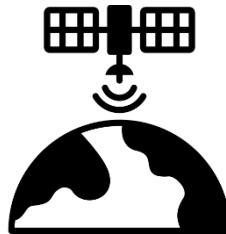


Génie de l'Environnement & Géosciences (S3)

Support de cours



« Géomatique »



2026 - 2027

M. TAHER

m.taher@uae.ac.ma

Avant-propos

Ce cours de Géomatique, conçu pour les étudiants du tronc commun en Génie de l'Environnement et en Géosciences GEG (S3), a pour objectif de fournir les bases théoriques et pratiques nécessaires à la compréhension, la manipulation et l'analyse de l'information géospatiale. Dans un monde où les données spatiales sont omniprésentes, que ce soit pour l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles, le suivi environnemental ou la planification urbaine, la géomatique constitue un outil incontournable pour tout ingénieur ou scientifique du domaine.

Ce cours se veut à la fois didactique et appliqué, avec des exemples concrets, des travaux dirigés (TD) et des études de cas (TP) permettant aux étudiants de développer des compétences pratiques en traitement et en analyse de données spatiales. Il constitue une base solide pour toute spécialisation future en géomatique appliquée à l'environnement et aux géosciences.

Il est possible que certaines fautes ou imprécisions se soient glissées dans ce support. Je prie donc les étudiants qui en relèveraient de bien vouloir me les signaler par courriel, à l'adresse indiquée sur la page de garde, afin d'améliorer la qualité de ce document pour les prochaines éditions.

Table des matières

Avant-propos.....	2
Table des matières	3
Liste des figures.....	7
Liste des tableaux	8
Chapitre 1 : Introduction à la géomatique	9
Introduction	9
1- Définition	9
2- Les disciplines de la géomatique	10
3- Généralités sur l'information géographique.....	11
a- Les composants de l'information géographiques IG	11
b- Les formes de représentation de IG	11
c- Les modes de représentation de IG.....	12
4- Domaines d'utilisation de la géomatique	13
Chapitre 2 : Systèmes de Référence et Coordonnées	14
Introduction	14
1- Les coordonnées géographiques et les coordonnées projetées	14
A- Les coordonnées géographiques	14
a- Parallèles et méridiens (latitude et longitude)	15
b- Le système de coordonnées géographiques	17
B- Les projections.....	18
a- Caractères des projections	18
b- Exemples de projections conformes	19
c- Le système de coordonnées projetées.....	20
C- Le géoréférencement.....	21
2- Ellipsoïde et le Géoïde	22
a- La Forme de la Terre	22
b- Les Hypothèses Historiques.....	23
c- L'Ellipsoïde.....	23
d- Le Géoïde	24
Chapitre 3 : Acquisition des Données Géospatiales	27
1- Techniques de levé topographique et bathymétrique	27
A- Les techniques de levée topographique	27
a- Classification des levées	27

b-	Méthode de réalisation des levées.....	27
c-	Levers avec station totale	30
B-	Les techniques de levée bathymétriques.....	33
a-	Objectifs visés par un levé bathymétrique	34
b-	Fonctionnement d'un sondeur bathymétrique	34
c-	Fonctionnement d'un échosondeur	35
d-	Le sonar latéral	36
2-	Technologie LiDAR.....	38
a-	Méthodes LIDAR :	38
b-	Concept LIDAR.....	38
c-	Instrument LIDAR et mesures.....	39
3-	Photogrammétrie.....	41
a-	Définition	41
b-	Principes et méthodes de la photogrammétrie	42
c-	Présentation du DJI Mavic Mini (Travail Pratique)	43
d-	Application : Modélisation et cartographie terrestre.....	43
e-	Avantages – inconvénients	45
4-	Systèmes de positionnement global (GPS, GNSS)	45
a-	Définition	45
b-	Principe du positionnement	46
c-	Système de positionnement global « GPS »	47
d-	GLONASS	49
e-	Galilée :	50
	Chapitre 4 : Système d'information géographique (SIG)	51
1-	Définition	51
2-	La structure de SIG et de l'IG	52
3-	Composants des SIG	54
a-	Les logiciels	54
b-	Les données	55
c-	Les utilisateurs	56
4-	Fonctionnalités d'un SIG	57
5-	Fonctionnement du SIG	58
6-	Modes d'acquisition de données.....	58
7-	Les modes de représentation de l'IG dans un SIG	59
A-	Le modèle vectoriel	60
a-	Intégration des données géographiques dans un SIG à modèle vectoriel	62

b-	Notion de couches informatiques	63
B-	Le modèle raster	64
a-	La couche matricielle.....	64
b-	la résolution.....	64
C-	Analyses spatiales sur les vecteurs	65
D-	Analyse spatiale sur les rasters	67
E-	Domaines d'utilisation des SIG.....	69
Chapitre 5 : Télédétection et Imagerie Satellite.....		71
1-	Définition de la télédétection.....	71
2-	Système de la télédétection	71
A-	Le rayonnement électromagnétique.....	72
a-	Détection de la lumière	72
b-	Ondes électromagnétiques	72
B-	La cible.....	73
a-	Comportements des ondes	73
b-	Le spectre électromagnétique.....	75
C-	L'environnement	78
D-	Systèmes d'observation	79
a-	Les capteurs.....	79
b-	Les vecteurs.....	81
c-	Résolution.....	82
3-	Nature et Caractéristique de l'image	84
a-	Traitement des données images	84
4-	Domaines d'utilisation de la télédétection.....	85
Chapitre 6 : Cartographie et Visualisation		87
1-	Définition de la cartographie et de la carte	87
2-	Classification des cartes.....	87
a-	Les cartes topographiques.....	87
b-	Les cartes thématiques.....	88
3-	Les principes de la cartographie	89
4-	Comprendre l'image cartographique : sémiologie et représentation.....	90
5-	Habillage cartographique	95
Chapitre 7 : Modélisation Géospatiale.....		98
1-	Les concepts de la modélisation géospatiale.....	98
2-	Le modèle numérique de terrain.....	99
a-	Définition	99

b- Les fichiers Dérivés du MNT	99
3- Modèle Numérique de Surface (MNS)	103
a- Définition	103
b- Conclusion.....	103
Références.....	104

Liste des figures

Figure 1 : Les formes de représentation	12
Figure 2: Les modes de représentation de IG.....	12
Figure 3: Le quadrillage imaginaire de la surface de la terre	15
Figure 4: Parallèles (latitudes) et méridiens (longitudes) de la terre	15
Figure 5: L'altitude	16
Figure 6: La représentation conique tangente et sécante	19
Figure 7: Les représentations cylindriques.....	20
Figure 8: Numéros de zone UTM	21
Figure 9: : On appelle « Forme de la Terre » la forme que prend cette surface de référence	22
Figure 10: Le Géoïde.....	25
Figure 11: Relation Ellipsoïde – Géoïde	26
Figure 12: Levé par abscisses et ordonnées	28
Figure 13: Levée par rayonnement.....	30
Figure 14: La méthode correcte pour écarter les pieds du trépied.....	31
Figure 15: Les composants d'un tachéomètre	33
Figure 16: Principe des mesures par les sondeurs mono faisceaux. (IFREMER)	35
Figure 17: : Principe de fonctionnement du sondeurs multifaisceaux. (IFREMER).....	36
Figure 18: Photographie d'un sonar latéral.	38
Figure 19: Schéma général d'un système lidar et du principe de la mesure.....	39
Figure 20: Principe des mesures 3D de la topographie urbaine par LIDAR sur véhicule mobile et LIDAR aéroporté.....	40
Figure 21: Schéma illustrant la cartographie par drone.....	42
Figure 22: Schéma de l'appareil	43
Figure 23: Phase d'opérationnalité des différents GNSS existants.....	46
Figure 24: Trilatération.....	46
Figure 25: Segment spatial et segment de contrôle	48
Figure 26: 24 satellites assurent la surveillance	50
Figure 27: Informatisation des données géoréférencées à l'aide du SIG	51
Figure 28: Les disciplines contribuant au SIG : 1 - Cartographie, 2 - Télédétection, 3- Gestion des bases de données, 4- Conception APO	52
Figure 29: La structure de l'IG dans un SIG.....	53
Figure 30: Structure d'un SIG (Abdelbaki C. 2012).....	53
Figure 31: Les principaux composants d'un SIG.....	54
Figure 32: Les différentes données d'un SIG	56
Figure 33: Exemple de sélection	57
Figure 34: Superposition sous un SIG.....	57
Figure 35: Exemple d'importation de fichiers vers le SIG	59
Figure 36: Décomposition du monde réel en couches d'information.....	60
Figure 37: Exemple de données vectorielles	61
Figure 38: Création de cartes thématiques par superposition des couches dans un SIG	63
Figure 39: Modèle raster	64
Figure 40: Exemples de la fonction buffer appliquée à un point, une ligne ou un polygone	65
Figure 41: La superposition de plusieurs couches sous GIS	66
Figure 42: Exemple d'une union spatiale	66
Figure 43: Exemple d'un clip.....	67
Figure 44: Reclassification des valeurs d'altitudes.....	67

Figure 45: Exemple de boîte de dialogue de l'outil Calculatrice raster	68
Figure 46: Exemple d'extraction par masque d'une zone d'étude	69
Figure 47: Système de la télédétection.....	71
Figure 48: Les caractéristiques de l'onde électromagnétique (source : ARSET)	73
Figure 49: Les différents comportements des ondes	75
Figure 50: Les principaux domaines du spectre (Source : ARSET).....	76
Figure 51: Les éléments perturbateurs des rayons électromagnétiques.....	79
Figure 52: Illustration de la télédétection active (A) et passive (B) (Source : Ressources Naturelles du Canada).....	80
Figure 53: Représentation de différents vecteurs	82
Figure 54: Exemple d'une carte topographique	88
Figure 55: Exemple d'une carte thématique	88
Figure 56: Les éléments d'une carte	95
Figure 57: Exemple d'une carte	97
Figure 58: Carte d'altitude du bassin de Boudinar.....	99
Figure 59: Carte de la pente du bassin de Boudinar.....	100
Figure 60: Carte d'exposition du bassin de Boudinar.....	100
Figure 61: Carte de réseaux hydrographique du bassin versant de Boudinar.....	102
Figure 62: Visualisation en 3D du bassin inférieur de Nekor.....	102

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison entre CG et CP.....	21
Tableau 2: Caractéristiques techniques des sondeurs bathymétriques selon le type de levé	35
Tableau 3: Caractéristiques de quelques capteurs	83

Chapitre 1 : Introduction à la géomatique

Introduction

Le terme « géomatique », créé dans les années 1960 par Bernard Dubuisson, résulte de la fusion des mots « géographie » et « informatique ». Il reflète l'intégration croissante des technologies informatiques dans le traitement des données géographiques. D'abord adopté au Québec, ce mot est aujourd'hui utilisé à l'échelle mondiale. La géomatique désigne l'ensemble des outils et méthodes permettant de collecter, traiter, analyser et diffuser des informations géographiques. Elle repose sur l'utilisation incontournable de l'informatique et se concrétise principalement à travers les Systèmes d'Information Géographique (SIG). Cette discipline permet ainsi de mieux comprendre les phénomènes naturels et humains. De nos jours, elle s'étend également sur Internet via des applications comme le WebMapping.

1- Définition

La géomatique désigne l'ensemble des sciences et technologies liées à l'acquisition, au stockage, à l'analyse, à l'interprétation et à la diffusion de l'information géographique. Issue de la convergence entre la géographie et l'informatique, elle s'appuie sur des données géoréférencées, qu'elles soient qualitatives ou quantitatives. Ces données sont structurées et représentées de manière à en faciliter la compréhension, afin de servir d'outil d'aide à la décision pour la gestion et la planification des milieux naturels et anthropiques.

La géomatique appliquée à l'environnement résulte de l'intégration de plusieurs technologies, telles que la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG), les systèmes de positionnement global (GPS) et la cartographie numérique, en lien étroit avec les disciplines de l'écologie, de la géologie, de la géographie et de la gestion des ressources naturelles. Elle constitue ainsi un champ d'expertise au croisement des sciences de la Terre et de l'environnement. Son objectif principal est de produire des représentations précises, structurées et accessibles du territoire, afin de mieux comprendre les interactions entre les milieux naturels et les activités humaines, et de contribuer à une planification durable et équilibrée de l'espace.

La géomatique appliquée s'intègre progressivement dans de nombreux domaines en tant qu'outil d'aide à la décision. Elle est aujourd'hui essentielle dans des secteurs variés tels que la planification stratégique, le suivi et la protection de l'environnement, le monitoring écologique, les études d'impact, la gestion de la santé publique, le développement durable des ressources

naturelles, la prévention des Géorisques, ainsi que la gestion des situations d'urgence et de la sécurité civile.

Les professionnels de ce domaine, appelés géomaticiens, exercent des métiers variés selon leur spécialisation : chef de projet ou ingénieur en systèmes d'information géographique, administrateur SIG, technicien en cartographie ou en traitement des données spatiales, gestionnaire de bases de données géographiques, ou encore architecte SIG.

Définition

La géomatique regroupe l'ensemble des outils et des méthodes permettant d'acquérir, de représenter et d'analyser des données géographiques.

Par conséquent, la géomatique regroupe au moins trois activités distinctes : la collecte des données géographiques, le traitement de ces données et la diffusion de celles-ci.

Les outils informatiques apparaissent indispensables à ces trois activités.

2- Les disciplines de la géomatique

Parmi les disciplines de la géomatique on peut citer :

La topométrie

Ensemble des travaux effectués sur le terrain pour procéder aux relevés métriques nécessaires à l'établissement d'une carte.

La géodésie

Science qui a pour objet l'étude de la forme et la mesure des dimensions de la terre.

La photogrammétrie

La photogrammétrie aérienne est l'ensemble des techniques et des matériels utilisés pour aboutir à la représentation d'un territoire étendu, à partir des clichés de la prise de vues aériennes.

La télédétection

La télédétection est l'ensemble des techniques utilisées pour déterminer à distance les propriétés d'objets naturels ou artificiels à partir des rayonnements qu'ils émettent ou réfléchissent.

Le système d'information géographique

Un système d'information géographique ou SIG est un système d'information conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques.

3- Généralités sur l'information géographique

Définition

L'information géographique est la représentation d'un objet ou d'un phénomène localisé dans l'espace à un moment donné.

a- Les composants de l'information géographiques IG

Les deux principales composantes de l'information géographique sont :

- **Le niveau géométrique** qui correspond à la forme et à la localisation de l'objet sur la surface terrestre. Un système de coordonnées peut être valable sur tout ou partie de la surface terrestre. On peut aussi définir un système de « coordonnées relatives » par rapport à un point d'origine quelconque, comme c'est souvent le cas pour les relevés topographiques.
- **Le niveau sémantique** qui correspond à l'information relative à un objet. L'ensemble des caractéristiques de l'objet forme ses attributs (comme par exemple : le numéro d'une parcelle cadastrale, le nom d'une route, le nom d'une rivière, le nombre d'habitants d'une commune. . .).

b- Les formes de représentation de IG

Pour représenter l'information géographique, il existe trois formes :

- L'information géographique se prête particulièrement bien à la représentation sur une carte où l'on situe les objets et les phénomènes dans un repère général et homogène.
- L'information géographique peut être représentée sur une image où l'on peut voir une multitude d'objets (comme par exemple une photo aérienne ou une image satellite) sans connaître directement leurs attributs (on ne voit pas le nom de la route, le nombre d'habitants des communes...).
- L'information géographique peut être représentée par un texte ou un fichier de données littérales où elle est représentée par des données numériques et par une adresse (comme par exemple les fichiers des abonnés à l'ADSL qui contiennent nom, prénom, numéro de téléphone, adresse postale. . .).



Nom	Tidrine
Latitude	34°50'36"N
Longitude	4°30'30" O
Altitude	2456

Image : Géométrie sans sémantique Carte : Géométrie et sémantique Texte : sémantique sans géométrie

Figure 1 : Les formes de représentation

c- Les modes de représentation de IG

D'un point de vue numérique, il existe deux modes de représentation :

- **Le mode maillé** (ou **raster** en anglais), où la surface de la carte ou de l'image est décrite selon un balayage ligne par ligne. Chaque ligne est composée de pixels. C'est mathématiquement, ni plus ni moins, qu'une matrice.
- Le deuxième mode de représentation est **le mode vecteur**, où chaque objet représenté sur la carte est décrit par un ou des points successifs composant sa forme. Chaque point est localisé par ses coordonnées rectangulaires. La forme des objets est exprimée par le biais de trois principales « primitives » géométriques : objets ponctuels, linéaires et surfiques.

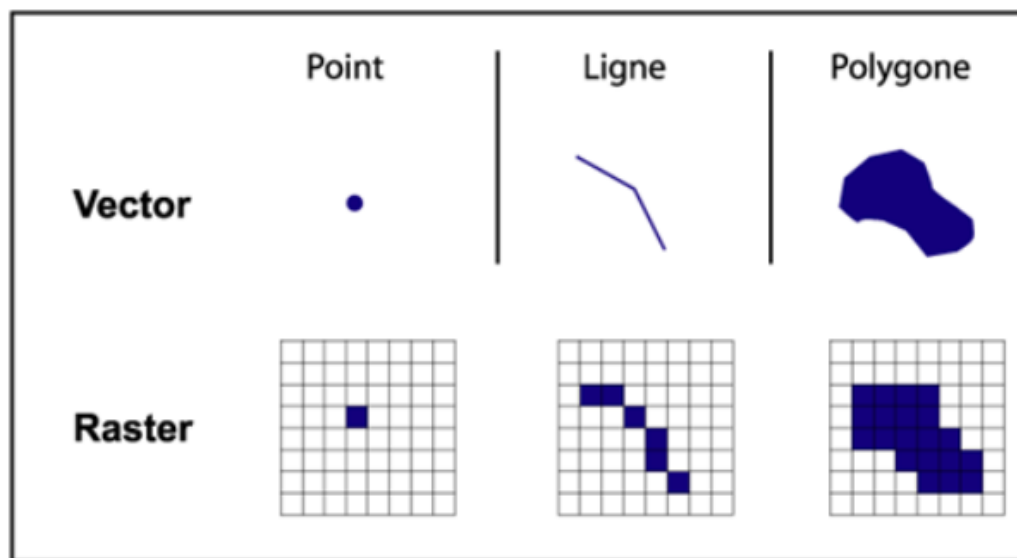


Figure 2: Les modes de représentation de IG

À un objet ponctuel est associé un seul jeu de coordonnées donnant la position du point dans l'espace : POINT(0 0)

À un objet linéaire est associé une suite ordonnée de points (donc de coordonnées). Chaque point de cette suite est relié au point suivant par un segment de ligne, en général un segment

de droite. La forme d'un objet linéaire est ainsi traduite par une ligne brisée : LINESTRING
(0 0, 1 1, 2 1, 2 2)

Un objet surfacique est délimité par un objet linéaire qui se ferme sur lui-même :

POLYGON (0 0, 1 0, 1 1, 0 1, 0 0)

4- Domaines d'utilisation de la géomatique

Les domaines pour lesquels peut s'appliquer la géomatique sont nombreux, avec par exemple :

Géographie – Démographie – Environnement – Topographie - Navigation - Géomarketing –
Hydrographie- Foresterie Pêche (halieutique) Aménagement du territoire et Urbanisme -
Gestion de la périurbanisation et du foncier - Agriculture, Pédologie, Agronomie - Gestion des
risques - Gestion des ressources naturelles - Sciences de la Vie et de la Terre - Sciences
humaines et sociales (SHS) - Épidémiologie - Météorologie - Observatoires (des transports, du
paysage, climat, de l'environnement, etc.) Photo-interprétation- Commerce - Statistiques
Cartographie - Occupation du sol – Archéologie - Océanographie.

Quelques applications

Environnement :

Problématique

La forêt de Sfiha-Souani, située dans la province d'Al Hoceima au nord du Maroc, constitue un écosystème fragile qui joue un rôle fondamental dans la protection des sols, la régulation hydrique et la préservation de la biodiversité locale. Toutefois, cette zone forestière est confrontée à de fortes pressions anthropiques, notamment l'urbanisation côtière, le développement touristique, le surpâturage, ainsi que les effets du changement climatique. Ces pressions entraînent une dégradation progressive de la couverture forestière et une fragmentation des habitats naturels. Dans ce contexte, comment la forêt de Sfiha-Souani a-t-elle évolué spatialement et temporellement au cours des dernières décennies, et quels sont les facteurs clés de cette transformation ?

Chapitre 2 : Systèmes de Référence et Coordonnées

Introduction

La localisation précise d'un objet ou d'un phénomène géographique nécessite l'utilisation de systèmes de référence rigoureux, capables de représenter la surface terrestre de manière cohérente et mathématiquement définie. Les systèmes de coordonnées, qu'ils soient géographiques ou projetés, permettent de situer des points à la surface de la Terre en utilisant des repères standardisés.

Ce chapitre présente les fondements des systèmes de référence spatiale, en abordant les principales familles de coordonnées utilisées en géomatique. Les systèmes de coordonnées géographiques, basés sur la latitude et la longitude, sont adaptés à l'échelle mondiale, tandis que les systèmes de coordonnées projetés traduisent ces données sur un plan, facilitant les analyses locales et régionales.

Une attention particulière est portée aux transformations de coordonnées, nécessaires pour passer d'un système à un autre sans perte significative de précision, notamment lors de l'intégration de données issues de sources multiples.

Par ailleurs, la représentation de la forme de la Terre repose sur des modèles géométriques abstraits tels que les ellipsoïdes de révolution et les modèles géoïdiques, qui permettent de définir la position verticale des points avec plus de réalisme. Ces modèles jouent un rôle fondamental dans la précision des mesures altimétriques et la conversion entre différentes hauteurs.

Ainsi, ce chapitre pose les bases nécessaires à une compréhension approfondie des outils de géoréférencement utilisés dans les Systèmes d'Information Géographique (SIG), en vue d'assurer l'harmonisation et la fiabilité des données spatiales.

1- Les coordonnées géographiques et les coordonnées projetées

A- Les coordonnées géographiques

Les coordonnées géographiques font partie d'un système de « repères cartographiques » composés de trois éléments ; 1) la latitude, 2) la longitude et 3) l'élévation par rapport au niveau de la mer.

Les coordonnées géographiques découlent d'un système géodésique utilisé pour se repérer à la surface de la planète. Le système géodésique est un quadrillage imaginaire qui couvre la surface de la Terre et qui la divise en carreaux.

À l'aide de ce quadrillage on peut localiser n'importe quel endroit dans le monde à l'intersection d'une ligne de latitude et d'une ligne de longitude.

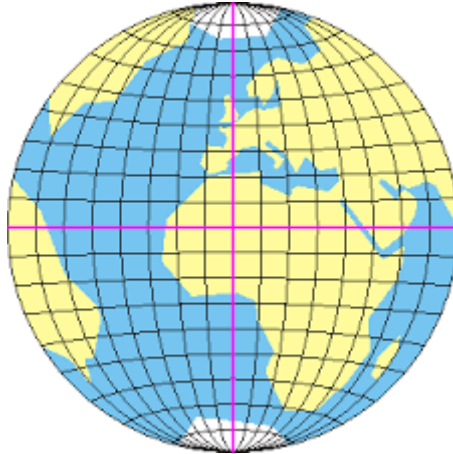
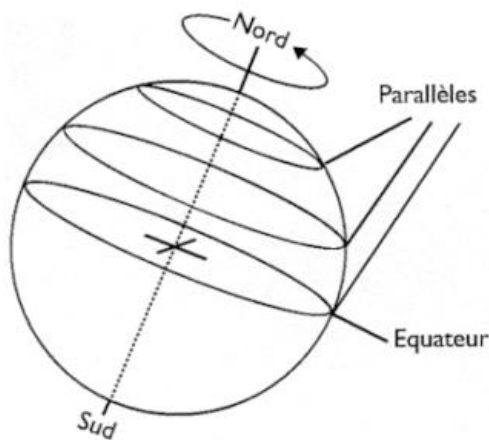


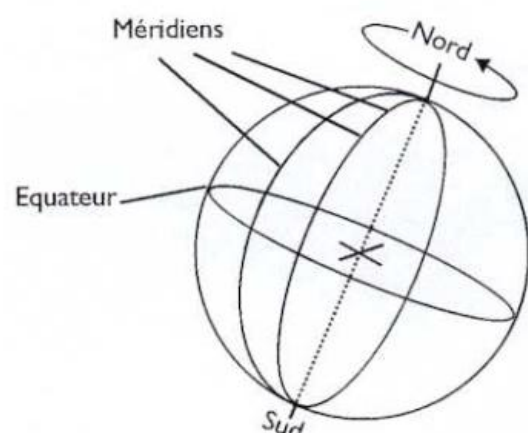
Figure 3: Le quadrillage imaginaire de la surface de la terre

a- Parallèles et méridiens (latitude et longitude)

Peu importe où tu te trouves dans le monde, tu peux identifier ton emplacement au moyen d'une 'adresse géographique' comprenant la latitude et la longitude. Tout endroit sur la Terre doit-être exprimé par ses coordonnées (Latitude et Longitude). Si tu utilises la latitude et la longitude, le centre géographique du monde se trouve dans le golfe de Guinée, sur la côte de l'Afrique de l'Ouest. (Trouve l'intersection la latitude 0 et de la longitude 0). À partir de là, un plan quadrillé s'étend du nord au sud et d'est en ouest.



Dessin 1 : les parallèles



Dessin 2 : les méridiens

Figure 4: Parallèles (latitudes) et méridiens (longitudes) de la terre

La première ligne imaginaire utilisée pour diviser la Terre est l'équateur, qui la sépare en deux hémisphères : nord et sud (Fig.9 : Dessin 1).

À partir de cette ligne, d'autres lignes parallèles ont été tracées pour permettre la localisation précise des points à la surface du globe. Ce découpage sert à définir la latitude, c'est-à-dire l'angle formé entre un parallèle donné et le plan de l'équateur (l'angle au centre de la Terre entre l'équateur et le parallèle d'un lieu).

Ainsi, l'équateur correspond à une latitude de 0° . Comme l'angle entre le plan de l'équateur et le pôle Nord est de 90° , ce dernier est situé à une latitude de 90° nord. De la même manière, le pôle Sud se trouve à une latitude de 90° sud.

Pour résumer, tous les points situés sur un même parallèle partagent la même latitude.

Ainsi, des milliers de points à la surface de la Terre peuvent avoir une latitude identique. Pour compléter cette localisation, d'autres lignes imaginaires ont été définies : ce sont les méridiens, qui relient les pôles Nord et Sud et coupent l'équateur à angle droit.

Le méridien-origine, qui traverse Greenwich en Angleterre, sert de référence pour le calcul de la longitude. Celle-ci correspond à l'angle formé entre ce méridien et le méridien passant par un point donné à la surface de la Terre (l'angle mesuré au centre de la Terre entre Greenwich et le lieu considéré) (Fig.9 : Dessin2).

Comme la latitude, la longitude s'exprime en degrés. Elle est dite **est** ou **ouest** selon que l'on s'éloigne du méridien de Greenwich vers l'est ou vers l'ouest.

Quand on connaît la latitude (indiquée en premier) et la longitude (indiquée en second) d'un lieu géographique, on peut le situer rapidement sur la carte.

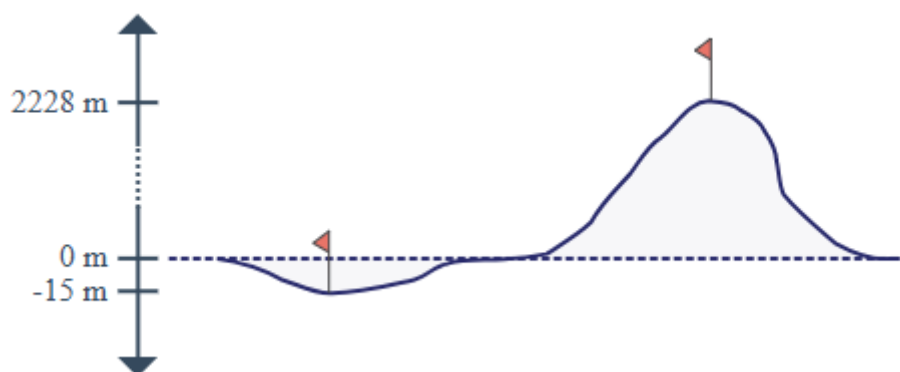


Figure 5: L'altitude

NB : Il ne faut pas confondre latitude et **altitude** (Fig.10). Cette dernière correspond à la mesure, en mètres, de l'élévation d'un lieu par rapport au niveau moyen de la mer.

b- Le système de coordonnées géographiques

Les systèmes de coordonnées géographiques utilisent des unités angulaires pour mesurer la longitude (x) et la latitude (y). **Les valeurs positives** indiquent le nord de l'équateur et l'est du méridien principal, tandis que **les valeurs négatives** correspondent au sud de l'équateur et à l'ouest du méridien principal. Les coordonnées peuvent être exprimées en degrés, minutes, secondes (DMS) ou en degrés décimaux (DD). La conversion entre ces formats se fait à l'aide des formules suivantes :

- Conversion DMS vers degrés décimaux (DD) :

Latitude = degrés + (minutes / 60) + (secondes / 3600).

