



**ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE  
POLYTECHNIQUE DE YAOUNDÉ**

**Département des génies Électrique et des  
Télécommunications**

**Master Recherche en Génie des Télécommunications**

Support de Cours

# **TÉLÉDÉTECTION**

Par

Dr Narcisse TALLA  
[narcisse.talla@univ-dschang.org](mailto:narcisse.talla@univ-dschang.org)

Mai 2019



---

# SOMMAIRE

|   |    |
|---|----|
| SOMMAIRE.....   | i  |
| CHAPITRE 1. FONDAMENTAUX SUR LA TELEDETECTION .....                         | 1  |
| 1.1. Objectifs .....  | 1  |
| 1.2. Définitions .....  | 1  |
| 1.3. Historique .....   | 2  |
| 1.4. Intérêt de la Télédétection.....                                       | 2  |
| 1.5. Domaines d'application de la télédétection.....                        | 4  |
| CHAPITRE 2. LES BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION .....                   | 6  |
| 2.1. Objectifs .....  | 6  |
| 2.2. Le spectre électromagnétique .....                                     | 7  |
| 2.3. Principes de mesure du signal analogique.....                          | 9  |
| 2.3.1. Principes .....  | 9  |
| 2.3.2. passage des données analogiques aux données numériques .....         | 10 |
| 2.3.3. Les effets atmosphériques dans le visible et dans l'infrarouge ..... | 13 |
| CHAPITRE 3. CAPTEURS ET VECTEURS (TYPES, APPLICATIONS ET TECHNIQUES).....   | 15 |
| 3.1. Objectifs spécifiques.....   | 15 |
| 3.2. Quelques définitions.....  | 15 |
| 3.2.1. Capteur et vecteur .....   | 15 |
| 3.2.2. Les ballons.....   | 16 |
| 3.2.3. Les avions .....   | 16 |
| 3.2.4. La navette spatiale.....   | 16 |
| 3.2.5. Les satellites .....   | 17 |
| 3.2.6. Les orbites.....   | 17 |
| 3.2.7. Les capteurs.....  | 19 |
| CHAPITRE 4. LES SIGNATURES SPECTRALES .....                                 | 23 |
| 4.1. Objectifs spécifiques.....   | 23 |
| 4.2. Introduction.....  | 23 |
| 4.3. Objets statiques : minéraux et roches .....                            | 24 |

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 4.3.1.      | Le sol.....   | 24 |
| 4.4.        | Objets dynamiques : la végétation.....  | 25 |
| 4.5.        | Un objet particulier : l'eau.....   | 28 |
| 4.5.1.      | Présentation .....  | 28 |
| 4.5.2.      | Absorption .....  | 28 |
| 4.5.3.      | Réflectance des surfaces :.....   | 28 |
| 4.5.4.      | émissivité des eaux de surface :.....   | 29 |
| 4.6.        | Objets artificiels : l'urbain.....  | 29 |
| 4.6.1.      | Aire représentative.....  | 30 |
| 4.6.2.      | Le vent .....   | 30 |
| 4.6.3.      | Le soleil.....  | 30 |
| 4.6.4.      | L'angle de visée.....   | 30 |
| CHAPITRE 5. | INTERPRÉTATION D'IMAGES.....  | 31 |
| 5.1.        | Présentation.....   | 31 |
| 5.2.        | Correction des données - Aperçu.....  | 31 |
| 5.3.        | Données d'entrée .....  | 32 |
| 5.4.        | Traitement des données .....  | 32 |
| 5.4.1.      | Étape1. Réétalonnage des données du capteur .....                                 | 32 |
| 5.4.2.      | Étape 2. Calcul de la réflectance du SA.....                                      | 33 |
| 5.4.3.      | Étape 3. Correction atmosphérique appliquée aux canaux du capteur AVHRR.....      | 33 |
| 5.4.4.      | Étape 4. Identification des pixels contaminés .....                               | 33 |
| 5.4.5.      | Étape 5. Calcul de la réflectance de la surface pour le canal 3 du capteur AVHRR. | 34 |
| 5.4.6.      | Étape 6. Calcul de la température de la surface.....                              | 34 |
| 5.4.7.      | Étape 7. Correction des effets de réflectance bidirectionnelle.....               | 34 |
| 5.4.8.      | Étape 8. Remplacement des pixels contaminés.....                                  | 34 |
| 5.4.9.      | Étape 9. Lissage du profil saisonnier de l'IVDN.....                              | 35 |
| 5.5.        | Jeu questionnaire d'interprétation d'images .....                                 | 35 |
| 5.5.1.      | Question 1 .....  | 35 |
| 5.5.2.      | Question 2 .....  | 36 |

---

|         |                  |    |
|---------|------------------|----|
| 5.5.3.  | Question 3 ..... | 36 |
| 5.5.4.  | Question 4 ..... | 36 |
| 5.5.5.  | Question 5 ..... | 37 |
| 5.5.6.  | Question 6 ..... | 37 |
| 5.5.7.  | Question 7 ..... | 38 |
| 5.5.8.  | Question 8 ..... | 40 |
| 5.5.9.  | Question 9 ..... | 42 |
| 5.5.10. | Question 10..... | 44 |
| 5.5.11. | Question 11..... | 46 |



---

# CHAPITRE 1. FONDAMENTAUX SUR LA TÉLÉDÉTECTION

## 1.1. Objectifs

Ce chapitre vise à présenter les bases et l'intérêt de la Télédétection. A terme, chaque étudiant devra être en mesure de :

- ☞ Définir les différents concepts relatifs à la télédétection
- ☞ Distinguer la télédétection passive de la télédétection active ;
- ☞ Décrire les principes de la télédétection ;
- ☞ Enumérer au moins quatre domaines d'application de la Télédétection ;
- ☞ Présenter le principe d'acquisition d'une image de télédétection ;
- ☞ Expliquer les différentes techniques d'analyse et de traitement d'images de télédétection ;
- ☞ Réaliser la photo-interprétation d'une image de télédétection.

## 1.2. Définitions

La télédétection est une technique d'**acquisition d'informations à grande distance**. C'est un ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à grande distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

La télédétection est la technique qui, par **l'acquisition d'images, permet d'obtenir de l'information sur la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci**. La télédétection englobe tout le processus qui consiste à capter et à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information, pour ensuite mettre en application cette information.

La télédétection appliquée à l'observation de la Terre est donc l'ensemble des **outils et méthodes de mesure, à partir d'un engin volant, des ondes électromagnétiques provenant d'objets au sol**. Cette définition inclut à la fois la photographie aérienne obtenue à partir de ballons, de drones, d'avions, etc. et la télédétection spatiale utilisant comme vecteur des satellites. Ajoutons que la télédétection englobe également le traitement des données ainsi acquises (images).

Ce qui est mesuré, ce sont des caractéristiques physiques et biologiques des éléments de la surface terrestre. On peut distinguer trois cas de figure :

- ☞ l'objet est suffisamment grand pour être identifié directement ;
- ☞ l'objet est détecté mais de manière indirecte (par exemple une ligne électrique qu'on repère grâce à une trouée dans la forêt) ;

- ☞ l'objet est invisible mais on le détecte par la présence d'un autre objet observable (un bassin sédimentaire signale la présence éventuelle d'un champ pétrolifère, ou bien un type de sol est déduit d'un type de couvert végétal).

Tout ceci ne concerne que des objets physiques, matériels. Les phénomènes humains sont ensuite éventuellement identifiés à partir des objets matériels observés. La télédétection nous renseigne d'abord sur l'occupation du sol.

### 1.3. Historique

L'homme s'est depuis longtemps intéresser à son environnement. L'explosion démographique, les pénuries énergétique et alimentaire ont poussé les gestionnaires des ressources naturelles et agricoles à les localiser et à en faire leur inventaire. Mais les moyens d'investigation traditionnels (enquêtes de terrain, statistiques nationales, analyse de photographies aériennes, ...) ne permettaient plus de répondre aux besoins des gouvernants. Il fallait agir vite et à grande échelle. La technologie spatiale, avec l'avènement des **satellites artificiels**, allait permettre de répondre à ces enjeux. Dès 1960 le premier satellite Tiros 1 est lancé, plus tard en 1972 les USA lançaient *Earth Resources Technology Satellite* (ERTS), rebaptisé plus tard Landsat. Avec une résolution spatiale de 80 mètres il était possible de couvrir, à partir des images numériques obtenues, de grandes surfaces et de répondre en partie aux préoccupations des gouvernants. Les successeurs de Landsat 1 (**1975** : Landsat 2 ; **1978** : Landsat3; Seasat (premier satellite radar civil); NOAA 6 (ex TIROS) avec le *Advanced Very High Resolution* ; **1982** : Landsat4 (avec le capteur Thematic Mapper) ; **1984** : Landsat 5 ; **1999** : Landsat7, Ikonos (1 mètre de résolution) ; **1988** : *Indian Remote Sensing Satellite* (IRS 1) ; puis le lancement du premier satellite Spot en **1986** : SPOT 1 (France) ; **1989**: Météosat-1, premier satellite géostationnaire d'EUMETSAT ; **1990** : SPOT 2 ; **1993** : SPOT 3 ; **1998** : SPOT 4 ; **2002** : SPOT-5, ENVISAT, Aqua-MODIS ; **2000** : Terra-MODIS ; QuickBird (0,70 m de résolution) allaient élargir l'échelle d'observation de notre planète en augmentant la résolution spatiale qui allait passer à 30m, 20m et 10m. De nos jours, les capteurs satellitaires sont capables de fournir des détails de l'ordre du mètre voire moins.

### 1.4. Intérêt de la Télédétection

Avant l'utilisation de l'imagerie satellitaire, les techniciens et les scientifiques avaient recours à la photographie aérienne, aux cartes thématiques existantes et aux enquêtes de terrain. Ces trois approches étaient complémentaires. L'analyse des photographies aériennes était basée sur une photo-interprétation longue, fastidieuse et onéreuse. L'absence de corrections géographiques systématiques ne permettait pas de travailler sur des documents précis. Les cartes thématiques, longues à mettre en œuvre et à diffuser, n'étaient pas nombreuses et ne répondaient pas toujours aux attentes des utilisateurs. Enfin, les enquêtes de terrain devaient être précises et exhaustives.



---

Elles représentaient un travail de longue haleine, difficile et coûteux. Le traitement des données de terrain s'ajoutait à leur longue acquisition, si bien que les résultats étaient diffusés tardivement. La **téledétection satellitaire** permet à la fois de **réduire le temps** et **le coût** et d'**améliorer la précision**. L'acquisition des données est rapide. Les systèmes d'observation de la terre sont opérationnels en permanence et peuvent acquérir des données sur une large surface dans un laps de temps. Leur coût est moins élevé qu'en photographie aérienne. De plus, la diversité spectrale des données fournit davantage d'informations sur les objets observés. Le traitement des données numériques est devenu plus rapide, plus complet et plus facile avec le développement de nombreux algorithmes performants. Enfin, le travail de terrain a été grandement simplifié. Le risque d'erreur est réduit et la mission de terrain ne nécessite plus le quadrillage exhaustif des zones d'étude.

La technologie actuelle propose une large gamme de produits de qualité. La résolution spatiale (taille du pixel) est de l'ordre de 0.50 m avec les systèmes spectro-imageurs, de 1 à 2m avec les satellites à très haute résolution (ex. Ikonos), de 2.5m, 5m, 10m, 20m et 30 m avec les satellites à haute résolution (ex. Spot, Landsat TM) ou encore 1000m avec les capteurs à basse résolution (instrument "végétation" de Spot). Le choix des capteurs est guidé par la problématique de l'utilisateur. Celui-ci pourra travailler au niveau de la parcelle, au niveau du paysage ou au niveau régional. Suivant l'échelle adoptée la taille du plus petit objet observable sera celle du pixel.

D'une manière générale, l'imagerie satellitaire permet de :

☞ **Cartographier** une zone géographique à partir de l'identification, de la localisation et de la mesure des objets. Ces cartes peuvent constituer des couches d'informations utilisées dans les SIG. On peut identifier des cultures, des forêts, des zones urbaines, des réseaux routiers ou hydrographiques, des structures géologiques, la composition des eaux marines ou lacustres, des bâtiments, des véhicules, etc. Toutes ces informations largement utilisées par les scientifiques, les urbanistes, les archéologues, les collectivités locales et nationales et constituent de précieuses bases d'informations pour les prises de décision.

☞ Dresser l'état d'**occupation du sol** : l'inventaire des zones cultivées ou naturelles, la diversité des surfaces urbaines, la présence de lacs ou de rivières, d'étendues minérales, etc. sont extraits des images satellitaires à partir de techniques de classification des pixels. Les pixels, dont les radiométries présentent un lien de parenté seront groupés dans une même classe thématique et représentée sur une carte par une couleur spécifique.

☞ Décrire l'**utilisation du sol** en grands ensembles structuraux. C'est une variante de l'occupation du sol. On peut ainsi mettre en évidence le parcellaire agricole, les zones d'habitation, les régions naturelles, les aires industrielles, commerciales, marines, les zones à risques (inondation, pollution, incendie, ...). Suivant l'échelle adoptée ces grands ensembles peuvent être subdivisés en sous-ensembles plus détaillés.

☞ D'étudier l'**évolution de l'occupation du sol** à partir d'analyses multitemporelles, c'est à dire l'étude comparative d'une même image acquise à deux dates différentes. On réalise deux classifications et on compare, pixel à pixel, toute modification surfacique ou toute apparition de nouveaux objets. Ces études sont particulièrement intéressantes pour mettre en évidence la fragmentation forestière (ou le reboisement), les conséquences d'une catastrophe naturelle ou artificielle (incendie, inondation, séisme, pollution, vent de sable, fumées toxiques, éruption volcanique, sécheresse, attaque parasitaire, ...), l'extension des zones urbaines, l'expansion des friches, etc.

☞ **Rectifier** ou de **mettre à jour des cartes** en leur superposant des images satellitaires définies dans le même système de projection et à la même échelle. Les données satellitaires permettront, par exemple, de rectifier le tracé d'une route ou d'une rivière, un lotissement, un barrage, un aéroport, un complexe sportif, etc.

☞ **modéliser un paysage en trois dimensions**. Pour cela il est nécessaire de disposer d'un MNT (Modèle Numérique de Terrain) et d'une scène satellitaire. Un MNT est une image raster où chaque pixel est défini géographiquement par trois coordonnées : la latitude, la longitude, l'altitude.

La plupart des logiciels d'analyse d'images disposent d'un algorithme de représentation en trois dimensions de sorte que l'on peut édifier un squelette topographique. L'image satellitaire (ou l'image classifiée) est ensuite posée comme une nappe sur ce relief.

Les données issues d'un MNT permettent de calculer des paramètres topographiques pouvant être représentés sur l'image, notamment les courbes de niveau, les plages d'altitudes, les pentes, et l'ensoleillement. La modélisation en trois dimensions intéresse les forestiers (ex. gestion des coupes), le génie civil (ex. construction de routes, de barrages), les géologues (ex. analyse structurelle, tectonique), les agriculteurs (ex. implantation de cultures), les télécommunications (ex. implantation de réseaux d'antennes), etc.

