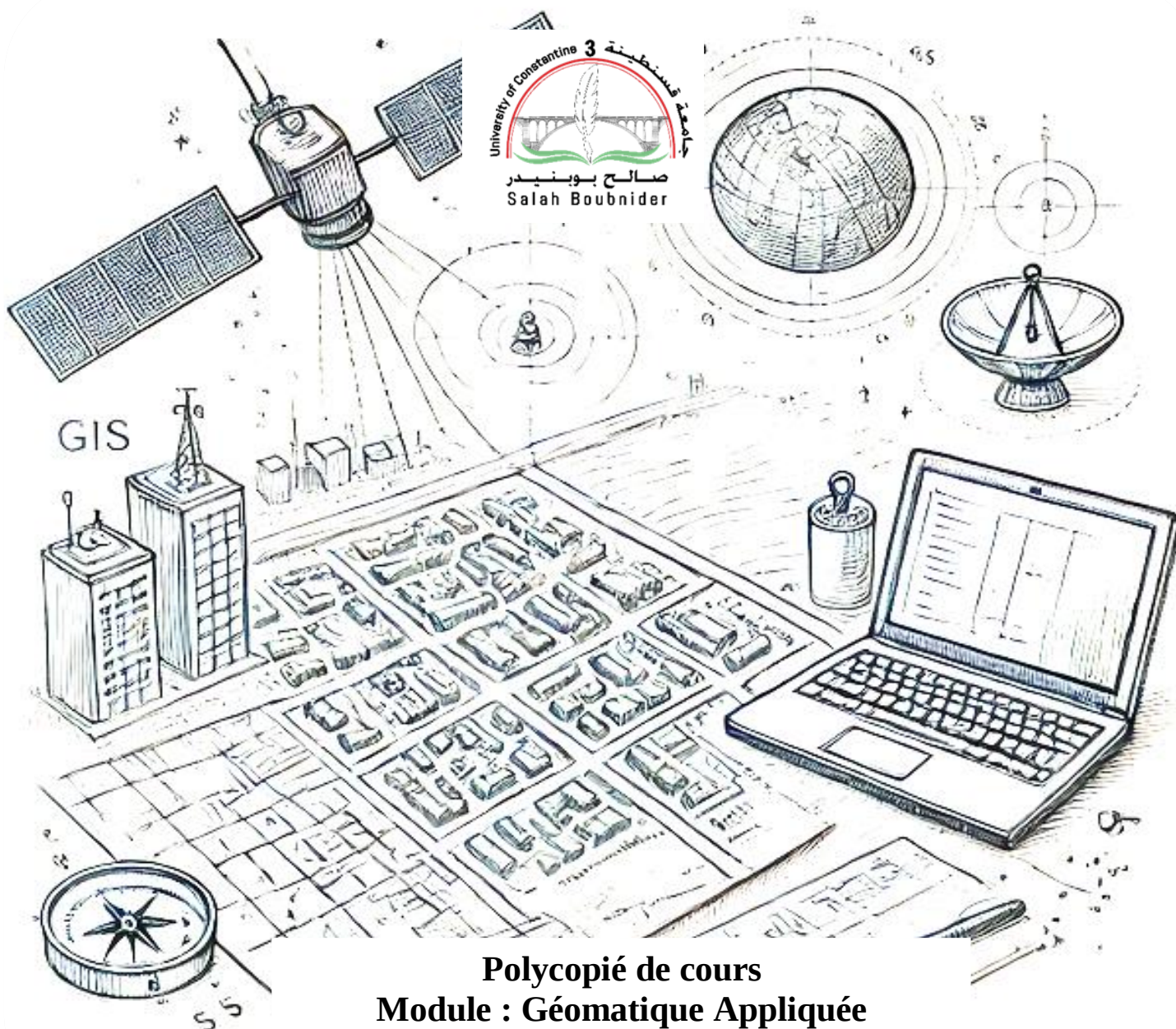


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Constantine 3
Faculté d'architecture d'urbanisme
Département d'urbanisme



Polycopié de cours
Module : Géomatique Appliquée
Adressé aux étudiants de : Master 2 Urbanisme

Préparé par
Dr Bourahli Radja Maya

:

Année universitaire : 2024-2025

Table des matières

Avant-propos

COURS 1 : Introduction à la Géomatique

1-Définition et concepts fondamentaux

1-1-Qu'est-ce que la géomatique?

1-2-Importance de la géomatique en urbanisme

2- Composantes de la géomatique:

2-1-Systèmes d'Information Géographique (SIG)

2-2-Télédétection

2-3-Géolocalisation

2-4-Cartographie Numérique

2-5-Géodésie

2-6-Informatique Géographique

2-7-Bases de Données Géographiques

2-8-Modélisation Spatiale

3- Applications en urbanisme

3-1-Planification Urbaine

3-2-Gestion des Transports

3-3-Aménagement du Territoire

3-4-Études d'Impact Environnemental

3-5-Gestion des Catastrophes

3-6-Surveillance et Sécurité Urbaines

3-7-Gestion des Services Urbains

3-8-Démographie Urbaine

4- Historique

COURS 2: Utilisation des Prérequis des SIG en Urbanisme

1- Les Prérequis des SIG en Urbanisme

1-1-Introduction aux SIG

2-Principes de base des SIG

2-1-Données Géo spatiales

2-2-Couches d'Information

2-3-Analyse Spatiale

2-4-Visualisation

3-Acquisition des Données Géo spatiales

- 3-1-Télédétection capture**
- 3-2-GPS (Global Positioning System)**
- 3-3-Cartographie Traditionnelle**
- 3-4-Enquêtes sur le Terrain**
- 3-5-Bases de Données Existantes**
- 4-Structure des Données dans un SIG**
- 4-1-Données Vectorielles**
- 4-2-Données Raster**
- 5- Analyse spatiale en urbanisme**
- 6- Exemples d'applications**
- 6-1-Planification Urbaine à Calgary, Canada**
- 6-2-Gestion des Catastrophes à Tokyo, Japon**
- 6-3-Aménagement du Territoire à Paris, France**
- 6-4-Mobilité Urbaine à Singapour**
- 6-5-Revitalisation Urbaine à Détroit, États-Unis**
- 6-6-Gestion des Eaux Pluviales à Copenhague, Danemark**
- 6-7-Gestion du Territoire à Riyad**
- 6-8-Gestion des Ressources en Eau à Djeddah**
- 6-9-Planification des Transports à La Mecque**
- 6-10-Gestion des Zones Côtières à Dammam**

COURS 3 : Photo interprétation

- 1-les aspects de la photo-interprétation**
- 1-1-Collecte de Données**
- 1-2- Analyse spatiale**
- 1-3-Connaissances du Terrain**
- 1-4-Identification des caractéristiques d'objets**
- 1-5-Interprétation des Changements**
- 1-6-Utilisation en Géomatique**
- 2- Fondements de la photo-interprétation**
- 2-1-Caractéristiques Visuelles**
- 2-2-Connaissances du Terrain**
- 2-3-Sensibilité aux Détails**

2-4-Identification des Signatures Spectrales

2-5-Analyse Comparative

2-6-Corrélation avec d'Autres Données

2-7-Intégration dans les SIG

3-Principes de l'Imagerie Aérienne

3-1-Perspective

3-2-Résolution Spatiale

3-3-Spectre Électromagnétique

3-4-Échelle

3-5-Angle de Vue

4- Les étapes d'interprétation d'Images

4-1-Identification des

4-2-Utilisation de Clés de Classification

4-3-Analyse de la Texture

4-4-Étude des Modèles

4-5-Comparaison Temporelle

4-6-Vérification sur le Terrain

4-7-Intégration dans un Contexte Spatial

5- La Photo-interprétation et ses Applications en Urbanisme

5-1-Planification Urbaine

5-2-Zonage et Utilisation des Sols

5-3-Identification des Éléments Urbains

5-4-Analyse des Changements dans l'Utilisation des Sols

5-5-Gestion des Infrastructures

5-6-Études d'Impact Environnemental

COURS 4 : La Télédétection-1-

1-définition

2- Le rayonnement électromagnétique

3- L'acquisition des images satellitaires

3- L'acquisition des images satellitaires

4- Les capteurs

4-1- Les capteurs passifs

4-2- Les capteurs actifs

5-Principales Caractéristiques de la Télédétection :

5-1-Capteurs

5-2-Plates-formes.

5-3-Spectre Électromagnétique

5-4- Le milieu perturbateur

5-5- La cible

5-6- Système de traitement des données

***Acquisition des Données**

***Prétraitement**

***Correction Atmosphérique**

***Calibration**

***Analyse Spectrale**

***Interprétation**

COURS 5 : La télédétection -2-

6-Caractéristiques d'une image Satellitaire : Les performances des capteurs

6-1- Résolution Spatiales (surfaces couvertes par la scène et le pixel)

6-2- Résolution Spectrales (nombre de bandes spectrales)

6-3- Résolution Radiométriques (sensibilité du capteur)

6-4- Résolution Temporelles (temps de revisite)

6-5-Bande Spectrale :

7-Les caractéristiques des bandes spectrales (interprétation monocanale)

8- Les étapes de la télédétection

9- Les signatures spectrales

COURS 6 : La télédétection -3-

10- Exemple de satellites et capteurs

10-1- Type de satellites

10-1-1 Les satellites géostationnaires

10-1-2 Les satellites à défilement se déplacent par rapport à la surface de la Terre

11- Caractéristiques du satellite Landsat 9

11-1-Points forts

11-2-Les points faibles

12-Les spécificités thématiques des bandes spectrales

13-Lecture et affichage d'une image

13-1-Affichage en composition colorée: Combinaisons de bandes spectrales

13-2- Types de composition colorée

14-Les indices

14-1-Indices de végétation simple

14-2-Indices de végétation normalisé

14-3- L'indice du bâti

14-4- L'indice de l'eau NDWI

15-Les Classifications sur les Images Satellitaires

15-1- Définition

15-2- Types de classification

15-2-1-Classification Supervisée :

15-2-2-Classification Non Supervisée :

16-Les avantages et inconvénients de la télédétection

16-1- Les avantages de la télédétection

16-2- Les inconvénients de la télédétection

Références bibliographiques

Table des figures

Figure 1 : Les Composantes de la géomatique.....	12
Figure 2:Les Principes de base des SIG	19
Figure 3:Structure des Données dans un SIG	20
Figure 4:Etapes de la photo-interprétation.....	27
Figure 5:Le rayonnement électromagnétique	29
Figure 6:l'acquisition des images satellitaires	30
Figure 7:Capteurs passifs.....	30
Figure 8:capteurs actifs.....	31
Figure 9:Quelques exemples de satellites	32
Figure 10:Les domaines spectraux.....	32
Figure 11:Le spectre électromagnétique	33
Figure 12:Nature et propagation d'une onde électromagnétique	34
Figure 13:Les caractérisée d'une onde Electromagnétique	35
Figure 14:Le milieu perturbateur	37
Figure 15:La cible	38
Figure 16:la Résolution Spatiale	39
Figure 17:le champs global b'observation	40
Figure 18:Résolution Spectrale	40
Figure 19: Résolution Radiométrique	41
Figure 20:Résolution Temporelle.....	42
Figure 21:Les étapes de la télédétection.....	44
Figure 22:Les signatures spectrales.....	45
Figure 23:Exemple de satellites et capteurs.....	46
Figure 24: exemples de satellites géostationnaires	46
Figure 25:Les satellites à défilement.....	47
Figure 26: satellite Landsat 9.....	48
Figure 27:Lecture et affichage d'une image satellitaire	51
Figure 28:exemple sur l'Indices de végétation simple.....	53
Figure 29:EXEMPLE SUR L'INDICES DE VEGETATION NORMALISE.....	54
Figure 30:le rôle de l'indice de végétation par différence normalisée	55
Figure 31:exemple de l'indice du bâti.....	55
Figure 32:exemple de l'indice de l'eau	56
Figure 33:les étapes et l'objectif de la classification.....	57
Figure 34:Exemple de classification d'image	59

Table des tableaux

Tableau 1:Principales caractéristiques des satellites Landsat	49
Tableau 2:Les spécificités thématiques des bandes spectrale	51
Tableau 3:Tableau des combinaisons de bandes.....	52

AVANT PROPOS

Fiche contact du cours

Faculté : D'Architecture et d'Urbanisme Université Constantine3

Département : Urbanisme

Public cible : 2ème année Master

Intitulé de l'UE : Méthodologique 3

Intitulé du cours : géomatique appliquée

Crédit : 03

Coefficient : 03

Durée : 14 semaines

Enseignant : Dre Bourahli Radja Maya -Maitre de Conférence B-

Mail professionnel : radja.bourahli@univ-constantine3.dz

Présentation du cours

Ce polycopié pédagogique s'adresse aux étudiants de deuxième année Master en Urbanisme

La géomatique comprenant la **photo-interprétation**, la **télédétection** et les **systèmes d'information géographique**. Elle sera introduite tant sur le plan des concepts et méthodes que sur le plan pratique et opérationnel pour les domaines de spécialisations des urbanistes. La photo-interprétation familiarisera l'étudiant aux notions d'analyse sémantique et à la démarche d'interprétation visuelle. Les bases physiques du rayonnement électromagnétique et la description détaillée de ses propriétés serviront de base à la compréhension des différents systèmes d'observation de la terre, y compris les systèmes radar. Les méthodes de pré-traitement du signal, de traitement numérique et d'analyse statistique des images seront détaillées et mises en oeuvre dans le cadre d'exercices pratiques. Les concepts de base des systèmes d'informations géographiques seront approfondis ; les méthodes d'analyse spatiale et de représentations cartographiques seront décrites. A travers l'apprentissage de logiciels de traitement d'images et de système d'information géographique, l'étudiant sera confronté à toutes les étapes de l'interprétation d'images, de la constitution, de la gestion et de l'exploitation d'une base de données cartographiques dans le domaine de l'environnement en général.

Objectifs de l'enseignement

- Connaissance approfondie des concepts et méthodes de la géomatique appliquées aux systèmes de productions agricoles, à la gestion des ressources naturelles, à l'aménagement du territoire et à l'environnement en général.
- Maîtrise opérationnelle des concepts, des méthodes et des outils informatiques liées à la photo-interprétation, la télédétection spatiale et aux systèmes d'informations géographiques
- Capacité à mener l'analyse conceptuelle d'une problématique, de formuler une stratégie d'acquisition, d'organisation et de traitement de données géo référencées et/ou cartographique, et de la mettre en œuvre.
- Capacité d'adaptation à l'évolution des technologies de l'information

Mode d'évaluation : Contrôle continu, examen.

Nature du contrôle	Pondération en %
Examen	50 %
Continue	50 %
Total	100 %

Connaissances préalables recommandées :

Connaissance de la statistique

COURS 1 : Introduction à la Géomatique

L'intégration de la géomatique dans le domaine urbain représente une avancée significative dans la gestion, la planification et le développement des espaces urbains. La géomatique, qui combine les sciences de la géographie et de l'informatique, offre des outils puissants pour la collecte, l'analyse et la représentation des données spatiales. Dans le contexte urbain, cela se traduit par une meilleure compréhension des dynamiques urbaines, une prise de décision plus éclairée et une optimisation des ressources.

Ce module vise à fournir aux étudiants les compétences nécessaires pour appliquer les principes de la géomatique dans le domaine urbain. Il abordera les concepts fondamentaux tels que la cartographie numérique, la télédétection, les systèmes d'information géographique (SIG) et d'autres technologies liées. Les étudiants auront l'opportunité d'explorer des études de cas concrets, d'acquérir des compétences pratiques dans l'utilisation des logiciels spécialisés, et d'analyser des données géo spatiales pour résoudre des problématiques urbaines spécifiques.

Ce module se veut une passerelle entre la théorie géomatique et son application pratique dans le contexte complexe des environnements urbains. Ils seront amenés à développer une vision critique et stratégique, en comprenant comment la géomatique peut contribuer de manière significative à la planification urbaine durable, à la gestion des ressources, et à l'amélioration de la qualité de vie dans les villes modernes.

1-Définition et concepts fondamentaux

1-1-Qu'est-ce que la géomatique?

La géomatique est une discipline qui intègre différentes technologies et méthodologies pour acquérir, représenter, analyser et interpréter des données spatiales. Elle combine des aspects de la géographie, de la cartographie, de l'informatique, de la statistique et de l'ingénierie afin de traiter des informations liées à la position géographique et à la distribution spatiale des phénomènes.

Cette discipline repose sur l'utilisation de divers outils et technologies, tels que les systèmes d'information géographique (SIG), la télédétection, le positionnement par satellite (comme le GPS), la cartographie numérique, et d'autres techniques liées à la gestion et à l'analyse des données géo spatiales.

Ses racines sont "Géo", qui veut dire Terre, et "matique" vient de : informatique, soit le traitement automatique de l'information géographique.

Les applications de la géomatique sont vastes et couvrent de nombreux domaines tels que l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles, l'urbanisme, la gestion des catastrophes, la gestion de l'environnement, la planification des réseaux de transport, et bien d'autres. En résumé, la géomatique fournit des moyens efficaces pour comprendre et traiter l'information spatiale, ce qui s'avère essentiel dans de nombreux secteurs d'activité.

La géomatique englobe un large éventail de compétences et de technologies qui convergent vers une compréhension approfondie de l'espace géographique. Les données géospatiales, qui incluent des informations liées à la localisation et à la distribution spatiale, sont au cœur de la géomatique. Ces données peuvent provenir de sources variées telles que les satellites, les capteurs terrestres, les enquêtes sur le terrain, et même les dispositifs GPS intégrés dans les téléphones mobiles.

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) constituent l'un des piliers essentiels de la géomatique. Ils permettent de stocker, gérer, analyser et représenter graphiquement des données spatiales. Les professionnels de la géomatique utilisent ces outils pour résoudre des problèmes complexes liés à l'espace, que ce soit pour la planification urbaine, la surveillance environnementale, la gestion des ressources naturelles, ou d'autres applications spécialisées.

