

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/324149696>

Cours de système d'information géographique

Preprint · April 2018

DOI: 10.13140/RG.2.2.32533.78564

CITATIONS

0

READS

23,768

1 author:



Y. Kouba

Université Larbi Ben Mhidi

22 PUBLICATIONS 73 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Land degradation and desertification In Arid Steppe Rangelands Of North Africa [View project](#)

Université LARBI BEN M'HIDI -OEB- Algérie
Faculté des Sciences de la terre et d'Architecture
Département de Géographie et d'Aménagement du territoire



COURS

DE SYSTEME

D'INFORMATION

GEOGRAPHIQUE

Yacine KOUBA

Année universitaire : 2017-2018

AVANT PROPOS

Depuis la deuxième partie de XX^{ème} siècle, le développement de l'informatique a entraîné des modifications importantes pour la géographie et la cartographie. La multiplication de données s'est accélérée, grâce à de nouveaux procédés de collectage et d'acquisition. Le traitement des données localisées s'est largement développé, grâce à la saisie numérique des données graphiques, les capacités de stockage des systèmes informatiques et les systèmes de gestion de bases de données. Récemment grâce aux Système d'Information Géographiques (SIG), des nombreuses parties de la cartographie ont été automatisées et les méthodes de production ont entièrement changé, avec pour conséquence une rapidité dans la propagation et l'utilisation des données.

Les SIG font appel à de nombreux domaines scientifiques et techniques tels que la géodésie, les systèmes de gestion de bases de données, la télédétection, l'analyse spatiale, les statistiques et la cartographie thématique. Ces derniers ont aussi la particularité d'englober une multitude de méthodes, ce qui leur permet de réaliser plusieurs fonctions : modéliser, saisir, stocker, gérer, consulter, analyser et représenter des objets géographiques, avec la possibilité d'intégrer la composante spatiale des objets ainsi que leurs attributs descriptifs.

Ce document constitue une partie très importante du module Système d'Information Géographique est destiné aux étudiants d'aménagement du territoire et de géographie.

L'objectif principal, c'est de présenter aux étudiants les différentes clés qui leur permettront de remplir les différentes tâches autour du SIG lors de leurs futures activités. Ainsi, à l'issue de ce cours les étudiants auront les capacités nécessaires pour saisir les concepts de bases et découvrir les différentes fonctionnalités des SIG, ce que leur permettront d'utiliser efficacement ces nouvelles technologies (SIG) pour le traitement de données, particulièrement cartographiques, qui seront mises à leur disposition au cours de leurs vies professionnelles.

Table des matières

I. Généralités.....	1
I.1. Définitions de Système d'Information Géographique (SIG).....	1
I.2. Historique de SIG.....	1
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	6
I.8.3. Logiciels Commerciaux.....	6
II. Les données dans les SIG.....	7
II.1. Types de données dans les SIG.....	7
II.1.1. Données spatiales	7
II.1.2. Données associées.....	11
II.2. Mode d'acquisition des données géographiques	11
II.2.1. Import de fichiers	11
II.2.2. Levés topographiques (par l'utilisation d'un Théodolite).....	12
II.2.3. Photos aériennes	12
II.2.4. Images satellites	14
II.2.5. Global Positioning System (GPS).....	14
II.2.6. Digitalisation	15
II.2.7. Scannage de plans.....	15
II.3. Notion de base de données géographique	16
III. Notions spatiales fondamentales	17
III.1. Systèmes de référence géographique.....	17
III.1.1. Coordonnées géographiques.....	17
III.1.2. Géoïde, Ellipsoïde et Datum.....	18
III.1.3. Exemples de systèmes de référence géographique	19
III.2. Systèmes Projections cartographiques.....	19
IV. Analyse spatiale.....	25
IV.1. Quelques définitions de l'analyse spatiale.....	25
IV.2. Analyse spatiale en mode vecteur	25
IV.2.1. Opérateurs danalyse spatiale en mode vecteur	25

IV.2.1.4. Opérateurs spatiaux statistiques	34
IV.3. Analyse spatiale en mode raster.....	35
IV.3.1. Opérateurs raster.....	35
V. Interpolation des données spatiales.....	43
V.1. Définition.....	43
V.2. L'interpolation déterministe globale	45
V.3. L'interpolation déterministe locale.....	45
V.3.1. Polygones de Thiessen	45
V.3.2. Méthodes d'interpolation à partie d'une triangulation	47
V.3.3. Méthodes d'interpolation barycentriques.....	48
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
VI.2.1. Courbes de niveau	54
VI.2.3. Représentation maillée (grille, matrice, raster).....	56
VI.3. Formats et résolution	56
VI.4. Modes d'acquisition de l'altitude.....	56
VI.4.1. Acquisition directe par des méthodes de topométrie : Levés sur le terrain de topométrie.....	56
VI.4.2. Numérisation (vectorisation) de courbes de niveau provenant de cartes	57
VI.4.3. Restitution photogrammétrique de photographies aériennes.....	57
VI.4.4. Radargrammétrie	60
VI.4.5. Laser grammétrie ou altimétrie par «laser à balayage».....	62
VI.6. Comparatif de validité.....	64
VI.7. Quelques sources de MNT/MNA.....	65
VI.8. Variables du relief dérivées.....	65
VI.8.1. Pente, orientation.....	65
VI.8.2. Concavité, convexité.....	65
VI.9. Variables thématiques dérivées.....	66
VI.9.1. Visibilité.....	66
VI.9.2. Ombre portée et ombre projetée.....	67
VI.9.4. Ligne de drainage.....	69
VI.9.5. Limites de bassin versant hydrologique.....	69
VI.10. Domaines d'application	70

VI.10.1. Usages du MNA	70
VI.11. Usages du MNA	72
VII. SIG comme outil d'aide à la décision : Création des cartes d'aptitude.....	75
VII.1.1. définition du problème.....	75
VII.2. analyse du problème et exploration des données.....	75
VII.3. Exécution de l'analyse	77
VII.3.1. Création de la carte de distances euclidienne à partir des installations récréatives.....	77
VII.3.2. Création de la carte de distances euclidienne à partir des écoles existantes.....	77
VII.3.3. Création et classification de la Carte des pentes	78
VII.3.4. Classement de la carte d'occupations du sol	79
VII.3.5. Pondération et superposition des cartes résultantes.....	80

I. Généralités

I.1. Définitions de Système d'Information Géographique (SIG)

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

1) La définition de l'économiste Didier (1990) « *Un SIG est un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision* ».

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

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

4) Selon Konecny (2003) « *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* ».

I.2. Historique de SIG

Premièrement les SIG sont parus pendant les années 60 au Canada et aux États Unis. Les chercheurs de Canadian Geographic Information System (1964) sont les premiers qui ont utilisés les SIG pour rassembler des informations relatives à l'usage du sol, et des données concernant l'environnement, sur une grande partie

du canada. Deux autres institutions aux Etats Unis à savoir le « New York Land Use Information System (1967) » et le « Minnesota Information System (1969) » ont aussi utilisés les SIG durant cette décade. Depuis lors, les coûts et les difficultés techniques ont largement réduit.

I.3. L'information géographique (IG)

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

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

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

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

1. Par ses caractéristiques diverses (c.-à-d. sa nature et son aspect).
2. Par son emplacement sur la terre.

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



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

I.4. Les principales composantes d'un SIG

Selon ESRI France (ESRI, 2018) un Système d'Information Géographique est composé de :

A/ Matériel informatique (hardware)

Les SIG marchent sur une très grande panoplie d'ordinateurs (pc de bureaux raccordés en réseau ou exploités de manière autonome).

B/ Logiciels (software)

Les logiciels de SIG offrent les outils nécessaires pour sauvegarder, examiner et visualiser l'information géographique.

C/ Données (Information Géographique)

Les données constituent la composante maîtresse des SIG. L'information géographique peut, soit être constituée en interne, soit acquise auprès de producteurs de données.

D/ Personnel formé

Un SIG étant avant tout un outil, donc c'est à l'utilisateur « expert en SIG » de l'exploiter. Il faut signaler que les SIG sont élaborés d'une manière qui leurs permettent d'être manipulés par plusieurs types d'utilisateurs, depuis ceux qui

créent et maintiennent les systèmes, jusqu'aux utilisateurs de logiciel pour le traitement de l'information géographique. Actuellement, grâce à l'accès des SIG sur Internet, le nombre d'utilisateurs de SIG s'agrandit de façon importante.

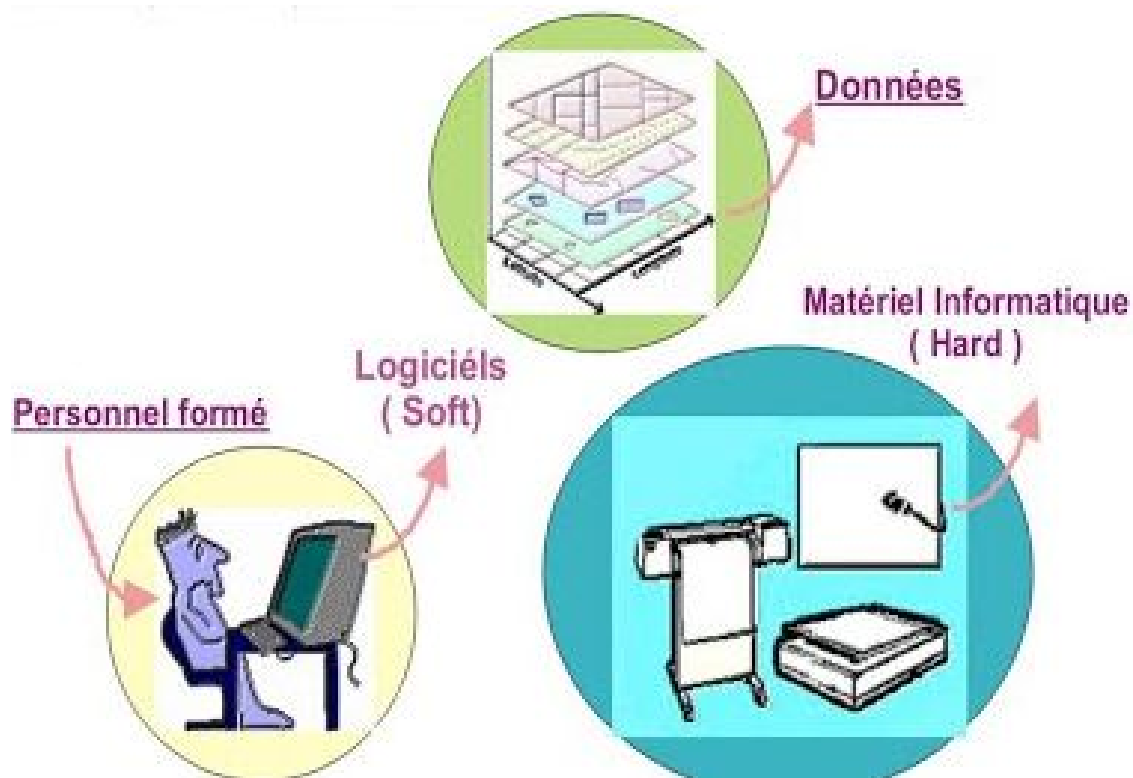


Figure I.2 : Les principales composantes de SIG (<https://sites.google.com/site/pastoraldz/>).

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

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

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

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

Archiver : Le logiciel doit avoir une grande capacité de stockage des données.

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

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

I.6. Domaines d'application des SIG

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

- **Pour les grandes échelles**

- La gestion foncière et cadastrale : ex. recensement des propriétés privées et le calcul de leurs surfaces.

- La planification urbaine : ex. réalisation des cartes d'occupation des sols et plans d'aménagement urbain.

- La gestion des réseaux : ex. réseau d'assainissement, approvisionnement en eau potable, gaz, électricité, téléphone, etc.

- La gestion des espaces verts naturels ou urbains : ex. parcs naturels et jardins publics.

- **Pour les échelles moyennes et petites**

- L'identification des meilleurs endroits pour l'emplacement d'une nouvelle ressource ou ce que n'appelle carte d'aptitude

- Les études d'ingénierie routière : ex. constructions de routes ou d'autoroutes.

- Les applications liées à la prévention des risques naturels.

I.7. Le SIG idéal

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

- Rentable : en fonction de l'autorisation de l'organisation.
- Pertinent : notamment pour les résultats.
- Flexible : il faut qu'il soit capable d'évoluer.
- Sécuritaire : il protège l'information confidentielle.
- Compétitif : vérification de la qualité et le rendement des traitements.

- Autonome : notamment le logiciel, afin d'assurer l'évolution de la portabilité.
- Coopératif : les tâches et les fonctions des différents services et individus impliqués, il faut qu'elles soient bien définies.
- Motivant : la conception et l'utilisation doivent être gérées par l'utilisateur.
- Documenter : la documentation doit être écrite conjointement au développement du logiciel.

I.8. Quelques logiciels SIG

I.8.1. Logiciels libres

GRASS GIS : Il rassemble des propriétés de traitement d'images satellitaires et des fonctionnalités à base topologique.

Map Server : Logiciel libre d'édition des cartes sur le web.

QGIS : Il permet de visualisé les cartes ainsi que leurs transformation. Il présente une qualité qui le rend très simple à utiliser.

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

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

I.8.2. Logiciels Gratuits

DIVA-GIS : Offre des outils d'analyse statistique et géostatistique de l'information géographique.

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

I.8.3. Logiciels Commerciaux

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

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

Toutes les géométries spatiales peuvent être décrites par 4 types de propriétés :

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

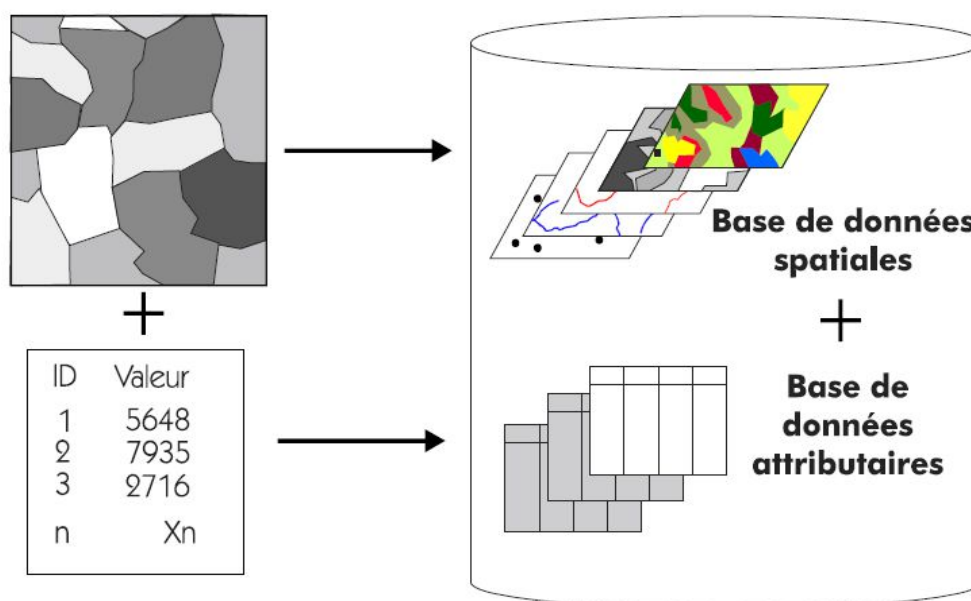


Figure II.1 : Types de données dans un SIG (<https://www.esrifrance.fr>).

II.1.1. Données spatiales

Elles déterminent les caractéristiques spatiales d'une entité géographique où sont figurés et reconnus tous les objets graphiques (Figure II.1) :

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

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

- 1) **Mode vecteur** : Les données vecteur sont un ensemble d'objets spatiaux représentés chacun par les éléments suivants : point, ligne et polygone.

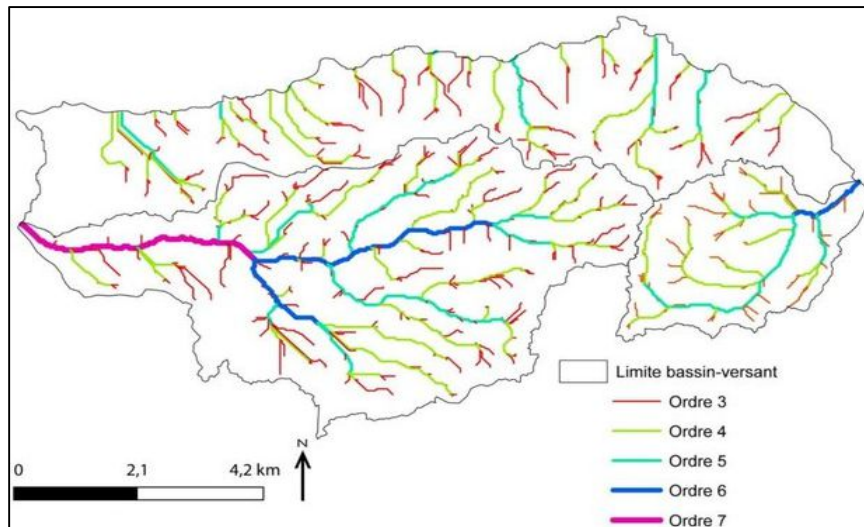


Figure II.3 : Exemple de données linières (carte de réseau hydrographique dans la partie occidentale d'Alger ; Menad, 2012).

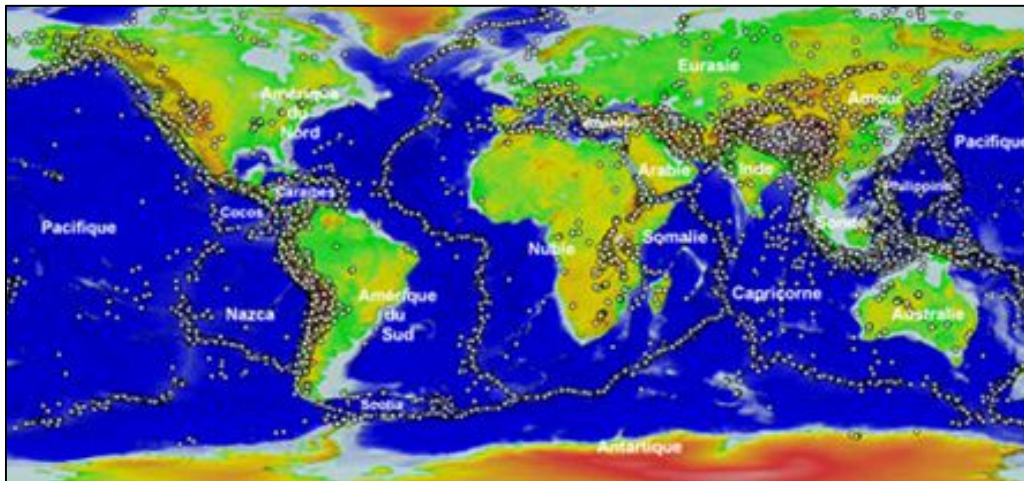


Figure II.4 : Exemple de données ponctuelles (Carte de la sismicité mondiale. Les épencentres sont issus du catalogue de l'United States Geological Survey, pour la période 1973-2008 et pour tous les séismes de magnitude supérieure à 5 ; <https://www.irsn.fr>).

○ **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 correspondent pas nécessairement aux frontières des entités sur le terrain.

Il y a deux types de données Raster :

- ✓ Les images : qui sont utilisées essentiellement pour la représentation cartographique [Figure II.6 (a)]. C'est l'exemple d'une photo aérienne où

l'information incluse dans la matrice de pixel concerne la couleur de représentation de l'information. Cette information n'est pas directement accessible.

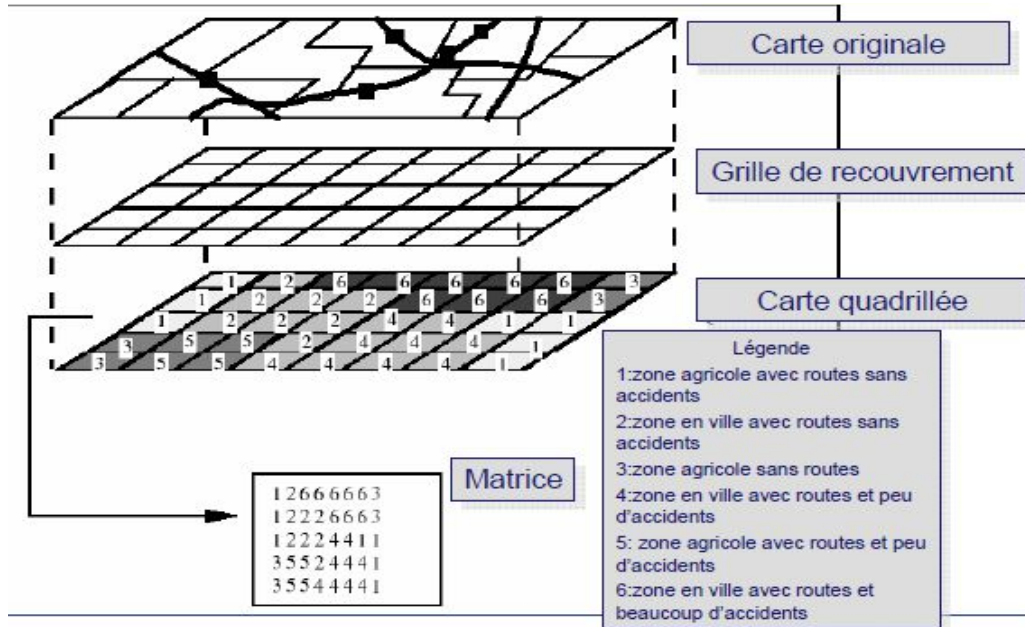


Figure II.5 : Représentation schématique d'une carte raster (<https://fr.slideshare.net>).

✓ Les grilles ou grids : sont utilisés pour le calcul et la modélisation (Figure II.6 (b)). Exemple de Modèle numérique de terrain où l'information contenue dans la matrice de pixel concerne une valeur quantitative (ex. altitude). Cette

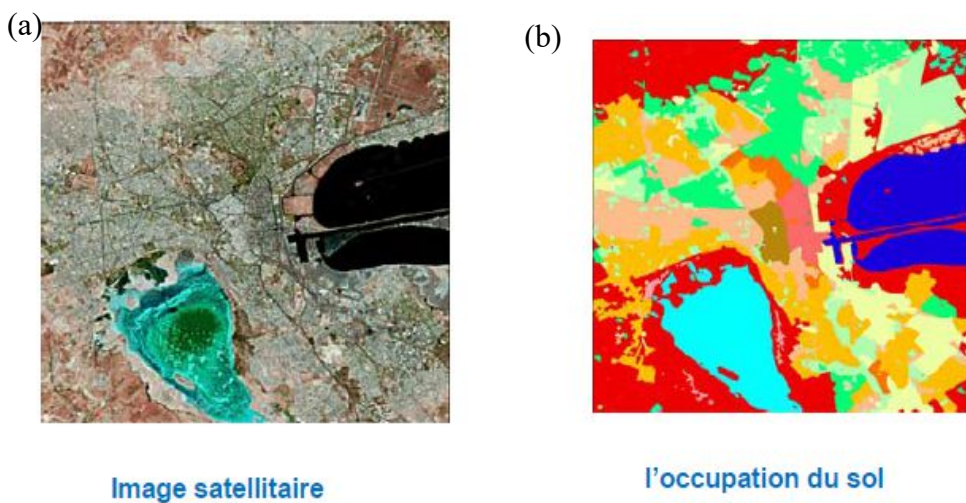


Figure II.6 : Exemples (a) d'une image satellitaire et (b) une grille raster (<https://fr.slideshare.net>).