Exemple : $45^{\circ} 54' 36'' = 45 + (54/60) + (36/3600) = 45,91^{\circ}$.

- Conversion DD vers DMS :

Exemple : $121,18^{\circ}$

1. Degrés = 121°
2. Partie décimale $\times 60' = 0,18 \times 60 = 10,8 \rightarrow$ Minutes = 10'
3. Partie décimale $\times 60'' = 0,8 \times 60 = 48 \rightarrow$ Secondes = 48''

Résultat : $121^{\circ} 10' 48''$.

Application 1

1. Convertissez les coordonnées suivantes (données en DMS) en système décimal (DD) : $71^{\circ} 37' 11.59356''$ S $3^{\circ} 36' 9.00139''$ E.

2. Convertissez les coordonnées suivantes (en DD) en système sexagésimal (DMS) : 37.0408755, 127.8586933.

Application 2

1. Convertissez les coordonnées suivantes (données en DMS) en système décimal (DD) : $52^{\circ} 9' 36.2542''$ N $74^{\circ} 49' 0.28736''$ W.

2. Convertissez les coordonnées suivantes (en DD) en système sexagésimal (DMS) : - 32.9680185, -0.8053846.

B- Les projections

Pour les besoins cartographiques, on doit représenter sur une surface plane l'image de la terre assimilée à un ellipsoïde, ce qui nécessite l'utilisation d'une représentation plane (ou projection).

Toute représentation sur une surface bidimensionnelle de la Terre, s'obtient par une projection, opération cartographique permettant de représenter l'ellipsoïde terrestre sur une surface plane, dite plan de projection, suivant certaines règles géométriques. Or, de cette projection dépend l'ensemble de la carte. Le fait de projeter une chose courbe sur un plan, entraîne des déformations. Aucune représentation en plan n'est donc conforme à la réalité.

Ainsi, il existe 2 types de déformations (Altérations):

- celle des longueurs, qui entraîne une variation de l'échelle de la carte d'un point à un autre.
- celle des angles, le passage de la sphère au plan entraînant une déformation des angles, des formes, des surfaces et des directions.

Pour réduire ces altérations, on distingue deux types de projections : les projections conformes qui permettent la conservation des rapports d'angles sur la carte par rapport à la Terre et les projections équivalentes qui assurent la conservation des rapports de surfaces.

Définition

Une projection est une fonction mathématique qui transforme les coordonnées géographiques λ (longitude) et ϕ (latitude) en coordonnées planes X et Y, destinées à être reportées sur un plan, la carte : $(X, Y) = f(\lambda, \phi)$.

Un exemple très simple de projection : $X = \lambda$ et $Y = \phi$.

Ce type de projection, appelé « Carte Plane », a été utilisé dans les toutes premières cartes marines : les portulans.

a- Caractères des projections

Aucune projection ne peut conserver les distances (c'est à dire avoir une échelle constante) sur toute l'étendue de la carte. Toutefois, pour les cartes topographiques, le type de projection est choisi de façon que la déformation sur les distances soit inférieure à la précision graphique de la carte. En revanche, certaines projections conservent les superficies, et d'autres les angles. Il est impossible pour une même projection de conserver à la fois les superficies et les angles. Les projections qui conservent les angles sont dites **conformes**.

Les projections qui conservent les superficies sont dites **équivalentes**.

Les projections qui ne conservent ni les angles ni les superficies sont dites **aphylactiques**.

Les cartes topographiques et de navigation sont généralement réalisées avec des projections conformes. Il est ainsi possible de reporter directement sur la carte les angles mesurés sur le terrain au théodolite ou à la boussole.

b- Exemples de projections conformes

- Coniques

Ce type de projection peut être assimilé géométriquement à la projection d'une sphère sur un cône qui lui serait tangent sur un parallèle :

Les distances sont conservées uniquement sur le parallèle de tangence.

Le cône peut être également sécant et coïncider avec la sphère sur deux parallèles.

Les projections Lambert utilisent ce type de projection.

La projection Lambert utilisée au Maroc est une projection conique.

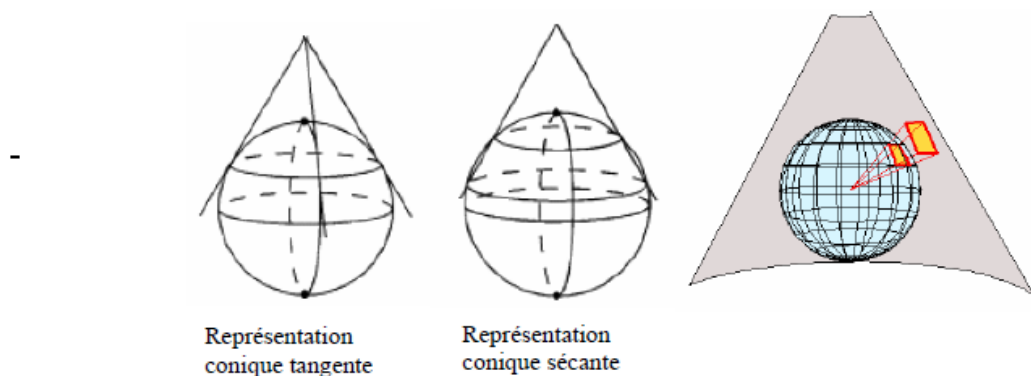


Figure 6: La représentation conique tangente et sécante

Cylindriques

Ce type de projection peut être assimilé géométriquement à la projection d'une sphère sur un cylindre qui lui serait tangent. On distingue plusieurs types suivant la ligne de tangence :

- La ligne de tangence est l'équateur. L'échelle et les déformations croissent avec la latitude. Cette projection est la plus utilisée pour les cartes marines et aéronautiques (par ex. : projection de Mercator).

- La ligne de tangence est un méridien. Les déformations croissent lorsque l'on s'éloigne du méridien de tangence. Cela permet de représenter plus fidèlement les zones nord-sud (ex. : projection UTM).

Une projection mondiale, appelée UTM (Universal Transverse Mercator), a été créée en découpant la terre en fuseaux et en appliquant une projection Mercator Transverse sur chacun des méridiens au centre des zones ainsi déterminées.

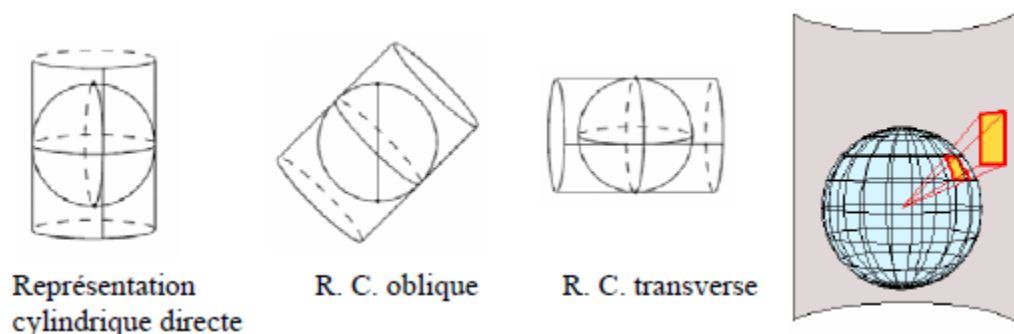


Figure 7: Les représentations cylindriques

c- Le système de coordonnées projetées

Le système UTM (Universal Transverse Mercator) divise le monde en 60 fuseaux de 6° de longitude chacun. Les coordonnées y sont exprimées en mètres :

- La latitude représente la distance à l'équateur.
- La longitude est mesurée par rapport au centre du fuseau, avec une valeur conventionnelle de 500 000 m.

Ce système permet une représentation précise des emplacements sur des cartes planes.

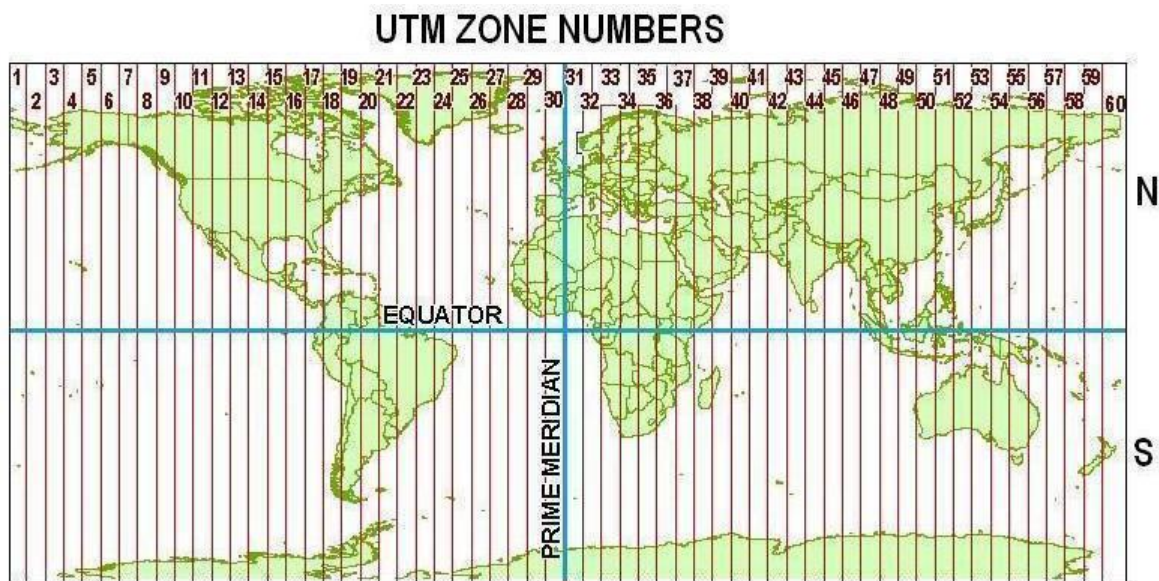


Figure 8: Numéros de zone UTM

Comparaison avec les Coordonnées Géographiques

Tableau 1 : Comparaison entre CG et CP

Caractéristique	Coordonnées Géographiques	Coordonnées Projetées (UTM)
Unité	Degrés (°)	Mètres (m)
Représentation	Sphérique (3D)	Plane (2D)
Précision locale	Moins précise	Très précise dans un fuseau
Utilisation typique	GPS, navigation globale	Cartographie topographique, ingénierie

C- Le géoréférencement

Le géoréférencement s'applique aux images raster (matricielles) afin de leur attribuer une référence spatiale dans un système de projection géographique donné, lorsqu'elles en sont dépourvues. Cette technique utilise des coordonnées cartographiques pour assigner une position spatiale précise à des éléments géographiques. Chaque entité d'une carte possède :

- Une localisation géographique (coordonnées précises).
- Une étendue spatiale (superficie ou forme).

Ces informations permettent de situer les objets à la surface de la Terre (ou à proximité), ce qui est fondamental pour :

- La cartographie.

- Les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

Pour décrire correctement un emplacement, un système de coordonnées est nécessaire. Par exemple :

- Le système longitude/latitude (coordonnées géographiques globales).
- Les systèmes projetés comme UTM (en mètres).

Le géoréférencement est indispensable pour :

- Superposer des couches cartographiques (ex : image satellite + routes).
- Effectuer des mesures précises (distances, aires).
- Intégrer des données non localisées dans un SIG.

2- Ellipsoïde et le Géoïde

a- La Forme de la Terre

Définition

La surface topographique de la terre est irrégulière et non modélisable mathématiquement. Il convient de définir une surface de référence à partir de laquelle s'effectueraient les mesures de topographie, de nivellement, de cartographie. Cette surface passe par un point d'altitude 0 défini arbitrairement comme étant le niveau moyen des mers. Ensuite, elle suit la perpendiculaire au fil à plomb. Par exemple, si la terre est considérée comme plate :

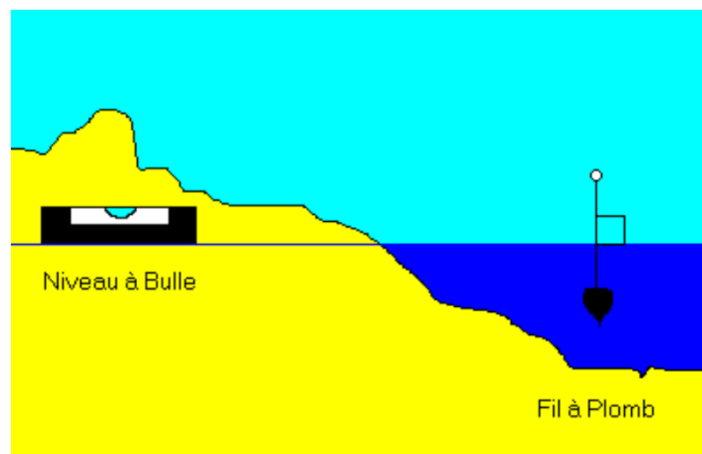


Figure 9: : On appelle « Forme de la Terre » la forme que prend cette surface de référence

b- Les Hypothèses Historiques

Historiquement la compréhension de la forme de la terre est passée par plusieurs étapes :

La Terre Plate

La terre considérée comme plate est l'hypothèse la plus intuitive, et donc la plus ancienne. Vu le très grand rayon de la terre, celle-ci est toujours considérée comme plate pour les levés topographiques couvrant une aire peu étendue.

La Terre Sphérique

Dès le III^{ème} siècle, des savants grecs constatèrent que certains phénomènes physiques ne pouvaient s'expliquer si la terre était plate. Leurs observations leur firent déduire que la terre avait la forme d'une sphère, qu'ils supposèrent parfaite. En 205 av.JC, Erathostène effectua la première mesure de la circonférence terrestre à Alexandrie, en comparant la différence de hauteur du Soleil à Alexandrie et à Syène. Ce modèle de terre sphérique s'est imposé jusqu'à la fin du 18^{ème} siècle. Les calculs sur la sphère étant très simples mathématiquement, ce modèle est toujours utilisé pour les 6 calculs de Navigation, d'Astronomie, et pour la cartographie aux très petites échelles (représentation d'un continent ou de la terre entière).

Le modèle de terre sphérique a permis de définir un premier système de repérage : les méridiens et les parallèles. Les parallèles, comme leur nom l'indique, forment des cercles parallèles à l'Equateur. Les méridiens forment des cercles passant obligatoirement par les deux pôles. L'un de ces cercles est défini comme étant le méridien d'origine. Autrefois, chaque pays, ou presque, avait son propre méridien. Aujourd'hui, le méridien passant par Greenwich est considéré comme le méridien d'origine international.

c- L'Ellipsoïde

La Terre n'est pas une sphère parfaite : sa forme réelle présente des irrégularités liées notamment à la répartition inégale des masses à l'intérieur et à la surface de la Terre. Pour simplifier sa représentation et faciliter les calculs en géodésie et en cartographie, on utilise une surface mathématique régulière appelée ellipsoïde de référence. Il s'agit d'un ellipsoïde de révolution obtenu par l'aplatissement d'une sphère au niveau des pôles et son allongement au niveau de l'équateur. L'ellipsoïde est défini principalement par deux paramètres : le demi-grand axe (a), correspondant approximativement au rayon équatorial, et le demi-petit axe (b), correspondant au rayon polaire. L'aplatissement ($f = (a-b)/a$) permet de caractériser le degré de déformation de l'ellipsoïde. Différents ellipsoïdes ont été définis pour représenter au mieux la

Terre selon les besoins et les systèmes géodésiques, comme l'ellipsoïde WGS 84, couramment utilisé aujourd'hui par les systèmes GPS et les applications de géolocalisation.

La grande particularité de cet ellipsoïde est qu'il est géo-centré : son centre est confondu avec le centre de masse de la Terre. Ses caractéristiques approximatives sont les suivantes :

- Demi grand axe, ou axe équatorial : $a = 6400\text{km}$
- Aplatissement : $\alpha = 1/300$

L'aplatissement (noté α) se définit par la formule : $\alpha = a - b / a$

où : a = demi-grand axe (équateur) et b = demi-petit axe (pôles).

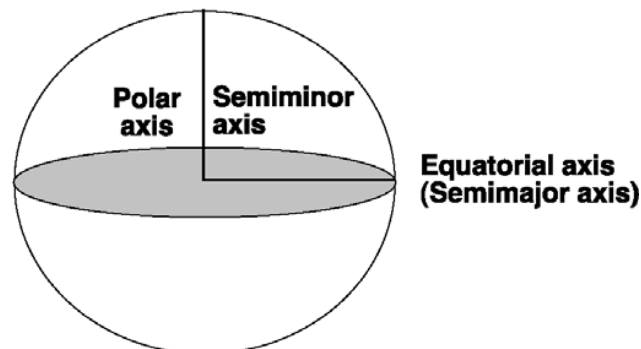
Cela veut dire que la différence entre le rayon équatorial (a) et le rayon polaire (b) est environ $1/300$ du rayon équatorial.

Donc : $a - b = \alpha \times a$,

donc $a - b = a / 300$

Avec $a = 6400\text{ km}$, donc : $a - b \approx \frac{6400}{300} \approx 22\text{ km}$

L'aplatissement donne un écart entre le demi grand axe (ou axe équatorial) et le demi petit axe (ou axe polaire), de 22km environs.



d- Le Géoïde

Le géoïde est une surface qui représente une approximation de la forme physique réelle de la Terre. C'est une surface irrégulière et ondulée, car il est influencé par les variations de la gravité terrestre dues à la répartition inégale des masses à l'intérieur de la Terre. Le géoïde est la véritable forme de la terre. Il peut être défini ponctuellement par la distance qui le sépare d'un ellipsoïde de référence. Cette distance, **symbolisée par N, est appelée ondulation**, séparation, ou hauteur du géoïde.

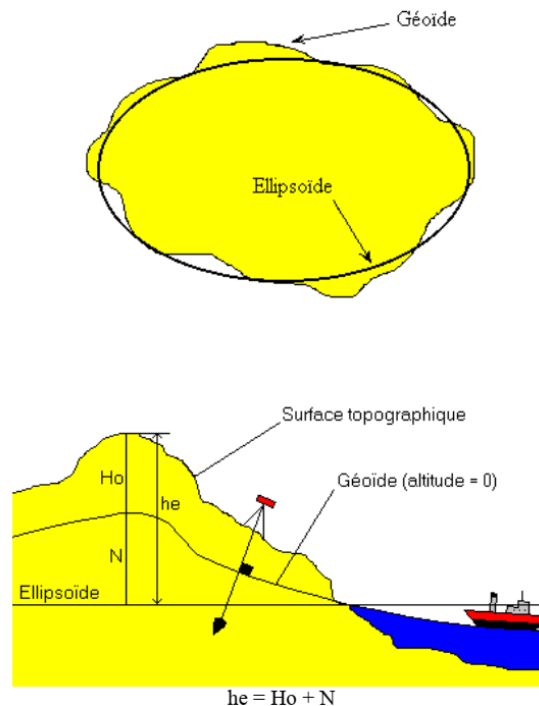


Figure 10: Le Géoïde

Il faut bien avoir à l'esprit que lorsque l'on met en station un appareil topographique avec une bulle ou un fil à plomb, le plan de l'appareil est parallèle au géoïde. Ainsi, toutes les mesures d'altitude faites au théodolite ou au niveau donnent les altitudes au-dessus du géoïde. Il s'agit de l'altitude réelle, celle figurant sur les cartes. Elle est appelée **Altitude Orthométrique**, et se note **Ho**.

En revanche, un GPS détermine sa position à l'aide de mesures satellites et par rapport à un ellipsoïde. L'altitude calculée par le GPS est donc la **Hauteur sur l'ellipsoïde**, notée **he**. Pour déterminer l'altitude Ho, il faut connaître N à l'endroit où s'effectue la mesure. En raison de son caractère chaotique, le géoïde ne peut être utilisé pour les calculs cartographiques. En revanche, on utilise des modèles non mathématiques de géoïde pour les calculs d'altitude. Il s'agit de grilles contenant, tous les x degrés de latitude et de longitude, la valeur correspondante de N.

Application

Un GPS indique une hauteur de 125 m par rapport à l'ellipsoïde. Si l'ondulation du géoïde à cet endroit est de 35 m, quelle est l'altitude réelle du point par rapport au niveau moyen de la mer ?

Conclusion

- la Terre est un Ellipsoïde aplati aux pôles, avec un grand axe et un petit axe.
- la Terre est un Géoïde, (une surface équipotentielle de pesanteur, passant par l'origine du nivellement, c'est à dire ajustée au niveau moyen des mers).
- Le géoïde n'a pas de représentation géométrique simple, à cause de l'irrégularité de répartition des masses constituant la terre.

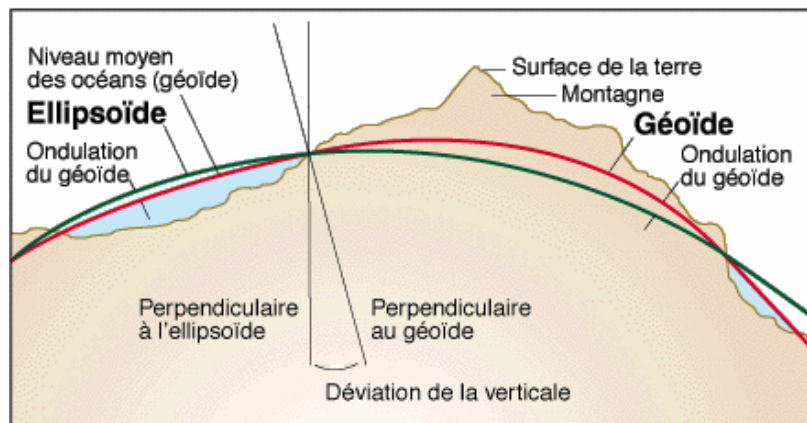


Figure 11: Relation Ellipsoïde – Géoïde

Chapitre 3 : Acquisition des Données Géospatiales

1- Techniques de levé topographique et bathymétrie

A- Les techniques de levée topographique

Introduction

Le levé topographique permet de représenter par un plan l'ensemble des détails naturels et artificiels d'une portion de la terre.

La levée topographique est la partie de la topographie dans laquelle on mesure les coordonnées d'un point pour le maître sur papier.

Le levé, nom donné au document résultant d'un lever, est destiné, éventuellement après traitement numérique, à l'établissement de plans graphiques ou numériques : c'est la phase de report.

a- Classification des levées

Principes de base

Lors d'un lever de détails, le topographe est confronté à trois problèmes principaux :

- Déterminer les détails à lever
- Définir le degré de précision ;
- Type des mesures à effectuer.

La classification

On classe les types de levés à partir de l'échelle et de la précision des plans construits :

- Levés topographiques – cartes topographiques (relief, hydrographie, objets artificiels, éléments planimétriques)
- Levés du cadastre – frontières légales (parcelles), établissements techniques.

Représentation seulement planimétrique

- Levés techniques de grande échelle – levés locaux pour les plans de construction (relief, hydrographie, objets artificiels, éléments planimétriques)

b- Méthode de réalisation des levées

Facteur influent le choix de la méthode et moyen.

Les méthodes de lever et les moyens à mettre en œuvre dépendent de plusieurs facteurs, essentiellement :

- La destination du plan : graphique, numérique...
- L'objet du plan : intérieur, propriété, parcellaire, alignement...
- La précision recherchée : pré-étude grossière, lever expédier, régulier, catégories...
- De la nature du terrain : relief, masques, couvert, étendue, distance des points...
- De la disponibilité du matériel dans l'entreprise ;
- Du cahier des charges, du prix de revient du marché et des délais impartis.

Par la suite, ces méthodes seront classées en deux catégories :

Les méthodes traditionnelles, qui ne font l'objet que d'une description sommaire car, abondamment traitées par ailleurs, elles sont peu à peu abandonnées ; elles utilisent le matériel classique du géomètre topographe : ruban, fil, roue, niveaux, cercles, goniomètres, goniographes, théodolites, tachéomètres opticomécaniques, boussoles, jalons, équerres optiques...

Les méthodes modernes basées sur l'emploi des stations totales et du GPS. Le lever altimétrique sera traité à part.

Levé par abscisses et ordonnées

Chaque point est défini par ses coordonnées rectangulaires à partir d'un système d'axe orthogonal dont celui des abscisses est choisi. Par conséquent l'axe des ordonnées est défini.

L'axe des abscisses est appelé ligne d'opération.

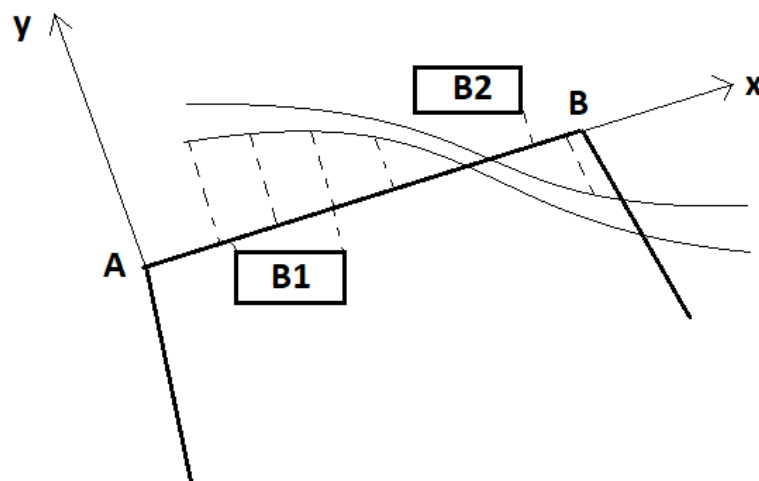


Figure 12: Levé par abscisses et ordonnées

Mode opératoire

- Choisir une ligne d'opération AB (axe des abscisses) la plus proche possible des détails à lever. Cette ligne d'opération peut être, selon les détails, un des côtés de la polygonale ou toute autre ligne déjà connue ou susceptible de l'être.
- Abaisser de chaque point de détail i une perpendiculaire sur la ligne d'opération à l'aide d'une équerre optique. Soit i' le point de la perpendiculaire sur la ligne AB
- Mesurer les abscisses Ai' et les ordonnées $i'i$ des points de détail.

Ces mesures sont complétées par des mesures des certaines dimensions des détails.

Exemple : la longueur L sur les détails B1 et B2 est mesurée pour définir ces détails de façon complète.

Lever par rayonnement

Cette technique s'apparente au lever de détails effectué avec les stations totales : on utilise un théodolite ou un niveau équipé d'un cercle horizontal pour lever la position angulaire de chaque point. La distance horizontale du point de station au point levé est mesurée au ruban, ou, moins précisément, par stadimétrie sur une mire.

Il est également possible d'obtenir l'altitude du point visé par nivellement direct (niveau) ou indirect (théodolite). Chaque point est alors connu :

- En planimétrie par ses coordonnées polaires par rapport au point de station et à la référence angulaire choisie ;
- En altimétrie par rapport à un point de référence connu en altitude.

Le lever s'effectue par rayonnement autour du point de station de l'appareil. L'orientation du zéro du cercle horizontal de l'appareil peut être réalisée de manière approximative, avec une boussole pour se rapprocher du nord magnétique et donc du nord Lambert.

Il est également possible de s'orienter de manière plus précise si l'on dispose de deux points connus en coordonnées générales ou locales.

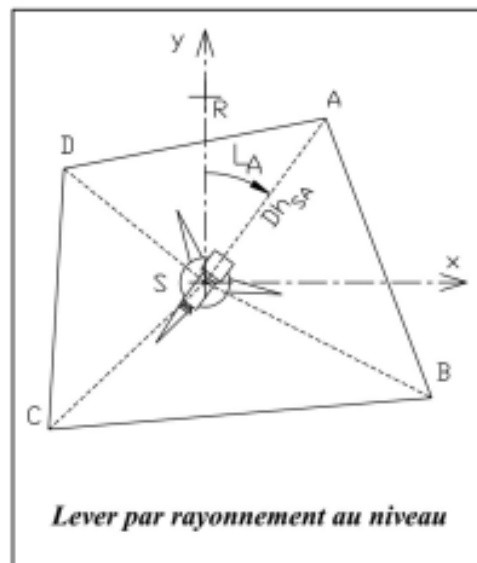


Figure 13: Levée par rayonnement

c- Levers avec station totale

La station totale est l'instrument idéal pour le lever précis d'un grand nombre de points. La station est équipée d'un distancemètre, permet de mesurer et d'enregistrer distances et angles en une seule manipulation (elle peut aussi calculer les coordonnées).

En entrant des codes pour les points de détail levés, certains tracés peuvent être automatisés au moment de la phase d'habillage du levé sur ordinateur. Par exemple, un même code (numéro) sera associé à tous les points levés en crête de talus et un autre code à ceux levés en pied de talus. Le logiciel traitant les données doit être programmé pour reconnaître ces codes et dessiner lui-même les talus. Tous les logiciels de topographie proposent des fonctions d'habillage automatique.

