

SOUDANI KAMEL

Maître de Conférences
Laboratoire Ecologie Systématique et Evolution
Département Ecophysiologie Végétale
Equipe bilan carboné et fonctionnement des Ecosystèmes
UMR 8079 CNRS-Université Paris-Sud XI
Faculté des Sciences d'Orsay, Université Paris-Sud XI, Bat. 362,
91405 Orsay Cedex, France.
<http://www.ese.u-psud.fr>
kamel.soudani@ese.u-psud.fr

INTRODUCTION GENERALE A LA TELEDETECTION

Partie I : Bases physiques et exemples d'applications aux couverts végétaux

(Version 1.0 – Mars 2005)

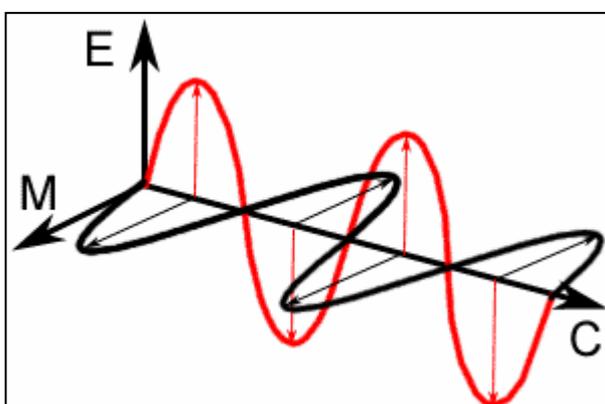
Définition

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, "d'observer" et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique, émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de cette cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol,...), etc.

I. Bases physiques de la télédétection

I.1. Rayonnement électromagnétique

Selon la théorie corpusculaire de la lumière, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons. Selon la théorie ondulatoire, le rayonnement électromagnétique est composé de deux vecteurs champ électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (dans le vide $c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$) (figure 1). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur et sa fréquence.



La longueur d'onde est la distance entre deux points homologues (deux crêtes ou deux creux) qu'on note λ (m).

La fréquence est le nombre d'oscillations par unité de temps qu'on note ν (nombre oscillations/s ou Hertz Hz). La relation reliant ces deux propriétés est :

$$c(m s^{-1}) = \lambda (m) \nu (Hz)$$

Figure 1 : onde électromagnétique monochromatique

(Source : Centre Canadien de Télédétection)

Les différentes longueurs d’ondes sont données dans la figure suivante :

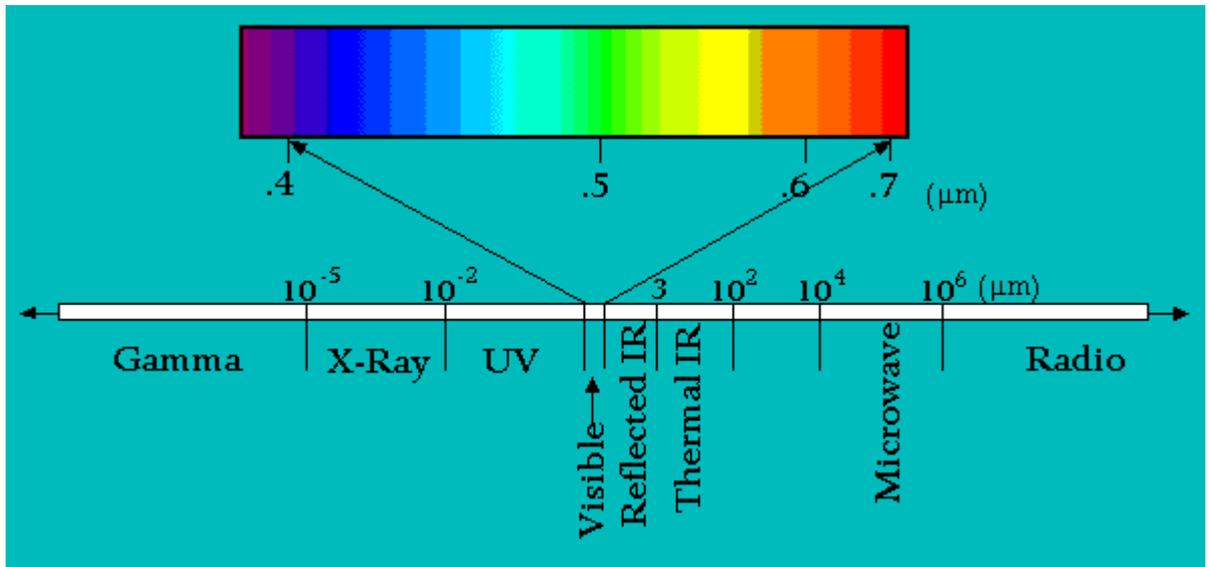


Figure 2 : Spectre du rayonnement électromagnétique solaire

Selon la théorie corpusculaire, la quantité d’énergie transportée par un photon est donnée par la relation suivante : $E_p = h\nu = hc/\lambda$, où h est dite la constante de Planck ($6.626 \cdot 10^{-34}$ Joules seconde Js). On observe que la quantité d’énergie transportée est inversement proportionnelle à la longueur d’onde. Les ondes de faibles longueurs sont donc les plus énergétiques. Cette quantité d’énergie par photon est faible ; elle est de $36.14 \cdot 10^{-20}$ J pour un photon dans une longueur d’onde de $0.55 \mu\text{m}$ ($1 \text{ nm (nanomètre)} = 10^{-3} \mu\text{m} = 10^{-9} \text{ m}$). Pour des raisons pratiques, on exprime cette quantité en Einstein soit N photons/mole avec N est le nombre d’Avogadro ($6.02 \cdot 10^{23}$). Cette quantité est alors de $217.56 \cdot 10^3 \text{ J/mole}$. C’est sous cette forme que le rayonnement est exprimé dans les processus photochimiques de photosynthèse.

Tout objet dont la température dépasse le zéro absolu (0° Kelvin ou -273.15°C – absence de vibration et rotation atomique) émet du rayonnement électromagnétique. Un corps, dit noir absorbant toute l’énergie qu’il reçoit et ayant une température T , émet une quantité d’énergie dite luminance spectrale à une longueur d’onde λ et dans une direction quelconque selon la loi de Plank :

$$L_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{k\lambda T}} - 1)}$$

où k est la constante de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$). L_λ est exprimé en $\text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ ($\text{Wm}^{-3} \text{ sr}^{-1}$).

L_λ correspond donc à une quantité d’énergie émise par unité de temps, par unité de surface, par unité d’angle solide (sr stéradians) et par unité de longueur d’onde λ .

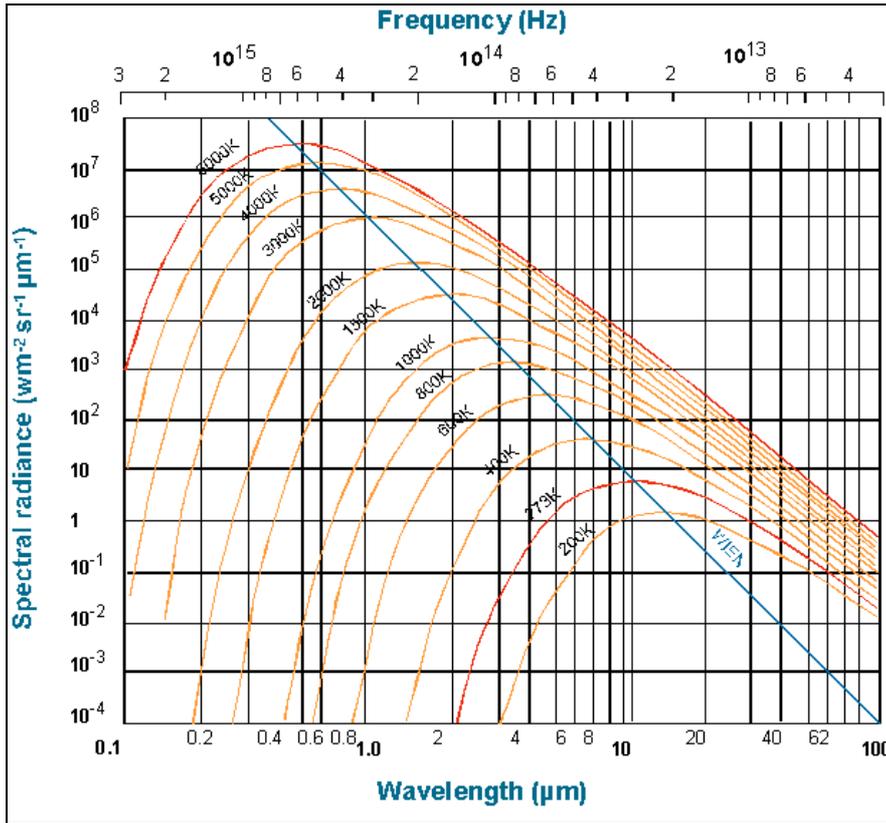


Figure 3 : luminance spectrale d’un corps noir pour différentes températures

L’équation de Plank définit une courbe en cloche (figure 3). La longueur d’onde correspondant au maximum de la luminance spectrale est aisément déterminée en utilisant la formule de Wien :

$\lambda_{\max} = \frac{K}{T}$, $K = 2.898 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{°K}$ et T est la température exprimée en °K. L’application de cette formule pour le soleil assimilé à un corps noir à 5770 °K, fournit un maximum d’émission à $\lambda_{\max} = 0.502 \text{ } \mu\text{m}$ (bande verte). Pour la terre, assimilée à un corps noir de 300°K, $\lambda_{\max} = 9.66 \text{ } \mu\text{m}$ (Infrarouge thermique). On retient que le maximum d’émission du soleil se fait dans le visible. Par contre, pour la terre, ce maximum se situe dans l’infrarouge thermique, donc sous forme de chaleur.

En considérant toutes les directions de l’espace, la luminance est dite émittance spectrale et

s’écrit alors : $M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{\frac{hc}{\lambda T}} - 1)}$ et s’exprime en $\text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1}$. On note alors que la relation : $M_{\lambda} = \pi L_{\lambda}$.

Un tel corps noir est dit lambertien car l’émission se fait d’une manière égale dans toutes les directions de l’espace.

L’intégration de M_{λ} sur l’ensemble de spectre λ permet de déterminer la quantité d’énergie totale émise par un corps noir (Wm^{-2}). On montre que : $E = \int_{\lambda} M_{\lambda} d\lambda = \sigma T^4$ où σ est la constante de Stephan-Boltzman $= 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$.

