

# Chapitre I

## Une histoire captivante

---

*Oublier ses ancêtres,  
c'est être un ruisseau sans source,  
un arbre sans racines.*

**Proverbe chinois**

### 1.1. D'Aristote à Newton

Dans ses principes fondamentaux pour toute recherche scientifique, le physiologiste français Claude Bernard présentait vers le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle une vision de l'Homme qui perçoit ses limites et qui sent toujours le besoin d'inventer afin d'améliorer son niveau de connaissance. Il parle de la création d'appareils spéciaux et de divers instruments qui permettent de découvrir des caractéristiques cachées des objets. La soif de savoir et l'émerveillement des êtres humains pour des inventions de toute sorte auront fait dire à McLuhan [44], en 1971, que : « De tout temps, les êtres humains ont toujours été fascinés par une extension d'eux-mêmes faite d'un autre matériau qu'eux. » L'amplification ou l'extension artificielle de nos sens, notamment celui de la vision, aura modifié en profondeur les méthodes d'appréhension et de compréhension des objets et de leur organisation spatiale. L'histoire de la télé-détection présuppose une interaction indissociable entre l'évolution de la science (lire la physique), des techniques liées à la photographie et des modes d'acquisition à caractère électronique de signaux provenant des objets (terrestres ou non). Il faut remonter à Aristote (environ 300 av. J.-C.) pour trouver nos assises menant à la pertinence du développement et de l'utilisation de la télé-détection. En effet, ce philosophe traitait souvent d'éléments physiques tels que la nature de la lumière. Il l'a décrite comme étant une forme d'énergie qui permet de découvrir les caractéristiques de certains corps (ex : il a observé que certains objets sont transparents). Il persiste un vide d'information entre Aristote et le physicien-mathématicien égyptien al Hazin qui, au X<sup>e</sup> siècle, explique le principe de la chambre noire (*camera obscura*). Par la suite, nous devons attendre les exploits de Newton en 1666 qui, en expérimentant avec un prisme, découvre que cet objet transparent peut décomposer une source incidente lumineuse en la dispersant dans un spectre de rouge, d'orange, de jaune, de vert, de bleu, d'indigo et de violet.

## **1.2. Les premiers pas**

Le XIX<sup>e</sup> siècle marque le début d'une période beaucoup mieux documentée et les inventions et découvertes s'effectuent à un rythme accéléré. En effet, plusieurs événements dignes de mention nous permettent de mieux comprendre les origines de la télédétection :

- 1802 mise en place des concepts de base de la théorie de la couleur (théorie de Young-Von Helmholtz) ;
- 1827 première photographie du milieu naturel par le français Joseph Nicéphore Niepce (exposition de 8 heures) ;
- 1829 Niepce et Louis M. Daguerre s'associent dans leurs recherches, le premier concentre ses efforts sur l'héliographie et le second sur des dioramas (en collaboration avec le français Bouton) ;
- 1839 Daguerre invente le daguerrotype basé sur sa découverte que des vapeurs de mercure peuvent faire apparaître une image sur une plaque d'argent et que du thiosulphate de sodium permet de la fixer, la rendant ainsi permanente ; cette découverte concernant le thiosulphate de sodium vient en réalité du britannique Herschel (1819) ; Daguerre s'en est inspiré ;
- 1855 le physicien écossais James Clark Maxwell propose les assises théoriques pour la production de photographies en couleur.

## **1.3. La Terre vue du ciel**

La deuxième moitié du XIX<sup>e</sup> siècle constitue un tournant pour le développement technologique associé à la télédétection. La première photographie aérienne connue est acquise en 1859 par le Français Félix Tournachon dit Nadar à partir d'un ballon captif situé à environ 400 m d'altitude au-dessus du lieu-dit « le Petit Bicêtre » (aujourd'hui disparu), au sud de Paris. Un an plus tard, les américains S. A. King et J. W. Black réalisent le même exploit au-dessus de la ville de Boston. Il a été reconnu que le ballon fut utilisé durant la

guerre civile américaine pour l'observation du déplacement des troupes. Au point de vue civil, des vols sont aussi réalisés pour cartographier la forêt mais seulement par observation visuelle. Ce n'est qu'en 1887 que des allemands prennent pour la première fois des photographies aériennes par ballon pour des fins de cartographie forestière. Pendant ce temps, des améliorations techniques importantes se font au niveau de la photographie : Herman Vogel découvre, en 1873, une technique pour rendre des émulsions encore plus sensibles à la lumière. L'américain George Eastman invente le premier film photographique en 1889. Il remplacera ainsi progressivement la technique des plaques vitrées. En 1891, l'allemand Rahrman se voit attribuer un brevet pour son invention qui allait permettre de prendre des photographies du haut des airs. Une particularité : son système de caméra (récupérable grâce à un parachute) était fixé sur une plate-forme propulsée par un moteur-fusée.

L'arrivée du XX<sup>e</sup> siècle marque le début d'une importante révolution technologique en matière de plate-forme aéroportée. On tente des expérimentations, plus cocasses les unes que les autres. On parle de cerfs-volants, de fusées propulsées par air comprimé. Une des plus spectaculaires est certes l'utilisation du pigeon (figure 1.1). Ses capacités de voler en ligne droite sur de longues distances et d'arriver à bon port auront fait de cet oiseau une plate-forme fiable et peu coûteuse. Julius Neubronne le constate et demande, en 1903, un brevet pour des pigeons équipés d'une caméra miniature installée sous leur ventre. Cependant, la venue des avions aura tôt fait de supplanter toutes ces initiatives. Dès 1909, Wilbur Wright prend une première photographie aérienne par avion au-dessus de Centocelli, en Italie. La plate-forme moderne était inventée. Cette réalité, combinée au premier grand conflit mondial, auront provoqué une accélération dans le développement des technologies de prise de vue aérienne. Pendant ce temps, une première étape essentielle était franchie dans le domaine de la télédétection spatiale. En effet, l'allemand Alfred Maul proposait, en 1907, le concept de gyro-stabilisation pour le système proposé par Rahrman une quinzaine d'années plus tôt. En 1912, il lance avec succès une charge utile (41 kg) composée de quatre caméras. Elle s'élève jusqu'à une altitude de 790 m.



Figure 1.1. : Une « force de frappe » en télédétection au début du siècle.  
Adapté de : National Council for Geographic Education/Remote Sensing Task Force.

#### 1.4. L'acquisition systématique de l'information

Dès 1915, des caméras sont construites spécifiquement pour des prises de vues aériennes. En effet, le lieutenant colonel J. T. C. More Brabazon conçoit la première caméra aérienne pratique en collaboration avec la compagnie Thornton Pickard. Durant la guerre 1914-1918, les Forces aériennes françaises développent et impriment parfois jusqu'à 10 000 photographies par nuit (ex : plus de 56 000 en 4 jours lors de l'offensive de la Meuse-Argonne).

Après la Première Guerre mondiale, l'intérêt pour la prise d'images aériennes s'estompe. Il demeure cependant que les besoins au niveau civil, soit en géologie, foresterie, agriculture et cartographie ont quand même donné un souffle suffisamment grand pour provoquer, encore une fois, des développements technologiques et diverses réalisations dignes de mention. En voici quelques-unes par ordre chronologique :

1919 un gigantesque programme de cartographie des forêts canadiennes débute ; la conséquence directe de ce projet sera que le Canada aura une couverture complète de photographies aériennes en 1931 ; premières détections d'information en thermographie infrarouge (Hoffman) ;

- 1923 la compagnie allemande Zeiss met au point un premier stéréoscope pour la vision tridimensionnelle des photographies aériennes : rappelons que le principe était connu depuis les années 1830 et il était utilisé pour fins d'amusement avec des photographies terrestres ;
- 1924 mise au point du premier film multicouche qui mènera à la mise en marché de la marque Kodachrome en 1935 ;
- 1931 fabrication du premier film sensible au rayonnement infrarouge ;
- 1936 prise de la première photographie aérienne montrant la courbure de la Terre par le capitaine A. W. Stevens à partir d'un ballon volant à plus de 23 000 m d'altitude.

## 1.5. Le début de l'ère spatiale

La Deuxième Guerre mondiale aura favorisé aussi le développement de technologies plus sophistiquées en ce qui concerne les capteurs photographiques, les fenêtres spectrales utilisables, les instruments de visualisation ainsi que les techniques et méthodes d'interprétation de ces photographies. À titre indicatif, notons le développement des films sensibles à l'infrarouge (fausse couleur) par les américains, les allemands et les anglais, ainsi que l'utilisation de la thermographie infrarouge et des micro-ondes actives (le radar). Pour ce dernier, la Grande-Bretagne prend les devants face à l'Allemagne et les États-Unis en développant un système de détection (radar imageur aéroporté, appelé PPI : *Plan Position Indicator*) qui aura d'abord été utilisé dans le cadre des bombardements de nuit. Elle gardera cette avance jusqu'à la fin de cette guerre. Il nous faut aussi insister sur la construction d'une arme de représailles redoutable que les allemands ont utilisée entre 1944 et 1945. Il s'agit de la *Vergeltungswaffe 2*, plus connue sous le nom de V2. Elle est le précurseur des lanceurs modernes de satellites. Après cette guerre, plusieurs événements marquent le développement de la télédétection moderne :

- 1946 les américains utilisent des V2 pour prendre les premières photographies de la Terre à partir de la haute atmosphère ;

- 1954 la compagnie américaine Westinghouse développe le premier radar à ouverture latérale, le SLAR (*Side looking airborne radar*) ;
- 1956 l'américain Colwell expérimente l'infrarouge fausse couleur, réservée jusqu'alors aux militaires ; ses recherches portaient sur la végétation (reconnaissance, classification, détection de zones de stress) ; il s'est inspiré des travaux réalisés par le russe Krinov en 1947 sur la réflectance des objets naturels ;
- 1957 l'URSS lance le premier satellite artificiel : le SPOUTNIK 1, démontrant ainsi la capacité qu'a l'être humain à lancer une plate-forme dans un environnement exoatmosphérique où la gravité terrestre n'exerce que peu d'influence ; cet événement ouvre la porte à l'exploration spatiale et, *a fortiori*, à l'observation de la Terre par satellite ;
- 1959 au mois d'août, première photographie de la Terre vue de l'espace ; elle fut transmise par le satellite américain Explorer-6 ;
- 1960 les américains lancent le premier satellite météorologique en avril. Il s'agit de TIROS-1 ; ce satellite est la première plate-forme de télédétection connue destinée à des fins civiles ; cet événement marque la fin du monopole exercé par la plate-forme aéroportée pour l'acquisition d'information terrestre ;
- 1962 Zaitor et Tsuprun construisent un prototype de caméra photographique multi-bande (9 fenêtres) ; les possibilités de ce type d'imagerie étaient connues depuis la fin de la Deuxième Guerre mondiale.