La télédétection est une autre composante cruciale de la géomatique, utilisant des satellites ou des avions pour collecter des données à distance sur la surface terrestre. Ces données peuvent être utilisées pour surveiller les changements environnementaux, étudier la végétation, évaluer les risques naturels, et bien d'autres applications.

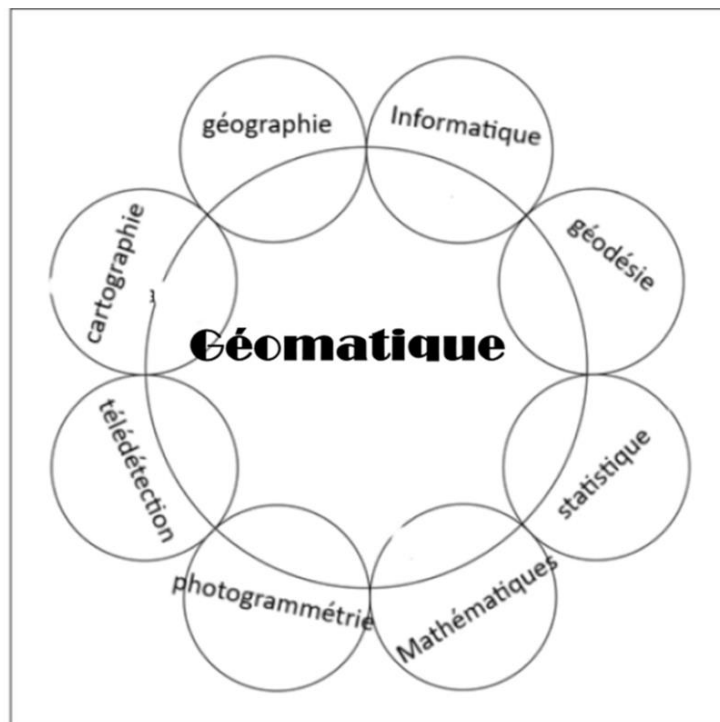


FIGURE 1 : LES COMPOSANTES DE LA GEOMATIQUE
Source : cours SIG. Larbi Abdelmadjid

En somme, la géomatique joue un rôle central dans notre compréhension du monde qui nous entoure. En exploitant les avancées technologiques pour collecter, traiter et interpréter des données spatiales, elle offre des solutions innovantes pour relever les défis complexes liés à la gestion des territoires et des ressources.

1-2-Importance de la géomatique en urbanisme

L'importance de la géomatique en urbanisme réside dans son rôle essentiel dans la collecte, l'analyse et la gestion des données spatiales, fournissant ainsi des outils puissants pour comprendre, planifier et améliorer les environnements urbains. La géomatique joue un rôle central dans le processus de planification urbaine. Voici quelques points soulignant cette importance :

Analyse spatiale : La géomatique permet d'effectuer des analyses spatiales approfondies qui aident à comprendre la distribution des phénomènes urbains, tels que la densité de population, l'utilisation des sols, les flux de circulation, etc. Ces analyses sont cruciales pour la prise de décision en urbanisme.

Planification urbaine : Les outils géomatiques, en particulier les systèmes d'information géographique (SIG), facilitent la planification urbaine en intégrant des données diverses, comme les infrastructures existantes, les zones résidentielles, les espaces verts, et en permettant une modélisation prospective pour anticiper les besoins futurs.

Gestion des ressources : En utilisant la géomatique, les urbanistes peuvent gérer efficacement les ressources urbaines telles que l'eau, l'énergie et les déchets. Cela contribue à une utilisation **plus durable des ressources et à une planification plus efficace des services publics.**

Évaluation des risques : Les techniques de géomatique, comme la télédétection, permettent d'évaluer les risques naturels et environnementaux tels que les inondations, les glissements de terrain, ou la pollution, facilitant ainsi la mise en place de mesures préventives.

Participation citoyenne : La géomatique offre des outils pour la collecte et la visualisation de données qui favorisent la participation citoyenne. Les habitants peuvent être impliqués dans le **processus de planification en partageant des informations sur leur environnement local.**

Optimisation des déplacements : Les systèmes de géolocalisation et les applications cartographiques contribuent à optimiser les déplacements urbains en fournissant des informations en temps réel sur les itinéraires, les transports en commun, les conditions de circulation, etc.

Surveillance de l'évolution urbaine : La géomatique permet de surveiller l'évolution des villes au fil du temps, ce qui est crucial pour évaluer l'efficacité des politiques d'urbanisme, anticiper les besoins futurs et ajuster les plans en conséquence.

2- Composantes de la géomatique

La géomatique regroupe différentes composantes qui travaillent de concert pour acquérir, traiter et analyser des données géospatiales. Voici les principales composantes de la géomatique :

2-1-Systèmes d'Information Géographique (SIG) : Les SIG sont des outils logiciels qui permettent de stocker, gérer, analyser et représenter graphiquement des données spatiales. Ils intègrent des informations provenant de diverses sources pour faciliter la prise de décision en matière de planification, de gestion et d'analyse géographique.

2-2-Télédétection : La télédétection implique l'acquisition d'informations sur la surface terrestre à l'aide de capteurs montés sur des satellites, avions ou drones. Cela inclut la capture d'images aériennes, de données LiDAR, et d'autres types de données qui sont utilisées pour surveiller et cartographier des zones étendues.

2-3-Géolocalisation : Cette composante utilise des technologies comme le GPS (Global Positioning System) pour déterminer la position précise d'objets, de personnes ou d'événements sur la Terre. La géolocalisation est fondamentale pour de nombreuses applications, de la navigation routière à la cartographie en temps réel.

2-4-Cartographie Numérique : La cartographie numérique implique la création de cartes électroniques à partir de données géospatiales. Elle offre des moyens dynamiques et interactifs de représenter des informations géographiques, allant au-delà des cartes traditionnelles.

2-5-Géodésie : La géodésie concerne la mesure et la représentation de la surface de la Terre. Elle fournit des références précises pour la cartographie et la modélisation tridimensionnelle de la planète.

2-6-Informatique Géographique : Cette composante englobe le développement de logiciels, d'algorithmes et d'applications dédiées à la gestion et à l'analyse de données géospatiales. Elle joue un rôle crucial dans la programmation d'outils personnalisés pour répondre aux besoins spécifiques de la géomatique.

2-7-Bases de Données Géographiques : Ces bases de données sont conçues pour stocker des informations géospatiales de manière structurée. Elles permettent un accès efficace aux données, facilitant ainsi leur gestion et leur utilisation dans divers contextes.

2-8-Modélisation Spatiale : La modélisation spatiale implique la création de représentations mathématiques des phénomènes géographiques. Ces modèles aident à simuler des situations réelles et à prévoir des scénarios futurs.

L'intégration de ces composantes permet à la géomatique de jouer un rôle crucial dans la compréhension, la planification et la gestion des espaces géographiques, tant à l'échelle locale que globale.

3- Applications en urbanisme

Les applications de la géomatique en urbanisme sont variées et elles contribuent de manière significative à la planification, à la gestion et au développement durables des espaces urbains. Voici quelques exemples d'applications spécifiques en urbanisme :

3-1-Planification Urbaine : Les systèmes d'information géographique (SIG) sont largement utilisés pour la planification urbaine. Ils permettent d'intégrer des données sur l'utilisation des sols, la démographie, les infrastructures existantes, et d'analyser ces informations pour prendre des décisions éclairées concernant le développement futur de la ville.

3-2-Gestion des Transports : La géomatique contribue à la planification des réseaux de transport en analysant les flux de circulation, en optimisant les itinéraires, en planifiant les transports en commun et en évaluant l'impact des nouvelles infrastructures sur la mobilité urbaine.

3-3-Aménagement du Territoire : Les outils géomatiques aident à définir des politiques d'aménagement du territoire en considérant des facteurs tels que la densité de population, la préservation des espaces verts, la localisation des équipements publics et l'accessibilité.

3-4-Études d'Impact Environnemental : La géomatique est utilisée pour évaluer les impacts environnementaux des projets urbains. Elle permet d'analyser les changements dans l'utilisation des sols, l'empreinte carbone, la qualité de l'air, et d'autres facteurs environnementaux.

3-5-Gestion des Catastrophes : En cas de catastrophes naturelles ou d'urgences, la géomatique est cruciale pour la gestion des crises. Elle permet de cartographier les zones touchées, d'évaluer les risques, de coordonner les opérations de secours et de planifier la reconstruction.

3-6-Surveillance et Sécurité Urbaines : La géomatique peut être utilisée pour la surveillance urbaine en analysant les données de vidéosurveillance, en cartographiant les zones à risque, et en contribuant à la planification de dispositifs de sécurité.

3-7-Gestion des Services Urbains : Les technologies géo spatiales sont appliquées à la gestion des services urbains tels que l'eau, l'électricité, les déchets, et les réseaux de télécommunications. Cela permet une utilisation efficace des ressources et une meilleure qualité de vie pour les citoyens.

3-8-Démographie Urbaine : La géomatique facilite l'analyse de la répartition démographique, la croissance de la population et la planification des logements en utilisant des données géo spatiales pour comprendre les besoins de logement et d'infrastructures.

Ces applications démontrent comment la géomatique en urbanisme contribue à une gestion plus efficiente, équitable et durable des villes, en tirant parti de la puissance de l'analyse spatiale et des données géo spatiales.

4- Historique

Le terme "géomatique" a été introduit pour la première fois au Canada, à la fin des années 1960, par le géographe Roger F. Tomlinson. Roger Tomlinson est souvent considéré comme le père des Systèmes d'Information Géographique (SIG). Il a joué un rôle clé dans le développement et la promotion de cette discipline émergente, qui combinait les principes de la géographie avec les capacités émergentes de l'informatique.

C'est dans ce contexte que le terme "géomatique" a été créé pour décrire l'intégration de la géographie et de l'informatique dans le traitement des données spatiales. Depuis lors, le champ de la géomatique a considérablement évolué et s'est répandu à l'échelle mondiale, influençant de nombreux domaines allant de la cartographie à la gestion des ressources et à la planification urbaine.

L'histoire de la géomatique remonte aux débuts de la cartographie et de la mesure de la **Terre**.

4-1-l'évolution de la géomatique au fil du temps :

Cartographie Ancienne : Les premiers pas de la géomatique remontent à l'Antiquité, avec les premières cartes réalisées par les civilisations mésopotamiennes, égyptiennes et grecques. Les cartographes utilisaient des observations astronomiques et des mesures du terrain pour représenter les territoires.

Révolution Scientifique : À partir de la Renaissance, la cartographie a connu des avancées significatives avec les travaux de scientifiques tels que Gerardus Mercator, qui a développé des projections cartographiques, et Edmund Halley, qui a utilisé des méthodes trigonométriques pour mesurer la distance entre la Terre et la Lune.

Invention des Instruments de Mesure : Au 18e siècle, des instruments de mesure plus précis ont été développés, facilitant la cartographie terrestre.

Photographie Aérienne : L'invention de la photographie aérienne au 19e siècle a marqué un tournant majeur. Les premières images aériennes ont été utilisées pour créer des cartes plus détaillées, ouvrant la voie à la télédétection.

Télédétection et Développement des SIG : Au milieu du 20e siècle, la télédétection par satellite est devenue une réalité, permettant la collecte de données à distance. Dans les années 1960, le développement des premiers Systèmes d'Information Géographique (SIG) a commencé, combinant la cartographie avec la gestion informatisée de données spatiales.

Informatisation et Technologie GPS : L'avènement de l'informatique dans les années 1970 et 1980 a facilité le stockage, l'analyse et la représentation graphique des données géospatiales. Parallèlement, le GPS (Global Positioning System) a été développé, offrant des capacités de géolocalisation précises.

Accessibilité des Données Géospatiales : Avec l'avènement d'Internet, la facilité d'accès et de partage des données géospatiales a considérablement augmenté. Des services de cartographie en ligne, tels que Google Maps, ont démocratisé l'accès à l'information géographique.

Évolution des Technologies : Les avancées continues dans les technologies telles que la réalité augmentée, l'intelligence artificielle et l'Internet des objets ont influencé la géomatique, ouvrant de nouvelles possibilités pour la collecte et l'analyse de données géospatiales.

Aujourd'hui, la géomatique est devenue omniprésente dans de nombreux domaines, contribuant de manière significative à la compréhension et à la prise de décision dans notre monde géographique complexe.

COURS 2: Utilisation des Prérequis des SIG en Urbanisme

1- Les Prérequis des SIG en Urbanisme

L'intégration des prérequis des Systèmes d'Information Géographique (SIG) en urbanisme, tels que l'introduction aux SIG, le géo référencement, la création de shapefile, le dessin, la création de géodatabase, et l'utilisation des Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD), offre un ensemble complet de compétences pour les urbanismes. Voici comment ces compétences sont appliquées dans le domaine urbain :

1-1-Introduction aux SIG : Cette étape initiale familiarise les urbanistes avec les concepts fondamentaux des SIG, leur permettant de comprendre comment ces systèmes peuvent être appliqués dans le contexte de l'urbanisme. Cela inclut la compréhension des données spatiales, des couches d'information, et des fonctionnalités analytiques.

Géoréférencement : La compétence en géo référencement est cruciale pour aligner des données provenant de différentes sources, comme des plans papier ou des images aériennes, sur une référence géographique commune. En urbanisme, cela permet une intégration harmonieuse des informations spatiales pour une analyse cohérente.

Création de Shapefile : La création de shapefile permet aux urbanistes de représenter graphiquement des objets spécifiques tels que des bâtiments, des rues, des zones résidentielles, etc. Ces shapefiles servent de base à la cartographie et à l'analyse spatiale.

Dessin : Les compétences en dessin dans un environnement SIG permettent aux urbanistes de créer des éléments géographiques directement sur une carte. Cela peut inclure la planification de nouveaux développements, la conception de zones vertes, ou la délimitation de zones spécifiques pour des projets urbains.

Création de Géodatabase : La création de géodatabase offre une structure organisée pour stocker et gérer des données géo spatiales de manière plus avancée qu'un simple shapefile. En urbanisme, cela facilite la gestion des informations sur le long terme, permettant une modélisation et une analyse plus complexes.

Utilisation des SGBD : Les urbanistes utilisent des Systèmes de Gestion de Bases de Données pour stocker, gérer et interroger efficacement de grandes quantités de données spatiales. Cela permet une gestion robuste des informations urbaines et une intégration transparente avec d'autres bases de données non spatiales.

Elaboration de Cartes Thématiques : Les compétences acquises dans l'utilisation des SIG permettent aux urbanistes de créer des cartes thématiques qui mettent en évidence des caractéristiques spécifiques de l'environnement urbain. Cela peut inclure des cartes représentant la densité de population, la répartition des équipements publics, les zones à risque, etc.

Visualisation de Données Urbaines : Les cartes thématiques sont des outils puissants pour visualiser des données complexes de manière compréhensible. En urbanisme, elles peuvent être utilisées pour représenter graphiquement des aspects variés tels que la répartition des services, les disparités socio-économiques, ou les caractéristiques environnementales.

2-Principes de base des SIG :

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont des outils informatiques conçus pour collecter, stocker, analyser et représenter des données géo spatiales. Les principes de base des SIG incluent :

2-1-Données Géo spatiales : Les SIG traitent des données qui sont liées à des emplacements spécifiques sur la Terre. Ces données peuvent être divisées en deux types principaux : les données vectorielles, qui représentent des objets par des points, des lignes ou des polygones, et les données raster, qui sont organisées en grilles régulières de cellules.

2-2-Couches d'Information : Les informations géo spatiales sont organisées en couches d'information. Chaque couche représente un aspect spécifique du paysage, tel que les routes, les rivières, les bâtiments, etc. La superposition de ces couches permet d'obtenir une représentation complète et complexe d'une zone géographique.

2-3-Analyse Spatiale : Les SIG permettent d'effectuer des analyses spatiales pour étudier les relations entre différentes entités géographiques. Cela inclut la mesure de la distance, la détermination des zones tampons, l'identification des corrélations et la modélisation de scénarios.

2-4-Visualisation : Les SIG offrent des outils de visualisation puissants pour représenter graphiquement des données géo spatiales. Des cartes thématiques, des diagrammes et des graphiques peuvent être générés pour communiquer efficacement des informations complexes.



FIGURE 2: LES PRINCIPES DE BASE DES SIG
Source : auteure d'après Kang Tsung Chang dans GIS

3-Acquisition des Données Géo spatiales :

L'acquisition des données est une étape cruciale dans le processus des SIG. Cela implique la collecte de données provenant de différentes sources, notamment :

3-1-Télédétection : Utilisation d'images satellites, d'aéronefs ou de drones pour capturer des données à distance, souvent sous forme d'images raster.

3-2-GPS (Global Positioning System) : Utilisation de dispositifs GPS pour collecter des données de localisation précises sur le terrain.

3-3-Cartographie Traditionnelle : Utilisation de cartes papier, de plans cadastraux, ou d'autres documents cartographiques existants.

3-4-Enquêtes sur le Terrain : Collecte manuelle d'informations en se déplaçant physiquement sur le terrain pour recueillir des données spécifiques.

3-5-Bases de Données Existantes : Intégration de données géospatiales provenant de sources existantes, telles que des bases de données gouvernementales ou des ensembles de données publiques.

4-Structure des Données dans un SIG :

La structure des données dans un SIG se divise généralement en deux catégories principales :

4-1-Données Vectorielles : Ces données représentent des objets géographiques sous forme de points, de lignes ou de polygones. Par exemple, un bâtiment peut être représenté par un polygone, une route par une ligne, et un point d'intérêt par un point.

4-2-Données Raster : Ces données sont organisées en grilles régulières de cellules, formant une image pixel par pixel. Les images satellites et les modèles numériques d'élévation sont des exemples de données raster.

La combinaison de ces deux types de données permet une représentation complète et détaillée de l'environnement géographique dans un SIG. Les données vectorielles sont souvent utilisées pour des informations précises, tandis que les données raster sont excellentes pour représenter des phénomènes continus tels que l'altitude du terrain.