En considérant le soleil comme étant un corps noir en équilibre thermodynamique à 5770°K, la quantité d’énergie émise est alors égale à : $E = \sigma T^4 = (5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}) * (5770 \text{ K})^4 = 6.28 \cdot 10^7 \text{ W m}^{-2}$. Rappelons que cette quantité d’énergie est émise par unité de surface. La quantité d’énergie totale émise par tout le soleil : $E_{\text{soleil}} = 4\pi R_{\text{soleil}}^2 E$, soit environ $3.82 \cdot 10^{28} \text{ W}$ (Rayon du soleil $R_{\text{soleil}} = 6.96 \cdot 10^8 \text{ m}$). Cette quantité d’énergie est émise dans toutes les directions de l’espace. A l’entrée de l’atmosphère terrestre, située à une distance terre-soleil D_{TS} d’environ $1.49 \cdot 10^{11} \text{ m}$, la quantité d’énergie reçue par m^2 de surface est égale au rapport de la quantité totale d’énergie émise à la surface d’une sphère fictive de rayon D_{TS} . Soit environ 1371 W m^{-2} . Cette valeur est dite la constante solaire et correspond donc à la quantité d’énergie reçue par m^2 de surface horizontale perpendiculaire au rayonnement incident et située à l’entrée de l’atmosphère terrestre. En absence d’atmosphère, le rayonnement solaire moyen atteignant la terre est de $1371/4$ soit environ 342 W m^{-2} puisque la surface terrestre est 4 fois la surface d’un disque de même rayon.

I.2. Interactions rayonnement EM -matière

I.2.1. Interactions au cours de la traversée des couches atmosphériques

Lors de la traversée de l’atmosphère, le rayonnement électromagnétique subit des interactions avec les différents composés atmosphériques. On distingue deux phénomènes majeurs : la diffusion et l’absorption. La diffusion correspond à des phénomènes de réflexion multiples entre le rayonnement et les atomes, les molécules et les particules atmosphériques. Selon la longueur d’onde et les dimensions de ces obstacles, on distingue trois types de diffusion : la diffusion de Rayleigh, la diffusion de Mie et une diffusion dite non sélective. La diffusion de Rayleigh se produit lorsque les dimensions des composés atmosphériques sont inférieures à la longueur d’onde. Elle concerne principalement les molécules de gaz, se produit particulièrement dans les couches supérieures de l’atmosphère et affecte principalement les courtes longueurs d’ondes particulièrement le visible. Par ciel clair, les longueurs d’ondes situées dans la bande bleue du spectre solaire sont fortement affectées expliquant ainsi la couleur bleue du ciel.

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

La diffusion non sélective concerne toutes les longueurs d’onde, courtes et longues, et produite suite aux interactions du rayonnement avec des grosses particules et les gouttelettes d’eau. Les nuages, chargées de gouttelettes d’eau et d’aérosols, diffusent sans préférences toutes longueurs d’onde du visible et apparaissent dans des teintes blanches.

L’absorption est un phénomène intimement lié aux niveaux énergétiques des composantes de l’objet absorbant. Le rayonnement absorbé modifie l’énergie interne des molécules et se manifeste le plus souvent par une augmentation de leur température. L’absorption atmosphérique est due principalement aux effets de l’ozone, l’oxygène, le gaz carbonique, le méthane et la vapeur d’eau. L’ozone absorbe les longueurs d’ondes inférieures à 290 nm et particulièrement le rayonnement UV, très énergétique et à l’origine des brûlures et cancers cutanés. L’oxygène absorbe principalement dans une bande étroite située autour de 760 nm. La vapeur d’eau, gaz carbonique et méthane, dits gaz à effets de serre absorbent principalement dans l’infrarouge proche, moyen et thermique.

La figure 4 montre la nature sélective de l’atténuation du rayonnement électromagnétique par les composés atmosphériques. Les intervalles de longueurs d’ondes de faible atténuation atmosphérique (forte transmittance) sont appelés fenêtres atmosphériques et constituent les bandes spectrales utilisées en télédétection des surfaces terrestres.

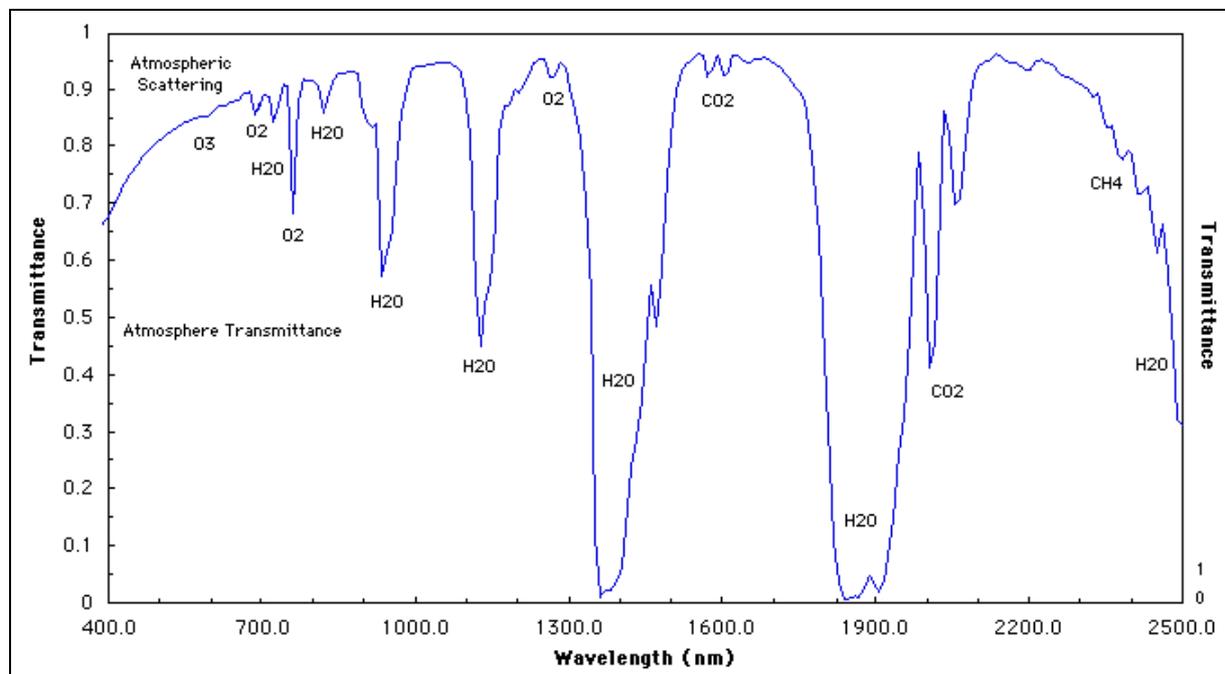


Figure 4 : fenêtres atmosphériques (source <http://www.sigu7.jussieu.fr/Led/cies/definitions>)

En effet, les longueurs d’onde employées en télédétection sont essentiellement le visible de 400 à 700 nm, le proche infrarouge de 700 à 1300 nm, l’infrarouge moyen de 1300 à 3000 nm, l’infrarouge thermique de 3000 à 15000 nm et les hyperfréquences ou micro-ondes, passives et actives, de 1 millimètre au mètre:

1.2.2. Interactions rayonnement et surfaces terrestres

Au niveau de la cible, le rayonnement électromagnétique est réfléchi, absorbé et transmis dans des proportions variables. Lorsqu’on s’intéresse à une longueur d’onde spécifique, le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident est appelé réflectance (ρ_λ). De la même manière, on définit l’absorption (α_λ), rapport du rayonnement absorbé au rayonnement incident et la transmittance (τ_λ), rapport du rayonnement transmis au rayonnement incident.

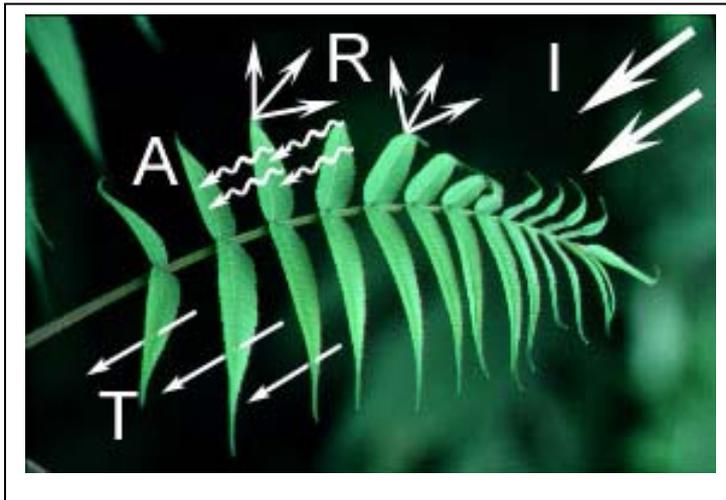


Figure 5 : interactions onde EM et surface naturelle (CCT)

On a toujours : $\alpha + \rho + \tau = 1$.

Le rapport du rayonnement réfléchi au rayonnement incident dans toute la bande spectrale visible est appelé coefficient de réflexion. On peut de la même manière, définir le coefficient d’absorption et de transmission. Lorsque la surface considérée correspond à la surface terrestre, le coefficient de réflexion est appelé albédo.

1.2.3. Quantités physiques mesurées en télédétection

En télédétection, les quantités mesurées sont le rayonnement réfléchi ou émis. Dans la suite de ce document, on s’intéressera particulièrement au rayonnement réfléchi. En télédétection, on définit les quantités suivantes :

Energie rayonnante Q_e : exprime la quantité d’énergie véhiculée par le rayonnement électromagnétique. Cette quantité est exprimée en Joules. Rappelons que l’énergie est le produit d’une force par une distance. 1 Joule correspond au travail produit par une force de 1 Newton dont le point d’application se déplace d’ 1 m (1 Joule = 1 Nm).

Flux énergétique ϕ_e (watt ou $J s^{-1}$) : exprime la quantité d’énergie par unité de temps : $\phi_e = dQ_e/dt$

Densité de flux énergétique F_e ($W.m^{-2}$) : exprime le flux énergétique par unité de surface :

$F_e = dQ_e/(dtdS)$. Lorsqu’il s’agit d’un flux reçu, on parle alors d’éclairement énergétique (E_e). Dans le cas d’un de flux émis, on parle d’excitance énergétique (M_e).

Luminance énergétique L_e ($W m^{-2} sr^{-1}$) : exprime un flux de rayonnement par unité d’angle solide et par unité d’aire de la surface apparente de la source dans cette direction.

On définit alors la réflectance comme étant le rapport entre le flux énergétique réfléchi au flux énergétique incident :

Réflectance : Rapport du flux radiatif réfléchi par un milieu matériel au flux radiatif incident.