La récente décision américaine de rendre publiques des photographies prises par des satellites militaires nous a fait découvrir qu'entre 1960 et 1972, les capteurs des satellites CORONA, ARGON et LANYARD ont acquis environ 800 000 photographies de la Terre. Elles ont été enregistrées dans la fenêtre du visible (panchromatique). Leur résolution spatiale était phénoménale pour l'époque. En effet, elle est passée de 8 m au début à 2 m à la fin du programme. Notons que la première photographie spatiale de l'environnement terrestre a été prise par le capteur du satellite CORONA le 18 août 1960 au-dessus du territoire soviétique. Il s'agissait évidemment d'une cible militaire.

## 1.6. Les premiers satellites d'observation de la Terre

Les années 1960 auront aussi été le théâtre de la course vers la Lune entre les américains et les russes. Cette compétition, à partir de satellites habités (Gemini, Apollo, Soyouz), aura profité grandement à la télédétection car, des deux côtés, on a développé et expérimenté des capteurs mono et multibandes menant à ceux qui sont installés dans les satellites d'observation de la Terre actuels. De plus, la « démilitarisation » du domaine des hyperfréquences par l'armée américaine au début de cette décennie ouvrait une porte. Cette porte était l'exploitation d'une fenêtre spectrale dont l'avantage de prise d'information terrestre en tout temps serait grandement exploité à partir des plates-formes tant aéroportées que satellitales. La course vers la Lune étant terminée, les années 1970 seront marquées par une première révolution dans le développement des satellites non habités. Tout en prenant conscience que les satellites météorologiques continuaient à jouer leur rôle en bénéficiant en même temps des nouvelles technologies, des étapes importantes sont franchies pour les satellites d'observation de la Terre. En voici quelques-unes :

- 1972 le 23 juillet, les américains lancent le satellite ERTS-1 (*Earth Resource Technology Satellite*) utilisant des capteurs de type RBV (*Return Beam Vidicon*) et MSS (*Multi Spectral Scanner*), ce dernier bénéficiant des expérimentations avec des caméras multibandes durant la mission Apollo-9 ; il sera le premier d'une série de trois (qui sont en réalité des versions modifiées des satellites météorologiques de type Nimbus) ; deux jours plus tard, le centre des opérations du Goddard Space Flight Center recevait la première image du satellite ;
- 1973 lancement de la première station spatiale américaine le 14 mai ; la station Skylab fut utile en télédétection par l'intermédiaire du EREP (*Earth Resource Experiment Package*) ; l'équipement comprenait des caméras mono (1) et multibandes (6), un balayeur multibande à 13 canaux, un spectroradiomètre et deux systèmes actifs d'expérimentation avec aussi des balayeurs multibandes ; les résultats ont permis de préparer notamment de nouveaux capteurs pour la deuxième génération des satellites Landsat : le capteur TM (*Thematic Mapper*) ; de plus, des expérimentations dans le domaine des micro-ondes passives et actives ont jeté les bases conceptuelles des capteurs actifs du satellite Seasat ;

- 1975 le 22 janvier, même si ERTS-1 fonctionne encore normalement et même s'il a largement dépassé son espérance de vie, les américains lancent le deuxième satellite de la série ; la NASA change l'appellation du programme ; il se nomme dorénavant Landsat (Land satellite - satellite d'observation de la Terre - pour une meilleure distinction par rapport au projet Seasat - satellite d'observation de la mer) ; le Landsat-2 utilise les mêmes capteurs que ceux montés sur Landsat-1 (ERTS-1) ; la République populaire de Chine lance en juillet le satellite Chinasat-I ; il est le premier d'une série de sept qui seront lancés jusqu'en décembre 1976 ;
- 1977 lancement en novembre de Météosat-I ; il est le premier d'une série de satellites à vocation météorologique destiné d'abord à répondre aux besoins de l'ensemble des pays européens ;
- 1978 le 5 mars, Landsat-3 est mis en orbite. On y ajoute une nouvelle fenêtre spectrale au capteur MSS ; il s'agit de celle qui capte une partie de l'énergie thermique (10,4 - 12,6  $\mu\text{m}$ ) ; il y a aussi un important changement dans les caméras RBV ; leur résolution spatiale double en précision ; le 26 avril, les américains lancent le satellite HCMM (*Heat Capacity Mapping Mission*) ; il s'agit d'un petit satellite plus spécialisé et moins dispendieux que les autres plateformes telles que le Landsat ; sa tâche principale est d'expérimenter le concept d'inertie thermique (apparente) afin d'aider à une meilleure discrimination entre les différentes surfaces ; il était le premier d'une série appelée AEM (*Application Explorer Missions*) que la NASA planifiait de lancer ; ce projet n'eut pas de suite ; deux mois plus tard, soit le 26 juin, un autre satellite spécialisé était lancé aux États-Unis, soit la plate-forme Seasat ; il devait être le premier d'une série de satellites d'observation destinée à la recherche océanographique ; le 10 octobre, un court circuit majeur dans le système électrique le rendait inutilisable ; cette année-là est marquée enfin par le lancement de Nimbus-7 ayant à son bord le capteur CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*) ainsi que le SMRR (*Scanning Multichannel Microwave Radiometer*) et de TIROS-N qui était la première plate-forme satellitale équipée du capteur AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*) ;

- 1979 l'Inde entre dans la course en lançant le satellite Bhaskara-1 le 7 juin ; il est destiné à l'observation de la Terre par un système de caméras de télévision et à l'observation océanique par des radiomètres fonctionnant dans les micro-ondes.

## 1.7. Une évolution nécessaire

La fin des années 1970 et surtout le début des années 1980 sont marqués, non seulement par l'arrivée de la seconde génération des satellites américains Landsat, mais aussi par celle de compétiteurs provenant de divers pays (France, Japon, Inde, URSS). Une nouvelle course s'inscrit dans le temps. Elle a comme finalité de proposer la plate-forme la plus performante en matière d'application et de fiabilité. Parallèlement à cela, on assiste à la privatisation des agences de développement et de distribution des produits de télédétection. Des entreprises telles que SPOTImage et EOSAT voient le jour. L'expression « plate-forme opérationnelle » est de plus en plus présente dans le langage des « décideurs ». Les préoccupations grandissantes au sujet de l'environnement engendrent une nouvelle perception du monde. Le vocabulaire s'enrichit d'expressions telles que le « suivi environnemental » et la « protection de l'environnement ». Une nouvelle échelle de travail s'ajoute à celles déjà existantes : celle de la Planète. Cette décennie aura donc été une phase cruciale dans le développement et l'expansion de l'utilisation des données de télédétection. Voici quelques étapes importantes à retenir :

- 1981 le 12 novembre, lancement d'une navette spatiale américaine ayant à son bord le système radar SIR-A (*Shuttle Imaging Radar*) ; les images acquises par bandes de 50 km de côté couvrent une superficie totale d'environ 10 millions de km<sup>2</sup> ; le 20 novembre, l'Inde poursuit sa mission en télédétection en lançant le satellite Bhaskara-2 ;
- 1982 lancement du satellite américain Landsat-4 le 16 juillet ; il s'agit du premier satellite de la seconde génération des Landsat ; un nouveau capteur est ajouté au MSS déjà existant sur les plates-formes antérieures ; il s'agit du Thematic Mapper (TM) ; il contient une amélioration notable au niveau de la résolution spatiale et spectrale ; des problèmes techniques majeurs ont engendré une perte

- importante de son potentiel d'utilisation sur une base opérationnelle moins de deux ans après son lancement ;
- 1984 suite aux difficultés techniques rencontrées avec Landsat-4, le satellite identique qui devait prendre la relève, le Landsat-5, est lancé plus tôt que prévu soit le 1<sup>er</sup> mars ; poursuite des expérimentations du radar à partir d'une navette spatiale ; lors du vol d'octobre, le système SIR-B est utilisé ; il possède une antenne qui permet de faire varier l'angle de dépression lors de l'acquisition des données ;
- 1985 privatisation de la distribution des données de Landsat ; un premier contrat à caractère commercial est donné à la firme EOSAT ;
- 1986 lancement le 21 février du satellite européen SPOT-1. Ainsi, les satellites américains d'observation de la Terre ne sont plus seuls dans l'espace ; ce satellite est géré par une entreprise privée française ; il s'agit de SPOT Image ;
- 1987 le Japon réplique à la compétition internationale en lançant le 19 février le satellite MOS-1A ; il est surtout destiné à l'observation maritime ; l'URSS expérimente un radar sur la plate-forme Cosmos-1870 ; elle est le prototype du satellite Almaz-1 ;
- 1988 l'Inde poursuit sa progression dans le domaine des plates-formes opérationnelles en lançant le 17 mars, le satellite IRS-1A.

