



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche

Scientifique

المدرسة الوطنية العليا للفلاحة

Ecole Nationale Supérieure Agronomique

Polycopie de cours

Photo-Interprétation et Télédétection

4^{ème} année section Hydraulique (GR)



Elaboré par : Dr. Abdelkader Laribi

Année Universitaire : 2023 - 2024



AVANT-PROPOS

Ce cours aborde les photographies aériennes, les bases physiques de la télédétection, les vecteurs et les principaux satellites optiques d'observation de la terre. Il vise également à apporter les bases nécessaires pour traiter et analyser des images de télédétection à travers différentes applications relevant du domaine des sciences agronomiques. Il comprend des opérations classiques de visualisation des images, de prétraitement, mais aussi l'apprentissage et la comparaison de différentes méthodes de classification d'images. Le cours traite à la fin les principaux domaines d'utilisation de la télédétection (océanographie, étude de l'atmosphère et les applications terrestres).

-Objectifs généraux

- Initier aux principes de la photo-interprétation et télédétection
- Mettre l'accent sur les potentialités de cette technique dans le domaine des sciences agronomique

-Objectifs pédagogiques

- Rechercher et sélectionner des images/données en fonction des objectifs poursuivis
- De concevoir une procédure de traitement d'images, depuis les opérations de visualisation jusqu'à l'analyse des résultats.
- D'extraire des informations utiles à partir de différents types d'images de télédétection ;
- D'évaluer les résultats obtenus.

-Démarche pédagogique

Le module est structuré autour de trois modes d'apprentissage :

- **Le cours** : le cours éclaire et donne un sens à l'exercice d'entraînement grâce à des apports plus théoriques.
- **L'entraînement** : l'étudiant est amené à se poser des questions, à réfléchir sur une problématique à partir d'un exemple donné. Chaque entraînement comprend un exercice autoévalué.
- **L'exercice** : l'étudiant se retrouve en situation concrète, il doit résoudre une problématique. Les exercices sont évalués.

TABLE DES MATIERES



Avant-propos	I
Liste des figures	VI
Liste des tableaux	X

CHAPITRE I : ELEMENTS DE BASE SUR LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

1. Les prises de vues	01
1.1. Les différents types de photographies aériennes	02
1.1.1. Les photographies verticales	02
1.1.2. Les photographies obliques	02
1.1.3. Les photographies panoramiques	02
1.1.4. Présentation d'une photographie aérienne	03
1.2. Les conditions de prise de vues	04
2. Recouvrement des photographies aériennes	04
3. Le matériel de prise de vue des photographies aériennes	05
4. Caractéristiques d'une photographie aérienne	06
4.1. Echelle	06
4.2. Les émulsions et formats	08
5. Stéréoscopie	08
5.1. Vision stéréoscopique	09
5.2. Mise en place d'un couple stéréoscopique	10
6. La parallaxe et la détermination de la hauteur des objets	10
6.1. Mesure de la hauteur d'un objet à partir du déplacement apparent	11
6.2. Mesure de la hauteur d'un objet basé sur la longueur de l'ombre	11
6.3. Mesure de la hauteur de l'objet à partir de la parallaxe stéréoscopique	12
7. Principes généraux de l'interprétation des photographies aériennes	14



7.1. La photo-identification	14
7.2. La photo-analyse	17
7.3. La photo-interprétation	17
7.4. La photo-interprétation assistée par ordinateur	17

CHAPITRE II : LES BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION

Définition	18
1. Le rayonnement électromagnétique	19
1.1. Les ondes électromagnétiques	19
2. Le spectre électromagnétique	21
3. Sources du rayonnement électromagnétique : Le soleil	21
4. Interaction avec l'atmosphère	23
5. Interaction avec les objets de la surface terrestre	24
6. Spectre de réflectance ou signature spectrale	26
7. Image numérique et visualisation	29
8. Détection passive et active	29

CHAPITRE III : LES SATELLITES DE TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

1. Éléments constituant les systèmes de télédétection	30
1.1. Les vecteurs	30
1.2. Les capteurs	31
1.2.1. Les composantes d'un capteur	31
1.2.2 Les résolutions d'un capteur	31
1.2.3. La fauchée (couloir observé)	34
2. Les principaux satellites optiques d'observation de la terre.	36
2.1. Le programme LANDSAT	36



2.2. Le programme SPOT (satellite pour l'observation de la terre)	38
2.3. Le programme COPERNICUS	41
2.3.1. Satellite Sentinel 2 (satellite d'observation de la terre)	41
2.4. Le satellite IKONOS	42
2.5. Satellite QUICKBIRD	43
2.6. Satellite ORBVIEW-2	44
2.7. Satellite NOAA	45
2.8. Satellites TERRA et AQUA	46
2.9. Autres capteurs : ALSAT	47

CHAPITRE IV : ANALYSE ET TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES

Définition	49
1. Prétraitement	49
1.1. Les corrections géométriques	49
1.2. Les corrections radiométriques	50
1.3. Niveaux de correction des images	51
2. Rehaussement de l'image	52
3. Transformation de l'image	53
3.1. Les rapports spectraux	54
3.2. Les indices de végétation	54
3.2.1. Les indices simples	55
3.3. Analyse des Composantes Principales (ACP)	59
3.4. Classification d'image	60
3.4.1. Les méthodes de classification non supervisée	61



3.4.2. Les méthodes de classification supervisée

3.4.3. Evaluation de la qualité d'une classification

CHAPITRE V : LA TELEDETECTION ET SES PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION

1. Etude de l'atmosphère	63
2. Océanographie	63
3. Prédiction précoce des rendements des cultures par télédétection	64
4. Identification de plantes stressées par télédétection	65
5. Cartographie du changement d'occupation des sols	65
6. Télédétection appliquée au suivi et au pilotage de l'irrigation	67
7. Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : inondations	67
8. La télédétection appliquée au suivi de la désertification	68
9. La géologie	70
Conclusion	70
Références	71



LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Prises de vues aériennes (Source : Gilvear and Bryant 2016)	01
Figure 2 : Photographies verticales des mines d'or arvernes de Haute - Combraill (Source : Trémont et al. 2015)	02
Figure 3 : Photographies obliques	02
Figure 4 : Photographies panoramiques	02
Figure 5 : Eléments d'informations de la prise de vue sur une photographie aérienne (source : http://www.uoh.fr)	03
Figure 6 : Recouvrement des photographies aériennes	04
Figure 7 : Schéma d'une caméra métrique (Girard and Girard, 2010)	05
Figure 8: Distance focale et altitude de l'aéronef	06
Figure 9 : Photographies aériennes en noir et blanc aux échelles de 1/15 000 et de 1/40 000 (Source : https://quebecgeographique.gouv.qc.ca)	07
Figure 10 : Stéréoscope à miroirs	09
Figure 11 : Stéréoscope à lentilles	10
Figure 12 : Parallaxe stéréoscopique	10
Figure 13 : Mesure de la hauteur d'un objet, basé sur son déplacement apparent	11
Figure 14 : Mesure de la hauteur d'un objet à partir de la longueur de l'ombre	11
Figure 15 : Mesure de la hauteur de l'objet à partir de la parallaxe.	12
Figure 16 : Mesure de la hauteur de l'objet à partir d'une seule photographie.	13
Figure 17 : la tonalité des objets (source : http://www.uoh.fr)	14
Figure 18 : Identification des objets à partir du critère forme (source : http://www.uoh.fr)	15
Figure 19 : Délimitation des objets à partir du critère texture	16
Figure 20 : Délimitation des objets à partir du critère structure	16



(Source : <http://berry.medieval.over-blog.com>)

Figure 21 : Le processus de télédétection passive (source : CNES, 2008)	18
Figure 22 : Onde électromagnétique (Lillesand et al. 2015).	19
Figure 23 : Le spectre électromagnétique (Source : https://chem.libretexts.org)	21
Figure 24 : Rayonnement du corps noir (Source: fr.wikipedia.org/wiki/)	22
Figure 25 : La diffusion non sélective (CCT, 1998).	23
Figure 26 : Spectre de transmission de l'atmosphère (https://fr.wikipedia.org)	24
Figure 27 : Les bases de l'interaction de l'énergie électromagnétique et les caractéristiques de la surface terrestre (Lillesand et al. 2015)	25
Figure 28 : Réflexion spéculaire (CCT, 1998)	26
Figure 29 : Réflexion diffuse (CCT, 1998)	26
Figure 30 : Réflectance de l'eau, du sol et de la végétation dans les différentes longueurs d'ondes (source : seos-project.eu).	26
Figure 31 : Signatures spectrales pour différents types de sols (source : UVED, 2008)	27
Figure 32 : Signature spectrale de la végétation (source : UVED, 2008)	28
Figure 33 : Image numérique (source : CCT, 1998)	29
Figure 34 : Détection passive et active (Source : http://www.chimix.com/an14).	29
Figure 35 : Orbite géostationnaire	30
Figure 36 : Orbite héliosynchrone	30
Figure 37 : Capteurs passifs (a) et capteurs actifs (b) (Source : www.gisresources.com)	31
Figure 38 : Comparaison de différentes résolutions spatiales dans l'environnement bâti à l'aide de photographies aériennes (0,2 m), HyMap (3,6 m), Sentinel-2 (10 m) et Landsat-8 (30 m). (Source : Small et al., 2018)	32
Figure 39 : Résolution spectrale	32
Figure 40 : Résolution radiométrique (2 bits et 8 bits)	33
Figure 41 : Résolution temporelle (CCT, 1998)	33



Figure 42 : Fauchée du satellite Sentinel- 2A	34
Figure 43 : Les principaux satellites Landsat (source : fr.wikipedia.org/wiki/Programme Landsat)	36
Figure 44 : Landsat 8	37
Figure 45 : SPOT 7 (Airbus Defence & Space)	40
Figure 46 : Programme Copernicus (Airbus Defence & Space)	41
Figure 47 : IKONOS-2 (https://directory.eoportal.org/)	42
Figure 48 : Satellite QUICKBIRD (http://eoedu-off.belspo.be)	43
Figure 49 : Satellite ORBVIEW-2 (Source: https://directory.eoportal.org)	44
Figure 50 : Satellite NOAA (fr.wikipedia.org)	45
Figure 51 : Satellite TERRA (Source: https://fr.wikipedia.org/)	47
Figure 52 : Lutte contre la désertification à partir d'une image ALSAT-2A (Https://asal.dz/)	48
Figure 53 : Extraction du réseau hydrographique à partir de l'ALSAT-2A (https://asal.dz/)	48
Figure 54 : Corrections géométriques de l'image brute à partir de la carte topographique	49
Figure 55 : Les différentes méthodes de rééchantillonnage	50
Figure 56 : Effet des Aérosols sur les propriétés spectrales du rayonnement	51
Figure 57: Rehaussement linéaire de l'image satellitaire (CCT)	52
Figure 58 : Filtrage de l'image (a : image bruité ; b : résultat de la filtration) (Source : Mitchell et al. 1977)	53
Figure 59 : Réflectance de la végétation en fonction de son état physiologique	55
Figure 60 : Cartographie de l'indice de Végétation par différence normalisé de la région métropolitaine de Colombo (Ranagalage et al. 2017).	57
Figure 61 : Indice de végétation ajusté au sol (USGS, 2018)	58
Figure 62 : Classification de la couverture du sol (Source : Chen et al. 2017)	60
Figure 63 : Les étapes de base de la classification supervisée (Source : Lillesand et al. 2015)	62
Figure 64 : Spatial distribution of yield (kg ha ⁻¹) for one of the field study sites: (a) measured by yield	64



monitor, (b) predicted by CMM and (c) absolute yield difference between measured and estimated.

Figure 65 : Cartographie de la Végétation stressée (Source Clark et al. 1995).	65
Figure 66 : Occupation du sol au lac de Guiers de 1973 à 2010	66
Figure 67 : Carte des zones à risques d'inondation de la région de Man.	68
Figure 68 : Carte synthèse de sensibilité à la désertification (2000-2005)	69



LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. Les caractéristiques des principaux capteurs satellitaires (très haute résolution)	34
Tableau II. Les caractéristiques des principaux capteurs satellitaires (résolution moyenne)	35
Tableau III. Les caractéristiques des principaux capteurs satellitaires (basse résolution)	35
Tableau IV. Les bandes spectrales des instruments OLI et TIRS	37
Tableau V. Caractéristiques spectrales du SPOT 1, 2 et 3	38
Tableau VI. Caractéristiques spectrales du SPOT 5	39
Tableau VII. Caractéristiques spectrales du SPOT 6 et 7	40
Tableau VIII: Caractéristiques spectrales du Quickbird	43
Tableau IX. Caractéristiques spectrales du satellite ORBVIEW-2	44
Tableau X. Les Caractéristiques spectrales du satellite NOAA/AVHRR	46
Tableau XI. Liste de quelques indices de végétation (source : Xue and Su, 2017)	56



Chapitre I

ELEMENTS DE BASE SUR LES PHOTOGRAPHIES

AERIENNES

Chapitre I. ELEMENTS DE BASE SUR LES PHOTOGRAPHIES AERIENNES

Par définition, les photographies aériennes sont des documents issus de prises de vues à partir d'un avion ou tout autre appareil volant (drone) et avec lesquels on peut identifier des objets, des formes ainsi que leur arrangement spatial et leurs relations. Pendant le vol, les prises de vues sont réalisées à intervalles réguliers de telle manière à réaliser un recouvrement de 60% entre les photos successives (Fig. 1). Chaque partie du terrain apparaît ainsi sur des photos consécutives.

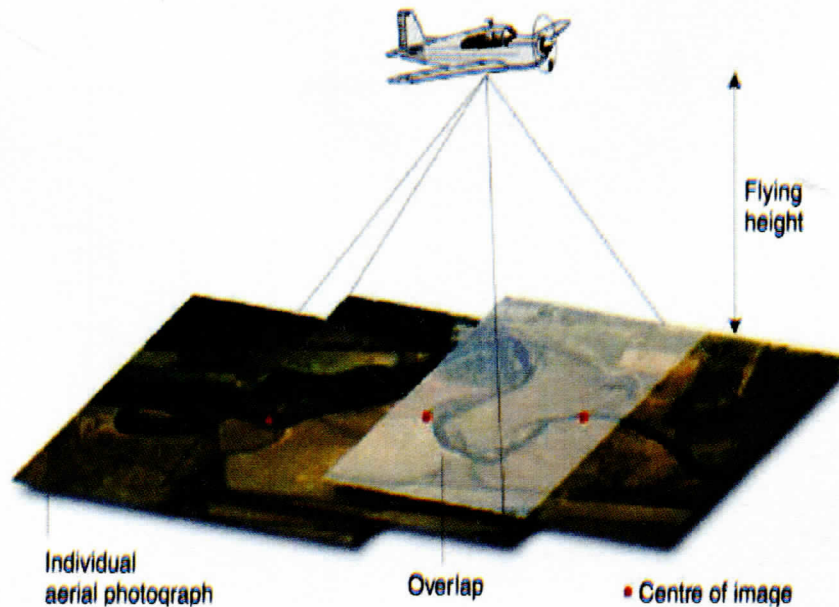


Figure 1 : Prises de vues aériennes
(Source : Gilvear and Bryant 2016).

1. Les prises de vues

La prise de vues des photographies aériennes qui s'effectue au cours d'un vol dénommé mission est fonction de trois ensembles de facteurs (Girard and Girard, 2010) :

- Facteurs ayant trait au document désiré: la focale de l'objectif du capteur, le format, le recouvrement, l'échelle.
- Facteurs de la région étudiée: champ à survoler, altitude maximale.
- Facteurs ayant trait au vecteur: vitesse de l'avion, stabilité en vol, etc.

Les photographies aériennes peuvent être classées en fonction de plusieurs critères : l'émulsion et le format, la longueur d'onde observée, les angles de prise de vue (verticale, obliques ou panoramiques). Dans ce chapitre, nous examinerons dans les points qui suivent, la prise de vues et la couverture stéréoscopique.

1.1. Les différents types de photographies aériennes

1.1.1. Les photographies verticales

Les plus intéressantes pour la cartographie et l'interprétation. Lecture facile des détails et des mesures, permet de restituer les lignes ou les points. Dans ce genre de photographie, l'axe optique de la caméra est vertical ou perpendiculaire (Fig. 2), le point central de la photographie est confondu avec le point nadir. Cette perpendicularité n'est jamais parfaite. Elle est considérée comme verticale si l'angle d'inclinaison de l'axe optique n'excède pas 5 degrés.

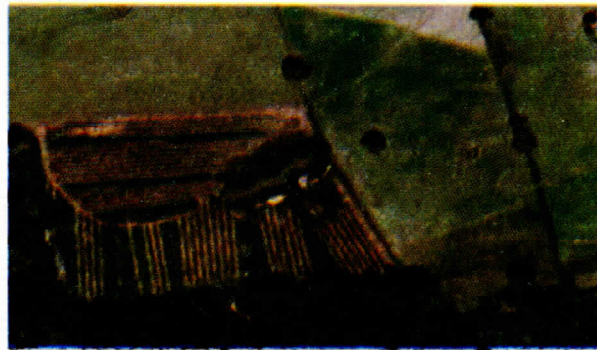


Figure 2 : Photographies verticales des mines d'or arvernes de Haute-Combrail
(Source : Trémont et al. 2015)

1.1.2. Les photographies obliques

Dans ce cas, l'axe oblique de la caméra fait un angle de plus de 5° avec la verticale (Fig. 3). Le nadir et le point central ne sont plus confondus. Elles couvrent une grande superficie que les verticales pour une même altitude de prise de vue.



Figure 3 : Photographies obliques

1.1.3. Les photographies panoramiques

Il s'agit d'une observation similaire à celle que l'on pourrait prendre à partir d'un poste terrestre (Fig.4). L'horizon doit être apparent.



Figure 4 : Photographies panoramiques

1.1.4. Présentation d'une photographie aérienne

Sur une photographie aérienne, plusieurs informations relatives à la prise de vue sont disponibles (Fig. 5).

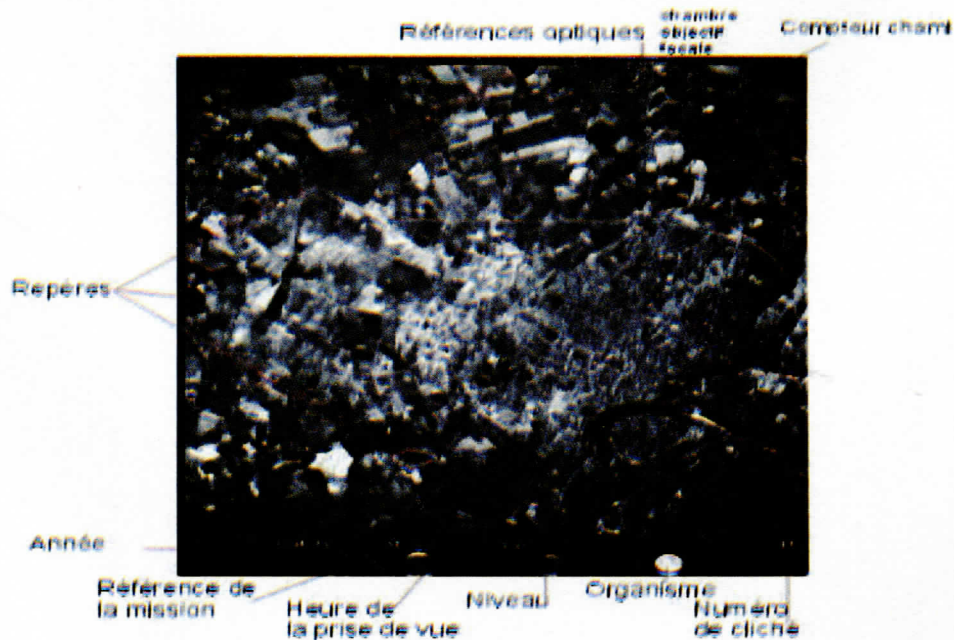


Figure 5 : Eléments d'informations de la prise de vue sur une photographie aérienne
(source : <http://www.uoh.fr>)

-Des paramètres temporels

- La date de prise de vue
- L'indication de l'heure de prise de vue

-Des paramètres géographiques

- Le numéro d'ordre de la photographie dans la mission
- L'indicatif de la mission, c'est aussi la mention de l'organisme exécutant la mission et désignation de la région survolée.

-Des paramètres géométriques et optiques

- Les encoches marginales ou repères de centre. Ils permettent de définir à l'intersection des droites joignant les encoches opposées le centre optique de la photographie : le point principal.
- L'altitude de prise de vue (altimètre)
- Le type de camera utiliser avec la distance focale.
- Un niveau permet également de connaître la position de l'avion lors de la prise de vue.

1.2. Les conditions de prise de vues

Les prises de vues doivent être réalisées (IFN, 2004) :

- Pendant la période de végétation, dont le début est postérieur à la feuillaison complète des arbres à feuilles caduques dans la région, et la fin antérieure à leur flétrissement ; cependant, en région de plaine, des prises de vues de fin de printemps (début juin) ou de fin d'été (septembre) sont susceptibles d'apporter une information spectralement plus riche que les prises de vues de plein été à cause de différences phénologiques entre espèces ;
- Lorsque la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon est supérieure à un seuil de 30° en plaine,
- Lorsque le couvert nuageux est inférieur à 5% de la surface du cliché, et en l'absence de brume et brouillard au sol.

2. Recouvrement des photographies aériennes

On définit le recouvrement comme proportion de la superficie couverte par une photographie qui se retrouve sur une deuxième photographie (Fig. 6) ; on l'exprime généralement en pourcentage. On distingue :

- Le recouvrement longitudinal qui est le recouvrement entre photographies consécutives le long d'un axe, il est d'environ 60%.
- Le recouvrement latéral qui est le recouvrement entre photos sur des axes voisins, il est compris entre 20% et 40%.

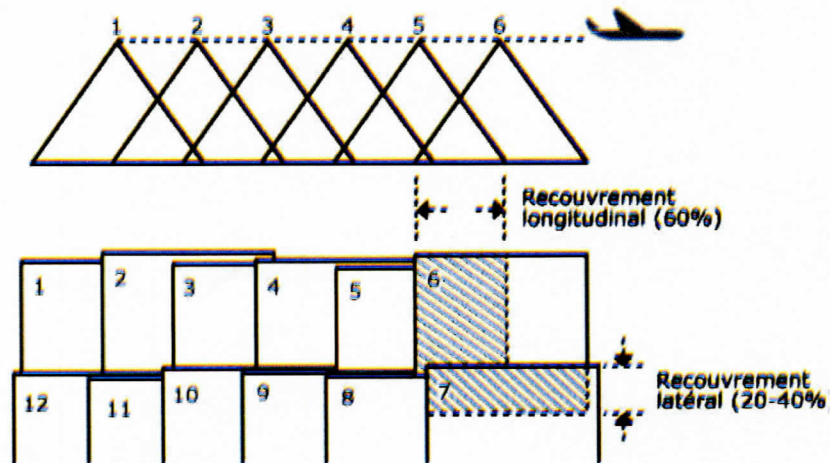


Figure 6 : Recouvrement des photographies aériennes.

3. Le matériel de prise de vue des photographies aériennes

Jusque vers la fin des années 1980, les seuls appareils photographiques utilisés pour les levés aériens sont les appareils conventionnels, dits à pellicule (Provencher and Dubois, 2007). Par la suite les photoscopes (appareils photographiques numériques) et les caméscopes analogiques et numériques sont de plus en plus utilisés pour la photographie de petit format.

Pour les prises de vues de photographies aériennes verticales des caméras spéciales ont été construites appelées chambres métriques (Girard and Girard 2010). Il est associé à ces caméras métriques un télescope de navigation et un GPS. Toutes les informations sur l'avion, sa vitesse, sa position, etc sont saisies dans une unité de contrôle électronique.

La caméra est un assemblage de plusieurs éléments qui selon leurs configurations et leurs caractéristiques influenceront celles de la photographie. La figure 7 présente le schéma d'une caméra métrique. Les caméras sont munies d'un objectif qui comporte un obturateur, un diaphragme, des filtres, un objectif qui, dans la plupart des cas, est composé de plusieurs lentilles assemblées.

L'objectif permet de définir la distance focale f . Elle varie couramment de 90 à 300 mm. On définit aussi une caméra par l'angle d'ouverture qui varie de moins de 75° à plus de 120° (Girard and Girard 2010).

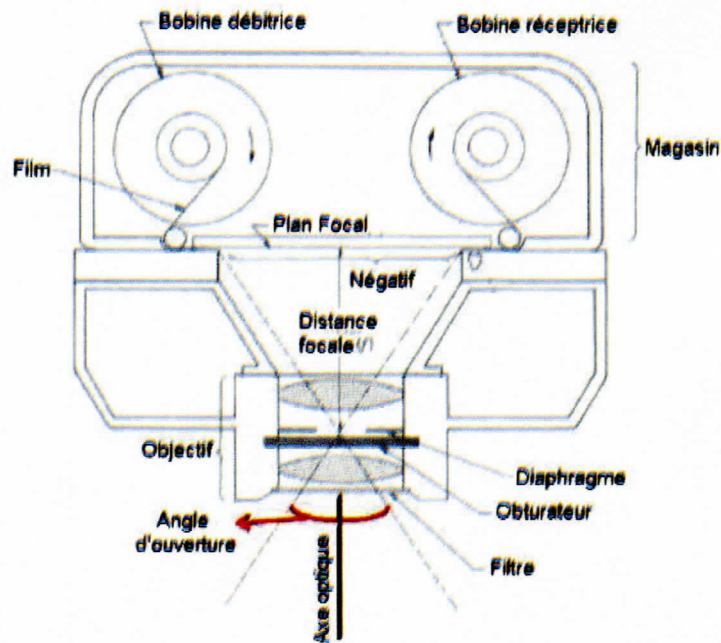


Figure 7 : Schéma d'une caméra métrique (Girard and Girard, 2010)

4. Caractéristiques d'une photographie aérienne

4.1. Echelle

C'est le rapport entre la distance entre deux points sur une photo et la distance réelle entre ces mêmes deux points au sol (c.-à-d. 1 unité sur la photo équivaut à « x » unités au sol).