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_i}$$

Transmittance : Rapport du flux transmis au flux incident.

$$\tau = \frac{\phi_t}{\phi_i}$$

Absorptance : Rapport du flux absorbé au flux incident

$$\alpha = \frac{\phi_a}{\phi_i}$$

Selon l'état de la surface réfléchissante, deux situations extrêmes sont possibles :

1. la réflexion est dite spéculaire lorsque la surface réfléchissante se comporte comme un miroir. Dans ce cas, l'angle d'incidence est identique à l'angle de réflexion et les rayons incidents et réfléchis sont contenus dans des plans perpendiculaires à la surface réfléchissante.
2. la réflexion est dite diffuse lorsque la réflexion des rayons se fait dans toutes les directions de l'espace.

Un réflecteur parfaitement diffusant suit une loi physique bien connue dite loi de Lambert. Le comportement est dit lambertien. Les surfaces naturelles combinent généralement ces deux modes de réflexion.

II. Acquisition de données de télédétection

Les plates formes utilisées en télédétection sont diverses (au sol, ballons, avions et satellites). La télédétection est dite passive lorsque la source illuminant la cible est indépendante du capteur. Généralement cette source est le soleil. C'est le cas des satellites *SPOT* (Satellite pour l'Observation de la Terre), *LANDSAT* (Land Satellite) (figure 6.1), *METEOSAT* (Meteorological Satellite), etc. La télédétection est dite active dans le cas contraire. C'est le cas du *LIDAR* (*Light Detection and Ranging*) utilisant une source laser et le *RADAR* (*RADio Detection And Ranging*) utilisant une source hyperfréquence. C'est l'exemple du satellite *ERS-1* (European Remote Sensing Satellite) (figure 6.2). L'un des principaux avantages de la télédétection active radar est la possibilité de réaliser des acquisitions en tout temps, par ciel clair ou nuageux, et de jour comme de nuit.

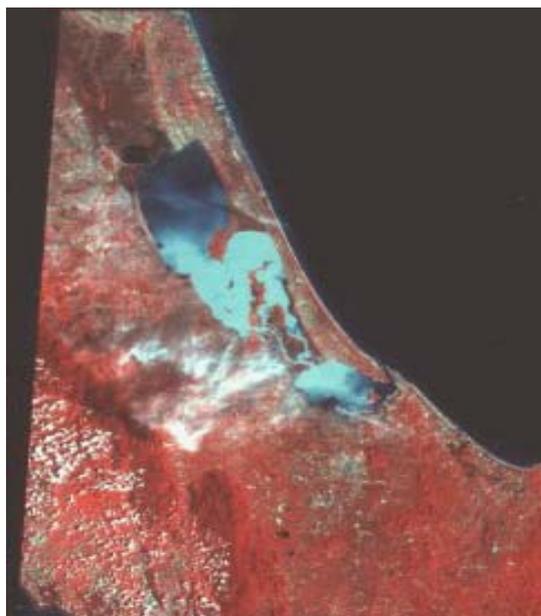


Figure 6.1 Image *Landsat Thematic Mapper*
(Source: National Research Council of Thailand)



Figure 6.2 Image Radar *ERS-1*
(Source: National Research Council of Thailand)

Les satellites d’observation en orbite autour de la terre sont essentiellement de trois types (Bonn & Rochon, 1992) :

1. L’orbite géostationnaire est une orbite équatoriale et circulaire à une altitude d’environ 36000 km. Le satellite se déplace à la même vitesse angulaire et dans le même sens que la terre assurant ainsi une observation permanente de la même région. C’est le cas des satellites de télécommunication et d’observation météorologique telles que les satellites *METEOSAT* et *GOES* (Geostationary Operational Environmental Satellite).

2. L’orbite héliosynchrone est une orbite circulaire où le plan de l’orbite du satellite est déterminé de manière à observer régulièrement un point particulier à la même heure locale solaire. C’est le cas des satellites *LANDSAT* et *SPOT*. L’altitude relativement basse de ces satellites (300 à 1500 km) permet des bonnes résolutions au sol.

3. L’orbite circulaire quelconque qui offre l’avantage de passer à la même altitude au dessus d’un point de la terre mais à des heures différentes. C’est le cas des satellites *ERS-1* et *ERS-2*.

Trois types de résolution caractérisent un capteur de télédétection, au sol ou embarqué:

1. La résolution spectrale correspondant aux bandes de longueurs d’onde auxquelles les capteurs sont sensibles (*SPOT panchromatique* dans la bande *visible* 510-730 nm, *SPOT XS canal vert* 500-590 nm, *canal rouge* 610-680 nm et *canal proche infrarouge* 790-890 nm ; *Radar ERS-1* Micro-onde bande C 5 GHz ; *JERS-1* (Japanese Earth Resources Satellite) bande L 1.28 GHz, etc. Les images suivantes de la forêt de Haguenau (juillet 1998) ont été acquises à différentes longueurs

d’onde avec une résolution au sol de 2 m à l’aide du radiomètre Push broom, embarqué sur l’avion ARAT (Avion de Recherche Atmosphérique et de Télédétection) du CNES (Raffy et al., Raffy & Soudani, sous presse).

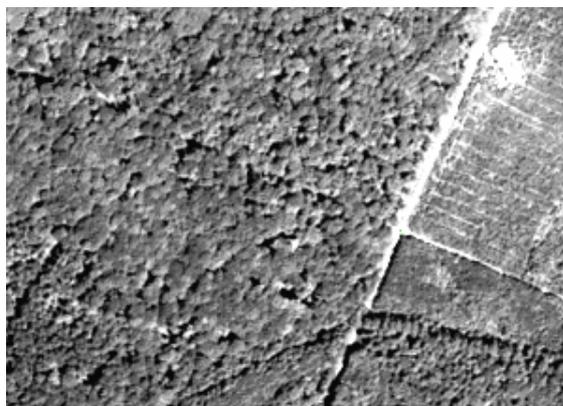


Figure 7.1 Image aéroportée ARAT capteur *push broom* canal vert 500-590 nm.

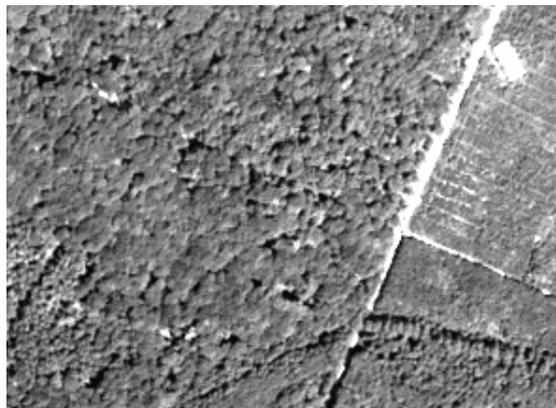


Figure 7.2 Image aéroportée ARAT capteur *push broom* canal rouge 610-680 nm

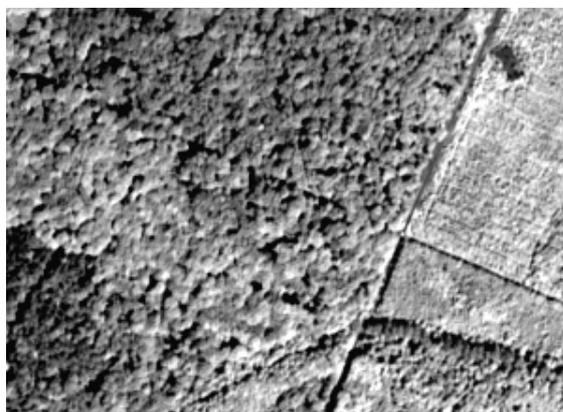


Figure 7.3 Image aéroportée ARAT capteur *push broom* canal proche infrarouge (790-890 nm)

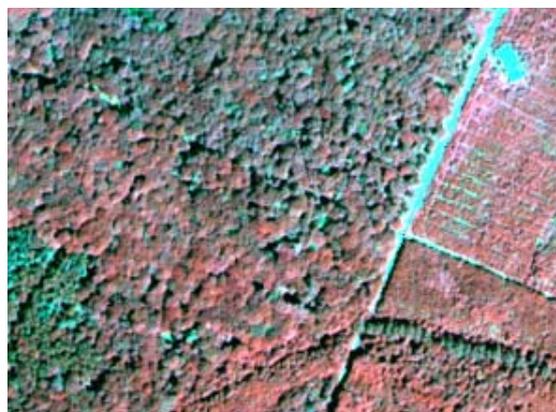


Figure 7.4 Image composition colorée RVB canal 3 Rouge, canal 2 Vert, canal 1 Bleu

Sur la composition colorée (combinaison RVB des trois canaux : Proche infrarouge en rouge, canal rouge en vert et canal vert en bleu), les espèces feuillues apparaissent dans des teintes rouges, les résineux dans des teintes bleutées sombres et le minéral (sol et autres) en teintes bleues-turquoises. Notons aussi les variations de niveaux de gris en fonction des entités du paysage sur les images mono-spectrales.

2. La résolution spatiale correspondant à la surface élémentaire d’échantillonnage observée instantanément par le capteur. Cette surface élémentaire correspond au pixel (picture element). Il est de 10 m × 10 m pour la bande *panchromatique* de SPOT, 20 m × 20 m pour les bandes XS de SPOT, 30 m × 30 m pour *LANDSAT Thematic Mapper*, 1 km × 1 km pour *NOAA-AVHRR* (National Oceanographic and Atmospheric Administration, Advanced Very High Resolution Radiometer), 30 m × 30 m pour *ERS-1* et 18 m × 18 m pour *JERS-1*.

La largeur de la bande balayée, le long d’un parcours correspondant à la trace du satellite, définit la fauchée au sol. Elle est de 60 km pour *SPOT*, 185 km pour *Landsat TM*, 2800 km pour *NOAA-AVHRR*, 100 km pour *ERS-1* et 75 km pour *JERS-1*.

La figure 8 correspond à trois images d’un peuplement feuillu de la forêt de Haguenau acquises à la même date (juillet 1998) : une photographie aérienne et deux images acquises dans les mêmes longueurs d’onde mais à deux résolutions spatiales différentes.