## 1.5. Domaines d'application de la télédétection

La télédétection est à la confluence de plusieurs disciplines et thématiques. Elle intervient ainsi dans :

☞ **L'Inventaire et gestion des ressources naturelles** : cartographie de l'occupation du sol, des types de végétation ou des états de surface des sols, ...

☞ **La surveillance des changements à court et moyen terme** : repérage des zones incendiées, inondations, déforestation, sécheresses, désertisation, changements d'occupation du sol, ...

☞ **L'aménagement du territoire** : gestion du cadastre, de la circulation routière, des services d'intervention et de secours ; aide à la décision avec notamment des mesures de

protection, des allocations de ressources humaines ou financières, des décisions d'intervention ; aide à la prévision avec notamment des systèmes de simulation.

Les domaines d'application de la télédétection sont récapitulés dans le tableau suivant :

| Domaines                         | Applications   |
|----------------------------------|--|
| Géosciences                      | Aide à la cartographie en géologie, géomorphologie                                 |
| Milieu marin et littoral         | Couleur et qualité de l'eau, circulation océanique, végétation marine              |
| Atmosphère et climat             | Météorologie, bilans énergétiques et hydriques                                     |
| Hydrologie                       | Comportements de l'eau à la surface du sol et dans le sol, cycles de l'eau         |
| Glaciologie                      | Suivi des glaciers   |
| Biosphère                        | Cartographie de la végétation et des sols  |
| Espaces aménagés                 | Statistiques agricoles, inventaire forestier, déforestation, croissance des villes |
| Archéologie                      | Cartographie de sites archéologiques   |
| Humanitaire                      | Pré-alerte de famines (sécheresse persistante); réfugiés (camps)                   |
| Santé                            | Aide à la prévision des épidémies, en relation avec climat et atmosphère           |
| Catastrophes environnementales   | Feux de forêts, inondations, sécheresses, marées noires, tsunamis, etc.            |
| Changements à l'échelle du globe | Désertisation, variations climatiques, composition de l'atmosphère                 |

## CHAPITRE 2. LES BASES PHYSIQUES DE LA TÉLÉDÉTECTION

### 2.1. Objectifs

Ce chapitre aborde notamment les notions de rayonnement électromagnétique, de réflectance, des signatures spectrales tout en précisant le rôle de l'atmosphère dans le processus du rayonnement électromagnétique (REM). A la fin de ce chapitre, chaque étudiant devra être en mesure entre autres de :

- ☞ Définir le rayonnement électromagnétique ;
- ☞ Connaître les caractéristiques des REM ainsi que le domaine du REM utilisé en télédétection optique ;
- ☞ Décrire les principes d'acquisition, de mesure et de transformation du signal analogique ;
- ☞ Maîtriser les notions de réflectance, d'albédo, d'absorptance, d'émitance, de diffusion, de réflexion et de transmittance.

Un rayonnement est une énergie transportée dans l'espace sous forme d'ondes (et de particules). On parle de Rayonnement Électromagnétique (REM) lorsque le rayonnement se comporte comme un champ de force dont les variations affectent les propriétés électriques et magnétiques de la matière. La lumière est la partie visible du REM, celle que l'homme capte avec ses yeux. L'énergie sonore, lumineuse, thermique, etc. se propage sous forme d'ondes. Certaines nécessitent l'existence d'un support de matière : l'air pour le son, les roches et minéraux pour les ondes telluriques, etc.

Les ondes lumineuses peuvent se propager dans le vide. Une onde électromagnétique, comme son nom l'indique, a deux composantes indissociables : un champ électrique, un champ magnétique. Ces deux composantes sont orthogonales et forment le plan électromagnétique. Une troisième composante, le sens de propagation de l'onde, est perpendiculaire à ce plan. Le REM se caractérise par :

- ☞ La **période** qui est le temps  $T$  pendant lequel l'onde effectue une oscillation complète ;
- ☞ La **fréquence**  $\nu$  qui est l'inverse de la période ( $1/T$ ). Elle traduit le nombre de cycles par seconde passant par un point fixe ; elle s'exprime en hertz (Hz).
- ☞ La **longueur d'onde**  $\lambda$  qui est la distance entre deux points homologues sur l'onde. Elle traduit la distance parcourue par l'onde pendant une période. Notons que plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est petite.
- ☞ La **vitesse**  $c$  de propagation de l'onde dans l'espace ou dans le vide, et, à peu de chose près, dans l'air, cette vitesse est :  $c = 300000 \text{ km/s}$ .

- ☞ La **polarisation**, qui caractérise la variation du plan dans lequel oscille l'onde. Si cette variation est aléatoire, l'onde est dite non polarisée. Si ce plan reste fixe, la polarisation est dite rectiligne.
- ☞ L'**amplitude**  $E_0$  qui exprime l'intensité de l'onde électromagnétique ; plus l'amplitude est importante, plus le rayonnement est intense. L'énergie transmise par une onde est également proportionnelle à la fréquence. La répartition des fréquences, et donc des longueurs d'ondes, définit le **spectre électromagnétique**. Une onde est définie par cinq paramètres :
- ☞ la **période**  $T$  : c'est le temps pendant lequel l'onde accomplit une oscillation complète.
- ☞ La **fréquence** est le nombre d'oscillations par seconde.
- ☞ La **longueur d'onde**  $\lambda$  est la distance parcourue par une oscillation complète, à la vitesse  $v$  ;
- ☞ La **vitesse**  $v$  est la distance parcourue par unité de temps.
- ☞ L'**amplitude** est l'écart vertical mesuré entre deux points. L'amplitude maximale est l'écart entre le minimum et le maximum de l'oscillation.

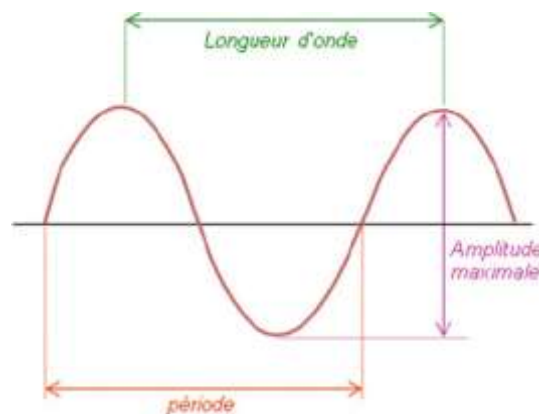


Figure 1. Illustration d'une onde.

## 2.2. Le spectre électromagnétique

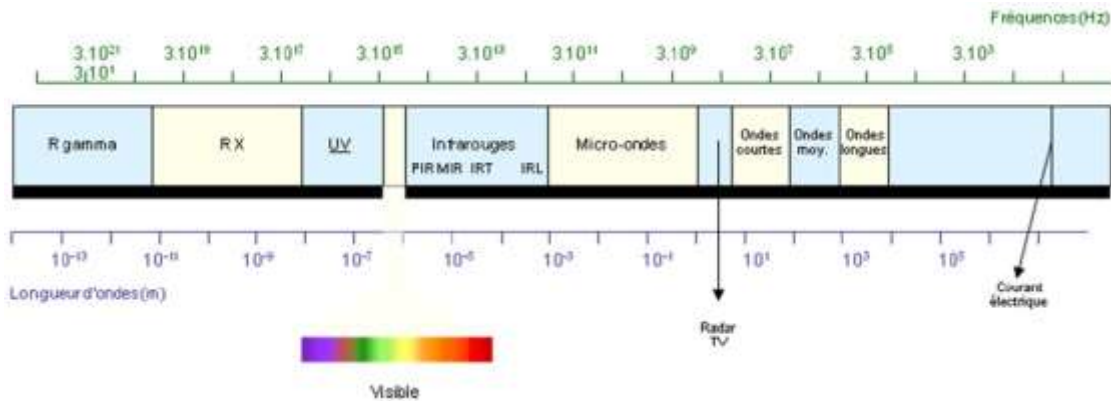
Le spectre électromagnétique est continu et invisible à l'œil humain, excepté entre 0.4 et 0.7 micromètres. Une partie du REM est dangereuse pour l'homme, notamment les rayons Gamma, X, UV, IR Thermique et les micro-ondes.

En télédétection optique on utilise la partie du spectre comprise entre le bleu et l'infrarouge thermique (inclus).

En télédétection active, les longueurs d'onde utilisées sont comprises entre 1 cm et 10 m

La télédétection utilise les propriétés du REM pour identifier les objets. Ceux-ci reçoivent un rayonnement incident naturel (le soleil) ou artificiel (ondes radar). Une partie de ce rayonnement sera absorbée ou transmise par l'objet, une autre partie sera réfléchi et/ou émise. L'énergie réfléchi et/ou émise est captée par un système radiosensible qui générera un signal analogique

(faible courant électrique). Ce signal analogique sera ensuite transformé en valeur numérique enregistrable sur un support mémoire.



**Figure 2.** Spectre électromagnétique.

Le spectre n'est pas utilisé dans sa totalité. La réponse spectrale des objets est mesurée dans des intervalles de longueur d'ondes caractéristiques appelées **bandes spectrales**. Ces bandes ne sont pas choisies au hasard. Elles correspondent à des signatures spectrales spécifiques de certains objets (eau, minéraux, végétaux, etc.).

Le rôle de l'utilisateur est d'analyser les données numériques de manière à établir une relation entre la nature du rayonnement capté et celle de l'objet. Entre le signal énergétique envoyé par l'objet et le calcul de sa valeur numérique, des **opérations correctives** doivent être effectuées. Nous verrons que l'**atmosphère** joue un rôle important dans la transmission des ondes électromagnétiques, notamment à travers les phénomènes de diffraction, de réfraction, de diffusion et de polarisation. La chaîne d'**acquisition électronique** (cellules radiosensibles, amplificateurs, convertisseur analogique, mémorisation, etc.) nécessite aussi des opérations de rectification. Le déplacement du vecteur, la topographie du terrain, la courbure de la Terre sont encore des **facteurs physiques** introduisant des biais dans les données. Seule une cohérence géométrique et radiométrique des données permettra d'établir des liens réalistes entre les données et la nature des objets.

Plus spécifiquement, les bandes spectrales les plus utilisées sont les suivantes :

- ☞ l'**ultraviolet** de 0,29 à 0,38  $\mu\text{m}$  (peu utilisé, car très perturbé par la traversée de l'atmosphère ; notons que l'ozone absorbe les longueurs d'onde  $< 0,29 \mu\text{m}$ ) ;

- ☞ le **visible** de 0,4 à 0,7  $\mu\text{m}$  : le domaine utilisé par les capteurs photographiques classiques (panchromatique et couleur), et largement utilisé en télédétection spatiale, avec des détecteurs permettant de décomposer le domaine en bandes spectrales (canaux) plus fines que les zones de sensibilité des films photographiques ; on utilise notamment la bande rouge (0,62 et 0,70  $\mu\text{m}$ ), qui permet de caractériser les couverts végétaux (car dans cette partie du spectre, il y a absorption du rayonnement solaire par les pigments chlorophylliens des feuilles) ;

↻ le **proche infrarouge** de 0,8 à 1,1  $\mu\text{m}$  : Dans cette bande proche du visible, l'emploi des capteurs photographiques reste possible dans ce domaine (film infrarouge et infrarouge couleur), qui est aussi l'un des plus utilisés en télédétection spatiale, car il permet, en combinaison avec la bande rouge, d'améliorer la détection de la végétation en exploitant notamment les indices de végétation ;

↻ l'**infrarouge de courtes longueurs d'onde** (*shortwave infrared*) ou infrarouge moyen réfléchissant de 1,1 à 2,5  $\mu\text{m}$  : ce domaine permet de caractériser l'humidité de la végétation ou de la surface du sol. Notons cependant que la télédétection n'opère pas directement dans les bandes d'absorption de l'eau, en raison de la présence d'eau dans l'atmosphère, notamment à travers les «fenêtres atmosphériques» ; notons que ce domaine est quelquefois qualifié (à tort ?) d'«infrarouge moyen», à l'exemple du capteur HRVIR de SPOT en bande «MIR» ;

↻ l'**infrarouge médian** de 3,4 à 5,2  $\mu\text{m}$  pour les domaines à la fois réfléchissants et émissifs ;

↻ l'**infrarouge thermique** de 7,5 à 14  $\mu\text{m}$  pour des domaines émissifs. Il est très utilisé en télédétection, notamment entre 10 et 14  $\mu\text{m}$ . C'est dans ce domaine que se produit le rayonnement thermique de la surface terrestre ;

↻ les **hyperfréquences** (ou **micro-ondes**) de 1 mm à 1 m : c'est le domaine utilisé notamment par des capteurs actifs (radars), mais aussi par des capteurs passifs ; c'est un domaine intéressant par la capacité à faire des mesures quel que soit l'état de l'atmosphère, même en présence de couvert nuageux ou de pluie.

## 2.3. Principes de mesure du signal analogique

### 2.3.1. Principes

L'interaction entre une lumière monochromatique et une plaque de métal génère une perte d'électrons (**effet photoélectrique**). Il s'en suit la création d'une différence de potentiel électrique en rapport avec la quantité d'énergie émise par l'objet. Ce faible courant est amplifié et transformé en signal numérique.

Au niveau de chaque détecteur, les photons émis par la cible au sol viennent frapper le détecteur métallique. Le **nombre d'électrons éjectés est proportionnel au nombre de photons**. Ces électrons, éliminés durant un laps de temps caractéristique, produisent un signal électronique correspondant à une mesure analogique de **tension**.

Pour le capteur **MSS de Landsat**, l'intervalle de détection est de 9 ms durant lequel le miroir à balayage capte le signal au sol d'un pixel de 75 m x 58 m.

Le satellite **Spot** présente, pour chaque bande spectrale, un capteur à barrette de 3 000 cellules photoélectriques. Chaque cellule enregistre simultanément le signal radiométrique d'un pixel de 20 m de côté, soit une trace au sol de 20 m x 3 000 = 60 000 m (vitesse au sol = 6 600 m par seconde). Les 20 m sont donc parcourus en 3 millisecondes environ. Pour 4 bandes spectrales, on



peut dénombrer  $3000 \times 4 = 12\ 000$  cellules. Spot 4 enregistre donc simultanément 12 000 informations pour 20 m de déplacement linéaire au sol. A ces bandes il faut rajouter l'instrument panchromatique qui capte 6 000 informations pour 10 m de déplacement linéaire au sol.