- ✓ information peut être vue et modifiée dans la table attributaire.

II.1.2. Données associées

Les données associées des objets spatiaux complètent la représentation géométrique de l'entité spatiale. En fait, chaque élément de l'espace (c.à.d. point, ligne, ou polygone) reçoit un code d'identification (ID) qui peut être numérique ou littéral. Ce dernier compose en une étiquette déterminant l'entité spatiale. Parmi les données associées on distingue :

a) Données de classification

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

b) Données d'identification

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

c) Données attributaires

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

II.2. Mode d'acquisition des données géographiques

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

II.2.1. Import de fichiers

Il y a généralement trois manières pour importer les données spatiales :

- Importer une base de données arrangée dans un format interne à un SIG. Cette méthode est valable entre les SIG d'un même type mais elle est compliquée entre des SIG de types ou de versions distinctes.
- Importer un fichier texte (txt) contenant tous les renseignements structurés de manière primitive. Il faut noter que cette méthode nécessite un arrangement

des données importés pour qu'elles concordent avec la structure interne du SIG.

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

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

Un théodolite (Figure II.7) est un appareil de géodésie parachevé d'un dispositif d'optique, calculant des angles dans les deux plans horizontal et vertical pour identifier une direction. Il est employé pour effectuer les mesures d'une triangulation. Cet instrument permet d'obtenir le tracé de voisin en voisin à partir d'un point d'origine.



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). Les clichés photographiques obtenus nous permettent de déterminer les coordonnées et l'altimétrie des points.

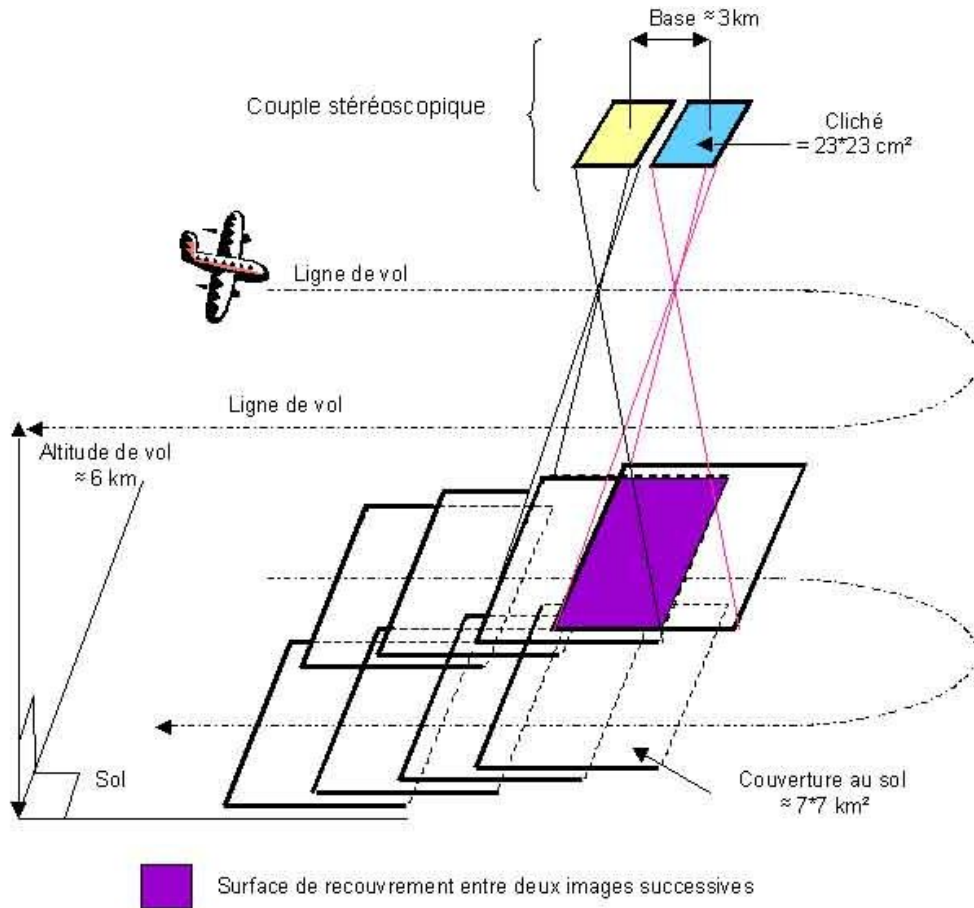


Figure II. 8 : Plan de vol d'un avion d'acquisition de photos aériennes (<https://perso-sdt.univ-brest.fr>).

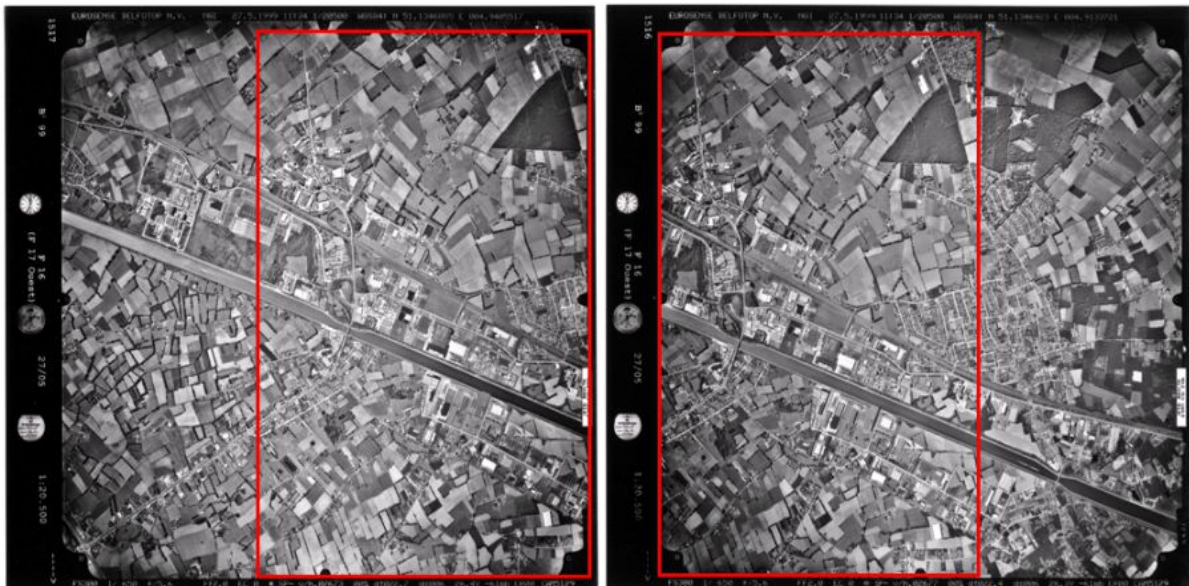


Figure II. 9 : Couple stéréoscopique de Tongerlo, Belgique, 17-05-1999. Le recouvrement est indiqué par les rectangles rouges (<http://www.seos-project.eu>).

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.10). Les données doivent subir certains traitements rectificatifs avant de les intégrer dans un SIG.

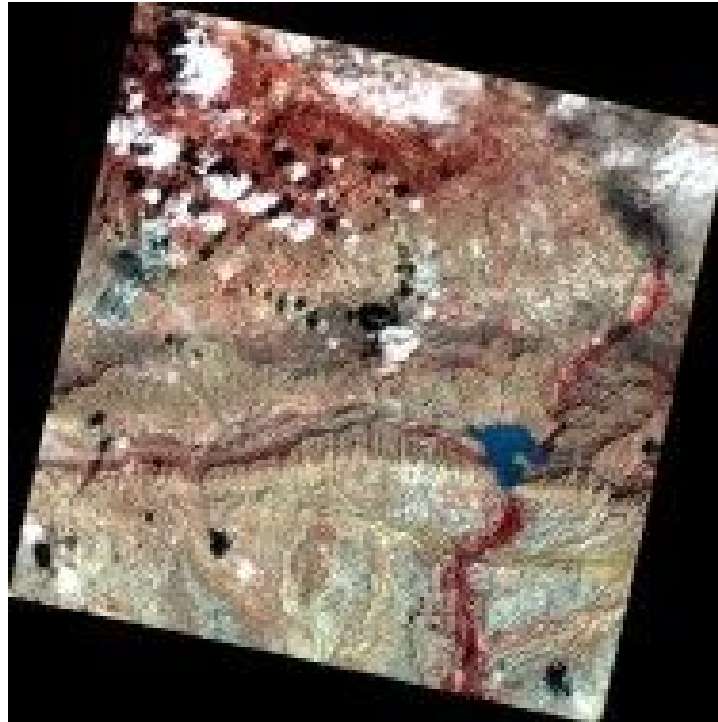


Figure II.10 : Image satellite prise par le satellite ALSAT-2A (<http://www.asal.dz>).

II.2.5. Global Positioning System (GPS)

Le système GPS (Figure II.12 (a)) permet le calcul à l'aide des satellites (Figure II.11 (b, c)) la position (coordonnées avec une précision de quelques centimètres voire même quelques millimètres).

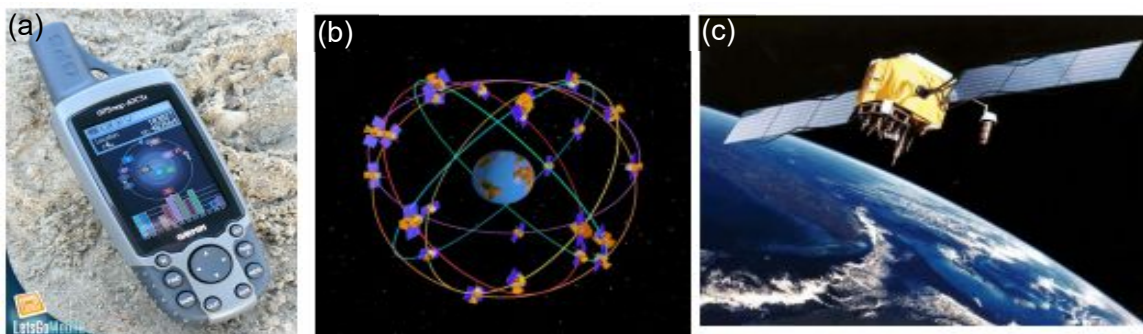


Figure II.11 : (a) Système de localisation par satellite (GPS) et satellites (b et c).

II.2.6. Digitalisation

La digitalisation (Figure II.12) est adaptée à la représentation vectorielle. Cette technique assure la préservation des informations présentées dans le document de base. Un traitement préalable sur les documents de base peut s'avérer nécessaire si ceux-ci sont trop chargés.

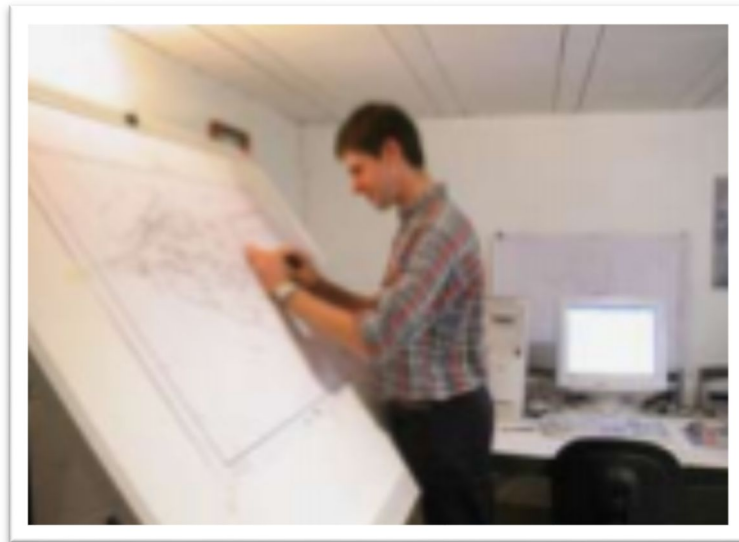


Figure II.12 : Une table de digitalisation.

II.2.7. Scannage de plans

Convient parfaitement à la représentation raster (Figure II. 14). Ce mode de saisie est rapide et peu coûteux. Si la donnée est scannée et géoréférencée c'est de la

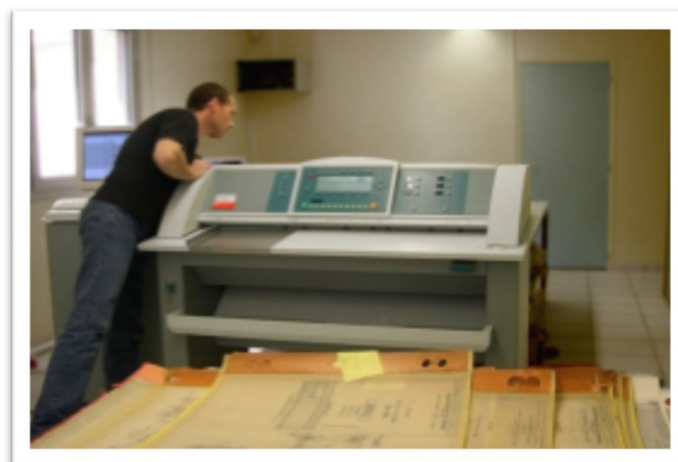


Figure II. 13 : Scanner automatique, utiliser pour le scannage de plans.

donnée «raster ». Le seul problème de cette méthode est la réécriture des erreurs dues au support d'origine.

II.3. Notion de base de données géographique

Les SIG stockent les données spatiales et les données attributaires sous forme d'une base de données géographique (Figure II.15), cette dernière est composée d'une série de couches d'information géographique ordonnées de manière efficace pour être utilisées 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).

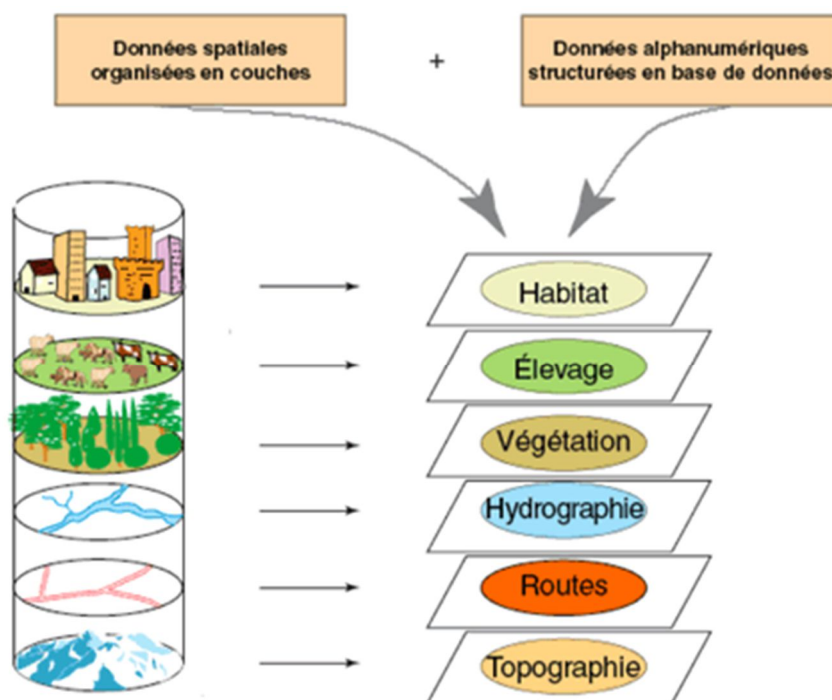


Figure II.14 : Représentation schématique d'une base de données géographique : ensemble de couches superposables (<http://www.cartographie.ird.fr>).

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 qui est caractérisée dans l'hémisphère nord par l'étoile polaire, qui est presque alignée sur l'axe des pôles.

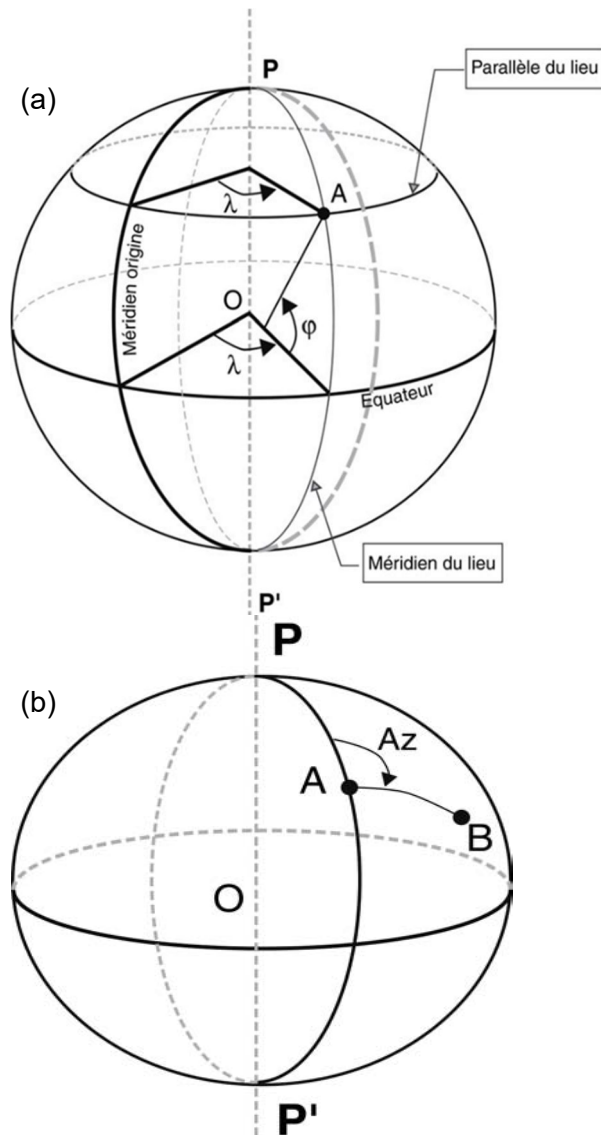


Figure III.1 : représentation de longitude, latitude et azimut (<http://cours-fad-public.ensg.eu>).

III.1.2. Géoïde, Ellipsoïde et Datum

III.1.2.1. Un géoïde

Est une représentation quasi exacte de la surface terrestre, il colle au plus près à la surface réelle de la terre. (Figure III.2). Il sert de zéro de référence pour les mesures exactes d'altimétrie. 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 représentation régulière du globe terrestre, qui s'éloigne au maximum de quelques dizaines de mètres du géoïde (Figure III.2). L'ellipsoïde est un ovoïde formé d'un grand axe et d'un petit axe. Quant à l'ellipsoïde global, le demi-grand axe est le rayon entre le centre de la terre et l'équateur, tandis 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)

Le datum (Figure III.2) est créé sur un ellipsoïde local et peut enjoinde des modifications locales d'altitude. Le changement du datum implique un changement dans les valeurs des coordonnées d'une carte.

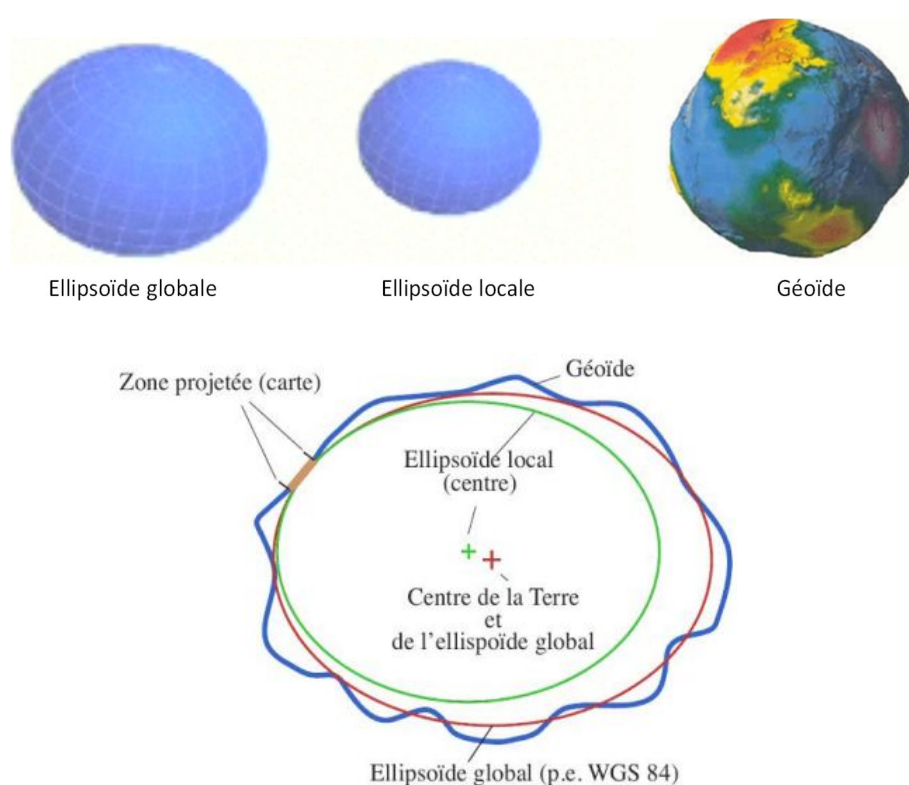


Figure III.2 : Géoïde, ellipsoïde global et ellipsoïde local (<https://vdatum.noaa.gov>).

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.

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 l'ellipsoïde sur une surface plate ou déroulable en un plan (ex. 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 :

- a) en fonction de l'espace représenté par la carte (carte mondiale, carte continental, carte d'un pays ou d'une région, etc.). Plus l'étendue de la carte est grande, plus les altérations sont considérables. Généralement, les cartes de petits étendues sont largement précises (ex. cadastre, parcellaire).

- b) par rapport au type de traitement/d'affichage : par exemple en statistique on préfère les projections qui conservent les aires, mai en navigation les projections qui conservent les angles sont préférées.
- c) Ca dépend de la région (ex. polaire ou non).
- d) pour des raisons légales, historiques, et/ou de l'accessibilité des informations (ex. cadre européen).