## **1.8. La sagesse, la compétition et la haute résolution**

La dernière décennie de notre siècle aura débuté sous le signe de l'évolution technologique, de la polyvalence et de la confirmation que le marché de la télédétection est ouvert à l'échelle du globe. En effet, plusieurs pays participent à l'avancement de la recherche et du développement en télédétection. La privatisation se poursuit. Les années 1990 sont témoins de l'arrivée d'une troisième génération de satellites. Nous parlons maintenant, d'une part, de capteurs multibandes avec un nombre de bandes qui se compte dans l'ordre de la centaine (capteurs hyperspectraux) et, d'autre part, d'une résolution spatiale qui voisine le mètre en panchromatique. Ils proviennent en partie du fait que certains satellites militaires ont vu leur vocation première changer. On parle de démili-

tarisation de quelques plates-formes, tant du côté américain que du côté russe. Nous sommes aussi témoins d'un changement de philosophie dans l'utilisation de la télédétection pour l'observation de la Terre. Elle devient une source de données parmi d'autres et c'est dans cet esprit que l'on perçoit une remontée de sa « popularité ». La poursuite de l'évolution est marquée par les événements suivants :

- 1990 le 7 juillet, lancement du satellite japonais MOS-1B ; lancement du satellite SPOT-2 le 22 juillet ;
- 1991 le 31 mars est marqué par la mise en orbite du satellite russe Almaz-1 ; il s'agit du premier satellite radar à être utilisé à des fins commerciales ; il ouvre une nouvelle ère en matière de télédétection opérationnelle à cause de sa capacité à acquérir des informations sous n'importe quelle condition climatique, le jour ou la nuit, le tout avec une haute résolution spatiale (10-15 m) ; la réplique européenne ne se fait pas attendre ; en effet, ERS-1 est lancé le 16 juillet ; comme Almaz-1, il opère dans le domaine des hyperfréquences actives (radar) ;
- 1992 le Japon réussit à mettre sur orbite le satellite JERS-1 le 11 février ; un problème technique lié à son antenne fait en sorte qu'il ne peut cependant utiliser qu'une partie de son énergie ; les États-Unis et la France joignent leurs efforts dans le projet TOPEX-POSÉIDON et lancent le 10 août une plate-forme destinée à prendre des mesures topographiques sur les surfaces océaniques ;
- 1993 le 26 novembre 1993, SPOT-3 est mis en orbite ; victime d'une panne majeure, il ne fonctionnera que jusqu'au 14 novembre 1996 ; suite à cette panne, SPOT-1 sera remis en service avec succès ;
- 1994 une navette spatiale américaine effectue 2 vols (9 avril et 30 septembre) avec un appareil radar à bord, le SIR-C ; il s'agit de la troisième expérience avec ce type de capteur depuis 1981 ; lancement du satellite américain Landsat-6 le 5 octobre ; un problème technique majeur aura empêché le satellite d'atteindre l'orbite souhaitée ; il s'est probablement abîmé en mer ;
- 1995 les images provenant de satellites à vocation militaire sont mises à la disposition du monde civil (séries CORONA, ARGON, LANYARD pour les États-Unis et les

- caméras KFA/KVR pour les russes) ; lancement du satellite européen ERS-2 le 20 avril ; le 4 novembre, le Canada lance son premier satellite de télédétection : RADARSAT-1 ; l'Inde poursuit son implication dans les satellites d'observation de la Terre en lançant IRS-1C le 28 décembre ;
- 1996 le 17 août 1996, le Japon lance ADEOS-I ; il s'agit d'un satellite polyvalent qui possède pas moins de 8 types de capteurs différents destinés à l'étude de l'eau, de la Terre et de l'atmosphère ; un problème technique provoquera une fin d'opération précoce le 30 juin 1997 ;
- 1997 le 22 août, le satellite américain TRW-Lewis est placé en orbite ; il a une vocation commerciale et possède des capteurs à très haute résolution spatiale et spectrale ; quatre jours plus tard, un problème technique donne au vaisseau un mouvement de rotation non souhaité ; ne pouvant être contrôlé, il se désintègre lors de son entrée dans l'atmosphère le matin du 28 septembre ; lancement d'un second satellite commercial à très haute résolution ; ce satellite américain se nomme Early Bird ; il a été lancé le 24 décembre grâce à la fusée porteuse russe SS20/SS25 à partir du cosmodrome de Svobodny, en Russie ; bien qu'il ait été mis en orbite, la station de contrôle a perdu le contact avec cette plate-forme le 28 décembre ; elle est devenue inutilisable ; lancement du satellite indien IRS-1D le 25 septembre ;
- 1998 lancement réussi de SPOT-4 le 24 mars (heure de Paris) depuis la base de Kourou, en Guyane. Deux nouveaux types d'instruments sont disponibles : il s'agit du HRVIR, dérivé du HRV avec l'ajout d'une bande dans le moyen infrarouge, et de la charge utile VÉGÉTATION qui est composée notamment de 4 caméras pouvant enregistrer dans les mêmes fenêtres spectrales que celles du HRVIR mais, avec une très large prise de vue (2 250 km) et une résolution spatiale de 1,165 km de côté.

Durant ces décennies de développement, des pays tels que l'ex-URSS et la Chine ont construit et exploité pour des fins, d'abord militaires, des satellites de télédétection. Malheureusement, nous n'avons que peu de détails à ce sujet

à l'exception de certains de l'ancienne l'URSS qui, à cause de son histoire récente, a rendu accessibles des données provenant de différentes plates-formes. Depuis le milieu des années 1970, des projets tels que Meteor, Cosmos (Okean), Resurs pour l'ex-URSS et Dong Fang Hong pour la Chine ont marqué leur histoire.

Aujourd'hui, le développement s'oriente vers l'amélioration des capteurs en matière de finesse (spatiale, spectrale, temporelle), de polyvalence et de longévité. Nous verrons en détails dans le chapitre 4 comment les nouvelles technologies permettent et permettront aux développeurs de proposer des équipements qui sont performants dans ce sens.



## Chapitre 2

# La télédétection : les assises

---

*Heureux celui qui a pu  
pénétrer les causes secrètes  
des choses.*

*Traduction d'un proverbe latin*

### 2.1. Sur la perception de l'image

En télédétection, la perception de l'**image** a son assise dans le fait que chaque objet (unité spatiale) a une signature qui lui est propre (unité spectrale). Sa **signature spectrale** est basée sur la luminance. La reconnaissance des objets par la **teinte** est on ne peut plus naturelle. En effet, cent ans de recherche en psychophysique et en neurobiologie ont démontré que les habiletés du système visuel humain sont souvent innées (reconnaissance des contrastes entre la luminance des objets).

Cependant, d'autres habiletés doivent être apprises (la **forme** des objets). En effet, selon Spelke [63] le cerveau doit se créer un dictionnaire visuel. En somme, l'efficacité de la perception visuelle est fonction, non seulement de la luminance des objets, mais aussi de la qualité de l'apprentissage que l'on acquiert avec le temps.

Il semble que l'être humain utilise toujours le même mécanisme pour percevoir l'organisation des objets, quelle que soit la période de sa vie. C'est peut-être pourquoi nous avons tant de difficultés à reconnaître les objets terrestres lorsque nous n'utilisons que leur luminance (lire **signature spectrale**), comme critère de reconnaissance en télédétection.

D'autres critères d'identification tels que la **forme**, la **taille**, la **texture** et l'**arrangement** deviennent des éléments de première importance. Selon des études sur la perception visuelle, le cerveau n'a besoin de « savoir » que ce qui se passe en périphérie, sur la bordure des objets, et que le contenu lui est secondaire. Nous verrons plus loin comment l'œil humain, par l'intermédiaire de ses cellules sensibles, réussit à connaître et à reconnaître les caractéristiques des objets.

Le géographe photo-interprète canadien Hugues Gagnon [29] reconnaissait d'emblée que l'identification et le rôle d'un objet par rapport à son environnement étaient identifiés par l'être humain à partir d'un processus mental complet. Pour lui, la suite logique des opérations se présente ainsi :

- 1) détection ;
- 2) identification ;
- 3) analyse (interprétation) ;
- 4) déduction ;
- 5) classification.

La finesse de la **résolution** (spatiale) de l'**image**, jumelée avec les caractéristiques des objets sont des éléments utilisés dans l'étape de l'identification. La stéréoscopie et l'effet d'ombrage peuvent contribuer à une identification de qualité quoique ce dernier peut aussi parfois masquer des objets. Estes *et al.* [27] proposent de prioriser les critères. Sur le tableau 2.1, nous présentons une synthèse sur le processus d'analyse d'image, peu importe qu'elle soit au départ analogique ou numérique.

Tableau 2.1. : Niveau de complexité des caractéristiques qui aident à l'identification des objets.

PARTICULARITÉS	CARACTÉRISTIQUES	COMPLEXITÉ
ÉLÉMENTS FONDAMENTAUX	Résolution spatiale, teinte/couleur	Faible
ARRANGEMENT SPATIAL	Forme, taille, texture	Moyenne
DES TEINTES	Arrangement, hauteur, ombre	Élevée
	Site, résolution, lien	Très élevée

Adapté de Estes *et al.* [27].

Une **image** n'a de sens que dans la perspective où cet ensemble d'informations complexes peut être perçu comme un tout cohérent à partir de différents systèmes de perception. En effet, c'est par l'établissement de liens entre la **forme**, la taille, la **texture**, la couleur et l'**arrangement** des objets qui la composent que nous pourrions comprendre ce que l'on voit.

Pour ce qui est de la **photographie** aérienne conventionnelle, l'expérience acquise avec les années et l'amélioration générale dans la connaissance des objets à analyser ont fait en sorte qu'elle est devenue et qu'elle demeure un outil très précieux. Encore aujourd'hui, plusieurs hésitent avant de se lancer dans l'aventure du numérique, estimant que la **photographie** conventionnelle possède encore un rapport qualité/prix très intéressant en fonction de leurs besoins. Il n'en demeure pas moins que les systèmes d'acquisitions d'**images** non-photographiques comportent des avantages indéniables :

- ils peuvent enregistrer des informations dans des **fenêtres spectrales** qui dépassent nettement les possibilités des systèmes photographiques afin de trouver de nouvelles caractéristiques particulières des objets ;
- ils peuvent décomposer les domaines spectraux détectables par **photographie** en une série de **bandes spectrales** fines afin de mieux distinguer certaines caractéristiques des objets ;
- ils possèdent une **dynamique spectrale plus grande** en ce sens qu'un **capteur** peut détecter simultanément l'énergie émise ou réfléchié dans plusieurs fenêtres à la fois, procurant ainsi à l'interprète un maximum d'information pour une interprétation plus objective ;
- ils peuvent informer en temps réel les utilisateurs d'**images** afin de pouvoir prendre des décisions rapides lorsque requises ;
- certains systèmes fournissent une **résolution** temporelle stable (satellites), facilitant ainsi le suivi de phénomènes dynamiques.