Le traitement des données satellitaires est réalisé sur des données numériques obtenues à partir des données analogiques. La plupart des ordinateurs sont capables de traiter des données codées sur 8 bits (**1 octet**). Un détecteur présentera 2 états : **activé** (présence d'un signal) ou **désactivé** (pas de signal). Ces deux états seront exprimés numériquement par une valeur de bit (1 ou 0). Le nombre d'arrangements de 0 et de 1 sur 8 bits sera égal à  $2^8 = 256$ . Ces valeurs sont appelées **Comptes Numériques** (CN). Les CN varient dans l'intervalle 0-255 (La valeur 0 correspondra à l'octet 00000000 et la valeur 255 à 11111111). Ces 256 valeurs seront exprimées à l'écran en 256 niveaux de gris (0 = noir, 255 = blanc). Plus la valeur décimale est faible, plus le gris est foncé et inversement, plus cette valeur est grande, plus le gris est clair.

### 2.3.2. passage des données analogiques aux données numériques

Par exemple : soit le **voltage minimum** : **0 V** (pas de signal détecté). Le **CN** correspondant sera mis à **zéro**. Soit le **voltage maximum** : **3 V** (valeur arbitraire correspondant au signal maximum détecté. Dans la réalité le voltage peut être plus élevé). On attribuera au **CN** la valeur **255**. Toutes les tensions intermédiaires seront interpolées et discrétisées.

L'émission de REM peut provenir de divers mécanismes naturels ou artificiels. On distingue principalement :

- ☞ L'émission entretenue par des charges électriques (antennes) ;
- ☞ Le rayonnement électronique des atomes, lorsque les électrons passent à niveau d'énergie inférieur ;
- ☞ Le rayonnement des molécules. En effet, tout objet dont la température est supérieure à  $0^\circ$  Kelvin (soit  $-273^\circ\text{C}$ ) émet un rayonnement électromagnétique issu de l'agitation des molécules, appelé communément émission thermique. Ceci est la principale source naturelle de REM.

Pour modéliser ce dernier type de rayonnement, on utilise la notion de **corps noir**: «*corps théorique qui absorbe la totalité du rayonnement qu'il reçoit (il ne réfléchit et ne transmet aucun rayonnement) : son émission dépend uniquement de sa température*».

Un **corps gris**, à la différence d'un corps noir n'absorbe pas toute l'énergie reçue : il en transmet et/ou réfléchit une partie. C'est le cas des objets observés dans la nature ; on définit alors le paramètre **émissivité**  $\epsilon$ , qui caractérise la déviation par rapport au corps noir, et qui dépend de la longueur d'onde  $\lambda$  et de la direction de visée (angle zénithal  $\theta$  et angle azimutal  $\Phi$ ). Le tableau ci-dessous donne des valeurs moyennes d'émissivités de différents types de surfaces.



| Type de surface                  | émissivité                    |
|----------------------------------|-------------------------------|
| Glace                            | 0,92- 0,97                    |
| eau                              | 0,99                          |
| Sol nu (sable sec, sable humide) | 0,94 (0,84- 0,90, 0,91- 0,94) |
| Prairie                          | 0,98                          |
| Blé                              | 0,97                          |
| Mais                             | 0,96                          |
| Feuillis                         | 0,97                          |

**Figure 3.** Exemple de valeurs moyennes d'émissivité

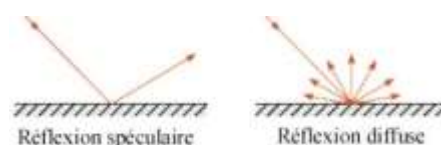
On notera que les émissivités sont généralement comprises entre 0,9 et 1, et que l'émissivité d'une surface est étroitement liée à son degré d'humidité, puisque l'émissivité de l'eau (ou de la neige) est très élevée (0,99). En pratique, on ne connaît généralement pas l'émissivité des surfaces mesurées par télédétection ; on définit alors la **température de brillance TB** (ou température radiative apparente), comme la température d'un corps noir délivrant la même luminance que celle de la surface mesurée. Pour passer de la température de brillance à la température radiométrique, il faut corriger les effets atmosphériques.

La **réflectance R** mesure la capacité d'une surface à réfléchir l'énergie incidente. Elle correspond au rapport de l'énergie réfléchie à l'énergie incidente. Elle est aussi appelée **coefficient de réflexion**. La réflectance dépend :

- ☞ de la direction du soleil par rapport à la surface observée ;
- ☞ de la direction du capteur par rapport à la surface observée ;
- ☞ de la longueur d'onde d'acquisition ;
- ☞ De la nature de la cible.

Comme la réflectance dépend de deux directions, on parle de **réflectance bi-directionnelle**. La réflectance est appelée **albédo** lorsque la source incidente est le soleil et lorsque la cible est terrestre. La **réflectance** et la **réflexion** sont liées. On distingue globalement deux types de réflexions :

- ☞ La **réflexion spéculaire** observée sur des **surfaces lisses**, notamment l'eau, le miroir, le verre, le métal et le bitume : A un rayon incident correspond un rayon réfléchi.
- ☞ La **réflexion diffuse** observée sur des **surfaces rugueuses**. C'est le cas le plus fréquent. A un rayon incident correspondent plusieurs rayons réfléchis. Si les rayons sont réfléchis avec la même énergie dans toutes les directions de l'hémisphère on a une surface lambertienne, à l'exemple d'une feuille de papier.



**Figure 4.** Illustration des réflexions

La **Réflectance (R)** est aussi associée aux propriétés de transmission et d'absorption des objets. Une partie de l'énergie incidente peut être transmise, c'est à dire "traverser" l'objet sans être altérée. On parle de Transmittance (**T**). Un objet transparent aura un coefficient de transmission élevé.

Une fraction de l'énergie incidente peut être absorbée par l'objet. On parlera d'**Absorptance (A)**. L'énergie absorbée modifiera l'état énergétique de la matière. Cette énergie peut être réémise en tout ou partie sous une autre forme d'énergie (par exemple de l'infra rouge thermique).

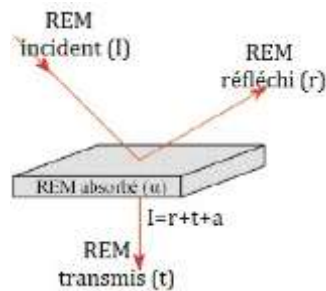


Figure 5. Réflexion de REM

L'énergie incidente ne sera donc pas totalement réfléchi. L'énergie mesurée par le capteur sera une combinaison de **réflectance** et d'**émittance**.

D'autres phénomènes physiques sont susceptibles de modifier la réflectance d'un objet. Citons, en particulier : l'**interférence**, la **diffraction**, la **diffusion**, la **polarisation**. Ces phénomènes sont plutôt à prendre en compte dans les systèmes dits actifs (systèmes radars ou balayeurs lasers).

Toutefois le phénomène de **diffusion** concerne aussi les systèmes passifs (radiomètres classiques). La diffusion est liée à la présence de particules dans l'atmosphère (aérosols, gaz, molécules, ...) qui ont la propriété de rétrodiffuser l'énergie incidente dans toutes les directions. La diffusion atmosphérique atténue les contrastes (ombres) et donne une teinte bleutée au ciel, alors qu'en l'absence d'atmosphère il nous apparaîtrait noir (ciel lunaire). C'est la raison pour laquelle il est important de corriger les données satellitaires des effets atmosphériques.

La **diffraction** est un phénomène de déviation des rayons lumineux frôlant l'arête d'une structure. Le schéma ci-contre reproduit une expérience connue : un faisceau lumineux passe à travers une fente longitudinale percée dans une plaque. L'image projetée de la fente est plus grande que celle attendue. L'effet de diffraction de la lumière a dévié les rayons lumineux. De part et d'autre de la partie la plus lumineuse de l'image apparaissent des raies verticales sombres et claires. C'est un phénomène d'interférence qui se surajoute au phénomène précédent.

La **polarisation** modifie aussi les propriétés de l'onde réfléchi. Considérons une onde électromagnétique traversant un milieu de densité variable. Elle subira le phénomène de réfraction. Dans un milieu homogène le REM peut être réfracté dans deux directions bien distinctes. Les deux rayonnements ont alors des propriétés physiques différentes. Par exemple, lorsqu'un faisceau de lumière traverse un cristal de spath d'Islande (carbonate de chaux

---

crystallisé), l'un des rayons réfractés est dit **polarisé**. Une onde polarisée présentera une répartition privilégiée de l'orientation des vibrations. Le phénomène de polarisation intervient dans le domaine du radar et dans une moindre mesure dans celui des capteurs optiques. Le signal rétrodiffusé des capteurs actifs apporte une information sur la nature des objets. Dans le domaine des capteurs passifs, le REM solaire traversant les couches atmosphériques sera en partie polarisé.

### 2.3.3. Les effets atmosphériques dans le visible et dans l'infrarouge

L'atmosphère agit comme un filtre variable. C'est son épaisseur, sa composition en particules, en molécules, en gaz et en aérosols qui déterminent l'intensité d'**absorption** du rayonnement solaire. Ces mêmes facteurs modifient, de manière différentielle, la nature du spectre électromagnétique arrivant au sol ainsi que celui atteignant le capteur satellitaire. Certaines bandes spectrales du soleil sont entièrement absorbées par l'atmosphère dans le domaine de l'infrarouge thermique et des hyperfréquences.

Les molécules, particules gaz et aérosols ont aussi la propriété de **diffusion** du rayonnement électromagnétique (REM). Il existe une spécificité relationnelle entre ces éléments et la longueur d'onde du REM. Lorsque le diamètre des éléments est inférieur à la longueur d'onde, la diffusion est due à l'interaction entre les photons et ces éléments (diffusion de Rayleigh). Concrètement, ce phénomène est observable à l'œil nu. La couleur du ciel change en fonction de la hauteur du soleil. A l'aube et au crépuscule le ciel prend une teinte jaune à rouge (forte épaisseur de la couche atmosphérique). Il vire au bleu-bleu clair lorsque le soleil est au zénith (faible épaisseur de la couche atmosphérique).

Localement on peut enregistrer des variations de la couleur du ciel en fonction de la teneur en particules. C'est ainsi que l'atmosphère des zones urbaines (rejets domestiques et industriels) peut renforcer l'effet de diffusion particulaire. Ce type de diffusion (diffusion de Mie) concerne des particules plus grosses en suspension dans l'atmosphère. Ce phénomène affecte l'ensemble des bandes spectrales et contribue à une réduction du rayonnement global. Cependant, suivant la nature des grosses particules on peut observer des dominantes de teintes. Un vent de sable entraînera de fines poussières d'argiles ou de sables en altitude. Le ciel pourra, localement, prendre une teinte jaunâtre, verdâtre ou même violacée. Ceci traduit l'extinction, dans le visible, des grandes longueurs d'ondes.

Outre le soleil qui constitue la source de REM essentielle, le **rayonnement atmosphérique** participe à l'éclairement des objets et influence le signal mesuré par les capteurs satellitaires.

L'atmosphère se comporte comme un corps complexe absorbant de l'énergie radiative et la restituant sous différentes formes et dans des directions variées. On constate donc que cette énergie s'ajoute à celle réfléchie ou émise par la cible. La contribution de l'atmosphère à l'éclairement de la cible et du capteur peut être évaluée et corrigée à partir de modèles

mathématiques (certains de leurs paramètres sont mesurés par radiosondages). Globalement, l'atmosphère générera une diminution du contraste entre les objets. **Effet sur l'infrarouge thermique**

Il existe un domaine particulier du REM dans lequel il est nécessaire de réaliser des corrections atmosphériques : c'est celui de l'infrarouge thermique qui s'étale de 6 mm à moins d'un centimètre. Les capteurs infrarouges ne balayent pas la totalité de ce domaine de fréquences. Leur rôle est de déterminer des températures de surfaces. On sait que tout corps dont la température est supérieure au zéro absolu est susceptible d'émettre un rayonnement que l'on mesure par une grandeur appelée **émissivité**.

Pratiquement cette grandeur varie entre 0.8 et 1 et dépend de la nature des objets, de la longueur d'onde de référence et de l'inclinaison du soleil. L'atmosphère est composée d'éléments émettant des rayonnements dans les grandes longueurs d'ondes (infrarouge thermique). Ces rayonnements sont à la fois dirigés vers le sol et vers le capteur satellitaire. L'énergie reçue au sol (flux descendant) est restituée par les objets dans d'autres directions, en particulier vers les capteurs (flux ascendant) et renforcé par le rayonnement direct de l'atmosphère. Le bilan peut se résumer dans le schéma ci-contre. Le capteur reçoit un signal issu du flux ascendant (1), du flux descendant (2) dont une partie est renvoyée par le sol et de l'émission propre des objets (3). Le signal reçu peut être exprimé par la luminance totale **LT**.

$$LT = LA + LD + LS$$

**LA** = luminance atmosphérique ascendante

**LD** = luminance atmosphérique descendante

**LS** = luminance liée à la contribution propre du sol.

Donc, pour estimer la température de surface il est indispensable de quantifier les luminances atmosphériques et de connaître l'émissivité d'une surface. Cette dernière est approximée à partir de tables de références que l'on trouve dans des ouvrages spécialisés. Pour évaluer les luminances atmosphériques on utilise des méthodes de radiosondages dans l'espace.

Différents satellites sont équipés de capteur infrarouge thermique. Les mesures effectuées par ces capteurs sont sensibles à plusieurs paramètres. Il est important de réaliser les mesures à des heures fixes afin de pouvoir comparer les scènes. Or les satellites subissent des dérives d'orbite pouvant dépasser plus d'une heure. Il est alors nécessaire d'effectuer des corrections de mesures à partir de modèles d'extrapolation. D'autre part, les capteurs présentent des limites de sensibilité. Au-delà d'un seuil d'énergie radiative ils ne sont plus capables d'enregistrer la valeur du signal. Cet effet est particulièrement remarqué dans les régions où la température de surface est élevée. Enfin, des effets parasites liés à un flux oblique du rayonnement sont susceptibles de fausser la mesure de température. Les vents constituent un facteur non négligeable dans le biais de la mesure puisqu'il a pour effet de déplacer des masses d'air chaud (latéralement et en altitude). On réalise des corrections atmosphériques à partir de modèles paramétrés.

---

## CHAPITRE 3. CAPTEURS ET VECTEURS (TYPES, APPLICATIONS ET TECHNIQUES).

### 3.1. Objectifs spécifiques

Ce chapitre, après une des notions de vecteurs et de capteurs, il présente les types de capteurs et de vecteurs, les applications thématiques et les techniques utilisées. A la fin de ce chapitre, chaque étudiant devra être capable de :

- ☞ Définir un capteur et un vecteur ;
- ☞ Connaître les types de capteurs et de vecteurs ainsi que leurs caractéristiques.

### 3.2. Quelques définitions

#### 3.2.1. Capteur et vecteur

Nous définirons un **vecteur** comme étant le véhicule ou la plate-forme supportant un capteur. Un **capteur** sera un système radiosensible capable d'enregistrer un rayonnement électromagnétique. Le signal analogique sera converti en énergie électrique, chimique, ou sous une autre forme, puis transformé en donnée visuelle et/ou numérique de manière à être analysé.