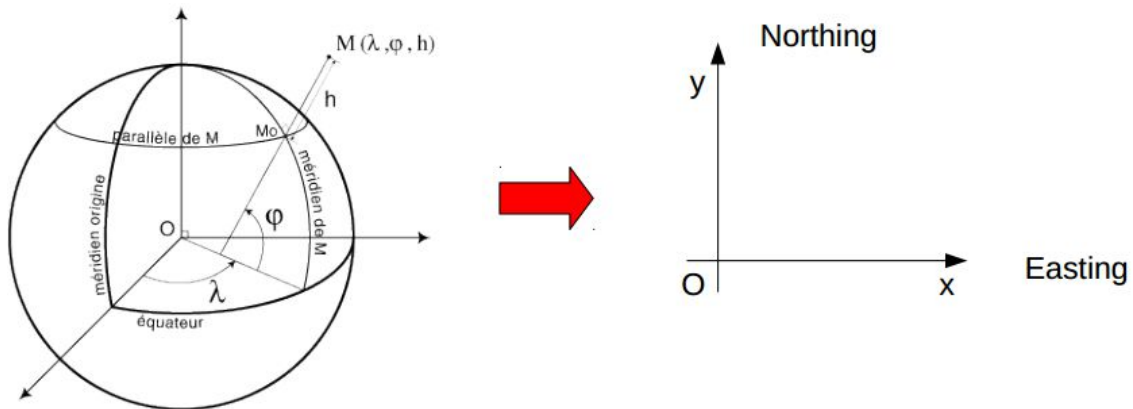


Figure III.3 : La transformation de (lon. lat.) à (x, y), x et y sont exprimés en mètre par rapport à l'origine (<https://docplayer.fr>).

Les projections cartographiques peuvent être classées basant sur la surface de 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.

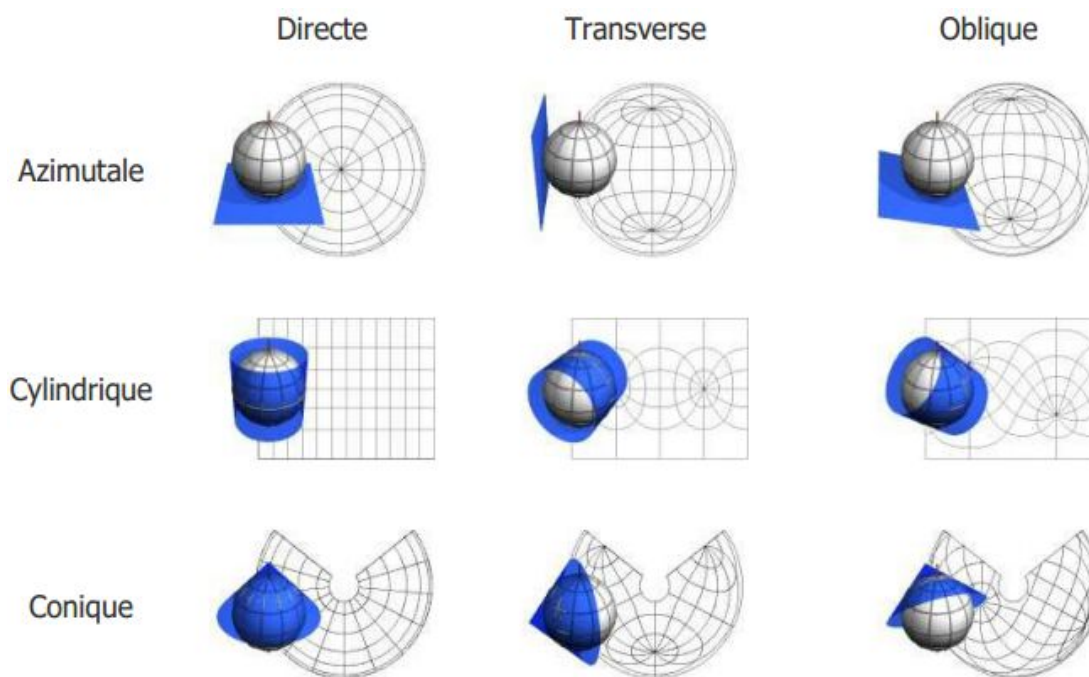


Figure III.4 : Les types de projections cartographiques (<http://www.in-terre-active.net>).

Chacune des projections peut être en plus directe, transverse ou oblique (Figure III.4).

➤ 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 aphylactique : ne conserve ni les angles (n'est pas conforme) ni les surfaces (n'est pas 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 ainsi que leurs descriptions.

Projection cartographique	Description
Projection azimutale équidistante	La principale caractéristique de cette projection réside dans le fait que la distance et la direction, mesurées à partir du point central, sont toutes deux exactes.
Projection cylindrique équivalente de Behrmann	Il s'agit d'une projection cylindrique équivalente, appropriée pour réaliser des cartes du monde.
Projection de Bonne	Cette projection équivalente respecte l'échelle vraie le long du méridien central et de tous les parallèles.
Projection de Cassini-Soldner	Cette projection cylindrique transverse respecte l'échelle le long du méridien central et de toutes les lignes qui lui sont parallèles. Cette projection n'est ni équivalente ni conforme.
Projection cylindrique équivalente Lambert	Lambert est le premier à avoir décrit en 1772 cette projection équivalente, peu utilisée.
Projection conique équidistante	Cette projection conique peut s'appuyer sur un ou deux parallèles de référence. Comme son nom l'indique, tous les parallèles concentriques sont régulièrement espacés le long des méridiens.
Projection cylindrique équidistante	Il s'agit de l'une des projections les plus faciles à construire car elle forme une grille de rectangles égaux.
Projection gnomonique	Cette projection azimutale perspective utilise le centre de la Terre comme point de perspective.
Projection azimutale équivalente de Lambert	Cette projection respecte la surface des polygones individuels tout en conservant les vraies directions à partir du centre.
Projection conique conforme de Lambert	Cette projection est parmi les mieux adaptées aux latitudes moyennes. Elle est similaire à la projection équivalente conique d'Albers mais permet une meilleure conservation des formes.
Projection de Mercator	Créée initialement pour afficher des relèvements au compas précis pour la navigation maritime, cette projection définit en outre clairement et précisément les formes locales.
Projection cylindrique de Miller	Cette projection est similaire à la projection de Mercator mais la distorsion des régions polaires est moindre.
Projection de Mollweide	Carl B. Mollweide a créé cette projection pseudo-cylindrique en 1805. Il s'agit d'une projection équivalente conçue pour les cartes à petite échelle.
Projection stéréographique polaire	Cette projection est équivalente à la projection stéréographique d'aspect polaire sur un ellipsoïde. Le point central est le pôle Nord ou le pôle Sud.
Projection de Robinson	Il s'agit d'une projection non caractérisée utilisée pour réaliser des cartes du monde.
Projection conique simple	Cette projection conique peut s'appuyer sur un ou deux parallèles de référence.
Projection de Mercator oblique spatiale	Cette projection est quasi conforme et présente une faible distorsion d'échelle dans la plage de détection d'un satellite de cartographie en orbite tel que Landsat. Prise en charge uniquement dans ArcInfo Workstation.
Projection de Mercator transverse	Cette projection est similaire à la projection de Mercator mais le cylindre est tangent le long d'un méridien et non de l'équateur. Le résultat est une projection conforme sans conservation des directions réelles.
Projection de Mercator transverse universelle	Le système de coordonnées Universal Transverse Mercator est une application spécialisée de la projection de Mercator transverse. Le globe est divisé en 60 zones, chacune d'elles s'étendant sur 6 degrés de longitude.

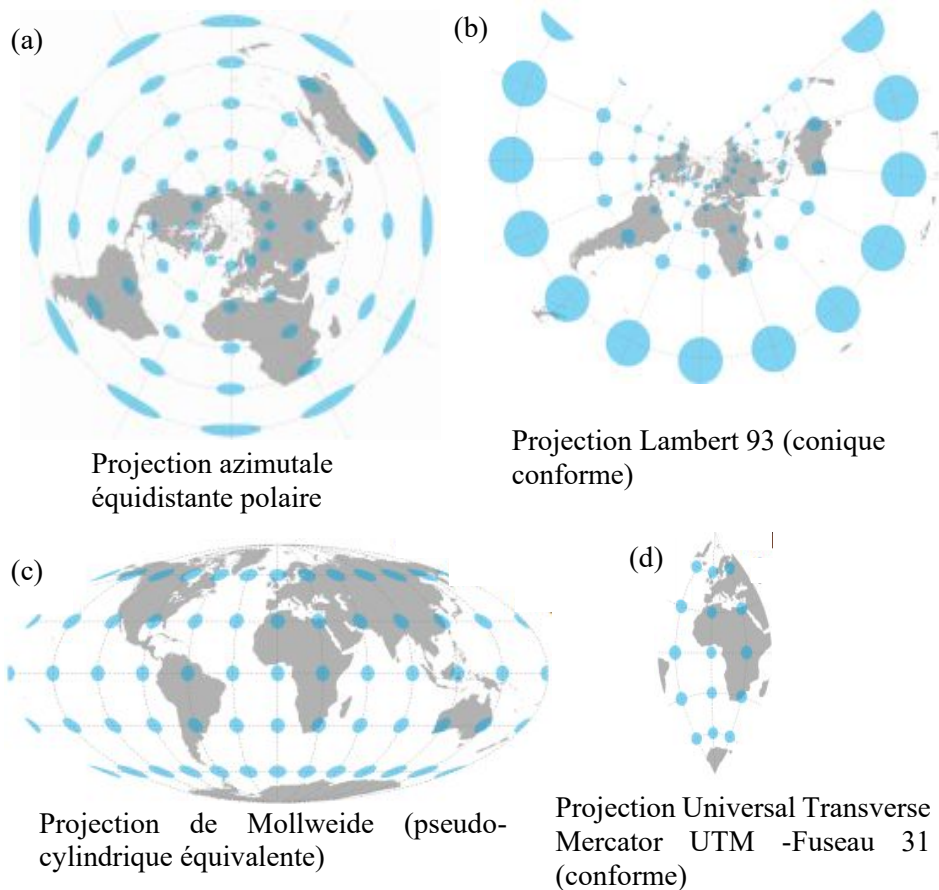


Figure III.5 : Quelques systèmes de projections utilisés dans le monde (<http://www.ign.fr>).

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

Cette projection est surtout utilisée pour les cartes de grande échelle (fine résolution). Le centre de projection est variable, sur la sphère terrestre, pour chaque zone prédéfinie. Il y a 20 bandes de latitude (entre 84°N-80°S) et 60 bandes en longitude (1200 zones) (Figure III.6). Les coordonnées (x, y) reflètent la position dans une zone ; “y” est en mètre par rapport à l'équateur tandis que “x” est en mètre par rapport au méridien central de la zone (il faut rappeler qu'il y a 1200 zones). 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.à.d. conserve les formes).

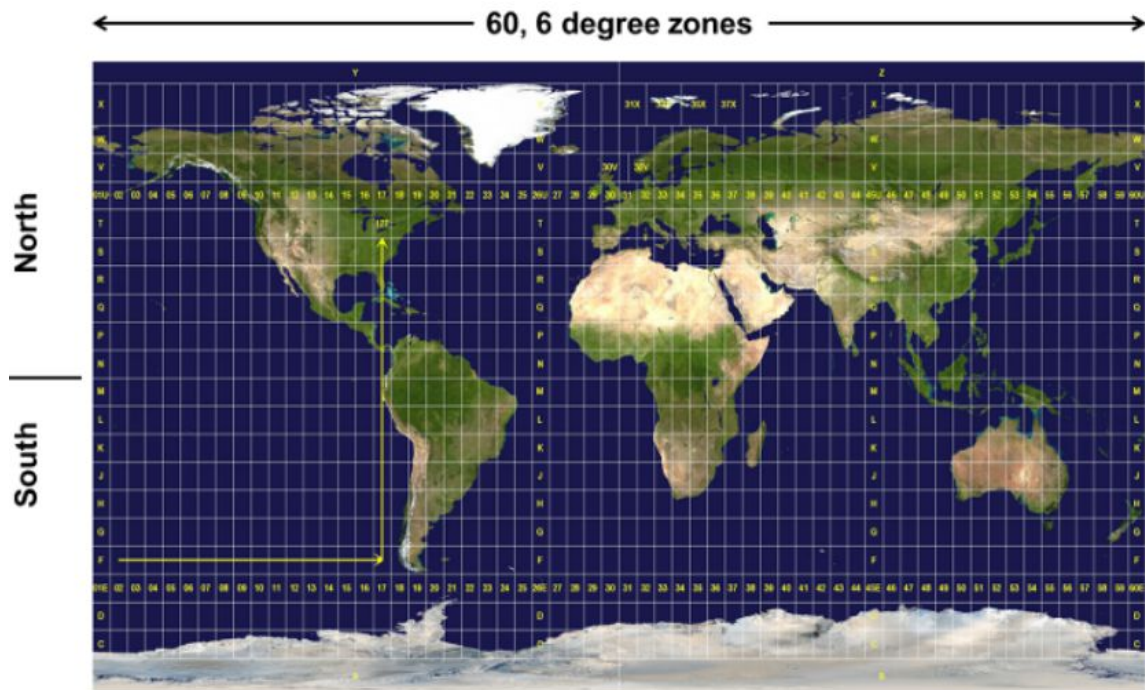


Figure III.6 : Projection Universal Transverse Mercator (UTM) (<http://gsp.humboldt.edu>).

IV. Analyse spatiale

IV.1. Quelques définitions de l'analyse spatiale

- Pumain et Saint-Julien (2010) : *«étude formalisée de la configuration et des propriétés de l'espace produit et vécu par les sociétés humaines»*.
- Charre (1995): *«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»*.
- Brunet et al. (2009) : *«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»*.
- Champoux et Bédard (1992) : *«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»*.

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 des combinaisons d'opérateurs logiques dans un diagramme de Venn (Venn, 1880).

Tableau IV.2 : Opérateurs logiques.

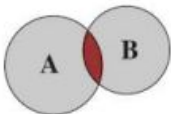

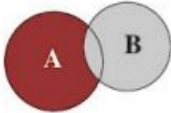

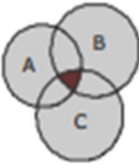
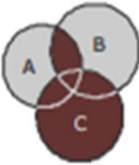

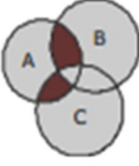
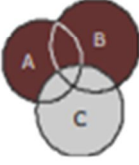

Opérateur	Description	Exemple	Diagramme
AND	Opérateur logique « et »	A AND B	
OR	Opérateur logique « ou », appelé également « ou inclusif »	A OR B	
NOT	Opérateur logique « et non »	A NOT B	
XOR	Opérateur logique « ou et uniquement ou », appelé également « ou exclusif »	A XOR B	

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. Operateurs 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 la géométrie des entités géographiques.

#Information métrique codée (Figure IV.1)

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

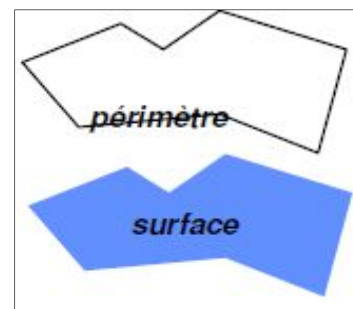


Figure IV.1 : Exemples de l'information métrique codée.

#Information métrique calculée (Figure IV.2)

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

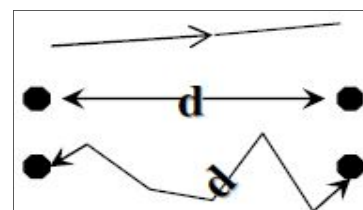


Figure IV.2 : Exemples de l'information métrique calculée.

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.

OPERATEUR	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).

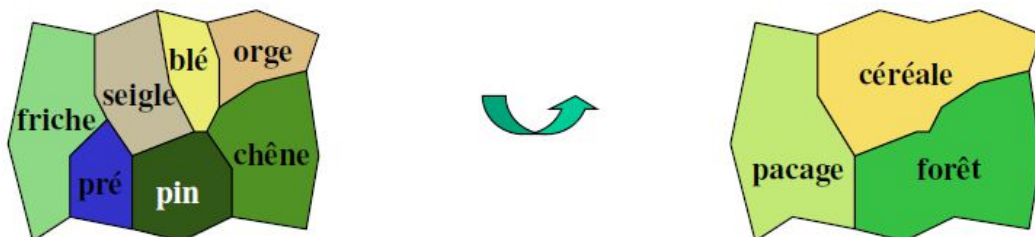


Figure IV.3 : Exemple de fusion de polygones.

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

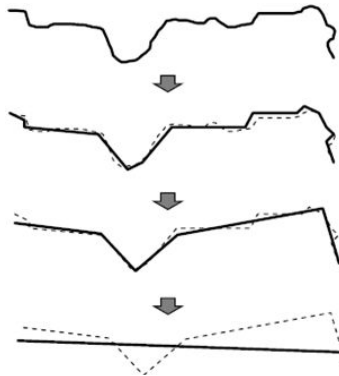


Figure IV.4 : Exemple de généralisation.

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

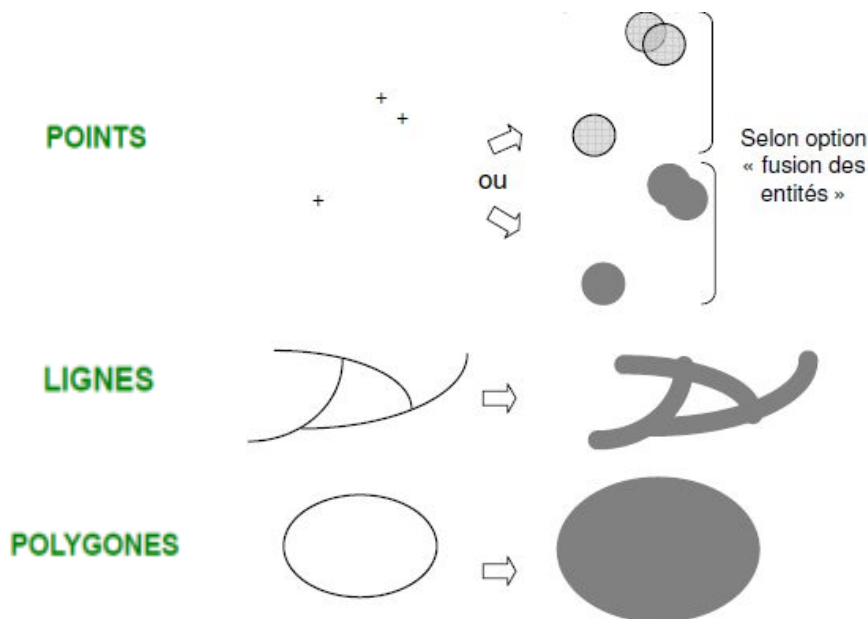


Figure IV.5 : Exemples de la fonction buffer appliquée à un point, une ligne et un polygone (<https://fr.slideshare.net>).

IV.2.1.3.3. Opérateurs spatiaux topologiques concernant deux couches

#Intersection de géométries : cette opération couper une couche d'entrée avec les entités d'une couche de recouvrement pour produire une couche de sortie composée d'entités ayant des attributs de données des deux couches (Figure IV.6).

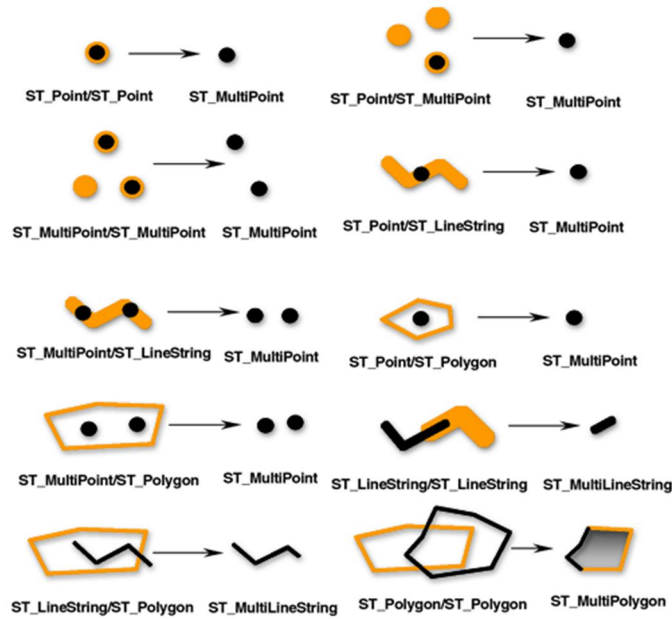


Figure IV.6 : Intersection de géométries ; La fonction d'intersection retourne l'ensemble d'intersections comme géométrie constituant la dimension minimale des géométries source (<http://desktop.arcgis.com>).

#Agrégation de géométries : cette opération combine les entités d'une couche d'entrée avec les polygones d'une couche de recouvrement, produisant ainsi une

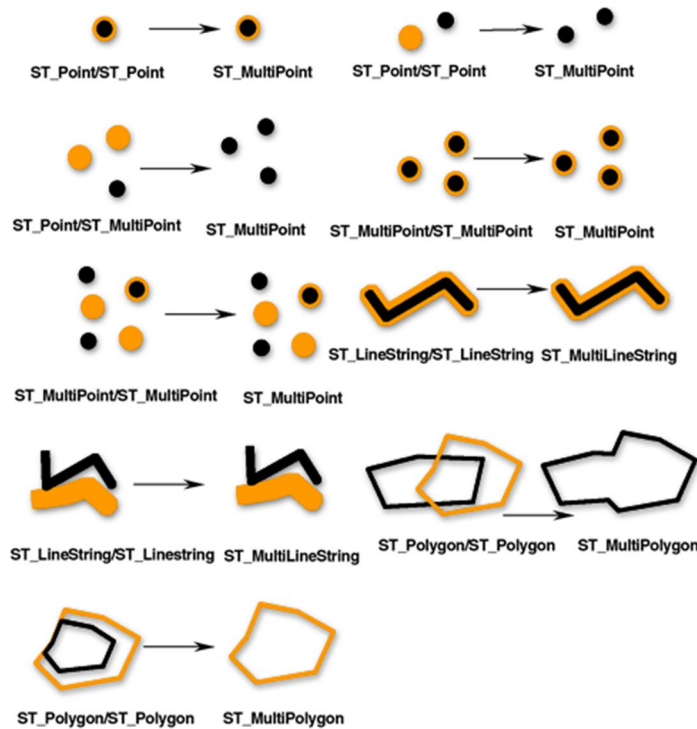


Figure IV.7 : Union entre deux couches ; La fonction Union retourne l'ensemble de deux géométries (<http://desktop.arcgis.com>).

couche de sortie contenant les attributs et l'étendue géographique des deux couches (Figure IV.7).

#Différence et différence symétrique :

La fonction de différence retourne la section de la première géométrie non intersectée par la deuxième géométrie. Cette fonction agit uniquement sur les géométries de dimension similaire et donne un ensemble incluant la même dimension que les géométries source ; elle retourne une géométrie vide si les deux géométries source sont semblables (voir Figure IV.8).

La fonction de différence symétrique retourne les parts des entités source qui ne font pas partie de l'ensemble d'intersections. Si les entités sont identiques, cette fonction retourne une entité vide ; dans le cas contraire, la fonction retourne l'ensemble des deux entités.

