Les bases physiques

Télédétection

Spectre électromagnétique

Les perturbations atmosphériques

L'infrarouge et les hyperfréquences

Infrarouge thermique

Hyperfréquences

** Propriétés utilisées en hyperfréquences

** Caractéristiques d'antenne radar

** Rugosité et signal rétrodiffusé

Les Vecteurs

Systèmes aéroportés

Satellites

** Orbitologie

** Satellites d'observation de la Terre

** Système SPOT

** Série LANDSAT

** Différents systèmes d'observation de la Terre

Les Capteurs

Capteurs à balayage

Capteurs à barrettes

Les Comportements spectraux

Facteur de réflectance

Comportements spectraux : végétation

** Indices de végétation

Comportements spectraux : sols

** Faisceau de droites de sols

Comportements spectraux : eau, neige

Des changements d'échelle

Le traitement des données

Compositions colorées

** Calendrier agricole

Interprétation visuelle

Classifications

** Différentes étapes d'une classification assisté

** Qualité des zones d'apprentissage

Evaluation des résultats

Qualité sémantique d'une classification

** Matrice de confusion

** Coefficient Kappa

Validation d'une classification

Exemple d'évaluation d'une classification

Index

Télédétection

La télédétection est "*l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer des caractéristiques physiques et biologiques d'objets par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci*" (J.O. du 11 décembre 1980).

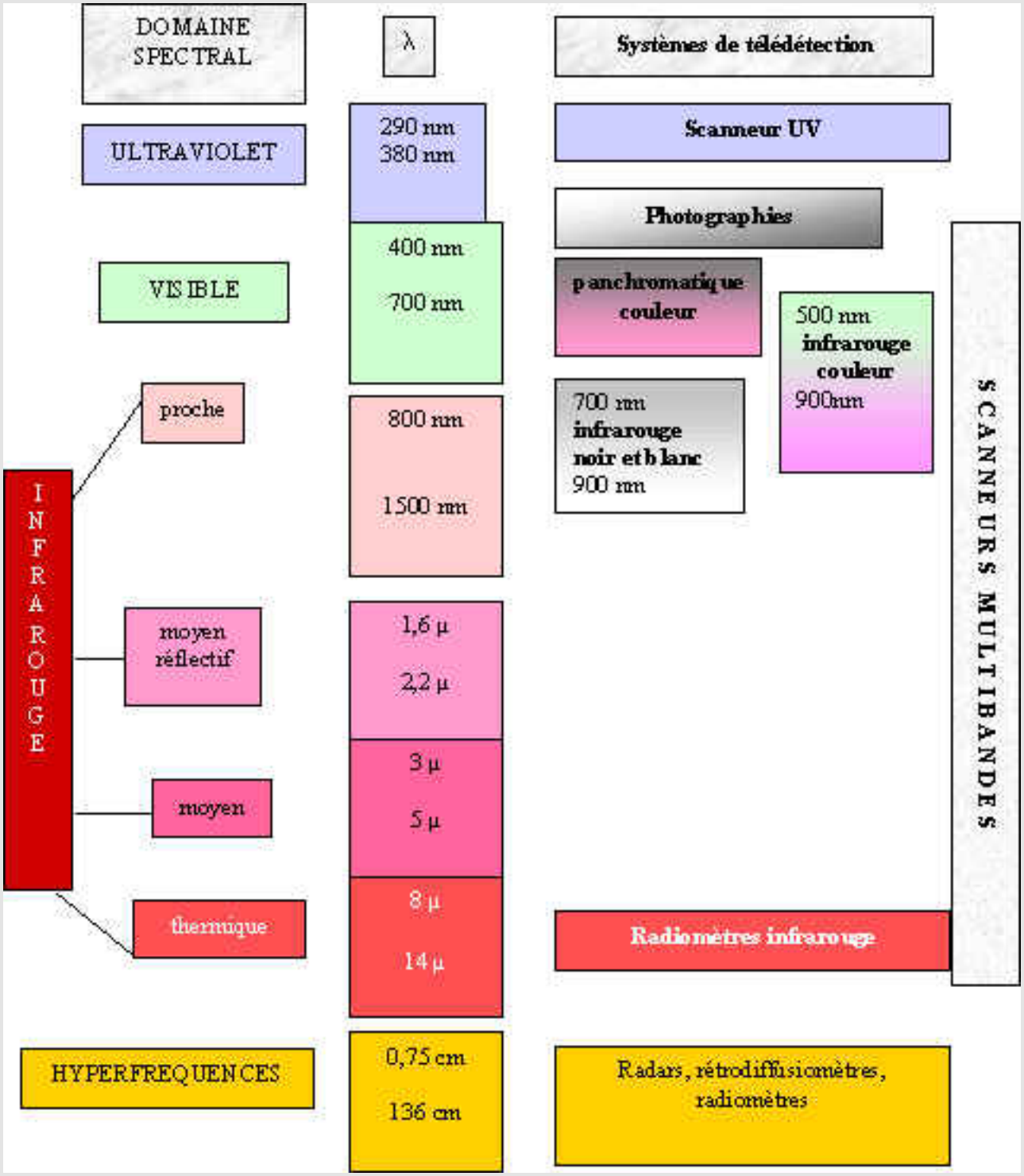
Elle utilise les propriétés d'émission ou de rayonnement des ondes électromagnétiques par les objets.

La télédétection est le plus souvent appliquée à l'observation de la Terre, mais peut aussi concerner d'autres planètes, étoiles, galaxies...

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **529 pages plus CD Rom**.

Spectre électromagnétique

Compte tenu des perturbations atmosphériques, seules, des portions du spectre électromagnétique sont utilisées en télédétection. Selon les domaines spectraux on utilise des capteurs photographiques ou non (scanneurs).

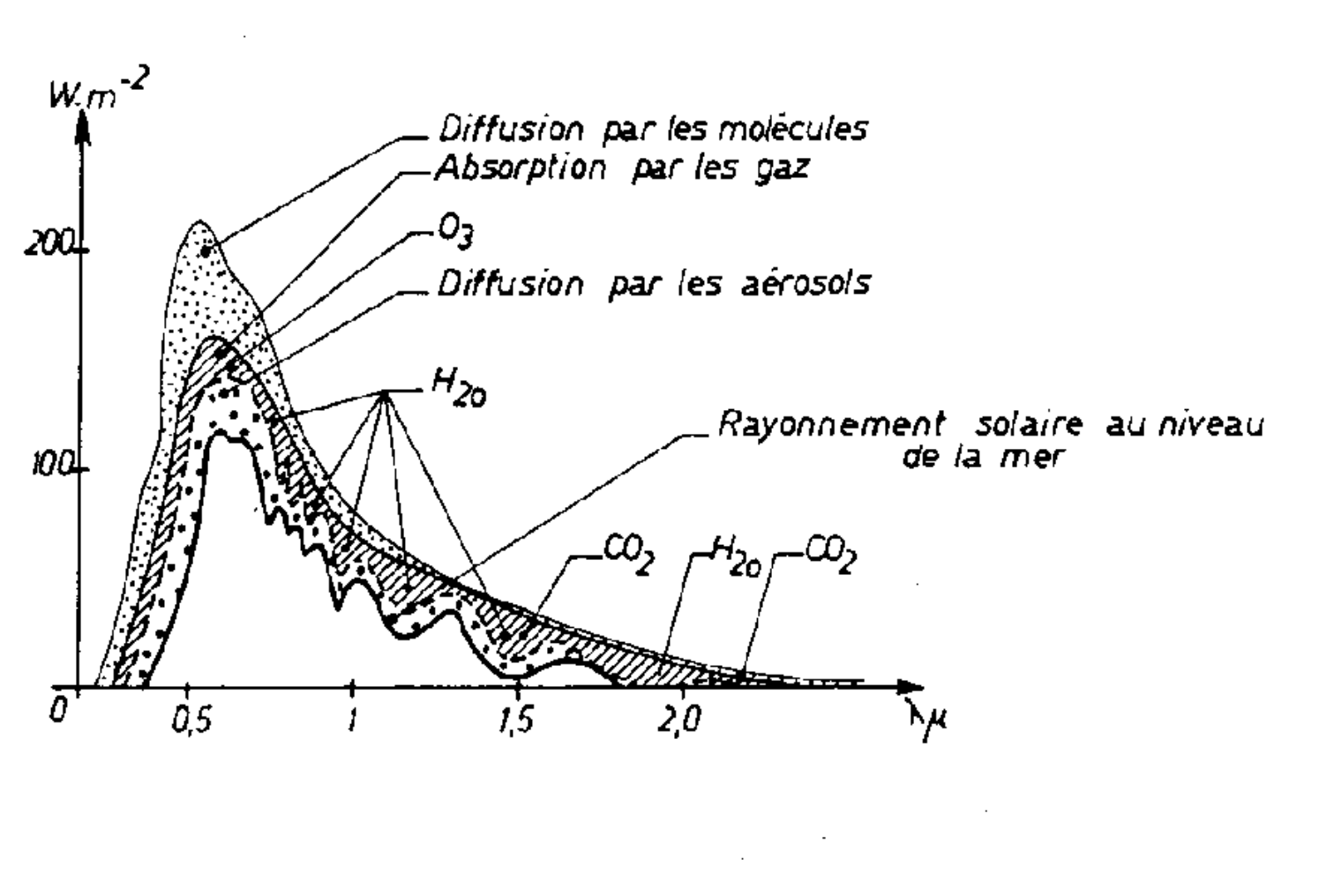


Les perturbations atmosphériques

L'atmosphère ne laisse passer le rayonnement solaire que dans un nombre limité de bandes spectrales appelées fenêtres atmosphériques. Si l'atmosphère est relativement transparente dans le visible et présente une large fenêtre atmosphérique dans l'infrarouge (de 8 à 14µm), elle est opaque de 22µm à 1mm, ce qui explique la non utilisation de cette portion de spectre en télédétection. Dans les hyperfréquences, l'atmosphère est transparente au-delà de 3cm, mais devient opaque pour des longueurs d'onde supérieures à 30m, pour lesquelles il y a interaction avec l'ionosphère.

L'absorption atmosphérique

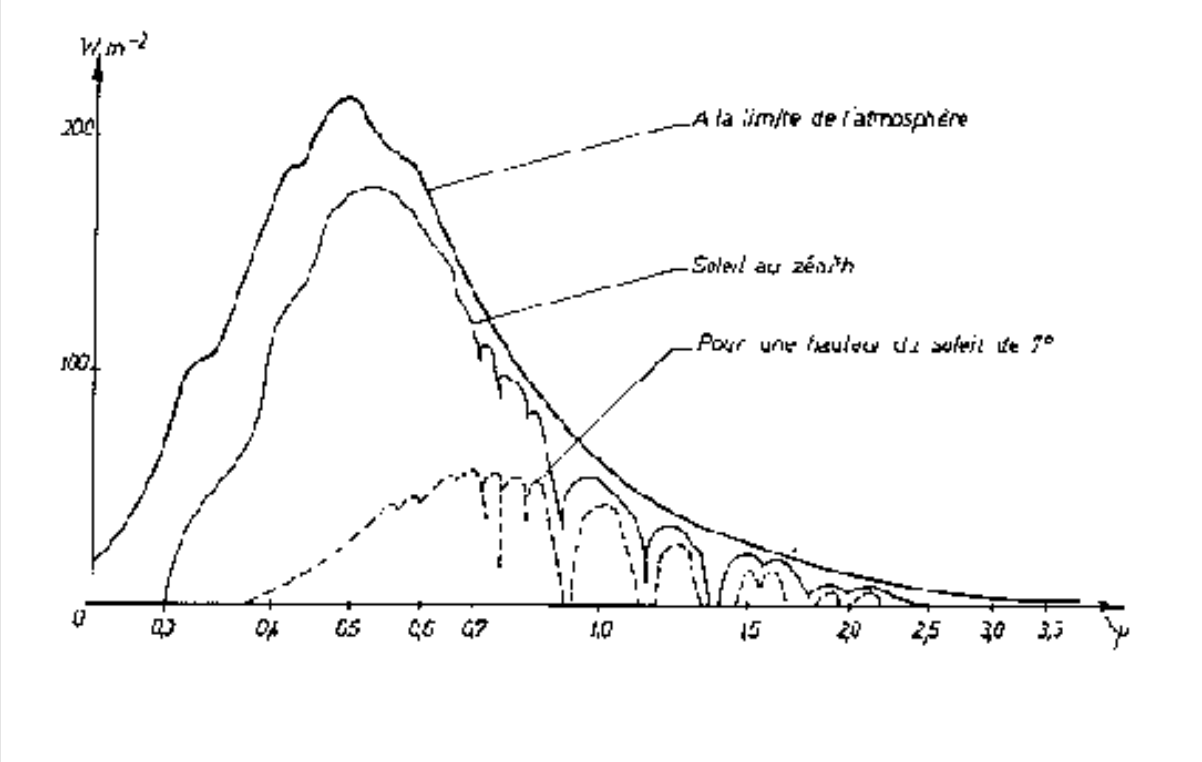
Les gaz de l'atmosphère absorbent une partie du rayonnement solaire.



Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire direct *(d'après Perrin de Brichambaut, 1985)*

L'ozone absorbe les longueurs d'onde en deçà de 290 nm et provoque une faible atténuation à 600nm. L'oxygène a une bande d'absorption intense mais très étroite à 760nm. Du proche infrarouge à l'infrarouge thermique, la vapeur d'eau, le gaz carbonique et le méthane sont principalement responsables de l'absorption atmosphérique.

Pour une faible hauteur zénithale du soleil, l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire est grande, le rayonnement solaire direct est faible.



Influence de la hauteur du Soleil sur la répartition spectrale du rayonnement solaire direct au sol *(d'après Perrin de Brichambaut, 1985)*

On constate une diminution plus importante du rayonnement pour les bandes spectrales violet et bleu que pour les bandes orange et rouge du visible.

La diffusion atmosphérique

Ce phénomène correspond à l'action des molécules et particules (gouttelettes d'eau, poussières, fumées...) sur les longueurs d'onde (λ). Le diamètre *d* des particules est de :

1 à 500 nm	noir de charbon, sulfates, nitrates...
0,5 à50 µm	fumées industrielles, brouillard, poussières...
10 à 100 µm	pollens, cendres...
20 à 300 µm	nuages, brume...
0,5 à 5 mm	gouttes de pluie.

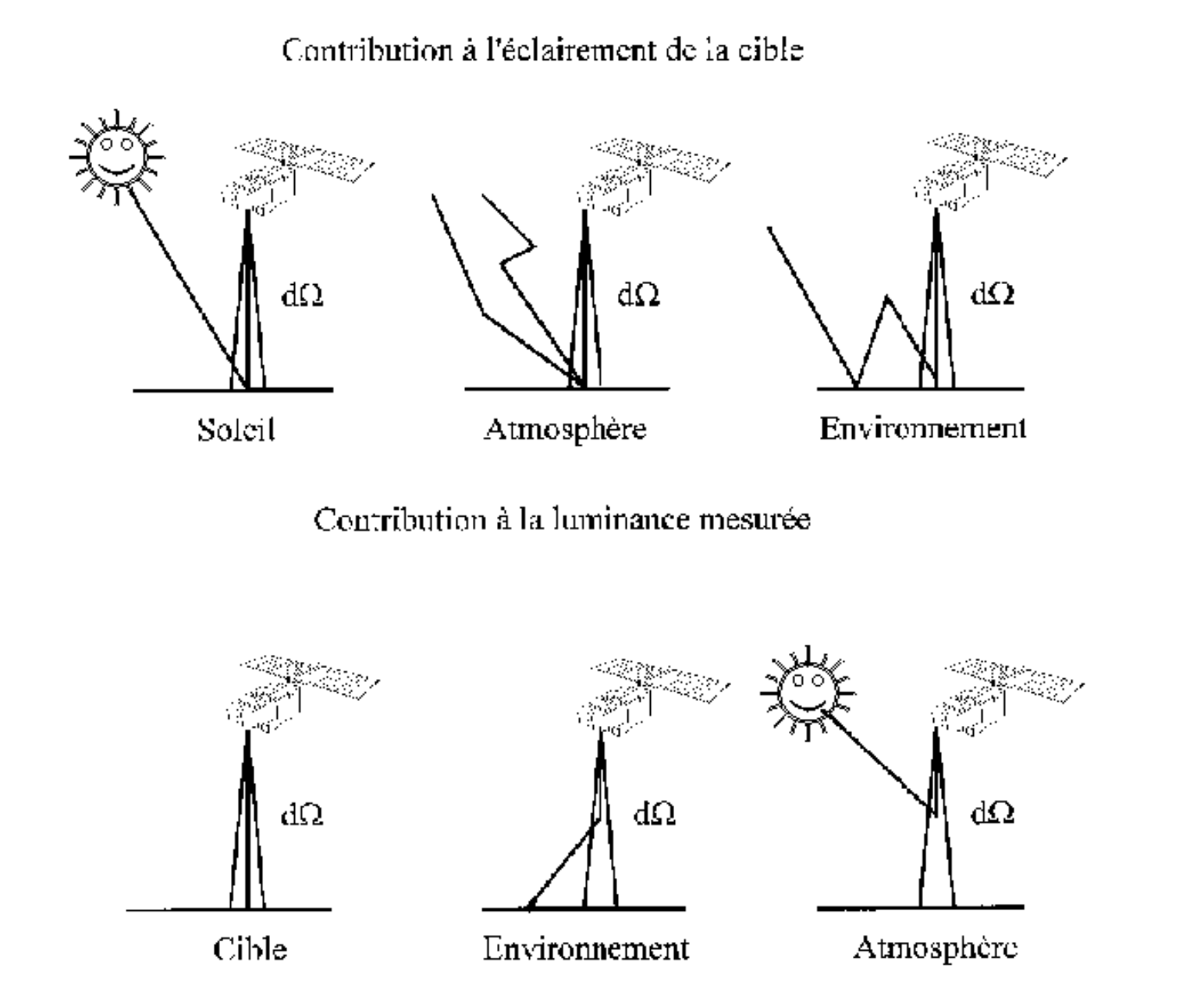
Si :

- $\lambda > d$. **diffusion de Rayleigh**, proportionnelle à λ^{-4}, importante pour $\lambda < 550$nm, liée à l'action des molécules d'oxygène et d'azote.

- $\lambda .10^{-2} < d < \lambda .10^{2}$. **diffusion de Mie**, suit une loi simplifiée en λ^{-1}, due aux aérosols en suspension dans l'air (poussières, micro gouttelettes d'eau) particulièrement importante près des sites industriels.