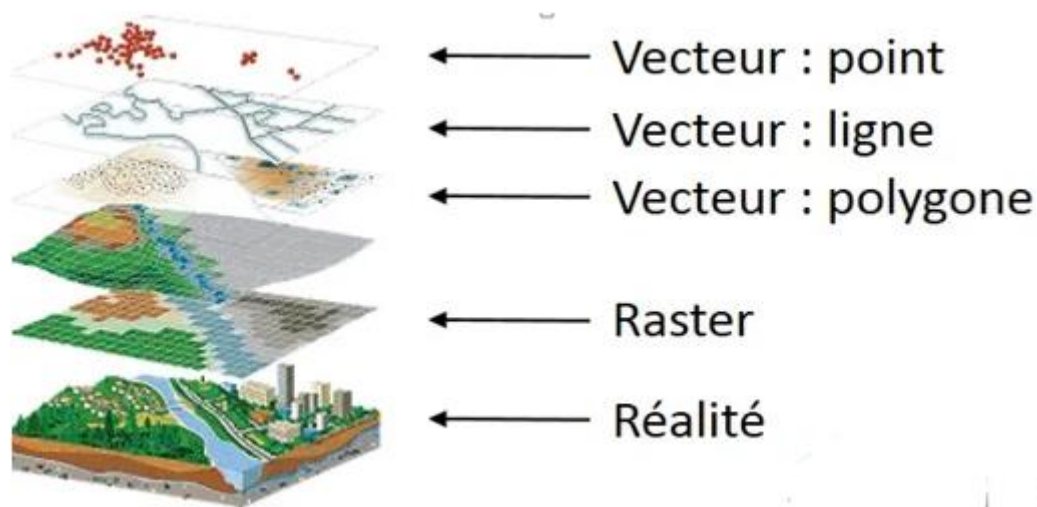


FIGURE 3:STRUCTURE DES DONNEES DANS UN SIG
Source : ESRI France

5- Analyse spatiale en urbanisme

L'analyse spatiale en urbanisme est une approche qui utilise les outils des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour examiner, interpréter et comprendre les relations spatiales entre différents éléments dans un environnement urbain. Voici comment l'analyse spatiale est appliquée en urbanisme :

5-1-Zonage et Planification Urbaine : L'analyse spatiale est utilisée pour définir des zones spécifiques en fonction de critères tels que l'utilisation des sols, la densité de population, et la proximité des infrastructures. Cela facilite la planification urbaine en déterminant où les zones résidentielles, commerciales, industrielles et récréatives devraient être localisées.

5-2-Études de Densité de Population : L'analyse spatiale permet de cartographier et d'analyser la densité de population dans différentes parties de la ville. Cela peut aider à identifier les zones surpeuplées, les quartiers en croissance rapide, et à planifier des équipements et des services en conséquence.

5-3-Modélisation des Flux de Mobilité : En analysant les données de déplacement, l'analyse spatiale aide à comprendre les modèles de mobilité urbaine. Cela inclut l'analyse des flux de trafic, la planification des itinéraires, et l'évaluation des besoins en matière de transport en commun.

5-4-Évaluation des Risques et des Catastrophes : L'analyse spatiale est cruciale pour évaluer les risques liés aux catastrophes naturelles, tels que les inondations ou les séismes. Elle permet de cartographier les zones à risque, d'identifier les populations vulnérables et de planifier des mesures d'atténuation.

5-5-Planification des Espaces Verts : En analysant la répartition des espaces verts et des parcs, l'urbanisme peut s'assurer que ces zones sont accessibles à la population, équilibrant ainsi le développement urbain avec la préservation de l'environnement.

5-6-Études d'Accessibilité aux Services : L'analyse spatiale aide à évaluer l'accessibilité des citoyens aux services essentiels tels que les écoles, les hôpitaux, les centres commerciaux, et les équipements publics. Cela contribue à une répartition équitable des services dans la ville.

5-7-Identification des Quartiers Prioritaires : En utilisant des indicateurs socio-économiques et démographiques, l'analyse spatiale permet d'identifier les quartiers nécessitant une intervention prioritaire en termes de développement, de revitalisation, ou d'amélioration des conditions de vie.

5-8-Évaluation de l'Impact des Projets Urbains : Avant de mettre en œuvre un projet urbain, l'analyse spatiale peut être utilisée pour évaluer son impact sur l'environnement existant. Cela inclut la modélisation de l'ombre des bâtiments, l'analyse des changements dans l'utilisation des sols, et l'évaluation de l'impact visuel.

En intégrant l'analyse spatiale dans le processus de planification urbaine, les décideurs peuvent prendre des décisions éclairées basées sur une compréhension approfondie des relations spatiales, contribuant ainsi à un développement urbain plus efficace, équitable et durable.

6- Exemples d'applications

Études de cas utilisant les SIG en urbanisme

Les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont largement utilisés en urbanisme pour résoudre des problèmes complexes, prendre des décisions informées et optimiser la gestion des ressources. Voici quelques exemples d'applications concrètes et d'études de cas utilisant les SIG en urbanisme

6-1-Planification Urbaine à Calgary, Canada :

Objectif : Optimiser la planification urbaine en tenant compte de la croissance démographique et des besoins en infrastructures.

Utilisation des SIG : Intégration de données sur l'utilisation des sols, la topographie, et les flux de transport pour modéliser différents scénarios de développement. Les urbanistes ont utilisé les résultats pour planifier de manière stratégique les nouvelles infrastructures et zones résidentielles.

6-2-Gestion des Catastrophes à Tokyo, Japon :

Objectif : Améliorer la préparation aux catastrophes naturelles, en particulier les risques sismiques.

Utilisation des SIG : Cartographie des zones à risque sismique, identification des itinéraires d'évacuation, et évaluation de la vulnérabilité des infrastructures critiques. Les données SIG ont été utilisées pour élaborer des plans d'urgence et améliorer la résilience urbaine.

6-3-Aménagement du Territoire à Paris, France :

Objectif : Optimiser l'aménagement du territoire en tenant compte des contraintes environnementales et des besoins de logement.

Utilisation des SIG : Intégration de données sur la démographie, l'utilisation des sols, et l'environnement pour élaborer des plans d'aménagement du territoire durables. Les urbanistes ont utilisé les SIG pour évaluer l'impact des nouveaux projets sur l'environnement et planifier des espaces verts.

6-4-Mobilité Urbaine à Singapour :

Objectif : Améliorer la gestion du trafic et les systèmes de transport en commun.

Utilisation des SIG : Collecte de données en temps réel sur les déplacements, analyse des flux de trafic, et optimisation des itinéraires de transport en commun. Les SIG ont permis de développer des solutions intelligentes pour atténuer la congestion urbaine et améliorer la mobilité.

6-5-Revitalisation Urbaine à Détroit, États-Unis :

Objectif : Redynamiser les quartiers urbains en déclin.

Utilisation des SIG : Cartographie des zones économiquement défavorisées, analyse des taux de criminalité, et identification des opportunités de développement. Les données SIG ont guidé les efforts de revitalisation en ciblant les investissements et les projets de réhabilitation.

6-6-Gestion des Eaux Pluviales à Copenhague, Danemark :

Objectif : Prévenir les inondations urbaines en optimisant la gestion des eaux pluviales.

Utilisation des SIG : Modélisation des bassins versants, cartographie des zones à risque d'inondation, et conception de systèmes de drainage. Les urbanistes ont utilisé les SIG pour planifier des infrastructures vertes et des solutions innovantes pour gérer les eaux pluviales. Ces exemples illustrent comment les SIG sont appliqués de manière variée en urbanisme, démontrant leur utilité dans la prise de décisions éclairées, la planification durable, et la gestion efficace des espaces urbains.

6-7-Gestion du Territoire à Riyad :

Objectif : Planifier et gérer la croissance urbaine rapide de la capitale, Riyad.

Utilisation des SIG : Intégration de données géospatiales pour la planification de l'utilisation des sols, l'analyse des flux de circulation, et la gestion des infrastructures. Les SIG sont utilisés pour optimiser le développement urbain tout en préservant les ressources naturelles.

6-8-Gestion des Ressources en Eau à Djeddah :

Objectif : Optimiser l'utilisation des ressources en eau et atténuer les problèmes de pénurie.

Utilisation des SIG : Cartographie des ressources en eau, suivi de la qualité de l'eau, et modélisation des schémas de consommation. Les SIG aident à élaborer des politiques de gestion de l'eau et à planifier des projets d'approvisionnement en eau.

6-9-Planification des Transports à La Mecque :

Objectif : Améliorer la mobilité et les systèmes de transport dans la ville sainte de La Mecque.

Utilisation des SIG : Collecte de données sur la circulation, analyse des itinéraires de pèlerins, et planification d'infrastructures de transport. Les SIG sont utilisés pour gérer les flux de piétons et de véhicules pendant les périodes de pèlerinage et améliorer la connectivité urbaine.

6-10-Gestion des Zones Côtières à Dammam :

Objectif : Protéger les zones côtières et planifier un développement côtier durable.

Utilisation des SIG : Cartographie des zones humides, suivi des changements côtiers, et gestion des permis de construction. Les SIG sont utilisés pour préserver les écosystèmes côtiers et assurer un développement urbain respectueux de l'environnement.

COURS 3 : Photo interprétation

La photo-interprétation est une méthode d'analyse des photographies aériennes ou satellitaires pour extraire des informations sur la surface terrestre. C'est un processus qui combine l'observation visuelle, la connaissance du terrain et l'interprétation des caractéristiques présentes sur les images.

La photo-interprétation joue un rôle essentiel dans la compréhension et la surveillance de l'environnement terrestre. Elle est utilisée dans divers domaines, de la gestion de l'environnement à la planification urbaine, contribuant à une prise de décision informée et à une utilisation efficace des ressources géospatiales.

1-les aspects de la photo-interprétation

1-1-Collecte de Données : La photo-interprétation commence par la collecte de données visuelles à partir d'images aériennes ou satellitaires. Ces images sont obtenues à partir de plates-formes en altitude, permettant une vue détaillée de la surface terrestre.

1-2- Analyse spatiale : Les photo-interprètes analysent une variété de caractéristiques, telles que les types d'utilisation des sols, les limites urbaines, les cours d'eau, les zones agricoles, les routes, les bâtiments, et d'autres éléments significatifs.

1-3-Connaissances du Terrain : La réussite de la photo-interprétation repose sur la combinaison de compétences en observation visuelle et de connaissances approfondies du terrain. Les interprètes doivent être familiers avec la topographie, la végétation, les structures humaines et d'autres aspects géographiques de la région étudiée.

1-4-Identification des caractéristiques d'objets : Les objets présents sur les images sont identifiés en fonction de leurs caractéristiques visuelles. Par exemple, les bâtiments peuvent être distingués par leur forme et leur taille, les cours d'eau par leur trajectoire, et les zones cultivées par leur texture.

1-5-Interprétation des Changements : La comparaison d'images prises à des moments différents permet d'identifier les changements dans le paysage. Cela peut inclure l'expansion urbaine, les changements d'utilisation des sols, ou d'autres évolutions significatives.

1-6-Utilisation en Géomatique : La photo-interprétation est souvent intégrée dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour enrichir les bases de données spatiales et faciliter des analyses plus approfondies. Les informations extraites des images contribuent à la cartographie, à la planification urbaine, à la gestion des ressources naturelles, et à d'autres domaines de la géomatique.

2- Fondements de la photo-interprétation

Les fondements de la photo-interprétation reposent sur des principes clés qui guident le processus d'analyse visuelle des photographies aériennes ou satellitaires. Voici les principaux fondements de la photo-interprétation :

2-1-Caractéristiques Visuelles : La photo-interprétation se base sur l'observation des caractéristiques visuelles présentes sur les images. Cela inclut la forme, la taille, la couleur, la texture, la tonalité, et d'autres aspects distinctifs des objets présents sur la photographie.

2-2-Connaissances du Terrain : Une compréhension approfondie du terrain est essentielle. Les photo interprètes doivent être familiarisés avec la topographie, la végétation, les infrastructures, et d'autres éléments géographiques spécifiques à la région étudiée.

2-3-Sensibilité aux Détails : La capacité à discerner des détails subtils sur les images est cruciale. Cela nécessite une observation attentive pour identifier des objets tels que des bâtiments, des routes, des rivières, et d'autres éléments qui peuvent ne pas être immédiatement évidents.

2-4-Identification des Signatures Spectrales : Les photointerprètes doivent être capables d'associer des caractéristiques visuelles à des signatures spectrales spécifiques. Par exemple, ils peuvent identifier la signature spectrale d'un type particulier de végétation ou de matériau de construction.

2-5-Analyse Comparative : La comparaison d'images prises à différents moments permet d'identifier les changements dans le paysage. Cela inclut la détection d'expansions urbaines, de changements d'utilisation des sols, et d'autres évolutions au fil du temps.

2-6-Corrélation avec d'Autres Données : Les résultats de la photo-interprétation peuvent être corroborés en les comparant avec d'autres données, qu'elles proviennent de relevés sur le terrain, de données cartographiques existantes, ou d'autres sources d'information géographique.

2-7-Intégration dans les SIG : Les informations extraites par photo-interprétation peuvent être intégrées dans des Systèmes d'Information Géographique (SIG) pour enrichir les bases de données spatiales et permettre des analyses géo spatiales plus avancées.

En combinant ces fondements, les photo interprètes peuvent extraire des informations significatives des images, contribuant ainsi à une compréhension approfondie de la géographie et facilitant la prise de décision dans des domaines tels que la cartographie, la gestion des ressources naturelles et la planification urbaine.

3-Principes de l'Imagerie Aérienne :

3-1-Perspective : Les images aériennes sont capturées depuis des plates-formes en altitude, offrant une perspective en plan incliné de la surface terrestre. La déformation de l'image due à cette perspective doit être prise en compte lors de l'interprétation.

3-2-Résolution Spatiale : La résolution spatiale se réfère à la capacité de l'image à distinguer des détails fins. Une résolution plus élevée permet de voir des objets plus petits. Cela dépend de la qualité de l'instrument d'imagerie et de la distance entre la plate-forme et la surface terrestre.

3-3-Spectre Électromagnétique : Les images aériennes capturent des informations sur différentes parties du spectre électromagnétique, de l'infrarouge au visible. Cela permet d'obtenir des données sur des caractéristiques telles que la végétation, les cours d'eau, et les zones urbaines.

3-4-Échelle : L'échelle de l'image est influencée par la distance entre la caméra et la surface terrestre. Une échelle plus petite capture une plus grande étendue de terrain mais avec une résolution moindre.

3-5-Angle de Vue : L'angle de vue affecte la perception des objets en fonction de leur hauteur. Des angles plus grands peuvent réduire la visibilité des objets au sol.

4- Les étapes d'interprétation d'Images :

4-1-Identification des Caractéristiques : L'interprétation d'images implique l'identification visuelle d'objets et de caractéristiques présents sur l'image, tels que des bâtiments, des routes, des cours d'eau, etc.

4-2-Utilisation de Clés de Classification : Des clés de classification sont souvent utilisées pour aider à attribuer des significations aux objets identifiés. Ces clés peuvent être basées sur des caractéristiques spectrales, spatiales ou d'autres attributs.

4-3-Analyse de la Texture : La texture des objets, telle que perçue sur l'image, peut fournir des informations importantes. Par exemple, la texture d'une forêt peut différer de celle d'un terrain agricole.

4-4-Étude des Modèles : La détection de modèles et de tendances sur l'image peut aider à comprendre des phénomènes tels que l'urbanisation, les schémas de végétation, ou les changements dans l'utilisation des sols.

4-5-Comparaison Temporelle : L'interprétation d'images peut également impliquer la comparaison d'images prises à différents moments pour détecter les changements dans le paysage au fil du temps.

4-6-Vérification sur le Terrain : Les résultats de l'interprétation d'images doivent souvent être vérifiés sur le terrain pour confirmer la présence réelle des caractéristiques identifiées.

4-7-Intégration dans un Contexte Spatial : Les interprétations individuelles doivent être intégrées dans un contexte spatial plus large pour fournir une compréhension globale de la zone étudiée.

L'interprétation d'images aériennes est un processus complexe qui nécessite à la fois une connaissance technique des principes d'imagerie et une compréhension approfondie du terrain étudié.

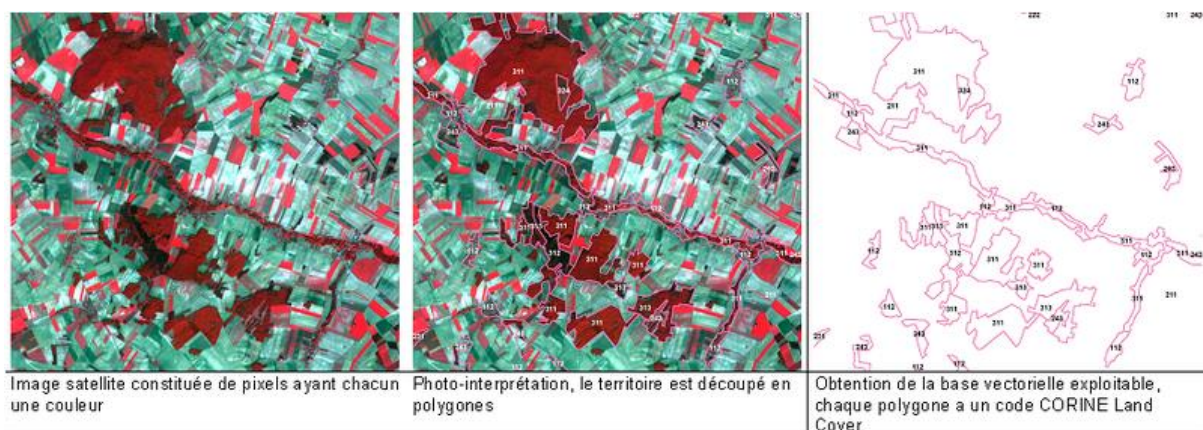


FIGURE 4:ETAPES DE LA PHOTO-INTERPRETATION

Source : https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Fichier:Photo_interpretation_corine_land_cover.PNG

5- La Photo-interprétation et ses Applications en Urbanisme :

La photo-interprétation, en tant que méthode d'analyse d'images aériennes, trouve des applications significatives en urbanisme, facilitant l'identification des éléments urbains et l'analyse des changements dans l'utilisation des sols. Voici comment cette technique est utilisée dans le contexte urbain :

5-1-Planification Urbaine :

Objectif : Optimiser la planification urbaine en comprenant la configuration existante de la ville.

