

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Republique Algérienne Démocratique et Pouplaire



*Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem
Faculté des sciences de la nature et de la vie
Département des sciences agronomiques*

Cours
Téledétection
Première partie

*Cours
Téledétection
Première partie*

PARCOURS : Master 1^{ère} année

SPECIALITES :

✚ TECHNOLOGIE AVANCEES POUR L'AGRICULTURE DE PRECISION (TAAP)

ENSEIGNANT : FARAH T.
ANNEE UNIVERSITAIRE : 2023/2024

Première partie : télédétection

Table des matières

1. Introduction.....	1
2. Historique.....	1
3. Définition	3
4. Bases physiques et technologiques de la télédétection	5
4.1. Rayonnement Electromagnétique (REM)	5
4.1.1. Sources d'énergie électromagnétique	11
4.1.1.1 Sources naturelles	18
4.1.1.2 Sources artificielles.....	25
4.2. Interaction du REM avec la cible (atmosphère)	27
4.2.1. Absorption	28
4.2.2. Diffusion.....	30
4.2.3. Diffusion de Rayleigh	31
4.2.4. Diffusion de Mie.....	31
4.2.5. Diffusion non-sélective	32
4.3. Interaction du REM avec la cible (terre : végétation, sol et eau).....	32
4.3.1. Notions de réflectance.....	33
4.3.1.1 Réflexion spéculaire	34
4.3.1.2 Réflexion diffuse.....	34
4.3.2. Réponses spectrales des végétaux	34
4.3.3. Réponses spectrales des sols	38
4.3.4. Comportements spectraux des surfaces d'eau.....	41
4.4. Les capteurs de télédétection	43
4.4.1. Capteurs passifs	43
4.4.2. Capteurs actifs	45
4.4.3. Formes de Télédétection	46
4.5. Notions de résolution.....	47
4.5.1. Résolution spatiale.....	47
4.5.2. Résolution spectrale	49
4.5.3. Résolution radiométrique	52
4.5.4. Résolution temporelle	53
4.6. Signification thématique des canaux.....	53
4.6.1. Végétaux	57
4.6.1.1 Feuilles des végétaux.....	57
4.6.2. Surfaces d'eau.....	60
4.6.2.1 Surfaces d'eau de mer	60
4.6.3. Surfaces des sols	61
4.7. Orbites des satellites.....	64
4.7.1. Orbites géostationnaires.....	65
4.7.2. Orbites héliosynchrones	66
4.8. Aperçu sur quelques plates formes spatiales d'acquisition d'images satellites	66
4.8.1. Satellites optiques à faible résolution.....	67
4.8.2. Satellites optiques à moyenne résolution	68
4.8.2.1 Satellite Landsat	71
4.8.2.2 Satellites Spot.....	74
4.8.2.3 Satellite optique Sentinel	74
4.8.2.4 Satellites Algériens	77
4.8.3. Satellites optiques à haute résolution	79
4.8.3.1 Satellite radar "Sentinel-1"	81

4.8.3.2	Satellite radar Sentinel -3	82
4.8.4.	Catalogues d'images	82
4.8.4.1	Images à faible résolution	82
4.8.4.2	Images à moyenne et à haute résolution	83
5.	Conclusion	84

Liste des figures

Fig. 1 :	Principe général de la télédétection	4
Fig. 2:	Spectre électromagnétique	5
Fig. 3:	Rayonnement électromagnétique	7
Fig. 4:	Spectre électromagnétique détaillé	8
Fig. 5:	Spectre visible	9
Fig. 6:	Spectre des hyperfréquences	11
Fig. 7:	Incidence du rayonnement électromagnétique sur une surface	15
Fig. 8:	Direction de propagation	16
Fig. 9:	Domaines de l'infrarouge	19
Fig. 10:	Différence entre unités degré Celsius (°C) et Kelvin (K) de température d'un corps	22
Fig. 11:	Luminance spectrale $L_B(\lambda, T)$ du corps noir et certains corps naturels à différentes températures	24
Fig. 12:	Schéma d'interaction du REM avec l'atmosphère et la cible (terre)	28
Fig. 13:	Bilan de rayonnement de la Terre en (%) (d'après Brieß, 2019)	28
Fig. 17:	Absorption des rayonnements dans l'atmosphère	29
Fig. 14:	Diffusion des ondes électromagnétiques	30
Fig. 15:	Trajet optique au coucher et lever du Soleil	31
Fig. 16:	Diffusion non-sélective	32
Fig. 1:	Eléments d'un signal micro-onde passif (d'après Lillesand et Kiefer, 1979)	33
Fig. 2:	Réflectance de l'eau, végétation et sols dans les canaux Landsat TM (d'après Sleimi, 2018).	38
Fig. 3:	Réflectance d'un sol argileux (d'après Herbreteau et al., 2018).	40
Fig. 4:	Réflectance d'un sol (ex : sableux) en fonction de l'humidité (Herbreteau et al., 2018).	40
Fig. 18:	Fenêtres d'absorption du spectre électromagnétique	43
Fig. 19:	Télédétection passive et active	46
Fig. 20:	Formes de télédétection (d'après Mariama & Hakdaoui, 2013).	47
Fig. 21:	Exemple de résolution spatiale (d'après Faivre, 2018)	48
Fig. 22:	Exemple de résolution spectrale (d'après Faivre, 2018)	50
Fig. 23:	Exemples de résolutions spectrales améliorées	50
Fig. 24:	Exemple d'image panchromatique (PAN) (d'après Faivre, 2018)	51
Fig. 25:	Exemple d'image multi spectrale acquise par le satellite Pléiade (d'après Faivre, 2018)	51
Fig. 26:	Eléments d'un signal micro-onde passif (d'après Lillesand et Kiefer, 1979)	55
Fig. 27:	Angles d'incidence dans la direction de la cible et du satellite	56
Fig. 28:	Absorption, réflexion, transmission (d'après Bonnet et Rochon, 1993)	57
Fig. 29 :	Exemple de réflectance des végétaux dans le Proche Infrarouge	58
Fig. 30:	Propriétés optiques de l'eau	60
Fig. 31:	Réflectance d'un sol argileux (d'après Girard et al., 1975)	63
Fig. 32:	Réflectance d'un sol (ex : sableux) en fonction de l'humidité (d'après Girard, 1975).	63
Fig. 33:	Types d'orbites de satellites	65
Fig. 34:	Orbite géostationnaire	66
Fig. 35:	Orbite héliosynchrone	66
Fig. 36 :	Caractéristiques techniques du satellite Landsat-9	73
Fig. 37:	Chronologie du programme Landsat 1 à 9 (1972 à 2021).	74

Liste des tableaux

Tab. 1:	Longueurs d'ondes et fréquences radar utilisées en télédétection (d'après Sabins, 1978)	25
Tab. 2:	Caractéristiques générales de quelques capteurs optiques (d'après Faivre, 2018)	44
Tab. 3:	Caractéristiques générales des bandes de fréquences radar	45
Tab. 4:	Liste des bandes spectrales du satellite Sentinel-2 (d'après Faivre, 2018)	51
Tab. 5:	Caractéristiques particulières des orbites d'après Brieß, 2019)	65

<i>Tab. 6: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à faible résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).....</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 7: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à moyenne résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).</i>	<i>68</i>
<i>Tab. 8: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à moyenne résolution (d'après Faivre, 2018) (...suite).</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 9: Principales caractéristiques techniques des satellites Landsat (1,2,3,4,5,6,7 et 8).....</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 10: Les différentes applications des images du satellite Landsat TM (d'après Hamzaoui, 2005).</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 11: Caractéristiques des bandes spectrales des capteurs du satellite Landsat-8.....</i>	<i>71</i>
<i>Tab. 12: Comparaison entre les bandes spectrales du Landsat 7 et 8 (http://glovis.usgs.gov/).</i>	<i>72</i>
<i>Tab. 13: Caractéristiques des bandes spectrales du satellite optique Sentinel - 2 (d'après Faivre, 2018).</i>	<i>75</i>
<i>Tab. 14: Liste des satellites Africains (d'après John, 2017).</i>	<i>76</i>
<i>Tab. 15: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à haute résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).....</i>	<i>79</i>
<i>Tab. 16: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à haute résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique- Québec, 2013) (...suite1).....</i>	<i>80</i>
<i>Tab. 17: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à haute résolution d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique (Québec), 2013) (....suite2).....</i>	<i>81</i>

1. Introduction

Les publications se multiplient et permettent de mieux apprécier l'utilité de la télédétection du fait qu'il est devenu une nécessité et un besoin à la fois surtout quand on veut manipuler l'information géographique se trouve dans le contenu de l'imagerie satellitaire.

La télédétection spatiale, s'appuyant sur des mesures au sol et combinée aux systèmes d'informations géographiques, apporte une contribution décisive aux diverses questions que se posent en matière d'environnement, d'aménagement du territoire, d'exploitation rationnelle des ressources naturelles ou de prévention contre les catastrophes naturelles.

Depuis longtemps, la télédétection satellitaire constitue un outil moderne et efficace pour l'étude de l'activité végétale et les différents facteurs qui influencent et celle-ci a permis d'ouvrir de larges perspectives pour des applications thématiques très variées (Minvielle et Souiah, 2003). On entend par télédétection l'acquisition de renseignements concernant un objet ou un événement sur la base de mesures effectuées à distance.

2. Historique

Le terme " télédétection " a été inventé en 1960 par Evelyn Pruitt du Bureau de la Recherche Navale des Etats-Unis mais l'histoire de la télédétection remonte bien plus loin, citons par exemple le lancement de Spoutnik I par l'URSS en 1957 a marqué le début de " l'ère aérospatiale".

En 1959, le satellite américain Explorer VI a transmis la première image de la terre vue de l'espace.

Le satellite météorologique TIROS1 a été lancé dans le cadre des études de la végétation et de la détection des maladies des plantes.

En 1973, les Etats-Unis ont lancé une station orbitale, Skylab, qui a reçu des astronautes en 1973 et 1974. Les capteurs utilisés comprenaient deux appareils photographiques, qui ont pris 35,000 photographies, et un radiomètre multi bandes (13 canaux), qui a enregistré 800 km de bande magnétique. Trois ans plus tard l'URSS a lancé la station Soyouz dotée d'un appareil photographique semblable au matériel principal à bord du Skylab.

Les années 80 ont été marquées par une avancée significative au niveau de l'élaboration des techniques et outils de traitement d'images qui a conduit notamment au montage d'un grand nombre de projets basés sur l'utilisation des données spatiales.

L'Afrique se dotait ainsi, dans les années 90, de centres nationaux, sous régionaux et régionaux spécialisés en la matière. (BenKhatra et Essahli, 2005).

Quelques dates résument l'historique de la télédétection comme suit :

- ✓ 1839 : Mise au point de la photographie (Niepce, Daguerre),

- ✓ 1844 : Premières photographies aériennes réalisées depuis un ballon par G.F. Tournachon dit Nadar,
- ✓ 1856 : Le même Nadar fait breveter l'installation d'une chambre photographique à bord de la nacelle d'un ballon pour la prise de photographies aériennes verticales,
- ✓ 1858-1898 : Laussedat expérimente systématiquement l'utilisation de la photographie aérienne (ballon) en cartographie et met au point les méthodes de la photogrammétrie,
- ✓ 1909 : Premières photographies depuis un avion (Wright),
- ✓ 1914-1918 : Utilisation intensive de la photographie aérienne comme moyen de reconnaissance pendant la 1ère guerre mondiale. - 1919 : Mise au point du premier restituteur stéréoscopique moderne (appareil de Poivilliers) pour l'utilisation des photographies aériennes en cartographie topographique,
- ✓ 1919-1939 : Essor de la photographie aérienne pour la cartographie et la prospection pétrolière (Moyen-Orient),
- ✓ 1940 : Apparition des premiers radars opérationnels en Grande-Bretagne (bataille d'Angleterre),
- ✓ Depuis 1945 : Développement continu de la photographie aérienne comme méthode opérationnelle de cartographie et de surveillance de l'environnement. Perfectionnement des appareils et des émulsions (infrarouge),
- ✓ 1957 : Lancement de Spoutnik 1, premier satellite artificiel,
- ✓ 1960-1972 : Développement parallèle de la technique des satellites et des capteurs (mise au point des radiomètres et radars imageurs),
- ✓ 1960 : Lancement de Tiros, premier satellite météorologique équipé de caméras de télévision pour le suivi des masses nuageuses,
- ✓ 1964-1969 : Embarquement d'appareils photographiques à bord d'engins spatiaux habités,
- ✓ 1972 : Lancement d'ERTS, rebaptisé Landsat 1, premier satellite spécialisé de télédétection des ressources terrestres,
- ✓ 1974-1978 : Mise en place, sous l'égide de l'Organisation Météorologique Mondiale, du réseau des satellites météorologiques géostationnaires,
- ✓ 1978 : Lancement de Seasat, premier satellite spécialisé dans la télédétection de l'océan, équipé, entre autres capteurs, d'un radar, (satellite Nimbus-7),

- ✓ 1982 : Apparition de la haute résolution spatiale pour l'observation de la Terre : lancement de Landsat 4, équipé du radiomètre « Thematic Mapper »,
- ✓ 1986 : Lancement de SPOT 1 (Système Probatoire d'Observation de la Terre), satellite français de télédétection. Début de l'exploitation commerciale des images (Société Spotimage),
- ✓ 1990 : Lancement du satellite Spot 2,
- ✓ 1991 : Mise en orbite et début de l'exploitation du satellite européen ERS-1, équipé de plusieurs capteurs passifs et captifs pour l'étude de l'environnement global de la planète,
- ✓ 1991 : Lancement du satellite NOAA 12,
- ✓ 1992 : Mise en orbite et début de l'exploitation du satellite européen ERS-2,
- ✓ 1993 : Lancement du satellite Spot 3,
- ✓ 1994 : Lancement du satellite NOAA 14,
- ✓ 1995 : Lancement du satellite Indian Remote Sensing (IRS),
- ✓ 1998 : Lancement du satellite Spot 4,
- ✓ 1999 : Lancement par la société privée Space Imaging Corp. du satellite IKONOS, offrant des images à très haute résolution spatiale (1 m),
- ✓ 2002 : Lancement du satellite Spot 5,
- ✓ 2011 : Lancement des satellites Pleiades,
- ✓ 2012 : Lancement du satellite Spot 6,
- ✓ 2013 : Lancement du satellite Landsat 8,
- ✓ 2014 : Lancement du satellite Sentinel 1A,
- ✓ 2015 : Lancement du satellite Sentinel 2A,
- ✓ 2016 : Lancement du satellite Sentinel 3A et 1B,
- ✓ 2017 : Lancement du satellite Sentinel 5 Precursor,
- ✓ 2021 : Lancement du satellite Landsat 9.

3. Définition

Parmi les nombreuses définitions de la télédétection nous pouvons retenir celles qui se résument essentiellement comme suit :

La télédétection (remote sensing en anglais) est un ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (Faivre, 2018). La télédétection est la discipline scientifique qui regroupe l'ensemble des connaissances et des techniques utilisées pour l'observation, l'analyse, l'interprétation et la gestion de l'environnement à partir de mesures et d'images obtenues à l'aide de plates-formes aéroportées, spatiales, terrestres ou maritimes. Elle suppose l'acquisition d'informations (caractéristiques physiques et biologiques) à distance, sans contact direct avec l'objet étudié (Bonnet et Rochon, 1992).

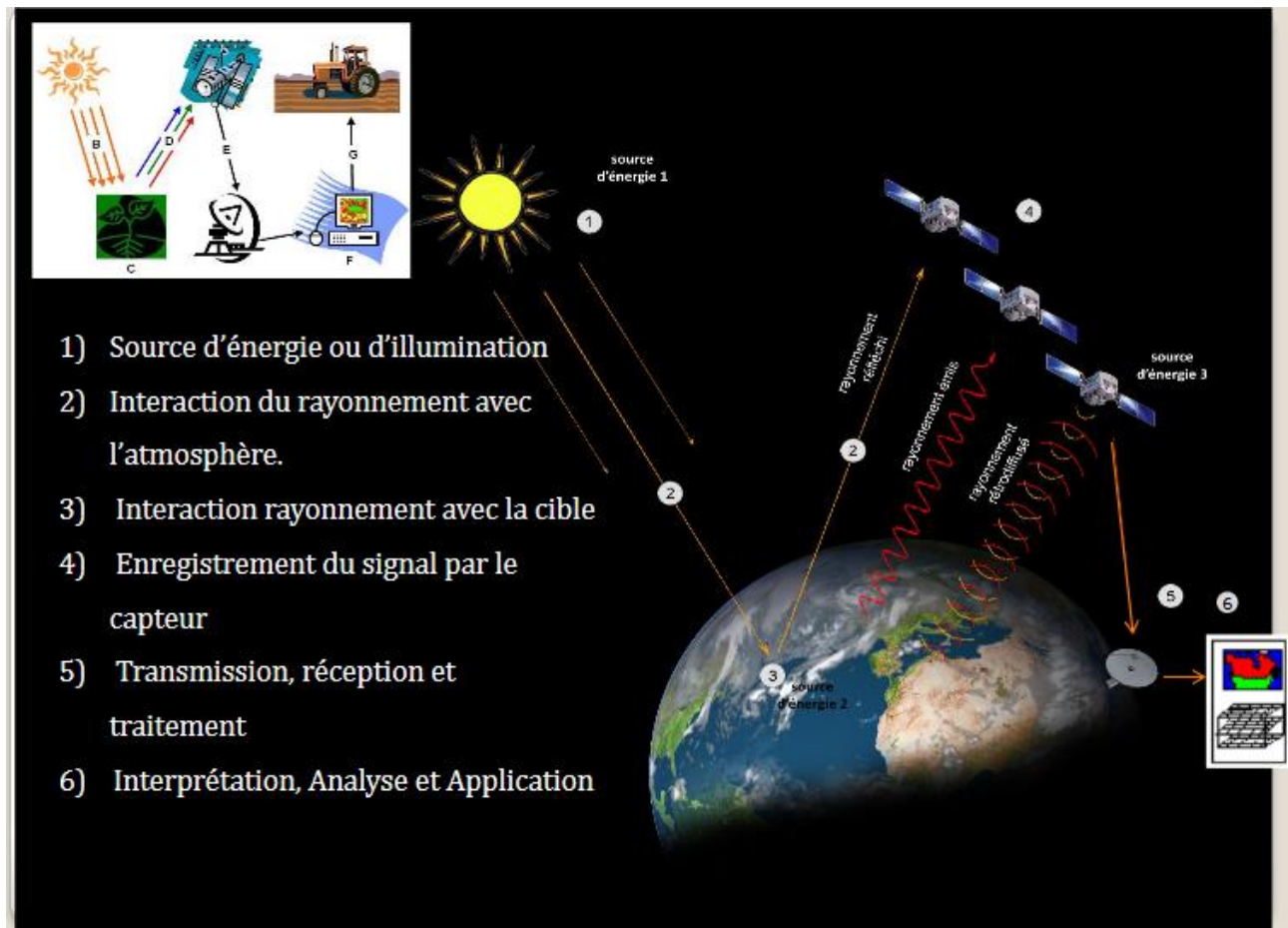


Fig. 1 : Principe général de la télédétection

La télédétection est définie comme étant l'ensemble des techniques mises en œuvre à partir d'avions, de ballons ou de satellites qui ont pour but d'étudier soit la surface de la terre ou d'autres planètes, soit l'atmosphère en utilisant les propriétés des ondes électromagnétiques émises, réfléchies ou diffractées par les différents corps observés (Scanvic, 1983).

La télédétection est un moyen d'appréhender les objets et d'étudier leurs propriétés spectrales. Cela se fait en étudiant les caractéristiques des ondes électromagnétiques réfléchies ou émises par ces objets. Elle est basée sur le principe que chaque objet absorbe, émet, diffuse et réfléchit des rayonnements qui lui sont propres et que l'on peut enregistrer et analyser (Deshayes et *al.*, 1984).

Alors que l'acteur « chercheur » la considère comme étant un outil défini par l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci.

4. Bases physiques et technologiques de la télédétection

La télédétection est un moyen d'observation de la terre, par l'étude des rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis par les objets au sol. Elle regroupe l'ensemble des techniques de collecte, de traitement et d'interprétation de l'information contenue dans ces rayonnements.

4.1. Rayonnement Electromagnétique (REM)

Le soleil émet un rayonnement qui se propage sous forme d'ondes. Ces ondes traversent l'espace puis l'atmosphère avant d'arriver à la surface de la Terre où une part d'entre elles est réfléchi vers l'espace. Ce rayonnement et les différentes ondes qui le composent sont représentés sous la forme d'un spectre électromagnétique. Les ondes sont caractérisées par leurs longueurs d'onde et leurs fréquences (deux grandeurs inversement proportionnelles). On parle par exemple de grandes ondes, de micro-ondes, d'ultraviolet, d'infra-rouge, etc. Dans le spectre visible, chaque couleur perçue par notre œil correspond à un intervalle de longueur d'onde. Le soleil n'est pas la seule source de rayonnement électromagnétique, de nombreuses autres sources émettent des ondes, qu'elles soient visibles ou non. Les domaines d'application du spectre électromagnétique sont nombreux : on utilise les ondes micro-ondes pour chauffer ou cuire des aliments, les rayons X pour les radiographies médicales, les rayonnements infrarouges émis par les êtres vivants pour observer des animaux de nuit, etc.

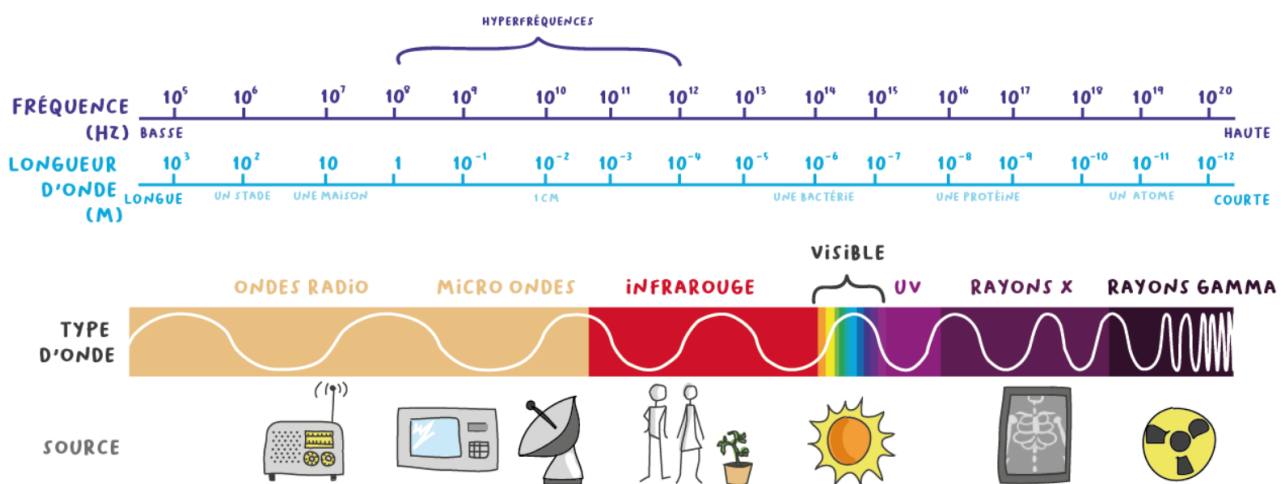


Fig. 2: Spectre électromagnétique

L'interaction entre le rayonnement solaire et les matériaux dépend de la longueur d'onde. Au cours de son trajet entre le Soleil, la Terre puis le capteur, ce rayonnement est (Faivre, 2018) :

1. Transmis ; lors de son passage à travers l'atmosphère, le rayonnement est transmis par le milieu. Les capteurs utilisent les bandes spectrales pour lesquelles la transmission du rayonnement par l'atmosphère est important.
2. Absorbé ; le signal parvenant au capteur est modifié au cours de la traversée atmosphérique où le rayonnement est absorbé par les constituants gazeux et les particules en suspension. L'atmosphère est quasi transparente aux rayonnements visibles et proche infrarouge, en revanche les surfaces naturelles absorbent une partie de ces rayonnements.
3. Réfléchi ; changement de direction du rayonnement quand il atteint une surface. La direction du rayonnement réfléchi peut varier, elle dépend de la rugosité des surfaces. On distingue ainsi trois types de réflexion (réflexion spéculaire, réflexion diffuse et réflexion de volume).
4. Diffusé ; la direction de la propagation du rayonnement est modifiée de manière aléatoire par les molécules et aérosols de l'atmosphère.
5. Emis ; après absorption, les particules s'échauffent et réémettent le rayonnement, mais souvent dans une autre longueur d'onde.

Les rayonnements qui nous intéressent dans les échanges radiatifs entre le soleil, le système terre-atmosphère et les satellites s'étendent sur un large spectre des ondes électromagnétique de 0.35 μm à 1 m.

Le Rayonnement Electromagnétique (REM) est une énergie qui apparaît sous forme de rayons de lumière visible et invisible, de micro-ondes et d'ondes-radio. Ces formes de REM, qui peuvent initialement apparaître comme des phénomènes séparés, font, en fait partie d'un spectre continu. Le meilleur exemple est celui d'un prisme, qui sépare la lumière blanche en différentes couleurs, dont chacune représente une longueur d'onde lumineuse différente. La lumière visible est la seule partie du REM détectable par l'œil humain. Ce rayonnement électromagnétique considéré comme étant une forme d'énergie ne peut être observée que par son interaction avec la matière.

Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M). Le champ électrique varie en grandeur et est orienté de façon perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement. Le champ magnétique est orienté de façon perpendiculaire au champ électrique. Les deux champs se déplacent à la vitesse de la lumière.

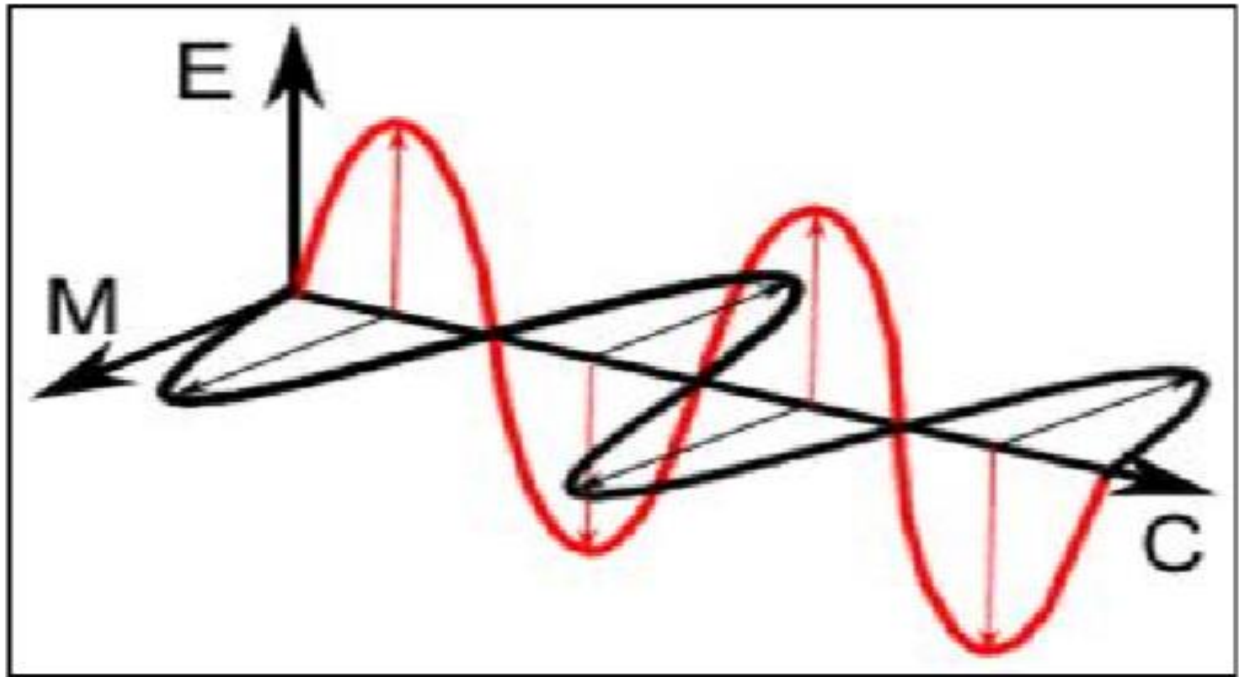


Fig. 3: Rayonnement électromagnétique

Il est indispensable de saisir les deux composantes du rayonnement électromagnétique que sont la longueur d'onde et la fréquence. La longueur d'onde est équivalente à la longueur d'un cycle d'une onde, ce qui correspond à la distance entre deux crêtes successives d'une onde. La longueur d'onde est représentée habituellement par la lettre grecque lambda (λ), elle est mesurée en mètres ou en l'un de ces sous-multiples tels que les nanomètres ($1\text{nm} = 10^{-9}$ mètre), micromètres ($1\mu\text{m} = 10^{-6}$ mètre) ou centimètres ($1\text{cm} = 10^{-2}$ mètre). La fréquence (ν) représente le nombre d'oscillations par unité de temps.

La fréquence est mesurée en Hertz (Hz), nombre d'oscillations par seconde, ou en multiple d'Hertz. La formule suivante illustre la relation entre la longueur d'onde et la fréquence :

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

λ : longueur d'onde,

C : vitesse de la lumière,

ν : fréquence.

La longueur d'onde et la fréquence sont donc inversement proportionnelles, tel que plus la longueur d'onde est petite, plus la fréquence est élevée, et plus la longueur d'onde est grande, plus la fréquence est basse.

Le spectre électromagnétique représenté par la Fig. 2 s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). La télédétection utilise plusieurs régions du spectre électromagnétique.

