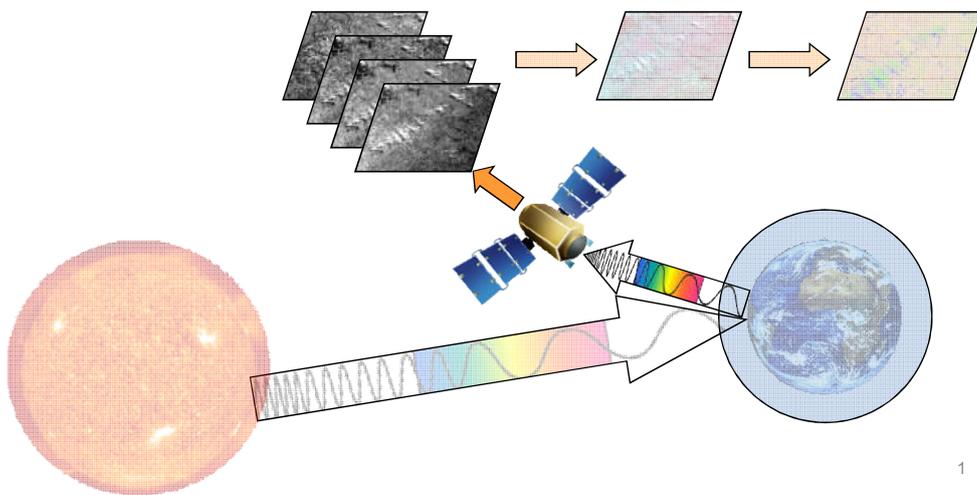


**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Ferhat Abbas de Sétif**

**Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie**

## **Polycopié du Cours: Télédétection et SIG**

Destiné aux étudiants de la 3<sup>ème</sup> Année Licence Ecologie et  
Environnement



**Réalisé par : Dr. Amina Beldjazia**

## **Contenu de la matière :**

### **Chapitre 1 : Notions de base de la télédétection**

#### **1. Introduction**

- 1.1. Définitions de la télédétection
- 1.2. Historique de la télédétection
- 1.3. Le rayonnement électromagnétique
- 1.4. Le spectre électromagnétique
- 1.5. Notions de radiométrie
- 1.6. Interactions avec l'atmosphère
- 1.7. Détection passive et active
- 1.8. Caractéristiques des images

#### **2. L'acquisition des données en télédétection (Capteurs)**

- 2.1. Le satellite en orbite
- 2.2. La géométrie orbitale usuelle en télédétection
- 2.3. Les deux grands types d'orbite utilisés en télédétection
- 2.4. Composition des capteurs
- 2.5. Les résolutions
- 2.6. Les appareils photographiques et la photographie aérienne
- 2.7. Satellites et capteurs d'observation de la terre
- 2.8. Réception, transmission et traitement des données

#### **3. Analyse d'image**

- 3.1. Élément d'interprétation visuelle
- 3.2. Traitement numérique des images
- 3.3. Les prétraitements
- 3.4. Classification

#### **4. Les domaines d'application de la télédétection**

- 4.1. Foresterie
- 4.2. Agriculture
- 4.3. Couverture et l'utilisation du sol
- 4.4. Changements d'utilisation du sol (rural/urbain)

### **Chapitre 2 : Le système d'information géographique**

#### **1. Définition d'un SIG**

#### **2. Structure de l'information géographique**

### **3. L'information Géographique**

#### **4. Les données géographiques**

4.1. La donnée « raster »

4.2. La donnée « vecteur »

#### **5. Les modèles des SIG**

5.1. Le modèle métrique (spaghetti)

5.2. Le modèle topologique

#### **6. Les domaines d'utilisation du SIG**

#### **7. La métadonnée**

#### **8. Les fonctionnalités d'un SIG**

8.1. Abstraction

8.2. Acquisition

8.3. Archivage

8.4. Analyse

8.5. Affichage

#### **Bibliographie**

## Chapitre 1 : Notions de base de télédétection

### 1. Introduction

La télédétection est née de la fusion de deux inventions anciennes : la montgolfière (première plate-forme d'observation aérienne) et la photographie. En réalité, la télédétection moderne est née de la photographie aérienne, qui a connu un essor considérable au cours du XX<sup>e</sup> siècle, surtout au cours de la seconde guerre mondiale.

L'année qui symbolise l'entrée de la télédétection dans l'ère moderne est l'année 1957 avec le lancement de Spoutnik, premier satellite artificiel à être placé en orbite autour de la terre. Depuis, de nombreux pays dont les USA, le Canada, la France, l'ex-URSS puis la Russie, la Chine, le Japon ou encore l'Inde ont développé leurs propres programmes de télédétection. Aujourd'hui, des dizaines de satellites d'observation de la terre sont en orbite et fournissent en permanence des milliers d'images pour des applications civiles.

#### 1.1. Définitions de la télédétection

"La télédétection est la science et l'art d'obtenir l'information sur un objet, surface ou phénomène à travers l'analyse des données acquises par un moyen qui n'est pas en contact avec l'objet, la surface ou le phénomène à étudier" (Lillesand & Kiefer, 1987).

La télédétection est l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci. *Télé* signifie "à distance" et *détection* veut dire "découvrir" ou "détecter" (Commission interministérielle de terminologie de la télédétection aérospatiale, 1988).

La télédétection est une discipline qui cherche à obtenir des informations de la Terre en utilisant des images acquises par des satellites ou des plateformes aériennes et en se servant de la radiation électromagnétique émise ou réfléchi par la surface terrestre (Lillesand et Kiefer, 1994 ; Chuvieco, 1996).

La télédétection utilise les propriétés physiques des objets pour acquérir des informations sur leur nature. Ceci implique une interaction entre l'énergie qui est transmise par le rayonnement électromagnétique et les objets. Pour la plupart des plates-formes satellitaires, cette énergie est enregistrée par un capteur et transmis à une station de réceptions, sous forme d'une image numérique (Lillesand et Kiefer, 1994).

#### 1.2. Historique de la télédétection

L'histoire des techniques de la télédétection peut être découpée en cinq grandes époques :

- de 1856, date à laquelle, pour la première fois, un appareil photographique a été installé de façon fixe à bord d'un ballon, à la première guerre mondiale, se déroule l'époque des pionniers,

pendant laquelle sont explorées les possibilités de la photographie aérienne verticale pour la cartographie ; les lois fondamentales de la stéréoscopie et de la photogrammétrie sont découvertes à la fin du XIXe siècle.

- de la première guerre mondiale à la fin des années 50, la photographie aérienne devient un outil opérationnel pour la cartographie, la recherche pétrolière, la surveillance de la végétation. On assiste à un progrès continu de l'aviation, des appareils photographiques et des émulsions (couleur, infrarouge noir et blanc, infrarouge fausse couleur). Les méthodes de la photo-interprétation sont précisées et codifiées.

- la période qui commence en 1957 et s'achève en 1972 marque les débuts de l'exploration de l'Espace et prépare l'avènement de la télédétection actuelle. Le lancement des premiers satellites, puis de vaisseaux spatiaux habités à bord desquels sont embarqués des caméras, révèle l'intérêt de la télédétection depuis l'espace. Parallèlement, les radiomètres-imageurs sont mis au point et perfectionnés, de même que les premiers radars embarqués à bord d'avions. La première application opérationnelle de la télédétection spatiale apparaît dans les années 60 avec les satellites météorologiques de la série ESSA.

- le lancement en 1972 du satellite ERTS (rebaptisé ensuite Landsat 1), premier satellite de télédétection des ressources terrestres, ouvre l'époque de la télédétection moderne. Le développement constant des capteurs et des méthodes de traitement des données numériques ouvre de plus en plus le champ des applications de la télédétection et en fait un instrument indispensable de gestion de la planète, et, de plus en plus, un outil économique.

- depuis les années 70, on assiste à un développement continu de la télédétection, marqué notamment par :

- l'augmentation de la résolution spatiale des capteurs, déjà évoquée.

- la diversification des capteurs qui utilisent des domaines de plus en plus variés et spécialisés du spectre électromagnétique. Dans les années 90, on assiste ainsi à la multiplication des satellites équipés de capteurs actifs, radars en particulier. Dans le domaine du rayonnement visible et infrarouge, les capteurs à très haute résolution spectrale sont aujourd'hui d'utilisation courante dans leur version aéroportée et font leur apparition à bord de satellites.

- la diffusion des données sur une base commerciale, envisagée dès le lancement du programme SPOT en 1986, se traduit aujourd'hui par le lancement de satellites de télédétection par des sociétés privées. Les données de télédétection deviennent l'objet d'un marché concurrentiel.

La diffusion accélérée et l'augmentation de la puissance des ordinateurs contribue de façon continue à promouvoir de nouvelles méthodes d'utilisation des données toujours plus abondantes que fournit la télédétection spatiale. Les données des satellites météorologiques et océanographiques sont aujourd'hui un auxiliaire indispensable de la prévision numérique du temps et du climat et font l'objet d'une assimilation directe par les modèles numériques. Les images de télédétection destinées à l'observation fine de la surface terrestre, y compris les photographies aériennes traditionnelles, sont, sous forme numérique, intégrées aux Systèmes d'Information Géographique (GUEYE I., 2013).

### Tableau 1 : historique de la télédétection

#### Quelques dates

- 1839 : Mise au point de la photographie (NIEPCE, DAGUERRE).
- 1844 : Premières photographies aériennes réalisées depuis un ballon par G.F. Tournachon dit NADAR.
- 1856 : Le même NADAR fait breveter l'installation d'une chambre photographique à bord de la nacelle d'un ballon pour la prise de photographies aériennes verticales.
- 1858-1898: LAUSSEDAT expérimente systématiquement l'utilisation de la photographie aérienne (ballon) en cartographie et met au point les méthodes de la photogrammétrie.
- 1909: Premières photographies depuis un avion (WRIGHT).
1914-1918 : Utilisation intensive de la photographie aérienne comme moyen de reconnaissance pendant la 1ère guerre mondiale.
- 1919 : Mise au point du premier restituteur stéréoscopique moderne (appareil de POIVILLIERS) pour l'utilisation des photographies aériennes en cartographie topographique.
- 1919-1939 : Essor de la photographie aérienne pour la cartographie et la prospection pétrolière (Moyen-Orient).
- 1940 : Apparition des premiers radars opérationnels en Grande-Bretagne (bataille d'Angleterre).
- Depuis 1945: Développement continu de la photographie aérienne comme méthode opérationnelle de cartographie et de surveillance de l'environnement. Perfectionnement des appareils et des émulsions (infrarouge).

1957 : Lancement de Spoutnik 1, premier satellite artificiel.
- 1960-1972 : Développement parallèle de la technique des satellites et des capteurs (mise au point des radiomètres et radars imageurs).
- 1960 : Lancement de Tiros, premier satellite météorologique équipé de caméras de télévision pour le suivi des masses nuageuses.
- 1964-69 : Embarquement d'appareils photographiques à bord d'engins spatiaux habités.
- 1972 : Lancement d'ERTS, rebaptisé Landsat 1, premier satellite spécialisé de télédétection des ressources terrestres.
- 1974-78 : Mise en place, sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale, du réseau des satellites météorologiques géostationnaires.
- 1978 : Lancement de Seasat, premier satellite spécialisé dans la télédétection de l'océan, équipé, entre autres capteurs, d'un radar.
- 1982 : Apparition de la haute résolution spatiale pour l'observation de la Terre : lancement de Landsat 4, équipé du radiomètre « Thematic Mapper ».
- 1986 : Lancement de SPOT 1 (Système Probatoire d'Observation de la Terre), satellite français de télédétection. Début de l'exploitation commerciale des images (Société Spotimage).
- 1991 : Mise en orbite et début de l'exploitation du satellite européen ERS-1, équipé de plusieurs capteurs passifs et captifs pour l'étude de l'environnement global de la planète.
- 1999 : Lancement par la société privée Space Imaging Corp. du satellite IKONOS, offrant des images à très haute résolution spatiale (1 m).

### 1.3. Le rayonnement électromagnétique

En télédétection, on utilise les propriétés physiques des objets observés, en particulier leurs propriétés optiques, pour acquérir de l'information sur la nature de ces objets. Cette information est portée vers le système d'observation à l'aide d'un rayonnement électromagnétique, comme la lumière, qui est la manifestation visible de ce rayonnement. Le système d'observation reçoit ce rayonnement et le traduit en éléments compréhensibles par l'utilisateur comme des images ou des données chiffrées (Bonn et al., 1996).

#### a. Les ondes électromagnétiques

L'énergie peut se transporter d'un point à un autre sous forme d'ondes. Certaines ondes nécessitent pour se propager un milieu favorable ; c'est le cas des ondes sismiques, par exemple,

qui se transmettent dans les matériaux solides, ou encore du son qui voyage dans l'air ou dans l'eau. Le son est une vibration longitudinale qui nécessite pour sa transmission un milieu élastique. Aucun son ne peut être transmis dans le vide. Par contre, les rayonnements électromagnétiques, comme la lumière, peuvent se transmettre dans le vide. Selon Maxwell, la radiation électromagnétique est une forme dynamique d'énergie qui ne se manifeste que dans son interaction avec la matière. Elle se comporte comme un champ de forces dont les variations affectent les propriétés électriques et magnétiques de la matière : une variation de champ magnétique crée un courant électrique et vice versa, d'où le terme d'électromagnétique, car les deux manifestations sont inséparables.

Une onde électromagnétique est représentée par deux vecteurs perpendiculaires indissociables, dont l'amplitude varie périodiquement avec le temps : le champ électrique  $E$  et le champ magnétique  $H$ . La direction de propagation de cette onde est perpendiculaire au plan défini par ces deux vecteurs.

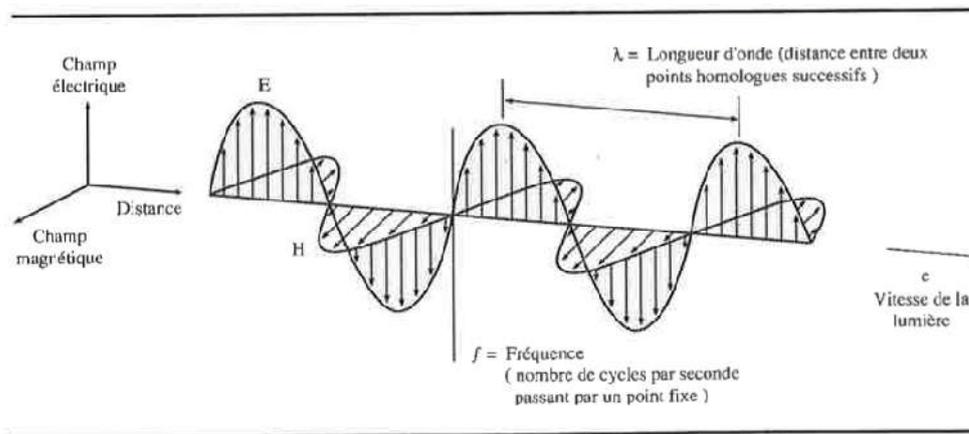
Toute onde peut être décrite mathématiquement par sa fonction d'onde qui associe le temps et l'espace. Pour une onde plane, cette fonction peut être exprimée par :

$$E = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi) \quad (\text{eq. 1})$$

où le sens de déplacement sera suivant  $x$  et la vibration perpendiculaire à cet axe, et où

- $t$  est le temps (s)
- $E_0$  est l'amplitude (V),
- $\omega$  est la fréquence angulaire ou pulsation ( $\omega = 2\pi \nu$ ) où  $\nu$  est la fréquence définie ci-dessous en eq. 2 ( $\text{s}^{-1}$ ),
- $k$  est le nombre d'ondes ( $2\pi/\lambda$ ) ou  $\lambda$  est la longueur d'onde définie ci-dessous en eq. 3,
- $\phi$  est le déphasage

Ces ondes sont connues comme ondes planes parce que la phase de l'onde est constante sur le plan de l'espace perpendiculaire à la direction de déplacement. L'équation 1 est représentée par la figure 1.



**Figure 1 : L’onde électromagnétique simple (monochromatique, plane) (Lillesand et Kiefer, 2000).**

Le rayonnement électromagnétique se caractérise par une période, une fréquence, une vitesse de propagation, une longueur d’onde et une amplitude.

La période est le temps T durant lequel l’onde fait une oscillation complète et la fréquence  $\nu$  est l’inverse de la période. La fréquence est le nombre d’oscillations par seconde.

$$T = 2\pi / \omega = 1 / \nu \quad \text{Eq. 2}$$

La longueur d’onde est la distance parcourue par l’onde à la vitesse  $\nu$  pendant une période T.

$$\lambda = \nu T = 2\pi / k \quad \text{Eq. 3}$$

Fréquence  $\nu$ , vitesse  $\nu$  et longueur d’onde  $\lambda$  sont reliées par l’expression suivante, liant les propriétés spatiales et temporelles de l’onde :

$$\nu = \lambda \nu = \omega / k \quad \text{Eq. 4}$$

Plus la fréquence est élevée, plus la longueur d’onde est petite. La fréquence est indépendante du milieu de propagation ; mais la vitesse est donc la longueur d’onde, en sont dépendantes. Il vaut dès lors mieux caractériser un type d’ondes par sa fréquence plutôt que par sa longueur d’onde, cette dernière n’étant pas la même dans l’eau ou dans le verre, par exemple.

Dans le vide et, à peu de chose près, dans l’air, la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques est :  $c = 300\,000 \text{ km.s}^{-1} = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ , la relation (eq.4) peut donc s’écrire :

$$\lambda = c / \nu \quad \text{Eq. 5}$$

Malgré cela, dans les fréquences du visible, de l'ultraviolet et de l'infra-rouge, on caractérise souvent les rayonnements par leur longueur d'onde, parce qu'une fois exprimées en microns, les longueurs d'onde les plus fréquemment utilisées s'expriment en chiffres simples. Il faut toutefois garder à l'esprit que ces longueurs d'onde ne s'appliquent vraiment que dans le vide ou dans l'air.

Les vitesses de propagation et les longueurs d'onde sont réduites dans d'autres milieux, comme l'eau. Le rapport de réduction de vitesse par rapport au vide est appelé indice de réfraction  $n$  du milieu  $m$  considéré.

$$n_m = c / v_m = \lambda_{\text{vide}} / \lambda_m \quad \text{Eq. 6}$$

Par définition, l'indice de réfraction du vide est égal à 1 et celui de l'air est sensiblement le même que celui du vide ; celui de l'eau est de 1.33 et celui des éléments constitutifs d'une même cellule végétale est proche de 1.5 (Guyot, 1989). La réfraction s'accompagne d'un phénomène de dispersion spectrale de la lumière. En effet, comme la vitesse de propagation de l'onde est fonction de la fréquence, dans tout milieu dont l'indice de réfraction est supérieur à 1, la réfraction met en évidence la dispersion selon les fréquences, comme cela se produit dans le cas d'un prisme. Elle s'accompagne aussi d'une modification géométrique du trajet optique obéissant aux lois de Descartes qui sont à la base de l'optique géométrique et de la conception des lentilles photographiques.

L'amplitude  $E_0$  exprime l'intensité  $I$  de l'onde électromagnétique. Plus l'amplitude est grande, plus la radiation est intense (Bonn et Rochon, 1996).

### **b. Rayonnement et énergie**

Le rayonnement électromagnétique est une forme de transport d'énergie. Une onde électromagnétique transporte l'énergie non pas de façon continue, mais de façon discrète (au sens mathématique du terme), par entités élémentaires ou quanta d'énergie. Ces quanta d'énergie peuvent être assimilés à des particules, et sont parfois appelés des photons. La quantité d'énergie associée à un photon dépend de la fréquence :

$$E = h \cdot \nu \quad \text{Eq. 7}$$

où  $E$  : est la quantité d'énergie ;

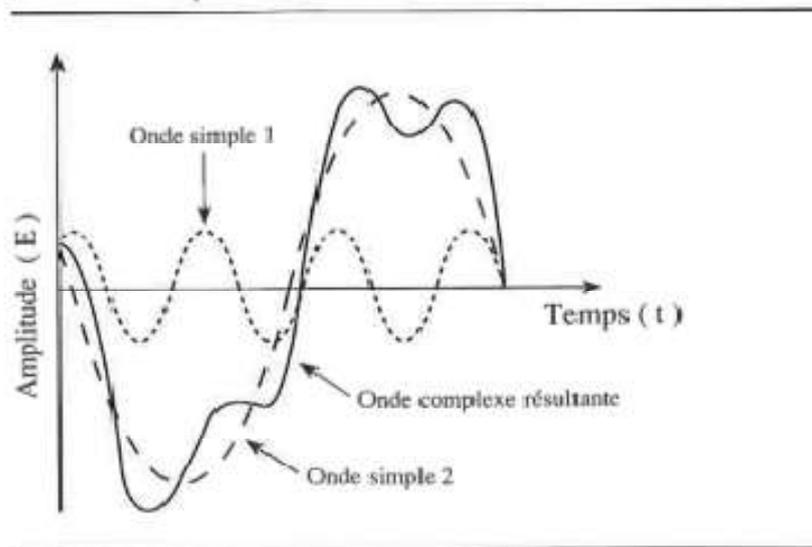
$\nu$  : la fréquence ;

$h$  : la constante de Planck :  $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$  J.s,

Les rayonnements de fréquence élevée ou de courte longueur d'onde (ultraviolet, lumière visible) transportent ainsi beaucoup plus d'énergie que les rayonnements de grande longueur d'onde (infrarouge, micro-ondes). C'est l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique qui est détectée par les capteurs utilisés en télédétection.