Exemple 1 : Si un tronçon de 1 km d'une autoroute couvre 4 cm sur une photo aérienne, on calcule l'échelle comme suit (1) :

$$\frac{\text{Distance sur la photo}}{\text{Distance au sol}} = \frac{4 \text{ cm}}{1 \text{ km}} = \frac{4 \text{ cm}}{100\,000 \text{ cm}} = \frac{1}{25\,000} \text{ ÉCHELLE: } 1/25\,000 \dots\dots\dots (1)$$

Il existe, cependant, une deuxième méthode pour calculer l'échelle d'une photo aérienne. C'est le rapport entre la distance focale de l'appareil de prise de vues et la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol au moment où on prend la photo (Fig. 8).

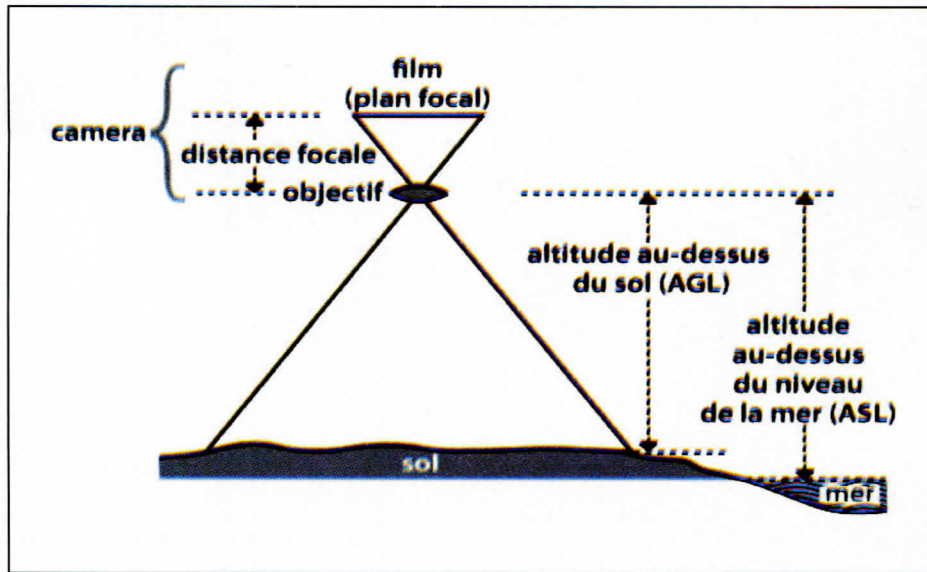


Figure 8: Distance focale et altitude de l'aéronef

Exemple 2 : Si la distance focale de l'appareil de prise de vues est de 152 mm, et la hauteur de l'aéronef au-dessus du sol (AGL) est de 7 600 m, on obtiendrait, à l'aide de la même formule, une échelle de (2) :

$$\frac{\text{Distance focale}}{\text{Hauteur (AGL)}} = \frac{152 \text{ mm}}{7\,600 \text{ m}} = \frac{152 \text{ mm}}{7\,600\,000 \text{ mm}} = \frac{1}{50\,000} \text{ ÉCHELLE: } 1/50\,000 \dots\dots\dots (2)$$

Les échelles peuvent être exprimées de trois manières différentes (1/25000) :

- Unités équivalentes
- Fraction représentative
- Rapport

Le fait qu'un millimètre sur une photographie représente 25 mètres au sol peut être exprimé comme suit :

- Unités équivalentes : 1 mm = 25 m
- Fraction représentative ou rapport : 1/25 000
- Rapport : 1:25 000

L'échelle se situe en général entre 1/5000 et 1/100000. Celle qui convient le mieux à une recherche donnée dépend des objectifs de la cartographie (Legro, 1996). A cet effet, on distingue :

- Les cartes à très grande échelle sont à plus de 1/10000
- Les cartes à grande échelles sont du 1/10000 au 1/25000 : couvre une superficie plus petite avec plus de détails.
- Les cartes à moyenne échelles sont du 1/50000 au 1/100000 : couvre une superficie plus grande mais avec moins de détails.
- Les cartes à petite échelles sont inférieures au 1/100000

En pédologie, le choix est porté le plus souvent sur des échelles intermédiaires.

Le détail qu'il est possible de discerner sur une photographie aérienne dépend de l'échelle de cette dernière (Fig. 9). Par exemple sur la photographie aérienne à l'échelle de 1/15 000 (à gauche), on distingue plus de détails, entre autres les routes, que sur la photographie aérienne à l'échelle de 1/40 000 (à droite).

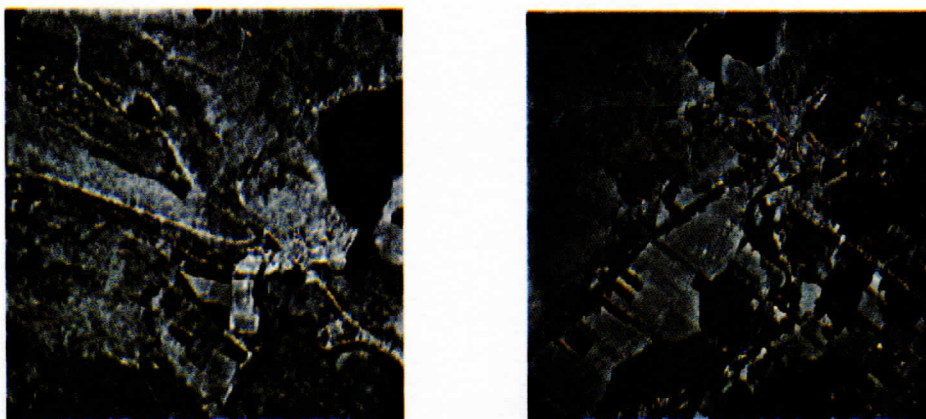


Figure 9 : Photographies aériennes en noir et blanc aux échelles de 1/15 000 et de 1/40 000
(Source : <https://quebecgeographique.gouv.qc.ca>)

4.2. Les émulsions et formats

La plupart des photographies aériennes sont captées à l'aide de pellicules noir et blanc; néanmoins, pour les projets spéciaux, on utilise quelquefois des pellicules couleur, infrarouge et infrarouge couleur.

On distingue classiquement les émulsions suivantes :

Le panchromatique, il correspond au mode noir et blanc. Il est sensible à la région visible du spectre électromagnétique (de 0.36 à 0.72 μ m) ce qui correspond approximativement à l'intervalle de sensibilité de l'œil humain (0.4 à 0.7 μ m). Ce film est de loin le plus utilisé en photo-interprétation car il est plus économique que les films couleur.

- La photographie couleur : beaucoup d'attraits pour le photo-interprète car les couleurs sont proches de celles du monde réel.
- L'infrarouge noir et blanc : Intérêt pour l'analyse du tapis végétal et l'eau. Plus l'humidité est forte plus la zone est sombre. Une forte activité chlorophyllienne est représentée par une forte clarté.
- L'infrarouge couleur (fausse couleur) car les objets ont des couleurs différents du monde réel.

Le format le plus courant actuellement en Algérie est le 24 cm * 24 cm, aux échelles suivantes : 1/4 000; 1/20 000; 1/40 000; 1/60 000; 1/90 000. En France, le format le plus utilisé est le 23 cm* 23 cm, mais on trouve aussi les anciens formats : 18 cm*18 cm pour les missions à 1/25 000 et plus anciennement le format 13 cm * 18 cm (Girard and Girard 2010).

5. Stéréoscopie

Procédé qui permet d'obtenir la sensation du relief à partir de deux images stéréoscopiques d'un objet, prises de deux points de vue différents. Il est important d'avoir une vue stéréoscopique ou 3-D d'une région afin d'en déterminer le relief topographique et la hauteur des objets tels que les arbres et les bâtisses.

La sensation du relief est donnée par la vision binoculaire. C'est la distance entre les deux images et la hauteur de l'avion qui permettent d'accentuer l'effet de trois dimensions.

Dans la vision binoculaire, la perception du relief dépend de plusieurs facteurs:

- La capacité de vue des deux yeux
- L'accommodation des cristallins
- La convergence des axes optiques des yeux
- Le fusionnement stéréoscopique

5.1. Vision stéréoscopique

Grâce au chevauchement, les photos montrant la même région mais prises d'une perspective différente, sont jumelées et visionnées à l'aide d'un dispositif appelé le stéréoscope à miroirs (Fig. 10) (appareil binoculaire à léger grossissement). Ce dispositif permet à l'observateur d'avoir une vision du relief. On parle alors de stéréophotographie.

Le stéréoscope est un dispositif optique qui sert à obtenir une image stéréoscopique à partir d'un couple de photographies. Il est constitué d'un système de prismes et de miroirs qui permettent d'agrandir considérablement l'écartement des deux photos et de disposer de plus de place pour le dessin. Cet appareil peut être utilisé avec ou sans binoculaires pour obtenir un grossissement plus ou moins fort (de 3 à 8 fois).

Par ailleurs, il faut savoir que la vision stéréoscopique n'est pas toujours obtenue du premier coup. Souvent on a quelques problèmes de perception du relief. La vision stéréoscopique nécessite alors un entraînement par des exercices répétés (une certaine gymnastique oculaire est indispensable), et l'utilisation des images comportant un relief accentué.

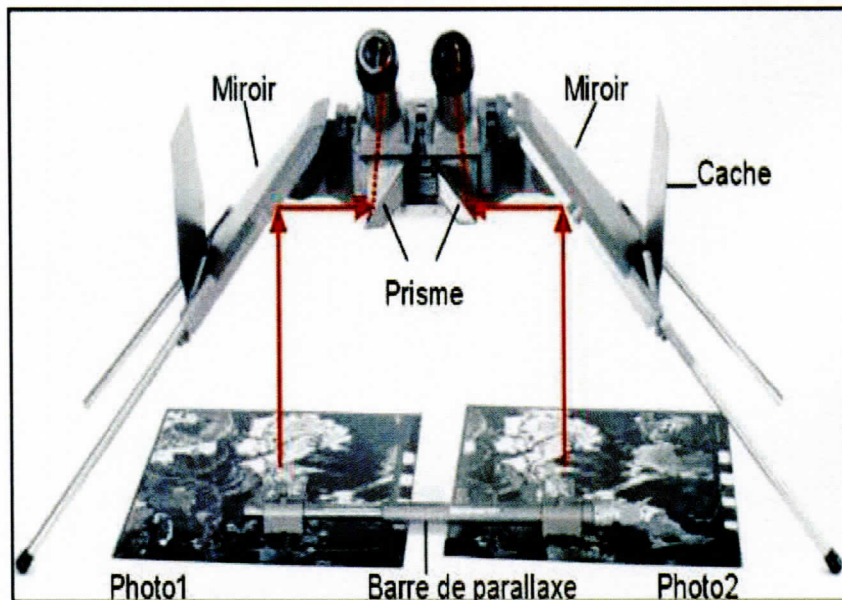


Figure 10 : Stéréoscope à miroirs

Outre les stéréoscopes à miroirs, il existe également les stéréoscopes à lentilles, dits stéréoscopes de poche, ils sont de petite dimension et constitués d'un support avec deux lentilles en plastique ou en verre, sur un support métallique léger et repliable (Fig. 11, Provencher and Dubois, 2007).

Ils sont facilement transportables et utilisables sur le terrain, mais à l'aide d'un support stable sur lequel on peut disposer les stéréogrammes.

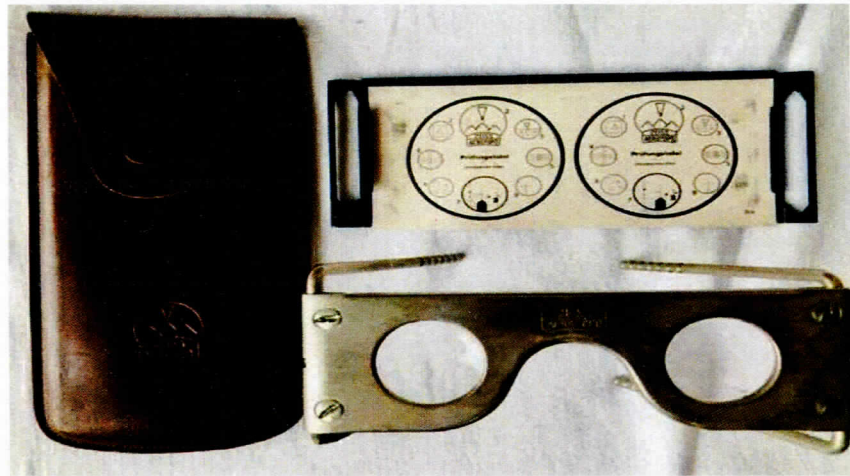


Figure 11 : Stéréoscope à lentilles

5.2. Mise en place d'un couple stéréoscopique

Un couple stéréoscopique est composé de deux photographies ayant un certain recouvrement. Les deux photographies 1 et 2 doivent être placées dans l'ordre dans lequel elles ont été prises lors de missions, sinon on obtient un pseudo stéréoscopique.

6. La parallaxe et la détermination de la hauteur des objets

Le déplacement d'un objet, causé par un changement dans le point d'observation est appelé parallaxe. La parallaxe stéréoscopique est causée par la prise de photographies d'un même objet, mais à partir de différents points d'observation.

Exemple : les deux maisons AB et CD sont de même taille mais apparaissent avec des dimensions différentes (ab et cd) sur la photo, par suite de leur différence d'altitude (Fig. 12). On appelle "**parallaxe**" cet écart de dimension dû au relief.

Plusieurs méthodes sont suggérées pour calculer la hauteur des objets, qui seront examinées dans les points qui suivent.

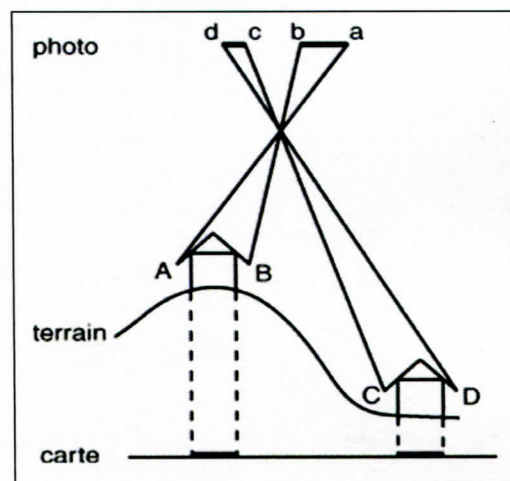


Figure 12 : Parallaxe stéréoscopique

6.3. Mesure de la hauteur de l'objet à partir de la parallaxe stéréoscopique

La hauteur de l'objet peut être calculée à partir du parallaxe absolu et parallaxe différentiel (Fig.15). L'équation générale pour le calcul de la hauteur de l'objet peut s'écrire de la manière suivante (7) :

$$h = (H) * [dP/(P + dP)] \dots \dots \dots (7)$$

Où :

-h = hauteur de l'objet

-H = altitude de l'avion au-dessus du terrain

-dP = parallaxe différentiel

a) mesure (en mm) du haut de l'objet en question sur une photo au même endroit sur l'autre photo.

b) mesure (en mm) de la base de l'objet en question sur une photo au même endroit sur l'autre photo.

c) le dP est calculé par soustraction des deux valeurs trouvées en a et b ($dP=P1-P2$).

-P = b = Parallaxe absolue ou longueur moyenne de la base de la photo ($b1 + b2/2$).

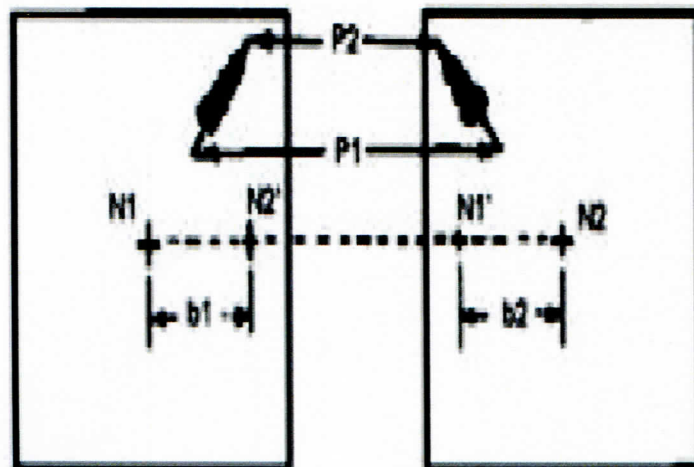


Figure 15 : Mesure de la hauteur de l'objet à partir de la parallaxe.

La formule présentée antérieurement est établie sur la base de deux photographies aériennes. Cependant, Il existe une formule alternative pour calculer la hauteur d'un objet à partir d'une seule photographie aérienne (Fig. 16) et équation 8.

$$h = (H) * d/(r) \dots \dots \dots (8)$$

Où

- h = hauteur de l'objet
- H = altitude de l'avion au-dessus du terrain
- d= déplacement du au relief, même chose que le dP.
- r = distance du point principal ou du nadir au sommet de l'objet, *même chose que (P + dP)*.

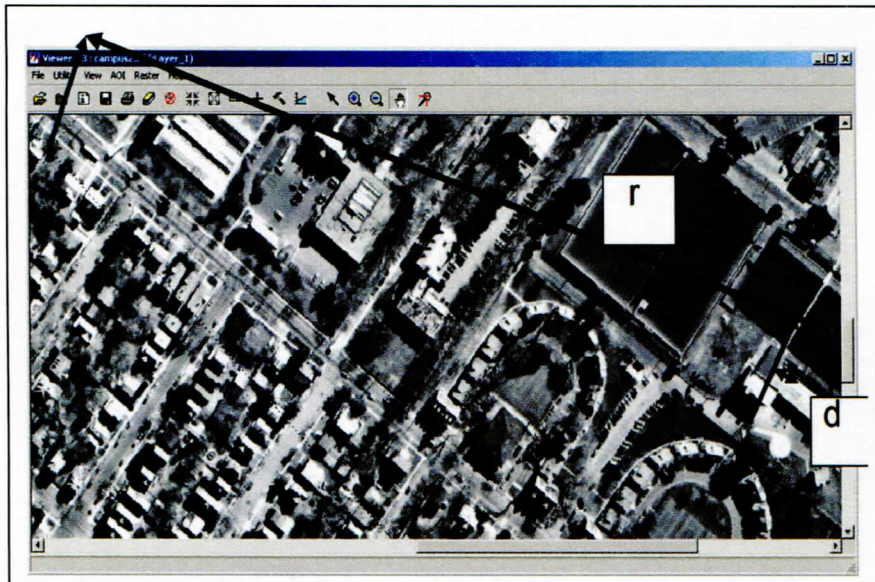


Figure 16 : Mesure de la hauteur de l'objet à partir d'une seule photographie.

Cette technique d'évaluation des hauteurs est possible si :

- Le point principal est accepté comme la position du nadir.
- La base et le sommet de l'objet sont clairement visibles.
- Le degré de déplacement de l'image est assez grand pour pouvoir le mesurer avec les équipements disponibles.

7. Principes généraux de l'interprétation des photographies aériennes

En fonction de l'objet de la recherche, la photo-interprétation aérienne permet à travers l'analyse de photographies aériennes d'extraire le maximum d'informations sur l'objet étudié. Globalement, la photo-interprétation signifie l'acte d'examiner des photographies aériennes dans le but de reconnaître les objets et juger leur signification.

Il est reconnu diverses phases dans la photo-interprétation : la photo-identification, la photo-analyse, la photo-interprétation, et la photo-interprétation assistée par ordinateur. Nous allons examiner dans ce qui suit les différentes phases de la photo-interprétation.

7.1. La photo-identification

L'étape de la photo-identification consiste en l'observation de l'ensemble de l'image, la délimitation des éléments homogènes, l'étude des formes et l'identification des détails. Cette phase s'appuie sur un certain nombre de critères photogrammétriques ou de variables visuels qui sont : la tonalité, la forme, la taille, la situation et l'association, les ombres, la texture et la structure.

- La tonalité/ teinte/couleur

La teinte d'un objet sur une photographie aérienne (Fig. 17) dépend d'un grand nombre de facteurs (caractéristiques physico-chimique, teneur en eau, type de film, conditions météo).

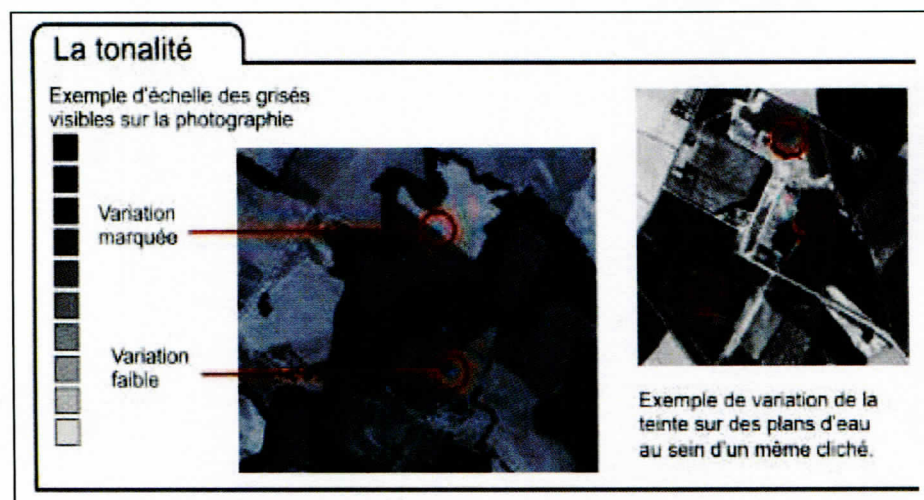


Figure 17 : la tonalité des objets (source : <http://www.uoh.fr>)

- La taille

La taille est également un élément important d'identification et est fonction de l'échelle. Elle permet par la comparaison avec certains objets de dimensions connues une évaluation précise des dimensions spatiales des phénomènes. Ainsi, la largeur d'une route de 35 pieds (10,50m) permettra

d'évaluer d'autres distances par comparaison avec cette route. Souvent, en milieu urbain, des surfaces à dimensions connues permettent des évaluations très précises: un terrain de football (canadien: 330 pieds, 99m), un losange de base-ball (120 pieds, 36m) dans le grand axe, etc.

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

Ce critère se réfère à l'allure générale et au contour de l'objet. C'est souvent un indice très important pour l'interprétation car il fournit souvent la fonction de l'objet géographique (Fig. 18). Il faut noter cependant que les formes rectilignes ou géométriques se retrouvent souvent dans les régions urbaines ou cultivées où la pression anthropique est forte. En revanche, les éléments peu affectés par l'homme conservent souvent des formes plus irrégulières.

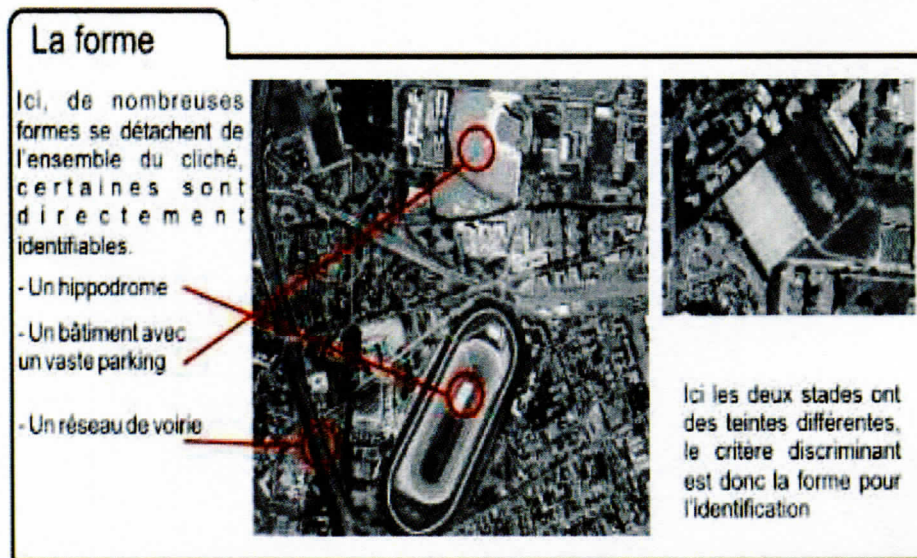


Figure 18 : Identification des objets à partir du critère forme (source : <http://www.uoh.fr>)

- **La texture**

La texture est un terme généralement employé pour décrire la fréquence de changements et l'arrangement des teintes de gris (ou des couleurs) sur une image. Elle correspond à l'aspect superficiel de l'objet observé. Nous qualifions souvent la texture comme lisse (uniforme, homogène), grossière (rugueuse, hétérogène) ou intermédiaire (entre les deux) (Fig. 19). La texture dépend fortement de

l'échelle d'une photo. Des objets qui apparaissent dépourvus de texture à petite échelle peuvent apparaître avec une texture rugueuse à grande échelle.

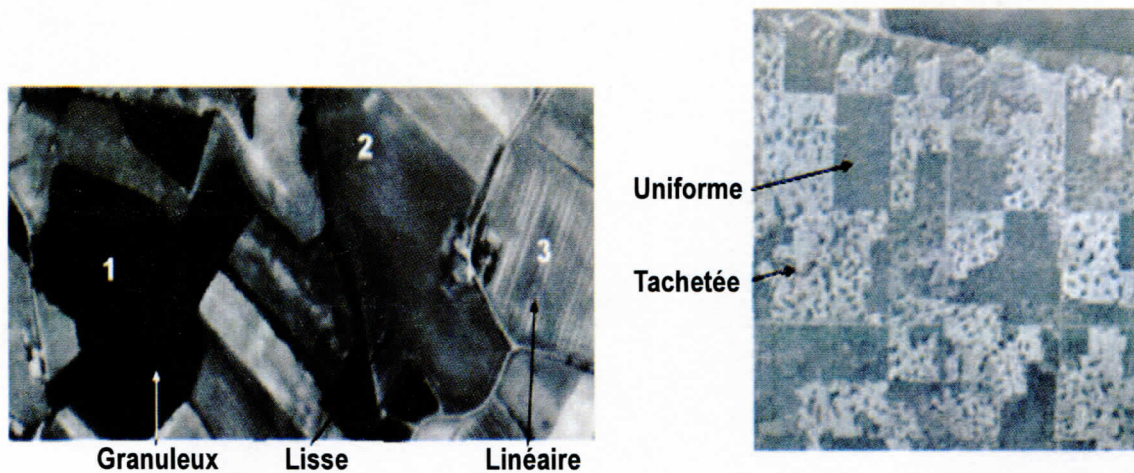


Figure 19 : Délimitation des objets à partir du critère texture

- **La structure**

Elle concerne l'organisation spatiale des éléments texturaux observés, les uns par rapport aux autres, ainsi que la relation existante entre eux dans une image. Dans les photographies de surface de sol, la structure caractérise les phénomènes de surface comme des linéaments, des fractures ou des phénomènes dus à des interventions humaines comme le parcellaire dans une zone agricole représentée sur la figure 20.