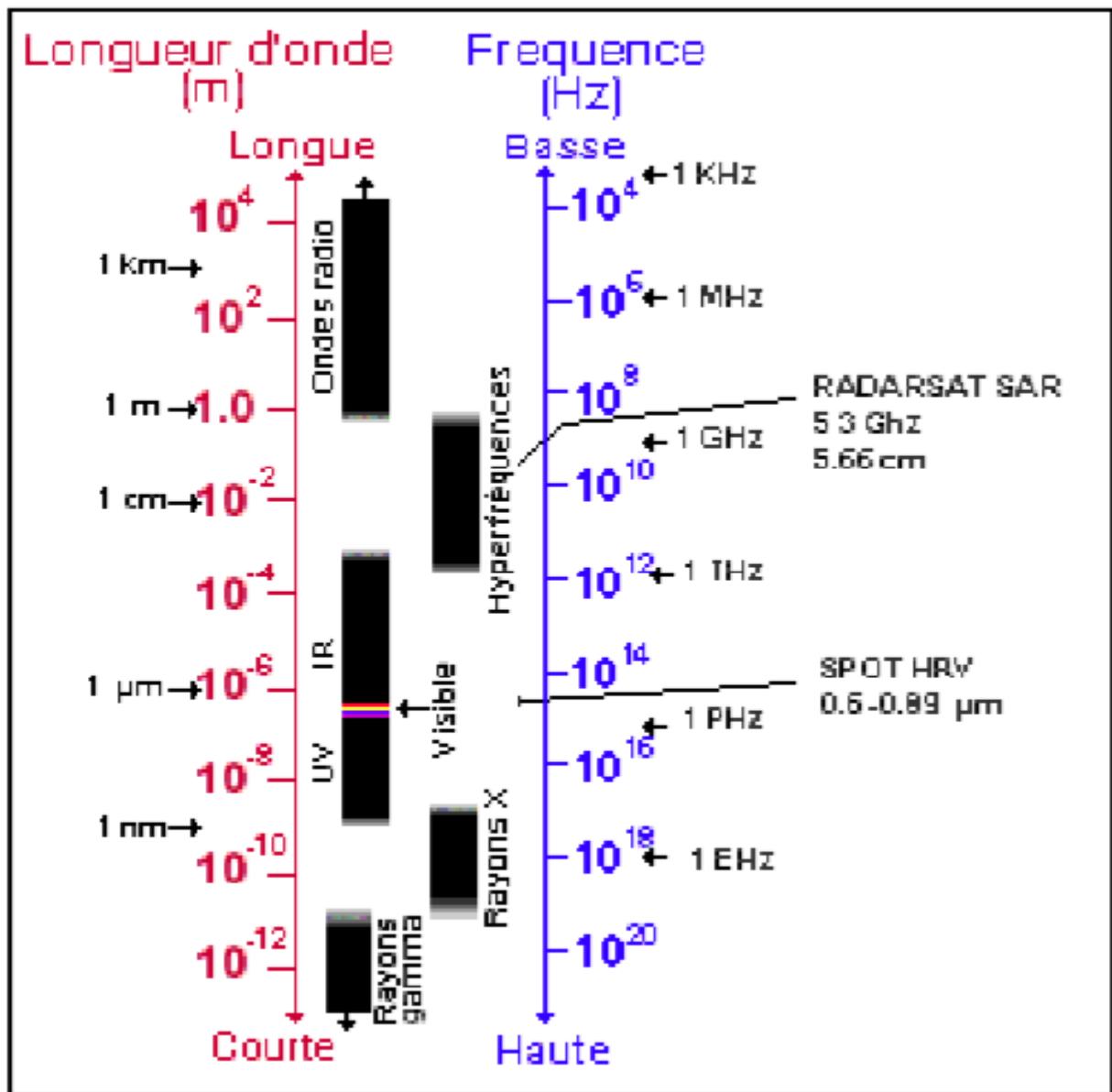


Fig. 4: Spectre électromagnétique détaillé

Les plus petites longueurs d'onde utilisées par la télédétection se situent dans l'ultraviolet. Certains matériaux de la surface terrestre, surtout des roches et minéraux, entrent en fluorescence ou émettent de la lumière visible quand ils sont illuminés par un rayonnement ultraviolet.

La lumière que nos yeux - nos tout premiers "capteurs de télédétection" peuvent détecter se trouve dans ce qui s'appelle "spectre visible". Il est important de constater que le spectre visible représente une petite partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui

nous entoure est invisible à l'œil nu, mais il peut cependant être capté par d'autres dispositifs de télédétection.

Les longueurs d'onde visibles s'étendent de $[0.4 \text{ à } 0.7] \mu\text{m}$. La couleur qui possède la plus grande longueur d'onde est le rouge, alors que le violet a la plus courte longueur d'onde. Les longueurs d'onde du spectre visible que nous percevons comme des couleurs communes sont énumérées ci-dessous. Il est important de noter que c'est la seule portion du spectre que nous pouvons associer à la notion de couleurs.

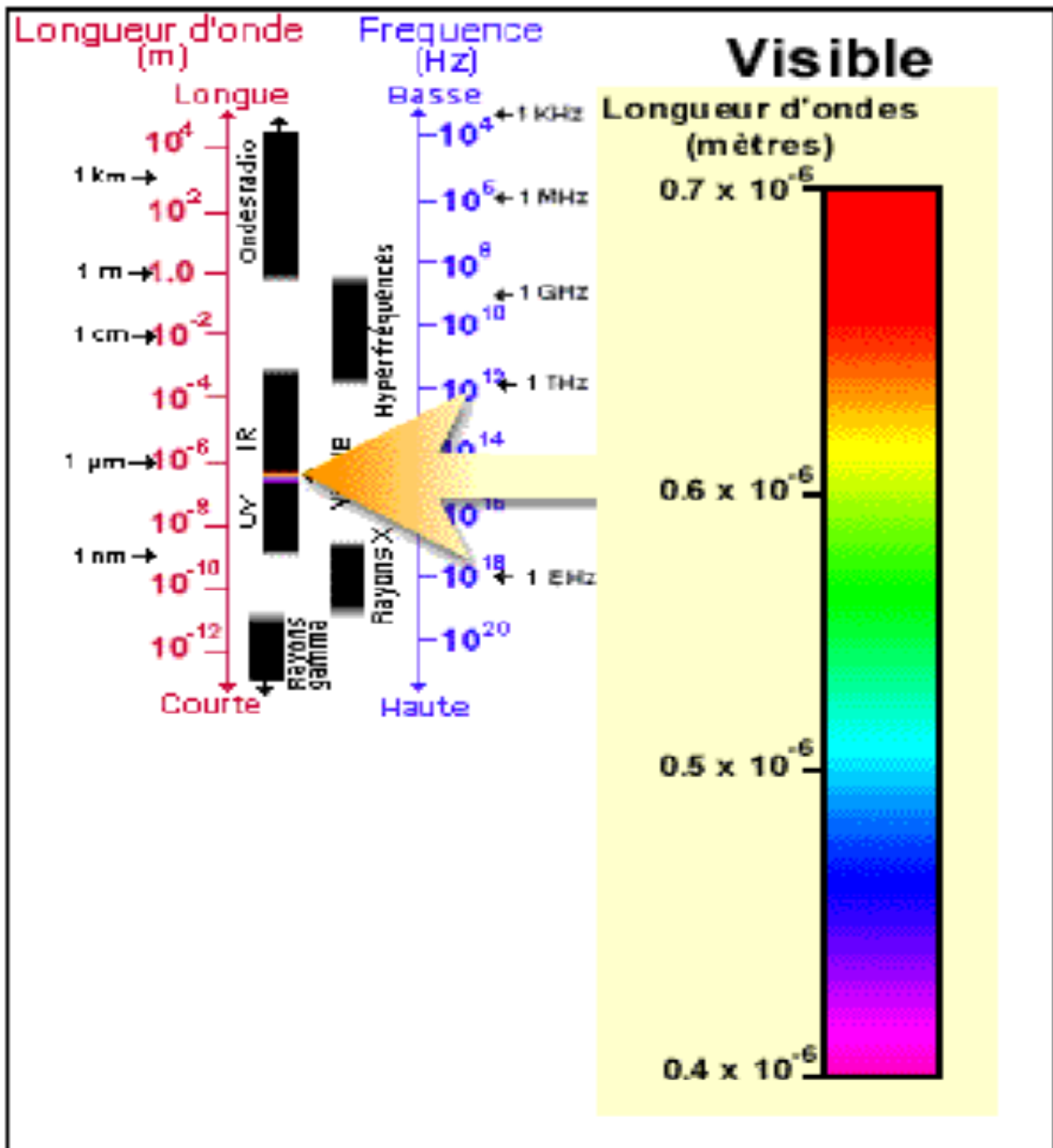


Fig. 5: Spectre visible

- a. Violet : 0.4 - 0.446 μm
- b. Bleu : 0.446 - 0.500 μm
- c. Vert : 0.500 - 0.578 μm
- d. Jaune : 0.578 - 0.592 μm
- e. Orange : 0.592 - 0.620 μm
- f. Rouge : 0.620 - 0.7 μm .

Le bleu, le vert et le rouge sont les couleurs (ou les longueurs d'onde) primaires du spectre visible. Une couleur primaire ne peut être créée par deux autres couleurs, mais toutes les autres couleurs peuvent être créées en combinant les couleurs primaires. Même si nous voyons la lumière du Soleil comme ayant une couleur uniforme ou homogène, en réalité, elle est composée d'une variété de longueurs d'onde dans les parties de l'ultraviolet, du visible, et de l'infrarouge du spectre. La portion visible de ce rayonnement se décompose en ses couleurs composantes.

Lorsqu'elle traverse un prisme. Le prisme réfracte la lumière de façon différente en fonction de la longueur d'onde.

Examinons maintenant la partie de l'infrarouge (IR) du spectre. L'infrarouge s'étend approximativement de [0,7 à 100] μm , ce qui est un intervalle environ 100 fois plus large que le spectre visible. L'infrarouge se divise en deux catégories : IR réfléchi et IR émis ou thermique. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible. L'infrarouge réfléchi s'étend approximativement de [0,7 à 3] μm . L'infrarouge thermique est très différent du spectre visible et de l'infrarouge réfléchi. Cette énergie est essentiellement le rayonnement qui est émis sous forme de chaleur par la surface de la Terre et s'étend approximativement de [3 à 100] μm . Depuis quelques temps, la région des hyperfréquences, suscite beaucoup d'intérêt en télédétection. Cette région comprend les plus grandes longueurs d'onde utilisées en télédétection et s'étend approximativement de [1 mm à 1m]. Les longueurs d'onde les plus courtes possèdent des propriétés semblables à celles de l'infrarouge thermique, tandis que les longueurs d'onde les plus grandes ressemblent aux ondes radio.

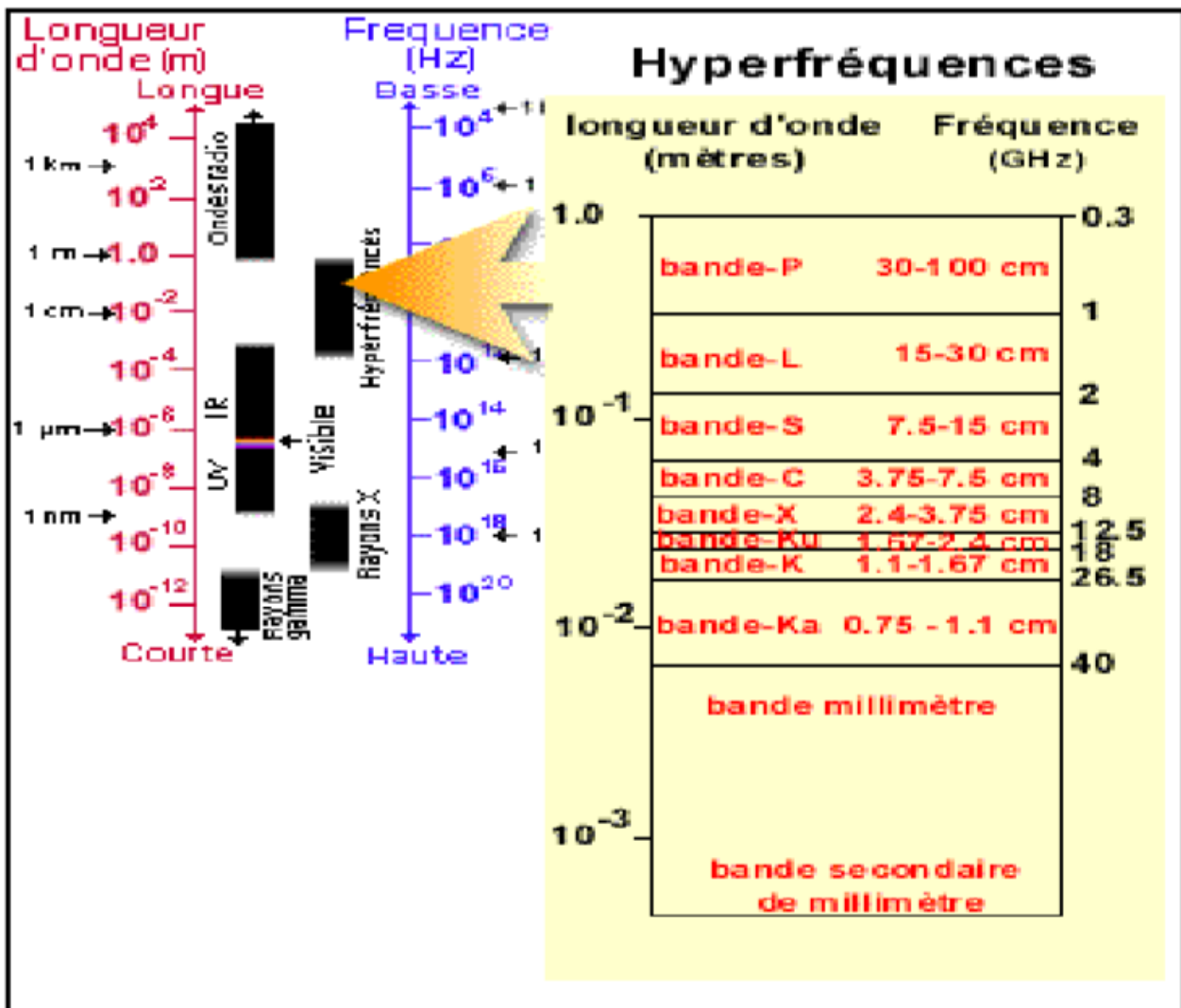


Fig. 6: Spectre des hyperfréquences

4.1.1. Sources d'énergie électromagnétique

Les expériences en télédétection ont montré que les objets ont des comportements spécifiques dans les différentes longueurs d'ondes, en fonction de leurs propriétés physiques, chimiques et morphologiques.

En observation de la Terre on peut exploiter :

- Des ondes émises par le soleil puis réfléchies par la surface de la Terre et enregistrées par un capteur placé sur un satellite,
- Des ondes émises par un émetteur artificiel placé sur le satellite puis réfléchies par la surface de la Terre et enregistrées par un capteur placé sur ce même satellite.

Dans le premier cas on parle de télédétection passive et d'images optiques, dans le second cas de télédétection active et d'images radar. La télédétection radar présente l'avantage de :

- a. S'affranchir des contraintes de couverture (les ondes émises par les satellites traversent les nuages).
- b. Pouvoir acquérir des images de jour comme de nuit.

En revanche, leur exploitation pour l'observation de la Terre est moins intuitive et une expertise est nécessaire pour interpréter des images qui ressemblent bien moins à une photo que les images optiques. Ainsi, différents domaines spectraux sont exploités en télédétection optique (longueurs d'onde du visible à l'infrarouge) et en télédétection radar (micro-ondes ou plus couramment appelées hyperfréquences dans le domaine de la télédétection).

Chaque élément de la surface de la terre peut d'une part absorber, transmettre ou réfléchir les rayonnements envoyés par une source électromagnétique naturelle (télédétection passive) ou artificielle (télédétection active) et d'autre part il peut émettre ses propres rayonnements, en particulier dans l'infrarouge thermique.

Deux techniques de télédétection peuvent être distinguées : les techniques passives, où l'on se contente d'enregistrer l'énergie naturelle émise ou réfléchiée par les corps et, d'autre part les techniques actives, où l'on « éclaire » les corps à étudier avant d'enregistrer l'énergie qu'ils renvoient vers le détecteur.

Nous rappelons dans cette section, la notion de certaines grandeurs énergétique utilisés couramment par la télédétection telle que, la luminance et la réflectance d'un objet.

Angle solide : un Angle solide $d\Omega$ en stéradians (sr) délimite un cône dans l'espace est donné par :

$$d\Omega = \frac{ds}{r^2}$$

ds étant l'aire que découpe le cône sur une sphère de rayon (r) dont le centre est au sommet du cône. L'angle solide correspondant à tout l'espace autour d'un point, vaut 4π [sr]. L'angle solide d'un cône de révolution dont le demi-plan aux sommets est α vaut :

$$\Omega = 2\pi (1 - \cos \alpha)$$

Pour un observateur situé à la surface de la terre, le demi espace formé par la voûte céleste (hémisphère) correspond donc à 2π [sr] ($\alpha = 90^\circ$).

- Flux énergétique : c'est l'énergie (W) émise par une source par unité de temps dans toutes les directions, c'est donc une puissance (en watt) :

$$F = \frac{dw}{dt}$$

Pour chacune des radiations de longueur d'onde (λ) ou de fréquence (ν) constituant le rayonnement émis, on peut donner la puissance spectrale $F\lambda$ ou $F\nu$.

$$I = \frac{dF}{d\Omega}$$

Une source est isotrope si son intensité est la même dans toutes les directions, et elle est dite anisotrope lorsque n'émet pas la même puissance dans toutes les directions.

- Luminance d'une source étendue : la luminance d'une source L [W. m⁻². Sr⁻¹], est la puissance émise dans une direction d'angle (θ , ϕ) par unité d'angle solide et par unité de surface (dS) émettrice apparente d'une source étendue.

$$L = \frac{dF}{d\Omega \times dS \times \cos \theta}$$

La luminance est une notion très importante car l'énergie mesurée au niveau du capteur est proportionnelle à la luminance de la source observée (surface terrestre). La surface est lambertienne si la luminance est indépendante de la direction (θ , ϕ).

- Emissance d'une source étendue : l'émissance est la puissance émise dans un hémisphère par unité de surface de la source :

$$M = \frac{dF}{dS}$$

dF étant la puissance émise par l'élément de surface dS dans une hémisphère, on peut écrire :

$$M = \frac{dF}{dS} = \iint L(\theta, \varphi) \times d\Omega \times \cos \theta$$

Si la surface émettrice est lambertienne la luminance L est constante ; d'autre part comme $d\Omega = \sin\theta \times d\theta \times d\varphi$ on peut écrire l'équation comme suit :

$$M = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta, \varphi) \times \cos(\theta) \times d\Omega = \pi \times L$$

- Eclairement d'un objet : soit un champ de rayonnement monochromatique arbitraire, illuminant un élément de surface dS , et soit dF (en Watts), le flux transporté par le rayonnement que reçoit dS . L'éclairement monochromatique de l'élément dS sera par définition le flux reçu par unité de surface est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{dF}{dS}$$

Cet éclairement monochromatique en $[W. m^{-2}]$ sera proportionnel au nombre de photons reçus par unité de temps et par unité de surface.

Si le champ de rayonnement se réduit à un simple faisceau parallèle, on parlera de l'éclairement E_0 de ce faisceau. Il s'agira alors de l'éclairement que recevrait une surface disposée perpendiculairement à la direction du faisceau. Si la normale de la surface fait un angle θ avec cette direction, l'éclairement deviendra :

$$E = E_0 \times \cos \theta$$

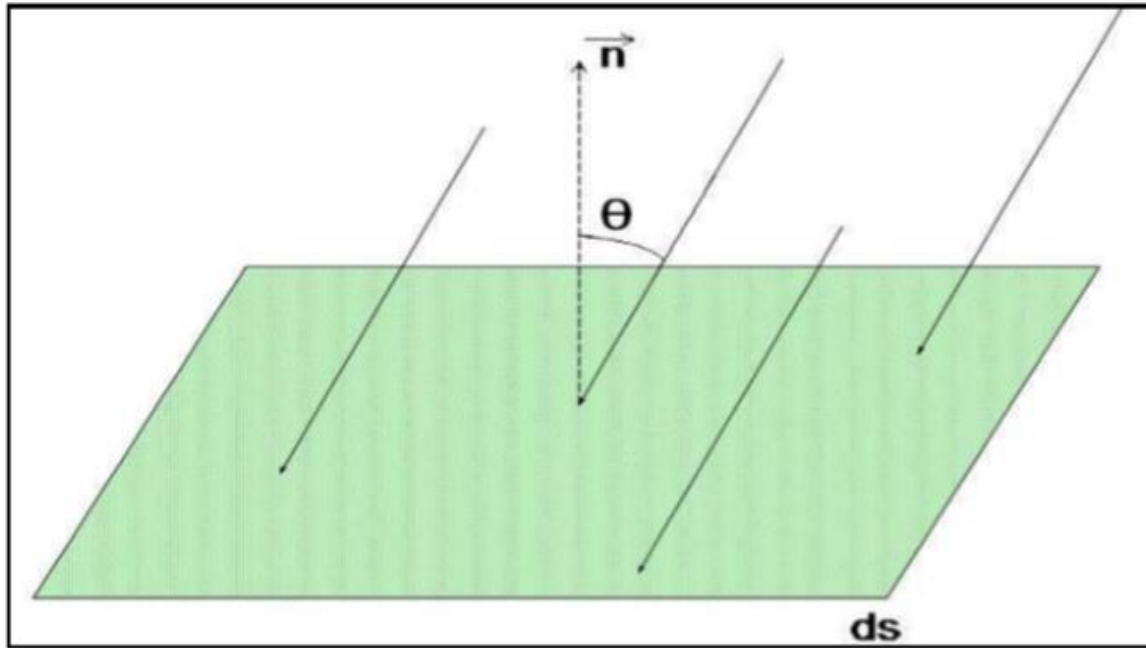


Fig. 7: Incidence du rayonnement électromagnétique sur une surface

Plus généralement un éclairement E donné, résultera de l'illumination de dS par un champ de rayonnement diffus arrivant autour du point (M) dans une infinité de directions. Pour analyser ce champ, nous considérons que les photons qui arrivent, à un petit angle solide $d\omega$ près, dans une direction particulière faisait un angle θ avec la normale à dS . Soit dE la contribution de ces photons à l'éclairement totale E . On leur associera la luminance monochromatique L [W. m⁻². Sr⁻¹] du champ de rayonnement, au point M et dans la direction considérée, définie par :

$$dE = L \times d\omega \times \cos \theta$$

On associera au faisceau parallèle ainsi considéré en M, un éclairement propre à $L \times d\Omega$.

En repérant la direction de propagation par l'angle θ et par son azimut φ dans l'élément dS , on prendra l'élément de l'angle solide :

$$d\Omega = \sin \theta \times d\theta \times d\varphi$$

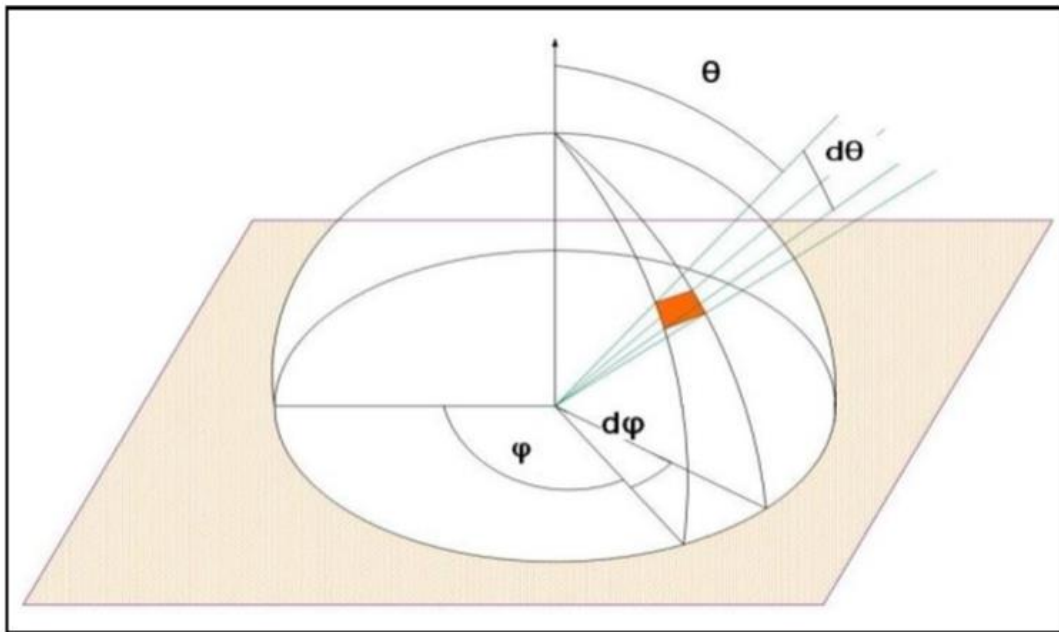


Fig. 8: Direction de propagation

Intensité d'une source ponctuelle : c'est la puissance rayonnée par une source ponctuelle par unité d'angle solide, elle est donnée en [W. sr⁻¹] par :

L'éclairement sera relié à la luminance $L(\theta, \varphi)$ par la relation suivante :

$$E = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} L(\theta, \varphi) \times \cos \theta \times \sin \theta \times d\theta$$

Dans le cas particulier d'un rayonnement isotrope, de luminance constante L_0 , on aura :

$$E = \pi \times L_0$$

Loi de Planck

Définit la distribution de la luminance énergétique spectrale du corps noir en fonction de la température thermodynamique. Tout objet avec $T > 0K$ (Kelvin) émet de l'énergie.

$T \uparrow \Rightarrow \text{Énergie} \uparrow (\text{rayonnement} \uparrow \text{ et } \lambda \downarrow)$

$$M_{\lambda,T} = \frac{c_1}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c_2/(\lambda \cdot T)} - 1}$$

Loi du déplacement de Wien

Pour une température donnée, il existe une longueur d'onde pour laquelle l'énergie électromagnétique est maximale.

$$\lambda_{\max} = \frac{2898 (\mu m \cdot K)}{T(K)}$$

Loi de Stefan-Boltzman

Établit la puissance totale rayonnée par unité de surface dans le demi-espace libre d'un corps noir.

$$M = \sigma \cdot T^4$$

1. Relation directe entre la température et la quantité d'énergie électromagnétique émise.
2. Entre plus chaud est l'objet, plus l'énergie produit.
3. Des petites variations de température impliquent des grandes variations de l'énergie émise (T4)
4. Les corps réels ne sont pas des corps noirs.

Deux types de capteurs existent en télédétection, les capteurs actifs et les capteurs passifs. Les capteurs actifs utilisent la réflexion des ondes émises par le satellite, alors que les capteurs passifs utilisent la réflexion des rayons solaires. La télédétection est dite passive quand le capteur n'émet aucune énergie (par ex. capteur optique passif avec les canaux Rouge, Vert, Bleu), et active lorsque le capteur émet sa propre source d'énergie avant réception (par ex. capteur *Radio Detection and Ranging (RADAR)* en bandes L, C, ou X (Herbreteau et al., 2018).

4.1.1.1 Sources naturelles

Les rayonnements qui nous intéressent dans les échanges radiatifs entre le soleil, le système terre-atmosphère et les satellites s'étendent sur un large spectre des ondes électromagnétique de 0.35 μm à 1 m.

Le capteur embarqué sur l'engin spatial est un appareil qui détecte les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis et les convertit en une valeur physique qui peut être enregistrée et traitée. Les capteurs passifs, qui enregistrent le REM réfléchi ou émis à partir de sources naturelles. Ils mesurent la radiation produite naturellement (l'énergie solaire renvoyée, soit l'énergie terrestre émise). Le corps noir est le radiateur parfait, car il émet toute l'énergie absorbée. Le rayonnement du soleil correspond à peu près à celui du corps noir. La terre représente aussi une source d'énergie qui émet essentiellement dans l'infrarouge lointain. Tous les objets se trouvant sur la surface de la terre émettent des radiations lorsque leur température est supérieure à $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pendant la construction des capteurs, on assortit autant que possible les détecteurs de la sensibilité. Comme celle-ci se modifie peu à peu avec le temps, il arrive qu'un détecteur devient plus ou moins sensible à la radiance qu'un autre. En conséquence, la même cible sera représentée avec des luminosités différentes par des détecteurs à sensibilités différentes. Les données auxiliaires du capteur sont utilisées au stade de prétraitement (au sol) pour corriger le défaut d'image.

Principales zones ou bandes spectrales employées dans les mesures de télédétection

Ondes non visibles

- 0,35 - 0,40 μm (ultraviolet),
- 0,70 - 0,90 μm (proche infrarouge).

L'infrarouge est un rayonnement électromagnétique ; il possède toutes les propriétés fondamentales de la lumière : propagation, réflexion, réfraction, interférences, diffraction, diffusion, polarisation, etc. Il est situé dans une région spectralement invisible à l'œil humain, entre visible et les micro-ondes ; ses longueurs d'onde sont supérieures à celles des radiations rouges ($\lambda \geq 0,72\text{ }\mu\text{m}$) et on peut leur fixer une limite supérieure qui est voisine de 0,1 cm. Le domaine de l'infrarouge est divisé en PIR (proche infrarouge), IRM (infrarouge moyen), IRT (infrarouge thermique), IRL (infrarouge lointain).

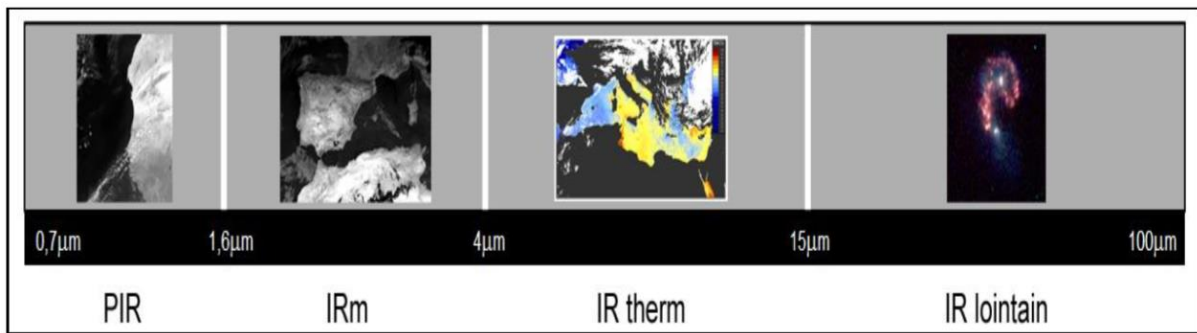


Fig. 9: Domaines de l'infrarouge

Le Proche infrarouge

Le proche infrarouge (0,7 à 1,6) μm , est la partie du spectre électromagnétique qui vient juste après le visible (couleur rouge). Comme pour le visible, ce que le radiomètre (instrument de mesure à distance) mesure dans le proche infrarouge, c'est une luminance correspondant au rayonnement solaire réfléchi par la surface terrestre. Ce domaine du spectre électromagnétique est très utilisé en télédétection pour différencier les surfaces naturelles qui se caractérisent par de très importantes variations de la réflectance à cette longueur d'onde. Il permet également l'étude des surfaces continentales, et notamment de distinguer les surfaces végétatives des surfaces minérales car les surfaces couvertes par la végétation se distinguent par une forte réflectance dans les longueurs d'onde du proche infrarouge, alors qu'elles réfléchissent peu le rayonnement dans le visible.