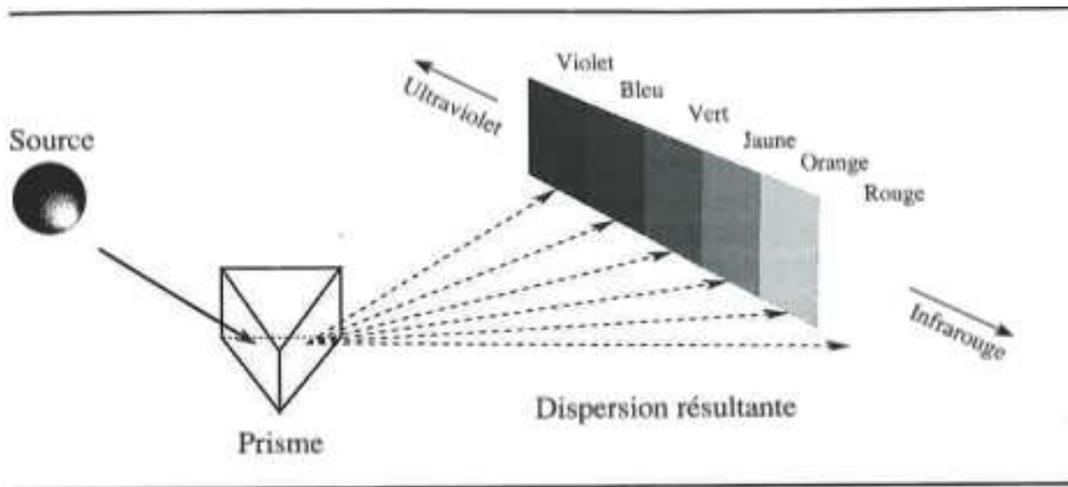
#### 1.4. Le spectre électromagnétique

Les différentes ondes électromagnétiques que l'on peut observer dans la nature sont le résultat de la superposition d'ondes sinusoïdales simples, caractérisées chacune par une amplitude et une fréquence différentes, et donc par des longueurs d'onde propres. La superposition de deux ondes sinusoïdales peut se visualiser simplement par deux ondes simples mais d'amplitude et de fréquence différentes se superposant pour former une onde complexe (fig. 2) (Bonn et al., 1996).



**Figure 2 : Superposition d'ondes simples (Bonn et Rochon, 1996).**

Par analogie, on peut comprendre que tout rayonnement électromagnétique peut être décomposé en ondes sinusoïdales élémentaires qu'on appellera composantes spectrales du rayonnement considéré. L'adjectif spectral fait référence au spectre obtenu quand la lumière blanche passe dans un prisme (fig. 3). Cette notion de spectre a été étendue à toutes les ondes électromagnétiques dont la partie visible correspond à des longueurs d'onde situées entre 0.4 et 0.7  $\mu\text{m}$ .



**Figure 3 : Dispersion spectrale de la lumière au moyen d'un prisme (Bonn et Rochon, 1996).**

La figure 4 représente le spectre électromagnétique, les différents types de rayonnement y sont classés selon leur longueur d'onde et leur fréquence. L'échelle des fréquences, et donc des longueurs d'onde, est logarithmique sur cette figure.

Les principales zones du spectre dans lesquelles des mesures sont possibles en télédétection sont :

- l'ultraviolet (quoique rarement) ;
- le visible, de 0.4 à 0.7  $\mu\text{m}$ , souvent décomposé en bandes spectrales plus étroites ;
- l'infrarouge proche, c'est-à-dire proche du visible, de 0.7 à 1.5 $\mu\text{m}$  ;
- l'infrarouge moyen, de 1.5 à 3 $\mu\text{m}$  ;
- l'infrarouge thermique, de 3 à 15 $\mu\text{m}$  ;
- les hyperfréquences appelées aussi micro-ondes, de 1 millimètre à 1 mètre.

En télédétection, l'utilisation des ondes électromagnétiques comme support d'information se traduit la plupart du temps par une mesure de l'intensité de celle-ci au moyen de capteurs spécifiques ; c'est pourquoi il faut détailler les différentes grandeurs et unités utilisées en radiométrie (Bonn et Rochon, 1996).

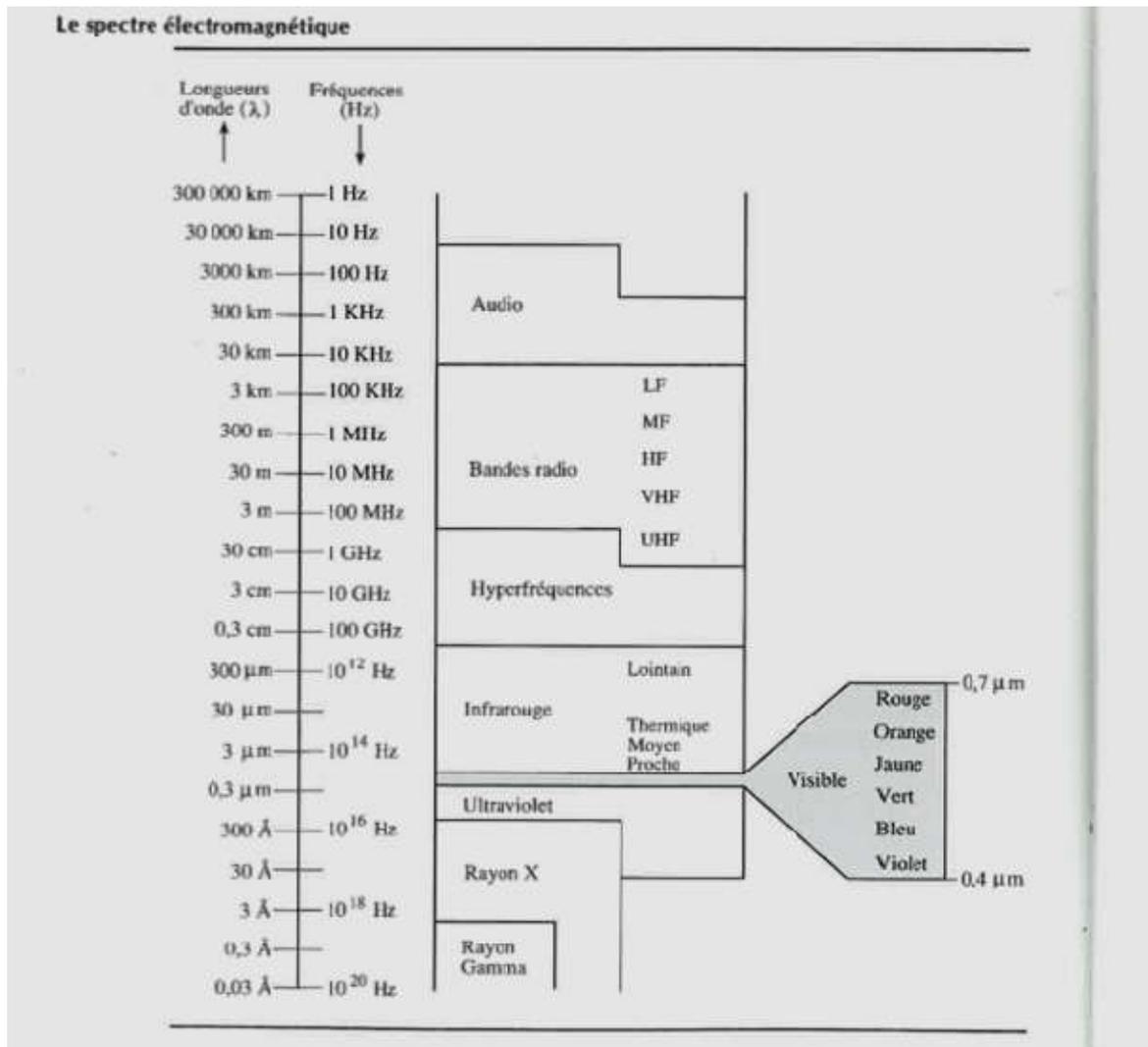


Figure 4 : Le spectre électromagnétique (Bonn et Rochon, 1996).

Les sources du rayonnement varient également selon le domaine du spectre :

- le rayonnement ultraviolet, visible ou infrarouge est émis par les corps, objets ou surfaces en fonction de leur température : rayonnement solaire (U.V., visible et proche infrarouge), rayonnement terrestre (infrarouge thermique).

- les rayonnements de très courte longueur d'onde (rayons gamma, rayons X) sont produits par les restructurations des noyaux des atomes (radioactivité).

- les rayonnements visible, infrarouge ou microonde peuvent être produits artificiellement par vibration ou rotation des molécules (fluorescence, lasers, four à microondes).

- les rayonnements de grande longueur d'onde sont produits par des oscillations électroniques (antennes).

## 1.5. Notions de radiométrie

La radiométrie est la mesure des grandeurs physiques reliées à la lumière, et par extension, à tout le rayonnement électromagnétique. On parle aussi de photométrie, terme qui implique une limitation à la partie visible du spectre. On peut l'aborder selon trois points de vue : le point de vue énergétique, le point de vue spectral et le point de vue lumineux (Bonn et Rochon, 1996).

### 1.5.1. Quantités énergétiques

Les ondes électromagnétiques se caractérisent par différentes grandeurs :

- L'énergie rayonnante  $Q$  est la quantité d'énergie transportée par l'onde. Elle est exprimée en joules (J) ;
- la puissance ou flux énergétique  $\phi$  est la quantité d'énergie émise par source ponctuelle par unité de temps dans toutes les directions. On l'exprime en watts (W) ;
- l'intensité énergétique  $I$  d'une source ponctuelle dans une direction donnée  $\Theta$  est la portion du flux énergétique rayonnée dans cette direction,

$$I = d\phi/d\omega \quad \text{Eq. 8}$$

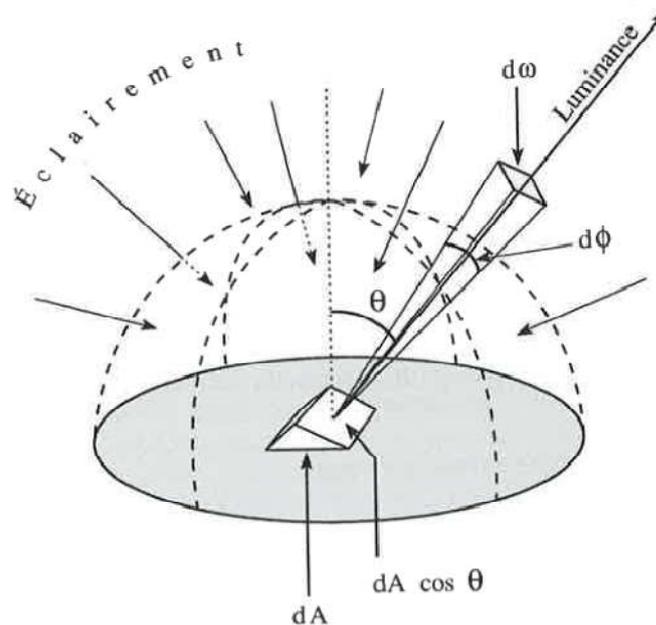
où  $\omega$  est l'angle solide à travers lequel la puissance est rayonnée. Un angle solide peut se représenter par un cône ayant une ouverture donnée. Il se définit donc dans l'espace à trois dimensions d'une manière analogue à un angle plan à deux dimensions. Il se mesure en stéradians. Il y a  $4\pi$  stéradians dans une sphère. L'intensité énergétique est donc exprimée en watts par stéradian ( $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ ).

- la luminance énergétique  $L$  est l'intensité émise par unité de surface apparente selon la direction  $\Theta$  pour une source non ponctuelle de superficie  $dA$  rayonnant à travers un angle solide  $\omega$ . Elle est parfois désignée à tort par le terme anglais *radiance*. On l'exprime par :

$$L = d\phi / d\omega dA \cos \Theta = I / dA \cos \Theta \quad \text{Eq. 9}$$

Les unités employées sont des watts par mètre carré par stéradian ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ ).

La surface apparente  $dA \cos \Theta$  correspond à la projection, dans le plan perpendiculaire à la direction de visée  $\Theta$ , de la surface horizontale  $dA$  considérée. Si l'énergie émise par un corps dans une direction faisant un angle  $\Theta$  avec la normale à la surface émettrice est proportionnelle à  $\cos \Theta$ , alors la luminance d'un tel corps est indépendante de la direction d'émission : ces corps sont dits *lambertiens*. Une feuille de papier blanc mat est un exemple de surface lambertienne (Bonn et Rochon, 1996).



**Figure 5 : Schéma illustrant la notion de luminance énergétique (Bonn et Rochon, 1996).**

- L'*exitance énergétique*  $M$  est la puissance totale  $\phi_e$  émise dans un hémisphère par unité de surface de la source. Certains auteurs emploient aussi le terme de pouvoir émissif ou terme anglais *emittance*. L'*exitance* s'exprime par :

$$M = d\phi_e / dA \quad \text{Eq. 10}$$

Elle se mesure en watts par mètre carré ( $\text{w.m}^{-2}$ ).

Si la source est lambertienne, l'*exitance* sera égale à la luminance énergétique multipliée par  $\pi$ , ce qui correspond à l'intégration de  $\cos \phi$  sur un hémisphère.

- L'*éclairement énergétique*  $E$ , parfois aussi appelé *irradiance*, est la puissance totale hémisphérique  $\phi_i$  incidente par unité de surface. Sa définition ressemble à celle de l'*exitance*, sauf qu'elle concerne le rayonnement reçu au lieu du rayonnement émis. On l'exprime par les mêmes unités ( $\text{W.m}^{-2}$ ) et on le définit par :

$$E = d\phi_i / dA \quad \text{Eq. 11}$$

Dans le cas d'une surface terrestre, l'*éclairement* est fourni essentiellement par le rayonnement solaire, après diffusion et atténuation partielle par l'atmosphère. En un lieu donné, il varie essentiellement en fonction de l'angle solaire, donc de l'heure, de la saison et de la latitude du lieu.

La topographie locale, et plus particulièrement la pente et l'exposition sont également des facteurs importants de variations de l'éclairement solaire (Bonn et Rochon, 1996).

### 1.5.2. Quantités spectrales

Dans le cas d'ondes électromagnétiques composées de plusieurs longueurs d'onde (données multibandes), la puissance transportée totale est égale à la somme des puissances transportées par chacune des longueurs d'onde, c'est-à-dire une série de quantités énergétiques analogues à celles définies ci-dessus mais dont la valeur est fonction de la longueur d'onde. Plusieurs méthodes d'identification des objets en télédétection s'appuient sur les variations spectrales relatives de ces quantités par l'intermédiaire de ce qu'il est maintenant convenu d'appeler la signature spectrale. Ces propriétés spectrales conditionnent aussi les échanges d'énergie à la surface terrestre qui sont à la base de la chaîne alimentaire des écosystèmes (Bonn et Rochon, 1996).

La puissance spectrale	$\phi_\lambda = d\phi/d\lambda$	Eq. 12
------------------------	---------------------------------	--------

L'intensité spectrale	$I_\lambda = dI/d\lambda$	Eq. 13
-----------------------	---------------------------	--------

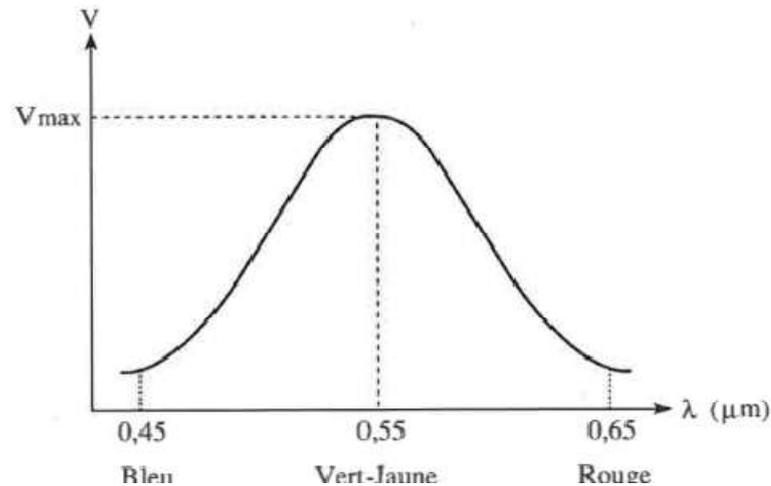
La luminance spectrale	$L_\lambda = dL/d\lambda$	Eq. 14
------------------------	---------------------------	--------

L'exittance spectrale	$M_\lambda = dM/d\lambda$	Eq. 15
-----------------------	---------------------------	--------

L'éclairement spectrale	$E_\lambda = dE/d\lambda$	Eq. 16
-------------------------	---------------------------	--------

### 1.5.3. Quantités lumineuses

L'œil humain constitue le capteur le plus familier ; il est sensible à des longueurs d'onde comprise entre 0.4 et 0.7  $\mu\text{m}$  sous l'effet de processus photochimique agissant au niveau de la rétine. Sa réponse spectrale varie en fonction de la longueur d'onde ; elle est maximale autour de 0.55  $\mu\text{m}$ . Les rayonnements de longueur d'onde supérieure à 0.7  $\mu\text{m}$  (infrarouges) atteignent la rétine sans provoquer de réactions photochimiques. Les rayonnements de longueur d'onde plus courte que 0.4  $\mu\text{m}$  ne traversent pas la cornée mais peuvent l'endommager si l'exposition est prolongée (fig. 6)



**Figure 6 : Réponse spectrale de l'œil humain (Bonn et Rochon, 1996).**

En optique, on définit alors des quantités photométriques analogues aux quantités énergétiques et spectrales précédentes en tenant compte du pouvoir de détection de l'œil. Ainsi l'unité de puissance lumineuse est-elle proportionnelle à la puissance spectrale ; le coefficient de proportionnalité  $V_\lambda$  appelé aussi *efficacité lumineuse spectrale*, se mesure en lumens/watt. Le lumen ( $lm$ ) est une unité de puissance lumineuse compensée pour tenir compte de l'efficacité visuelle chez l'homme. Au maximum de la sensibilité de l'œil, situé à  $0,55\mu m$ , ce coefficient est égal à l'unité. Il décroît rapidement de part et d'autre de ce maximum. Une relation de correspondance entre les unités de flux lumineux et de flux énergétique pour la partie visible du spectre peut s'écrire :

$$\phi_{v\lambda} = (683 \text{ lm}\cdot\text{W}^{-1}) V_\lambda \phi_{e\lambda}$$

Les indices  $v$  et  $e$  se rapportent respectivement aux unités visuelles et énergétiques du spectre. Les unités lumineuses sont employées très couramment dans le domaine de la photographie et de la vidéographie, même si ces capteurs ont une réponse spectrale différente de l'œil humain et rendent de ce fait leur utilisation impropre d'un point de vue purement physique.

### 1.6. Interactions avec l'atmosphère

Entre la surface terrestre observée et le capteur aéroporté ou satellitaire, on a toujours une couche d'atmosphère qui modifie le signal reçu en perturbant certaines propriétés du rayonnement électromagnétique.

Les perturbations atmosphériques sont dues à deux entités bien distinctes : les molécules de gaz et les particules liquides ou solides (aérosols, poussières, gouttelettes, etc.) provoquant trois phénomènes d'interaction : *l'absorption, la diffusion et la réfraction* du rayonnement.

L'atmosphère se présente comme un milieu stratifié où la répartition des gaz et des particules varie dans l'espace et dans le temps. Il en résulte que l'atmosphère agit comme un filtre très variable qui affecte toutes mesures de télédétection (Bonn et Rochon, 1996).

### 1.6.1. L'absorption et la transmission : les fenêtres atmosphériques

L'absorption du rayonnement par l'atmosphère, qui commande sa capacité de transmission, est due aux-transitions électroniques des atomes et molécules dans le visible et le proche infrarouge ainsi qu'aux transitions de rotation et de vibration des molécules dans les hyperfréquences et l'infrarouge lointain. Les principaux gaz absorbantes de l'atmosphère sont : l'oxygène ( $O_2$ ), l'ozone, ( $O_3$ ), la vapeur d'eau ( $H_2O$ ), le gaz carbonique ( $CO_2$ ), l'azote ( $N_2$ ), l'oxyde de carbone ( $CO$ ) et le méthane ( $CH_4$ ). L'absorption se traduit par une atténuation du signal dans la direction de propagation. Le rayonnement absorbé par l'atmosphère est réémis en chaleur, ce qui a pour effet de générer des différences de température et d'humidité relative, donc des dilatations et des mouvements des masses d'air caractéristiques des divers systèmes climatiques.

En télédétection, ce sont les capacités de transmission et de diffusion de l'atmosphère qui nous intéressent parce qu'elles affectent le signal reçu par le capteur en modifiant son contenu en information. Cette modification du signal, qui perturbe l'information spectrale sur la surface, peut cependant être utilisée pour étudier la composition de l'atmosphère (Royer et al., 1990).

L'atmosphère est opaque au rayonnement électromagnétique depuis les plus courtes longueurs d'onde correspondant aux rayons  $\gamma$  et X jusqu'à environ  $0.35\mu m$  dans l'ultraviolet, très proche du visible. A partir de  $0.4\mu m$  l'atmosphère présente plusieurs zones spectrales de transmission avant de redevenir opaque de  $14\mu m$  à 1 millimètre à 8 centimètre pour devenir proche de 1 pour les hyperfréquences. on a pris l'habitude d'appeler fenêtres atmosphériques ces zones du spectre où l'atmosphère est transparente au rayonnement, par analogie avec fenêtre qui laisse passer la lumière dans un mur opaque. Les fenêtres atmosphériques peuvent être classées par domaines spectraux, de l'ultraviolet aux hyperfréquences. Les principales fenêtres qui présentent un intérêt en télédétection sont résumées au tableau 2.