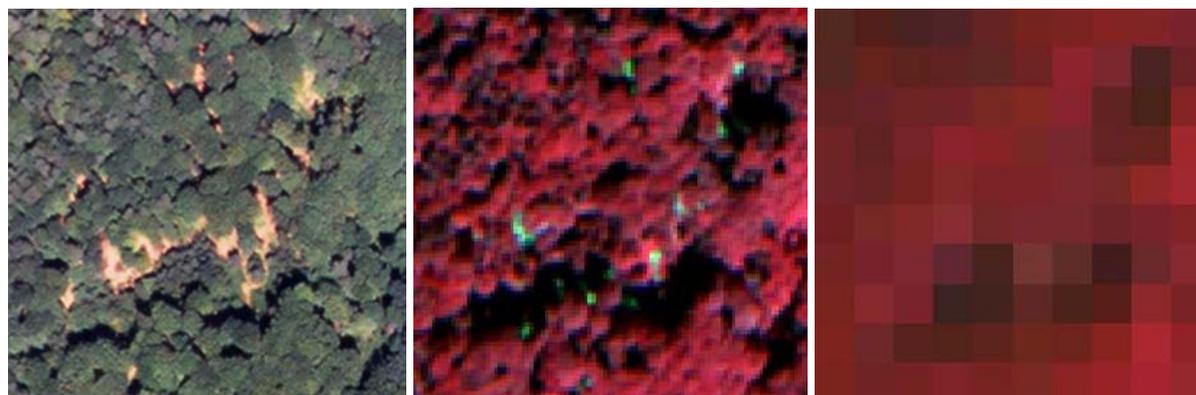


Figure 8. De gauche à droite : photographie aérienne ; composition colorée à une résolution de 2 m × 2 m (ARAT Push broom-CNES) ; composition colorée SPOT à une résolution de 20 m × 20 m (Raffy & Soudani, sous presse).

3. La résolution temporelle ou répétitivité correspond à la période entre deux acquisitions de la même scène. Cette résolution ne dépend pas du capteur mais de l’orbite et du mode de manœuvre du satellite. Notons que le satellite *SPOT* offre la possibilité de viser un site sur commande permettant ainsi d’assurer une excellente résolution temporelle. Sans manœuvre, la résolution temporelle de *SPOT* est de 26 jours, 16 jours pour *LANDSAT TM* et 14.5 jours pour *NOAA-AVHRR*. Le tableau 1. donne quelques caractéristiques des principaux satellites d’observation de la terre :

	Landsat-5	SPOT	ERS	JERS-1	NOAA-12,14
Date de lancement	USA 1984	France SPOT-1 Février 1986 SPOT-2 Janvier 1990 SPOT-3 Septembre 1993 SPOT-4 Mars 1998	Europe Juillet 1991(ERS-1) jusqu’à juin 1996 Avril 1995 (ERS-2)	Japan Février 1992	USA Mai 1991 (NOAA-12) Décembre 1994 (NOAA-14)
Altitude	705 km	832 km	782-785	586 km	833 km (NOAA-12) 870 km (NOAA-14)
Durée d’une révolution	99 min	101 min	100 min	96 min	102 min (NOAA-12) 101 min (NOAA-14)
Répétitivité	16 jours	26 jours 1-3 jours en programmation	3,35 et 168 jours en (ERS-1) 35 jours (ERS-2)	44 jours	14.5 jours

Capteurs	Thematic Mapper 0.45-0.52 μm TM1 0.52-0.60 μm TM2 0.63-0.69 μm TM3 0.76-0.90 μm TM4 1.55-1.75 μm TM5 10.4-12.5 μm TM6 2.10-2.35 μm TM7	HRV (High resolution visible) 0.50-0.59 μm XS1 0.61-0.69 μm XS2 0.79-0.90 μm XS3 0.51-0.73 μm P 1.5-1.75 μm MIR (Infrarouge moyen sur SPOT-4)	Altimètre radar Diffusomètre vent Sondeur hyperfréquences Capteur Infrarouge	SAR (Synthetic Aperture Radar) OPS (Optical Sensor)	AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) 0.55-0.68 μm 0.73-1.10 μm 3.33-3.93 μm 10.50-11.50 μm 11.00-12.50 μm
Résolution spatiale	30 m	10 m P 20 m XS	30 m SAR	18 m (SAR), 18.3 x 24.2 m (OPS)	1.1 km
Fauchée au sol	185 km	60 km	100 km (SAR)	75 km	2800 km

Tableau1. Caractéristiques de quelques capteurs et satellites d’observation de la terre

III. Propriétés optiques de la végétation, du sol et des surfaces d’eau libre

Dans cet exposé, on se référera, plus particulièrement, aux travaux de synthèse de Guyot (1989), Guyot et al. (1989), Baret & Guyot (1991), Breda et al. (2003). On distinguera entre les propriétés optiques des feuilles et du sol et les propriétés optiques du couvert végétal.

III.1. Végétation

III.1.1. Propriétés optiques des feuilles

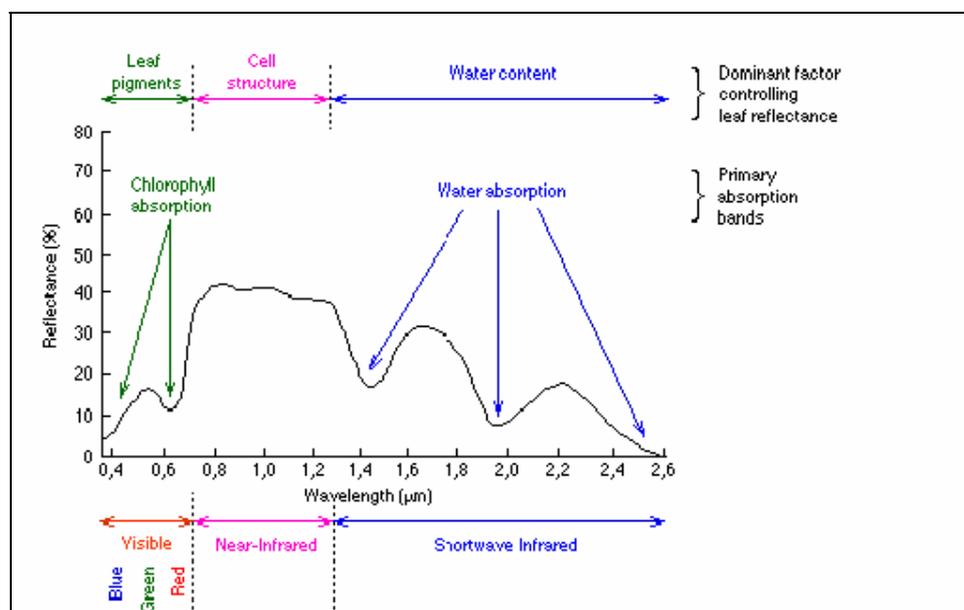


Figure 9. Propriétés optiques des feuilles (CCT)

Visible 400-700 nm : dans le visible, les propriétés optiques des feuilles sont fortement conditionnées par la pigmentation foliaire, xanthophylle, carotène, antocyanes, et tout particulièrement

les chlorophylles a et b (Guyot, 1989). On distingue deux bandes de faible réflectance et de forte absorption, dans le bleu (450 nm) et dans le rouge (670 nm, canal *XS2 SPOT*), provoquées par les chlorophylles a et b. Entre ces deux bandes, se situe un pic de réflectance autour de 550 nm (vert-jaune, canal *XS1 SPOT*).

Proche Infrarouge 700-1300 nm: dans le proche infrarouge, les propriétés optiques sont affectées par la structure interne de la feuille. On observe une faible absorption et des fortes réflectance et transmittance. Pour cette bande, les pigments foliaires et la cellulose, qui constituent les parois cellulaires, sont transparents et induisent une faible absorption (10% maximum). La réflectance et la transmittance sont pratiquement similaires. La réflectance (50% maximum) atteint un plateau dont le niveau est lié à la structure anatomique des feuilles. Celui-ci est d'autant plus élevé que les feuilles présentent une structure cellulaire irrégulière, une composition hétérogène et un nombre d'assises cellulaires important (Guyot, 1989).

Infrarouge moyen 1300-2500 nm : dans la bande infrarouge moyen, on distingue essentiellement les bandes d'absorption de l'eau, centrées sur 1450 nm, 1950 nm et 2500 nm. Les pics de réflectance sont à 1650 nm et 2200 nm (canaux 5 et 7 du satellite *LANDSAT TM*).

De nombreux facteurs (structure interne des feuilles, âge, teneur en eau, déficiences minérales et état sanitaire des feuilles) sont à l'origine des perturbations de ces propriétés (Guyot, 1989) :

1- La taille des cellules et l'épaisseur relative du parenchyme lacuneux conditionnent la réflectance dans le proche infrarouge. Les feuilles épaisses sont généralement plus réfléchissantes que les feuilles fines. Notons aussi que pour une même espèce, les feuilles de lumière sont plus épaisses et plus réfléchissantes que les feuilles d'ombre.

2- L'âge des feuilles affecte indirectement les propriétés optiques, car il influence la structure et la composition des feuilles. Ses effets sont généralement liés à des variations de la concentration chlorophyllienne. Au cours de la saison de végétation dans les forêts de feuillus, des variations phénologiques sont visibles. La diminution de la concentration chlorophyllienne à la fin de la saison de végétation a pour effet une forte diminution de l'absorption et un accroissement de la réflectance dans le jaune-vert et dans le rouge. Dans le proche infrarouge, l'évolution est uniquement visible lorsque la structure interne des feuilles se trouve modifiée. Chez les conifères, la réflectance des aiguilles diminue lorsque l'âge augmente. Cette diminution est provoquée par l'augmentation de la concentration chlorophyllienne et la structure interne des aiguilles, qui devient de plus en plus dense (Guyot *et al.*, 1989).

3- Les effets de la teneur en eau se manifestent dans toutes les bandes spectrales. Une diminution de la teneur en eau a pour effet une augmentation de la réflectance. Elle est beaucoup plus importante dans l'infrarouge moyen que dans le visible et le proche infrarouge.

4- Les déficiences minérales affectent les propriétés optiques car elles influencent la structure et la composition des feuilles. Une diminution de la nutrition azotée se traduit par une diminution de la concentration chlorophyllienne, ayant pour effet une augmentation de la réflectance dans le visible.

5- Les effets de l’état sanitaire dépendent de la nature des manifestations (dessèchement et chute foliaire, changement de pigmentation, etc.).

De nombreux travaux ont permis de construire des modèles destinés à prédire le comportement optique des feuilles suivant les caractéristiques anatomiques, les caractéristiques de surface, la teneur en eau et en pigmentation foliaire. Brièvement, on distingue globalement quatre catégories de modèles (Jacquemoud & Ustin, 2001):

(1) les modèles de lancer de rayon sont basés sur une description détaillée et une modélisation tridimensionnelle de la structure anatomique de la cellule et de la feuille et simulent la propagation de photons dans ce milieu en utilisant les lois de réflexion, de réfraction et d’absorption. Il s’agit de modèles à la fois géométriques et optiques. Tel est le cas du modèle RAYTRAN, développé par l’Institut des Applications Spatiales (Jacquemoud *et al.*, 1997).