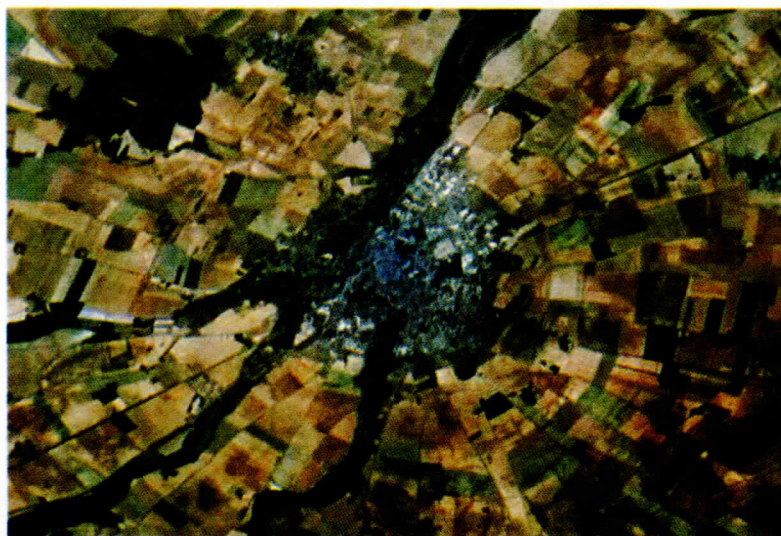


Figure 20 : Délimitation des objets à partir du critère structure

(Source : <http://berry.medieval.over-blog.com>)



7.2. La photo-analyse

La reconnaissance de la forme d'un objet ne suffit pas dans certain cas, à identifier réellement ce qu'il représente. Il est donc nécessaire d'analyser l'environnement de l'objet pour aider à le déterminer.

7.3. La photo-interprétation

Elle associe les 2 phases précédentes à des recherches documentaires et aux connaissances de l'expert afin de dégager le résultat final. Il faut être spécialiste avant d'être photo-interprète.

7.4. La photo-interprétation assisté par ordinateur

Comme son nom l'indique la photo-interprétation assistée par ordinateur exploite les performances des ordinateurs pour obtenir un rendu meilleur. Cela est réalisé à partir des différents logiciels de systèmes d'information géographique (SIG) existants, que ce soit en mode raster ou en mode vecteur.



Chapitre II

LES BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION

Chapitre II. LES BASES PHYSIQUES DE LA TELEDETECTION

L'objectif de ce chapitre est de présenter les principes fondamentaux de la télédétection depuis le spectre électromagnétique jusqu'à l'interaction du rayonnement électromagnétique avec les objets de la surface terrestre.

Définition

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 (Fig. 21, CCT, 1998).

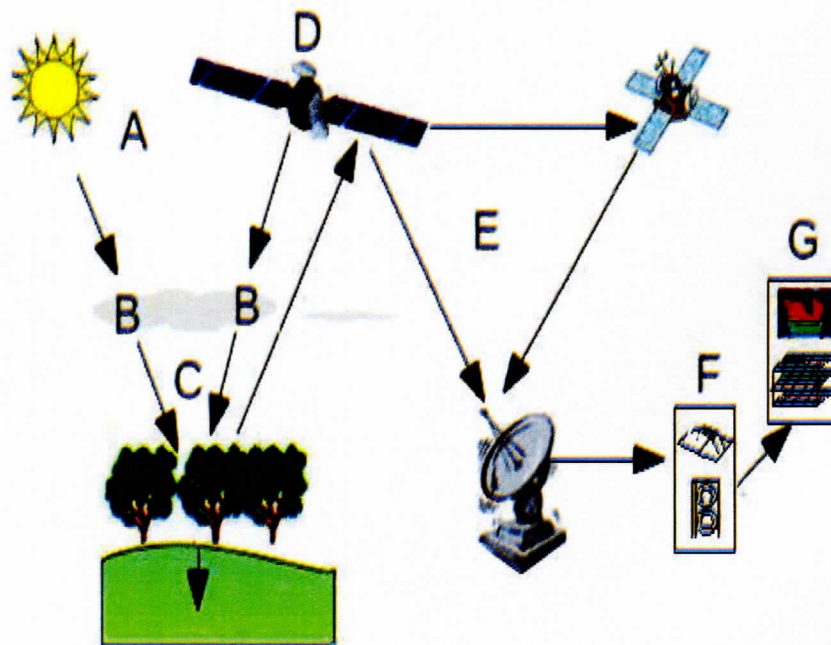


Figure 21 : Le processus de télédétection passive (source : CNES, 2008)

Plus précisément, le processus de télédétection se rassemble en sept étapes :

- (A) La source de l'énergie : est nécessaire pour illuminer la cible ;
- (B) Le rayonnement et l'atmosphère : entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère ;
- (C) L'interaction avec la cible : L'énergie interagit avec la surface de la cible selon les caractéristiques du rayonnement et les propriétés physiques de sa surface ;

Dr. Abdelkader LARIBI

(D) L'enregistrement de l'énergie par le capteur : l'énergie émise par la cible est captée et enregistrée à distance par un capteur ;

(E) Transmission, réception et traitement : L'énergie enregistrée par le capteur est transmise à une station de réception où l'information est transformée en images ;

(F) Interprétation : L'analyse des images obtenues se fait d'une manière visuelle ou numérique pour obtenir les caractéristiques qu'on cherche à propos de la cible ;

(G) Application : Elle consiste à exploiter ces informations pour résoudre des questions de recherche.

1. Le rayonnement électromagnétique

Par définition, le rayonnement électromagnétique correspond à l'ensemble des radiations émises par une source qui peut être soit le soleil, soit la surface terrestre ou océanique ou l'atmosphère, ou bien encore le capteur satellitaire lui-même, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

1.1. Les ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique comporte à la fois un champ électrique et un champ magnétique oscillant à la même fréquence. Ces deux champs, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre se propagent dans une direction orthogonale (Fig. 22).

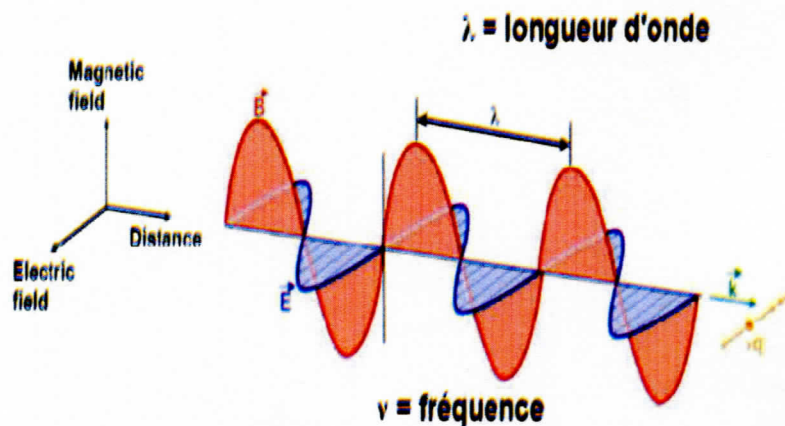


Figure 22 : Onde électromagnétique (Lillesand et al. 2015).

- **La longueur d'onde (λ)** : elle exprime le caractère oscillatoire périodique de l'onde dans l'espace. C'est la longueur d'un cycle d'une onde, la distance séparant deux crêtes successives.



Dr. Abdelkader LARIBI

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

le nanomètre : $1 \text{ nm} = 10^{-9}$ mètre

le micromètre : $1 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-6}$ mètre

le centimètre : $1 \text{ cm} = 10^{-2}$ mètre

- **La période (T)** : elle représente le temps nécessaire pour que l'onde effectue un cycle. L'unité est la seconde.
- **La fréquence (v)** : inverse de la période, elle traduit le nombre de cycles par unité de temps. Elle s'exprime en Hertz (Hz) - un Hz équivaut à une oscillation par seconde - ou en multiples du Hertz, les ondes électromagnétiques utilisées en télédétection spatiale présentent des fréquences très élevées :

le kilohertz : $1 \text{ kHz} = 10^3$ Hz

le mégahertz : $1 \text{ MHz} = 10^6$ Hz

le gigahertz : $1 \text{ GHz} = 10^9$ Hz

Longueur d'onde et fréquence sont inversement proportionnelles et unies par la formule suivante (9) :

$$\lambda = c/v \dots\dots\dots (9)$$

où

- λ : longueur d'onde de l'onde électromagnétique

- c : vitesse de la lumière ($3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$)

- v : la fréquence de l'onde

Exemple : Soit une onde électromagnétique de fréquence de $1,5 \times 10^{14}$ Hz.

Quelle est sa longueur d'onde ?

On part de l'équation vu précédemment, qui relie fréquence, longueur d'onde et vitesse de la lumière :

$$\lambda = 3 * \frac{10^8}{1,5 * 10^{14}} = 2 * 10^{-6} \text{ m}$$

Par ailleurs, il faut savoir que le rayonnement électromagnétique peut être transmis par différentes sources :

- Le soleil (domaines du visible, du proche et du moyen infrarouge) : les capteurs enregistrent donc l'énergie solaire réfléchiée par les objets à la surface terrestre.
- Le sol (domaine du thermique et des micro-ondes) : les récepteurs de télédétection enregistrent l'énergie émise par la Terre à partir de sa température.
- Une source dite artificielle - télédétection active - associée au capteur (c'est le cas des lasers et des radars micro-ondes)

2. Le spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est divisé en différents domaines allant des courtes aux grandes longueurs d'ondes (Fig. 23). Il s'agit notamment des domaines du visible (λ entre 0,4 et 0,8 μm), du proche infrarouge (λ entre 0,8 et 1,1 μm), du moyen infrarouge (λ entre 1.1 et 3 μm), de l'infrarouge thermique (λ entre 10 et 12 μm) (rayonnement émis sous forme de chaleur par la surface terrestre), mais également le domaine des micro-ondes (1 mm – 1 m, télédétection radar).

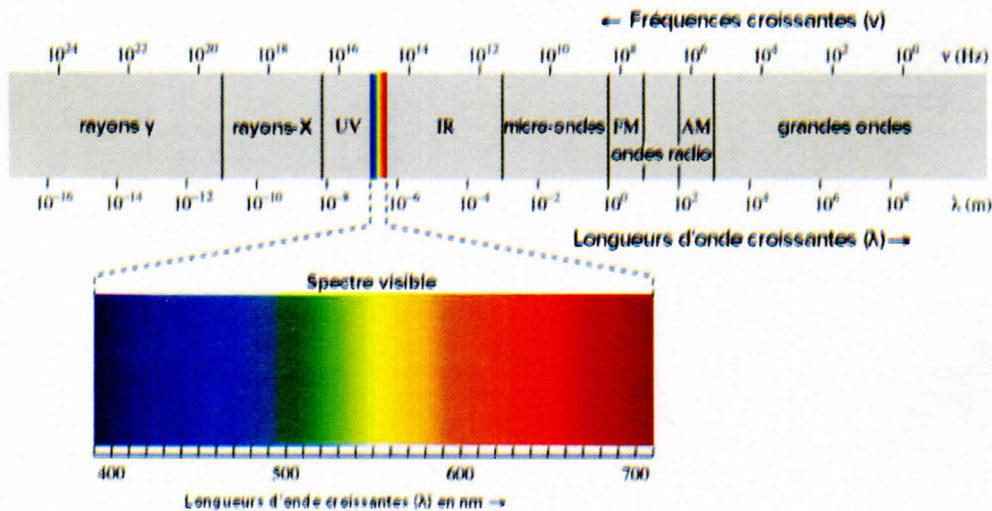


Figure 23 : Le spectre électromagnétique (Source : <https://chem.libretexts.org>)

3. Sources du rayonnement électromagnétique : Le soleil

L'équation de Stephan- Boltzman permet d'exprimer la quantité d'énergie émise par un corps complètement absorbant, dit corp noir (10).

$$E = \sigma T^4 \dots \dots \dots (10)$$



Où :

- σ est la constante de Stephan-Boltzman $= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.
- T : Température du corps noirs exprimée en kelvin en ° Kelvin ($0^\circ \text{ K} = -273.15^\circ \text{ C}$).
- Soleil assimilé à un corps noir à une température de 5770° K :

$$E = (5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}) * (5770 \text{ K})^4 = 6.28 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2}.$$

La loi de Stefan-Boltzmann donne la puissance totale (énergie/seconde) émise par le soleil et est exprimée également de la manière suivante (11):

$$P_{S \text{ emt}} = 4\pi R_s^2 \sigma T_s^4 \dots\dots\dots (11)$$

Où :

R_s : est le rayon du soleil

T_s : est la température réelle du soleil

Un corps noir, à température constante, réémet donc l'énergie qu'il a absorbée sous forme de rayonnements électromagnétiques. Son spectre d'émission dépend de sa température.

Ainsi, le Soleil par exemple peut être classé dans la catégorie des corps noirs, comme toutes les étoiles, alors qu'il nous apparaît jaune-orangé (Fig. 24).

Le Soleil émet cette puissance dans toutes les directions. Ainsi, cette énergie se disperse selon la surface d'une sphère et seule une petite partie de la radiation est captée par la planète. La puissance du Soleil qui frappe la planète (au sommet de l'atmosphère) est donc (12) :



Figure 24 : Rayonnement du corps noir
(Source: fr.wikipedia.org/wiki/)

$$E \times (4\pi R_{\text{soleil}}^2 / 4\pi D_{TS}^2) = 1371 \text{ W m}^{-2} \text{ (Constante solaire)} \dots\dots\dots (12)$$

Les mesures les plus précises situent la constante solaire en moyenne à 1367 W m^{-2} .



Avec $R_{\text{soleil}} = 6.96 \cdot 10^8 \text{ m}$ et $D_{\text{Ts}} \approx 1.49 \cdot 10^{11} \text{ m}$.

4. Interaction avec l'atmosphère

Lors de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement électromagnétique subit des interactions avec les différents composés atmosphériques. Il peut être dévié de sa trajectoire, ou être en totalité ou en partie absorbé, c'est le *phénomène de diffusion atmosphérique*. Dans ce dernier cas, il y a transfert d'énergie entre le rayonnement et les molécules avec lesquelles il entre en collision.

On distingue ainsi trois types de diffusion (CCT, 1998) : la diffusion de Rayleigh, la diffusion de Mie et une diffusion dite non sélective. La diffusion de Rayleigh est due aux molécules gazeuses présentes dans l'atmosphère (O_2 , N_2 , CO_2 , vapeur d'eau, etc.) ou aux fines particules de poussière.

Elle se produit lorsque la taille des molécules diffusantes est très inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. Elle est observée dans les hautes couches de l'atmosphère et c'est elle qui explique la couleur bleue du ciel pendant la journée.

La diffusion de Mie concerne les composés atmosphériques de tailles presque identiques à la longueur d'onde. Elle est principalement produite par les aérosols et les molécules d'eau, très présents dans les basses couches atmosphériques.

La diffusion non sélective se produit lorsque la taille des particules atmosphériques est beaucoup plus grande que la longueur d'onde du rayonnement. Elle est due notamment aux gouttelettes d'eau que l'on trouve dans les nuages et les brouillards. La diffusion non sélective affecte toutes les longueurs d'onde, ce qui explique la couleur blanche des nuages (Fig. 25).

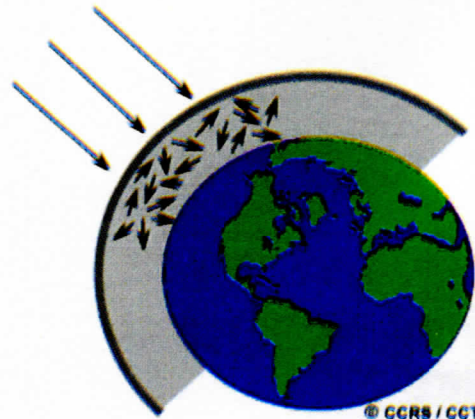


Figure 25 : La diffusion non sélective (CCT, 1998).

Contrairement à la diffusion, l'absorption atmosphérique entraîne un transfert d'énergie entre le rayonnement et les molécules avec lesquelles il entre en collision. Les constituants atmosphériques les plus absorbeurs du rayonnement solaire sont la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et l'ozone. Les longueurs d'onde pour lesquelles le rayonnement électromagnétique est peu ou pas absorbé constituent ce que l'on appelle les fenêtres de transmission atmosphériques (Fig. 26).

Dans ces fenêtres, pratiquement tout le rayonnement est transmis (Lillesand et al. 2015). Les capteurs satellitaires dédiés à l'observation de la Terre utilisent ces fenêtres pour observer la surface terrestre et celle des océans.



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

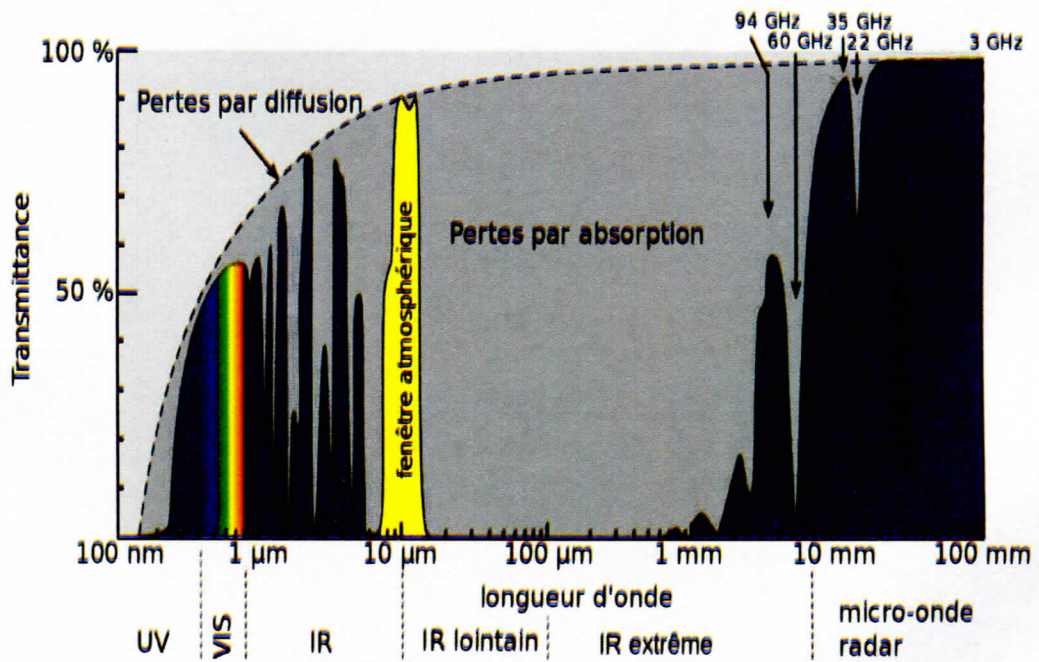


Figure 26 : Spectre de transmission de l'atmosphère (<https://fr.wikipedia.org>)

5. Interaction avec les objets de la surface terrestre

Lorsque le rayonnement électromagnétique atteint la cible, trois interactions énergétiques fondamentales avec l'objet sont possibles (Fig. 27). Une partie du rayonnement incident peut être soit réfléchi, absorbé ou transmis. En appliquant le principe de conservation de l'énergie, nous pouvons écrire l'interrelation entre ces trois interactions énergétiques selon l'équation suivante (10) :

$$E_I(\gamma) = E_R(\gamma) + E_A(\gamma) + E_T(\gamma) \dots \dots \dots (10)$$

Où :

- $E_I(\gamma)$: Energie incidente
- $E_R(\gamma)$: Energie réfléchie
- $E_A(\gamma)$: Energie absorbé
- $E_T(\gamma)$: Energie transmise

Toutes les composantes de l'énergie incidente sont fonction de la longueur d'onde.

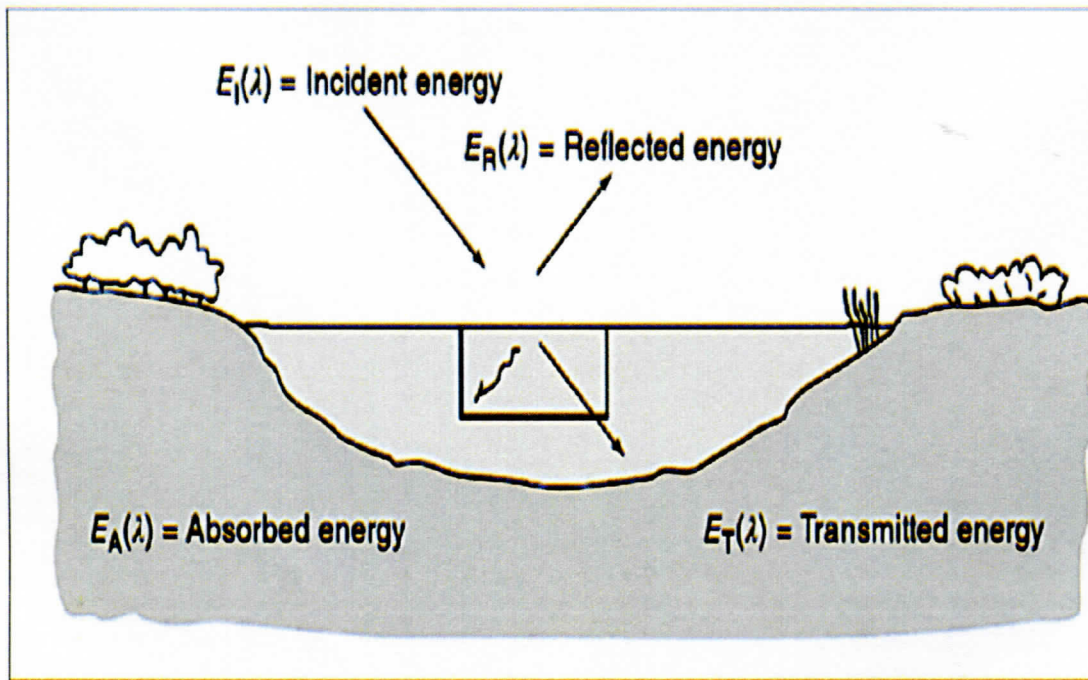


Figure 27 : Les bases de l'interaction de l'énergie électromagnétique et les caractéristiques de la surface terrestre (Lillesand et al. 2015)

La proportion de chaque interaction dépendra de la longueur d'onde de l'énergie, ainsi que de la nature et des conditions de la surface. La télédétection s'intéresse au rayonnement réfléchi par une cible. On distingue deux types de réflexions : la réflexion spéculaire et la réflexion diffuse. La réflexion est dite spéculaire lorsque le rayonnement réfléchi par la surface l'est dans une seule et même direction (Fig. 28).

La réflexion spéculaire se produit uniquement sur des surfaces lisses, dont les aspérités ont une taille inférieure à la longueur d'onde du rayonnement incident. Dans le cas de la réflexion diffuse, le rayonnement est réfléchi dans toutes les directions à cause de l'hétérogénéité du milieu (Fig. 29). Elle se produit généralement sur des surfaces rugueuses.



Figure 28 : Réflexion spéculaire (CCT, 1998)

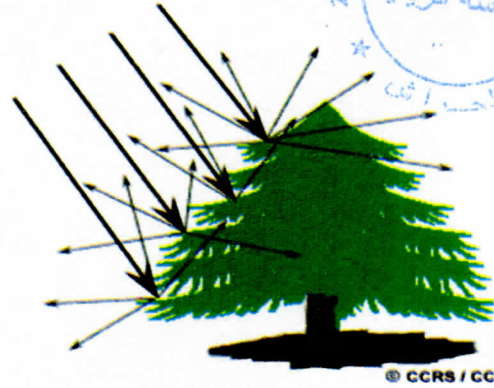


Figure 29 : Réflexion diffuse (CCT, 1998)

6. Spectre de réflectance ou signature spectrale

En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible (objet) avec une variété de longueur d'onde du rayonnement, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet qui permettra son identification sur les images satellitaires (Fig. 30) (UVED, 2008). Un objet peut être une feuille, un arbre, un peuplement forestier ou la forêt dans son ensemble etc. La réflectance correspond au rapport de l'intensité du rayonnement réfléchi par une surface à celle du rayonnement incident. C'est donc une grandeur sans dimension, qu'on exprime généralement en pourcentage.