L'Infrarouge moyen

L'infrarouge moyen (1,6 à 4) μm , permet de façon générale d'étudier les teneurs en eau des surfaces. Il est très utilisé en agriculture et en foresterie, notamment pour cartographier les couverts végétaux en état de stress hydrique. L'atmosphère est en grande partie opaque aux rayonnements du moyen infrarouge qui sont absorbés par la vapeur d'eau. Seules quelques fenêtres atmosphériques permettent la transmission du rayonnement. Elles sont centrées sur les longueurs d'onde 2,5 μm , 3,5 μm et 5 μm .

L'Infrarouge thermique

Dans ce domaine spectral (4 à 15) μm , le rayonnement dépend des propriétés d'émissivité des surfaces, et les capteurs satellitaires mesurent la température apparente des objets. En effet une partie du rayonnement visible et proche infrarouge parvenant à la surface de la Terre est absorbée par les objets, puis réémise sous forme de chaleur à une longueur d'onde plus grande.

Télédétection dans l'infrarouge thermique

Plusieurs systèmes de télédétection multi spectraux (MSS) captent la radiation infrarouge (ou thermique) ainsi que le visible et l'infrarouge réfléchi. Cependant, la détection de l'énergie

infrarouge émise par la terre (entre 3 et 15 microns) demande une technique différente de la technique utilisée pour capter l'énergie infrarouge réfléchie. Les capteurs infrarouges thermique (ou capteurs thermiques) utilisent des photos détectrices dont la surface est sensible au contact des photons infrarouges émis par la terre. Ces détecteurs sont refroidis à des températures très basses (près du zéro absolu), de façon à limiter leur propre émission d'infrarouge thermique. Les capteurs thermiques mesurent essentiellement la température de surface et les propriétés thermiques de la cible.

Les systèmes de détection thermique sont des capteurs à balayage perpendiculaire à la trajectoire, qui captent la radiation émise dans la portion infrarouge thermique du spectre d'énergie. Ces systèmes utilisent une ou plusieurs références internes (corps noir) de température pour étalonner la radiation détectée. De cette façon, les capteurs thermiques peuvent déterminer la température absolue de la radiation captée. Afin d'analyser une image de température radiative relative (avec un thermo gramme), on affiche en différents niveaux de gris, les températures chaudes en fond pâles, et les températures froides en fond foncés. Les images qui montrent les températures relatives à chacun pixel (plus petit élément d'un nuage satellitaire correspondant à une surface donnée de la cible observée) sont suffisantes pour la plupart des besoins. La température absolue peut être calculée, mais elle demande un étalonnage précis, une mesure de température de référence et une connaissance approfondie des propriétés thermiques des cibles, de la distorsion géométrique et des effets radiométriques est nécessaire.

L'émission thermique

Tout corps dont la température thermodynamique (T) est supérieure à 0 K ($-273,16^{\circ}\text{C}$) est une source de rayonnement thermique. Ce rayonnement est directement associé à l'agitation des particules constituant la matière. De ce fait, il est qualifié de 'thermique', car la température est une mesure de l'énergie cinétique interne du milieu. L'intensité de ce rayonnement est modélisée de manière exacte pour les corps 'parfaits' appelés corps noirs.

Le phénomène de corps noir

Un corps noir désigne un objet idéal dont le spectre électromagnétique ne dépend que de sa température. Il est caractérisé par une température thermodynamique T , il est opaque à son propre rayonnement. Ceci signifie que dans tout domaine spectral, sa capacité à émettre un rayonnement est égale à sa capacité à absorber ce rayonnement ; les bandes d'absorption et d'émission sont coïncidentes. Le rayonnement du corps noir est à l'équilibre avec la matière. Le rayonnement est alors le seul mécanisme d'échanges d'énergie, en dehors des collisions moléculaires responsables de cet équilibre, le corps est dit à l'équilibre thermodynamique.

Les lois du corps noirs

Pour évaluer l'émission thermique on utilise les lois suivantes :

a. Loi de Planck

La luminance spectrale $L_B(\lambda, T)$ en ($\text{W.m}^{-2}.\text{sr}^{-1}.\mu\text{m}$) du rayonnement du corps noir est isotrope, peut être évalué par la loi de Planck suivante :

$$\frac{\partial L_B(\lambda, T)}{\partial \lambda} = \frac{2h\lambda^{-5}.c^2}{[\exp(\frac{hc}{\lambda kT}) - 1]}$$

Où :

c : est la vitesse de la lumière ($2,997925.10^8 \text{ ms}^{-1}$),

h : est la constante de Planck ($6,62618.10^{-34} \text{ J.s}$),

k : est la constante de Boltzmann ($1,38066.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$),

Le rayonnement du corps noir étant isotrope, son émittance $M_B(\lambda, T)$ en ($\text{W.m}^{-2}.\mu\text{m}$) est donnée par la relation suivante :

$$M_B(\lambda, T) = 2\pi \int_0^{\pi/2} L_B(\lambda, T). \cos\theta. d\Omega = \pi. L_B(\lambda, T)$$

Où, $d\Omega$ est le cône angulaire d'émission et où θ est l'angle entre la direction d'émission et la normale locale.

b. Loi de Wien

La majeure partie de l'émittance $M_B(T)$ survient sur une bande spectrale relativement étroite centrée sur la longueur d'onde $\lambda_{\text{max}} (\mu\text{m})$ correspondant au maximum de la fonction de Planck λ_{max} et $M_B(\lambda_{\text{max}}, T)$ sont données par la relation de Wien suivante :

$$\lambda_{max} = \frac{2897,8}{T}$$

$$M_B(\lambda_{max}, T) = 1,2862 \cdot 10^{-5} \cdot T^5$$

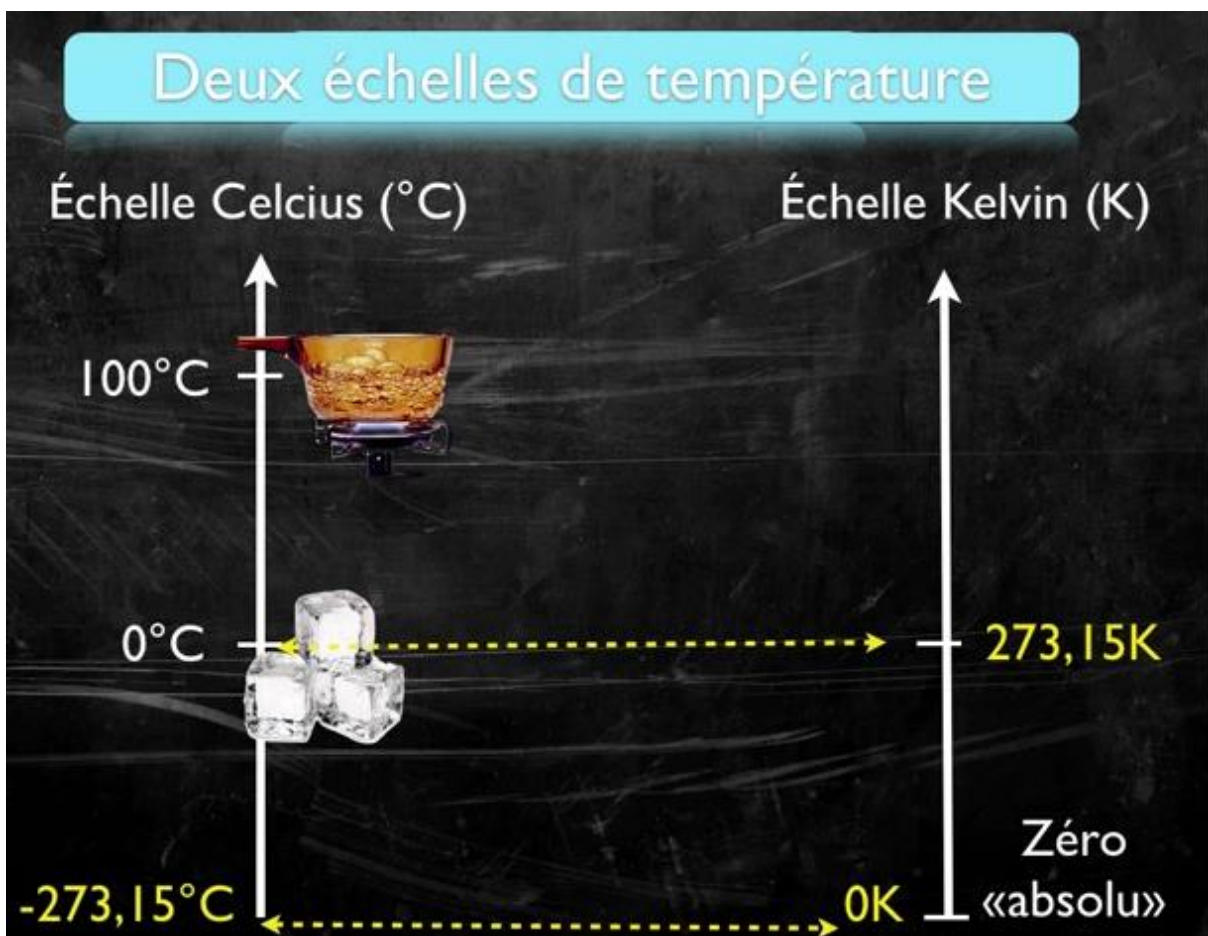


Fig. 10: Différence entre unités degré Celcius (°C) et Kelvin (K) de température d'un corps

L'échelle Celsius est basée sur l'état macroscopique des corps, le 0°C est associé à l'eau qui passe de l'état liquide à l'état solide et inversement, alors que les 100 °C à laquelle l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux.

L'Echelle Kelvin est basé sur l'état microscopique des corps et leurs agitations. L'agitation nulle correspond à la valeur de zéro absolue ou 0 Kelvin qui correspond à une température de -273,15 °C d'où aucun corps ayant une température inférieure à 273,15 °C.

Température (en degré Kelvin) = température (en degré Celsius) + 273,15

c. Loi de Stéphan-Boltzmann

Cette loi considère que l'émittance totale [W.m⁻²] rayonnée par une corp noire, équivalent au rayonnement émis sur l'ensemble du spectre est définie par :

$$M_B(T) = \int_0^{\infty} M_B(\lambda, T). d\lambda = \frac{2\pi^4 K^4}{15C^2 h^3} T^4 = \sigma . T^4$$

Où σ est la constante de Stéfan Boltzmann [5,669. 10⁻⁸ W.m⁻²K⁻⁴]. La luminance totale LB T W. m⁻².sr⁻¹ associée est :

$$L_B(T) = \int_0^{\infty} L_B(\lambda, T). d\lambda = \frac{\sigma . T^4}{\pi}$$

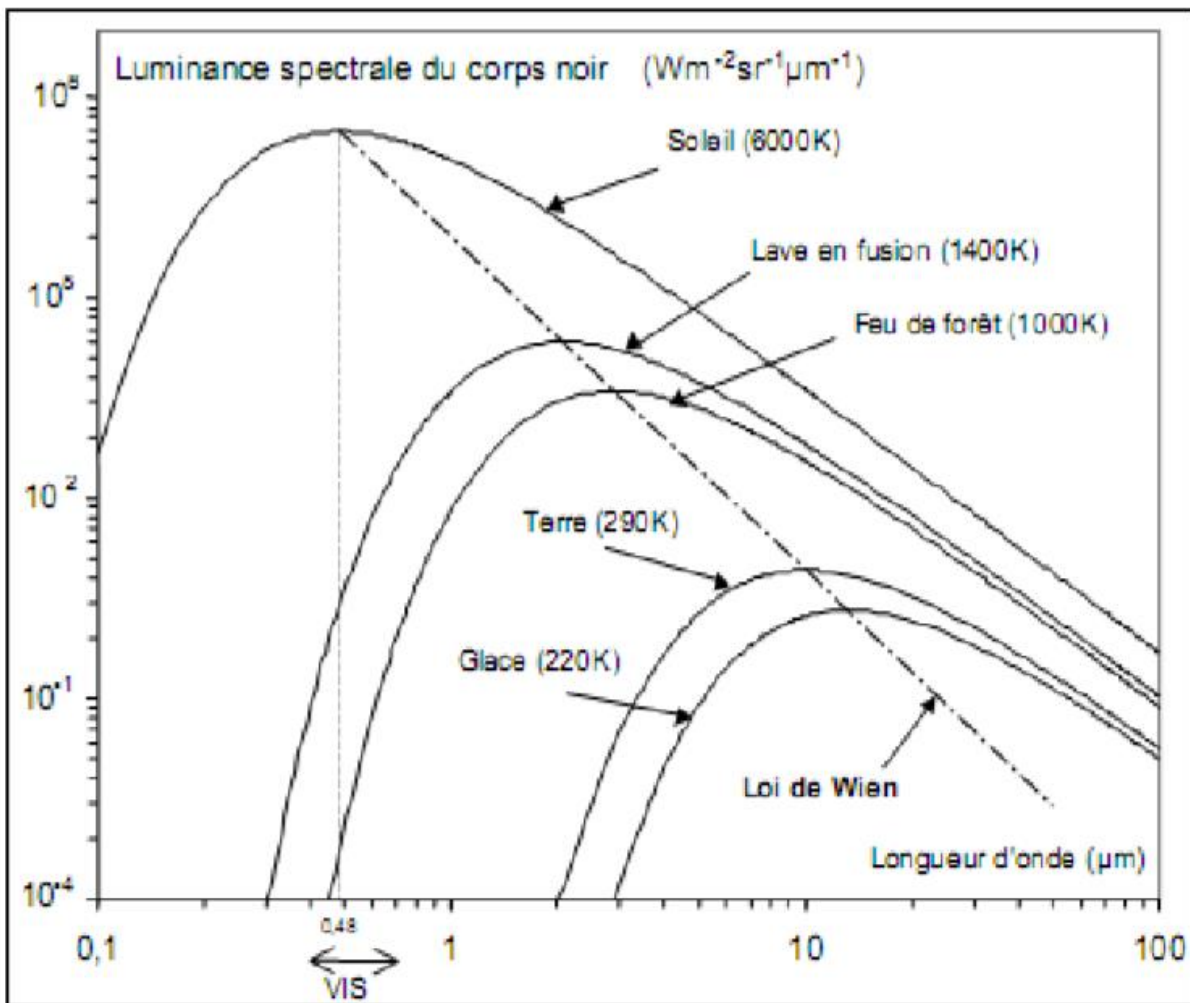


Fig. 11: Luminance spectrale $LB(\lambda, T)$ du corps noir et certains corps naturels à différentes températures.

L'Infrarouge lointain

L'infrarouge lointain (15 à 100) μm , n'est utilisé ni pour l'observation de la terre, ni pour l'étude de l'atmosphère, mais pour étudier la formation des galaxies et des étoiles. Les détecteurs, appelés bolomètres utilisent cette gamme de longueurs d'onde pour mesurer l'intensité du rayonnement infrarouge émis par les corps célestes.

Ondes visibles

➤ 0,40 – 0,70 μm (visible),

L'œil humain ne peut voir que la synthèse des trois bandes suivantes :

1. 0,40 – 0,50 μm (bleu),
2. 0,50 – 0,60 μm (vert –jaune),
3. 0,60 – 0,70 μm (rouge).

Les techniques de la télédétection se différencient les unes des autres par le type de vecteur (drone, ballon, avion ou satellite), le mode d'acquisition (analogique ou numérique), la résolution spatiale, la gamme spectrale utilisée et la surface observée. Ces techniques sont actuellement au nombre de quatre :

1. La photographie aérienne ou spectrale,
2. La télédétection multi spectrale visible,
3. La télédétection thermique,
4. La radar graphie (Lidar, ...etc.).

4.1.1.2 Sources artificielles

Les bandes des capteurs Radar sont ainsi peu ou très peu sensibles aux conditions atmosphériques à la différence des capteurs optiques pour lesquels les nuages, en particulier, masquent le sol. Dans le cas des capteurs Radar, on mesure la part retransmise (rétrodiffusée) par les objets tout en mesurant le temps de trajet des ondes et les changements éventuels de polarisation de l'onde émise (Herbreteau et al., 2018). Les capteurs actifs peuvent émettre ses propres rayonnements ou énergies artificielles on parle télédétection active ou radar.

Les sources d'énergies sont constituées par différents appareils tels que les lasers et les radars. Elles permettent la production artificielle d'un rayonnement et l'enregistrement du signal réfléchi par la surface visée. Les capteurs actifs se composent d'un émetteur, qui est la source du rayonnement, et d'un détecteur qui mesure le rayonnement de retour de la surface observée. Le capteur actif le plus utilisé en télédétection est le radar imageur à visée latérale. Le grand avantage du radar est d'utiliser des longueurs d'ondes très grandes, entre 0,8 cm et 1 m, pour lesquelles l'atmosphère, y compris les nuages, est complètement transparente ; les radars sont des capteurs « tous temps », particulièrement intéressants dans les régions du monde où la nébulosité est très fréquente, et pour les applications qui nécessitent d'obtenir des images à des dates et heures bien déterminées (Kergomard, 1990). Les caractéristiques générales des longueurs d'ondes et fréquences radar utilisées en télédétection sont résumées dans le Tab.1 suivant :

Tab. 1: Longueurs d'ondes et fréquences radar utilisées en télédétection (d'après Sabins, 1978).

Désignation de Bande	λ :Longueur d'ondes (cm)	Fréquence Mégahertz (10 ⁶ cycles/sec)
Ka (0, 86 cm *)	0,8 à 1,1	40,000 à 26.500
K	1,1 à 1,7	26,500 à 18.000
Ku	1,7 à 2,4	18,000 à 12.500

X (3 et 3, 2 cm *)	2,4 à 3,8	12,500 à 8.000
C	3,8 à 7,5	8,000 à 4.000
S	7,5 à 15,0	4,000 à 2.000
L (25 cm *)	15,0 à 30,0	2,000 à 1.000
P	30,0 à 100,0	1,000 à 300

(*) Indique les longueurs d'ondes utilisées généralement avec les radars imageurs

Dans les conditions nuageuses qui font obstacle aux moyens de télédétection conventionnels, la fiabilité de l'acquisition des données prend plus d'importance que la résolution ou la fréquence. Un capteur actif est peut-être la seule source possible de donner et sa fiabilité facilitera la régularité de la surveillance. Le radar est tout indiqué pour ce rôle et un capteur aéroporté suffit pour les exigences de haute résolution telle que la distinction du couvert. Ce type de données peut être utilisé pour une carte initiale, et les données à faible résolution pourront servir aux mises à jour de cette carte. Les capteurs RSO tel Radarsat sont plus utiles dans les cas où les couches nuageuses persistent et limitent l'utilité des capteurs optiques.

L'interprétation du type de couvert forestier avec des données radars est très similaire à l'interprétation d'images multi spectrales. Les mêmes éléments d'interprétation sont utilisés (ton, texture, forme, motif, grandeur, association), mais la texture joue un rôle de première importance dans la distinction des différents types de forêts. La visualisation des images en stéréo aide à différencier la hauteur relative des arbres et à définir les rivières qui ont une végétation spécifique sur leurs rivages.

Les résultats expérimentaux (tests portés sur deux espèces résineuses : Pin maritime et Pin noir d'Autriche) obtenus avec le capteur Hutsat (bande X 2,1 cm et bande C 5,6 cm) par Martinez (2000), montrent qu'on peut estimer la hauteur des arbres avec une précision absolue de l'ordre du mètre, comme on peut déduire de ces estimations d'autres variables tel que le volume de bois sur pied et l'indice de fertilité locale.

Des données de l'image Radarsat ont montrés que les plantations d'Eucalyptus d'Algorta (Uruguay en 1998) présentaient une tonalité plus brillante et une texture plus grossière que les plantations de pins, ce qui permet la classification des espèces. Les images de Radarsat ont considérablement facilité la classification des espèces forestières, notamment la distinction entre les plantations d'eucalyptus et les plantations de pins qui génèrent beaucoup de confusion lorsque la classification est faite à partir de données optiques.

Les résultats préliminaires ont démontré que les images Radarsat sont aussi très utiles pour la détection de nouvelles plantations forestières ; ce qui permet, avec l'aide des cartes d'utilisation des sols d'obtenir une mise à jour rapide des activités de reboisement.

L'information polarimétrique (données acquises par l'antenne RSO) rehausse fortement la distinction entre les espèces forestières lors des conditions de feuillaison et de défeuillaison ; et permet la démonstration de l'effet significatif de l'angle d'illumination RSO sur le mécanisme de diffusion des forêts (Touzi, 2004).

La transparence de l'atmosphère aux micro-ondes ou hyperfréquences permet au radar d'acquérir les données quelles soient les conditions climatiques. Les micro-ondes pénètrent les nuages et ne sont diffusées ni par la brume ni par la pluie.

Les capteurs actifs (radar, Sonar, ...etc.) peuvent illuminer un objet avec leur propre source de radiation. L'illumination peut soit induire un objet à émettre une radiation (fluorescence), soit lui faire réfléchir la radiation produite par le capteur. Les capteurs actifs sont souvent utilisés quand la radiation naturelle dans une bande particulière du spectre n'est pas suffisante pour illuminer convenablement la cible, autrement dit quand elle est au-dessous du seuil signal-bruit.

4.2. Interaction du REM avec la cible (atmosphère)

Avant que le rayonnement, qui sera utilisé pour la télédétection, atteigne la surface de la Terre, celui-ci doit traverser une certaine épaisseur d'atmosphère. Les particules et les gaz dans l'atmosphère peuvent dévier ou bloquer le rayonnement incident. Ces effets sont causés par les mécanismes de diffusion et d'absorption.

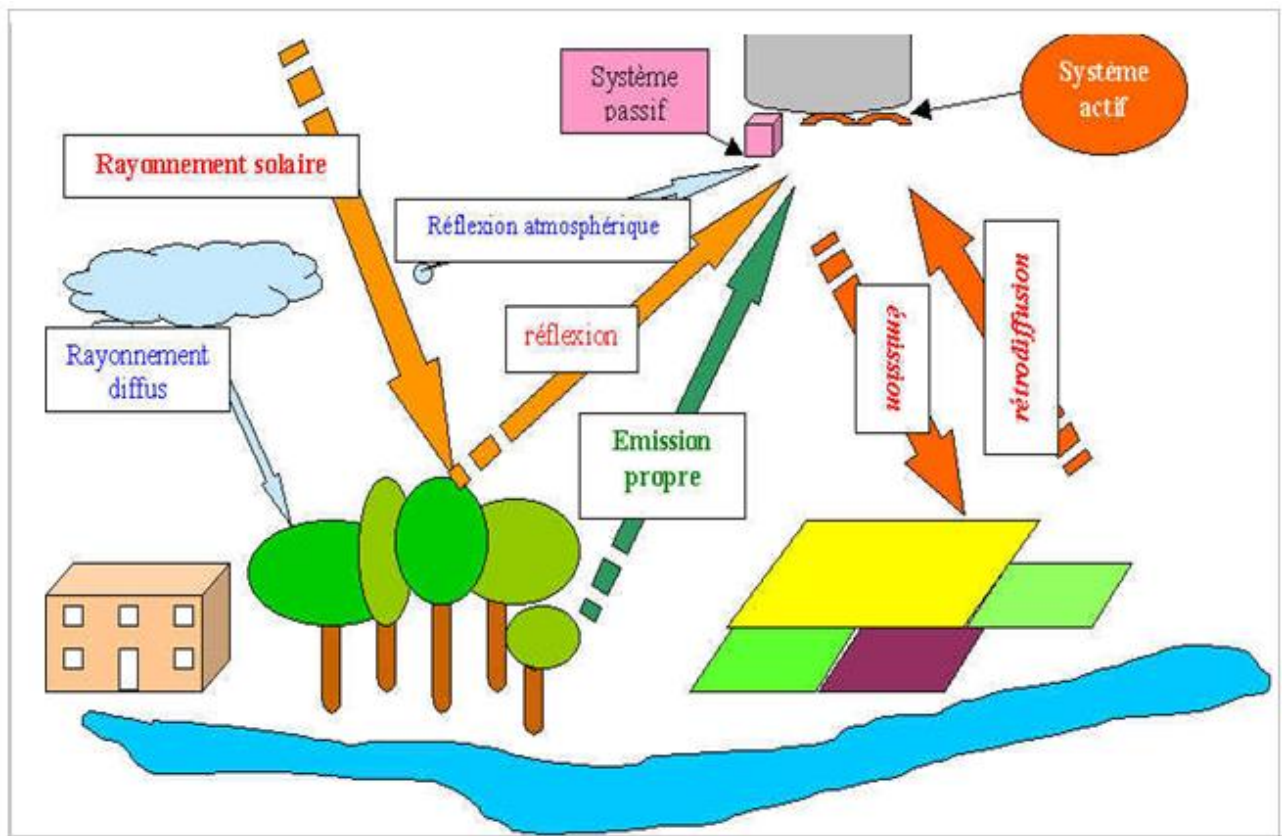


Fig. 12: Schéma d'interaction du REM avec l'atmosphère et la cible (terre)

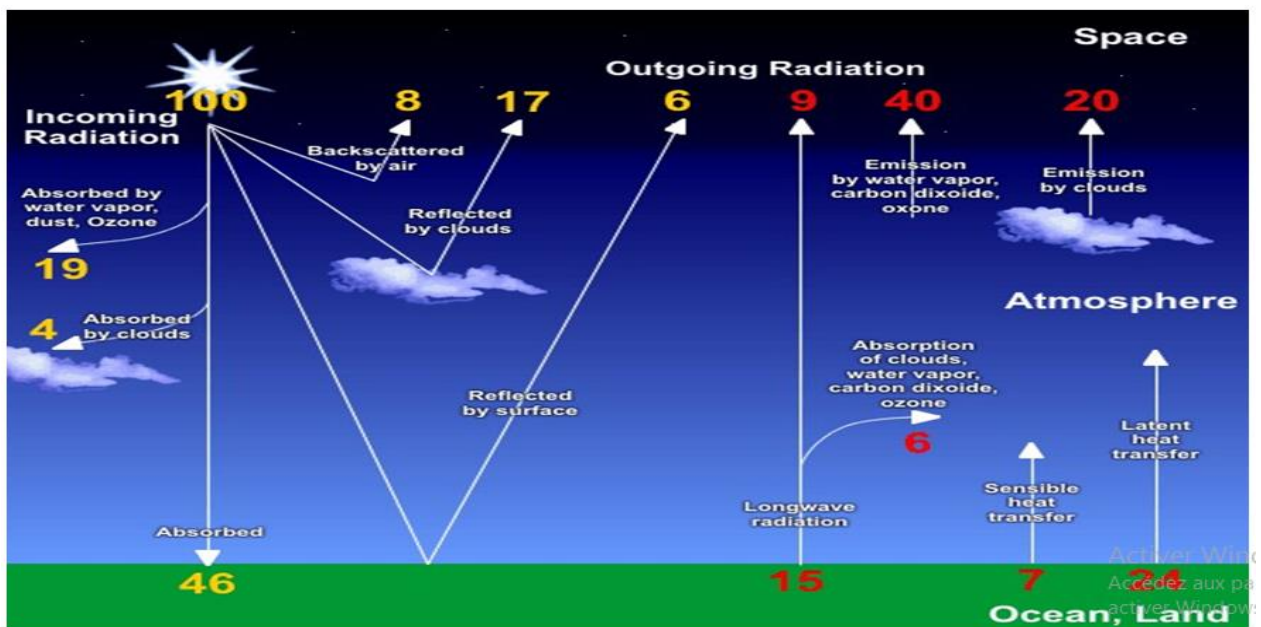


Fig. 13: Bilan de rayonnement de la Terre en (%) (d'après Brieß, 2019)

4.2.1. Absorption

Ce phénomène entre en jeu lorsque le rayonnement électromagnétique interagit avec l'atmosphère. L'absorption survient lorsque les grosses molécules de l'atmosphère (ozone, dioxyde de carbone et vapeur d'eau) absorbent l'énergie de diverses longueurs d'onde.

L'ozone absorbe les rayons ultraviolets qui sont néfastes aux êtres vivants. Sans cette couche de protection dans l'atmosphère, notre peau brûlerait lorsqu'elle est exposée au Soleil.

Le dioxyde de carbone est un gaz qui contribue à l'effet de serre. Ce gaz absorbe beaucoup de rayonnement dans la portion infrarouge thermique du spectre et emprisonne la chaleur dans l'atmosphère.

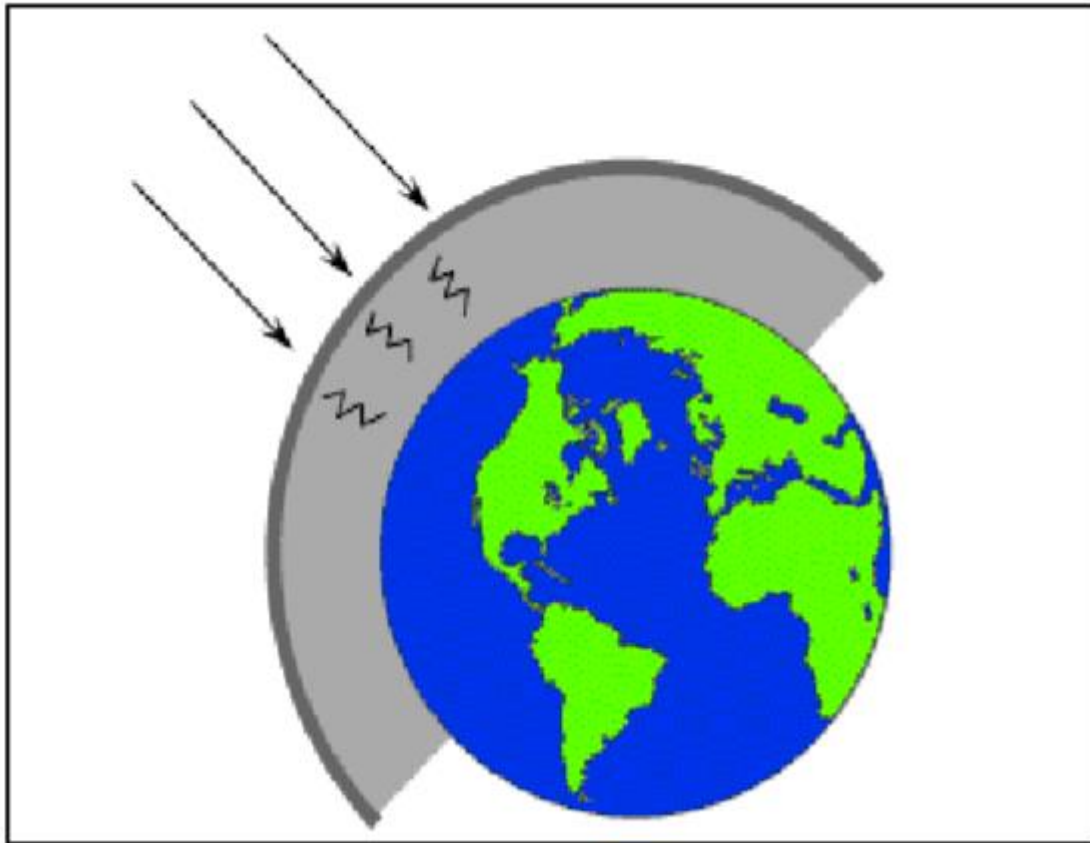


Fig. 14: Absorption des rayonnements dans l'atmosphère

La vapeur d'eau dans l'atmosphère absorbe une bonne partie du rayonnement infrarouge de grandes longueurs d'onde et les hyperfréquences de petites longueurs d'onde qui entrent dans l'atmosphère (entre $22\mu\text{m}$ et 1m). La présence d'eau dans la partie inférieure de l'atmosphère varie grandement d'un endroit à l'autre et d'un moment à l'autre de l'année. Par exemple, une masse d'air au-dessus d'un désert contient très peu de vapeur d'eau pouvant absorber de l'énergie, tandis qu'une masse d'air au-dessus des tropiques contient une forte concentration de vapeur d'eau. Parce que ces gaz et ces particules absorbent l'énergie électromagnétique dans des régions spécifiques du spectre, ils imposent le choix de longueurs d'onde utilisées en télédétection. Les régions du spectre qui ne sont pas influencées de façon importante par l'absorption atmosphérique, et qui sont donc utiles pour la télédétection, sont appelées fenêtres atmosphériques.