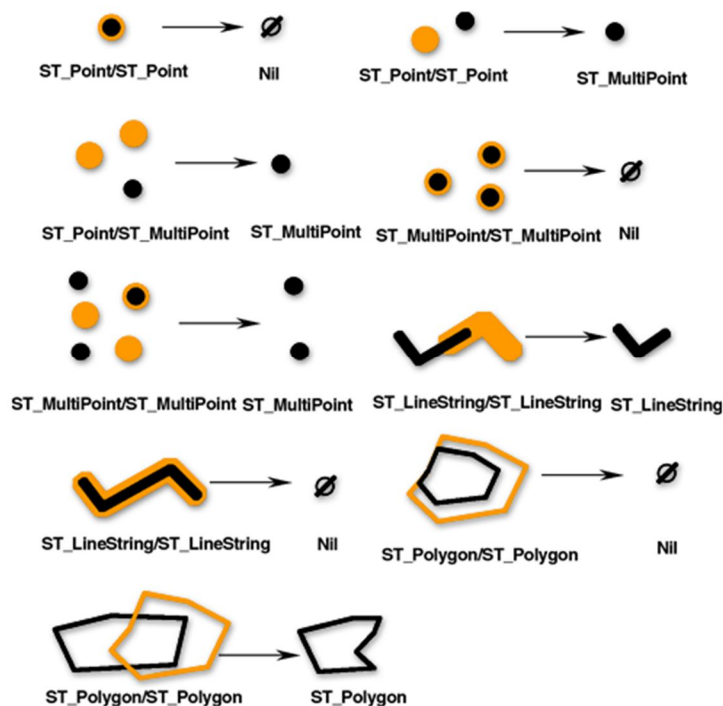


Figure IV.8 : Différence de géométries, les premières géométries en entrée sont en noir et les deuxièmes sont en orange (<http://desktop.arcgis.com>).

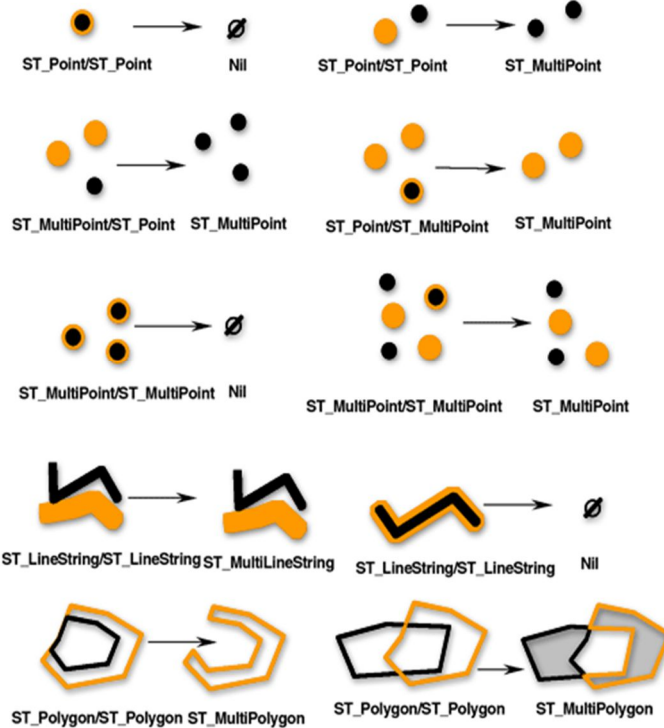


Figure IV.9 : Différence symétrique des entités, les entités source doivent avoir la même dimension (<http://desktop.arcgis.com>).

#Fonctions de «découpage-rapiéçage»: La figure IV.10 montre les différents opérateurs de découpage et de rapiéçage.

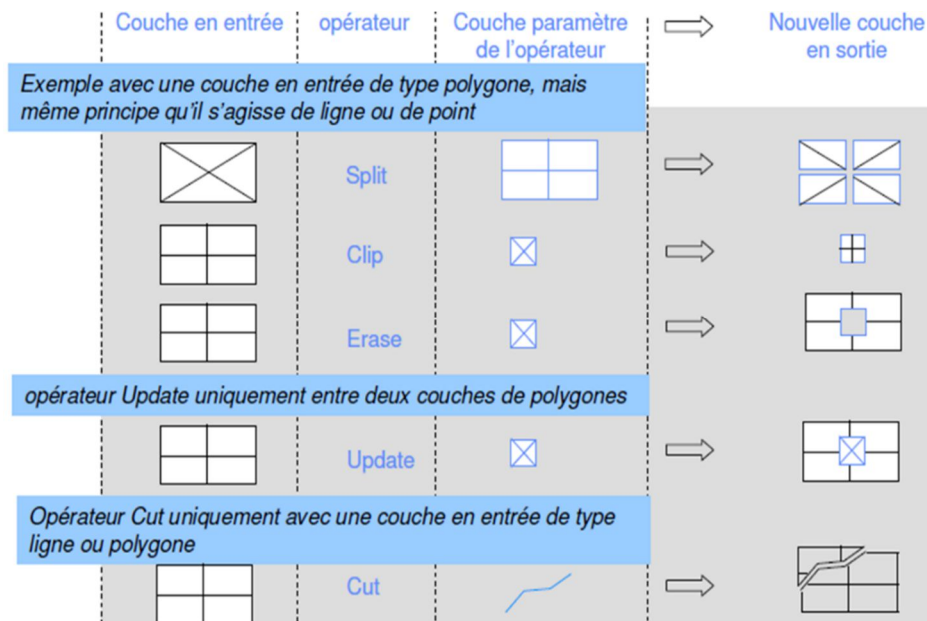


Figure IV.10 : Différents opérateurs de découpage et rapiéçage (<https://docplayer.fr>).

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.

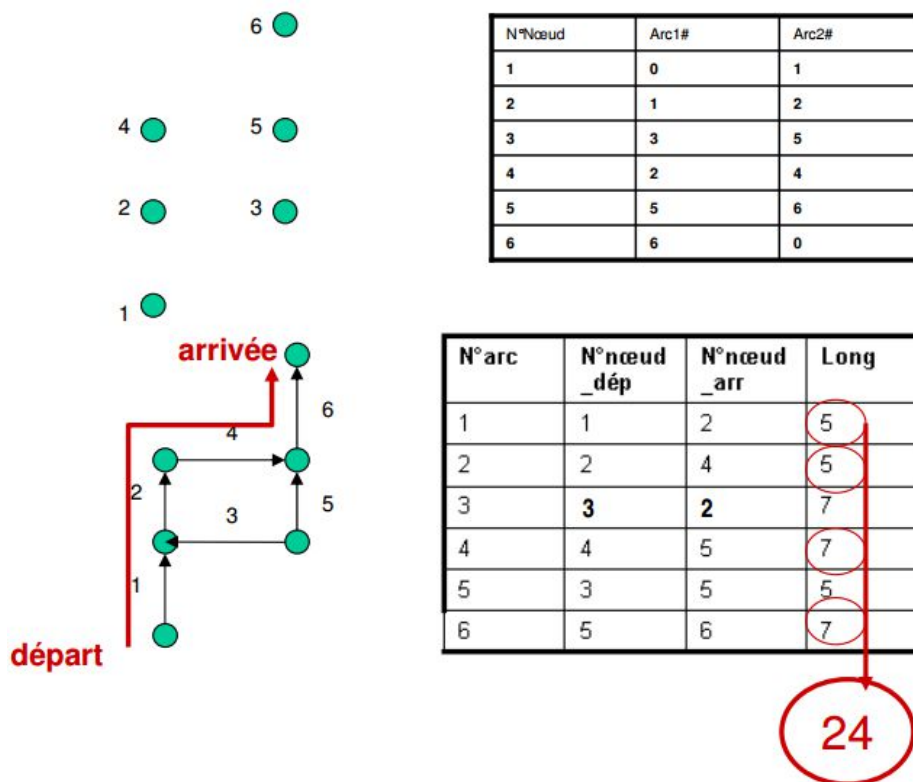


Figure IV.11 : Distance sur réseau (traitement de la continuité). Les points représentent les nœuds et les lignes sont des tronçons de réseau (<https://docplayer.fr>).

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 grande 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 créent un raster en sortie où la valeur à chaque pixel est une fonction de la valeur associée à ce pixel dans un ou plusieurs couches rasters (Figure IV.12). Plus exactement, uniquement la valeur de pixel, sans tenir en compte les valeurs des pixels voisins, affecte la valeur de la sortie. Les opérations locales peuvent s'appliquer à un ou à plusieurs couches raster. Pour une seule couche raster, des exemples d'opérations locales « par cellule » sont, les outils trigonométriques tels que Tan, ou les outils logarithmiques tels que Log2 (Figure IV.13).

Lorsque les opérations locales sont appliquées sur plusieurs couches rasters (Figure IV.14), chaque pixel en sortie va avoir une valeur unique, en fonction d'une opération réalisée sur le pixel concordant dans chacune des couches rasters en entrée. C'est l'exemple d'utilisation de calculs statistiques de pixel (c.à.d. Pour chaque pixel en sortie un calcul statistique, comme la moyenne ou la plage, est réalisé sur les valeurs de pixel de toutes les couches rasters en entrée à l'endroit exact (Figure IV.15).

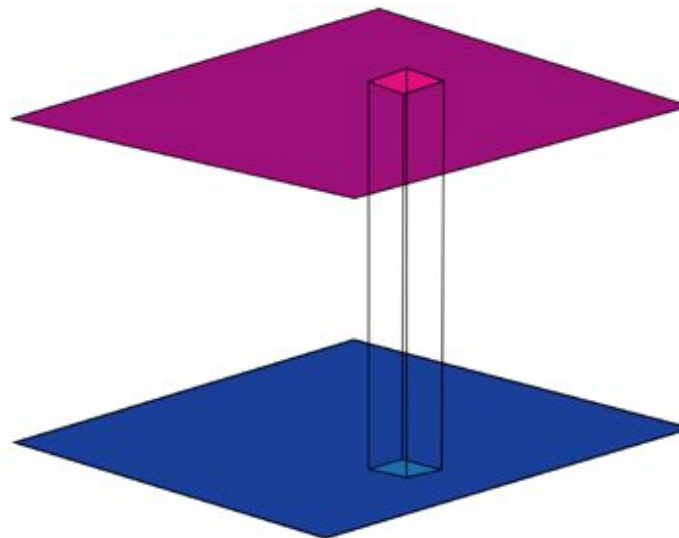


Figure IV.12 : Opération locale dont la valeur en sortie à chaque pixel est une fonction de la valeur associée à ce pixel dans un jeu de donnée raster (<https://desktop.arcgis.com>).

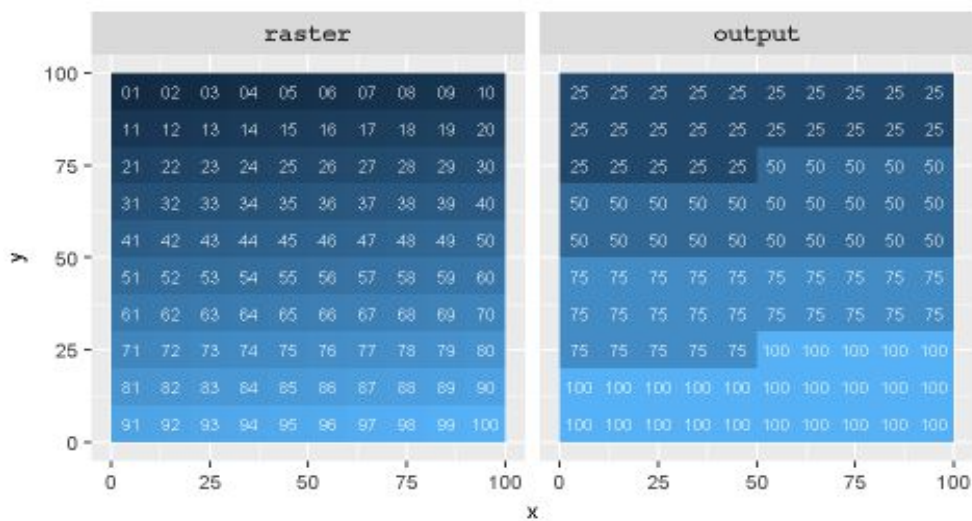


Figure IV.13 : Exemple d'une opération locale ou l'output est le résultat de la reclassification de l'input (<https://mgimond.github.io>).

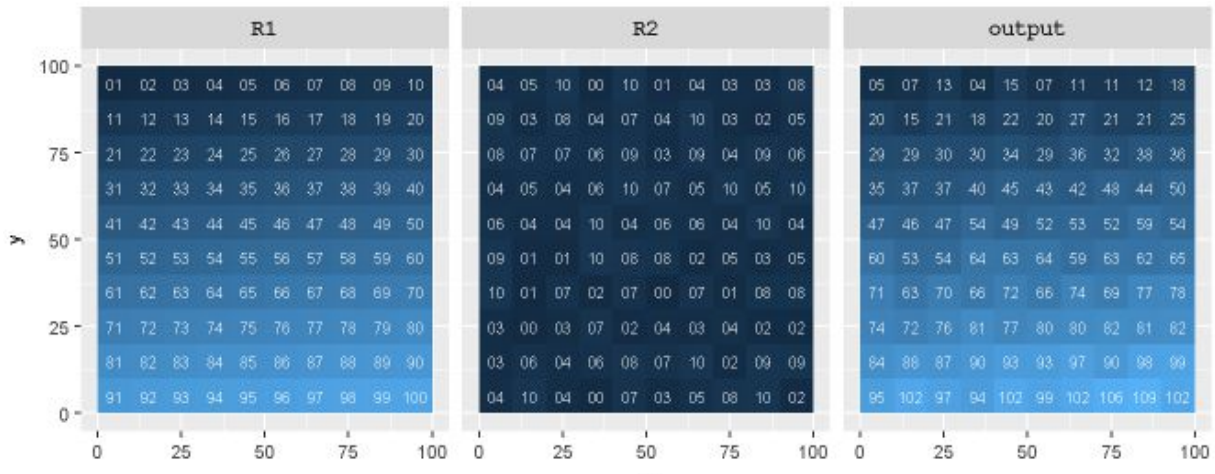


Figure IV.14 : Exemple d'une opération locale ou l'output = (raster1 + raster2) (<https://mgimond.github.io>).

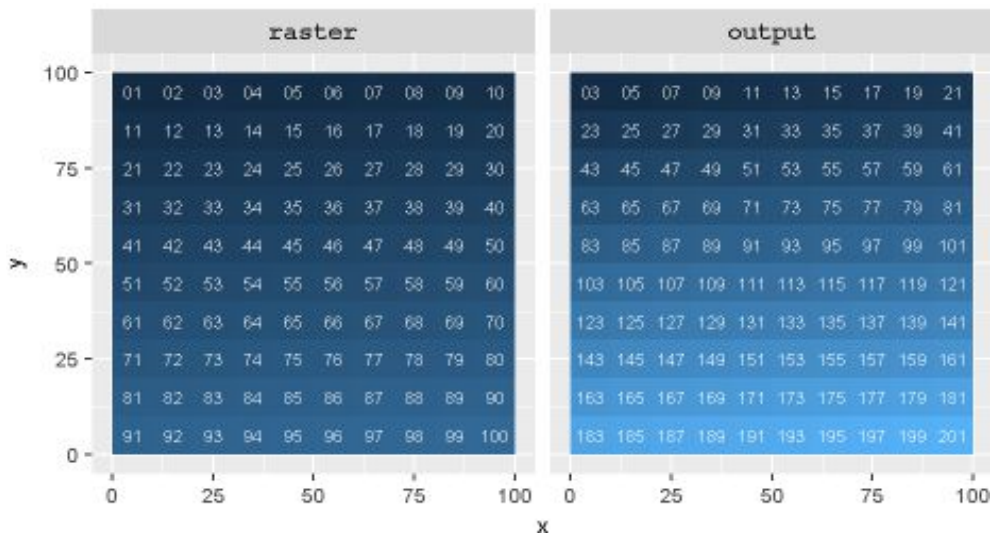


Figure IV.15 : Exemple d'une opération local ou l'output = (2*raster+1) (<https://mgimond.github.io>).

IV.3.1.2. Fonctions focales

Les opérations focales (ou de voisinage) produisent une couche raster en sortie dans lequel la valeur en sortie à chaque pixel est une fonction de la valeur en entrée à cet endroit d'un pixel et des valeurs des pixels voisinant, le nombre de pixels voisins peut être déterminé par l'utilisateur (Figure IV.16). Il faut signaler que le voisinage est particulièrement une fenêtre en mouvement qui se déplace avec le pixel. La configuration (taille et forme) du voisinage spécifie quels pixels approches du pixel de traitement doivent être utilisés dans le calcul de chaque pixel résultant (ex. Figures IV.17, IV.18 et IV.19). Par exemple le voisinage 3 x 3

pixels, inclus le pixel de traitement ainsi que ses 8 voisins les plus proches. C'est le cas de filtres spatiaux en télédétection ou le calcul des pentes ou d'exposition sur un MNT.

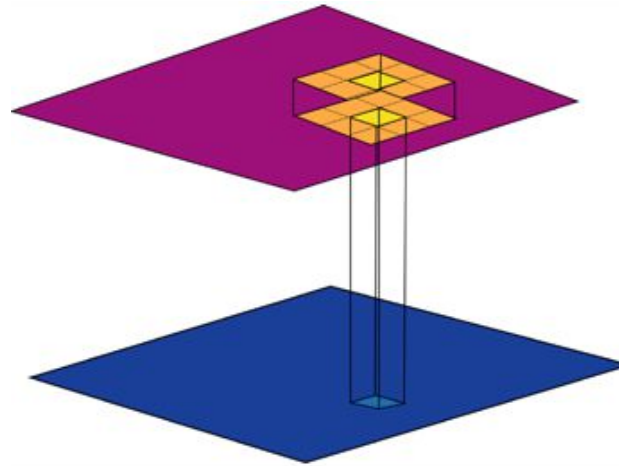


Figure IV.16 : Opération focale dont le voisinage est 3 par 3 pixels (<https://desktop.arcgis.com>).

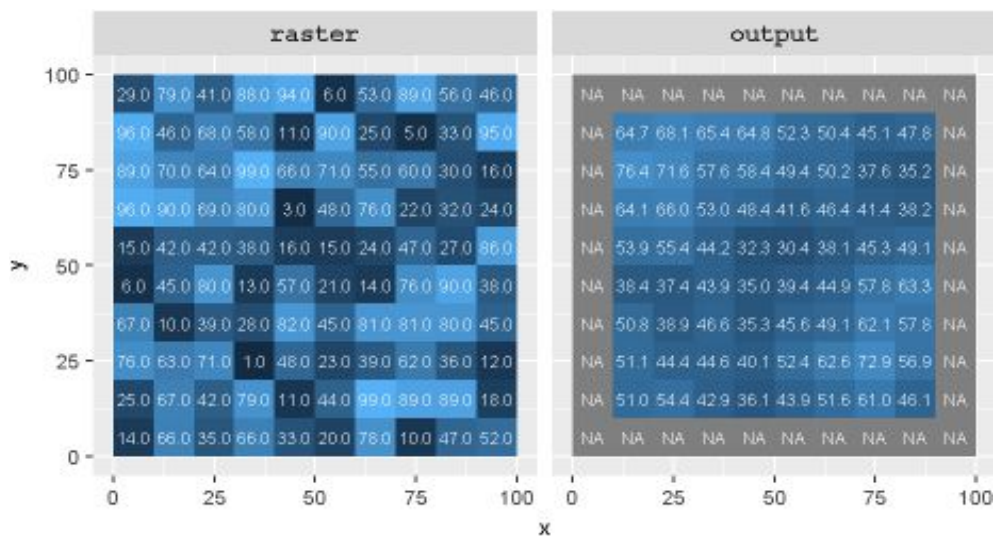


Figure IV.17 : Exemple d'une opération focale dont la valeur de chaque pixel de l'output est égale à la moyenne des pixels voisinant ce pixel dans le raster input. Si le pixel focal n'est pas entouré par des pixels, l'output est NA (<https://mgimond.github.io>).

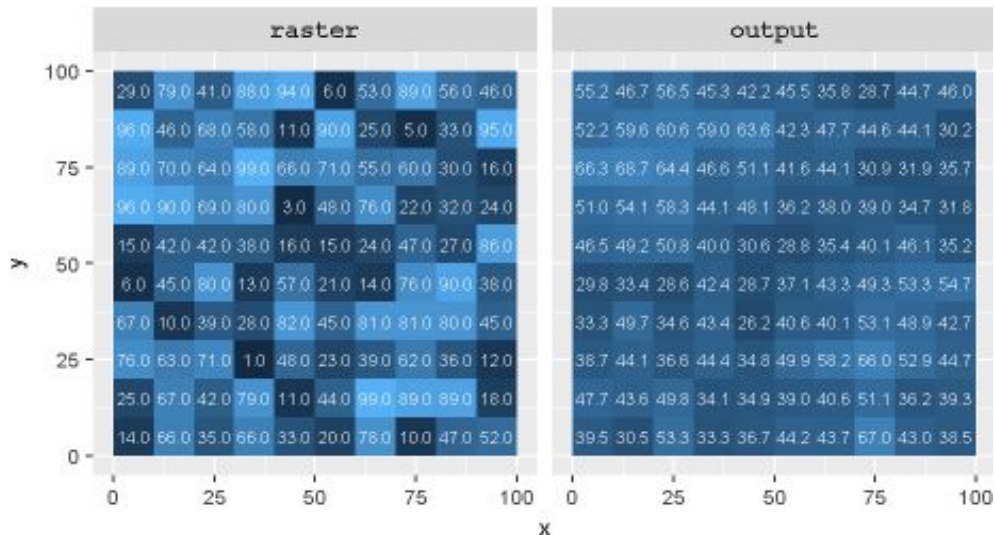


Figure IV.18 : Exemple d'une opération focale dont la valeur de chaque pixel de l'output est calculée par l'application de la fonction kernel dans le raster input (<https://mgimond.github.io>).

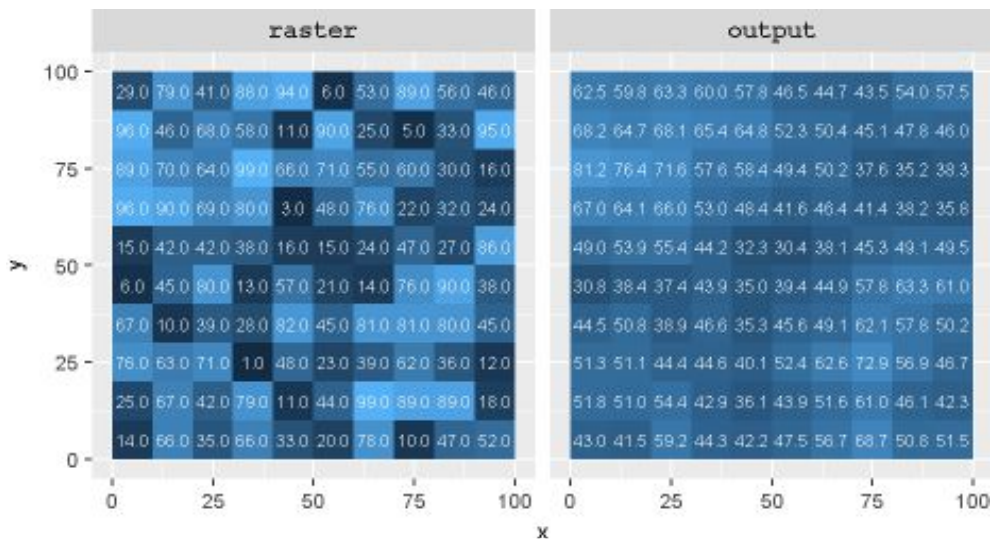


Figure IV.19 : Exemple d'une opération focale dont la valeur de chaque pixel de l'output est égale à la moyenne des pixels voisinant ce pixel dans le raster input. Les pixels focaux non entourés par des pixels, sont ignorés (<https://mgimond.github.io>).