(2) les modèles à N flux basés sur la théorie de Kubelka-Munk. Ces modèles décrivent les différents flux montants et descendants où la feuille est considérée comme un ensemble de couches absorbantes et diffusantes. Chaque couche est caractérisée par un coefficient de diffusion et un coefficient d’absorption qui sont conceptuellement associés à la composition de la feuille (cellules plus ou moins absorbantes).

(3) les modèles d’empilement de couches. La feuille est divisée en N couches, séparées par des espaces d’air. Dans cette catégorie de modèles, on cite le modèle PROSPECT (Jacquemoud & Baret, 1990). Il s’agit d’un modèle de transfert radiatif permettant de calculer la réflectance et la transmittance hémisphériques des feuilles vertes dans des longueurs d’onde allant de 400 à 2500 nm. Les paramètres d’entrée de ce modèle sont : le paramètre N caractérisant la structure anatomique foliaire (de 1 à 3), la concentration en chlorophylles a et b, la teneur en eau, en protéine, en cellulose et en lignine (figure 10).

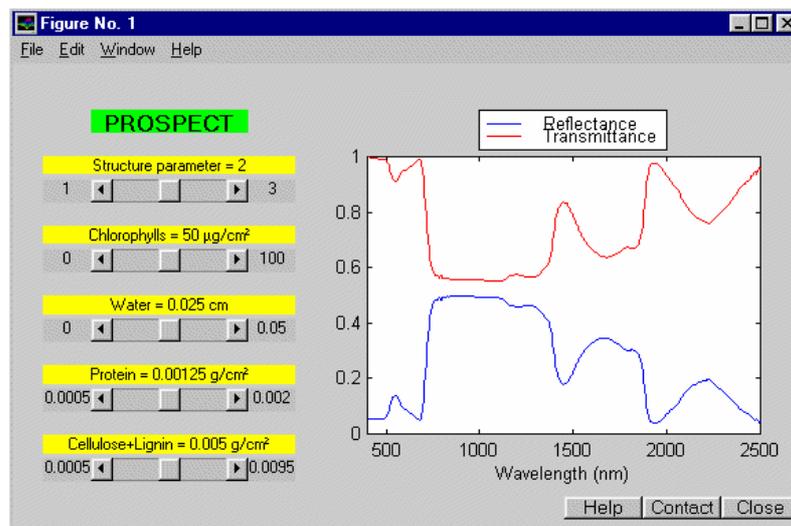


Figure10. Modèle PROSPECT de Jacquemoud & Baret (1990) (http://www.diderotp7.jussieu.fr/Led/LED_prospect_f.htm)

(4) d’autres modèles simulant le transfert radiatif au sein d’une feuille ont été aussi développés. On cite par exemple le modèle de Dawson *et al.* (1998) conçu pour simuler les propriétés optiques des aiguilles de pin fraîches ou sèches. Les entrées de ce modèle sont illustrées par la figure 11 :

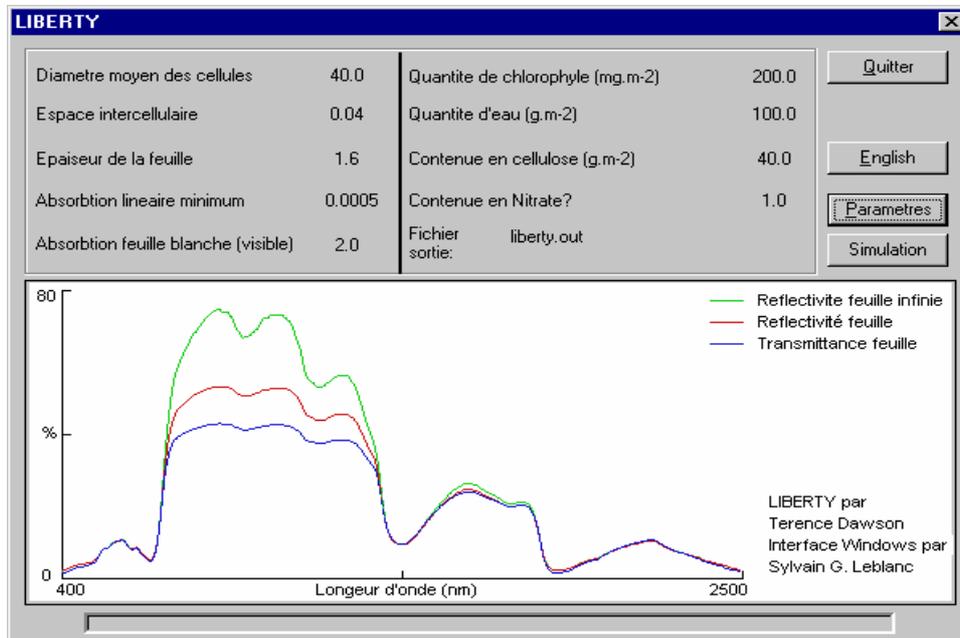


Figure 11. Modèle LIBERTY pour les aiguilles de conifères (Dawson *et al.* 1998) (http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/tekrd/rd/apps/em/beps/scale_e.html)

III.1.2. Propriétés optiques des parties corticales

Les troncs, les branches et les rameaux ont des propriétés optiques différentes de celles des feuilles. Ces organes ne présentent pas les bandes d’absorption dans le visible puisqu’ils sont dépourvus de chlorophylle. D’une façon générale, la réflectance dans le visible et le proche infrarouge croît lorsque la longueur d’onde augmente.

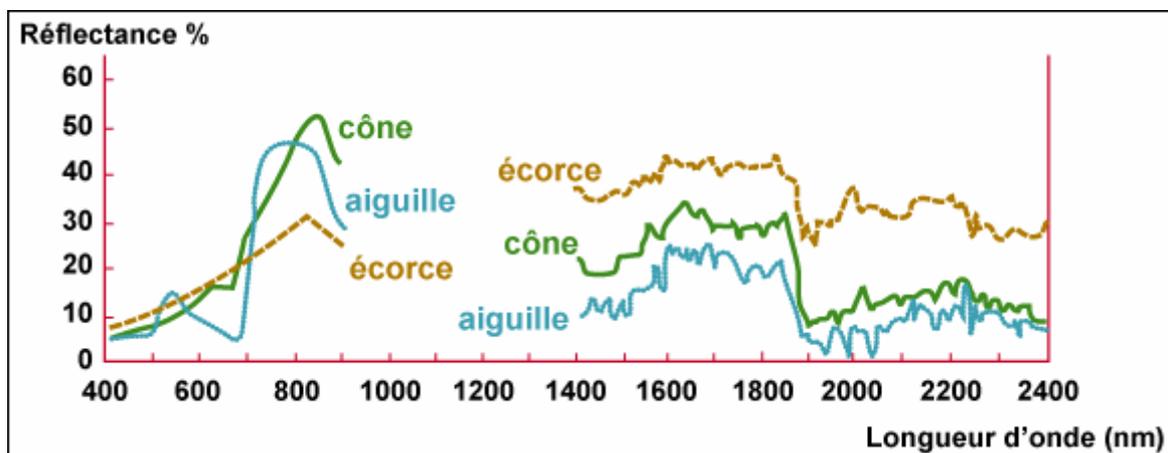


Figure 12. Propriétés optiques des différents éléments d’un sapin (*Abies Alba*) (Guyot *et al.*, 1989)

III.2. Propriétés optiques du sol

Les propriétés optiques du sol dépendent de sa composition minérale, de la teneur en eau et en matière organique et de la rugosité de surface. Les effets de la rugosité sont très importants dans toutes les bandes spectrales allant du visible à l’infrarouge thermique. Plus les particules d’un sol donné sont fines, plus la réflectance est élevée. Une structure grossière du sol, suite à des travaux agricoles tels que les labours et les hersages, se traduit par des aspérités importantes qui accentuent la diffusion et génèrent des zones d’ombre. Concernant la teneur en eau, plus le sol est sec, plus sa réflectance est importante. La diminution de la teneur en eau du sol affecte de manière similaire toutes les bandes spectrales (figure13). Etant donné que la teneur en eau est, à la fois, très variable et déterminante dans le comportement optique des sols, certains auteurs (Baret, 1986) définissent un type de sol donné par une droite, dite droite du sol, mettant en relation sa réflectance dans le proche infrarouge et le rouge (figure 14). Cette droite permet de caractériser les propriétés optiques du sol dans ces deux bandes, indépendamment de sa teneur en eau.

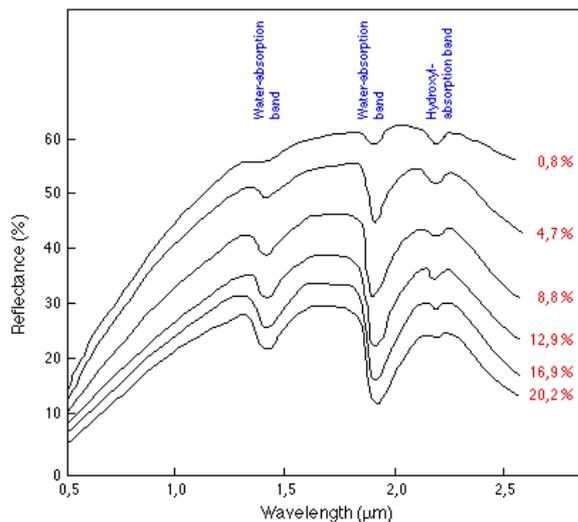


Figure 13. Courbes de réflectance d’un sol en fonction de sa teneur en eau (CCT)

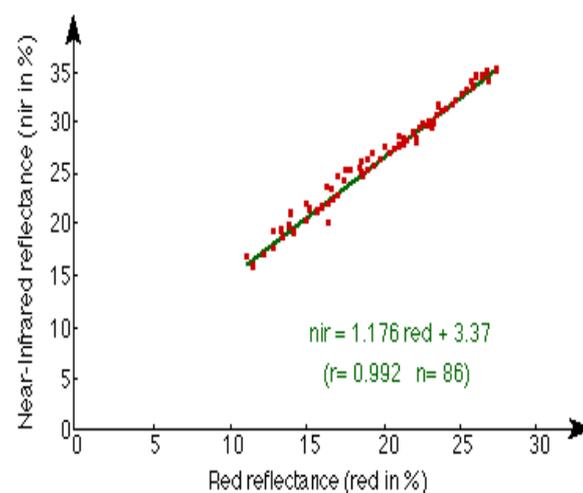


Figure 14. Droite mettant en relation le proche infrarouge et le rouge d’un sol nu

III.3 Propriétés optiques et télédétection des couverts végétaux

Le champ d’application de la télédétection pour l’étude de la végétation est très vaste. Les acquisitions ont été utilisées dans maintes études : description, identification et cartographie de la végétation et de l’occupation du sol, déforestation tropicale, indice foliaire LAI, photosynthèse et évapotranspiration, biomasse, productivité des systèmes agricoles, phénologie forestière, coupes et régénération, défoliation foliaire et dépérissement des couverts forestiers.