Application : La photo-interprétation permet d'identifier les caractéristiques urbaines clés, tels que les zones résidentielles, commerciales et industrielles, contribuant ainsi à une planification urbaine stratégique.

5-2-Zonage et Utilisation des Sols :

Objectif : Définir les zones en fonction de l'utilisation des sols pour une planification efficace.

Application : La photo-interprétation facilite l'identification des différentes utilisations des sols urbains, soutenant ainsi le processus de zonage et la gestion des espaces urbains.

5-3-Identification des Éléments Urbains :

Objectif : Reconnaître et cartographier les éléments spécifiques qui composent le tissu urbain.
Application : elle permet d'identifier des éléments tels que les bâtiments, les routes, les parcs, les installations industrielles, contribuant ainsi à une compréhension détaillée de la structure urbaine.

5-4-Analyse des Changements dans l'Utilisation des Sols :

Objectif : Comprendre l'évolution des zones urbaines au fil du temps.

Application : En comparant des images aériennes prises à différentes époques, la photo-interprétation révèle les changements dans l'utilisation des sols, tels que l'expansion urbaine, les développements immobiliers et les transformations dans la structure urbaine.

5-5-Gestion des Infrastructures :

Objectif : Faciliter la gestion et la planification des infrastructures urbaines.

Application : L'identification précise des éléments tels que les routes, les réseaux de transport en commun et les installations publiques aide à optimiser la gestion des infrastructures urbaines.

5-6-Études d'Impact Environnemental :

Objectif : Évaluer l'impact des changements urbains sur l'environnement.

Application : La photo-interprétation permet d'analyser comment les modifications dans l'utilisation des sols influent sur les écosystèmes urbains et contribuent à des études d'impact environnemental.

En utilisant la photo-interprétation de manière judicieuse, les urbanistes peuvent tirer parti de ces informations visuelles pour prendre des décisions éclairées, favorisant ainsi un développement urbain durable et une gestion urbaine efficace.

Cours 4 : La Télédétection-1-

« La télédétection est l'ensemble des techniques qui permettent, par l'acquisition d'images, d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec celle-ci. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et analyser l'information qu'il représente, pour ensuite mettre en application cette information. »

1-définition

La télédétection est un procédé scientifique et technologique qui consiste à recueillir des informations sur la surface terrestre à partir de capteurs à distance, souvent embarqués sur des satellites, avions ou drones. Ces capteurs enregistrent des données électromagnétiques ou acoustiques, permettant une observation de la Terre depuis l'espace.

C'est une science qui permet de photographier la terre à distance, elle mesure et permet d'étudier la réponse spectrale de l'état de surface du sol en fonction de la longueur d'onde de l'onde électromagnétique utilisée.

2- Le rayonnement électromagnétique :

En télédétection, le rayonnement électromagnétique désigne l'émission et la réception d'ondes électromagnétiques pour recueillir des informations sur la surface de la Terre sans contact direct. Cette technique repose sur l'utilisation de capteurs à bord de satellites pour détecter et enregistrer le rayonnement émis ou réfléchi par la surface terrestre.

Le spectre électromagnétique est divisé en différentes bandes, chacune correspondant à des longueurs d'onde spécifiques. En télédétection, différentes bandes spectrales sont utilisées pour recueillir des informations sur des caractéristiques spécifiques de la surface terrestre. Par exemple, les capteurs peuvent enregistrer des bandes dans l'infrarouge proche pour évaluer la santé des plantes, dans l'infrarouge thermique pour mesurer la température de surface, ou dans le visible pour capturer des images visuelles.

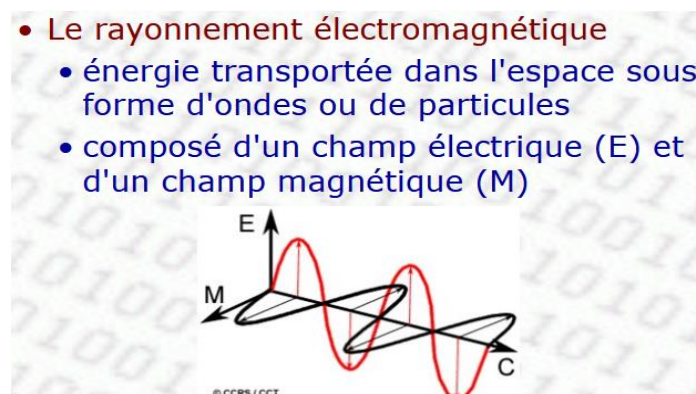


FIGURE 5:LE RAYONNEMENT ELECTROMAGNETIQUE

Source : Cours SIG télédétection de l'école de technologie supérieure de CANADA

3- L'acquisition des images satellitaires

L'acquisition des images est l'interaction entre trois éléments fondamentaux :

1-une source d'énergie

2-la cible

3-plateforme d'acquisition : capteurs (satellites)

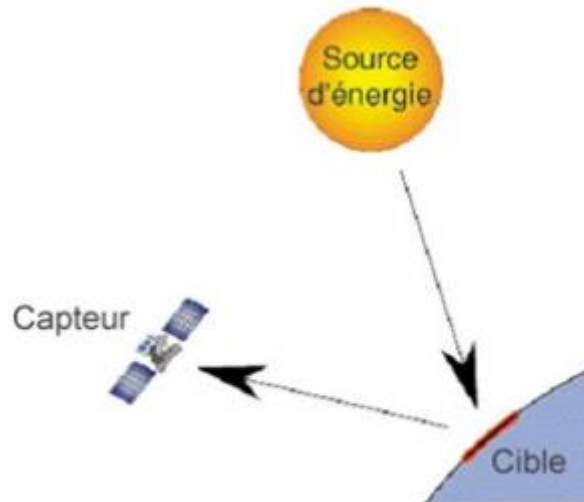


FIGURE 6:L'ACQUISITION DES IMAGES SATELLITAIRES

Source : Cours SIG télédétection de l'école de technologie supérieure de CANADA

4- Les capteurs

4-1- Capteurs de satellite : Passifs

Ce sont des capteurs optiques fonctionnent sur le même principe que les appareils photographiques. Ils enregistrent des images à partir du rayonnement solaire réfléchi par la Terre. Ces capteurs passifs sont basés sur la seule réflectance.

Passive Sensors



FIGURE 7:CAPTEURS PASSIFS

Source: State of Satellite Imager, <https://share.google/wLszTd88P7IdoJNB>

L'énergie rayonnante est convertie en quantités bio-géophysiques telles que la température, les précipitations et l'humidité du sol. Exemples : Landsat OLI/TIRS, Terra MODIS, GPM

GMI, GRACE, etc.

4-2-Capteurs satellites : Actifs

La plupart des capteurs actifs fonctionnent dans le spectre électromagnétique, ce qui leur permet de pénétrer dans l'atmosphère dans la plupart des conditions et peuvent être utilisés de jour comme de nuit.

Les capteurs radar produisent des images sur la base d'un signal micro-ondes (2 à 30 cm) émis et réceptionné par une antenne, après réflexion sur le sol. Les capteurs actifs fournissent leur propre source d'énergie pour l'éclairage. Ils mesurent les caractéristiques de l'énergie rétrodiffusée. On peut dire qu'ils émettent artificiellement un rayonnement pour en étudier **les interactions** avec l'objet à étudier.

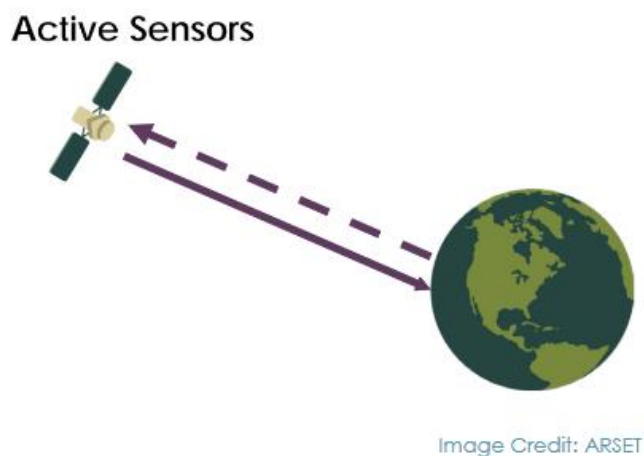


FIGURE 8:CAPTEURS ACTIFS

Source: State of Satellite Imager, <https://share.google/wLszTd88P7IdoJNB>

- Ils ont une variété d'applications liées à météorologie et à l'observation de la surface et de l'atmosphère de la surface et de l'atmosphère de la Terre.
- Exemples : Altimètre laser, LiDAR, RADAR, diffusomètre, Missions : Sentinel-1 (C-SAR), ICESat-2 (ATLAS), GPM (DPR).



FIGURE 9: QUELQUES EXEMPLES DE SATELLITES

Source: applisat.fr

5-Principales Caractéristiques de la Télédétection :

5-1-Capteurs : Les capteurs utilisés en télédétection peuvent être optiques, capturant la lumière visible et invisible, ou d'autres types comme les capteurs radar, lidar, ou thermiques. Chaque type de capteur fournit des informations spécifiques sur la surface terrestre.

5-2-Plates-formes : Les capteurs sont montés sur des plates-formes telles que des satellites, avions, drones, ou ballons stratosphériques. La sélection de la plate-forme dépend des objectifs de l'observation, de la résolution spatiale requise et de la fréquence d'acquisition des données.

5-3-Spectre Électromagnétique : Les capteurs enregistrent des données sur différents domaines du spectre électromagnétique, y compris la lumière visible, l'infrarouge, le radar, et d'autres longueurs d'onde. Chacun de ces domaines offre des informations uniques sur la surface terrestre.

Le spectre électromagnétique représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie

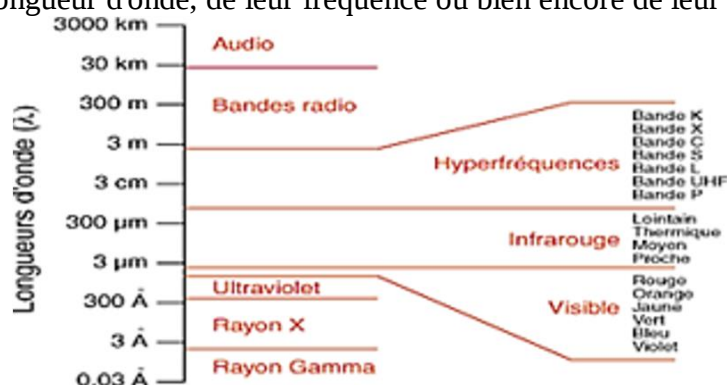


Figure 10: Les domaines spectraux

Source: Lilesand and Keiffer;1987

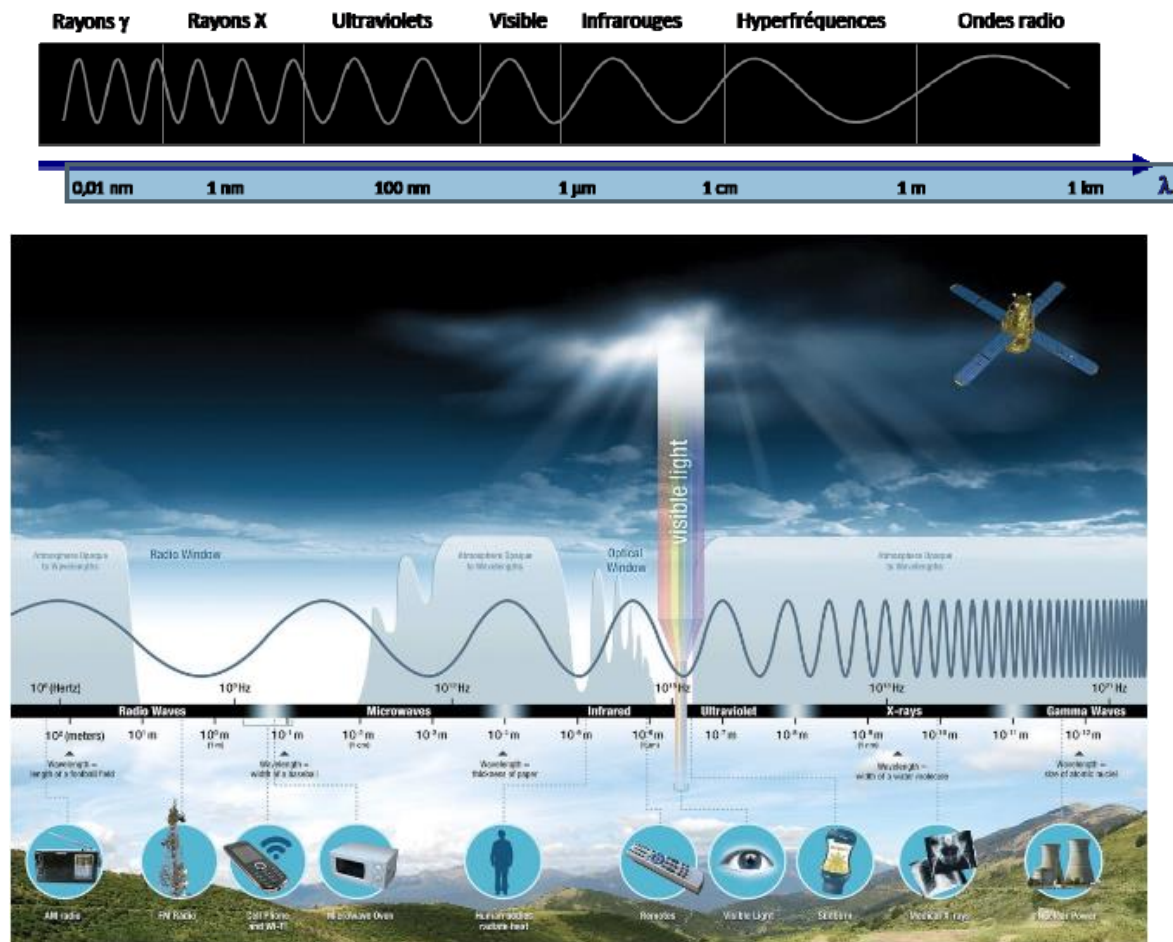


FIGURE 11: LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE

SOURCE: INTRODUCTION TO HYPERSPECTRAL REMOTE SENSING -PART I

<https://richadutt.medium.com/introduction-to-hyperspectral-remote-sensing-part-i-69d9e05a63f8>

La plupart des ondes électromagnétiques ne sont pas détectées par l'œil humain. Même les détecteurs satellites ne captent qu'une petite partie de l'ensemble du spectre électromagnétique

5-3-1-Les ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique comporte à la fois :

- un champ électrique
- un champ magnétique
- oscillant à la même fréquence.

Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans un milieu selon une direction orthogonale.

La propagation de ces ondes s'effectue à une vitesse qui dépend du milieu considéré.

Dans le vide, la vitesse de propagation est égale à 3.108 m.s^{-1} .

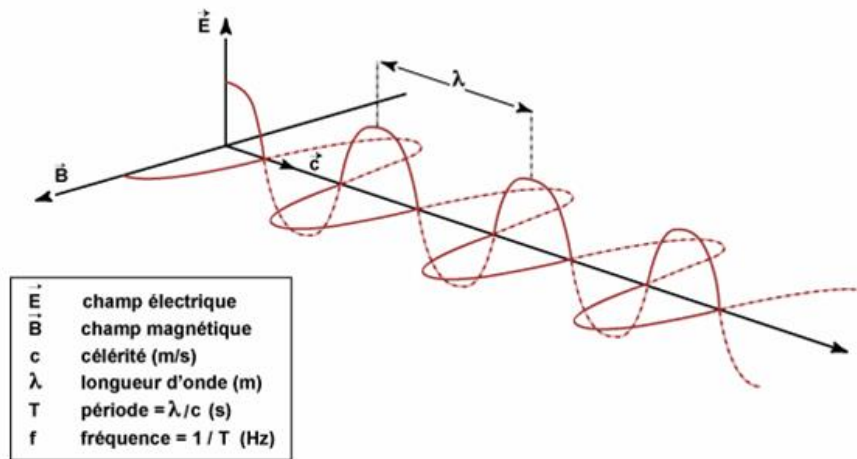


FIGURE 12: NATURE ET PROPAGATION D'UNE ONDE ELECTROMAGNETIQUE

Source: Source : Cours SIG télédétection de l'école de technologie supérieure de CANADA

5-3-2-Les caractérisée physique d'une onde Electromagnétique

La longueur d'onde (λ) : elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace.

$$\lambda = \frac{c}{\nu}$$

- λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique
- c : vitesse de la lumière (3.108 m.s-1)
- ν : la fréquence de l'onde

Par conséquent, plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et réciproquement.

C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives.

Elle est mesurée en mètre ou en l'un de ses sous-multiples, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale ayant des longueurs d'onde relativement courtes :

Le nanomètre 1 nm = 10^{-9} mètre

Le micromètre 1 μ m = 10^{-6} mètre

Le centimètre 1 cm = 10^{-2} mètre

La période (T) : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.