La perception des objets dans des fenêtres autres que celles du visible constitue un défi en matière d'identification et d'interprétation. En effet, une **image** acquise dans l'infrarouge thermique n'a absolument pas la même clé d'identification que celle prise dans le visible. Les possibilités de créer des **composés couleur** (sur écran ou sur papier) complexifient encore plus l'identification et l'interprétation. L'être humain est habitué à percevoir les objets dans leurs couleurs « naturelles ». Là, c'est bien connu, la couleur devient un avantage.

Cependant, la combinaison de trois bandes spectrales provenant de fenêtres différentes ou même des fenêtres du visible, mais non ordonnée d'une façon naturelle, engendre une perception visuelle qui porte à confusion parce que les objets n'ont pas leur couleur habituelle. L'**image** résulte cependant de règles bien connues. Nous parlons ici des couleurs de base et de leurs combinaisons pour obtenir d'autres couleurs. Sur le tableau 2.2, nous présentons ces principales combinaisons.

*Tableau 2.2. : Les couleurs.*

COULEURS DE BASE	COMBINAISONS
MAGENTA	Magenta + Jaune = Rouge (1)
	Jaune + Cyan = Vert (1)
JAUNE	Magenta + Cyan = Bleu (1)
	Magenta + Jaune + Cyan = Noir (1)
CYAN	Rouge + Vert + Bleu = Blanc (2)
	Rouge + Bleu = Magenta (2)
	Rouge + Vert = Jaune (2)
	Bleu + Vert = Cyan (2)

Notons que les couleurs intermédiaires sont obtenues soit par une modification du niveau d'absorption des filtres utilisés (1), soit par une variation de l'intensité des faisceaux lumineux (2).

Les clés d'interprétation impliquant la couleur deviennent plus complexes et la perception du message visuel beaucoup plus difficile lorsque nous n'associons pas, dans les canaux respectifs, les couleurs qui leur sont naturelles, soit bleu dans le bleu, vert dans le vert et rouge dans le rouge. En conséquence, l'interprétation risque de comporter plus d'erreurs que dans le cas d'une photo-interprétation conventionnelle. Pour parer à ce problème, certains chercheurs ont constaté que la perception colorée des objets est étroitement liée à la percep-

tion des **formes**, des contours et des contrastes. Face à ces constats, on a développé des outils visant à compartimenter l'espace spectral et à créer une vision synthétique des objets qui composent le paysage. En fait, on tente de créer des **arrangements** identifiables par l'œil humain.

La perception de l'**image** est devenue complexe car on ajoute au processus menant à l'interprétation des caractéristiques d'objets qui ne sont pas détectables par nos sens comme la vue. De plus, nous utilisons des outils sophistiqués qui sont composés d'éléments parfois rébarbatifs pour un utilisateur. Il existe cependant une complémentarité indéniable entre la perception visuelle souvent appelée analogique et les outils numériques. Lillesand et Kiefer [39] synthétisent bien cette assertion lorsqu'ils mentionnent que, jusqu'à un certain point, les humains sont limités dans leurs habilités à interpréter des signatures spectrales. Les ordinateurs sont à leur tour limités dans l'interprétation d'organisations spatiales. En conséquence, les techniques visuelles et numériques sont complémentaires et il faut réfléchir à une approche ou à une combinaison d'approches que nous devons préconiser pour un type particulier d'application.

Dans un autre ordre d'idées, la perception de l'**image** est fortement influencée par l'**échelle** spatiale à laquelle nous désirons obtenir des informations terrestres. En télédétection numérique, le terme **échelle** est intimement lié au concept de la **résolution** spatiale. Par analogie au grain d'une **photographie** aérienne, plus le **pixel** est petit, plus l'image sera informative du réel perceptible par l'œil humain. Une modification dans la résolution spatiale engendre inévitablement un changement dans la finesse de l'information obtenue.

Cette **résolution** est déterminée par la technologie des **capteurs** ou par les possibilités d'amalgame ou de duplication de **pixels** à l'aide de logiciels appropriés. Plus elle augmente, plus elle banalise les détails et, *a fortiori*, plus elle présente les grands ensembles d'un territoire donné. Le contraire permet d'examiner les constituantes du territoire dans leurs moindres détails, surtout si l'on tient compte de l'arrivée d'une nouvelle génération de capteurs. Selon Bonn [10], la résolution spatiale fine promise par les promoteurs des nouveaux

satellites entraîne des inconvénients (déjà perceptibles lors de la mise en opération de SPOT-1 et de Landsat-4). Notons d'abord l'augmentation effarante de la quantité de données qui engendre des problèmes de stockage et de traitement. Par exemple, lorsque l'on double la finesse de la **résolution** spatiale, nous obtenons quatre fois plus d'informations. Cette multiplication a pour conséquence de limiter la superficie couverte par une **image**. À titre indicatif, le futur satellite américain QuickBird ne couvrira qu'un secteur de 22 km de côté. En mode **panchromatique** (avec une **résolution** spatiale de 0.82 m), une image non compressée aura une taille de 1 gigaoctet ! Cette nouvelle réalité remet sérieusement en question les méthodes de traitement et de classification développées pour des images ayant des résolutions spatiales beaucoup plus grossières (ex : les données du **capteur** MSS de Landsat). Mais, par contre, les progrès fulgurants de l'informatique permettent de suivre cette évolution et de poursuivre la recherche.

Pour l'**échelle** temporelle, nous devons en tenir compte lorsque l'**image** représente un processus dynamique provoqué par des activités humaines (déforestation) ou des phénomènes naturels (éruption volcanique). Pour des satellites sans **capteur** à géométrie variable, il est logique de penser que, plus l'image acquise est petite, moins souvent le satellite pourra repasser sur le même site. Les développements récents nous montrent cependant que les fabricants développent de plus en plus de **capteurs** à géométrie variable. Grâce à cette technologie, il devient possible d'améliorer la **résolution** temporelle ou, en d'autres mots, la fréquence de prise d'information.

Même si la connaissance de la vision humaine est bien développée, il n'en demeure pas moins que l'un de ses aspects est peu compris. Il s'agit de l'esthétique. Il est d'une importance capitale en télédétection. En effet, devant une **image** subjectivement plus plaisante à regarder, on est tenté d'en savoir plus long sur son contenu bref, de l'interpréter. Si nous sommes attirés par l'**image**, cela signifie que l'agencement des **teintes** (couleurs) et des **formes** crée des stimuli agréables. Pour les couleurs, l'être humain préfère par ordre, décrois-

sant, le bleu, le rouge, le vert, le violet, l'orange et le jaune. Il faut qu'elles soient bien harmonisées (jaune et vert, violet et rouge, jaune et bleu, par exemple). À ce moment, la télédétection devient un art. Il faut savoir bien utiliser les connaissances et les techniques de rehaussement mises à notre disposition par l'intermédiaire de logiciels sophistiqués (mais souvent conviviaux).

## 2.2. Sur la définition de l'outil

La définition la plus élémentaire de la télédétection se confine au processus nécessaire pour obtenir de l'information sur des objets et ce, sans être en contact physique avec eux.

À ce titre, l'œil est peut-être notre plus vieil outil servant à la télédétection. Il est cependant subordonné par le cerveau : instrument ultime à l'appréhension, au traitement, à la classification, à l'analyse et à l'interprétation des messages visuels que notre système optique véhicule. Avec le temps, la technologie aura permis de développer des outils qui sont en quelque sorte un prolongement, un raffinement, voire parfois un remplacement d'un de nos sens vitaux par des artifices dont l'efficacité suscite encore aujourd'hui l'étonnement. On se rappellera toujours de la première fois que l'on a regardé une **image** acquise par télédétection. C'est la découverte d'un monde qui nous échappait jusqu'à maintenant. L'extension de nos sens s'avère être une nécessité.

L'interaction entre l'œil et le cerveau implique évidemment un niveau de connaissances suffisamment cohérent pour pouvoir comprendre le message reçu. Notons d'abord le pourquoi des choses. Si l'être humain peut enregistrer des données visuelles, c'est parce que la télédétection a des assises qui relèvent de la physique (énergie, **longueur d'onde**, **rayonnement électromagnétique**, etc). C'est pourquoi certains auteurs ont poussé la définition de la télédétection jusqu'à la frontière de la science alors que c'est un outil. La logique et la méthode qu'elle apporte ne sont pas suffisantes. En effet, la base de la connaissance contient aussi de l'intuition, de l'imagination et de la mémoire. Il devient donc hasardeux de commencer une définition par : c'est une science... Elle

n'est pas non plus nécessairement un art, quoi qu'il faille avoir en soi des qualités artistiques pour réussir à faire ressortir l'essentiel d'un message qui est souvent perdu dans un univers de pixels. Devant cet imbroglio, comment doit-on réagir ? Faut-il proposer une définition où science et art sont implicites ? D'un point de vue pratique, nous nous risquons sur une définition à caractère appliquée :

***La télédétection est une série de méthodes et de techniques nécessaires à la saisie, au traitement et à l'interprétation d'objets à la surface terrestre et ce, sans être en contact physique avec eux.***

Pour nous, il s'agit d'un outil qui nous permet d'obtenir d'abord des **images** de la Terre. Nous ne pouvons cependant exclure aujourd'hui les autres planètes du système solaire. La compréhension du message visuel et l'analyse des signatures qui les composent relèvent d'un mélange d'éléments à caractères empirique et rationnel, ce qui nous fait penser que, ce n'est qu'à cette étape que nous pouvons introduire dans la démarche de la connaissance les termes science et art.

La télédétection nous aide à obtenir une vision de la surface de la Terre d'un point de vue nouveau, caractérisé par un champ de vision, un angle de vue et une optique spectrale inhabituels pour les observateurs. Elle dispense des **images** qui permettent une telle variété d'**échelles** de travail que l'on peut mieux saisir dans son entité un phénomène, une organisation ou une structure.