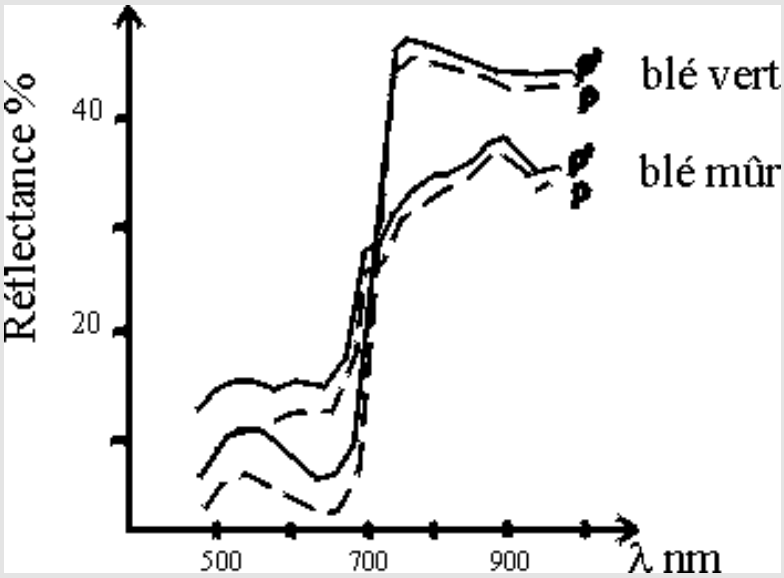
Le rayonnement atmosphérique

Le rayonnement réémis par l'atmosphère augmente la valeur de flux mesurée par le capteur.



Influence de l'atmosphère et de l'environnement de la cible sur le signal mesuré par un satellite

La diffusion atmosphérique augmente la réflectance observée en haut de l'atmosphère (ρ ') par rapport à celle observée au sol (ρ).



Effet de la diffusion atmosphérique sur la réflectance observée en haut de l'atmosphère ρ ' et au sol ρ , pour un blé vert et un blé mûr *(d'après Deschamps et al., 1984)*

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 9 à 12**.

Infrarouge thermique

C'est un domaine situé entre l'infrarouge moyen et les hyperfréquences. Les instruments les plus utilisés se situent autour de 8-14µm. Les mesures fournissent des températures de surface et permettent d'obtenir des informations sur l'état hydrique et énergétique des surfaces. Elles représentent donc un intérêt important dans le domaine agricole pour le suivi des sols et des cultures.

La **température de brillance** (ou température radiative apparente *TB*) d'une surface correspond à la température d'un corps noir délivrant la même luminance que la surface étudiée. Sur une bande spectrale (λ_1-λ_2) :

$$\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} B_\lambda(T_B) = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon_\lambda B_\lambda(T) d\lambda$$

B_λ *:* luminance du corps noir ε_λ :émissivité de la surface

ou sur tout le spectre :

$$\sigma T_B^{\,4} = \varepsilon \sigma T^4$$

σ : constante de Stefan-Boltzmann

La température de brillance varie suivant les bandes spectrales des satellites utilisés. Sa conversion à la température radiométrique demande une correction du rayonnement atmosphérique.

L'émissivité est toujours inférieure à 1, et généralement supérieure à 0,9 pour la plupart des corps naturels. Elle varie suivant la longueur d'onde et la direction θ ainsi que l'état d'humidité des surfaces.

Quelques exemples de valeurs d'émissivités attribuées aux principaux types de surface *(d'après Guyot, 1997)*

type de surface	émissivité
glace	0,92-0,97
eau	0,99
sol nu (sable sec, sable humide)	0,94 (0,84-0,90;0,91-0,94)
prairie	0,98
blé	0,97
maïs	0,96
vignes, vergers	0,95
résineux	0,98
feuillus	0,97

Dans ces longueurs d'onde, l'absorption du rayonnement par la neige est très importante, seule la

température de surface intervient sur la luminance. L'émissivité de la neige est proche de 0,99 dans ce domaine spectral. L'émissivité de l'eau est très proche de 1.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 12 à 19 et 475 à 481**.

Hyperfréquences

Il faut distinguer les capteurs passifs (diffusiomètres, en anglais *scatterometer*) des capteurs actifs : radars (*Radio Detection And Ranging*).

Dans ce domaine spectral l'atmosphère est transparente pour l'essentiel des longueurs d'ondes utilisées (de 3mm à un peu plus de 30cm),

Les bandes de fréquence

Le tableau récapitule les bandes de fréquences employées en télédétection active et passive.

Longueur d'onde	nomenclature OTAN		bandes radar	
100 m 10 m 1 m	A B C	0 à 250 MHz 250 à 500 MHz 0,5 à 1 GHz	 HF VHF UHF	 3 à 30 MHz 30 à 300 MHz 0,3 à 1GHz
30 cm	D	1 à 2 GHz	L	1 à 2 GHz
10 cm	E	2 à 3 GHz	S	2 à 4 GHz
	F	3 à 4 GHz		
5 cm	G	4 à 6 GHz	C	4 à 8 GHz
	H	6 à 8 GHz		
3 cm 2 cm 1 cm	I	8 à 10 GHz	X	8 à 12 GHz
	J	10 à 20 GHz	Ku	12 à 18 GHz
			K	18 à 27 GHz
	K	20 à 40 GHz	Ka	27 à 40 GHz
inférieures à 1 cm	L	40 à 60 GHz	V	40 à 70 GHz
	M	60 à 100 GHz	W	70 à 100 GHz

Les bandes de fréquence *(d'après Paquet, 1997)*

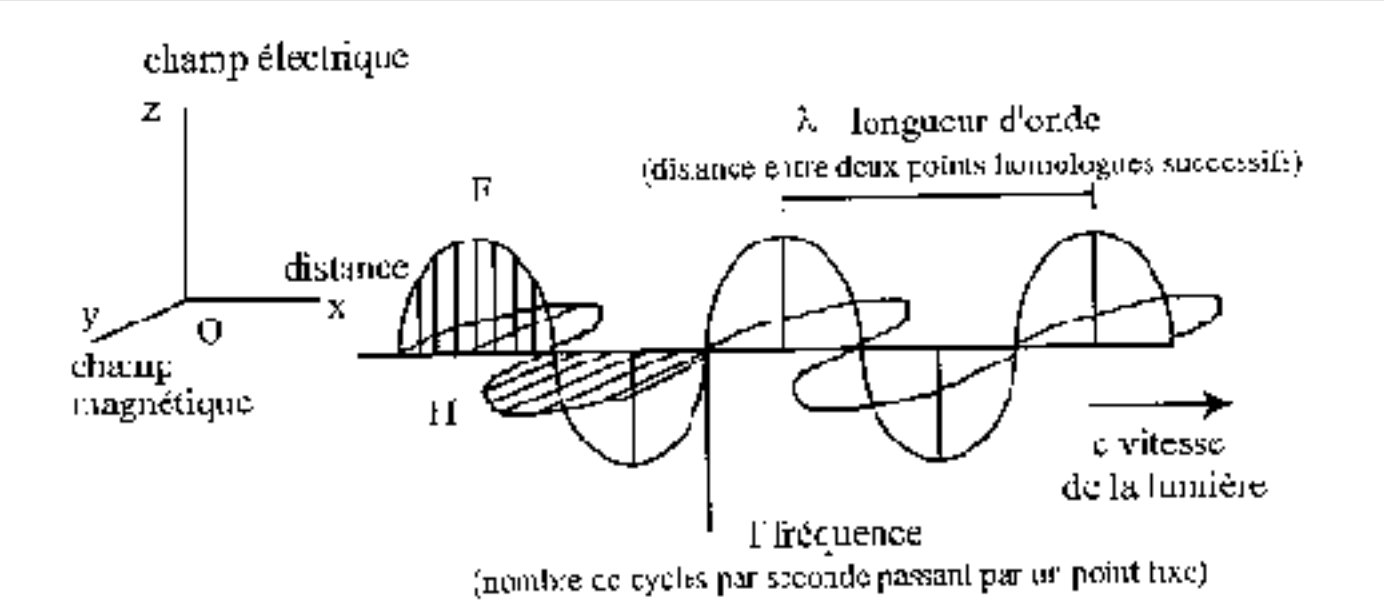
La nomenclature OTAN s'applique aux domaines radar et radio, la nomenclature radar (non officielle) est très couramment employée en télédétection active, plus particulièrement les fréquences situées entre 1 et 40 GHz.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 482 à 495**.

Propriétés utilisées en hyperfréquences

La polarisation

Une onde électromagnétique peut être représentée dans l'espace par les vecteurs de champ électrique E et de champ magnétique H. Le vecteur E, qui reste perpendiculaire à l'axe x, peut tourner autour de cet axe.



Caractéristiques d'une onde

(d'après Bonn et Rochon, 1992, p26 -reproduit avec la permission de l'éditeur. Tiré de : Précis de télédétection.Volume 1. Principes et méthodes.Quebec. Presses de l'Université de Quebec)

Si le déphasage ϕ (manière dont E se comporte dans un plan parallèle à yOz) varie de façon aléatoire dans le temps, l'onde est non polarisée, si ϕ garde une valeur constante, l'onde est polarisée. On distingue :

- la polarisation verticale, lorsque le vecteur E est contenu dans le plan d'incidence,
- la polarisation horizontale, lorsque le vecteur E est perpendiculaire au plan d'incidence.

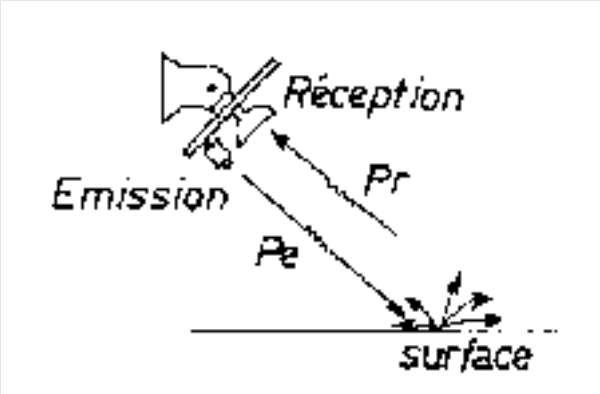
En hyperfréquences la polarisation apporte des informations sur l'objet étudié, par exemple sa rugosité.

L'effet Doppler

Décalage de fréquence entre une onde émise par un émetteur en mouvement et le récepteur, il a des applications importantes en hyperfréquences pour le radar à antenne synthétique.

Le signal rétrodiffusé

Le radar étant émetteur et récepteur, seule la fraction de l'onde renvoyée en direction du radar est mesurée : c'est le signal rétrodiffusé (σ_0) de puissance P_r .



Le signal rétrodiffusé

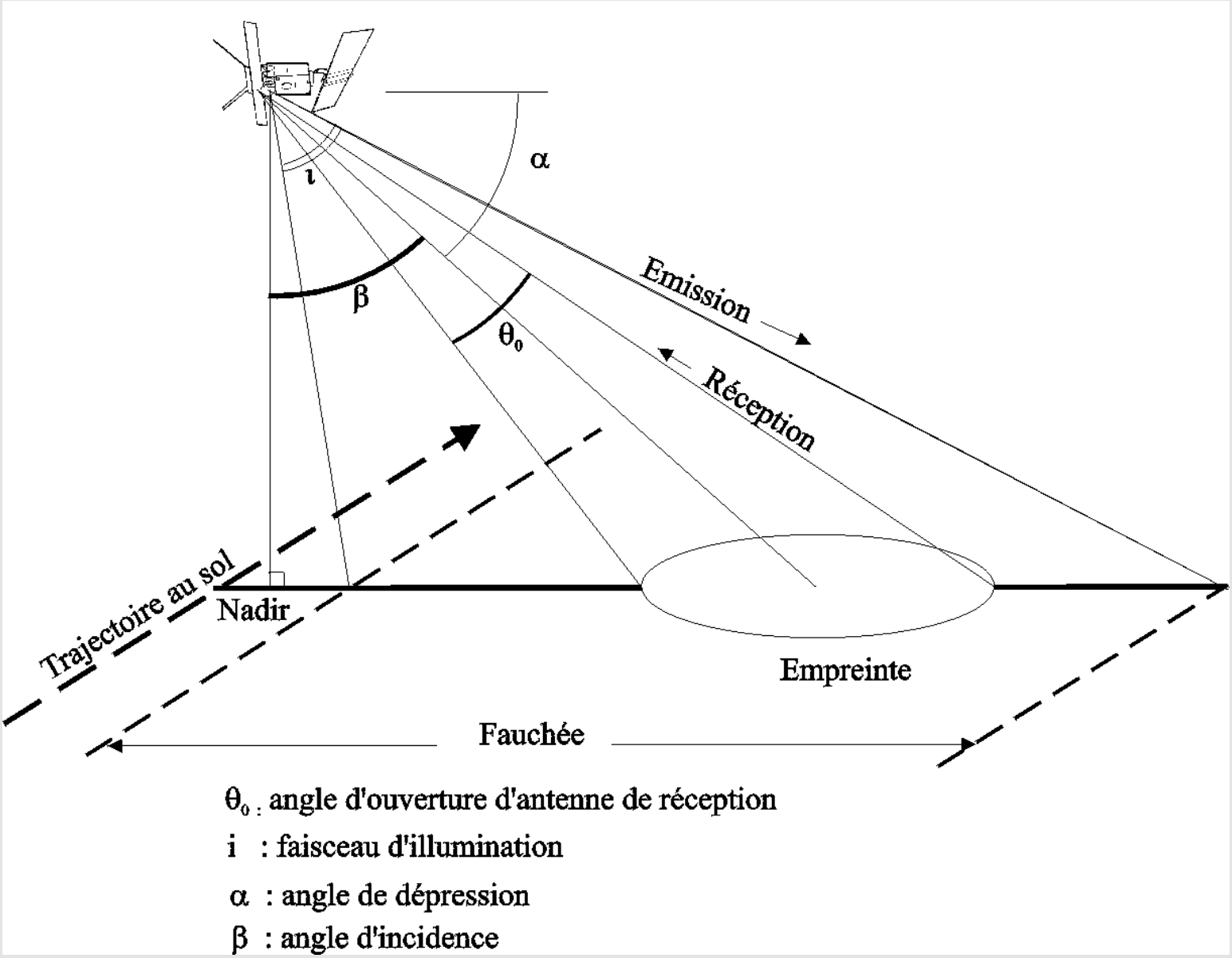
Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 20 à 26 et 482 à 486**.

Caractéristiques d'antenne radar

La valeur du signal rétrodiffusé est fonction de :

- l'incidence du faisceau, la distance entre le capteur et la surface visée au sol.

- le cône prenant en compte la surface "éclairée" (l'empreinte), définie par l'ouverture θ_0 de l'antenne de réception.



Les caractéristiques d'antenne

L'angle de dépression est l'inclinaison de l'antenne par rapport à l'horizontale (ou le complément de l'angle d'incidence vis à vis d'une surface horizontale).

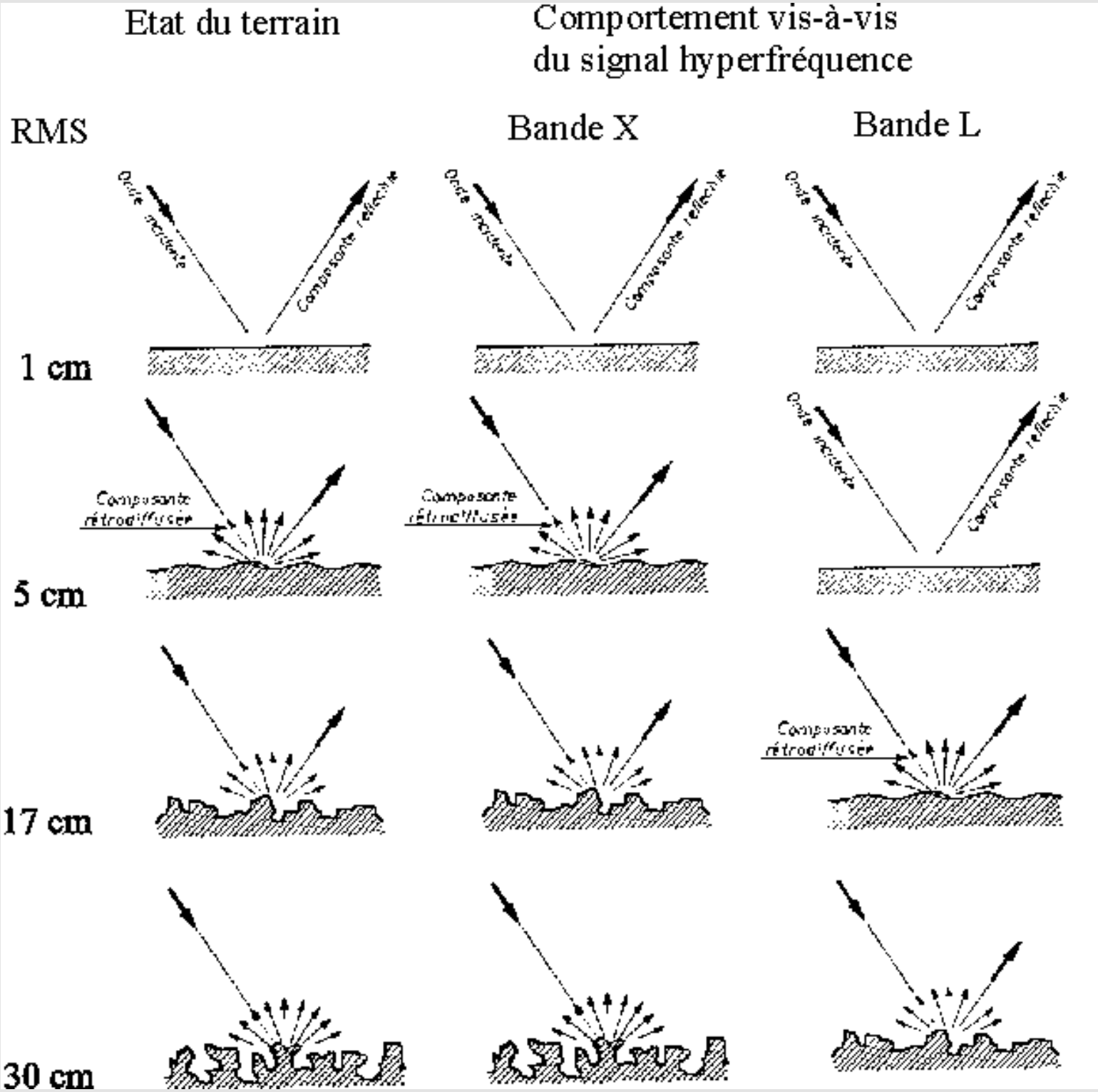
L'angle d'incidence modifie la perception de la rugosité de la surface "éclairée".

L'ouverture de l'antenne et la géométrie de son positionnement ont une incidence directe sur la résolution géométrique du système.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 484 à 486**.