Il existe de **nombreux véhicules mobiles ou fixes** susceptibles d'être équipés de capteurs : ballons, hélicoptères, avions, navettes spatiales ou satellites. L'altitude des capteurs varie de 1 mètre, pour les radiomètres portatifs ou embarqués sur tracteur, à 36000 kilomètres pour les satellites géostationnaires. L'altitude et le type de capteurs déterminent la résolution spatiale du système (de quelques millimètres à 7 kilomètres).

Les vecteurs aérospatiaux les plus anciens sont les **ballons** et dirigeables à bord desquels les premières photographies aériennes ont été obtenues. Le ballon a été remplacé dès l'apparition des **avions**. Les photographies étaient alors obtenues à partir d'appareils photographiques manuels. La précision de la visée n'était pas exemplaire. L'avion a longtemps été utilisé pour réaliser des clichés civils et militaires. L'automatisation des prises de vue a été développée au cours des deux grands conflits mondiaux du XXème siècle pour le renseignement militaire. Avec les progrès de l'électronique, la miniaturisation des composants et le développement des télécommunications, la mise en orbite des premiers **satellites** a permis de faire un bond technologique prodigieux. La résolution spatiale des premiers documents obtenus n'était pas très fine mais cette nouvelle technologie permettait d'observer la Terre de manière plus systématique et à un prix de revient moins élevé.

### 3.2.2. Les ballons

Ils ne sont plus guère utilisés qu'en météorologie. Ils sont constitués d'une enveloppe fine, légère et résistante. Le corps du ballon est gonflé de gaz (hélium ou hydrogène) plus léger que l'air de manière à assurer sa propulsion verticale. Il existe des ballons captifs reliés au sol par un long câble de manière à contrôler la trajectoire et à récupérer le matériel. Ces engins ne montent guère au delà de 2 500 mètres d'altitude. On utilise également des ballons libres, plus volumineux, pouvant emporter des charges de plus de 5 tonnes et s'élever à une altitude de 50 km.

L'inconvénient majeur est la dérive du ballon, sensible aux courants ascendants et aux vents de travers. Le ballon peut également tourner sur lui-même et rendre ainsi plus difficile la visée de la cible.

### 3.2.3. Les avions

Ils sont encore largement utilisés pour réaliser des photographies aériennes. De nos jours, ils peuvent être équipés de capteurs spécifiques pour l'acquisition de données hyperspectrales. L'avion est d'un emploi très souple puisqu'il peut décoller "à la demande". Toutefois, son utilisation est limitée lorsque les conditions météorologiques sont défavorables. Ce vecteur peut transporter de très lourdes charges en homme et en matériel adaptées au type de mission à des altitudes variables selon le modèle d'avion. Les porteurs les plus lourds ne dépassent pas 20 km d'altitude. Cependant le prix de revient est prohibitif. Ce vecteur nécessite une infrastructure et un coût de fonctionnement élevés (frais de stationnement, d'entretien, de carburant, défraiement de l'équipage, des techniciens, et des mécaniciens, chargement /déchargement du matériel scientifique, prise en compte de la logistique (hôtellerie, restauration, frais d'immobilisation). D'autre part l'acquisition des données porte sur des zones restreintes. La couverture exhaustive d'une région engendre des coûts très élevés et des traitements de données lourds et onéreux.

### 3.2.4. La navette spatiale

Il s'agit d'un véhicule spatial mis en orbite par un lanceur puissant et capable de retourner au sol par ses propres moyens. La durée des missions n'excède pas une semaine. Ce véhicule est capable d'emporter une charge utile très lourde. Ce vecteur n'a pas été conçu pour des missions d'observation de la Terre mais pour réaliser des expérimentations en apesanteur et mettre sur orbite des satellites. Toutefois la navette spatiale, dans le cadre du projet SpaceLab a effectué des missions radar et photographiques qui ont permis d'affiner les techniques de

---

téledétection. La navette peut évoluer sur des orbites variant de 200 à 400 km d'altitude. La fauchée au sol est comprise entre 160 et 600 km. Mais il est certain que la courte durée de mission, le coût d'élaboration et de fonctionnement ne sont pas appropriés aux moyens et aux exigences des utilisateurs de la téledétection.

### 3.2.5. Les satellites

Ce sont des véhicules mis sur orbite terrestre par des lanceurs et télécommandés depuis des stations au sol. Les télémessures et l'acquisition des données s'effectuent au moyen d'antennes paraboliques. Les satellites représentent une charge de quelques centaines de kilos à 5 tonnes. Au début, leurs missions étaient monospécifiques. Les avancées technologiques ont permis de multiplier le nombre de "passagers" (plusieurs types de capteurs). Selon le type de mission, ils évoluent à des altitudes variant de quelques centaines de kilomètres à plus de 30 000 km. En dehors d'incidents majeurs (comme une collision, une panne ou une explosion), leur durée de vie dépend du vieillissement des composants électroniques et de la quantité de carburant. Ce dernier active de petits moteurs permettant de rectifier la trajectoire orbitale.

Les satellites d'observation de la Terre (comme Landsat, Spot, Ikonos, ...) sont équipés de capteurs permettant, dans des bandes spectrales appropriées, de mesurer l'énergie réfléchie par les objets terrestres. Cette énergie est transformée en signal électrique, lui-même converti en valeur numérique. Les données sont alors envoyées à une station de réception au sol. On distingue deux types d'orbites : les **orbites à défilement** (orbites basses et quasi polaires) et les **orbites géostationnaires** (orbites hautes et équatoriales). Les satellites d'observation de la Terre appartiennent à la première catégorie.

### 3.2.6. Les orbites

Une orbite présente une forme plus ou moins elliptique, voire circulaire, située dans un plan.

#### 3.2.6.1. Les orbites géostationnaires

La vitesse de rotation du satellite est identique à celle de la Terre de sorte que pour un observateur au sol le satellite paraît immobile. Pour obtenir cette orbite caractéristique le satellite doit avoir un rayon orbital de 42 000 km (soit une altitude de 36 000 km par rapport au niveau de la mer). L'orbite est circulaire et équatoriale. L'immobilité apparente permet d'avoir une très haute répétitivité d'acquisition. Par contre, l'éloignement est responsable d'une faible résolution spatiale (pixels de l'ordre de 1,5 à 5 km). Exemple de satellite : Météosat



### 3.2.6.2. Les orbites à défilement

Le rayon orbital est plus faible : 6500-7000 km (soit une altitude de 500 à 1000 km par rapport au niveau de la mer). L'orbite est quasi circulaire (échelle constante : la Terre n'est pas sphérique) et généralement quasi polaire. Compte tenu de la faible altitude, la vitesse de rotation doit être élevée. Par exemple, Spot réalise une révolution complète en 101 minutes. L'orbite est phasée, c'est à dire qu'elle détermine une grille régulière des trajectoires sur la surface de la Terre. La couverture du globe est excellente (sauf au niveau des pôles). La répétitivité représente le nombre de jours séparant deux passages à la verticale du même lieu. Pour Spot, la répétitivité est de 26 jours. Toutefois, ce satellite a la possibilité d'orienter son miroir ( $-27^\circ / +27^\circ$ ) ce qui lui confère la possibilité d'acquérir des scènes environ tous les 5 jours. Ce processus est appelé **dépointage**. L'utilisation conjointe de 3 satellites Spot permet d'augmenter la répétitivité à près de 24 heures.

Mais les visées obliques génèrent une déformation importante des scènes. Il est alors nécessaire d'effectuer des corrections géométriques complexes. Selon les satellites, la haute résolution spatiale varie entre 1 mètre (Ikonos) et 30 mètres (Landsat TM) en passant par 2.5, 5, 10 et 20 mètres pour les satellites Spot. Des résolutions plus fines sont obtenues avec les satellites militaires (par exemple, Hélios pour le programme Français). Il existe 2 types d'orbites à défilement : les orbites **héliosynchrones** et les orbites **circulaires ordinaires**. Le plan d'une **orbite héliosynchrone** réalise un tour complet en un an. Cela permet de conserver l'angle de mesure entre le plan orbital et le soleil. Cette spécificité permet au satellite de passer à la verticale d'un point à la même heure locale.

**Exemples de satellites** : Spot, Landsat ;

Une **orbite circulaire ordinaire** a l'avantage de conserver une altitude constante. L'orientation du plan orbital peut être quelconque.

**Exemples de satellites** : SeaSat, RadarSat.

Nous avons dit que la durée de vie d'un satellite était en partie liée à sa réserve en carburant. En effet, un vaisseau mis sur une orbite basse a tendance à descendre. Pour pallier cet inconvénient on corrige régulièrement la trajectoire du satellite en actionnant de petits moteurs. Pour économiser le carburant certains gestionnaires préfèrent laisser descendre le vaisseau spatial jusqu'à la limite orbitale basse pour le repositionner, en temps voulu, sur la limite orbitale haute.



---

### 3.2.7. Les capteurs

Le premier capteur artificiel mis au point par l'homme est l'**appareil photographique**. Il s'agit d'un système constitué par une infrastructure physique (mécanique et optique) et une surface photochimique (le film). La résolution est obtenue par les caractéristiques et la qualité des optiques ainsi que par la taille des grains de la couche photosensible. Les composants chimiques utilisés sont plus ou moins sensibles à certaines longueurs d'ondes du REM. C'est ainsi qu'il existe des films panchromatiques, infra rouge, RX, etc. Le développement des films est obtenu par réaction chimique.

En télédétection, il existe un grand nombre de systèmes radio sensibles. On distingue un **mode passif** (récepteur) où le système capte l'énergie réfléchie ou émise par les objets soumis au rayonnement naturel et un **mode actif** (émetteur-récepteur) où l'émetteur diffuse un rayonnement artificiel vers l'objet qui renvoie vers le capteur un signal modifié.

Parmi les systèmes passifs, on peut citer les **radiomètres** (ou scanners) à **balayage** (optiques ou thermiques), les **radiomètres à barrette**, les **spectroradiomètres**, les **scintillomètres**, **caméras**, etc.. Parmi les systèmes actifs, citons les radars (Radio Detection And Ranging), les lidars (Light Detection And Ranging), les lasers (Light Amplification by Stimulated Emitted Radiation), les fluoromètres, etc. Quel que soit le type de capteur, le système comprendra trois composantes : optique (télescope), spectrale (filtres, prismes) et radio sensible (détecteurs). Un amplificateur de signal est associé à chaque détecteur car l'énergie électrique mesurée est très faible. Les données analogiques sont ensuite converties en données numériques (variables discrètes) puis enregistrées. Lorsque le satellite passe à proximité d'une station de réception il transmet les données. Si ses mémoires de stockage sont saturées il transfère les données sur un satellite relais.

Il existe deux systèmes physiques permettant de capter le REM réfléchi ou émis :

- ❖ un système basé sur la mobilité du miroir (tournant ou oscillant), il s'agit d'un scanner à balayage,
- ❖ un système basé sur un miroir fixe et une barrette de détecteurs.

Avec un scanner à miroir oscillant, la vitesse de déplacement du satellite doit être parfaitement synchronisée avec la vitesse de balayage du miroir. Le temps de réaction des détecteurs est extrêmement rapide.

La résolution spatiale du capteur dépend de l'angle d'ouverture de l'optique et de l'altitude du capteur. Ces deux grandeurs déterminent la surface élémentaire ou pixel (Picture Element). L'énergie radiative du pixel est reçue selon un angle solide (voir figure ci-contre). L'angle d'ouverture de l'optique est constant pour un capteur donné. L'altitude du satellite devra donc

être constante par rapport au sol. Dans le cas contraire, la taille du pixel sera variable. Mais les déformations les plus importantes sont liées à l'angle de visée. À la verticale du lieu on peut considérer qu'il n'y a pas de déformation. Par contre, à chaque extrémité du balayage l'angle de visée n'est plus le même. Les déformations seront importantes. Il sera alors nécessaire d'utiliser des modèles de correction pour rétablir une bonne géométrie de l'image. Les satellites Spot sont munis d'un **système à barrettes** (ou **peigne**). Il y a autant de barrettes que de bandes spectrales. Le capteur (HRV) comprend 4 barrettes de 1700 diodes ce qui permet une prise de vue instantanée de 6000 points au sol

Une barrette comporte environ 3000 détecteurs CCD en mode multispectral, pour une résolution spatiale de 20 mètres (largeur de la scène :  $3000 \times 20 \text{ m} = 60 \text{ km}$ ). Pour une résolution de 10 mètres (mode panchromatique) la barrette comportera 6000 détecteurs CCD et déterminera une scène de 60 km de large. À quelle vitesse sont acquises les données ?

- ❖ Diamètre de la Terre aux pôles : 12 713 km (soit un rayon de 6 356,5 km)
- ❖ Altitude moyenne de Spot : 830 km
- ❖ Soit un rayon orbital moyen  $R_o$  de  $6\,356,5 + 830 = 7\,186,5 \text{ km}$
- ❖ Longueur de l'orbite =  $2 \pi R_o = 2 \times 3,14159 \times 7\,186,5 = 45\,154,07 \text{ km}$
- ❖ Temps de révolution de Spot : environ 101 minutes ou 6060 secondes
- ❖ Vitesse linéaire du satellite Spot :  $45\,154,07 / 6060 = 7,45117 \text{ km/seconde}$

Pour un déplacement au sol de 10 mètres (taille du pixel), Spot devra se déplacer de 11,306 mètres puisque le rayon orbital est plus élevé que le rayon terrestre. Le satellite effectuera donc ce déplacement en 0,001517 secondes soit environ 1,5 millisecondes. Durant ce laps de temps, les milliers de détecteurs CCD devront être renseignés. La vitesse de détection d'un signal est de l'ordre de 10 microsecondes ce qui permet de bien gérer l'acquisition. Dans le cas des scanners à balayage (ex. Landsat) il est nécessaire que la durée d'exposition de chaque pixel, pour une ligne de 3000 pixels, soit mille fois plus courte.

Les détecteurs à barrettes sont plus performants, en termes de résultat, que les détecteurs associés aux scanners à balayage. En effet, en raison de l'absence de mécanique de miroir, la durée d'exposition au signal radiatif peut être plus longue. Ceci permet d'utiliser des capteurs dont le temps de réponse est plus long (technologie moins coûteuse) et la fiabilité meilleure. Les détecteurs à barrettes sont aussi d'une technologie plus récente. En contrepartie, en raison de leur grand nombre, il est indispensable d'égaliser la réponse électronique des détecteurs (étalonnage individuel). D'autre part, les pixels situés en bordure de ligne sont moins énergétiques que ceux situés au nadir. Il devient alors nécessaire d'effectuer des corrections de gain au niveau des détecteurs entre le nadir et le bord de ligne.

---

La page suivante montre le principe de fonctionnement de ces deux types de systèmes.

Le nombre de bandes des capteurs multi-spectraux varie entre 3 et 9. Le choix des bandes spectrales n'est pas fortuit. Chacune correspond à des intérêts thématiques définis par les utilisateurs. La figure ci-dessous indique, pour quelques satellites d'observation de la terre, le nombre de bandes, leur largeur et leur position.