Les effets atmosphériques dépendent de facteurs tels que la longueur du trajet, les longueurs d'ondes observées et les variations quotidiennes des conditions atmosphériques. Dans le cas de l'énergie réfléchie, l'atmosphère intervient aussi bien entre la source de lumière et la cible, qu'entre la cible et le capteur. En ce qui concerne les longueurs d'ondes émises, la situation est plus simple parce que la cible est la source de lumière. Cette énergie absorbée par l'atmosphère est ensuite réémise, généralement sous forme de chaleur.

La quantité d'énergie émise est fonction de la température et de l'émissivité du matériau. Etant donné que l'énergie émise par la terre est la plus importante dans la région infrarouge thermique et que l'émissivité de l'eau est essentiellement constante dans cette gamme. Les mesures infrarouges, pourvues qu'elles soient calibrées, permettent de déterminer les températures de la surface de l'eau avec un degré raisonnable de précision.

4.2.2. Diffusion

La diffusion se produit par interaction entre le rayonnement incident et les particules ou les grosses molécules de gaz présentes dans l'atmosphère. Les particules dévient le rayonnement de sa trajectoire initiale. Le niveau de diffusion dépend de plusieurs facteurs comme la longueur d'onde, la densité de particules et de molécules, et de l'épaisseur de l'atmosphère que le rayonnement doit franchir.

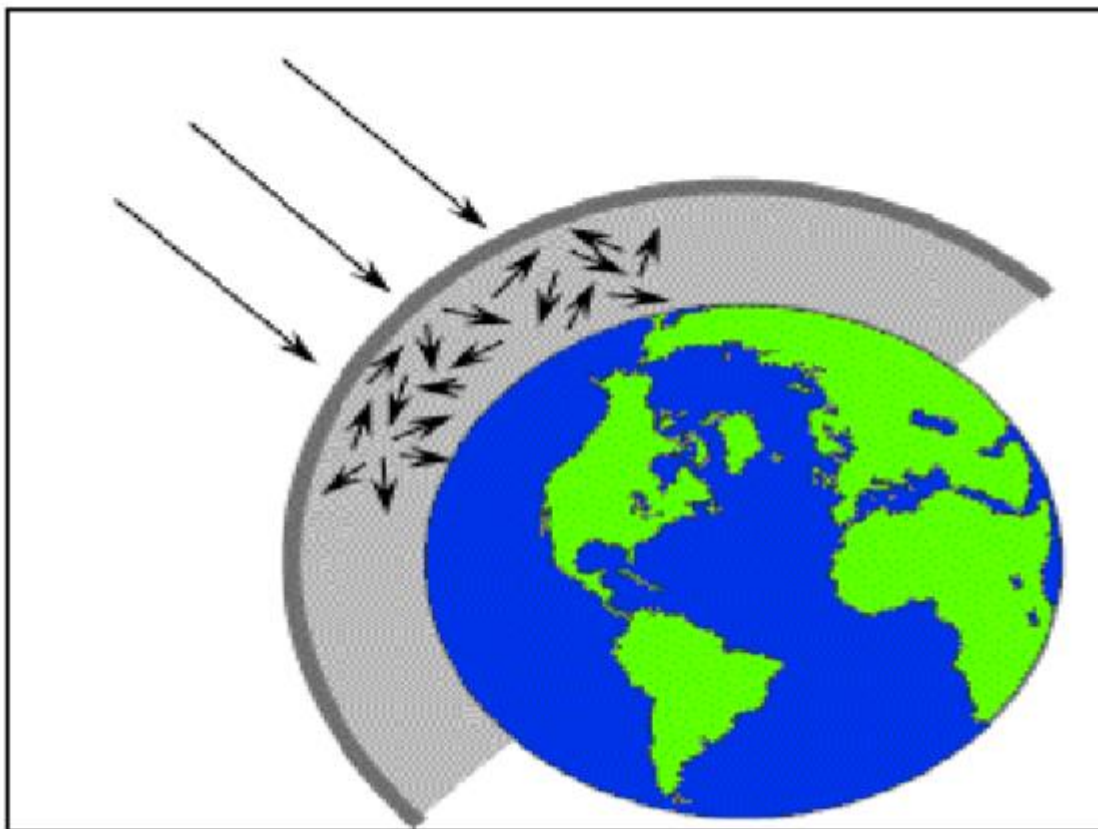


Fig. 15: Diffusion des ondes électromagnétiques

Il existe trois types de diffusion :

4.2.3. Diffusion de Rayleigh

Elle se produit lorsque la taille des particules est inférieure à la longueur d'onde du rayonnement. Celles-ci peuvent être soit des fines particules d'aérosols ou des molécules d'azote ou d'oxygène. La diffusion de Rayleigh disperse et dévie de façon plus importante les courtes longueurs d'onde que les grandes longueurs d'onde. Cette forme de diffusion est prédominante dans les couches supérieures de l'atmosphère. Ce phénomène explique pourquoi nous percevons un ciel bleu durant la journée. Comme la lumière du Soleil traverse l'atmosphère, les courtes longueurs d'onde (correspondant au bleu) du spectre visible sont dispersées et déviées de façon plus importante que les grandes longueurs d'onde. Au coucher et au lever du Soleil, le rayonnement doit parcourir une plus grande distance à travers l'atmosphère qu'au milieu de la journée. La diffusion des courtes longueurs d'onde est plus importante. Ce phénomène permet à une plus grande proportion de grandes longueurs d'onde de pénétrer l'atmosphère.

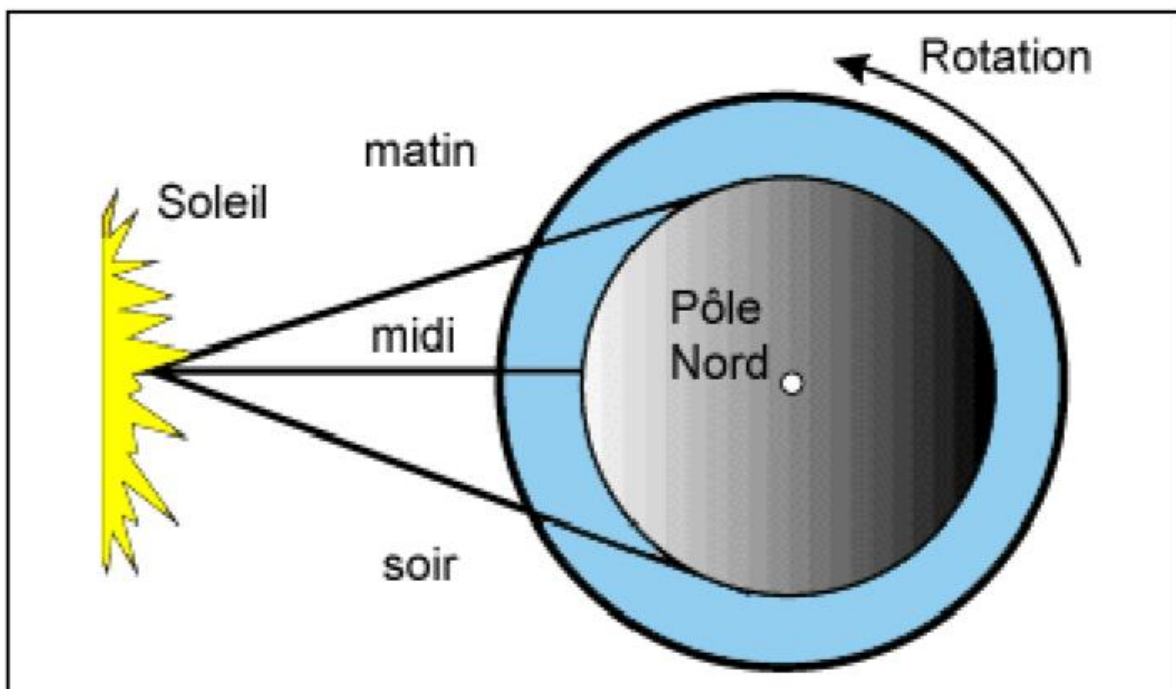


Fig. 16: Trajet optique au coucher et lever du Soleil

4.2.4. Diffusion de Mie

Lorsque les particules sont presque aussi grandes que la longueur d'onde du rayonnement. Ce type de diffusion est souvent produit par les particules de poussière, le pollen, la fumée et les gouttelettes d'eau. Ce genre de diffusion affecte les plus grandes longueurs d'onde et se produit surtout dans les couches inférieures de l'atmosphère où les grosses particules sont plus abondantes. Ce processus domine quand le ciel est ennuagé.

4.2.5. Diffusion non-sélective

Ce genre de diffusion se produit lorsque les particules (les gouttes d'eau et les grosses particules de poussière) sont beaucoup plus grosses que la longueur d'onde du rayonnement. Nous appelons ce genre de diffusion "non-sélective", car toutes les longueurs d'onde sont dispersées. Les gouttes d'eau de l'atmosphère dispersent le bleu, le vert, et le rouge de façon presque égale, ce qui produit un rayonnement blanc (lumière bleue + verte + rouge = lumière blanche). C'est pourquoi le brouillard et les nuages nous paraissent blancs.



Fig. 17: Diffusion non-sélective

4.3. Interaction du REM avec la cible (terre : végétation, sol et eau)

Le rayonnement qui n'est pas absorbé ou diffusé dans l'atmosphère peut atteindre et interagir avec la surface de la Terre. Lorsque l'énergie atteint la cible, la surface peut absorber (A) l'énergie, transmettre (T) ou réfléchir (R). L'énergie incidente totale interagira avec la surface selon l'une ou l'autre de ces trois modes d'interaction, ou selon leur combinaison. 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.

L'absorption se produit lorsque l'énergie du rayonnement est absorbée par la cible, la transmission lorsque l'énergie du rayonnement passe à travers la cible et la réflexion lorsque la cible redirige l'énergie du rayonnement. En télédétection, nous mesurons le rayonnement réfléchi par une cible. La réflexion spéculaire et la réflexion diffuse représentent deux modes limites de réflexion de l'énergie.

4.3.1. Notions de réflectance

Quand le REM frappe un objet, certaines longueurs d'ondes sont réfléchies tandis que d'autres sont absorbées ou transmises. Dans le spectre visible, cette réflectance sélective de certaines longueurs d'ondes est perçue en termes de couleur. La quantité d'énergie réfléchie par un objet dans les différentes longueurs d'ondes (par rapport à l'énergie qu'il reçoit) s'appelle la réflectance spectrale, celle-ci étant une propriété intrinsèque de chaque matériau.

La réflectance spectrale est le rapport de l'énergie réfléchie dans toutes les directions à l'énergie incidente dans un intervalle de longueur d'onde donnée. Les données recueillies sur les images sont quantifiables. Elles représentent l'intensité relative des différentes longueurs d'ondes. Ces valeurs enregistrées simultanément représentent la signature spectrale des objets (Herbreteau et al., 2018). Cette énergie ou signature spectrale est donc propre à chaque objet et rend sa distinction possible (Stoner et al., 1981). La réflectance est définie comme étant une grandeur qui dépend de la dimension, la nature, la composition, la structure, l'humidité de la cible, de son environnement, des conditions atmosphériques, de la géométrie de l'éclairement et de celle de la visée, de la rugosité du sol et de la réflectance diffuse de la végétation, de l'importance des ombres, l'angle d'incidence solaire et l'angle de visée sont autant de facteurs susceptibles de modifier sensiblement la réflectance d'une surface dont quelques types de réflectances sont représentées par la Fig.1 suivante:

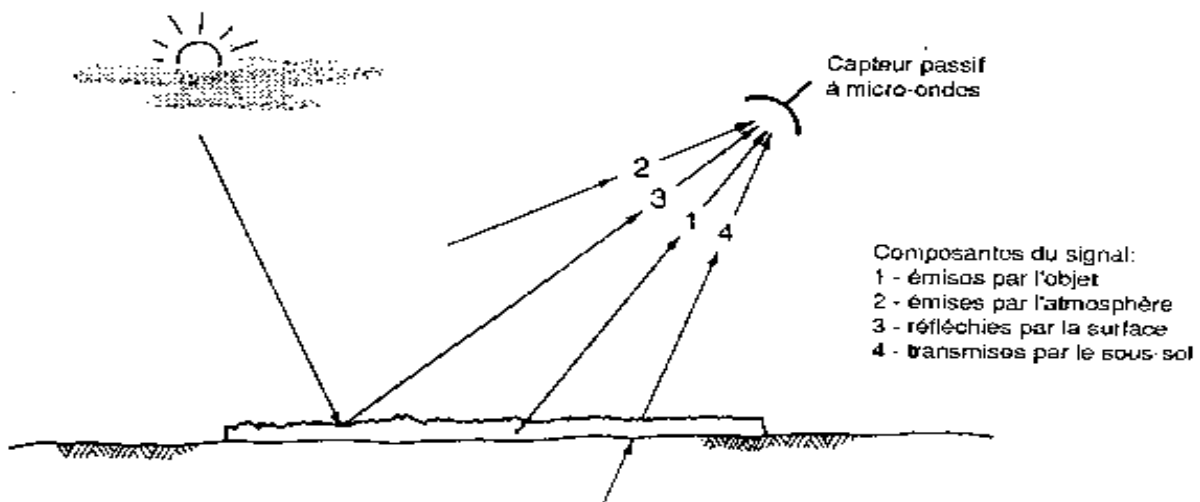


Fig. 18: Eléments d'un signal micro-onde passif (d'après Lillesand et Kiefer, 1979).

La réflectance se mesure à l'aide de spectromètres capables de fournir des résultats pouvant différencier la nature des objets. Les objets auront des courbes de réflectances différentes. Cette propriété, dont la couleur est un aspect bien vulgarisé, est celle qui a conduit à concevoir des systèmes d'acquisition du rayonnement selon des canaux de longueur d'onde distincts.

L'expérience a montré que, dans les mêmes conditions géométriques d'incidence et d'observation, un objet a une luminance qui varie avec la longueur d'onde (Scanvic, 1983).

Pour un rayonnement quelconque qui arrive sur un objet, on peut écrire la loi de conservation suivante (Bonn & Rochon, 1992) :

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Où : ρ est la fraction de l'énergie réfléchie, τ est la fraction de l'énergie transmise et α est la fraction de l'énergie absorbée.

Seules les ondes réfléchies par les objets peuvent être enregistrées par un capteur. Ce sont elles qui sont intéressantes en télédétection. Par ailleurs, tous les objets émettent de l'énergie dans différentes longueurs d'onde. Elle peut être captée par des appareils de télédétection et analysée.

En définitif, les capteurs enregistrent l'énergie issue principalement d'un rayonnement incident ou de l'émission d'ondes électromagnétiques par l'objet.

4.3.1.1 Réflexion spéculaire

Une surface lisse produit une réflexion spéculaire, c'est-à-dire que toute l'énergie est redirigée dans une même direction. Pour qu'une réflexion spéculaire puisse avoir lieu, il faut que les rugosités de la surface du corps soient plus petites que la longueur d'onde incidente. Dans le domaine du spectre solaire (0.4 à 2 μ m), la réflexion est donc de type spéculaire sur des surfaces lisses.

4.3.1.2 Réflexion diffuse

La réflexion diffuse se produit quand la surface est rugueuse, ce qui redirige l'énergie non uniformément dans les différentes directions. La plupart des objets de la surface terrestre se situent entre ces deux extrêmes.

La façon dont une cible réfléchit le rayonnement dépend de l'amplitude de la rugosité de la surface par rapport à la longueur d'onde du rayonnement incident. Si la longueur d'onde du rayonnement est beaucoup plus petite que la rugosité de la surface ou que la grosseur des particules qui composent la surface, on a la réflexion diffuse.

Examinons quelques exemples de cibles de la surface de la Terre et voyons comment l'énergie aux longueurs d'onde visible et infrarouge interagit avec celles-ci.

4.3.2. Réponses spectrales des végétaux

Chaque type d'objet observé possède des caractéristiques d'émission et de réflexion propres que l'on nomme « signature spectrale ». Par exemple, la végétation absorbe le rayonnement de la lumière aux longueurs d'onde du rouge et du bleu et réfléchit le vert (d'où sa couleur) (Herbreteau et al., 2018). La signature spectrale de la végétation est complexe. La complexité croît de la feuille

vers la plante en fonction de la phénologie (variation en fonction des saisons et des phases de croissance). La signature spectrale de la feuille vivante qui se traduit par une couleur verte dans le visible est attribuable aux pigments foliaires comme la chlorophylle. Cette dernière a une forte absorption dans le bleu et le rouge et un maximum de réflectance dans le vert vers $0,55 \mu\text{m}$. En revanche, dans le proche infrarouge, les feuilles se caractérisent par une forte réflectance, la transition entre le rouge et le proche infrarouge est très forte et se traduit par une pente abrupte de la courbe de réflectance. Dans le Moyen Infrarouge (MIR), ce sont les bandes d'absorptions de l'eau à $1,45$ et $1,95 \mu\text{m}$ qui commandent l'absorption de la feuille, ce qui génère des pics de réflectance à $1,650$ et $2,2 \mu\text{m}$.

Dans le visible ($400 - 700 \text{ nm}$), les végétaux réagissent en fonction de leur composition en pigments foliaires.

Dans le proche infrarouge (800 à 900 nm), les pigments ont peu d'influence sur la réflectance des végétaux ; c'est alors la structure interne des feuilles, à savoir la densité des parenchymes foliaires, qui prend de l'importance. La réflectance dans ce domaine, bien supérieure à la réflectance dans le visible, présente donc une bonne corrélation avec la biomasse verte.

Les propriétés optiques des feuilles :

La réflexion d'une feuille est de nature diffuse. Les mécanismes qui interviennent sont très complexes car les réfractions qui se produisent à tous les changements d'indice ; paroi cellulaire – protoplasme, chloroplastes contribuent à la diffusion et donc à la réflexion.

Tous les spectres des feuilles (y compris les aiguilles des conifères) ont la même forme. Les différences se manifestent seulement dans les amplitudes, on peut distinguer trois domaines :

Le visible ; la majeure partie du rayonnement reçu est absorbée par les pigments foliaires. Les principaux d'entre eux sont les chlorophylles a et b (65% des pigments des plantes supérieures) qui possèdent deux bandes d'absorption dans le bleu et le rouge. Cela se traduit par un maximum de réflectance dans le jaune - vert à 550 nm environ.

Le PIR ; La réflectance des feuilles dépend du nombre d'assises cellulaires, de la dimension des cellules et de l'épaisseur du parenchyme lacuneux. Les feuilles des plantes adaptées et résistantes à la sécheresse généralement plus épaisses (olivier, chêne vert,). ont par conséquent des réflectances très élevées dans le proche infrarouge (70 à 80%).

Le MIR ; dans l'infrarouge moyen ($1,3$ à $2,5 \mu\text{m}$), l'absorption est principalement due à l'eau présente dans les plantes. Plus une plante contiendra de l'eau, plus l'absorption sera grande dans l'infrarouge moyen. Ceci peut servir à détecter les stress hydriques. Différentes études ont montré l'intérêt du canal MIR notamment pour le suivi de la végétation en raison de sa sensibilité à la

présence d'eau. Allen et al., (1970) ont montré que la réponse du MIR est déterminée par le contenu en eau de la végétation. Ceci s'exprime d'une part par une forme identique de profil spectral. et d'autre part par une corrélation linéaire entre le contenu en eau, exprimé par la lame d'eau équivalente, et le MIR. Gardner et al., (1985) ont confirmé cette observation, ils concluaient qu'il n'est pas possible d'estimer de manière opérationnelle le stress hydrique avec MIR ou des indices intégrant cette bande spectrale, parce que ce stress dépend de la teneur relative en eau de la végétation, que cette teneur varie en fonction du type de végétation, et qu'une faible réduction de la teneur peut entraîner un stress important (Gond et al., 2004).

Les feuillus et les résineux réfléchissent différemment d'où la subdivision des végétaux en deux catégories : végétaux à parenchyme palissadique développé (les résineux) et végétaux à parenchyme lacuneux développé (les feuillus). La réflectance dans le proche infrarouge est toujours plus élevée pour la seconde catégorie de végétaux que pour la première. Le niveau de réponse spectrale dans ce domaine de longueur d'onde permet une bonne différenciation de ces deux types de végétaux. (Fall, 2005).

Les principaux facteurs de variabilité ; au niveau de la feuille des végétaux, structure anatomique des limbes ; nombre des assises cellulaires, épaisseur de la cuticule, présence de poils. Âge des feuilles ; les propriétés optiques des feuilles évoluent uniquement durant les stades juvéniles et la sénescence. La disparition des pigments chlorophylliens et leur remplacement par des pigments bruns entraînent un fort accroissement de la réflectance dans le jaune - vert et dans le rouge. Dans le proche infrarouge, la réflectance évolue seulement lorsque la structure interne de la feuille est désorganisée ou modifiée par le dessèchement de la feuille. Dans l'infrarouge moyen, l'accroissement de la réflectance est lié au dessèchement de la feuille dû principalement à la disparition des pigments chlorophylliens.

Teneur en eau des feuilles ; la teneur en eau des feuilles se traduit par une plus forte augmentation de la réflectance dans l'infrarouge moyen que dans le visible et le proche infrarouge.

Déficience minérale ; les déficiences minérales affectent en premier lieu la teneur en chlorophylle des feuilles puis leurs structures anatomiques. Le manque d'azote rend les feuilles des plantes moins épaisses (réduction du nombre d'assises cellulaires). Les cellules sont plus grandes et leur teneur en matière sèche par unité de surface est plus faible.

Les attaques parasitaires : Elles peuvent :

- a. Modifier la teneur en pigments des feuilles qui est provoqué par la disparition de la chlorophylle sous l'action d'agents pathogènes,
- b. Provoquer des nécroses ; mêmes phénomènes que celui de la sénescence des feuilles,

- c. Modifier les échanges hydriques des feuilles sans apporter de modification à leurs propriétés optiques. Dans ce cas, la température radiative des feuilles change et l'attaque parasitaire peut être détectée dans l'infrarouge thermique.

Les études faites sur l'identification et l'analyse des arbres endommagés par les insectes, ont pu améliorer la qualité des bandes spectrales spécifiques aux cibles concernées.

Au niveau du couvert végétal ; Les effets des facteurs propres aux couverts végétaux se résument comme suit :

- a. La densité de feuillage ; l'accroissement de la densité de feuillage augmente la réflectance dans le PIR et diminue la réflectance dans le rouge. (Indice foliaire = 7 (dans le PIR) et 3 (dans le visible).
- b. La géométrie du couvert,
- c. La densité du peuplement, interférence sol- végétation,
- d. L'association et distribution relative des espèces,
- e. La phénologie non uniforme des composantes du couvert.
- f. La réflectance d'un couvert végétal dépend de l'angle d'inclinaison des feuilles, lorsque les feuilles sont dressées, il faut un indice foliaire beaucoup plus élevé pour masquer le sol que lorsqu'elles sont étalées. Cette réflectance est plus grande dans le PIR que dans le visible.

Parmi les facteurs externes au couvert végétal. nous citons ce qui suit :

Angle solaire : variation de l'importance des phénomènes d'ombre au cours de la journée,

Angle de visée : la variation dépend de la longueur d'onde considérée (variation de la proportion de sol nu, d'Ombre,).

Taille de la surface visée : composition de l'atmosphère (mesure par satellite). teneur en eau de l'atmosphère (absorption de l'infrarouge). aérosols.

Activité physiologique des plantes ; lorsque la végétation est en phase active de croissance, la réflectance dans le visible et l'infrarouge moyen diminuera. Elle augmentera par contre dans le PIR.

Durant la période de juin à mi-septembre, il y a élévation maximale du soleil au dessus de l'horizon (Fall, 2005) alors que le départ et l'arrêt de croissance des aiguilles des conifères sont liés aux facteurs énergétiques qu'aux facteurs hydriques. Les aiguilles des conifères sont plus longues vers l'extrémité de la pousse chez les jeunes arbres de clairières, que celles des peuplements âgés (Cabanettes, 1979).

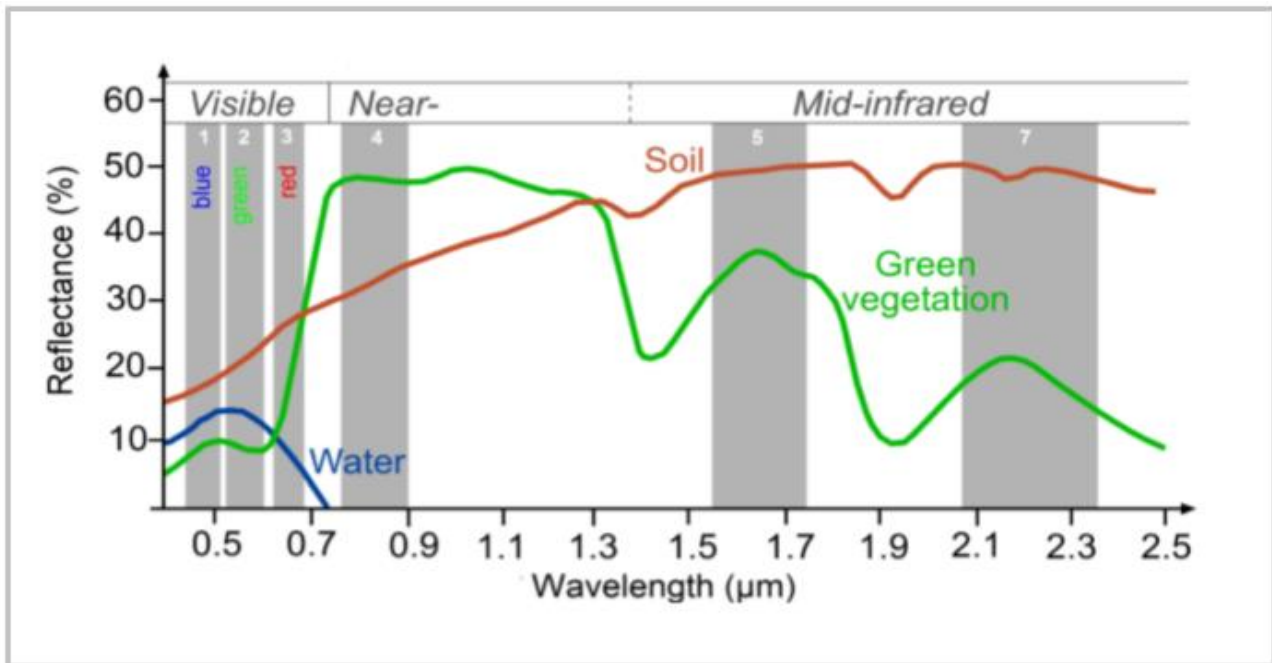


Fig. 19: Réflectance de l'eau, végétation et sols dans les canaux Landsat TM (d'après Sleimi, 2018).

4.3.3. Réponses spectrales des sols

Les signatures spectrales des sols sont moins variées que celles des végétaux. La technique de l'utilisation des radiomètres multi spectraux de HR, disposant d'un grand nombre de canaux 100 voire 200 entre 0.4 et 3 μm . L'objectif est de détecter un nombre maximum de singularités pour chaque sol afin de le différencier des autres. L'autre piste a recours à l'analyse dite diachronique qui repose, comme son nom l'indique, sur l'étude de plusieurs images prises à des périodes différentes avec l'hypothèse que les paramètres caractéristiques des sols évoluent différemment en cours de saison.

Les sols présentent un spectre continu où la réflectance progresse lorsque la longueur d'onde augmente.

Le visible ; dans le visible, l'absorption d'énergie est due à l'excitation des vibrations dans les liaisons fondamentales de groupes anioniques tels que OH, CO₃, ...etc. Les ions ferriques Fe³⁺ produisent 2 bandes à 0,4 et à 0,7 nm.

La télédétection infrarouge est surtout destinée à mesurer la température du sol, de l'océan, ou des nuages (Kergomard, 1990).

Le proche infrarouge (PIR) ; un sol blanc (calcaire fins) peut ainsi avoir des réflectances très fortes dans le PIR. Les ions ferreux Fe²⁺ produisent une forte bande d'absorption à 1,1 nm. La présence de fer est donc détectable dans le visible et le PIR grâce aux ions Fe²⁺ et ferriques (Fe³⁺).

L'infrarouge thermique ; l'émissivité des sols varie très sensiblement en fonction de la longueur d'onde et de leur composition minérale. Les argiles présentent une réflectance très faible et très

stable dans tout l'infrarouge thermique (0,8 à 1,3 nm). Les sables présentent un pic de réflectance vers 0,8 – 0,9 nm. Les bandes d'absorption de l'eau à 1,4 à 1,9 um.

Les facteurs affectant la réponse spectrale des sols. Les paramètres du sol qui affectent la réflectance de manière prépondérante sont notamment :

- a. La texture (teneur en sable, limon, argile).
- b. L'humidité,
- c. La présence d'oxyde de fer,
- d. La rugosité de surface,
- e. La teneur en MO.
- f. La granulométrie.

La réflectance des sols augmente quand la taille des particules diminue. La rugosité influence directement la réflectance par le phénomène de réflexion diffuse. Plus le sol est rugueux, moins il réfléchit. Un sol à granulométrie fine apparaît plus clair qu'un sol grossier. En présence de sillons ou de grandes mottes de terre, il y a également apparition d'ombres portées.

Éléments grossiers ; augmentent la réflectance des sols :

- a. Pièrrosité (surface de cible).
- b. Roches ou affleurement (patine).
- c. Présence de lichen (chlorophylle).
- d. Présence de l'eau (humidité).

Éléments fins ; Les argiles ; (particules fines liées à la MO ; d'où réflectance faible.