Rugosité et signal rétrodiffusé

En hyperfréquences, la diffusion de surface est fonction de l'angle d'incidence des ondes et de la rugosité de la surface observée. Une surface se comporte différemment selon son aspect et la longueur d'onde du rayonnement incident.



Comportements réflectifs d'une surface en fonction de la longueur d'onde (*d'après C. KING, 1979)*

La rugosité d'une surface est habituellement exprimée par deux paramètres : l'écart type (h) de la variation des irrégularités de la surface (hauteur quadratique moyenne : *Root Mean Square RMS*) et une mesure de la dimension horizontale de la rugosité. Si α est l'angle de dépression :

- une surface est lisse, pour la longueur d'onde utilisée, si :

$$h < \lambda / 8 \sin \alpha$$

σ_0 sera nul ou très faible.

- une surface est plus ou moins rugueuse, si :

$$h > \lambda / 8 \sin \alpha$$

σ_0 augmente avec la rugosité croissante.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 27 à 29**.

Les vecteurs

En fonction de la distance au sol on distingue différents types de vecteurs :

- ceux qui opèrent à quelques mètres du sol : grues, ou véhicules qui supportent des radiomètres ou appareils photographiques ;

- ceux qui opèrent entre la dizaine de mètres et la dizaine de kilomètres : avions, hélicoptères et ballons

- ceux qui opèrent entre la dizaine et la centaine de km : ballons stratosphériques

- ceux qui opèrent entre 200 km et 40 000 km : satellites, habités ou non.

Les systèmes aéroportés

En plus des données satellitaires, facilement disponibles, des missions aéroportées avec des capteurs spécifiques sont effectuées dans un certain nombre de cas.

Caractéristiques	AVIRIS	CASI
Technologie	barrette de CCD mesurant tous les canaux pour 1 pixel; balayage mécanique des lignes	barrette de CCD. En mode spectral 39 colonnes de la barrette sont sélectionnées pour lesquelles les 288 bandes sont fournies. En mode spatial, sélection de 15 bandes, l'information est fournie pour les 512 pixels.
Date de mise en service	1987	
Résolution spatiale	20mx20m à 20 km d'altitude	2,3x2,7m en mode spatial, 2,3x9,5m en mode spectral à 1860m
Fauchée	12km	angle d'ouverture 35°5
Nombre bandes spectrales	224	288
Largeur des bandes spectrales	10 nm	1,8 nm
gamme de longueurs d'onde	410 à 2450 nm	430 à 870 nm

Exemples de spectromètres imageurs

Il y a quatre raisons à cela :

1) Entre le terrain et le satellite, il est indispensable de pouvoir disposer d'un niveau de perception intermédiaire permettant de mieux comprendre certains phénomènes,

2) Pour certaines études régionales, sur un territoire limité, une mission aéroportée peut être plus efficace, que des données satellitales,

3) Les capteurs utilisés contiennent des bandes nombreuses et étroites (de quelques à quelques dizaines de nanomètres) pour lesquelles l'absorption atmosphérique peut être importante, ce qui interdit de les embarquer sur satellites. Ces bandes étroites sont intéressantes pour étudier des phénomènes précis comme différents stades phénologiques ou états physiologiques de cultures, ou différents minéraux constituants de sols ou de roches,

4) Le positionnement absolu de l'avion est maintenant possible grâce à l'emploi du GPS (*Global Positionning System*) en relation avec les satellites américains de positionnement.

Orbitologie

En fonction des utilisations recherchées les satellites présentent des caractéristiques orbitales dictées par un certain nombre de lois générales.

L'attraction des corps (Newton)

$$F = g\ TS / d^2$$

avec F : force d'attraction

T : masse de la Terre

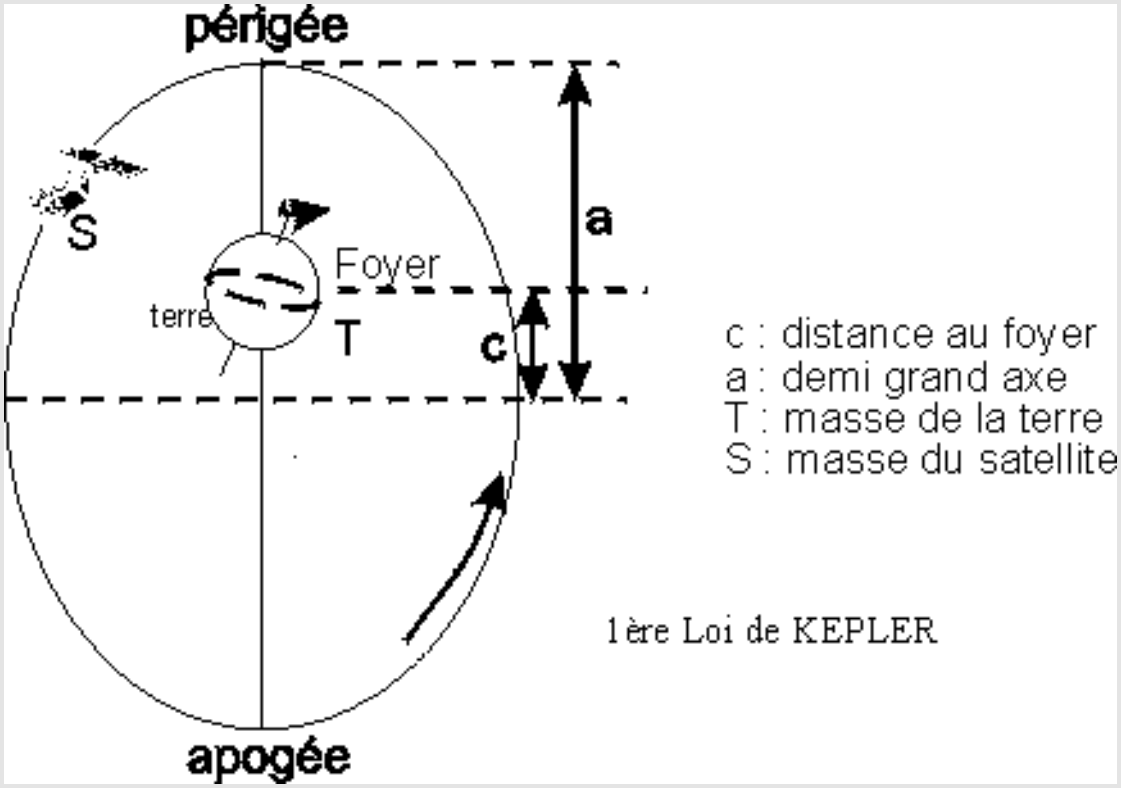
S : masse du satellite

d : distance entre les la Terre et le satellite

g : constante de gravitation

Première loi de Kepler

Le satellite décrit une orbite en forme d'ellipse autour de la Terre qui occupe un foyer de cette ellipse.



Orbite d'un satellite selon la première loi de Kepler (*adapté de JM. Gilliot,1994)*

e = c/a : excentricité de l'ellipse

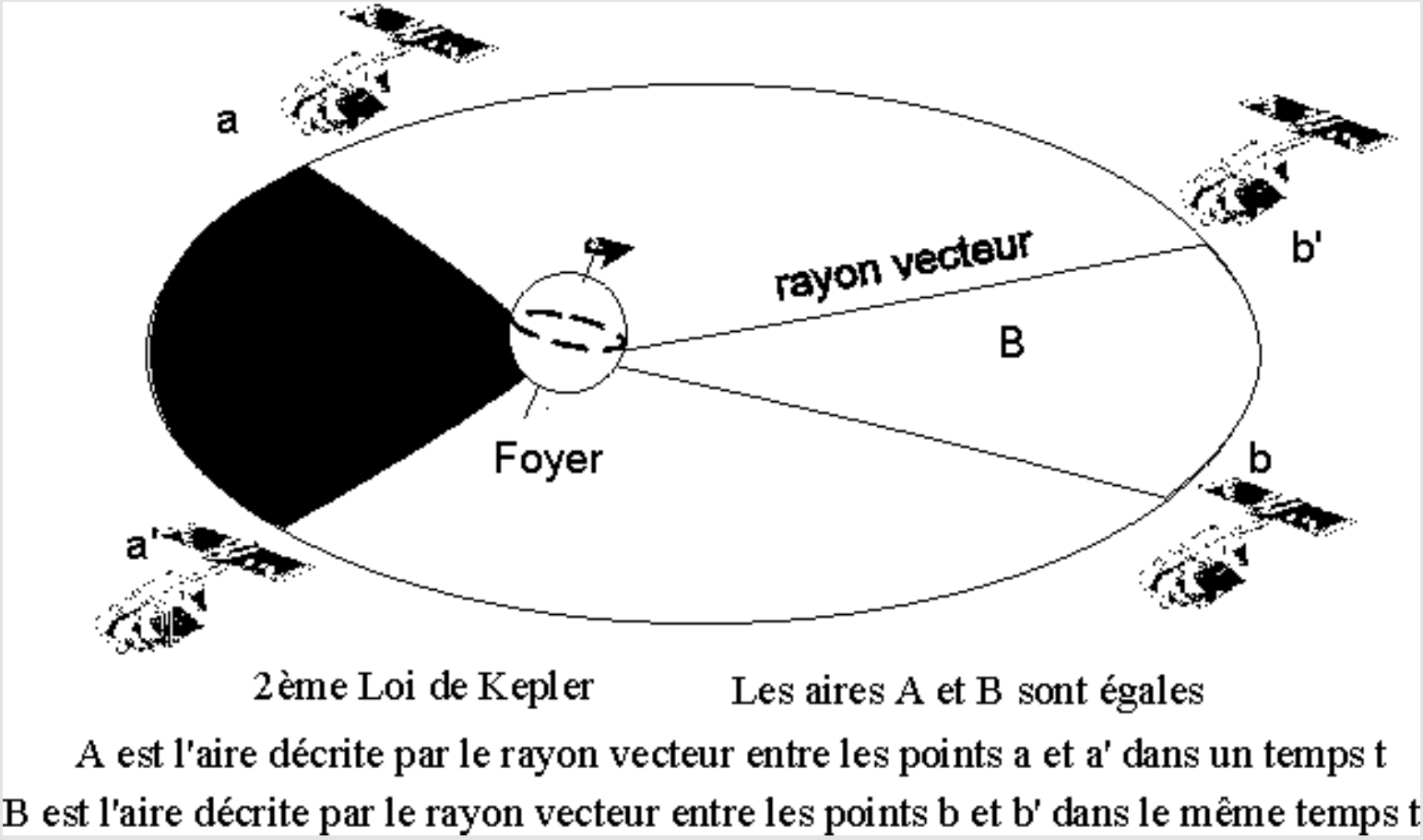
périgée : point où le satellite est le plus proche de la Terre (818 km pour SPOT)

apogée : point où le satellite est le plus éloigné de la Terre (833 km, pour SPOT).

Afin de ne pas retomber sur terre le périgée d'un satellite doit être supérieur à 200 km au dessus du sol.

Deuxième loi de Kepler

L'ellipse n'est pas parcourue à une vitesse linéaire constante par le satellite. Dans un temps donné, c'est la surface balayée par le rayon vecteur joignant le satellite à la Terre qui est constante.



Vitesse des satellites selon la 2ème loi de Kepler (*adapté de JM. Gilliot,1994)*

La vitesse du satellite est plus grande quand il est proche de son périgée que lorsqu'il est à son apogée.

Troisième loi de Kepler

$$(T+S)\ P^2 = a^3 .$$

avec T : masse de la Terre

S : masse du satellite

P : période (en années) du satellite

a : valeur du demi-grand axe de l'ellipse exprimée en unité astronomique (1 u.a. = distance Terre-Soleil)

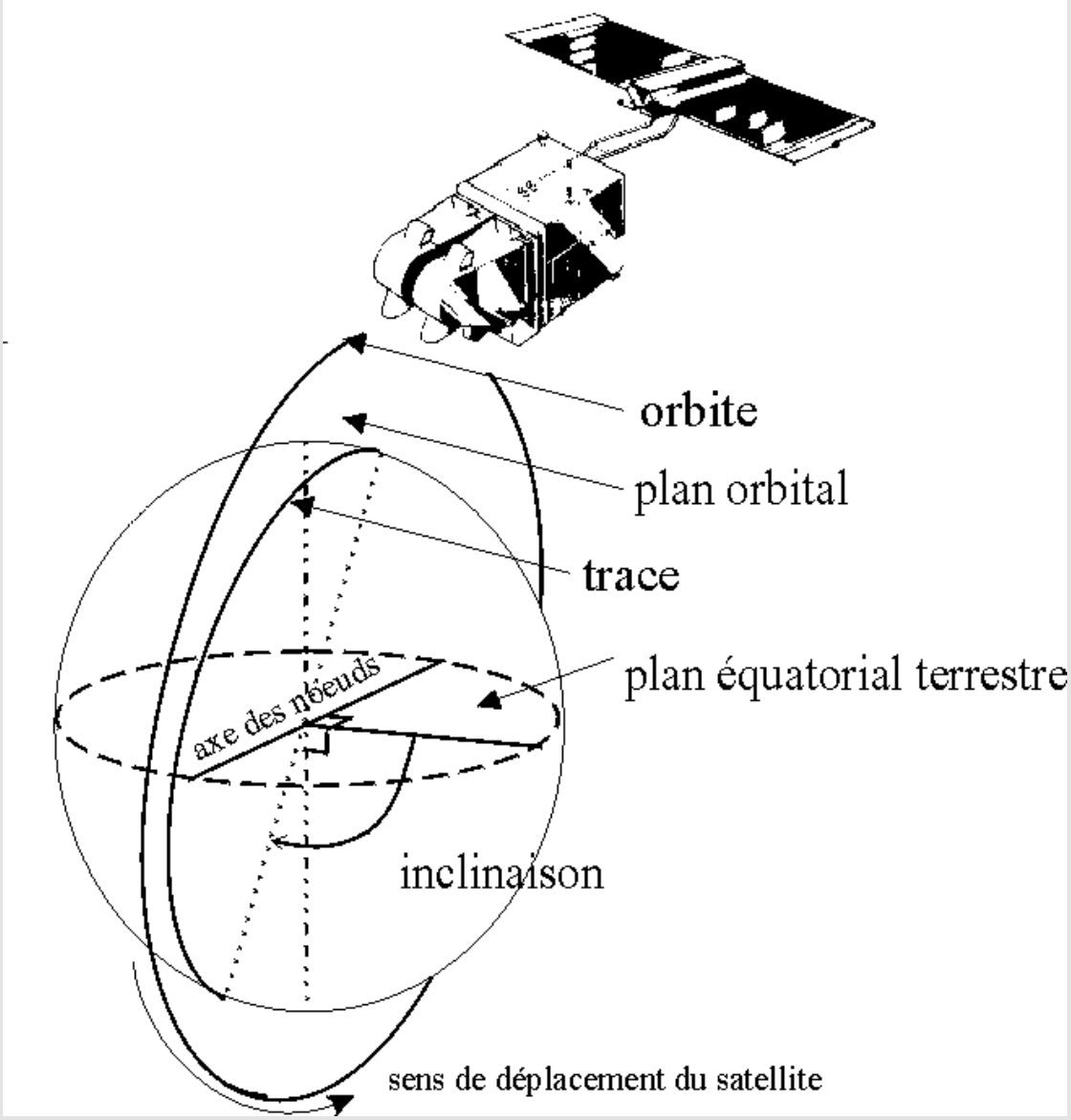
Les orbites

plan orbital du satellite : plan contenant l'orbite elliptique.

angle d'inclinaison : angle entre le plan orbital et le plan de l'équateur

axe des noeuds : ligne d'intersection des deux plans

noeud : projection orthogonale sur la Terre de l'orbite du satellite.



Données orbitales d'un satellite (*adapté de JM. Gilliot,1994)*

Périgée des satellites d'observation de la Terre

Pour une altitude minimale de 200km, a = 6500 km, la vitesse minimale du satellite est de 7,77 km/s et la périodicité de 1h30, mais la durée de vie du satellite est de quelques mois.

Les satellites d'observation de la Terre, à durée de vie de plusieurs années, ont un périgée d'environ 700 à 800 km.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 41 à 44**.

Les satellites d'observation de la Terre

Selon les applications attendues, les satellites d'observation de la Terre occupent différentes orbites.

Orbite circulaire quelconque

Orbite circulaire : ellipse à excentricité nulle.

Les satellites TIROS, NOAA et ERS-1 ont des orbites circulaires.

Orbite géostationnaire

Un satellite géostationnaire se situe toujours au zénith du même point sur l'équateur terrestre, le plan orbital est confondu avec le plan équatorial, et l'orbite est circulaire.

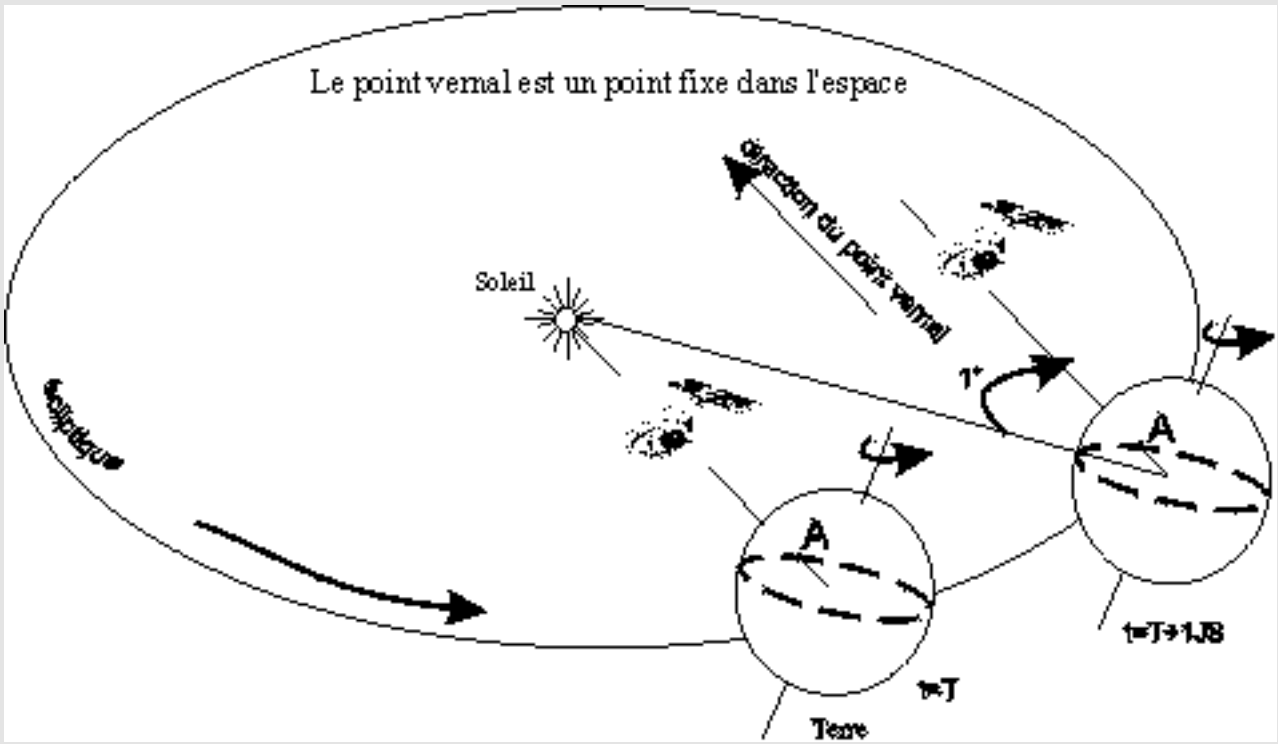
Le satellite tourne à la même vitesse angulaire que la Terre. Le rayon R de l'orbite est donné par la 3ème loi de Kepler :

42 164 km (35 786 km au-dessus de l'équateur).