Mise en station d'une station totale (Travail Pratique)

Le Tachéomètre se pose sur un support et doit se caler sur le plan horizontal. Il est souvent placé sur un trépied, et à la verticale exacte d'un point connu en coordonnées, à l'aide d'un plomb « optique » ou d'un plomb « laser », et d'un niveau à bulle sphérique. Sa base doit être parfaitement horizontale. L'ensemble de cette phase d'utilisation se nomme « la mise en station ».

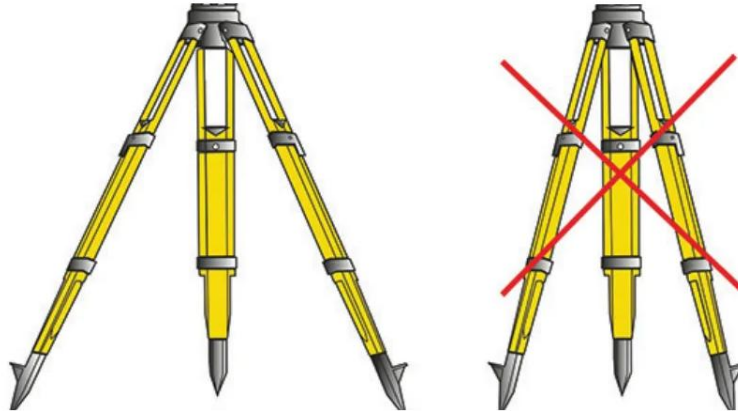


Figure 14: La méthode correcte pour écarter les pieds du trépied.

Les étapes de la mise en station :

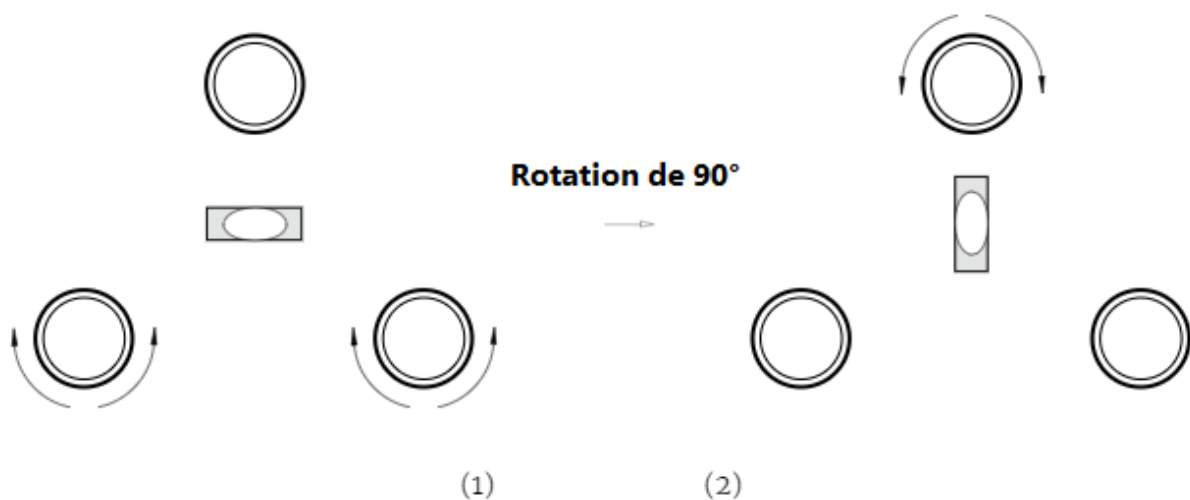
La mise en station consiste à placer l'appareil d'une part à la verticale de la station (point repère) et d'autre part dans un plan horizontal.

- Écartez les pieds du trépied pour augmenter la stabilité de l'installation.
- Serrez toutes les vis du trépied et de l'embase pour éviter le jeu.
- Une fois le trépied en place, venir fixer l'appareil (le tachéomètre) sur le plateau du trépied à l'aide de la vis de serrage trépied/tachéomètre. (La nivelle sphérique permet de se caler grossièrement).
- L'appareil est fixé sur le plateau du trépied. Il faut à présent le centrer à la verticale de la station tout en regardant à travers le plomb optique du tachéomètre. Si l'on contrôle au plomb optique, il est fort probable que l'appareil ne soit pas parfaitement centré sur le point de station. Pour corriger, desserrer la vis de serrage trépied/théodolite faire glisser le tachéomètre sur le plateau du trépied jusqu'à la bonne position : c'est le centrage forcé.
- La nivelle sphérique située sur l'appareil est sûrement déréglée. La caler en faisant coulisser les branches du trépied. Pour cette opération, il est plus aisé de maintenir la branche que l'on coulissera à l'aide du pied.

Le tachéomètre et le trépied sont bien solidaires, les branches du trépied sont stables et bien serrées, l'appareil est parfaitement à la verticale de la station et la nivelle sphérique est réglée. Il s'agit à présent de finir cette mise en station grâce à la nivelle torique.

- Suivant l'axe de rotation horizontal du tachéomètre, placer la nivelle torique parallèle à deux vis calantes. Régler la nivelle en tournant ces deux vis calantes en même temps, de la même quantité et en sens inverse (1).
- Quand, dans cette première position, la nivelle est bien réglée, donner à l'appareil (donc à la nivelle puisque celle-ci est solidaire du tachéomètre) une rotation de 90° et régler à nouveau la nivelle à l'aide de la troisième vis calante (2).
- Quand dans cette seconde position, la nivelle est bien calée, revenir à la première position et régler de nouveau la nivelle. Réitérer cette opération dans les deux positions jusqu'à un résultat parfait de la nivelle torique.

Lorsque l'appareil est parfaitement mis en station, il est formellement interdit de toucher au trépied (même avec les mains) et aux vis calantes.



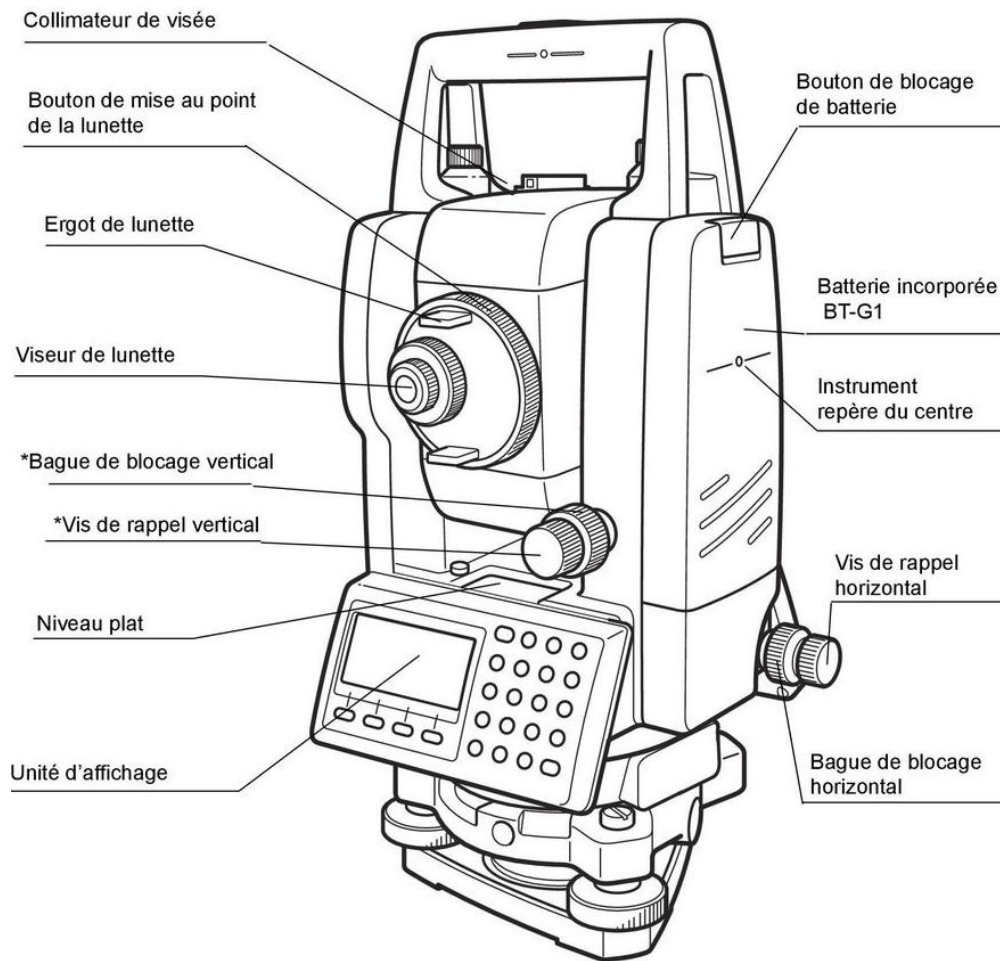


Figure 15: Les composants d'un tachéomètre

B- Les techniques de levée bathymétriques

La bathymétrie est une technique qui permet de mesurer la profondeur et le relief du fond marin ou des plans d'eau, à l'aide de capteurs spécialisés tels que la sonde bathymétrique, le sonar ou encore le laser.

À l'instar des photographies aériennes et des images satellitaires, qui ont transformé notre vision de la surface terrestre, les relevés bathymétriques ont profondément renouvelé notre compréhension des fonds marins et océaniques.

Les méthodes traditionnelles de mesure de la topographie sous-marine, souvent longues, coûteuses et complexes, ont aujourd'hui été largement remplacées par des technologies plus innovantes, notamment grâce à l'émergence de la robotique autonome.

L'utilisation de drones nautiques motorisés et autonomes représente désormais une avancée majeure, offrant de nombreux avantages en matière de précision, de rapidité et de sécurité.

a- Objectifs visés par un levé bathymétrique

- Mieux connaître la topographie du sol sous la surface de l'eau, comme pourrait le faire un géomètre pour le relief terrestre,
- Sécuriser la navigation de surface ou sous-marine,
- Mesurer les stocks sous eau et les niveaux d'envasement des lits de rivière et carrières par exemple,
- Établir des cartes bathymétriques des fonds marins que vous pourrez ensuite superposer avec une topographie terrestre...

b- Fonctionnement d'un sondeur bathymétrique

Le sondeur bathymétrique est un appareil qui mesure la profondeur de l'eau à l'aide d'ondes acoustiques. Il émet un signal sonore vers le fond marin, qui se réfléchit sur le sol et revient vers le capteur. En mesurant le temps que met cet écho à revenir, l'appareil peut calculer avec précision la profondeur.

Ce système fonctionne grâce à un principe simple : plus le fond est profond, plus l'écho mettra de temps à revenir. La profondeur est ainsi déterminée par le délai entre l'émission et la réception du signal.

Le sondeur est généralement relié à un système de géolocalisation (comme un GPS), ce qui permet d'associer chaque mesure de profondeur à une position précise sur le plan d'eau.

La fréquence du signal acoustique joue un rôle important :

- Les fréquences basses pénètrent plus profondément dans l'eau, ce qui les rend idéales pour les grandes profondeurs.
- Les fréquences hautes offrent une meilleure résolution, mais avec une portée plus limitée.

Pour améliorer encore la précision des mesures, on peut utiliser un **célérimètre**, un capteur qui mesure la vitesse du son dans l'eau. Cette vitesse dépend de plusieurs facteurs comme la température, la salinité ou la pression. En connaissant précisément la vitesse du son, le calcul de la profondeur devient plus fiable.

Certains drones de surface sont équipés d'un **treuil automatique** permettant d'immerger la sonde de célérité à différentes profondeurs, même à distance, pour obtenir un profil complet de la célérité dans la colonne d'eau.

Tableau 2: Caractéristiques techniques des sondeurs bathymétriques selon le type de levé

SONDEURS	PLAGE DE PROFONDEURS	FRÉQUENCE	TYPES DE LEVÉS
GRANDS FONDS	100 À 12000M	10-15 KHZ	TALUS, ET PLAINES ABYSSALES
MOYENS FONDS	30 À 3000M	30-50 KHZ	PLATEAU, TALUS
PETITS FONDS	5 À 500M	80-120 KHZ	PLATEAU CONTINENTAL
TRÈS PETITS FONDS	0 À 100M	200-400 KHZ	ZONES LITTORALES

c- Fonctionnement d'un échosondeur

Mono-fréquence

La sonde mono-faisceau mesure la profondeur uniquement à l'aplomb de sa position jusqu'au 1er obstacle (un fond dur, une plante un peu dense, le sommet de la vase...).

Le sondeur mono-faisceau mono fréquence est un moyen efficace et peu onéreux qui permet d'obtenir des données bathymétriques fiables à partir de 30 cm de profondeur.

Ils mesurent la profondeur à la verticale du navire le long de la route suivie, selon un angle de 15° à 30°.

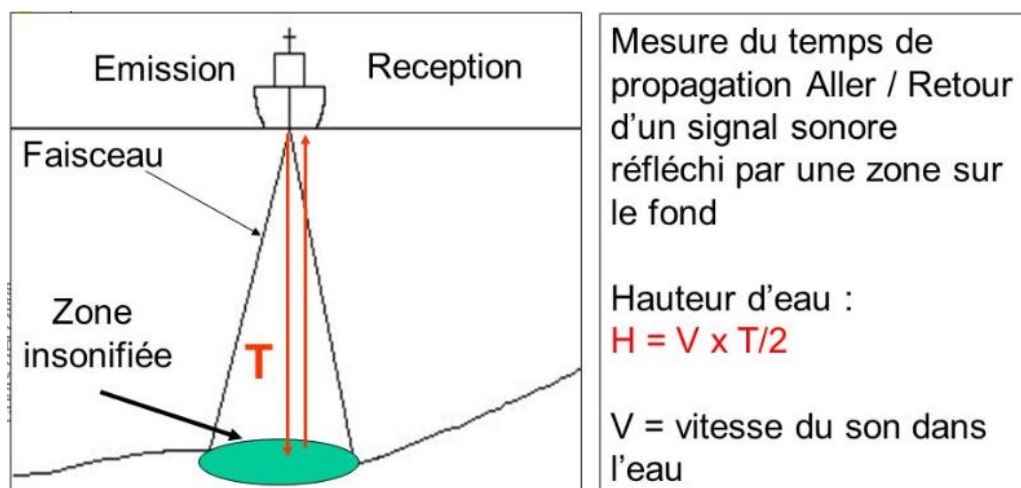


Figure 16: Principe des mesures par les sondeurs mono faisceaux. (IFREMER)

Bi-fréquence

La basse fréquence (généralement 30 kHz) permet d'estimer une épaisseur de sédiments fluide puisque le signal pénètre en partie les sédiments. Le couplage des 2 fréquences permet théoriquement d'estimer l'épaisseur des sédiments mous.

L'échosondeur mono-faisceau bi fréquence a besoin de 3 mètres d'eau minimum pour retourner des résultats fiables.

Multi-faisceaux (fig. 22)

Ils datent des années 1970 et ont beaucoup évolué depuis. Ils permettent la cartographie de larges zones, de l'ordre de 10 000 km² en 24 heures (l'angle couvert par le sondeur peut aller jusqu'à 150°). Ils émettent et reçoivent des faisceaux ultrasonores, suivant une succession d'angles étroits qui permettent de réaliser une cartographie précise au premier passage.

Par exemple le sondeur multifaisceaux de l'Atalante permet de déterminer des profondeurs entre 100 et 10 000 mètres grâce à 151 faisceaux espacés d'un degré. Les cartes peuvent ensuite être élaborées directement à bord, grâce à l'informatique, rendant obsolète le fastidieux travail de tracé d'autrefois. Le sondeur multifaisceaux permet, en plus des relevés topographiques du relief sous-marin, de fournir des images permettant d'identifier la nature du fond.

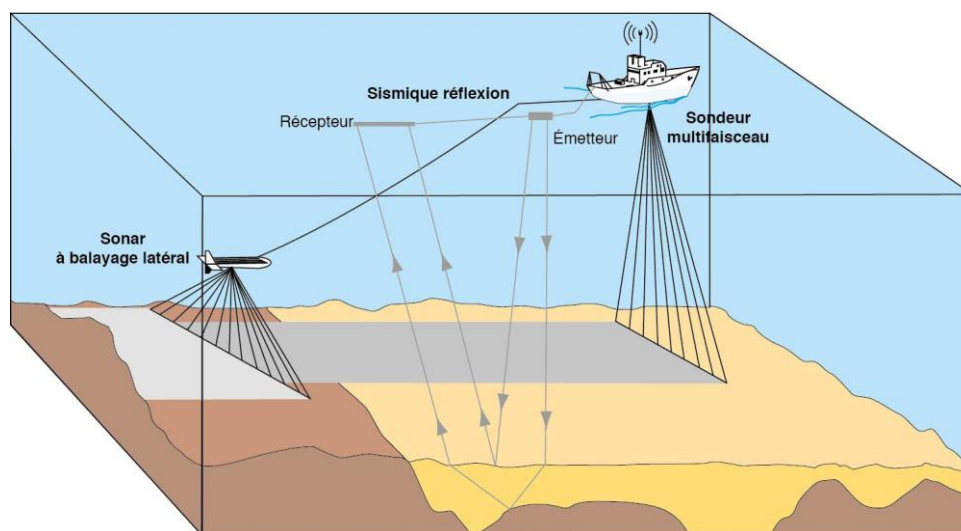


Figure 17: : Principe de fonctionnement du sondeurs multifaisceaux. (IFREMER)

d- Le sonar latéral

SONAR est l'acronyme de **SO**und **N**avigation **A**nd **R**anging (navigation et détection acoustique). Le sonar latéral est un émetteur-récepteur d'ondes acoustiques qui présente l'avantage de visualiser les fonds sur une largeur importante.

Le signal acoustique réfléchi par les fonds marins est restitué à bord du navire sur écran. Sont ainsi obtenues des informations sur la morphologie et la nature texturale du fond. Ce système utilisé par les hydrographes pour rechercher les épaves et obstructions, est un outil très utile pour les applications de sédimentologie car il apporte une vision du fond comparable à de la photographie aérienne du sol.

Le sonar à balayage latéral se compose (fig. 23) :

- D'un poisson cylindrique, en métal profilé, pourvu d'ailerons de stabilisation, d'un lest en zinc dans le nez pour l'équilibre hydrodynamique, de caissons étanches pour les transducteurs et l'électronique, un bras de remorque et une prise étanche câble électroporteur-poisson,
- De câbles avec une double armature en acier tressé, de 5 tonnes de charge de rupture, avec une longe flexible de 5 mètres du côté du poisson, une alimentation électrique,
- D'un dépresseur qui permet d'augmenter la profondeur d'immersion du poisson et ainsi de pouvoir explorer la totalité du plateau continental,
- D'un équipement de visualisation, d'enregistrement et de traitement du signal à bord du navire.

Quand les fonds marins ne sont pas plats, une correction géométrique est nécessaire pour obtenir une image correcte, soit par des hypothèses simples, a priori, sur la topographie ; soit en complétant le relevé sonar par des mesures de bathymétrie.

Les obstacles sur le fond se traduisent par des ombres portées sur le fond, de forme correspondante à l'objet immergé. Ce qui est utile pour la détection des mines et des épaves, mais aussi pour étudier le relief de fond. Le plus souvent, il s'agit de systèmes légers, facilement transportables, destinés à une utilisation sur les petits fonds (portée de quelques centaines de mètres) mais des modèles grands fonds existent aussi.

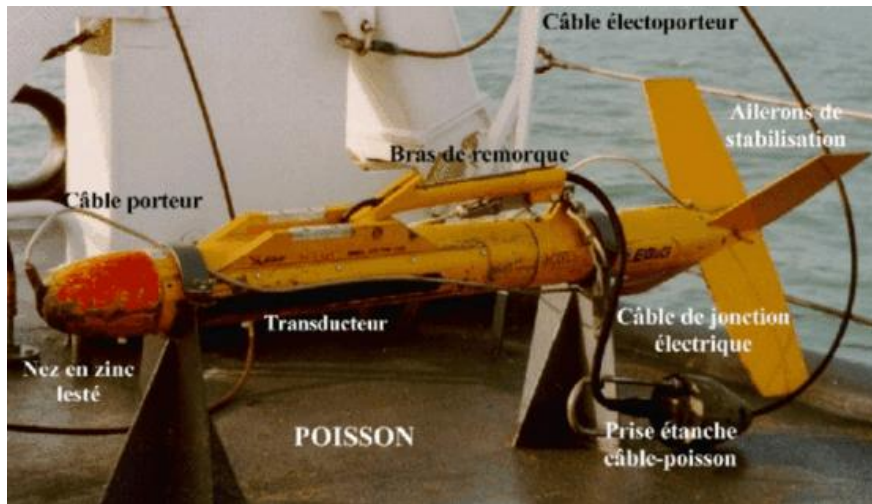


Figure 18: Photographie d'un sonar latéral.

2- Technologie LiDAR

Le LIDAR (**L**ight **D**etection **A**nd **R**anging) est une méthode de télédétection optique active. Des lasers de plus en plus performants ont conduit à la formidable expansion des applications LIDAR dans les domaines géophysiques et industriels. On utilise des lasers impulsionnels pour la mesure de distance (télémétrie) à laquelle s'ajoutent des mesures de composition atmosphérique ou marine, de vitesse et de réflectivité des cibles (terrain, végétation, bâti urbain).

a- Méthodes LIDAR :

Le LIDAR est une méthode d'analyse optique dite active car elle utilise sa propre source d'énergie lumineuse LASER pour éclairer une zone d'atmosphère ou les cibles à étudier. La mesure LIDAR est non intrusive. La méthode LIDAR se distingue des méthodes radiométriques passives qui utilisent la lumière solaire ou le rayonnement thermique infrarouge émis par les objets. L'exemple de la photographie ordinaire avec ou sans flash de lumière illustre cette distinction. La source de lumière additionnelle permet des mesures en l'absence de lumière solaire.

b- Concept LIDAR

Le concept LIDAR associe : (1) un instrument équipé d'un ou plusieurs lasers, (2) des processus d'interaction lumière-matière avec des cibles microscopiques (molécules, particules en suspension dans l'air ou dans l'eau) ou macroscopiques (terrain, végétation, bâtiments, véhicules), (3) une propagation aller-retour du rayonnement laser puis de la lumière diffusée/réfléchi. Pour l'air, l'atténuation est liée à une faible visibilité due à la pollution et aux conditions météorologiques. Pour les milieux aquatiques elle est due à la turbidité. Les

applications reposent sur la télémétrie (mesure de distance) et la restitution des propriétés optiques du milieu et des cibles. Pour l'atmosphère et la bathymétrie ce sont les phénomènes de diffusion et d'extinction qui permettent de restituer les propriétés optiques des particules en suspension dans l'air ou l'eau et les concentrations en composés minoritaires. Comme pour toute méthode optique, les nuages épais de la basse atmosphère gênent voire rendent inopérantes les mesures LIDARs.

Pour les applications topographiques, c'est le nombre de points d'impact au mètre carré qui sert à établir les modèles numériques de terrain (MNT ou DEM pour digital elevation model) ou les modèles numériques d'élévation (MNE) pour la végétation et les bâtiments. Un système de balayage de la ligne de visée permet de décrire une nappe de points. Les LIDARs topographiques permettent « d'effacer » la végétation. Ils ne conservent que les surfaces nues. La technique est utilisée en archéologie pour restituer des vestiges d'occupation de territoire ou pour détecter des failles sismiques ou des impacts de météorites.

Pour dénommer un instrument LIDAR atmosphérique il est d'usage d'associer le processus d'interaction lumière-matière, l'objectif de la mesure et/ou la zone d'altitude et d'y ajouter des informations comme micro-, mini- etc. Pour les LIDARs topographiques ou bathymétriques, c'est plus simple car l'objectif est la mesure précise de distance répétée un grand nombre de fois par seconde.

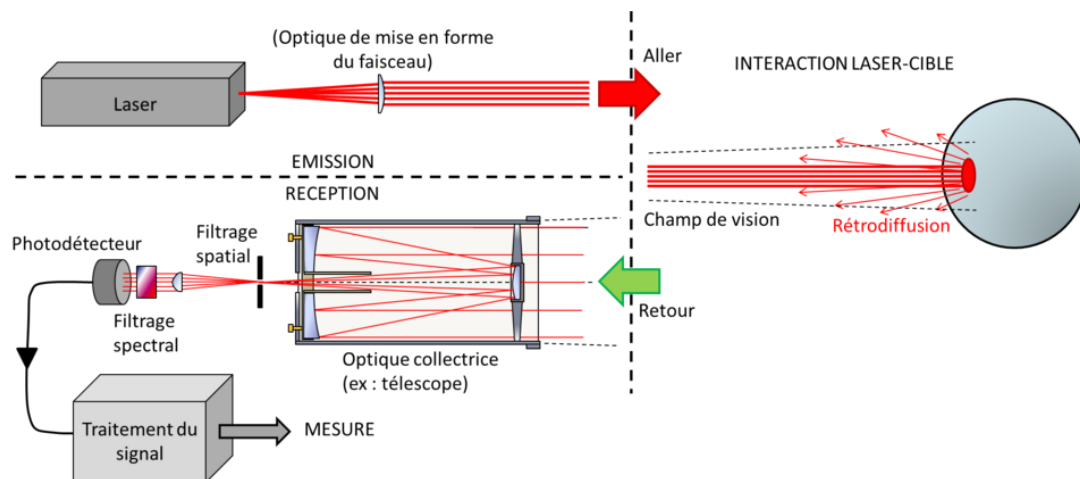


Figure 19: Schéma général d'un système lidar et du principe de la mesure.

c- Instrument LIDAR et mesures

Un instrument LIDAR est composé d'un ou plusieurs lasers émettant des impulsions brèves, d'un télescope, d'un ensemble de détection comprenant des filtres optiques, des polariseurs et des détecteurs rapides, d'un convertisseur analogique-numérique, d'une informatique pour

gérer le fonctionnement de l'instrument et enregistrer les signaux numériques et afficher les mesures en temps réel (figure 24). Toutes les analyses postérieures sont effectuées avec les signaux numériques : soustraction des bruits parasites, méthodes d'inversion pour obtenir les grandeurs recherchées.

Les applications télémétriques utilisent la rétrodiffusion élastique sur des cibles dures. On distingue les LIDARs utilisés à partir du sol (MLS pour mobile LIDAR scanner) ou aéroportés (ALS pour airborne LIDAR scanner) (figure 24). Comme les instruments modernes sont très compacts, on utilise des petits porteurs et des drones. Les applications bathymétriques sont effectuées à partir d'avion ou de bateau.

Pour choisir une méthode LIDAR, on utilise un modèle instrumental de « bout en bout » (end-to-end) comme montré sur la figure 25. La portée LIDAR dépend (1) des constituants du LIDAR (énergie laser, diamètre du télescope, etc.), (2) de l'efficacité du processus de diffusion ou de réflexion des cibles, et (3) de la transmission du milieu (visibilité, turbidité).

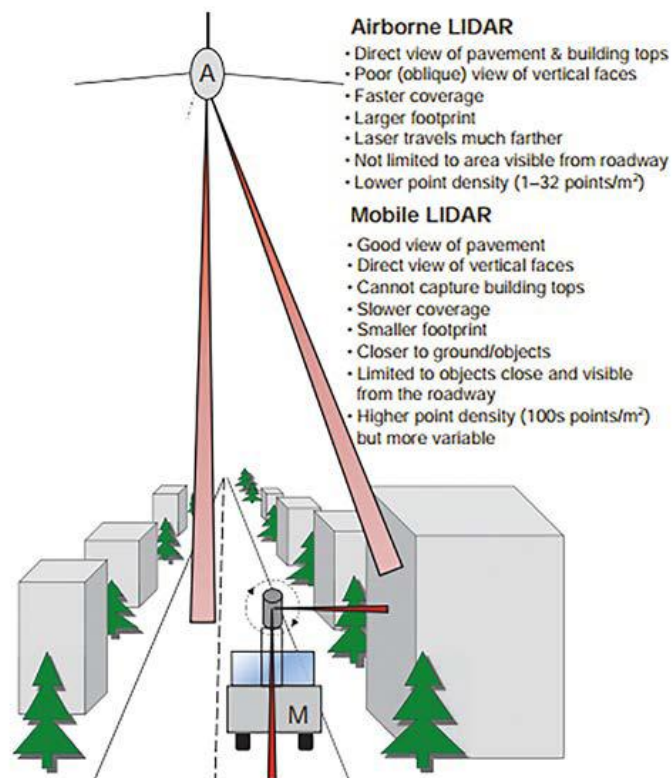


Figure 20: Principe des mesures 3D de la topographie urbaine par LIDAR sur véhicule mobile et LIDAR aéroporté.

3- Photogrammétrie

a- Définition

Qu'elle soit aérienne ou terrestre, la photogrammétrie est une technique qui permet d'effectuer des mesures spatiales à partir de clichés photographiques, en utilisant la parallaxe obtenue entre des images acquises selon des points de vue différents.