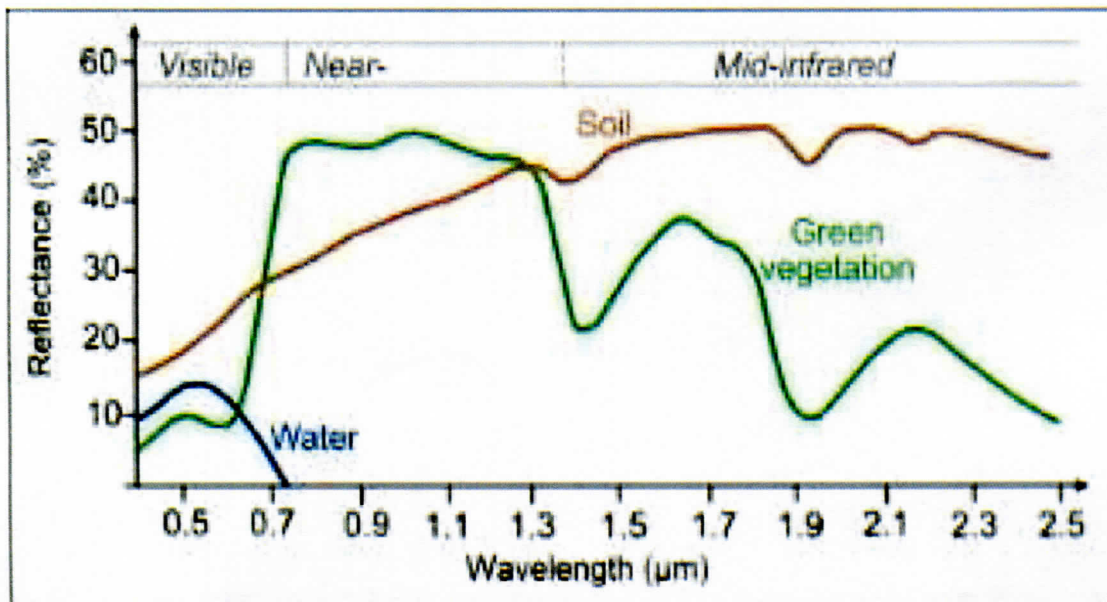
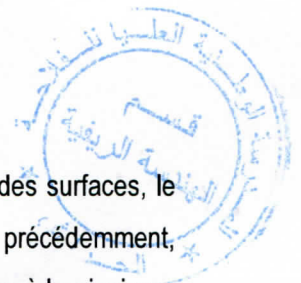


Figure 30 : Réflectance de l'eau, du sol et de la végétation dans les différentes longueurs d'ondes (source : seos-project.eu).



En fonction de la nature et des caractéristiques intrinsèques des objets et des surfaces, le rayonnement incident interagira avec la cible selon l'une ou l'autre des propriétés citées précédemment, ou de manière générale selon une combinaison de ces propriétés. Chaque surface possède ainsi une signature spectrale (quantité d'énergie émise ou réfléchiée en fonction de la longueur d'onde) qui lui est propre et qui permettra son identification sur les images satellitaires.

L'examen de la figure 30 met en évidence que les trois courbes sont assez proches dans le spectre visible. Il est observé une réflectance assez similaire pour l'eau, le sol et la végétation. Pour distinguer les trois types de couverture terrestre, nous devons examiner les grandes longueurs d'ondes, en l'occurrence dans la plage infrarouge du spectre électromagnétique.

En ce qui concerne les sols, la signature spectrale augmente au fur et à mesure qu'on se déplace vers les grandes longueurs d'onde (spectre infrarouge). Les seules discontinuités observées correspondent aux bandes d'absorption de l'eau, à 1,4 μm et 1,9 μm . Elles sont liées à la fois à la composition minérale et organique des sols, de leur teneur en eau et de leur rugosité. Les propriétés optiques des sols peuvent présenter une variabilité considérable (Fig. 31).

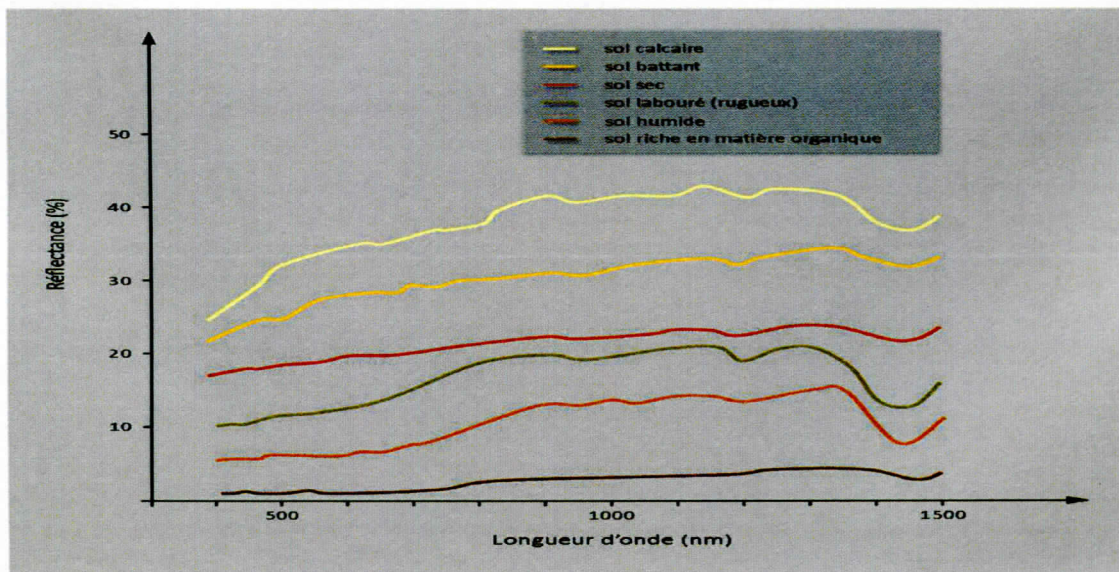


Figure 31 : Signatures spectrales pour différents types de sols (source : UVED, 2008)

Une augmentation de l'humidité du sol entraîne une baisse de la réflectance sur tout le spectre, de même qu'un accroissement de la rugosité (obscurcissement par effet d'ombre). Toutefois, il faut noter que l'étude des propriétés spectrales des sols est particulièrement complexe car elle doit tenir compte de la nature hétérogène du sol qui contient à la fois des matières minérales et organiques, mais aussi une composante liquide ; tous ces éléments vont influencer la réflexion du rayonnement.



La signature spectrale de la végétation est très caractéristique. Les propriétés spectrales des couverts végétaux dépendent à la fois de la nature de la végétation qui les compose, de leur état physiologique, de leur teneur en eau (lien interne propriétés optiques des feuilles), mais aussi du sol sous-jacent qui influera d'autant plus la mesure spectrale que la végétation sera clairsemée (Fig. 32).

La réflectance mesurée au niveau du capteur satellitaire prend en considération à la fois des paramètres de structure de la canopée, comme l'indice de surface foliaire ou l'angle d'inclinaison des feuilles, et l'organisation spatiale des peuplements, leur agencement, leur densité, ainsi que le taux de recouvrement du sol selon le stade phénologique.

Lorsque la végétation est peu couvrante, la réponse spectrale des plantes est affectée par la réflectance des sols. Les interactions du rayonnement entre la végétation et le sol sont si complexes qu'il est très difficile de corriger l'influence perturbatrice du sol. C'est pourquoi, certains indices tels que l'indice de surface foliaire (LAI) et l'indice de répartition angulaire des feuilles (LAD) ont été suggérés pour corriger l'influence du sol.

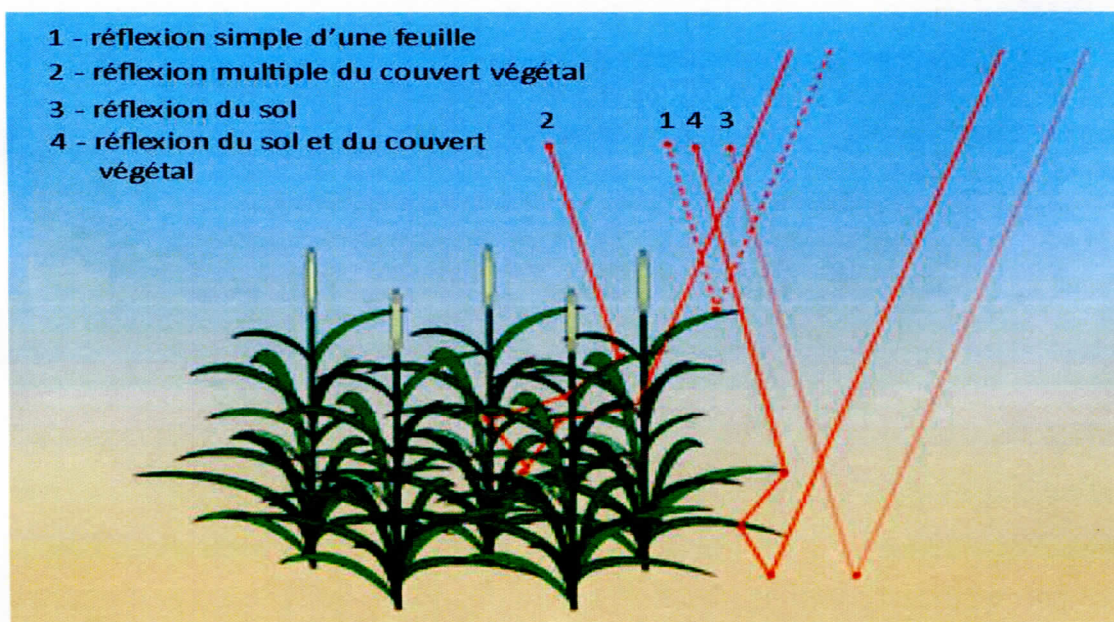


Figure 32 : Signature spectrale de la végétation (source : UVED, 2008)

La réflectance des surfaces d'eau libre est conditionnée bien évidemment par la concentration des substances dissoutes et en suspension. Globalement, la réflectance des surfaces d'eau libre décroît rapidement du visible à l'infrarouge. On peut admettre qu'elle est de quelques % dans le visible et pratiquement nulle dans l'infrarouge proche et moyen (Fig. 30).

7. Image numérique et visualisation

C'est une matrice de valeurs (comptes numériques) comprises entre 0 et 255. Chaque pixel est codé par un numéro de colonne et de ligne. La taille d'un mémoire correspond aux nombres de colonnes * nombres de lignes. La taille du segment ci-contre (les valeurs sont codées sur 1 octet = 8 bits) :

6 colonnes * 6 lignes = 32 octets.

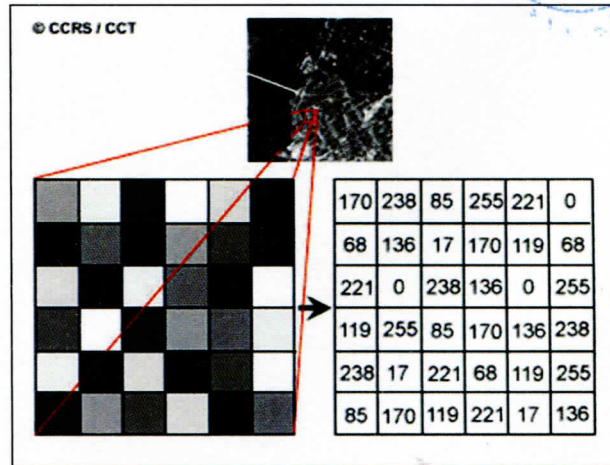
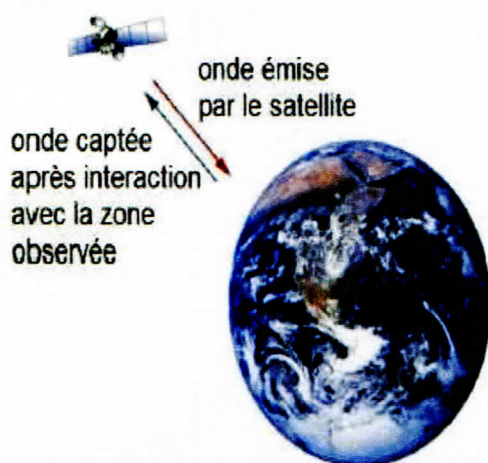


Figure 33 : Image numérique (source : CCT, 1998)

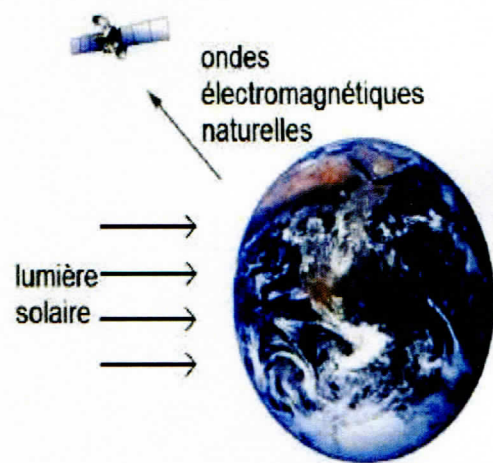
8. Détection passive et active

En télédétection passive, seules les sources naturelles de rayonnement (Soleil, Terre...) sont mises en jeu et le capteur est un simple récepteur, « passif ». Les images des satellites SPOT, NOAA ou Météosat appartiennent au domaine de la télédétection passive.

En télédétection active, une source de rayonnement, artificielle, est embarquée à bord du satellite. Son émission s'effectue en direction des objets observés qui renvoient un signal que détecte le capteur du satellite. Les images radar appartiennent au domaine de la télédétection active (Fig. 34).



Principe de la télédétection active



Principe de la télédétection passive

Figure 34 : Détection passive et active (Source : <http://www.chimix.com/an14>).



Chapitre III

LES SATELLITES DE TELEDETECTION DES

RESSOURCES TERRESTRES



Chapitre III. LES SATELLITES DE TELEDETECTION DES RESSOURCES TERRESTRES

L'objectif de ce chapitre est de présenter les éléments constituant les systèmes de télédétection depuis les vecteurs, les capteurs jusqu'aux principaux satellites optiques d'observation de la terre.

1. Éléments constituant les systèmes de télédétection

Un système de télédétection est un ensemble comprenant un vecteur, un ou plusieurs capteurs, et un ensemble de moyens de contrôle du système et d'exploitation des données acquises (Girard and Girard, 2010).

1.1. Les vecteurs

Il s'agit d'un véhicule aérien (avion, voire un ballon) ou spatial (satellite) sur lequel sont embarqués des appareils de mesure (capteurs) et d'enregistrement des données acquises sur les objets observés au sol. On distingue des satellites héliosynchrones et géostationnaires.

Un satellite géostationnaire orbite à une altitude de 36 000 km. Sa vitesse de rotation étant identique à celle de la Terre, il se trouve toujours au-dessus du même point sur la Terre et fournit presque en continu une image d'une zone donnée de la Terre (Fig. 35).

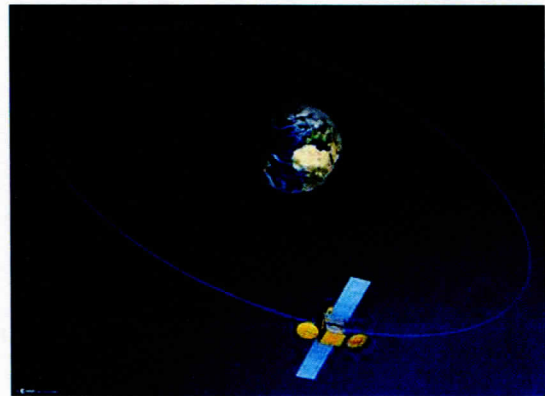


Figure 35 : Orbite géostationnaire

Un satellite héliosynchrone est un satellite dont le plan orbital et la ligne Terre-Soleil forme toujours un angle constant (Fig. 36). Une telle orbite permet de couvrir l'ensemble de la surface terrestre dans un intervalle de temps donné (à l'exception des pôles). Cet intervalle peut aller de quelques jours à presque un mois. De passer au-dessus du même territoire à la même heure locale. Il s'agit d'une orbite polaire (qui passe près du pôle), basse (entre 600 et 1000 km) et de périodicité courte (décrite toutes les 96 à 110 minutes).

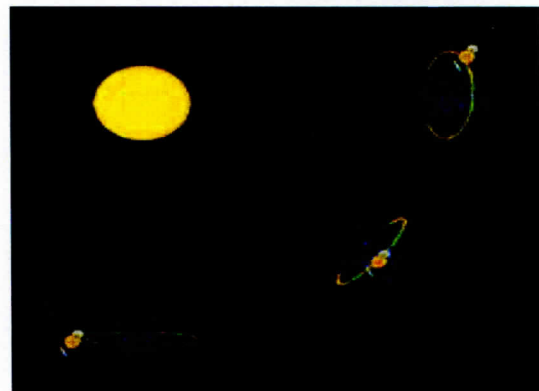


Figure 36 : Orbite héliosynchrone

1.2. Les capteurs

Ce sont des instruments de mesure permettant d'acquérir et d'enregistrer des données sur les objets observés à la surface de la Terre pour différentes régions du spectre. Chacune de ces régions donne lieu à une image, appelées alors canal ou bande. On distingue (Fig. 37) :

- **Des capteurs passifs** qui enregistrent uniquement l'énergie solaire réfléchie ou le rayonnement propre émis par les objets.
 - Photographiques
 - Optico-électroniques
 - Spectromètres d'images et d'antenne (radiomètres de microondes).
- **Des capteurs actifs** qui ont à la fois un rôle d'émission et de réception de l'énergie réfléchie par la cible.
 - Radar
 - Lidar (Technologie Laser)

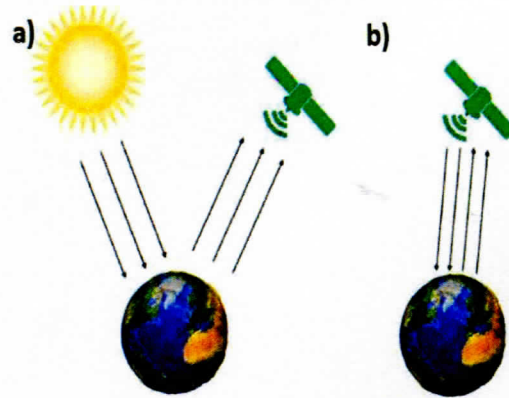


Figure 37 : Capteurs passifs (a) et capteurs actifs (b)
(Source : www.gisresources.com)

1.2.1. Les composantes d'un capteur

- Un système optique: conditionne la limite de résolution spatiale, définit la géométrie, les caractéristiques optiques et l'angle de visée du système.
- Un filtre spectral: conditionne le domaine spectral de mesure.
- Un détecteur: commande à la fois la limite de résolution radiométrique et la limite de résolution spectrale, transforme le signal physique reçu en une forme de données (voltage, réaction photochimique) qui deviennent analysables mathématiquement ou perceptibles à l'œil humain (codage).

1.2.2. Les résolutions d'un capteur

L'émission de radiation (émise ou réfléchie) à partir de la surface terrestre est un phénomène continu en 4 dimensions (espace, temps, longueur d'onde et intensité). Quatre types de résolutions caractérisent un capteur, au sol ou embarqué :

- **La résolution spatiale** : elle correspond à la dimension du plus petit élément (Pixel) discernable à la surface terrestre. Elle est intrinsèquement liée à la notion de détails qu'il est possible de



distinguer dans une image de télédétection. Toutefois, plus on augmente la résolution, plus la superficie couverte par l'image est petite. Donc, ce qu'on gagne en précision, on le perd dans la vue d'ensemble. L'exemple des images du centre-ville de Berlin, Allemagne illustre bien ce concept de résolution spatiale (Fig. 38). L'image montre un quartier densément peuplé dans le centre-ville de Berlin, Allemagne.

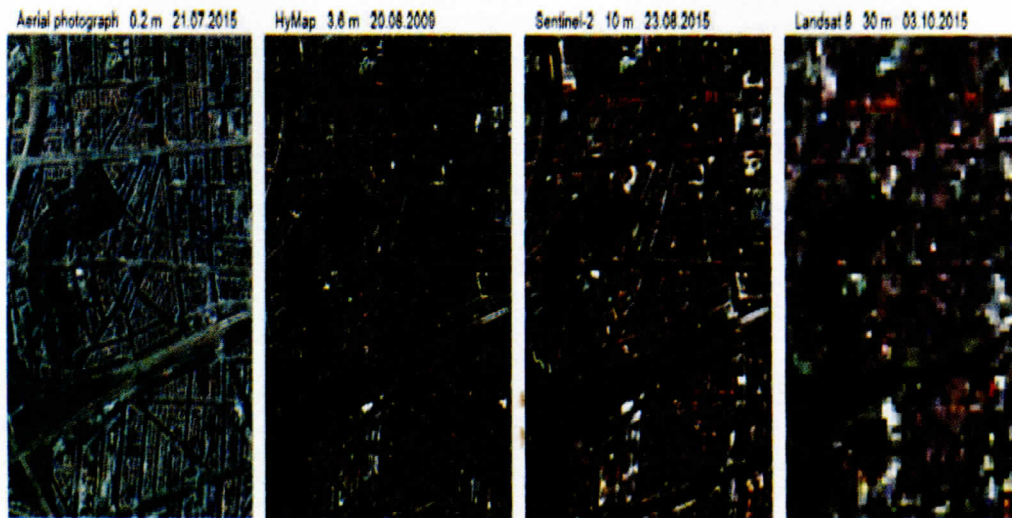


Figure 38 : Comparaison de différentes résolutions spatiales dans l'environnement bâti à l'aide de photographies aériennes (0,2 m), HyMap (3,6 m), Sentinel-2 (10 m) et Landsat-8 (30 m).

(Source : Small et al., 2018)

- **La résolution spectrale :**
la résolution spectrale correspond au nombre et caractéristiques des bandes dans lesquelles le satellite observe (Fig. 39).

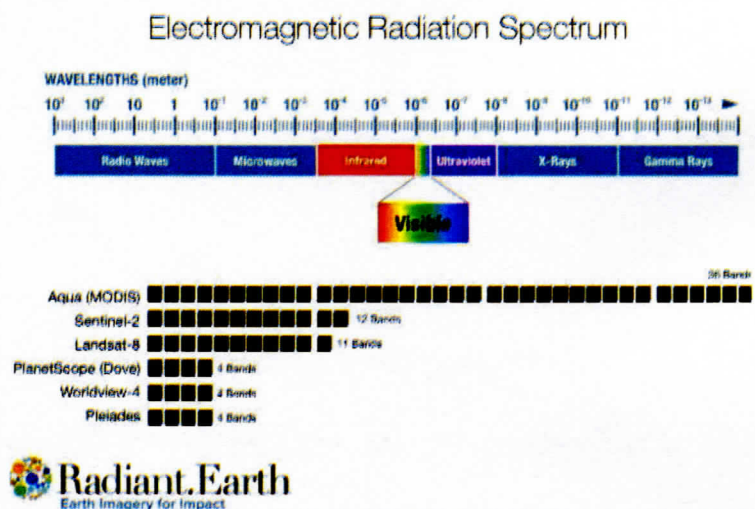


Figure 39 : Résolution spectrale



- **La résolution radiométrique**

La résolution radiométrique d'un système de télédétection décrit sa capacité à reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique. Plus la résolution radiométrique d'un capteur est fine, plus le capteur est sensible à de petites différences dans l'intensité de l'énergie reçue (Fig. 40).

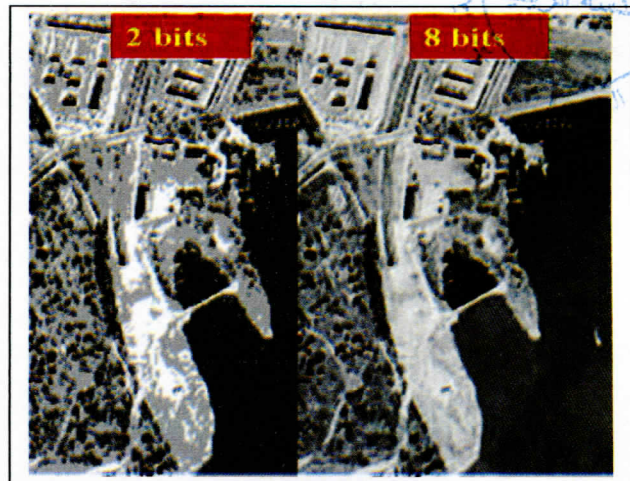


Figure 40 : Résolution radiométrique (2 bits et 8 bits)

Le nombre maximum de niveaux d'intensité disponibles dépend du nombre de bits utilisés. Par exemple, un capteur utilisant 8 bits pour enregistrer les données aura $2^8=256$ niveaux d'intensité disponibles allant de 0 à 255. Si, seulement 4 bits sont utilisés, alors seulement $2^4=16$ valeurs allant de 0 à 15 seront disponibles. La résolution radiométrique sera donc plus faible.

- **La résolution temporelle ou répétitivité** correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène (Fig. 41). Elle dépend de l'orbite et du mode de manœuvre du satellite. On parle souvent de temps de revisite où période nécessaire pour réobserver un même point de la terre. Le satellite SPOT offre la possibilité de viser un site sur commande permettant ainsi d'assurer une excellente résolution temporelle. Sans manœuvre, la résolution temporelle de SPOT est de 26 jours, 16 jours pour LANDSAT TM et 14.5 jours pour NOAA-AVHRR.

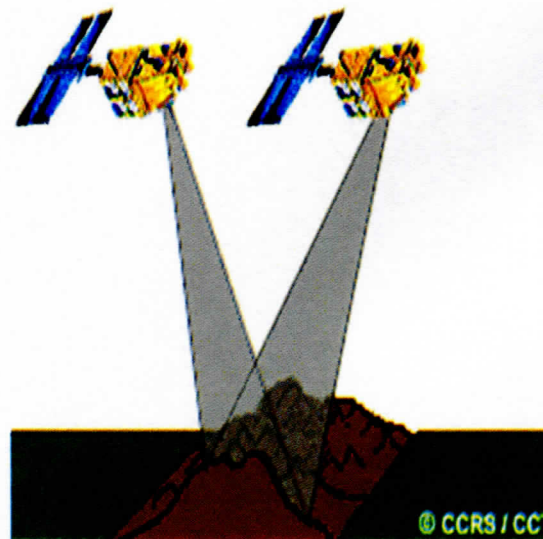


Figure 41 : Résolution temporelle (CCT, 1998)



1.2.3. La fauchée (couloir observé)

Du fait de leur altitude élevée (36 000 km), les capteurs des satellites géostationnaires observant de larges surfaces ne sont pas en mesure de fournir des images détaillées de notre planète (Fig. 42), au contraire des capteurs embarqués sur des satellites en orbite plus basse (par exemple les satellites héliosynchrones, altitude de 750 km à 900 km) fournissant des images détaillées mais sur des régions plus petites.