**Tableau 2 : Principales fenêtres atmosphériques**

Fenêtres	de	à
Ultraviolet et visible	0.35	0.75 $\mu\text{m}$
Proche infrarouge	0.77	0.91 $\mu\text{m}$
	1.0	1.12 $\mu\text{m}$
	1.19	1.34 $\mu\text{m}$
Infrarouge moyen	1.55	1.75 $\mu\text{m}$
	2.05	2.4 $\mu\text{m}$
Infrarouge thermique	3.35	4.16 $\mu\text{m}$
	4.5	5.0 $\mu\text{m}$
	8.0	9.2 $\mu\text{m}$
	10.2	12.4 $\mu\text{m}$
	17.0	22.0 $\mu\text{m}$
Hyperfréquences	2.06	2.22 mm
	3.0	3.75 mm
	7.5	11.5 mm
	20.0 mm	et au delà

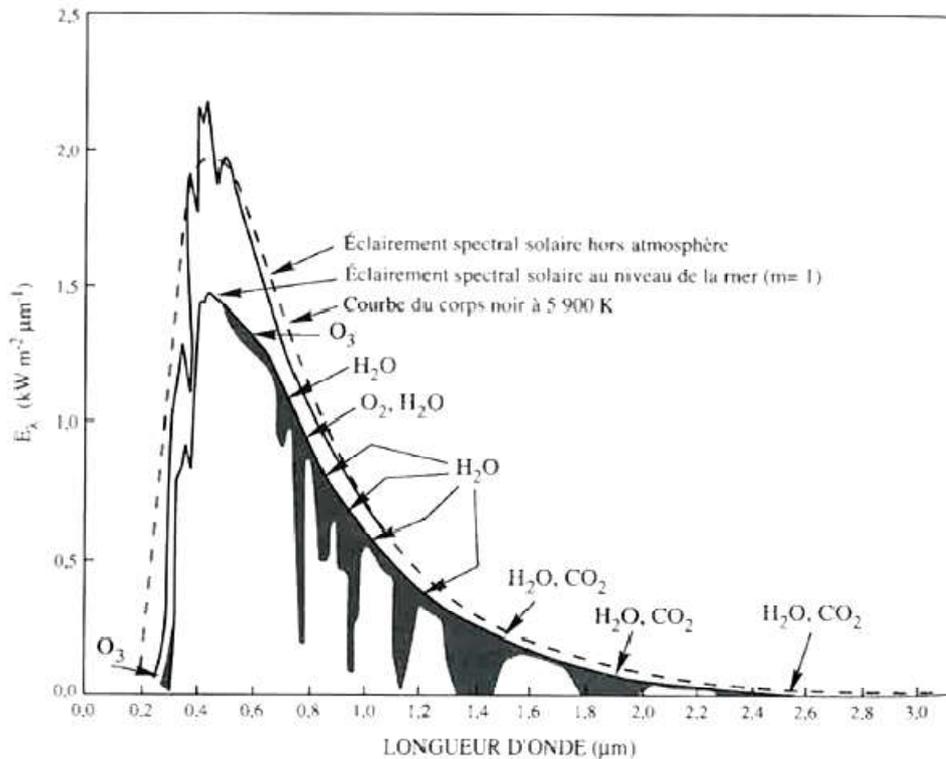
### 1.6.1.1. L'ultraviolet

Le rayonnement ultraviolet absorbé par les hautes couches de l'atmosphère conduit à une dissociation des molécules d'oxygène ( $\text{O}_2$ ), d'ozone ( $\text{O}_3$ ) ou d'azote ( $\text{N}_2$ ) et à l'ionisation des molécules d'oxygène et d'azote. Ces interactions sont si intenses que le rayonnement solaire ultraviolet est pour ainsi dire inutilisable en télédétection spatiale, mais elles protègent la surface de la terre de ces radiations destructives. Le maintien de la présence de l'ozone est particulièrement important de ce point de vue et constitue un des problèmes majeurs pour la qualité de l'air à l'échelle mondiale. Comme ce gaz se situe surtout dans la stratosphère, il affecte un peu moins la télédétection à basse altitude, mais la diffusion générale de l'atmosphère dans l'ultraviolet contribue à rendre cette fenêtre peu utilisable en télédétection (Bonn et Rohon, 1996).

### 1.6.1.2. Le visible

C'est dans le rayonnement visible que se situe le maximum de l'énergie solaire arrivant sur terre. Environ 75% de l'énergie solaire atteignant les couches supérieures de l'atmosphère arrive à

la surface de la terre. Le rayonnement visible est beaucoup moins absorbé par l'atmosphère que l'ultraviolet. On y constate cependant des bandes de faible absorption dues à l'ozone vers  $0.6 \mu\text{m}$ , à l'oxygène et à la vapeur d'eau entre  $0.69$  et  $0.76 \mu\text{m}$ . De plus, la diffusion causée par les molécules et les particules en suspension dans l'atmosphère à une importance prépondérante en télédétection. La figure 7 situe les principales bandes d'absorption de l'atmosphère dans le visible et le proche infrarouge.

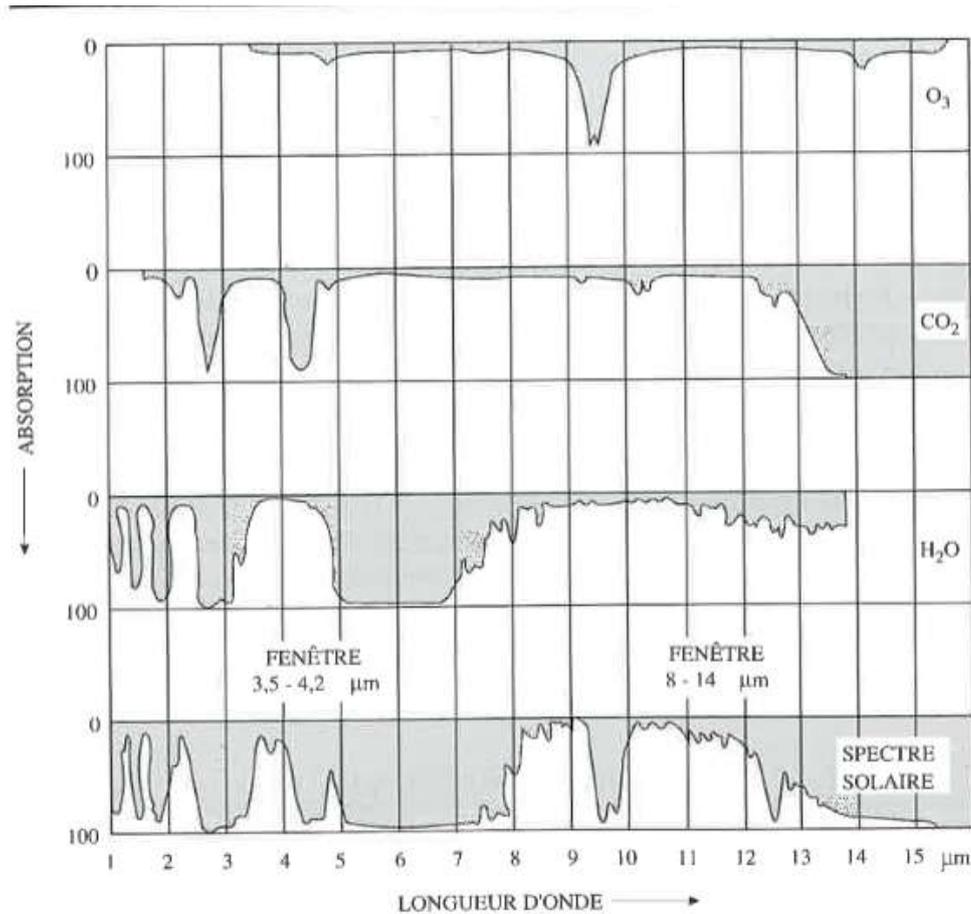


**Figure 7 : Absorption atmosphérique du rayonnement électromagnétique dans le visible et le proche infrarouge (d'après Wolfe et Zissis, 1978).**

### 1.6.1.3. L'infrarouge

Les bandes d'absorption dans l'infrarouge sont causées par les transitions de vibration des molécules et principalement de celles de la vapeur d'eau. Les fenêtres entre  $1.5$  et  $1.8 \mu\text{m}$  et entre  $2.05$  et  $2.4 \mu\text{m}$  sont utiles à la détection des changements d'humidité dans la végétation. Entre  $3.5$  et  $5.0 \mu\text{m}$  les feux de forêt, certaines laves volcaniques actives et des industries lourdes émettent leur maximum d'énergie. Dans l'infrarouge thermique il existe des bandes d'absorption très fortes dues

à la vapeur d'eau et au gaz carbonique CO<sub>2</sub>. Les fenêtres situées entre 8.0 et 9.2 μm et entre 10.2 et 12.4 μm couvrent la région d'émission normale de la terre. Ces deux fenêtres sont séparées par la bande d'absorption de l'ozone centrée sur 9.6 μm. Pour une détection à basse altitude, on néglige habituellement cette bande d'absorption à cause de la localisation de l'ozone dans les couches supérieures de l'atmosphère et on parle alors d'une grande fenêtre de 8 à 14 μm. La figure 8 représente les principales zones d'absorption et donc de transmission de l'atmosphère dans l'infrarouge.

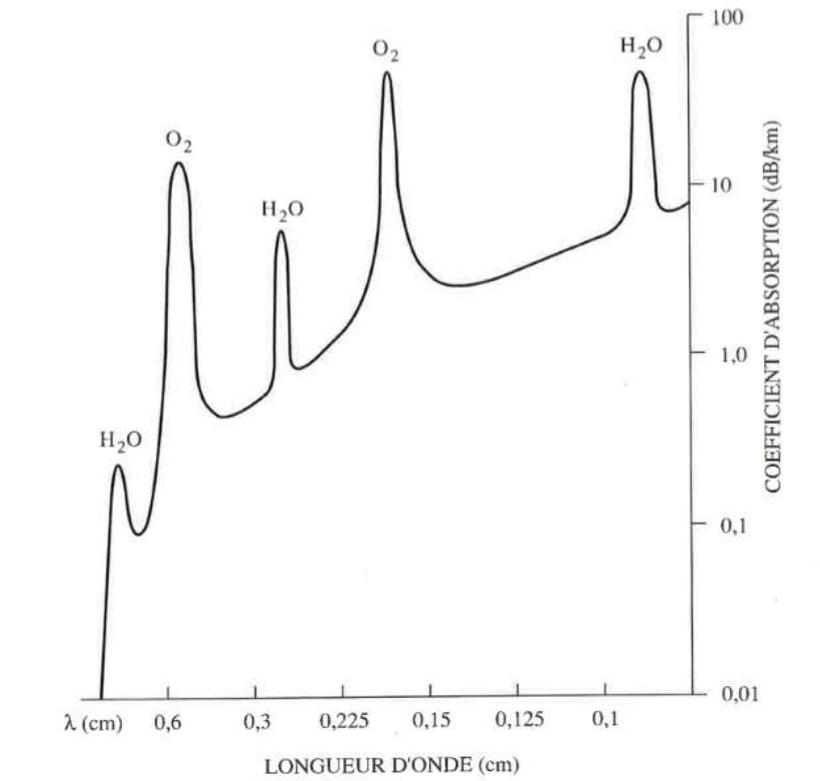


**Figure 8 : Absorption atmosphérique du rayonnement électromagnétique entre 1 et 15μm (Les spectres des trois principaux gaz absorbants « ozone, gaz carbonique et vapeur d'eau » sont représentés (Bonn et Rochon, 1996).**

#### 1.6.1.4. Les hyperfréquences

Pour des longueurs d'onde supérieures à 2 centimètres, l'atmosphère ne présente pas d'absorption marquée des hyperfréquences actives et passives : la capacité de fonctionner par tous les temps, de nuit comme de jour, et de voir à travers les nuages. Les radars météorologiques qui localisent les précipitations s'appuient sur le fait que des gouttes de pluie suffisamment grosses pour

atteindre une dimension du même ordre que la longueur d'onde renvoyent un écho vers la source, qui est détecté et enregistré. Dans les hautes fréquences des micro-ondes, il y a cependant des bandes d'absorption associées à l'oxygène et à la vapeur d'eau qui limitent l'utilisation de certaines bandes, comme montre la figure 9.



**Figure 9 : Absorption atmosphérique dans les hyperfréquences.**

L'observation de la figure 10 permet de dégager les points essentiels du phénomène d'absorption :

- Les rayonnements ultraviolets ( $\lambda = 0,29\mu\text{m}$ ) sont totalement absorbés par l'ozone.
- Les domaines spectraux du visible et du proche infrarouge présentent une très bonne transmission et sont par conséquent très largement utilisés par les capteurs satellitaires dédiés à l'observation de la terre.
- Dans le moyen infrarouge et l'infrarouge thermique, seules quelques bandes spectrales permettent la transmission du rayonnement.
- La vapeur d'eau et le dioxyde de carbone présents dans l'atmosphère absorbent la quasi-totalité du rayonnement dans l'infrarouge lointain.
- Dans le domaine des hyperfréquences, le phénomène d'absorption est inexistant et l'atmosphère est totalement transparente au rayonnement (Lillesand et Kiefer, 1987).

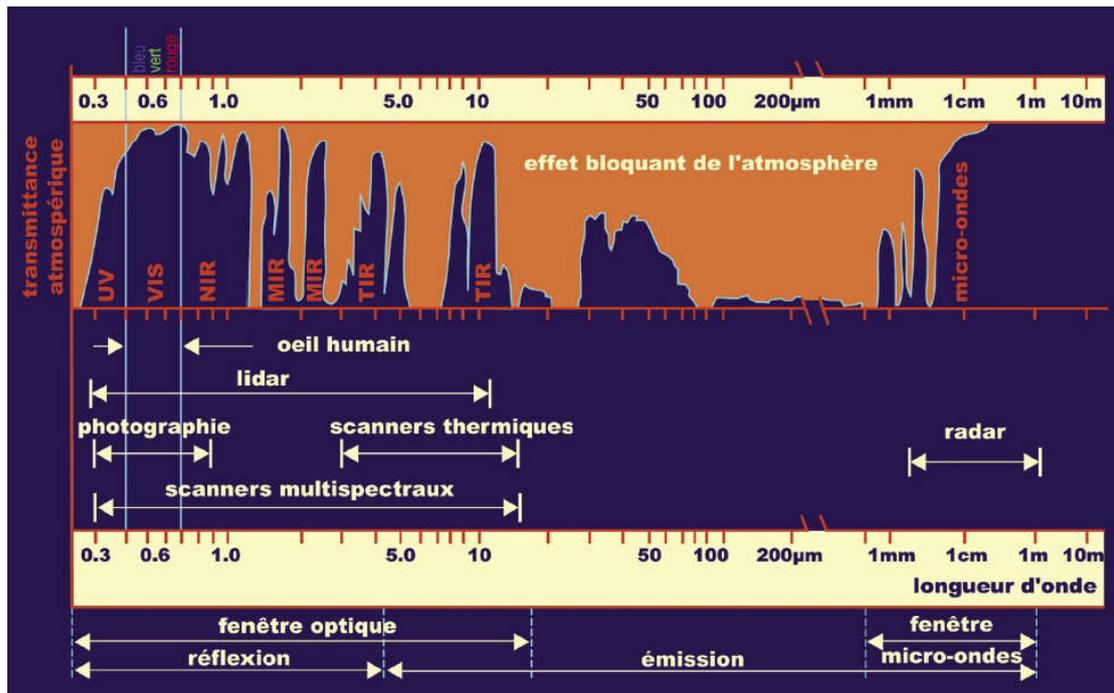


Figure 10 : Absorption atmosphérique du rayonnement électromagnétique (Lillesand et Kieffer, 1987).

### 1.6.2. La diffusion atmosphérique

La diffusion atmosphérique est due à l'absorption des photons par les atomes ou molécules et à la réémission par ces atomes ou molécules d'un rayonnement électromagnétique de même fréquence que le rayonnement incident. Il faut ici considérer le rayonnement électromagnétique sous son aspect quantique qui introduit la notion de niveau ou d'état énergétique. Si l'énergie du photon correspond à la différence d'énergie entre les niveaux énergétiques excités, il y a diffusion élastique ou résonante. Cela se traduit par une diminution du rayonnement dans la direction de propagation et par une augmentation du rayonnement dans les autres directions. S'il y a réémission par l'atome ou la molécule d'un rayonnement électromagnétique de fréquence différente de celle du rayonnement incident, on parle de luminescence (fluorescence ou phosphorescence) si la fréquence de réémission est inférieure à la fréquence incidente ou d'effet Raman si elle est supérieure.

Selon la dimension des molécules de gaz ou des particules considérées, le mécanisme de diffusion varie et les physiciens de l'atmosphère ont pris l'habitude de parler de trois types de diffusion : la diffusion de Rayleigh due aux molécules dont la dimension est petite vis-à-vis de la longueur d'onde, la diffusion de Mie par les particules de dimension voisine de la longueur d'onde et la diffusion non sélective, par les particules de grande taille par rapport à la longueur d'onde.

Tous ces phénomènes de diffusion dépendent du rapport de la longueur d'onde au diamètre des particules ; les molécules de gaz produisent une diffusion de Rayleigh importante dans le domaine visible mais les gouttes de pluie produisent le même type de diffusion pour les ondes millimétriques (Bonn et Rochon, 1996).

### **1.6.3. La réfraction atmosphérique**

Les rayonnements se propageant dans une direction oblique par rapport à la verticale terrestre ne suivent pas une trajectoire rectiligne ; l'écart angulaire entre la position apparente vue du sol et la position réelle vient du phénomène de réfraction, qui est fonction de la pression, des constituantes de l'air et de la température.

Les effets de la réfraction atmosphérique sont plus importants pour un observateur au sol regardant une cible située hors de l'atmosphère que pour un observateur hors de l'atmosphère visant le sol. Ce phénomène est particulièrement important lors de la prise de mesures sur des clichés grands-angulaires ou panoramiques, avec des angles d'incidence élevés (Bonn et Rochon, 1996).

### **1.6.4. L'émission atmosphérique**

L'atmosphère suit le comportement d'un corps noir entre 200 et 300 K et son émission maximum correspond à une longueur d'onde de près de 10  $\mu\text{m}$ . Cette émission est d'intérêt en thermographie et en radiométrie des hyperfréquences parce qu'elle crée une source additionnelle de rayonnement. Un ciel dégagé est habituellement moins émetteur, donc plus froid qu'un ciel couvert ou chargé d'humidité et de particules. La contribution du rayonnement céleste est souvent négligée en thermographie à cause des émissivités de surface voisines de 1 pour la plupart des surfaces naturelles ou végétales, intervenant par leur racine quatrième sur la température de brillance. Par contre, elle est importante en hyperfréquences passives où les émissivités plus basses interviennent à la première puissance sur l'émission mesurée par le capteur et comportent donc une composante non négligeable de réflexion du rayonnement céleste (Bonne et Rochon, 1996).

## **1.7. Détection passive et active**

Le soleil constitue une source d'énergie très pratique pour la télédétection. L'énergie du soleil est soit réfléchi, comme dans la partie visible des longueurs d'onde, ou absorbée puis retransmise, comme dans la portion infrarouge thermique des longueurs d'onde. On appelle « capteurs passifs » les dispositifs de télédétection qui mesurent l'énergie naturellement disponible. Les capteurs passifs peuvent servir à détecter l'énergie uniquement lorsqu'elle est disponible naturellement. L'énergie

réfléchi ne peut donc être perçue que lorsque le Soleil éclaire la Terre. L'énergie réfléchiée dégagée par le Soleil n'est pas disponible pendant la nuit. Par contre, pourvu qu'elle soit suffisante, l'énergie dégagée naturellement (l'infrarouge thermique) peut être enregistrée le jour ou la nuit.

Les « capteurs actifs » sont ceux qui produisent leur propre énergie pour éclairer la cible. Le capteur émet un rayonnement dirigé vers la cible observée, puis il capte et mesure le rayonnement réfléchi par la cible. Il offre donc l'avantage de pouvoir prendre des mesures à n'importe quel moment de la journée ou de la saison. Les capteurs actifs sont utilisés pour examiner les longueurs d'onde qui ne sont pas produites par le soleil, par exemple les hyperfréquences, ou pour mieux contrôler la façon dont une cible est éclairée. Ils doivent cependant produire une quantité considérable d'énergie pour bien éclairer une cible. Le fluoromètre laser et le radar à synthèse d'ouverture (RSO) sont des exemples de capteurs actifs.

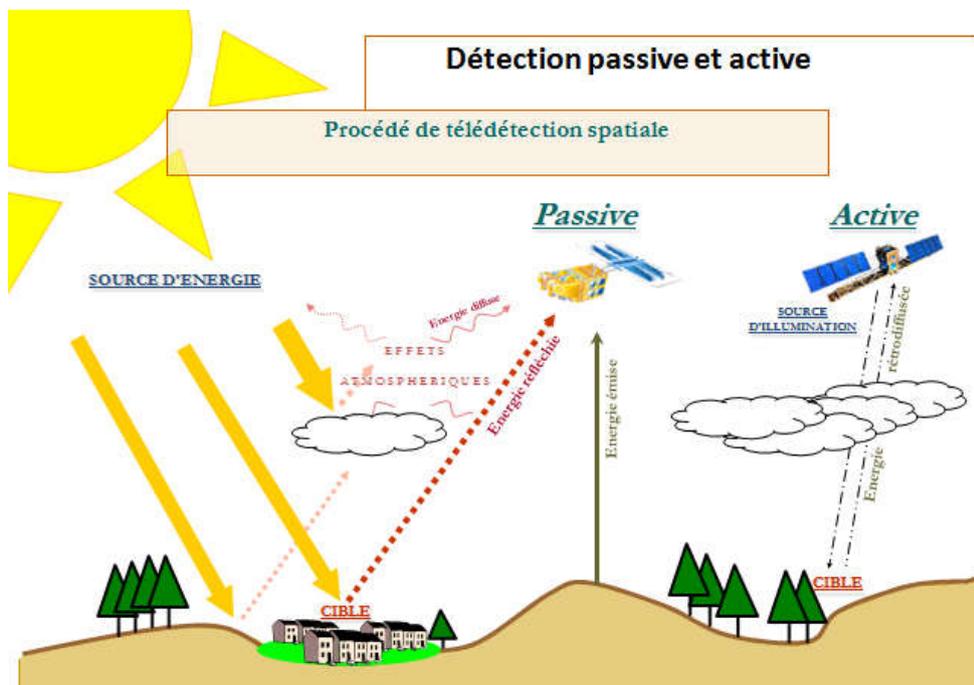


Figure 11 : Détection passive et active.

### 1.7. Caractéristiques des images

L'énergie électromagnétique peut être perçue de façon photographique ou de façon électronique. Le processus photographique utilise une réaction chimique sur une surface sensible à la lumière pour capter et enregistrer les variations d'énergie. Il est important, en télédétection, de distinguer les termes "image" et "photographie". Une image est une représentation graphique, quels que soit la longueur d'onde ou le dispositif de télédétection qui ont été utilisés pour capter et

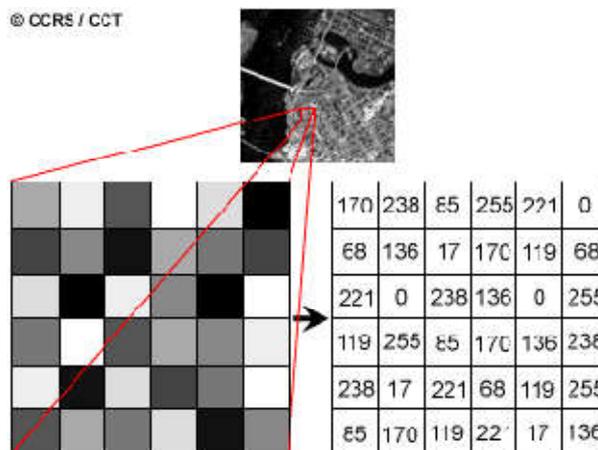
enregistrer l'énergie électromagnétique. Une photographie désigne spécifiquement toute image captée et enregistrée sur une pellicule photographique.