Reproduisant la vision stéréoscopique humaine, la photogrammétrie a longtemps exploité celle-ci pour reconstituer le relief de la scène à partir de cette différence de points de vue. Actuellement, elle exploite de plus en plus les calculs de corrélation entre des images désormais numériques.

Cette technique repose entièrement sur une acquisition des images et une modélisation rigoureuse de leur géométrie afin de reconstituer une copie 3D fidèle de la réalité. Le développement des clichés numériques et des moyens de calculs de plus en plus puissants a fortement fait évoluer les applications de photogrammétrie (multiplication des clichés, bruit réduit, prise de vues convergentes, mise en oeuvre facilitée, traitements rapides, exactitude des résultats...).

Ses champs d'application sont vastes : en topographie pour la création de cartes précises, en urbanisme pour le suivi de l'aménagement du territoire, en géosciences pour l'étude des formes du relief, en archéologie pour la reconstitution de sites anciens, en agriculture de précision pour le suivi des cultures, ou encore en surveillance environnementale pour le suivi de l'érosion, des glissements de terrain et de la végétation.

Appliquée aux relevés des réseaux, cette technique peut être mise en oeuvre principalement de deux manières :

Photogrammétrie terrestre

- Acquisition de clichés par des prises de vues terrestres



Photogrammétrie aérienne

- Acquisition de clichés par voies aériennes notamment en utilisant un drone (UAV) et en respectant la législation en vigueur.



b- Principes et méthodes de la photogrammétrie

La photogrammétrie est une méthode qui permet de reconstituer des objets ou des surfaces en trois dimensions à partir d'images prises sous différents angles. Elle repose sur la détection de points communs entre les images, ce qui permet de reconstruire la géométrie de la scène grâce à des techniques de triangulation.

L'acquisition des images est une étape cruciale : il faut respecter un recouvrement suffisant entre les vues (en général 75 % frontal et 60 % latéral) pour assurer la qualité de la reconstruction. Les paramètres de calibration de la caméra (internes comme la focale et externes comme la position GPS) influencent aussi fortement la précision des résultats.

Le traitement photogrammétrique utilise des approches comme la Structure from Motion (SfM) et le Multi-View Stereo (MVS). Ces méthodes permettent d'aligner les images, de générer un nuage de points 3D dense, puis de produire des orthophotos ou des modèles numériques de terrain.

La chaîne de traitement comprend la planification du vol, la prise de vues, le transfert des données dans un logiciel, la correction des images si nécessaire, puis la génération et l'export des produits finaux (orthophotos, MNE, nuages de points). Pour améliorer la précision, des points de contrôle au sol (GCP) peuvent être ajoutés.

Enfin, divers facteurs influencent la qualité des résultats : la stabilité du vol, les conditions d'éclairage, la qualité des capteurs, ou encore la résolution souhaitée. Une planification rigoureuse et une bonne maîtrise des outils permettent d'obtenir des données fiables et adaptées aux besoins géoscientifiques ou environnementaux.



Figure 21: Schéma illustrant la cartographie par drone

c- Présentation du DJI Mavic Mini (Travail Pratique)

Le DJI Mavic Mini est un drone léger (moins de 250 g), compact et facilement transportable, ce qui en fait un excellent outil pour des missions de photogrammétrie à petite échelle. Il est conçu pour être accessible, tout en offrant des fonctionnalités suffisamment avancées pour des applications scientifiques ou pédagogiques.

Sa caméra est équipée d'un capteur de 12 mégapixels avec une optique fixe, montée sur un stabilisateur à 3 axes, permettant de capturer des images nettes, même en mouvement. Il peut enregistrer des vidéos jusqu'en 2.7K et prendre des photos en haute résolution (4000×3000 px). L'ensemble des composants est optimisé pour garantir une bonne stabilité de vol et une qualité d'image suffisante pour la génération de modèles 3D.

Le Mavic Mini est également doté d'un GPS et de capteurs inertiels (IMU), qui assurent une localisation précise lors des prises de vue. Son autonomie de vol atteint environ 30 minutes, ce qui permet de couvrir efficacement de petites surfaces sans recharge.

Bien qu'il n'intègre pas certains capteurs professionnels (comme le multispectral ou le lidar), ce drone reste très performant pour des relevés topographiques, des modélisations de terrain ou des suivis environnementaux à faible coût.

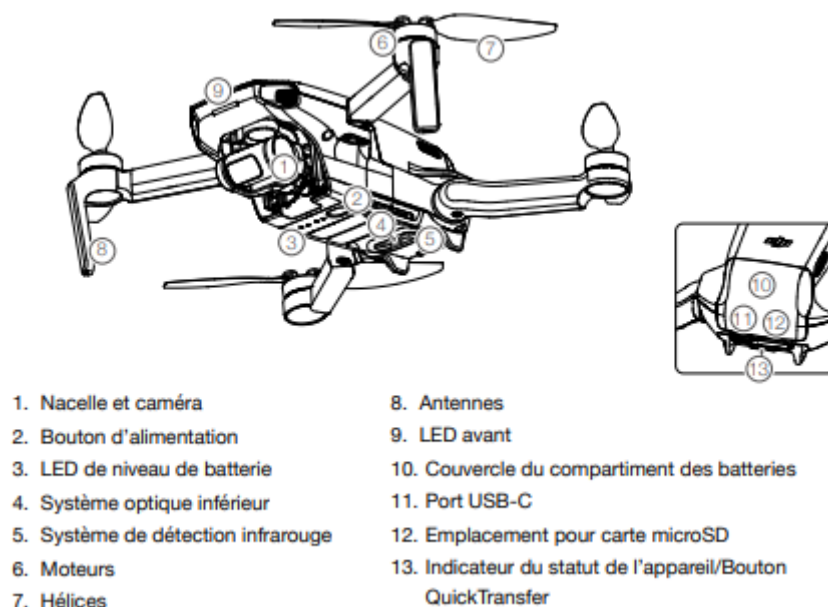


Figure 22: Schéma de l'appareil

d- Application : Modélisation et cartographie terrestre

Sur le terrain, le drone est calibré pour assurer la précision de ses capteurs, notamment l'IMU et le compas. La couverture GPS est vérifiée pour garantir un bon géoréférencement des images.

Le vol peut être entièrement automatisé pour couvrir la zone selon le plan défini, ou la prise de vue peut être manuelle si des ajustements sont nécessaires.

Après la mission, les images collectées sont transférées vers un logiciel de traitement photogrammétrique. Parmi les plus courants figurent Metashape, Pix4D, ContextCapture ou OpenDroneMap. Ces logiciels permettent de générer plusieurs types de livrables : orthophotoplans géoréférencés, modèles numériques de terrain (MNT) et nuages de points denses colorés.

Par exemple, sur un chantier de terrassement d'environ un hectare, la photogrammétrie par drone permet de produire rapidement une carte d'altitude précise, des coupes topographiques et un plan de masse. Ces documents sont essentiels pour le suivi des travaux, l'évaluation des volumes déplacés et la gestion du site.

Applications en géosciences et environnement

La photogrammétrie par drone, s'impose comme un outil polyvalent pour l'étude et la surveillance des milieux naturels. En géosciences, elle permet d'analyser précisément la morphologie du terrain et de suivre les phénomènes dynamiques affectant la surface terrestre. Par exemple, la surveillance des glissements de terrain est facilitée par la production régulière d'orthophotos qui révèlent les déformations du sol et permettent de quantifier les volumes déplacés. Ce suivi temporel est essentiel pour prévenir les risques et mieux comprendre les mécanismes à l'œuvre.

Au-delà de la cartographie géomorphologique, la photogrammétrie offre la possibilité de détecter et mesurer les formes du relief comme les vallées, crêtes ou ravines, avec une résolution adaptée aux besoins de chaque étude. En géologie structurale, elle aide à analyser l'orientation des fractures et à visualiser en trois dimensions des sites d'intérêt, comme des zones de fouilles.

Dans le domaine environnemental, ces techniques sont utilisées pour surveiller la végétation, grâce à l'analyse d'indices de végétation calculés à partir d'images RGB. Cela permet de cartographier la biomasse, d'évaluer la santé forestière et de repérer les zones affectées par des stress biotiques ou abiotiques. La photogrammétrie aide aussi à étudier les milieux humides et les zones inondables, en cartographiant précisément les surfaces sensibles et en évaluant l'impact des inondations.

Enfin, le suivi côtier constitue une autre application importante, où la photogrammétrie permet de mesurer le recul des berges et de quantifier l'érosion côtière. Elle contribue ainsi à mieux comprendre la dynamique sédimentaire et à planifier des mesures de protection adaptées.

Ainsi, en combinant données géométriques précises et analyses spatiales, la photogrammétrie par drone constitue un outil clé pour la recherche et la gestion durable des ressources naturelles et des territoires.

e- Avantages – inconvénients

Avantages :

La mise en oeuvre de la photogrammétrie permet une réduction importante du temps d'acquisition. Un bloc image pourra être réalisé rapidement sur le terrain, sans retarder outre mesure les opérations de remblaiement.

Le modèle 3D corrélé obtenu présentera une grande exhaustivité dans la description des surfaces modélisées. Il est à noter que les contrastes obtenus sur des tranchées de génie civil sont en général très favorables à une corrélation de qualité.

Inconvénients :

La durée du post-traitement varie en fonction des solutions logicielles utilisées et de la qualité des images en entrée. Des difficultés de corrélation peuvent être rencontrées si les images ne sont pas prises en nombre suffisant et selon une disposition adéquate.

4- Systèmes de positionnement global (GPS, GNSS)

a- Définition

On appelle GNSS (Global Navigation Satellite System, pour système global de positionnement par satellite) les systèmes de positionnement basé sur des signaux émis de satellites en orbite autour de la Terre et fournissant une ouverture mondiale.

Jusqu'en 2011, le GPS – conçu, développé et entretenu par le Département de la Défense des États-Unis – était le seul système GNSS opérationnel. À partir de cette date, le système Glonass (initialement développé par l'URSS puis repris par la Russie) est également devenu opérationnel. Deux autres systèmes étaient alors en cours de développement : Galileo, développé par l'Union européenne, qui est devenu pleinement opérationnel en 2019 (après une première phase d'opérationnalité vers 2014-2015), et le système chinois Compass/Beidou, dont la mise en service complète a été prévue pour 2020 (fig. 29).

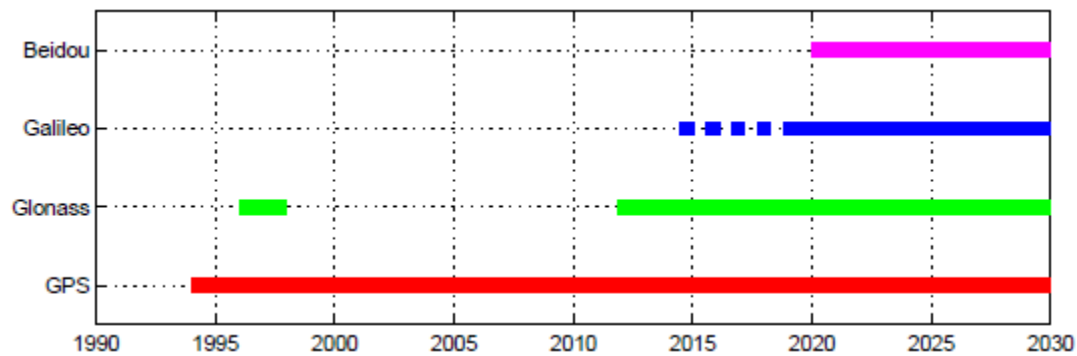


Figure 23: Phase d'opérationnalité des différents GNSS existants

L'objectif d'un système global de positionnement par satellite est de fournir à un récepteur sa position, sa vitesse de déplacement et l'heure. Ce positionnement est réalisé de manière rapide, avec une précision d'une dizaine de mètres, n'importe quand, n'importe où sur la Terre, quelle que soit la météo et à un faible coût.

Les utilisations de ces systèmes sont principalement la navigation (piétonne, maritime, aérienne, et routière), la topométrie et la géodésie, la synchronisation du temps, la géophysique.

b- Principe du positionnement

Deux événements importants ont conditionné l'apparition des systèmes de positionnement global par satellite :

- D'abord en 1948, la mise au point par le Dr. Harold Lyons de la première horloge atomique (à ammoniac), qui permet une mesure stable et fiable du temps.
- Puis en 1957 le lancement du premier satellite artificiel Spoutnik par l'URSS, signant ainsi le début de l'ère spatiale.

Le fonctionnement des GNSS repose sur la mesure du temps de propagation du signal émis par un satellite jusqu'à sa mesure par un récepteur. La mesure du temps de propagation du signal en provenance de plusieurs satellites permet par intersection de déterminer la position du récepteur (fig. 30).

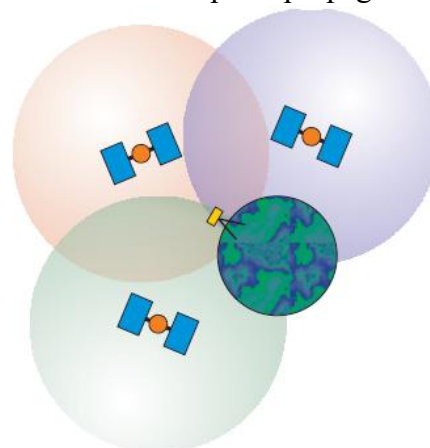


Figure 24: Trilatération

Les satellites émettent donc en direction de la Terre des ondes électromagnétiques (micro-ondes) qui se propagent à la vitesse de la lumière $c = 3 \cdot 10^8 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$. Le récepteur sur Terre mesure le temps mis par l'onde pour arriver jusqu'à lui. Connaissant c , le récepteur peut alors estimer la distance r le séparant du satellite à partir de la durée de propagation de l'onde Δt (environ 70 ms). La mesure précise de ce temps de propagation est primordiale puisqu'une erreur de 10^{-6} μs engendre une erreur de 300 m sur r (il faut donc une précision de 1 ns pour atteindre une résolution de l'ordre du mètre !).

Positionnement GNSS avec des horloges parfaitement synchronisées. En pratique un quatrième satellite est nécessaire pour palier le problème de synchronisation des horloges satellite et récepteur.

La mesure précise de ce temps de propagation nécessite une synchronisation parfaite des satellites entre eux et avec le récepteur.

Au final, pour un positionnement absolu par GNSS, 4 inconnues doivent donc être déterminées :

- Trois inconnues de position, (X, Y, Z) dans un repère géocentrique, lié à un système de référence propre au GNSS.
- Une inconnue de temps, liée à la désynchronisation du récepteur avec le temps GNSS.

Pour estimer ces 4 paramètres inconnus, au moins 4 observations sont donc nécessaires, soit des mesures effectuées en direction de 4 satellites.

Un GNSS est opérationnel dès que l'observation de 4 satellites en simultanée en (quasiment) tout point de la Terre est possible permettant alors le positionnement d'un récepteur quelconque.

c- Système de positionnement global « GPS »

Système de Positionnement Global « GPS » : est un système de radionavigation spatial qui permet aux utilisateurs équipés de récepteurs convenables de déterminer sur terre, sur mer ou dans les airs, leur position, leur vitesse et l'heure à n'importe quel moment du jour ou de la nuit et ce, quelles que soient les conditions météorologiques.

Degré de précision du GPS :

Le GPS offre deux niveaux de service : un service de positionnement standard (SPS), accessible à tout utilisateur, et un service de positionnement précis (PPS) dont l'accès est réservé

principalement aux militaires américains. Le SPS offre une précision de l'ordre de 20 mètres dans le plan horizontal.

Erreurs issues du satellite

La mesure de distance d'un satellite repose sur l'hypothèse fondamentale que la vitesse d'émission du signal du satellite est constante. Ce fait n'est vrai que dans l'espace libre car cette vitesse change avec le déplacement du signal à travers des particules électriquement chargées de l'ionosphère terrestre, et ensuite à travers la vapeur d'eau de la troposphère. Ce changement peut entraîner des erreurs dans la distance mesurée par rapport au satellite de l'ordre de 10 à 12 mètres.

Limites d'un GPS

Le GPS ne fonctionne qu'en des lieux découverts. Endroits à éviter :

- l'intérieur de bâtiments ;
- forêts avec feuillage dense

Le GPS ne fonctionne pas toujours : il arrive parfois que les signaux soient trop perturbés lors de la traversée de l'atmosphère.

Éléments constitutifs d'un GPS :

Le système de positionnement global comporte trois éléments : le segment spatial, le segment contrôle et le segment utilisateur (fig. 31).

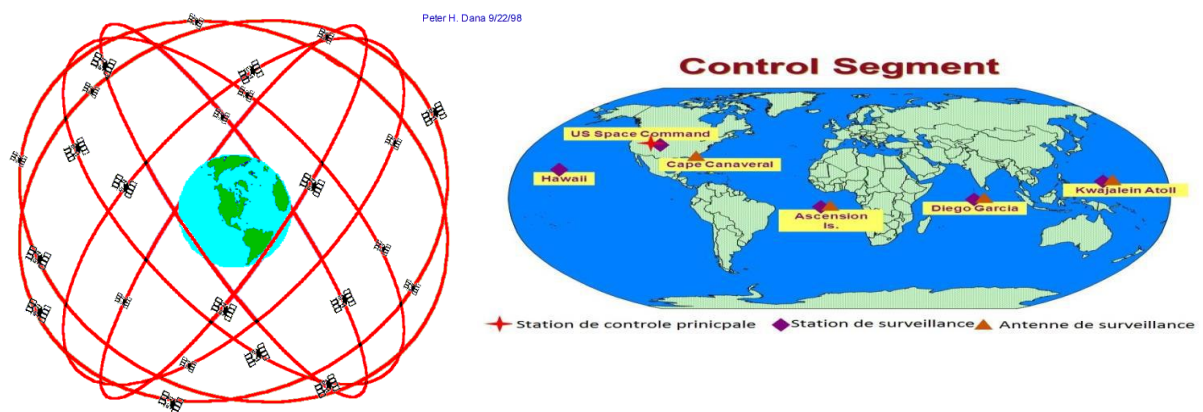


Figure 25: Segment spatial et segment de contrôle

Fonctionnement d'un GPS

Le récepteur GPS doit localiser deux paramètres :

- La position des satellites : déterminée à l'aide des données d'almanach (Almanac data).
- La distance entre le récepteur et les satellites : calculée grâce à la formule :

$$\text{Distance} = \text{Vitesse} \times \text{Temps}$$

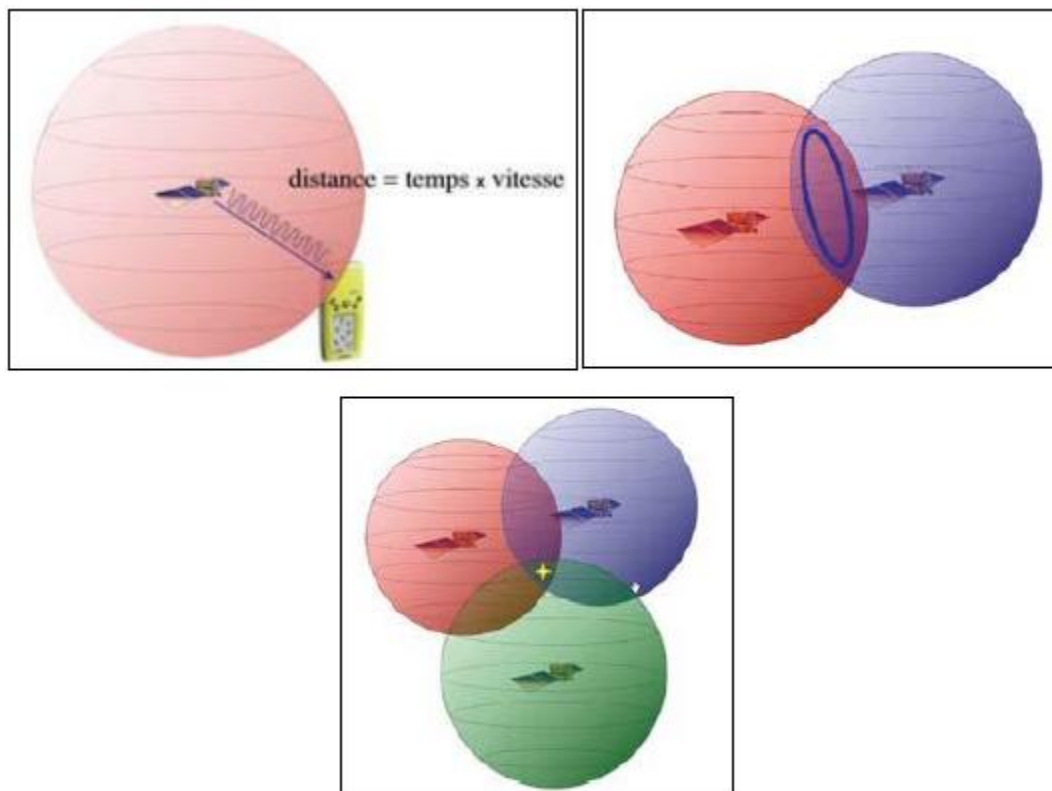
À noter :

- Les satellites GPS évoluent à une altitude très élevée, d'environ 20 200 km.
- Pour certaines applications civiles, une précision centimétrique est atteignable.

Fonctionnement d'un GPS

- le satellite émet une onde électromagnétique de vitesse connue ;
- le récepteur calcule le temps mis par cette onde pour l'atteindre ;
- le récepteur sait alors qu'il se trouve sur une sphère centrée sur le satellite.

Dans la pratique, le détecteur utilise entre 4 et 12 satellites pour calculer sa position. Plus il y en a, mieux sa position est précise.



d- GLONASS

GLONASS « système global de navigation satellitaire » est un système de positionnement par satellites d'origine soviétique et géré par les forces spatiales de la Fédération de Russie. Le

segment spatial utilise vingt-quatre satellites circulant sur une orbite moyenne (fig. 32). Le système devient opérationnel en 1996 mais la crise financière et économique qui frappe la Russie à la fin des années 1990 ne lui permet plus de maintenir un nombre de satellites suffisant. Le service complet n'est restauré qu'au cours des années 2010.



Figure 26: 24 satellites assurent la surveillance

e- Galilée :

Galileo est un système de positionnement développé par l'Union européenne et incluant un segment spatial, ce segment de Galileo est constitué à terme de 30 satellites dont 6 de rechange. Chaque satellite, d'une masse d'environ 700 kg. Les satellites sont constitués par deux stations chargées également de surveiller l'orbite et l'état des satellites.

Chapitre 4 : Système d'information géographique (SIG)

Dans ce chapitre, il nous a semblé pertinent de présenter certaines notions fondamentales relatives aux systèmes d'information géographique (SIG), afin de mieux comprendre leur rôle et leur utilité. Le concept de SIG a émergé entre les années 1960 et 1970, période marquée par les premières tentatives d'informatisation de la cartographie et de l'analyse spatiale.

Depuis lors, de nombreuses définitions ont été proposées, partageant des caractéristiques similaires mais variant selon les contextes d'utilisation, les disciplines et les objectifs visés. Il convient de noter qu'à ce jour, aucune définition unique et universellement acceptée ne fait consensus au sein de la communauté scientifique. La plupart des définitions sont générales, couvrant un vaste éventail d'applications allant de la gestion des ressources naturelles à la planification urbaine, en passant par l'analyse environnementale ou encore la gestion des risques.

1- Définition

Un système d'information géographique (SIG) est un ensemble intégré de moyens informatiques (incluant matériels, logiciels, données et méthodologies) conçu pour collecter, organiser, stocker, analyser, gérer et représenter des données géoréférencées (fig. 33). Il permet d'extraire, de croiser et de visualiser des informations spatiales issues de sources diverses, dans le but de mieux comprendre, modéliser et gérer l'espace. Le SIG joue ainsi un rôle central dans la prise de décision, la planification territoriale, la gestion des ressources et la simulation de phénomènes naturels ou anthropiques.

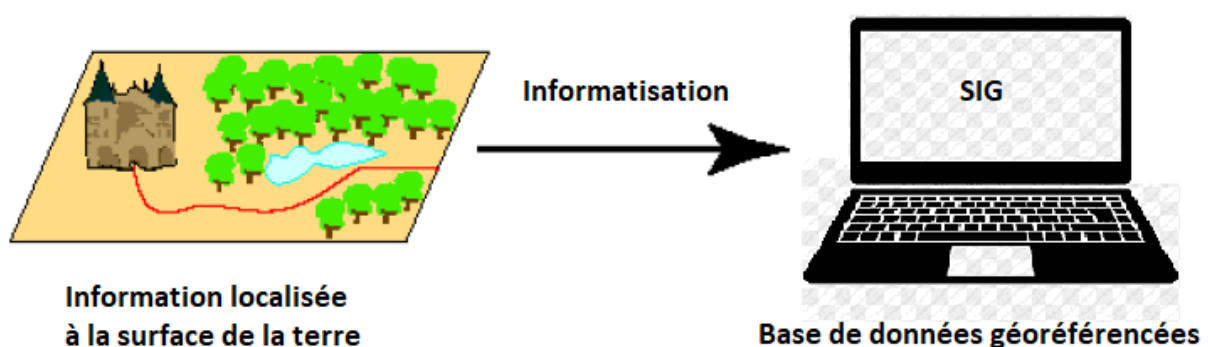


Figure 27: Informatisation des données géoréférencées à l'aide du SIG

Un SIG répond à 5 fonctionnalités (les 5 A) :

- Abstraction : modélisation de l'information,
- Acquisition : récupérer l'information existante, alimenter le système en données,

- Archivage : stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement,
- Analyse : réponses aux requêtes, cœur même du SIG,
- Affichage : restitution graphique.

En d'autres termes, un SIG est un environnement informatisé d'analyse d'une information spatiale numérisée.

Les SIG se situent à l'intersection de quatre disciplines, dont ils intègrent une partie de l'histoire, des principes et des technologies (voir Figure 34). Leur maîtrise nécessite la compréhension de plusieurs concepts fondamentaux, tels que les systèmes de référence et de projection, l'analyse des données, les processus de modélisation, ainsi que les traitements statistiques et graphiques.

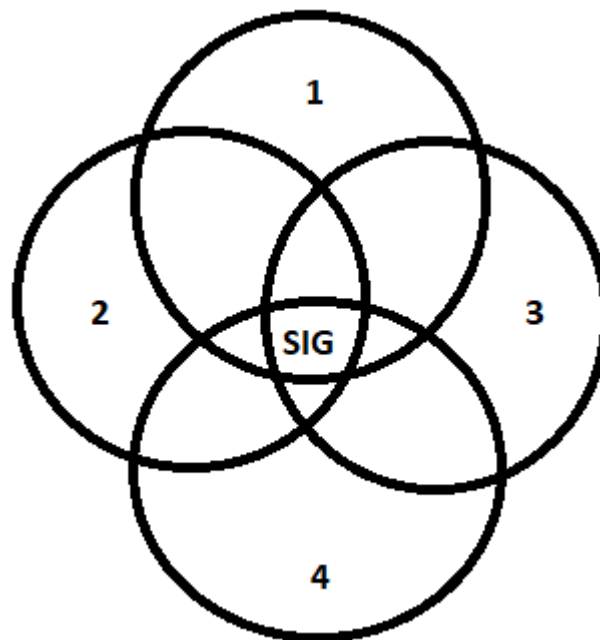


Figure 28: Les disciplines contribuant au SIG : 1 - Cartographie, 2 - Télédétection, 3- Gestion des bases de données, 4- Conception APO

2- La structure de SIG et de l'IG

Les IG se présentent généralement sous forme de couches d'information provenant de cartes thématiques (figure 35). Ces couches peuvent représenter divers éléments tels que la topographie, les ressources en eau, la nature des sols, le couvert végétal, le climat, la géologie, la répartition de la population, la propriété foncière, les limites administratives ou encore les infrastructures telles que les routes principales, les voies ferrées et les réseaux électriques.