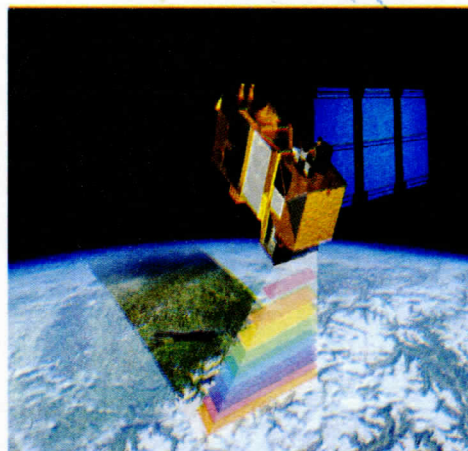


Figure 42 : Fauchée du satellite Sentinel-2A

Les tableaux I, II et III présentent les caractéristiques des principaux capteurs et satellites opérationnels présents et à venir.

Tableau I. Les caractéristiques des principaux capteurs satellitaires (très haute résolution)

Satellite	Panchromatique Multibande	Résolution spatiale	Résolution spectrale	Fauchée	Produits dérivés (liste non exhaustive)
Satellite à très haute résolution spatiale					
SPOT 5	Panchromatique Multibande	2,5 m et 5 m 10 m	Optique	60*60 km 60*120 km	Cartes (géologiques, pédologiques, occupation des sols, de vulnérabilité), spatiocartes, plan d'information (réseau hydrographique, routier, chemin de fer), modèle numérique de terrain (MNT).
IKONOS 2	Panchromatique Multibande	1m 4 m	Optique	11*11 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
QUICKBIRD	Panchromatique Multibande	0,60 et 0,7m 2,4 et 2,88 m	Optique	16,5 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
ORBITVIEW 3	Multibande	1 et 4 m	Optique	8*8 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
HELIOS 2A		30 cm	Optique	Confidentiel	Défense
Pleiades (2008-2009)	Panchromatique Multibande	0,7 m 2,8 m	Optique	21 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
EROS A	Panchromatique	1 - 1,8 m	Optique	12,5*12,5 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
ROCSAT-2	Panchromatique Multibande	2 - 5 m 8 - 20 m	Optique	24*24 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information, MNT
IRS-P6	Multibande	5,8 m 23 m 60 - 70 m	Optique	24 à 70 km 140 km 740 km	Cartes, spatiocartes, plans d'information
RADARSAT-1		de 3 à 100 m	Radar	20 à 500 km	Plans d'information, MNT, cartes (humidité des sols, zones inondées)



Tableau II. Les caractéristiques des principaux capteurs satellitaires (résolution moyenne)

Satellite à résolution spatiale moyenne

ERS 1,2		25 m	Radar	100 km	Produits de cohérence permettant de réaliser (dériver) des cartes d'occupation des sols (particulièrement en zone tropicale), géologiques. Cartes d'humidité des sols, cartes des zones inondées, MNT.
SPOT 1, 2, 3 et 4	Panchromatique	10 m	Optique	60*60 km	Cartes, spatio-cartes, MNT, plans d'information
	Multibande	20 m		60*80 km	
LANDSAT 7 (ETM)	Panchromatique	15 m	Optique	185*170 km	Cartes, spatio-cartes, plans d'information
	Multibande	30 m			
LANDSAT 4, 5	Multibande	30 et 80 m	Optique	185 km	Cartes, spatio-cartes, plans d'information
ENVISAT (ASAR)		10 à 1 000 m	Radar	15*5 km à 405*405 km	Cartes (géologiques, topographiques, humidité des sols, zones inondées, pollution marine, dynamique côtière, glaciologie...), plans d'information, MNT
TERRA (ASTER)	Multibande	de 15 à 90 m	Optique	60 km	Cartes, spatio-cartes, plans d'information, MNT

Tableau III. Les caractéristiques des principaux capteurs satellitaires (basse résolution)

Satellite à basse résolution spatiale

SPOT (VEGETATION)	Multibande	1 km	Optique	2*2 km	Produits de synthèse (synthèse journalière, décadaire), indice de végétation (NDVI)
METEOSAT	Multibande	2,25 et 4,5 km	Optique	Hémisphère	Produits météorologiques, océanographiques et géophysiques
MSG (Meteosat Second Generation)	Multibande	1 et 3 km	Optique	Hémisphère	Produits météorologiques, océanographiques et géophysiques
ENVISAT (MERIS)	Multibande	300 m	Optique	1 150 km	Produits dérivés des mesures de la couleur des océans (cycle du carbone, gestion des zones de pêche, gestion des zones côtières...)
SMOS (Fev 2007)		35 et 50 km	Radar	1 000 km	Cartes (humidité des sols, salinité des océans)
PARASOL	Multibande	6*7 km	Optique	2 400 km	Cartes du bilan radiatif, observation des nuages



2. Les principaux satellites optiques d'observation de la terre.

2.1. Le programme LANDSAT

- Programme le plus ancien des Etats Unis (1972) administré par la NASA.
- 8 satellites lancés, Landsat 7 et 8, sont actuellement opérationnel (Fig. 43).

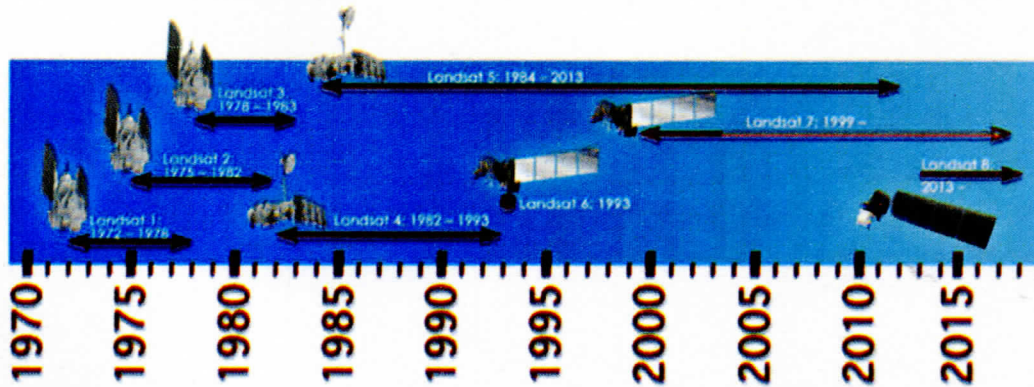


Figure 43 : Les principaux satellites Landsat (source : fr.wikipedia.org/wiki/Programme Landsat)

-Première génération (caméra Vidéo RBV)

- LANDSAT 1 : 23 juillet 1972
- LANDSAT 2 : 22 janvier 1975
- LANDSAT 3 : 5 mars 1978

Orbite héliosynchrone phasée

-Seconde génération (MSS : Multi Spectral Scanner ; TM : Thematic Mapper)

- LANDSAT 4 : 16 juillet 1982
- LANDSAT 5 : 1 mars 1984
- LANDSAT 6 : 5 octobre 1993 (échec)

Orbite héliosynchrone phasée

-Landsat 7

- Date de lancement : 15 avril 1999
- Durée de vie initialement prévue : 5 ans, Landsat 7 devrait poursuivre sa mission jusqu'en 2017.

Caractéristiques orbitales de Landsat 7 :

Altitude : 705 km

Inclinaison : 98 degrés

Orbite : quasi polaire héliosynchrone (horaire de passage à 45° latitude nord : 09h30)



Période de révolution : 99 minutes

Durée d'un cycle : 16 jours

L'instrument de prise de vue de Landsat 7 est l'Enhanced Thematic Mapper (ETM)

-Landsat 8

- Date de lancement : 11 février 2013 (Fig. 44)
- Durée prévue de service : 10 ans (2023)

Les caractéristiques orbitales de Landsat 8 sont les mêmes que celles de Landsat 7 :

- Altitude : 705 km
- Inclinaison : 98 degrés
- Orbite : quasi polaire héliosynchrone (horaire de passage à 45° latitude nord : 09h30)
- Période de révolution : 99 minutes
- Durée d'un cycle : 16 jours

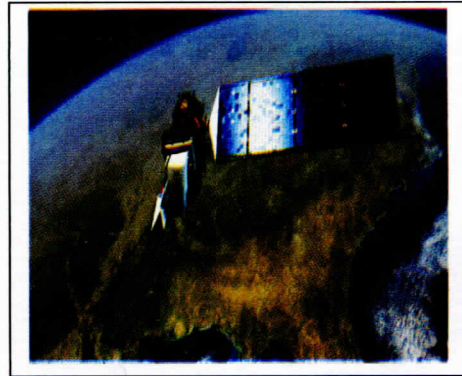


Figure 44 : Landsat 8

Landsat 8 comporte deux instruments de prise de vue :

- OLI (Operational Land Imager)
- TIRS (Thermal Infrared Sensor)

La fauchée de prise de vue est de 185 km.

Les bandes spectrales des principaux instruments du Landsat 8 sont présentées dans le tableau IV.

Tableau IV. Les bandes spectrales des instruments OLI et TIRS

Operational Land Imager (OLI)			Bande Thermique		Bande panchromatique	
Bande multispectrales			Résolution : 60 m.		Résolution : 15 m.	
Résolution : 30 m.			Numéro de bande	Longueur d'onde	Numéro de bande	Longueur d'onde
1	Visible	0.45 - 0.52 μm	6	10.40 - 12.50 μm	8	0.52 - 0.90 μm
2	Visible	0.52 - 0.60 μm				
3	Visible	0.63 - 0.69 μm				
4	Infra-rouge	0.77 - 0.90 μm				
5	Infra-rouge	1.55 - 1.75 μm				
7	Moyen infra-rouge	2.08 - 2.35 μm				
Thermal Infrared Sensor (TIRS)						
Résolution : 100 m.						
Numéro de bande	Spécire	Longueur d'onde				
10	Infra-rouge thermique	10.5 - 11.19 μm				
11	Infra-rouge thermique	11.5 - 12.51 μm				



2.2. Le programme SPOT (satellite pour l'observation de la terre)

Il s'agit d'une famille de satellites de télédétection français civils d'observation de la Terre développés par l'agence spatiale française, le CNES (Centre national d'études spatiales). Les cinq premiers exemplaires sont lancés entre 1985 et 2002. Les images fournies par les satellites sont commercialisées par Astrium. SPOT-6 est lancé en 2012 et SPOT-7 en 2014.

-Première génération (SPOT 1, 2 et 3)

Prévus initialement pour des missions de 3 ans.

- SPOT 1 : 22 février 1986 / 17 novembre 2003
- SPOT 2 : 22 janvier 1990 / juillet 2009
- SPOT 3 : 26 septembre 1993 / novembre 1996

Charge utile :

- Deux instruments optiques identiques (HRV - Haute Résolution Visible) ;
- Enregistreurs des données (sur bande magnétique) ;
- Système de transmission des images vers des stations de réception au sol.

Caractéristiques orbitales :

- Altitude : 822 km
- Inclinaison : 98 degrés
- Orbite : quasi polaire héliosynchrone (horaire de passage à 45° : 10h30)
- Période de révolution : 101 minutes
- Durée d'un cycle : 26 jours

Les caractéristiques spectrales du SPOT1, 2 et 3 sont présentées dans le tableau V.

Capteurs HRV

Tableau V. Caractéristiques spectrales du SPOT 1, 2 et 3.

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
XS-multispectral	XS1	0,50 - 0,59 μm (vert)	20m x 20m
	XS2	0,61 - 0,68 μm (rouge)	20m x 20m
	XS3	0,78 - 0,89 μm (proche IR)	20m x 20m
P-panchromatique	PAN	0,50 - 0,73 μm	10m x 10m

-Deuxième génération (SPOT 4)

Résolution des images de l'instrument HR VIR (haute résolution visible et infra-rouge), il a deux instruments identiques :

-10 mètres en panchromatique (0,51-0,73 μm).



Dr. Abdelkader LARIBI

-20 mètres en multispectral :

- Bande 1 : vert (0,50–0,59 μm).
- Bande 2 : rouge (0,61–0,68 μm).
- Bande 3 : proche infrarouge (0,78–0,89 μm).
- Bande 4 : moyen infrarouge (MIR) (1,58–1,75 μm).

Charge utile :

- Deux instruments optiques :
 - HR VIR (Haute Résolution Visible et Infra Rouge) ;
 - VEGETATION (Programme cofinancé par l'Union européenne, la Belgique, la France, l'Italie et la Suède);
- Enregistreurs des données (sur bande magnétique très performante);
- Système de transmission des images vers les stations de réception au sol.
- Mis en orbite le 26 mars 1998, sa durée de vie prévue était de 5 ans.

-SPOT 5

Spot 5 a été lancé le 4 mai 2002, pour une durée de vie nominale de 5 ans (fin de l'exploitation commerciale le 31 mars 2015). Les bandes spectrales de SPOT 5 sont les mêmes que celles de SPOT 4 (Tableau VI). Pour la bande panchromatique par contre, les valeurs ont été fixées à celles qui étaient utilisées pour SPOT 1, 2 et 3. Cette caractéristique, demandée par un grand nombre d'utilisateurs, assurait une continuité avec les images acquises depuis SPOT 1.

Tableau VI. Caractéristiques spectrales du SPOT 5

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
Multispectral	B1	0,50 - 0,59 μm (vert)	10m x 10m
	B2	0,61 - 0,68 μm (rouge)	10m x 10m
	B3	0,78 - 0,89 μm (proche IR)	10m x 10m
	SWIR	1,58 - 1,75 μm (moyen IR)	20m x 20m
M - monospectral	PAN	0,51 - 0,73 μm	5m x 5m (ou 2,5m en supermode)

Deux types de capteurs sont embarqués à bord du SPOT5 :

- Capteurs HRS (Haute résolution stéréoscopique)
- Capteur VEGETATION 2



-SPOT 6 et 7

SPOT 6 et 7 sont deux satellites identiques (Fig. 45). Bien plus légers que SPOT 5 (720 kg par rapport à 3 tonnes), leurs performances n'en sont pas pour autant moins bonnes. L'instrument imageur à leur bord offre en effet le même champ d'observation de 60 km, mais une résolution nettement meilleure, puisqu'on arrive à 1,5 m. Leur espérance de vie est également améliorée puisqu'ils sont conçus pour opérer 10 ans. La continuité du système devrait donc être assurée au moins jusqu'en 2024.

Les bandes spectrales sont sensiblement différentes de celles de leurs prédécesseurs : la bande bleue fait en effet son apparition en lieu et place de la bande SWIR, et la bande panchromatique est un peu plus large.

- Altitude: 694 km
- Inclinaison: 98,79 degrés
- Orbite: polaire héliosynchrone
- Période de révolution: 98,79 minutes
- Durée d'un cycle: 26 jours
- Champ de prise de vue: 60 x 60 - bande de max 600 km de long



Satellites : Mise en orbite

Figure 45 : SPOT 7 (Airbus Defence & Space)

- SPOT 6: 09/09/2012 – opérationnel
- SPOT 7: 30/06/2014- opérationnel

Les satellites SPOT 6 et 7 comportent un capteur NAOMI (New AstroSat Optical Modular Instrument)

Le système optique est constitué d'un instrument regroupant 2 télescopes Korsch identiques capables d'enregistrer simultanément en mode panchromatique à 1,5 m de résolution et en mode multispectral à 6 m de résolution (Tableau VII), avec un champ d'observation de 60 km.

Tableau VII. Caractéristiques spectrales du SPOT 6 et 7

Mode	Bande	Bande spectrale	Résolution
Multispectral	Bleu	0,450 - 0,520 μm	6m x 6m
	Vert	0,530 - 0,590 μm	6m x 6m
	Rouge	0,625 - 0,695 μm	6m x 6m
	Proche Infrarouge	0,760 - 0,890 μm	6m x 6m
Monospectral	PAN	0,450 - 0,745 μm	1,5 m x 1,5 m



2.3. Le programme COPERNICUS



Copernicus est le programme de la Commission européenne d'observation de la Terre à l'échelle de la Planète. Ce programme unique au monde, alors appelé GMES, a démarré à Baveno, en Italie, lors d'une conférence tenue en mai 1998 où il a été décidé de doter l'Europe d'un accès continu, indépendant et fiable aux données d'observation de la Terre pour les applications environnementales (Fig. 46).

Figure 46 : Programme Copernicus (Airbus Defence & Space)

Aujourd'hui (janvier 2020), Copernicus compte six familles de satellites et instruments, et d'autres sont à l'étude avec de nouveaux services à l'horizon 2025.

- **Sentinel 1** : imagerie radar de jour et de nuit, chargé de l'observation des terres émergées et des océans ;
- **Sentinel 2** : imagerie optique à haute résolution optique, chargé de l'observation des terres émergées ;
- **Sentinel 3** : imagerie optique à résolution modérée, chargé de l'observation des océans et des surfaces terrestres par optique multispectrale, infrarouge et altimétrie ;
- **Sentinel 4** : suivi atmosphérique GEO, deux instruments embarqués à bord de Météosat de troisième génération. Un spectromètre UV et un sondeur IR chargés de l'étude de la pollution atmosphérique depuis l'orbite géostationnaire. Mission intermédiaire en attendant l'arrivée de Sentinel 5 ;
- **Sentinel 5** : suivi atmosphérique LEO, instrument Tropomi chargé de l'étude de la chimie de l'atmosphère depuis l'orbite basse. Embarqué à bord du satellite Metop NG ;
- **Sentinel 6** : famille de satellites altimétriques chargée de suivre au jour le jour et en temps réel, l'élévation du niveau des mers et océans. Relais des satellites Jason.

2.3.1. Satellite Sentinel 2 (satellite d'observation de la terre)

Les satellites Sentinel-2 constituent une des composantes spatiales de ce programme qui comprend également les Sentinel-1 (observation radar tout temps) et Sentinel-3. Ils fournissent l'imagerie

optique haute résolution permettant ainsi l'observation des sols (utilisation des sols, végétation, zones côtières, fleuves, etc.) ainsi que le traitement des situations d'urgence (catastrophes naturelles...).

Principales caractéristiques des images

- Haute résolution : 10 m/20 m/ 60m.
- Grande couverture : toutes les terres, 290 km de fauchée.
- Fréquente revisite : 5 jours avec 2 sat., angle de prise de vue constants.
- Orbite : héliosynchrone à 786 km
- Richesse spectrale : 13 bandes spectrales, dont le Moyen Infra Rouge.
- Pointage latéral d'urgence : accès à n'importe quel point du globe en 2 jours maximum.
- Durée de vie : 7,25 ans extensible à 12 ans.

2.4. Le satellite IKONOS

C'est un satellite d'observation de la Terre américain à vocation commerciale (Fig. 47). Ce satellite offre une résolution d'un mètre en panchromatique et de quatre en multispectrale. On distingue :



-IKONOS-1 :

Échec au lancement le 27/04/1999

-KONOS-2 :

Lancement réussi le 24/09/1999

Figure 47 : IKONOS-2 (<https://directory.eoportal.org/>)

- Orbite : quasi-polaire, héliosynchrone
- Poids : 720 kg.
- Altitude : 682 km
- Revisite : < 3 jours
- Fauchée : 11 km
- Angle de visée : +/- 51°

2.5. Satellite QUICKBIRD

Il s'agit un satellite d'observation de la Terre haute résolution commercial, lancé en 2001 par un lanceur Delta II à partir de la base de Vandenberg en Californie (Fig. 48).

Caractéristiques orbitales :

- Altitude : 450 à 482 km
- Inclinaison : 97 degrés
- Orbite : circulaire quasi-polaire héliosynchrone
- Période de révolution : 93 minutes
- Vitesse : 7,1 km/s
- Heure locale du nœud descendant : 10h30
- Durée d'un cycle : 1 à 4 jours (en fonction de la latitude)



Figure 48 : Satellite QUICKBIRD
(<http://eoedu-off.belspo.be>)

Tableau VIII: Caractéristiques spectrales du Quickbird

Résolution	Pan: 65 cm (nadir) to 73 cm (20° off-nadir)
	MS: 2.62 m (nadir) to 2.90 m (20° off-nadir)
Bandes de l'image	Pan: 450-900 nm
	Blue: 450-520 nm
	Green: 520-600 nm
	Red: 630-690 nm
	Near IR: 760-900 nm

La faible altitude est un inconvénient : durée de vie plus courte car l'atmosphère est plus dense et par conséquent il subit plus de frottements.

L'activité de Quickbird a été stoppée le 27 janvier 2015, la dernière image a été prise le 17 décembre 2014.



2.6. Satellite ORBVIEW-2

Orbview-2 (parfois appelé Seastar) fait partie de la flotte de satellites de **Geoeye** (anciennement Orbimage) (Fig. 49). Il a été lancé le 01/08/1997 et est toujours opérationnel. Il transporte l'instrument SeaWiFS de la NASA qui a été conçu pour l'étude des océans. Il permet des estimations de la teneur globale en chlorophylle et de l'eutrophisation de l'eau ainsi que l'établissement d'un index de végétation normalisé global.

- Altitude: 705 km
- Inclinaison: 98,2 degrés
- Orbite: polaire héliosynchrone
- Période de révolution: 98 minutes
- Capacité de revisite: 1 jour



Figure 49 : Satellite ORBVIEW-2

(Source: <https://directory.eoportal.org>)

Capteur SeaWiFS (Sea Viewing Wide Field of View Sensor)

Ce capteur optique multispectral recueille sur une base quotidienne des images couleurs de la surface terrestres et des océans. L'utilisation des différentes bandes spectrales (tableau IX) donne des images permettant d'étudier, entre autre, les planctons et sédiments marins. Les données Orbview sont entre autres utilisées par les navires commerciaux pour détecter les conditions favorables de pêche.

Tableau IX. Caractéristiques spectrales du satellite ORBVIEW-2

Bande	Bande spectrale	Résolution	Utilisation
1	0,402 - 0,422 μm (violet)	1 x 1 km	
2	0,433 - 0,453 μm (violet-bleu)	1 x 1 km	chlorophylle
3	0,480 - 0,500 μm (bleu)	1 x 1 km	autres pigments
4	0,500 - 0,520 μm (vert)	1 x 1 km	
5	0,545 - 0,565 μm (vert)	1 x 1 km	chlorophylle
6	0,660 - 0,680 μm (rouge)	1 x 1 km	diffraction sous la surface
7	0,745 - 0,785 μm (proche IR)	1 x 1 km	correction atmosphérique
8	0,845 - 0,885 μm (proche IR)	1 x 1 km	correction atmosphérique



La couverture à large champ (2 800 km) permet également une utilisation de routine dans les opérations navales, la surveillance de l'environnement ou les estimations de production agricole. Satellite: OrbView 2 (01/08/1997 - opérationnel).

2.7. Satellite NOAA

Le NOAA exploite deux programmes de satellites : les satellites opérationnels environnementaux sur orbite polaire (POES) et les satellites environnementaux opérationnels sur orbite géostationnaire (GOES).

Le NOAA POES constitue la cinquième génération de satellites météorologiques polaires de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) (Fig. 50). Ces satellites font partie intégrante du programme de la NOAA développé en partenariat avec la NASA, et l'organisation européenne EUMETSAT qui fournit les satellites MetOp. Cinq satellites de cette série ont été lancés entre 1998 et 2009. Quatre d'entre eux sont toujours opérationnels depuis début 2015. Ils sont en cours de remplacement par Suomi NPP (lancé en 2011) et les satellites Joint Polar Satellite System.



Figure 50 : Satellite NOAA (fr.wikipedia.org)

Les satellites NOAA fonctionnent en binômes sur des orbites polaires opposées, de manière à assurer une couverture totale de la Terre avec une mise à jour au moins toutes les 6 heures. En effet, une même région est survolée 4 fois par jour, en matinée et en soirée par le satellite de numéro pair, de nuit et en début d'après-midi par le satellite de numéro impair. Ces satellites permettent le suivi, à l'échelle globale, de l'étendue des glaces et surfaces enneigées, des températures de surface de l'eau, des profils verticaux de températures atmosphériques et d'humidité.

-Caractéristiques NOAA-15 à 19

- Altitude : 807 - 870 km
- Inclinaison : 98,5° - 99°
- Orbite: quasi-polaire, héliosynchrone
- Période de révolution : 102 minutes
- Capacité de revisite : 1 jour



Parmi les capteurs embarqués à bord du satellite on retrouve le **Capteur AVHRR/3** (Advanced Very High Resolution Radiometer). Le radiomètre à balayage AVHRR est caractérisé par un champ d'observation très large (Tableau X). Sa fauchée est de 2940 km et sa résolution de 1 km dans l'IR et 0,5 km dans le visible.

L'instrument livre 2 fois par jour des images de nuages du monde entier et offre également des images fréquentes des surfaces des mers et des terres. L'instrument est particulièrement bien adapté pour l'étude de la végétation à l'échelle mondiale, par exemple pour l'étude des changements de saison. Il permet également de suivre les températures de surface des mers et l'étendue de la couche de glace.

Tableau X. Les Caractéristiques spectrales du satellite NOAA/AVHRR

Bande	Largeur de bande	Applications
1 (visible)	0,58 - 0,68 μm	Cartographie de jour des zones nuageuses et de la surface terrestre
2 (proche IR)	0,725 - 1,00 μm	Cartographie de jour des zones nuageuses et de la surface terrestre
3A (proche IR)	1,580 - 1,64 μm	Détection neige et glace
3B (IR)	3,550 - 3,93 μm	Cartographie de nuit des zones nuageuses et température de surface de la mer
4 (IR)	10,30 - 11,30 μm	Cartographie de nuit des zones nuageuses et température de surface de la mer
5 (IR)	11,50 - 12,50 μm	Température de surface de la mer

2.8. Satellites TERRA et AQUA

Terra (EOS AM-1) est une mission spatiale de la NASA placée en orbite en 1999 dont l'objectif est d'explorer les interactions entre l'atmosphère, les terres, les régions enneigées, la glace et les océans ainsi que la balance énergétique. L'objectif est de comprendre le climat de la Terre et son évolution, de cartographier l'impact de l'activité humaine et des désastres naturels sur les communautés humaines et les écosystèmes.