### **2.3. Sur la place de la télédétection au sein des données multisources**

Dans le cadre de la planification (incluant l'inventaire et la mise à jour) et de la surveillance du territoire, des chercheurs tels que Star et Estes [64] ou Lillesand et Kiefer [39] n'hésitent pas à affirmer que la télédétection et les **systèmes d'information géographique (SIG)** sont devenus avec le temps les pivots de l'information et de l'analyse de notre biosphère. De toutes les sources de données disponibles, la télédétection constitue à plusieurs égards un apport essentiel aux **SIG**.

Cette vision des choses n'est cependant pas partagée par tous. En effet, certains ne perçoivent pas encore aujourd'hui les avantages d'utiliser les données de télédétection à l'intérieur d'un système d'information multisource. Parfois, on est plutôt négatif à son égard, notamment chez certains cartographes, pour des raisons telles que le type de données (matriciel), la faiblesse de sa **résolution** spatiale, son coût, son caractère relativement expérimental, la nécessité de traiter les données avant de pouvoir arriver à en extraire un produit de sortie utile et la difficulté d'obtenir les données en temps réel. Présenter ce genre d'arguments est bien mal connaître la télédétection d'aujourd'hui et de demain. La technologie aura poussé ses limites tellement loin qu'une partie des problèmes énumérés précédemment ne sera plus bientôt qu'un vague souvenir. Il n'en reste pas moins que les arguments économiques (coût/rentabilité) restent à être démontrés dans bien des cas.

Il faut encore faciliter l'accessibilité aux données et aux logiciels de traitements conviviaux. Dans ce cas, de grands pas ont été faits dans la bonne direction. En effet, plusieurs **images** ainsi que des logiciels de traitement d'images sont disponibles gratuitement sur le réseau Internet.

Les actions récentes de la part des gouvernements et des entreprises privées confirment la pertinence de la télédétection comme source de données. En effet, nous assistons à la mise en place d'une nouvelle génération de satellites ayant des **capteurs** à haute **résolution** spatiale (comparable à celle des **photographies** aériennes), spectrale, radiométrique et temporelle. Les logiciels deviennent de plus en plus conviviaux et l'intégration de données de type matriciel (ex : données de télédétection) est devenue chose courante dans les logiciels de **SIG**. Bien qu'elle soit une source de données consistantes, la télédétection a souvent besoin de **données auxiliaires** afin d'arriver à proposer des informations fiables et utilisables.

Par exemple son utilisation devient incontournable lorsque nous tentons de saisir le concept de région ou d'unité spatiale. Elle représente le réel (**visible** et invisible) mieux que la carte, celle-ci étant une représentation mathématique et synthétique d'un territoire. Une combinaison en couleurs d'images acquises par

télédétection, calée sur un **modèle numérique d'altitude (MNA)** en vision tridimensionnelle, devient un document nécessaire, voire essentiel, pour saisir une unité spatiale ainsi que son contenu.

La télédétection est unique en son genre en ce sens qu'elle peut être utilisée pour recueillir des informations non directement détectables par d'autres moyens techniques. La statistique, les **SIG** et la cartographie ont besoin de données existantes préalables. Elles proviennent la plupart du temps d'une collection d'informations *in situ*. Dans la perspective de gestion du territoire, la télédétection est une des seules sources d'information qui permet d'emmagasiner sur une base temporelle régulière diverses caractéristiques des objets. Comme nous le savons maintenant, elle détecte notamment ce qui est invisible à l'œil humain. En conséquence, la télédétection permet d'enregistrer de nouvelles caractéristiques de la Terre et de ses composantes. Elles peuvent aussi être traitées et classifiées afin d'alimenter des bases de données multisources utilisables dans un **SIG**. Selon Star et Estes [64], plusieurs modèles qui nécessitent des données spatiales ne peuvent aujourd'hui fonctionner sans l'apport de la télédétection. Retenons par exemple les prévisions météorologiques, la désertification et le suivi des grands courants marins.

Par ses possibilités en matière de répétitivité, les données de télédétection deviennent une source privilégiée pour la mise à jour de documents divers, qu'ils soient numériques ou analogiques. De plus, la diversité des **plates-formes** disponibles fait en sorte qu'il est possible maintenant d'obtenir des informations utiles de l'**échelle** locale à l'**échelle** planétaire et ce, sous n'importe quelle condition climatique. Ainsi, la télédétection devient une source précieuse de renseignements tant dans la planification et l'aménagement du territoire que dans l'appréhension et l'analyse d'événements à caractère environnemental ayant des impacts à l'**échelle** du globe, comme des événements récurrents tels le phénomène El Niño ou les éruptions volcaniques.

Les données numériques de télédétection ont comme avantage technique majeur de pouvoir se **géoréférencer** avec d'autres données numériques afin qu'elles soient géographiquement superposables à d'autres documents et ce,

avec grande précision. De plus, elles offrent des possibilités non négligeables en planimétrie car il devient facile de mesurer des éléments linéaires ou de calculer des surfaces lorsque nous connaissons la dimension d'un **pixel**.

En somme, l'intégration des données de télédétection dans un **SIG** constitue un amalgame d'informations avantageux pour plusieurs utilisateurs.

## 2.4. Sur les assises scientifiques

### 2.4.1. L'énergie

Bien que la télédétection ne soit d'abord et avant tout qu'une série d'outils utilisés pour détecter à distance et identifier les objets, il n'en demeure pas moins qu'elle sert à capter des caractéristiques de ces objets qui, elles, nécessitent une connaissance scientifique de base. Ces connaissances, relevant en grande partie de la physique, vont de la simple définition de l'énergie à son interaction avec la matière.

Rappelons-nous d'abord que tout corps ayant une température supérieure à 0 K (-273,15 °C) émet de l'énergie et ce, dans toutes les directions sous diverses longueurs d'onde. Cette énergie radiante est émise selon la loi de Stefan-Boltzmann. La quantité est déterminée par la température du corps de la façon suivante :

$$M = \sigma T^4$$

où M = énergie émise par une surface ( $\text{Wm}^{-2}$ )

$\sigma$  = constante de *Stefan-Boltzmann*

$$(5,6697 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4})$$

T = température absolue de la surface

Cette équation n'est valable que pour une surface qui se comporte comme un corps noir c'est-à-dire un radiateur parfait qui absorbe et qui réémet toute l'énergie incidente.

**En réalité, un corps noir est une image théorique. Tous les objets terrestres se comportent comme des corps gris du fait qu'ils ne réémettent pas totalement l'énergie absorbée.**

Mathématiquement, la loi de Stefan-Boltzmann devient alors :

$$M = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{où} \quad \epsilon = \text{émissivité du corps gris}$$

L'émissivité correspond au rapport entre l'énergie émise par une surface à une température donnée et l'énergie émise par un corps noir à la même température. Cette valeur (sans unité) peut varier de 0 à 1. À titre indicatif, une surface d'aluminium polie a une émissivité de 0,06 tandis que l'eau pure a une valeur de 0,98. Retenons de cette loi que, plus l'objet est chaud, plus il émet de l'énergie.

À partir du moment où un corps émet de l'énergie, il obéit aussi à des lois naturelles.

**Pour la télédétection, il nous faut savoir d'abord que la radiation électromagnétique est une forme dynamique d'énergie qui ne se manifeste que dans son interaction avec la matière (base de la théorie électromagnétique du physicien écossais Maxwell).**

L'énergie est véhiculée par des ondes composées de deux vecteurs dont la direction de l'un est à la normale de l'autre. Le vecteur vertical représente le champ électrique et le vecteur horizontal, le champ magnétique. La figure 2.1 illustre une onde simple.

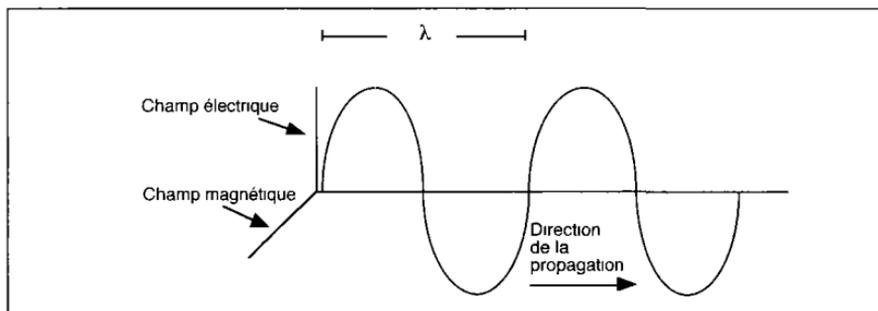


Figure 2.1.: L'onde simple.

À partir de cette figure, nous constatons que l'énergie électromagnétique voyage d'une façon harmonique et sinusoïdale, et ce, à la vitesse de la lumière. La fréquence (cycle/seconde) est liée à la **longueur d'onde** selon la loi générale de physique suivante :

$$c = \nu \lambda \quad \text{où} \quad \begin{aligned} c &= \text{vitesse de la lumière} \\ \nu &= \text{fréquence} \\ \lambda &= \text{longueur d'onde} \end{aligned}$$

Il est intéressant de constater que, plus la **longueur d'onde** est courte, plus la fréquence est élevée. De plus, la quantité d'énergie véhiculée est directement proportionnelle à la fréquence et donc inversement proportionnelle à la **longueur d'onde**.

***De ces constatations basées sur les recherches de Planck, il importe de se rappeler que plus la longueur d'onde est grande, moins elle véhicule de l'énergie.***

Pour les objets terrestres, la source principale d'énergie est le Soleil. C'est à partir de ce corps céleste que nous poursuivrons l'apprentissage des bases physiques essentielles à la compréhension du signal reçu par télédétection. Le Soleil émet de l'énergie qui entre en contact avec la matière.