**NB** : Spot 4 et 5 sont équipés d'un "instrument végétation" sur 4 bandes (bleu, rouge, PIR, MIR)

Plus une bande est large et plus grande est l'énergie radiative captée. Landsat MSS est un satellite de première génération pour lequel la sensibilité des détecteurs n'était pas très performante. Les avancées technologiques ont permis d'améliorer cette sensibilité autorisant ainsi la réduction de la largeur des bandes (augmentation de la résolution spectrale).

La résolution spectrale est liée à la résolution spatiale. En effet, lorsque l'énergie captée est importante il est possible de réduire la taille des pixels. Un exemple est fourni avec le capteur HRV de Spot en mode panchromatique. La largeur de l'unique bande spectrale dans le visible (510 à 730 nm) permet d'acquérir suffisamment d'énergie radiative pour abaisser les dimensions de la tâche élémentaire de 20m (en mode multibande) à 10m. L'énergie radiative fournie par la tâche élémentaire de 10mx10m est alors suffisante pour être enregistrée par le détecteur approprié.

De nouveaux capteurs disposant d'un plus grand nombre de bandes spectrales (100 à 500 bandes) ont été développés. Ces capteurs sont essentiellement aéroportés. L'angle d'ouverture étant constant pour un capteur donné, l'altitude d'acquisition des scènes permet de faire varier la largeur de la fauchée au sol et, par voie de conséquence, la résolution spatiale. On parle ici de **systèmes spectro imageurs** et de données hyperspectrales. L'utilisateur dispose d'un très grand nombre de bandes fournissant ainsi un spectre détaillé et quasi continu pour chaque pixel. Selon le modèle, le spectre peut s'étaler de 400 à 30 000 nm. Les bandes ont une largeur variable; le capteur CASI, par exemple, présente 288 bandes spectrales (comprises dans l'intervalle radiométrique 430870 nm) dont la largeur unitaire est de l'ordre de 1,8 nm. Les logiciels de traitement des données hyperspectrales permettent à l'utilisateur de sélectionner les bandes les plus intéressantes pour conduire l'étude.

L'utilisation des données hyperspectrales se justifie lorsque l'objectif de l'étude se situe à une grande échelle (parcelle, par exemple). La gêne liée à l'effet de voile de l'atmosphère peut constituer une autre justification. Cependant, en raison de l'augmentation de la résolution spatiale d'autres phénomènes gênants peuvent survenir (par exemple, l'apparition de l'ombre des objets).

### 3.2.7.1. Les capteurs actifs

Les capteurs optiques présentent des limites d'utilisation lorsque l'absence de soleil ou les perturbations atmosphériques (nuages, brume) empêchent l'acquisition des données. Des **systèmes actifs** ont été développés (radars, diffusomètres, fluoromètres ou lidars). Ils émettent un rayonnement artificiel en direction du sol et captent, en retour, l'énergie renvoyée par les objets. Nous présenterons ici uniquement la technique radar.

Le **radar** le plus connu est le radar rotatif fixé sur un socle neutre. Il est utilisé pour la navigation aérienne civile ou militaire. En télédétection on utilise plutôt le radar latéral. Une antenne émet perpendiculairement au sol des micro-ondes électromagnétiques (domaine des hyperfréquences). L'émission est réalisée sous forme de trains d'impulsions. L'ouverture de l'angle de visée est faible. L'étroit faisceau d'hyperfréquences est, en partie, réfléchi vers le capteur. Le signal retourné est différent du signal émis. Ses caractéristiques (amplitude, polarisation, ...) permettent de déterminer les propriétés de la surface réfléchissante (granulosité, orientation, taille...). Citons comme satellites à capteurs actifs : Radarsat, ERS, ...

On distingue des radars latéraux à ouverture réelle et des radars à antenne synthétique (ou radars à synthèse d'ouverture).

Un transmetteur génère des trains d'ondes qui sont émis vers le sol par une antenne. Celle-ci, en retour, capte le rayonnement renvoyé par la cible. Un chronomètre électronique mesure le temps mis par les trains d'ondes pour atteindre la cible puis l'antenne. Dans le système latéral à ouverture réelle la résolution spatiale n'est pas la même selon qu'on se place dans le sens de déplacement du vecteur ou dans celui du balayage latéral.

---

## CHAPITRE 4. LES SIGNATURES SPECTRALES

### 4.1. Objectifs spécifiques

Ce chapitre aborde la notion de signatures spectrales. A la fin du chapitre, chaque étudiant devra être en mesure de :

- ☞ Définir la notion de signature spectrale ;
- ☞ Reconnaître et interpréter les réponses radiométriques spécifiques des objets sous l'incidence d'un REM.

### 4.2. Introduction

En dehors de tout effet atmosphérique, la matière donne des réponses radiométriques spécifiques sous l'incidence d'un REM. Les réponses varient en fonction de la nature de l'objet, de sa structure, de sa texture, de son orientation ou encore de son activité lorsqu'il s'agit d'un objet dynamique comme la végétation. La signature spectrale d'un objet est la réponse radiométrique de celui-ci mesurée à un moment donné et dans des conditions d'observation données.

Deux espèces végétales (spatialement voisines) peuvent présenter des signatures spectrales identiques. Inversement, deux parcelles d'une même espèce peuvent générer deux réponses radiométriques différentes. Cette constatation est également valable pour d'autres objets (sols, eau, etc.). Pour une variété cultivée donnée, la signature spectrale d'un couvert végétal varie au cours du temps. Le stade de développement des plantes exprime des changements physiologiques et anatomiques qui modifient leur réponse spectrale.

La réponse spectrale est aussi liée à la complexité du contenu du pixel. Pour une étendue marine les pixels sont homogènes. Ils fourniront une signature spectrale bien identifiable. Pour un pixel hétérogène, la signature spectrale sera la résultante d'une combinaison de valeurs radiométriques élémentaires. La signature spectrale sera plutôt interprétée comme l'expression de la texture d'un paysage. D'autre part, pour un couvert végétal visuellement homogène, une partie du REM mesuré par le capteur peut être attribuée au sol sous-jacent.

Ces premières constatations soulignent la **complexité de la signature spectrale**. De nombreuses études ont montré qu'il fallait prendre en compte plusieurs critères physicochimiques pour caractériser un objet (rugosité, couleur, teneur en eau, pigments, etc.). Les réponses individuelles liées à chaque critère sont difficiles à séparer de la signature spectrale globale mesurée. La signature spectrale d'un arbre fruitier ne permettra pas de dire quelle est la contribution relative des feuilles, des fruits, de l'écorce ou même du sol.

Dans ces conditions, une des grandes difficultés, pour le photo-interprète, est d'identifier avec certitude les objets. Nous venons de voir que la signature spectrale dépendait de la nature de l'objet, de sa structure, de sa texture mais aussi de nombreux facteurs de l'environnement (saison,

atmosphère, contribution d'autres objets voisins, ...). L'idéal serait de disposer de tables de conversion des données spectrales permettant de déduire avec certitude la nature d'un objet. Depuis plusieurs années, des travaux de recherche sont entrepris pour élaborer des bases de signatures spectrales de référence.

La signature spectrale des objets n'est donc pas toujours interprétable. Dans les paragraphes qui suivent nous tenterons d'identifier quelques facteurs susceptibles de modifier la réponse radiométrique des objets. Nous distinguerons 3 catégories d'objets :

- ❖ les **objets statiques**, dont la signature spectrale varie peu ou pas au cours du temps (exemple: minéraux, roches, sols),
- ❖ les **objets dynamiques**, dont la signature spectrale varie rapidement au cours du temps (exemple : végétation, l'eau, composé chimique particulier, dont la signature spectrale varie selon son état physique),
- ❖ les **objets artificiels**, essentiellement liés à l'anthropisation du milieu (exemple: urbain, carrières, chantiers, routes, ...).

### 4.3. Objets statiques : minéraux et roches

Les **minéraux** existent à l'état pur dans la nature sous la forme de cristaux de dimensions variables (de quelques microns à plusieurs mètres). Ils sont largement présents à la surface de la terre. Cependant, leur faible taille ne permet pas de les identifier à partir des capteurs aérospatiaux même avec les résolutions spatiales les plus fines. Par contre, les minéraux sont assez bien étudiés en laboratoire. Ils présentent des spectres de réflectance montrant des bandes d'absorption caractéristiques. Les phénomènes physiques qui leur sont associés sont dus aux transitions électroniques (surtout dans l'UV : Fe<sup>++</sup> et Fe<sup>+++</sup>) et aux vibrations ioniques (surtout dans l'infrarouge thermique : OH<sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>-</sup> ...). Les carbonates présentent cinq bandes caractéristiques entre 1.6 et 2.5 mm. Entre 8 et 12 mm (IRT) l'émissivité des carbonates est élevée. Pour les silicates, à toutes longueurs d'onde, la réflectance augmente lorsque la taille des particules diminue. Comme pour les carbonates, leur émissivité est élevée entre 8 et 12 mm.

Les **roches** sont des associations de minéraux. Leurs signatures spectrales sont des combinaisons de signatures spectrales élémentaires (celles des minéraux qui la composent). L'observation spatiale des roches n'est possible que lorsqu'elles affleurent en surface : dans les zones désertiques (absence de sol et de végétation), les sommets de montagnes... **Les sols : objets statique.**

#### 4.3.1. Le sol

Un **sol** est un milieu complexe associant des éléments minéraux (issus de la désagrégation des roches), des éléments organiques (décomposition de la flore et de la faune), d'eau (eau libre, eau liée : solutions salines, colloïdales, acides humiques, ...), d'air et de micro-organismes (bactéries,

---

algues, champignons). Des macro-organismes (vers, larves, insectes, petits mammifères) et des déchets divers (déjections) apportent une contribution non négligeable à l'évolution des sols.

La courbe de réflectance moyenne d'un sol est représentée ci-contre. On peut remarquer que la réflectance moyenne augmente jusqu'à la limite du moyen infrarouge puis décroît de manière irrégulière. La courbe ne présente pas de zones très caractéristiques; c'est pourquoi il est difficile d'extraire des bandes discriminantes. Dans l'IRT la réflectance dépend de la longueur d'onde et de la composition minérale.

Des facteurs physico-chimiques plus ou moins bien identifiés sont susceptibles de modifier la courbe de réflectance d'un sol.

La **rugosité** est un facteur physique qui affecte la réflectance des sols. Plus un sol présentera une fine granulométrie et plus il sera réfléchant. C'est ainsi qu'une plage de sable sera plus réfléchante qu'une plage de galets. Un sol labouré et le même sol lissé par le ruissellement de la pluie (sur une faible pente) auront des réflectances très différentes. Ce phénomène se manifeste par de nettes différences de couleurs sur les compositions colorées. La forte réflectance d'un sol ne signifie pas toujours qu'il est constitué de fines particules. Sa couleur, sa teneur en eau ou d'autres facteurs physiques peuvent jouer un rôle important.

La **matière organique** lorsqu'elle est présente en grande quantité (>2%) affecte les propriétés optiques des sols : occultation de certains ions (Fe, Mn) et variation de la capacité de rétention de l'eau.

Nous savons vu que l'**humidité** modifie fortement la réflectance d'un sol. Il faut bien se garder de conclure qu'une "image de sol humide" indique que le sol dispose de réserves d'eau en profondeur (et vice versa). En **téledétection optique** on mesure des **phénomènes de surface** ne dépassant pas 1-2 cm.

#### 4.4. Objets dynamiques : la végétation

Les **objets dynamiques** ont été définis comme des objets dont les propriétés spectrales varient au cours du temps. C'est le cas de la végétation dont les **stades de développement** sont bien connus : germination, croissance et développement, floraison, fructification et sénescence. Suivant le type de capteur et de vecteur, la mesure de la réflectance peut se faire à **différentes échelles** : celle d'un organe, de la plante entière ou d'un couvert végétal. D'une manière générale, un **végétal chlorophyllien** absorbera fortement le rayonnement visible avec cependant moins d'intensité dans le vert (les plantes nous apparaissent vertes) et le rouge lointain. Ce phénomène est lié à la présence de nombreux pigments, surtout les chlorophylles et dans une moindre mesure les xanthocyanes et les carotènes. Dans le proche infrarouge, par contre, la réflectance augmente fortement et présente un palier



caractéristique. Ici, ce ne sont plus les pigments qui sont responsables de ces propriétés mais la structure anatomique de la plante. Le REM va traverser plusieurs assises cellulaires, c'est à dire des milieux de géométrie et de compositions différentes. Plus la structure sera complexe et moins la réflectance sera élevée. Enfin, dans le moyen infrarouge la réflectance décroît et présente deux pics caractéristiques ; des études ont montré que l'eau libre circulante est responsable de la réponse radiométrique.

Il est important de prendre en compte le **stade de développement** des végétaux. Durant la phase de croissance, l'appareil végétatif va se développer jusqu'à atteindre un maximum de biomasse. Durant la phase de sénescence les feuilles vont perdre peu à peu les pigments chlorophylliens, se déshydrater puis tomber. Le changement de couleur est dû aux xanthocyanes et aux carotènes qui se dégradent moins vite. Le passage d'une phase à l'autre sera marqué par les stades de floraison et de fructification. Globalement nous observerons une évolution de la signature spectrale au cours du temps. Ces caractéristiques vont être importantes pour discriminer les différentes espèces présentes sur un même lieu. Dans ces conditions, la date d'acquisition des mesures devient un facteur important à prendre en compte. La figure ci-dessous montre l'allure générale de la signature spectrale d'un végétal chlorophyllien. Suivant le domaine spectral, différents phénomènes anatomo-physiologiques sont responsables de la réponse spectrale.

Cependant, lors de la phase de croissance, beaucoup d'**espèces différentes** peuvent présenter la **même signature spectrale** (c'est le cas, par exemple, des graminées cultivées : blé tendre, blé dur, orge,...). Par contre, à l'amorce de la seconde phase des différences peuvent apparaître; c'est pourquoi il est important de savoir choisir la date d'acquisition d'une scène satellitaire. Si cela ne suffit pas il est alors intéressant de croiser deux scènes acquises à des dates différentes.

La **signature spectrale** d'un couvert végétal chlorophyllien est une **donnée complexe**. Au fur et à mesure du développement de la plante l'indice foliaire varie. De plus, la réponse radiométrique du sol s'ajoute plus ou moins à celle de la végétation. De nombreux auteurs ont développé des modèles mathématiques pour s'affranchir de l'influence du sol : les **indices de végétation**. Ces modèles sont basés sur les propriétés des bandes rouge et proche infrarouge. On sait que les végétaux chlorophylliens absorbent fortement les radiations rouges alors qu'ils réfléchissent fortement les radiations proches infrarouges. Ces indices permettent d'optimiser la contribution des plantes et de réduire celle des sols. Quelle que soit l'espèce végétale, la courbe de réflectance est la même. Les différences porteront sur l'**amplitude de variation** (voir figure ci-contre).