Les satellites METEOSAT (France), GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellites*, USA), GMS (Japon) et INSAT (Inde) sont géostationnaires.

Orbite héliosynchrone

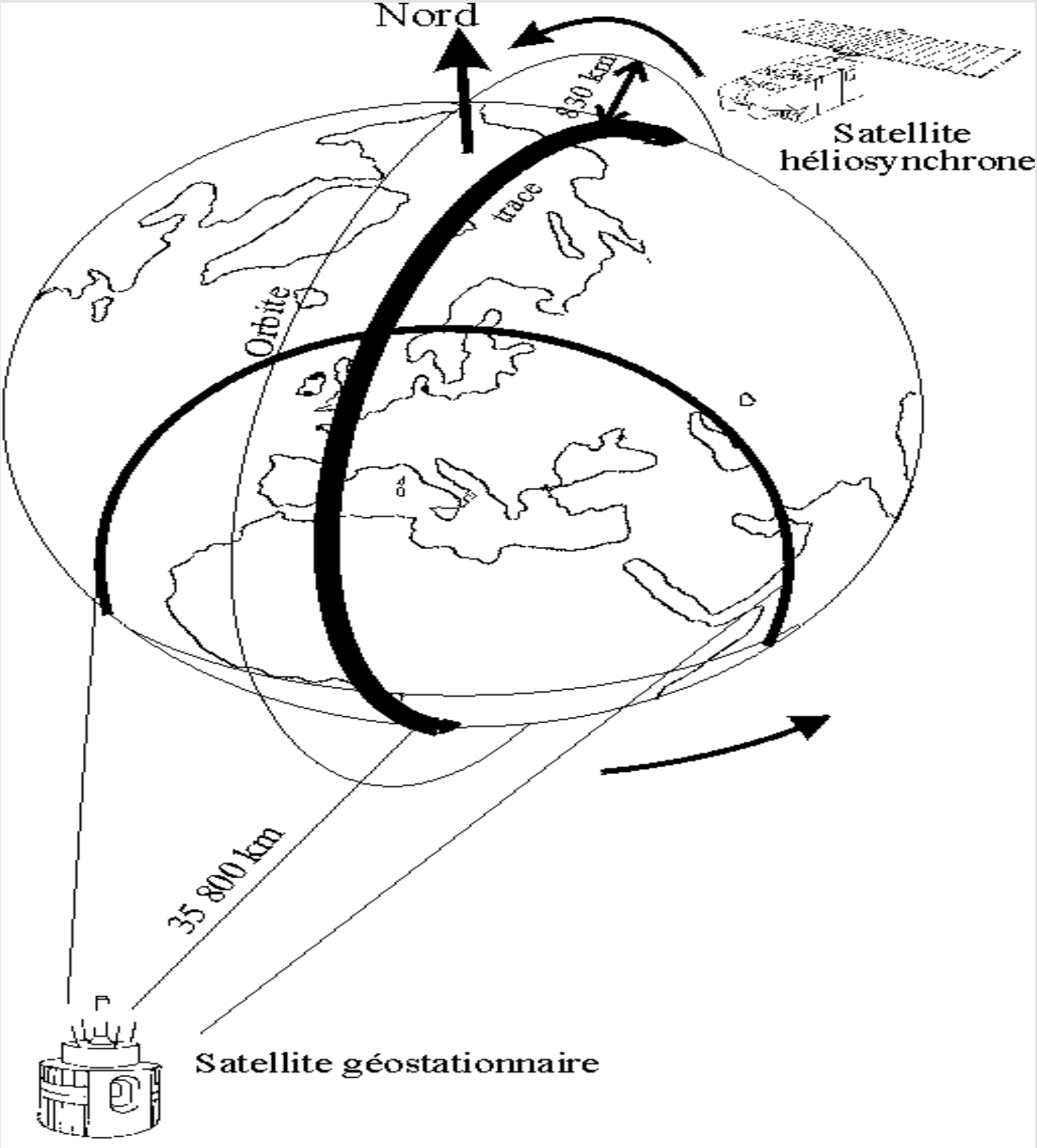
Un satellite héliosynchrone passe toujours à la même heure solaire locale au-dessus d'un même point de la Terre. Le plan orbital du satellite reste fixe par rapport au plan orbital de la Terre autour du Soleil, donc la ligne des noeuds fait un angle constant avec la droite des centres de la Terre et du Soleil. Le plan orbital du satellite doit se déplacer de 360 ° en 365,2425 j soit de 0,985 6° par jour.



Déplacement du plan orbital d'un satellite héliosynchrone (*adapté de JM. Gilliot,1994)*

Pour une orbite circulaire à 832 km d'altitude (SPOT), l'inclinaison doit être de 98,7 °, les pôles sud et nord ne sont jamais survolés. Les satellites NIMBUS, LANDSAT et SPOT circulent sur ce type d'orbite.

On distingue les satellites à défilement : orbites circulaires quelconques ou héliosynchrones, des satellites géostationnaires.



Positions relatives des satellites héliosynchrone à défilement et géostationnaire

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 47 à 56**.

Le système SPOT

Conçu dans les années 1970, le premier satellite SPOT a été mis en orbite le 22 Février 1986; SPOT 2 a été lancé le 22 Janvier 1990; SPOT 3, le 26 Septembre 1993 mais a cessé d'émettre; SPOT 4 a été mis en orbite le 24 Mars 1998. SPOT5 est prévu pour le début de 2002.

Caractéristiques communes :

- orbite : altitude à l'équateur 822 km, quasi polaire (98,7°), circulaire

- héliosynchrone

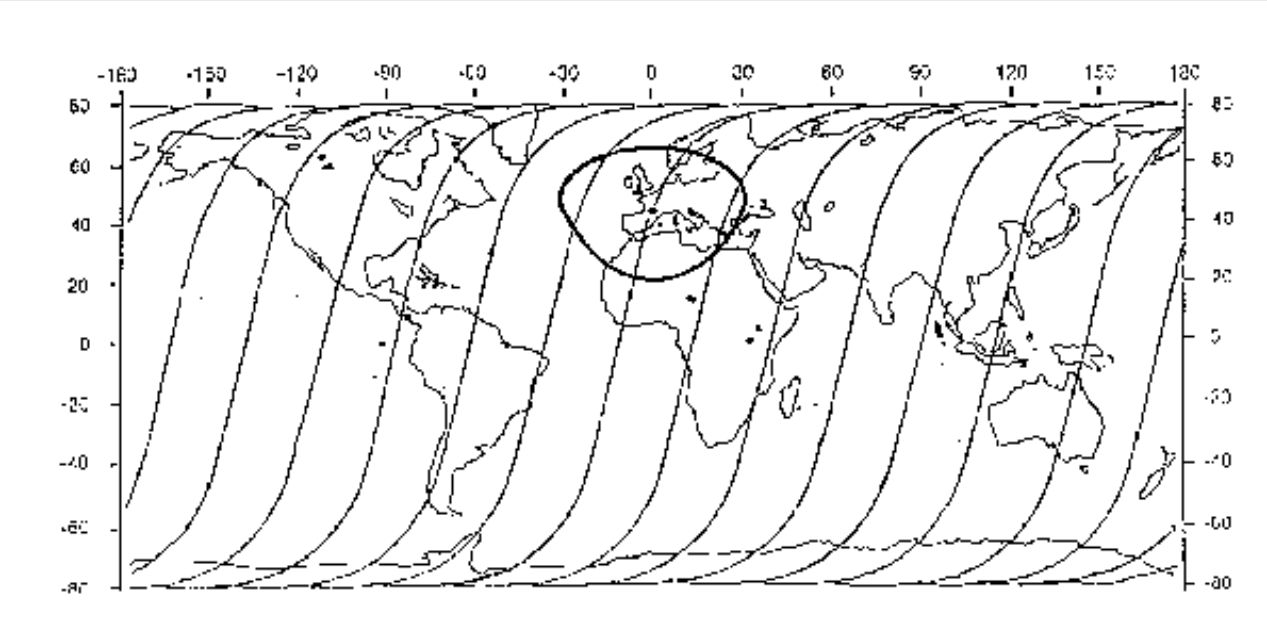
- images acquises en trace descendante, de jour,

- passage à une heure constante (plus ou moins 15 mn) au-dessus d'une région donnée.

- traces chronologiques successives espacées de 2823 km

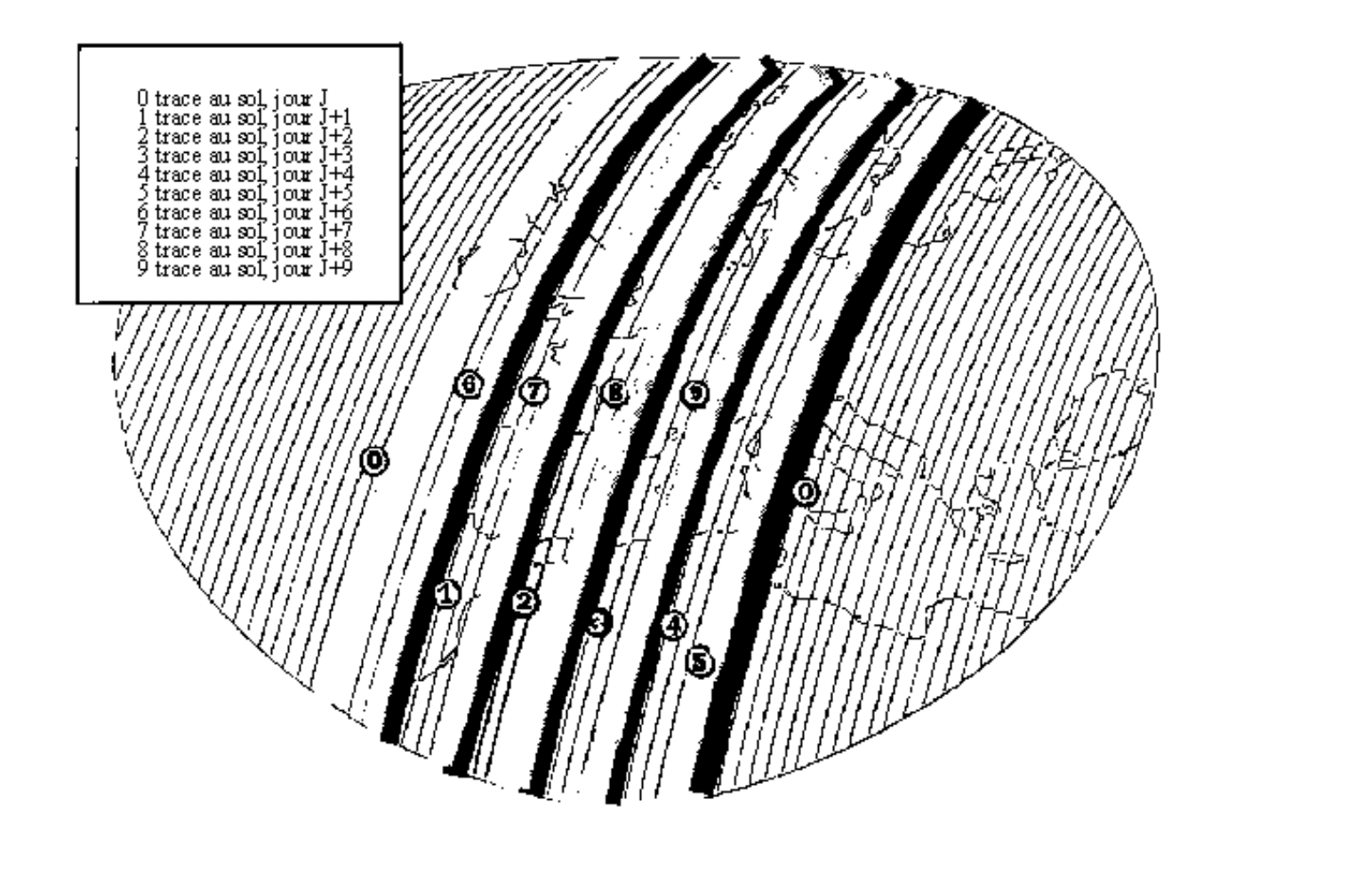
- traces adjacentes distantes de 108,6 km à l'équateur, de 76,7 km à 45° de latitude et de 16,5 km au cercle de précession

- repasse au-dessus du même point tous les 26 jours



Orbites sur une journée (*d'après illustration CNES)*

Sur l'Europe, le satellite passe sur deux traces adjacentes, tous les 5 jours.



Orbites descendantes sur l'Europe (*d'après illustration CNES)*

L'acquisition des données se fait grâce à des détecteurs (CCD) mesurant de 13 µm x 13 µm, groupés en barrettes de 1728 détecteurs mesurant environ 2,25 cm. Chaque milliseconde et demi on obtient 6 000 valeurs correspondant à une bande de terrain de 10 m de large et de 60 km de long.

Les capteurs

	SPOT 1, 2, 3	
Mode	Multispectral	Panchromatique
Bandes spectrales	B1 : 0,51 - 0,59 µm B2 : 0,61 - 0,68 µm B3 : 0,79 - 0, 89 µm	0,51 - 0,73 µm
pixel	20 x 20 m	10 x 10 m
nombre pixels par ligne	3000	6000
largeur scène (visée verticale)	60 x 60 km	60 x 60 km
compression données à bord	néant	DPCM (3/4)

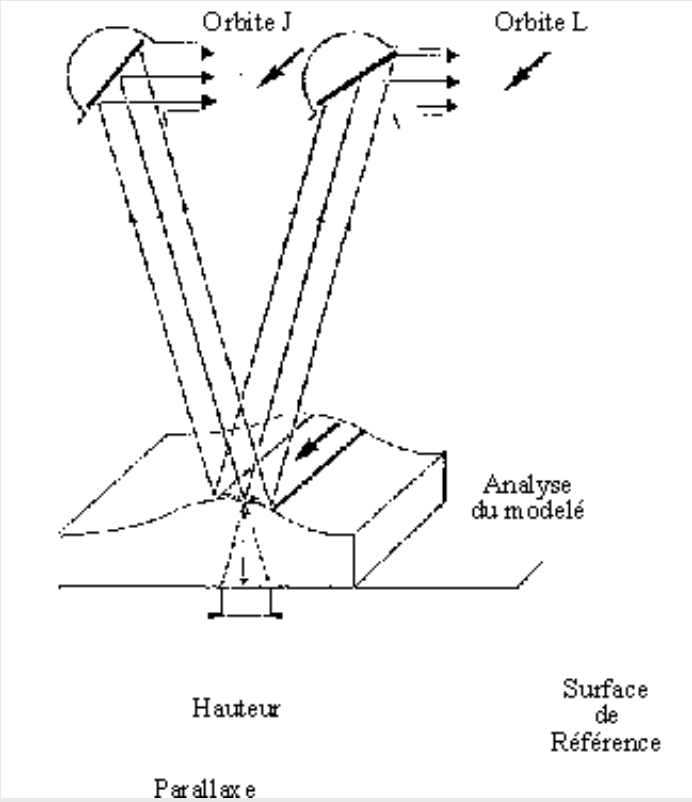
SPOT4 possède une plus grande résolution spectrale que les satellites des séries précédentes.

	SPOT 4		
Mode	Multispectral	Panchromatique	VEGETATION

Bandes spectrales	B1 : 0,51 - 0,59 µm B2 : 0,61 - 0,68 µm B3 : 0,79 - 0, 89 µm B4 : 1,58 - 1,75 µm	0,61 - 0,68 µm	B0 : 0,43 - 0,47 µm B2 : 0,61 - 0,68 µm B3 : 0,79 - 0, 89 µm B4 : 1,58 - 1,75 µm
pixel	20 x 20 m	10 x 10 m	1 x 1 km
nombre pixels par ligne	3000	6000	
largeur scène (visée verticale)	60 x 60 km	60 x 60 km	2250 x 2250 km
compression données à bord	DPCM (3/4)	DPCM (3/4)	

La stéréoscopie

Grâce au dépointage (de plus ou moins 27° à l'ouest ou à l'est de la verticale), on dispose d'images, panchromatiques ou multispectrales, prises sous deux angles différents (niveau de pré-traitement 1A ou 1B). Ceci permet d'observer cette zone en trois dimensions avec un stéréoscope, et construire des modèles numériques de terrain.



Stéréoscopie par visées latérales (Illustration CNES)

La répétitivité

Le dépointage permet d'assurer une plus grande répétitivité ce qui augmente la probabilité d'acquérir des images, sans nuages, sur un territoire donné, ou de suivre à intervalles journaliers des phénomènes à dynamique rapide (incendies, inondations...) .

Les niveaux de prétraitement des données

1A	Données brutes
1B	Corrections des distorsions dues aux instruments
1AP	Etirement des lignes pour compenser grossièrement l'effet panoramique
2A	Correction dans une projection cartographique standard sans points d'appui
2B	Correction dans une projection cartographique standard avec points d'appui

ortho	Correction dans une projection cartographique avec points d'appui, des erreurs résiduelles de parallaxe dues au relief

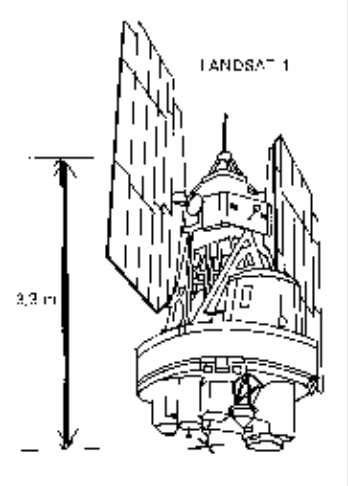
SPOT 5

Prévu pour 2002, la tendance est vers une amélioration sensible de la résolution géométrique, qui devrait être inférieure à 3 mètres pour le panchromatique et de 10 m pour les capteurs multispectraux. Des capteurs plus petits : 6,5 µm au lieu des 13 µm actuels seraient à l'étude ce qui donnerait des systèmes avec 12 000 capteurs pour une ligne. Il est prévu que l'instrument VGT (végétation) soit aussi porté sur SPOT 5.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **CD Rom**.