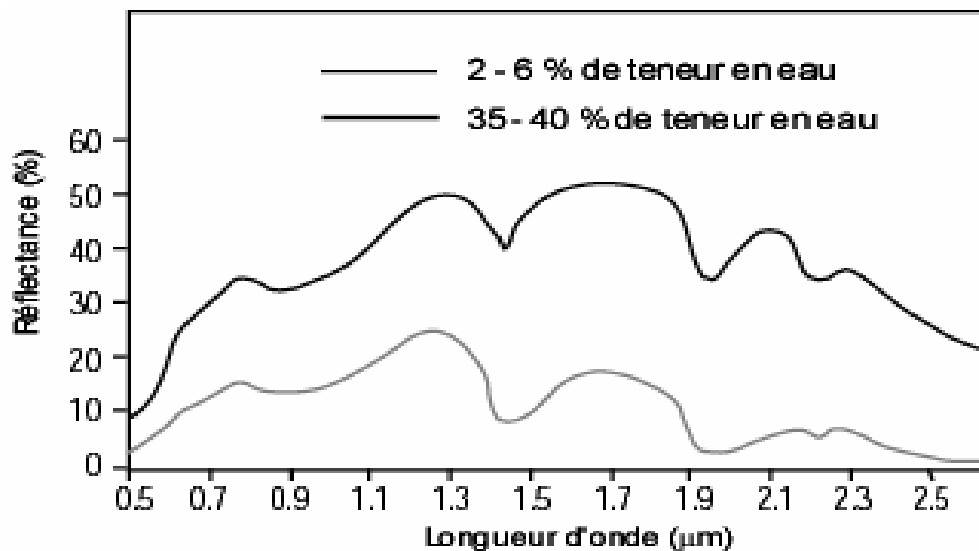


Fig. 20: Réflectance d'un sol argileux (d'après Herbreteau et al., 2018).

Le sable ; particules fines de faible teneur en eau d'où la réflectance est relativement élevée.

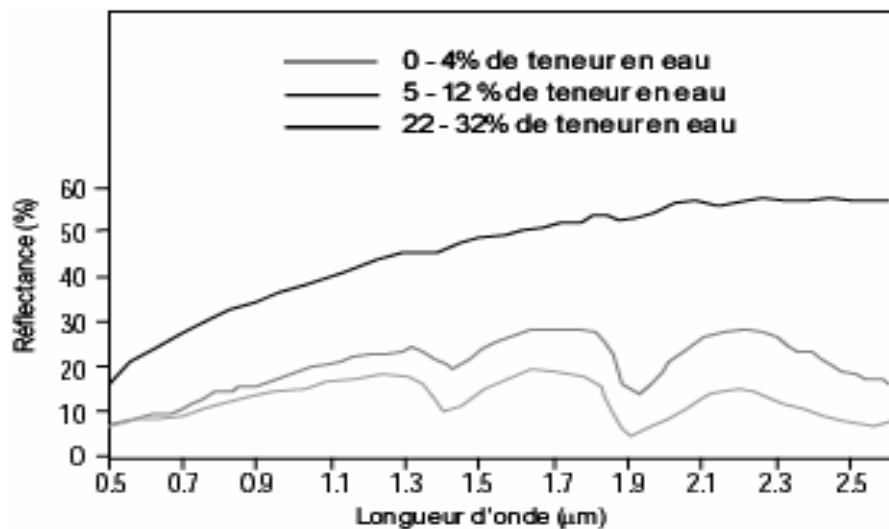


Fig. 21: Réflectance d'un sol (ex : sableux) en fonction de l'humidité (Herbreteau et al., 2018).

Il convient de relever :

- La forte variation de réflectance dès que le sol s'humidifie (courbe 1 et 2).
- Une augmentation ensuite du taux d'humidité n'apporte que peu de modification (les bandes d'absorption de l'eau 1,4 – 1,9 et 2,5 μm).
- Le calcaire ; (CaCO_3) augmente la réflectance à partir d'un taux de 10 à 20 %.
- Le fer ; diminue la réflectance à partir d'une teneur en fer de plus de 15 %.
- La présence d'oxyde de fer produit sur la réflectance un effet similaire à celui de la MO.

Chaque élément chimique influe selon sa structure et formulation ionique ce qui donne une couleur spécifique au sol donc une réponse spectrale différente.

Exemple ; les oxydes de fer donnent une apparence sombre au sol donc une faible réflectance à celui-ci, le calcaire (CaCO_3) donne une apparence claire au sol donc une forte réflectance au sol. Les sels augmentent la réflectance moyenne.

La droite des sols ; quelle que soit la teneur en MO, en eau et la rugosité des sols ; le sol nu présente toujours une courbe de réflectance croissante et pratiquement linéaire dans les courtes longueurs d'ondes ce qui définit la droite des sols et qui exprime la corrélation très forte entre les réflectances d'un sol mesuré dans le rouge et le PIR.

L'indice de brillance :

La brillance est le caractère réfléchant d'un sol. Elle est mesurée par des indices de brillances calculés à partir des mesures de réflectance dans le rouge et le PIR, la formule la plus courante est : $(R_2 + IR_2) / 0,5$ on l'utilise pour caractériser les sols nus.

La MO produit un assombrissement. Elle influe à la fois sur la structure du sol ; sur leur capacité de rétention d'eau et sur leur couleur. La teneur en MO (à partir d'un taux de 2,2%) a un effet dépresseur sur la réflectance des sols. L'humus diminue donc la réflectance des sols dans toutes les bandes spectrales.

4.3.4. Comportements spectraux des surfaces d'eau

L'eau est caractérisée par une réflectance relativement plus forte dans le visible (bleu (0.45 - 0.52 μm). vert (0.52 - 0.60 μm). rouge (0.63 - 0.69 μm)). que dans le proche infrarouge (0.76 - 0.90 μm) et les courtes longueurs du proche infrarouge (1.55 – 1.75 μm). considérant les bandes du capteur Landsat TM comme exemple. L'absorption des rayons solaires dans la bande proche infrarouge est complète (Sleimi, 2018). L'eau réfléchit les longueurs d'onde du bleu et absorbe fortement les longueurs d'onde de l'infrarouge (Herbreteau et al., 2018). L'humidité diminue la réflectance des sols. Un sol sec (interface air- particules). Sol humide (microcavité occupée par l'eau).

L'eau absorbe davantage les grandes longueurs d'onde du rayonnement visible et du proche infrarouge. Ainsi, l'eau paraît généralement bleue ou bleu-vert car il réfléchit davantage les petites longueurs d'onde, il paraît encore plus foncé s'il est observé sous les longueurs d'onde du rouge ou du proche infrarouge. Lorsque les couches supérieures de l'eau contiennent des sédiments en suspension, la transmission diminue, la réflexion augmente et l'eau paraît plus brillante. Nous confondons parfois l'eau qui contient des sédiments en suspension avec l'eau peu profonde et claire, car ces deux phénomènes paraissent très semblables.

La chlorophylle dans les algues absorbe plus de bleu et réfléchit plus de vert. L'eau paraît donc plus verte quand il contient des algues. L'état de la surface d'eau (rugueuse, lisse, vagues, débris

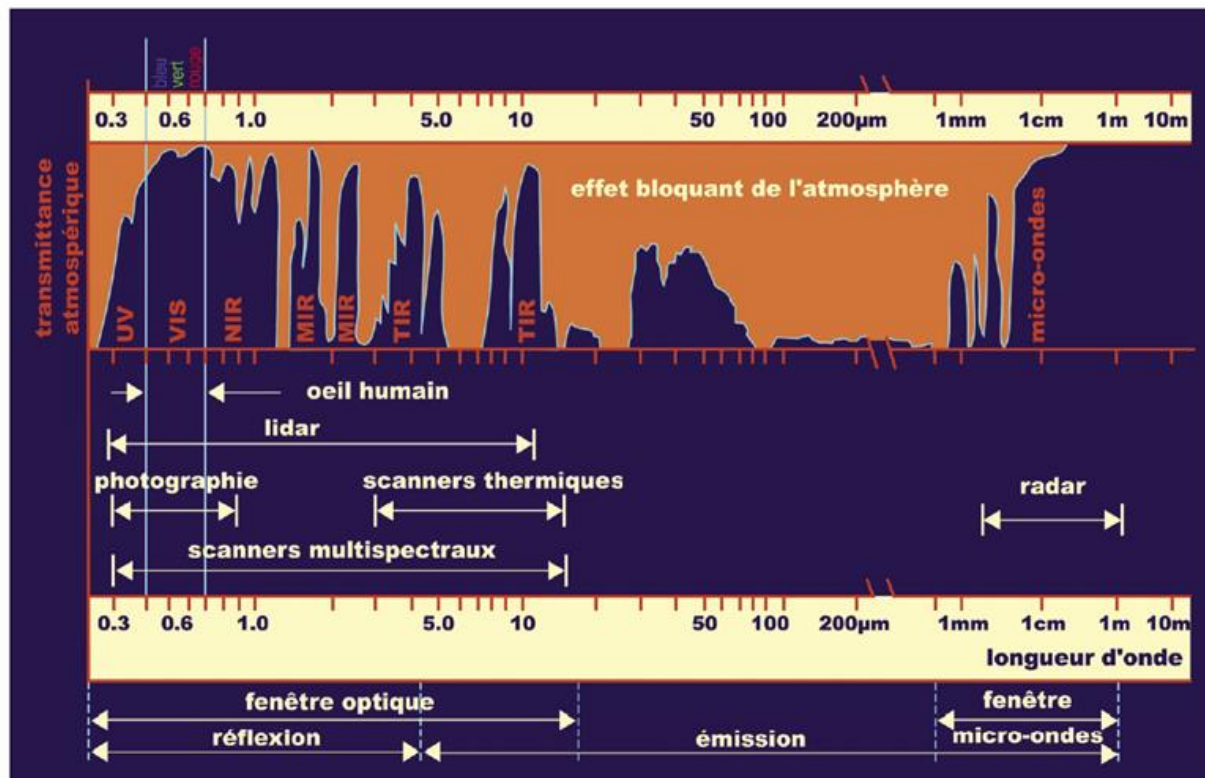
flottants, ...etc.) peut aussi susciter des problèmes dans l'interprétation à cause de la réflexion spéculaire.

Ces exemples démontrent que nous observons des réponses très différentes aux mécanismes d'absorption, de transmission et de réflexion selon la composition de la cible et la longueur d'onde du rayonnement qui lui est propre. En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'onde, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. En comparant les signatures de différents objets, nous pouvons les distinguer les uns des autres, alors que nous ne pourrions peut-être pas les distinguer si nous les comparions seulement avec une longueur d'onde.

Par exemple, l'eau et la végétation peuvent avoir une signature spectrale similaire aux longueurs d'onde visibles, mais ils sont presque toujours différenciables dans l'infrarouge. Les signatures spectrales peuvent être très variables pour la même sorte de cible et peuvent aussi varier dans le temps et dans l'espace. Pour interpréter correctement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la surface, il est important de savoir où regarder dans le spectre et de comprendre les facteurs qui influencent la signature spectrale de la cible.

Quand le REM et la matière agissent, l'un sur l'autre, le REM peut être réfléchi, absorbé ou transmis. On appelle spectre électromagnétique la courbe de répartition de l'énergie diffusée par cette surface (réflectance dans le visible et le proche infrarouge, émittance dans le thermique) en fonction de la longueur d'onde. C'est bien ce message spécifique qu'il faut enregistrer puis décrypter.

Les fenêtres utilisées à l'heure actuelle en télédétection sont fonction des techniques actuelles et des facteurs atmosphériques, qui limitent l'usage du spectre électromagnétique dans le visible (0,4 – 0,75 μm), le proche infrarouge (0,75 – 1,1 μm), l'infrarouge thermique (3 à 5 et 8 à 14 μm) et les ondes radars (supérieur au millimètre).



Les régions du spectre électromagnétique qui ne sont pas absorbées de façon importante par l'atmosphère, et qui sont donc utiles pour la télédétection, sont appelées les fenêtres atmosphériques.

Source: "Remote Sensing and Image Interpretation" Lillesand & Kiefer

Fig. 22: Fenêtres d'absorption du spectre électromagnétique

4.4. Les capteurs de télédétection

Un capteur est un appareil qui détecte les rayonnements électromagnétiques émis ou réfléchis et les convertit en une valeur physique qui peut être enregistrée et traitée. Les capteurs peuvent être divisés en capteurs passifs et actifs.

4.4.1. Capteurs passifs

Capteurs passifs, qui enregistrent le REM réfléchi ou émis à partir de sources naturelles (Soleil, surface terrestre, atmosphère). Ils mesurent la radiation produite naturellement (l'énergie solaire renvoyée, soit l'énergie terrestre émise).

Pendant la construction des capteurs, on assortit autant que possible les détecteurs de la sensibilité. Comme celle-ci se modifie peu à peu avec le temps, il arrive qu'un détecteur devient plus ou moins sensible à la radiance qu'un autre. En conséquence, la même cible sera représentée avec des luminosités différentes par des détecteurs à sensibilités différentes. Les données auxiliaires du capteur sont utilisées au stade de prétraitement (au sol) pour corriger ce défaut d'image.

Les capteurs mesurent la radiance, ce qui correspond à la brillance de la surface dans la direction du capteur. On parle souvent plutôt de réflectance, c'est-à-dire le rapport entre le rayonnement réfléchi et le rayonnement solaire incident sur la surface (Faivre, 2018). Un capteur comporte trois éléments

constitutifs : un système optique, un filtre spectral et un détecteur. Le système optique fixe l'angle instantané de prise de vue, le filtre spectral (ou les filtres spectraux) définit le domaine spectral de la mesure et le détecteur transforme le signal physique en informations utilisables pour l'utilisateur. Un capteur donné peut détecter le REM seulement sur une gamme limitée de longueurs d'ondes, dite bande spectrale. La largeur de la bande spectrale, c'est-à-dire l'étendue de la gamme réduite aux longueurs d'ondes détectées, est dénommée résolution spectrale. Certains capteurs comprennent un certain nombre de détecteurs dont chacun est sensible à une bande spectrale différente. Ces capteurs s'appellent capteurs multispectraux ou multi-bandes. Quand nous observons la terre dans deux ou plusieurs bandes simultanément, il est possible de distinguer une plus large gamme de caractéristiques. L'ensemble des réponses types émanant d'une cible spécifique vue par un capteur dans différentes bandes spectrales, constitue la signature spectrale de cette cible.

La base de la télédétection est axée sur les dispositifs d'enregistrement de ces rayonnements électromagnétiques à savoir les capteurs portés sur les plates formes, vecteurs ou navettes spatiales. Les capteurs constituent l'ensemble des moyens assurant la transformation des informations recueillies en données facilement assimilables pour l'interprétation. Ils enregistrent des luminances provenant de la terre et qui renferment les informations sur les caractéristiques de la surface réfléchissante, les facteurs atmosphériques et la géométrie du système (Soleil - Cible - Capteur).

Utiliser un capteur sensible à de petites variations dans les valeurs de réflectance, dite d'une bonne résolution radiométrique. Ces techniques peuvent également servir à détecter des variations ou des changements à l'intérieur d'un type donné de matériau.

Tab. 2: Caractéristiques générales de quelques capteurs optiques (d'après Faivre, 2018)

Capteur	Résolution (m)	Bandes spectrales	Fauchée (km)	
Sentinel 2	MS : 10, 20, 60	B, V, R, PIR (10m)	290 x 290	MS : Multi-spectral PAN : Panchromatique RVB : Rouge Vert Bleu PIR : Proche Infra-Rouge MIR : Moyen Infra-Rouge CA : Côtier/Aérosol
SPOT 5	Pan : 2,5 MS : 10	V, R, PIR, MIR	60 x 60	
SPOT 6 & 7	Pan : 1,5 MS : 6	B, V, R, PIR	60 x 60	
Pléiades	Pan : 0,5 MS : 2	B, V, R, PIR	20 x 20	
Worldview-4	Pan : 0,31 MS : 1.24	B, V, R, PIR	13 x 13	
Landsat 8	Pan : 15 MS : 30	CA, B, V, R, PIR, MIR	185 x 180	

4.4.2. Capteurs actifs

Capteurs actifs, qui illuminent un objet avec leur propre source de rayonnement (radars, lidars) et enregistrent "l'écho". Ils transmettent la radiation pour illuminer la surface et pour recevoir et mesurer la quantité de radiation qui est réfléchi.

Tab. 3: Caractéristiques générales des bandes de fréquences radar

Bande de fréquence	Intervalle de fréquence (Ghz)	Intervalle longueur d'onde (Cm)
Bande P	0.22 - 0.39 Ghz	140 - 76.3 cm
Bande L	0.39 - 1.55 Ghz	76.9 - 19.3 cm
Bande S	1.55 - 4.20 Ghz	19.3 - 07.10 cm
Bande C	4.20 - 5.75 Ghz	7.10 - 5.20 cm
Bande X	5.75 - 10.90 Ghz	5.20 - 2.75 cm
Bande K	10.90 - 36.00 Ghz	2.70 - 0.83 cm

La bande C la plus utilisée par les satellites ERS et Envisat, car la valeur de longueur d'onde comprise entre 7,10 et 5.20 cm leur permet de pénétrer et traverser le couvert nuageux au niveau de la couche composée de l'ozone (O3) donc l'atténuation atmosphérique est nulle ou relativement faible. La valeur de la bande C permet aussi à l'onde émise par le *Radio Detecting And Ranging* (RADAR) de traverser au niveau de la cible (forêt) le feuillage, les troncs et le sous-sol sous les arbres.

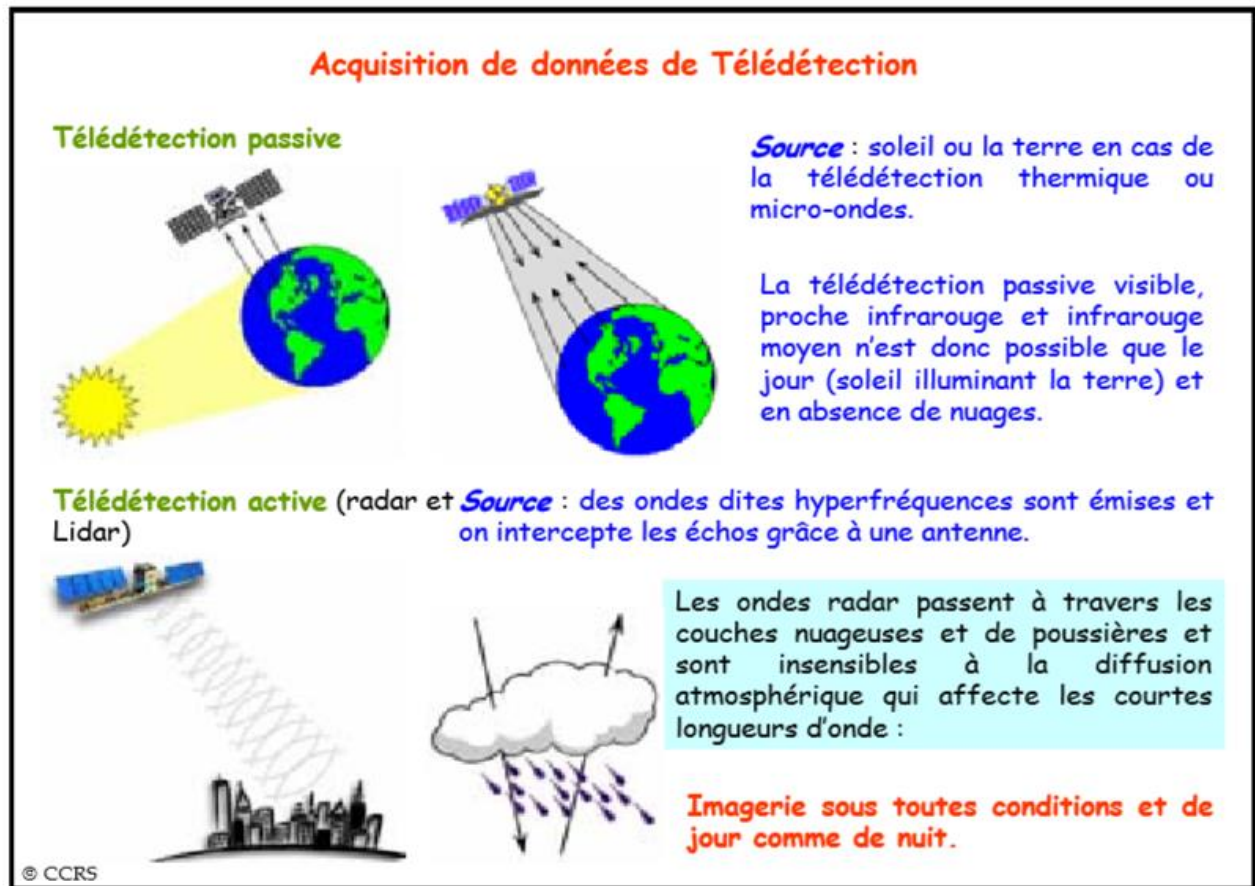


Fig. 23: Télédétection passive et active

4.4.3. Formes de Télédétection

Formes de Télédétection ; formes d'acquisition d'information avec capteurs.

- Par réflexion (a)
- Par émission (b).
- Par émission-réflexion (c).

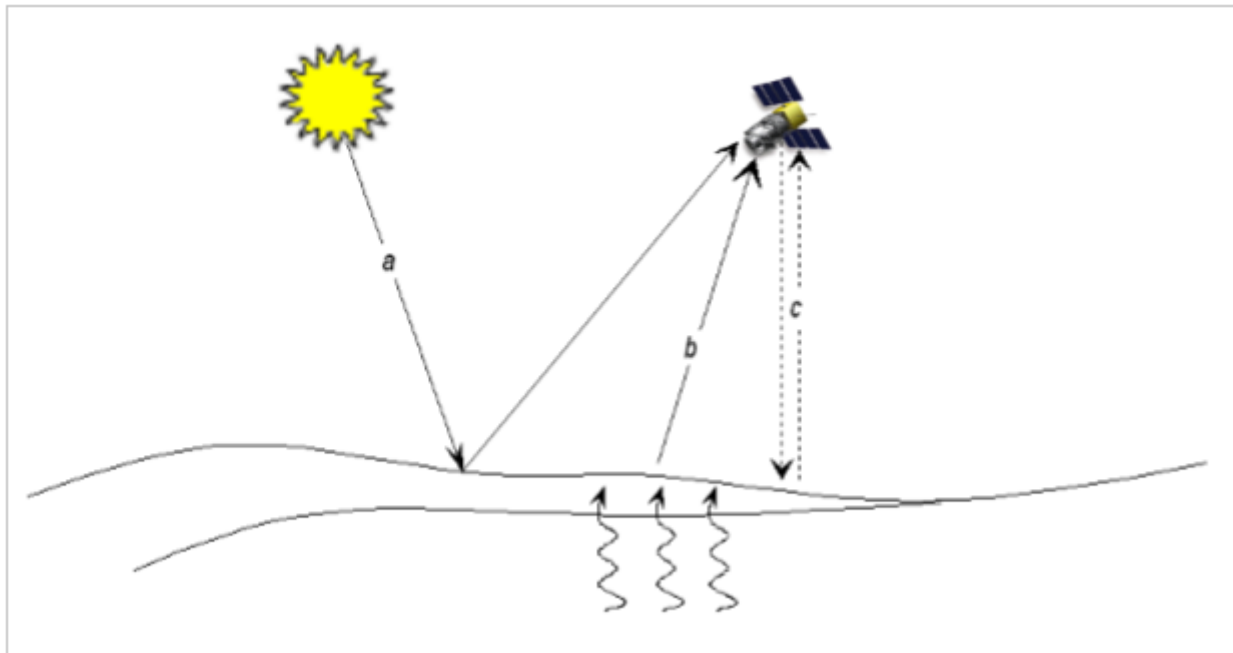


Fig. 24: Formes de télédétection (d'après Mariama & Hakdaoui, 2013).

Le radar permet de localiser une cible en gisement et distance (y compris de nuit ou par mauvaise visibilité). La cible peut être :

1. Un autre navire en anticollision,
2. La côte ou un amer en positionnement.

4.5. Notions de résolution

Lorsque l'on prend une photographie classique, l'information est traduite par des formes et des couleurs, qui correspondent à des groupes de pixels plus ou moins homogènes. Sur une même scène photographiée prise par deux appareils, plus les **pixels** seront nombreux dans l'image plus la **résolution spatiale** sera élevée. On le voit aisément lorsque l'on souhaite faire un agrandissement et que l'on voit apparaître les pixels en zoomant sur une image.

La résolution fait appel à la notion du pixel. Le pixel étant la plus petite surface distinguée par le capteur. Par exemple, le satellite Landsat *Thematic Mapper* (TM) distingue des surfaces d'à peine $30\text{m} \times 30\text{m}$. Depuis 1972, les progrès dans ce domaine sont remarquables : on est passé d'une résolution de 80 m (MSS de Landsat), à 30 m (*Thematic Mapper*) et à 20 et 10 m (SPOT) (Kergomard, 1990) et actuellement à 10 m avec Sentinel. Il existe trois types de résolutions.

4.5.1. Résolution spatiale

La résolution spatiale est la taille du plus petit élément qu'il est possible de distinguer sur l'image. Elle est également couramment définie comme étant la taille du pixel. Sur une image, les objets qu'il sera possible de discerner dépendront de la résolution spatiale du capteur utilisé. Généralement, plus la résolution spatiale augmente, plus la superficie de la surface visible par le

capteur diminue : une image très haute résolution couvrira une portion de territoire plus restreinte qu'une image moyenne résolution. Au moment du choix des images à traiter, il convient donc de choisir le bon compromis selon la taille des objets les plus petits que l'on veut observer, et l'échelle à laquelle on souhaite observer un processus.

La résolution spatiale d'une image satellite est la taille de la zone couverte par un pixel. Chaque pixel de l'image correspond à une partie de la surface de la terre. La résolution spatiale dépend de la taille des détecteurs, du miroir, de la distance focale et de l'altitude de vol. Une résolution fine permet de distinguer des objets de petite taille (Faivre, 2018).

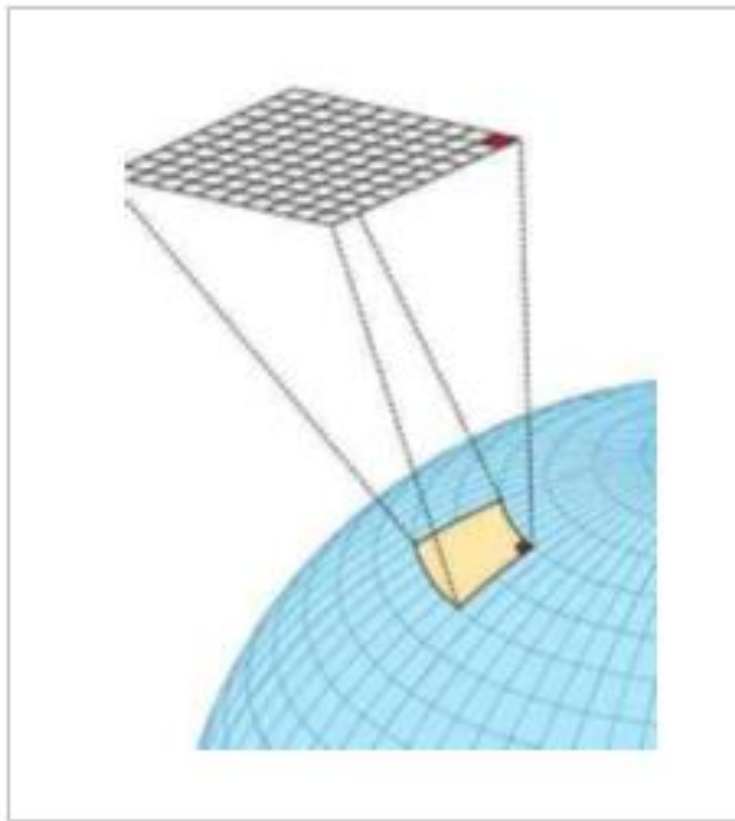


Fig. 25: Exemple de résolution spatiale (d'après Faivre, 2018)

La télédétection produit des indicateurs dont la précision dépend de la résolution spatiale des capteurs utilisés (Forman et al., 2016). La résolution spatiale correspond à la dimension des pixels qui constituent les éléments de base d'une image (Stéphanie et al., 2011).

En règle générale, plus la résolution spatiale de l'image est grande (taille du pixel plus petite), plus la surface couverte par l'image est faible (Charrier et al., 2016).

Une résolution spatiale de 10 à 30 m semble adéquate pour la cartographie du couvert forestier, l'identification, la surveillance des coupes à blanc, la cartographie des zones en feu ou brûlées, la collecte de l'information des récoltes forestières et l'identification des dommages subis par les forêts.

4.5.2. Résolution spectrale

Dans une image satellitaire, l'information sur les couleurs est décomposée en différents **canaux ou bandes spectrales**. Chaque bande est une image en niveaux de gris, composée de pixels ayant chacun une valeur de réflectance pour un intervalle de longueur d'ondes donné. On parle ainsi de "bande du bleu", du "rouge, du proche infrarouge", etc. Chaque bande va couvrir une portion plus ou moins large du spectre électro magnétique. Par exemple, la bande du bleu correspond à des longueurs dans un intervalle autour de 480 nm, celle du rouge autour de 600 nm.

Bande spectrale (Canal spectral) ; chaque bande spectrale est une image raster en niveau de gris qui représente les valeurs de réflectance des surfaces au sol pour un intervalle de longueurs d'ondes donné.

Signature spectrale ; lorsqu'elles sont soumises à une source d'énergie, différentes cibles ont différents comportements. La variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde est appelée signature spectrale.

L'œil ne voit que le visible. En plus du visible, certains satellites optiques sont capables de capter un rayonnement hors du visible (ex : infrarouge). Le rayonnement est capté par bande : une image satellite est composée d'une ou plusieurs bandes, correspondant chacune à un intervalle spectral. La résolution spectrale correspond au nombre et caractéristiques des bandes dans lesquelles le satellite observe (Faivre, 2018).

La résolution spectrale d'un capteur est son aptitude à différencier les longueurs d'ondes du spectre électromagnétique. Elle fait référence au détail perceptible dans une image. La résolution spectrale fait référence à la largeur ou l'étendue de chaque bande enregistrée. Les classes spectrales sont des groupes de pixels qui ont les mêmes caractéristiques (ou presque). La surface marine peut contenir plusieurs sous classes spectrales avec des variations spectrales définies. Les sous classes spectrales peuvent être causées par des variations des propriétés physico-chimique de l'eau, sa couleur, sa température, sa salinité, sa turbidité ou son activités biologique.

La résolution spectrale correspond au nombre et à la finesse des bandes spectrales auxquelles le capteur est sensible (Stéphanie et al., 2011). La résolution spectrale indique le nombre de bandes spectrales dans lesquelles le capteur peut capturer les radiations. Le nombre de bandes n'est pas le seul aspect important de la résolution spectrale. La position des bandes dans le spectre électromagnétique est un aspect clé (Mariama & Hakdaoui, 2013).