**Photo 1 : La ville d'Ottawa.**

La photo noir et blanc (photo 1), représentant une partie de la ville d'Ottawa au Canada, a été obtenue grâce à la partie visible du spectre. Les photographies enregistrent habituellement les longueurs d'onde entre 0,3 et 0,9 mm (les portions visible et infrarouge réfléchi). Avec ces définitions, nous constatons que toute photographie est une image, mais que les images ne sont pas toutes des photographies. À moins de parler d'images enregistrées par un procédé photographique, nous utilisons donc le terme image.

Une photographie peut être présentée et affichée en format numérique en divisant l'image en petits morceaux de taille et de forme égales, que nous nommons pixels. La luminosité de chaque pixel est représentée par une valeur numérique. C'est exactement ce qui a été fait à la photographie 2 (d'après CCRS/CCT).



**Photo 2**

En effet, en appliquant les définitions présentées plus haut, nous déduisons que l'image est vraiment une image numérique de la photographie originale ! Cette photographie a été numérisée et subdivisée en pixels. Chaque pixel a été doté d'une valeur représentant les différents niveaux de luminosité. L'ordinateur affiche chaque valeur numérique comme un niveau de luminosité. Les capteurs enregistrent alors électroniquement l'énergie en format numérique (en rangées de chiffres).

Ces deux différentes façons de représenter et d'afficher les données de télédétection, par des moyens photographiques ou numériques, sont interchangeables car elles représentent la même information (mais chaque conversion peut engendrer une perte de précision).

Nous percevons les couleurs parce que nos yeux captent la gamme entière des longueurs d'onde visibles et notre cerveau transforme cette information en couleurs distinctes. Imaginez le monde si nous ne pouvions percevoir qu'une seule bande étroite de longueurs d'onde ou de couleur ! De nombreux capteurs fonctionnent de cette façon. L'information d'une gamme étroite de longueur d'onde est captée et emmagasinée sous forme numérique dans un fichier représentant la bande de longueurs d'onde. Il est ensuite possible de combiner et d'afficher de ces bandes d'information numérique en utilisant les trois couleurs primaires (rouge, vert, bleu). Les données de chaque bande sont représentées comme une couleur primaire et, selon la luminosité relative (c.-à-d. valeur numérique) de chaque pixel dans chaque bande, les couleurs se combineront en proportions différentes pour produire des couleurs distinctes.



**Photo 3 : Combinaison de trois bandes spectrales.**

Lorsque nous utilisons cette méthode pour afficher une seule bande ou gamme de longueurs d'onde, nous affichons réellement cette bande avec les trois couleurs primaires. Parce que la luminosité de chaque pixel est la même pour chaque couleur primaire, les couleurs se combinent et produisent une image en noir et blanc. L'image est donc affichée avec ses différentes teintes de gris,

de noir à blanc. Lorsque nous affichons plus d'une bande, chaque bande ayant une couleur primaire différente, le niveau de luminosité peut être différent pour chaque combinaison de bandes ou de couleurs primaires, et les couleurs se combinent pour former un composé couleurs (Centre canadien de télédétection).

## 2. L'acquisition des données en télédétection (les capteurs)

Quand on parle de capteurs en télédétection, quel que soit le domaine spectral dans lequel on se situe, il convient de distinguer le mode passif, où l'on se contente d'enregistrer l'énergie naturelle (réfléchi ou émise) provenant de la terre, du mode actif où l'on éclaire artificiellement les corps à étudier avant d'enregistrer l'énergie que ceux-ci renvoient vers le capteur.

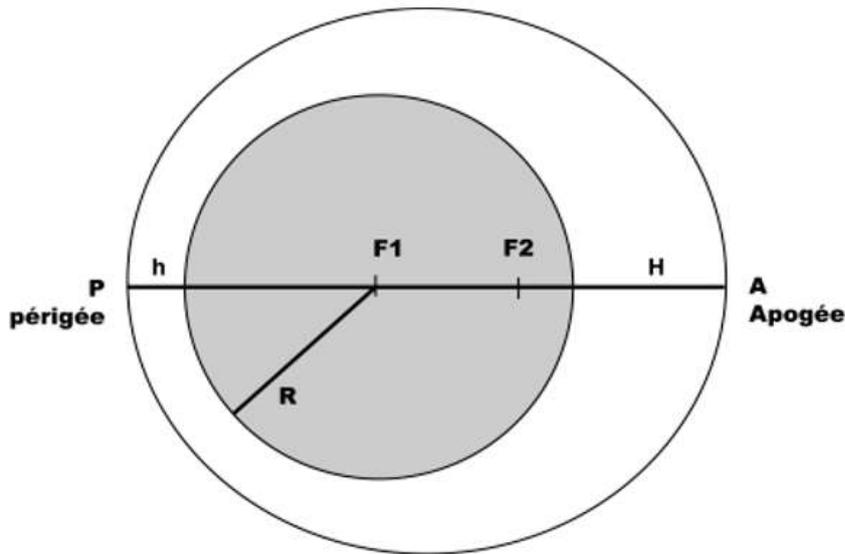
Parmi les capteurs passifs, il y a les radiomètres, les balayeurs thermiques, les balayeurs optiques, les chambres de prise de vue, les tubes vidicons, les scintillomètres, les spectroradiomètres et les spectromètres imageurs, alors que l'on trouve parmi les capteurs actifs les radars, les diffusomètres, les lidars et les fluoromètres (Bonn et Rochon, 1996).

### 2.1. Le satellite en orbite

L'**orbite** correspond à la trajectoire effectuée par le satellite autour de la Terre.

Les lois qui régissent le mouvement des satellites en orbite peuvent être comparées à celles qui régissent le mouvement des planètes, formulées par les astronomes et mathématiciens des 16e et 17e siècles: Kepler, Galilée, Newton.

Une fois placé sur son orbite, le satellite est mû par la seule inertie; en l'absence de frottement (au-delà de l'atmosphère), l'orbite doit en théorie se maintenir indéfiniment. La force centrifuge compense l'attraction terrestre. L'orbite d'un satellite est toujours une ellipse, dont la Terre occupe l'un des foyers (fig 12). La distance entre les deux foyers définit l'excentricité de l'orbite elliptique. En télédétection, les orbites choisies sont généralement circulaires ou presque circulaires, c'est à dire d'excentricité nulle ou très faible.



**Figure 12 : L'orbite elliptique. F1 et F2 sont les foyers, h et H, l'altitude du satellite au périgée et à l'apogée, R le rayon de la Terre.**

La vitesse d'un satellite en orbite varie entre un maximum au périgée, point le plus bas de l'orbite, et un minimum à l'apogée, point le plus élevé. La période désigne le temps nécessaire au satellite pour effectuer une révolution autour de la Terre (Bonn et Rochon, 1996).

$$V = \sqrt{\frac{g \cdot M}{R + Z}}$$

- où V est la vitesse du satellite,
- R est le rayon de la Terre,
- z l'altitude du satellite,
- g est la constante de gravitation universelle,
- et M la masse de la Terre.

La troisième loi de Képler donne une relation entre le rayon de l'orbite  $a = R + z$  et la période T :

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{g \cdot M}{4\pi^2}$$

ou, après calcul de la constante :

$$a = 21,627 \sqrt[3]{T^2}$$

(a est en km, T en secondes).

$$v = \frac{2\pi(R+Z)}{T}$$

Enfin, la relation entre vitesse et période du satellite :

### 2.2. La géométrie orbitale usuelle en télédétection

Une des caractéristiques fondamentales des orbites est leur inclinaison, c'est à dire l'angle entre le plan de l'orbite et le plan équatorial. La valeur de l'angle est comptée en tenant compte du sens de rotation de la Terre et du satellite (fig 13) : si l'angle est inférieur à 90°, l'orbite est dite directe, dans le cas contraire, on parle d'orbite rétrograde.

La projection de l'orbite sur la Terre définit la trace du satellite; la projection du satellite sur la Terre est le sous-point. Le point de croisement entre la trace et l'Equateur est appelé nœud ascendant lorsque le satellite se déplace dans le sens Sud-Nord, et nœud descendant dans le cas contraire. En télédétection, une orbite particulière est généralement désignée par la longitude du nœud ascendant (plus rarement du nœud descendant).

En première approximation, nous pouvons considérer que l'orbite est fixe par rapport aux étoiles, tandis que la Terre tourne sur elle-même avec une révolution en  $T = 86164$  s (jour sidéral). Pour un satellite situé à 850 km d'altitude, qui effectue une révolution en 101 mn, le décalage entre les longitudes des nœuds ascendants de deux orbites successives est de 25°30' de longitude environ, soit, avec le périmètre de la Terre à l'Equateur représentant 40 000 km, 2800 km.

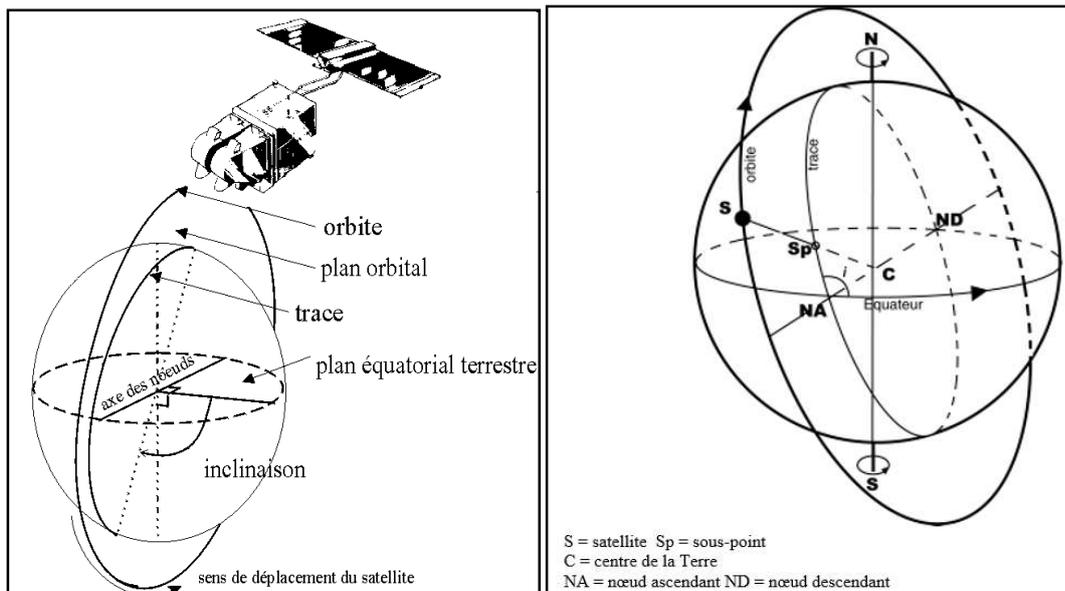


Figure 13. Géométrie orbitale (Exemple d'une orbite rétrograde) (adapté de M.C. et C.M. Girard, 1999).

## 2.3. Les deux grands types d'orbite utilisés en télédétection

### a. Les satellites à défilement

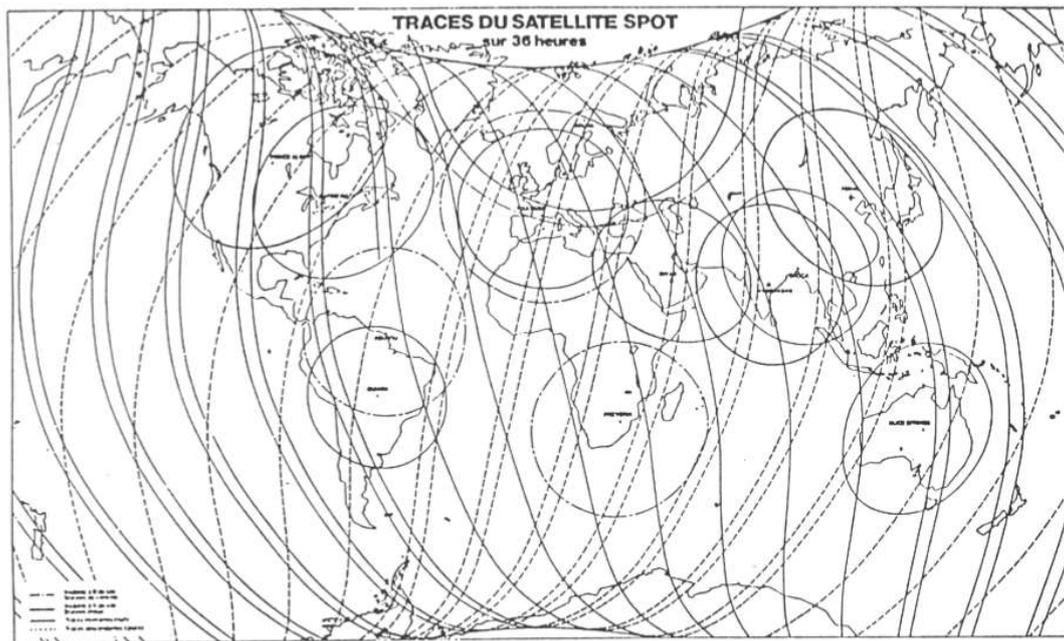
L'orbite d'un satellite « à défilement » est une orbite basse (500 à 1500 km d'altitude), avec une période comprise entre 90 et 120 mn. C'est le cas de la plupart des satellites de télédétection. Le nombre de révolutions en une journée est compris entre 12 et 16: ce type de satellite survole donc en une journée des régions très variées, puisque l'orbite est presque fixe, alors que la Terre effectue une révolution. L'inclinaison de l'orbite par rapport à l'Equateur est généralement proche de  $90^\circ$ , de façon à permettre un survol des régions de haute latitude. L'orbite est dite quasi-polaire, le survol du pôle proprement dit étant très difficile. Le plus souvent, l'inclinaison de l'orbite est choisie proche de  $100^\circ$ , de façon à satisfaire aux conditions de l'héliosynchronisme, dont l'intérêt est grand en télédétection. Enfin, la période orbitale est choisie selon le champ de vision du ou des capteurs, de façon à ce que, au bout d'une durée variable appelée cycle orbital, lorsque le satellite a pu couvrir la totalité, ou presque, de la surface terrestre, il retrouve exactement la position du cycle précédent, et puisse à nouveau acquérir des images au-dessus des mêmes régions, selon les mêmes orbites et les mêmes horaires. On dit que les orbites sont phasées par rapport à la Terre. Depuis les années 70, les caractéristiques orbitales de la plupart des satellites de télédétection tendent à se ressembler de plus en plus, comme si l'on avait fini par atteindre les possibilités optimales d'acquisition des données de télédétection.

Deux exemples permettent de mieux comprendre les relations entre le choix d'une orbite et les possibilités d'observation de la Terre :

- les satellites météorologiques de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) sont destinés à fournir des images de bonne résolution spatiale (1 km environ) dans le visible et le proche infrarouge d'une part, l'infrarouge thermique d'autre part. Le capteur AVHRR a un champ de vision très large, plus de 2500 km. Les orbites choisies pour ces satellites (6 se sont succédé depuis 1978) sont des orbites basses, quasipolaires et héliosynchrones. La période est d'environ 100 mn, ce qui correspond à un espacement de deux passages successifs à l'Equateur (noeud ascendant ou descendant) d'environ 2800 km. Les satellites effectuent entre 14 et 15 révolutions par jour. Etant donné le champ de vision du capteur, presque toute la Terre est couverte chaque jour deux fois, de jour et de nuit : cela permet d'avoir au moins une image dans le visible (jour), et deux images thermiques (jour et nuit). Aux latitudes moyennes et hautes, le recouvrement des champs de vision de deux orbites successives permet une couverture plus fréquente encore. La trace du satellite, dont l'inclinaison est de  $101^\circ$ , monte en latitude jusqu'à  $82^\circ$  Nord ou Sud, mais la

largeur du champ permet d'obtenir des images couvrant les pôles eux-mêmes. L'orbite choisie est donc parfaitement accordée aux besoins de la météorologie : fréquence au moins quotidienne de la couverture, vision globale de la Terre, passage de jour et de nuit pour la mesure des écarts diurnes de la température.

- le satellite SPOT, satellite français de télédétection, a été conçu pour fournir, avec une très grande résolution spatiale, des données visible ou proche infrarouge destinées à la cartographie et aux études thématiques. Il a été lancé le 22 février 1986, par une fusée Ariane, sur une orbite basse (830 km), quasi-polaire (inclinaison:  $98,7^\circ$ ), et héliosynchrone. La période est de 101 mn : le satellite effectue  $14 + 5/26$  révolutions par jour. Le cycle orbital est donc de 26 jours, au bout duquel le satellite, après avoir effectué 369 révolutions, reprend exactement l'orbite parcourue 26 jours auparavant. Les traces au sol des 369 orbites effectuées durant le cycle sont espacées au sol de 108 km environ (fig 14). Compte-tenu du champ des deux capteurs HRV présents à bord, qui couvrent une bande de 117 km en largeur, toute la Terre, à l'exception des latitudes supérieures à  $82^\circ$ , est donc couverte en 26 jours. Mais la répétitivité des observations est largement accrue par les possibilités de dépointage angulaire, selon un angle de  $\pm 27^\circ$ , qui est une des particularités remarquables du système SPOT (Verger, 1997).



**Figure 14 : Traces au sol successives du satellite SPOT pendant 24 h et cercles de visibilité des stations de réception au sol.**

## b. Les satellites géostationnaires

Les satellites géostationnaires sont installés sur une orbite circulaire dans le plan de l'Equateur (inclinaison nulle), et de période égale à la durée d'une rotation de la Terre sur elle-même (orbite géosynchrone). L'altitude est d'environ 36000 km. Ces satellites apparaissent donc stationnaires, à une longitude donnée, face à l'Equateur. Le champ de vision d'un satellite géostationnaire s'étend de 60° N à 60° S, et sur 120° de longitude. En revanche, la résolution spatiale est limitée par l'éloignement de la Terre. Ce type d'orbite est utilisé par les satellites météorologiques, qui peuvent ainsi obtenir, avec une très grande répétitivité (toutes les 1/2 heures pour Météosat), des images globales d'une vaste portion de la surface terrestre ; le système mondial de surveillance de l'atmosphère terrestre par télédétection utilise la complémentarité d'un réseau d'au moins 5 satellites géostationnaires et de satellites à défilement sur orbite basse (fig 15). Les satellites géostationnaires sont aussi utilisés pour les satellites de télécommunications qui retransmettent d'un continent à l'autre les communications téléphoniques ou les images de télévision (Verger, 1997).

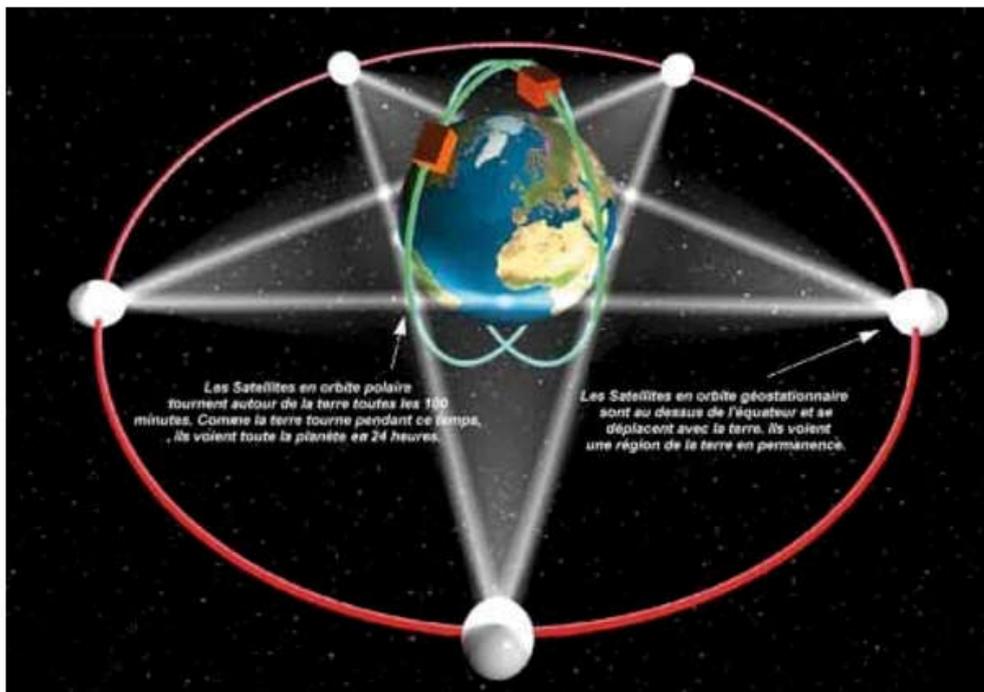


Figure 15 : Le système global de surveillance de l'atmosphère (complémentarité des satellites géostationnaires et des satellites à défilement). Source : Agence spatiale européenne.

## 2.4. Composition des capteurs

Qu'ils soient actifs ou passifs, les capteurs comportent toujours trois éléments :

- Un système optique, qui conditionne la limite de résolution spatiale, définit la géométrie, les caractéristiques optiques et l'angle de visée du système ;
- Un filtre spectral, qui conditionne le domaine spectral de mesure, définit la où les zones du spectre où les ondes reçues seront admises jusqu'au capteur ;
- Un détecteur, qui commande à la fois la limite de résolution radiométrique et la limite de résolution spectrale, transforme le signal physique reçu en une forme de données (voltage, réaction photo-chimique) qui deviennent analysables mathématiquement ou perceptibles à l'œil humain (Bonn et Rochon, 1996).

## **2.5. Les résolutions**

Les capteurs satellitaires présentent différentes capacités techniques regroupées sous la dénomination de « résolutions ». On distingue principalement 4 types de résolution en détection passive : spatiale, spectrale, radiométrique et temporelle. Elles fonctionnent comme un balancier dans lequel un équilibre doit toujours être respecté : il n'existe pas (encore) de satellite unique possédant de très bonnes résolutions spatiale et spectrale et radiométrique et temporelle. C'est pour cela que l'on développe des constellations de satellites permettant de pallier chacune des limitations.

### **2.5.1. La résolution spatiale**

La résolution spatiale est, par définition, la taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur l'image. Elle est également définie (par abus de langage, accepté de tous) comme étant la taille du pixel. On notera que la distinction entre ces 2 termes dans le cas de la détection active est plus importante. Les satellites optiques Spot (6 et 7) proposent des images de 1,5 mètres de résolution spatiale. Le dernier satellite américain de la société DigitalGlobe, nommé WorldView-3, propose des images d'une résolution spatiale de 0,30 mètres. Plus la résolution spatiale est fine, plus sa fauchée est limitée.