Terra embarque à son bord cinq instruments (MODIS, ASTER, etc) d'une masse totale de 1155 kg utilisés pour surveiller l'état de l'environnement de la Terre et l'évolution de son climat (Fig. 51).

-ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*)

Il s'agit d'une caméra qui fournit des images à haute résolution dans 14 bandes spectrales allant de la lumière visible à l'infrarouge thermique. ASTER permet de réaliser des images tridimensionnelles permettant de reconstituer la topographie de la surface.

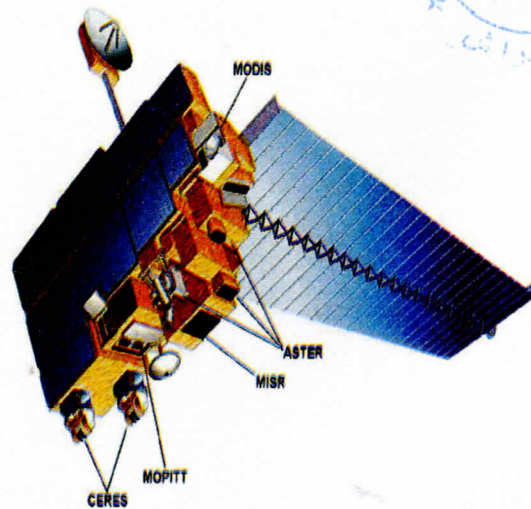


Figure 51 : Satellite TERRA

(Source: <https://fr.wikipedia.org/>)

-MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)

Il s'agit d'un imageur à résolution modérée pour mesurer les propriétés des nuages et les flux d'énergie radiative. Il note en plus les propriétés des aérosols, la couverture et le changement d'utilisation des sols ainsi que la détection des incendies et des éruptions volcaniques. Il enregistre des données dans 36 bandes spectrales allant de 0,4 à 14,4 μm avec une résolution spatiale de 250 m à 1 km.

AQUA ou EOS PM-1 est le deuxième engin spatial du programme Earth Observing System (EOS), après le satellite Terra lancé en 1999, qui étudie la surface et ses interactions avec l'atmosphère. Il a été lancé en 2002 par la NASA pour étudier le cycle de l'eau c'est-à-dire des précipitations et des processus d'évaporation. Aqua contribue à améliorer les prévisions météorologiques en mesurant les profils de température et d'humidité de l'atmosphère.

2.9. Autres capteurs : ALSAT

Le programme Alsat est une famille de satellites algériens gérés par l'Agence spatiale algérienne (ASAL) et réalisés dans le cadre de programme spatial algérien d'horizon 2020.

Le 12 juillet 2010, le satellite algérien d'observation de la Terre **Alsat-2A** a été lancé avec succès par le lanceur PSLV C-15 depuis le site de Sriharikota à Chennai (Sud -Est de l'Inde), à 04 h 53' heure algérienne. Pour rappel Alsat-2A en orbite depuis 07 ans, a fourni plus de 40.000 produits jusqu'à la fin de l'année 2016.

Dr. Abdelkader LARIBI

Alsat-2A est le deuxième satellite d'observation de la terre du programme spatial national (PSN) mis en orbite après Alsat-1 le 28 novembre 2002. C'est un satellite d'observation de la terre à haute résolution, avec une résolution spatiale **de 2.5 m en mode panchromatique**, et de **10 m en mode multispectral** couvert par les 04 bandes spectrales suivantes : le bleu, le vert, le rouge et le proche infrarouge.

Evaluation et Suivi des actions de lutte contre la désertification : Fixation des dunes par un quadrillage de brises vent identifié à partir d'une image Alsat-2A

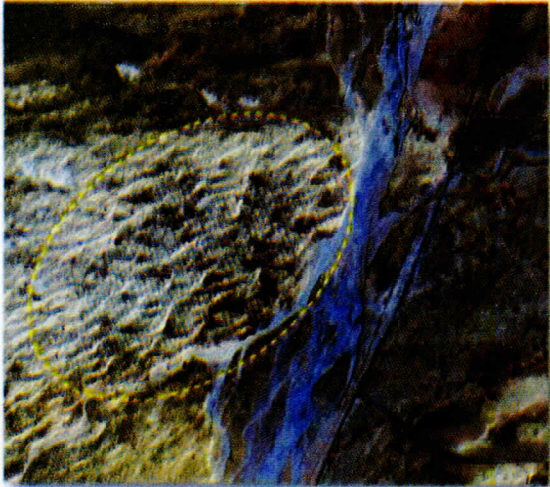


Figure 52 : Lutte contre la désertification à partir d'une image ALSAT-2A (<https://asal.dz/>)

L'exploitation des données images issues des deux satellites Alsat-2A et Alsat-2B répondent aux besoins des différents secteurs en l'occurrence la révision cartographique, le cadastre, l'environnement et l'aménagement du territoire, les ressources naturelles, l'urbanisme et les infrastructures de base (Fig. 52, 53).

Extraction du réseau hydrographique à partir d'images satellitaires Alsat-2A

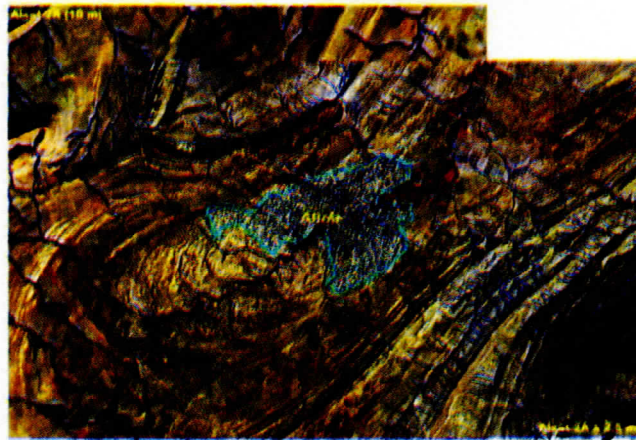


Figure 53 : Extraction du réseau hydrographique à partir de l'ALSAT-2A (<https://asal.dz/>)



Chapitre IV

ANALYSE ET TRAITEMENT NUMERIQUE DES

IMAGES



Chapitre IV. ANALYSE ET TRAITEMENT NUMERIQUE DES IMAGES

L'objectif de ce chapitre est d'apporter une formation de base dans les domaines du traitement et de l'analyse d'images de télédétection, depuis les opérations de visualisation jusqu'à l'analyse des résultats.

Définition

L'analyse des images fait appel à divers procédés, dont le prétraitement, le rehaussement numérique pour faciliter l'interprétation visuelle, la transformation et la classification automatique.

1. Prétraitement

Le prétraitement ou bien la restauration et rectification d'une image est une étape importante de la télédétection. Il se subdivise en corrections radiométriques, corrections géométriques et en corrections atmosphériques. Les corrections radiométriques et atmosphériques correspondent souvent à l'étalonnage de l'image.

1.1. Les corrections géométriques

Les images acquises par les systèmes d'observation de la Terre ne peuvent être directement superposées à des cartes parce qu'elles sont affectées de déformations géométriques. Ces déformations sont dues à des erreurs de positionnement du satellite sur son orbite, la courbure et la rotation de la terre, aux effets du relief terrestre et à la vitesse de déplacement du capteur. Le but des corrections géométriques est de corriger ces déformations et placer l'image dans une géométrie compatible avec des applications cartographiques (Fig. 54). Cette correction peut être effectuée d'une image à une carte, mais aussi d'une image à une autre image.

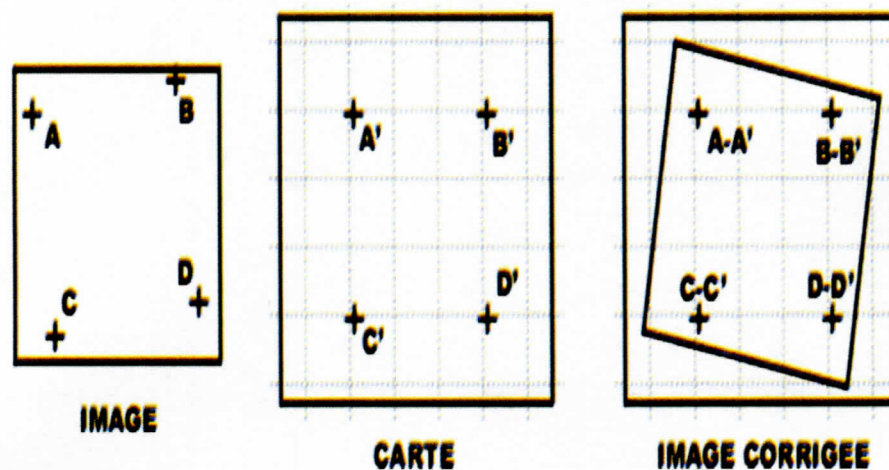


Figure 54 : Corrections géométriques de l'image brute à partir de la carte topographique



Les corrections géométriques sont réalisées à partir d'un procédé appelé rééchantillonnage. Le principe de cette méthode consiste à calculer la nouvelle valeur du pixel à partir de sa valeur originale dans l'image non corrigée. Il existe trois principales méthodes de rééchantillonnage (Fig. 55) :

- Plus proche voisin (1) : valeur du pixel le plus proche (données discrètes)
- Bilinéaire (2) : moyenne pondérée des neuf pixels les plus proches (données continues)
- Convolution cubique (3) : moyenne pondérée des 16 pixels les plus proches (données continues)

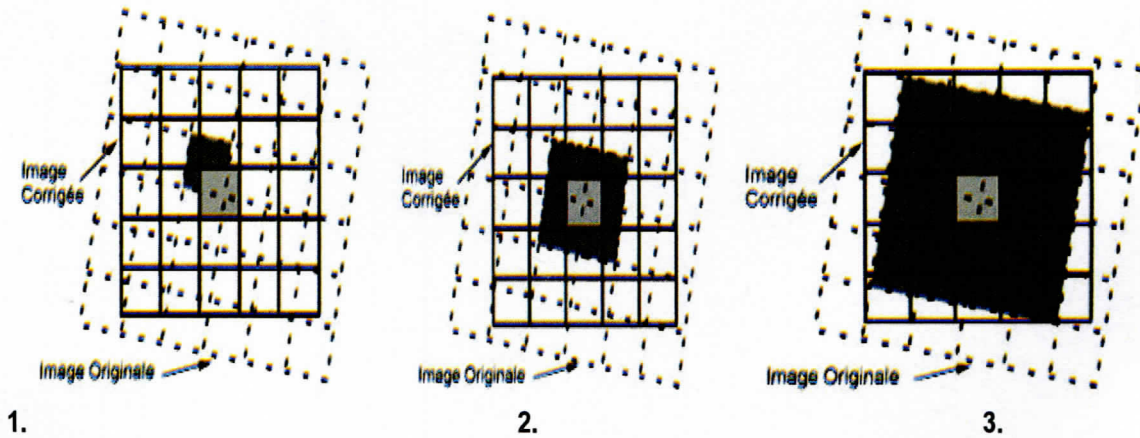


Figure 55 : Les différentes méthodes de rééchantillonnage

1.2. Les corrections radiométriques

Les corrections radiométriques comprennent entre autres, la correction des données dus aux irrégularités du capteur, des bruits dus au capteur ou à l'atmosphère. En effet, la lumière solaire qui éclaire les objets est perturbée par sa traversée de l'atmosphère et n'éclaire pas tous les objets sous un même angle. De plus, la lumière réfléchi par les objets doit également traverser l'atmosphère avant d'être analysée par le capteur du satellite et cette traversée perturbe également le signal (Fig. 56).

Ces perturbations sont dues à la présence de gaz et de poussières qui peuvent absorber et/ou réfléchir certaines longueurs d'ondes, modifiant ainsi les propriétés spectrales du rayonnement. Les méthodes de corrections se basent sur l'observation de cibles de référence dont on connaît la radiométrie (ex : des surfaces d'eau libre).

Cependant, en raison de la complexité des solutions pour remédier aux irrégularités, une très grande majorité des recherches en télédétection s'opère sur des données dont la radiométrie n'a pas été corrigée.

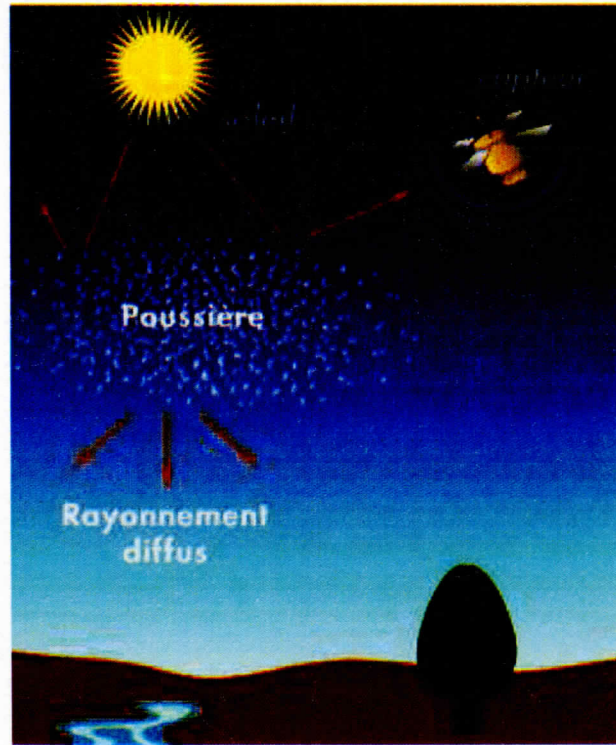


Figure 56 : Effet des Aerosols sur les propriétés spectrales du rayonnement

-Les corrections atmosphériques

Comme le rapporte Kergomard (1996), les capteurs installés à bord des satellites météorologiques ou d'observation de la Terre, opérant dans le domaine spectral de l'émission solaire (longueurs d'onde de 0,2 à 4 μm) sont des radiomètres qui mesurent la luminance réfléchiée par l'ensemble (Terre + Atmosphère éclairé par le Soleil).

En atmosphère non-nuageuse, le signal radiométrique dépend de la réflectance de la surface terrestre mais aussi des effets de l'atmosphère qui interviennent au cours des deux trajets (descendant, du Soleil vers la surface, et montant, de la surface vers le capteur) effectués par le rayonnement solaire à travers l'atmosphère. Le simple étalonnage des données d'un capteur, en luminances (valeurs absolues mesurées en $\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) ou en réflectances (valeurs relatives), ne fournit donc pas une information sur la surface mais un signal composite ; l'objet des corrections atmosphériques est d'extraire de ce signal une information indépendante des effets de l'atmosphère, variables dans le temps et l'espace, et concernant la seule surface terrestre, qui est l'objet à étudier (Kergomard 1996).

1.3. Niveaux de correction des images

Lors de l'acquisition d'images satellitales, il est distingué différents niveaux de correction (Purkis and Klemas, 2011) :

- 1A : l'image est brute, sans aucune correction (rare)
- 1B : l'image a été corrigée radiométriquement (niveau standard)
- 1AP : Etirement des lignes pour compenser en partie l'effet atmosphérique
- 2A : Corrections radiométriques et géométriques simples pour superposition de carte sans point d'appui
- 2B : Corrections radiométriques et géométriques complexes pour superposition de carte et autre image avec points d'appui (coût très élevé).
- Niveau 3 : L'imagerie est géoréférencée comme le niveau 2B. Les produits de niveau 3, également appelés « orthoimages », sont prétraités à l'aide d'un modèle numérique d'altitude (DEM) pour corriger les erreurs de parallaxe résiduelle dues au relief du terrain. Les produits de niveau 3 sont des cartes d'images idéales pour cartographier le relief du terrain et sont conçues pour offrir une précision maximale pour la production et la mise à jour des cartes.
- Ortho - S : Corrections complètes avec compensation du relief.

2. Rehaussement de l'image

Le rehaussement de l'image ou amélioration de contraste (brillance) a pour but d'améliorer l'apparence de l'imagerie pour aider l'interprétation et l'analyse visuelles. Il est basé sur l'examen des histogrammes des bandes spectrales. Il existe plusieurs méthodes qui permettent de rehausser le contraste et les détails d'une image, mais la méthode la plus simple fait appel au **rehaussement linéaire** du contraste (Fig. 57).

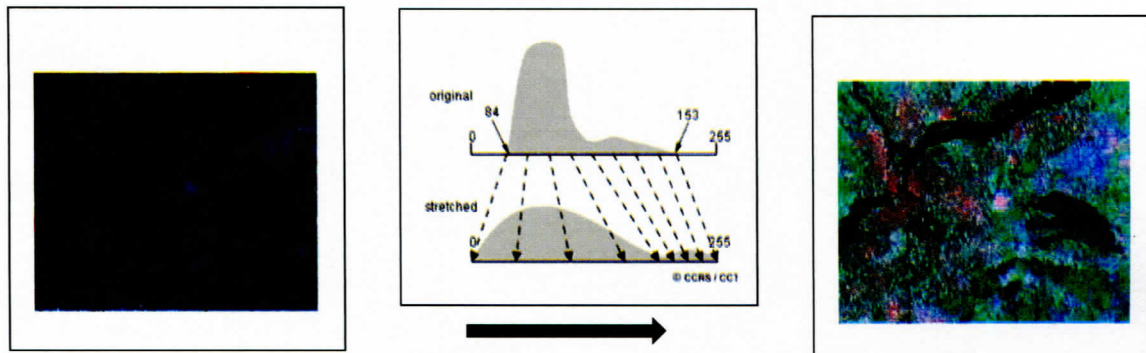


Figure 57 : Rehaussement linéaire de l'image satellitaire (CCT, 1998)

Afin d'appliquer cette méthode, on identifie les limites supérieures et inférieures d'intensité représentées sur l'histogramme (les valeurs minimales et maximales), et à l'aide d'une transformation linéaire, on étire ces valeurs sur l'ensemble des valeurs disponibles (CCT, 1998). Dans notre exemple, la valeur minimale des données initiales dans l'histogramme est de 84 et la valeur maximale est de 153.

Ces 70 niveaux n'occupent qu'un tiers des 256 valeurs disponibles. Un rehaussement linéaire étire de façon uniforme cet intervalle afin d'utiliser la totalité des valeurs de 0 à 255 (CCT).

Une autre méthode pour le traitement numérique utilisé pour le rehaussement des images correspond au **filtrage**. Le principe de cette méthode repose sur la réduction du bruit dans une image (Fig. 58), dont le but consiste à diminuer l'amplitude des perturbations liées au bruit, en préservant et en accentuant les zones de transitions. On peut définir le filtrage comme le processus de remplacement d'un pixel par une valeur qui est fonction des données à proximité du pixel.

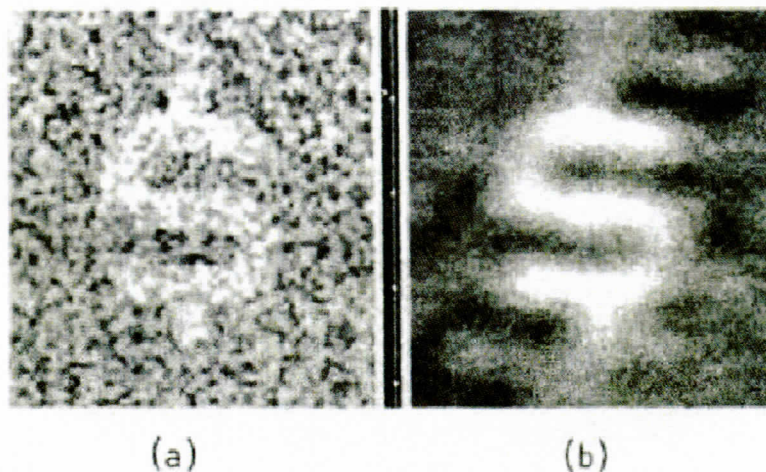


Figure 58 : Filtrage de l'image (a : image bruité ; b : résultat de la filtration)

(Source : Mitchell et al. 1977)

3. Transformation de l'image

Contrairement au rehaussement qui s'applique à une seule bande de données à la fois, la transformation d'images est un procédé qui implique la manipulation de plusieurs canaux pour transformer une image provenant d'un capteur multispectral ou pour transformer plusieurs images de la même région prises à des intervalles de temps différents. Le résultat est une nouvelle image=néo-canal résultant de la combinaison de différentes sources d'information. L'objectif des transformations multispectrales est triple:

- Convertir des luminances mesurées par le satellite en variables thématiques ayant une signification dans les domaines de l'environnement, comme la biomasse, la couverture foliaire, l'humidité d'un sol, etc.



- Construire des indicateurs synthétiques permettant de décrire l'état d'un phénomène. L'indice de végétation (NDVI) rend compte par exemple de l'état, du stade de croissance de la végétation à un moment donné.
- Réduire le nombre des données par la sélection des données les plus utiles. Les canaux (9 pour Landsat OLI) d'une même scène sont souvent corrélés entre eux, ce qui entraîne une redondance de l'information. La transformation permet de synthétiser l'information.

Le calcul de ces nouvelles couches d'information synthétiques s'appuie sur des méthodes d'analyse statistique (ACP) et des combinaisons arithmétiques de canaux (appelées aussi rapports spectraux).

3.1. Les rapports spectraux

Les transformations de base utilisent des opérations arithmétiques simples (+, -, x, /). La soustraction d'image est couramment utilisée pour discerner les changements observés entre des images obtenues à des dates différentes. Dans ce contexte, Lillesand et al. (2015), rapportent que les images de rapports spectraux sont des améliorations résultant de la division des valeurs numériques (DN) dans une bande spectrale par les valeurs correspondantes dans une autre bande spectrale (). Par exemple, le rapport proche infrarouge / rouge pour une végétation saine est normalement très élevé. Celui de la végétation stressée est généralement plus faible (car la réflectance dans le proche infrarouge diminue et la réflectance dans le rouge augmente).

Ainsi, l'image résultante du ratio proche infrarouge / rouge (ou rouge/proche infrarouge) pourrait être très utile pour différencier les zones où la végétation est stressée de celles non stressées. Ce type de rapport a été largement utilisé dans les calculs des indices de végétation visant à quantifier la verdure relative à la végétation et la biomasse.

3.2. Les indices de végétation

En télédétection, les indices font parties des méthodes de traitement que l'on appelle les transformations multispectrales. Il s'agit de néocanaux appliqués à la détection de la végétation. Ils sont très utilisés d'une part, pour identifier et suivre la dynamique de la végétation, mais aussi pour estimer certains paramètres biophysiques caractéristiques des couverts végétaux, comme la biomasse et l'indice de surface foliaire (Leaf Area Index). Ils prennent la forme, soit d'expressions très basiques (simple différence ou simple ratio), soit de formules beaucoup plus complexes.

Les indices sont classés selon qu'ils prennent ou non en considération les facteurs externes aux couverts végétaux, tels que l'influence de l'atmosphère, la contribution spectrale des sols, la teneur en eau des végétaux (indices de sécheresse), etc.

Cependant, avant d'entamer un certains nombres d'indices spectraux, il faut rappeler que la végétation réfléchit fortement dans le proche infrarouge et absorbe fortement dans le rouge (PIR) lorsqu'elle est en bonne santé (Fig.59).

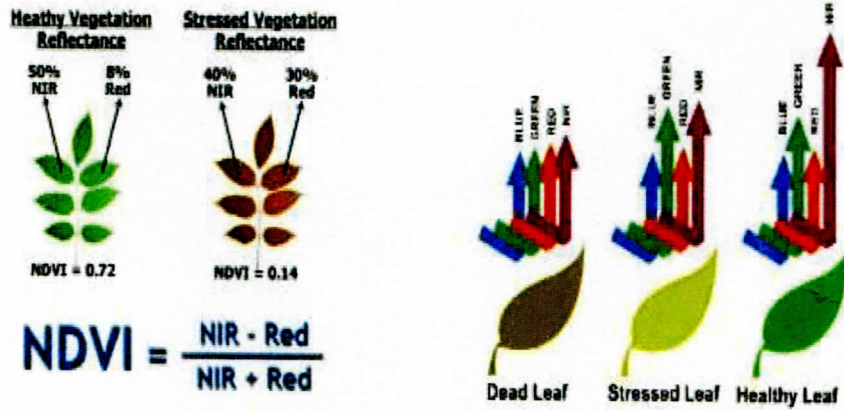


Figure 59 : Réflectance de la végétation en fonction de son état physiologique

3.2.1. Les indices simples

Les indices de végétation les plus simples sont basés sur des opérations arithmétiques entre deux bandes spectrales, généralement le rouge et le proche infrarouge, mais également les bandes du proche et du moyen infrarouge. Il existe dans la bibliographie scientifique plus de 118 indices de végétation. Il est indiqué dans tableau XI qu'un extrait des indices existants (Xue and Su, 2017).