La résolution spectrale décrit la capacité d'un capteur à utiliser de petites fenêtres de longueurs d'onde. Plus la résolution spectrale est fine, plus les fenêtres des différents canaux du capteur sont étroites.

La forêt peut contenir plusieurs sous classes spectrales avec des variations spectrales définies. Les sous classes spectrales peuvent être causées par des variations d'âge, d'espèces, de densité d'arbres ou simplement par les effets d'ombrage ou de variation dans l'illumination.

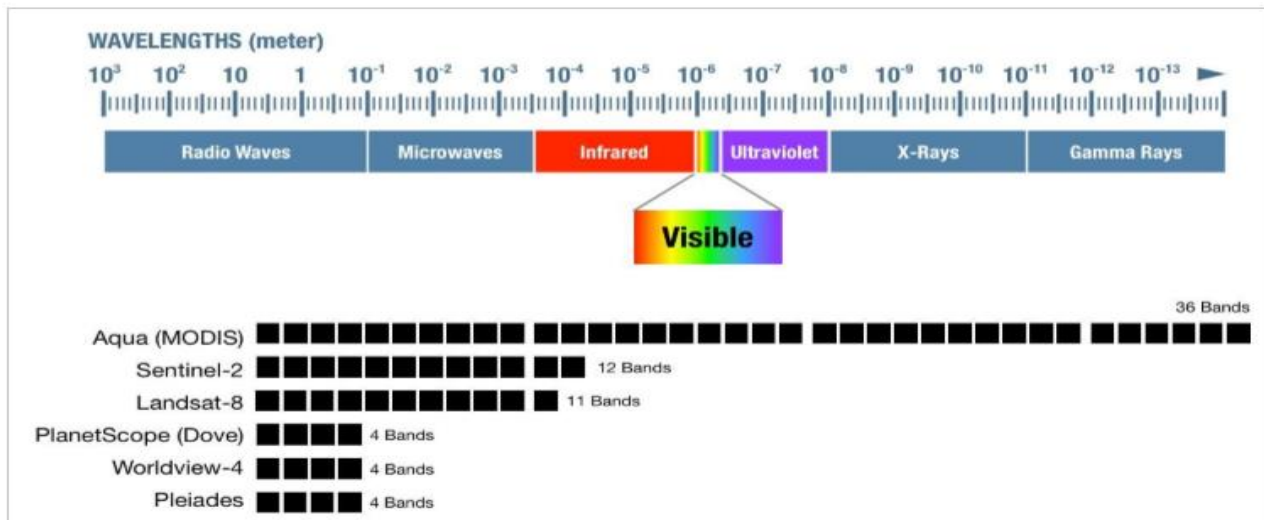


Fig. 26: Exemple de résolution spectrale (d'après Faivre, 2018)

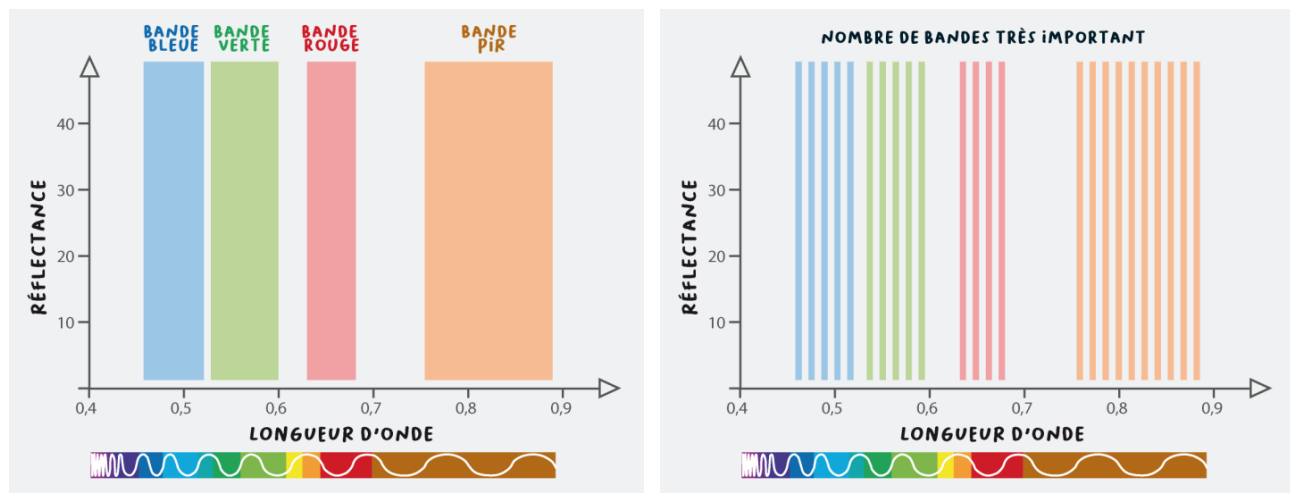


Fig. 27: Exemples de résolutions spectrales améliorées

Une image satellitaire, selon les caractéristiques du capteur embarqué sur le satellite, peut contenir en plus des trois bandes du visible (RVB) quelques bandes supplémentaires (par exemple infrarouge, proche infrarouge), et jusqu'à des centaines de bandes. Ces bandes vont couvrir des intervalles plus ou moins large du spectre électromagnétique. On parle ainsi d'**images multi-spectrales** (quelques bandes) ou d'**images hyper-spectrales** (des dizaines à des centaines de bandes).

Exemple d'image panchromatique (PAN)

Est une image monocanal représentée en niveaux de gris comme le montre la Fig. 24 suivante :



Fig. 28: Exemple d'image panchromatique (PAN) (d'après Faivre, 2018)

Exemple d'image multi-spectrale (MS)

Est un enregistrement simultané dans plusieurs bandes spectrales visible (bleu, vert, rouge, Infrarouge). Affichage en couleurs naturelles ou en fausses couleurs comme le montre la Fig. 25 suivante :

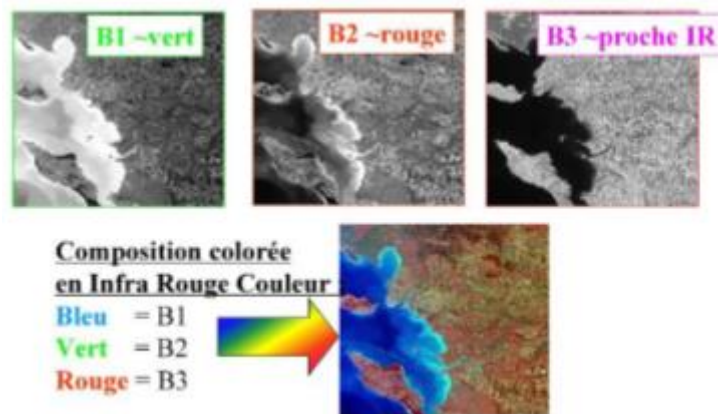


Fig. 29: Exemple d'image multi spectrale acquise par le satellite Pléiade (d'après Faivre, 2018)

Le satellite Sentinel-2 acquiert dans 13 bandes spectrales à une résolution spatiale de 10m, 20m et 60m en fonction de la bande considérée.

Tab. 4: Liste des bandes spectrales du satellite Sentinel-2 (d'après Faivre, 2018)

Bandes Sentinel-2	Longueur d'onde centrale [micromètres]	Résolution [mètres]
Band 1 – Aérosol (bleu côtier)	0.443	60
Band 2 – Bleu	0.490	10
Band 3 – Vert	0.560	10
Band 4 – Rouge	0.665	10
Band 5 – Végétation Red Edge	0.705	20
Band 6 – Végétation Red Edge	0.740	20
Band 7 – Végétation Red Edge	0.783	20
Band 8 – PIR	0.842	10
Band 8A – Végétation Red Edge	0.865	20
Band 9 – Vapeur d'eau	0.945	60
Band 10 – MIR – Cirrus	1.375	60
Band 11 – MIR	1.610	20
Band 12 – MIR	2.190	20

4.5.3. Résolution radiométrique

La résolution radiométrique est la sensibilité d'un détecteur aux variations de l'intensité de l'énergie électromagnétique émise, réfléchie ou diffusée qui est détectée. Différents niveaux d'intensité qui peuvent être discriminés par le capteur dans une bande (Mariama & Hakdaoui, 2013).

La résolution radiométrique est la capacité de distinguer les différents niveaux d'intensité du REM dans une bande spectrale donnée. Habituellement mesurée en bits (chiffres binaires), la résolution radiométrique est la plage des valeurs de luminosité disponibles qui, dans l'image, correspondent à la plage maximale des DN ; par exemple, une image avec une résolution de 8 bits a 256 (2^8) niveaux de luminosité.

La résolution radiométrique ; c'est le nombre d'intervalles des intensités qui peuvent être capturées. Elle est caractérisée par ce qui suit :

- Sensibilité à l'intensité de l'énergie électromagnétique,
- Capacité du capteur à reconnaître de petites différences dans l'énergie électromagnétique,
- La gamme de longueurs d'onde à l'intérieur de laquelle un capteur est sensible se nomme plage dynamique.

4.5.4. Résolution temporelle

La résolution temporelle correspond à la fréquence d'acquisition d'une image à un endroit donné (Stéphanie et al, 2011). Elle fait référence au laps de temps écoulé entre deux images. Entre ces deux images, trois facteurs principaux sont susceptibles de modifier la mesure au niveau du capteur :

- a. *L'état du couvert végétal* ; les images prises en été, quand la stabilité phénologique est grande, on suppose que le couvert a le même comportement spectral d'une année à l'autre,
- b. *La géométrie d'observation* ; la réflectance est directionnelle et dépend de l'angle d'incidence solaire, de l'angle de prise de vue, et de l'azimut relatif entre les directions d'observation et d'éclairement. En prenant les images à la même époque de l'année, l'angle d'incidence solaire sera considéré comme identique. On privilégiera des angles de prise de vue comparables entre images,
- c. *Les conditions atmosphériques* ; jouent sur la réflectance apparente d'un objet car la composition très variable de l'atmosphère dans le temps (eau, aérosols, ...etc.) modifie l'importance des phénomènes d'absorption et de diffusion par ses composantes.

La résolution temporelle précise la fréquence de révision du satellite pour un emplacement spécifique (Mariama & Hakdaoui, 2013). Le facteur temps est important lorsque :

- Les nuages persistants offrent une vue directe limitée de la surface de la Terre,
- Les phénomènes à court terme (inondations, marées noires, ...etc.),
- Les phénomènes qui changent rapidement (atmosphérique),
- ✓ Haute résolution temporelle : < 1 - 3 jours,
- ✓ Moyenne résolution temporelle : 4 - 16 jours,
- ✓ Faible résolution temporelle : > 16 jours.

4.6. Signification thématique des canaux

En télédétection, la grandeur utilisée pour décrire la « teinte » des pixels est la **réflectance** (on parle de réflectivité pour les images radar). La réflectance va traduire le comportement d'une surface lorsqu'elle reçoit les rayons du soleil. Soumise à un rayonnement, une surface (la cible) va en partie :

- a. L'absorber,
- b. Le transmettre aux surfaces sous-jacentes,

- c. Le réfléchir vers le ciel. C'est cette part réfléchi qui est enregistrée par les capteurs des satellites.

La réflectance est une grandeur qui traduit la proportion de lumière réfléchi par la surface d'une cible. Elle est définie comme le rapport entre le flux lumineux réfléchi et le flux lumineux incident et s'exprime généralement en pourcentage.

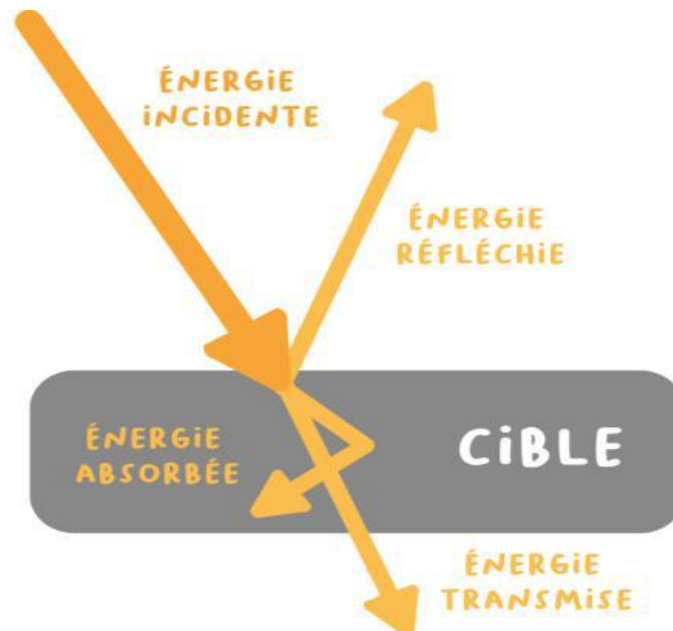


Figure 1: Interaction de l'énergie solaire avec la surface de la cible

$$\text{RÉFLECTANCE (\%)} = \frac{\text{ÉNERGIE RÉFLÉCHIE}}{\text{ÉNERGIE INCIDENTE}}$$

Quand le REM frappe un objet, certaines longueurs d'ondes sont réfléchies tandis que d'autres sont absorbées ou transmises. Dans le spectre visible, cette réflectance sélective de certaines longueurs d'ondes est perçue en termes de couleur. La quantité d'énergie réfléchi par un objet dans les différentes longueurs d'ondes (par rapport à l'énergie qu'il reçoit) s'appelle la réflectance spectrale, celle-ci étant une propriété intrinsèque de chaque matériau.

La réflectance spectrale est le rapport de l'énergie réfléchi dans toutes les directions à l'énergie incidente dans un intervalle de longueur d'onde donnée. Les données recueillies sur les images sont quantifiables. Elles représentent l'intensité relative des différentes longueurs d'ondes. Ces valeurs enregistrées simultanément représentent la signature spectrale des objets (Girard et al. 1977). Cette énergie ou signature spectrale est donc propre à chaque objet et rend sa distinction possible (Stonner et al., 1981). La réflectance est définie comme étant une grandeur qui dépend de la dimension, la

nature, la composition, la structure, l'humidité de la cible, de son environnement, des conditions atmosphériques, de la géométrie de l'éclairement et de celle de la visée, de la rugosité du sol et de la réflectance diffuse de la végétation, de l'importance des ombres, l'angle d'incidence solaire et l'angle de visée sont autant de facteurs susceptibles de modifier sensiblement la réflectance d'une surface dont quelques types de réflectances sont représentées par la Fig. 26 suivante:

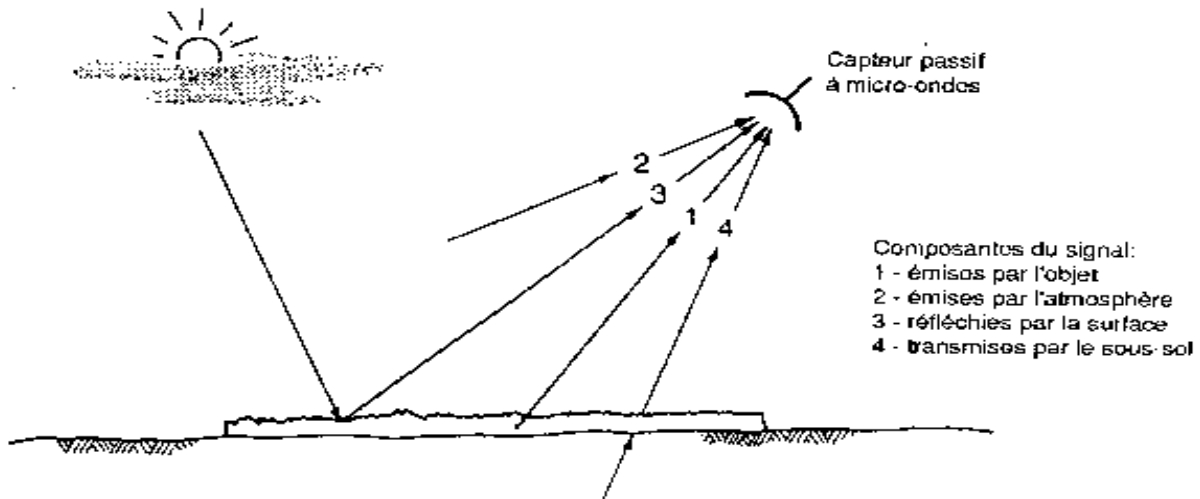


Fig. 30: Eléments d'un signal micro-onde passif (d'après Lillesand et Kiefer, 1979).

La réflectance se mesure à l'aide de spectromètres capables de fournir des résultats pouvant différencier la nature des objets. Les objets auront des courbes de réflectances différentes. Cette propriété, dont la couleur est un aspect bien vulgarisé, est celle qui a conduit à concevoir des systèmes d'acquisition du rayonnement selon des canaux de longueur d'onde distincts. L'expérience a montré que, dans les mêmes conditions géométriques d'incidence et d'observation, un objet a une luminance qui varie avec la longueur d'onde (Scanvic, 1983).

Pour un rayonnement quelconque qui arrive sur un objet, on peut écrire d'après Bonnet et al., (1993) la loi de conservation suivante :

$$\rho + \tau + \alpha = 1$$

Où ;

ρ : est la fraction de l'énergie réfléchie,

τ : est la fraction de l'énergie transmise,

α : est la fraction de l'énergie absorbée.

Seules les ondes réfléchies par les objets peuvent être enregistrées par un capteur. Ce sont elles qui sont intéressantes en télédétection. Par ailleurs, tous les objets émettent de l'énergie dans différentes longueurs d'onde. Elle peut être captée par des appareils de télédétection et analysée.

En définitif, les capteurs enregistrent l'énergie issue principalement d'un rayonnement incident ou de l'émission d'ondes électromagnétiques par l'objet.

Soit un faisceau parallèle d'éclairement E_0 arrivant sur une surface dS sous un angle d'incidence θ_s .

Soit $L(\theta_s, \theta_v, \varphi)$ la luminance renvoyée dans la direction de visé du satellite d'angle (θ_v) :

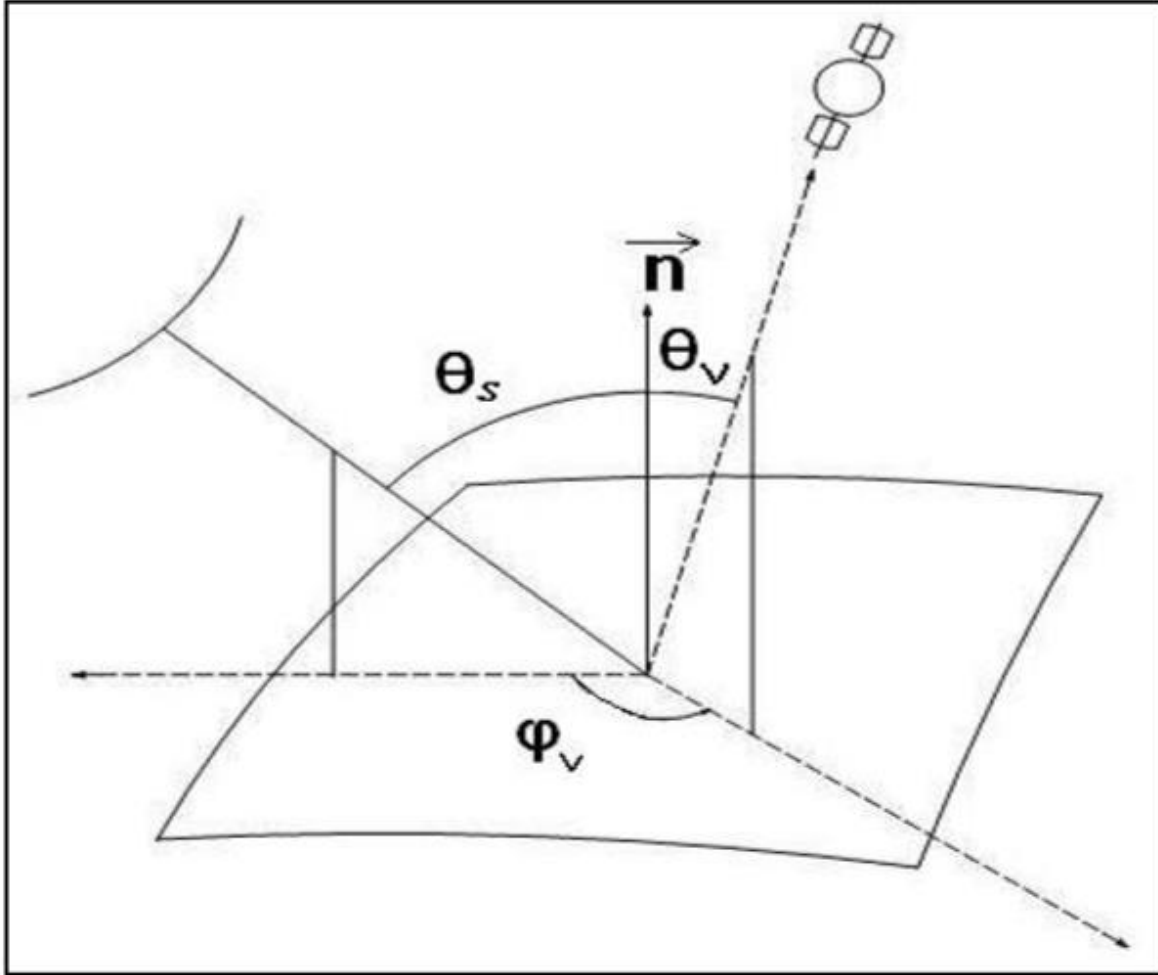


Fig. 31: Angles d'incidence dans la direction de la cible et du satellite

On définit alors la réflectance d'un objet par le rapport suivant :

$$\rho_{\lambda}(\theta_s, \theta_v, \varphi_v) = \frac{\pi \times L(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)}{E_0 \times \cos \theta_s}$$

E_0 étant l'éclairement reçu par la surface suivant la direction d'incidence θ_s . et le terme $L(\theta_s, \theta_v, \varphi_v)$ est la luminance (brillance) mesurée par le capteur dans la direction (θ_v, φ_v) .

Cette réflectance dépend de deux directions, celle du soleil (θ_s) et celle du capteur (θ_v) elle est appelé souvent réflectance bidirectionnel. Elle dépend aussi de la longueur d'onde d'observation (λ).

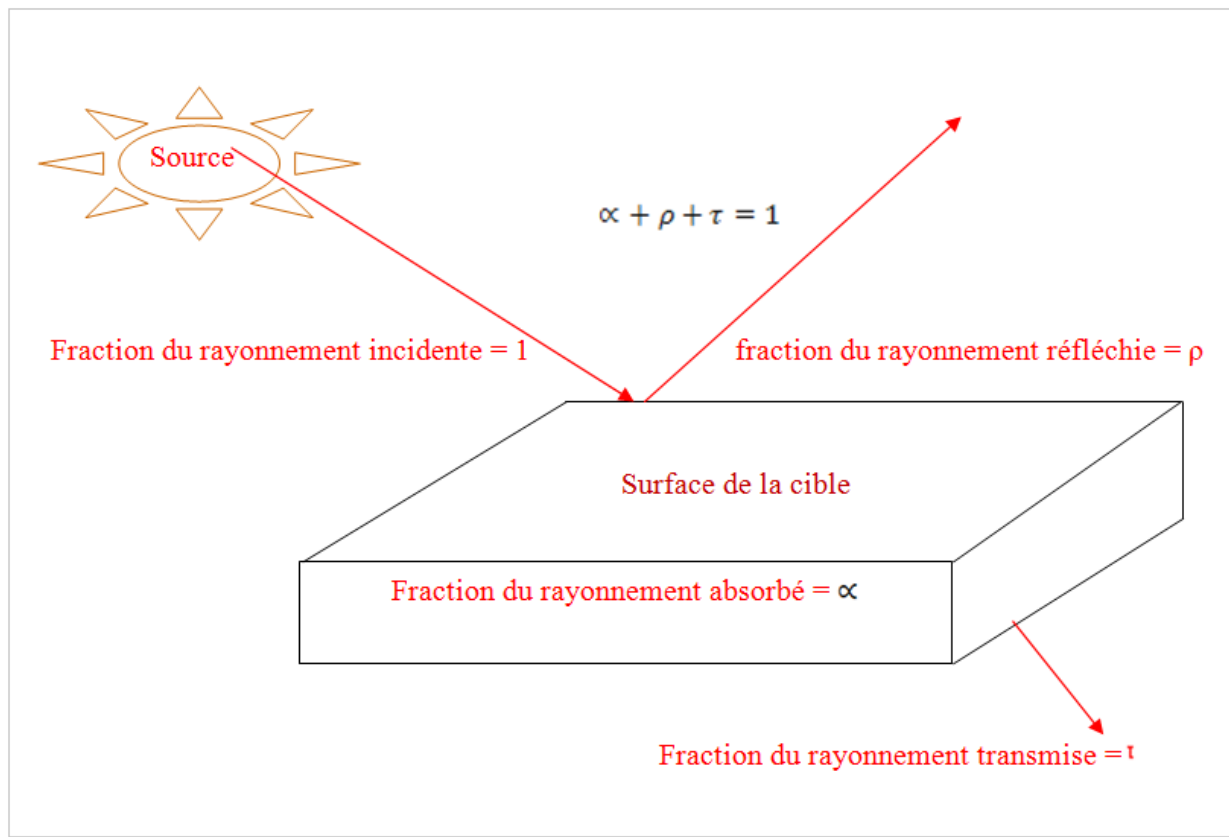


Fig. 32: Absorption, réflexion, transmission (d'après Bonnet et Rochon, 1993)

Chaque cible thématique est caractérisée par une signature spectrale. Elle ne réagit pas de la même façon dans les différents canaux. L'analyse des réflectances moyennes des différents thèmes individualisés dans chacun des canaux permet le choix des bandes spectrales appropriées pour la cartographie des sols (Escadafal, 1989). Il est donc, à priori, possible d'identifier un objet à partir de son spectre électromagnétique. Mais la signature spectrale d'un objet donné varie en fonctions de son état et des conditions d'éclairement (Scanvic, 1983). La signature spectrale est affectée également par la teneur en éléments minéraux et par la teneur en eau.

4.6.1. Végétaux

4.6.1.1 Feuilles des végétaux

Les feuilles d'une plante en bonne santé vont absorber les longueurs d'onde du rouge et du bleu (pour les besoins physiologiques de la plante, puisque les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique par le processus de photosynthèse), et réfléchir les longueurs d'ondes du vert. Ainsi, nous voyons les feuilles de couleur verte. Au-delà du domaine du visible, la végétation réfléchit de manière très importante les longueurs d'ondes de l'infrarouge et du proche infrarouge (PIR). C'est pour cela que sur l'image de la rade de Lorient, la végétation apparaissait en

blanc sur l'image de la bande PIR. Autrement dit, les valeurs de réflectance de la végétation sont élevées dans la bande du PIR.

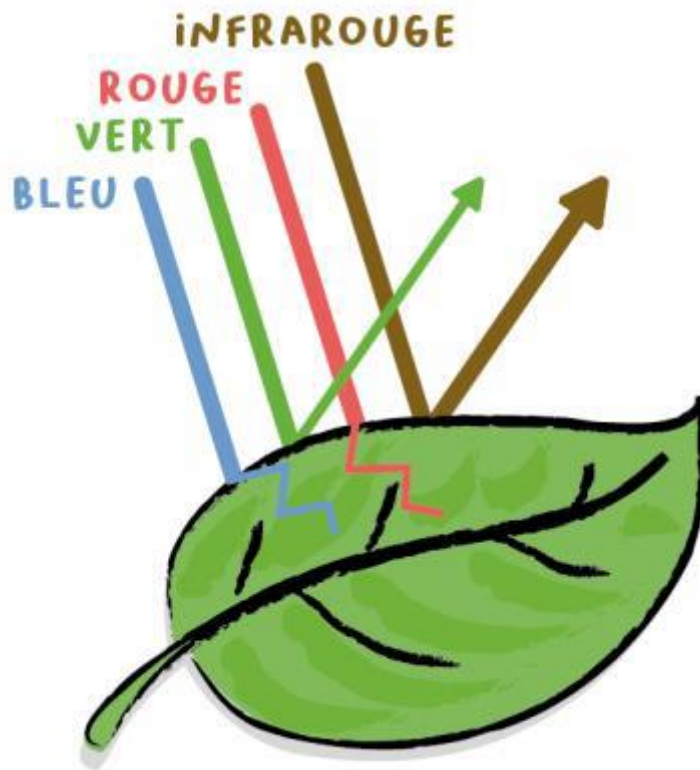


Fig. 33 : Exemple de réflectance des végétaux dans le Proche Infrarouge

Les feuilles d'une plante en bonne santé vont absorber les longueurs d'onde du rouge et du bleu (pour les besoins physiologiques de la plante, puisque les végétaux convertissent l'énergie lumineuse en énergie chimique par le processus de photosynthèse), et réfléchir les longueurs d'ondes du vert. Ainsi, nous voyons les feuilles de couleur verte. Au-delà du domaine du visible, la végétation réfléchit de manière très importante les longueurs d'ondes de l'infrarouge et du proche infrarouge (PIR). C'est pour cela que sur l'image de la rade de Lorient, la végétation apparaissait en blanc sur l'image de la bande PIR. Autrement dit, les valeurs de réflectance de la végétation sont élevées dans la bande du PIR.

Il est possible de caractériser des cibles de différente nature selon leur réponse spectrale à différentes longueurs d'onde. On parle de signature spectrale d'une cible (ou d'un type de surface). On peut représenter graphiquement les signatures spectrales des principaux matériaux.

La réflexion d'une feuille est de nature diffuse. Les mécanismes qui interviennent sont très complexes car les réfractions qui se produisent à tous les changements d'indice ; paroi cellulaire – protoplasme, chloroplastes contribuent à la diffusion et donc à la réflexion.

Tous les spectres des feuilles ont la même forme. Les différences se manifestent seulement dans les amplitudes, on peut distinguer trois domaines :

- a. Le visible : la majeure partie du rayonnement reçu est absorbée par les pigments foliaires. Les principaux d'entre eux sont les chlorophylles a et b (65% des pigments des plantes supérieures) qui possèdent deux bandes d'absorption dans le bleu et le rouge. Cela se traduit par un maximum de réflectance dans le jaune-vert à 550 nm environ.
- b. Le proche infrarouge ; La réflectance des feuilles dépend du nombre d'assises cellulaires, de la dimension des cellules et de l'épaisseur du parenchyme lacuneux.
- c. Le moyen infrarouge ; Dans l'infrarouge moyen (1,3 à 2,5 μm), l'absorption est principalement due à l'eau présente dans les plantes. Plus une plante contiendra de l'eau, plus l'absorption sera grande dans l'infrarouge moyen.