LANDSAT

Le programme *Earth Resources Technological Satellite* (ERTS) utilisant les satellites ERTS-1 dont le nom a été transformé en LANDSAT (*Land Satellite)* est dû à la NASA. LANDSAT 1, envoyé le 22 Juillet 1972, a fonctionné jusqu'au 6 janvier 1978. LANDSAT 2, envoyé le 5 novembre 1975, a fonctionné jusqu'au 27 Juillet 1983, puis des anomalies ont affecté ses capteurs. LANSDAT 3, lancé le 5 mars 1978, n'a plus fourni de données après le 7 septembre 1983 à la suite d'une panne dans le dispositif de balayage. LANSDAT 4, lancé 16 Juillet 1982, n'émet plus de données TM depuis Février 1983. Lancé le 1er mars 1984, LANDSAT 5 fonctionne sans problème. LANDSAT 6, lancé le 5 Octobre 1993, s'est écrasé en mer lors du lancement. LANDSAT 7 a été lancé avec succès le 15 avril 1999 et fournit des données.



LANDSAT 1(d'après NASA)

De 1986 jusqu'à récemment les produits étaient commercialisés par la société EOSAT. La diffusion des produits Landsat 7 doit être assurée par l'US Geological Survey (USGS).

Tous les satellites de la série LANDSAT sont héliosynchrones, en orbite sub-polaire, dont l'altitude standard a varié de 917 (1 à 3) à 705 km (4 à 7) mais on distingue plusieurs générations :

	Capteurs	Type	Altitude standard	Répétitivité
Landsat 1 à 3	RBV et MSS	héliosynchrones	917 km	16 jours
Landsat 4 à 5	MSS et TM	orbite	705 km	16 jours
Landsat 6 à 7	TM et ETM+	sub-polaire	705 km	16 jours

Caractéristiques des différents capteurs :

- Caméra numérique *Return Beam Vidicon* (RBV)

- Capteur Multispectral : *Multi Spectral Scanneur* (MSS)

- Capteur *Thematic Mapper* (TM)

- Capteur *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+)

	RBV	MSS	TM	ETM+
canaux	0,479 - 0,575 µm 0,580 - 0,680 µm 0,690 - 0,830 µm	4 : 0,5 - 0,6 µm 5 : 0,6 - 0,7 µm 6 : 0,7 - 0,8 µm 7 : 0,8 - 1,1 µm	1 : 0,45 - 0,515 µm 2: 0,525 - 0,605µm 3 : 0,63 - 0,690µm 4 : 0,73 - 0,90µm 5 : 1,55 - 1,75 µm 6 : 10,40 - 12,5µm 7 : 2,09 - 2,35µm	1 : 0,45 - 0,515 µm 2:0,525 - 0,605µm 3 : 0,63 - 0,690µm 4 : 0,73 - 0,90µm 5 : 1,55 - 1,75 µm 6 : 10,40 - 12,5µm 7 : 2,09 - 2,35µm P : 0,52 - 0,90 µm
angle ouverture		11°56	14°8	14°8
pixel		79m x 56m	1 à 7 : 30m 6 : 120m	1 à 7 : 30m 6 : 60m P : 15m
taille scène		170 x 185,2 km	170 x 185,2 km	170 x 185,2 km

Le satellite passe à l'équateur à 9 h 37 mn (heure locale). La durée d'une révolution est de 98,9 minutes et 14 et 9/16 orbites sont décrites par jour. Le satellite repasse tous les 16 jours au-dessus du même point. Il faut 233 traces pour couvrir le globe, chaque trace comprenant 248

scènes. La trace 1 coupe l'équateur à 64,6° W. A cette latitude le recouvrement entre deux scènes est de 7,6 %, tandis qu'elle est de 54 % à 60° de latitude.

La France est couverte par les traces (*paths)* 210 à 219 et les lignes (*row)* 25 à 30.

Les satellites 1 à 5 n'ayant pas d'enregistreur embarqué les données sont envoyées en temps réel aux stations de réception, quand il ne peut y avoir de liaison directe, les informations sont envoyées par des relais en utilisant des satellites de communication TDRS (*Tracking and Data Relay Systems*). Pour Landsat 7, il y a une possibilité d'enregistrement à bord.

Il y a 16 photodétecteurs en parallèle permettant de balayer seize lignes en même temps pour tous les canaux, sauf le canal 6 pour lequel il n'y a, évidemment, que 4 détecteurs. Des différences de sensibilité entre les seize photodétecteurs peuvent engendrer des rayures parallèles, visibles sur les images (en anglais, s*tripping).*

Les produits Landsat 7 commercialisés, le sont à différents niveau de correction. On distingue le produit de base, niveau OR (correction des défauts de balayage et d'attitude du satellite), le niveau 1R (corrections radiométriques), le niveau 1G (corrections radiométriques et géométriques).

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 51 à 52**.

Différents systèmes d'observation de la Terre

Il existe différents satellites utilisés pour l'étude des ressources terrestres (tableau 1) : MÉTÉOSAT, NOAA, LANDSAT... Certains possèdent des capteurs spécifiques dans l'infrarouge thermique (tableau 2). Enfin certains possèdent des capteurs dans les hyperfréquences : ERS, RADARSAT, JERS …(tableau 3).

Caractéristiques du système	Météosat	NOAA-AVHRR	LANDSAT MSS	LANDSAT TM
orbites : Type d'orbite	Géostationnaire	circulaire	sub-polaire héliosynchrone	sub-polaire héliosynchrone
altitude km	35 800	850	705	705
répétitivité	25 mn	12 heures	16 jours	16 jours
capteurs : acquisition	rotation du satellite	miroir tournant	miroir oscillant	miroir oscillant
résolution spatiale (pixel)	2,5km (S1) 5 km (S2, S3)	1,1 ou 4km	56 x 79 m	30m
Bandes spectrales (µm)				
S1	0,4-1,1	0,58-0,68	0,5-0,6	0,45-0,52
S2	5,7-7,1	0,72-1,1	0,6-0,7	0,52-0,60
S3	10,5-12,5	3,55-3,93	0,7-0,8	0,63-0,69
S4		10,3-11,3	0,8-1,1	0,76-0,90
S5		11,5-12,5		1,55-1,75
S6				10,4-12,5
S7				2,0-2,35
Panchromatique				
dimensions de la scène (km)	le globe	2400	185	185

Caractéristiques du système	JERS1- OPS	SPOT	IRS 1D	
orbites : Type d'orbite	Héliosynchrone	sub-polaire héliosynchrone	sub-polaire héliosynchrone	
altitude km	570	830	905	
répétitivité	44 jours	26 (ou 1- 5)jours	22 (ou 2- 4)jours	
capteurs : acquisition	barrettes CCD	barrettes CCD	LISS : CCD	WIFS : CCD
résolution spatiale	18m	10m(pan) 20m(S)	5m(pan) 20m(S)	190 m
Bandes spectrales (µm)				
S1	0,52-0,60	0,50-0,59	0,52-0,59	0,62-0,68
S2	0,63-0,69	0,61-0,68	0,62-0,68	0,77-0,75
S3	0,76-0,86	0,79-0,89	0,77-0,86	
S4	1,59-1,70		1,55-1,70	
S5	2,0-2,1			
S6	2,1-2,2			
S7	2,2-2,3			
Panchromatique		0,51-0,73	0,50-0,75	

dimensions de la scène (km)	75	60	131	774

Tableau 1 - Caractéristiques des principaux systèmes satellitaux d'observation de la terre dans les bandes du visible et du proche infrarouge

Satellite	capteur	Bandes spectrales µm	répétitivité	résolution géométrique	champ de vue	date
Météosat	MVIRI	10,5-12,5	30mn	5km	géostationnaire	
NOAA	AVHRR2	3,55-3,93 c4:10,3-11,3 c5:11,5-12,5	2 fois/jour	1,1km	3000 km	
ERS1 **ERS2**	ATSR ATSR2	1,6 3,7 10,8 12	3 à 35j	1km	50 km	1991 1995
Landsat 7	ETM+	10,4-12,5	16j	120m	185 km	1998
EOS-AM	ASTER	5 8-12	16j	90m	60 km	1998
EOS-AM1	MODIS	0,4-14,4 (14c)	2j	1km	2300 km	1998
GMS 1	SERIVI	3,7 8,8 10,8 12	15mn	3km	géostationnaire	2000
capteurs aéroportés						
scanneur **Allemagne**	DAIS 7915	6 canaux de 8 à 14µm		512 pixels/ligne	78 ° visée	1993
scanneur **Italie**	MIVIS	10 canaux		755 pixels/ligne	71°	1994
Caméra France	Inframe-trics 760	1 /3 possibilités		256 pixels/ligne	7°-20°-80°	1992

Tableau 2- Principaux capteurs mesurant dans l'infrarouge thermique *(d'après Prévot, 1996)*.

	ERS	JERS	RADARSAT
Date de lancement	-1 : 25/07/1991 -2 : 20/04/1995	11/02/1992	4/11/1995
Altitude	785 km	570 km	800 km
Capteur ROS*	mode image		
bande spectrale	C	L	C
fréquence	5,3 GHz	1275 MHz	5,3 GHz
polarisation	V-V	H-H	H-H

caractéristiques particulières	possibilité d'un mode étude des vagues et vitesse du vent	répétitivité 44 jours	différents angles de visée, cycle de 24j., répétitivité possible de 1,5j. à 45° latitude Nord
angle d'incidence au milieu de la fauchée	23°	35°	10° à 60°
résolution spatiale	25-30 m	18-18 m	10 à 100 m selon visée
fauchée	100 km	75 km	50 à 500 km
Autres capteurs embarqués	**ERS-1** : -radar altimètre - scanneur ATSR (4 canaux centrés respectivement sur 1,6 - 3,7 - 10,8 et 12 µm) **ERS-2** : les mêmes plus GOME (*Global Ozone Monitoring Equipment*)	OPS (*Optical Sensor*) : 3 canaux dans le visible et le pIR, 4 canaux dans l'infrarouge	

ROS : Radar à Ouverture Synthétique

Tableau 3 - Exemples de satellites possédant des capteurs dans les hyperfréquences (radar)

Les photographies satellitales

Un certain nombre de missions ont permis d'obtenir à partir de caméras, des photographies de la Terre, il s'agit soit de vols habités (missions GEMINI, APOLLO aux USA, missions SOYOUZ russes), soit de vols non habités, en particulier les missions COSMOS (russes).

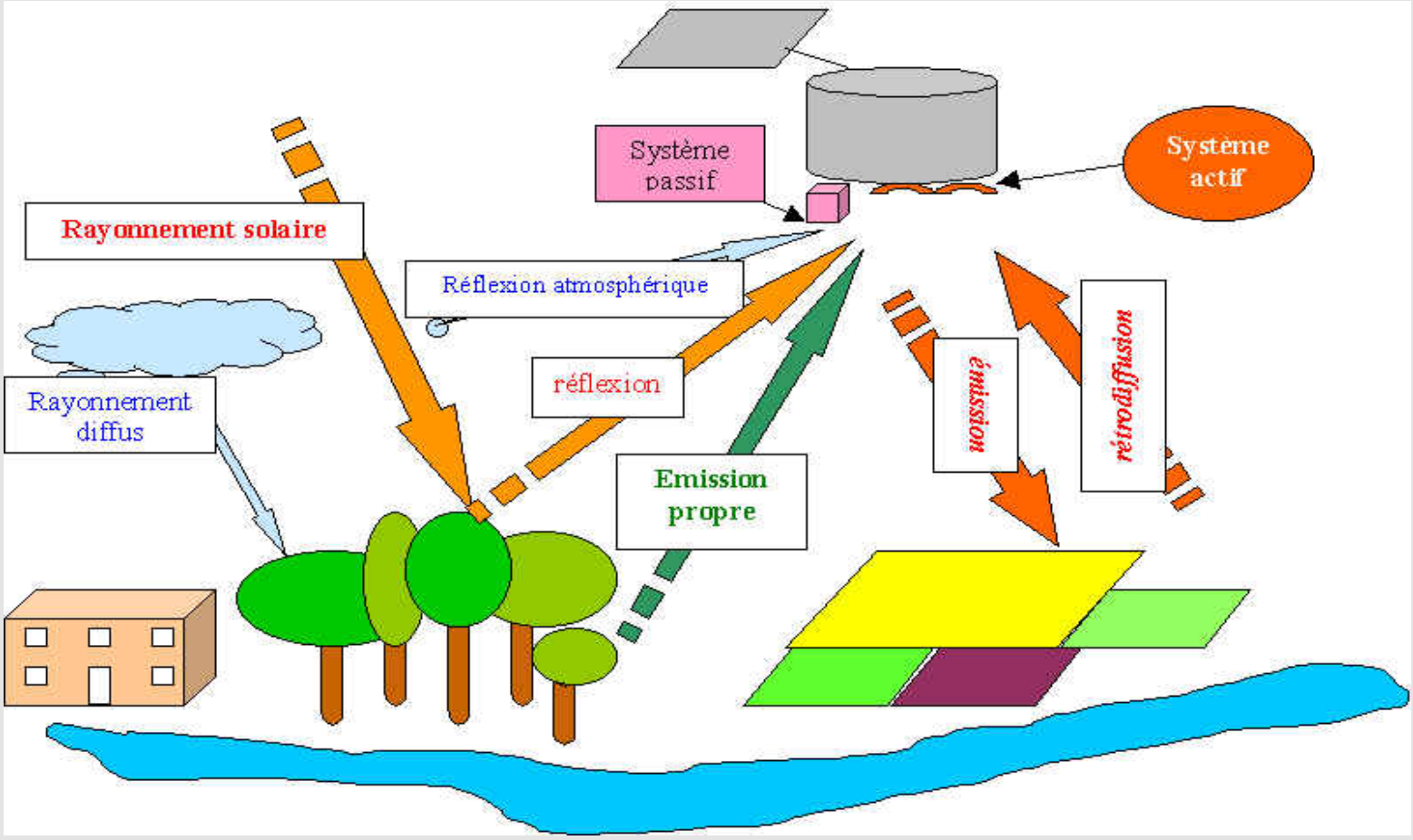
Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 35 à 56**.

Les capteurs

Ils permettent d'acquérir les données concernant les objets étudiés dans une bande donnée de longueur d'onde.

Les **capteurs actifs** sont à la fois émetteurs et récepteurs (ex : les radars, les lasers etc...)

Les **capteurs passifs** sont uniquement récepteurs (ex : radiomètres, caméras, spectroradiomètres, etc.), la source d'énergie est le plus souvent le soleil.



Le principe est le suivant : à l'intérieur du *champ de vision*, les flux émis ou réfléchis par les objets situés dans l'élément de surface (*pixel*) défini par l'*angle solide* du capteur et par son *altitude* sont recueillis par les détecteurs puis enregistrés. Il correspond à la *résolution géométrique*.

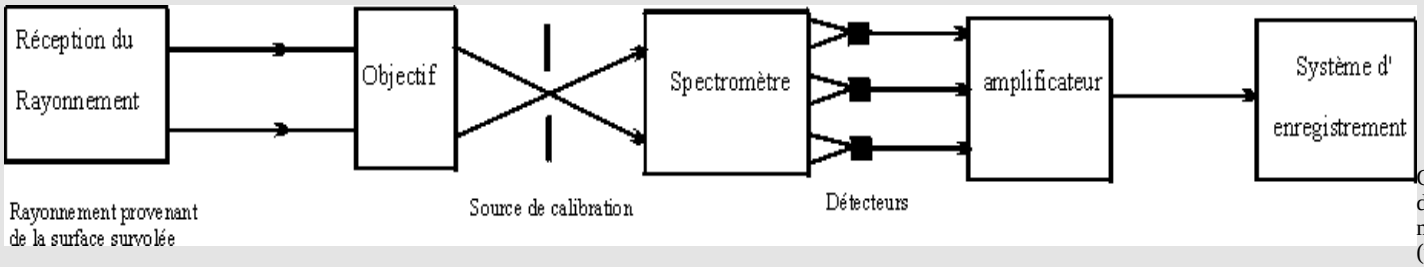
On distingue les caméras utilisant des pellicules photosensibles, des systèmes non photographiques.

Le principe de fonctionnement des capteurs non photographiques est le suivant :

- un système recevant le rayonnement du pixel et un télescope (objectif),

- une source de calibration et un spectromètre comprenant différents *détecteurs*,

- un amplificateur et un système d'enregistrement.



Configuration d'un scanneur multispectral (type LANDSAT MSS)

L'amplificateur est indispensable pour accroître le signal qui est le plus souvent très faible. Le signal reçu est transformé en signal numérique (par valeurs discrètes exprimées en nombre de bits : entre 6 et 12), par un système d'enregistrement qui varie selon les détecteurs.

Les bandes spectrales

Elles sont en nombre variable selon les capteurs, plus elles seront nombreuses et étroites, plus elles permettront la détection de phénomènes spécifiques de certains domaines spectraux (AVIRIS, CASI). Elles définissent la résolution spectrale du système.

Un détecteur doit recevoir une énergie minimum pour être activé, pour une bande large, la quantité d'énergie reçue est plus grande que pour une bande plus étroite. Il existe une relation inverse entre la résolution géométrique et la résolution spectrale.

