, P. (2005) *Geographical information systems : principles, techniques, management, and applications*. 2nd Editio. Edited by P. A. Longley et al. Wiley.
- Matheron, G. (1976) 'Les Concepts de Base et L'Evolution de la Geostatistique Miniere', in *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 3–10. doi: 10.1007/978-94-010-1470-0_1.
- Mitchell, A. (1999) *The ESRI guide to GIS analysis*. ESRI.
- Ouedraogo, M. (2014) *Exactitude du positionnement numérique des axes de ruissellement dans les bassins versants agricoles*. Université de Liège.
- Pike, R. J. (2002) *A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography: supplement 4.0*. U.S. Geological Survey.
- Pumain, D. and Saint-Julien, T. (2010) *Analyse spatiale: Les localisations*. 2e éd.

Armand Colin.

Sibson, R. (1981) 'A brief description of natural neighbor interpolation', in *Interpreting Multivariate Data*. Chichester: John Wiley., pp. 21–36.

Venn, J. (1880) 'On the Diagrammatic and Mechanical Representation of Propositions and Reasonings', *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 10(58), pp. 1–18.