IV.3.1.3. Fonctions zonales

Pour ces opérations la valeur en sortie de chaque endroit dépend de la valeur de pixel à l'endroit et de l'association entre cet endroit et une zone cartographique (Figure IV.20). La définition du voisinage dans une opération zonale convient à la configuration des zones mêmes, et non à une forme de voisinage spécifiée. Les zones spécifiques peuvent avoir différentes tailles et peuvent être séparées entre

elle. Les zones peuvent être des données raster, dans ce cas une zone est composée de tous les pixels ayant la même valeur ; ou des données d'entité, dans ce cas la zone est formée de toutes les entités possédant la même valeur attributaire (Figure IV.21).

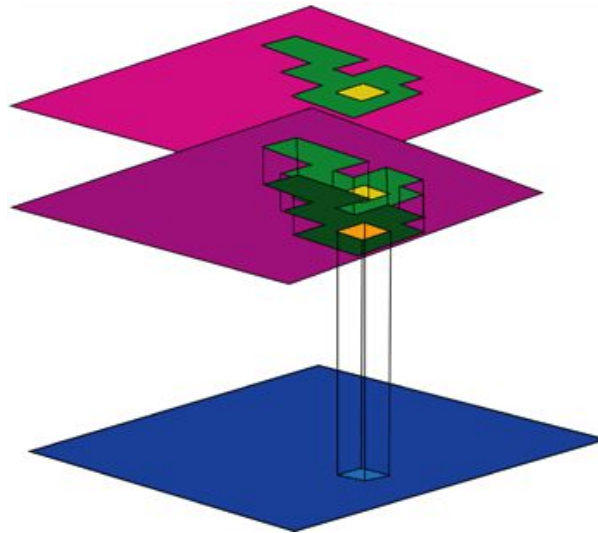


Figure IV.20 : Le calcul de raster en sortie dans une opération zonale (<https://desktop.arcgis.com>).

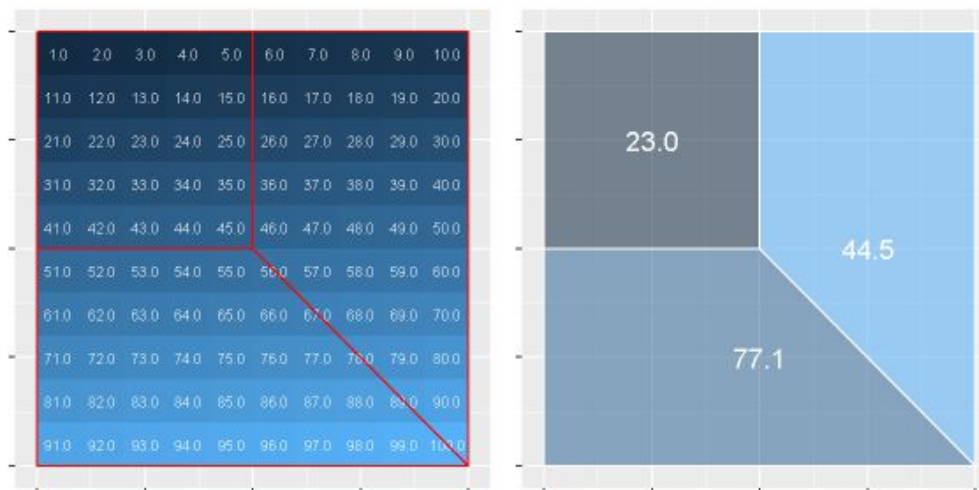


Figure IV.21 : Exemple d’une opération zonale dont les valeurs des pixels de raster sortie sont égales à la moyenne des pixels par chacune des zones définies en rouge dans le raster d’entrée (<https://mgimond.github.io>).

IV.3.1.4. Fonctions incrémentales ou globales

Pour ces opérations, la valeur en sortie à chaque pixel (dans le raster produit) est pratiquement une fonction de tous les pixels combinés de diverses couches raster

en entrée. Il existe deux groupements d'opérations globales : distance euclidienne et distance pondérée.

IV.3.1.4.1. Opérations globales de distance euclidienne

Ces opérations attribuent à chaque pixel de la couche raster en sortie sa distance par rapport au pixel source le plus proche (Figure IV.22). Un exemple de source peut être l'endroit à partir duquel commencer une nouvelle voie. La direction du pixel source le plus proche peut aussi être affectée en tant que valeur de chaque pixel dans la couche raster produite (Figure IV.23).

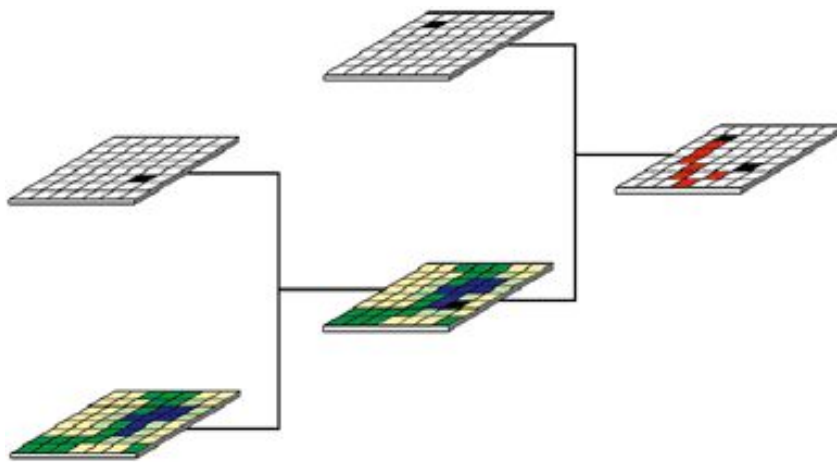


Figure IV.22 : Le calcul de distance euclidienne (<https://mgimond.github.io>).

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

Ce type d'opérations calcule le coût de déplacement d'un pixel de destination vers le pixel source le plus proche. Autrement dit, en plus de la distance euclidienne entre les deux pixels l'opération ajoute un coût pondéré (ex. pente). Par exemple si on suit le chemin le plus court et le plus direct lors de la construction d'une voie entre deux endroits A et B, la construction va coûter très cher si la surface est escarpée, donc il est préférable de choisir un autre chemin qui nous permet de diminuer le coût de réalisation.

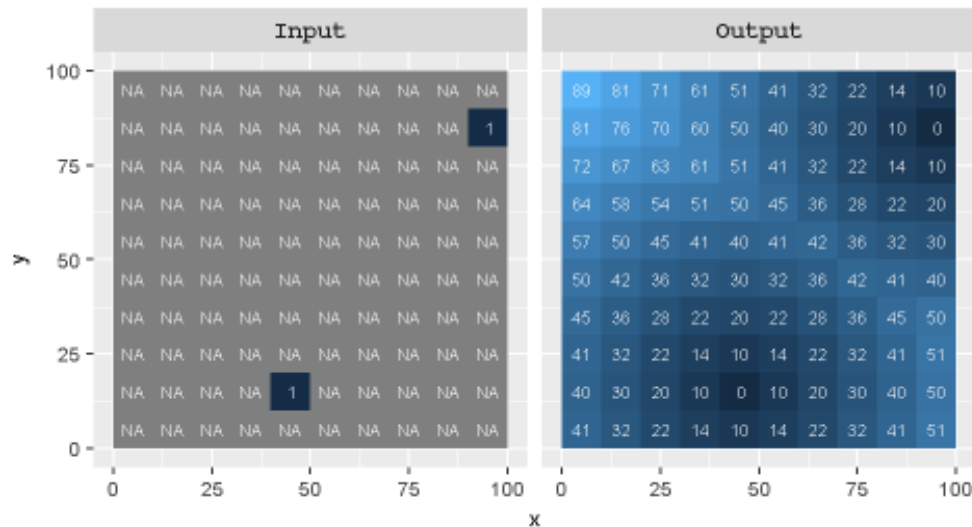


Figure IV.23 : Exemple de fonction globale : la distance euclidienne. Chaque pixel est attribué la valeur de la plus proche distance à l’une des deux locations sources définis dans le raster input (<https://mgimond.github.io>).

IV.3.1.5. Opérations d'application

Une opération d'application exécute une opération qui est spécifique à un domaine. Par exemple, les fonctions d'analyse hydrologique produisent un réseau hydrographique et démarquent un bassin versant. Il faut noter que certaines opérations d'application ont une conduite plus globale, tel que l'analyse des surfaces.

couvrent la zone entière et pour la modélisation (Arnaud et Emery, 2000; Longley, 2005).

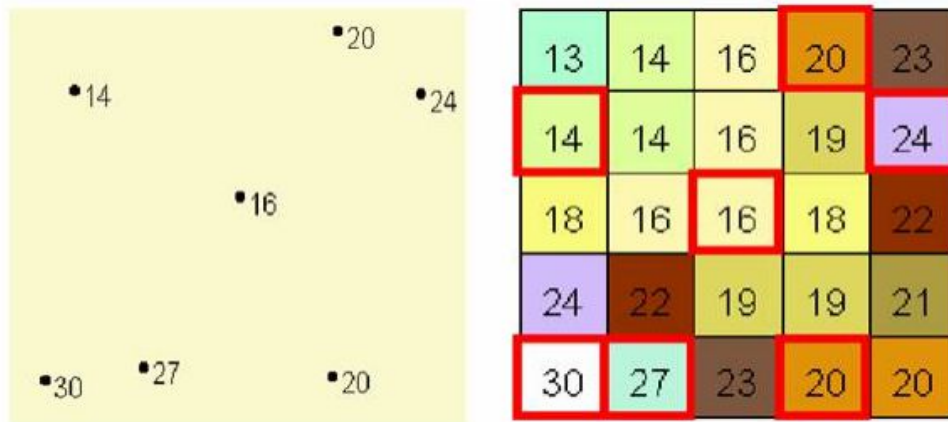


Figure V.2 : A gauche sont les points avec des valeurs connues. Dans la partie droite le raster résultant de l'interpolation des points qui se trouvent à gauche, les valeurs inconnues sont prédites en utilisant une formule mathématique qu'utilisent les valeurs connus des points proches (<http://planet.botany.uwc.ac.za>).

On s'intéresse dans ce cours à ces méthodes de prévision. Elles se divisent généralement 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, 2016).
- Méthodes stochastiques : elles supposent une modélisation probabiliste du phénomène, dont les observations résultent de la réalisation de variables aléatoires ; ces méthodes basent sur l'analyse statistique des données considérées. On parle alors de techniques géostatistiques (Chang, 2016).

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 ; par contre un

opérateur local fait une estimation de la moyenne en utilisant uniquement les observations les plus proches de point à estimer, c.à.d. une petite partie du champ.

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. Il faut signaler que dans ce document on ne va pas détailler ces méthodes d'interpolation.

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. Les méthodes locales fonctionnent dans une petite zone autour du point à estimer (c.à.d. utilisent des échantillons dans une fenêtre de recherche) et capturent la variation locale ou à courte distance.

V.3.1. Polygones de Thiessen

#Notation : On définit une variable régionalisée comme étant une fonction numérique prenant ses valeurs dans une région limitée :

- z , la variable régionalisée ou à estimer.
- D , le champ de la régionalisation.
- $\vec{s} \in D$, 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 :

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

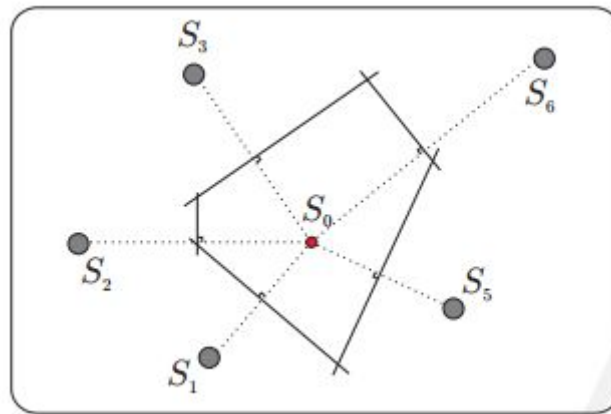


Figure V.3 : Construction des polygones de Thiessen (Bossler, 2013).

D est alors partitionné en un ensemble de polygones de Thiessen (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 (FigureV.4).

Notons que le découpage de Thiessen est basée essentiellement sur la configuration géométrique et non pas sur les valeurs observées.

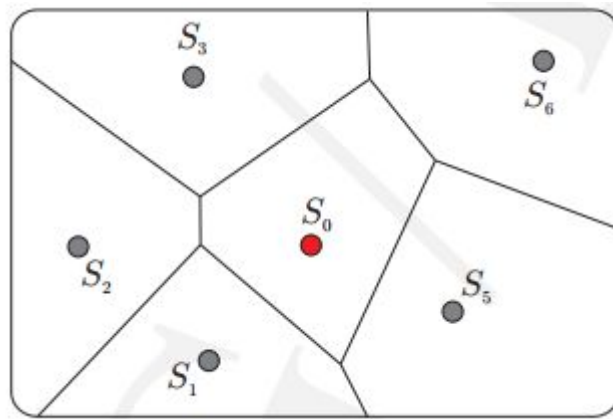
Les polygones de Thiessen permettent la pondération des observations pour calculer la moyenne de la variable régionalisée sur le champ d'étude :

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

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.

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



FigureV.4 : Découpage en polygones de Thiessen (Bossert, 2013).

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

Cette méthode divise le champ en triangles disjoints, dont les pointes sont les sites avec valeurs connus, puis applique l'interpolation à l'intérieur de chaque triangle. Il y a plusieurs méthodes qui peuvent être utilisées pour la construction des triangles :

IV.3.2.1. Triangulation de Delaunay

La triangulation de Delaunay (Delaunay, 1924) est définie comme le diagramme dual du diagramme de Thiessen. Autrement dit, la construction d'un nouveau diagramme à partir du diagramme de Thiessen dont on relie tous les points séparés par une arête de Thiessen (voir Figure V.5).

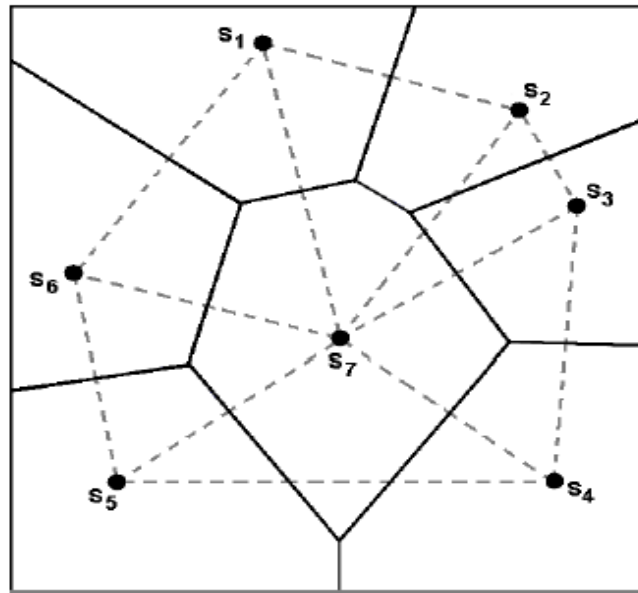


Figure V.5 : Polygones de Thiessen (lignes pleines) accompagnés de la triangulation de Delaunay associée (lignes pointillées) (Bossler, 2013).

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 une pondération égale à la proportion de la surface de triangle opposé : plus le point dont la valeur a estimé est proche d'un point dont la valeur est mesurée plus la valeur de la variable interpolé est proche de la valeur mesuré en ce point (Bossler, 2013).

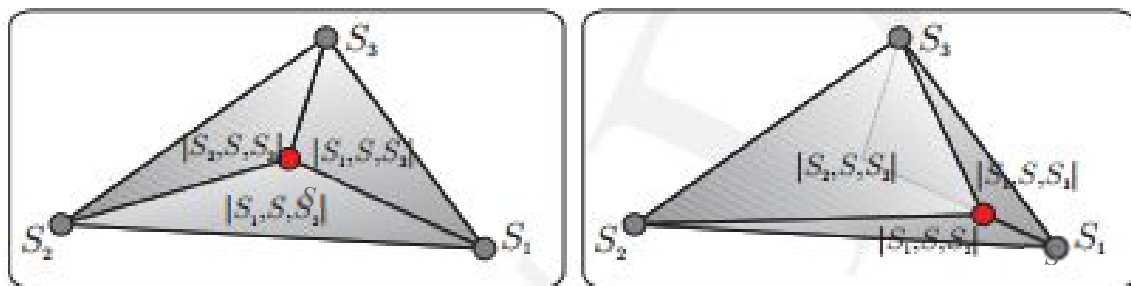


Figure V.6 : Interprétation géométrique de l'interpolation linéaire (Bossler, 2013).

V.3.3. Méthodes d'interpolation barycentriques

Pour les méthodes précédentes, l'estimation de la valeur d'un point est basée essentiellement sur les points observés immédiatement voisins, comme résultat

une très grande partie de l'information est ignoré. Pour résoudre ce problème, les méthodes barycentriques utilisent donc un nombre plus grand de points observés (c.à.d. pas uniquement les points observés immédiatement voisins).

V.3.3.1. Méthode d'interpolation Voisin naturel

Cette méthode est aussi appelé l'interpolation de Sibson (Sibson, 1981). L'algorithme utilisé par cette méthode recherche le sous-ensemble de points (dont les valeurs sont connus) en entrée le plus proche d'un point désigné (dont la valeur à estimer) et lui applique une pondération pour interpoler une valeur (Sibson, 1981). Premièrement, le champ D est divisé en polygones de Voronoï (les polygones vert olive) en utilisant toutes les données, ensuite un nouveau polygone de Voronoï (le polygone beige) est créé autour du point d'interpolation (étoile rouge). La pondération est basée sur le pourcentage d'intersection entre le polygone beige et les polygones vert olive (voir Figure V.7) (ESRI, 2018).

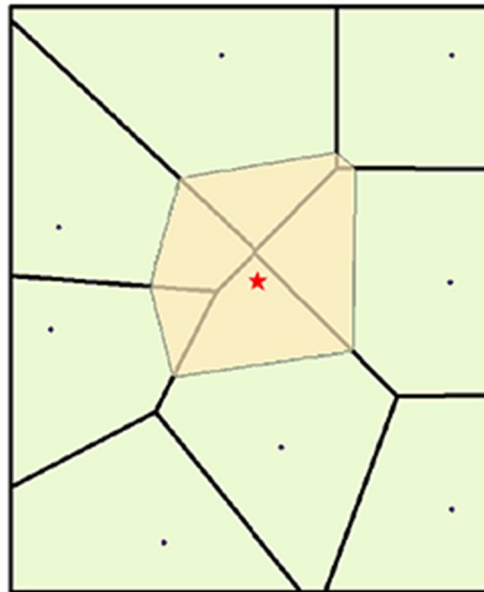


Figure V.7 : Exemple de polygone de Voronoï créé autour du point d'interpolation (<https://pro.arcgis.com>).

Par rapprochement, une méthode d'interpolation basée sur l'inverse de la distance (voir V.3.3.2), donne des poids similaires au point le plus nordique et au point nord-est, puisque ils se trouvent à la même distance du point d'interpolation.

L'interpolation par voisins naturels, au contraire, donne consécutivement des poids de 19,12 pour cent et 0,38 pour cent sur la base du proportion de croisement (ESRI, 2018).

V.3.3.2. Méthode de l'inverse des distances

La première étape est d'effectuer une recherche des points qui vont intervenir dans l'estimation par la fixation un rayon de recherche duquel le centre est le positionnement de point à estimer. En suit, un poids est donné pour tout point tenu, ce dernier est inversement proportionnel à la distance entre ce point et le point à estimer, (Despaigne, 2006) (voir Figure V.8).

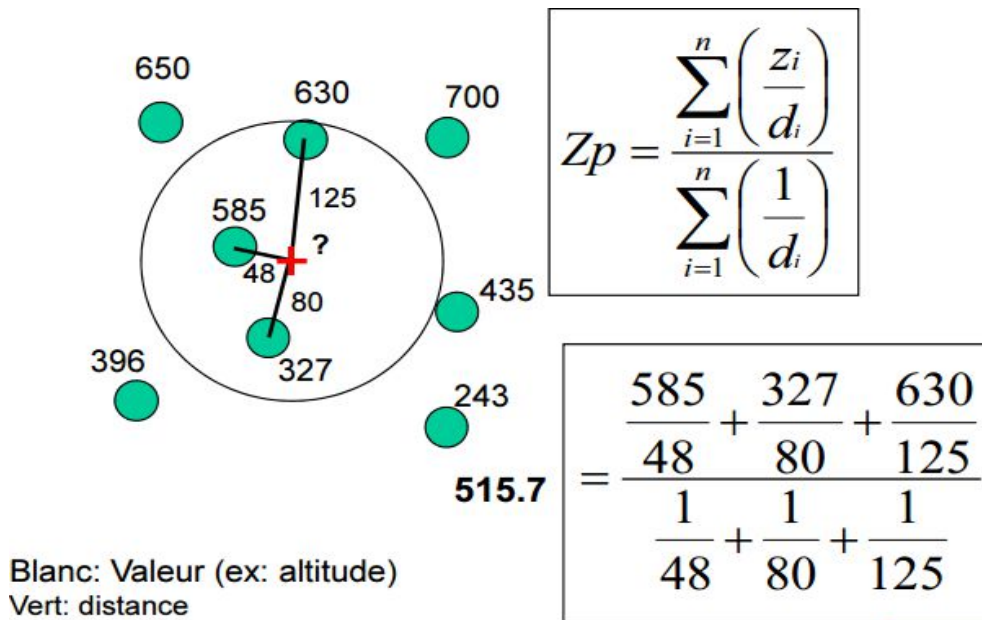


Figure V.8 : Exemple d'application de la méthode de l'inverse des distances.

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 les utilise pour obtenir une surface la plus lisse possible tout en remplaçant les valeurs mesurées en d'autres points d'observation.