Son rayonnement incident est absorbé, réfléchi et transmis selon le premier principe de la thermodynamique qui s'exprime de la façon suivante :

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad \text{où} \quad \begin{aligned} \alpha &= \text{rayonnement absorbé} \\ \rho &= \text{rayonnement réfléchi} \\ \tau &= \text{rayonnement transmis} \\ \lambda &= \text{longueur d'onde} \end{aligned}$$

La loi de Kirchoff-Draper spécifie que l'émissivité spectrale d'un objet est égale à son absorptance. En conséquence, l'équation précédente devient :

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad \text{où} \quad \varepsilon = \text{émissivité}$$

Selon Lillesand et Kiefer [39], pour la plupart des applications en télédétection, on assume que les objets étudiés sont opaques à la radiation thermique. En conséquence, nous pouvons écrire :

$$\varepsilon(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$$

Les différents types d'énergie transportés par les ondes électromagnétiques peuvent être représentés sous forme d'un spectre, au même titre que la division de l'énergie d'une source lumineuse lorsqu'elle passe à travers un prisme. Dans la nature, l'énergie en présence dépasse nettement les ondes lumineuses. La figure 2.2 illustre la répartition des types d'énergie en fonction des longueurs d'onde.

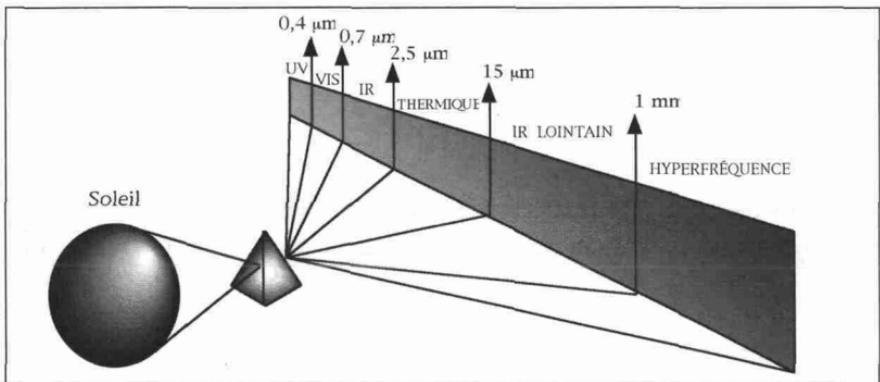


Figure 2.2. : Un spectre électromagnétique simplifié.

Sur cette figure, il est intéressant de noter qu'il existe plusieurs bandes spectrales utilisées en télédétection. Elles vont de l'ultraviolet aux hyperfréquences. Nous verrons plus loin comment l'atmosphère terrestre intervient au niveau de l'absorption et de la transmission de l'énergie incidente du soleil.

La loi de *Stefan-Boltzmann* nous indique que la quantité d'énergie émise par un corps varie en fonction de sa température. Il faut aussi mentionner que cette énergie n'est pas répartie de façon égale dans tout le spectre électromagnétique.

La loi de Planck détermine la distribution de l'émittance spectrale d'un corps noir en fonction de sa température. Elle peut s'écrire de la façon suivante :

$$M_{\lambda} = \frac{2hc^2\lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{hc}{k\lambda T}\right) - 1}$$

où  $M_{\lambda}$  = énergie émise ( $\text{Wm}^{-2}\text{m}^{-1}$ ) en fonction de  $\lambda$

$h$  = constante de Planck ( $6,62 \times 10^{-34}$  Js)

$c$  = vitesse de la lumière ( $2,998 \times 10^8$  ms<sup>-1</sup>)

$\lambda$  = longueur d'onde (m)

$k$  = constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>)

$T$  = température absolue (K).

Il est possible d'en dériver la **longueur d'onde** où un corps noir émet un maximum d'énergie par la loi de Wien. Mathématiquement, elle s'exprime ainsi :

$$\lambda_m = A/T$$

où  $\lambda_m$  = longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )

$A$  = constante ( $2898 \mu\text{m K}$ )

$T$  = température (K)

Par cette loi, le Soleil, lorsque considéré comme un corps noir ayant une température de 5900 K, émet un maximum d'énergie à une **longueur d'onde** de 0,49  $\mu\text{m}$ . De même, la Terre (ayant une température moyenne de 300 K) le fait à 9,66  $\mu\text{m}$ .

Sur la figure 2.3, nous illustrons l'énergie émise par deux corps noirs ayant une température similaire à celles du Soleil et de la Terre.

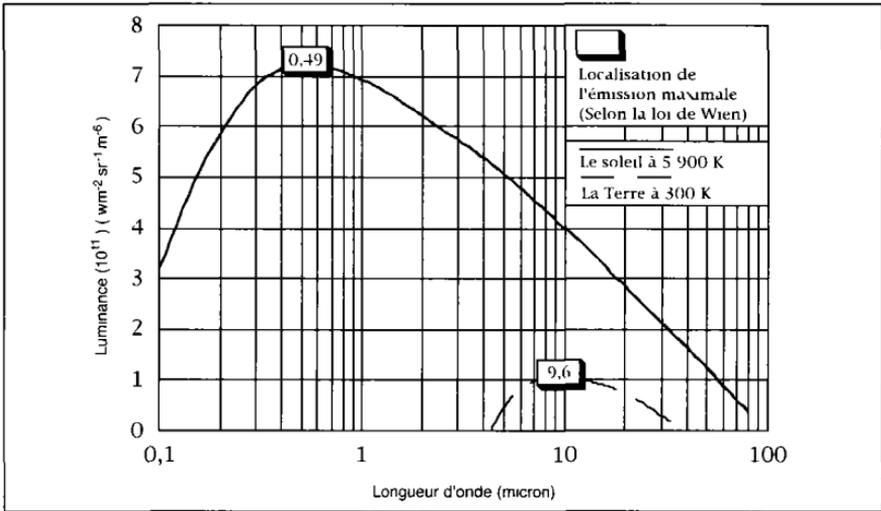


Figure 2.3. : Distribution spectrale de deux sources d'énergie en fonction de la loi de Planck

**Pour le Soleil, la loi de Planck nous permet de constater qu'une grande partie de sa puissance énergétique observable par télédétection est déployée dans les ondes réfléchies (ultra-violet, visible, proche infrarouge). Cette loi démontre cependant que, pour la Terre, la création d'énergie est beaucoup plus faible. Sa puissance maximale est présente dans l'infrarouge thermique.**

## 2.4.2. L'énergie incidente et la matière

### A) Le contact avec l'atmosphère

Le rayonnement solaire entre d'abord en contact avec l'atmosphère et, par la suite, avec la surface terrestre. Sur la figure 2.4, nous illustrons comment cette énergie se répartit. D'après Oke [48], l'atmosphère absorbe environ 25 % (20 + 5) du rayonnement incident et en réfléchit aussi 25 % (19 + 6). Pour la Terre, il y a une forte disproportion entre l'énergie absorbée (47 %) et réfléchie (3 %), même si l'albédo peut varier.

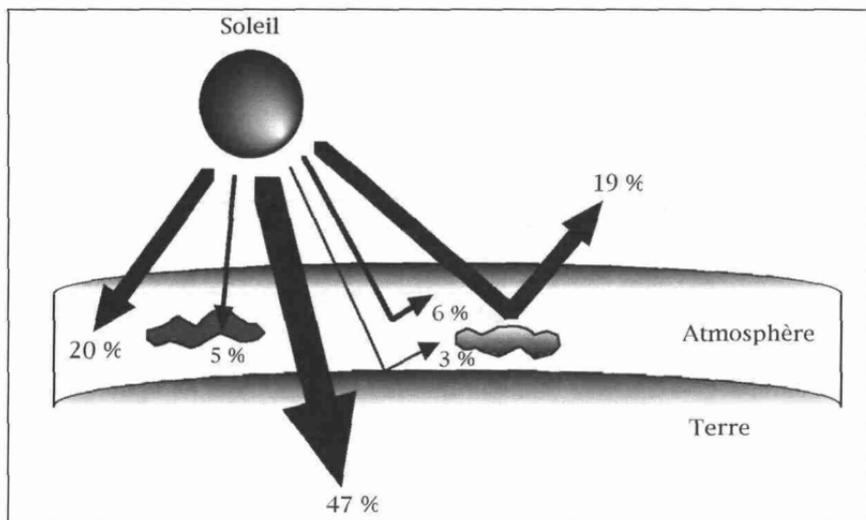


Figure 2.4. : Représentation schématique du rayonnement solaire en contact avec la matière. Adapté de : Oke [47].

Dans le contexte de la télédétection, nous devons comprendre d'abord quel rôle peut jouer l'atmosphère dans la perception du type d'énergie qu'elle absorbe ou transmet. Sur la figure 2.5, on indique ce que l'on peut percevoir comme énergie par l'intermédiaire de **fenêtres spectrales** présentées en blanc. Là, l'atmosphère est relativement transparente. Les zones grises correspondent aux espaces spectraux dont l'énergie est absorbée par les constituants atmosphériques mentionnés. L'atmosphère joue donc un rôle de filtre qui est parfois essentiel à la vie (absorption d'une grande partie des ondes UV), ou qui lui est parfois nuisible (augmentation de la rétention de gaz carbonique engendrant l'effet de serre).

Même s'il existe des **fenêtres spectrales** où l'énergie (le rayonnement) peut atteindre la surface terrestre, il reste que certains facteurs peuvent influencer la quantité d'énergie qui atteint le sol. En effet, il s'agit de l'épaisseur atmosphérique en fonction de l'angle solaire, de la quantité de vapeur d'eau et de gaz carbonique ainsi que de la présence d'aérosols.