La télédétection des couverts forestiers pose des problèmes particuliers liés à l’hétérogénéité du milieu. En télédétection passive optique, les propriétés optiques d’un couvert forestier résultent des

effets de ses différentes composantes, photosynthétiques et corticales (branches et troncs), et du sol sous-jacent, couvert ou non par une végétation herbacée. En télédétection active en hyperfréquences, le signal radar rétrodiffusé (réfléchi dans la direction de l’antenne de réception) est essentiellement conditionné par les propriétés géométriques et la teneur en eau du couvert et du sol.

Le comportement spectral d’un couvert végétal est la résultante de la contribution de la végétation et du sol sous-jacent qui, dans le cas des forêts, peut être couvert ou non par une végétation herbacée. La contribution du sol dans la radiométrie d’un pixel dépend essentiellement du taux du couvert et de l’épaisseur de la couche végétale qui le couvre. Ces deux caractéristiques structurales du couvert peuvent être exprimées, respectivement, par le degré d’ouverture du couvert et l’indice foliaire.

Le développement du couvert s’accompagne d’une augmentation de la réflectance dans le proche infrarouge et une diminution dans le rouge (figure 15.). Ces évolutions s’atténuent à mesure que la végétation devient couvrante et épaisse. La réflectance se stabilise à un niveau correspondant à un seuil de saturation qui dépend de la bande spectrale considérée. Ainsi, dans le proche infrarouge, les feuilles sont plus transparentes au rayonnement et le niveau de saturation est atteint pour une végétation plus dense que dans le rouge. Ensuite la phase de sénescence ramène les propriétés de la réflectance vers des valeurs qui caractérisent essentiellement le sol.

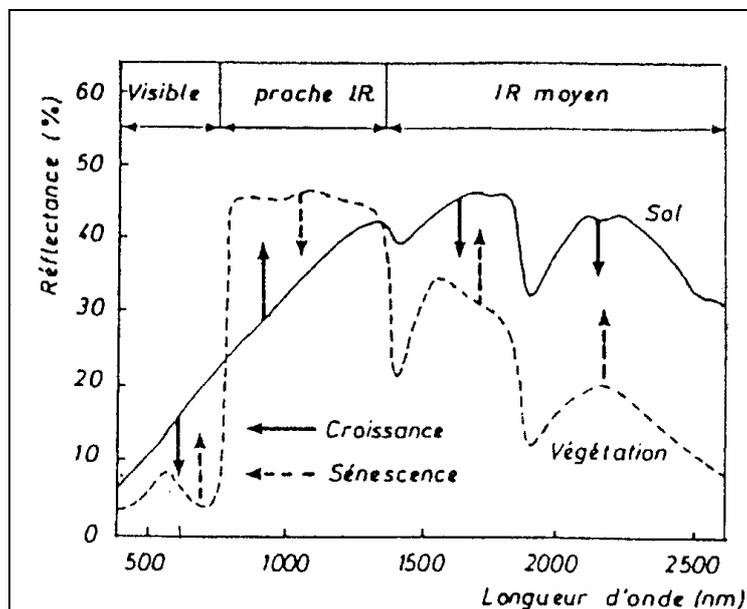


Figure 15. Représentation schématique du sens de l’évolution de la réflectance d’un couvert végétal au cours de la phase active de croissance et de la sénescence (Guyot, 1989).

Les études réalisées ne s’accordent pas sur une valeur d’indice foliaire pouvant provoquer cette saturation. En effet, d’autres facteurs, en particulier l’organisation spatiale et les propriétés géométriques du couvert végétal, sont déterminants. Ces facteurs influencent la distribution des zones

d'ombre et de lumière dans le couvert et la contribution du sol. Pour des couverts organisés en lignes, tels que les jeunes plantations de pin, la réflectance dépend de l'orientation des rangs par rapport aux rayons lumineux. Les proportions des zones d'ombre varient selon que les rayons lumineux sont parallèles ou perpendiculaires aux rangs. L'ampleur des effets de rangs sur le comportement optique du couvert dépend de la bande spectrale et du taux de couverture. Ces effets sont légèrement plus importants dans la bande visible que dans le proche infrarouge pour laquelle la végétation est plus transparente (Guyot, 1989). Un autre facteur important est la distribution des angles foliaires dont dépend fortement la contribution du sol. Pour un même indice foliaire, une distribution foliaire érectophile (feuilles majoritairement érigées) a pour effet d'augmenter la contribution du sol dans la réflectance du couvert. Dans le visible, le sol est généralement plus réfléchissant que la végétation, l'augmentation de sa contribution se traduit par une augmentation de la réflectance de l'ensemble du couvert. Dans le proche infrarouge, la tendance est inversée.

L'importance de la géométrie du couvert dans sa réflectance se manifeste aussi dans les effets dus à la rugosité de la couronne supérieure des arbres car celle-ci influence la distribution des zones d'ombre et de lumière. Notons enfin que d'autres facteurs, tels que les attaques parasitaires, un déficit hydrique ou le vent, peuvent affecter fortement la réflectance du couvert.

III.4 Propriétés optiques des surfaces d'eau libre

Atteignant une surface d'eau libre, une grande partie du rayonnement incident est réfléchi d'une manière spéculaire comme sur un miroir et ceci dans toutes les longueurs d'onde du spectre visible et infrarouge proche et moyen. La partie absorbée est rapidement atténuée dans le volume suite aux phénomènes de diffusion et d'absorption. Sur les images de télédétection, les surfaces d'eau apparaissent dans des teintes sombres et se comportent comme si elles étaient des corps noirs qui absorbent tout le rayonnement qu'ils reçoivent. La réflectance des surfaces d'eau libre dépendent bien évidemment de la concentration des substances dissoutes et en suspension. D'une manière générale, la réflectance des surfaces d'eau libre décroît rapidement du visible à l'infrarouge. On peut admettre qu'elle est de quelques % dans le visible et pratiquement nulle dans l'infrarouge proche et moyen.

IV. Indices de végétation radiométriques

Sur une image de télédétection, les données radiométriques sont appelées comptes numériques (CN) car elles sont exprimées en niveaux de gris allant de 0 à 255 (image dite en 8 bits). Ces comptes numériques peuvent être transformés en luminance L (en $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$) ou en réflectances ρ (en % du rayonnement incident). Le passage des comptes numériques aux luminances et aux réflectances est une opération souvent compliquée car elle nécessite l'emploi d'équations de calibration propres au capteur et de modèles de corrections atmosphériques. Les données radiométriques peuvent être utilisées sous forme de canaux bruts ou d'indices combinant les canaux rouge et proche infrarouge, respectivement XS2 et XS3 du satellite SPOT, TM3 et TM4 du satellite LANDSAT Thematic Mapper,

canaux 1 et 2 du satellite *NOAA-AVHRR*. Ces indices sont mathématiquement exprimés de manière à utiliser le contraste important entre ces deux bandes. Ce contraste résulte de la forte absorption du rayonnement dans le rouge et de la forte réflectance dans le proche infrarouge (figure 9).

La complexité structurale des couverts et la multitude des facteurs externes perturbateurs (géométrie de visée et élévation solaire, effets atmosphériques et propriétés optiques du sol) sont à l’origine de la multiplicité des indices. Ils sont classés en deux catégories (Baret & Guyot, 1991 ; Goel & Quin, 1994):

1- Indices caractérisés par une pente : RVI (Ratio Vegetation Index), NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index), etc.

2- Indices caractérisés par une distance : WDV (Weighted Difference Vegetation Index), PVI (Perpendicular Vegetation Index).

Ces différents indices correspondent généralement à des relations géométriques dans le plan rouge / proche infrarouge (figure 16.). Bien que mathématiquement différents, certains indices véhiculent les mêmes informations spectrales et discriminent de manière équivalente les couverts végétaux.

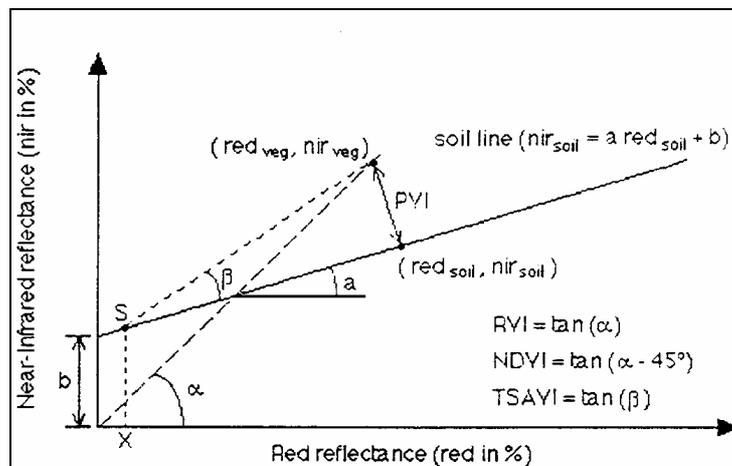


Fig. 16. Indices de végétation radiométriques (d’après Baret *et al.*, 1989a)

Si l’on désigne par ρ_{pir} et ρ_r les réflectances dans les deux bandes proche infrarouge et rouge, les indices les plus fréquentes sont :

DVI : Difference Vegetation Index

$$DVI = \rho_{pir} - \rho_r \quad (1)$$

RVI : Ratio Vegetation Index, appelé aussi Simple Ratio SR

$$RVI = \rho_{pir} / \rho_r \quad (2)$$

Il correspond à la pente d’une droite reliant l’origine (0,0) et un point (ρ_r, ρ_{pir}) correspondant à la végétation.

NDVI : Normalized Difference Vegetation Index, appelé aussi Normalized Difference ND

$$NDVI = (\rho_{pir} - \rho_r) / (\rho_{pir} + \rho_r) \quad (3)$$

Le NDVI et le RVI peuvent s’exprimer explicitement l’un en fonction de l’autre:

$$NDVI = (RVI - 1) / (1 + RVI) = (\tan(\alpha) - 1) / (\tan(\alpha) + 1) = \tan(\alpha - 45^\circ).$$

Ces deux indices contiennent les mêmes informations spectrales. Le DVI est très rarement utilisé, car il ne présente pas les avantages de NDVI et de RVI. Le rapport entre canaux permet de minimiser les effets de conditions d’éclairage et de la géométrie de visée, les effets atmosphériques et les erreurs de calibration (Baret & Guyot, 1991 ; Bonn & Rochon, 1992). Bien qu’il ne soit pas toujours approprié, le NDVI est de loin l’indice de végétation le plus utilisé.