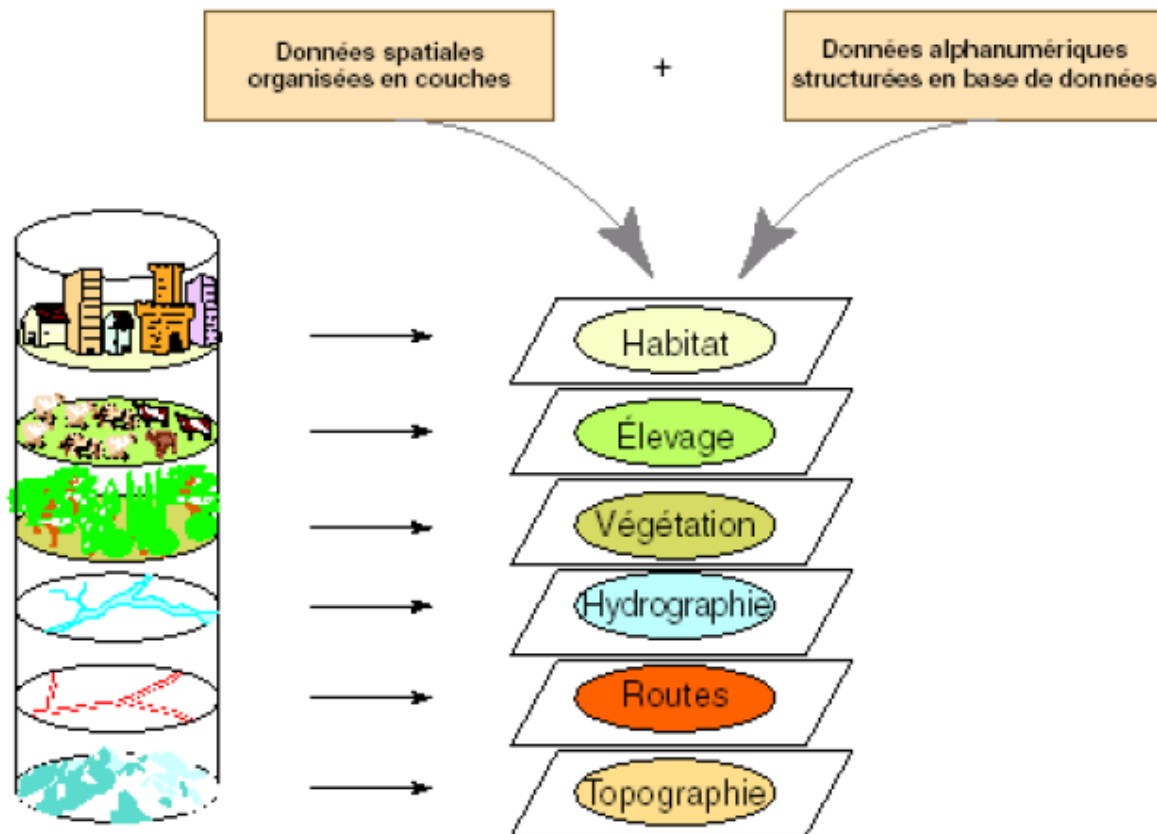


Figure 29: La structure de l'IG dans un SIG

La figure 36 met en évidence quatre groupes de fonctionnalités au-dessous d'une couche d'applications : l'acquisition des données géographiques d'origines diverses, la gestion pour le stockage et la recherche des données, l'analyse spatiale pour le traitement et l'exploitation et enfin la présentation des résultats sous forme cartographique.

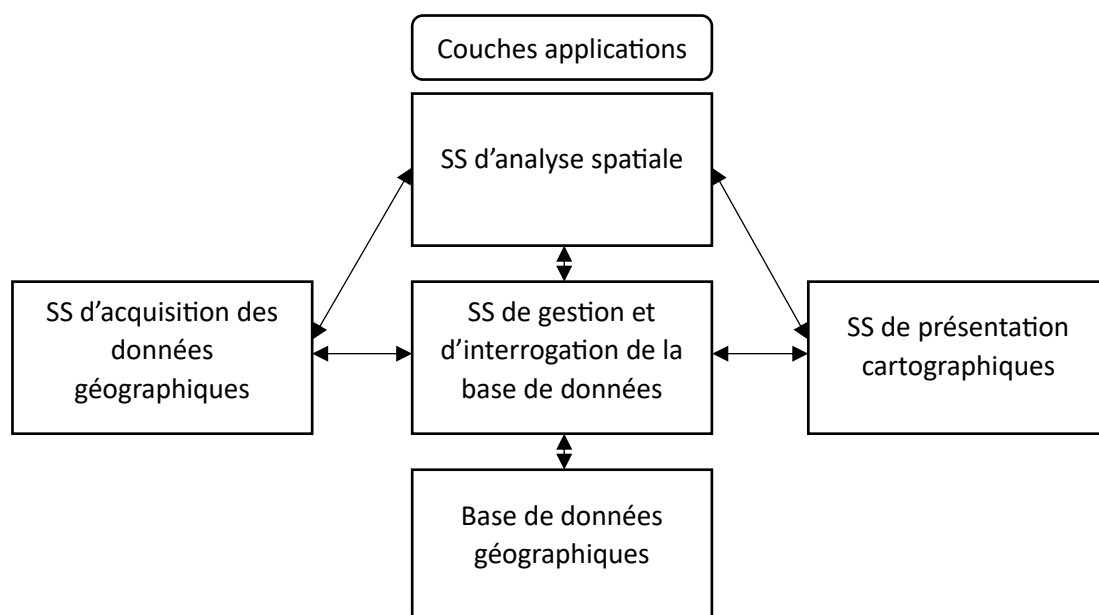


Figure 30: Structure d'un SIG (Abdelbaki C. 2012)

3- Composants des SIG

Les composants nécessaires à une utilisation efficace des Systèmes d'Information Géographique (SIG) se répartissent en quatre grands ensembles (fig. 37) :

- Le matériel, comprenant les ordinateurs, les GPS, les scanners, les serveurs, etc.
- Les logiciels, qui permettent le traitement, l'analyse et la visualisation des données spatiales.
- Les données, à la fois spatiales et attributaires, qui constituent le cœur de tout système SIG (cartes, images satellites, bases de données, etc.).
- Les ressources humaines (les utilisateurs), incluant les utilisateurs formés, les analystes et les experts en géomatique, en cartographie et en analyse spatiale.



Figure 31: Les principaux composants d'un SIG

a- Les logiciels

Les logiciels de SIG proposent un large éventail d'outils et de fonctionnalités permettant l'acquisition, le stockage, l'analyse et la visualisation de données géographiques. Parmi les plus utilisés aujourd'hui figurent ArcGIS pro, QGIS, MapInfo, ArcMap bien que de nouvelles solutions SIG continuent d'émerger régulièrement.

Pour qu'un programme soit considéré comme un véritable SIG, il doit intégrer un ensemble de systèmes informatiques essentiels, notamment :

- Un système de numérisation des cartes, indispensable pour intégrer des données géoréférencées. Celles-ci peuvent être des données spatiales localisées à l'aide de coordonnées (x, y, z), ou encore des données descriptives, sous forme textuelle (noms de régions, types de sols, affleurements, etc.) ou numériques (débit des cours d'eau, précipitations, etc.).
- Un système de gestion de bases de données, permettant d'organiser l'information sous forme de tableaux. Chaque tableau contient des champs (ou colonnes) dans lesquels sont stockées les données descriptives associées aux éléments des différentes couches cartographiques. Le SIG rend possible l'analyse de ces données et permet de répondre aux requêtes formulées par l'utilisateur.
- Un système d'analyse spatiale, reposant sur des outils statistiques et cartographiques. Il permet d'examiner les interrelations entre les différents facteurs géographiques à travers des croisements successifs de couches thématiques, afin de mieux comprendre la complexité des phénomènes observés.
- Un système d'aide à la décision, qui fournit aux décideurs les moyens d'élaborer des scénarios prospectifs, d'évaluer l'impact potentiel des interventions sur l'environnement et de concevoir des stratégies de développement durable.
- Un système de cartographie, riche en outils de conception graphique, qui permet de présenter les informations géographiques de façon claire, synthétique et accessible.

b- Les données

Les données constituent sans doute l'un des éléments les plus essentiels d'un Système d'Information Géographique (SIG). Elles se distinguent selon leur nature : elles peuvent être numériques, textuelles, graphiques (sous forme d'images ou de schémas), ou descriptives. Ces données géographiques peuvent être collectées directement sur le terrain ou obtenues auprès de sources spécialisées, telles que des producteurs de données ou des institutions officielles (Voir la figure 38).



Figure 32: Les différentes données d'un SIG

c- Les utilisateurs

Le composant humain joue un rôle central dans le fonctionnement d'un Système d'Information Géographique (SIG). Bien qu'il s'agisse avant tout d'un outil technologique, son efficacité dépend entièrement des personnes qui l'utilisent, le maintiennent et le gèrent. Ce sont ces utilisateurs qui donnent au SIG toute sa valeur opérationnelle.

Pour exploiter pleinement le potentiel d'un SIG, les utilisateurs doivent posséder un ensemble de compétences variées, notamment :

- une bonne maîtrise des outils informatiques, incluant le traitement de texte, la gestion de bases de données et la conception assistée par ordinateur (CAO),
- une connaissance approfondie de la sémiologie cartographique, afin de représenter l'information spatiale de manière claire et pertinente.

La réussite d'un projet SIG repose également sur une collaboration étroite entre spécialistes de disciplines diverses. La coordination entre informaticiens, géomaticiens, experts en base de données et spécialistes du domaine d'application est essentielle. L'expertise thématique apportée par ces derniers doit être mobilisée tout au long du développement, afin de construire un modèle de données cohérent et adapté aux besoins spécifiques du projet.



4- Fonctionnalités d'un SIG

Un Système d'Information Géographique (SIG) complet ne se limite pas au simple dessin ou au tracé automatique de plans. Il offre une large gamme de fonctionnalités avancées, parmi lesquelles :

- La géoréférenciation des objets dans un système de coordonnées, avec la possibilité de convertir ces objets d'un système de projection à un autre.
- La mise en correspondance et superposition de cartes issues de sources différentes, facilitant leur comparaison, comme illustré dans la figure 40.
- La correction des contours sur les cartes moins fiables, en s'appuyant sur les coordonnées issues de sources jugées plus précises.
- L'extraction d'objets géographiques situés dans une zone définie, par exemple à une certaine distance d'un carrefour, d'une route ou du rivage d'un lac.
- La sélection d'éléments situés à l'intérieur d'un périmètre spécifique, comme présenté dans la figure 39.
- La fusion d'entités géographiques partageant une caractéristique commune, par exemple la réunion de parcelles contiguës ayant une même densité de surface bâtie.
- Le calcul d'itinéraires optimaux sur un réseau, afin de déterminer le chemin le plus court entre deux points.

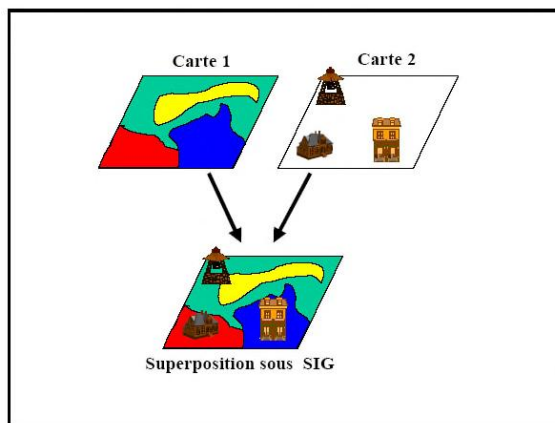


Figure 34: Superposition sous un SIG

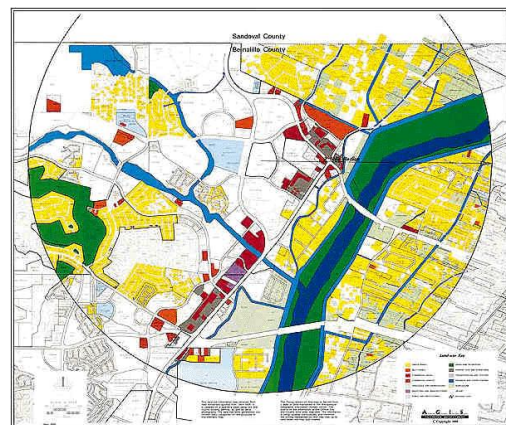


Figure 33: Exemple de sélection

5- Fonctionnement du SIG

Lorsqu'il est question d'un logiciel de cartographie numérique ou d'un système d'information géographique (SIG), la première idée qui vient à l'esprit est la gestion et la manipulation des données spatiales. Cela soulève naturellement plusieurs interrogations : comment l'information présente sur une carte peut-elle être numérisée et stockée dans un ordinateur ? Quels types de données sont traités par un SIG ? Cette section répond à ces questions en présentant les principes de fonctionnement du SIG, en particulier les modes d'acquisition, de structuration et de traitement des données géographiques.

6- Modes d'acquisition de données

En pratique, les données géographiques proviennent d'une grande variété de sources et sont obtenues par des méthodes d'acquisition diverses, sur des supports multiples : on parle alors de **données multisources**. Certaines sont relevées directement sur le terrain, comme les levés topographiques, tandis que d'autres sont obtenues à distance, par exemple grâce au système de positionnement global (GPS), à la photographie aérienne ou aux images satellitaires. D'autres encore sont saisies à partir de cartes ou de plans existants, ou bien fournies par des organismes spécialisés dans la production de données géographiques.

L'enjeu consiste alors à intégrer ces données hétérogènes, qui diffèrent par leur qualité, leur fiabilité, leur précision et leur étendue spatiale. Les principales méthodes d'acquisition de ces données sont présentées dans la section suivante.

- **Digitalisation**

La numérisation (digitalisation ou vectorisation) permet de récupérer la géométrie des objets disposés sur un plan ou une carte préexistante.

- **Scannérisation**

La scannérisation consiste à convertir un document papier (carte, plan, photo, etc.) en format numérique à l'aide d'un scanner. Cette opération produit une image numérique (souvent au format JPEG, TIFF, ou PDF), qui pourra ensuite être utilisée dans un logiciel SIG, notamment pour géoréférencer ou vectoriser l'information contenue dans la carte.

- **La photogrammétrie**

La photogrammétrie aérienne est couramment utilisée pour la réalisation de cartes à moyenne échelle. Elle constitue également une solution privilégiée dans les pays où la couverture

cartographique et géodésique est insuffisante. Grâce à son efficacité et à son coût potentiellement avantageux, cette technique est aussi employée pour produire des plans à grande échelle.

- **Télédétection**

La télédétection constitue un moyen pratique et efficace pour générer des données destinées à être intégrées dans un SIG. Elle repose sur l'exploitation, dans des conditions précises et contrôlées, soit de photographies aériennes, soit d'images captées et transmises par satellite, permettant ainsi une observation à distance du territoire.

- **Import de fichiers**

Cette méthode permet de réduire les coûts de saisie en récupérant des données existantes, puis en les convertissant au format, au système d'unités et de projection requis (figure 41). Pour cela, on utilise des interfaces adaptées qui permettent soit une conversion directe vers le format interne du SIG, à l'aide de bibliothèques spécifiques, soit un import via un format d'échange standard reconnu par le logiciel récepteur.

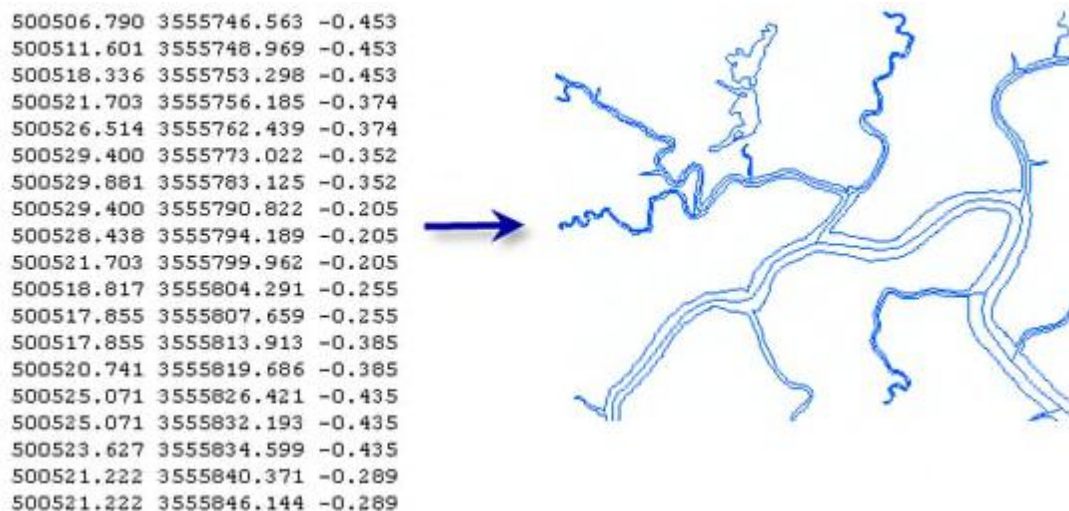


Figure 35: Exemple d'importation de fichiers vers le SIG

7- Les modes de représentation de l'IG dans un SIG

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) permettent de représenter l'environnement spatial de manière plus ou moins réaliste en s'appuyant sur deux types de modèles :

- Le modèle vectoriel : les objets géographiques sont représentés à l'aide d'éléments géométriques tels que des points, des lignes ou des polygones, définis par des coordonnées réelles (X, Y).

- Le modèle raster (ou matriciel) : le territoire est modélisé sous forme d'un maillage régulier composé de cellules de taille uniforme (pixels), chaque cellule étant associée à une valeur spécifique représentant un attribut (altitude, température, occupation du sol, etc.).

Le choix entre ces deux modèles dépend de plusieurs facteurs, notamment la source des données, les capacités matérielles disponibles et les objectifs de l'analyse. La plupart des logiciels SIG permettent également de convertir les données d'un modèle à l'autre, selon les besoins de l'utilisateur.

A- Le modèle vectoriel

Le modèle vectoriel vise à représenter les objets géographiques de la manière la plus précise possible. Pour convertir un objet réel en donnée à référence spatiale, le territoire est décomposé en couches thématiques (relief, routes, bâtiments, etc.), comme illustré à la figure 42. Ces couches sont ensuite structurées et organisées dans des bases de données numériques, facilitant ainsi leur gestion et leur analyse.

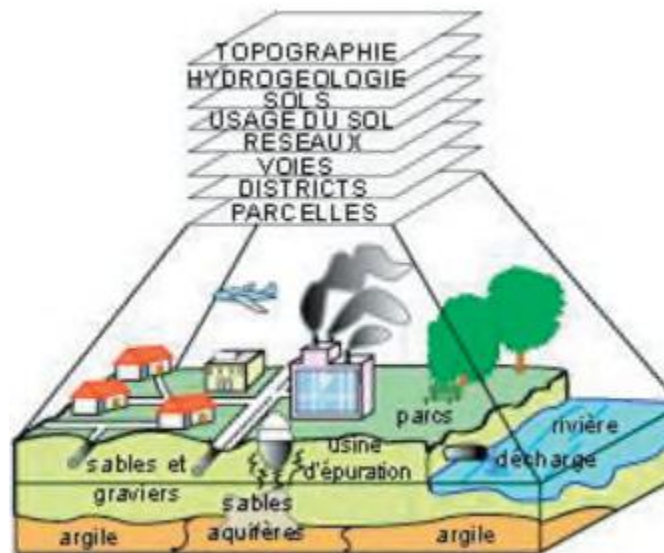


Figure 36: Décomposition du monde réel en couches d'information

Trois types d'éléments géographiques peuvent être intégrés dans le modèle vectoriel ; les éléments ponctuels, les éléments linéaires et les éléments surfaciques (fig. 43).

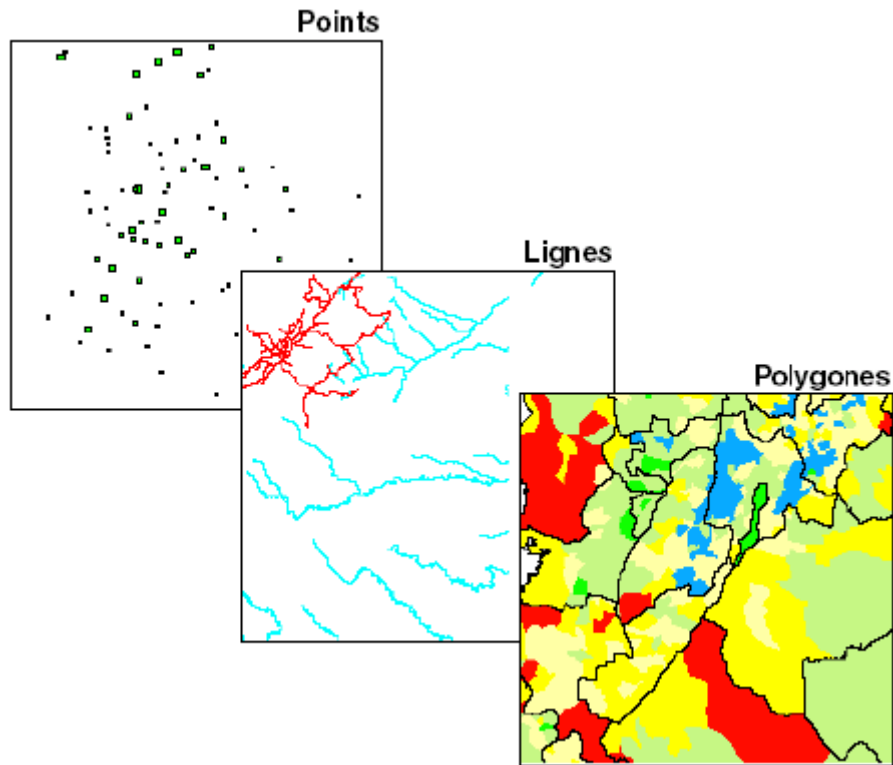
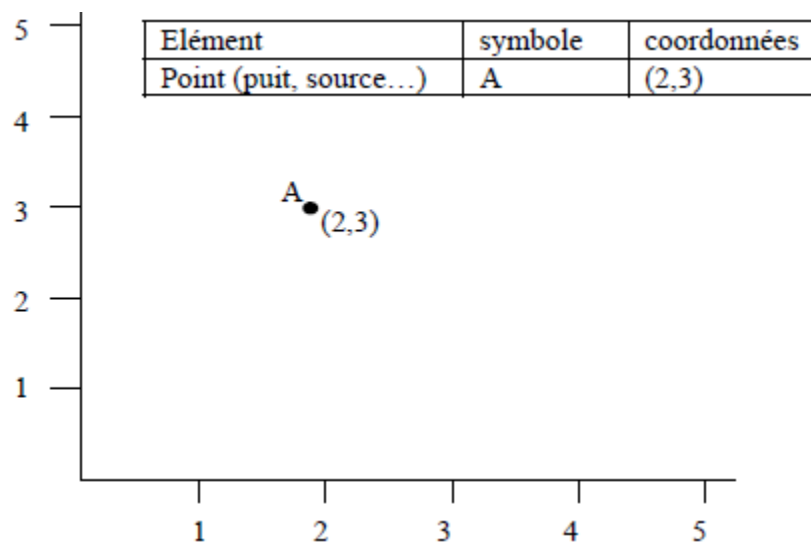


Figure 37: Exemple de données vectorielles

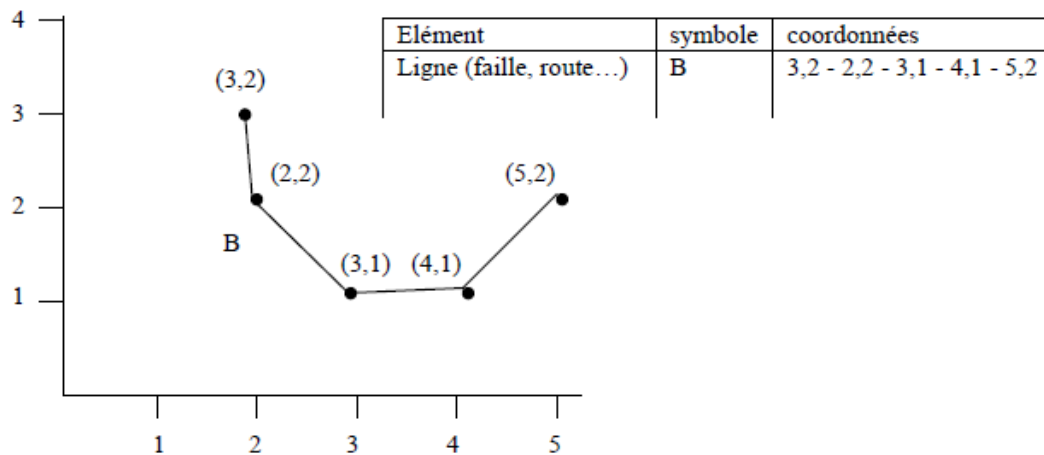
- **Les éléments ponctuels**

Ce sont des éléments représentés sur une carte par des points qui ont des coordonnées x,y (puit, source, localité...)



- **Les éléments linéaires**

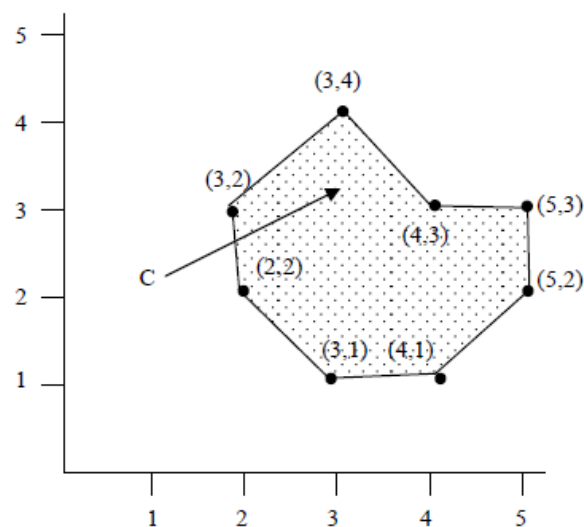
Ce sont des éléments représentés sur la carte par un trait. Ils sont réalisés en joignant une série de points. (Faille, réseau hydrographique, route ...). Chaque point a des coordonnées x,y.



- **Les éléments surfaciques (polygones)**

Ils constituent des surfaces limitées par un trait fermé (polygones), où les coordonnées du point de départ coïncident avec celles du point d'arrivée.

Elément	symbole	coordonnées
Polygone (formation géologique, forêt...)	C	3,2 - 2,2 - 3,1 - 4,1 - 5,2 - 5,3 - 4,3 - 3,4 - 3,2



Remarque : La représentation de la topographie nécessite l'ajout d'un troisième paramètre (z) ou coordonné réel représentant les valeurs d'altitude.

a- Intégration des données géographiques dans un SIG à modèle vectoriel

Dans le modèle vectoriel, les éléments géographiques peuvent être intégrés de différentes manières :

- à l'aide d'une table à digitaliser, qui convertit des documents imprimés (cartes, plans) en données numériques ;
- par importation directe à partir de fichiers numériques existants ;
- en effectuant une digitalisation manuelle directement sur une image géoréférencée (image raster).

b- Notion de couches informatiques

Dans un Système d'Information Géographique (SIG), les données spatiales sont généralement organisées sous forme de couches. Une couche correspond à un plan numérique sur lequel sont représentées des entités géographiques liées à un thème spécifique.

Chaque couche constitue ainsi un sous-ensemble thématique du territoire à cartographier, regroupant des éléments géographiques de même nature (fig. 44).

Par exemple :

Les informations topographiques (courbes de niveau, points cotés, etc.) sont regroupées sur une même couche ;

Les éléments hydrographiques (cours d'eau temporaires ou permanents, lacs, etc.) sont représentés sur une autre couche.

Cette structuration en couches facilite l'analyse, la gestion et la visualisation des données dans un SIG.

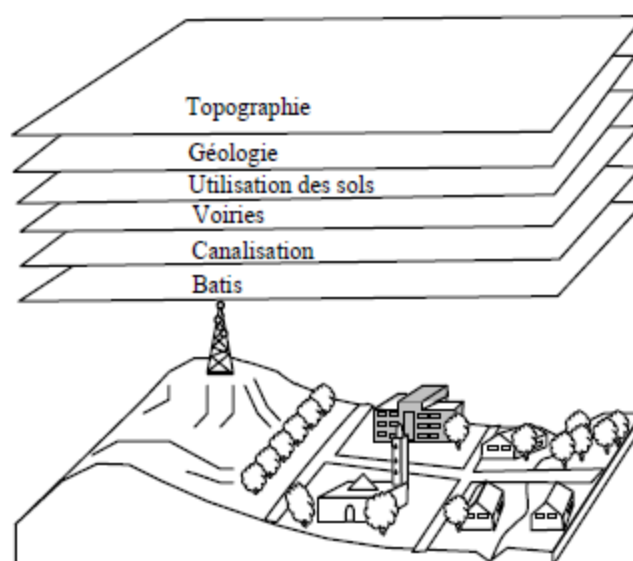


Figure 38: Création de cartes thématiques par superposition des couches dans un SIG

B- Le modèle raster

Le modèle raster représente les données sous forme d'une grille composée de surfaces élémentaires appelées « pixels » (fig. 45). Ces données sont intégrées dans l'ordinateur via un scanner, par importation de fichiers satellites, ou par conversion depuis un modèle vectoriel.

Dans ce modèle, un point est représenté par un carré unique, une ligne par une succession de carrés adjacents, et une surface par un groupe de carrés voisins sur deux dimensions.

Selon le type d'information, les valeurs stockées dans chaque cellule peuvent être des nombres entiers, des nombres réels ou des caractères alphanumériques.