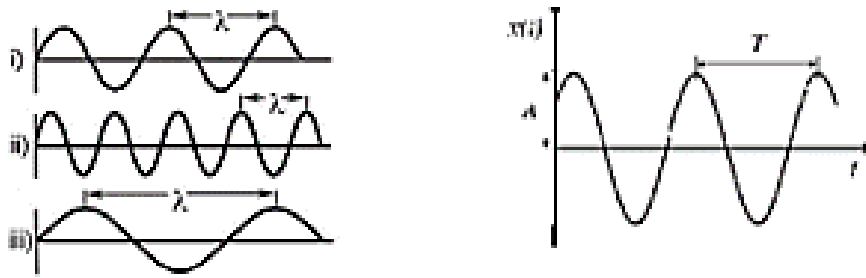


FIGURE 13: LES CARACTÉRISTIQUES D'UNE ONDE ÉLECTROMAGNÉTIQUE
Source : Cours SIG télédétection de l'école de technologie supérieure de CANADA

5-3-3-Le domaine visible :

Le domaine visible : correspond à la partie très étroite du spectre électromagnétique perceptible par notre œil. C'est dans le domaine visible que le rayonnement solaire atteint son maximum ($0,5 \mu\text{m}$) et c'est également dans cette portion du spectre que l'on peut distinguer l'ensemble des couleurs de l'arc en ciel, du bleu au rouge. Il s'étend de quatre dixièmes de millimètre ($4 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) - *lumière bleue* - à huit dixièmes de millimètre ($8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) de millimètre - *lumière rouge*.

Les capteurs utilisés en télédétection peuvent capter l'énergie provenant de différentes fenêtres spectrales à l'intérieur même du visible (le satellite SPOT par exemple, est sensible au rouge et au vert, le satellite américain IKONOS lui, dispose de trois bandes spectrales dans le visible, sensibles au rouge, au vert et au bleu).

5-3-4-L'infrarouge :

Rayonnement émis par tous les corps dont la température est supérieure au zéro absolu (-273°C).

En télédétection, on utilise certaines bandes spectrales de l'infrarouge pour mesurer la température des :

- surfaces terrestres
- et océaniques,
- ainsi que celle des nuages.

La gamme des infrarouges couvre les longueurs d'onde allant de huit dixièmes de millimètre ($8 \cdot 10^{-7} \text{ m}$) à un millimètre (10^{-3} m).

Dans cette fourchette de longueurs d'onde, on distingue généralement quatre types d'infrarouges qui vont du proche infrarouge à l'infrarouge lointain, en passant par l'infrarouge moyen et le thermique.

5-3-5-Le proche infrarouge

Le proche infrarouge ($0,7 \mu\text{m}$ à $1,6 \mu\text{m}$) est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge).

Comme pour le visible, ce que le radiomètre mesure dans le proche infrarouge, c'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre.

Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde.

Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétalisées des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

5-3-6-L'infrarouge moyen

L'infrarouge moyen (1,6 μ m à 4 μ m) permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en foresterie et en agriculture, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique.

L'atmosphère est en grande partie opaque aux rayonnements du moyen infrarouge qui sont absorbés par la vapeur d'eau. Seules quelques fenêtres atmosphériques permettent la transmission du rayonnement. Elles sont centrées sur les longueurs d'onde 2,5 μ m, 3,5 μ m et 5 μ m.

5-3-7-L'infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral (4 μ m à 15 μ m), le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces. Les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets.

En effet une partie du rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une plus grande longueur d'onde.

5-4- Le milieu perturbateur : se réfère aux éléments susceptibles de perturber ou altérer la qualité des données acquises par les capteurs lors du processus d'observation à distance de la surface terrestre. Ces perturbations peuvent provenir de diverses sources et avoir des effets sur la précision et la fiabilité des informations collectées. On peut citer :

Conditions Atmosphériques : Les conditions météorologiques, telles que les nuages, la brume, les précipitations, et la variation de l'humidité atmosphérique, peuvent altérer la qualité des images capturées par les capteurs, en limitant la pénétration du rayonnement électromagnétique.

Topographie : La topographie du terrain peut influencer la réflexion et la diffusion des rayons lumineux, en particulier dans des zones montagneuses ou accidentées. Cela peut entraîner des distorsions ou des ombres sur les images télé détectées.

Végétation : La végétation peut constituer un milieu perturbateur en absorbant certaines longueurs d'onde du spectre électromagnétique et en réfléchissant d'autres. La densité et le type de végétation peuvent affecter la précision des informations recueillies.

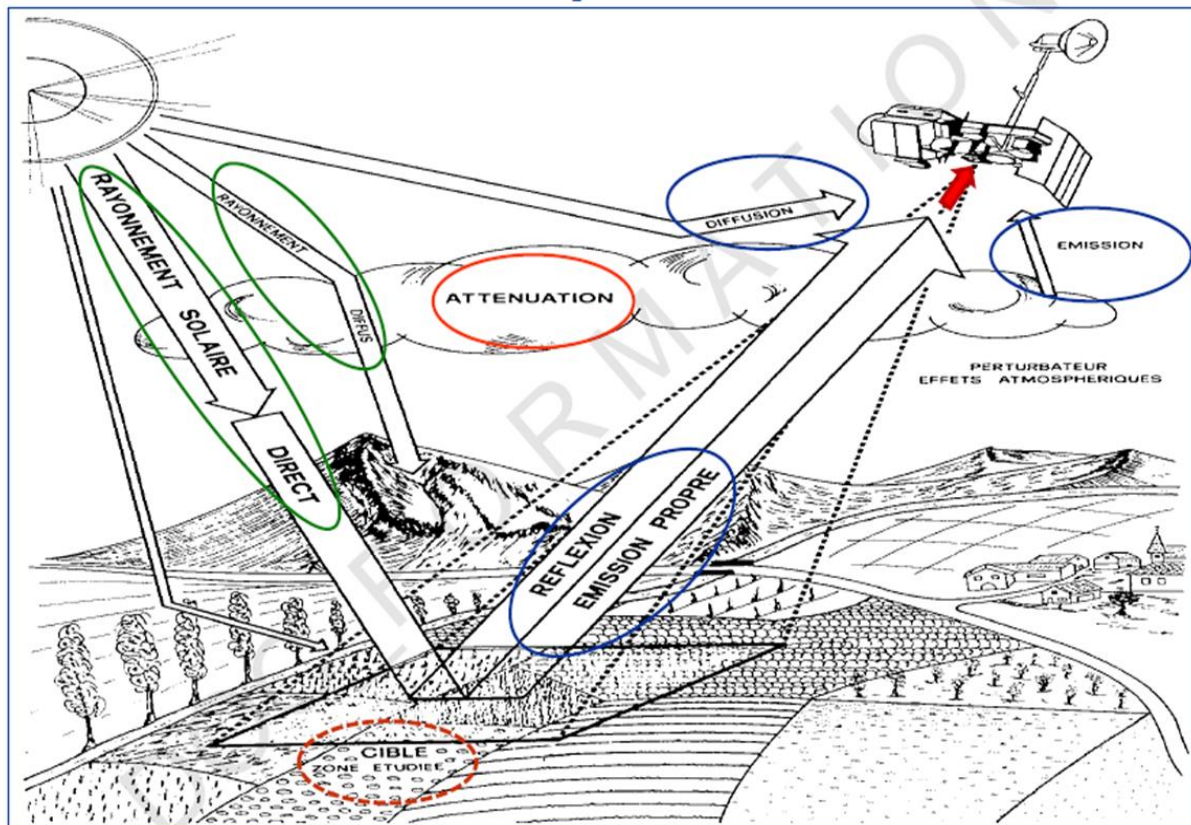


FIGURE 14:LE MILIEU PERTURBATEUR
Source : Cours télédétection .A.Serradj

5-5- La cible : c'est l'objet ou à la zone spécifique sur la surface terrestre que l'on souhaite observer, mesurer ou étudier à l'aide des capteurs à distance. La cible peut être un élément naturel, comme une forêt, un lac, ou une montagne, ou un élément créé par l'homme, comme une ville, une route, ou un bâtiment.

La définition précise de la cible dépend des objectifs de l'observation. Par exemple, une cible peut être une zone agricole que l'on souhaite surveiller pour évaluer les rendements des cultures, ou une zone urbaine que l'on souhaite cartographier pour la planification urbaine.

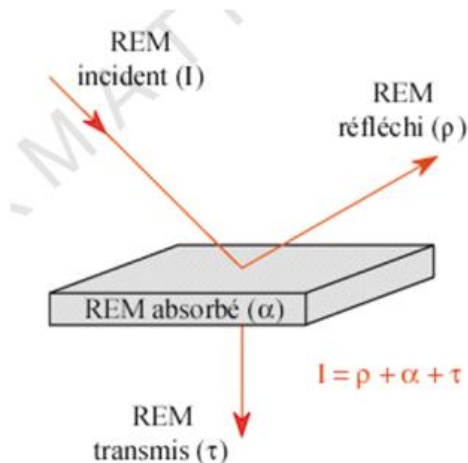


FIGURE 15: LA CIBLE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

L'objet étudié (la cible) réfléchit le rayonnement électromagnétique et peut aussi émettre son propre rayonnement.

5-6- Système de traitement des données

Le système de traitement en télédétection englobe l'ensemble du processus, depuis l'acquisition des données brutes jusqu'à la production d'informations exploitables pour des applications diverses.

***Acquisition des Données** : Le processus commence par l'acquisition des données télédétectées, généralement sous forme d'images satellites, aériennes, ou d'autres types de données recueillies à distance.

***Prétraitement** : Les données brutes peuvent subir des prétraitements pour corriger des imperfections, éliminer des artefacts dus à des conditions atmosphériques ou à d'autres sources de perturbations, et garantir la qualité des données.

***Correction Atmosphérique** : En cas d'observation dans l'atmosphère, une correction atmosphérique peut être réalisée pour compenser les effets des composants atmosphériques et garantir une représentation précise de la surface terrestre.

***Calibration** : Les données sont souvent calibrées pour garantir une correspondance précise entre les valeurs enregistrées par les capteurs et les propriétés réelles des objets sur la surface terrestre.

***Analyse Spectrale** : Les images peuvent subir une analyse spectrale pour extraire des informations sur les propriétés spectrales des objets, permettant ainsi leur identification et leur classification.

***Interprétation** : Les photo-interprètes ou les algorithmes d'interprétation automatisée peuvent être utilisés pour identifier des caractéristiques spécifiques, des changements dans l'utilisation des sols, ou d'autres informations pertinentes.

Cours 5 : La télédétection -2-

6-Caractéristiques d'une image Satellitaire : Les performances des capteurs

Les Performances des capteurs dépendent des caractéristiques :

6-1- Résolution Spatiale (surfaces couvertes par la scène et le pixel)

Se réfère à la capacité d'un satellite à distinguer les détails sur la surface de la Terre. Elle est mesurée en mètres par pixel.

Les satellites à haute résolution spatiale peuvent capturer des détails plus fins, tandis que ceux à basse résolution montrent des images plus générales.

Capteurs	Resolutions			
	Spatiale	Spectrale (micromètre)	Radiométrique	Temporelle
LANDSAT-MSS	60 m 185 km	4 bandes 0.50 - 0.60 0.60 - 0.70 0.70 - 0.80 0.80 - 1.10	6 bit (0 à 63)	16 jours
LANDSAT-TM	30 m 185 km	7 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5	8 bit (0 à 255)	14 jours
LANDSAT-ETM+	30 m ou 28,50 m 185 km	8 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5 0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	14 jours
Panchromatique	30 m ou 14,25 m	0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	
SPOT-XS	20 m 60 km	3 bandes 0.50 - 0.59 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89	8 bit (0 à 255)	26 jours
SPOT-P	10 m 60 km	0.51 - 0.73	8 bit (0 à 255)	26 jours
IKONOS-XS	4 m 11 km	4 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours
IKONOS-Pan	1 m 11 km	1 bande 0.45 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours

FIGURE 16:LA RESOLUTION SPATIALE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

Le champ global d'observation



FIGURE 17:LE CHAMPS GLOBAL B'OBSERVATION

Source : Cours télédétection .A.Serradj

6-2- Résolution Spectrale (nombre de bandes spectrales)

Se rapporte à la capacité d'un satellite à percevoir différentes longueurs d'onde de la lumière. Cela permet de distinguer entre différentes caractéristiques du terrain, telles que la végétation, l'eau et les zones urbaines.

Capteurs	Spatiale	Resolutions		
		Spectrale (micromètre)	Radiométrique	Temporelle
LANDSAT-MSS	60 m 185 km	4 bandes 0.50 - 0.60 0.60 - 0.70 0.70 - 0.80 0.80 - 1.10	6 bit (0 à 63)	16 jours
LANDSAT-TM	30 m 185 km	7 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5	8 bit (0 à 255)	14 jours
LANDSAT-ETM+	30 m ou 28,50 m 185 km	8 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5 0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	14 jours
Panchromatique	30 m ou 14,25 m	0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	
SPOT-XS	20 m 60 km	3 bandes 0.50 - 0.59 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89	8 bit (0 à 255)	26 jours
SPOT-P	10 m 60 km	0.51 - 0.73	8 bit (0 à 255)	26 jours
IKONOS-XS	4 m 11 km	4 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours
IKONOS-Pan	1 m 11 km	1 bande 0.45 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours

FIGURE 18:RESOLUTION SPECTRALE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

6-3- Résolution Radiométrique (sensibilité du capteur)

Indique la sensibilité d'un capteur satellite à différentes intensités de lumière. Une résolution radiométrique plus élevée permet de distinguer un plus grand nombre de niveaux de luminosité.

Capteurs	Resolutions			
	Spatiale	Spectrale (micromètre)	Radiométrique	Temporelle
LANDSAT-MSS	60 m 185 km	4 bandes 0.50 - 0.60 0.60 - 0.70 0.70 - 0.80 0.80 - 1.10	6 bit (0 à 63)	16 jours
LANDSAT-TM	30 m 185 km	7 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5	8 bit (0 à 255)	14 jours
LANDSAT-ETM+	30 m ou 28,50 m 185 km	8 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5 0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	14 jours
Panchromatique	30 m ou 14,25 m	0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	
SPOT-XS	20 m 60 km	3 bandes 0.50 - 0.59 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89	8 bit (0 à 255)	26 jours
SPOT-P	10 m 60 km	0.51 - 0.73	8 bit (0 à 255)	26 jours
IKONOS-XS	4 m 11 km	4 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours
IKONOS-Pan	1 m 11 km	1 bande 0.45 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours

FIGURE 19: RESOLUTION RADIOMETRIQUE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

6-4- Résolution Temporelle (temps de revisite)

Représente la fréquence à laquelle un satellite capture des images d'une même zone géographique. Certains satellites offrent une revisite quotidienne, tandis que d'autres peuvent prendre plusieurs jours ou semaines.

Capteurs	Resolutions			
	Spatiale	Spectrale (micromètre)	Radiométrique	Temporelle
LANDSAT-MSS	60 m 185 km	4 bandes 0.50 - 0.60 0.60 - 0.70 0.70 - 0.80 0.80 - 1.10	6 bit (0 à 63)	16 jours
LANDSAT-TM	30 m 185 km	7 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5	8 bit (0 à 255)	14 jours
LANDSAT-ETM+	30 m ou 28,50 m 185 km	8 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90 1.55 - 1.75 2.08 - 2.35 10.4 - 12.5 0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	14 jours
Panchromatique	30 m ou 14,25 m	0.52 - 0.90	8 bit (0 à 255)	
SPOT-XS	20 m 60 km	3 bandes 0.50 - 0.59 0.61 - 0.68 0.79 - 0.89	8 bit (0 à 255)	26 jours
SPOT-P	10 m 60 km	0.51 - 0.73	8 bit (0 à 255)	26 jours
IKONOS-XS	4 m 11 km	4 bandes 0.45 - 0.52 0.52 - 0.60 0.63 - 0.69 0.76 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours
IKONOS-Pan	1 m 11 km	1 bande 0.45 - 0.90	8 bit (0 à 255)	3 jours

FIGURE 20: RESOLUTION TEMPORELLE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

6-5-Bande Spectrale : Les satellites peuvent être équipés de capteurs sensibles à différentes bandes spectrales, telles que le visible, l'infrarouge proche, l'infrarouge thermique, etc. Chaque bande spectrale fournit des informations spécifiques sur la surface terrestre.

***Taille de Pixel :**

La taille de pixel représente la dimension physique d'un pixel sur l'image satellite. Elle est directement liée à la résolution spatiale et détermine la capacité de l'image à représenter des détails.

***Altitude Orbitale :**

L'altitude orbitale du satellite affecte la résolution spatiale. Un satellite en orbite basse offre généralement une meilleure résolution spatiale qu'un satellite en orbite haute.

Ces caractéristiques sont cruciales pour déterminer l'utilité d'une image satellite dans divers domaines tels que la cartographie, la surveillance environnementale, l'agriculture, et bien d'autres.

7-Les principales bandes spectrales (interprétation monocanale)

Les images Landsat 7 disposent de sept bandes à une résolution spatiale de 30 m à l'exception de la bande thermique qui a une résolution spatiale de 120 m. On peut résumer les caractéristiques de la longueur d'onde de ces bandes spectrales comme suit :

Bande 1: le bleu (0.4-0.5 μm)

Bande 2: le vert (0.5-0.6 μm)

Bande 3: le rouge (0.6 - 0.7 μm)

Bande 4: PIR (0.7-1.2 μm)

Bande 5: l'Infrarouge Moyen (MIR, 1.55 - 1.75 μm)

Bande 6: Infrarouge Thermique (TIR, 5.0 - 14.0 μm)

Bande 7: Moyen Infrarouge (MIR, de 2.08 - 2.35 μm)

8- Les étapes de la télédétection

A : Source d'énergie ou d'illumination : les objets sur la surface de la terre, appelés cibles doivent être illuminés, par le biais du soleil, mais le satellite peut être une source d'énergie, la télédétection Radar.

B : rayonnement et atmosphère : le rayonnement interagit avec l'atmosphère lors de son trajet « aller/ retour » entre la cible et le capteur.

C : Interaction avec la cible : Chaque objet émet ou réfléchit un rayonnement qui s'appelle le comportement spectral. Chaque classe d'objet possède sa signature spectrale ou empreinte digitale,

D : Enregistrement de l'énergie par le capteur : Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance pour être enfin enregistrée.