### **2.5.2. La résolution spectrale**

La résolution spectrale est la capacité du satellite à discriminer les signaux de différentes longueurs d'ondes. Plus la bande du capteur est fine, plus sa résolution spectrale est bonne. Ainsi le nombre de bandes du capteur, s'il rentre en compte dans la discrimination des signaux, n'est pas le seul facteur à prendre en compte pour caractériser la résolution spectrale. Le satellite américain

Landsat possède des bandes multi-spectrales d'une résolution spatiale de 30m et une bande panchromatique (une seule bande spectrale très large) d'une résolution spatiale de 15m. C'est donc en diminuant la résolution spectrale que ce capteur peut améliorer sa résolution spatiale (X2).

### **2.5.3. La résolution radiométrique**

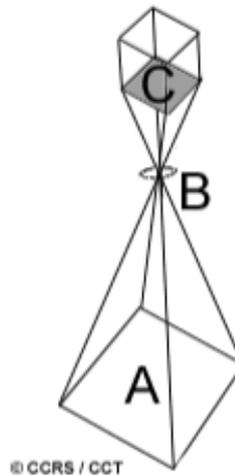
La résolution radiométrique est la capacité du capteur à discriminer des petites variations d'énergie électromagnétique. C'est le nombre de bits utilisés pour enregistrer l'image qui régit le nombre maximum de niveaux d'intensités disponibles.

### **2.5.4. La résolution temporelle**

La résolution temporelle du capteur correspond à son temps de revisite. Cette résolution peut être associée au temps que met le satellite pour repasser au-dessus de la même zone, mais en réalité elle est nettement améliorée par la capacité du satellite à dépointer (à regarder sur les côtés, devant, derrière ... ).

## **2.6. Les appareils photographiques et la photographie aérienne**

Les appareils photographiques et les photographies aériennes constituent le système de télédétection le plus simple et le plus ancien utilisé pour observer la surface de la Terre. Les appareils photographiques sont des systèmes qui enregistrent un cliché presque instantané d'une région (A) de la surface. Ces appareils sont des capteurs optiques passifs qui utilisent une lentille (B) (ou un système de lentilles que l'on appelle système optique) afin de former une image sur le plan focal (C), plan sur lequel l'image est bien définie.



**Figure 16 : Système de fonctionnement des appareils photographiques**

La pellicule photographique est sensible à la lumière (énergie) d'une longueur d'onde de 0,3 à 0,9 microns, couvrant l'ultraviolet (UV), le visible et le proche infrarouge (PIR). Les pellicules panchromatiques sont sensibles aux ondes dans l'ultraviolet et dans le visible. Ces pellicules produisent des photographies noir et blanc et sont les plus utilisées en photographie aérienne. La photographie des ultraviolets utilise aussi ce type de pellicule, mais un filtre est utilisé avec l'appareil photographique afin d'absorber la lumière visible. Ceci permet d'enregistrer les cibles qui réfléchissent les ultraviolets. Cependant, cette technique n'est pas utilisée très souvent car l'atmosphère diffuse et absorbe beaucoup d'énergie dans ces longueurs d'onde. La photographie noir et blanc des longueurs d'onde de l'infrarouge utilise une pellicule sensible dans cette bande et permet de détecter des différences dans le couvert végétal.

La photographie couleur et pseudo-couleur (ou couleur infrarouge (CIR)) nécessite l'utilisation de trois niveaux de sensibilité dans la pellicule, chaque niveau étant sensible à trois bandes de longueurs d'onde. Pour une photographie couleur normale les niveaux sont sensibles à la lumière bleue, verte et rouge, comme notre œil. Ces photos nous apparaissent de la même façon que notre œil perçoit l'environnement et les couleurs nous apparaissent normales (ex. : les feuilles sont vertes). Pour les photographies couleur infrarouge, les trois niveaux de sensibilité enregistrent le vert, le rouge et une portion du proche infrarouge qui sont ensuite traités pour apparaître bleu, vert et rouge respectivement. Pour les photographies pseudo couleur, les cibles ayant une forte réflectivité dans le proche infrarouge apparaissent rouges, celles qui ont une forte réflectivité dans le rouge apparaissent vertes et celles avec une forte réflectivité dans le vert apparaissent bleues (photo 4).



**Photo 4**

Les appareils photographiques peuvent être installés sur plusieurs types de plates-formes (terrestre, aérienne ou spatiale). Des photographies très détaillées sont prises à partir d'avions et sont utilisées là où l'identification de petits détails est nécessaire. La superficie couverte par une photo dépend de différents facteurs dont la distance focale de la lentille, l'altitude de la plate-forme et la dimension de la pellicule. La distance focale contrôle le champ de vision angulaire de la lentille et détermine la superficie « vue » par l'appareil photographique. La distance focale typique pour ces appareils est de 152 mm, mais on utilise aussi des lentilles de distance focale de 90 mm et 210 mm. Plus la distance focale est grande, plus la superficie couverte au sol est petite mais plus il y a de détails (c.-à-d. une échelle plus grande). La superficie couverte dépend aussi de l'altitude de la plate-forme. En haute altitude, l'appareil photographique « verra » une plus grande surface au sol mais il y aura moins de détails (c.-à-d. une échelle plus petite). Les photos aériennes peuvent avoir une résolution spatiale de moins de 50 cm. La résolution spatiale d'une photographie aérienne est une fonction complexe qui dépend de plusieurs facteurs qui changent pour chaque image.

Les photographies verticales prises avec un appareil photographique à lentille unique sont les photos aériennes les plus communes en télédétection et en cartographie. Ces appareils photographiques sont spécialement faits pour exécuter rapidement une série de clichés, en limitant la distorsion géométrique. Ils sont souvent reliés à un système de navigation à bord de l'avion, ce qui permet une identification précise des coordonnées géographiques qui sont automatiquement assignées à chaque photographie. La plupart de ces systèmes ont aussi un mécanisme qui compense pour l'effet du déplacement de l'avion par rapport au sol, de façon à limiter, encore une fois, toutes distorsions dans l'image.

Afin d'obtenir des photographies aériennes verticales, l'avion survole la surface terrestre le long de lignes appelées lignes de vol. Les photos sont prises rapidement, l'appareil photographique étant pointé directement vers le sol. Deux photos successives ont un pourcentage de chevauchement de 50% à 60% (A). Ce chevauchement entre les images assure une couverture totale de la superficie le long de la ligne de vol et facilite la visualisation stéréoscopique des photographies. Grâce au chevauchement, les photos montrant la même région mais prises d'une perspective différente, sont jumelées et visionnées à l'aide d'un dispositif appelé le stéréoscope. Ce dispositif permet d'avoir une vue en trois dimensions de la région appelée un modèle stéréo. Cette méthode de visualisation est très utilisée.

Les photographies aériennes s'avèrent très utiles lorsque la résolution spatiale est beaucoup plus importante que la résolution spectrale. La résolution spectrale de ces systèmes est généralement très grossière si l'on compare avec un système de capteurs électroniques. La géométrie utilisée dans les photos aériennes verticales est très connue. Il est donc possible de faire des mesures précises à partir de ces photos. Ces mesures sont utilisées en géologie, en foresterie, en cartographie et dans bien d'autres domaines. La photogrammétrie est la science qui s'intéresse aux mesures faites sur les photographies aériennes et est connue depuis le début de l'utilisation de ces photos. Ces photos sont, dans la plupart des cas, analysées par des humains qui les regardent en stéréoscopie. Elles peuvent aussi être numérisées afin d'être analysées par un ordinateur.

On obtient les photographies multibandes à l'aide de systèmes à plusieurs lentilles utilisant une combinaison de filtres afin de prendre simultanément des photos dans plusieurs bandes spectrales. Ce type d'appareil photographique a l'avantage de pouvoir enregistrer l'énergie réfléchie par la surface ou la cible dans plusieurs fenêtres spectrales, ce qui permet éventuellement de différencier et d'identifier plusieurs caractéristiques de cette surface ou de cette cible. Toutefois, l'analyse simultanée de ces photographies multiples peut devenir problématique. Les appareils photographiques numériques qui enregistrent l'énergie électromagnétique de façon électronique sont très différents des appareils photographiques utilisant une pellicule. Dans ces appareils numériques, la pellicule est remplacée par une grille de CCD (charge coupled devices, ou en français : dispositifs de couple de charges). Les CCD réagissent individuellement à la radiation électromagnétique les atteignant et produisent une charge électronique proportionnelle à l'intensité de l'énergie provenant de la surface. Une valeur numérique correspondante est ensuite assignée à chaque pixel pour chacune des bandes spectrales utilisées. Le format numérique de ces images peut être traité et stocké sur ordinateur ou utilisé pour produire une image sur papier photographique. Ces appareils photographiques permettent un meilleur contrôle de la résolution spectrale et une efficacité accrue

lors de l'acquisition des données et lors de la consultation des données archivées. Les appareils photographiques numériques ont une résolution spatiale d'environ 0,3 m et une résolution spectrale allant de 0,012 mm à 0,3 mm. La dimension de la grille de CCD varie généralement entre 512 sur 512 et 2048 sur 2048 (Centre canadien de télédétection).

## 2.7. Satellites et capteurs d'observation de la Terre

### Landsat

Bien que plusieurs satellites météorologiques soient également utilisés pour la surveillance de la surface de la Terre, ceux-ci n'ont pas été conçus pour la cartographie détaillée de la surface terrestre. Suite aux succès éclatants des premières images des satellites météorologiques dans les années 60, et par les images acquises lors des missions spatiales habitées, le premier satellite d'observation Landsat-1 a été lancé par la NASA en 1972. Connu à l'origine sous l'acronyme ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite), Landsat avait été conçu pour tester la faisabilité d'une plate-forme multispectrale d'observation de la Terre non habitée. Depuis, le programme Landsat a permis l'acquisition de données sur tous les coins de la planète. Le programme Landsat qui était gérée à l'origine par la NASA, est sous la responsabilité de la NOAA, en 1983. En 1985, le programme a été commercialisé pour fournir des données aux divers utilisateurs civils.

Parmi les facteurs qui ont contribué au succès de Landsat, il faut mentionner une combinaison de capteurs avec des domaines spectraux façonnés pour l'observation de la Terre, une résolution spatiale fonctionnelle et une bonne couverture du globe (fauchée et répétitivité). La longévité du programme a permis d'accumuler des archives de données volumineuses sur les ressources terrestres, ce qui facilite la surveillance à long terme ainsi que le maintien des données historiques et de la recherche. Tous les satellites Landsat ont été placés en orbite héliosynchrone polaire. Les trois premiers satellites (Landsat-1 à Landsat-3) se situaient à une altitude de 900 km avec une répétitivité de 18 jours, tandis que les derniers orbitent à une altitude approximative de 700 km avec une répétitivité de 16 jours. Tous les satellites Landsat croisent l'équateur le matin pour profiter des conditions d'illumination optimales.

Les satellites de la série Landsat portent plusieurs capteurs comme les systèmes de caméras RBV (Return Beam Vidicon), le système MSS (Multi Spectral Scanner), et plus tard, le TM (Thematic Mapper) Chacun de ces capteurs a une fauchée de 185 km, avec une scène complète de 185 km sur 185 km.

Le MSS capte le rayonnement électromagnétique de la surface de la Terre provenant de quatre bandes spectrales. Chaque bande possède une résolution spatiale de 60 sur 80 mètres, et une résolution radiométrique de 6 octets, ou de 64 valeurs numériques. Le MSS capte le rayonnement avec un balayeur mécanique qui utilise un miroir oscillant. Six lignes de balayage peuvent être recueillies simultanément avec chaque balayage d'est en ouest du miroir. Le tableau suivant décrit les domaines spectraux des bandes MSS.

**Tableau 3 : Les domaines spectraux des bandes MSS**

Bandes		Longueurs d'ondes (microns)
Landsat 1,2,3	Landsat 4,5	
MSS 4	MSS 1	0,5 - 0,6 (vert)
MSS 5	MSS 2	0,6 - 0,7 (rouge)
MSS 6	MSS 3	0,7 - 0,8 (proche infrarouge)
MSS 7	MSS 4	0,8 - 1,1 (proche infrarouge)

La collecte routinière de données MSS a cessé en 1982 à cause de l'utilisation des données TM qui a commencé avec Landsat 4. Le capteur TM capteur MSS, le capteur TM apporte plusieurs améliorations : une meilleure résolution spatiale et radiométrique, des bandes spectrales plus étroites, sept bandes spectrales par rapport à quatre pour le MSS, et une augmentation du nombre de détecteurs par bandes (seize pour les bandes non thermiques par rapport à six pour MSS). Seize lignes de balayage sont captées simultanément pour chaque bande spectrale non thermique (quatre pour les bandes thermiques). Les seize lignes sont captées simultanément à l'aide d'un miroir oscillant qui balaie à l'aller (de l'ouest vers l'est) et au retour (de l'est vers l'ouest) du miroir. Cette différence par rapport au capteur MSS augmente le temps d'arrêt sur un objet et améliore l'intégrité géométrique et radiométrique des données. La limite de résolution spatiale du TM est de 30 m pour toutes les bandes, sauf l'infrarouge thermique qui est de 120 m. Toutes les bandes sont enregistrées sur une étendue de 256 valeurs numériques (8 octets). Le tableau suivant décrit la résolution spectrale des bandes individuelles TM et leurs applications.

**Tableau 4 : Bandes TM**

Bandes	Domaine spectral (microns)	Application
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)	discrimination entre le sol et la végétation, bathymétrie/cartographie côtière; identification des traits culturels et urbains
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)	cartographie de la végétation verte (mesure le sommet de réflectance); identification des traits culturels et urbains
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)	discrimination entre les espèces de plantes à feuilles ou sans feuilles; (absorption de chlorophylle); identification des traits culturels et urbains
TM 4	0,76 - 0,90 (proche IR)	identification des types de végétation et de plantes; santé et contenu de la masse biologique; délimitation des étendues d'eau; humidité dans le sol
TM 5	1,55 - 1,75 (IR de courte longueur d'onde)	sensible à l'humidité dans le sol et les plantes; discrimination entre la neige et les nuages
TM 6	10,4 - 12,5 (IR thermique)	discrimination du stress de la végétation et de l'humidité dans le sol relié au rayonnement thermique; cartographie thermique
TM 7	2,08 - 2,35 (IR de courte longueur d'onde)	discrimination entre les minéraux et les types de roches; sensible au taux d'humidité dans la végétation

Les données des capteurs TM et MSS sont utilisées pour plusieurs applications comme la gestion des ressources, la cartographie, la surveillance de l'environnement et la détection du changement (par exemple, la surveillance des coupes à blanc).

## SPOT

Le système SPOT (Système pour l'observation de la Terre) est une série de satellites d'observation de la Terre qui ont été conçus et lancés par le Centre National d'Études Spatiales (CNES) de la France, avec l'aide de la Belgique et de la Suède. SPOT-1 a été lancé en 1986, et a été suivi d'autres satellites lancés à tous les trois ou quatre ans. Tous les satellites sont en orbite héliosynchrone polaire à une altitude de 830 km, ce qui produit une répétitivité de 26 jours. Ils croisent l'équateur vers 10h30 heure solaire locale. Conçu dans le but d'acquérir des données de télédétection à des fins commerciales, SPOT et a été le premier satellite à utiliser la technologie du balayage à barrettes ou balayage longitudinal.

Tous les satellites SPOT ont deux balayeurs multibandes HRV (haute résolution visible) à barrettes, qui peuvent être opérés indépendamment ou simultanément. Chaque HRV peut capter en mode panchromatique (une seule bande) et offre une excellente limite de résolution spatiale de 10 m. Ils peuvent aussi capter en mode multibande (MLA) (trois bandes) qui offre une résolution spatiale de 20 m. Chaque balayeur à barrettes est composé de quatre rangs linéaires de détecteurs :

un de 6 000 éléments pour l'enregistrement en mode panchromatique, et un de 3 000 éléments pour chacune des trois bandes multispectrales. La fauchée pour les deux modes est de 60 km à partir du nadir. Le tableau suivant décrit les caractéristiques spectrales des deux modes.

**Tableau 5 : Caractéristiques spectrales du satellite spot**

Mode / bande	Domaine spectral (microns)
Panchromatique (PLA)	0,51 - 0,73 (bleu-vert-rouge)
Multispectrale (MLA)	
Bande 1	0,50 - 0,59 (green)
Bande 2	0,61 - 0,68 (red)
Bande 3	0,79 - 0,89 (proche infrarouge)

L'angle de dépointage des capteurs peut être ajusté pour regarder des deux côtés de la ligne nadir. Ceci permet des visées obliques, ce qui augmente la répétitivité des satellites. Cette capacité de dépointage (jusqu'à 27 degrés à partir du nadir) permet aux satellites SPOT d'accéder à un couloir d'acquisition de 950 km et permet une répétitivité de plusieurs fois par semaine. Lorsque le capteur s'éloigne du nadir, la fauchée augmente de 60 à 80 km de large. En plus d'améliorer la capacité de surveillance d'un site spécifique et d'augmenter les chances d'acquérir une scène sans nuages, la visée oblique permet aussi l'acquisition de données en stéréoscopie. Les images d'une même région enregistrées à partir de deux angles différents peuvent être visionnées et analysées en trois dimensions, une technique indispensable pour l'interprétation de terrain, la cartographie et les reproductions visuelles de terrain.

La visée oblique augmente à 3 jours la fréquence de répétitivité à l'équateur (7 fois durant un cycle de 26 jours). Les régions situées à une latitude de 45 degrés peuvent être visionnées 11 fois lors du cycle de 26 jours à cause de la convergence des orbites vers les pôles. En pointant les deux capteurs pour couvrir des traces au sol adjacentes, une trace au sol de 117 km (3 km de chevauchement) peut être visionnée. Ce mode d'opération permet l'acquisition de données panchromatiques ou multispectrales, mais pas les deux en même temps.

Le système SPOT présente plusieurs avantages par rapport aux autres capteurs spatiaux. Sa limite de résolution fine et le dépointage des capteurs sont les principales raisons de sa popularité. Les données de trois bandes multispectrales sont utiles pour afficher des images fausses-couleurs et la bande panchromatique peut être utilisée pour améliorer le détail des données multispectrales.

SPOT est utile pour les applications qui requièrent une excellente résolution spatiale (comme la cartographie urbaine) et combine également les avantages d'un coût abordable et de pouvoir acquérir des données satellites au moment idéal. Les images SPOT trouvent plusieurs applications dans des domaines qui nécessitent des images fréquentes, tels que la foresterie et l'agriculture. L'acquisition d'images stéréoscopiques a joué un rôle important pour les applications en cartographie et pour la dérivation d'information topographique (modèle numérique de terrain - MNT) des données satellitaires.



**Figure 17. Système de fonctionnement du Spot.**

## IRS

La série des satellites IRS (Indian Remote Sensing satellite) combine les caractéristiques des capteurs de Landsat MSS et TM et du capteur HRV de SPOT. Le troisième satellite de la série, IRS-1C, lancé en décembre 1995, a trois capteurs : une caméra de haute résolution panchromatique à une bande (PAN), le capteur à quatre bandes LISS-III (Linear Imaging Selfscanning Sensor) de résolution moyenne, et le capteur à deux bandes WiFS (Wide Field of View) de faible résolution. Le tableau suivant décrit les caractéristiques de chaque capteur.

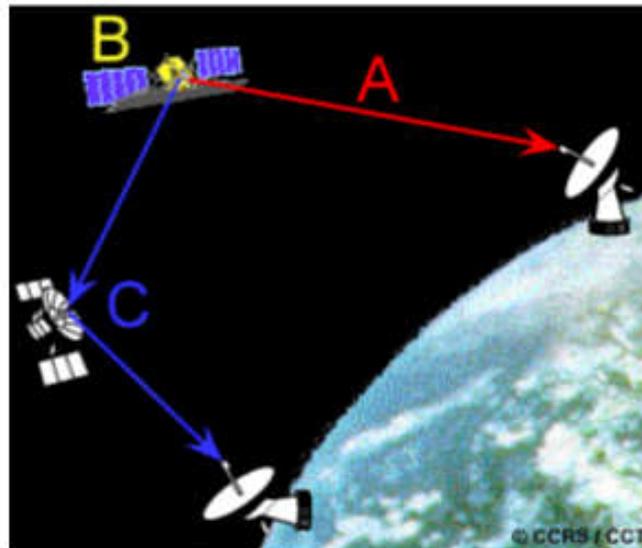
Tableau 6 : Capteur IRS

Capteur	Domaine spectral (microns)	Résolution spatiale	Largeur de la fauchée	Répétitivité (à l'équateur)
<b>PAN</b>	0,5 - 0,75	5,8 m	70 km	24 jours
<b>LISS-II</b>				
Vert	0,52 - 0,59	23 m	142 km	24 jours
Rouge	0,62 - 0,68	23 m	142 km	24 jours
Proche IR	0,77 - 0,86	23 m	142 km	24 jours
IR moyen	1,55 - 1,70	70 m	148 km	24 jours
<b>WiFS</b>				
Rouge	0,62 - 0,68	188 m	774 km	5 jours
Proche IR	0,77 - 0,86	188 m	774 km	5 jours

En plus de sa haute résolution spatiale, le balayage linéaire du capteur panchromatique peut être dépointé jusqu'à 26 degrés, ce qui permet d'acquérir des images stéréoscopiques et d'augmenter la répétitivité du satellite (jusqu'à 5 jours), comme pour les satellites SPOT. Les données à haute résolution sont utiles pour les applications comme la planification urbaine et la cartographie. Les quatre bandes multispectrales LISS-III ressemblent aux bandes 1 à 4 du capteur TM de Landsat. Celles-ci sont utiles pour la discrimination de la végétation, la cartographie terrestre, et pour la gestion des ressources naturelles. Le capteur WiFS est semblable aux bandes AVHRR de NOAA. La résolution spatiale de ce capteur ainsi que son recouvrement sont utilisés pour la surveillance de la végétation à l'échelle régionale (Centre canadien de télédétection).

## 2.8. Réception, transmission, et traitement des données

Les données acquises par un capteur aéroporté peuvent être recueillies une fois que l'avion est de retour au sol. Elles peuvent ensuite être traitées et, finalement, remises à l'utilisateur. Par contre, les données acquises par un satellite doivent être transmises électroniquement à une station de réception sur Terre, car le satellite demeure en orbite pour plusieurs années. Les méthodes de transmission développées pour les satellites peuvent aussi être utilisées dans le cas d'un avion s'il y a un besoin urgent des données au sol (fig. 18).