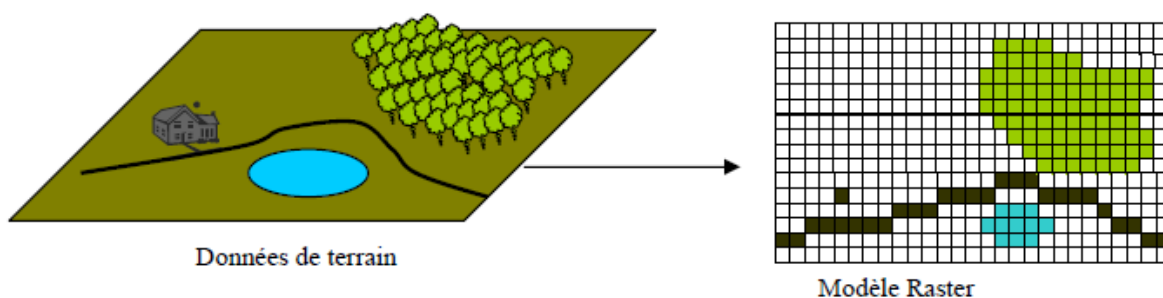


Figure 39: Modèle raster

a- La couche matricielle

Les valeurs associées aux pixels d'une couche, qu'elles soient entières, réelles ou alphanumériques, correspondent souvent à des codes référencés dans un tableau ou une légende.

Les données représentant un territoire peuvent ainsi être visualisées sous forme de plusieurs couches thématiques superposables.

b- la résolution

La précision de l'information géographique dans ce modèle dépend du degré de résolution, c'est-à-dire de la taille des pixels et du nombre de pixels sur une surface donnée. En fonction de l'échelle, la taille d'un pixel peut varier de quelques mètres carrés à plusieurs hectares. Chaque pixel ne contient qu'une seule valeur, ce qui peut entraîner une perte de précision lorsque la résolution est faible, notamment lorsque la limite entre deux classes de sols se trouve à l'intérieur d'un même pixel.

C- Analyses spatiales sur les vecteurs

- **Buffering (zone tampon)**

Le buffering est une opération spatiale qui permet de créer une zone autour d'un objet géographique (point, ligne ou polygone) à une distance donnée (fig. 48). Par exemple, on peut générer une zone tampon de 500 mètres autour d'une rivière pour identifier les zones à risque d'inondation. Cette méthode est très utilisée pour l'analyse de proximité.

Application :

Un buffer de 20 m calculé à partir d'un point va créer un polygone dont le centre est le point de départ et le rayon la distance de 20m donnée par l'utilisateur.

Un buffer de 5m a été calculé à partir d'une ligne ou d'un polygone.

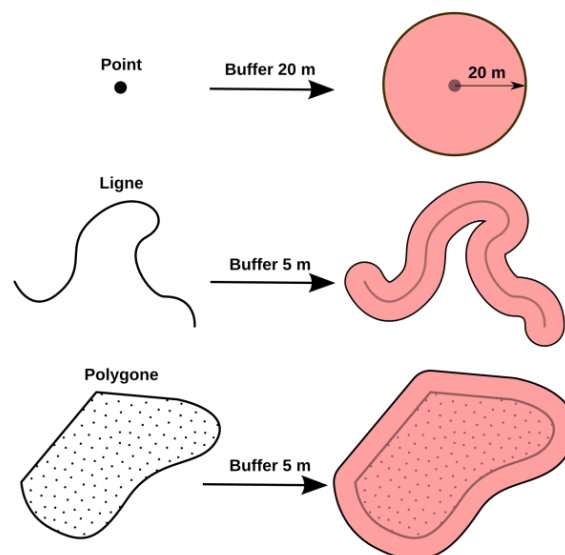


Figure 40: Exemples de la fonction buffer appliquée à un point, une ligne ou un polygone

- **Overlay (superposition)**

L'overlay est une technique qui consiste à superposer plusieurs couches d'information géographique pour analyser les relations spatiales entre elles (fig. 49). Par exemple, on peut superposer une couche d'occupation du sol avec une couche de zones protégées pour évaluer l'impact de l'urbanisation. Les outils d'overlay incluent l'intersection, l'union, la soustraction, etc.

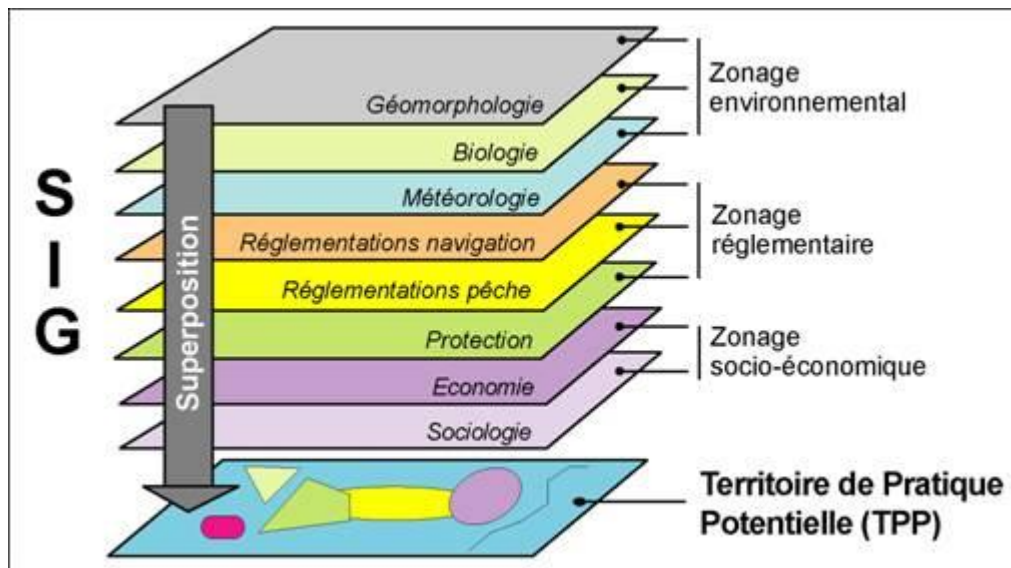


Figure 41: La superposition de plusieurs couches sous GIS

- **Union (union spatiale)**

L'union spatiale combine deux couches pour produire une nouvelle couche contenant toutes les entités des deux couches initiales, avec leurs attributs respectifs (fig. 51). Elle est utile pour fusionner des données et analyser l'ensemble de l'espace couvert par deux phénomènes.

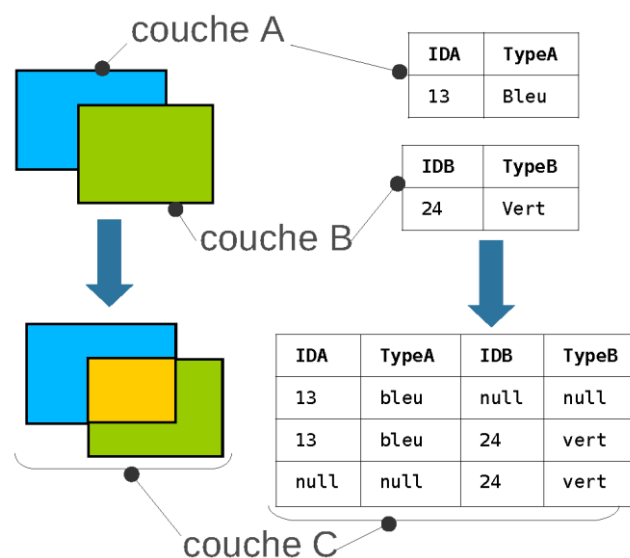


Figure 42: Exemple d'une union spatiale

- **Clip (découpage)**

Le clip permet de découper une couche selon les limites d'une autre (fig. 52). Cela sert à restreindre l'analyse à une zone d'intérêt. Par exemple, on peut découper une carte d'occupation du sol en se basant sur les limites d'une commune.

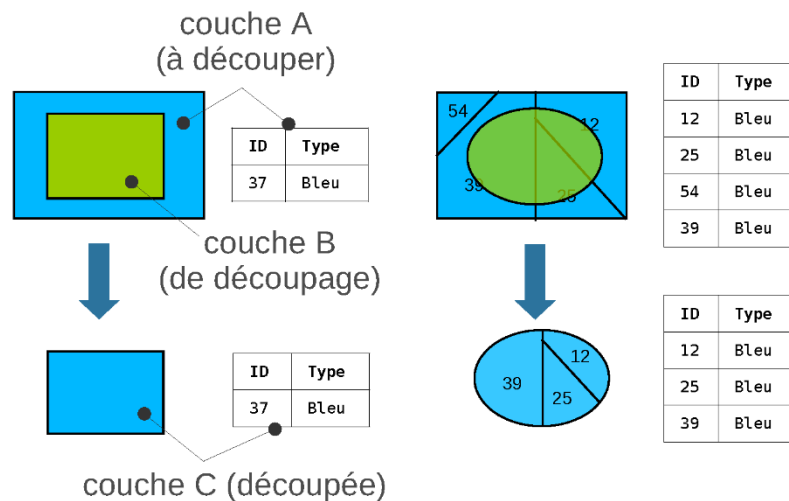


Figure 43: Exemple d'un clip

D- Analyse spatiale sur les rasters

- **Classification supervisée/non-supervisée**

Les rasters multispectraux (comme ceux des satellites) peuvent être utilisés pour classer automatiquement l'occupation du sol en différentes catégories (forêt, sol nu, eau...). Cela repose sur les signatures spectrales des pixels.

- **Reclassification (reclassification des valeurs)**

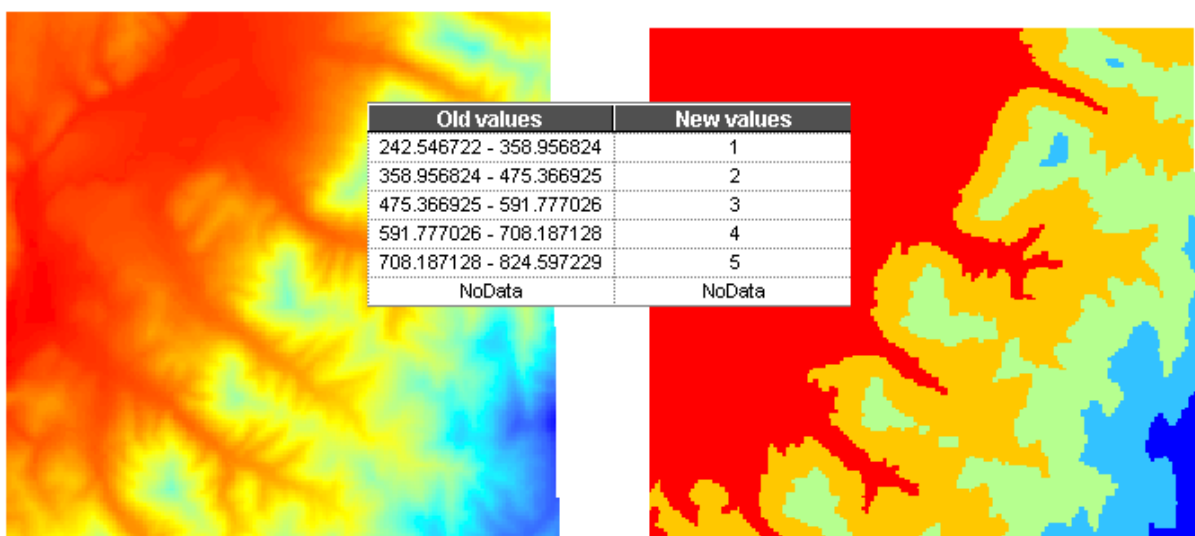


Figure 44: Reclassification des valeurs d'altitudes

Cette opération consiste à modifier les valeurs des pixels d'un raster en fonction de critères définis (fig. 54). Par exemple, une image NDVI peut être reclassée en trois classes : faible végétation, moyenne et forte. Cela simplifie les interprétations pour des analyses thématiques.

- **Calculs raster (Raster Calculator)**

Les outils de calcul raster permettent d'effectuer des opérations mathématiques entre différentes couches raster (fig. 55). Par exemple, on peut soustraire deux images satellites de dates différentes pour détecter un changement de couverture.

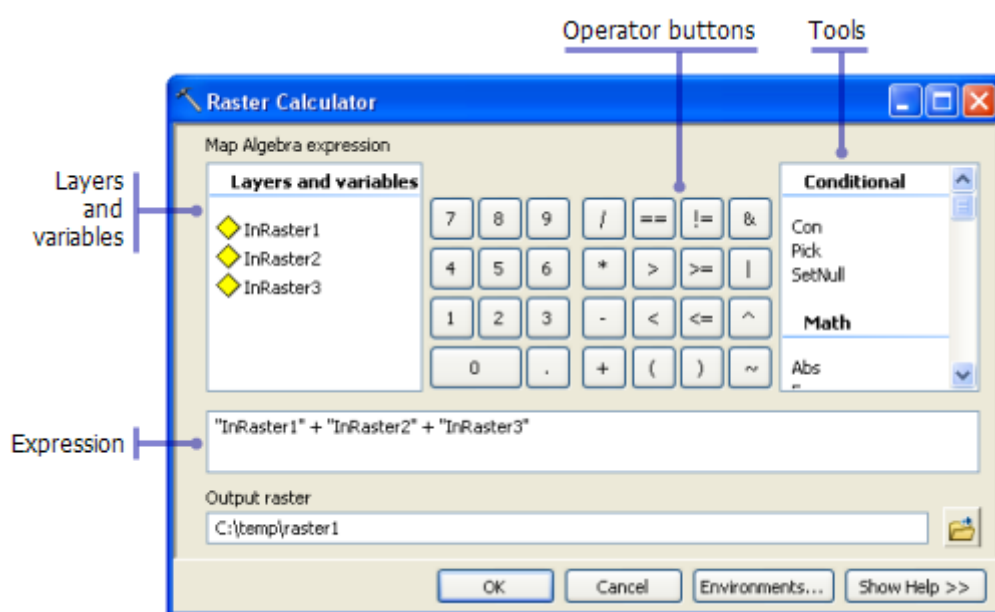


Figure 45: Exemple de boîte de dialogue de l'outil Calculatrice raster

La boîte de dialogue de l'outil Calculatrice raster contient les outils suivants :

Symbole	Signification	Symbole	Signification	Symbole	Signification
/	(Division)	==	(Égal à)	!=	(Différent de)
*	(Multiplication)	>	(Supérieur à)	>=	(Plus grand que ou égale à)
-	(Soustraction)	<	(Inférieur à)	<=	(Inférieur ou égal à)
+	(Addition)				

- **Analyse d'altitude / MNT**

Avec un Modèle Numérique de Terrain (MNT), on peut extraire des informations comme l'altitude, la pente ou l'orientation (aspect) d'un terrain. Ces paramètres sont essentiels en géomorphologie, en hydrologie ou en aménagement du territoire.

- **Extraction par masque**

Permet d'extraire les valeurs raster à l'intérieur d'une zone spécifique définie par un polygone (ex. : une commune ou un bassin versant). C'est l'équivalent raster du clip pour les vecteurs.

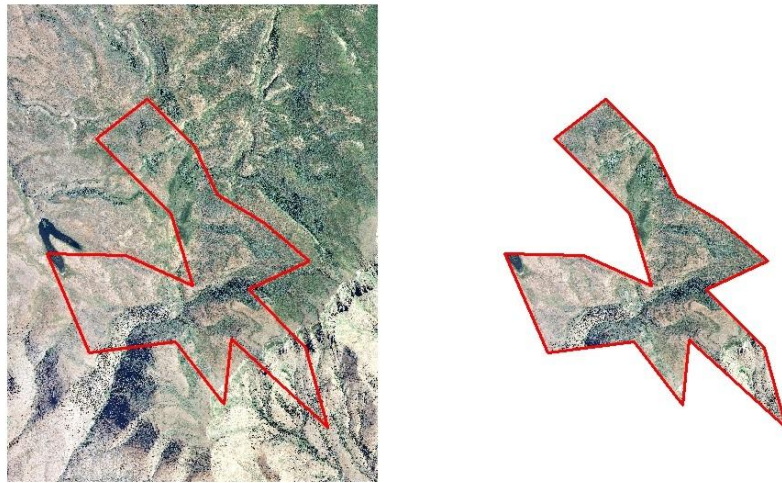


Figure 46: Exemple d'extraction par masque d'une zone d'étude

E- Domaines d'utilisation des SIG

Avec la prise de conscience croissante des interrelations entre les différents phénomènes se produisant à la surface de la Terre, le besoin de développer des outils de gestion globaux et pluridisciplinaires s'est rapidement imposé.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG), grâce à leur capacité à gérer et à croiser des informations spatiales provenant de sources et de cartes variées, sont devenus des outils essentiels d'aide à la décision. Leur utilisation s'est étendue à de nombreux domaines, où ils permettent d'apporter des solutions concrètes et efficaces :

- **Aménagement du territoire** : élaboration de schémas d'organisation spatiale, plans d'urbanisme, choix d'implantation d'infrastructures (routes, autoroutes, lignes ferroviaires), et réalisation d'études d'impact.
- **Gestion urbaine** : organisation de la voirie, des réseaux de distribution (eau, électricité, gaz), gestion des espaces verts, du patrimoine urbain, de la sécurité publique, et insertion de projets architecturaux.
- **Mobilité et transport** : optimisation des itinéraires, suivi en temps réel des flottes de véhicules, assistance à la conduite par des systèmes informatisés.
- **Agriculture** : gestion des ressources hydriques, suivi des cultures, prévision des rendements, gestion forestière, et accompagnement de la mise en œuvre de la Politique Agricole Commune (PAC).

- **Protection de l'environnement** : identification des zones sensibles, suivi de l'évolution des milieux naturels, systèmes d'alerte à la pollution, préservation des paysages et évaluation des impacts environnementaux.
- **Gestion des risques naturels et technologiques** : cartographie et surveillance des zones à risque, prévention des catastrophes, organisation des interventions d'urgence et coordination des secours.

Chapitre 5 : Télédétection et Imagerie Satellite

1- Définition de la télédétection

La télédétection est une technique d'observation à distance fondée sur l'analyse de la réaction des objets à une source d'excitation, qu'elle soit naturelle (comme le rayonnement solaire) ou artificielle (comme un signal radar). Elle permet de détecter et d'interpréter, sans contact direct, les caractéristiques morphologiques, physiques et/ou spectrales des surfaces ou des matériaux. En étudiant leur comportement face aux radiations électromagnétiques, notamment leur capacité à réfléchir, absorber ou émettre ces radiations, la télédétection fournit des informations précieuses sur la nature, les propriétés et l'état des objets observés.



2- Système de la télédétection

La télédétection est un système complexe qui intègre plusieurs paramètres et phénomènes en interaction. On peut en distinguer quatre éléments principaux : le rayonnement électromagnétique, la cible, l'environnement de l'objet, et le système d'observation.

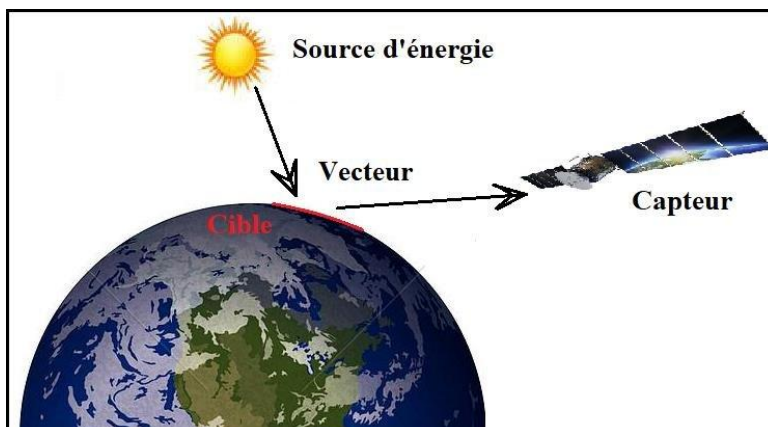


Figure 47: Système de la télédétection

A- Le rayonnement électromagnétique

a- Détection de la lumière

Nos yeux sont un exemple de système de télédétection. Les yeux humains détectent la lumière visible rouge, verte et bleue, et notre cerveau traite et interprète ces informations pour percevoir l'ensemble des couleurs du spectre lumineux visible. Les capteurs de télédétection artificiels, tels que les caméras et les instruments embarqués sur les satellites, utilisent un processus similaire.

Les instruments de télédétection sont conçus pour détecter des sources d'énergie spécifiques. Ils interprètent ces observations afin de fournir des données sur les objets situés à la surface de la Terre et dans l'atmosphère.

Remarques :

Paramètres géophysiques : Les scientifiques désignent par ce terme les propriétés mesurables au sein des systèmes terrestres.

La plupart des capteurs de télédétection utilisés par la NASA pour étudier la Terre détectent le rayonnement électromagnétique.

Le rayonnement électromagnétique est souvent appelé lumière, énergie électromagnétique ou ondes électromagnétiques.

b- Ondes électromagnétiques

Les ondes électromagnétiques peuvent être décrites par leur fréquence, leur longueur d'onde et leur amplitude (figure 57). Ces trois caractéristiques représentent différentes propriétés de la lumière, mais elles sont liées entre elles mathématiquement.

- **La fréquence** correspond au nombre de cycles (marqués par les crêtes) qui passent par un point donné pendant une période déterminée, généralement par seconde.
- **La longueur d'onde** est la distance entre deux crêtes consécutives d'une onde. Elle est inversement proportionnelle à la fréquence : plus la fréquence augmente, plus la longueur d'onde diminue (devient plus courte).
- **L'énergie** contenue dans une onde augmente avec la fréquence. Ainsi, les ondes ayant de longues longueurs d'onde transportent moins d'énergie que celles avec des longueurs d'onde plus courtes.

- **L'amplitude** est la mesure de la hauteur de l'onde, depuis la position de repos (ligne centrale) jusqu'à la crête (sommet de l'onde) ou le creux (bas de l'onde).
- **L'intensité**, utilisée en télédétection, est une mesure proportionnelle au carré de l'amplitude.

B- La cible

a- Comportements des ondes

Les ondes électromagnétiques adoptent des comportements prévisibles lorsqu'elles interagissent avec les surfaces de différents matériaux. Lorsqu'elles rencontrent un objet, elles peuvent être soumises à divers phénomènes, notamment : Réflexion, Absorption, Diffusion (ou dispersion), Transmission, Émission (et réémission)

Ces différents comportements sont décrits plus en détail ci-dessous (figure 59).

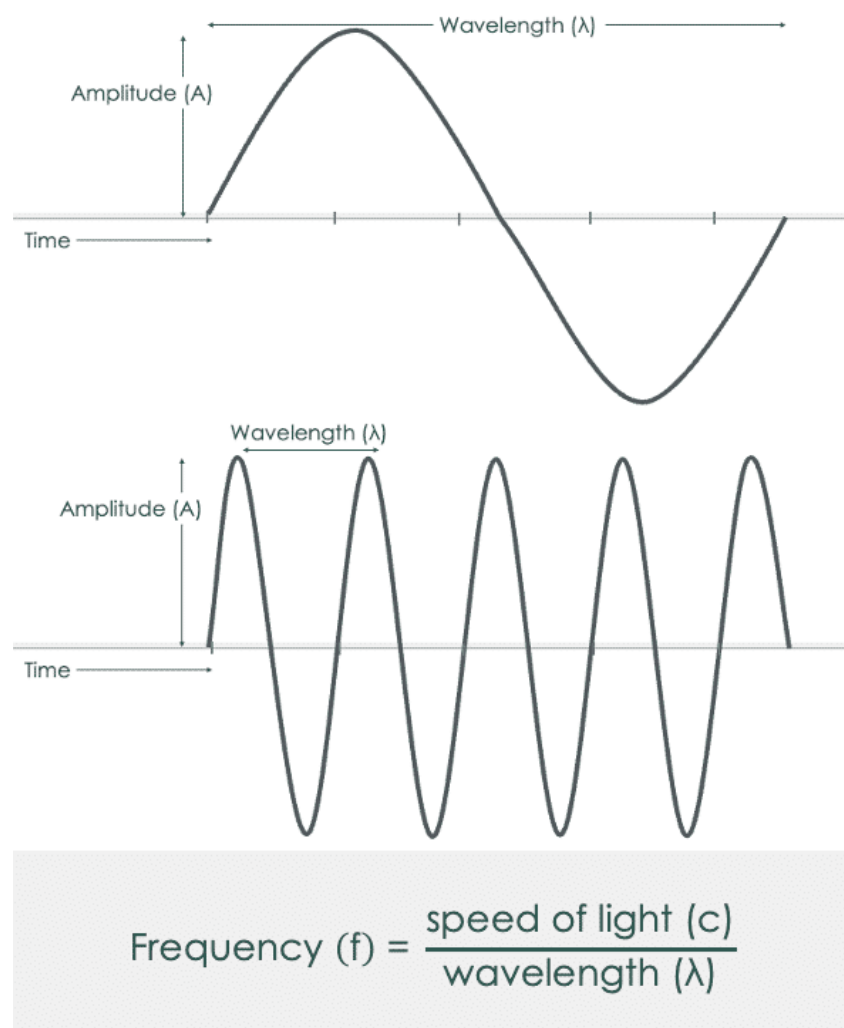
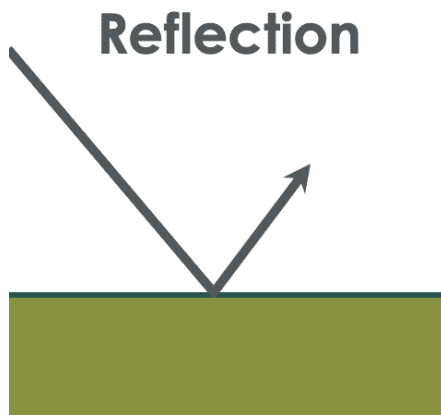
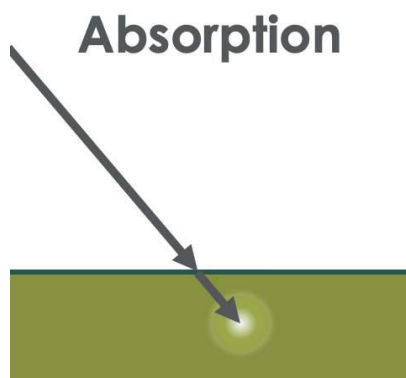


Figure 48: Les caractéristiques de l'onde électromagnétique (source : ARSET)

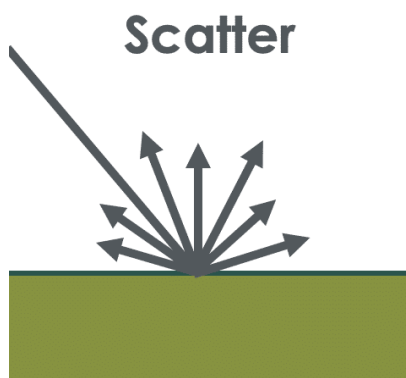
Rayonnement incident : L'énergie électromagnétique entrante qui atteint une surface est appelée rayonnement incident.



L'énergie réfléchie désigne les ondes électromagnétiques qui rebondissent sur une surface selon un angle égal et opposé à celui du rayonnement incident.



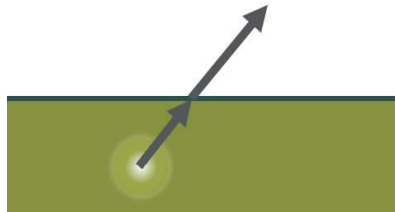
L'énergie absorbée se produit lorsque certaines longueurs d'onde du rayonnement incident atteignent une surface et sont captées par l'objet.



La diffusion se produit lorsque la surface fait rebondir le rayonnement incident dans plusieurs directions et à différentes longueurs d'onde.

Une forme particulière de ce phénomène est appelée rétrodiffusion (backscatter), qui se produit lorsque l'énergie est diffusée en direction de la source.

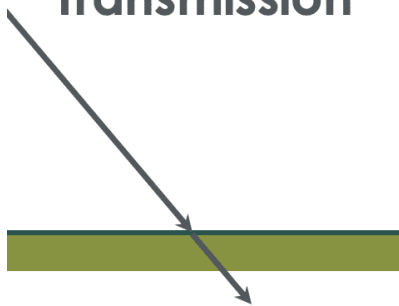
Emission



L'émission de longueurs d'onde spécifiques se produit lorsqu'un objet émet un rayonnement électromagnétique provenant de sa propre énergie.

Une autre forme, appelée réémission, survient lorsqu'une partie du rayonnement solaire incident est absorbée par un objet, puis réémise, souvent sous forme d'énergie plus faible (à une longueur d'onde plus longue).

Transmission



La transmission se produit lorsqu'un objet est transparent à une ou plusieurs longueurs d'onde du rayonnement incident et permet à ce rayonnement de le traverser.

Figure 49: Les différents comportements des ondes

b- Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique désigne l'ensemble des types de rayonnements électromagnétiques, classés selon leurs longueurs d'onde ou fréquences (voir figure 60). Il comprend, de la plus grande longueur d'onde à la plus courte : les ondes radio, les micro-ondes, l'infrarouge, la lumière visible, l'ultraviolet, les rayons X et les rayons gamma. Chaque type de rayonnement possède des propriétés et des usages différents, allant de la communication et le chauffage à l'imagerie médicale et l'astronomie.