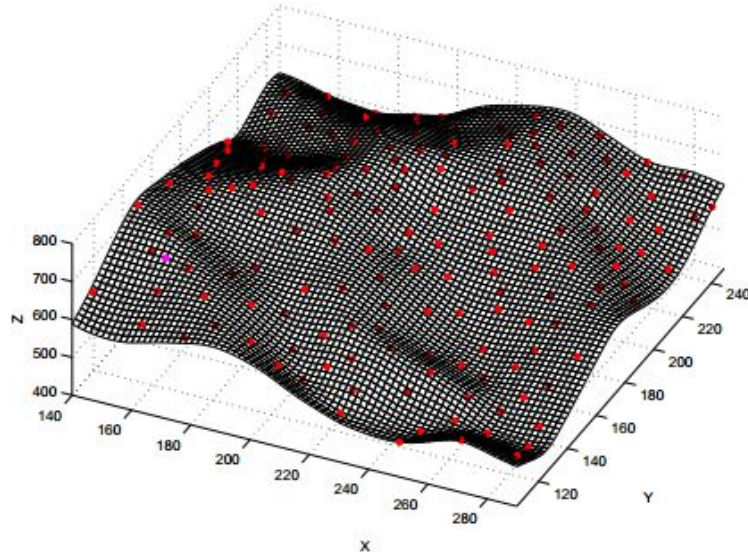


Figure V.9 : Interpolation par spline d'interpolation : application sur un champ d'observations -vue en perspective (Bossier, 2013).

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

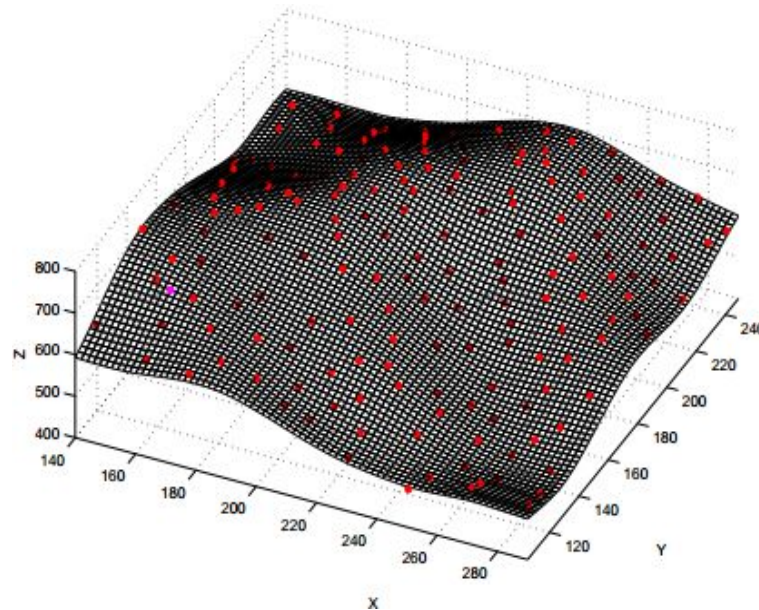


Figure V.10 : Interpolation par spline de lissage : application sur un champ d'observations -vue en perspective (Bossier, 2013).

V.4. L'interpolation stochastique

Inversement aux méthodes précédentes, les méthodes d'interpolation stochastique tiennent en compte ce qu'on appelle le hasard. Sont des modèles probabilistes qui incluent les erreurs aléatoires pour modéliser le comportement d'un phénomène étudié (Arnaud et Emery, 2000). De ce fait des erreurs de prédiction peuvent être calculées.

V.4.1. Le krigeage

La théorie du krigeage a été développée par le mathématicien français Matheron (1976) à partir des travaux de l'ingénieur minier sud-africain D.G. Krige (Krige, 1981). Krige a développé une série de techniques statistiques empiriques pour caractériser la répartition de minerais depuis un ensemble de forages.

Cette méthode présume que si la distance ou la direction liant les points d'échantillonnage reflète une corrélation spatiale, elle peut expliquer les variations spatiales de la variable étudié (Bossert, 2013). Le Krigeage utilise une fonction mathématique à tous les points, ou à certains points précis, situés dans un rayon déterminé pour calculer la valeur en sortie de chaque pixel (voir Figure V.11). Il incorpore l'analyse statistique des données, la détermination des variogrammes, la création de la surface interpolé et possiblement l'exploration de la surface de variance (Bossert, 2013).

Il existent différents types krigeage, on peut citer entre autres, le krigeage simple (utiliser pour une fonction aléatoire d'espérance connue), le krigeage ordinaire (le plus communément utilisé), le krigeage universel (prise en compte d'une variable dérive), le cokrigeage (on l'utilise lorsque il y a différents phénomènes liés) (Arnaud et Emery, 2000; Hengl, Heuvelink et Rossiter, 2007).

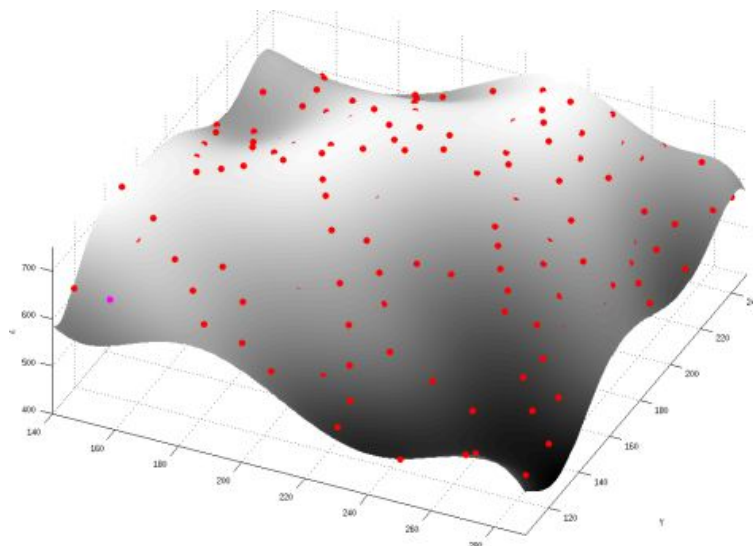


Figure V.11 : Interpolation par krigeage : application sur un champ d'observations -vue en perspective (Bossier, 2013).

VI. Modèle numérique de terrain/d'altitude

VI.1. Définitions

Un Modèle numérique de terrain (MNT) peut être défini comme une représentation numérique du relief donc des valeurs d'altitude d'une région donnée (voir Figure VI.1). Le MNT peut être avoir plusieurs formes : points cotés, courbes de niveau, réseau de triangles irréguliers (TIN) ou raster (pixel).

Un Modèle Numérique d'Altitude (MNA) est une représentation des altitudes sur un terrain tenant compte les hauteurs de objets placés sur celui-ci comme les bâtiments et les arbres (voir Figure VI.1).

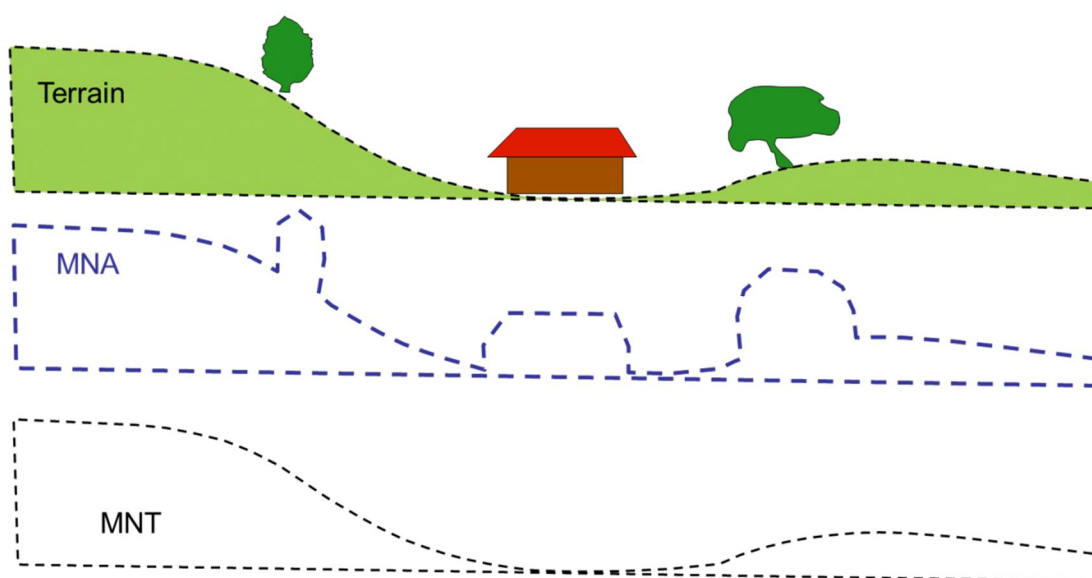


Figure VI.1 : MNA vs MNT (<https://www.emse.fr>).

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).

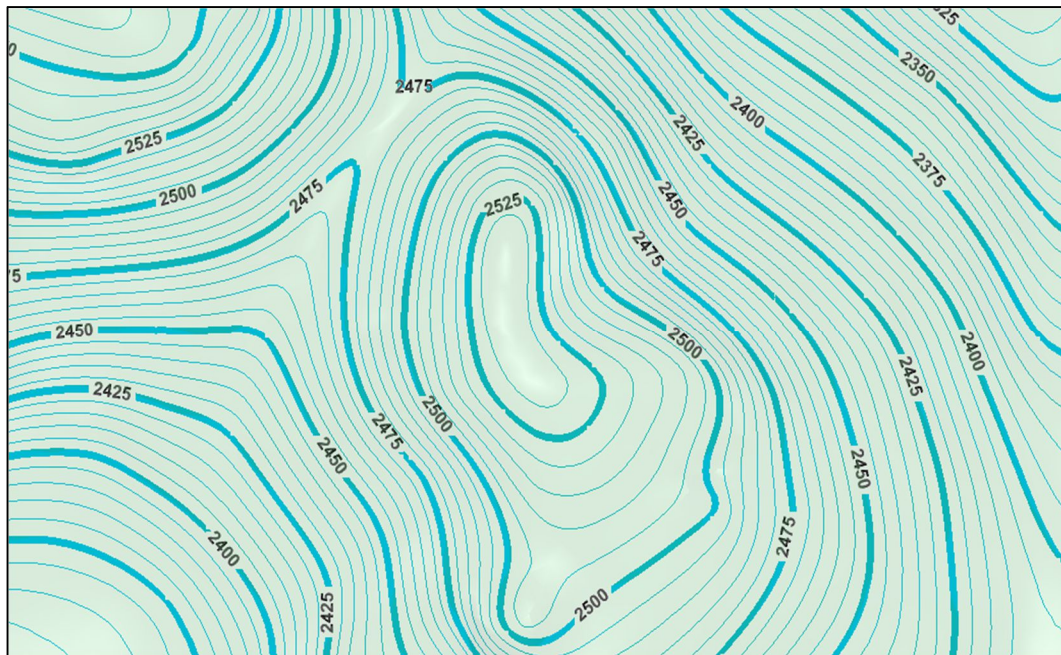


Figure VI.2 : Courbes de niveau avec une équidistance de 5 mètres (https://www.3dreshaper.com).

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

Un semis irrégulier de points (Figure VI.3) apparait 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 exceptionnel qu’un tel modèle soit formé de points mesurés. C’est le résultat

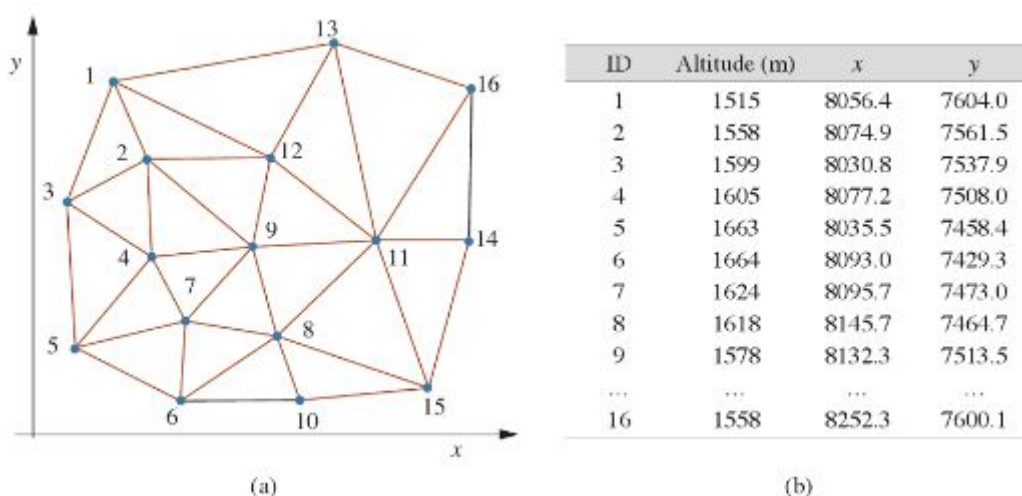


Figure VI.3 : Modèle numérique d’altitude sous forme (a) d’un semis de points irrégulier (TIN) (b) d’un tableau de coordonnées (Caloz et Collet, 2011).

d'interpolation d'un semis de points irréguliers, sa la précision dépend du mode d'obtention et de la méthode d'interpolation de données (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).

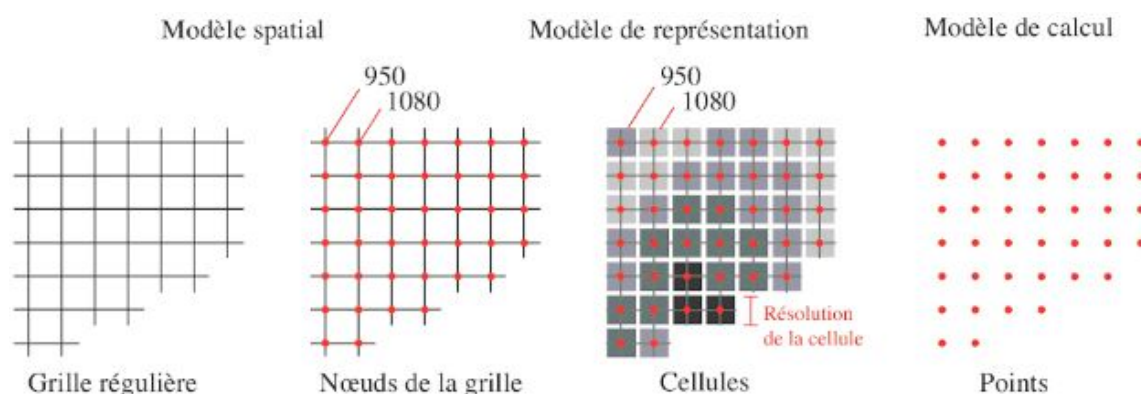


Figure VI.4 : Modèle numérique sous forme d'une grille régulière (Caloz et Collet, 2011).

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 dernière dépend de la fréquence des points laser émis par le système Lidar et l'altitude de vol.

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 : Le levé permet d'échantillonner quelques endroits (semis de points) sur le terrain pour leur transposition, à l'échelle, sur carte. Pour pouvoir situer un point sur les axes x, y (plan) et z (altitudes), deux levés sont nécessaires : un levé planimétrique et un autre altimétrique.

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 bien connue. Au niveau du sol, un appareil observe avec exactitude la date de réception de ces mêmes bits, et à décoder ceux-ci.

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 MNT 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 (équidistance).

VI.4.3. Restitution photogrammétrique de photographies aériennes

La photogrammétrie englobe les outils utilisés pour restituer la géométrie d'un objet à partir d'un couple de clichés, pris dans des positions différentes, de cet objet.

La photogrammétrie dispose de deux images aériennes d'un même endroit mais prise sous deux angles différents. Ces images constituent 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.



Figure VI.5 : Une carte topographique américaine en courbes de niveau. Équidistance des courbes est de 20 mètres (<https://fr.wikidia.org>).

La Figure VI.6 illustre l'usage d'un couple de topographies couvrant partiellement la même zone géographique.

Pour une restitution photogrammétrique 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 aérotrigulation exige de connaître parfaitement la position relative des clichés lors de la prise du vue.

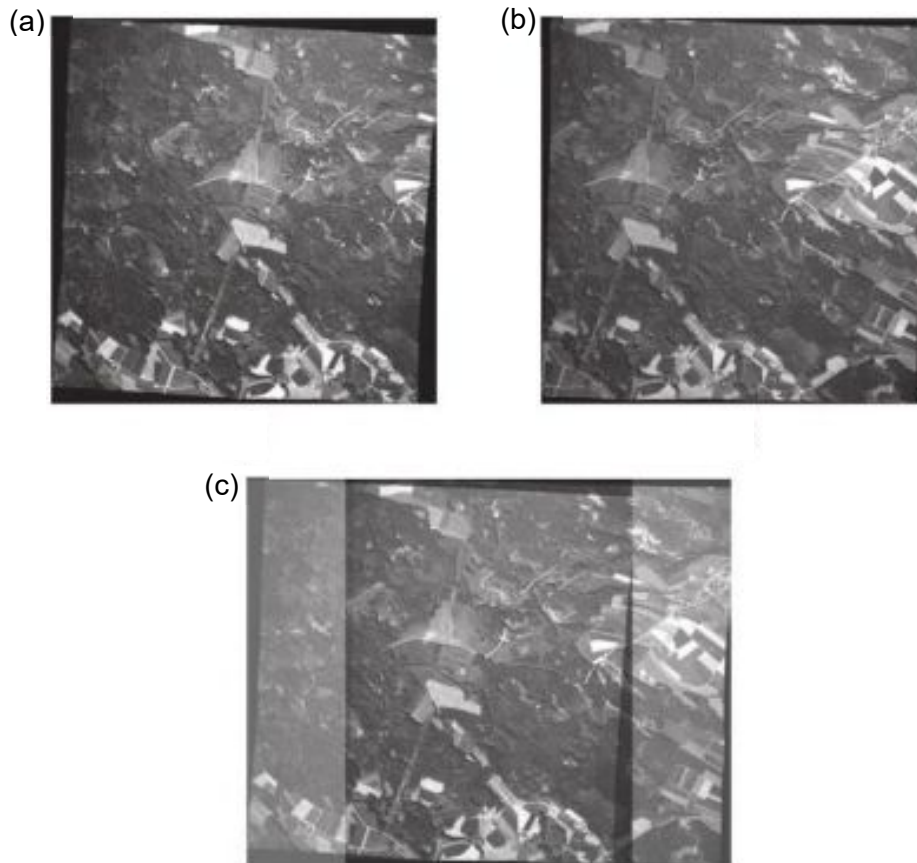


Figure II.6 : Couple de stéréoscopique et leur zone de recouvrement :
 (a) cliché 1 ; (b) cliché 2 ; (c) zone de recouvrement des cliché 1 et 2
 (Caloz et Collet, 2011).

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.



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

Actuellement, grâce au développement technologique on assiste à l'utilisation des outils très avancés tel que :

- Moniteurs 3D (Type Planar ou ACL) et lunettes (polarisées ou ACL) (Figure VI.8).
- Logiciels 3D (ex. DVP) et extensions 3D qui s'intègrent à ArcGIS (ex. Purview, Stereo Analyst, Inpho, etc.) (Figure VI.9)



Figure VI.8 : Exemples des moniteurs 3D et lunettes, utilisés dans la photo-interprétation.



Figure VI.9 : Deux extensions (3D) intégrées à ArcGIS ; (a) Stereo Analyst, (b) PurVIEW

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.10) est cependant très différente, de sorte que la procédure de restitution altimétrique et les équations associées sont propres à ce système (Caloz et Collet, 2011). 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 où 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) (Caloz et Collet, 2011).

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

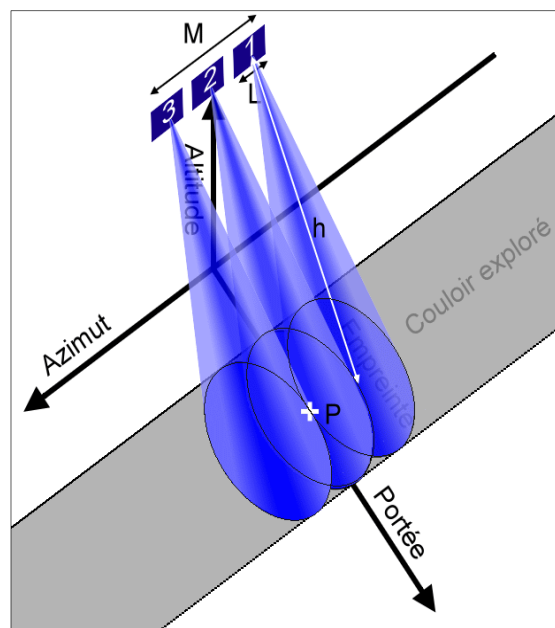


Figure VI.10 : Principe de fonctionnement du RSO. Le point P est illuminé plusieurs fois par le radar en mouvement (Caloz et Collet, 2011).

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 (Caloz et Collet, 2011). Les données sont téléchargeables sur site de la NASA.

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 position des points est calculée grâce à la connaissance de la position de l'avion et la mesure des temps d'aller-retour des impulsions laser (Caloz et Collet, 2011). 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.11).



Figure VI.11 : Principe de l'acquisition de l'altimétrie par balayage laser (Caloz et Collet, 2011).

Plusieurs échos du signal émis peuvent être mesurés, par exemple dans le cas d'une forêt une 1^{ère} réflexion est produite par des parties hautes des arbres. 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 (Caloz et Collet, 2011). Certains radiomètres enregistrent jusqu'à quatre échos pour un même rayon (Figure VI.12).

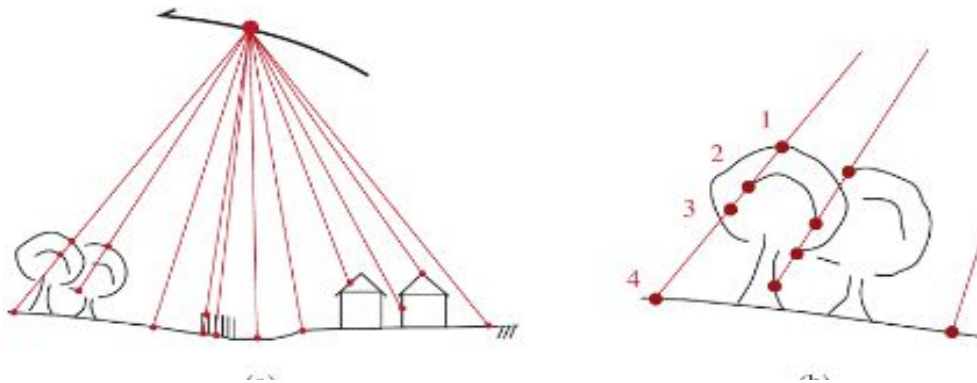


Figure VI.12 : Schéma d'une réflexion à plusieurs échos (a) profil d'un balayage laser ; (b) échos multiples possibles en couverture végétale (Caloz et Collet, 2011).

La longueur d'onde du faisceau est généralement comprise entre 0.8 et 1 um, c'est-à-dire dans le proche infrarouge, l'intensité du signal de retour est porteuse d'information sur les propriétés du couvert végétale car celui-ci réfléchit bien ces longueurs d'onde (Caloz et Collet, 2011).

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 bien illustrés par leur état de surface (Figure VI.13).