La réception du rayonnement

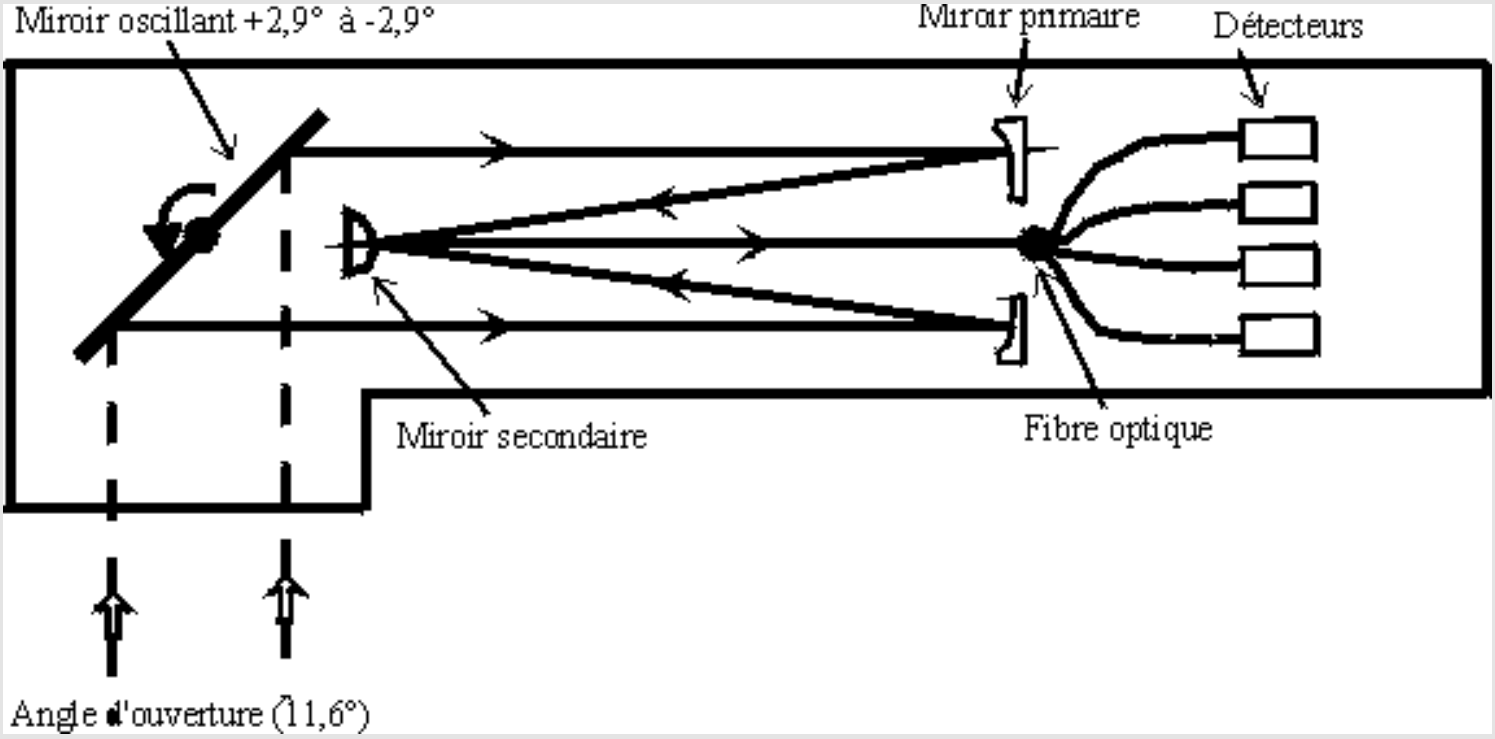
On distingue, suivant le mode d'acquisition des données : les systèmes à balayage (Landsat TM), des systèmes à barrettes (SPOT).

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 35 à 40**.

Capteurs à balayage

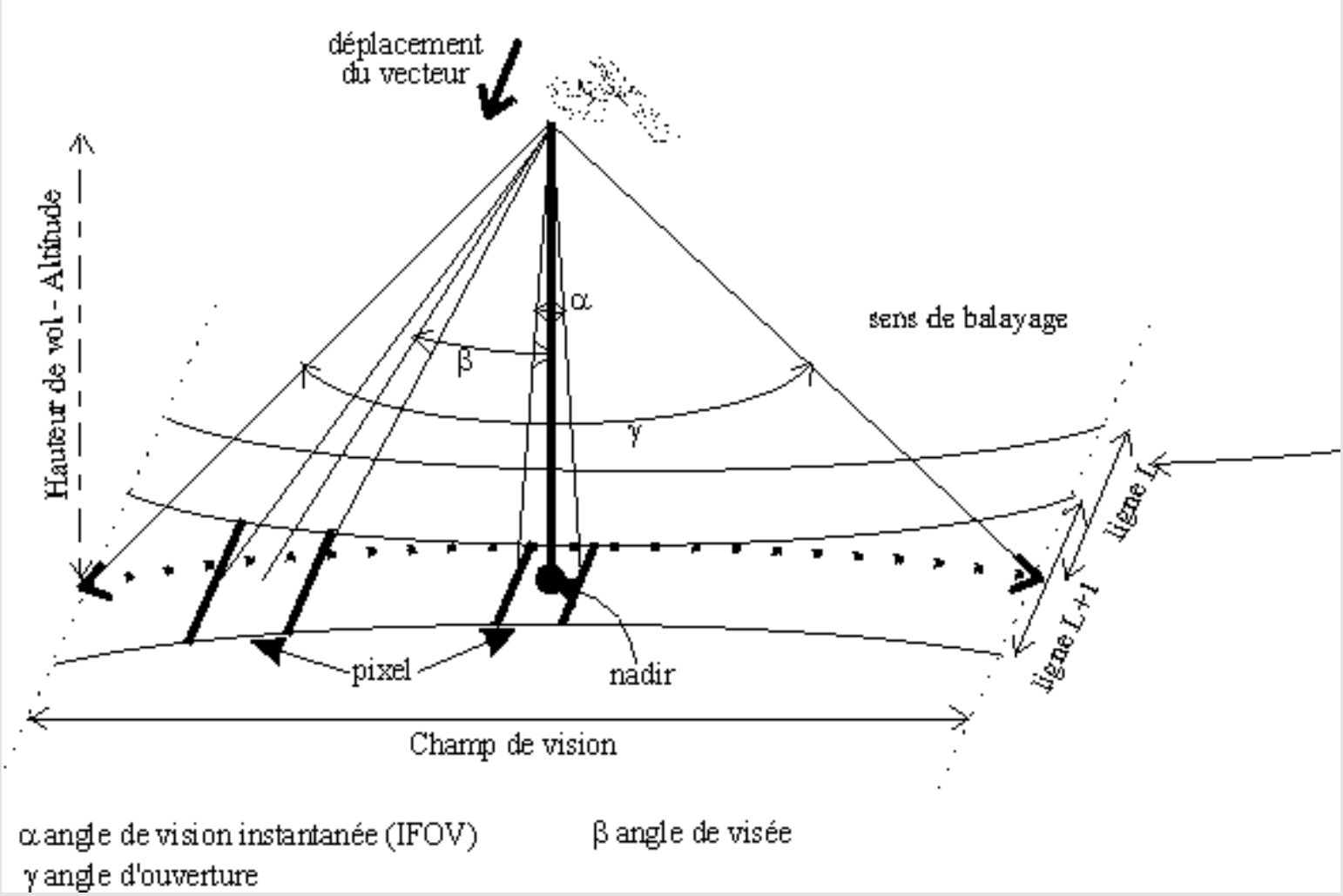
Le système à balayage

Il correspond aux capteurs des LANDSAT ainsi qu'à divers scanneurs aéroportés. L'acquisition des données est assurée par un miroir, tournant ou oscillant incliné à 45 ° sur la verticale, et situé perpendiculairement à l'avancée du vecteur.



Le système à balayage de LANDSAT MSS

L'énergie est reçue selon un angle solide dont l'ouverture définit le champ de vision instantané au sol (en anglais *Instantaneous Field of View*, IFOV), de l'ordre de 10^{-3} à 10^{-5} radian. Cet angle, constant pour un scanneur donné, détermine, pour une altitude donnée du vecteur, la superficie de la tache élémentaire au sol : le pixel. C'est la résolution géométrique du capteur.



Principe du balayage

L'image reçue est constituée d'une série de bandes dont la largeur est délimitée par l'angle d'ouverture du capteur et dépend en partie des mouvements du miroir. Ces bandes se recouvrent ou non en fonction de l'avancement du capteur et donc du vecteur sur lequel il est installé. Pour avoir une couverture complète et sans trous, il faut que la vitesse du déplacement du vecteur, son altitude et la vitesse de rotation du miroir soient parfaitement synchronisées.

Le mode d'acquisition par balayage influe sur les caractéristiques géométriques des images. En effet les dimensions des pixels d'une même ligne ne seront pas les mêmes selon que le pixel se trouve au nadir où latéralement sur la ligne de balayage. Il en résulte des déformations sur l'image, mais elles sont assez faibles pour les capteurs embarqués sur satellites qui ont des angles solides très petits. Cela s'accompagne de modifications radiométriques car l'épaisseur de l'atmosphère traversée est plus grande pour une visée oblique que pour une visée verticale.

Ces erreurs systématiques doivent être corrigées si l'on souhaite superposer différentes images ou si les interprétations thématiques doivent être comparées avec d'autres au sein d'un Système d'Information Géographique (SIG).

Capteurs à barrettes

Le système à barrettes (ou peigne)

Plus récent que le système de balayage, il comporte de 1 728 à 12 000 détecteurs CCD (*Charge-Coupled Device)* qui reçoivent en même temps l'information de 1728 ou 6 000 pixels placés sur une même ligne. L'énergie reçue est transformée en un signal électrique le courant induit est amplifié puis stocké sur support magnétique.

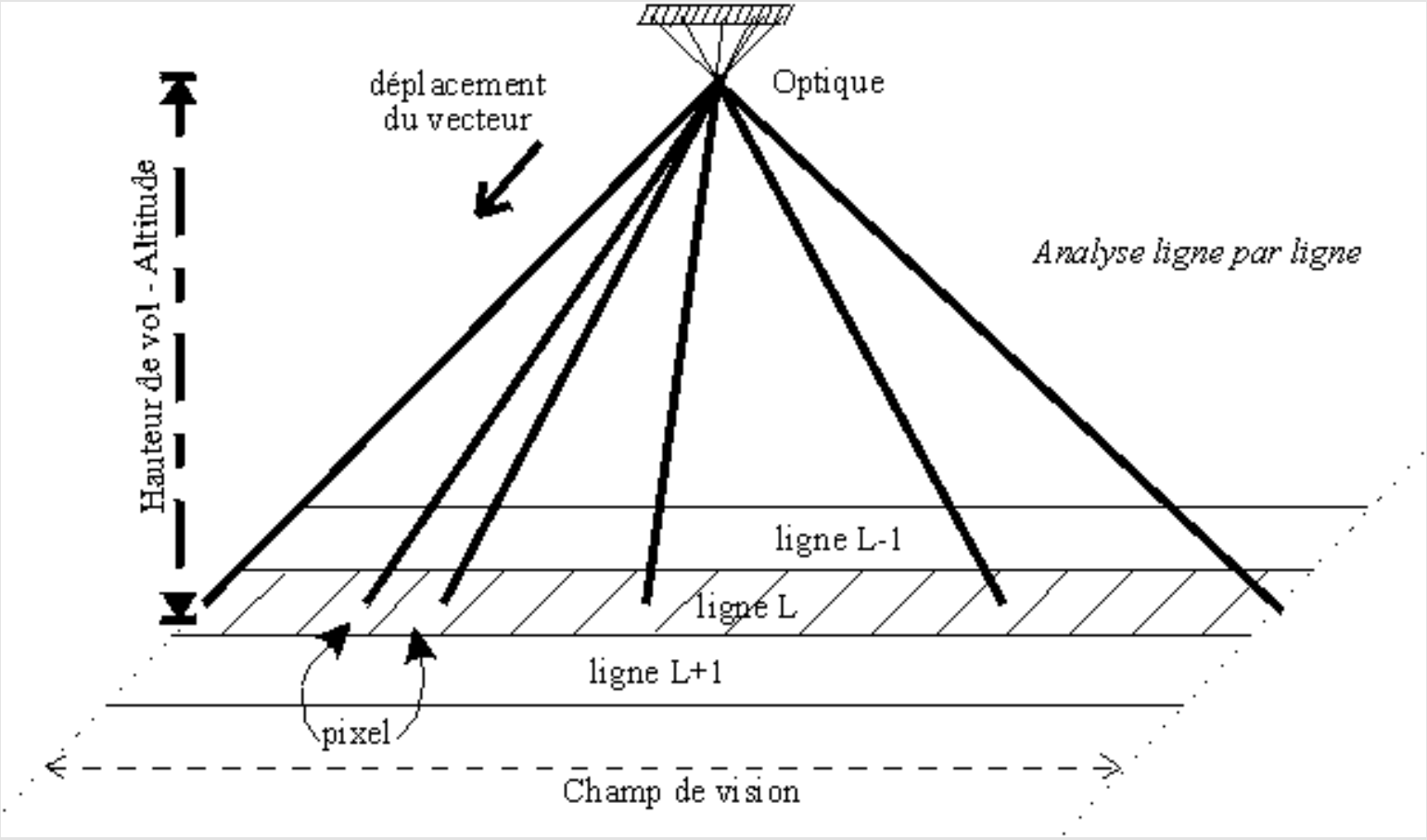


Schéma d'un capteur à barrettes

A chaque pixel correspond un détecteur. Comme tous les détecteurs sont identiques, il n'y a pas de déformations dues à l'optique de l'appareil (caméras photographiques), ni de distorsions dues au balayage (système à balayage). L'ensemble des détecteurs saisit une ligne, qui est générée par l'avancement du vecteur (*push broom)* ou ratissage. Chaque détecteur est étalonné individuellement. A chaque bande spectrale, correspond une barrette. Les détecteurs étant identiques, l'angle solide définissant le champ instantané est identique mais les dimensions des pixels sont légèrement plus grandes sur les bords de la ligne puisqu'on a une projection conique.

Avantage des systèmes à barrette vis à vis des systèmes à balayage : durée d'exposition plus grande pour une même vitesse du vecteur. En effet, soient :

D : la durée d'exposition (en s), p : la taille du pixel (en m), v : la vitesse du satellite (en m/s).

Pour le système à barrette : $D = p/v$

Pour le système à balayage avec un miroir : $D = p/n.v$

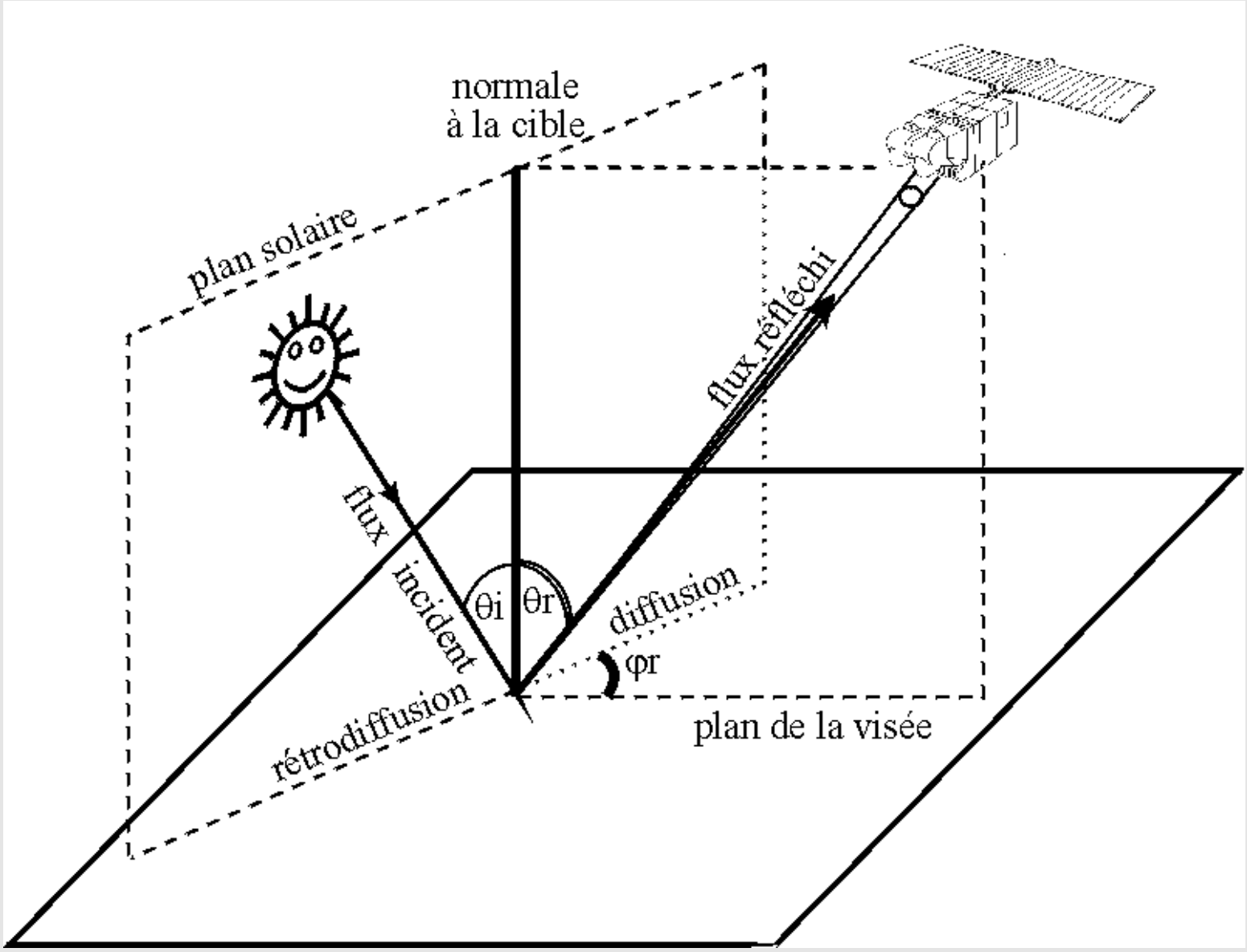
avec n : le nombre de pixels par ligne de balayage

v : vitesse du satellite (en m/s)

Les capteurs HRV de SPOT et MOS-1 correspondent à des systèmes à barrettes.