Le spectre électromagnétique décrit l'ensemble des fréquences d'ondes qui composent le rayonnement électromagnétique. Les humains ne peuvent voir que la lumière visible, qui représente une très étroite portion du spectre (0,0035 %). Nous percevons ce rayonnement

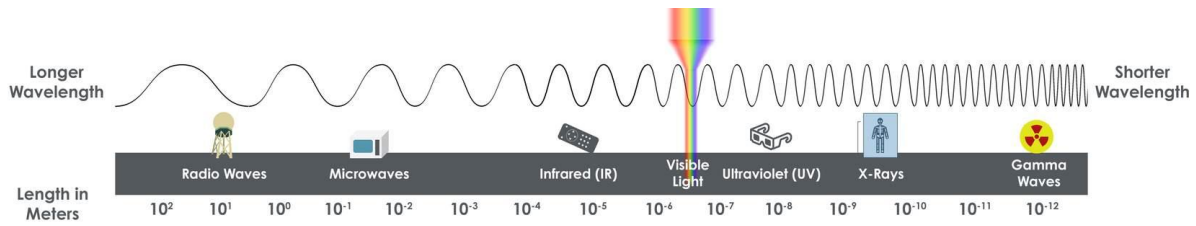


Figure 50: Les principaux domaines du spectre (Source : ARSET)

visible sous forme des couleurs de l'arc-en-ciel allant du rouge au violet, le rouge ayant des longueurs d'onde plus longues et le violet des longueurs d'onde plus courtes.

- **Ondes radio**

Longueurs d'onde : 1 m – 100 km ($1 - 10^5$ m)

Exemple d'utilisation en télédétection : Mesurer l'humidité atmosphérique, les types et quantités de nuages, la vitesse et la direction du vent, ainsi que les types et quantités de précipitations.

- **Micro-ondes**

Longueurs d'onde : 1 mm (10^{-3} m) – 100 mm (10^{-1} m) *

Exemple d'utilisation en télédétection : Suivi des phénomènes météorologiques globaux par la mesure des hauteurs de surface de la mer et des précipitations, ainsi que la mesure des températures de surface et de l'humidité du sol.

*mm = millimètre

1 mm = 10^{-3} m

- **Infrarouge**

Longueurs d'onde : 0,75 – 100 μ m

($7,5 \times 10^{-7} - 10^{-4}$ m)*

Exemple d'utilisation en télédétection : Observation de la santé de la végétation et de la composition du sol.

La télédétection terrestre utilise souvent l'infrarouge dans ces sous-plages :

Infrarouge proche (NIR) : 0,75 – 1,4 μ m

($7,5 \times 10^{-7} - 1,4 \times 10^{-6}$ m)*

Infrarouge à ondes courtes (SWIR) : $1,4 - 4 \mu\text{m}$

$(1,4 \times 10^{-6} - 3 \times 10^{-6} \text{ m})^*$

Infrarouge thermique / infrarouge à ondes longues (LWIR/TIR) : $8 - 15 \mu\text{m}$

$(8 \times 10^{-6} - 1,5 \times 10^{-5} \text{ m})^*$

* μm = micromètre ou micron

$1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$

- **Visible**

Longueurs d'onde : $750 \text{ nm} (7,5 \times 10^{-7} \text{ m}) - 400 \text{ nm} (4 \times 10^{-7} \text{ m})^*$

Rouge : $\sim 690 \text{ nm}$

Vert : $\sim 530 \text{ nm}$

Bleu : $\sim 420 \text{ nm}$

Exemple d'utilisation en télédétection : Observation des plans d'eau, du phytoplancton, du sol, des gaz traces atmosphériques et des aérosols/particules.

* nm = nanomètre

$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

- **Ultraviolet (UV)**

Longueurs d'onde : $100 \text{ nm} (10^{-7} \text{ m}) - 1 \text{ nm} (10^{-9} \text{ m})^*$

Exemple d'utilisation en télédétection : Mesure de l'ozone et de la qualité de l'air.

* nm = nanomètre

$1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$

- **Rayons X**

Longueurs d'onde : $1 \text{ pm} (10^{-12} \text{ m}) - 100 \text{ pm} (10^{-10} \text{ m})^*$

Exemple d'utilisation en télédétection : Les rayons X sont complètement absorbés par la haute atmosphère, ils ne sont donc généralement pas utilisés en télédétection.

* pm = picomètre

$$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m}$$

- **Rayons gamma**

Longueurs d'onde : 1 fm (10^{-15} m) – 100 fm (10^{-13} m)*

Exemple d'utilisation en télédétection : Les rayons gamma sont complètement absorbés par la haute atmosphère, ils ne sont donc généralement pas utilisés pour l'observation terrestre.

*fm = femtomètre

$$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$$

C- L'environnement

L'atmosphère constitue un milieu très hétérogène, composé de divers gaz et particules. Ces éléments, dont la température est supérieure à 0 K, émettent de l'énergie à travers plusieurs processus physiques tels que l'absorption, la réémission, la diffraction, la réfraction et la réflexion. Ces interactions peuvent engendrer des interférences dans les données recueillies (fig. 61).

Par ailleurs, l'environnement immédiat de la cible peut influencer la quantité d'énergie reçue, en provoquant une diminution ou une augmentation en fonction de l'état de surface et de la résolution spatiale.

Selon Robert (1978), l'atmosphère introduit principalement deux types de perturbations : les perturbations géométriques et les perturbations radiométriques.

Remarque : L'atmosphère altère le signal dans son double trajet :

- source – cible
- cible – capteur

Pour les applications courantes, nous supposons que cette perturbation est quasiment la même pour tous les objets ; nous pouvons donc l'occulter.

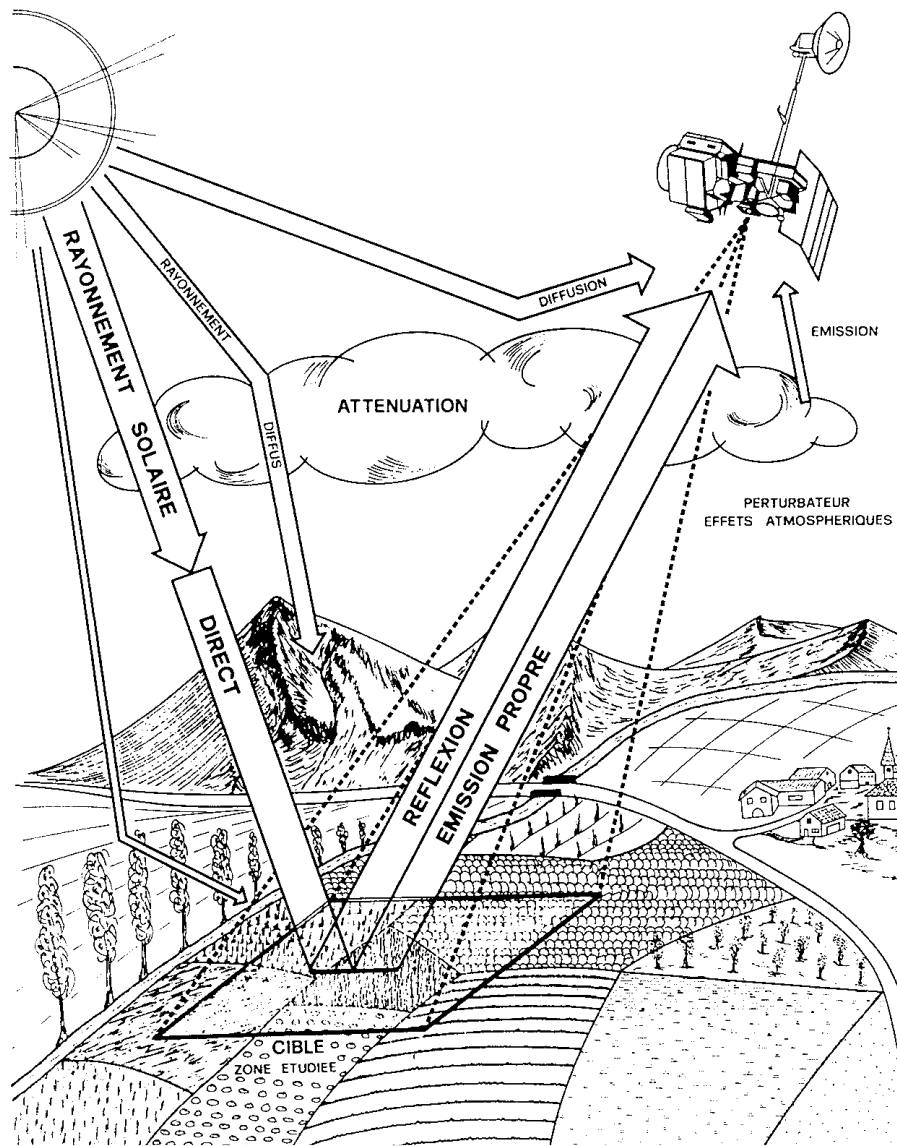


Figure 51: Les éléments perturbateurs des rayons électromagnétiques

D- Systèmes d'observation

Ils représentent à la fois les instruments de mesures du rayonnement électromagnétique (capteurs), et les systèmes de télédétection (vecteurs ou plateformes).

a- Les capteurs

L'acquisition d'une image s'effectue à l'aide d'un capteur, un dispositif capable de détecter les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par une cible, puis de les convertir en valeurs numériques pouvant être enregistrées et traitées.

On distingue généralement deux grandes catégories de capteurs :

- **Les capteurs passifs** : ils mesurent le rayonnement réfléchi ou réémis par un objet naturellement éclairé, principalement par la lumière solaire (voir Figure 62B). Ce type de dispositif est utilisé dans le cadre de la télédétection passive.
- **Les capteurs actifs** : ils génèrent leur propre source d'énergie (voir Figure 62A). Le capteur émet un rayonnement artificiel qui, après réflexion sur la cible, est capté et mesuré. Ce procédé est à la base de la télédétection active (Robin, 1995).

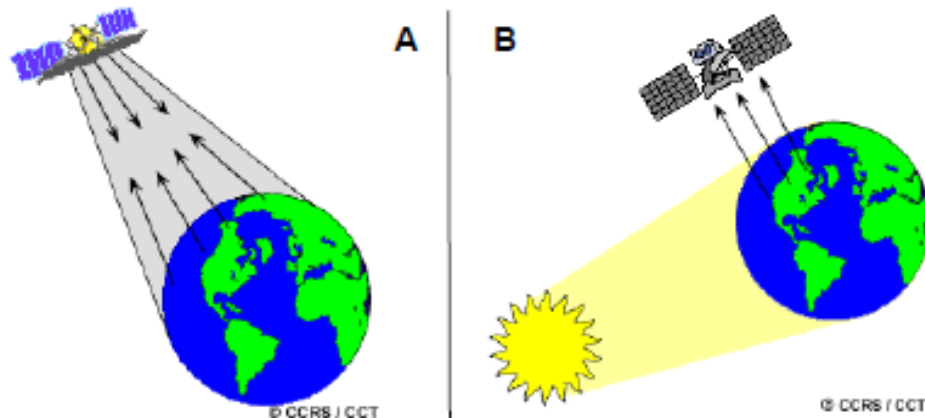


Figure 52: Illustration de la télédétection active (A) et passive (B) (Source : Ressources Naturelles du Canada)

La télédétection passive

Les capteurs passifs détectent l'énergie naturelle réfléchi par un objet, dans une plage du spectre électromagnétique allant de l'ultraviolet à l'infrarouge. En général, la principale source d'émission est le rayonnement solaire.

Parmi les capteurs utilisés dans ce cadre, on trouve les appareils photographiques, les caméras, ainsi que les radiomètres imageurs. Ces derniers peuvent fonctionner selon différents systèmes : balayage optique, balayage mécanique ou dispositifs à barrette de détection.

La télédétection active

Les capteurs actifs, tels que les radars et les lidars, émettent leur propre rayonnement pour illuminer les objets, puis enregistrent le signal réfléchi, appelé « écho », afin de produire des images. Ces images sont principalement utilisées pour reconstituer la forme des objets en deux ou trois dimensions, ce qui permet de générer des modèles numériques de terrain ou de surface.

Ces capteurs peuvent également être associés à des capteurs optiques passifs, permettant ainsi de combiner les informations sur la forme et l'occupation du sol.

Parmi les capteurs actifs les plus courants, on distingue :

- Le radar à synthèse d'ouverture (RSO), un système émetteur-récepteur qui utilise des micro-ondes pour illuminer la cible, plutôt que la lumière visible. Ce type de radar, équipé d'une antenne compacte transmettant un faisceau large, est embarqué sur des satellites tels que Radarsat ou ERS.
- Le lidar (Light Detection and Ranging), utilisé notamment pour les relevés topographiques. Il fournit des nuages de points en trois dimensions géoréférencées, permettant d'identifier des éléments comme les chenaux, les ponts ou la végétation. Ce capteur est généralement installé sur des avions ou des hélicoptères. Contrairement au radar, le lidar fonctionne dans le domaine spectral de la lumière (visible, ultraviolet et infrarouge), et non dans celui des ondes radio.
- Les lasers (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) et les **fluoromètres** constituent également des systèmes utilisés en télédétection active.

L'un des principaux avantages de la télédétection active réside dans sa capacité à acquérir des données en l'absence de lumière solaire, notamment de nuit ou en présence d'une couverture nuageuse. Cela s'explique par le fait que ces capteurs génèrent leur propre source d'illumination, ce qui les rend indépendants des conditions d'éclairage naturel.

b- Les vecteurs

Le vecteur, également appelé plateforme, désigne le dispositif utilisé pour embarquer un capteur dans l'espace et permettre l'observation d'une cible à distance. On distingue différents types de vecteurs selon l'altitude à laquelle ils évoluent par rapport à la surface terrestre.

Selon leur altitude et leur mode de déplacement, les plateformes d'observation se classent en plusieurs catégories (fig. 63):

- **Les plateformes spatiales** : ce sont les satellites placés en orbite autour de la Terre. On distingue principalement les satellites en orbite géostationnaire (à environ 36 000 km d'altitude), qui restent fixes par rapport à un point donné de la surface terrestre, et ceux en orbite polaire ou héliosynchrone (entre 600 et 900 km d'altitude), qui permettent une couverture globale du globe en passant au-dessus des pôles.
- **Les plateformes aéroportées** : il s'agit d'avions, d'ULM ou d'hélicoptères équipés de capteurs. Ces vecteurs permettent d'obtenir des images à haute résolution et sont souvent utilisés pour des études locales ou régionales.

- **Les plateformes terrestres ou maritimes** : ces capteurs fixes ou mobiles sont installés au sol ou sur des navires. Ils sont généralement utilisés pour la calibration et la validation des données satellitaires ou pour des observations spécifiques à proximité du sol.
- **Les drones (UAV - Unmanned Aerial Vehicles)** : de plus en plus utilisés en télédétection, les drones opèrent à basse altitude (généralement entre 50 et 300 mètres) et permettent une acquisition très fine des données, avec une grande flexibilité en termes de temps et de zone d'intervention.



Figure 53: Représentation de différents vecteurs

Étant donné la diversité des types d'images disponibles (Landsat, orthophotographies, etc.), il est essentiel de bien comprendre les spécificités propres à chacun. Pour évaluer les apports potentiels de chaque type d'image et faire un choix pertinent entre les différentes combinaisons vecteur/capteur, quatre caractéristiques fondamentales doivent être prises en compte : la résolution radiométrique, la résolution spectrale, la résolution spatiale et la résolution temporelle.

c- Résolution

La résolution désigne la capacité d'un système optique à distinguer des signaux proches, que ce soit dans l'espace ou dans le spectre électromagnétique. En télédétection, la qualité et la

précision des données dépendent de quatre types de résolution qu'il convient d'examiner avec attention : la résolution radiométrique, spatiale, spectrale et temporelle

- **Résolution radiométrique**

Elle désigne la sensibilité du capteur à détecter les variations d'intensité de l'énergie électromagnétique réfléchie ou émise par une scène. Plus précisément, c'est la plus faible différence de signal que le capteur peut enregistrer dans chaque bande spectrale. Une résolution radiométrique élevée permet de mieux distinguer les nuances fines dans les niveaux de gris.

- **Résolution spectrale**

Elle correspond à la capacité du capteur à distinguer des bandes étroites du spectre électromagnétique. Plus la bande spectrale est étroite, plus la résolution spectrale est élevée. Par exemple, elle est d'environ 0,1 μm pour les radiomètres à bord des satellites d'observation des ressources terrestres, et peut atteindre 10 nm pour les capteurs à haute résolution spectrale.

- **Résolution temporelle**

Elle représente la fréquence à laquelle un satellite passe au-dessus de la même zone, c'est-à-dire le temps nécessaire pour revisiter une même scène à partir du même angle d'observation (nadir). Cette périodicité varie de quelques jours à plusieurs semaines selon les systèmes. La résolution temporelle permet d'étudier l'évolution d'un phénomène au fil du temps (analyse multitemporelle), en observant les changements détectables entre deux acquisitions.

- **Résolution spatiale**

Elle définit la plus petite surface au sol que le capteur peut distinguer comme une unité distincte. Plus la résolution spatiale est fine, plus les détails observables dans l'image sont précis. Par exemple, la résolution spatiale du capteur ETM+ à bord de Landsat est de 30 mètres, ce qui signifie que chaque pixel représente une surface de 30 m $\times$ 30 m au sol.

Tableau 3: Caractéristiques de quelques capteurs

CAPTEURS	SPATIALE	SPECTRALE	RADIO-MÉTRIQUE	TEMPORELLE
NOAA_AVHRR	1,1 km / 4 km 1500 miles	4 ou 5 bandes (.58 - .68 μm) (.72 - 1.1) (3.55 - 3.93) (10.3 - 11.3) (11.5 - 12.5)	10 bit (0 à 1023)	12 heures (1 jour et 1 nuit)

LANDSAT_MSS	80 m185 km	4 bandes (.6 - .6 μ m) (.7 - .8) (.8 - 1.1) (.5 - .6)	6 bit (0 à 63)	16 jours
LANDSAT_TM	30 m / 120 m185 km	7 bandes (.45 - .52 μ m) (.52 - .60) (.63 - .69) (.76 - .90) (1.55 - 1.75) (10.4 - 12.5) (2.08 - 2.35)	8 bit (0 à 255)	16 jours
SPOT_XS	20 m60 km	3 bandes (.5 - .59 μ m) (.61 - .68) (.79 - .89)	8 bit (0 à 255)	26 jours
SPOT_P	10 m60 km	1 bande (.51 - .73 μ m)	8 bit (0 à 255)	26 jours
IKONOS_XS	4 m11 km	4 bandes (.45 - .52 μ m) (.52 - .60) (.63 - .69) (.76 - .90)	8 bit (0 à 255)	3 jours

3- Nature et Caractéristique de l'image

a- Traitement des données images

Prétraitement

Il vise à corriger les défauts liés au capteur, à l'atmosphère ou à la géométrie.

- Correction radiométrique : ajuste les niveaux de gris pour compenser les variations d'éclairage ou les erreurs instrumentales.
- Correction atmosphérique : supprime les effets de l'atmosphère (diffusion, absorption).
- Correction géométrique : rectifie la position des pixels pour les aligner avec des coordonnées géographiques (géoréférencement).

Amélioration d'image (Image Enhancement)

Techniques utilisées pour rendre les images plus lisibles ou interprétables visuellement.

- Amélioration du contraste (ex. : étirement d'histogramme)
- Filtres spatiaux (lissage, renforcement des contours)
- Composition colorée (combinaison de bandes spectrales en RVB)

Transformation d'image

Conversion des données en un nouveau système plus adapté à l'analyse.

- PCA (Analyse en composantes principales)
- Indices spectraux (NDVI, NDWI, etc.)

Classification

Attribution d'une étiquette (classe) à chaque pixel selon ses caractéristiques spectrales.

- Classification supervisée : nécessite des échantillons d'apprentissage (ex. : Maximum de vraisemblance, SVM)
- Classification non supervisée : regroupe les pixels en classes automatiquement (ex. : k-means, ISODATA)
- Résultat : Carte d'occupation du sol

Post-traitement

Affinement des résultats de classification.

- Filtrage des pixels isolés
- Fusion de classes
- Validation (matrice de confusion, calcul de la précision globale)

4- Domaines d'utilisation de la télédétection

La télédétection connaît aujourd'hui un essor remarquable et ses applications se multiplient dans une grande variété de domaines scientifiques et techniques. Quels que soient les champs d'application, l'exploitation efficace des images ou des données numériques issues de la télédétection repose sur une bonne compréhension des principes physiques à la base des techniques utilisées.

Voici quelques domaines majeurs où la télédétection joue un rôle essentiel :

- Météorologie : Suivi en temps réel des systèmes nuageux, des tempêtes, et des précipitations.

Exemple : L'imagerie satellite permet de prévoir l'évolution des ouragans comme les cyclones tropicaux grâce aux satellites géostationnaires.

- Climatologie : Analyse à long terme des changements climatiques, de la température de surface ou de la couverture neigeuse.

Exemple : Les capteurs MODIS mesurent l'évolution des calottes glaciaires en Arctique pour suivre la fonte des glaces

- Océanographie : Surveillance de la température de surface de la mer, des courants marins, ou de la concentration en chlorophylle.

Exemple : Les satellites comme Sentinel-3 permettent de cartographier les zones de prolifération d'algues marines.

- Cartographie : Production et mise à jour de cartes topographiques, thématiques ou d'occupation du sol.

Exemple : Les images Landsat sont utilisées pour produire des cartes d'urbanisation à grande échelle.

- Géographie : Étude des dynamiques spatiales, de l'aménagement du territoire ou de la gestion des ressources naturelles.

Exemple : L'analyse des images SPOT permet de suivre l'évolution des fronts de déforestation en Amazonie.

Chapitre 6 : Cartographie et Visualisation

1- Définition de la cartographie et de la carte

La cartographie est la science, la technique et l'art de représenter l'espace géographique sous forme de cartes. Elle permet de modéliser et visualiser des phénomènes physiques, humains ou environnementaux sur une surface plane, à différentes échelles.

Elle comprend plusieurs étapes, notamment :

- la collecte de données spatiales (à l'aide de GPS, de relevés topographiques, de la télédétection, etc.) ;
- leur traitement et analyse (via des logiciels SIG ou DAO) ;
- et leur représentation graphique (carte papier ou numérique).

La carte est une représentation réduite, généralisée, mathématiquement précise de la surface terrestre sur un plan montrant la situation, la distribution et les rapports de divers phénomènes naturels et sociaux, choisis et définies en fonction du but de chaque carte.

La carte permet également de montrer les variations et développement des phénomènes dans le temps ainsi que leurs facteurs de déplacement dans l'espace.

2- Classification des cartes

a- Les cartes topographiques

Les cartes topographiques (fig. 66) représentent principalement les résultats d'observations directes réalisées sur le terrain. Elles indiquent la position planimétrique (coordonnées horizontales) et altimétrique (élévation) des éléments, ainsi que leur forme, dimension et identité. Ces cartes décrivent les éléments fixes et durables de la surface terrestre, offrant une vision détaillée de la physionomie du terrain.

Elles sont généralement produites à des échelles comprises entre 1:5 000 et 1:100 000, selon le niveau de développement et les besoins cartographiques du pays concerné.



Figure 54: Exemple d'une carte topographique

b- Les cartes thématiques

Les cartes thématiques représentent des phénomènes spécifiques, qu'ils soient qualitatifs ou quantitatifs, concrets ou abstraits, en se basant sur un fond de référence (généralement une carte topographique ou administrative). Elles sont conçues autour d'un ou plusieurs thèmes bien définis, permettant de mettre en évidence des informations ciblées.

Ces cartes peuvent être classées selon différents domaines thématiques :

- Cartes physiques : géophysiques, géologiques (fig. 67), géomorphologiques, pédologiques, hydrologiques, climatologiques, météorologiques.
- Cartes bio-géographiques : phytogéographiques (végétation), zoologiques (faune), écologiques.
- Cartes de géographie humaine : démographiques, sociologiques, politiques, administratives, historiques, culturelles.
- Cartes économiques : agricoles, industrielles, des réseaux de transport, commerciales.
- Cartes de géographie générale : cartes synthétiques à petite échelle, couvrant de vastes territoires avec un niveau de généralisation élevé.

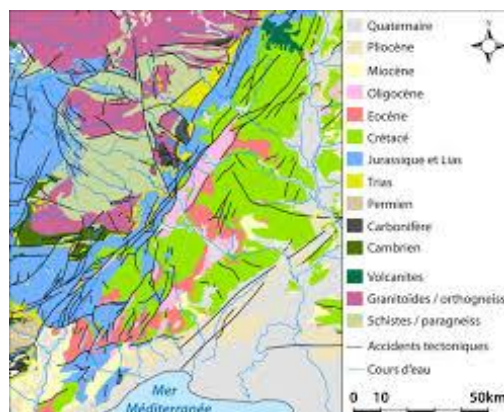


Figure 55: Exemple d'une carte thématique

3- Les principes de la cartographie

Les principes de la cartographie par SIG (Système d'Information Géographique) reposent sur des règles scientifiques, graphiques et techniques permettant de produire des cartes numériques précises, lisibles et utiles à l'analyse spatiale. Voici les principaux principes :

- **Sélection de l'information pertinente**

Tout projet cartographique SIG commence par le choix des données à représenter, en fonction de l'objectif de la carte. Il faut :

Identifier les couches utiles (ex. : routes, cours d'eau, usage du sol...).

Éviter la surcharge d'information pour garder la lisibilité.

- **Géoréférencement et système de projection**

Les données utilisées doivent être géoréférencées dans un système de coordonnées commun (ex. : WGS 84, UTM) afin de permettre leur superposition correcte dans l'espace.

- **Hiérarchisation visuelle et sémiologie graphique**

La sémiologie graphique permet d'utiliser des symboles, couleurs, tailles, formes, épaisseurs et textures pour traduire des phénomènes :

Points (villes, forages),

Lignes (routes, rivières),

Polygones (zones d'occupation du sol, communes),

Respect des conventions cartographiques (ex. : bleu pour l'eau, vert pour la végétation...).

- **Respect de l'échelle**

L'échelle doit être choisie selon le niveau de détail souhaité :

Grande échelle (1:5 000 à 1:25 000) pour le détail local,

Petite échelle (1:100 000 à 1:1 000 000) pour une vision régionale ou nationale.

- **Structure en couches (layers)**

Les SIG fonctionnent par superposition de couches thématiques, chacune contenant un type d'information homogène. Cela facilite l'analyse croisée (ex. : croiser la géologie avec l'hydrologie).

- **Conception cartographique**

Une carte SIG bien conçue comporte :

Un titre clair,

Une légende précise,

Une échelle graphique,

Une orientation (nord),

Une source des données,

Une date de création.

- **Analyse spatiale et interprétation**

Le SIG ne sert pas seulement à représenter, mais aussi à analyser l'espace (requêtes, zonages, calculs de surfaces, distances, intersections, etc.) pour appuyer la prise de décision.

4- Comprendre l'image cartographique : sémiologie et représentation

La lecture et l'interprétation d'une image cartographique reposent sur un ensemble de règles bien établies, regroupées sous le terme de sémiologie graphique — la science des signes appliquée à la cartographie. Celle-ci englobe l'usage codifié des symboles, des textes et le respect de principes esthétiques destinés à garantir la clarté et la lisibilité de la carte.

Un objet géographique est d'abord défini par sa localisation spatiale, c'est-à-dire sa position dans le plan cartésien (coordonnées X, Y). Cette localisation atteste de son existence dans l'espace, mais ne suffit pas à en exprimer la présence matérielle ou la nature.

Pour représenter cet objet sur une carte, il est nécessaire de recourir à un graphisme visible — une « tâche », une forme, un symbole — qu'il s'agisse d'un simple point pour un puits, d'une ligne pour une route, ou d'une surface pour une forêt. C'est cette traduction graphique qui rend la donnée intelligible.

Chaque représentation graphique est construite à partir de variables visuelles fondamentales, telles que :

-la forme,

-la taille,

-la couleur,

-l'orientation,

-la texture,

-la valeur (clarté ou obscurité),

-la position.

Ces variables permettent de distinguer, hiérarchiser et qualifier les objets représentés, selon leur nature ou leur importance.

- **La forme**

La forme correspond à l'enveloppe d'un objet représenté sur une carte, définie par un contour ou par une surface différenciée. Elle permet d'identifier un objet en l'associant à un concept connu (grâce à notre expérience ou à la légende).

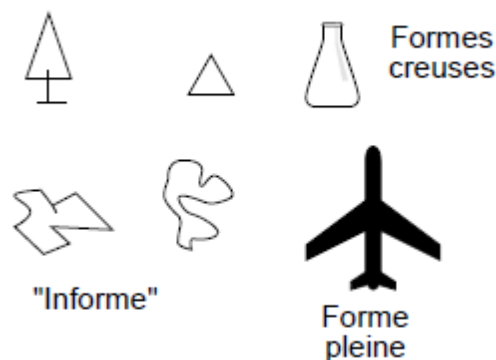
Il existe plusieurs types de formes :

- Forme creuse : uniquement délimitée par un contour, laissant l'intérieur vide (utile pour superposer d'autres informations).
- Forme pleine ou virtuelle : délimitée sans contour visible, sa limite est perçue par une différence de couleur ou de texture.