E : réception et traitement : L'information enregistrée par le capteur est transmise, par des moyens électroniques, à une station de réception où l'information est transformée en images.

F : Interprétation et analyse : visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

G : Application : utiliser l'information extraite pour mieux comprendre la cible, ou découvrir de nouveaux aspects ou résoudre un problème particulier.

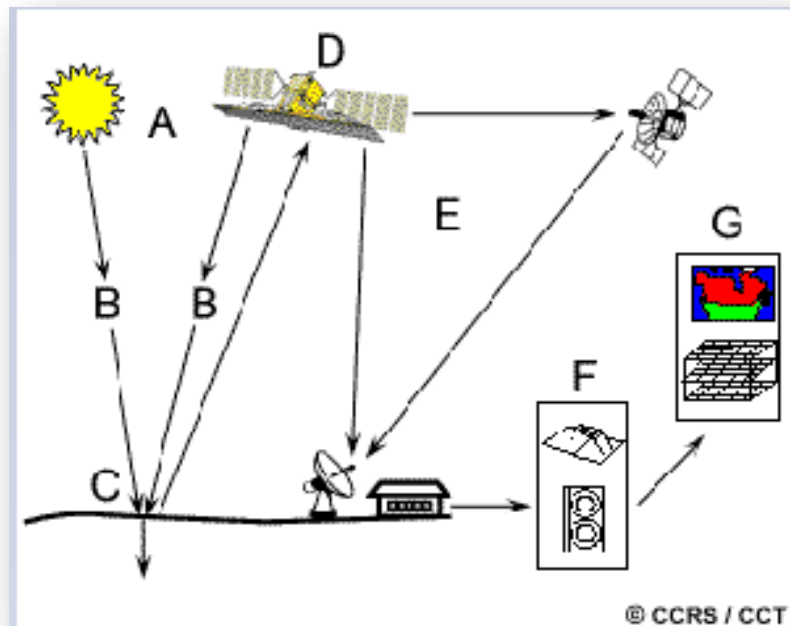


FIGURE 21: LES ETAPES DE LA TELEDETECTION

Source : Cours télédétection .A.Serradj

9- Les signatures spectrales

Différents matériaux reflètent et absorbent différentes longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique. Chaque surface possède une signature spectrale - quantité d'énergie émise ou réfléchie en fonction de la longueur d'onde - qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires.

Sur le graphe ci-dessous les longueurs d'onde réfléchies détectées par les capteurs

- En ce qui concerne la signature spectrale des sols, on note un accroissement régulier de la réflectance au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde. Les discontinuités que l'on observe dans le proche infrarouge et l'infrarouge moyen sont dues aux bandes d'absorption de l'eau. On doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi la composante liquide; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement.
- La signature spectrale de la végétation : Les propriétés spectrales des couverts végétaux dépendent à la fois de la nature de la végétation qui les compose, de leur état physiologique, de leur teneur en eau, mais aussi du sol sous-jacent.

- L'eau a une réflectance très faible dans toutes les longueurs d'onde, elle absorbe cependant un peu moins les ondes les plus courtes, d'où sa couleur bleue. Sa signature spectrale dépend à la fois des molécules qui la constituent. Plus l'eau est turbide, plus elle contient de matériaux sédimentaires, plus sa réflectance augmente dans toutes les longueurs d'onde et notamment pour les ondes les plus longues.
- La signature spectrale de la neige est très forte dans les courtes longueurs d'onde, mais elle diminue rapidement dans le proche infrarouge, pour atteindre des valeurs très faibles dans l'infrarouge moyen où le rayonnement est absorbé par l'eau.

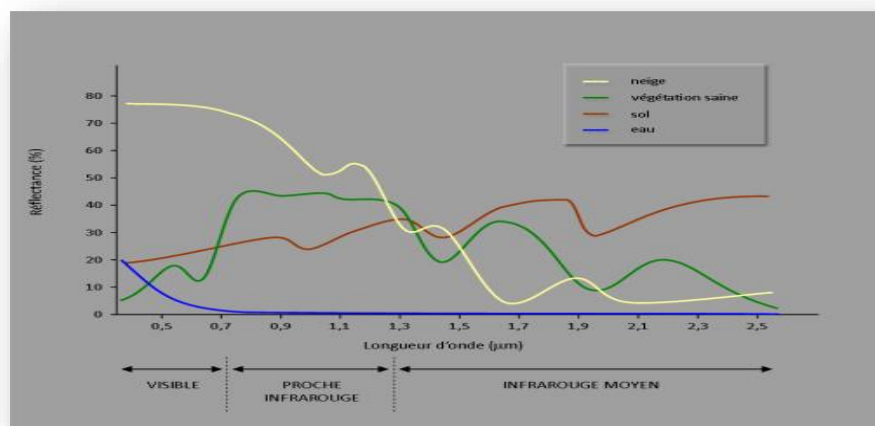


FIGURE 22: LES SIGNATURES SPECTRALES
Source : Cours télédétection .A.Serradj

Cours 6 : La télédétection -3-

10- Exemple de satellites et capteurs

Le système d'acquisition capte le signal qui lui arrive; on distingue en fait : le vecteur et le capteur

Le vecteur, c'est « *la station, le satellite...* » qui embarque les capteurs (instruments d'acquisition).

Les satellites transportent des capteurs ou des instruments. Les noms des capteurs sont généralement des acronymes qui peuvent inclure le nom du satellite.

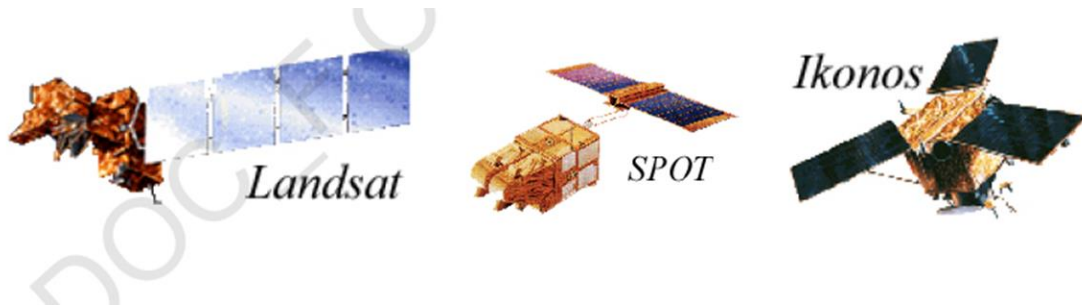


FIGURE 23:EXEMPLE DE SATELLITES ET CAPTEURS

Source : Cours télédétection .A.Serradj

10-1- type de satellites

10-1-1 Les satellites géostationnaires

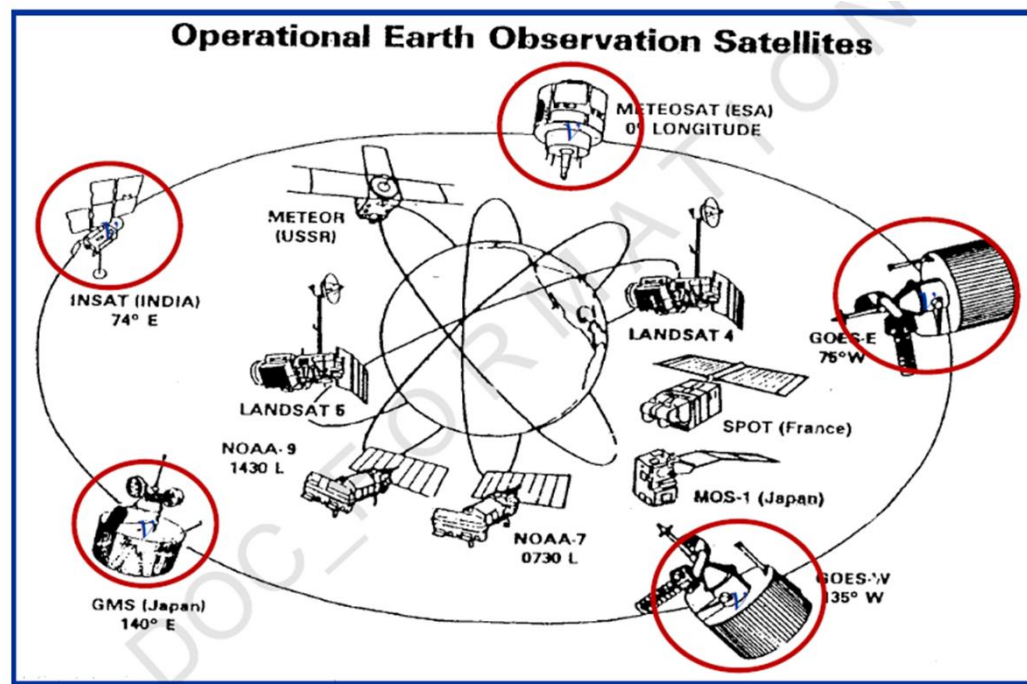


FIGURE 24: EXEMPLES DE SATELLITES GEOSTATIONNAIRES

Source : Cours télédétection .A.Serradj

10-1-2 Les satellites à défilement se déplacent par rapport à la surface de la Terre

- orbites circulaires à excentriques

- altitude : entre 800 et 2000 km

Période de révolution < 2 heures

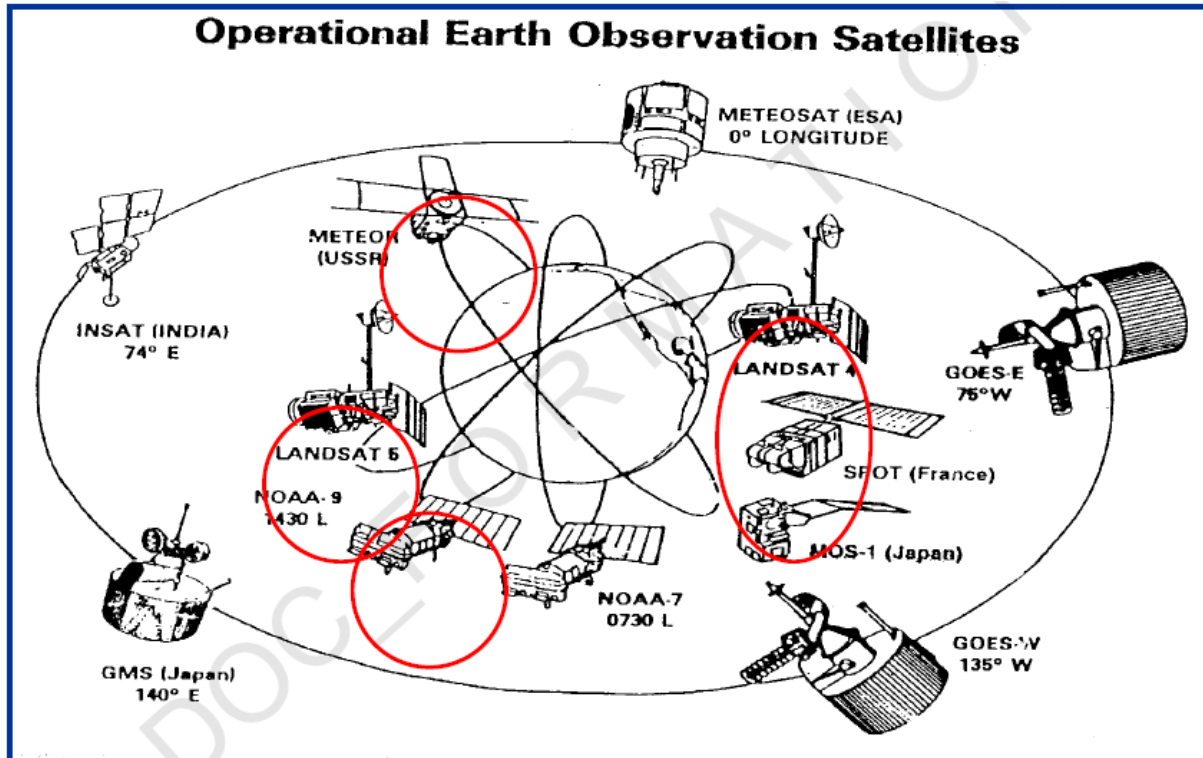


FIGURE 25: LES SATELLITES A DEFILEMENT

Source : Cours télédétection .A.Serradj

11- Caractéristiques du satellite Landsat 9

Le programme Landsat, lancé dans les années 1960 par la NASA en collaboration avec l'USGS et le département de l'agriculture américain, est le premier programme d'observation terrestre à des fins civiles. Entre 1972 et 2021, neuf satellites Landsat ont été lancés, avec Landsat 9 prévu pour assurer la continuité des observations. Le programme est désormais géré conjointement par la NASA (développement spatial) et l'USGS (exploitation des données).

Caractéristiques principales :

*Satellites lourds (près de 3 tonnes)

*Acquisition d'images multispectrales (visible, panchromatique, infrarouge) avec une résolution spatiale de 15 à 120 mètres.

*Données utilisées pour l'étude des changements climatiques, l'aménagement des sols, la cartographie, l'agriculture, la géologie, et d'autres domaines.

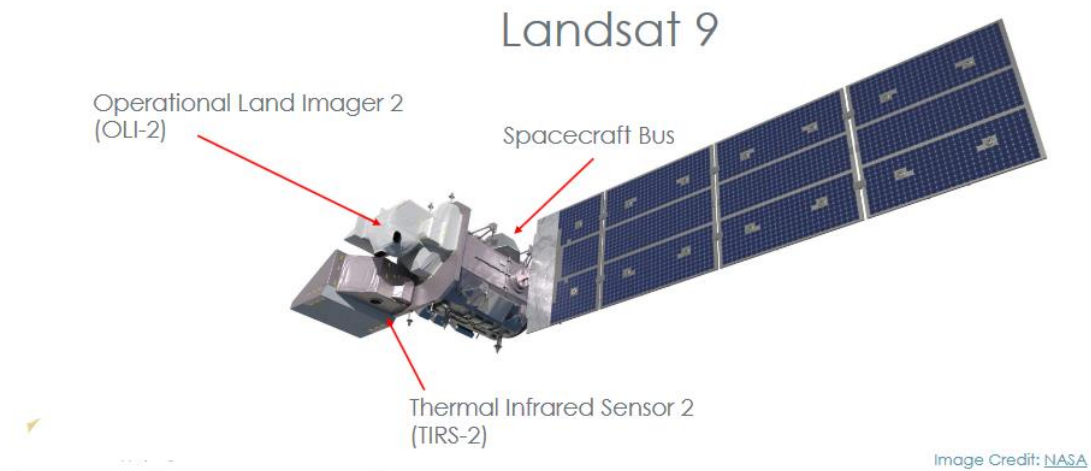


FIGURE 26: SATELLITE LANDSAT 9

SOURCE: A BEGINNER'S GUIDE TO SATELLITE REMOTE SENSING (SRS) FOR NATURAL ASSETS

<https://www.maya-climate.com/post/satellite-remote-sensing-for-natural-assets>

- Orbites : Orbite polaire/non polaire ou géostationnaire
- Source d'énergie : Passive ou Active
- Spectres solaire et terrestre : visible, UV, IR, micro-ondes...
- Technique de mesure : Balayage ; non balayage ; imageur ; sondeurs...
- Type et qualité de la résolution : Spatiale, temporelle, spectrale, radiométrique.
- Application : Météo, couleur des océans, cartographie des terres, qualité de l'air, bilan radiatif.

11-1-Points forts :

- Les données brutes sont accessibles gratuitement dans le monde entier.
- Le programme a connu des difficultés financières et organisationnelles, notamment une tentative infructueuse de privatisation dans les années 1990.
- La poursuite du programme est assurée pour 20 ans avec Landsat 9 et le futur programme Landsat Next, qui vise à intégrer des satellites plus petits et une résolution améliorée, en réponse aux standards européens Sentinel-2.

Le programme Landsat reste un outil incontournable pour l'observation de la Terre et ses nombreuses applications scientifiques et pratiques.

11-2-Les points faibles :

- Concurrence technologique

La résolution spatiale (15 à 120 mètres) et la couverture spectrale des satellites Landsat, bien qu'importantes, sont aujourd'hui surpassées par des programmes concurrents comme les satellites européens Sentinel-2.

- Satellites lourds et coûteux

Les satellites Landsat, pesant près de 3 tonnes, sont coûteux à construire et à lancer.

Cette conception traditionnelle est moins compétitive face à des programmes misant sur des constellations de satellites plus petits et plus flexibles.

Caractéristiques	Landsat 1 à 3	Landsat 4 et 5	Landsat 6	Landsat 7	Landsat 8	Landsat 9
Début et fin de mission	Landsat-1 : 1972-1978 Landsat-2 : 1975-1981 Landsat-3 : 1978-1983	Landsat-4 : 1982-1993 Landsat-5 : 1984-2013	1993 (échec)	1999-2022?	2013-	2021-
Statut satellite	Mission terminée	Mission terminée	Échec au lancement	Opérationnel	Opérationnel	Opérationnel
Masse	816-960 kg	1938-1 961 kg	2 000 kg	2 200 kg	2 600 kg	2 782 kg
Instruments	MSS : radiomètre RVB : caméra vidéo	MSS et TM : radiomètre	MSS et TM : radiomètre	ETM+ : radiomètre	OLI et TIRS : radiomètre	OLI-2 et TIRS-2
Bandes spectrales	0,5-0,6 µm 0,6-0,7 µm 0,7-0,8 µm 0,8-1,1 µm	0,45-0,52 µm 0,52-0,60 µm 0,63-0,69 µm 0,76-0,90 µm 1,55-1,75 µm 2,08-2,35 µm	-	0,45-0,52 µm 0,53-0,61 µm 0,63-0,69 µm 0,77-0,90 µm 1,55-1,75 µm 2,09-2,35 µm	0,433-0,453 µm 0,45-0,515 µm 0,525-0,60 µm 0,63-0,68 µm 0,845-0,885 µm 1,56-1,66 µm 2,1-2,3 µm	0,433-0,453 µm 0,45-0,515 µm 0,525-0,60 µm 0,63-0,68 µm 0,845-0,885 µm 1,56-1,66 µm 2,1-2,3 µm

TABEAU 1:PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES SATELLITES LANDSAT
Source : Cours SIG télédétection de l'école de technologie supérieure de CANADA

12-Les spécificités thématiques des bandes spectrales

Les images Landsat 8 et 9 disposent de 9 bandes spectrales et 2 bandes thermiques

Bande 2: le bleu :

- le rayonnement est très diffusé par l'atmosphère et pénètre mieux sous l'eau
- cette bande peut être utilisée pour la discrimination sol /végétation et l'identification de zones de bâti.