Le facteur de réflectance

Le facteur de réflectance spectral Rλ est égal au rapport du flux énegétique réfléchi par un élément de surface dans un cône dont le sommet se trouve sur l'élément de surface, au flux énergétique qui serait réfléchi dans un même angle solide par un réflecteur diffusant parfait (surface blanche lambertienne) recevant le même éclairement.



$$R_\lambda = \int_{\Omega_r} L_r(\theta_r, \varphi_r) \times \cos\theta_r \times d\Omega_r \,/\, L_w \int_{\Omega_r} \cos\theta_r \times d\Omega_r = \overline{L_r(\Omega_r)} / L_w$$

avec Ω r : angle solide dans lequel le flux énergétique est mesuré, Lw : luminance d'un réflecteur blanc lambertien

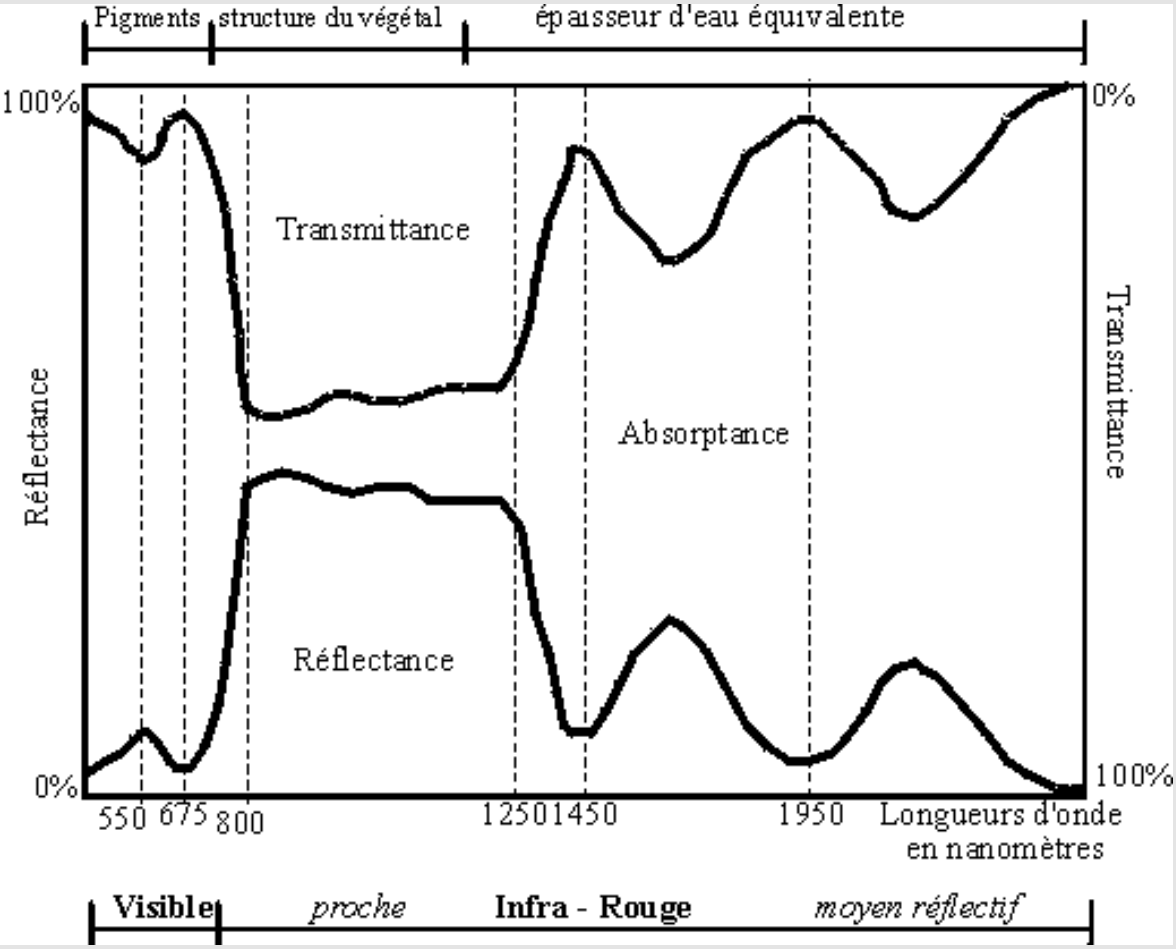
Les propriétés optiques des surfaces naturelles sont très différentes selon le domaine spectral considéré, par exemple la neige fraîche réfléchit 95% du rayonnement solaire, tandis qu'elle se comporte comme un coprs noir dans l'infrarouge thermique (0,90 < ε < 0,99). De même l'albédo des sols nus peut varier de façon importante en fonction de leur humidité, tandis que leur émissivité est peu sensible à la teneur en eau.

Les comportements spectraux

(visible, infrarouge proche et moyen réflectif)

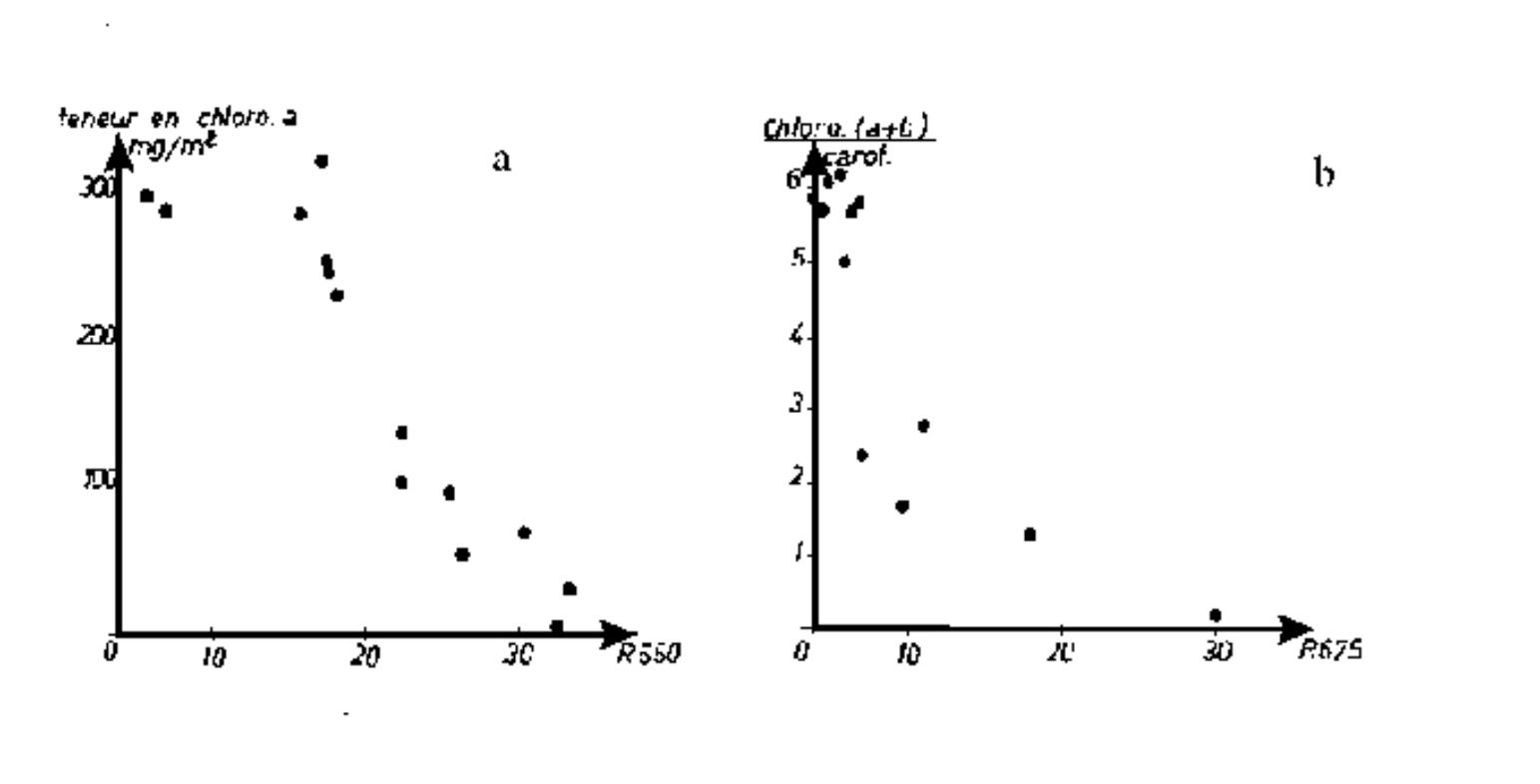
Végétation

Les végétaux chlorophylliens se caractérisent par des comportements particuliers dans les grands domaines spectraux.



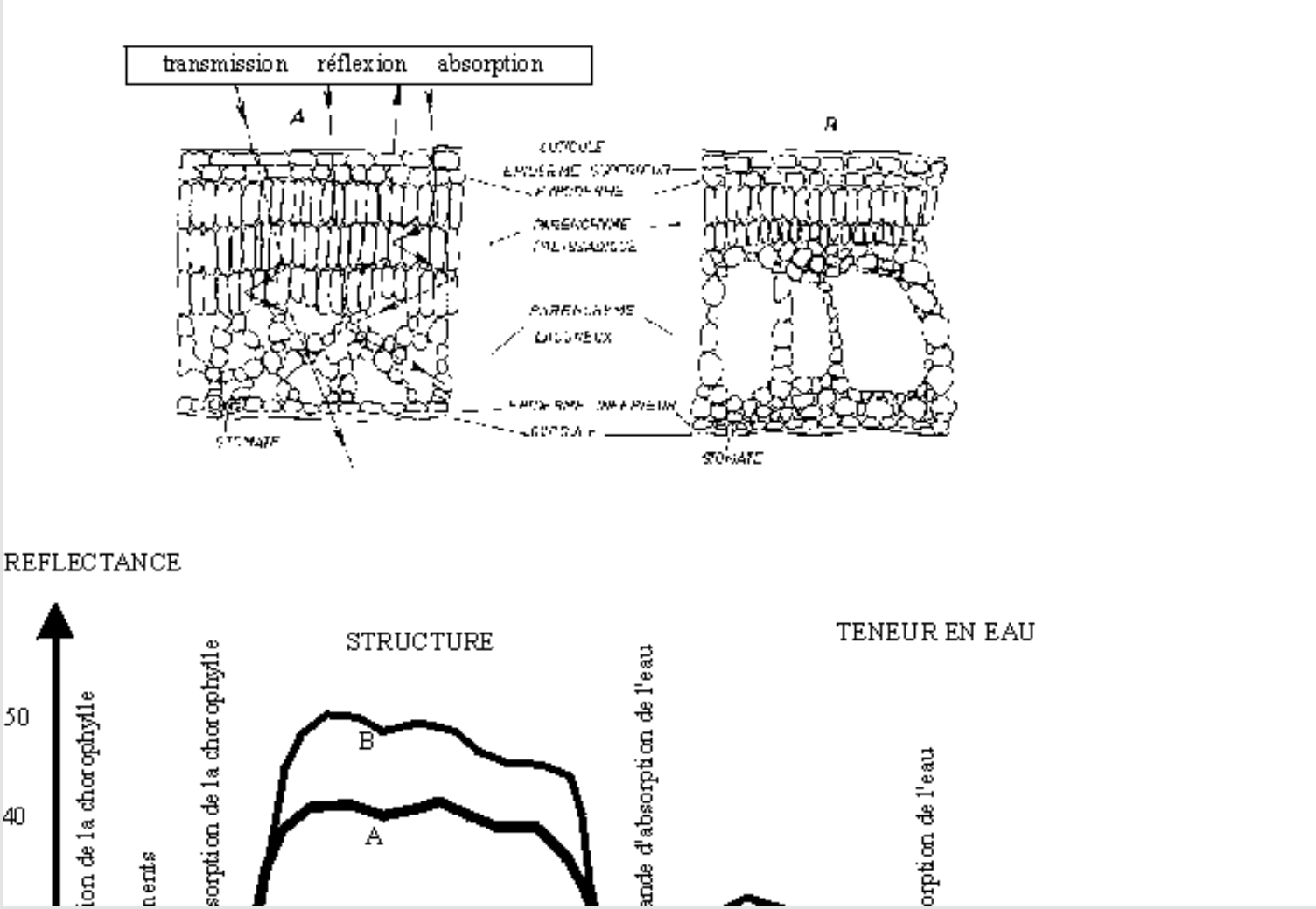
Comportement spectral d'un végétal chlorophyllien

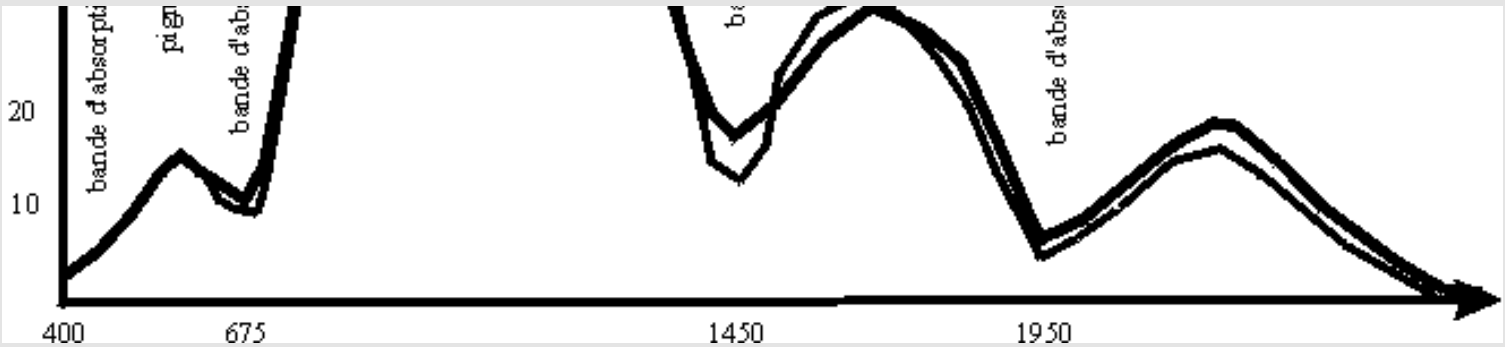
- Dans le visible, à cause des pigments chlorophylliens, la réflectance est globalement faible avec un maximum à 0,55 µm et un minimum à 0,675 µm.



a) Relation inverse entre la réflectance à nm et la chlorophylle a b) Relation inverse entre la réflectance à 675 nm et le rapport chlorophylle/carotène

- Dans le proche infrarouge, en fonction de la structure des tissus ainsi que de la structure générale de la canopée et de l'importance de la biomasse chlorophyllienne, la réflectance est plus ou moins forte. Sauf cas particuliers, dans ce domaine spectral, la végétation chlorophyllienne a toujours des valeurs de réflectance plus fortes que les autres objets (sols, eau, minéraux...).



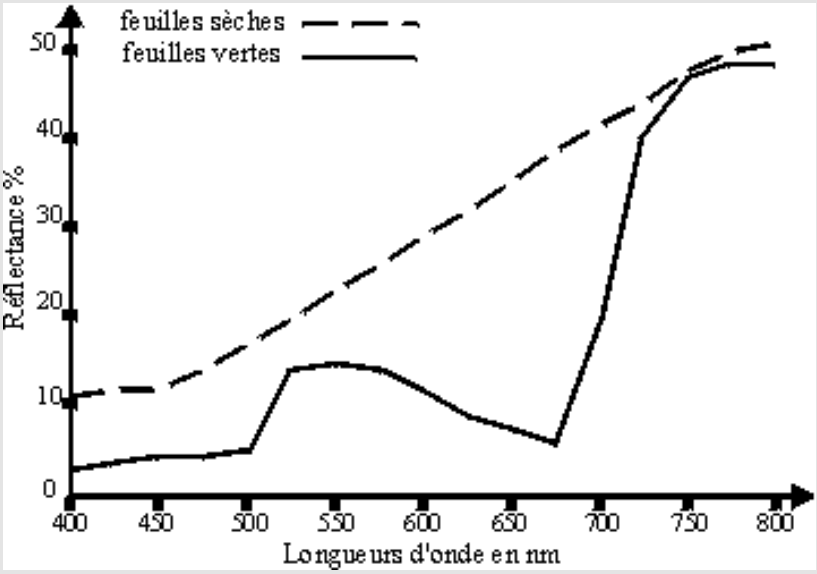


Influence de la structure interne des feuilles sur leur comportement spectral

- Dans l'infrarouge moyen réflectif, en fonction de la teneur en eau des tissus végétaux, la réflectance sera plus ou moins forte. Plus la teneur en eau est grande, plus la réflectance est faible.

Les changements d'état physiologique (maturation, sénescence,...) de la végétation se traduisent par des changements spectraux :

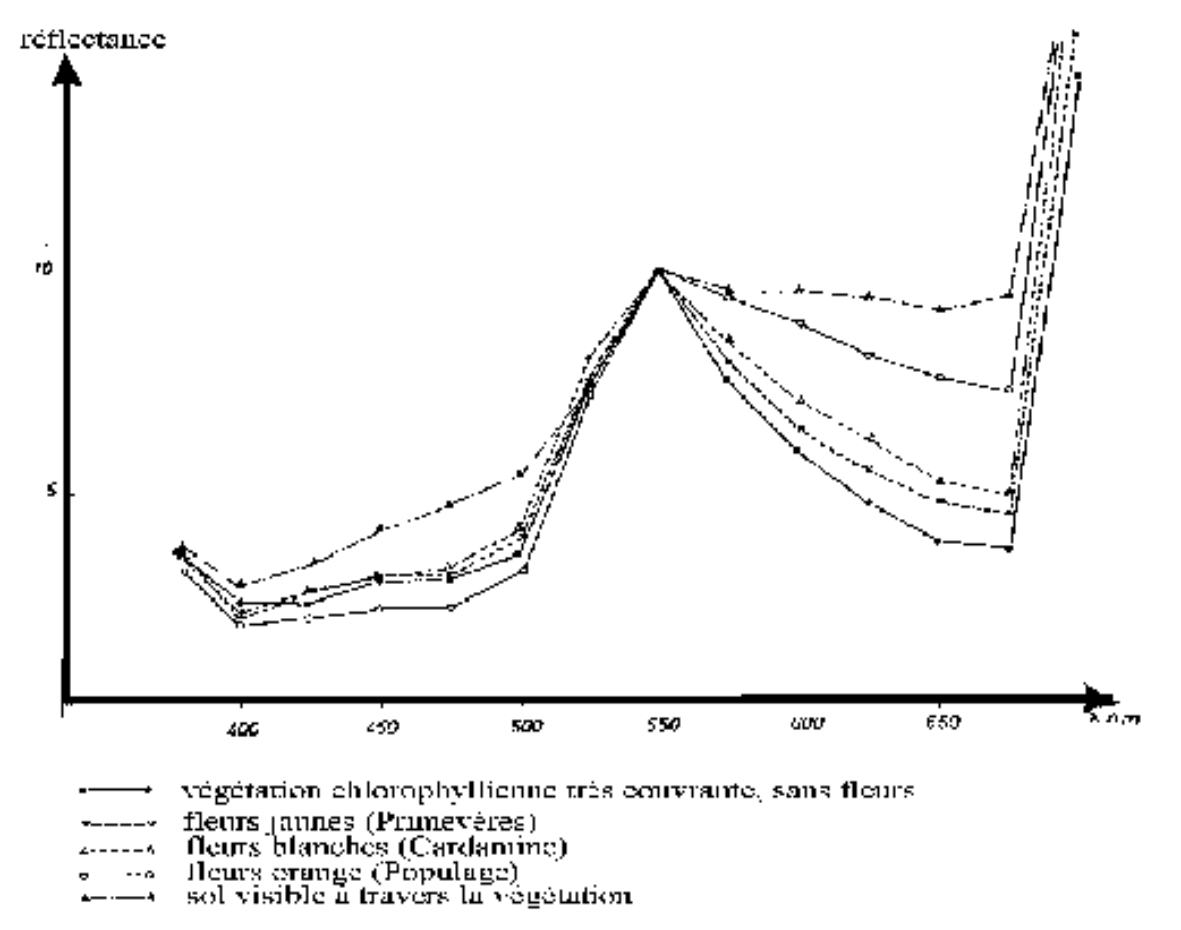
- la disparition des pigments chlorophylliens conduit à des réflectances plus fortes dans le visible et en particulier la disparition du maximum à 0,675 µm,



Réflectance de feuilles vertes et de feuilles sèches (de l'année précédente), d'un même individu de brachypode penné (*Brachypodium pinnatum* L.)