La forme peut être :

- Figurative (pictogramme représentant un objet réel),
- Évocatrice (idéogramme suggérant une idée),
- Symbolique (forme abstraite sans lien direct avec l'objet).

Elle peut aussi être géométrique (cercle, carré...) ou libre, et n'est limitée que par l'imagination du concepteur, ce qui lui confère une longueur infinie (selon Bertin).



- **La taille**

La taille désigne les dimensions d'un symbole graphique sur une carte (hauteur, largeur, surface).

Bien qu'en théorie cette variable soit infiniment modulable, elle est limitée par deux contraintes :

- Le seuil minimal de perception visuelle (trop petit = invisible),
- Le seuil maximal d'encombrement (trop grand = illisible ou gênant sur la carte).

La taille d'un symbole n'est pas toujours proportionnelle à la dimension réelle de l'objet représenté. Elle peut être utilisée pour :

- Attirer l'attention,
- Hiérarchiser l'information,
- Représenter une valeur (quantité, importance).



- **La couleur**

La couleur est une sensation physiologique perçue par l'œil humain, résultant des radiations lumineuses réfléchies par les objets. En cartographie, elle constitue un puissant outil visuel, mais son usage doit rester limité et codifié pour assurer clarté et lisibilité.

Contraintes en cartographie :

Bien que l'œil humain puisse distinguer des milliers de nuances, la palette utilisable en cartographie est restreinte à une vingtaine de couleurs distinctes au maximum, pour garantir la compréhension et la mémorisation des informations.

L'objectif n'est pas artistique mais fonctionnel : la couleur doit différencier, classer ou hiérarchiser les objets cartographiés.

Rôle de la couleur sur une carte :

- Identifier différentes zones ou classes (ex. : types d'occupation du sol),
- Représenter une gradation (ex. : température, altitude),
- Renforcer l'esthétique et la lisibilité.

- **L'orientation**

L'orientation désigne la direction d'un symbole par rapport aux axes de référence de la carte, généralement ses bords verticaux et horizontaux. Elle ne fait pas référence au nord géographique, mais uniquement à la position du symbole dans le cadre de la carte.

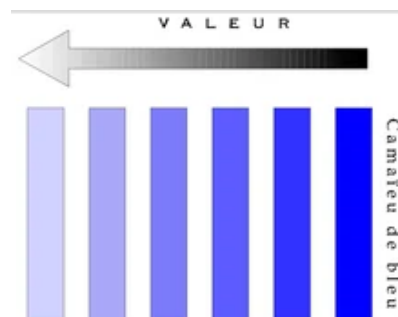
Dans une carte complexe, l'œil humain n'est capable de percevoir clairement que quatre orientations distinctes :

- les deux axes principaux (horizontal et vertical),
- et deux directions obliques (pas nécessairement les diagonales exactes).

Il serait donc inutile, voire contre-productif, d'utiliser une multitude d'orientations légèrement différentes, que le lecteur serait contraint d'identifier à l'aide de la légende.

- **La valeur**

La valeur désigne le degré de clarté ou d'obscurité d'une couleur, allant du blanc pur jusqu'à la saturation maximale de cette couleur. C'est une progression continue, comme en aquarelle, où un bleu peut être dilué progressivement pour produire une gamme de tons du plus clair au plus foncé.



- **La texture**

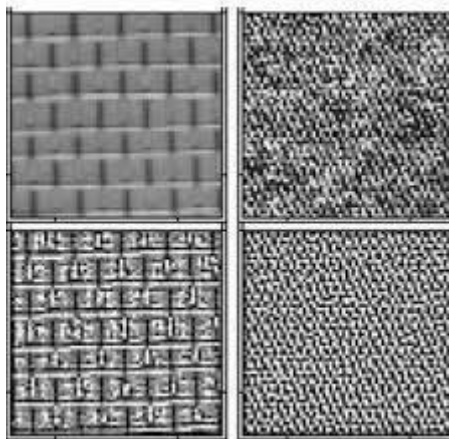
La texture est définie comme l'organisation spatiale d'éléments graphiques unitaires servant à représenter une zone ou une surface sur une carte. Ces éléments (points, traits, motifs...) sont répétés pour donner une apparence caractéristique à une aire géographique.

- Deux types de textures sont possibles :

- Teinte uniforme : remplissage simple d'une zone avec une seule couleur — facile à mettre en œuvre.
- Motifs répétés : agencement d'éléments distincts (ponctuels ou linéaires), selon une certaine structure.
- La structure d'une texture peut varier :
 - Géométrique : si la répartition des motifs est régulière et prévisible (ex. : quadrillage),
 - Aléatoire : si les motifs sont répartis sans ordre apparent,
 - Homogène : si tous les éléments de texture sont identiques,
 - Hétérogène : si les éléments sont variés.
- Utilisation et portée :

La texture est utilisée exclusivement pour les zones (contrairement aux autres variables qui s'appliquent aussi aux points ou lignes),

Elle permet de différencier visuellement des surfaces aux contenus thématiques distincts (ex. : forêts, cultures, zones urbaines).



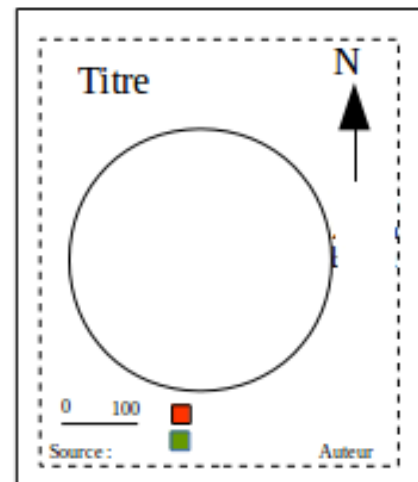
- **La position**

La position est une variable fondamentale en cartographie. Elle correspond à l'emplacement d'un symbole sur le plan de la carte, c'est-à-dire sa localisation spatiale dans un système de coordonnées (souvent X, Y). Cette position permet de géoréférencer les objets représentés, et constitue la base même de la représentation cartographique.

5- Habillage cartographique

L'habillage est l'ensemble des éléments autour de la carte, permettant au lecteur de se repérer et de comprendre la carte. Il se compose de différents éléments (fig. 68).

Figure 56: Les éléments d'une carte



- **Titre**

- Le titre doit être simple, précis et concis. Il doit comprendre le thème, le lieu, et l'année, afin de répondre aux questions « quoi », « où » et « quand ». Néanmoins, on doit penser à exclure toute unité de mesure, comme les km² ou les pourcentages.
- Rôle : Informer immédiatement le lecteur sur le contenu.

Exemples :

- Carte géologique de la région d'Al Hoceima
- Répartition des plages fréquentées au Maroc – Été 2024

- **Échelle**

- L'échelle est un élément essentiel. Elle permet d'avoir un ordre de grandeur, pour savoir si la carte représente des mètres, des kilomètres... On doit privilégier l'échelle graphique, car elle permet de garder un ordre de grandeur quand on redimensionne. De plus, on doit privilégier les valeurs rondes, comme 1 km, et éviter des hérésies comme des échelles à 37,5 km.
- Formes :
 - Numérique : C'est un rapport entre deux valeurs. 1:50 000 (1 cm sur la carte = 500 m sur le terrain)
 - Graphique : une barre graduée permettant de mesurer.



- Exemple : Une carte topographique au 1:25 000 permet de voir beaucoup de détails.

- **Orientation (Nord géographique)**

- L'orientation permet au lecteur de se repérer. Il n'est pas nécessaire de faire une rose des vents à 32 directions, une simple flèche pointant vers le nord est largement suffisante.

- Rôle : Aider à situer les directions par rapport à la carte.

Exemples :

Flèche simple pointant vers le haut avec la lettre N



Rose des vents avec les points cardinaux (N, E, S, O)



- **Légende**

- La légende est l'emplacement où vont être déposés les figurés et leurs significations. Sa conception doit être achevée avant l'exécution de la carte. Quelques points pour faire une belle légende :



- Évitez le superflu, ne marquez pas le mot légende.
- Autre point important, le figuré doit toujours être représenté à gauche et son identifiant à sa droite. Ainsi, on voit un figuré, et on cherche sa correspondance.
- De plus, et cela semble évident, le figuré de la légende doit être la même que celui de la carte, tant en forme, qu'en couleur et en taille.
- **Source des données et date**
- La carte doit être sourcée, notamment pour les données. Cela est essentiel, car cela aide à être critique sur le document ! On trouve aussi une datation de la carte.
- Rôle : Garantir la fiabilité et la traçabilité de la carte.

Exemples :

- Source : ministère de l'Agriculture, 2023
- Données Sentinel-2, ESA, janvier 2024
- **Projection et système de coordonnées**
- Définition : Méthode mathématique utilisée pour représenter la surface de la Terre sur un plan.
- Rôle : Permet d'interpréter correctement les distances, les surfaces et les positions.

Exemples :

- Projection UTM Zone 30N, WGS 84 et Lambert Conformal Conic

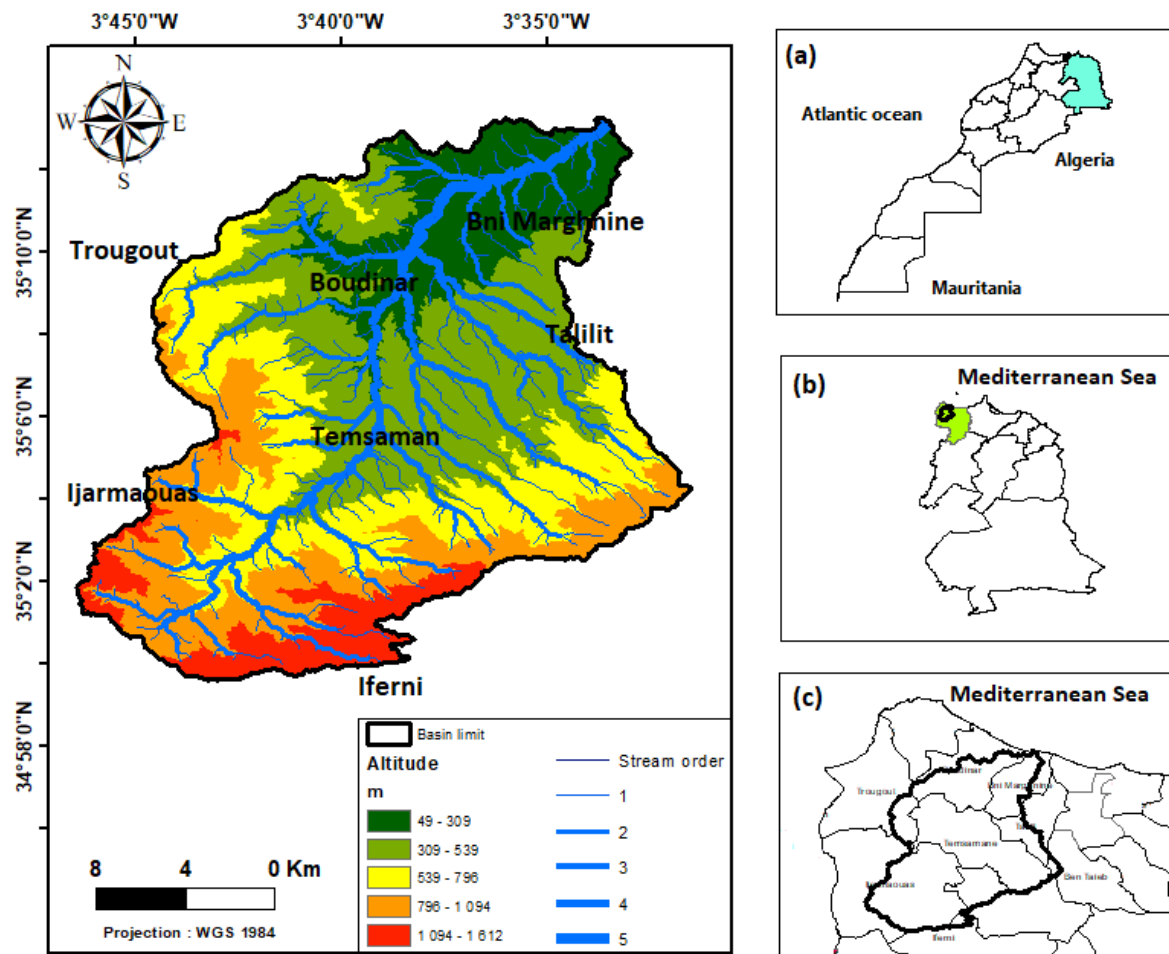


Figure 57: Exemple d'une carte

Chapitre 7 : Modélisation Géospatiale

1- Les concepts de la modélisation géospatiale

Les concepts de la modélisation géospatiale sont les notions fondamentales qui permettent de représenter, analyser et simuler les phénomènes localisés dans l'espace à l'aide des Systèmes d'Information Géographique (SIG).

Voici les principaux, expliqués clairement :

- **Entités géospatiales**

Ce sont les objets géographiques modélisés dans un SIG, représentés par des points (ex. stations météo), lignes (ex. routes, rivières) ou polygones (ex. zones urbaines, lacs). Elles constituent la base de toute analyse.

- **Localisation**

Chaque entité possède une position géographique précise, définie par des coordonnées (latitude, longitude, et éventuellement altitude). Cela permet de situer les objets dans l'espace réel.

- **Attributs**

Les attributs décrivent les caractéristiques non spatiales des entités. Par exemple, pour une route : nom, largeur, type de revêtement. Ils sont généralement stockés dans des tables liées à la géométrie.

- **Topologie**

La topologie correspond aux relations spatiales entre entités, comme l'adjacence (voisinage), la connectivité (liaisons) ou l'inclusion (un objet contenu dans un autre). Elle garantit la cohérence spatiale des données.

- **Modèles de données géospatiales**

On distingue deux grands types :

Vecteur : données discrètes (points, lignes, polygones).

Raster : données continues (altitude, température) sous forme de grille de pixels.

- **Échelle et résolution**

Échelle : rapport entre les distances sur la carte et celles sur le terrain.

Résolution : taille de la plus petite unité représentée (par ex. taille du pixel dans un raster).

Ces deux paramètres déterminent le niveau de détail.

- **Relations spatiales**

Elles décrivent comment les entités interagissent : proximité, intersection, superposition, inclusion.

Exemple : identifier toutes les zones agricoles situées à moins de 1 km d'un cours d'eau.

- **Processus et phénomènes spatiaux**

Ils représentent l'évolution d'un phénomène dans l'espace et le temps, comme l'expansion urbaine, la dispersion d'un polluant ou la progression d'un incendie.

2- Le modèle numérique de terrain

a- Définition

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation numérique de la morphologie de la surface terrestre, autrement dit du relief.

Il se limite à la topographie du sol et n'inclut pas les éléments qui s'y trouvent, tels que les routes, la végétation, les plans d'eau ou les constructions.

Dans la suite du document, on utilisera l'abréviation MNT.

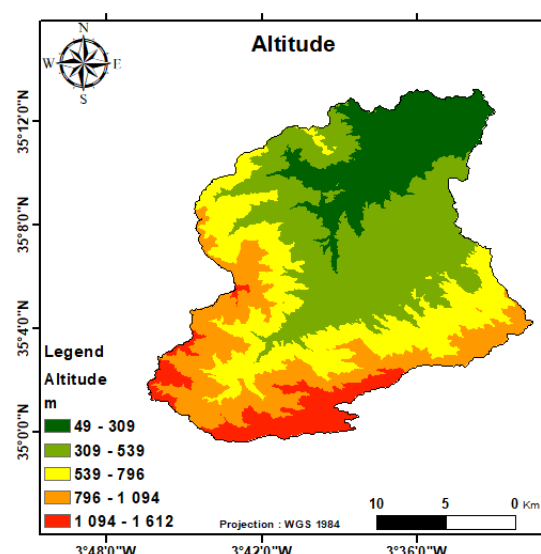
b- Les fichiers Dérivés du MNT

À partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), on peut extraire plusieurs types de fichiers et d'informations dérivées.

- **Données d'altitude brutes**

Le MNT peut être fourni sous forme de raster (chaque pixel contient l'altitude) ou de vecteur (points avec coordonnées et altitude) (fig. 70).

Figure 58: Carte d'altitude du bassin de Boudinar



- **Cartes de pentes (Slope)**

À partir du MNT, on peut calculer la pente de chaque cellule en degrés ou en pourcentage.

Utilité : analyse des risques d'érosion, aménagement du territoire, choix de tracés routiers.

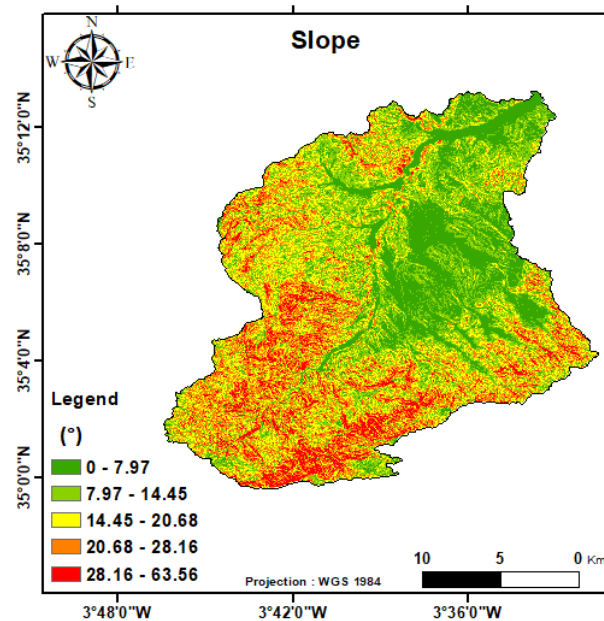


Figure 59: Carte de la pente du bassin de Boudinar

- **Cartes d'exposition (Aspect)**

L'exposition indique l'orientation des pentes (nord, sud, est, ouest).

Utilité : études agricoles (ensoleillement), écologiques, climatiques.

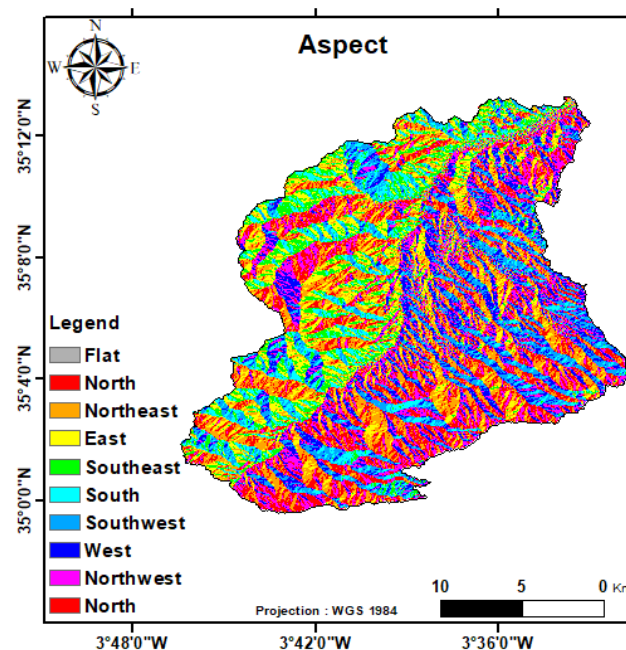


Figure 60: Carte d'exposition du bassin de Boudinar

- **Carte d'ombrage (Hillshade)**

Représentation visuelle du relief simulant la lumière et les ombres.

Utilité : donner un effet 3D aux cartes, améliorer la lisibilité du relief.

- **Courbes de niveau (Contours)**

Lignes reliant des points d'altitude identique, extraites du MNT.

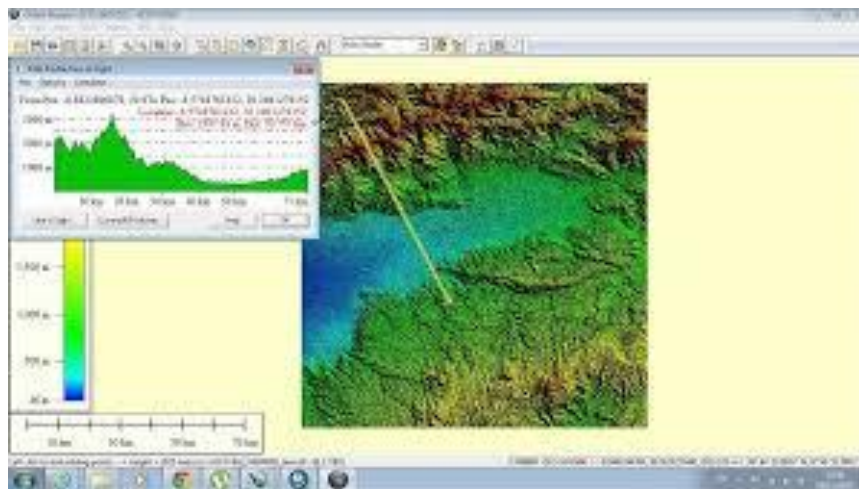
Utilité : cartographie topographique, modélisation du terrain, génie civil.



- **Profils topographiques**

Graphiques représentant l'altitude le long d'un tracé.

Utilité : études d'implantation de routes, sentiers, lignes électriques.



- **Réseaux hydrographiques et bassins versants**

Extraction des rivières, chenaux et zones de drainage.

Utilité : hydrologie, gestion des inondations, aménagement hydraulique.

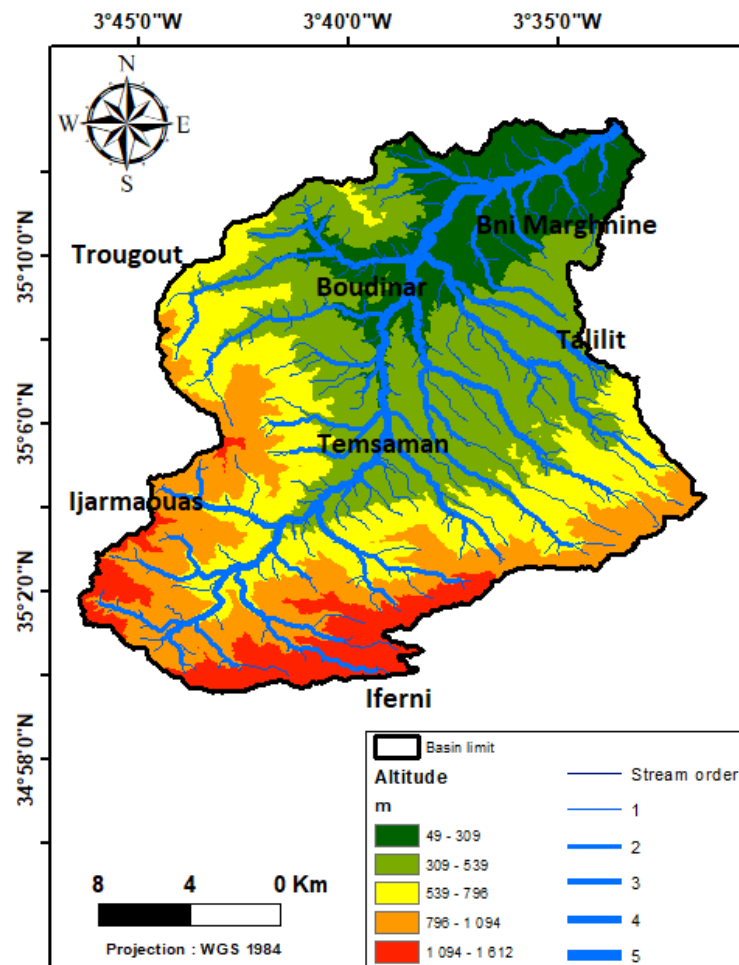


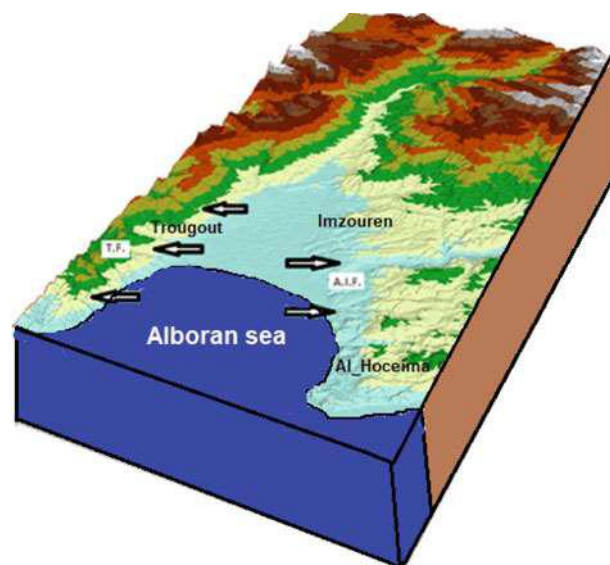
Figure 61: Carte de réseaux hydrographique du bassin versant de Boudinar

• Modèles 3D

Conversion du MNT en maillages ou surfaces tridimensionnelles.

Utilité : visualisations 3D, impression 3D, simulations paysagères.

Figure 62: Visualisation en 3D du bassin inférieur de Nekor

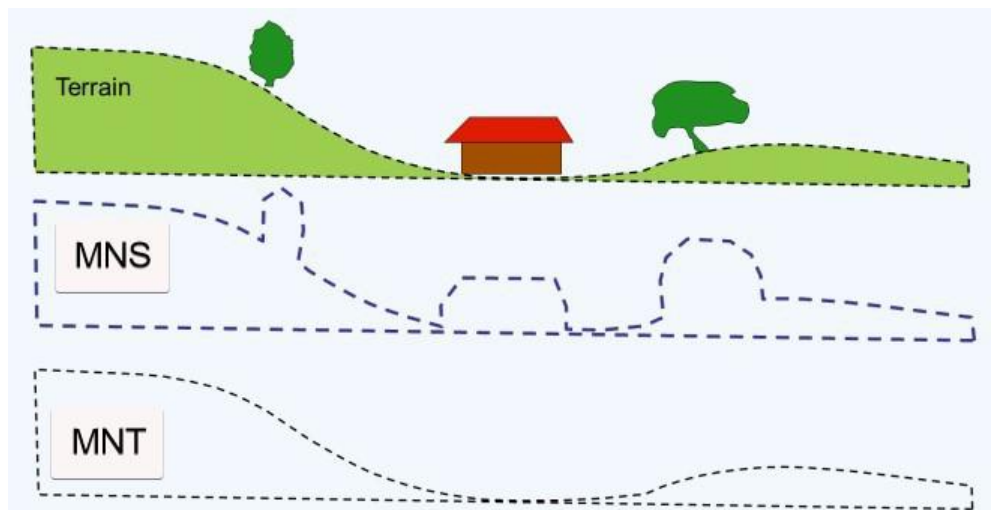


3- Modèle Numérique de Surface (MNS)

a- Définition

Un Modèle Numérique de Surface (MNS), en anglais Digital Surface Model (DSM), est une représentation numérique de la surface terrestre incluant toutes les structures et objets présents sur le sol.

Contrairement au Modèle Numérique de Terrain (MNT), qui ne décrit que le relief du sol nu, le MNS prend en compte : la végétation, les bâtiments, les infrastructures, et toute autre élévation au-dessus du sol.



b- Conclusion

Le MNT est une représentation de l'altitude du « terrain nu » sans infrastructure, alors que le MNS est un modèle d'altitude comprenant les bâtiments et les arbres. La différence entre ces deux modèles va donner une estimation de la hauteur des objets du territoire appelé modèle numérique de hauteur (MNH).

Les données altimétriques de base peuvent être produits par différentes technologies :

- La photogrammétrie
- Les levés terrestres
- Le balayage laser (LiDAR)
- Le radar

Références

Guellouh Sami. 2019. Introduction à la géomatique. Institut des sciences de la terre et de l'univers. Université Batna.

Serge Lhomme. Introduction à la géomatique. Université paris-Est Créteil.

Kévin Bedin. Systèmes de coordonnées.

Hamlaoui Salim. Levée topographique technique et application. Département de génie civil. Université des frères Mentouri.

La bathymétrie « principes et outils ». EscaDrone.

Pierre H. FLAMANT. Comprendre la science du lidar. Cahier technique.

Pierre Bosser. GNSS : Systèmes globaux de positionnement par satellite. École Nationale des Sciences Géographiques. Département Positionnement Terrestre et Spatial. 2012-2013

Wolf, P., & Dewitt, B. (2000). Elements of Photogrammetry. 3rd ed. 2000

Mavic Mini. Guide d'utilisateur. 2021

Elise Wiederkehr, Simon Dufour, Hervé Piégay. Apport des techniques d'imagerie pour la caractérisation physique des corridors fluviaux. 2008

G. Weger. Cartographie : sémiologie graphique et conception cartographique. Ecole nationale des sciences géographiques. 1999