**Figure 18 : Réception, transmission, et traitement des données**

On utilise trois méthodes de transmission des données :

A. Les données peuvent être transmises directement à une station de réception sur Terre, si le satellite se situe dans le cercle de réception de la station. B. Si le satellite n'est pas dans le cercle de réception d'une station, les données peuvent être stockées par un enregistreur à bord du satellite. C. Les données peuvent être aussi retransmises à la station de réception par des satellites de communication qui sont en orbite géostationnaire autour de la Terre. Les données sont transmises de satellite à satellite jusqu'à ce qu'on puisse les retransmettre à la station.

Le Canada possède deux stations de réception de données satellitaires qui sont exploitées par le CCT : l'une est située à Cantley (GSS), tout près d'Ottawa, l'autre, à Prince Albert (PASS) en Saskatchewan. La combinaison des cercles de couverture de ces deux stations permet la réception des données transmises directement ou enregistrées par presque tous les satellites qui passent au-dessus du territoire canadien et des États-Unis continentaux. Plusieurs pays ont également construit des stations de réception tout autour de la Terre afin de recevoir les données des différents satellites en orbite.

Les données brutes parviennent à la station de réception sous forme numérique. Elles sont alors traitées pour corriger les distorsions atmosphériques, géométriques, et systématiques lorsque nécessaire. Elles sont ensuite converties dans un format standard et sont sauvegardées sur bandes magnétiques, disquettes ou CD-ROM. La plupart des stations de réception et de traitement

conservent aussi en archives les données qu'elles acquièrent. Les agences gouvernementales et les entreprises privées prennent charge des archives de leurs capteurs respectifs.

Pour plusieurs capteurs, il est possible de fournir rapidement des images aux clients qui en ont un urgent besoin. Des systèmes de traitement en temps réel permettent de produire des images à faible résolution (sur papier ou numérique) au cours des quelques heures suivant l'acquisition. Ces images peuvent être retransmises aux clients par télécopieur ou en format numérique. Ce traitement rapide des données est utilisé pour fournir des images aux navires parcourant l'océan Arctique : les images facilitent la navigation dans les champs de glace car elles permettent aux pilotes des navires d'évaluer les conditions de la glace. Le traitement d'images en temps réel pour des capteurs aériens est utilisé pour envoyer des images infrarouges thermiques directement aux pompiers qui combattent un feu de forêt.

Les images à faible résolution "quick-look" sont utilisées pour vérifier les images archivées avant de les acheter. Bien que la qualité spatiale et radiométrique de ce type de produits soit inférieure, ils n'en demeurent pas moins utiles pour s'assurer que la qualité, la composition, et la couverture nuageuse sont acceptables (Centre canadien de télédétection).

### **3. Analyse d'image**

Pour tirer avantage des données de télédétection, il faut être en mesure d'extraire de l'information significative de l'imagerie. L'interprétation et l'analyse de l'imagerie de télédétection ont pour but d'identifier et de mesurer différentes cibles dans une image pour pouvoir en extraire l'information utile. En télédétection, une cible est définie comme étant toute structure ou objet observable dans une image.

Les cibles peuvent être des points, des lignes ou des surfaces. Elles peuvent donc présenter des formes variées : un autobus dans un stationnement, un avion sur une piste, un pont, une route, un grand champ ou une étendue d'eau. La cible doit être distinctive, c.-à-d. qu'elle doit contraster avec les structures avoisinantes (photo 5).



**Photo 5. Exemple d'une cible (cercle bleu).**

L'interprétation et l'identification des cibles en télédétection sont souvent faites de façon visuelle, c'est-à-dire par un interprète humain. Dans plusieurs cas, l'imagerie est présentée dans un format photographique, indépendamment du type de capteurs et de la manière dont les données sont acquises. Dans ce cas, nous dirons que les données sont en format analogique. Les images de télédétection peuvent être représentées au moyen d'un ordinateur par une matrice de pixels, où chaque pixel correspondant à un nombre, représentant le niveau d'intensité du pixel. Dans ce cas, les données sont en format numérique. L'interprétation visuelle peut aussi être faite en examinant l'imagerie numérique sur un écran d'ordinateur. Les imageries analogique et numérique peuvent toutes deux être représentées en noir et blanc (images monochromatiques) ou en composés couleurs en combinant différents canaux ou bandes représentant différentes longueurs d'onde.

Quand des données de télédétection sont disponibles en format numérique, le traitement et l'analyse numériques peuvent être faits au moyen d'un ordinateur. Le traitement peut servir à rehausser les données en prévision d'une interprétation visuelle. Des traitements et analyses numériques peuvent être faits automatiquement afin d'identifier des cibles et d'extraire l'information sans l'intervention d'un interprète humain. Cependant, le traitement et l'analyse numériques sont presque toujours utilisés en appui et en complément à l'interprétation humaine.

L'interprétation et l'analyse visuelles datent du tout début de la télédétection avec l'interprétation de photos aériennes. Le traitement et l'analyse numériques sont plus récents avec la venue des enregistrements numériques des données de télédétection et le développement des

ordinateurs. Les techniques analogiques et numériques pour l'interprétation des données de télédétection ont leurs avantages et désavantages respectifs.

En général, l'interprétation visuelle requiert peu ou pas d'équipement, tandis que l'analyse numérique requiert de l'équipement spécialisé et parfois dispendieux. L'interprétation visuelle est souvent limitée à un seul canal de données ou une seule image à la fois, en raison de la difficulté d'effectuer une interprétation visuelle avec plusieurs images. Les ordinateurs étant en mesure de traiter des images plus complexes, l'analyse numérique peut s'effectuer à partir de données provenant de plusieurs canaux. Dans cette optique, l'analyse numérique, est utile pour l'analyse simultanée de plusieurs bandes spectrales et elle peut traiter des banques de données plus rapidement qu'un interprète humain. L'interprétation humaine est un procédé subjectif, ce qui veut dire que les résultats peuvent varier d'un interprète à l'autre. L'analyse numérique, puisqu'elle est basée sur la manipulation de nombres par un ordinateur est plus objective, ce qui donne des résultats reproductibles. Cependant, la précision des résultats provenant de traitements numériques peut être difficile, puisqu'elle doit être validée par les analystes.

Rappelons que les analyses visuelles et numériques de l'imagerie de télédétection ne s'excluent mutuellement. Les deux méthodes ont chacune leurs mérites, et c'est en combinant les deux que se font la plupart des analyses de l'imagerie. La décision finale quant à l'importance et l'utilité de l'information extraite à la fin du processus d'analyse, revient toujours aux analystes.

### **3.1. Éléments d'interprétation visuelle**

L'analyse d'imagerie de télédétection nécessite l'identification de différentes cibles sur une image. Ces cibles peuvent être des structures naturelles ou artificielles, faites de divers points, lignes ou surfaces. Les cibles peuvent être définies en fonction de la manière dont elles diffusent le rayonnement. L'intensité du rayonnement est mesurée et enregistrée par un capteur pour être ensuite transformée en un produit utilisable tel qu'une photo aérienne ou une image satellite.

Qu'est-ce qui fait de l'interprétation de l'imagerie une tâche plus difficile que l'interprétation de ce qui nous entoure dans notre quotidien? D'abord, nous perdons notre sens de la perspective en regardant une image en deux dimensions, à moins de la regarder en stéréoscopie pour simuler une troisième dimension. En effet, dans plusieurs applications, la visualisation stéréo est un atout important pour l'interprétation puisque la reconnaissance d'une cible y est rehaussée de façon spectaculaire. À vol d'oiseau, les objets peuvent avoir une apparence très différente de celle à laquelle nous sommes habitués. La combinaison d'une perspective inhabituelle, d'une échelle très

différente et du peu de détails fait que les objets les plus familiers sont parfois méconnaissables sur une image. Enfin, comme nous avons l'habitude de ne voir que les longueurs d'onde de la zone visible du spectre électromagnétique, il nous est plus difficile de comprendre l'imagerie des longueurs d'onde des autres zones du spectre.

La reconnaissance des cibles est la clé de l'interprétation et de l'extraction d'information. L'observation des différences entre les cibles et leurs arrière-plans implique la comparaison entre différentes cibles en se basant sur une combinaison des caractéristiques suivantes : ton, forme, taille, patron, texture, ombre et association. Consciemment ou non, nous utilisons régulièrement ces caractéristiques pour les interprétations visuelles que nous effectuons quotidiennement. L'observation des images satellites lors des bulletins de météo ou l'observation d'une poursuite rapide à partir d'un hélicoptère sont des exemples familiers d'interprétation d'images visuelle. L'identification des cibles en télédétection basée sur les 7 caractéristiques visuelles nous permet de mieux interpréter et analyser. Chacune de ces caractéristiques d'interprétation est décrite ci-dessous, avec une image en exemple pour chaque cas.



Le **ton** réfère à la clarté relative ou la couleur (teinte) des objets dans une image. Généralement, la nuance de ton est l'élément fondamental pour différencier les cibles et les structures. Les variations de ton permettent aussi la différenciation des formes, textures et patrons des objets.



La **forme** réfère à l'allure générale, la structure ou le contour des objets Pris individuellement. La forme peut être un indice très important pour l'interprétation. Les formes aux bordures rectilignes se retrouvent généralement dans les régions urbaines ou sont des champs agricoles, alors que les structures naturelles, telles que les bordures des forêts, sont généralement plus irrégulières, sauf dans les endroits où l'homme a construit une route ou effectué une coupe à blanc. Les fermes où les champs de culture irrigués par des systèmes d'arrosage automatiques présentent des formes circulaires.



La **taille** d'un objet sur une image est fonction de l'échelle. Il est important d'évaluer la taille d'une cible par rapport aux autres objets dans une scène (taille relative), ainsi que la taille absolue, afin d'aider l'interprétation de cette cible. Une évaluation rapide de la taille approximative d'une cible facilite souvent l'interprétation. Par exemple, dans une image où l'on aurait à distinguer

différentes zones d'utilisation du sol et à identifier une aire comportant des bâtiments, les grosses structures telles que les usines ou les entrepôts suggéreraient des propriétés commerciales, tandis que de plus petits éléments suggéreraient des lieux résidentiels.

Le **patron** réfère à l'agencement spatial des objets visiblement discernables. Une répétition ordonnée de tons similaires et de textures produit un patron distinctif et facilement reconnaissable. Les vergers avec leurs arbres régulièrement disposés, ou les rues régulièrement bordées de maisons sont de bons exemples de patrons.



La **texture** réfère à l'arrangement et à la fréquence des variations de teintes dans des régions particulières d'une image. Des textures rugueuses consisteraient en des tons en rayures où les niveaux de gris changent brusquement dans une petite région, alors que les textures lisses auraient peu ou pas de variations de tons. Les textures lisses sont souvent le résultat de surfaces uniformes telles que des champs, du pavement ou des terrains gazonnés. Une cible avec une surface rugueuse et une structure irrégulière, telle qu'une forêt, résulte en une texture d'apparence rugueuse. La texture est l'un des éléments les plus importants pour différencier les structures sur une image radar.



Les **ombres** sont aussi utiles pour l'interprétation puisqu'elles donnent une idée du profil et de la hauteur relative des cibles pouvant être identifiées facilement. Les ombres peuvent cependant réduire, voire éliminer l'interprétation dans leur entourage, puisque les cibles situées dans les

ombres sont moins, ou pas du tout discernables. En imagerie radar, les ombres sont particulièrement utiles pour rehausser ou identifier la topographie et les formes géologiques, particulièrement en imagerie radar.



L'**association** tient compte de la relation entre la cible d'intérêt et d'autres objets ou structures reconnaissables qui sont à proximité. L'identification d'éléments qu'on s'attend normalement à retrouver à proximité d'autres structures peut donner de l'information facilitant l'identification. Dans l'exemple ci-dessous, les propriétés commerciales peuvent être associées avec les routes à proximité, alors que les aires résidentielles seraient associées avec les écoles, les terrains de jeux et de sports. Dans notre exemple, un lac est associé à des bateaux, à une marina et à un parc récréatif tout près.



### 3.2. Traitement numérique des images

De nos jours, la plupart des données de télédétection étant enregistrées en format numérique, presque toutes les interprétations et analyses d'images requièrent une partie de traitement numérique. Le traitement numérique des images peut recourir à divers procédés dont le formatage

et la correction des données, le rehaussement numérique pour faciliter l'interprétation visuelle ou même la classification automatique des cibles et des structures entièrement par ordinateur.

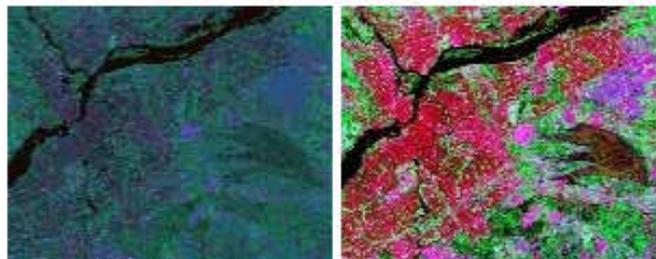
Le traitement numérique de l'imagerie de télédétection exige que les données soient enregistrées et disponibles dans un format numérique convenable pour l'entreposage sur disques ou cassettes informatiques.

Le traitement d'images numériques nécessite évidemment un système informatique (ou système d'analyse d'images) ainsi que l'équipement et les logiciels pour traiter les données. Plusieurs systèmes de logiciels commerciaux ont été développés spécifiquement pour le traitement et l'analyse des images de télédétection.

Pour les besoins de ce cours, nous regrouperons les fonctions de traitement des images communément disponibles en analyse d'images en quatre catégories :

1. Prétraitement 2. Rehaussement de l'image 3. Transformation de l'image 4. Classification et analyse de l'image

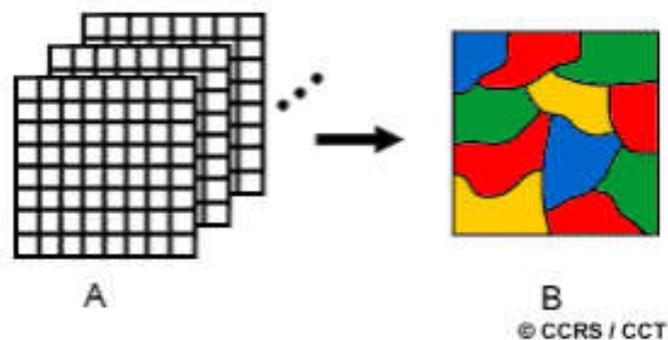
On appelle fonctions de pré-traitement les opérations qui sont normalement requises avant l'analyse principale et l'extraction de l'information. Les opérations de pré-traitement se divisent en corrections radiométriques et en corrections géométriques. Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données à cause des irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère, et de la conversion des données afin qu'elles puissent représenter précisément le rayonnement réfléchi ou émis mesuré par le capteur. Les corrections géométriques comprennent la correction pour les distorsions géométriques dues aux variations de la géométrie Terre-capteur, et la transformation des données en vraies coordonnées (par exemple en latitude et longitude) sur la surface de la Terre.



**Améliorer l'apparence de l'imagerie**

Les fonctions de rehaussement ont pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Les fonctions de rehaussement permettent l'étirement des contrastes pour augmenter la distinction des tons entre les différents éléments d'une scène, et le filtrage spatial pour rehausser (ou éliminer) les patrons spatiaux spécifiques sur une image.

Les transformations d'images sont des opérations similaires à ceux de rehaussement de l'image. Cependant, alors que le rehaussement de l'image qui est normalement appliqué à une seule bande de données à la fois, la transformation de l'image combine le traitement des données de plusieurs bandes spectrales. Des opérations arithmétiques (c'est-à-dire addition, soustraction, multiplication, division) sont faites pour combiner et transformer les bandes originales en de "nouvelles" images qui montrent plus clairement certains éléments de la scène. Nous allons examiner certaines de ces opérations incluant les diverses méthodes de rapport de bande aussi appelé rapport spectral et un procédé appelé analyse des composantes principales qui est utilisée pour mieux représenter l'information en imagerie multispectrale.



Les opérations de classification et d'analyse d'image sont utilisées pour identifier et classifier numériquement des pixels sur une image. La classification est habituellement faite sur des banques de données multispectrales (A), et ce procédé donne à chaque pixel d'une image une certaine classe ou thème (B) basé sur les caractéristiques statistiques de la valeur de l'intensité du pixel. Il existe une variété d'approches prises pour faire une classification numérique. Nous allons brièvement décrire deux approches générales qui sont souvent utilisées, soit la classification supervisée et la classification non supervisée.

### 3.3. Les prétraitements

Les prétraitements sont des opérations effectuées sur les images en amont de tous traitements de façon à les corriger ou les améliorer géométriquement et thématiquement. Il existe trois types de

prétraitements : les corrections radiométriques, les corrections géométriques et les corrections atmosphériques.

### Les corrections radiométriques

Les corrections radiométriques sont appliquées sur les images pour réaffecter à chaque pixel une valeur radiométrique la plus proche possible de celle mesurée sur le terrain. Les variations enregistrées peuvent être dues au vieillissement des capteurs, à leur dérèglement ou aux défauts lors de la conception des instruments. Les images SPOT ont ainsi un léger problème de colonage et les images LANDSAT MSS et TM (notamment au début de la série) un important phénomène de lignage. Ce sont souvent les organismes distributeurs des images satellitaires qui procèdent aux prétraitements radiométriques (égalisation de la sensibilité des détecteurs...) mais il est possible de les effectuer grâce à des procédures adaptées. Ainsi, l'analyse de Fourier permet entre autre de réduire le colonage des images LANDSAT.

### Les corrections géométriques

Les corrections géométriques sont appliquées sur les images pour réduire les déformations géométriques intervenues lors de l'enregistrement de la scène:

- Les distorsions causées par l'environnement (courbure de la terre, variation d'altitude au sol, réfraction atmosphérique...)
- Les distorsions dues aux erreurs des systèmes de mesure
- Les distorsions provenant des mouvements de la plate-forme (roulis, tangage, lacet...)

Les corrections géométriques sont également utilisées pour projeter et géoréférencer les images. Il existe deux façons de corriger géométriquement les images :

● **La méthode par modèle de navigation du satellite** consiste à transformer les images après avoir appliqué un modèle mathématique des paramètres géométriques de l'enregistrement de la scène. Chaque satellite possède son propre modèle de navigation.

● **La méthode polynomiale par prise de points d'appui** consiste à retrouver pour tout point  $m$  et  $n$  d'une image représentée par la fonction  $f(m, n)$  sa nouvelle position  $u$  et  $v$  dans tout autre système de coordonnées, soit la fonction  $g(u, v)$ , au moyen de la fonction  $h$ .

$$G(u, v) = f(m, n) h(m, n ; u, v)$$

La première étape consiste à trouver des points d'appui (dits aussi de calage ou d'amer) communs entre la source de référence et l'image à corriger. La source de référence peut être un ensemble de points connus et référencés (points géodésiques, relevés GPS...), une carte topographique ou encore une image satellitale géoréférencée, comme dans l'exemple ci-dessous.

Image de référence



Image à corriger



La seconde étape consiste à calculer la relation entre points source et points de référence. Plus il y a de déformations et plus il faut utiliser un modèle de déformation de degré élevé (c'est à dire un polynôme de déformation à degré élevé) et plus le nombre de points d'amer nécessaire est élevé. Le nombre minimal de points d'amer peut être calculé de la façon suivante :

$$N = ((T+1) (T+2)) / 2$$

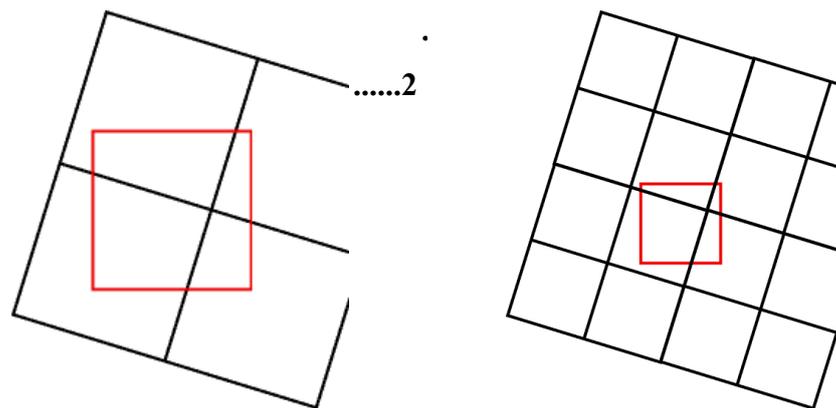
où  $N$  est le nombre minimal de points d'amer nécessaire et  $T$  l'ordre de la transformation choisie. Exemple avec un polynôme du second degré :  $N = ((2+1)(2+2))/2 = 6$  points d'amer au minimum.

La troisième et dernière étape consiste à appliquer le polynôme de déformation sur l'image à corriger pour créer une nouvelle image dans le référentiel choisi. L'ancienne et la nouvelle grille ne correspondant pas, il est nécessaire d'appliquer un algorithme de reventilation pour affecter à chaque nouveau pixel de l'image créée, une valeur la plus proche possible de l'ancienne image. Trois modes de reventilation sont possibles :

- La reventilation au plus proche voisin qui affecte à tout pixel de la nouvelle image le pixel le plus proche dans l'image d'origine (dans le schéma n°1, c'est le pixel en bas à gauche). Cette méthode est très rapide et conserve les valeurs radiométriques d'origine, mais a un mauvais rendu géométrique (effet d'escalier sur les diagonales...), c'est la méthode utilisée lorsque l'on travaille avec les valeurs radiométriques (classifications, analyses spectrales...).

- L'interpolation bilinéaire qui affecte à chaque pixel de la nouvelle image la valeur des 4 plus proches voisins (2x2) dans l'image d'origine (voir schéma n°1). Cette méthode est un peu moins rapide et engendre un léger effet de lissage, mais la précision spatiale est satisfaisante.

- L'interpolation bicubique qui affecte à chaque pixel de la nouvelle image la valeur des 16 plus proches voisins (4x4) dans l'image d'origine (voir schéma n°2). C'est la méthode la plus lente et elle engendre un lissage assez important de l'image. Néanmoins, la nouvelle image est très précise spatialement, donc parfaitement adaptée pour l'analyse des formes et des textures (méthodes de photo-interprétation).



En zone de fortes variations d'altitude, il est également possible, en plus de toutes ces opérations, de corriger géométriquement les images en prenant en compte le relief. Pour cela, on utilise un modèle numérique d'altitude, ce qui accroît davantage la précision spatiale des images. Ce procédé s'appelle "orthorectification".