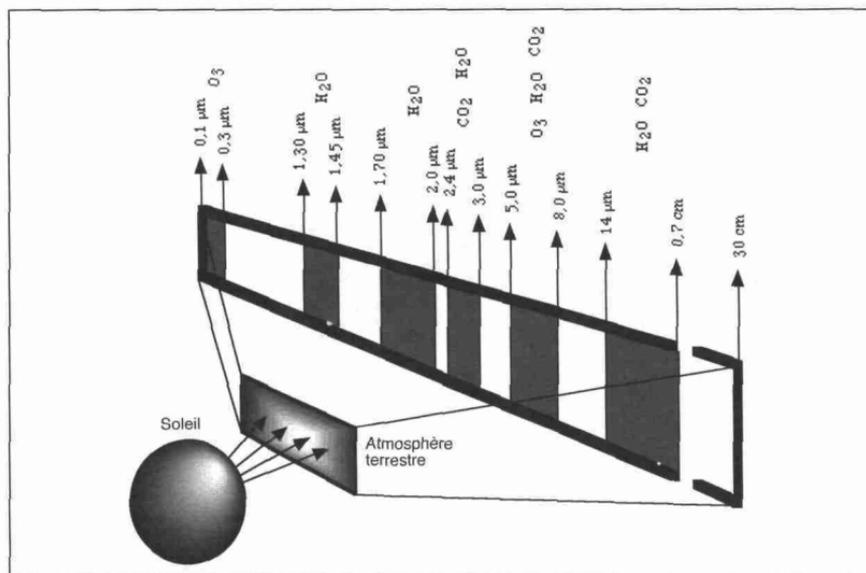


Figure 2.5. : Effets de l'atmosphère terrestre sur le rayonnement solaire. Identification des gaz d'absorption.

Le rayonnement électromagnétique qui passe par les fenêtres subit des modifications de direction quand il entre en contact avec les molécules d'air ou de petites particules qui ont un diamètre nettement plus petit que la **longueur d'onde** qui véhicule le dit rayonnement. Ce phénomène est appelé diffusion de Rayleigh. Il s'atténue en fonction de l'altitude (puisque l'atmosphère y est de moins en moins dense) et de l'augmentation de la **longueur d'onde**. La manifestation la plus tangible de cette diffusion isotrope est le ciel bleu.

Elle est aussi présente dans des longueurs d'ondes un peu plus grandes lorsque l'énergie solaire doit traverser une colonne atmosphérique plus épaisse comme c'est le cas au crépuscule. À ce moment, le ciel a des **teintes** variant du rose à l'orange.

*En télédétection, la diffusion atmosphérique a comme conséquence néfaste d'atténuer les contrastes naturels entre les objets terrestres.*

Lorsque le rayonnement entre en contact avec des particules dont le diamètre voisine la **longueur d'onde** avec laquelle cette énergie est véhiculée, c'est la diffusion de Mie. Elle s'effectue dans une direction préférentielle voisine à la direction du rayonnement incident. On parle alors de diffusion anisotrope. Plus le volume de la particule est grand, plus l'intensité de la diffusion sera importante. La pollution au-dessus d'un milieu urbain en absence de vent est un exemple type de la diffusion de Mie. Elle est présente surtout dans les basses couches de l'atmosphère.

D'après Bonn et Rochon [11], à partir du moment où le diamètre des particules est nettement plus grand que la **longueur d'onde**, la diffusion n'est plus liée à cette dernière. Elle ne dépend plus que du diamètre des particules et de leur nombre par unité de volume. Les nuages blancs en sont un exemple typique.

### **B) Le contact avec la surface terrestre**

Lorsque le rayonnement incident entre en contact avec la surface terrestre, il est aussi absorbé, transmis ou réfléchi que ce soit pour la biosphère, la lithosphère ou l'hydrosphère.

***En télédétection, nous obtenons des informations utilisables grâce à l'énergie réfléchie ou émise par les corps qui est détectée par un capteur.***

Nous savons maintenant que cette énergie est détectée grâce au fait que l'atmosphère en laisse passer une certaine quantité par des fenêtres et ce, dans différentes longueurs d'onde. La **longueur d'onde** véhiculant l'énergie réfléchie détectable ne dépasse pas 2,4  $\mu\text{m}$ . Pour l'énergie émise, elle passe par les fenêtres situées entre 3 et 15  $\mu\text{m}$ .

Enfin, il est possible de détecter l'énergie émise par les corps dans des longueurs d'onde plus grandes (hyperfréquences passives), mais elle est tellement faible que l'on a développé des émetteurs capables de produire de l'énergie d'une façon beaucoup plus utilitaire (hyperfréquences actives). Dans ce cas, il s'agit de rétrodiffusion et non d'**émission** pour la portion d'énergie qui entre en contact avec l'objet qui est détecté par un **capteur**.

Il est commun de lire que la majeure partie de l'information que nous obtenons de la Terre provient de la portion réfléchie ou rétrodiffusée de l'énergie incidente, qu'elle soit d'origine naturelle ou artificielle. La réflexion peut être de type spéculaire ou diffuse (voir figure 2.6).

Cela dépend de la rugosité de la surface. En effet, une surface parfaitement lisse engendre une **réflexion** spéculaire où l'**angle de réflexion** est égal à l'**angle d'incidence** du rayonnement. Dans le cas de toutes les autres surfaces, la **réflexion** est dite diffuse mais, avec des angles préférentiels qui dépendent de la variabilité de la rugosité de surface.

L'épiderme terrestre est constitué de surfaces lisses (ex : plan d'eau calme) et de surfaces à rugosité (ou **texture**) très variable. Un objet ayant une rugosité détectable et identique sur toute sa superficie exposée au rayonnement est considéré comme étant une surface lambertienne c'est-à-dire que la quantité d'énergie réfléchie par cet objet est égale dans toutes les directions.

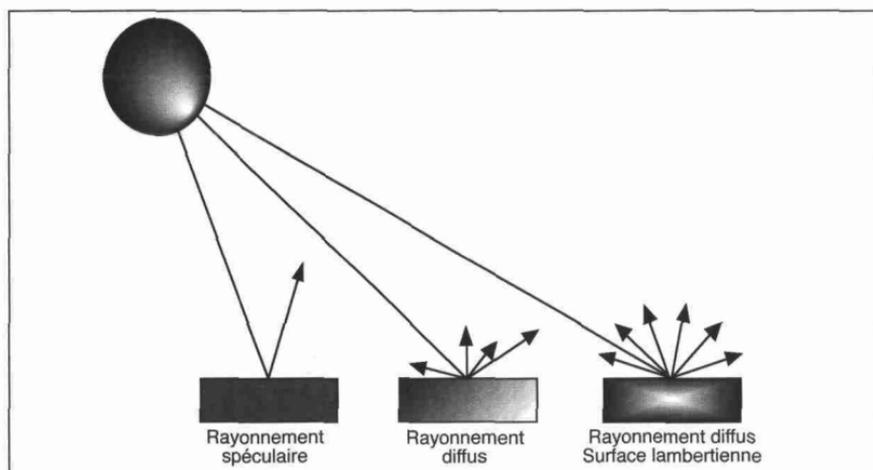


Figure 2.6. : Réflexion du rayonnement incident.

Lorsqu'elle est quantifiée, l'énergie réfléchie [ou le rayonnement réfléchi  $\rho(\lambda)$ ] est appelée **réflectance** spectrale. Elle est l'expression du rapport entre l'énergie réfléchie et l'énergie incidente.

### C) L'information télédéTECTÉE

Rappelons d'abord que l'énergie incidente qui entre en contact avec la surface terrestre est en grande partie réfléchiE ou absorbée et réémise en fonction de caractéristiques physico-chimiques et géométriques des objets qui la composent. Les **capteurs** spécialement développés pour acquérir cette information ne reçoivent pas que ce signal. Il nous faut prendre en compte que le signal traverse l'atmosphère avant d'atteindre ces **capteurs**. Elle rajoute son propre rayonnement à celui des objets terrestres télédéTECTÉS.

D'après Anderson et Wilson [1], dans les ondes courtes (visible et infrarouge réfléchi), la valeur de luminance apparente perçue au capteur s'exprime ainsi :

$$L_{tot}(h) = L_a(h) + \tau L_s(h)$$

où  $L_{tot}(h)$  = luminance télédéTECTÉE à une altitude (h) ( $Wm^{-2} sr^{-1}$ )

$L_a$  = luminance de l'atmosphère

$\tau$  = transmittance atmosphérique (sans unité)

$L_s$  = luminance de la surface

Dans les ondes longues (infrarouge thermique), Schott et Volchok [61] proposent la formulation suivante :

$$L_{tot}(h) = \tau(h)\epsilon L_t(h) + \tau(h)\rho L_d(h) + L_u(h)$$

où  $L_{tot}(h)$  = luminance télédéTECTÉE à une altitude (h) ( $Wm^{-2} sr^{-1}$ )

$\tau(h)$  = transmittance atmosphérique

$\epsilon L_t(h)$  = luminance de l'objet en fonction de son émissivité et de sa température cinétique (K)

$\rho$  = luminance réfléchiE de l'objet (1-e)

$L_d(h)$  = luminance hémisphérique (du ciel)

$L_u(h)$  = luminance de la colonne atmosphérique localisée entre l'objet et le capteur

La figure 2.7 illustre les différentes variables qui composent le signal reçu après le contact du rayonnement incident avec le sol.

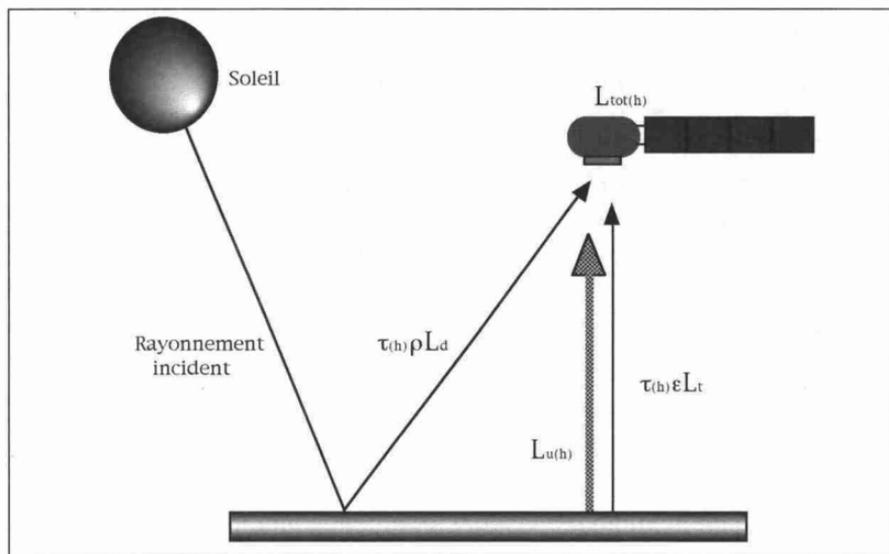


Figure 2.7. : Énergie détectée par un capteur dans les ondes longues.