Bande 3: le vert :

Pénètre assez bien dans l'eau claire et donne un excellent contraste entre l'eau claire et trouble (boueuse)

- identifie le bâti.
- la diffusion atmosphérique du rayonnement vert est beaucoup moins forte que celle du bleu les images sont plus nettes.

Bande 4: le rouge

Il s'agit du rayonnement le plus absorbé par la végétation vivante et le plus fortement réfléchi par les surfaces de sol comme le sable ou les secteurs bâtis.

- Les contrastes entre secteurs boisés et déboisées sont très forts au printemps, mais peu de nuances sont visibles à l'intérieur des unités de végétation.

Bande 5: PIR

Le PIR est fortement réfléchi par la végétation verte vivante et totalement absorbé par l'eau.

- Le contraste entre la végétation et l'eau est maximum dans cette bande.
- Les surfaces du sol absorbent plus le PIR que le visible et apparaissent donc plus sombres.
- La réflexion varie selon les espèces végétales

Bande 6: l'Infrarouge Moyen MIR 1

Fournit un bon contraste entre les types différents de végétation.

- également utile pour mesurer l'humidité du sol et de la végétation.
- aide à discriminer les minéraux d'altérations qui accompagnent les métaux précieux.

Bande 7: Moyen Infrarouge MIR2

Fournit un bon contraste général,

- mesure l'humidité de la végétation
- aide à différencier entre la neige et les nuages.
- aide à discriminer les minéraux d'altérations qui accompagnent les métaux précieux.

Bande 8: panchromatic

Rouge + Vert + Bleu forment ensemble une bande Pan (panchromatique, qui signifie "toutes les couleurs"). Une image dans la bande Pan apparaît généralement en noir et blanc et a une résolution spatiale plus élevée par rapport à la plupart des autres bandes. Ainsi, la combinaison d'une bande panchromatique avec n'importe quel autre type de bandes spectrales rend l'image finale composée plus "nette" mettant en évidence plus de détails

- **Bande 9: Cirrus**

Les images prises dans la bande Cirrus révèlent des nuages de haute altitude qui sont invisibles dans la plupart des autres bandes spectrales.

- **Bande 10 – Infrarouge thermique (TIRS) 1 (10,6 – 11,19 microns)**
- **Bande 11 – Infrarouge thermique (TIRS) 2 (11,50 – 12,51 microns)**

Ces deux bandes spectrales sont : Infrarouge Thermique (TIRS) :

En utilisant la bande LWIR (signifie la région infrarouge à ondes longues, entre 8 et 14 microns), nous pouvons détecter la chaleur rayonnante émise par les surfaces terrestres et aquatiques. Cela signifie que nous pouvons mesurer les températures de ces surfaces. Les deux types de bandes spectrales de Landsat-8 se trouvent dans la région infrarouge à ondes longues, ce qui permet à ce satellite de mesurer les températures.

Code	Longueur d'onde (microns)	Couleur	Domaine spectral	Domaines d'utilisation
OLI1 TM1 QB1	0,45-0,52	Bleu	Visible	Cartographie des eaux littorales Différentiation sol/végétation Différentiation feuillus/conifères
OLI2 TM2 QB2 S1 MSS4	0,56-0,60 0,50-0,60 0,50-0,60 0,50-0,60	Vert Vert Vert-Jaune Vert-Jaune	Visible	Détection de la santé des végétaux Pic de réflectance du vert Chlorophylle
OLI3 TM3 QB3 S2 MSS5	0,63-0,69 0,60-0,70 0,60-0,70 0,60-0,70	Rouge " " "	Visible	Absorption de la chlorophylle → différenciation des espèces végétales
OLI4 TM4 QB4 S3 MSS6 MSS7	0,76-0,90 0,76-0,90 0,76-0,90 0,80-1,10 0,70-0,80 0,80-1,10		PIR	Cartographie de la biomasse Délimitation des plans d'eau
OLI5 TM5	1,55-1,75		IRM-1	Mesure de l'humidité des plantes Différentiation nuage/neige
OLI7 TM7	2,08-2,35		IRM-2	Mesure des altérations végétales dues à la sécheresse.
OLI6 TM6	10,4-12,5		IRT	Cartographie hydrothermale Recherches géologiques

TABLEAU 2: LES SPECIFICITES THEMATIQUES DES BANDES SPECTRALE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

13-Lecture et affichage d'une image satellitaire

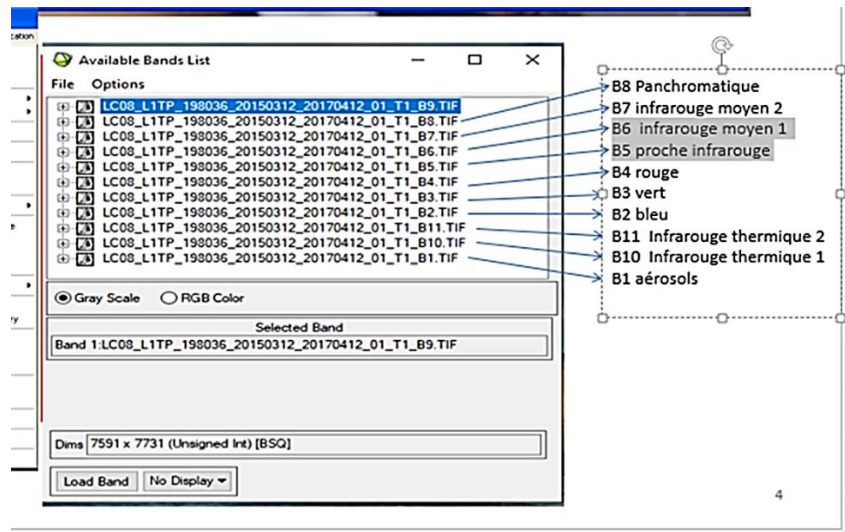


FIGURE 27: LECTURE ET AFFICHAGE D'UNE IMAGE SATELLITAIRE
TELEDETECTION ,ASAL

13-1-Affichage en composition colorée: Combinaisons de bandes spectrales

Les bandes spectrales peuvent être combinées de plusieurs manières, en fonction de la fonctionnalité qui doit être mise en évidence sur l'image. Prenant en considération que les yeux humains ne peuvent voir que dans la plage visible, la plupart des images sont composées de

combinaisons de bandes rouges, vertes et bleues, pour imiter le spectre visible. Cette combinaison de bandes spectrales est connue sous le nom de couleur “vraie” ou “naturelle”.

Lorsqu’une caractéristique particulière de surface doit être mise en évidence sur l’image, on utilise les bandes spectrales au-dessus et au-dessous de la plage visible. Le résultat est une image en couleur dite “fausse” où on peut mettre en évidence une végétation saine, des nuages, l’humidité du sol, des points chauds et d’autres caractéristiques. À l’aide d’algorithmes mathématiques spécialement développés, les caractéristiques mises en évidence peuvent être mesurées pour fournir des données quantitatives. Par exemple, nous pouvons calculer la quantité d’humidité dans le sol, la teneur en chlorophylle dans les feuilles, etc.

-Les compositions colorées permettent de produire des images en couleurs en tenant compte de la signature spectrale des objets.

- Elles sont fréquemment utilisées pour faire ressortir les différents types de surface sur les images multi spectrales ou mettre en évidence certains phénomènes environnementaux, comme les feux de forêts, les vents de sable, les glaces de mer, *etc.*

- Lorsqu’on réalise une composition colorée en combinant deux ou trois bandes spectrales, l’objectif est bien de tirer le maximum d’information de l’image et de rendre l’analyse et l’interprétation plus aisées.

Combinaison de bandes	Utilisation
4 – 3 – 2 (R,V,B)	Couleur naturelle
5 – 4 – 2 (PIR,R,B)	Combinaison standards : la végétation est en rouge
5 – 6 – 4 (PIR,MIR1,R)	Limite entre terre / eau, pour l’étude des sols et de la végétation
7 – 5 – 3 (MIR2,PIR,V)	Utilisée pour la géologie, le sable, le sol et les minéraux montrent de multiples couleurs, spécifique pour les régions désertiques
7 – 6 – 4 (MIR2,MIR1,R)	Utilisée pour la géologie, le sable, le sol et les minéraux montrent de multiples couleurs
6 – 5 – 2 (MIR1,PIR,B)	Utilisée pour l’agronomie, la végétation est en vert
7 – 6 – 5 (MIR2,MIR1,PIR)	Utile pour la géologie, la végétation est en bleu
7 – 4 – 2 (MIR,R,B)	Utile pour la géologie, les roches ont de multiple couleur
6 – 5 – 4 (MIR1,PIR,R)	Santé de la végétation
2 – 4 – 6 (B,R,MIR1)	Réalisation d’une spatiocarte géologique et d’une carte de fracturation
7 – 6 – 3 (MIR2,MIR1,V)	Distinction entre le sol sec et des surfaces rocheuses

TABLEAU 3:TABLEAU DES COMBINAISONS DE BANDES

SOURCE :COURS TELEDETECTION ,ASAL

13-2- Types de composition colorée

1. Compositions en ' vraies couleurs' si l'on veut rendre les images réalistes.
2. Compositions 'fausses couleurs', qui ne représente pas les couleurs réelles, mais qui ont pour but de mettre en avant certains objets dans une image, les images infrarouges fausses couleurs très utilisées pour l'étude de la végétation.

14-Les indices

- Pour augmenter la précision des données extraites d'une combinaison de plusieurs types de bandes spectrales, on peut effectuer avec l'image la transformation à la base de coefficient pour faire un indice.
- Un indice c'est essentiellement un rapport de valeurs dans différentes bandes spectrales pour mesurer le degré élevé ou faible de réflexion d'une caractéristique particulière.
- Le NDVI (Indice de végétation par différence normalisée) et l'EVI (Indice de végétation amélioré) sont des indices couramment utilisés pour mesurer la santé de la végétation. D'autres indices mesurent le degré de gravité des brûlures, la présence de certains minéraux, la densité de la neige, le niveau de stress hydrique, etc. On fait en permanence de nouveaux indices pour développer nos connaissances sur notre planète.

14-1-Indices de végétation simple

$IVS = \text{PIR}/\text{ROUGE}$

$IVS = B5/B4$

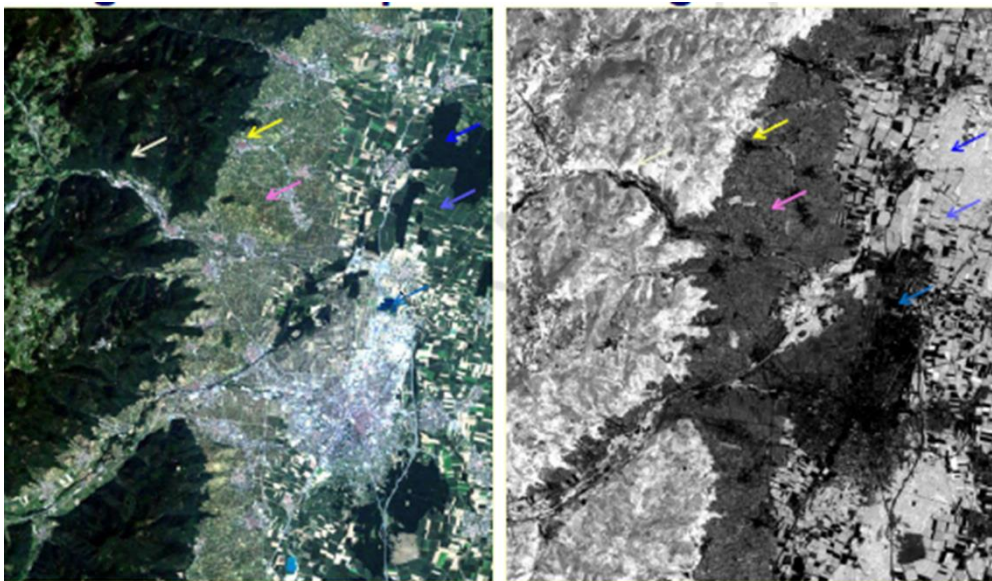


FIGURE 28:EXEMPLE SUR L'INDICES DE VEGETATION SIMPLE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

14-2-Indices de végétation normalisé

$IVN = \text{PIR} - \text{ROUGE} / \text{PIR} + \text{ROUGE}$

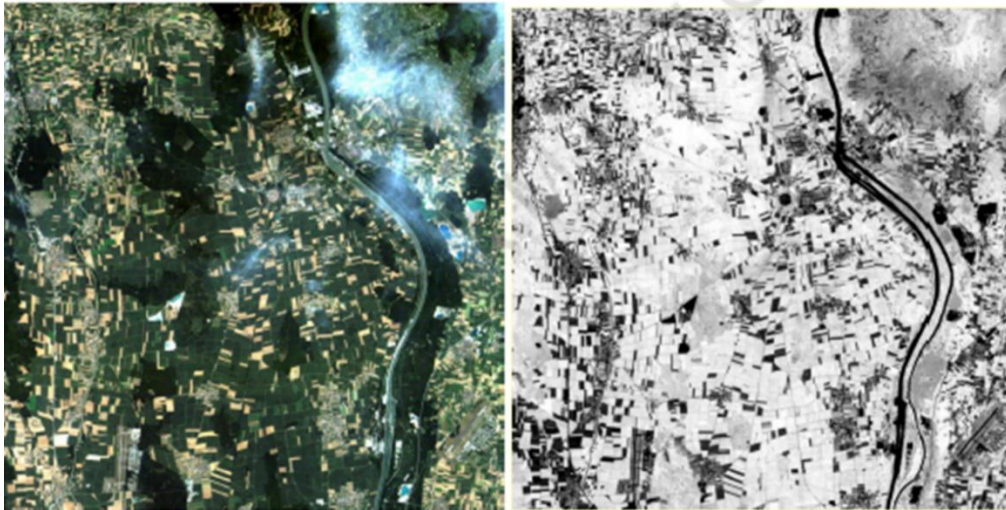


FIGURE 29:EXEMPLE SUR L'INDICES DE VEGETATION NORMALISE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

En termes simples, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) mesure la verdure et la densité de la végétation capturée sur une image satellite. Une végétation saine présente une courbe de réflectance spectrale très caractéristique dont nous pouvons tirer profit en calculant la différence entre deux bandes – le rouge visible et le proche infrarouge. Le NDVI est cette différence exprimée sous forme de nombre – allant de -1 à 1.

Plage d'indices ;

Le NDVI définit des valeurs de -1,0 à 1,0, où les valeurs négatives sont principalement formées de nuages, d'eau et de neige, et les valeurs proches de zéro sont principalement formées de roches et de sols nus.

De très petites valeurs (0,1 ou moins) de la fonction NDVI correspondent à des zones vides de rochers, de sable ou de neige.

Les valeurs modérées (de 0,2 à 0,3) représentent les arbustes et les prairies, tandis que les valeurs élevées (de 0,6 à 0,8) indiquent les forêts tempérées et tropicales.

En termes simples, l'indice de végétation par différence normalisée est une mesure de l'état de santé des plantes basée sur la façon dont la plante réfléchit la lumière à certaines fréquences (certaines ondes sont absorbées et d'autres sont réfléchies).