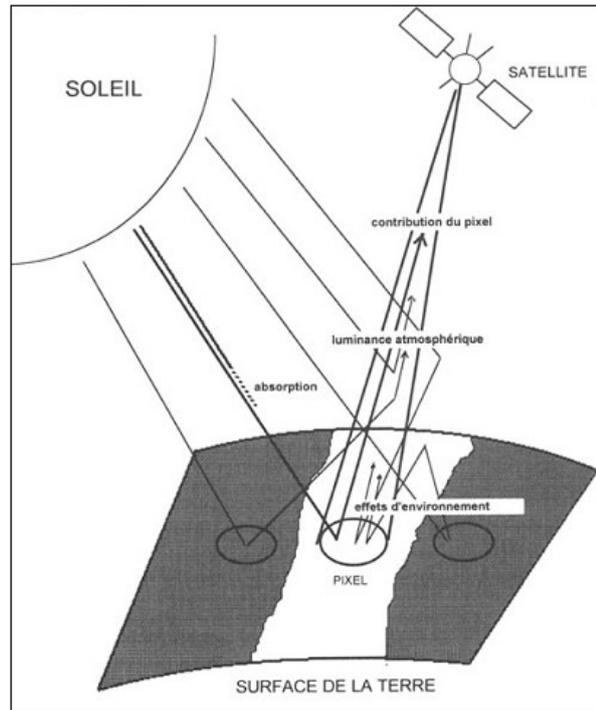
Les organismes distributeurs d'images de télédétection spatiale fournissent des données avec des degrés de précision géométrique variables en fonction du prix payé. Le tableau ci-dessous nous montre les différents niveaux de prétraitements effectués par l'organisme distributeur des images SPOT :

**Tableau 7 : Les différents niveaux de prétraitements effectués par l'organisme distributeur des images SPOT.**

Niveau de correction	Corrections radiométriques	Corrections géométriques	Précision de l'image
<b>1A</b>	Egalisation des détecteurs	Aucunes	Faible
<b>1B</b>	Egalisation des détecteurs	Sans repères terrestres	500 m
<b>2A</b>	Egalisation des détecteurs	Idem 1B mais géo référencées	-
<b>2B</b>	Egalisation des détecteurs	Idem 2A avec points d'amer	30 m
<b>3</b>	Egalisation des détecteurs	Idem 2B avec MNT ou stéréoscopie	-
<b>S1 et S2</b>	Egalisation des détecteurs	Idem 2B mais précision accrue	> à 10 m

### Les corrections atmosphériques

Le signal lumineux mesuré par les capteurs d'un satellite traverse deux fois l'atmosphère terrestre (figure ci-dessous), la première fois lors du trajet soleil-cible et le seconde lors du trajet cible-capteurs. A chacun de ces deux traversées, le rayonnement électromagnétique va subir des transformations dues aux propriétés physico-chimiques des deux composants majeurs de l'atmosphère terrestre qui sont les gaz (oxygène, ozone, vapeur d'eau...) et les aérosols (poussières, pollens...).



**Figure 19 : Réception des longueurs d'onde.**

La contribution de l'atmosphère dans la valeur radiométrique d'un pixel peut ainsi dépasser 50% dans certaines longueurs d'ondes, comme le bleu par exemple. Il est donc parfois nécessaire d'appliquer des corrections atmosphériques sur les images en fonction des caractéristiques thématiques la zone d'étude et de la méthode de traitement d'image employée.

Il est impossible d'obtenir la contribution réelle de l'atmosphère sans posséder les données décrivant les conditions météorologiques lors de l'enregistrement de l'image. C'est donc par simulation que les corrections atmosphériques vont être effectuées, pour obtenir au final une évaluation la plus précise possible de l'état de l'atmosphère lors de la prise de vue.

Parmi les logiciels de corrections atmosphériques les plus connus figurent 5S (TANRE et al) développé en France et la série des modèles LOWTRAN (KNEIZIS et al) développés aux Etats-Unis. Le logiciel 5S (Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) a été élaboré par le L.O.A. (Laboratoire d'Optique Atmosphérique) en 1985 et 1986 permet, grâce à un modèle de simulation du transfert radiatif à travers l'atmosphère non nuageuse, d'évaluer l'importance des effets de l'atmosphère sur les images satellitaires et de les corriger partiellement. Le logiciel 6S (Seconde Simulation du Signal Satellitaire dans le Spectre Solaire) a amélioré de nombreux points de l'ancienne version, mais au prix d'une complexité accrue.

Une fois la contribution de l'atmosphère connue, il suffit de la soustraire à la valeur radiométrique des pixels.

### 3.4. Classification

La classification d'une image de télédétection consiste en une reconnaissance automatique des réflectance. L'algorithme utilisé pour classer l'image va effectuer des regroupements de pixels en fonction de leurs similitudes. Il est ainsi possible d'identifier automatiquement les différents thèmes d'une image (végétation, eau, bâti...). Il est possible d'effectuer une classification sur un nombre important de canaux, la rapidité des traitements diminuant avec le nombre d'informations à traiter.

Il existe de très nombreuses méthodes de classification : noyaux dynamiques, ascendante hiérarchique, segmentation hyper cube, maximum de vraisemblance... sans compter les dernières technologies d'intelligence artificielle telles que les réseaux de neurones. Les classifications sont divisées en deux catégories : les classifications non supervisées, c'est à dire complètement automatisées et les classifications supervisées ou l'utilisateur définit un certain nombre de paramètres d'ordre spatiaux ou thématiques en entrée.

Dans le cas des classifications non supervisées, l'utilisateur ne rentre qu'une quantité limitée de paramètres, l'ordinateur fait le reste. Les choix de l'utilisateur portent par exemple sur le nombre de classes souhaitées ou le seuil à partir duquel l'ordinateur peut considérer que la classification est terminée (il y a toujours des pixels quasiment inclassables).

Dans le cas des classifications supervisées, l'utilisateur va guider l'ordinateur en lui fournissant des informations d'ordres thématiques ou spatiales. Ce type de classifications nécessite donc un minimum de connaissances sur la zone d'étude. Ce type de traitement donne des résultats souvent bien meilleurs, mais est plus long et peut être taxé de subjectivité.

Les paramètres thématiques qui sont entrés par l'utilisateur peuvent être par exemple des intervalles radiométriques qui ont été identifiés sur la zone d'étude (exemple : entre 0 et 25 = eau pure dans l'infrarouge). Les paramètres spatiaux sont par exemple des polygones dessinés sur l'image (un champ de blé, une parcelle de résineux, un lotissement pavillonnaire...) qui serviront d'étalon à l'ordinateur. La classification consistera ensuite à comparer chacun des pixels de l'image aux classes définies et à les affecter à celle qui est considérée comme la plus proche.

## Le Havre (classification automatique)



- Fortes réflectances (sols nus, bâti)
- Surfaces fortement minéralisées (bâti dense, sols nus)
- Bâti de densité moyenne (zones pavillonnaires, collectif bas)
- Surfaces végétalisées (végétation basse)
- Zones boisées
- Surfaces en eau

### 4. Les domaines d'application de la télédétection

#### 4.1. Foresterie

L'importance des forêts comme ressource alimentaire et protectrice, comme habitat, comme pourvoyeur de papier, de matériaux de construction et de combustion ainsi que de plantes médicinales est indéniable. Les forêts jouent également un rôle important dans les réserves et l'équilibre des échanges de CO<sub>2</sub> sur la Terre. Elles constituent un maillon clé entre l'atmosphère, la géosphère et l'hydrosphère. Les forêts tropicales en particulier sont constituées d'une très grande diversité d'espèces d'arbres, capables d'une bien meilleure capacité d'adaptation et de survie que nos forêts à monoculture. Ces forêts diversifiées sont également l'habitat d'une multitude d'espèces

animales, sans oublier les nombreuses espèces végétales dont on découvre de plus en plus la valeur au point de vue médicinal. Parmi les thèmes importants pour la gestion des forêts, mentionnons la surveillance du déboisement de sources naturelles (feux et infestations) ou humaine (coupes à blanc, brûlis, expansion de l'agriculture) et la surveillance de la santé et de la croissance pour la conservation et l'exploitation commerciale.

Jusqu'à maintenant les humains ont davantage considéré les produits forestiers que les forêts elles-mêmes. Ainsi, l'extraction du bois est une pratique courante presque partout au monde. Comme le déboisement a un effet à long terme sur le climat, la conservation du sol, la biodiversité et les régimes hydrologiques, on le retrouve au coeur même des préoccupations des activités de surveillance environnementale. L'exploitation commerciale des forêts est une industrie importante à travers le monde. Des forêts sont coupées puis replantées et les compagnies d'exploitation forestière sont continuellement à la recherche de nouvelles sources de bois. Les pressions se faisant grandissantes pour la conservation des forêts primaires et vierges et les pratiques forestières abusives ayant grandement limité les régions de coupes potentielles, les compagnies d'exploitation forestière doivent modifier leurs méthodes et devenir plus efficaces et développer des méthodes d'exploitation plus écologiques. Leur propre survie de même que l'approvisionnement en bois d'une population toujours en croissance dépend de la préservation de la ressource.

L'exploitation commerciale de la forêt n'est pas la seule responsable du déboisement. Des facteurs humains (les brûlis pour l'agrandissement des pâturages et des champs de cultures, le développement urbain) et des facteurs naturels (les sécheresses, l'agrandissement des déserts, la perte d'eau souterraine, les insectes, les feux, la maladie, le typhon) contribuent également à la disparition des forêts. Dans certaines parties du monde, particulièrement sous les tropiques, les forêts (tropicales humides) recouvrent ce qui peut être considéré comme la plus grande richesse qui soit : des terres fertiles. Les forêts sont brûlées ou rasées pour faciliter l'accès et l'utilisation de ces terres. Cette pratique survient souvent la perception des besoins de subsistance à long terme est éclipsée par celle des quand besoins de subsistance à court terme. Non seulement le déboisement des forêts riches en espèces diverses affecte-t-il le régime hydrologique local et régional, mais la fumée provenant des arbres en combustion pollue l'atmosphère, y ajoutant plus de CO<sub>2</sub> et augmentant l'effet de serre.

La surveillance de la santé des forêts est indispensable pour leur conservation et leur survie. Le déboisement d'espèces clés telles que les palétuviers sur les côtes où l'équilibre environnemental est fragile, la destruction de supports clés ou d'arbres abritant des essences potentiellement

récoltables ou la disparition de larges biotes agissant comme réservoirs de CO<sub>2</sub> ont des répercussions négatives pour la société. De plus en plus d'efforts sont déployés pour assurer l'application des lois et des protocoles internationaux qui tentent de protéger ces régions.

La foresterie peut bénéficier de nombreuses applications internationales et domestiques de la télédétection. Mentionnons parmi celles-ci : le développement continu, la biodiversité, les titres et cadastres des terres, la surveillance du déboisement, la gestion du reboisement, les opérations de coupes commerciales, la cartographie et la protection des côtes et bassins versants et la surveillance biophysique (estimation d'habitats sauvages).

Certains pays en voie de développement ont une connaissance limitée de leurs ressources forestières. La cartographie du couvert forestier général, la surveillance des changements côtiers et des bassins versants, la surveillance des coupes et le suivi de la régénération, ainsi que la cartographie des feux de forêts et des zones brûlées sont autant d'applications que les agences ou compagnies canadiennes et étrangères qui sont en mesure d'utiliser la télédétection comme source d'information peuvent offrir sur le marché international.

Parmi les applications de la télédétection en foresterie se trouvent également :

#### 1) La cartographie de reconnaissance

Les agences nationales forestières ou environnementales poursuivent des objectifs tels que la mise à jour du couvert forestier, la surveillance de la diminution des ressources et la mesure des propriétés biophysiques des forêts : „ discrimination du type de couvert forestier „, cartographie agroforestière

#### 2) La foresterie commerciale

Les compagnies forestières ainsi que les agences de gestion des ressources accordent beaucoup d'importance à l'inventaire et aux applications cartographiques telles que la collecte d'information sur les récoltes, la mise à jour des inventaires pour la demande de coupe, les types de forêts, la densité de végétation et les mesures de biomasse : „ cartographie de coupe à blanc / évaluation de la régénération „, déboisement par le feu „, cartographie d'infrastructure / support des opérations „, inventaire des forêts „, estimation de la biomasse „, inventaire des espèces.

#### 3) Surveillance environnementale

Les gestionnaires de conservation sont préoccupées par la surveillance de la qualité, de la santé et de la diversité des forêts de la Terre : „ déforestation (forêts amazoniennes, colonies de palétuviers) „ inventaire des espèces „ protection des bassins déversants (bandes riveraines) „ protection des côtes (forêts palétuviennes) „ santé et vigueur des forêts.

La déforestation est un problème global dont les implications sont nombreuses. Dans l'Europe industrialisée, la pollution (pluies acides, suie et produits chimiques des cheminées industrielles) ont endommagé une grande partie des forêts. En ex-Tchécoslovaquie, la moitié des forêts ont été détruites ou endommagées par des polluants. Des effets similaires se font sentir en Allemagne, en Pologne et même dans les pays scandinaves. Dans les pays tropicaux, de précieuses forêts ont été détruites pour faire place à des terres cultivables et des pâturages. Il en résulte de grandes pertes à travers l'Amérique latine (Amérique centrale, le sud du Mexique, Haïti), l'Amérique du Sud (Brésil), l'Afrique et l'Asie. En Haïti et à Madagascar en particulier, les résultats en sont catastrophiques. La perte des forêts accentue l'érosion du sol et l'envasement des rivières, ce qui affecte la navigation, la pêche, les habitats sauvages, les réserves d'eau potable ainsi que la productivité et l'autosuffisance agricoles.

Des environnements estuariens sensibles sont protégés par les forêts de palétuviers qui sont coupées ou perdues pour le développement urbain et l'aquaculture ou endommagées par les polluants ou la boue. Le suivi de la santé de ces forêts est une étape vers la protection de côtes contre l'érosion, la dégradation et l'inondation des terres avoisinantes.

La perte des forêts affecte aussi la diversité génétique des espèces sur Terre qui contrôle notre habileté intrinsèque à nous adapter aux conditions changeantes et à l'environnement. Les forêts amazoniennes abritent environ la moitié des espèces de plantes et d'animaux sur Terre; leur destruction massive ne peut que réduire le potentiel génétique et la diversité des espèces.

Le taux et l'étendue de la déforestation, ainsi que le suivi de la régénération sont les paramètres clés mesurés par des méthodes de télédétection.

#### **4.2. L'agriculture**

La végétation herbacée terrestre fait l'objet de plusieurs types d'utilisation. Ces types peuvent se répartir de la façon suivante :

- 1- Utilisation pour la production d'herbe et de fourrage, nécessaires à l'alimentation du bétail :

- de façon intensive,
- de façon extensive.

2- Utilisation à titre de conservation des milieux :

- Périmètre de protection des bassins versants pour le captage d'eau potables,
- conservatoires biologiques d'espèces (animales et végétales),
- zone de protection contre l'érosion ('éolienne et hydrique) ;

3- Utilisation comme valeur d'usage :

- dans un but esthétique
- pour une vocation touristique.

Suivant les zones géographiques, c'est plutôt d'un ou l'autre type d'utilisation qui est développé. En zone tempérées d'Europe de l'Ouest par exemple, on assiste à une diminution de l'utilisation des prairies permanentes pour l'élevage, avec une nette tendance à la déprise agricole touchant les zones défavorisées. Dans ce cas les prairies peuvent avoir plus d'intérêt pour leur valeur d'usage (contribution à la valeur esthétique du paysage à limitation du risque d'avalanche en montagne) que pour leur production de biomasse.

Par contre en zone semi-aride, où la disponibilité en fourrages est semi limitée, la fonction de production de biomasse des formations herbacées domine tous les autres types d'utilisation.

L'aménagement et la gestion de ces végétations herbacées et les conditions d'utilisation de la télédétection seront donc très différents. Cependant, les formations habituellement recherchées par les gestionnaires et décideurs sont :

- une identification des groupements végétaux ;
- une évaluation des surfaces ;
- une appréciation de la qualité de la phytomasse produites ;
- une évaluation de la quantité ;
- une aide à la prévision de l'évolution dynamique des groupements végétaux et, en particulier, aux conséquences de tel ou tel usage par l'homme, de telle ou telle pratique agricoles.

La télédétection permet de répondre, au moins partiellement à toutes ces questions, avec une mise en œuvre plus ou moins facile, une obtention plus ou moins rapide de résultats, eux-mêmes plus ou moins précis et fiables (Bonn et Rochon, 1996).

#### **4.3. Couverture et l'utilisation du sol**

Même si les termes couverture du sol et utilisation du sol se ressemblent, ils ont des définitions très différentes. La couverture du sol fait référence à la couverture de la surface sur le sol, que ce soit de la végétation, des infrastructures, de l'eau, le sol nu ou autres. L'identification, le tracé et la cartographie de la couverture du sol sont importants pour les études de surveillance planétaire, de gestion des ressources et de planification d'activités. L'identification de la couverture du sol établit la ligne de base à partir de laquelle des activités de suivi (et de détection) des changements peuvent être effectuées, et fournir des informations préliminaires pour les cartes thématiques.

L'utilisation du sol fait référence à l'usage qu'on fait du sol, par exemple les loisirs, l'habitat de la faune ou l'agriculture. L'application de l'utilisation du sol comprend la cartographie de base ainsi que la surveillance qui en découle, puisque des informations adéquates sont nécessaires pour connaître quelle superficie de sol correspond à quel type d'utilisation, ainsi que pour identifier les changements d'utilisation au fil des ans. Ces connaissances vont aider au développement de stratégies visant à équilibrer les utilisations conflictuelles et les pressions de l'urbanisation. La disparition et les perturbations des terres arables, l'urbanisation et la détérioration des forêts sont des sujets qui stimulent le développement d'études sur de l'utilisation du sol.

Il est donc important de faire la distinction entre la couverture du sol et l'utilisation du sol, ainsi que les informations que nous pouvons en retirer. Les propriétés mesurées par la télédétection se rapportent à la couverture du sol, à partir de laquelle l'utilisation du sol peut être déduite à l'aide de données auxiliaires ou de connaissances préalables.

L'étude de la couverture et de l'utilisation du sol est multidisciplinaire. Les participants impliqués dans ce genre d'études sont nombreux et très variés, mentionnons entre autres : les organismes internationaux de préservation de la faune et de conservation les centres de recherche gouvernementaux et l'industrie forestière. Les agences gouvernementales régionales ont besoin d'inventaires des couvertures du sol et de suivi des utilisations du sol pour mener à bien leur mandat de gestionnaire des ressources naturelles de leurs régions respectives. En plus de faciliter la gestion durable des terres, la couverture et l'utilisation du sol peuvent être utilisées pour la planification, la

surveillance et l'évaluation de développement, de l'activité industrielle ou des réclamations. La détection de changements des couvertures du sol à long terme peut indiquer une réaction à des modifications des conditions climatiques locales ou régionales qui sont la base même de la surveillance à l'échelle du globe.

Les négociations en cours concernant les réclamations des terres par les aborigènes ont engendré un besoin de connaissances plus précises sur ces territoires, tant au niveau de l'information cartographique que thématique.

Les gestionnaires de ressources qui travaillent avec des compagnies d'exploitation de ressources telles que le pétrole, le bois et les mines, sont soucieux des couvertures et des utilisations du sol tout comme les agences d'inventaires de ressources naturelles locales. Les changements dans la couverture du sol intéressent les scientifiques, et les gestionnaires de la conservation ainsi que les intervenants municipaux qui sont intéressés à établir le niveau des taxes ou la cartographie de la végétation. Les gouvernements sont également soucieux de la protection des ressources naturelles et s'engagent dans des activités de sensibilisation du grand public aux problèmes des sols.

Voici une liste de quelques applications de la télédétection pour l'utilisation du sol :

„ la gestion des ressources naturelles „ la protection de l'habitat sauvage „ la cartographie de base pour des données SIG „ l'expansion et le développement urbains „ la planification des itinéraires et de la logistique pour les activités d'exploration sismique et d'extraction de ressources „ la délimitation de l'étendue de dommage (tornades, inondations, volcans, tremblements de terre, feux) la détermination des limites légales pour l'évaluation des taxes et des propriétés „ la détection de cibles - l'identification de pistes d'atterrissage, de routes, de clairières, de ponts, de l'interface terre-eau.

#### **4.4. Changements d'utilisation du sol (rural/urbain)**

Contexte général Comme la population de la Terre augmente et que les économies nationales continuent de s'éloigner d'un système basé sur l'agriculture, les villes prennent constamment de l'expansion. La croissance urbaine s'effectue souvent aux détriment des terres agricoles ou des forêts productives envahies par ces irrésistibles poussées d'urbanisation. La croissance des villes est un indicatif du développement de l'industrialisation et elle a généralement un impact négatif sur la santé environnementale d'une région.

Le passage de l'utilisation rurale du sol à une utilisation urbaine, est surveillé de manière à estimer la population, prévoir et planifier la direction de la croissance urbaine et pour effectuer le suivi des régions sensibles à certains dangers sur le plan environnemental. L'établissement de refuges temporaires peut être surveillé, et la densité et l'importance d'une population peuvent être estimées.

L'analyse de changement d'utilisation du sol est importante afin d'assurer que le développement urbain n'empiète pas sur les précieuses terres agricoles et que l'agriculture se développe dans les endroits les plus appropriés pour éviter une dégradation due au voisinage urbain.

Pourquoi la télédétection? Avec des analyses multitemporelles, la télédétection offre une perspective unique sur la façon dont les villes se développent. L'élément clé pour cartographier les changements d'utilisation du sol, de rurale à urbaine, est la capacité de distinguer entre les utilisations rurales (l'agriculture, les pâturages, les forêts) et les utilisations urbaines (résidentielle, commerciale, récréative). Les méthodes de télédétection peuvent être utilisées au-dessus de grandes régions pour effectuer la classification des types d'utilisation du sol de façon pratique, économique et de manière répétitive.

Exigences des données La détection et la cartographie des changements d'utilisation du sol doivent satisfaire deux exigences : une haute résolution spatiale afin d'obtenir des informations détaillées, et des données multispectrales optiques afin de faire la distinction entre les différentes classes d'utilisation du sol.

Les détecteurs opérationnels dans les zones visible et infrarouge du spectre sont les sources de données les plus utiles pour l'analyse de la couverture et de l'utilisation du sol. Alors que plusieurs caractéristiques urbaines peuvent être détectées par l'imagerie radar ou autres (grâce à une grande réflectivité), les données VIR à haute résolution permettent une distinction plus fine de la couverture et de l'utilisation du sol, ce qui permet une identification plus sûre de la banlieue urbaine et des classes de transition allant de l'urbain au rural. Les images optiques acquises pendant les mois d'hiver sont également utiles pour tracer la frontière entre les régions urbaines et non urbaines. Les villes apparaissent de façon contrastée par rapport aux champs couverts de neige dont la texture est lisse.