La signature spectrale de la végétation est complexe. La complexité croît de la feuille vers la plante en fonction de la phénologie (variation en fonction des saisons et des phases de croissance). La signature spectrale de la feuille vivante qui se traduit par une couleur verte dans le visible, est attribuable aux pigments foliaires comme la chlorophylle. Cette dernière a une forte absorption dans le bleu et le rouge et un maximum de réflectance dans le vert vers 0,55 μm . En revanche, dans le proche infrarouge, les feuilles se caractérisent par une forte réflectance, la transition entre le rouge et le proche infrarouge est très forte et se traduit par une pente abrupte de la courbe de réflectance.

Dans la plupart des cas, les surfaces en eau peuvent être considérées comme surfaces réfléchissantes ou lambertiennes, c'est à dire qu'elles réfléchissent, de façon isotrope, une part très faible du rayonnement solaire (réflectance très faible). Pour des incidences solaires et des angles d'observation particuliers, les surfaces en eau réfléchissent le rayonnement comme un miroir (réflexion spéculaire): la quasi-totalité du rayonnement incident est alors réfléchi selon un angle égal à l'angle d'incidence, est dans la direction opposée à celle de l'angle d'incidence solaire.

Dans le moyen infrarouge, ce sont les bandes d'absorptions de l'eau à 1,45 et 1,95 μm qui commandent l'absorption de la feuille, ce qui génère des pics de réflectance à 1,650 et 2,2 μm .

Dans le visible (400-700 nm), les végétaux réagissent en fonction de leur composition en pigments foliaires.

Dans le proche infrarouge (800 à 900 nm), les pigments ont peu d'influence sur la réflectance des végétaux ; c'est alors la structure interne des feuilles, à savoir la densité des parenchymes foliaires, qui prend de l'importance. La réflectance dans ce domaine, bien supérieure à la réflectance dans le visible, présente donc une bonne corrélation avec la biomasse verte.

4.6.2. Surfaces d'eau

L'eau est caractérisée par une réflectance relativement plus forte dans le visible (bleu (0.45 - 0.52 μm), vert (0.52 - 0.60 μm), rouge (0.63 - 0.69 μm)), que dans le proche infrarouge (0.76 - 0.90 μm) et les courtes longueurs du proche infrarouge (1.55 - 1.75 μm), considérant les bandes du capteur Landsat TM comme exemple. L'absorption des rayons solaires dans la bande proche infrarouge est complète (Sleimi, 2018). L'eau réfléchit les longueurs d'onde du bleu et absorbe fortement les longueurs d'onde de l'infrarouge (Herbreteau et al., 2018). L'humidité diminue la réflectance des sols. Un sol sec (interface air- particules). Sol humide (microcavité occupée par l'eau).

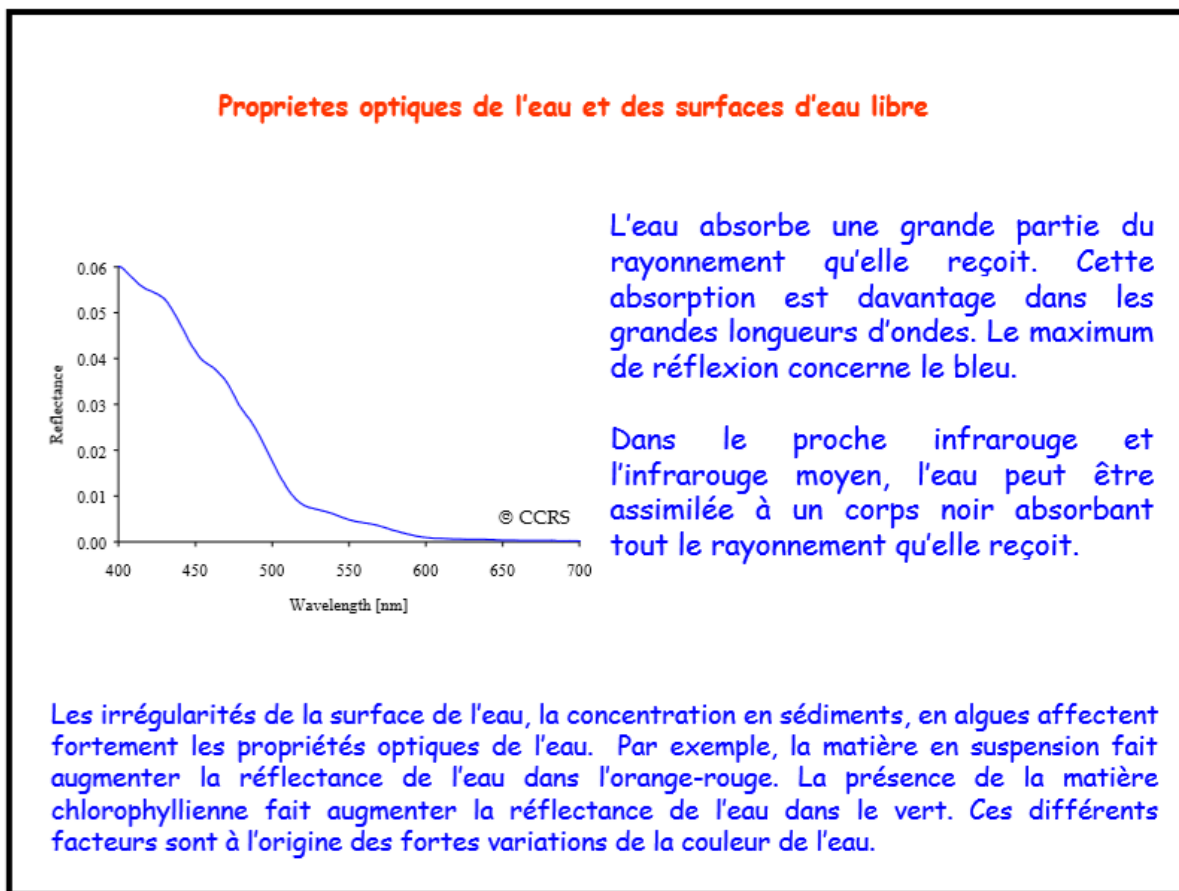


Fig. 34: Propriétés optiques de l'eau

4.6.2.1 Surfaces d'eau de mer

La diffusion

C'est surtout la diffusion particulière qui va dominer, c'est-à-dire que les particules en suspension dans l'eau de mer et les molécules d'eau diffusent un rayon de lumière et forment ensemble comme un faisceau lumineux ; en réalité, l'ensemble des particules éclairées.

L'atténuation de la lumière est donc liée pour une grande part à la teneur en matières en suspension et donc à la turbidité de l'eau de mer. Les eaux littorales ont tendance à être plus turbides que les eaux océaniques du large (remises en suspension, apports estuariens, etc).

L'absorption

L'absorption varie avec les longueurs d'onde et après quelques dizaines de mètres, seuls les bleus continuent à se propager, la lumière devient quasi monochromatique (une seule couleur).

La couleur de la mer va du bleu au vert : elle est davantage bleue lorsqu'il y a peu de production biologique (et donc moins de chlorophylle, responsable de la couleur verte) comme dans les mers tropicales et équatoriales où l'on rencontre parfois un bleu indigo ; le long des côtes, les eaux sont généralement verdâtres ; dans les régions polaires, la mer est quasiment verte.

Si l'eau avait été chargée de microalgues, on aurait vu des zones plus rouges dans l'eau (comme la végétation).

4.6.3. Surfaces des sols

Les signatures spectrales des sols sont moins variées que celles des végétaux. La technique de l'utilisation des radiomètres multi spectraux de haute résolution spectrale, disposant d'un grand nombre de canaux 100 voire 200 entre 0,4 et 3 μm . L'objectif est de détecter un nombre maximum de singularités pour chaque sol afin de le différencier des autres. L'autre piste a recours à l'analyse dite diachronique qui repose, comme son nom l'indique, sur l'étude de plusieurs images prises à des périodes différentes avec l'hypothèse que les paramètres caractéristiques des sols évoluent différemment en cours de saison.

Les sols présentent un spectre continu où la réflectance progresse lorsque la longueur d'onde augmente.

Le visible

Dans le visible, l'absorption d'énergie est due à l'excitation des vibrations dans les liaisons fondamentales de groupes anioniques tels que OH, CO₃, ...etc. Les ions ferriques Fe³⁺ produisent deux (02) bandes à 0,4 et à 0,7 nm.

L'infrarouge

La télédétection infrarouge est surtout destinée à mesurer la température du sol, de l'océan, ou des nuages (Kergoumard, 1990).

Le proche infrarouge (PIR) ; un sol blanc (calcaire fins) peut ainsi avoir des réflectances très fortes dans le PIR. Les ions ferreux Fe²⁺ produisent une forte bande d'absorption à 1,1 nm. La présence de fer est donc détectable dans le visible et le PIR grâce aux ions Fe²⁺ et Fe³⁺

L'infrarouge thermique ; l'émissivité des sols varie très sensiblement en fonction de la longueur d'onde et de leur composition minérale. Les argiles présentent une réflectance très faible et très stable dans tout l'infrarouge thermique (0,8 à 1,3 nm). Les sables présentent un pic de réflectance vers 0,8 – 0,9 nm. Les bandes d'absorption de l'eau à 1,4 à 1,9 um.

Les facteurs affectant la réponse spectrale des sols. Les paramètres du sol qui affectent la réflectance de manière prépondérante sont notamment :

- a. La granulométrie,
- b. La texture (teneur en sable, limon, argile),
- c. La rugosité de surface,
- d. La teneur en matière organique.
- e. L'humidité,
- f. La présence d'oxyde de fer.

La réflectance des sols augmente quand la taille des particules diminue. La rugosité influence directement la réflectance par le phénomène de réflexion diffuse. Plus le sol est rugueux, moins il réfléchit. Un sol à granulométrie fine apparaît plus clair qu'un sol grossier. En présence de sillons ou de grandes mottes de terre, il y a également apparition d'ombres portées.

Éléments grossiers ; augmentent la réflectance des sols :

- a. Pièrrosité (surface de cible),
- b. Roches ou affleurement (patine),
- c. Présence de lichen (chlorophylle),
- d. Présence de l'eau (humidité).

Éléments fins ; Les argiles ; (particules fines liées à la Matière Organique (MO) ; d'où réflectance faible.

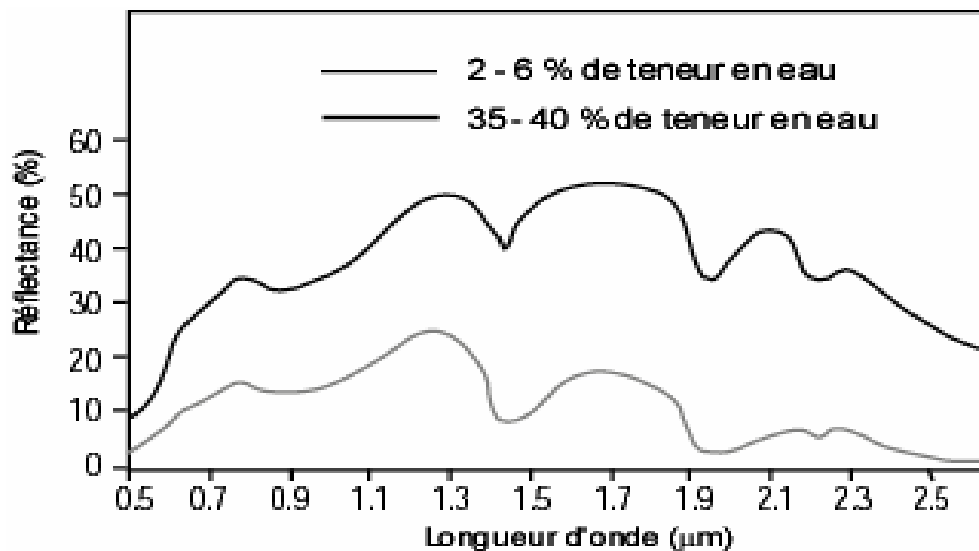


Fig. 35: Réflectance d'un sol argileux (d'après Girard et al., 1975)

Le sable ; particules fines de faible teneur en eau d'où la réflectance est relativement élevée.

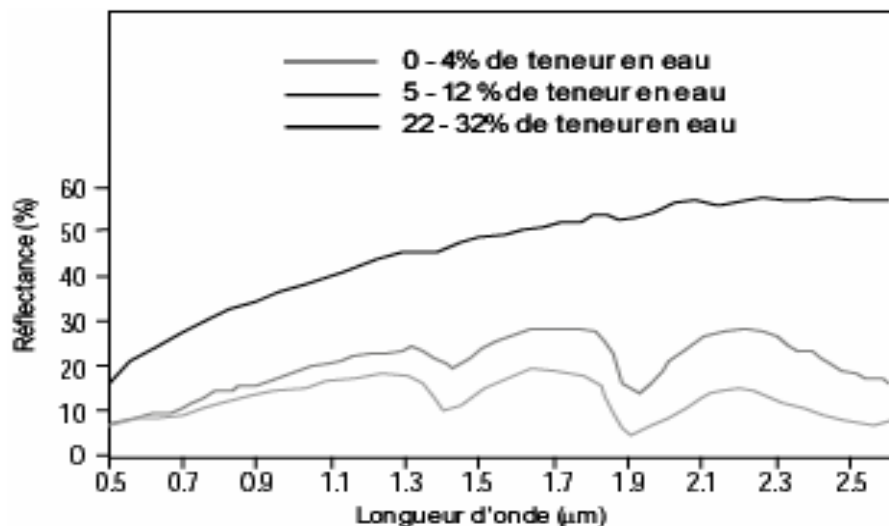


Fig. 36: Réflectance d'un sol (ex : sableux) en fonction de l'humidité (d'après Girard, 1975).

Il convient de relever :

- ✓ La forte variation de réflectance dès que le sol s'humidifie (courbe 1 et 2),
- ✓ Une augmentation ensuite du taux d'humidité n'apporte que peu de modification (les bandes d'absorption de l'eau 1,4 – 1,9 et 2,5 μm).
- ✓ Le calcaire ; (CaCO_3) augmente la réflectance à partir d'un taux de 10 à 20 %.
- ✓ Le fer ; diminue la réflectance à partir d'une teneur en fer de plus de 15 %.
- ✓ La présence d'oxyde de fer produit sur la réflectance un effet similaire à celui de la matière organique.

Chaque élément chimique influe selon sa structure et formulation ionique ce qui donne une couleur spécifique au sol donc une réponse spectrale différente.

Exemple ; les oxydes de fer donnent une apparence sombre au sol donc une faible réflectance à celui-ci, le calcaire (CaCO_3) donne une apparence claire au sol donc une forte réflectance au sol. Les sels augmentent la réflectance moyenne.

La droite des sols ; quelle que soit la teneur en matière organique, en eau et la rugosité des sols ; le sol nu présente toujours une courbe de réflectance croissante et pratiquement linéaire dans les courtes longueurs d'ondes ce qui définit la droite des sols et qui exprime la corrélation très forte entre les réflectances d'un sol mesuré dans le rouge et le Proche Infrarouge (PIR).

L'indice de brillance :

La brillance est le caractère réfléchant d'un sol. Elle est mesurée par des indices de brillances calculés à partir des mesures de réflectance dans le rouge et le PIR. La formule la plus courante est :

$$(R^2 + IR^2) 0,5$$

On utilise la formule pour caractériser les sols nus.

La matière organique (MO) produit un assombrissement. La MO influe à la fois sur la structure du sol ; sur leur capacité de rétention d'eau et sur leur couleur. La teneur en MO (à partir d'un taux de 2,2%) a un effet dépresseur sur la réflectance des sols. L'humus diminue donc la réflectance des sols dans toutes les bandes spectrales.

4.7. Orbites des satellites

Les difficultés que pose la télédétection à partir d'un avion ont été en partie surmontées par l'usage de satellites comme plates-formes. Ceux-ci peuvent surveiller périodiquement toute la surface du globe, en couvrant une grande section à chaque révolution. Les satellites conçus pour la télédétection sur une base opérationnelle sont des stations habitées. Néanmoins, quelques stations ont fourni des renseignements d'une grande valeur malgré la courte durée de leur mission, par exemple, Skylab, Soyouz et les navettes spatiales. La règle générale est ; plus l'altitude d'une plate-forme est grande, plus la superficie "vue" par le capteur, est étendue ; toutefois, la capacité à distinguer de petits objets est alors réduite.

Actuellement les satellites d'observation de la Terre scrutent les milieux naturels avec une précision spatiale, spectrale et temporelle de plus en plus grande. Plusieurs paramètres physiologiques des objets thématiques sont étudiés à travers les domaines visible et infrarouge du spectre électromagnétique.

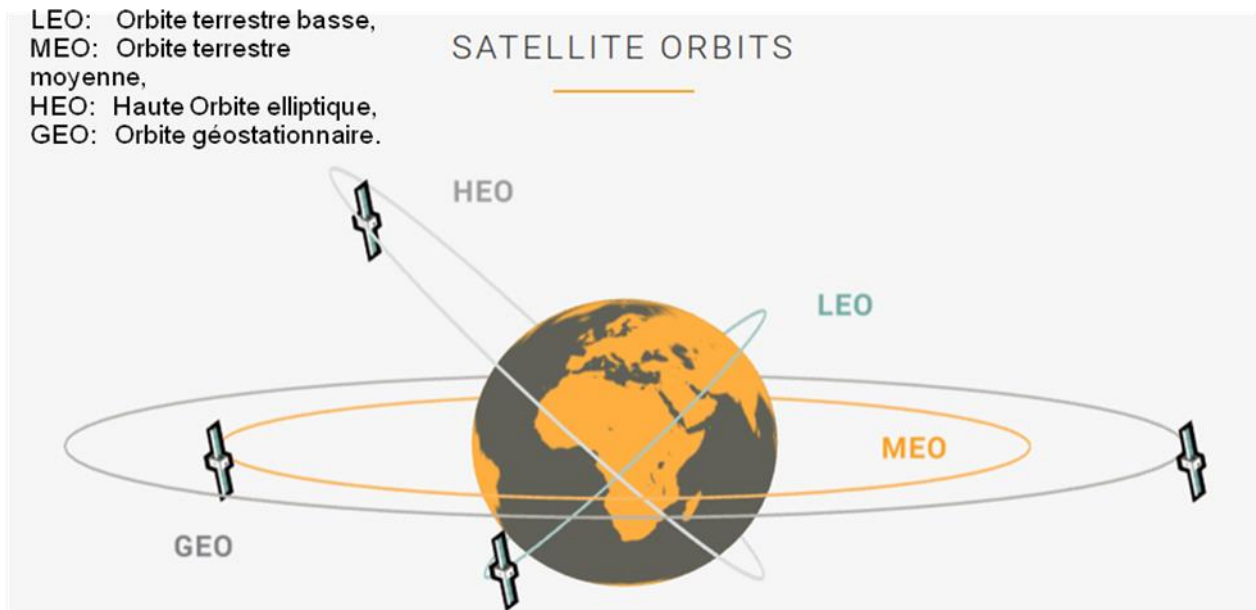


Fig. 37: Types d'orbites de satellites

Tab. 5: Caractéristiques particulières des orbites d'après Brieß, 2019)

	LEO	MEO	GEO	HEO (Molniya)
Altitude moyenne [km]	300-2000	2000-25000	35786	500x36000
Inclinaison [degré]	0-99	any	0	63,44
période[h]	approx. 1,5	approx. 5-12	24	12
Heure de contact [h]	approx. 10 min	2-4	24	11
utilisation	Divers	Postponement par GPS (GNSS), communication	communication, observation de la terre, météo.	communication

Deux orbites particulières sont décrites par la couverture terrestre quasi complète des satellites d'environnement : l'orbite géosynchrone et l'orbite héliosynchrone.

4.7.1. Orbites géostationnaires

Les orbites géostationnaires ont des altitudes jusqu'à 36 000 km. Les satellites placés sur ces orbites tournent dans le même sens que la rotation de la terre prograde et leur vitesse est réglée de manière qu'elle corresponde à celle de la surface terrestre située juste au-dessous d'eux.

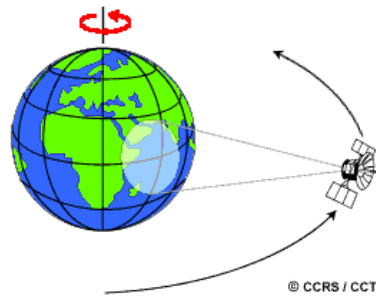


Fig. 38: Orbite géostationnaire

4.7.2. Orbites héliosynchrones

Situées entre 180 et 800km d'altitude, ces orbites sont dédiées à l'observation de la terre, car elles permettent une bonne visibilité de la surface. Le satellite survole un même point de la surface toujours vers la même heure solaire local (haute fréquence de revisite possible) (Faivre, 2018).

Cette orbite est beaucoup plus basse que l'orbite géosynchrone. Son inclinaison par rapport à l'équateur, est près de 90° (polaire ou proche-polaire).

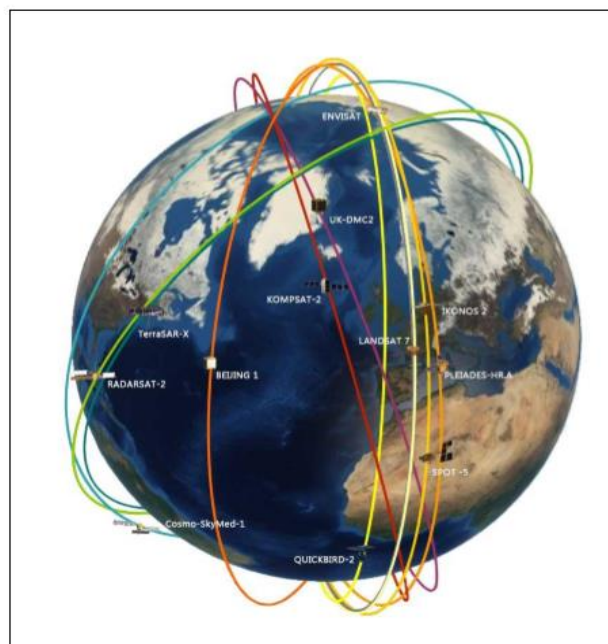


Fig. 39: Orbite héliosynchrone

4.8. Aperçu sur quelques plates formes spatiales d'acquisition d'images satellites

Plusieurs générations de satellites ont été lancés depuis et présentent un intérêt certain pour la recherche. Il y a environ 1071 satellites opérationnels en orbite (John, 2017).

On peut distinguer d'une part des satellites d'acquisition d'images à très haute résolution spatiale mais ne comportant que les traditionnelles bandes bleu-vert-rouge-proche infrarouge, et d'autre part des satellites de télédétection (comme par exemple des satellites comme MODIS ou la famille des Landsat) offrant un panel de bandes un peu plus riche mais une résolution spatiale basse ou

moyenne. Les satellites super spectraux, c'est-à-dire spectralement plus riches, sont restés des satellites à basse ou moyenne résolution spatiale. Il s'agissait par exemple des satellites Landsat (Landsat7 et 8 comportent respectivement 8 et 11 bandes, avec des résolutions spatiales de l'ordre de 30m pour la plupart des bandes) ou MODIS (36 bandes entre 400 nm et 14 400 nm, mais avec des résolutions spatiales variant entre 250 et 1000 m) (Chehata, 2017).

4.8.1. Satellites optiques à faible résolution

La résolution spatiale de cette catégorie de satellites varie entre 30 à 1000 mètres.

Tab. 6: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à faible résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).

	NOAA 17 et 18	NOAA 19	SPOT 4 et 5	IRS-1C et 1D	RESOURCESAT-1
Pays	États - Unis	États - Unis	France	Inde	Inde
Année de lancement	2002 et 2005	2009	1998 et 2002	1997	2003
Résolution spatiale	1,1 km (nadir) 5 à 6 km (bordure)	1,1 km (nadir) 5 à 6 km (bordure)	1,1 km (nadir) 1,7 km (bordure)	180 m	50 m (nadir) 70 m (bordure)
Dimension de l'image	2 400 x 2 400 km	2 400 x 2 400 km	2 200 x 2 100 km	774 x 774 km	734 x 734 km
Fréquence de passage	2 fois / jour	2 fois / jour	1 fois / jour	24 jours	24 jours
Application	Météorologie et océanographie	Météorologie et océanographie	Végétation, agriculture et océanographie	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation
Site web	http://www.noaa.gov	http://www.noaa.gov/	http://www.spot.com/	http://www.isro.org/satellites/earthobservationsatellites.aspx	http://www.isro.org/satellites/earthobservationsatellites.aspx

4.8.2. Satellites optiques à moyenne résolution

La résolution spatiale de cette catégorie de satellites varie entre 04 à 30 mètres.

Le CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), fédère 60 agences membres ou associées, recense 154 satellites pour l'observation de la Terre en 2018, dont les caractéristiques sont données sur son portail d'information : <http://database.eohandbook.com/index.aspx> (Herbreteau et al., 2018).

Tab. 7: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à moyenne résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).

	LANDSAT 1, 2 et 3	LANDSAT 4 et 5	LANDSAT 7	LANDSAT 8	SPOT 1, 2 et 3	SPOT 4	SPOT 5
Pays	États - Unis	États - Unis	États - Unis	États - Unis	France	France	France
Année de lancement	1972, 1975 et 1978	1982 et 1984	1999	2013	1986, 1990 et 1993	1998	2002

Résolution spatiale	60 x 80 m	Multispectrale: 30m Infra rouge thermique : 120m	Multispectral : 30 m Infra rouge thermique : 60 m Panchromatique : 15 m	Multispectral : 30 m Infra rouge thermique : 100 m Panchromatique : 15 m	Multispectrale: 20m Panchromatique: 10m	Multispectrale: 20m Panchromatique: 10m	Vert, rouge et IR : 10 Infra rouge moyen : 20 m Panchromatique : 5 m et 2 à 3 m
Dimension de l'image	185 x 185 km	185 x 172 km	185 x 172 km	185 x 172 km	60 x 60 km (80 km en visée latérale extrême)	60 x 60 km (80 km en visée latérale extrême)	60 x 60 km (80 km en visée latérale extrême)
Fréquence de passage	18 jours	16 jours	16 jours	18 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours	3 à 26 jours
Application	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol et végétation	Occupation du sol, cartographie et physiographie	Occupation du sol, cartographie et physiographie	Occupation du sol, cartographie et physiographie
Site web	http://www.landsat.org	http://www.landsat.org	http://www.landsat.org	/	http://www.spot.com	http://www.spot.com	http://www.spot.com/

Tab. 8: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à moyenne résolution (d'après Faivre, 2018) (...suite).

	Spot 6 & 7	Sentinel 2
Pays	France	Agence Spatiale Européenne (ESA)
Année de lancement	2012 et 2014	2015 et 2016
Résolution spatiale	Multispectrale: 6 m Panchromatique : 1,5 m	Multispectrale: 10, 20 et 60 m
Dimension de l'image	60 x 60 km	290 x 290 km
Fréquence de passage	26 jours	5 jours
Application	Occupation du sol, cartographie et physiographie	Occupation du sol et végétation

La mise sur orbite de la série des satellites Landsat résulte d'un projet de l'Administration Américaine nationale de l'aéronautique et de l'espace (en anglais National Aeronautics and Space Administration (NASA), visant à réaliser un satellite dédié à l'observation de la terre pour évaluer les ressources potentielles c'est la raison pour laquelle ce satellite est connu auparavant par le nom satellite (Earth Resources Technology Satellite "ERTS"). Le programme Landsat a commencé en juillet 1972, avec le lancement de la première plateforme Landsat-1. Grâce à l'avancement technologique et à la demande d'une meilleure qualité, d'autres plateformes ont été lancées (Landsat-2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9). Sauf que, le lancement de Landsat-6 n'a pas été réussi en 1993. De plus, un problème technique dans le balayeur du capteur Landsat-7 (ETM+) a eu lieu le 31 mai 2003 et a causé des anomalies dans les images subséquentes. Les résolutions spatiale et temporelle ont été améliorées dans les plateformes de Landsat-4 au Landsat-8 : le cycle est devenu 16 jours au lieu de 18 jours et la résolution spatiale est devenue 30 mètres au lieu de 60 mètres après rééchantillonnage (<http://glovis.usgs.gov/>). Les caractéristiques techniques des huit satellites sont décrites dans le Tab. 9 suivant :

Tab. 9: Principales caractéristiques techniques des satellites Landsat (1,2,3,4,5,6,7 et 8).

Principales caractéristiques des satellites Landsat 1,2,3,4,5,6,7 et 8					
Caractéristiques	Landsat-1 à 3	Landsat-4 et 5	Landsat-6	Landsat-7	Landsat 8/ Landsat Data Continuity Mission (LDCM)
Début et fin de mission	Landsat-1 : 1972-1978 Landsat-2 : 1975-1981 Landsat-3 : 1978-1983	Landsat-4 : 1982-1993 Landsat-5 : 1984-2013	1993 (échec)	1999-	2013
Statut satellite	Achevée	Achevée (L-4) Fonctionne en mode dégradé (L-5)	Echec au lancement	Actif	Actif
Masse	816–960 kg	1 938–1 961 kg	-	2 200 kg	2 600 kg
Instruments	MSS : radiomètre RVB : caméra vidéo	MSS et TM : radiomètre	MSS et TM : radiomètre	ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) : radiomètre	OLI et TIRS : radiomètre
Bandes spectrales	0,5-0,6 μm 0,6-0,7 μm 0,7-0,8 μm 0,8-1,1 μm	0,45-0,52 μm 0,52-0,6 μm 0,63-0,69 μm 0,76-0,9 μm 1,55-1,75 μm 2,08-2,35 μm	-	0,45-0,52 μm 0,53-0,61 μm 0,63-0,69 μm 0,78-0,9 μm 1,55-1,75 μm 2,09-2,35 μm	0,433-0,453 μm 0,45-0,515 μm 0,525-0,6 μm 0,63-0,68 μm 0,845-0,885 μm 1,56-1,66 μm 1,36-1,39 μm 2,1-2,3 μm
Infrarouge thermique	-	10,4-12,5 μm	-	10,4-12,5 μm	10,3-11,3 μm 11,5-12,5 μm
Panchromatique	-	-	-	0,52-0,9 μm	0,5-0,68 μm
Résolution	Générale : 79 m	Générale : 30 m Infrarouge thermique : 120 m	-	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 120 m	Générale : 30 m Panchromatique : 15 m Infrarouge thermique : 100 m
Technique de prise d'image	Whiskbroom	Whiskbroom	-	Whiskbroom	Pushbroom
Orbite	Altitude : 907–915 km cycle : 18 jours heure : 9 h 45	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 9 h 30-10 h	-	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 10 h-10 h 15	Altitude : 705 km cycle : 16 jours heure : 10 h

Depuis, la caméra est évoluée de Return Beam Vidicon (RBV) et Multi Spectral Scanner (MSS) de 1972 à *Thematic Mapper (TM)* en 1982 puis à *Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM⁺)* en 1999 et ensuite à *Radiomètre Operational Land Imager (OLI8)* en 2013. La résolution spatiale est passée de 80 m à 30 m (ou 15 m en mode panchromatique) et les domaines spectraux explorés concernent le

visible, le proche infrarouge et le moyen ainsi que l'infrarouge thermique. Les images couvrent un champ d'observation de 170 km x 185 km.