---

Nous avons souligné que des **facteurs anatomo-physiologiques** sont susceptibles de **modifier la réflectance** des végétaux chlorophylliens :

❖ - l'**épaisseur** des feuilles joue un rôle essentiel dans la réflectance. Le parenchyme lacuneux et la cuticule sont très réfléchissants. Le nombre et la géométrie des assises cellulaires déterminent des structures plus ou moins complexes. Le REM traverse les membranes et les cytoplasmes selon des trajectoires multiples,

❖ - la **face inférieure** des limbes est, généralement, plus réfléchissante que la face supérieure. Ce phénomène est en grande partie lié à la présence de nombreux poils blancs,

❖ - l'**âge** des feuilles, nous l'avons souligné, est un facteur de modification de la réponse spectrale. La réflectance change pendant la phase active de croissance et la phase de sénescence. Elle est stable entre les deux. La disparition des pigments chlorophylliens et le dessèchement des feuilles augmentent la réflectance,

❖ - la **teneur en eau** modifie la réponse spectrale. Mais les variations de la turgescence cellulaire ne sont pas suffisantes pour détecter un déficit hydrique. Avec les capteurs actuels, la détection du stress est trop tardive pour permettre de prévenir l'accident cultural,

❖ - les **déficiences minérales** touchent, avant tout, la teneur en pigments. De plus, une déficience en azote affecte la structure foliaire (feuilles plus minces). Ceci

❖ entraîne une modification de la signature spectrale dans le proche infrarouge, d'**autres organes** peuvent, à des périodes particulières, influencer sur la réflectance. C'est le cas des fleurs, des fruits, de l'écorce,

❖ la **pathologie** foliaire peut être détectable par télédétection. Les parasites provoquent des nécroses, des jaunissements, des enrroulements, des dessèchements. Ces facteurs conjugués conduisent à une augmentation de la réflectance. Le mycelium tapissant les limbes peut, suivant sa couleur affecter la réponse radiométrique (rouille brune ou jaune, oïdium, etc.). Lorsque le degré pathologique est avancé on aboutit même à une chute d'organes (feuilles, fruits).

❖ Les **couverts végétaux** font intervenir d'autres facteurs influençant la réponse radiométrique : la **surface couverte** est liée au stade de développement de la culture. Le sol sera plus ou moins visible. Dès que la biomasse, essentiellement représentée par les feuilles, couvre la totalité du sol, la réflectance atteint une limite (quel que soit le nombre d'étages foliaires). Dans le domaine du visible l'absorption du REM est très élevée : la seule grandeur mesurée est la réflectance. Dans le PIR il y a moins d'absorption et la transmittance est plus élevée. Les étages inférieurs des plantes jouent un rôle dans la réponse radiométrique du couvert. Dans l'IRT la température radiative du couvert végétal dépend de la température du sol. Pour une couverture totale on observe une température minimum.

❖ Le **port des feuilles** : la réflectance est plus grande pour des feuilles érectophiles que pour des feuilles planophiles. Le phénomène est plus marqué dans le PIR car, dans ce domaine, les feuilles ont une réflectance supérieure à celle du sol. Lorsque les végétaux subissent l'action de facteurs traumatisants (perte d'eau, gel, parasites) le port des feuilles peut être modifié ainsi que l'indice foliaire. Le vent, par son effet mécanique, peut modifier également la réponse radiométrique. L'**orientation** des rangs de culture joue un rôle non négligeable, que ce soit un sol nu ou un sol cultivé. On a une réflectance maximum lorsque l'azimut est nul et une réflectance minimum lorsque l'azimut est orienté perpendiculairement aux rangs. Lorsque le couvert devient important il y a atténuation de l'effet. La température radiative du couvert suit la même loi. Pour une culture donnée il n'est pas rare d'observer, sur une même zone, des parcelles orientées dans des directions différentes. En conséquence, on peut donc obtenir des valeurs variables de réflectance.

## 4.5. Un objet particulier : l'eau

### 4.5.1. Présentation

L'eau existe sous différents états : gazeux, liquide, solide. Quel que soit son état, l'eau a la propriété de réfléchir une partie du REM et d'en absorber une autre partie. La fraction absorbée peut être restituée sous différentes formes (lumière, IRT). Du visible à l'infrarouge on observe une diminution régulière de la courbe de réflectance. Si l'eau est chargée en éléments dissous, en particules ou en micro-organismes la courbe a même allure mais les valeurs de la réflectance sont plus élevées. La glace et la neige ont une forte émissivité dans l'infrarouge. On peut les assimiler à des "corps noirs".

### 4.5.2. Absorption

Dans le PIR et le MIR le REM est absorbé par quelques centimètres d'eau pure. Cela donne une image "noire". Cette caractéristique facilite la détection de l'eau. Toutefois, selon les positions du soleil et du capteur, une surface calme (lac) peut être très réfléchante et générer des confusions au niveau de l'interprétation. Cette propriété doit être rattachée au phénomène physique de réflexion totale.

L'eau est rarement pure dans la nature. Elle est souvent associée à des micro-organismes, des minéraux dissous, des matières organiques et/ou à des particules en suspension. Le bilan énergétique global dépend donc aussi de la réponse radiométrique de ces éléments. Le **phytoplancton** et les **détritus biogènes** possèdent, en général, les mêmes pigments que les végétaux aériens (surtout des chlorophylles). L'absorption se fait dans le visible. Lorsque la taille des algues augmente on observe un lissage du spectre d'absorption (disparition des pics de la chlorophylle). Les **particules minérales** en suspension jouent un rôle important en bordure des côtes, dans les estuaires (alluvions, sédiments remués). Ces particules présentent une forte absorption dans le bleu et le rouge et une faible absorption entre 500 et 600 nm. La réflectance de ces particules confère aux eaux sédimenteuses une teinte ocrée ou rougeâtre suivant la nature des sols continentaux. La **substance jaune** est due à la décomposition des végétaux terrestres, du phytoplancton et au lessivage des sols. Cette matière organique est présente en forte concentration dans les embouchures des fleuves et des rivières où l'eau douce abonde, ainsi que dans certaines mers (Baltique). Elle présente une faible absorption aux alentours de 600 nm et une forte absorption dans le bleu ce qui lui confère une teinte jaunâtre.

### 4.5.3. Réflectance des surfaces :

Les surfaces marines peuvent être classées en deux catégories :

❖ **les eaux claires** : où l'effet de diffusion moléculaire prédomine. La réflectance est maximum dans le bleu ;

❖ **les eaux troubles** : dans le cas de particules en suspension et éléments dissous, la réflectance est élevée sur tout le spectre. La couleur des eaux marines est d'un vert laiteux. Dans le cas d'eaux marines où la substance jaune est abondante la couleur tire vers le jaune-brun. Dans les zones côtières, le fond peut modifier la réflectance des eaux claires et peu profondes. L'effet du fond peut se mesurer jusqu'à 20 mètres (ou 40 mètres dans les cas extrêmes).

Les eaux continentales sont plus chargées en substance jaune et en sédiments que les eaux marines. Elles apparaissent en tons bleus dans les scènes satellitaires. Les eaux lacustres, en courant faible, ne présentent pas le même spectre. L'image radiométrique de telles surfaces est bleu foncé à noir.

#### 4.5.4. émissivité des eaux de surface :

L'eau pure est la plus émissive. Elle peut atteindre 100% dans l'IRT. La rugosité de la surface (vagues), les films flottants ou le taux de particules abaissent l'émissivité. Les eaux douces sont plus émissives que les eaux marines (la teneur en sel n'affecte pas l'émissivité des eaux marines).

#### 4.6. Objets artificiels : l'urbain

Les revêtements naturels (ardoises, tuiles, bitume,...) ont des réflectances proches de celles des roches ou des sols nus. Les revêtements artificiels (verre, métaux, ...) ont des propriétés variables selon leur angle d'inclinaison (réflexion totale ou partielle, transparence, ...). Le paysage urbain est constitué d'objets très hétérogènes (pavillons, jardins, arbres, places, ruelles, ouvrages d'art, terrains vagues, chantiers, bassins, ...). Lorsque la résolution spatiale est supérieure à 10 mètres il devient difficile d'extraire des informations précises et fiables. L'image obtenue est une mosaïque de taches "minérales" et "végétales". En traitement d'image, des filtres morphologiques permettent de mettre en évidence des structures ou des textures (axes de communication, densité d'habitat, ...). Usuellement, lorsqu'on étudie la matrice agricole, les structures urbaines sont volontairement masquées de manière à ne pas générer de confusions entre les surfaces agricoles et les surfaces urbaines. Avec l'acquisition de données à très haute résolution spatiale (capteurs hyperspectraux, Ikonos,...) il est possible d'identifier avec une grande précision les objets urbains (0,3-1 mètre). La précision est du même ordre que celle des photographies aériennes. Le second avantage réside dans la richesse de l'information contenue dans les nombreuses bandes spectrales. Mais l'analyse radiométrique des données numériques à l'aide des outils développés pour les données à haute résolution (5-30 mètres) pose de nouveaux problèmes : les ombres sont nettement marquées. Une rue, par exemple, peut être en partie à l'ombre et en partie au soleil. Il devient alors délicat d'extraire un objet dans son intégralité. Des travaux scientifiques sont en cours pour intégrer ce nouveau paramètre. **Action des facteurs externes**

### 4.6.1. Aire représentative

Selon le type de surface visée et la résolution spatiale du capteur, la taille de l'échantillon varie. Ainsi pour un capteur de type HRV<sub>1</sub> de Spot (par exemple, à 20 mètres de résolution spatiale), une culture de céréales sera homogène sur 1m<sup>2</sup> alors que pour un verger il faudra au moins 3000 m<sup>2</sup> (soit 8 pixels au minimum).

### 4.6.2. Le vent

Nous avons déjà évoqué ses effets. Il affecte peu les signatures spectrales dans les courtes longueurs d'ondes. Par contre ses effets sont importants dans l'IRT. Le vent peut générer la formation d'écume sur un plan d'eau ou modifier l'orientation des feuilles d'une culture, faisant apparaître les tiges et le sol. Dans les courtes longueurs d'ondes la réflectance aura tendance à augmenter. Sous l'effet de vents violents, les sols instables peuvent être dégradés. Les particules les plus fines sont transportées dans l'atmosphère. Lorsque ce phénomène est intense, les nuages de particules sont visibles par télédétection. Sables, poussières et particules plus fines atténuent le REM des surfaces couvertes par ce nuage.

### 4.6.3. Le soleil

Le facteur variant est essentiellement la hauteur du soleil. Sur les sols et les roches, un soleil bas fera apparaître des ombres d'autant plus étendues que le sol est rugueux. La réflectance diminuera. Pour les couverts végétaux, la réflectance sera aussi d'autant plus grande que le soleil sera haut.

### 4.6.4. L'angle de visée

Les variations de réflectance dépendront de la surface visée. Cette dernière est caractérisée par sa rugosité, la géométrie du couvert, la nature de l'objet, etc. Chacun de ces caractères participera à la réponse radiométrique. Suivant l'angle de visée, le relief pourra masquer ou déformer une partie de la surface visée. La surface délimitée au sol pourra être composée d'objets différents ou encore présenter un angle d'exposition au soleil variable. La réponse radiométrique de la surface visée ne sera pas la même. **La nébulosité**

La présence de nuages (disséminés) abaisse, dans les courtes longueurs d'ondes, l'intensité de l'éclairage de la cible, le rayonnement direct et diffus. Les aérosols modifient la luminance de l'objet et atténuent les contrastes.

---

## CHAPITRE 5. INTERPRÉTATION D'IMAGES

### 5.1. Présentation

Ce chapitre est basé sur un jeu de questions. Ce jeu-questionnaire **interactif d'interprétation d'images** est conçu pour les apprenants de la télédétection qui voudraient explorer une variété de concepts et techniques d'interprétation d'images.

L'objectif est de familiariser l'apprenant à la reconnaissance d'éléments ; la combinaison de bandes et des couleurs différentes ; le rehaussement d'images ; les histogrammes mono et bidimensionnels et la photo aérienne comparée aux images satellitaires.

### 5.2. Correction des données - Aperçu

Les données satellitaires optiques de moyenne résolution représentent une importante source d'information sur les caractéristiques et la dynamique de la biosphère terrestre aux échelles régionale et planétaire. De telles données, recueillies depuis plus d'une décennie au moyen de radiomètres perfectionnés à très haute résolution (AVHRR) à bord des satellites NOAA, offrent des possibilités exceptionnelles en raison de la couverture quotidienne de ces satellites et de leur sensibilité aux processus des écosystèmes. Les succès obtenus dans ce domaine ont mené à la construction de capteurs optiques de moyenne résolution plus sophistiqués tels que SeaWiFS à bord du satellite SeaSTAR de la NASA lancé le 1er août 1997, ATSR-2 à bord du satellite ERS2 de l'ASE lancé le 21 avril 1995, VEGETATION à bord de SPOT 4 lancé le 4 mars 1998, MODIS et MISR à bord de TERRA, première plate-forme pour le système d'observation de la Terre (**Earth Observing System platform**) de la NASA lancé le 18 décembre 1999, GLI à bord du satellite ADEOS-II de NASDA lancé en novembre 2000, et AATSR et MERIS à bord du satellite ENVISAT de l'ASE lancé en juin 2001.

À l'échelle régionale, des nuages sont toujours présents dans les images. Des procédures de composite sont par conséquent appliquées pour créer des images sans nuages pour des intervalles de plusieurs jours pendant lesquels l'état de la surface peut être considéré statique. Afin de traiter un large volume de telles données, des systèmes informatiques à haut rendement ont été mis au point. Au Canada, le système de GEOcodage et de COMPosition est utilisé depuis 1992 au Centre de télédétection du Manitoba, il génère depuis 1993 des jeux de données saisonniers de composites 10-jours pour la masse continentale du Canada.

Bien que les images composites ainsi obtenues soient en majorité sans nuages, on y trouve néanmoins certains pixels contaminés par les nuages. Les nuages couvrant entièrement un pixel sont facilement détectés alors que les pixels contenant de petits nuages peuvent apparaître sans

nuages. Les autres sources de bruit sont les variations angulaires de la réflectance qui sont une fonction de la géométrie soleil-cible-capteur, mieux connue sous le nom de la fonction de la distribution de la réflexion bidirectionnelle (FDRB). Cette dernière varie en fonction du type de couvert végétal et des saisons, car la phénologie de la végétation change; des effets atmosphériques (absorption et diffusion par les gaz et les aérosols) et de l'émissivité de la surface en infrarouge thermique. De plus, le logiciel de correction atmosphérique, bidirectionnelle et de la contamination créé par le CCT (Atmosphere, Bidirectional and Contamination - ABC3) est utilisé pour corriger les données composites 10-jours de GEOCOMP pour ces artefacts. Par la suite, des procédures additionnelles ont été développées et utilisées pour générer des produits dérivés décrivant l'évolution saisonnière de la végétation au Canada ou corroborant le bilan du rayonnement solaire.