L'indice de végétation brut, ou indice différentiel de végétation (DVI en anglais) est égal à la simple différence des bandes du proche infrarouge et du rouge (1).

$$DVI = PIR - R \dots \dots \dots (1)$$

R: réflectance dans la bande rouge

PIR: réflectance dans la bande proche infrarouge

L'indice de végétation par quotient (RVI en anglais), encore appelé indice foliaire, s'exprime également de façon très simple. Il est égal au rapport entre les bandes du PIR et du R (2).

$$RVI = PIR / R \dots \dots \dots (2)$$

Tableau XI. Liste de quelques indices de végétation (source : Xue and Su 2017)

Index	Definition
AGVI	$GVI - (1 + 0.018GVI) * YVI - \frac{NSI}{2}$
ARI	$\left(\frac{1}{R_{550}}\right) - \left(\frac{1}{R_{700}}\right)$
ARI2	$R_{800} \left[\left(\frac{1}{R_{550}}\right) - \left(\frac{1}{R_{700}}\right) \right]$
ARVI	$\frac{(NIR - RB)}{(NIR + RB)}$
ASBI	0.2YVI
ATSAVI	$\frac{[a(NIR - aRed - b)]}{[aNIR + Red - ab + X(1 + a^2)]}$
AVI	2.0MSS ₇ - MSS ₅
AVI	$\tan^{-1} \left\{ \left[\frac{(\lambda_3 - \lambda_2)}{\lambda_2} \right] (NIR - R)^{-1} \right\} + \tan^{-1} \left\{ \left[\frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2} \right] (G - R)^{-1} \right\}$
BGI1	$\frac{R_{400}}{R_{550}}$
BGI2	$\frac{R_{450}}{R_{550}}$
BRI2	$\frac{R_{450}}{R_{690}}$
CAI	0.5 (R ₂₀₀₀ + R ₂₂₀₀) - R ₂₁₀₀
CARI	CAR * $\left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$
CCCI	$\frac{(NDRE - NDRE_{min})}{(NDRE_{max} - NDRE_{min})}$
CRCWD	1 - ρ_{min}^r
CRI500	$\frac{(1/R_{515})}{(1/R_{550})}$
CRI700	$\frac{(1/R_{515})}{(1/R_{700})}$
CWSI	$\frac{((T_c - T_a) - (T_c - T_a)_n)}{((T_c - T_a)_{id} - (T_c - T_a)_n)}$
DII	R ₈₀₀ - R ₅₅₀
DVI	$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \left(\frac{d\rho}{d\lambda}\right) d\lambda$
DVI	2.4MSS ₇ - MSS ₅
EVI	$\frac{[(TM_4 - TM_3)(1 + L)]}{(TM_4 - C_1TM_3 + C_2TM + L)}$

Par ailleurs, l'indice le plus connu et le plus utilisé est l'indice de végétation par différence normalisé ou indice de Tucker (NDVI) en anglais. Il a été démontré que cet indice est bien corrélé avec l'accumulation de la biomasse des cultures, les niveaux de chlorophylle foliaire, les valeurs de l'indice de surface foliaire et l'intensité de l'activité de la photosynthèse par le couvert végétal. Son expression est la suivante (3):

$$NDVI = \frac{PIR-R}{PIR+R} \dots \dots \dots (3)$$

Les valeurs du NDVI sont comprises en théorie entre -1 et +1, les valeurs négatives correspondant aux surfaces autres que les couverts végétaux, comme la neige, l'eau ou les nuages, pour lesquelles la réflectance dans le rouge est supérieure à celle du proche infrarouge.

Pour les sols nus, les réflectances étant à peu près du même ordre de grandeur dans le rouge et le proche infrarouge, le NDVI présente des valeurs proches de 0. Les formations végétales quant à elles, ont des valeurs de NDVI positives, généralement comprises entre 0,1 et 0,7. Les valeurs les plus élevées correspondant aux couverts les plus denses. La figure 60 présente un exemple des données du NDVI dérivés à partir de différentes dates pour la région métropolitaine de Colombo, Sri Lanka (Ranagalage et al. 2017). Les valeurs du NDVI ont varié respectivement de -0.74 à 0.84 en 1997, de -0.36 à 0.77 en 2007 et de -0.25 à 0.81 en 2017.

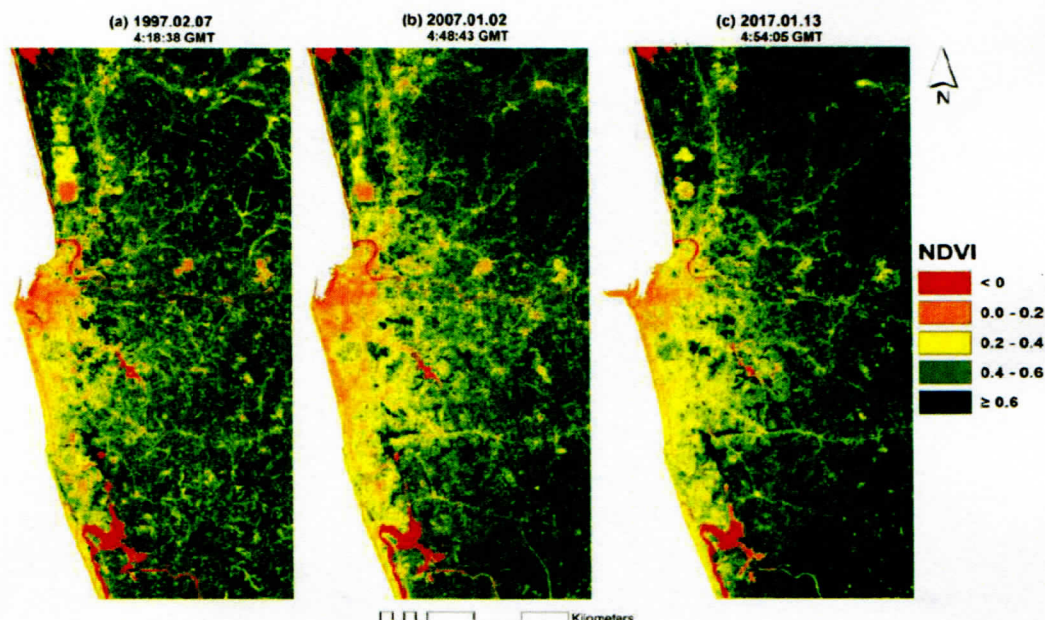


Figure 60 : Cartographie de l'indice de Végétation par différence normalisé de la région métropolitaine de Colombo (Ranagalage et al. 2017).

Dr. Abdelkader LARIBI

Cependant, dans certaines conditions, notamment dans les zones où le couvert végétal est faible, le NDVI devient moins efficace, et est influencé par les propriétés optiques des sols sous-jacents, d'où une autre gamme d'indices alternatifs permettant de réduire cette erreur, tel que **l'indice de végétation ajusté au sol (SAVI)** (4) (Huete, 1988).

$$SAVI = ((PIR-R) / (PIR+R+L)) * (1+L) \dots\dots\dots (4)$$

"L" est un facteur de correction dont la valeur dépend du couvert végétal. Pour un couvert végétal totalement fermé, il vaut zéro et le SAVI est alors équivalent au NDVI. Pour un couvert végétal très faible, il vaut 1. La valeur de 0.5 est généralement utilisée quand le type de couvert végétal est inconnu, puisque 0.5 représente un couvert végétal moyen (Huete, 1988). La figure 61 présente l'exemple du SAVI pour la région de Sacramento (USGS, 2018).

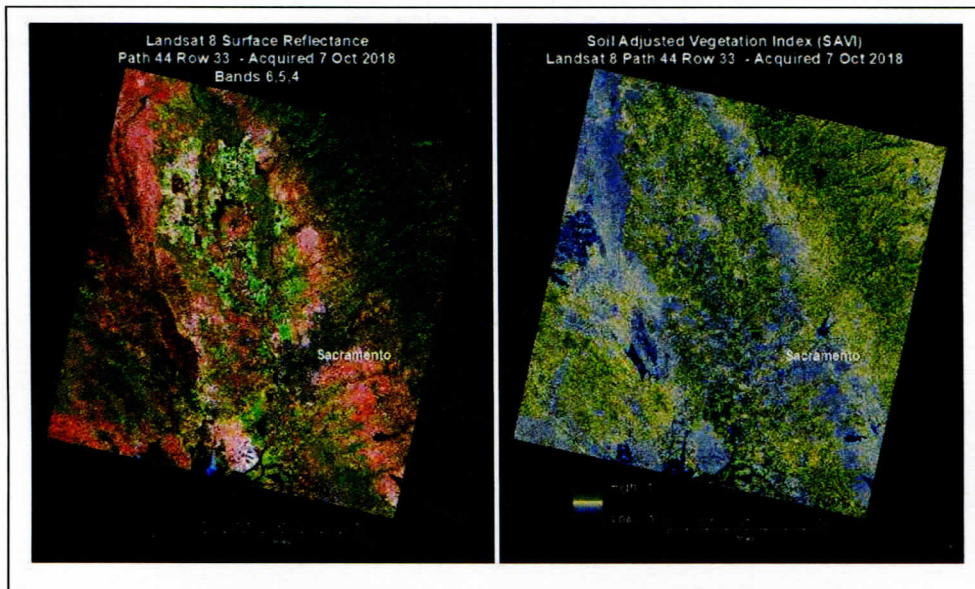


Figure 61 : Indice de végétation ajusté au sol (USGS, 2018)

En revanche, lorsque le couvert végétal atteint des niveaux modérés à élevés, l'indice vert de végétation par différence normalisée (GNDVI) peut être un indicateur plus fiable des conditions des cultures. Le Green NDVI est identique dans sa forme au NDVI sauf que la bande verte substitue la bande rouge (Lillesand et al. 2015). Cet indice a été trouvé pour être beaucoup plus sensible à la concentration de la chlorophylle.

Les indices de stress hydrique, comme le MSI (5) ou le NDWI (6) sont également des indices simples dans lesquels on utilise la bande spectrale du moyen infrarouge à la place de la bande rouge. Ces indices varient en fonction de la teneur en eau des feuilles. Ils permettent de détecter lorsque



Dr. Abdelkader LARIBI

les végétaux sont en état de stress hydrique et sont par conséquent très utiles pour le suivi de la végétation en zone sèche.

$$MSI = MIR / PIR \dots\dots\dots (5)$$

$$NDWI = PIR - MIR / PIR + MIR \dots\dots\dots (6)$$

MSI: moisture stress Index

NDWI: normalized difference water index

MIR: réflectance dans le moyen infrarouge

PIR: réflectance dans le proche infrarouge

Ces indices de végétation doivent être utilisés avec précaution, lorsqu'on les applique à des images qui n'ont pas été corrigées des effets atmosphériques et des divers effets d'angle.

Autres indices (7 et 8) :

Indice de brillance : mise en évidence des sols brillants (liés notamment à l'humidité)

$$IBS = \sqrt{IR^2 + R^2} \dots\dots\dots (7)$$

Indice de clarté : mise en évidence des sols rouges (ex : tropicaux)

$$IC = (R - V) / (R + V) \dots\dots\dots (8)$$

3.3. Analyse des Composantes Principales (ACP)

Le principe de l'ACP consiste à définir, dans l'espace multispectral, de nouveaux canaux résumant l'information contenue dans l'image. Les "nouvelles" bandes qui résultent de cette compression statistique sont appelées composantes. Le résultat de l'ACP est un jeu d'images dans lequel chaque bande est non corrélée avec les autres bandes, en d'autre terme : chacune présente des informations uniques. Ce procédé vise donc à maximiser (statistiquement) la quantité d'information (ou variance) des données originales dans un nombre restreint de composantes. Ce type de transformation est intéressant car il concentre la quasi-totalité de l'information dans les deux ou trois premières composantes, les autres composantes ne renfermant généralement que du bruit. Cette transformation est également utilisée comme technique de rehaussement visuel.

Par exemple, l'ACP peut transformer des données provenant de neuves bandes du capteur Landsat 8 OLI de façon à ce que les trois principales composantes de la transformation contiennent plus de 90% de l'information contenue dans les neuves bandes initiales. L'interprétation et l'analyse de ces trois composantes, en les combinant visuellement ou numériquement, est plus simple et plus efficace que l'utilisation des neuves bandes initiales.



3.4. Classification d'image

La classification des images fait référence à la tâche d'extraction des classes d'informations d'une image de raster multicanal. C'est-à-dire, il s'agit de transformer les données numériques des images en catégories descriptives qui identifient différents éléments de l'image. Le résultat de la classification des images permet de créer des cartes thématiques (ex : eau, forêt, agriculture) (Fig. 62).

Lorsqu'il est question de classes, il importe de faire la distinction entre les classes d'information et les classes spectrales. Les « classes d'information » renvoient aux catégories d'intérêt que l'analyste tente d'identifier dans les images, par exemple les types de cultures, les types de forêts ou d'essences d'arbres, les différentes unités géologiques ou familles de roches, et ainsi de suite.

Les « classes spectrales » renvoient à des groupes de pixels identiques (ou quasi identiques) en ce qui a trait à leur valeur de brillance dans les différentes bandes spectrales des données. L'objectif est d'établir la concordance entre les classes spectrales contenues dans les données et les classes d'information d'intérêt.

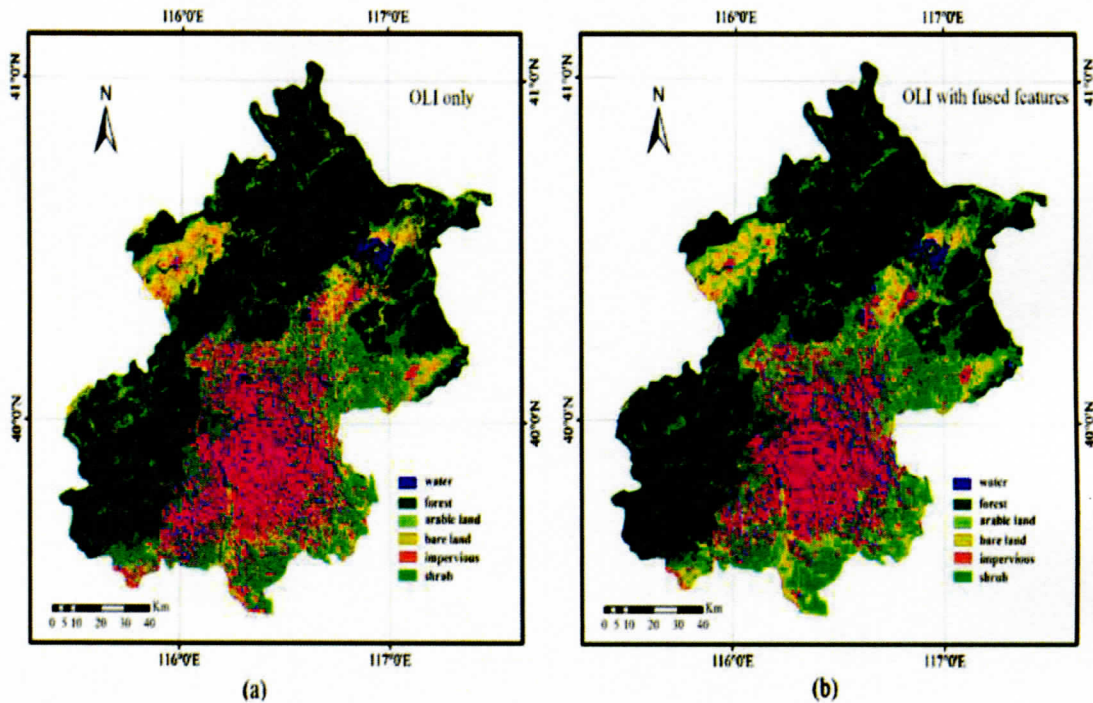


Figure 62 : Classification de la couverture du sol
(Source : Chen et al. 2017)

Les méthodes de classification les plus communes peuvent être subdivisées en deux grandes catégories : les méthodes de classification supervisée et les méthodes de classification non supervisée.



3.4.1. Les méthodes de classification non supervisée

Les données sont classées en fonction de leurs caractéristiques spectrales, sans aucune information a priori sur la nature des objets à classer. D'une autre manière, on laisse l'ordinateur analyser l'ensemble des signatures spectrales de tous les pixels de l'image, et déterminer des groupements naturels, c'est-à-dire regrouper les pixels sur base de signatures spectrales similaires. Ce type de classification est également appelé classification non assistée ou bien non dirigée. Parmi les algorithmes (méthodes) de classification non supervisée, on distingue :

- **La méthode de K-Mean** : Regroupement des pixels de l'image au centre de classes, régulièrement distribués dans l'hyperespace, les plus probables (statistiques). Elle permet une analyse régionale des grands types homogènes de couvertures végétales.
- **La méthode Isodata clustering** (de valeurs égales) : Regroupement des pixels de l'image aux centres des classes, régulièrement distribués dans l'hyperespace, les plus proches (distance).

3.4.2. Les méthodes de classification supervisée

La classification supervisée utilise les signatures spectrales obtenues à partir des échantillons d'apprentissage pour classer une image. Cette méthode part du principe que l'analyste a une connaissance parfaite du terrain sur lequel porte le travail. Ce type de classification est également appelé classification assistée ou bien dirigée. Cette dernière se déroule en trois étapes (Fig. 63) :

- La première étape consiste à sélectionner des zones de l'image dont on connaît la vraie occupation du sol. Ces zones sont appelées régions d'intérêt ou des aires d'entraînement.
- La deuxième étape utilise ces zones comme références à la généralisation sur l'ensemble de l'image.
- La dernière étape correspond à la présentation des résultats : cartes thématiques, tables statistiques des différentes classes et des données digitales à intégrer dans un Sig.

Par ailleurs, deux grandes familles d'algorithmes de classifications sont utilisées : paramétrique ou non paramétrique.

- Méthodes non paramétriques : pas d'hypothèse sur la distribution des pixels (méthode de la distance minimum et Méthode des parallélépipèdes).
- Méthodes paramétriques : distribution supposée connue, souvent distribution normale (méthode de Maximum de vraisemblance Gaussien (likelihood) : la signature spectrale de chaque pixel, dans chacun des canaux est comparée à celle des zones d'apprentissage ou régions d'intérêt. Les pixels sont alors affectés dans la classe dont ils sont le plus proches. En d'autres termes l'algorithme calcule la probabilité d'un pixel d'appartenir à chaque classe.

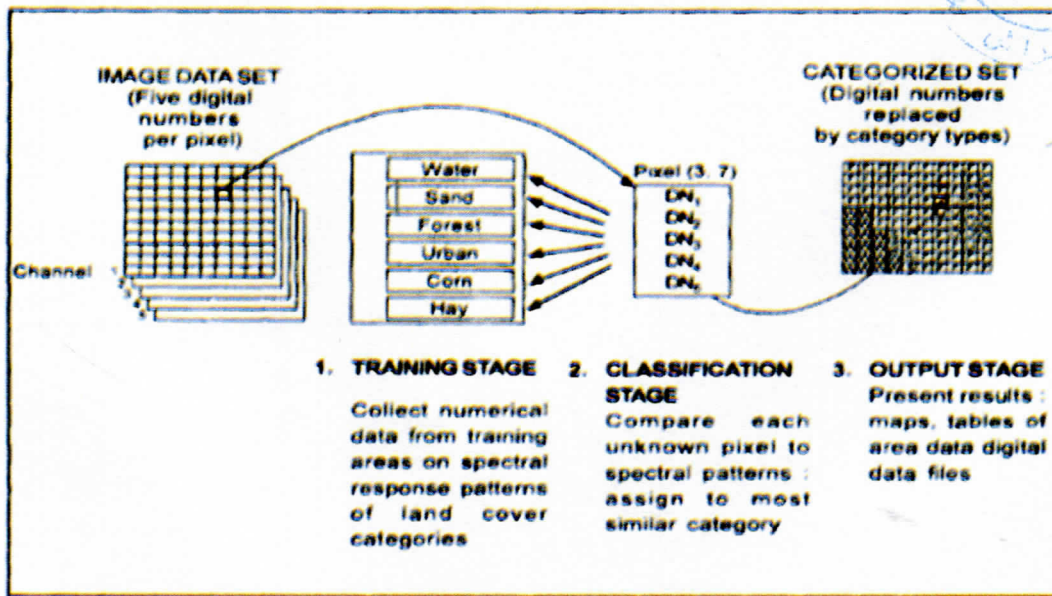


Figure 63 : Les étapes de base de la classification supervisée
(Source : Lillesand et al. 2015)

3.4.3. Evaluation de la qualité d'une classification

La pertinence de la classification est évaluée à l'aide d'indicateurs comme par exemple le coefficient Kappa. Ce dernier mesure la correspondance entre l'image classée et la réalité. Une valeur de kappa de 1 représente un accord parfait, alors qu'une valeur de zéro indique qu'il n'y a aucun accord. Il est calculé de la manière suivante (9) :

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^n m_{i,i} - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)}{N^2 - \sum_{i=1}^n (G_i C_i)} \dots\dots\dots (9)$$

Où

i est le nombre de classes

N est le nombre total de pixels évalués

m_{i,i} est le nombre de valeurs appartenant à la classe *i* qui ont bien été classé dans la classe *i* (i.e. les valeurs situées dans la diagonale de la matrice de confusion)

C_i est le nombre total de pixels attribués à la classe *i*

G_i est le nombre total de pixels appartenant vraiment à la classe *i*



Chapitre V

TELEDETECTION ET SES PRINCIPAUX DOMAINES

D'UTILISATION



Chapitre V. LA TELEDETECTION ET SES PRINCIPAUX DOMAINES D'UTILISATION

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différents domaines d'application de la télédétection depuis l'étude de l'atmosphère et l'océanographie jusqu'aux applications terrestres (Clark et al. 1995 ; Kergomard, 2004 ; Gerard et al., 2005 ; Benslimane et al., 2008 ; Dichri and Elasri, 2015 ; Faye et al., 2016 ; Gaso et al., 2019). Les applications de la télédétection décrites dans ce chapitre sont représentatives, mais ne forment pas une liste exhaustive de toutes les applications possibles.

1. Etude de l'atmosphère

Le premier grand domaine d'application de la télédétection a été l'étude de l'atmosphère (météorologie et climatologie). L'intérêt de la télédétection dans ce domaine est d'assurer une couverture globale et très fréquemment répétée de la planète entière ; par contre la résolution spatiale n'est pas primordiale pour les applications météorologiques.

C'est en 1962, que le premier satellite destiné à la météorologie a été lancé : TIROS-1. Toutes ces données sont maintenant disponibles grâce aux satellites météorologiques. Ils ont créé une véritable révolution. Les satellites en orbite géostationnaire, à 36000 km de la Terre, permettent d'obtenir une image couvrant près d'un cinquième de la surface terrestre toutes les demi-heures ; cinq satellites de ce type assurent une couverture globale de l'atmosphère terrestre, à l'exception des pôles.

Ce système est complété par des satellites en orbite polaire, à 900 km d'altitude, qui offrent plus de précision. Les capteurs utilisés permettent d'observer les nuages et leur déplacement, de mesurer des températures ou le contenu en vapeur d'eau de l'atmosphère. Parallèlement au système opérationnel de veille météorologique, la météorologie est un domaine très actif de la recherche en télédétection ; des capteurs encore expérimentaux, utilisant les micro-ondes, effectuent de véritables sondages de l'atmosphère et mesurent la composition de la stratosphère (ozone) ou les termes du bilan radiatif.

2. Océanographie

Depuis 1992, l'océanographie a été bouleversée par l'apparition des satellites d'observation des masses d'eau. La télédétection offre l'avantage de permettre une vision synoptique de vastes régions qu'il est impossible d'obtenir par les moyens traditionnels (bateaux). Pour certaines études à petite échelle, les données des satellites météorologiques sont largement utilisées en océanographie (températures de surface de l'océan) ; pour les études côtières, ce sont les satellites de télédétection terrestre, équipés de capteurs à haute résolution, qui sont les plus utiles.

Des satellites spécialisés à vocation océanographique ont volé dans un passé récent (Nimbus, Seasat) ou volent depuis le début des années 90 (ERS-1 de l'Agence Spatiale Européenne,



TOPEX-Poseïdon). Les types de capteurs utilisés pour l'océanographie sont très variés. Les radiomètres utilisant le rayonnement visible analysent la couleur de l'océan, qui permet de mesurer la production biologique (plancton) et la turbidité; les radiomètres infrarouge ou microonde mesurent la température de surface de la mer. La répartition des températures ou des turbidités est un indice des courants océaniques.

Les radars embarqués sur des avions ou certains satellites ont l'avantage d'être insensibles aux nuages; ils permettent d'observer les phénomènes ondulatoires présents sur l'océan, les vagues en particulier. Enfin, certains types particuliers de capteurs, radars-altimètres ou diffusiomètres sont utilisés pour mesurer avec une très grande précision l'altitude de la surface de la mer qui est un reflet de la dynamique océanique (courants généraux), ou la vitesse du vent sur la mer. Parmi les applications océanographiques de la télédétection, citons l'étude des glaces des océans en régions polaires.

3. Prédiction précoce des rendements des cultures par télédétection

La prédiction précoce des rendements des cultures est une question qui fait l'objet de beaucoup de recherches. Les approches développées sont généralement basées sur des données de télédétection qui alimentent des modèles de culture. Un article publié en 2019 dans le journal Computers and Electronics in Agriculture montre qu'il est possible d'utiliser les données de télédétection pour estimer le rendement du blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.) à l'échelle de la parcelle (Fig. 64, Gaso et al., 2019).

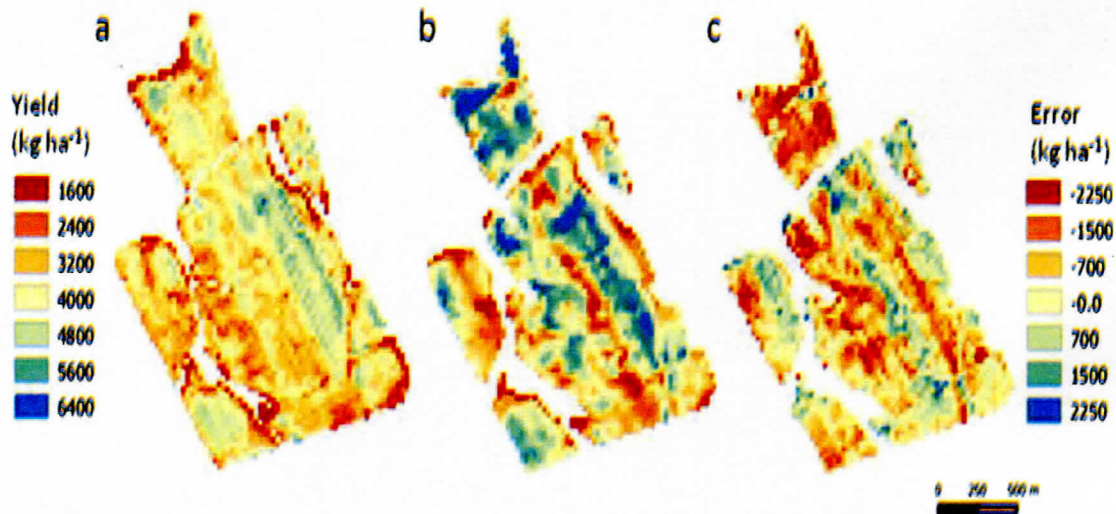


Figure 64 : Spatial distribution of yield (kg ha⁻¹) for one of the field study sites: (a) measured by yield monitor, (b) predicted by CMM and (c) absolute yield difference between measured and estimated.