Dans le cas des hyperfréquences passives, Bonn et Rochon [11] mentionnent que, pour une température inférieure à 300 K et une fréquence inférieure à 300 GHz, nous pouvons utiliser une simplification de la formule de Planck afin de trouver la **luminance** des objets. Appelée la loi de Rayleigh-Jeans, elle s'exprime ainsi :

$$L_{\lambda} = \frac{2kT}{\lambda^2}$$

où  $L$  = luminance ( $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\text{HZ}^{-1}$ )

$T$  = température du corps noir (K)

$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$  (constante de Boltzmann)

En somme, d'après Meylan *et al.* [45], l'énergie émise par un corps noir dans le domaine des hyperfréquences passives est proportionnelle à sa température.

La quantité d'énergie émise pouvant être reçue au **capteur** dans ce domaine s'exprime par la **température (de brillance apparente)** d'un objet.

Elle est formulée de la façon suivante :

$$T_{app} = \tau(\varepsilon T_O + \rho T_r) + (1 - \tau)T_s$$

où  $\tau$  = transmittance de l'atmosphère

$\varepsilon$  = émissivité de l'objet

$T_O$  = température absolue de l'objet

$\rho$  = réflectance de l'objet

$T_r$  = température équivalente de radiation incidente sur l'objet

$T_s$  = température absolue de la colonne atmosphérique située entre l'objet et le capteur

Dans le domaine des hyperfréquences actives (créées artificiellement par un **radar**), le rayonnement, dont la puissance est contrôlable, est reçu au **capteur**, non sans avoir subi des altérations parfois importantes. En effet, des facteurs tels que la **longueur d'onde**, la **polarisation** de l'onde, l'**angle de visée (angle d'incidence)**, la **résolution spatiale**, la **rugosité de surface**, la **profondeur de pénétration** et la **constante diélectrique** de l'objet influencent le signal reçu.

Pour ce qui est de l'atmosphère, son impact est en général minime. C'est ce qui rend actuellement l'utilisation des **images radar** plus attirante, surtout dans des régions où l'on a des conditions climatiques qui favorisent souvent la formation de nuages. Il faut parfois tenir compte que la présence de nuages denses, de précipitations sous forme liquide ou solide ainsi que de cristaux de glace en haute altitude peuvent perturber le signal reçu. Sur la figure 2.8, on indique comment ces phénomènes peuvent altérer la **transmittance** de l'atmosphère. Force nous est de constater que, même si l'adage dit que les ondes radar passent à travers les nuages et les intempéries, nous nous devons d'être prudents lorsque nous avons à interpréter des **images** acquises par ce mode. Une altération du signal est donc probable dans les bandes situées entre 1 et 10 cm de **longueur d'onde** lorsque les conditions climatiques sont mauvaises. On se sert d'ailleurs de **radars** au sol pour localiser les zones de précipitations importantes.

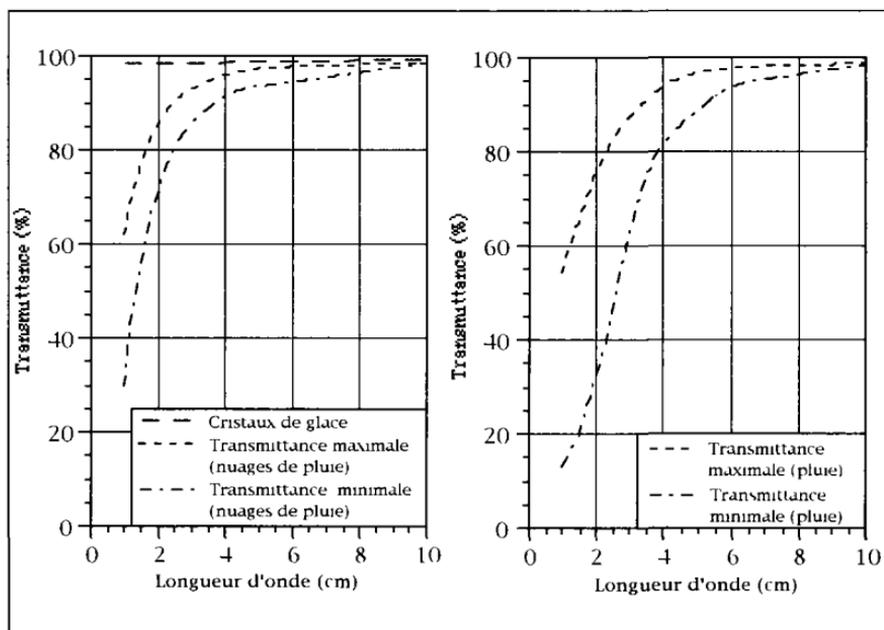


Figure 2.8. : Effets de certains phénomènes climatiques dans les hyperfréquences.  
 Adapté de Ulaby et al. [74].

## 2.5. Sur les fenêtres spectrales

L'information acquise passe par différentes **fenêtres spectrales**. À l'aide des figures 2.2 et 2.5, nous avons constaté que l'énergie incidente (et réfléchie) traversait l'atmosphère par des **fenêtres** spécifiques. Voyons maintenant dans le tableau 2.3 à quoi peuvent servir celles qui sont les plus souvent utilisées en télédétection en fonction des trois principales composantes de la Terre. À cette fin, la fenêtre du visible sera divisée en deux parties, soit le bleu et le vert, et le rouge. Pour ce qui est de l'infrarouge, nous la diviserons en trois parties, deux dans l'infrarouge réfléchi et une dans l'infrarouge thermique. Enfin, nous y trouverons le domaine des hyperfréquences.

Tableau 2.3. · Utilité et particularités des différentes fenêtres spectrales.

Fenêtre spectrale	Eau	Végétation	Surface minéralisée	Remarques
<b>Bleu</b> (0,4-0,5 µm) <b>Vert</b> (0,5-0,6 µm)	Possibilités de pénétration dans l'eau claire Sensible à la densité de la matière en suspension et aux nappes de pétrole Réflexion élevée pour la neige et la glace pure sauf pour la glace récente et peu épaisse	Absorption du rayonnement par la chlorophylle dans le bleu Réflexion du rayonnement dans le vert (couleur des plantes)	Forte réflexion par temps sec	Présence de la diffusion de Rayleigh Utile pour la correction des effets atmosphériques
<b>Rouge</b> (0,6-0,7 µg)	Sensible à la matière en suspension dans l'eau Réflexion moyenne pour la neige et la glace pure. La glace récente est difficilement distinguable	Forte absorption par la chlorophylle Utile pour la détermination de la biomasse	Forte réflexion pour les surfaces sèches	Moins sensible aux effets de diffusion atmosphérique Reconnaissance des grands ensembles de l'occupation/utilisation du sol
<b>Proche infrarouge</b> (0,7-1,1 µm)	Forte absorption du rayonnement dans l'eau claire ou faiblement turbide Forte réflexion pour la neige sèche et la glace épaisse	Forte réflexion par la chlorophylle Utile dans la détermination de la biomasse	Sensible à l'humidité en surface des sols Effet d'ombrage accentué favorisant la reconnaissance des linéaments	Faible impact des effets de diffusion atmosphérique Bon contraste naturel entre les objets (terre et eau)

Tableau 2.3. : Utilité et particularités des différentes fenêtres spectrales (suite).

<p><b>Infrarouge moyen</b> (1,55-1,75 <math>\mu\text{m}</math>) (2,10-2,35 <math>\mu\text{m}</math>)</p>	<p>Forte absorption du rayonnement dans l'eau claire, faiblement et moyennement turbide</p> <p>Faible réflexion de la neige sèche et de la glace</p>	<p>Réflexion élevée jusqu'à 1,5 <math>\mu\text{m}</math>. Elle diminue par la suite</p> <p>Sensible à la présence de l'eau dans les plantes</p>	<p>Meilleure distinction entre les différents niveaux d'humidité à la surface des sols</p> <p>Différenciation entre les différents types de roches et de minéraux.</p> <p>On distingue les roches sèches des roches altérées dans les longueurs d'onde supérieures à 2 <math>\mu\text{m}</math></p>	<p>Insensible à la brume sèche et aux nuages minces de faible densité</p> <p>Bonne distinction entre les nuages et la neige</p>
<p><b>Infrarouge thermique</b> (3,5-5 <math>\mu\text{m}</math>) (8-14 <math>\mu\text{m}</math>)</p>	<p>Dynamique thermique à l'épiderme des masses d'eau (étude des courants et présence de matières polluantes)</p> <p>Distinction entre l'eau, la neige sèche et la glace</p>	<p>Sensible aux variations de température causées par le stress hydrique ou biologique</p> <p>Utile dans l'étude des feux de forêt ou de brousse</p>	<p>Suivi d'activités volcaniques</p> <p>Humidité des sols en surface et en profondeur (environ 1 m)</p> <p>Détection de différences lithologiques là où il y a affleurement</p>	<p>Peut être acquis le jour et la nuit</p> <p>Détection de l'émission propre aux objets terrestres une heure avant le lever du Soleil</p> <p>Présence de l'effet atmosphérique</p>
<p><b>Hyperfréquences</b> (1-30 cm)</p>	<p>Sensible à la rugosité (vagues, glace, neige)</p> <p>Absorption du rayonnement par la neige humide</p> <p>Détermination de l'âge des glaces</p>	<p>Distinction de couverts végétaux ayant une rugosité particulière</p>	<p>Sensible à l'humidité des sols</p> <p>Reconnaissance des grands ensembles structuraux et des finements</p>	<p>Peut être acquis le jour et la nuit avec ou sans présence de nuages</p> <p>Sensible aux nappes de pétrole denses</p> <p>Encore au stade expérimental pour plusieurs champs d'application</p>