### **5.3. Données d'entrée**

Le jeu de données de base consiste en vingt images composites 10-jours, ces images ont été acquises par les capteurs AVHRR à bord de NOAA-11 et NOAA-14, entre les 11 avril et 31 octobre de chaque année de 1993 à 1999. Les images composites ont été préparées à l'aide du système GEOCOMP. En bref, GEOCOMP exécute un étalonnage du capteur AVHRR pour les cinq canaux, un enregistrement des données du satellite par rapport aux points d'appui à l'aide de fragments d'images à haute résolution, et un ré-échantillonnage spatial à l'aide d'une fenêtre Kaiser 16-points modifiée. Les images enregistrées sont introduites dans le traitement de composition où un critère de composition (valeur de l'IVDN au sommet de l'atmosphère (SA)) est utilisé pour sélectionner le pixel comportant le moins de nuages ou étant le moins contaminé.

### **5.4. Traitement des données**

#### **5.4.1. Étape1. Réétalonnage des données du capteur**

En raison de la détérioration du capteur après le lancement, il est important d'appliquer un étalonnage des gains et des décalages basé sur le temps afin de dériver la radiance du SA pour les canaux 1 et 2 du AVHRR. Le CCT a recommandé d'appliquer des coefficients d'étalonnage linéaire dans le système GEOCOMP pour NOAA 11 et NOAA 14. Toutefois, comme il arrive fréquemment pour des jeux de données historiques, des coefficients d'étalonnage linéaire ont par la suite été dérivés pour NOAA 14. Ces coefficients ont été utilisés dans le réétalonnage des données des canaux 1 et 2 du capteur AVHRR.

---

### 5.4.2. Étape 2. Calcul de la réflectance du SA

La réflectance du sommet de l'atmosphère a été calculée pour les canaux 1 et 2 à partir de la radiance corrigée,  $L^*$  (nouveau), en utilisant la formule donnée par Teillet en 1992.

### 5.4.3. Étape 3. Correction atmosphérique appliquée aux canaux du capteur AVHRR

L'algorithme SMAC (*Simplified Method for Atmospheric Correction*) a été utilisé pour convertir la réflectance du SA en réflectance de la surface. Le traitement a été effectué à l'aide de cartes du contenu en vapeur d'eau précipitable créées à partir de données acquises à intervalle de 6 heures. Le contenu total de la colonne de l'ozone atmosphérique se basait sur les valeurs mensuelles pluriannuelles moyennes. La pression atmosphérique telle que requise pour la correction de la profondeur optique de Rayleigh a été dérivée à partir de cartes de la moyenne saisonnière de la pression barométrique, cette dernière étant interpolée à partir d'un MNA de 1 km de résolution. Ces données auxiliaires ont été dérivées des données réanalysées du Centre national de recherche atmosphérique (NCAR). Des valeurs nominales ont été utilisées pour toutes les autres données d'entrée des paramètres atmosphériques. Les corrections atmosphériques ont été calculées pixel par pixel au moyen des pseudo-bandes GEOCOMP. Aucun masque-pixel n'a été appliqué pendant la correction atmosphérique.

### 5.4.4. Étape 4. Identification des pixels contaminés

Une nouvelle procédure d'identification des pixels contaminés a été mise au point. Cette procédure appelée CECANT (*Cloud Elimination from Composites using Albedo and NDVI Trend* - élimination des nuages sur les composites d'après l'albédo et la tendance de l'IVDN) est basée sur la grande sensibilité de l'IVDN à la présence de nuages, de brouillard, de fumée et de neige. Trois caractéristiques de la tendance annuelle de la réflectance de la surface sont utilisées : le contraste important entre l'albédo des étendues de terre (représenté par les données du canal 1 du capteur AVHRR), surtout lorsqu'elles sont totalement couvertes par la végétation verte, et par des nuages ou de la neige et de la glace ; la valeur moyenne de l'IVDN (valeur prévue pour ce pixel et intervalle de composite) ; et la tendance monotone de l'IVDN. Quatre seuils sont nécessaires pour permettre l'identification par CECANT des pixels contaminés. Ces seuils ont permis la préparation d'un masque-nuages pour chaque intervalle de composite.



### **5.4.5. Étape 5. Calcul de la réflectance de la surface pour le canal 3 du capteur AVHRR**

La radiance du SA pour le canal 3 du capteur AVHRR comprend la composante de l'émission thermique et celle de la réflexion solaire pendant la journée. Le canal 3 contient des données bruitées, mais avec un traitement sophistiqué on peut extraire la réflectance de la surface (lorsqu'elle est faible). En se basant sur une relation empirique de la température de brillance du canal 5, la composante de l'émission thermique peut être soustraite, nous laissant ainsi avec la réflectance estimée de la surface pour le canal 3.

### **5.4.6. Étape 6. Calcul de la température de la surface**

Le but de traiter les canaux thermiques était d'obtenir la température de la surface. L'extraction de la température précise de la surface des images composites de l'AVHRR est complexe, en raison des effets de l'atténuation atmosphérique et de l'émissivité de la surface. La méthode modifiée de double fenêtre a été utilisée puisqu'elle tient compte des effets atmosphériques et de l'émissivité de la surface. Pour les émissivités du sol et de la végétation des canaux 4 et 5, une combinaison de sources a été utilisée. La relation non linéaire entre l'émissivité de la surface et l'IVDN a été utilisée pour estimer l'émissivité du canal 4, de même que pour la différence dans l'émissivité entre les canaux 4 et 5.

### **5.4.7. Étape 7. Correction des effets de réflectance bidirectionnelle**

Le modèle FDRB développé en 1992 a été modifié par introduction de l'IVDN et de l'effet du point chaud afin de caractériser l'effet saisonnier de la FDRB pour chaque type de couvert végétal. La carte de la couverture des terres du Canada en 1995 créée par le CCT avec une dimension de pixel de 1 km a été utilisée pour déterminer le type de couverture des terres. Seuls les pixels sans nuages ont été inclus dans la dérivation des coefficients du modèle et aucune correction n'a été appliquée pour les étendues couvertes de neige ou de glace. Les coefficients résultants du modèle FDRB ont été utilisés pour calculer la réflectance normalisée de la surface pour les canaux 1, 2 et 3.

### **5.4.8. Étape 8. Remplacement des pixels contaminés**

On a retenu deux cas, soit ceux des pixels contaminés a) pendant, ou b) au début et à la fin de la saison de croissance. Pour les pixels contaminés pendant la saison de croissance, il a été supposé qu'aucun changement rapide ne se produirait entre des composites 10-jours adjacentes et que les valeurs manquantes pouvaient ainsi être interpolées d'après la trajectoire saisonnière pour ce



pixel et cette couche de données (canal). Le problème se pose différemment au début et à la fin de la saison de croissance alors que des pixels sont souvent manquants en raison de la présence d'une couverture nivale ou nuageuse. Une importance égale a été accordée aux valeurs des canaux 1 et 2 afin qu'elles correspondent aux valeurs de l'IVDN après le remplacement. Pour la température de la surface, seulement les pixels contaminés pendant la saison de croissance ont été remplacés afin de préserver l'information sur la durée de la saison de croissance.

### 5.4.9. Étape 9. Lissage du profil saisonnier de l'IVDN

Pour chaque pixel dans les intervalles de composite 3 à 18 (dans une saison de 20 composites), un lissage de 5 intervalles a été appliqué où les valeurs minimales et maximales de l'IVDN sont ignorées et la valeur de l'IVDN pour l'intervalle central est remplacé par la moyenne de l'IVDN pour les 3 autres intervalles de composite.

## 5.5. Jeu questionnaire d'interprétation d'images

### 5.5.1. Question 1

On considère l'image suivante.



**Figure 15.** image Landsat 5 TM (700 X 700) de l'Est du Grand Lac des esclaves.

**NB :** l'image Landsat-5 TM couvre la partie est du Grand Lac des Esclaves

La bande-couleur de ce segment d'image Landsat Thematic Mapper est la suivante => :

1. R, G, B => 1, 2, 3
2. R, G, B => 2, 3, 1
3. R, G, B => 5, 4, 3

Quelle bande-couleur (A, B ou C ci-dessus) correspond à ce composé couleur Landsat TM ?

### 5.5.2. Question 2

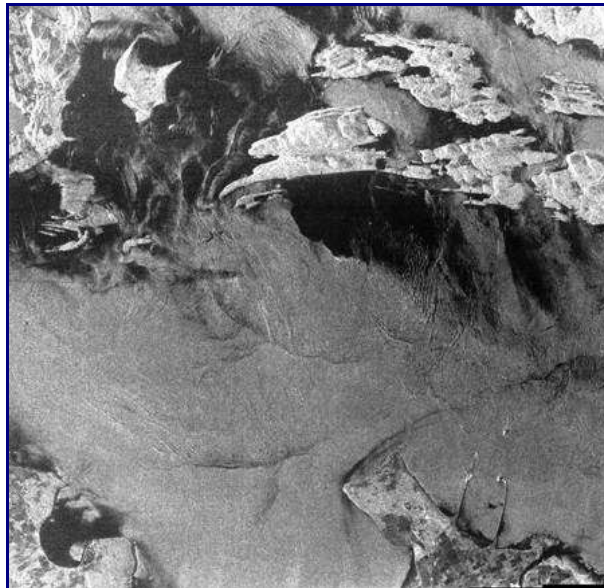
La ligne diagonale blanche dans la partie supérieure droite de l'image représente :

1. Route revêtue
2. Traînée de condensation
3. Ligne de transport d'électricité
4. Route non revêtue

Cette question exige une observation attentive doublée d'une bonne dose de raisonnement logique:

### 5.5.3. Question 3

On considère l'image suivante :



**Figure 17.** Image satellitaire (942x894) : Détroit de Georgia SEASAT RSO

Les surfaces d'eau de cette image apparaissent généralement en gris moucheté, mais avec de grandes sections noires. Ces zones noires sont :

- A. Nappes d'hydrocarbures à la surface de l'eau.
- B. Ombres des collines présentes sur les îles.
- C. Surfaces d'eau protégées du vent par les terres.

Choisir A, B ou C

### 5.5.4. Question 4

Le faisceau radar qui a illuminé cette scène (image précédente) provient :

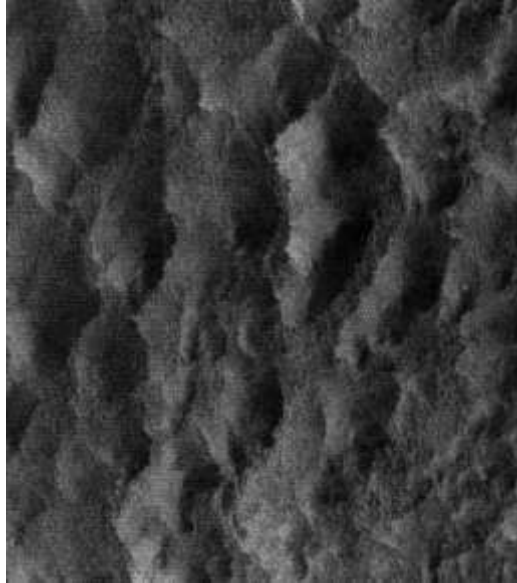
- A. D'en haut

- B. D'en bas
- C. De la droite
- D. De la gauche

Choisir A, B, C ou D

### 5.5.5. Question 5

On considère l'image suivante :



**Figure 18.** Image satellitaire : Mer du Labrador RSO de RADARSAT-1

Les formes observées dans cette image radar représentent :

- A. Collines sans végétation apparente.
- B. Cellules de convection apparaissant à la surface de l'océan.
- C. Lignes de dunes de sables dans une partie très aride du monde.
- D. Glaciers dans le nord de l'Antarctique.

### 5.5.6. Question 6

On considère l'image suivante :



**Figure 19.** Image satellitaire (1000x1000) : North West River, Labrador, LANDSAT TM

Trouvez l'unique pont dans cette image.

Pour trouver le pont, il faut d'abord reconnaître les caractéristiques d'une étendue de terre et d'une étendue d'eau!

Où la terre commence et l'eau se termine? Dans la plupart des images satellites, la frontière entre la terre et l'eau est tout à fait distincte. Si vous vous rendez compte que l'eau est très trouble sur cette image, le rivage est tout à fait évident. La charge élevée de sédiment fait de la surface de l'eau un réflecteur plus intense que la normal (le perfectionnement appliqué accentue celui-ci).

Utilisez le bord de la végétation verte pour vous aider à trouver le rivage.

### 5.5.7. Question 7

Indiquez l'image qui correspond le mieux à la combinaison de bandes. **Combinaisons de bande**

**Landsat TM**

- 1) 3, 2, 1
- 2) 3, 4, 5
- 3) 4, 3, 2
- 4) 5, 4, 3





A



B

**Figure 21.** Image LANDSAT TM: Fleuve Mackenzie, **Figure 22.** Image LANDSAT TM: Fleuve Mackenzie



C



D

**Figure 23.** Image LANDSAT TM: Fleuve Mackenzie, **Figure 24.** Image LANDSAT TM: Fleuve Mackenzie

Les parties sombres au centre de l'image « A » représentent des cicatrices de feux de forêt, les zones blanches dans la partie inférieure de l'image désignent des sommets de montagnes enneigés, la ligne bleu clair qui traverse le centre de l'image est une rivière. On observe également une ligne diagonale de petits nuages (ainsi que l'ombre des nuages) qui traverse la partie supérieure droite de l'image. Les petites surfaces sombres sont des lacs.

**Définitions des bandes spectrales Landsat 5 Thematic Mapper :**

- ❖ Bande 1 : 0,45 - 0,52 micromètres (bleu-vert) ;
- ❖ Bande 2 : 0,52 - 0,60 micromètres (vert) ;
- ❖ Bande 3 : 0,63 - 0,69 micromètres (rouge) ;
- ❖ Bande 4 : 0,76 - 0,90 micromètres (proche infrarouge) ;
- ❖ Bande 5 : 1,55 - 1,75 micromètres (proche infrarouge) ;
- ❖ Bande 6 : 10,4 - 12,5 micromètres (infrarouge thermique) ;
- ❖ Bande 7 : 2,08 - 2,35 micromètres (infrarouge ondes courtes).

### 5.5.8. Question 8

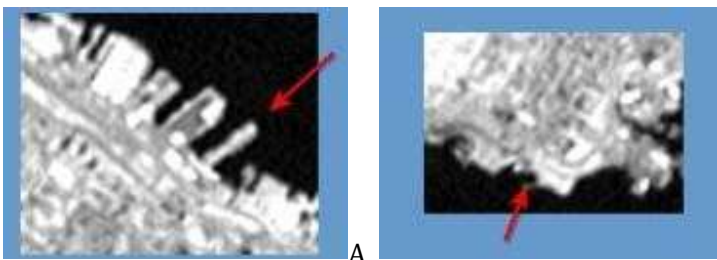
Quelle image satellite (A, B, C ou D) correspond à la photo aérienne ?