Les capteurs radars sont également utiles pour le tracé des applications rurales et urbaines grâce à leur sensibilité aux formes géométriques qui permet de détecter les éléments anthropogéniques comme les édifices. L'arrangement géométrique optimal entre le capteur et la

région urbaine est une orientation linéaire, parallèle au mouvement du capteur, et perpendiculaire à l'énergie (L) incidente reçue.

Généralement, ce type d'application ne nécessite pas un délai de traitement et de livraison court, ou une fréquence d'acquisition élevée (Centre canadien de télédétection).

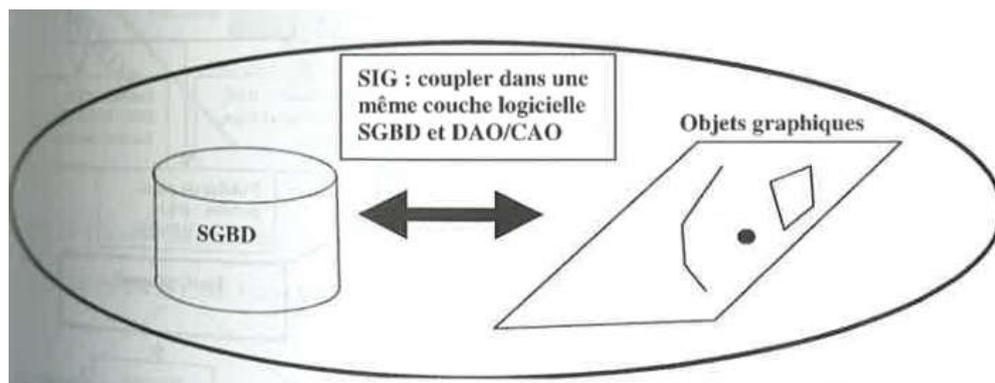
## Chapitre 2 : Le système d'information géographique

### 1- Définition d'un SIG

Les systèmes d'information géographique sont nés de la rencontre entre :

- la gestion de l'information graphique et notamment le dessin assisté par ordinateur (DAO) sous Autocad qui a fourni un standard de format de données graphiques (format DXF) que de nombreux SIG intègrent dans les modules d'importation de données pratiques.
- la gestion des bases de données par des systèmes informatiques selon des tables et des relations entre elles (ORACLE, ACCESS, DBASE...).

Les premiers SIG ont fait leur apparition au Canada et aux USA vers les années 1964-1965, dès qu'il fut possible d'établir un lien entre géométrie des objets (lignes, points et surface) et les informations qui leur sont associées (Pornon, 1990).



**Figure 20: Couche logicielle d'un SIG (d'après H. Pornon, 1990).**

En 1989, la Société française de Photogrammétrie et de télédétection définissait le SIG comme étant " un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement (géoréférencées). L'ensemble des informations géographiques intégrées dans le SIG forment une base de données géographiques." Le SIG permet donc de gérer une multitude d'informations de tous types (images satellitaires, photos aériennes, cartes, données chiffrées, bases de données...), de les mettre à jour très rapidement, de faire des requêtes (classiques et spatiales), d'appliquer des règles de topologie et de générer de nouvelles couches d'informations par le biais de ces croisements (Christophe Magdelaine / notre-planete.info, 2014)

On appelle donnée à référence spatiale toute donnée pouvant être localisée de façon directe (une école, une route...) ou indirecte (une adresse, un propriétaire...) à la surface de la terre.

## 2- Structure de l'information géographique

Pour transformer un objet réel en une donnée à référence spatiale, on décompose le territoire en couches thématiques (relief, routes, bâtiments...) structurées dans des bases de données numériques. Les bases de données qui alimentent les SIG doivent être géoréférencées, c'est-à-dire partager un cadre commun de repérage appelé système de projection (Hammoum et Bouzida, 2010).

## 3- L'information géographique

L'information géographique désigne toute information relative à un point ou un ensemble de points spatialement référencés à la surface de la terre. Elle est d'importance primordiale pour tous ceux qui ont à gérer un espace ou des objets dispersés dans un espace donné. On rassemble sous la dénomination d'information spatiale des données aussi diverses que la distribution de ressources naturelles (sols, eaux, végétation); la localisation d'infrastructures (routes, édifices, réseaux d'équipements divers), les limites administratives et politiques.

La définition de chacun des composants, système d'information et information géographique contribue à en préciser le contour :

➤ *Système d'information* : ensemble de composants inter reliés qui recueillent de l'information, la traitent, la stockent et la diffusent afin de soutenir la prise de décision et le contrôle au sein de l'organisation.

➤ *Information géographique* : l'information est dite géographique lorsqu'elle se rapporte à un ou plusieurs lieux de la surface du globe terrestre. Cette information possède la caractéristique d'être localisée, repérée ou géocodée.

Les données géographiques ont deux composantes : les données spatiales et les données attributaires.

Voici quelques exemples illustrant la relation entre l'espace et l'attribut :

- Une parcelle et son numéro
- La position d'un point et sa largeur
- La localisation d'une surface naturelle et son type de végétation

- *Les données spatiales* : représentent des objets géographiques associés avec leur localisation dans le monde réel (données localisées). Les objets géographiques sont représentés sur les cartes par des points, des lignes, et des polygones.

- *Les données attributaires* : décrivent des propriétés particulières des objets géographiques telles que : le numéro de parcelle, la largeur de pont, un type de végétation.

## **4. Les données géographiques**

### **4.1. Données RASTER**

La réalité est décomposée en une grille régulière et rectangulaire, organisée en lignes et en colonnes, formant des unités spatiales élémentaires. Cette unité spatiale élémentaire est appelée pixel (Picture element). La taille en unités de distance de ce pixel définit la résolution spatiale de l'image.

Chaque maille de cette grille ayant une intensité de gris ou une couleur. La juxtaposition des points recrée l'apparence visuelle du plan et de chaque information (Minvielle et Souiah, 2003).

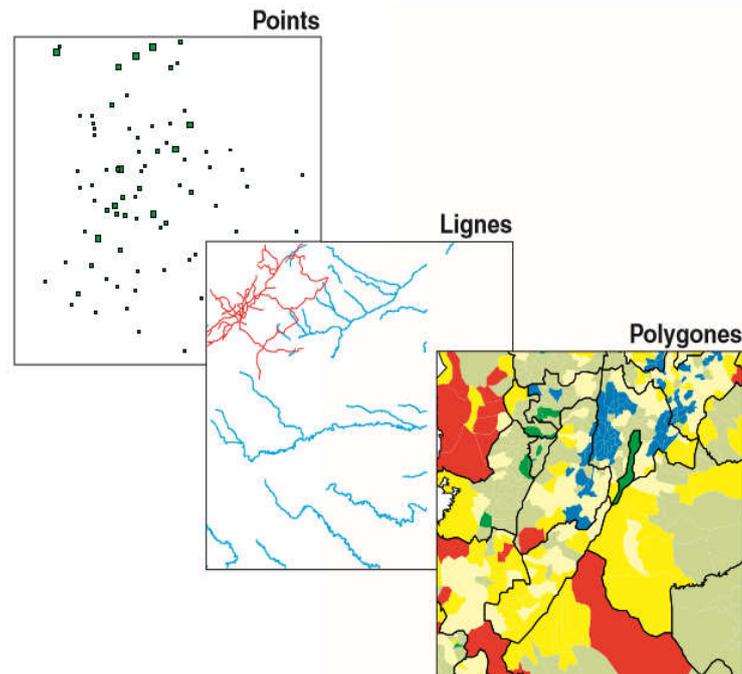
### **4.2. Données vectorielles**

Les limites des objets spatiaux sont décrites à travers leurs constituants élémentaires, à savoir les points, les arcs, et les arcs des polygones. Chaque objet spatial est doté d'un identifiant qui permet de le relier à une table attributaire.

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

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

Les polygones représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme des pays, des parcelles, des types de sols... (fig. 19) (Minvielle et Souiah, 2003).



**Figure 19 : Données vecteurs.**

Les données graphiques décrivent la localisation et la forme des objets géographiques, alors que les données alphanumériques décrivent la nature et les caractéristiques des objets spatiaux.

## **5. Les modèles de SIG**

### **Introduction**

Le but d'un SIG est de répondre à 5 questions fondamentales :

- où : où se trouve la zone que je veux analyser
- quoi : que trouve-t-on sur l'emplacement analysé
- comment : comment les objets de cette zone sont-ils répartis et comment interagissent-ils entre eux
- quand : y a-t-il eu, à un moment donné, des changements sur les données
- et si : que se passerait-il si tel événement se produisait

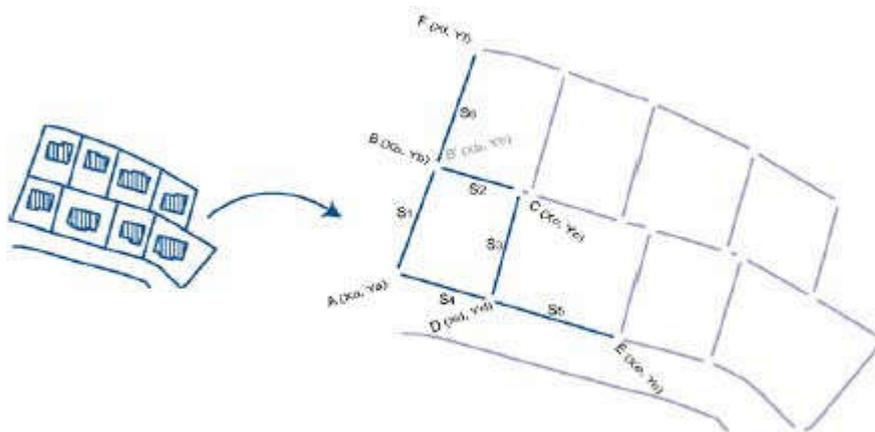
Pour pouvoir répondre à ces questions, il a fallu mettre en place une méthode pour stocker les informations relatives à la géographie.

Un modèle permet d'analyser la réalité et de la schématiser pour rendre les données récoltées utilisables. Deux modèles existent dans le SIG, le modèle spaghetti et le modèle topologique.

### **5.1. Modèle spaghetti**

La structure filaire ou dite "spaghetti" : les figurés géométriques de base sont enregistrés indépendamment les uns des autres (les données sont décrites séparément les unes des autres).

Aucune relation entre les différents segments n'est précisée. Il y aura donc des informations redondantes pour permettre de lier les informations ensemble. Ce genre de structure ne sert pratiquement qu'à une représentation visuelle des données. Il est très difficile d'effectuer de l'analyse spatiale à partir de ce type de modèle.



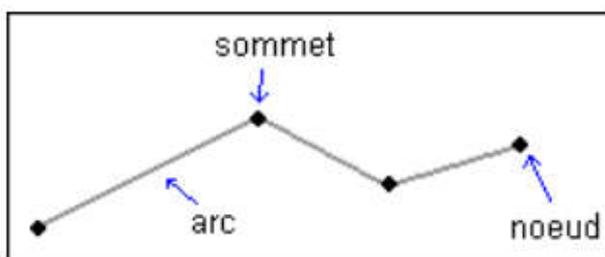
**Figure 21 : Modèle spaghetti**

L'image ci-dessus représente un modèle spaghetti. Pour décrire dans la base de données l'image de gauche, il faut décrire chaque segment. Ainsi, le segment S1 a pour sommet A et B. Le segment S2 a pour sommet B et C.

On voit ici que pour ajouter 2 segments, il a fallu entrer 2 fois le point B (Minvielle et Souiah, 2003).

### 5.2. Modèle topologique

La topologie désigne l'expression des relations entre les objets. Tous les logiciels SIG ne gèrent pas la topologie, dans ce cas on parle de SIG "en mode objet" (ou non topologiques). Ceux qui gèrent la topologie (comme la gamme ArcGIS d'ESRI), identifient tous les objets les uns par rapports aux autres (le sens de la saisie est par exemple enregistré).



Le modèle topologique décrit toutes les relations entre les segments et supprime la redondance d'information. Au détriment de l'efficacité de l'affichage, ces structures enregistrent les données de façon à accélérer l'exécution de requêtes spatiales.

L'image ci-dessous montre que chaque point a été stocké dans une table avec des informations le décrivant. Ensuite, une autre table s'occupe de lier ces divers points pour créer un ensemble complexe (Minvielle et Souiah, 2003).

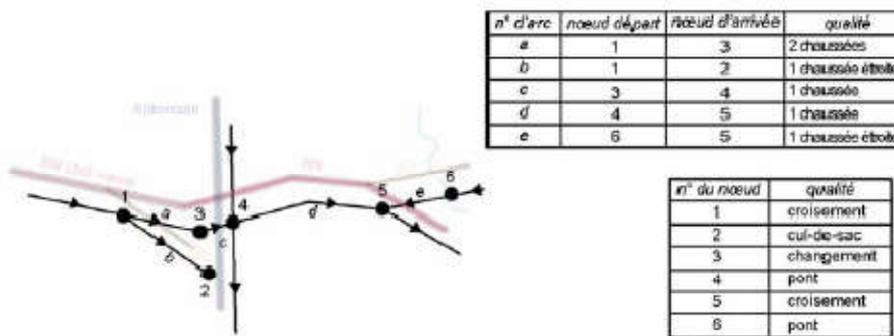


Figure 22 : modèle topologique

Par exemple, les vecteurs s'appellent des arcs, les points d'intersection des nœuds et les points intermédiaires des sommets. Des règles topologiques lient les éléments les uns aux autres : une habitation est strictement comprise dans une parcelle cadastrale et n'intersecte pas d'autoroute par exemple.

**Avantages / inconvénients de la topologie**

**Avantages**

- on peut capturer quelques nœuds pour fermer un polygone automatiquement et supprimer des arcs pendants
- on peut enregistrer les résultats de croisement de plusieurs couches dans une nouvelle qui hérite de toute l'information liée aux premières (géographique et attributive). Notons qu'il existe plusieurs options de croisement (union, intersection, identité...)
- on peut créer des zones-tampons ou buffer. Ceci consiste à déterminer une zone à distance fixe autour d'entités spatiales (zones de protection, zones d'influence...). Cette zone est circulaire autour des points isolés, forme un corridor autour d'un arc (ligne), et une zone tampon autour d'un polygone.

- si l'intégrité topologique est respectée, les couches d'informations sont fiables et leur exploitation plus rigoureuse.
- possibilité d'intégration Raster/Vecteur. Un plan raster peut être utilisé de manière passive (habillage lors de la restitution d'un plan), semi-passive (sert de guide à la numérisation), mais aussi active en enrichissant automatiquement la base de données vectorielles : c'est l'intégration Raster / Vecteur. Cette utilisation ne s'intéresse plus seulement à l'aspect visuel des images, mais aux valeurs des pixels. On peut connaître le nombre exacts de pixels à l'intérieur d'un polygone, mais aussi leur valeur numérique moyenne, mini ou maxi, la valeur majoritaire rencontrée etc...

### **Inconvénients**

- cela demande plus de temps et de rigueur dans la création et la mise à jour des données
- l'application de règles topologiques risque de créer de nouvelles erreurs qu'il faudra gérer...

## **6. Les domaines d'utilisation des SIG**

Il y a quelques années la mise en place de SIG paraissait réservée aux grandes structures. Aujourd'hui les progrès informatiques et les possibilités offertes en matière de gestion et d'analyse, conduisent à la généralisation de l'outil à tous les échelons du territoire.

Ainsi, on trouve des SIG dans bons nombres de domaines :

- aménagement du territoire et urbanisme
- agriculture
- industrie pétrolière,...
- prévention des risques naturels (inondations, feux de forêt, pollution,...)
- infrastructure routière
- construction publique
- gestion de l'eau

## **7. La métadonnée**

Donnée qui renseigne sur la nature de certaines autres données et qui permet ainsi leur utilisation pertinente.

Elle permet de :

- Connaître l'origine et la nature des données
- Comprendre leur structure
- Savoir comment accéder aux données et comment les interpréter

- Connaître les modèles de données et leur règle de gestion

*Exemple* : les projections cartographiques, la précision spatiale.

## 8. Fonctionnalités d'un SIG

La littérature qui traite du domaine, définit rapidement les fonctions attendues d'un SIG par « les 5A » qui sont : Abstraction, Acquisition, Archivage, Analyse et Affichage.

### 8.1. Abstraction

C'est la modélisation du monde réel suivant différents prismes. La construction du schéma conceptuel de données permet de modéliser la base de données en définissant les objets (classes d'objets), leurs attributs ainsi que leurs relations. Cette étape est nécessaire avant toute numérisation, elle sert de point de départ de la constitution des bases de données géographiques, et de support de dialogue entre les différents intervenants. Le but de modéliser est de se faire comprendre par le plus grand nombre.

La deuxième étape consiste à trouver le logiciel qui soit capable de transcrire et de « stocker » le schéma. Chaque logiciel possède implicitement un Modèle Conceptuel de Données. L'important étant le résultat, le logiciel n'étant qu'un outil. L'outil SIG doit être capable de transcrire et de stocker la modélisation.

### 8.2. Acquisition

Nous pouvons trouver l'information auprès des organismes nationaux ou internationaux producteurs ou revendeurs :

- *Des données de références* : INCT (Institut National de Cartographie et de Télédétection), ANC (Agence National du Cadastre), INPS (Institut National de Planification de la Statistique), CNTS (Centre National des Techniques Spatial) Spot Image,...
- *De données thématiques* : ANRH (Agence National des Ressources Hydriques), DGF (Direction général des Forêts).
- Auprès de professionnels locaux, cabinet d'expert géomètres, bureaux d'études d'état, collectivités local (APC).

Si la donnée n'existe pas sous forme numérique, il est possible de la créer soi-même ou par un prestataire :

- ❖ Numérisation du cadastre
- ❖ Levé topographique

*Quelles sont les techniques d'acquisition ?*

- Acquisition à partir des données vecteurs ; les sources sont soit indirectes : plan, photo, image satellite, soit directes avec des levés terrains. Cette acquisition se fait à partir de documents existants en papier (plan carte) par numérisation à partir d'une planche à numériser ou du scannage de la donnée sur l'écran de l'ordinateur, on numérise des objets dessinés sur le plan en données vecteurs. L'inconvénient de cette méthode est la retranscription des erreurs dues au support d'origine (déformation du papier, épaisseur du trait,...).
- Si la donnée est scannée et géo-référencée c'est de la donnée « raster ».
- Acquisition à partir de photos ; de la photo (scannée) ortho rectifiée à la donnée vecteur, c'est une des principales sources pour une numérisation précise sur de grands territoires. La précision de la donnée est en relation avec la précision de la photo. Ce type d'acquisition nécessite soit des enquêtes terrain soit des croisements avec d'autres données pour qualifier la donnée ; la photo est une simple collection de pixels.
- Acquisition à partir d'image satellite ; l'image satellite constitue la principale source d'information pour l'occupation du sol grâce à la télédétection. La télédétection est l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.
- Acquisition à partir du terrain ; généralement utilisée pour des chantiers de petite taille ou en complément d'autres techniques. Levé G.P.S (Global Positioning System) système de positionnement, à l'échelle du Globe, sur un ensemble de satellites artificiels.

### **8.3. Archivage**

#### *La gestion*

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

### *L'environnement de travail*

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

#### **8.4. Analyse**

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

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

*Analyse spatiale géométrique* : Cette analyse se base sur la position de l'objet, sa forme, et les relations qui existent éventuellement. La distance entre objets est une des fonctionnalités simples de l'analyse spatiale. On peut travailler sur la topologie quand elle existe. On peut manipuler de la donnée en la découpant, la joignant, l'excluant.

#### **8.5. Affichage**

Son but est de permettre à l'utilisateur d'appréhender des phénomènes spatiaux dans la mesure où la représentation graphique respecte les règles de la cartographie. L'affichage sert à communiquer :

- Sur un ordinateur lors de l'élaboration d'une étude
- Sur internet en respectant des contraintes de poids, de couleur, de format,...
- Sur papier pour des documents de travail, des rapports, des documents de promotion (Hammoum et Bouzida, 2010).

**Bibliographie**

BONN F. et ROCHON G. Précis de télédétection Volume 1 : Principes et Méthodes, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 1996.

BONN F. Précis de télédétection Volume 2 : Applications thématiques, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, 1996.

Canada Centre for Remote Sensing/Natural Resources Canada : Notions fondamentales de télédétection. Un cours tutoriel du Centre canadien de télédétection.

CHUVIECO, E. (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. Ediciones Rialp S.A. Madrid. 568 pp.

GUEYE Ismaila (2013). Application de la Télédétection aérospatiale pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles : cas des sols de la région de Kaolack située dans le Bassin arachidier du Sénégal. Mémoire de master professionnel en Application de la Télédétection spatiale pour l'évaluation de la dégradation des ressources naturelles : cas des sols de la région de Kaolack située dans le Bassin arachidier du Sénégal»Université Cheikh Anta DIOP de Dakar, Faculté des Sciences et Techniques.

GIRARD M.C., GIRARD C.M. (1999). Traitement des données de télédétection, Dunod.

GUYOT G. (1989). Signatures spectrales des surfaces naturelles, coll « Télédétection satellitaire », Paradigme.

HAMMOUM H. et BOUZIDA R. (2010). Pratique des systèmes d'information géographiques (S.I.G). Cours et applications. Copyright Eurl Pages Bleues Internationales. 196p.

LILLESANDT M., and KIEFERR W. (1987). Remote Sensing and Image Interpretation, 2nd ed. xiv, 721 pp. New York, ISBN 0 471 845175 (pb).

LILLESANDT M., and KIEFERR W. (1994). Remote Sensing and Image Interpretation, 3rd ed. xvi + 750 pp. New York, ISBN 0 471 30575 8 (pb).

LILLESAND et KIEFER (2000). Remote sensing and Image interpretation Wiley and Sons, 4th edition.

MINVIELLE E. et SOUIAH S. (2003). L'analyse statistique et spatiale : Statistiques, cartographie, télédétection, SIG. Editions du Temps. 255p. ISBN-10: 2842742249

PORNON H. (1990). Système d'information géographique, des concepts aux réalisations, Hermès.

PORNON H. (1992). Les SIG : Mise en œuvre et applications, Hermès.

ROUET P. (1991). Les données dans les systèmes d'information géographique, Hermès.

VERGER F. (1997). Atlas de géographie de l'espace, Belin.

**Liens:**

<https://www.notre-planete.info/terre/outils/sig.php>