Fig.17. Composition colorée RVB

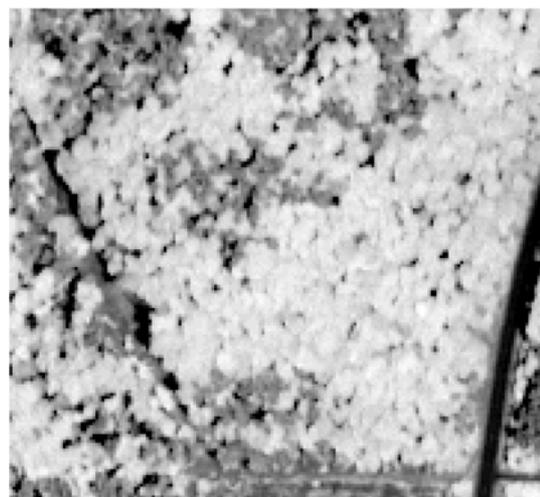


Fig.18. Image NDVI

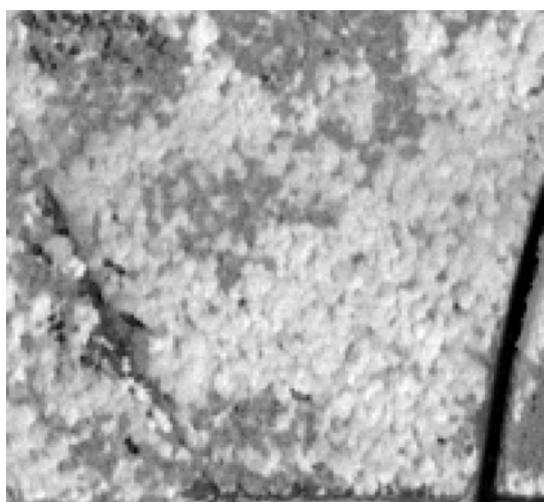


Fig.19. Image DVI



Fig.20. Image RVI

Sur l’image NDVI (figure 18.), les espèces feuillues apparaissent dans des teintes claires et correspondent à des fortes valeurs de l’indice NDVI (0.6-0.7 en moyenne). Les résineux apparaissent dans des teintes plus foncées (0.4-0.5 en moyenne). Les sols nus et les surfaces d’eau libre apparaissent dans des teintes très foncées et correspondent à des valeurs de l’indice faibles ou négatives.

WDVI : Weighted Distance Vegetation Index

$$WDVI = \rho_{pir} - a \rho_r \quad (4)$$

PVI : Perpendicular Vegetation Index

$$PVI = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} (\rho_{pir} - a\rho_r - b) = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} (WDVI - b) \quad (5)$$

Les deux paramètres a et b sont respectivement la pente et l’ordonnée à l’origine de la droite du sol (figure 16).

Le PVI représente la distance perpendiculaire entre un point (ρ_r, ρ_{pir}) représentant la végétation et la droite du sol (figure 16). Théoriquement le PVI est pratiquement nul pour un sol nu, négatif pour l’eau et positif pour la végétation.

Le PVI et le WDVI contiennent les mêmes informations spectrales.

GEMI : Global Environment Monitoring Index

$$GEMI = [\eta (1 - 0.25\eta) - (\rho_r - 0.125)] / (1 - \rho_r) \quad (6)$$

$$\eta = [2 (\rho_{pir}^2 - \rho_r^2) + 1.5\rho_{pir} + 0.5\rho_r] / (\rho_{pir} + \rho_r + 0.5)$$

Cet indice est théoriquement construit pour minimiser à la fois les effets du sol et atmosphériques.

SAVI : Soil Adjusted Vegetation Index

$$SAVI = [(\rho_{pir} - \rho_r) (1+L)] / (\rho_{pir} + \rho_r + L) \quad (7)$$

L est un paramètre d’ajustement introduit afin de minimiser les effets du sol. L varie de 0 à l’infini. Pour L = 0, le SAVI correspond au NDVI. Lorsque L tend vers + ∞, le SAVI tend vers le DVI (Baret & Guyot, 1991). La valeur de L doit être théoriquement déterminée pour chaque type de sol. Pour des densités intermédiaires, le meilleur ajustement est obtenu pour une valeur de L = 0,5. Cette valeur semble satisfaisante pour aborder la plupart des situations (Baret & Guyot, 1991).

TSAVI : Transformed Soil Adjusted Vegetation Index

$$\text{TSAVI} = a (\rho_{\text{pir}} - a\rho_r - b) / [a \rho_{\text{pir}} + \rho_r - a b + \chi (1+a^2)] \quad (8)$$

Le TSAVI correspond à la tangente de l'angle β (figure 16.). Il s'agit d'une amélioration du PVI. La valeur de χ est déterminée pour minimiser les effets du sol. Elle est généralement prise égale à 0,08. Le TSAVI est = 0 pour un sol nu et proche de 0,7 pour des couverts très denses. Pour $a = 1$ et $b = 0$, le TSAVI est très proche du NDVI et du SAVI pour $L = 0$.

Deux autres indices ont été introduits :

SAVI1 où le paramètre L de l'équation 4.7 est pris égal à :

$$L = 1 - 2.12 \text{NDVI} \text{WDVI} \quad (9)$$

$$\text{SAVI2} = \rho_{\text{pir}} + 0.5 - [(\rho_{\text{pir}} - 0.5)^2 - 2(\rho_{\text{pir}} - \rho_r)]^{1/2} \quad (10)$$

Les indices de végétation ont été utilisés dans de nombreux travaux comme variables corrélées à certaines variables environnementales tels que l'état sanitaire, âge, taux de couverture et indice foliaire des couverts végétaux. L'indice foliaire est l'un des principaux paramètres investigués à l'aide des indices de végétation. De nombreuses relations entre l'indice foliaire LAI et les indices de végétation radiométriques ont été établies : Peterson *et al.* (1987) entre le LAI et le RVI (Ratio Vegetation Index) sur des forêts de conifères à partir des données du satellite *LANDSAT Thematic Mapper* ($\text{SR} = 1,92 \text{LAI}^{0,583}$, $R^2 = 0,91$) ; Jappiot *et al.* (1990) entre le LAI et le NDVI sur des châtaigniers à partir des données *SPOT* ($\text{NDVI} = 0,165 \text{LAI}^{0,1058}$, $R^2 = 0,98$) ; Nemani & Running (1989) entre le LAI et le NDVI ($\text{NDVI} = 0,35 \text{Ln}(\text{LAI}/1.652)$, $R^2 = 0,80$) sur des forêts de conifères à partir des données du satellite *LANDSAT Thematic Mapper* ; Soudani (1999) sur des forêts de chênes à partir des données *SPOT* ($\text{NDVI} = 0,1326 \text{Ln}(\text{LAI}) + 0,3624$, $R^2 = 0,86$).

Les relations empiriques entre les indices de végétation radiométriques VI et l'indice foliaire LAI sont généralement de type exponentiel. Elles s'écrivent sous la forme suivante (Baret & Guyot, 1991) (figure 21) : $\text{VI} = \text{VI}_\infty + (\text{VI}_s - \text{VI}_\infty) \exp(-K_{\text{VI}} \text{LAI})$ (13)

VI étant un indice de végétation radiométrique tels que le NDVI, le SAVI, ... etc. Il s'agit d'un modèle de type "loi d'extinction" de Beer-Lambert où VI_s est l'indice de végétation radiométrique pour un sol nu ; VI_∞ est une valeur asymptotique traduisant une saturation de l'indice de végétation radiométrique lorsque l'indice foliaire est très grand ; K_{VI} est un coefficient positif contrôlant la différentielle de la relation $\text{VI}(\text{LAI})$. Le tableau 2 donne quelques estimations de ces différents coefficients pour des peuplements feuillus tempérés.

	NDVI	SAVI	TSAVI
K_{VI}	0.5	0.49	0.45
VI_{∞}	0.71	0.6	0.6
VI_s	0.14	0.13	0.01

Tab.2. Coefficients des modèles $VI=f(LAI)$ pour des peuplements de feuillus (d’après Grégoire-Himmler, 1995).

Les paramètres VI_{∞} , K_{VI} dépendent des conditions d’éclaircement, de la géométrie de visée et de l’inclinaison foliaire. Pour un angle de visée et un angle solaire fixes, K_{VI} diminue lorsque l’inclinaison des feuilles augmente (Baret & Guyot, 1991). VI_{∞} est peu affecté par l’inclinaison foliaire et les légères variations observées dépendent de l’indice de végétation radiométrique considéré. Baret & Guyot (1991) notent que le TSAVI est insensible, PVI et SAVI diminuent et NDVI augmente, lorsque l’inclinaison des feuilles augmente.

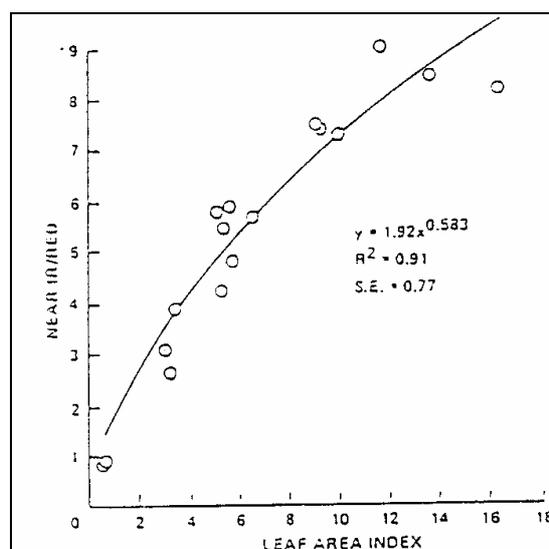


Fig.21. Relation LAI-RVI (PIR/R) sur une forêt de conifères (Peterson *et al.*, 1987)

Le plateau atteint par la relation d’ajustement pour les fortes valeurs de LAI est variable. Il est atteint pour une valeur LAI de 8 pour le TSAVI sur une culture de blé (Baret *et al.*, 1989b), d’environ 7 pour le NDVI sur une culture de blé (Asrar *et al.*, 1984), d’environ 11 pour le NDVI sur des forêts matures de conifères (Nemani & Running, 1989).