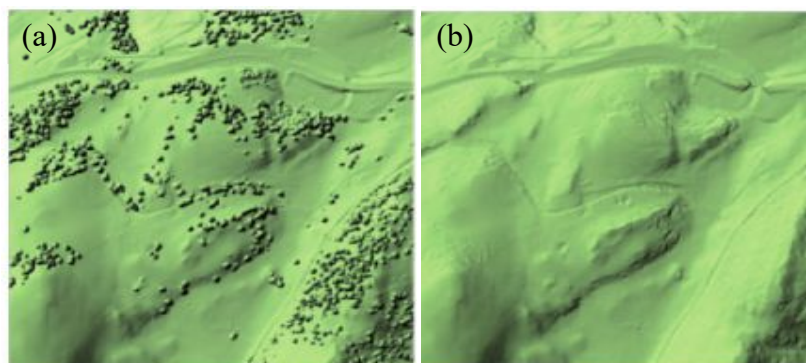


Figure VI.13 : portion de (a) modèle numérique d'altitude (MNA), (b) modèle numérique de terrain (MNT) (Caloz et Collet, 2011).

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 (Caloz et Collet, 2011). 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). 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).

VI.5. Les erreurs du MNT

Il y a pratiquement trois types d'erreurs dans les MNT (Pike 2002): (1) Les erreurs systématiques qui sont le résultat du processus d'élaboration du MNT ; ceux-ci peuvent être exclues ou à la rigueur réduites si la source est reconnue. (2) Les erreurs commises lors de la collecte des données qui peuvent être identifiées et éliminées durant la phase de traitement des données. (3) Les erreurs aléatoires qui sont inévitables (Ouedraogo, 2014).

VI.6. Comparatif de validité

Les caractéristiques qui permettent d'avoir une idée sur un MNT, donc de juger son adéquation pour un traitement donné sont les suivantes (Koehl *et al.*, 2008) :

1. Sa résolution : la longueur du pixel ;
2. Sa couverture géographique ;
3. La correction ou non des données collectées.

Il faut signaler que quelques techniques de collecte laissent des artefacts dans les données, c'est l'exemple de l'apparition des « trous » quand des nuages étaient présents lors d'un relevé satellitaire.

VI.7. Quelques sources de MNT/MNA

Le Tableau VI.1 montre quelques sources, particulièrement, de MNT sur internet.

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

Nom	Résolution	Couverture géographique	Éditeur	Post-traitements
DEM ASTER (en)	30 m	La Terre entière (sur demande)	NASA	non
GTOPO30 (en)	30" d'arc (~ 1 km)	La Terre entière	USGS/NASA	oui
SRTM-3	90 m	80 % des terres émergées	NASA/NIMA	non
SRTM-1	30 m	Mars (hors zones polaires)	NASA IGN, Spot Image	oui
SRTM-1	30 m	États-Unis	NASA/NIMA	non
Reference3D	30 m	54 millions de km ² , 80 millions en 2014	IGN, Spot Image	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 cote d'un plan tangent. Dans le premier cas, la courbure est positive, dans l'autre négative (Caloz et Collet, 2011).

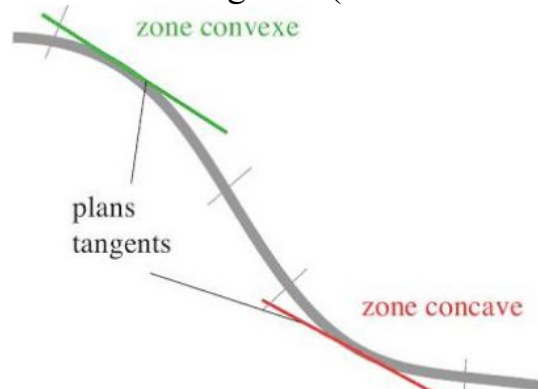


Figure VI.13 : Convexité et concavité (Caloz et Collet, 2011).

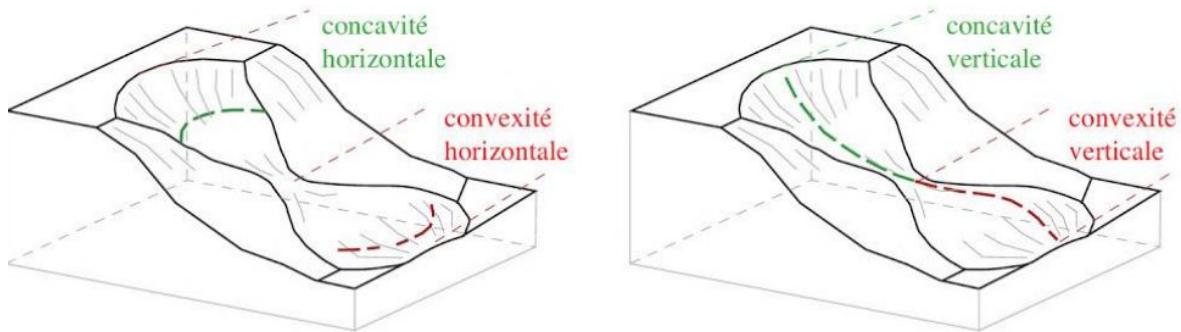


Figure VI.14 : Concavité et convexité horizontales- Concavité et convexité verticales (Caloz et Collet, 2011).

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 ?

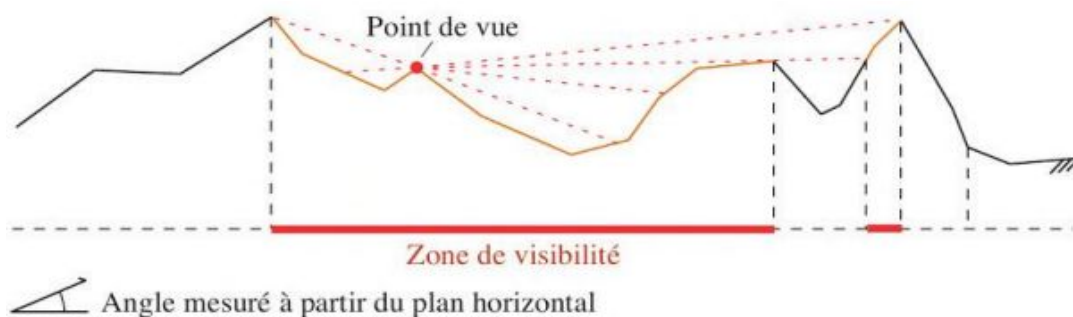


Figure VI.15 : Détermination de zones visibles d'un point de vue (Caloz et Collet, 2011).

VI.9.2. Ombre portée et ombre projetée

Ombre portée : L'ombrage des modèles numériques de terrain (Figure : VI.16) 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 (Caloz et Collet, 2011).

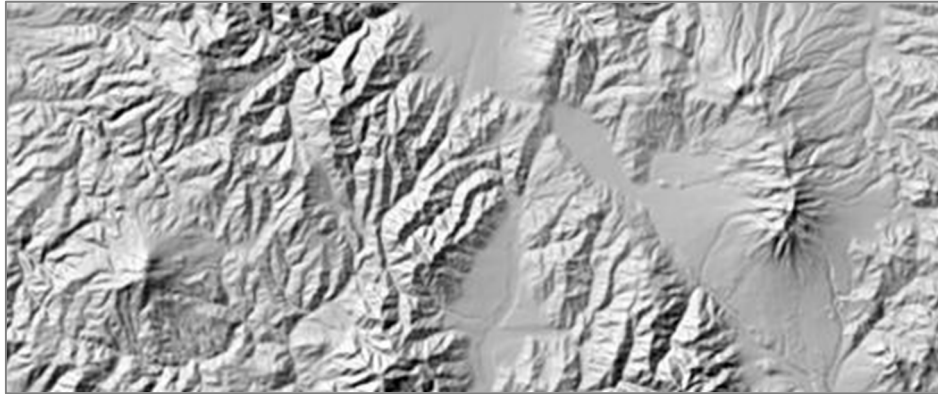


Figure VI.16 : Exemple d'un MNT ombré (<http://desktop.arcgis.com>).

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.17).

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.18).

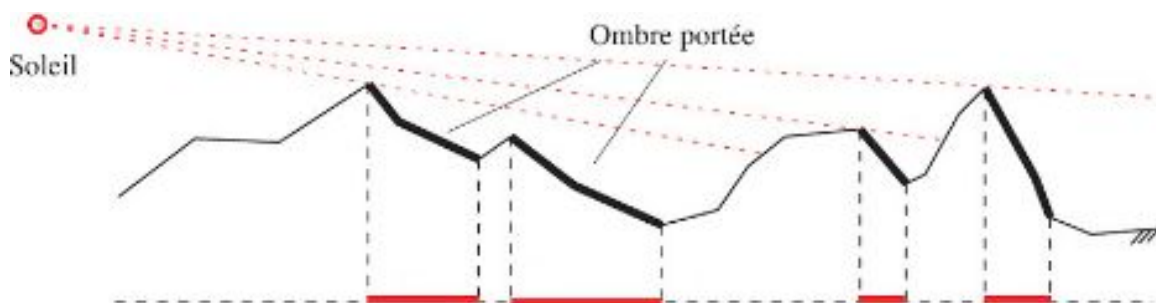


Figure VI.17 : Représentation schématique de l'ombre portée (Caloz et Collet, 2011).

VI.9.3. Taux d'enseillement

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

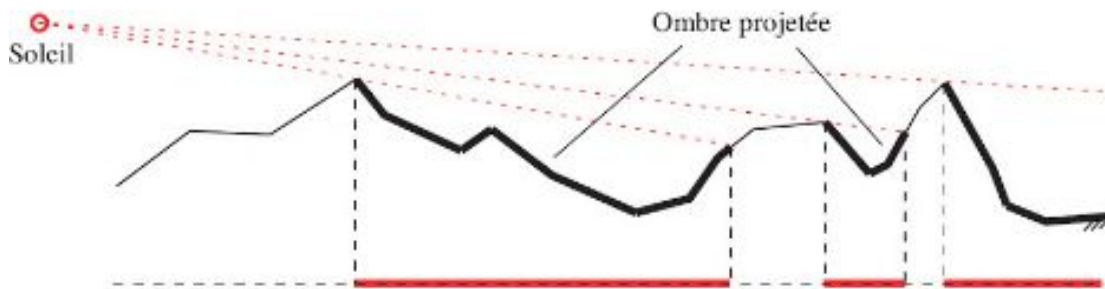


Figure VI.18 : Représentation schématique de l'ombre projetée (Caloz et Collet, 2011).

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

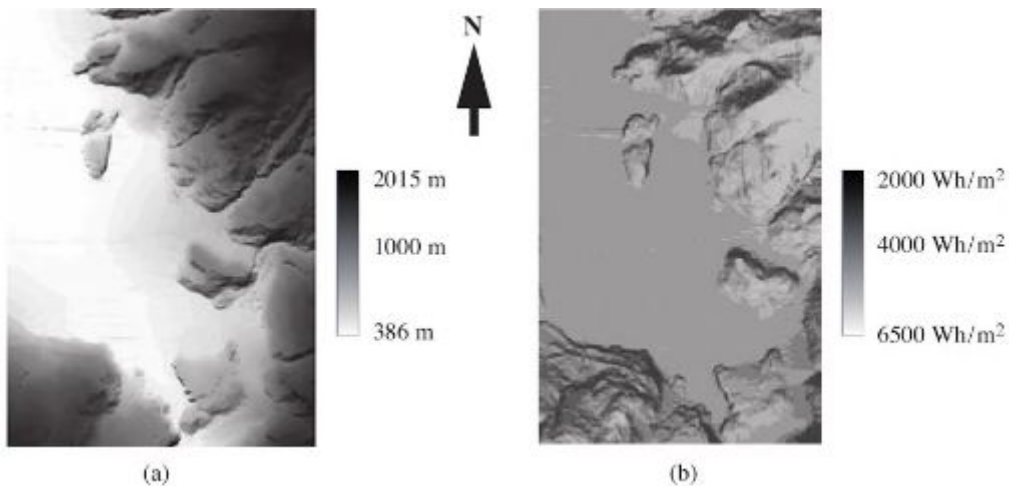


Figure VI.19 : Ensoleillement calculée à l'aide de MNT (a) MNT ; (b) énergie solaire cumulée durant une journée (Caloz et Collet, 2011).

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.20). 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.

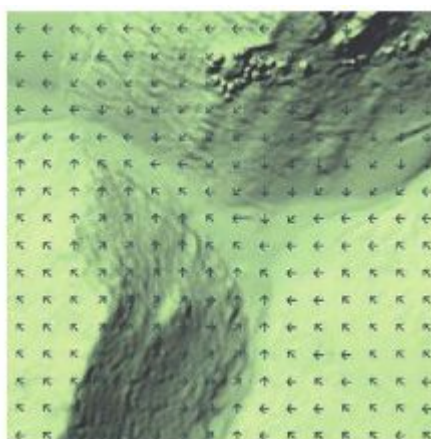


Figure VI.20 : Ligne d'écoulement selon la plus forte pente (Caloz et Collet, 2011).

VI.9.5. Limites de bassin versant hydrologique

La détermination automatique de bassin versant à l'aide de MNT (voir Figure VI.21) 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.21 : Des bassins versants délimités à partir d'un MNT (<https://pro.arcgis.com>).

VI.10. Domaines d'application

VI.10.1. Usages du MNA

VI.10.1.1. Topographie

Le MNT sert principalement à représenter les formes topographiques d'un site (Figure VI.22). La schématisation 3D de la surface du sol, sans construction ni végétation, aboutit à la création d'un référentiel topographique très précis.

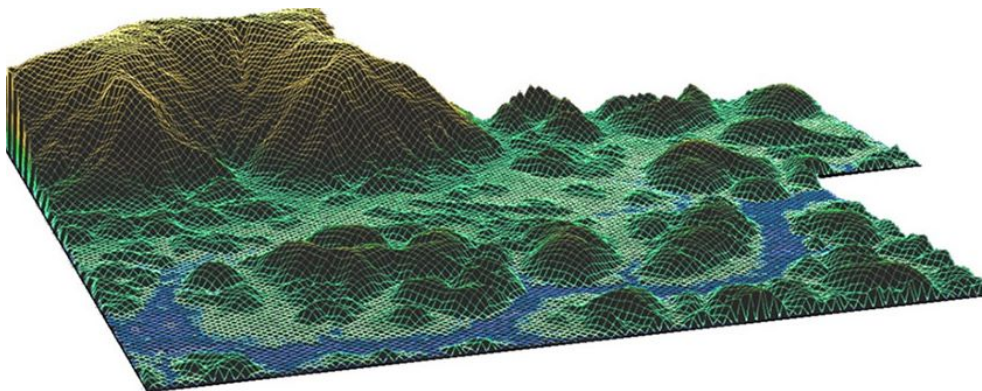


Figure VI.22 : MNT représente les formes topographiques de site (<http://www.altoa.org>).

VI.10.1.2. Hydrologie

Le MNT permet l'identification des rivières, des lacs, des talwegs (Figure VI.23). Il permet aussi de délimiter les bassins versants et la direction des écoulements, de réaliser une modélisation hydraulique et de créer une simulation des inondations.

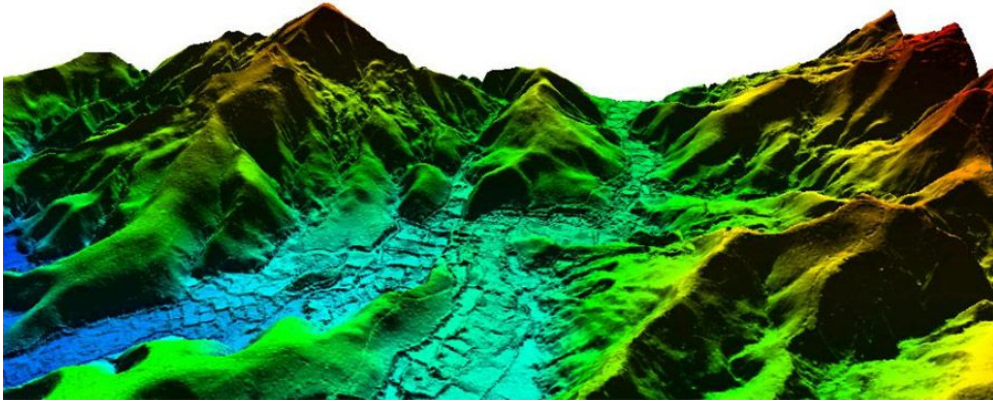


Figure VI.23 : MNT permet la compréhension des formes et mouvements hydrologiques (<http://www.altoa.org>).

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.24) et aurifères, etc. L'utilisation du MNT permet de calculer les volumes d'extraction et de prévoir l'aménagement futur de ces zones (réhabilitation des sites après exploitation).

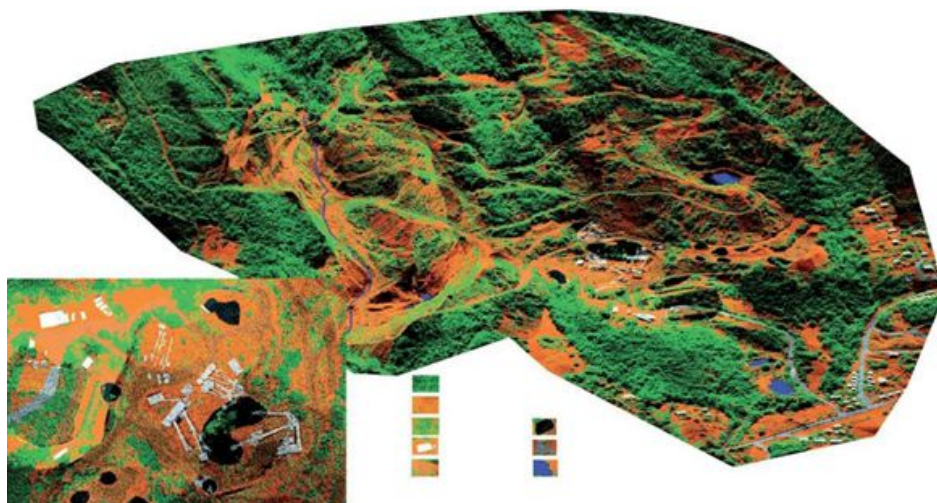


Figure VI.24 : MNT caractérise une zone minière ce qui permet de calculer les volumes d'extraction de sol (<http://www.altoa.org>).

VI.10.1.4. Archéologie

L'une des utilisations de l'MNT est d'identifier les microreliefs liés aux anciennes civilisations (anciens chemins, murailles, restes des villes, etc.) (Figure VI.25).

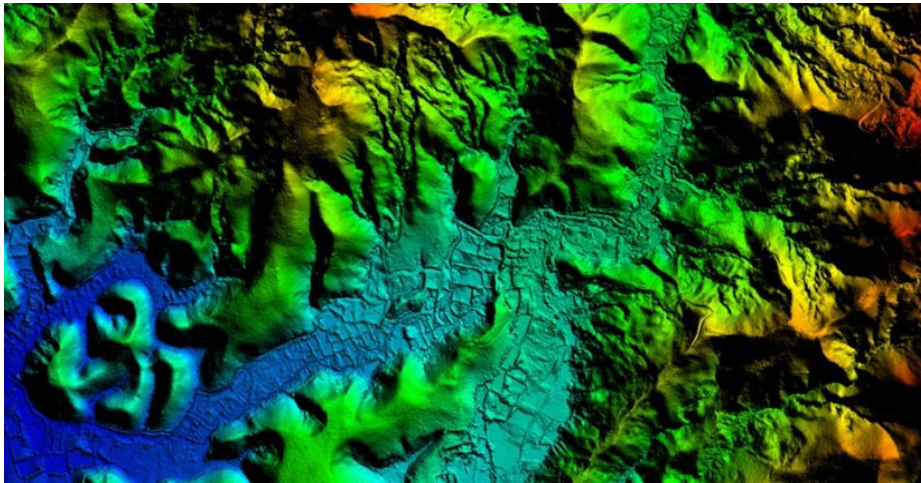


Figure VI.25 : MNT représente les microreliefs liés aux activités humaines anciennes (<http://www.altoa.org>).

VI.11. Usages du MNA

VI.11.1. Gestion forestière

MNA permet de caractériser exactement la forme de canopée (Figure VI.26), de telle manière qu'on peut déduire un modèle numérique de la canopée (MNC=MNA-

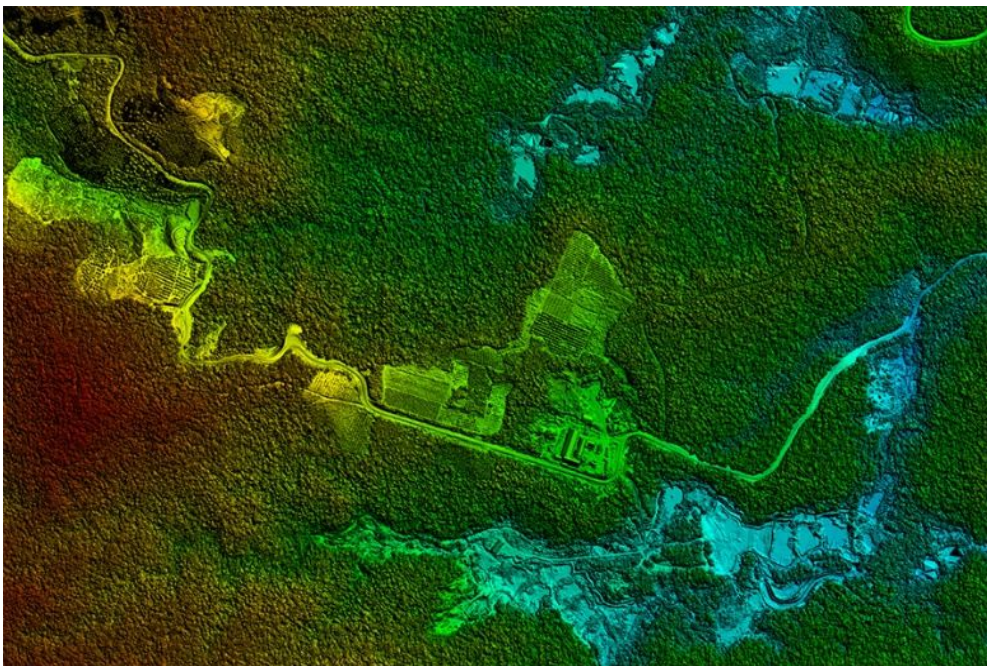


Figure VI.26 : MNA permet de caractériser précisément la surface de la canopée (<http://www.altoa.org>).

MNT). En utilisant le MNT, on peut aussi calculer le volume de biomasse d'un peuplement forestier ; aujourd'hui cet outil est indispensable pour la gestion forestière et agroforestière.

VI.11.2. Urbanisme

Le MNA sert également à repérer distinctement les formes anthropiques d'une zone urbaine. Le couplage des MNS avec le cadastre urbain permet d'estimer, avec précision, la hauteur des bâtiments (Figure VI.27).

Les urbanistes utilisent les MNA pour des travaux de représentation 3D du tissu urbain. Cette représentation est nécessaire pour analyser le tissu existant et prévoir les évolutions en termes d'aménagement tel que la création des zones d'aménagement concerté.



Figure VI.27 : Vue 3D de la reconstitution du bâti par MNA laser et cadastre (Caloz et Collet, 2011).