Le capteur *Thematic Mapper (TM)* du Landsat 7 capte des données dans sept (7) bandes spectrales, il a la capacité de surveiller une large gamme de bandes spectrales (du bleu à l'infrarouge). Il apporte plusieurs améliorations notamment les applications détaillées dans le Tab.10 suivant :

Tab. 10: Les différentes applications des images du satellite Landsat TM (d'après Hamzaoui, 2005).

Bandes	Domaine spectral (microns)	Application
TM 1	0,45 - 0,52 (bleu)	Discrimination du sol et de la végétation ; cartographie côtière et bathymétrique ; identification des caractéristiques urbaines et culturelles.
TM 2	0,52 - 0,60 (vert)	Cartographie de la végétation verte (pic de réflexion de mesure) ; identification des caractéristiques urbaines et culturelles.
TM 3	0,63 - 0,69 (rouge)	La discrimination des espèces végétales et non végétales (absorption de chlorophylle végétale) ; identification des caractéristiques urbaines et culturelles.
TM 4	0,76 - 0,90 (proche IR)	Identification des types de végétation, de la santé et de la biomasse ; délimitation du corps d'eau ; l'humidité du sol.
TM 5	1,55 - 1,75 (IR moyen)	Sensible à l'humidité dans le sol et la végétation ; la neige exigeante et les zones couvertes par les nuages
TM 6	10,4 - 12,5 (IR thermique)	Le stress de la végétation et la discrimination de l'humidité du sol liés aux rayonnements thermiques ; cartographie thermique (urbain, eau).
TM 7	2,08 - 2,35 (ondes courtes UV)	Discrimination des types de minéraux et des types de roches ; sensible au taux d'humidité dans la végétation. Sensible à la teneur en humidité de la végétation
TM 8	0,52 - 0,90 (panchromatique) (vert et rouge) et proche IR)	Cartographie de larges zones, évolution de l'urbanisation.

4.8.2.1 Satellite Landsat

Le satellite Landsat actuel est celui de la génération 8 (Landsat-8), il dispose deux capteurs dont leurs caractéristiques sont détaillées dans le Tab.11 suivant :

Tab. 11: Caractéristiques des bandes spectrales des capteurs du satellite Landsat-8.

Les bandes spectrales de l'instrument OLI-8		
Bande spectrale	Longueur d'onde	Résolution
Bande 1 - Aérosols	0,433 - 0,453 μm	30 m
Bande 2 - Bleu	0,450 - 0,515 μm	30 m
Bande 3 - Vert	0,525 - 0,600 μm	30 m
Bande 4 - Rouge	0,630 - 0,680 μm	30 m
Bande 5 - Infrarouge proche	0,845 - 0,885 μm	30 m
Bande 6 - Infrarouge moyen 1	1,560 - 1,660 μm	30 m
Bande 7 - Infrarouge moyen 2	2,100 - 2,300 μm	30 m
Bande 8 - Panchromatique	0,500 - 0,680 μm	15 m
Bande 9 - Cirrus	1,360 - 1,390 μm	30 m
Les bandes spectrales de l'instrument TIRS-8		

Bande 10 - Infrarouge moyen	10,30 - 11,30 μm	100 m
Bande 11 - Infrarouge moyen	11,50 - 12,50 μm	100 m

Le premier capteur est dit *Operational Land Imager (OLI)* est l'instrument principal. Ce radiomètre multispectral acquiert des images dans neuf (9) bandes spectrales allant du visible au moyen infrarouge. Sept (7) de ces bandes spectrales étaient déjà pressentes sur l'instrument *ETM⁺* de Landsat-7, deux canaux supplémentaires ont été ajoutés, destinés principalement à la correction atmosphérique (canal bleu à 440 nm) et à la détection des nuages (1380 nm). Le second capteur est dit *Thermal Infrared Sensor (TIRS)* est un radiomètre multispectral infrarouge à deux canaux qui fournit des données dans des longueurs d'onde observées par les anciens satellites Landsat mais non repris dans l'instrument *OLI*. L'objectif est d'assurer la continuité des mesures effectuées par le passé. La résolution des images est de 100 mètres contre 60 m pour l'instrument de Landsat-7. Les bandes spectrales du Landsat 7 et 8 sont détaillées dans le Tab.12 suivant :

Tab. 12: Comparaison entre les bandes spectrales du Landsat 7 et 8 (<http://glovis.usgs.gov/>).

Bandes L7 ETM+	Bandes L8 LDCM OLI / TIRS	Explication des différences
	Bande 1 : 30 m, Coastal / Aerosol, 0.433–0.453 μm	Bande côtière ajoutée à la demande des chercheurs de couleur océanique exigeant une résolution plus élevée des eaux côtières par rapport à MODIS et SeaWiFS.
Bande 1: 30 m, Blue, 0.450–0.515 μm	Bande 2 :30 m, Blue, 0.450–0.515 μm	Amélioration de la bande passante effectuée pour éviter les caractéristiques d'absorption atmosphérique (activée par le rapport signal-tonoise plus élevé inhérent à l'architecture push-broom)
Bande 2: 30 m, Green, 0.525–0.605 μm	Bande 3 :30 m, Green, 0.525–0.600 μm	
Bande 3: 30 m, Red, 0.630–0.690 μm	Bande 4 : 30 m, Red, 0.630–0.680 μm	
Bande 4: 30 m, NearIR, 0.775–0.900 μm	Bande 5 : 30 m, Near-IR, 0.845–0.885 μm	
Bande 5: 30 m, SWIR1, 1.550–1.750 μm	Bande 6 : 30 m, SWIR-1, 1.560–1.660 μm	
Bande 7: 30 m, SWIR2, 2.090–2.350 μm	Bande 7 : 30 m, SWIR-2, 2.100–2.300 μm	
Bande 8: 15 m, Pan, 0.520–0.900 μm	Bande 8 :15 m, Pan 0.500–0.680 μm	Bande de cirrus ajoutée pour détecter la contamination des nuages dans d'autres canaux.
	Bande 9 : 30 m, Cirrus, 1.360–1.390 μm	
Bande 6: 60 m, LWIR, 10.00–12.50 μm	Bande 10 : 100 m, LWIR1, 10.30–11.30 μm	TIRS acquerra les données pour ces deux bandes thermiques.
	Bande 11 : 100 m, LWIR2, 11.50–12.50 μm	

Les données fournies par les satellites Landsat font actuellement l'objet d'une vaste série d'examens de la part de nombreux chercheurs (géologues, pédologues, hydrologues, forestiers, aménagistes...). Ils sont capables d'enregistrer la réponse spectrale des forêts, il permet la cartographie, la gestion des ressources, la surveillance de l'environnement et la détection du changement (Wulder et al, 2005).

Landsat 9

Landsat 9 a été lancé avec succès le lundi 27 septembre 2021 depuis la Vandenberg Space Force Base en Californie. Il est placé sur une orbite quasi polaire, héliosynchrone, située à une altitude de 705 km (438 miles). Son inclinaison de l'orbite est de 98,2° et sa vitesse du vaisseau spatial est de 26,972 km/heure. Landsat 9 prend des images de la Terre tous les 16 jours en décalage de 8 jours avec Landsat 8. Lorsque Landsat 9 rejoindra Landsat 8 en orbite, les deux satellites pourront

ensemble d'imager chaque bande du globe tous les huit (8) jours. Les capteurs couvrent une bande ou fauchée de 185 kilomètres de large.

Spectral band	Wavelength, in micrometers	Resolution, in meters
Operational Land Imager		
Band 1—Ultra blue (coastal/aerosol)	0.435–0.451	30
Band 2—Blue	0.452–0.512	30
Band 3—Green	0.533–0.590	30
Band 4—Red	0.636–0.673	30
Band 5—Near infrared (NIR)	0.851–0.879	30
Band 6—Shortwave infrared (SWIR) 1	1.566–1.651	30
Band 7—Shortwave infrared (SWIR) 2	2.107–2.294	30
Band 8—Panchromatic	0.503–0.676	15
Band 9—Cirrus	1.363–1.384	30
Thermal Infrared Sensor		
Band 10—Thermal infrared (TIR) 1	10.60–11.19	100 ^a
Band 11—Thermal infrared (TIR) 2	11.50–12.51	100 ^a

Fig. 40 : Caractéristiques techniques du satellite Landsat-9

Le TIRS mesure le rayonnement infrarouge thermique, ou chaleur, de la surface de la Terre avec deux bandes dont les performances ont été améliorées par rapport aux bandes thermiques de Landsat 8. OLI-2 et TIRS-2 sont des capteurs optiques qui détectent 11 longueurs d'onde du visible, Infrarouge proche, infrarouge à ondes courtes et infrarouge thermique lorsqu'elle est réfléchie ou émise par la surface de la planète.

L'instrument TIRS-2 de Landsat 9 peut mesurer la température du sol et de l'eau de notre planète. Landsat 9 transmettra des données de 14 bits à partir de l'instrument OLI-2, par rapport aux données de 12 bits de Landsat 8 OLI, ce qui permettra d'améliorer les observations des régions plus sombres, comme les forêts et les eaux côtières. Tous les produits de données Landsat 9 peuvent être téléchargés gratuitement par le biais de l'USGS *Earth Resources Observation and Science* (EROS) Center.

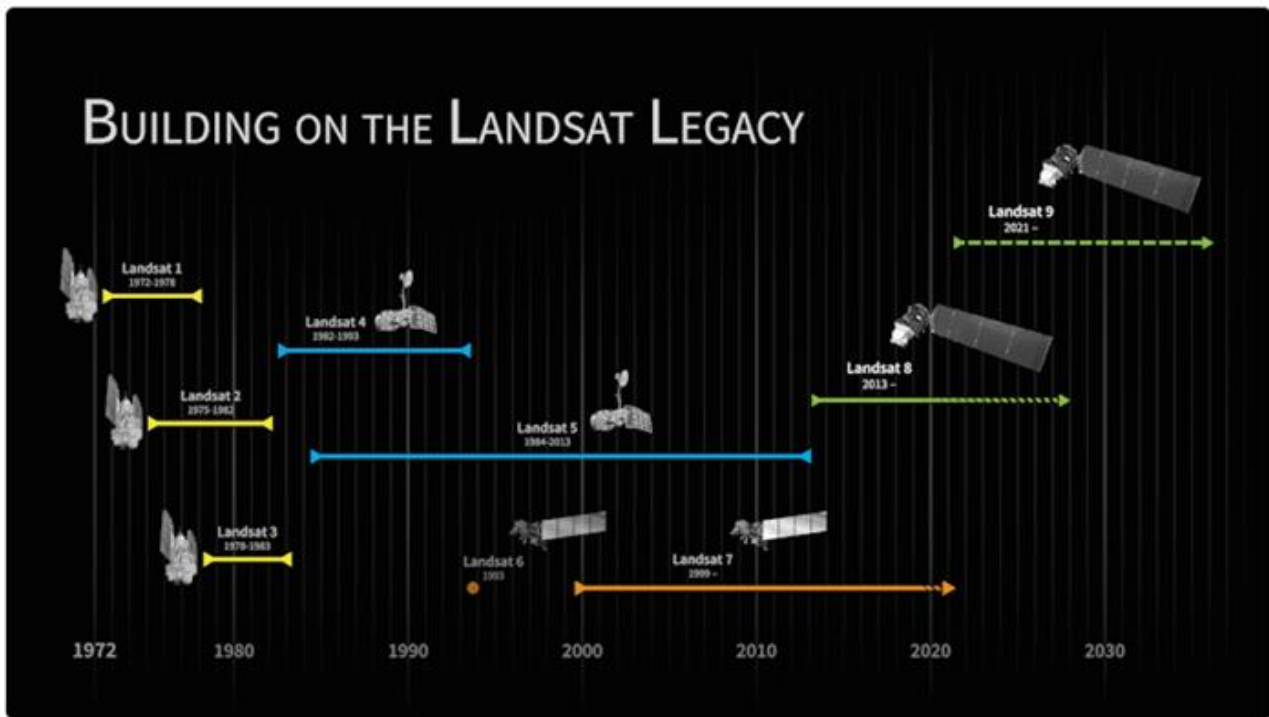


Fig. 41: Chronologie du programme Landsat 1 à 9 (1972 à 2021).

4.8.2.2 Satellites Spot

Les satellites Spot ; est une série de satellites d'observation de la terre qui ont été conçus et lancés par le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) de France depuis 1986. Il a une résolution spatiale de 10 m en mode panchromatique (1 seule bande) et 20 m en mode multi spectrale (3 bandes), la fauchée est de 60 km. Les données de 3 bandes multi spectrale sont utiles pour afficher des images en fausses couleurs et la bande panchromatique peut être utilisée pour améliorer le détail des données multi spectrales. Les images Spot sont utilisées en foresterie et en agriculture. Les principales caractéristiques techniques de l'instrument végétation Spot-4 (Mayaux et al., 2003) sont optimisées pour la surveillance globale de la végétation (CNES, 1999). Les images Spot permettent d'en produire une cartographie des contours de feux avec une précision inférieure à 10 m et calculer le nombre d'hectares brûlés pour chaque feu de forêt. L'acquisition d'images stéréoscopiques sont appliquées également en cartographie pour établir le Model Numérique de Terrain (MNT).

4.8.2.3 Satellite optique Sentinel

En 2001, l'Agence Spatiale Européenne (ESA) et l'Union européenne ont lancé un programme ambitieux de surveillance globale pour l'environnement et la sécurité (Global Monitoring for Environment and Security - GMES), devenu le programme Copernicus en 2012, afin de rassembler des données satellitaires accessibles et de développer des services opérationnels. Dans le cadre de Copernicus, l'ESA a développé la constellation des satellites Sentinel qui fournissent des images gratuites, optique et Radar, dans des résolutions complémentaires. Ainsi, les satellites Sentinel-2 A

et B produisent des images à haute résolution spatiale (HR) (jusqu'à 10 m), avec une acquisition systématique globale tous les 5 jours (Herbretau et al., 2018) et une couverture au sol de 290km (Faivre, 2018). Deux satellites optiques identiques : Sentinel-2A et Sentinel-2B, Lancés respectivement par l'ESA en date du 2015 et 2016. Il dispose 13 bandes spectrales ayant une résolution spatiale de 10, 20 et 60. Les caractéristiques des bandes sont résumées dans le Tab.13 suivant :

Tab. 13: Caractéristiques des bandes spectrales du satellite optique Sentinel - 2 (d'après Faivre, 2018).

Bandes Sentinel-2	Longueur d'onde centrale (micromètres)	Résolution (mètres)
Band 1 –Aérosol (bleu côtier)	0.443	60
Band 2 –Bleu	0.490	10
Band 3 –Vert	0.560	10
Band 4 –Rouge	0.665	10
Band 5 –Végétation RedEdge	0.705	20
Band 6 –Végétation RedEdge	0.740	20
Band 7 –Végétation RedEdge	0.783	20
Band 8 –PIR	0.842	10
Band 8A –VégétationRed Edge	0.865	20
Band 9 –Vapeur d'eau	0.945	60
Band 10 –MIR –Cirrus	1.375	60
Band 11 –MIR	1.610	20
Band 12 –MIR	2.190	20

Le satellite optique Sentinel-2 est utilisé dans les applications de la cartographie de l'occupation des sols. Il permet d'élaborer des cartes d'occupation des sols, cartes de risque et de couverture rapide en cas d'urgence et cartes de la végétation et de la chlorophylle (Mariama & Hakdaoui, 2013).

Parmi les 1071 satellites opérationnels en orbite, l'Afrique compte 24 satellites opérationnels sur orbites et ayant pour missions de navigation, communications, suivi de la météorologie et d'observation de la terre (John, 2017). Les satellites sont répartis dans le Tab.14 suivant :

Tab. 14: Liste des satellites Africains (d'après John, 2017).

Pays	Satellites	Dates de lancement
Afrique du Sud	NSIGHT-1 , ZA-AEROSAT	20/11/1998
	SUNSAT	23/02/1999
	SUMBANDILA	17/09/2009
	ZACUBE	21/11/2013
	KONDOR E	19/12/2014
Egypt	NILESAT	28/04/1998
	NILESAT 102	17/08/2000
	EGYPTSAT 1	17/04/2007
	NILESAT 201	04/08/2010
	EGYPTSAT 2	16/04/2014
Algérie	ALSAT 1	28/11/2002
	ALSAT 2A	12/07/2010
	ALSAT 1B, ALSAT 2B, ALSAT 1N	26/09/2016
	ALCOMSAT1	11/12/2017
	NSIGHT-1, ZA-AEROSAT	20/11/1998

Nigéria	SUNSAT	23/02/1999
	SUMBANDILA	17/09/2009
	ZACUBE	21/11/2013
	KONDOR E	19/12/2014
Ghana	GhanaSat-1	07/07/2017
Maroc	MOHAMMED VI-A	08/11/2017

4.8.2.4 Satellites Algériens

L'Algérie compte actuellement 6 satellites mis sur orbites depuis l'année 2002. Ils sont gérés par l'Agence Spatiale Algérienne (ASAL). Le microsatellite amélioré satellite Alsat-1 mis sur orbite terrestre de 700 km (Bekhti & Sweeting, 2008). Sa fauchée est de 600 km. Son capteur solaire a une résolution spatiale de 32m et 3 bandes spectrales (rouge, vert et proche infrarouge) identiques à celles du capteur *TM* du satellite Landsat (Rachedi et al., 2004). Il est dédié à la surveillance des catastrophes naturelles. Les données Alsat-1 ont été utilisées dans un cadre prévisionnel dans la mesure où elles permettent la localisation et l'identification des zones agricoles menacées par d'éventuelles invasions acridiennes (Benhamouda, 2005). Elles ont permis aussi de faire un suivi des incendies de forêts et un bilan chiffré des superficies touchées annuellement (entre le mois de Mai et Août) par le feu de forêts (Yousfi et al., 2005).

Le deuxième satellite Alsat-2A mis sur orbite héliosynchrone de 670 km (Kameche et al., 2011). Son capteur a une résolution au sol de 2,5 m pour la bande panchromatique et 4 m pour les 4 bandes multispectrales (vert, bleu, rouge et infrarouge). Sa fauchée est de 17,5 km. Les opérations sont effectuées à partir du segment terrestre Alsat-2 situé à Ouargla - Algérie (Larbi et al., 2012). Le satellite présente un intérêt technologique et économique considérable et qui garantit le renforcement de l'autonomie en termes de disponibilité et de couverture des données satellitaires, ce qui permet d'améliorer et de mettre à jour la cartographie de base et thématique sur l'ensemble du territoire national (Boukerch et al., 2012). Plus de 130 000 produits d'imagerie ont été reçus (Kameche et Benmostefa, 2016).

Le satellite Alsat-1B et 2B ont été mis sur une orbite héliosynchrone de 700 km. La résolution spatiale est moyenne (24 m en multispectrale et 12 m en panchromatique). La fauchée est de 163 km. Parmi ses applications on cite l'observation de la terre telle que la surveillance des ressources

naturelles (agriculture), gestion des catastrophes et la cartographie de l'occupation des sols (Serief, 2017).

Le satellite expérimental Alsat-1N est dédié à la recherche scientifique et le développement technologique.

Le satellite AlcomSat1 est le 6^{ème} satellite Algérien et le premier satellite de communication. Il assure une couverture nationale et régionale (nord-ouest de l'Afrique et le Sahel). Il permet le renforcement de la souveraineté nationale en matière de télécommunications. Il permettra la diffusion de 200 à 300 chaînes de télévision et du même nombre de radios numériques, mais aussi l'amélioration de certains services tels que la formation en ligne, la télé médecine et la visioconférence grâce à la diffusion de l'Internet à très haut débit sur l'ensemble du territoire Algérien. Il permet la réduction des coûts d'exploitation actuels liée à l'utilisation de la capacité spatiale fournie par des systèmes de télécommunications internationaux (ASAL, 2018).

4.8.3. Satellites optiques à haute résolution

La résolution spatiale de cette catégorie de satellites varie entre 0.5 à 04 mètres. La fin des années 1990 et le début des années 2000 ont vu l'avènement des satellites à très haute résolution spatiale, avec des capteurs comme GeoEye, QuickBird, Worldview ou Pléiades. Ces satellites permettent de bénéficier de résolution submétrique (de 0,3 à 0,7m) en panchromatique et métrique (de 1 à 3m) en multispectral (Chehata, 2017). Les capteurs des satellites optiques à haute résolution ont une très haute résolution. Ils permettent de détecter les changements à une échelle plus fine et de mesurer l'impact de l'exploitation sur la dégradation forestière (Mayaux et al., 2003). Les données télédéteectées serviront à établir les cartes, les spatioctes, les plans d'information et le Model Numérique de Terrain (MNT).

Tab. 15: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à haute résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique - Québec, 2013).

	IKONOS2	QUICKBIRD2	WORLDVIEW1	WORLDVIEW2	ORBVIEW3	GEOEYE1
Pays	États - Unis	États - Unis	États - Unis	États - Unis	États - Unis	États - Unis
Année de lancement	1999	2001	2007	2009	2003	2008
Résolution spatiale	Multispectrale: 4m Panchromatique: 1m	Multispectrale: 2.5m Panchromatique: 61Cm	50 cm au nadir 59 cm à $\pm 25^\circ$ du nadir	Panchromatique 46 cm au nadir 52 cm à 20° off-nadir Multispectral 1.8 m au nadir 2.4 m à 20° off-nadir	Multispectrale: 4m Panchromatique: 1m	Multispectrale: 1.64m Panchromatique: 41Cm
Dimension de l'image	13 x 13 km Bande 13 X 1000 km	16,5 x 16,5 km Bande 16,5 X 165 km	60 x 110 km mono (max) 30 x 100 km stéréo (max)	96 x 110 km mono (max) 48 x 110 km (stéréo)	8 x 8 km	15 x 15 km Hyperspectral : 5 x 5 km
Fréquence de passage	3 jours à 1 m 1,5 jour à 1,5 m	1 à 3,5 jours	1,7 jour en moyenne	1,1 à 3,7 jours	3 jours	2,1 à 3 jours
Application	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Cartographie topographique, études bathymétriques, agriculture, cartographie de l'environnement, gestion de crise, gestion des catastrophes naturelles et gestion des côtes.	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie
Site web	http://www.geoeye.com	http://www.digitalglobe.com/	http://www.digitalglobe.com	http://www.digitalglobe.com/	http://www.geoeye.com	http://www.geoeye.com

Tab. 16: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à haute résolution (d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique- Québec, 2013) (...suite1).

	EROS A1	EROS B	CARTOSAT-1 (IRS P5)	CARTOSAT-2	FORMOSAT-2, 3 (ROCSAT-2)	KOMPSAT-2 (ARIRANG-2)
Pays	Israël	Israël	Inde	Inde	Chine	Corée du Sud
Année de lancement	2000	2006	2005	2007	2004,2007	2006
Résolution spatiale	1,8 m	70 cm	2,5 m	1 m	Multispectrale: 8m Panchromatique: 2m	Multispectrale: 4m Panchromatique: 1m
Dimension de l'image	12,6 km x 12,6 km	7 km x 7 km	30 x 30 km	9,6 x 9,6 km	24 km x 24 km	15 km x 15 km
Fréquence de passage	1,8 jour à 4 jours	1 à 3 jours	5 jours	5 jours	1 fois / jour	28 jours (nadir) 3 jours (roulis $\pm 30^\circ$)
Application	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture et cartographie	Occupation du sol, agriculture, cartographie, foresterie et suivi des désastres
Site web	http://www.spotimage.com/web/107-eros.php	http://www.spotimage.com/web/107-eros.php	http://www.isro.org/satellites/earthobservationsatellites.aspx	http://www.isro.org/satellites/earthobservationsatellites.aspx	http://www.nspo.org.tw/2008/	http://new.kari.re.kr/english/index.asp

Tab. 17: Principales caractéristiques techniques des satellites optiques à haute résolution d'après Ministère des ressources naturelles - Direction de l'information géographique (Québec), 2013) (...suite2).

	Pléiades 1A	Pléiades 1B
Pays	France	France
Année de lancement	2011	2012
Résolution spatiale	Multispectrale: 2.8 m Panchromatique: 70Cm	Multispectrale: 2.8 m Panchromatique: 70Cm
Dimension de l'image	20Km X 20Km	20Km X 20Km
Fréquence de passage	1 à 3 jours	1 à 3 jours
Application	Cartographie urbaine et en complément à la photographie aérienne	Cartographie urbaine et en complément à la photographie aérienne
Site web	http://www.astrium.eads.net/fr/programme/pleiades-satellites-observation-nouvelle-generation.html	http://www.astrium.eads.net/fr/programme/pleiades-satellites-observation-nouvelle-generation.html

Ces nouveaux capteurs satellitaires à haute résolution tendent également à améliorer la couverture spatiale et aussi la résolution temporelle des données avec des temps de revisite de plus en plus courts (tous les 1-5j) (Chehata, 2017). Les images des capteurs à Très Haute Résolution Spatiale (THRS) sont souvent onéreuses, et leur acquisition s'effectue via des demandes de programmation (Herbreteau et al., 2018).

4.8.3.1 Satellite radar "Sentinel-1"

Ce satellite a été lancé le 03/04/2014 dans le cadre d'un programme Européen Copernicus mené par la commission Européenne, il apporte une amélioration sur le plan revisite de 6 jours. Son orbite est héliosynchrone, altitude de 700 km, cycle de répétition de 12 jrs, donc 6 jrs à l'équateur. Son but c'est de fournir des informations relatives à la surveillance de l'atmosphère, de la mer, de la terre et du changement climatique. Sentinel 1, c'est une émission radar dans la bande C, il permet de surveiller les pôles, l'environnement marin (pêche illégale, glaciation, vents, courants, détection des bateaux, sécurité maritime) l'océan, la terre (mouvement des surfaces (inondation, surveillance des forêts, agriculture, etc.) et quelques déformations. Autres applications sont résumées d'après Mariama & Hakdaoui, 2013) comme suit :

- a. Surveillance de la glace de mer et de l'environnement arctique,

- b. Surveillance marine,
- c. Surveillance des risques en raison du déplacement du sol,
- d. Cartes pour organiser l'aide humanitaire dans les situations de crise.

4.8.3.2 Satellite radar Sentinel -3

Sentinel-3 ; c'est une mission globale océanique et du sol terrestre. Il est placé sur une orbite hélium-synchrone à 814.5 Km d'altitude. Sa période de révision est de 27 jours. Parmi leurs applications nous citons ce qui suivent :











- a. Couleur et température de la surface de la mer et du sol,
- b. Topographie de la surface de la mer et des glaciers,
- c. Topographie des zones côtières, des lacs et de la banquise,
- d. Cartes végétation

4.8.4. Catalogues d'images

4.8.4.1 Images à faible résolution

Les produits à faible résolution spatiale sont généralement distribués gratuitement. Il y a beaucoup de serveurs qui permettent d'accéder et télécharger des données (Mariama & Hakdaoui, 2013).

Entre les plus importants il faut souligner les suivants :

-  Giovanni (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>)
-  OceanColor (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)
-  LPDAAC (<https://lpdaac.usgs.gov/>)
-  PODAAC (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>)
-  LAADS (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)
-  USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>)
-  USGS (<http://glovis.usgs.gov/>)
-  ESA (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>)
-  GMES (<http://gmesdata.esa.int/web/gsc/home>)
-  EUMETSAT (<http://www.eumetsat.int/home/main/dataaccess/index.htm>)

Accès et téléchargement de produits marins, atmosphériques ou terrestres générés à partir des données de capteurs spatiaux :

-  OceanColor (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>)

✚ LPDAAC (<https://lpdaac.usgs.gov/>)

✚ PODAAC (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>)

✚ LAADS (<http://ladsweb.nascom.nasa.gov>)

Accès aux images de satellites, ortophotos et *LIDAR* :

✚ USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>)

4.8.4.2 Images à moyenne et à haute résolution

Les catalogues pour accéder aux images de télédétection des principaux satellites à moyenne et haute résolution sont les suivants :

Landsat

<http://glovis.usgs.gov/>

<http://earthexplorer.usgs.gov/>

Sentinel

sentinel.esa.int/web/sentinel/sentinel-data-access

Deimos

<http://www.deimos-imaging.com/extcat/>

SPOT

<http://catalog.spotimage.com/PageSearch.aspx>

Worldview, Quickbird

<https://browse.digitalglobe.com/imagefinder/>

Geoeye, Ikonos

<http://geofuse.geoeye.com/maps/Map.aspx#>


Rapideye

<http://eyefind.rapideye.de/>³


Ces catalogues permettent de sélectionner une zone géographique et visualiser les images disponibles dans le fichier. Il faut souligner que les produits de la série de satellites Landsat sont offerts de forme gratuite pour des applications non commerciales.

La plupart des serveurs présentés ici sont de la NASA. C'est parce qu'ils sont les plus accessibles et documentées. Ils disposent également d'une variété de produits qui répondent aux attentes exigées (Mariama & Hakdaoui, 2013).

En outre, il montrera l'application de bureau d'accès et le téléchargement des données stockées et traitées par l'Agence spatiale européenne (ESA)

 EOLISA (<http://earth.esa.int/EOLi/EOLi.html>)

Se montrera finalement l'outil Giovanni de la NASA qui permet de réaliser de divers types d'analyse.

 Giovanni (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>)

5. Conclusion

La géomatique (SIG + télédétection), devient actuellement une activité de recherche et de développement car elle forme un réseau de connexions entre différents domaines scientifiques et technologiques.

La télédétection offre de nombreux avantages tels que le stockage numérique des données, la répétitivité fréquente, la livraison rapide, la possibilité d'intégration dans un SIG et une mise à jour aisée de l'information. La télédétection, de par sa vision synoptique, actualisée et objective sur l'état de la surface terrestre, constitue une source d'information pertinente pour le suivi de l'agriculture à l'échelle régionale et son utilisation dans le cadre des systèmes de suivi de la sécurité alimentaire pourrait être renforcée (Leroux, 2015). La télédétection est un outil d'investigation à associer à d'autres techniques pour l'analyse de l'évolution des couverts végétaux. La télédétection est considérée comme étant un outil performant de travail utilisé souvent pour la connaissance, le contrôle, le suivi et la surveillance des milieux physiques, biotiques et abiotiques. La télédétection se couple avec les SIG d'où ils fournissent une plate-forme appropriée pour l'analyse et la mise à jour des données (Goodchild & Barbara, 2009).