Les éléments sur la Terre paraissent très différents selon qu'on les observe en altitude d'un point de vue direct ou d'un angle oblique. Cette différence est même étrange lorsque les deux observations sont faites à des échelles très différentes. Portez une attention particulière à cette différence en comparant les images satellites verticales à petites échelles aux photos aériennes obliques à grande échelle.

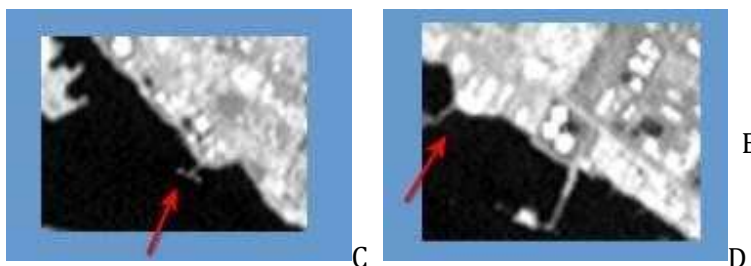
**Note :** La flèche rouge sur l'image satellite indique l'endroit et la direction d'où la photo a été prise



Photo aérienne 1



Images satellites LANDSAT  
TM

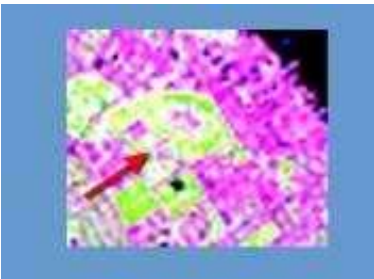




**Photo aérienne 1:** Ne vous laissez pas distraire par les trois cheminées. Du point de vue dominant du satellite passant juste au-dessus, elles sont anodines. Observez plutôt les formes de trait de côte, telles que la jetée particulièrement anguleuse.



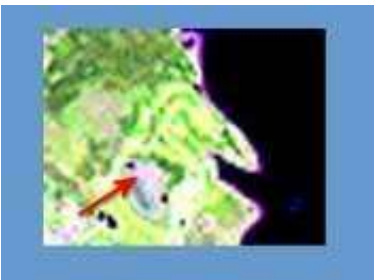
Photo aérienne 2



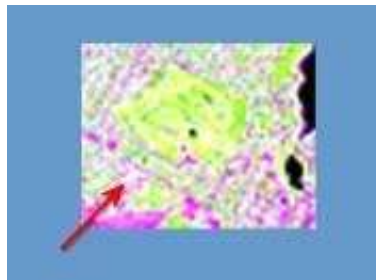
A



B



C



D

B Images satellites LANDSAT TM



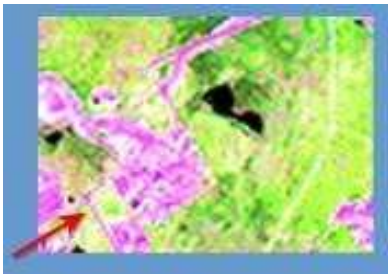
Photo aérienne 3



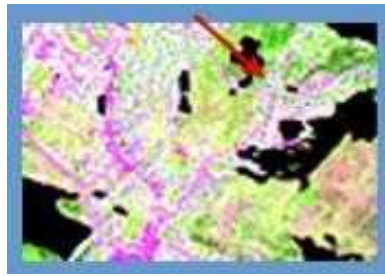
A



B



C



D

B Images satellites  
LANDSAT TM

**Photo aérienne 2 :** Les allées du parcours de golf créent des formes uniques, observez également la structure des rues et le plan d'eau à proximité.

**Photo aérienne 3 :** Une combinaison unique de rues, forêt et lacs compose cette image.

### 5.5.9. Question 9

Dans cette image LANDSAT de Winnipeg, on peut en apprendre beaucoup sur cette ville. On y voit trois rivières, une petite, une moyenne et une grande. L'herbe est vert pâle et les arbres sont vert foncé. Les surfaces dures (sans végétation) apparaissent dans des tons de rose à violet selon la nature des matériaux et de l'ombrage. L'eau est noire.

Qu'est-ce que c'est? Identifiez les éléments de cette image satellite.

**Aéroport:** Les grandes formes linéaires se croisant devraient faciliter l'identification du sujet de cette image

**Rivière:** Un élément foncé de forme sinueuse. Une autre cible facile à identifier?

**Secteur commercial:** La couleur indique qu'il n'y a pas de végétation. Notez les petites zones d'ombre.



---

**Dépôt de rails:** Une forme linéaire mais assez large de tons très foncés, sans végétation.

**Étangs:** Des petites formes arrondies, de tons sombres (sans végétation).

**Secteur résidentiel:** Un motif structuré de diverses formes adjacentes plutôt minces.

**Secteur industriel:** Un mélange de petites formes rectangulaires de tons variés, mais sans végétation.

**Couloir ferroviaire:** Les formes linéaires longues et minces traversent la région à des angles bizarres pointant vers de dépôt de rails.

**Champs agricoles:** Des grandes formes rectangulaires dont certaines sont couvertes d'une végétation uniforme.

**Parc / forêt:** Le ton et les teintes montrent clairement que c'est de la végétation. Quant aux formes irrégulières et brouillées, elles indiquent que cette végétation est d'origine naturelle plutôt qu'anthropique.

**Terrain de golf:** Les tons de jaune et de vert indiquent une végétation luxuriante. L'alignement des formes suggère une origine humaine plutôt que naturelle.

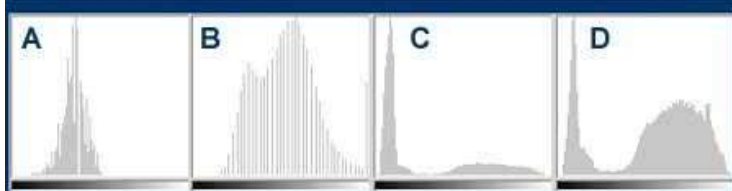
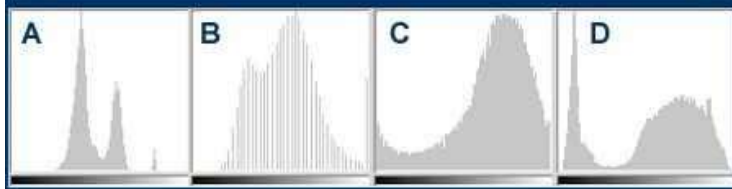
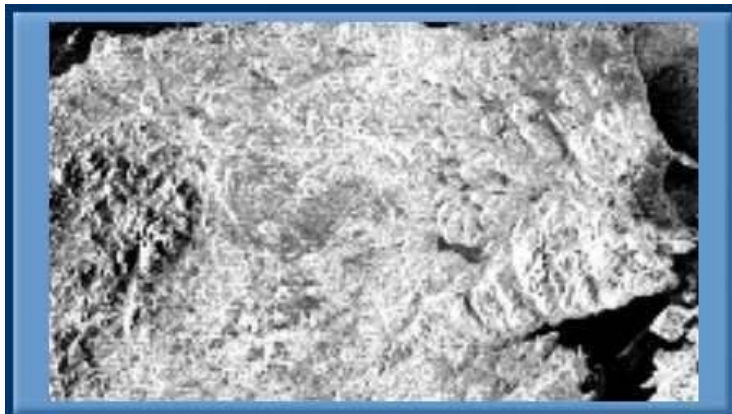
**Parc de stockage:** Dans un ensemble sans végétation, les points blancs semblent être organisés en motifs réguliers.



**Figure 29.** Image satellite (590x547) : Winnipeg, Manitoba, LANDSAT TM (bandes5,4,3=RGB)

### 5.5.10.Question 10

Un histogramme est la représentation graphique des statistiques reliées à la densité de l'image. Un histogramme unidimensionnel, tel qu'illustré ici, représente la superficie de l'image (axe vertical) correspondant à des valeurs de densité (axe horizontal). L'analyse de l'histogramme



d'une image permet à l'interprète d'identifier objectivement la quantité de pixels classifiés à des niveaux de densité donnés.

Connaissez-vous bien vos histogrammes? Associez chaque histogramme à son image.

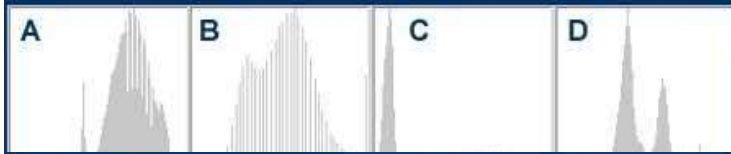
**Indice pour l'image 1:** Notez que la plus grande partie de l'image est claire avec quelques petites surfaces d'un gris moyen à des tons très foncés.

Image 2

**Indice pour l'image 2:** Une grande variété de tons de gris peut être observée dans cette image.



**Indice pour l'image 3:** Deux surfaces en différents tons de gris moyen sont observées dans cette image, elles correspondent à deux grands champs. La route en tons clairs dans le bas de l'image est de petite dimension présentant une gamme étroite de niveaux de gris

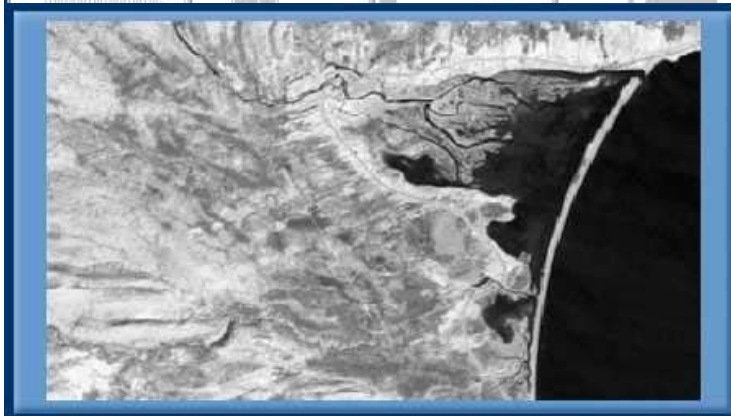
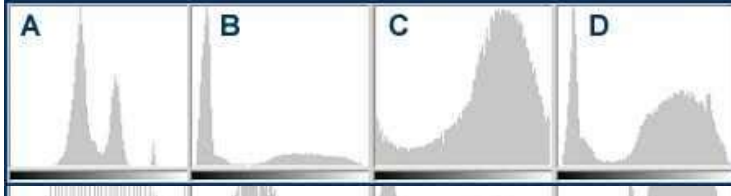


**Indice pour l'image 4:** Les tons de gris de cette image sont tous de niveaux moyens et on n'y voit aucune surface claire.

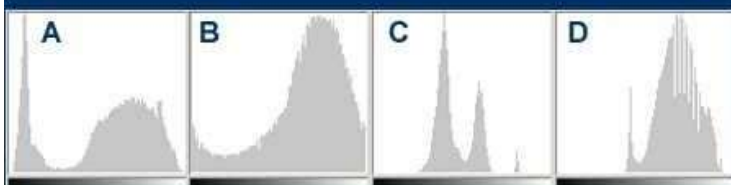
Image 5

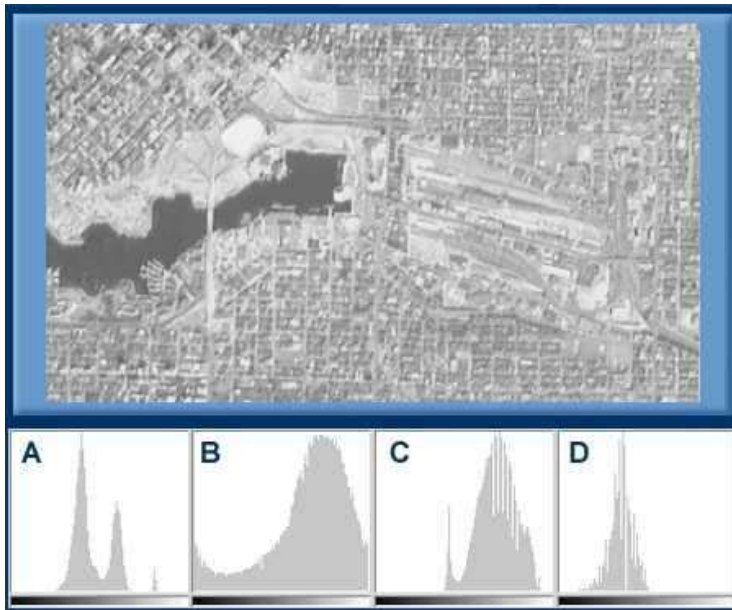


**Indice pour l'image 5:** Plus de la moitié de la surface de cette image présente une gamme restreinte de tons foncés qui correspond à l'eau. Les surfaces terrestres sont représentées par une gamme étendue de tons moyens à élevés.



**Indice pour l'image 6:** La plus grande partie de cette image est composée d'une gamme étendue de tons moyens à élevés représentant la terre. Le reste de l'image, composée d'une gamme étroite de tons foncés, représente de l'eau.





**Indice pour l'image 7:** La plus grande partie de cette image est composée d'une gamme étendue de tons moyens à élevés représentant la terre. Le reste de l'image, composée d'une gamme étroite de gris moyen, représente de l'eau

Un histogramme ou « *fréquence de distribution* » d'une image permet à l'analyste entre autres:

- ❖ d'identifier des problèmes potentiels dans le traitement d'une image numérique ;
- ❖ de planifier les rehaussements nécessaires à l'interprétation visuelle d'une image ;
- ❖ de planifier les schémas de classification appropriés pour une image ou une partie d'image ;
- ❖ de planifier des vérifications au sol pour la classification des images ;
- ❖ de préparer les stratégies de mosaïquage de plusieurs images.

### 5.5.11.Question 11

**Maîtrisez-vous bien les notions de rehaussement d'images?**

plus  
nature



Image originale

L'interprétation visuelle des images utilise souvent le rehaussement d'images pour rendre certains éléments apparents et faciles à reconnaître. Mais le choix du rehaussement dépend de l'élément à interpréter et de la de l'imagerie.

Quelle image (A, B, C ou D) est le résultat d'un :

1. Rehaussement par étalement de contraste
2. Rehaussement par filtre passe haut
3. Rehaussement par segmentation





Image rehaussée.



Image rehaussée.



Image rehaussée.

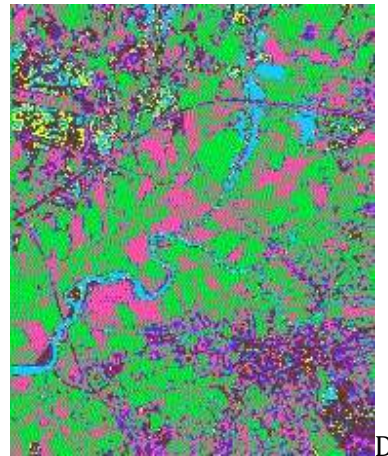


Image rehaussée.