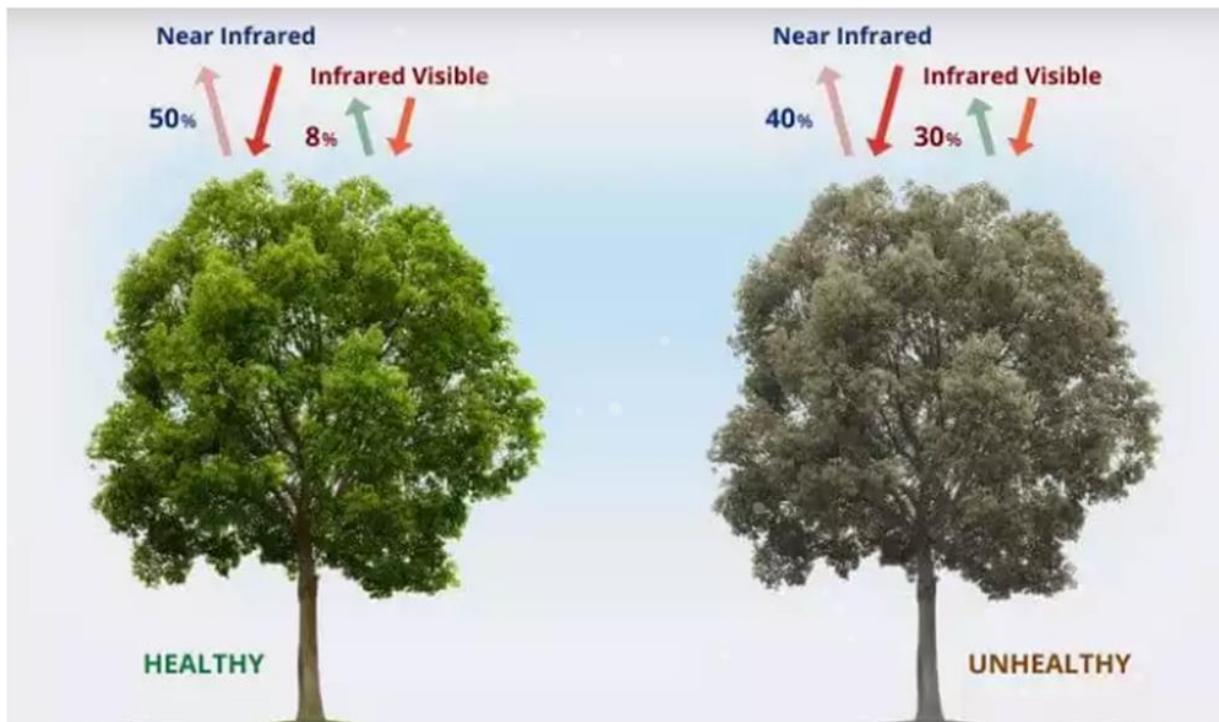


FIGURE 30:LE ROLE DE L'INDICE DE VEGETATION PAR DIFFERENCE NORMALISEE

Source : Développement d'un modèle de reconnaissance automatisé ou semi automatisé d'objets cibles

14-3- L'indice du bâti

Les établissements humains peuvent être identifiés grâce à des indices d'urbanisation, dont l'un est l'indice de différence de bâti normalisé (NDBI).

$$NDBI = \frac{MIR1 - PIR}{MIR1 + PIR}$$

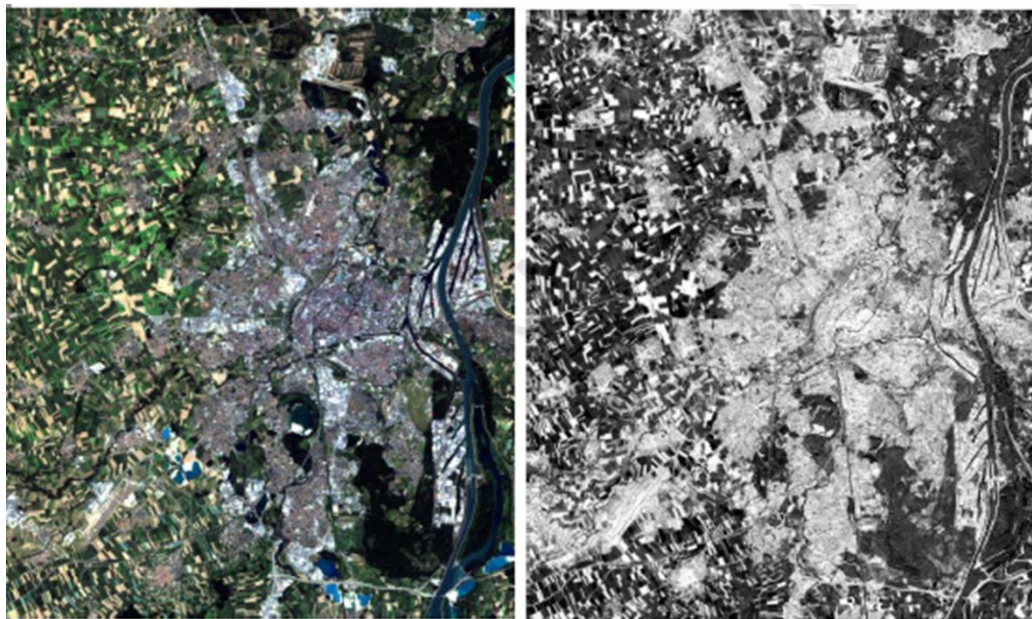


FIGURE 31:EXEMPLE DE L'INDICE DU BATI

Source : Cours télédétection .A.Serradj

14-4- L'indice de l'eau NDWI

$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$

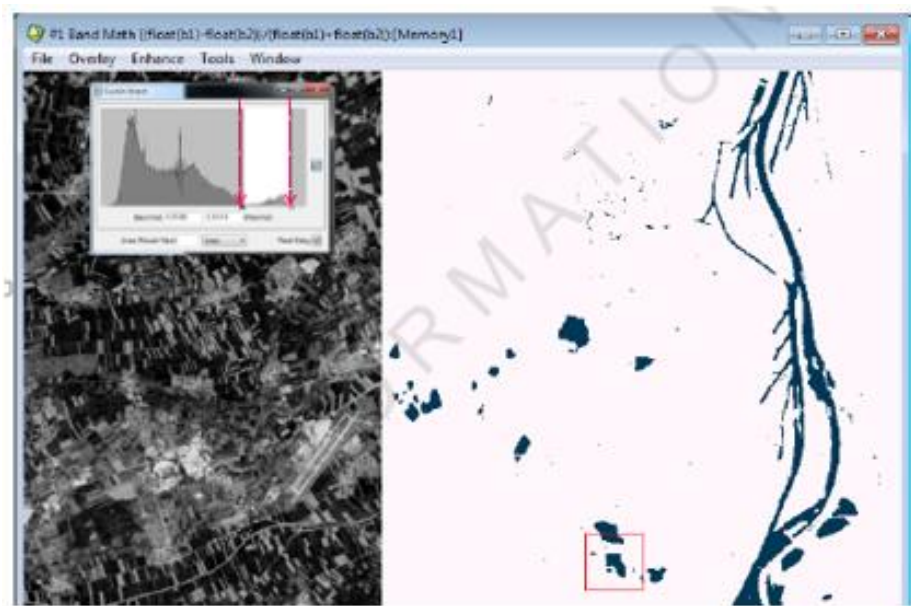


FIGURE 32: EXEMPLE DE L'INDICE DE L'EAU

Source : Cours télédétection .A.Serradj

Comment calculer le NDWI ?

L'équation NDWI ressemble à ceci : $NDWI = \frac{Vert - NIR}{Vert + NIR}$

L'indice d'eau par différence normalisée (NDWI) est utilisé pour mettre en évidence les caractéristiques des eaux libres sur une image satellite, permettant à un plan d'eau de « se démarquer » du sol et de la végétation.

Comment interpréter les valeurs NDWI ?

Les valeurs des plans d'eau sont supérieures à 0,5. La végétation a des valeurs beaucoup plus petites, ce qui permet de distinguer plus facilement la végétation des plans d'eau. Les éléments bâtis ont des valeurs positives comprises entre 0 et 0,2.

Les valeurs NDWI correspondent aux plages suivantes :

0,2 – 1 – Surface de l'eau,

0,0 – 0,2 – Inondation, humidité,

-0,3 – 0,0 – Sécheresse modérée, surfaces non aqueuses,

-1 – -0,3 – Sécheresse, surfaces non aqueuses

15- Les Classifications sur les Images Satellitaires

(Du pixel à la classe thématique)

15-1- Définition

En télédétection, la classification des images satellitaires est le processus qui consiste à assigner des étiquettes ou des catégories à des pixels ou des régions dans une image satellite en fonction de leurs caractéristiques spectrales. En d'autres termes, il s'agit d'attribuer à chaque pixel de l'image une classe prédéfinie qui représente un type spécifique de surface terrestre.

Le processus de classification des images satellitaires implique généralement l'utilisation d'algorithmes et de techniques d'apprentissage automatique. Ces méthodes exploitent les informations spectrales provenant des différentes bandes spectrales de l'image pour distinguer les caractéristiques de la surface terrestre, telles que les types de végétation, les zones urbaines, les plans d'eau, etc.

Les principales étapes de la classification des images satellitaires comprennent la sélection des zones d'entraînement pour chaque classe, l'extraction des caractéristiques spectrales, et l'application d'algorithmes de classification, tels que les classificateurs basés sur les statistiques, les réseaux neuronaux, ou les méthodes de classification supervisée et non supervisée.

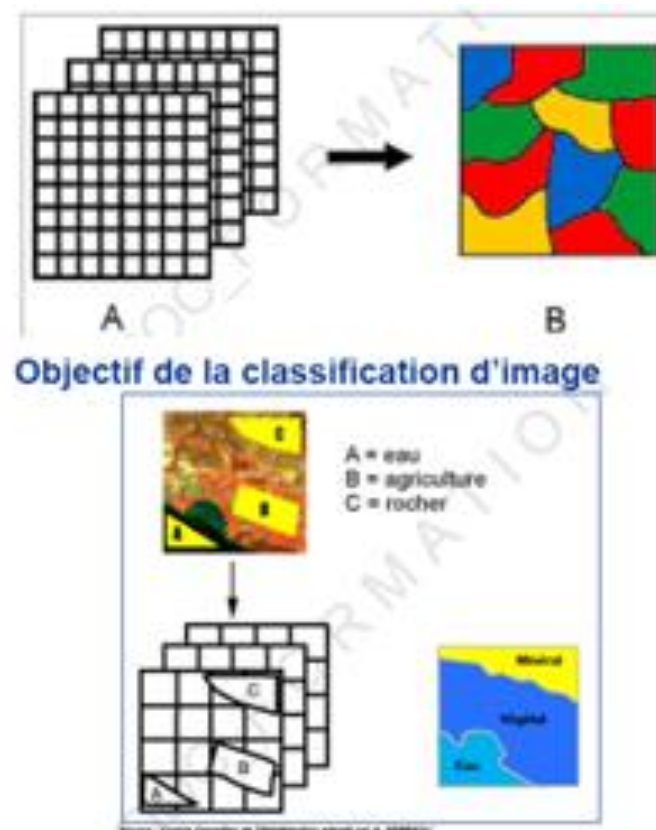


FIGURE 33: LES ETAPES ET L'OBJECTIF DE LA CLASSIFICATION

Source : Cours télédétection .A.Serradj

La classification des images satellitaires en télédétection permet d'analyser et d'interpréter les informations contenues dans les images pour identifier et cartographier différentes classes de caractéristiques de la surface terrestre.

15-2- Types de classification

La classification supervisée et non supervisée sont deux approches distinctes en télédétection pour attribuer des classes à des pixels dans une image satellite.

15-2-1-Classification Supervisée :

Principe : Dans la classification supervisée, l'utilisateur fournit à l'algorithme des échantillons d'entraînement préalablement étiquetés, représentant différentes classes d'intérêt (par exemple, forêt, eau, zones urbaines).

Processus : L'algorithme utilise ces échantillons pour apprendre à distinguer les différentes classes en se basant sur les caractéristiques spectrales des pixels. Il applique ensuite cette connaissance pour classer l'ensemble de l'image en fonction des classes définies.

15-2-2-Classification Non Supervisée :

Principe : À l'inverse, la classification non supervisée ne nécessite pas d'échantillons d'entraînement préalables. L'algorithme segmente l'image en regroupant les pixels similaires en termes de propriétés spectrales, sans connaissance préalable des classes.

Processus : Les groupes formés par l'algorithme correspondent à des "clusters" de pixels partageant des caractéristiques spectrales similaires. L'utilisateur doit ensuite interpréter ces clusters et les attribuer à des classes spécifiques.

La classification supervisée repose sur l'utilisation d'échantillons d'entraînement étiquetés pour enseigner à l'algorithme, tandis que la classification non supervisée cherche à découvrir automatiquement des structures ou des classes à partir des données sans étiquettes préalables. Les deux approches ont leurs avantages et sont adaptées à différents types d'analyses en télédétection.

Le produit final est une image contenant la répartition spatiale des différentes classes thématiques

Strasbourg Spot-XS, 1989

Global Supervised Classification

7 classes



FIGURE 34:EXEMPLE DE CLASSIFICATION D'IMAGE

Source : Cours télédétection .A.Serradj

16-Les avantages et inconvénients de la télédétection

16-1- Les avantages de la télédétection

- Fournit des informations sur la surface de la Terre (y compris l'atmosphère et les océans), sans contact direct avec la terre.
- Fournit des observations à l'échelle mondiale.
- Permet une surveillance continue de notre planète.
- Les données sont disponibles gratuitement et ces données peuvent être analysées.

16-2- Les inconvénients de la télédétection

- L'acquisition simultanée de données spectrales, spatiales, temporelles et radiométriques s'avère complexe.
- Gérer d'importantes quantités de données provenant de divers formats peut entraîner des retards et nécessiter davantage de ressources en termes de temps et de traitement.
- L'utilisation de données satellitaires peut également impliquer des étapes supplémentaires de traitement, de visualisation, ainsi que l'usage d'outils spécialisés.
- Bien que les données soient généralement validées par des mesures de surface, il est vivement recommandé d'effectuer une évaluation à l'échelle locale et régionale pour garantir une interprétation précise.

Références Bibliographique

Livres et ouvrages académiques

- **Ait-Lahcen, M., & Bouslama, M. (2012). Géomatique pour l'aménagement du territoire et l'urbanisme. Paris: L'Harmattan.**
Cette référence est correcte et correspond à un ouvrage réel publié par L'Harmattan, éditeur spécialisé en sciences humaines et sociales.
- **Bakis, H., & Bonin, M. (2000). La photographie aérienne et spatiale. Paris: Presses Universitaires de France.**
Cette référence est avérée, Presses Universitaires de France publient plusieurs ouvrages sur la photographie aérienne, dont celui-ci.
- **Bariou, R. (1978). Manuel de télédétection: photographie aérienne, image radar, thermographies, satellites. Paris: SODIPE.**
Référence validée dans des catalogues. Ouvrage ancien mais disponible dans des bibliothèques spécialisées.
- **Beiranvand Pour, A., Guha, A., Crispini, L., Chatterjee, S., et al. (Eds.). (2024). Hyperspectral Remote Sensing from Spaceborne and Low Altitude Aerial/Drone-Based Platforms — Differences in Approaches, Data Processing Methods, and Applications. MDPI Books.**
Livre récent en accès ouvert publié par MDPI Books. DOI valide : [10.3390/books978-3-0365-9833-8](https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-9833-8).
- **Bessière, P.-H., & Bouchier, J.-M. (2010). Imagerie satellite et géomatique pour l'analyse de l'environnement. Techniques de l'Ingénieur.**
Technique de l'Ingénieur est un site et collection bien connus. Cette référence correspond à un article ou dossier disponible en ligne.
- **Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). Introduction to remote sensing (5th ed.). New York, NY: Guilford Press.**
Ouvrage fondamental souvent cité, publication authentifiée.
- **Chevallier, R. (1965). Photographie aérienne: panorama Intertechnique. Paris: Gauthier-Villars.**
Ce livre existe dans les archives bibliographiques sur la photographie aérienne.
- **Deshpande, S. S. (2023). Hyperspectral remote sensing in urban environments. CRC Press.**
Livre récent bien référencé chez CRC Press, DOI valide : [10.1201/9781032359106](https://doi.org/10.1201/9781032359106).
- **Gagnon, H. (1974). La photo aérienne: son interprétation dans les études d'environnement et de l'aménagement du territoire. Montréal: HRW.**
Ouvrage ancien mais présent dans divers catalogues universitaires canadiens.
- **Garry, G., & Camou. (1984). Photo-interprétation: de la photographie aérienne à l'urbanisme. Paris: Ministère de l'Urbanisme.**
Référence plausible, publiée par une institution gouvernementale française.
- **Girard, M.-C., & Girard, C. (1999). Traitement de données de télédétection. Paris: Dunod.**
Livre universitaire disponible chez Dunod.
- **Huang, J. (Ed.). (2023). Hyperspectral imaging – A perspective on recent advances and applications. IntechOpen.**
Livre open access disponible via IntechOpen, DOI : [10.5772/intechopen.102315](https://doi.org/10.5772/intechopen.102315).
- **Joseph, G. (2003). Fundamentals of remote sensing. Hyderabad: Universities Press.**
Ouvrage académique disponible, fréquemment cité.

- **Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation (7th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.**
Référence incontournable dans le domaine, disponible et largement utilisée.
- **Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. (2015). Geographic information systems and science. Hoboken, NJ: Wiley.**
Ouvrage académique reconnu.
- **Marghany, M. (Ed.). (2022). Recent remote sensing sensor applications – Satellites and unmanned aerial vehicles (UAVs).**
Disponible sur IntechOpen, DOI : [10.5772/intechopen.95162](https://doi.org/10.5772/intechopen.95162).
- **Philipson, W. R. (2000). Manual of photographic interpretation (2nd ed.). Bethesda, MD: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.**
Livre reconnu dans la photographie aérienne et la télédétection.
- **Plénat, P.-J. (2015). Introduction à la télédétection. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.**
Publication valide en télédétection.
- **Poussou, J.-P., & Guichard, M. (2011). La télédétection: Principes et applications. Paris: Dunod.**
Livre académique publié chez Dunod, domaine télédétection.
- **Sabins, F. F. (1997). Remote sensing: Principles and interpretation (3rd ed.). New York, NY: W.H. Freeman and Company.**
Ouvrage classique en télédétection.
- **Scanvic, J.-Y. (1983). Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. Orléans: Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM).**
Publication officielle BRGM, existante.
- **Singhroy, V. (Ed.). (2021). Advances in remote sensing for infrastructure monitoring. Cham: Springer.**
Publié chez Springer, DOI valide : [10.1007/978-3-030-59109-0](https://doi.org/10.1007/978-3-030-59109-0).

Cours et supports pédagogiques

- **ASAL. Cours de télédétection.**
C'est une ressource universitaire classique, mais sans précisions supplémentaires, elle est difficile à vérifier précisément.
- **École de technologie supérieure du Canada. Cours SIG et télédétection.**
Cours publiés en ligne ou en interne dans plusieurs universités, plausible.
- **Serradj, A. Cours de télédétection.**
Auteur probablement un enseignant proposant des notes disponibles en ligne; absence de date rend la vérification complète difficile.
- **Université de Genève. (2001). Cours de télédétection (Cours n°4645). Département de géographie.**

Sites web et documents en ligne

- **Applisat. Plateforme télédétection. (<https://applisat.fr>)**
- **CEDF Québec. (2021). Colloque présentation – Rihab Saadouni. ESRI. Site officiel. (<https://www.esri.com>)**
Site web officiel d'ESRI, leader mondial en SIG.
- **Gouvernement du Canada. Interprétation des photographies aériennes.**
- **Lillesand, T., & Kiefer, R. (1987). State of satellite imager..**

- **Maya Climate. Beginner's guide to satellite remote sensing (SRS) for natural assets..**
- **NASA Earth Observatory. Earth observation.**
(<https://earthobservatory.nasa.gov>)
Site officiel bien connu.
- **Richadutt. Introduction to hyperspectral remote sensing – Part I.**