Les performances des divers indices radiométriques pour l’estimation de l’indice foliaire ont été évaluées selon les caractéristiques structurales propres au couvert végétal (effets du sol sous-jacent,

de la distribution des angles d’inclinaison foliaire, de l’hétérogénéité spatiale du couvert), mais aussi selon leur sensibilité aux facteurs externes, tels que les conditions d’éclairement, la géométrie de visée et les effets atmosphériques (Baret & Guyot, 1991). Les effets du sol sont de loin les plus indésirables et de nombreux indices sont essentiellement conçus pour tenter de les minimiser. Les effets des autres facteurs, en particulier les effets atmosphériques, sur les performances des indices de végétation radiométriques ont été abordés par de nombreux auteurs (Myneni & Asrar, 1994 ; Pinty *et al.*, 1993). Les indices de végétation radiométriques, déterminés directement à partir des données satellitaires brutes, diffèrent de ceux pouvant être obtenus au sommet du couvert après corrections atmosphériques.

V. Apports de la télédétection en hyperfréquences RADAR pour l’étude de la structure des couverts forestiers

L’imagerie radar consiste à émettre des impulsions d’énergie en hyperfréquences vers les divers éléments du paysage et à enregistrer les échos. Une information, équivalente à la réflectance dans les images optiques, est extraite des images radar. Elle correspond à une diffusion moyenne (differential scattering cross-section per unit area) ou coefficient de retrodiffusion noté σ^0 . Cette quantité est théoriquement adimensionnelle mais on l’exprime en décibels. Le signal est émis par une antenne fixée sur le côté de la plate-forme. L’antenne illumine une bande perpendiculaire à l’axe du vol. De ce fait, on appelle un tel système un radar latéral, plus connu sous le nom de SLAR (Side Looking Airborn Radar). On en distingue deux types : (1) Le radar à ouverture réelle (Real Aperture Radar) ; (2) Le radar à ouverture synthétique ou encore radar à synthèse d’ouverture SAR (Synthetic Aperture Radar). Une description de ces deux systèmes est donnée par Bonn & Rochon (1992). Notons seulement que le SAR a pour principal avantage de permettre une meilleure résolution spatiale azimutale.

Le tableau 3 résume les longueurs d’ondes utilisées en télédétection radar :

Bande	Fréquence (GHz)	Longueur d’onde (cm)
P	0.3-1	30-100
L	1-2	15-30
S	2-4	7.5-15
C	4-8	3.75-7.5
X	8-12.5	2.4-3.75
Ku (J)	12.5-18	1.67-2.4
K	18-27	1.1-1.67
Ka (Q)	27-40	0.75-1.1

Tab.3. Longueurs d’ondes utilisées en télédétection radar (Bonn & Rochon, 1992)

La télédétection active en hyperfréquences consiste à établir des relations entre le coefficient de retrodiffusion et les grandeurs biophysiques. Pour un couvert forestier, la retrodiffusion résulte des actions combinées du volume végétal, du sol sous-jacent et des réflexions multiples sol/végétation.

La végétation agit par sa structure (forme, dimensions, distribution, orientation et inclinaison des feuilles, branches et troncs) et sa biomasse (Ulaby *et al.*, 1982). Le signal radar est aussi fortement lié à la teneur en eau du sol (Engman, 1991). L'image résultante est caractérisée par de très grandes variations des niveaux de gris entre les zones à forte retrodiffusion (forêts) et les zones à retrodiffusion faible (surfaces d'eau libres). C'est pourquoi elles sont souvent enregistrées en format 16 bits (65536 niveaux de gris) alors que la plupart des images dans le domaine optique du spectre sont en format 8 bits (256 niveaux de gris). Une autre caractéristique de l'image radar est son aspect poivre et sel du à l'effet de speckle (chatoiement). Ce phénomène est un bruit du à la nature cohérente de l'onde radar.

Une image RADAR, telle que l'image ERS-1 de la figure 6.2., montre que les surfaces d'eau libre ressortent dans des teintes sombres correspondant à une faible rétrodiffusion. Les surfaces d'eau se comportent comme des surfaces lisses ayant pour effet de provoquer une réflexion spéculaire (comportement comparable à un miroir) dans une direction opposée à la direction d'incidence. Signalons que la réponse des surfaces d'eau libre est fortement instable car elle est liée aux conditions du vent. Les couverts forestiers présentent au contraire une forte retrodiffusion et apparaissent dans des teintes claires. Ceci est lié à la complexité structurale du milieu (troncs, branches et feuilles) engendrant des phénomènes de réflexion multiple. Les troncs et les branches constituent des surfaces très réfléchissantes. A un degré moindre, l'hétérogénéité et les différents âges du peuplement traduisent une irrégularité du couvert et donc un effet de rugosité. Signalons aussi que certaines surfaces telles que les espaces urbains ressortent dans des teintes claires. Ces surfaces sont fortement hétérogènes. Les bâtiments, voiries et parkings sont des forts reflecteurs radar.

Très peu de travaux ont porté sur l'estimation de l'indice foliaire à partir des hyperfréquences radar. La plupart de travaux ont concerné les cultures. Une synthèse bibliographique a été réalisée par Champion *et al.* (1996). Prévot *et al.* (1996) donnent une expression de la rétrodiffusion radar en fonction de l'indice foliaire et la teneur en eau de la végétation et du sol.

Conclusion

L'emploi des images de télédétection pour la cartographie de l'occupation du sol, zones humides et l'estimation de certaines variables environnementales tels que l'indice foliaire, le rayonnement utile à la photosynthèse, biomasse, etc. demeure encore une affaire de spécialistes. Les étapes préalables avant l'exploitation de l'information radiométrique sont relativement longues et fastidieuses. En effet, les images acquises par les systèmes spatiaux ou aéroportés ne sont pratiquement jamais

superposables à une carte et il est nécessaire de corriger géométriquement les données. Les effets atmosphériques doivent aussi être pris en compte et corrigés. Cette étape est fondamentale pour des études multi-temporelles du couvert. La télédétection a connu ces dernières années un essor considérable en raison de l'intérêt de plus en plus croissant accordé aux écosystèmes terrestres et les échanges de masse et d'énergie dans le système lithosphère-biosphère-atmosphère. Des images sont disponibles par milliers sur toutes les surfaces du globe.

Remarque : une grande partie de ce document figure déjà dans le livre : **Mesures de l'indice foliaire en forêt** – Bréda Nathalie., Soudani Kamel, Bergonzini Jean-Claude- 157 pages – Edition ECOFOR- ISBN 2-914770-02-2.

Bibliographie

Ouvrages

Bonn F., Rochon G., 1992
Précis de télédétection
Volume 1, Principes et méthodes
Presses de l'Université du Québec/AUPELF

Bréda N., Soudani K., Bergonzini J-C, 2003
Mesure de l'indice foliaire en forêt
157 pages - Edition ECOFOR – ISBN 2-914770-02-2

Guyot G., 1989
Signatures spectrales des surfaces naturelles. Collection télédétection N°5, 178 p.

Articles et thèses scientifiques

Asrar G., Fuchs M., Kanemasu E. T., Hatfield J. L., 1984
Estimating absorbed photosynthetic radiation and leaf area index from spectral reflectance in Wheat.
Agronomy Journal, 76, 300-306.

Baret F., 1986
Contribution au suivi radiométrique de cultures de céréales. Thèse de doctorat, Université de Paris Sud, 182p.

Baret F., Guyot G., Major D., 1989a
TSAVI : a vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. 12th
Canadian Symposium on Remote Sensing and IGARSS'90, Vancouver, Canada, 3, 1355-1358.

Baret F., Guyot G. and Major D., 1989b
Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria, 43, 241-256.

Baret F., Guyot G., 1991
Potentials and limits of vegetation indices for LAI and PAR assessment Remote Sensing of Environment, 35, 161-173.

Champion I., Wigneron J.P, Bréda N., 1996
Variables de fonctionnement issus des données de télédétection micro-onde.
Actes de l'Ecole-Chercheurs INRA en BIOCLIMATOLOGIE, Le croisic, 25-29 Mars, 1996. Tome 2 :
Du couvert végétal à la région, pp.145-167. INRA- Service des Editions Route de Saint-Cyr F78026
versailles Cedex.

Dawson T.P., Curran P.J., Plummer S.E., 1998

LIBERTY - Modelling the effects of leaf biochemistry on reflectance spectra. *Remote Sensing Environ.*, 65, 50-60.

Engman E.T., 1991

Applications of microwave Remote Sensing of soil moisture for water resources and Agriculture. *Remote Sens. Environ.*, 35, 213-226.

Guyot G., Guyon D., Riom J., 1989

Factors affecting the spectral responses of forest canopies : A review. *Geocarto International*, 3, 3-17.

Jacquemoud S., Govaerts Y., Ustin S.L., Frangi J.P., 1997

Three dimensional representation of leaf anatomy - Application of photon transport, in Proc. 7th Int. Sym. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Courchevel (France), 7-11 April 1997, A.A. Balkema (Rotterdam, Netherlands), pp.295-302.

Jacquemoud S., Baret F., 1990

PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sens. Environ.*, 34, 75-91.

Jacquemoud S., Ustin S.L., 2001

Leaf optical properties: A state of the art, in Proc. 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing, Aussois (France), 8-12 January 2001, CNES, pages 223-232.

Jappiot M., Haak H, Lacaze B., 1991

Etude par télédétection des variations inter-annuelles de l'indice foliaire d'un taillis de châtaigniers dans les Cevennes. *Bul.Soc.Ét Sc.Nat.Nimes et Gard-1995-Tome60*, 22-29.

Nemani R.R., Running S.W., 1989

Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-infrared AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28(4), 276-284.

Peterson D.L., Spanner M.A., Running S.W. and Teuber K.B., 1987

Relationship of Thematic Mapper Simulator data to leaf area index of temperate coniferous forest. *Remote Sensing Environ.*, 22, pp 323-341.

Prévot L., Doussan C., Clastre, P., 1996

Les mesures de télédétection dans le domaine des micro-ondes actives. Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie. Le Croisic, 25-29 Mars, 1996. Tome 2 : Du couvert végétal à la région, pp. 131-144. INRA- Service des Editions Route de Saint-Cyr F78026 Versailles Cedex.

Raffy M., Soudani K., Trautmann J.: On the variability of the LAI of homogeneous covers with respect to the surface size. *Sous presse à International Journal of Remote Sensing.*

Raffy M., Soudani K. : *On the LAI of mixed soils-forests regions.* *Sous presse à International Journal of Remote Sensing.*

Soudani K., 1999

Etude de la structure et de la dynamique spatiale et temporelle des canopées forestières : approche par méthodes optiques indirectes et par télédétection, Thèse de Doctorat de l'Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1999, 227 pp.

Ulaby F.T., Moore R. K., Fung A.K., 1982

Microwave Remote Sensing : active and passive. Addison-Wesley, Reading, MA, 1064 pp.