VI.11.3. Télécommunications

Le MNA est utilisé pour repérer les obstacles physiques ou de visibilité lors de création des réseaux aériens, tel que les pylônes électriques et antennes (Figure VI.28). Le MNA peut être utilisé aussi pour envisager les aménagements nécessaires pour la création de nouveaux réseaux.

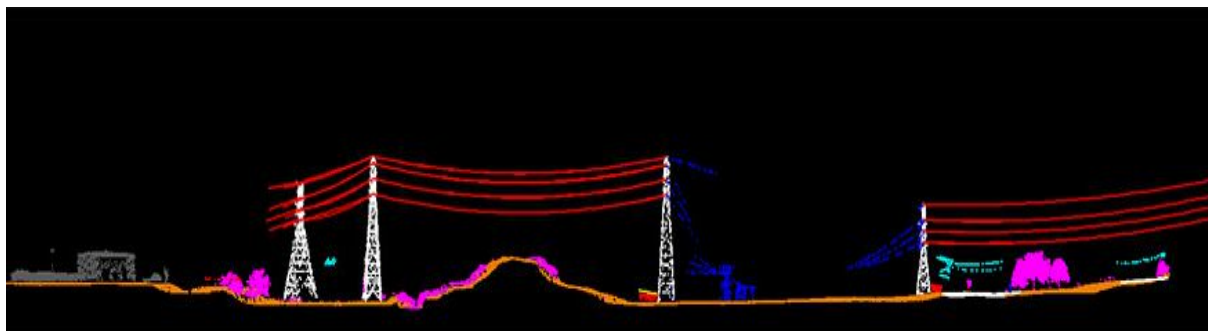


Figure VI.28 : MNA utilise pour la gestion des réseaux de pylônes électriques (<http://www.altoa.org>).

VII. SIG comme outil d'aide à la décision : Création des cartes d'aptitude

Dans cette partie on va voir comment on peut utiliser le Système d'Information Géographique (GIS) comme outil d'aide à la décision dans l'aménagement du territoire, particulièrement, comment l'on utilise pour l'identification des meilleurs endroits pour l'emplacement d'une nouvelle ressource ou ce que n'appelle carte d'aptitude.

La carte d'aptitude montre le degré d'adéquation de chaque localité sur la carte pour l'implantation d'une nouvelle ressource, en tenant compte des critères désignés à l'avance. Dans les paragraphes qui suivent nous détaillons les différentes étapes de réalisation d'une carte d'aptitude :

VII.1.1. définition du problème

Il faut tout d'abord une détermination claire de problème à solutionner ainsi que l'objectif à atteindre. Par exemple, si on veut rechercher le meilleur site pour la construction d'une nouvelle école primaire, dans ce cas le résultat de notre analyse va être une carte qui représente tous les endroits candidats classés de plus à moins approprié pour la réalisation de ce nouvel établissement.

VII.2. analyse du problème et exploration des données

Une fois le problème est défini, la prochaine étape est de scinder le problème en plusieurs objectifs. Parmi les objectifs qu'on peut établir on cite :

- Il est préférable de situer l'école près d'installations récréatives (pour offrir aux enfants des activités de loisirs).
- Il est raisonnable d'être loin des écoles existantes.
- L'école doit être construite sur un terrain relativement plat (pour faciliter l'accès aux enfants).
- L'utilisation du sol doit être appropriée dans ces emplacements. Ici les terres agricoles sont les plus privilégiés par ce que la construction dans ces terres coute moins cher. Après viennent les terres stériles, puis les matorrals, les forêts et les zones déjà construites.

Après avoir fixé nos objectifs (sélectionner les critères) on va procéder à l'identification des différentes cartes nécessaires pour répondre à chacun de nos objectifs :

- ✓ Pour trouver les zones dont le terrain est relativement plat, on doit créer une carte des pentes et de la classer ensuite.
- ✓ Pour la détermination de type d'utilisations du sol le plus approprié (terre agricoles), on doit utiliser et reclassifier la carte d'occupation des sols
- ✓ Pour situer l'école dans les endroits proches des installations récréatives, il faut créer une carte qui calcule les distances par rapport à ces installations.
- ✓ Pour situer l'école loin des écoles existantes on doit donc créer une carte indiquant la distance par rapport aux écoles existantes.

La Figure VI.1. Récapitule les différentes opérations à réalisées ainsi que les cartes nécessaires dans cet exercice.

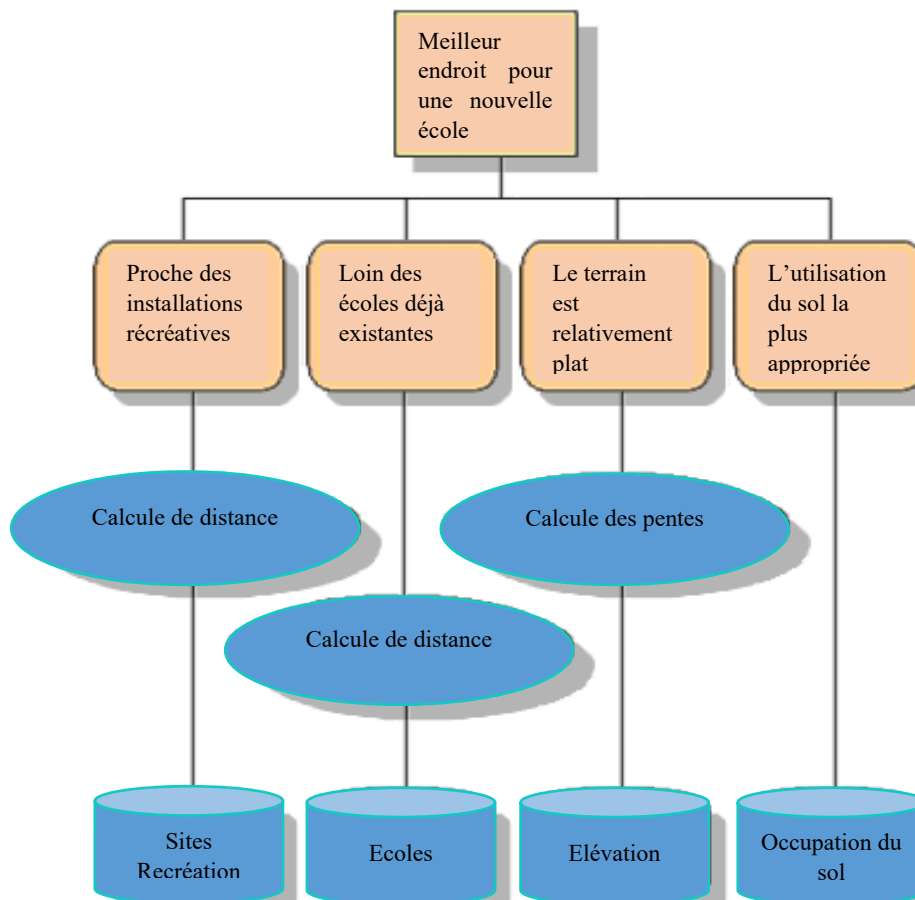


Figure VII.1 : Schéma des opérations à réalisées et des carte nécessaires (ESRI, 2018).

VII.3. Exécution de l'analyse

On a déterminé nos objectifs, sélectionné les données nécessaires, désigné les opérations à réaliser, il ne reste que de passer à l'analyse. Il faut signaler que dans cet exercice l'analyse des données est basée essentiellement sur le logiciel Arc GIS.

VII.3.1. Création de la carte de distances euclidienne à partir des installations récréatives.

Pour situer l'école auprès des installations récréatives, on doit premièrement créer une carte dont chaque pixel représente la distance aux installations récréatives les plus proches. En suite cette carte doit être reclassifiée de telle sorte que les pixels éloignés des installations vont avoir la valeur 1 et les pixels proches la valeur 10 (Figure VII.2).

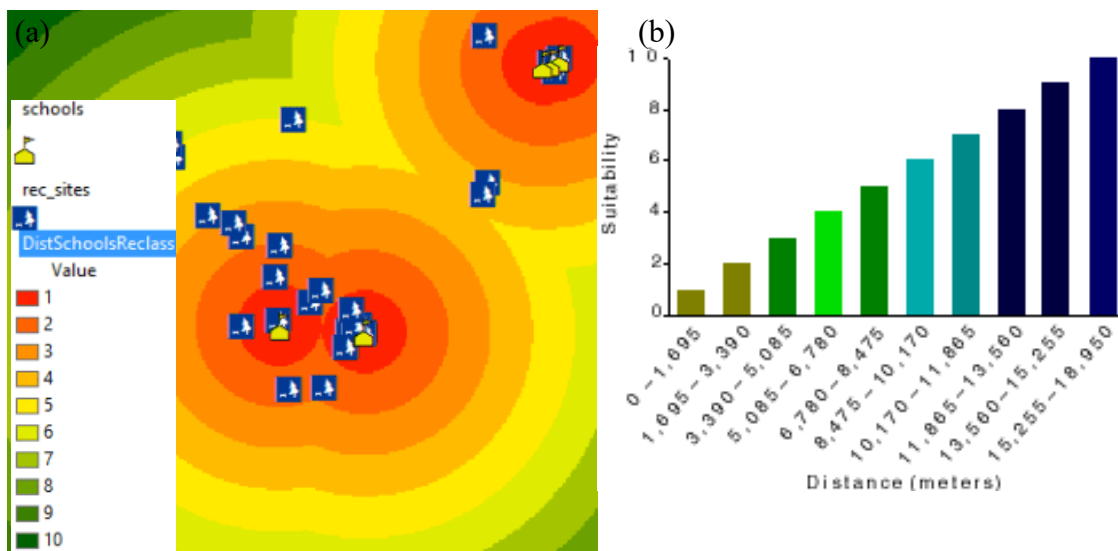


Figure VII.2 : (a) Carte de classement des zones éloignées d'écoles ; (b) histogramme de classement des zones éloignées des écoles (ESRI, 2018).

VII.3.2. Création de la carte de distances euclidienne à partir des écoles existantes

Nous allons créer une couche raster dans laquelle chaque pixel donne la distance à l'école la plus proche. Puisqu'il est souhaitable de situer l'école loin des établissements existants, on affecte la valeur 1 aux pixels proches de ces établissements et la valeur 10 aux pixels qui s'en éloignent (Figure VI.3).

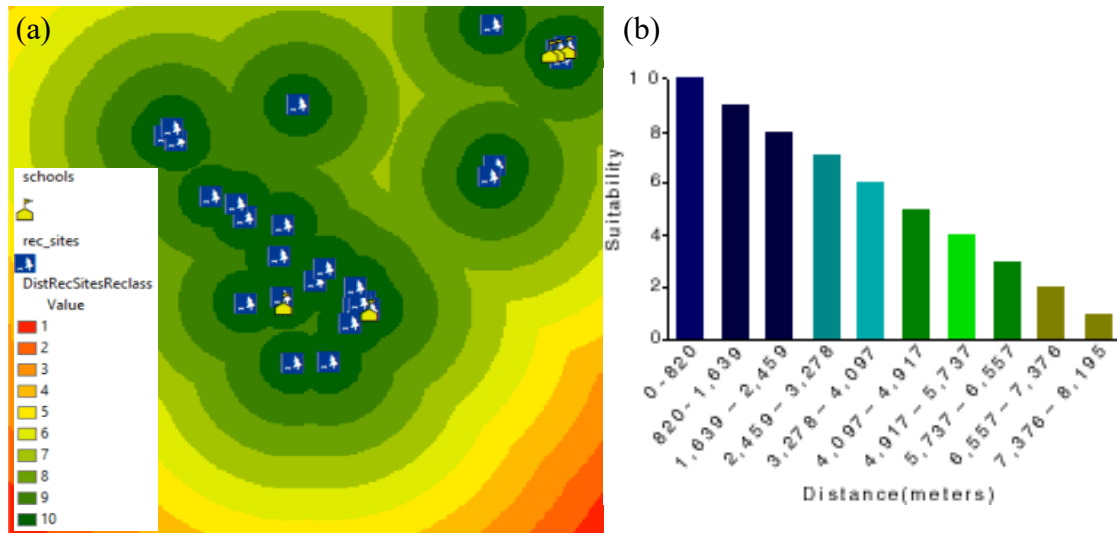


Figure VII.3 : (a) la carte résultante de classement des zones à proximité d’installations récréatives ; (b) histogramme de classement (en 10 classes) des zones à proximité d’installations récréatives (ESRI, 2018).

VII.3.3. Création et classification de la Carte des pentes

Il faut signaler que la carte des pentes est dérivée du modèle numérique du terrain. Comme on veut construire la nouvelle école sur un terrain plat on va classer la carte des pentes de plus grandes à plus petites valeurs, de telle façon que les pixels dont la pente est raide vont avoir la valeur 1 et les pixels dont la pente est faible vont avoir la valeur 10 (Figure VII.4).

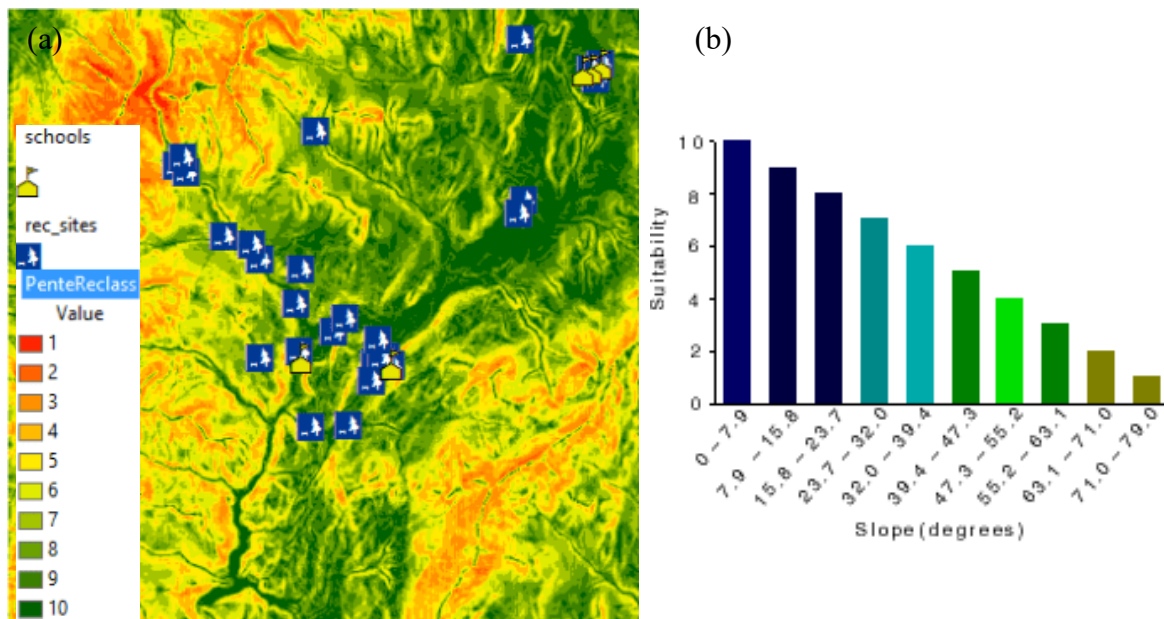


Figure VII.4 : (a) Carte des pentes classée en 10 classes ; (b) histogramme de classement des pentes (ESRI, 2018).

VII.3.4. Classement de la carte d'occupations du sol

On va classer par ordre de préférence les types d'occupations du sol dans la zone d'étude (Figure VII.8). Le tableau VII.1 montre la valeur affectée à chaque type d'occupations du sol.

Tableau VII.1 : Classement de la carte d'occupations du sol

Type d'occupation du sol	Valeur affectée
Terres agricoles (Agriculture)	10
Terres arides (Barren)	06
Zone arbustive (Brush)	05
Forêt (Forest)	04
Zone construite (Built up)	03

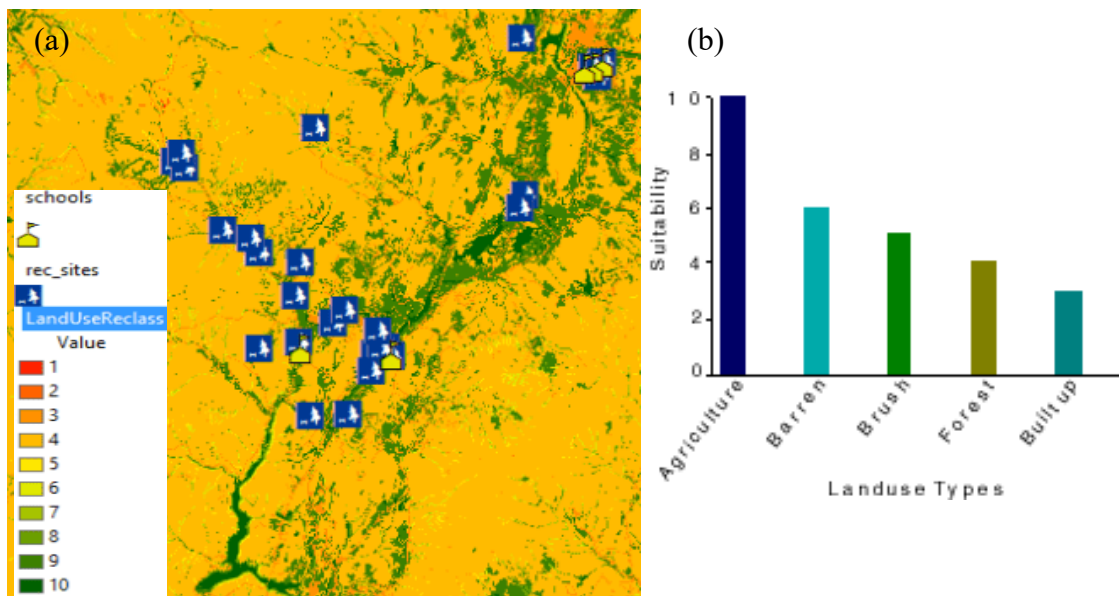


Figure VII.7 : (a) carte d'occupations du sol classifiée ; (b) classement des zones dont le type d'utilisation du sol est approprié (ESRI, 2018).

VII.3.5. Pondération et superposition des cartes résultantes

De la même manière que dans le cas de classement des cartes, la pondération des cartes résultantes est un processus subjectif, il dépend essentiellement de l'objectif

Tableau VII.2 : Superposition pondérée avec tous les rasters inclus ainsi que le pourcentage d'influence de chaque raster.

Raster	% Influence	Field	Scale Value
∨ PenteReclass	13	Value	
∨ LandUseReclass	12	Value	
∨ DistSchoolsReclas	25	Value	
∨ DistRecSitesRecla	50	Value	

de l'étude. Ici nous attribuerons un pourcentage d'influence à chaque carte en entrée, selon l'importance de chacune dans la carte d'aptitude finale (voir Tableau VII.2).

Le résultat final (Figure VII.13) de la superposition pondérée est une carte d'aptitude de notre territoire, dont les pixels en vert foncé représentent les endroits les plus adéquats pour la construction de la nouvelle école. Tandis que les pixels en bleu représentent les endroits exclus de l'analyse lors de la superposition pondérée.

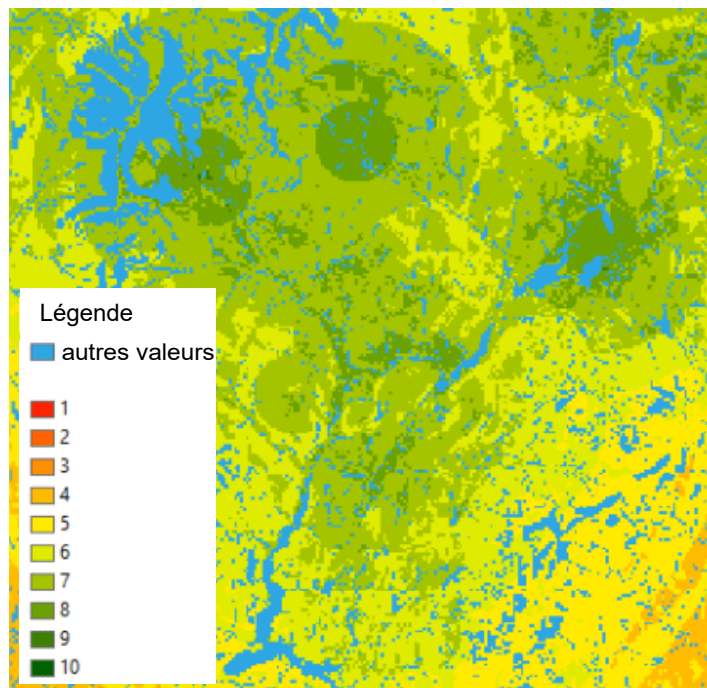


Figure VII.13 : Carte d'aptitude montre les zones les plus favorables pour situer la nouvelle école (ESRI, 2018).

Bibliographie

- Arnaud, M. and Emery, X. (2000) Estimation et interpolation spatiale : méthodes déterministes et méthodes géostatiques. Première édition. Paris : Hermes Science.
- Bosser, P. (2013) Introduction à l'interpolation spatiale et aux géostatistiques. Notes de cours - École Nationale des Sciences Géographiques, France.
- Brunet, R., Ferras, R. and Théry, H. (2009) Les mots de la géographie : dictionnaire critique. Troisième édition. Reclus.
- Bugayevskiy, L. M. and Snyder, J. P. (1995) Map projections : a reference manual. Première édition. London : Taylor & Francis.
- Caloz, R. et Collet, C. (2011) Analyse spatiale de l'information géographique. Première édition. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, collection Ingénierie de l'Environnement.
- Champoux, P. et 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. (2016) Introduction to geographic information systems. Huitième édition. New York: McGraw-Hill Education.
- Charre, J. (1995) Statistique et territoire. Reclus.
- Delaunay, B. (1924) 'Sur la sphère vide', 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, Institut Universitaire Professionnalisé Informatique et Statistique (France).
- Didier, M. (1990) Utilité et valeur de l'information géographique. Paris : Economica.
- ESRI (2018) Tout savoir sur les Systèmes d'Information Géographique. Available at: <https://www.esrifrance.fr/> (Accessed: 15 December 2018).
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M. et 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.
- Koehl, M. et al. (2008) 'SIG 3D et 3D dans les SIG : Application aux modèles patrimoniaux', in GéoÉvénement. France, pp. 1–15. doi: <halshs-00278404> .
- Konecny, G. (2003) Geoinformation : remote sensing, photogrammetry, and geographic information systems. Deuxième édition. 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. Deuxième édition. Wiley.

- Matheron, G. (1976) 'Les concepts de base et l'évolution de la géostatistique minière', in Guarascio, M., David, M., and Huijbregts, C. (eds) *Advanced Geostatistics in the Mining Industry*. Dordrecht : Springer Netherlands, pp. 3–10. doi: 10.1007/978-94-010-1470-0_1.
- Ouedraogo, M. (2014) *Exactitude du positionnement numérique des axes de ruissellement dans les bassins versants agricoles*. Université de Liège.
- Pumain, D. et Saint-Julien, T. (2010) *Analyse spatiale : Les localisations*. Deuxième édition. 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.