Les auteurs ont comparé deux méthodes différentes : i) une méthode très simple basée sur une régression linéaire entre différents indices de végétation à la floraison (anthèse) et le rendement, et (ii) une méthode de modélisation des cultures basée sur l'optimisation de deux paramètres (l'azote foliaire et la biomasse aérienne initiale) utilisant des séries chronologiques d'indices de végétation. Les indices de végétation sont issus des images Landsat-7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) et Landsat-8 Operational Land Imager (OLI) acquises au cours de deux saisons (2013, 2014).

Ces deux approches ont été évaluées sur 22 parcelles du sud-ouest de l'Uruguay (surface moyenne de 128 ha). Les données de rendement ont été obtenues avec des capteurs de rendement embarqués sur moissonneuses batteuses correctement étalonnés. Les résultats de cette étude montrent qu'une régression simple permet d'estimer le rendement de la parcelle avec une plus grande précision ($\pm 0.9 \text{ t. ha}^{-1}$) que l'approche combinant indices de végétation et modélisation ($\pm 1.5 \text{ t. ha}^{-1}$). Toutefois, lorsqu'on s'intéresse à l'estimation du rendement au niveau intra-parcellaire (pixels de $30 \times 30 \text{ m}$), l'approche modèle est plus pertinente et permet de détecter la variabilité spatiale du rendement, ce qui permet d'identifier des zones à potentiel de rendement différent.

4. Identification des plantes stressées par télédétection

La chlorophylle est une composante essentielle du processus de photosynthèse. Elle peut être estimée directement à partir des données de télédétection. En combinant plusieurs bandes d'une image de télédétection, il est possible de calculer des indices de végétation et les utiliser pour estimer l'état des cultures (Dichri and Elasri, 2015).

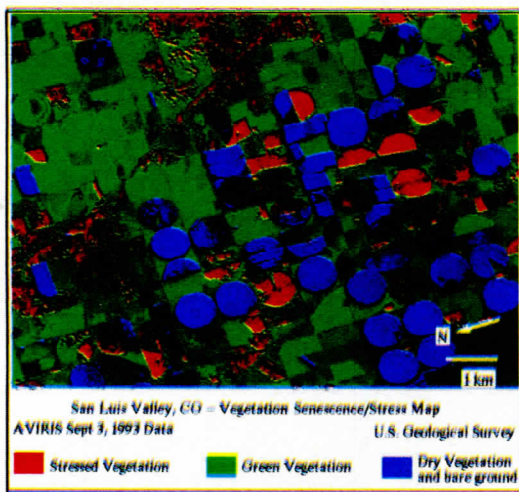


Figure 65 : Cartographie de la Végétation stressée
(Source Clark et al. 1995).

En utilisant les indices de végétation, les images de télédétection peuvent être traitées pour produire des images classifiées qui indiquent directement les cultures stressées (Fig. 65)

L'image classifiée a été produite à partir des données acquises par le capteur AVIRIS (Airborne Visible/ Infrared Imaging Spectrometer) monté sur un avion.



En fonction de la réflectance dans le visible et le proche infrarouge, les indices de végétation produits nous donnent une indication de la quantité de chlorophylle présente dans les plantes. Avec cette information, il est possible d'estimer si les plantes sont stressées, et dans l'affirmative, à quel point elles sont atteintes. Dans l'image classifiée ci-dessus, les champs ne contenant pas de végétation verte (sols nus et végétation sèche) sont en bleu et les champs couverts de végétation apparaissent en vert. Les parties des champs qui apparaissent en rouge mettent en évidence que les cultures y sont stressées.

5. Cartographie du changement d'occupation des sols

Les données sur l'occupation et l'utilisation des sols fournissent en général des informations quantitatives (classes d'occupation/utilisation, estimations de la superficie). Des précisions concernant les caractéristiques qualitatives (pratique agricole, valeur écologique, etc.) sont nécessaires pour bien décrire les processus en action. Ces données (les classes d'occupation) sont également des unités analytiques qui permettent d'établir un premier lien quantitatif entre les activités humaines, leurs répercussions sur l'environnement, et la dimension géographique (spatiale).

Un article publié en 2016 dans la revue *Vertigo* montre qu'il est possible d'exploiter les données de l'image Landsat et Quickbird pour cartographier les changements d'occupation des sols (1973-2010) dans la zone agropastorale du lac de Guiers de Sénégal (Fig. 66, Faye et al., 2016).

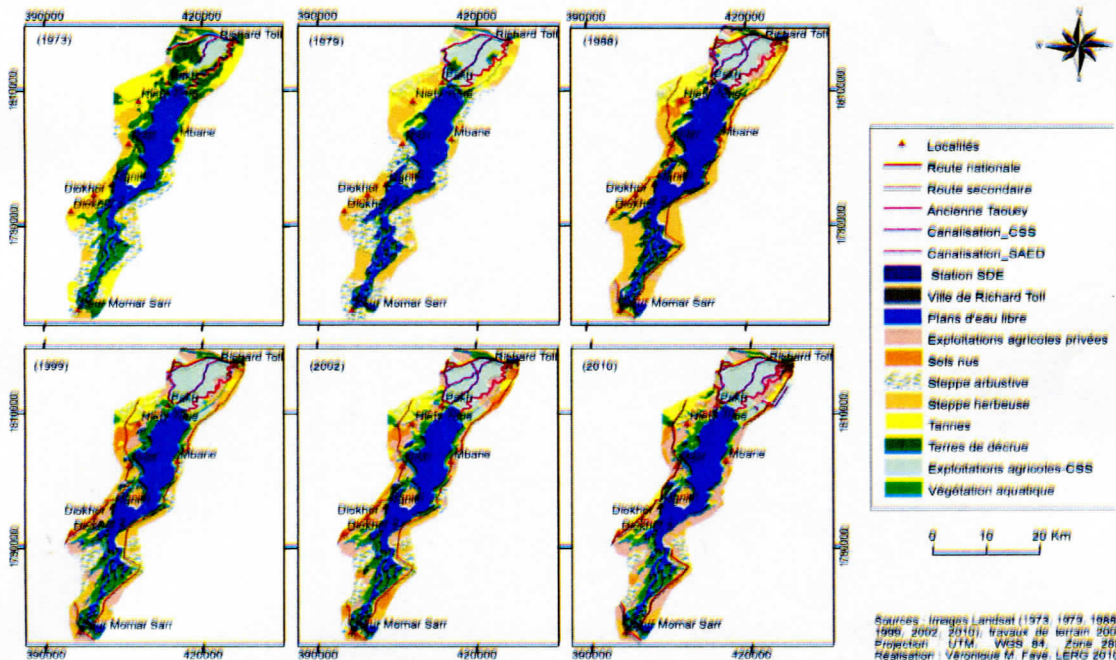


Figure 66 : Occupation du sol au lac de Guiers de 1973 à 2010



Dr. Abdelkader LARIBI

Sur la période étudiée, il a été observé une augmentation des étendues d'eau de 14,9 % ; de la végétation aquatique de 17,5 %, des exploitations agricoles industrielles et privées respectivement de 207,5 et 5508,8 % et une diminution des superficies des steppes arbustives et herbeuses de 69,9 et 64,3 %. Les changements d'occupation du sol se sont manifestés principalement par la substitution de la steppe arbustive par une steppe herbeuse entre 1973-1988 (avant l'édification des barrages de Diama et Manantali sur le fleuve Sénégal), et l'extension des aménagements agricoles et de la végétation aquatique, entre 1988 à 2010 (après les barrages).

6. Télédétection appliquée au suivi et au pilotage de l'irrigation

La télédétection est apparue depuis plusieurs années comme un outil particulièrement performant pour aider à la gestion de l'irrigation et du drainage. Il s'agit notamment de l'infrarouge thermique qui est utilisé depuis longtemps dans le suivi et le pilotage de l'irrigation à différentes échelles (parcelle, périmètre irrigué, bassin versant). Les principales applications de l'infrarouge thermique en irrigation portent sur (Tiercelin and Vidal, 2006) :

- L'estimation des besoins en eau des cultures à partir de l'évapotranspiration de référence ;
- Le pilotage des irrigations à différentes échelles par le suivi du stress hydrique des cultures.

7. Télédétection et gestion des catastrophes naturelles : inondations

Les inondations constituent un phénomène naturel du cycle hydrologique. Elles s'avèrent nécessaires pour renouveler la fertilité du sol, car elles déposent périodiquement de nouveaux nutriments et des sédiments fins. Mais elles peuvent aussi causer des pertes de vies, la destruction temporaire d'habitats sauvages et des dommages aux infrastructures urbaines et rurales.

Des inondations fluviales peuvent être causées par l'endommagement des barrages humains ou naturels, la fonte catastrophique de la neige ou la glace, la pluie, l'engorgement des rivières par la glace et le ruissellement excessif des eaux de fonte au printemps.

Les techniques de télédétection sont utilisées pour mesurer et effectuer le suivi de la superficie de l'inondation, pour orienter les secours de façon efficace et pour fournir des évaluations quantifiables sur l'étendue des terres et des infrastructures touchées (CCT, 1998).

L'article publié en 2005 dans la revue de télédétection a montré que la combinaison des données satellitaires (Landsat TM) avec un modèle numérique d'altitude (MNA) a permis la cartographie des zones à risque d'inondation de la région semi-montagneuse de Man à l'Ouest de la Côte d'Ivoire (Saley et al., 2005).



La carte du risque à l'inondation présente quatre zones, dont le risque varie de faible à très fort. Les zones à moyen et fort risque couvrent 65 % du territoire (Fig. 67). L'étendue de ces zones mérite un suivi et une surveillance en vue de sécuriser les populations et les infrastructures socio-économiques de la région. Ainsi, la carte des risques à l'inondation obtenue constitue une carte de base pour les éventuels aménagements des différents bassins fluviaux de l'Ouest semi-montagneux ivoirien.

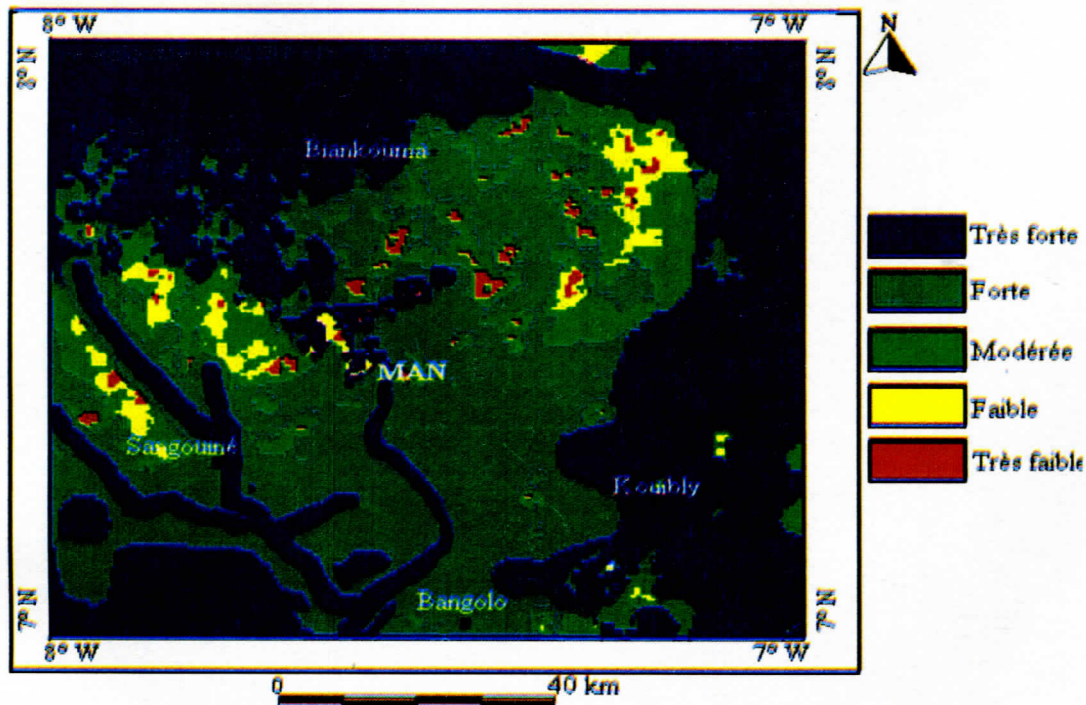


Figure 67 : Carte des zones à risques d'inondation de la région de Man.

8. La télédétection appliquée au suivi de la désertification

Force est de constater que la dégradation des sols touche toute la planète (Gerard et al., 2005). La désertification est un processus typique dans les régions arides et semi-arides. Elle existe aussi dans les régions humides, mais le phénomène reste moins étendu. Dans les contextes graves, elle aboutit à un état de dégradation des terres irréversible en l'espace d'une génération humaine (25 ans). Elle se traduit par un changement du milieu dont les surfaces subissent des modifications à la fois de la couverture végétale et des sols. Les facteurs de désertification sont d'ordre naturel et anthropique.

La Convention des Nations Unies sur la lutte contre la désertification, adoptée à Paris en 1994 et ratifiée 10 ans plus tard par 190 pays, définit le processus de désertification aux échelles régionales et locales comme « la dégradation des terres dans les zones arides, semi-arides et subhumides sèches par suite de divers facteurs, parmi lesquels les variations climatiques et les activités humaines ».



La désertification désigne donc le déclin irréversible ou la destruction du potentiel biologique des terres et de leur capacité à supporter ou à nourrir les populations.

Sur la base de ces considérations, il apparaît donc que les facteurs de désertification sont d'ordre naturel et anthropique. On cherche à associer à ces facteurs des indicateurs permettant d'évaluer le risque potentiel de désertification ou la gravité de la désertification d'une aire donnée, une fois avoir compris les processus qui caractérisent ce phénomène (Gerard et al., 2005). Ces indicateurs permettront d'alerter et d'aider les autorités locales ou nationales à entreprendre des actions adéquates concernant la gestion de l'environnement. Le rôle de la télédétection dans ce contexte est de permettre via des « variables dérivées : rugosité de surface, albédo, température de surface, humidité au sol et indice de Végétation » l'évaluation de ces indicateurs, notamment ceux d'ordre physique et écologique, et ainsi de déterminer les processus de désertification.

Par ailleurs, un article publié en 2008 dans la revue Vertigo révèle qu'il est possible d'exploiter les données satellitaires du capteur TERRA- MODIS pour l'analyse et le suivi du phénomène de la désertification au Nord de l'Algérie (Fig. 68, Benslimane et al., 2008). Des paramètres géophysiques tels que l'albédo, l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) et la température de surface ont été calculées pour la période de 2000 à 2005 dans le but de suivre l'état hydrique et l'état de la végétation. Les résultats obtenus ont mis en évidence que 75 % des parcours steppiques sont désertifiés ou au seuil de la désertification.

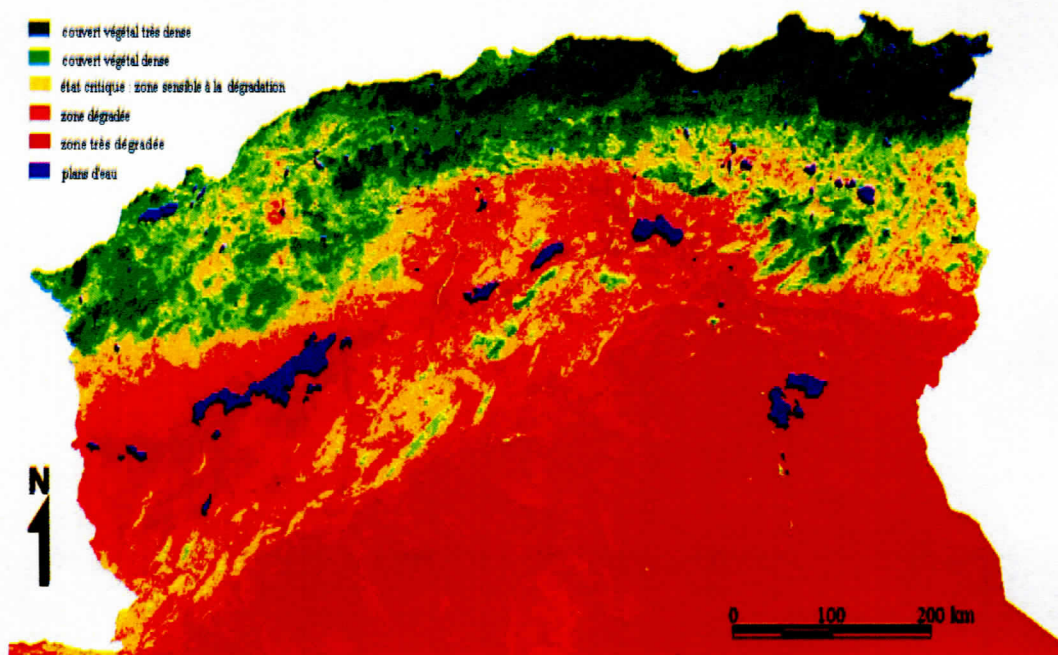


Figure 68 : Carte de synthèse de la sensibilité à la désertification (2000-2005)



9. La géologie

La géologie est l'étude des formes de terrain, des structures et de l'écorce terrestre, et a pour but de comprendre les processus physiques qui modifient la croûte terrestre. Elle est généralement perçue comme étant l'exploration et l'exploitation des ressources minérales et pétrolières dans le but d'améliorer les conditions de vie de la société. La géologie comprend aussi l'étude des phénomènes naturels potentiellement dangereux comme les volcans, les glissements de terrain et les tremblements de terre, et constitue donc un apport important pour les études géotechniques de construction et de génie civil. Il faut savoir aussi que la géologie n'est pas limitée à la surface de la Terre.

La télédétection a été utilisée pour examiner la composition et la structure de l'écorce terrestre. La télédétection est un outil qui permet l'extraction d'information sur la structure ou la composition de la surface de la Terre. Elle est souvent combinée à d'autres sources de données pour des mesures complémentaires. À partir de la réflectance spectrale, les données multispectrales peuvent fournir de l'information sur la composition lithologique des roches. Le radar fournit de l'information sur la rugosité et la géométrie de la surface ce qui très utile, surtout quand il est combiné avec des données provenant d'autres sources pour produire une représentation détaillée du relief (CCT, 1998).

Un article publié en 2002 dans le bulletin des sciences géographiques a montré qu'il est possible d'élaborer la carte géologique de la région d'In-Azaoua à 1/500.000 (Hoggar Central) à partir de l'imagerie satellitaire Landsat 5 (Thematic Mapper) (Saad, 2002). Les résultats ont mis en évidence une corrélation entre les données spectrales recueillies par les différents canaux du satellite Landsat 5 Thematic Mapper avec les caractéristiques des roches des formations précambriennes et primaires du bassin d'In-Azaoua (Hoggar Central Méridional). Des provinces géologiques homogènes ont été caractérisées. L'apport des données infrarouge thermique a été déterminant dans la cartographie des limites lithologiques de ces deux ensembles.

Conclusion

Ce cours sur la photo-interprétation et la télédétection permettra aux étudiants de 4ème année ingénieur sciences agronomiques d'acquérir une compréhension approfondie des principes et des applications de ces techniques dans le domaine agronomique. En abordant les photographies aériennes, les bases physiques de la télédétection, ainsi que les vecteurs et les principaux satellites optiques d'observation de la Terre, les étudiants seront initiés aux méthodes de traitement et d'analyse des images de télédétection.



Références

- Benslimane, M., Hamimed, A., El Zerey, W., Khaldi, A., and Mederbal, K. (2008). Analyse et suivi du phénomène de la désertification en Algérie du nord », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 8 Numéro 3 | décembre 2008, mis en ligne le 18 février 2009, consulté le 25 mai 2020.
- CCT (Centre Canadian de Télédétection), 1998. Tutoriel sur les notions fondamentales de télédétection. Canada, Ottawa, 266 p.
- Chen, B., Huang, B, and Xu, B. (2017). Multi-source remotely sensed data fusion for improving land cover classification, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 124:27–39.
- Clark, R.N., King, T.V.V., Ager, C., and Swayze, G.A., (1995). Initial vegetation species and senescence/stress mapping in the San Luis Calley, Colorado using imaging spectrometer data. Proceedings: Summitville Forum '95, H.H. Posey, J.A. Pendelton, and D. Van Zyl Eds., Colorado Geological Survey Special Publication 38, p. 64-69.
- CNES. (2008). Bulletin de l'Information Géographique Appliquée aux Activités de Recherche et développement. BIG n. 3. Initiation à la Télédétection. [Consulté en Mai 2020]. http://www.cnes-csg.fr/automne_modules_files/standard/public/p7774_9f5e71f0025c698de2ef85d1cOe20big_3.pdf.
- Dichri, M., and Elasri, A. (2015). Rapport de recherche : la classification et l'identification des cultures par télédétection. Faculté des Sciences et Techniques Tanger, 23 p.
- Faye, V.M., Mbow, C., and Thiam, A. (2016). Évolution de l'occupation et de l'utilisation du sol entre 1973 et 2010 dans la zone agropastorale du lac de Guiers (Sénégal) », VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement [En ligne], Volume 16 Numéro 1 | mai 2016, mis en ligne le 09 mai 2016, consulté le 25 mai 2020.
- Gaso, D. V., Berger, A. G., and Ciganda, V. S. (2019). Predicting wheat grain yield and spatial variability at field scale using a simple regression or a crop model in conjunction with Landsat images. Computers and Electronics in Agriculture, 159, 75-83.
- Gérard, B., Escafadal, R., Fontannaz, D., Hong-Nga Nguyen, A-T., Bennouna, T, Cornet, A., Delaitre, E., Mainguet, M., Toutain, B. (2005). La télédétection : un outil pour le suivi et l'évaluation de la désertification. Montpellier : Agropolis international, 36 p.
- Gilvear, D., and Bryant, R.G. (2016). Analysis of remotely sensed data for fluvial geomorphology and river science, In book: Tools in Fluvial Geomorphology, 103-132.
- Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sensing of Environment, 25 (3): 295-309.



- IFN (Inventaire Forestier National). (2004). Instruction pour la cartographie et la photo-interprétation, Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche et des Affaires Rurales Français, 141 p.
- Kergomard, C. (1996). Pratique des corrections atmosphériques en télédétection : utilisation du logiciel 5S-PC. Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne], Dossiers, document 181, mis en ligne le 27 avril 2000, consulté le 16 avril 2020.
- Kergomard, C. (2004). Cours de télédétection spatiale : Introduction. Ecole Normale Supérieure de Paris, 74 p.
- Legros, J-P. (1996). Cartographie des sols, de l'analyse spatiale à la gestion des territoires, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 317 p.
- Lillesand, T.M., Kiefer, R.W., and Chipman, J.W. (2015). Remote sensing and image interpretation, seventh edition, John Wiley & Sons Ltd, 770 p.
- Mitchell, O.R., Edward, J. D., Chen, P. (1977). Filtering to remove cloud cover in satellite imagery, Journal Transactions on Geoscience Electronics, 15:137-141.
- Provencher, L and Dubois, J.M. (2007). Précis de télédétection, méthodes de photointerpretation et d'interprétation d'image, Presses de l'Université du Québec, 503 p.
- Purkis, S and Klemas, V. (2011). Remote sensing and global environmental change, first edition, John Wiley & Sons Ltd, 757 p.
- Ranagalage, M., Estoque, R.C., and Murayama, Y. (2017). An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017). International Journal of Geo-Information, 6: 189:1-17.
- Saad, A. Z. (2002). Apport des images Thematic Mapper de Landsat 5 à la cartographie géologique à 1/500.000 d'In-Azaoua (Hoggar Central Méridien). Bulletin des Sciences Géographiques, 9 : 42-47.
- Saley, M.B., Kouame, F.K., Penven, M.J., Biemi, J., and Kouadio, H.B. (2005). Cartographie des zones à risque d'inondation dans la région semi-montagneuse à l'Ouest de la côte d'ivoire : apports des MNA et de l'imagerie satellitaire. Télédétection, 5, (1-2-3) : 53-67.
- Small, C., Okujeni, A., Van der Linden, S., Waske, B. (2018). Remote Sensing of Urban Environment, Comprehensive Remote Sensing, 6, 96-127.
- Tiercelin, J.R and Vidal, A. (2006). Traité d'irrigation, 2^e édition, Lavoisier, 1251 p.
- Trément, F., Argant, J and Brémon, E. (2015). À la recherche de l'or des Arvernes. Le programme MINEDOR. Caractérisation archéologique et paléoenvironnementale des mines d'or arvernes de Haute-Combraille (Protohistoire – Moyen Âge).



Dr. Abdelkader LARIBI

- UVED., (2008). ENVCAL -Suivi de l'environnement par télédétection, Cours en ligne. Université Paris I, Panthéon-Sorbonne.
- Xue, J., and Su, B. (2017). Significant Remote sensing vegetation indices: A review of developments and applications. Journal of sensors, Article ID 1353691, 17p.

Sites Web consultés

- USGS. 2018. <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-soil-adjusted-vegetation-index>.
- <https://quebecgeographique.gouv.qc.ca/education/aerienne-photos.asp>.
- https://fr.freepik.com/photos-gratuite/vue-aerienne-panoramique-du-paysage-route-village_5954811.htm.
- <http://www.uoh.fr/front/document/ee86e66d/cdbb/47df/ee86e66d-cdbb-47df-a13e-bf502c963b0a/UOHGEOprod/Module115/pages/s4/page2372.xml>.
- <http://berry.medieval.over-blog.com/article-le-parcellaire-radioconcentrique-medieval-autour-d-issoudun-36-52162914.html>.
- <https://fr.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>.
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Rayonnement_du_corps_noir.
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Fen%C3%AAtre_atmosph%C3%A9rique.
- fr.wikipedia.org/wiki/Programme_Landsat
- <http://www.chimix.com/an14/bac14/pond1.html>
- www.gisresources.com.
- <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/i/ikonos-2>.
- <http://eoedu-off.belspo.be>.
- <https://www.google.fr/search?q=satellite+NOAA&tbm=isch&ved=2ahUKEwjZxJb->
- https://asal.dz/?page_id=70.