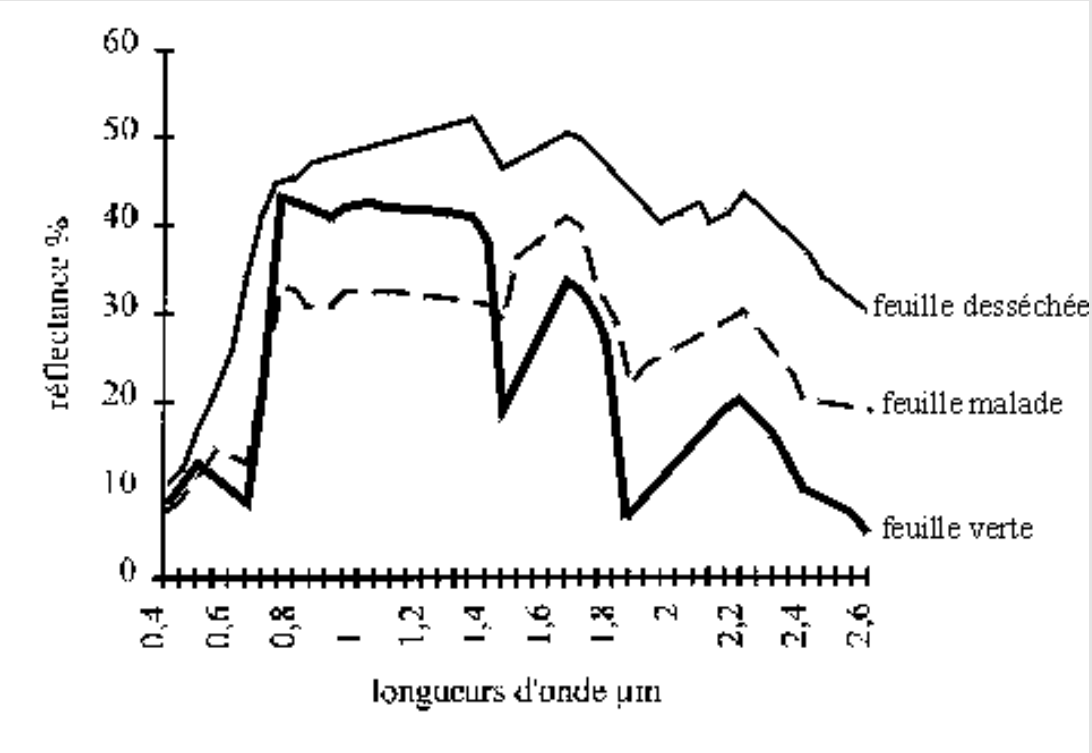
- l'abondance de certains pigments dans les inflorescences modifie le comportement spectral dans le visible. Ces modifications sont décelables au laboratoire et pour les réflectances mesurées sur le terrain.

Elles ne sont perceptibles sur des données prises en altitude, que lorsqu'il s'agit de plantes cultivées (colza, tournesol, lin ...) ou de jachère (phacélie) dont la densité de fleurs est très grande.



Influence des couleurs des fleurs sur la réflectance de prairies permanentes (mesures sur le terrain)

- la diminution de la teneur en eau et les changements dans la structure du feuillage provoquent, pour des mesures au laboratoire, une augmentation de la réflectance dans le moyen infrarouge réflectif et une diminution dans l'infrarouge proche, ou une augmentation dans cette bande spectrale pour des couverts végétaux complètement secs.

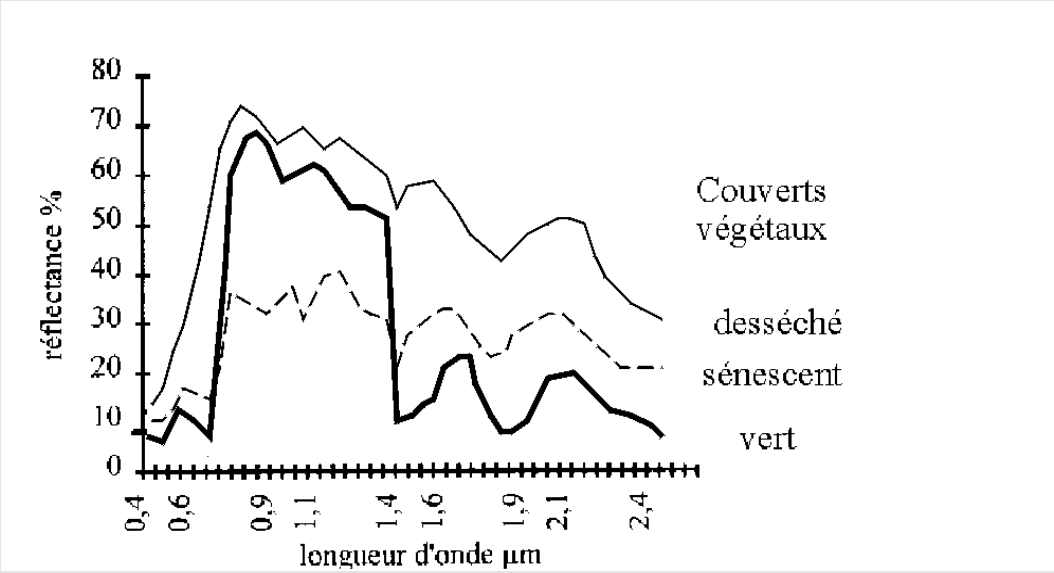


Réflectance, mesurée au laboratoire de feuilles dans divers états physiologiques

Les bandes d'absorption de l'eau à 1,45, 1,95 et 2,45 µm, disparaissent quand la feuille est sèche.

Sur le terrain, aux caractéristiques du feuillage s'ajoutent celles du sol sous-jacent ainsi que des ombres portées. Le

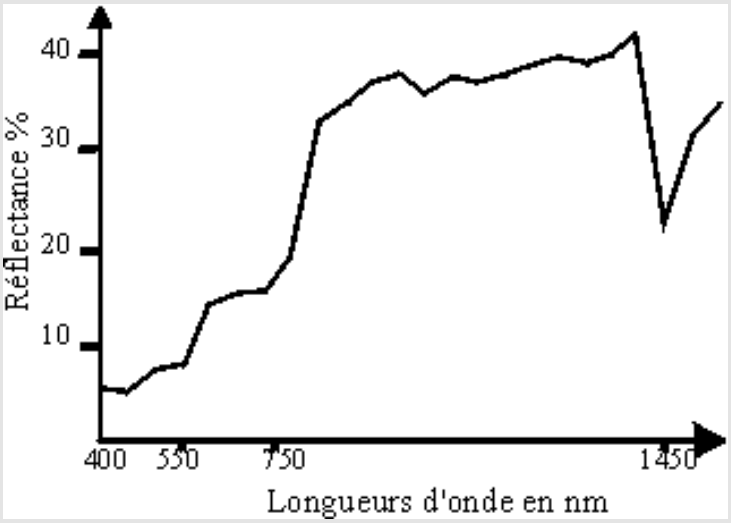
comportement spectral est différent de celui de feuilles mesurées au laboratoire.



Réflectance, mesurée sur le terrain, de couverts végétaux dans divers états physiologiques

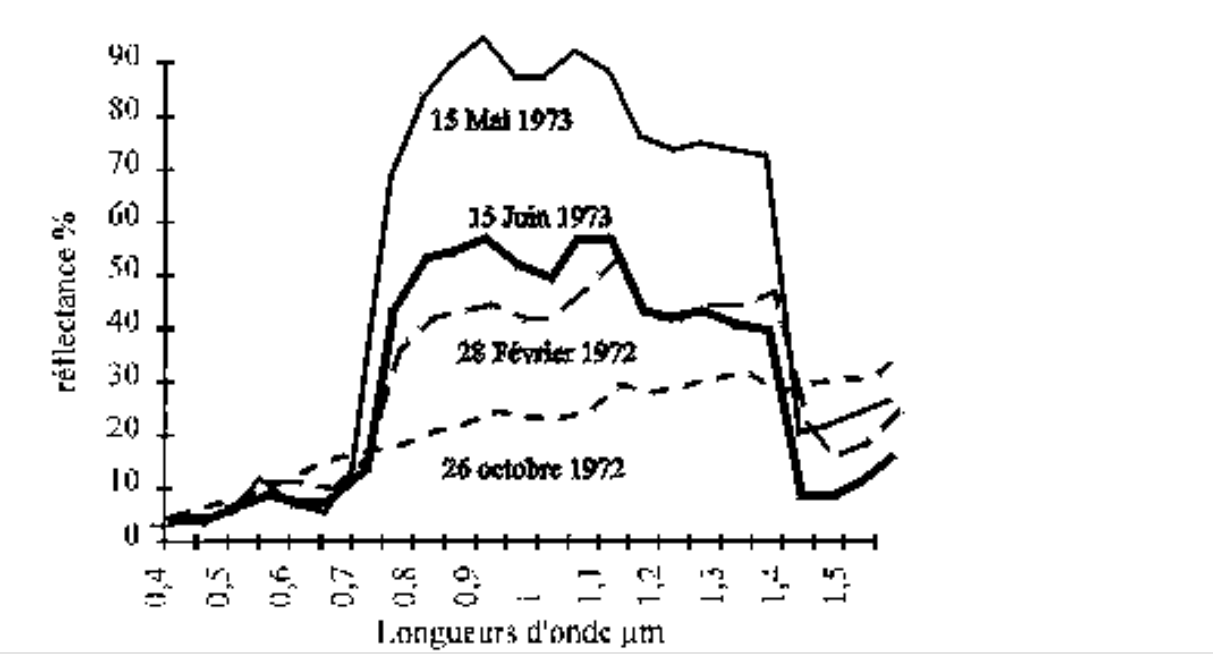
Dans ce cas, la réflectance d'un couvert sénescent est souvent plus faible dans le proche infrarouge que celle du même couvert, chlorophyllien.

La contribution du sol nu pour les jeunes stades de croissance d'une culture est responsable de comportements spectraux particuliers. Il est difficile dans ce cas d'identifier, sur les données satellitaires, la présence d'un végétal chlorophyllien.

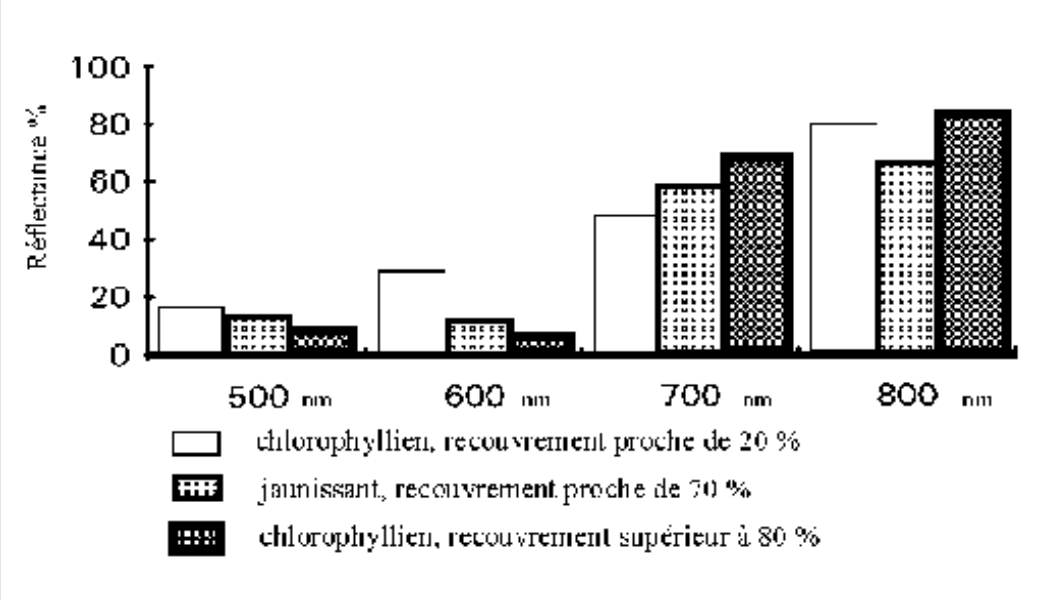


Réflectance d'un couvert de maïs inférieur à 20%.

Au champ, l'effet des pratiques agricoles, modifie les comportements spectraux des cultures et des pâturages. Il faut en tenir compte pour l'interprétation des données de télédétection, en s'appuyant sur la connaissance du calendrier agricole.



Mesures de réflectance, au champ, à différentes dates, parcelle de blé d'hiver



Réflectance, mesurée sur le terrain, de couverts d'une graminée fourragère (*Panicum maximum*) à différents stades d'exploitation.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 75 à 86**.

Les indices de végétation

Approche empirique pour identifier et suivre l'évolution temporelle des couverts végétaux, ainsi que pour évaluer certains paramètres du couvert comme la biomasse aérienne chlorophyllienne, les indices de végétation sont calculés soit à partir de mesures de réflectance sur le terrain, soit de comptes numériques fournis par des données satellitales

Les indices de végétation les plus couramment utilisés

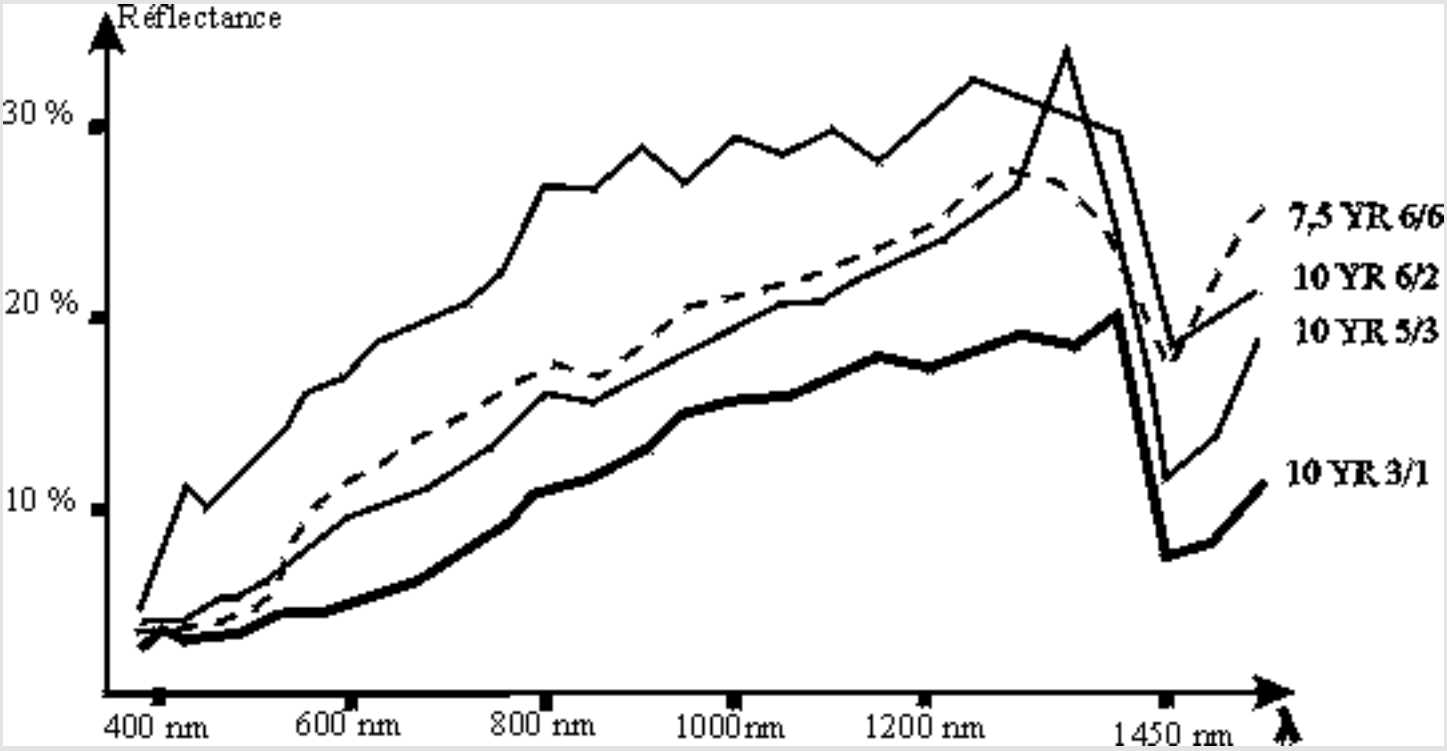
Dénomination	Formule	Caractéristiques	Auteurs
Différence	R - pIR	forte sensibilité aux variations atmosphériques	Monget 1980
Rapport	RVI = pIR/R ou d'autres canaux XS1/XS2 Indice pigmentaire	saturation aux forts indices, sensibilité à la contribution spectrale des sols et aux effets atmosphériques	Knipling 1970, Viollier et al. 1985
Indice de végétation normalisé	NDVI = (pIR-R)/(pIR+R)	sensibilité aux effets atmosphériques, gamme de variation plus faible, que le précédent, mais sensibilité aux variations angulaires de la visée, selon la position vis à vis du soleil "hot spot"	Rouse et al. 1974, Tucker 1979
Indice de végétation transformé	TVI = √ (NDVI + 0,5)	essai d'élimination des valeurs négatives, stabilisation de la variance	Deering et al. 1975
Indice de végétation perpendiculaire	PVI = a1(pIR)-a2(R) + constante	diminution de la contribution spectrale des sols, mais sensibilité à diverses caractéristiques des sols	Richardson & Wiegand 1977
Chapeau à corne "*tassel cap*"	formule générale a1(V)+a2(R)+a3(pIR)+a4(pIR)	transformation orthogonale des 4 canaux pour réduire la sensibilité à la contribution spectrale des sols, sans pouvoir l'éliminer complètement	Kauth & Thomas 1976
issu du précédent : Indice de verdeur	GR4 = -b1(V)-b2(R)+b3(pIR) +b4(pIR) pour canaux MSS		Jackson 1983
Indice de végétation ajusté au sol	SAVI = [(1+L) (pIR-R)] / (pIR+R+L) avec L = 0,5 pour diminuer l'effet du sol	De nombreux indices sont issus de celui-ci pour minimiser l'effet du sol (TSAVI, MSAVI...)	Huete 1988
indice de végétation normalisé corrigé des effets atmosphériques	ARVI = (pIR-RB)/(pIR+RB) avec RB = R - γ(B-R) B et R réflectances dans le bleu et le rouge, γ fonction du type d'aérosols	Diminue l'effet des aérosols contenus dans l'atmosphère sur le NDVI mais sensible à la contribution spectrale des sols	Kaufman & Tanre (1992)
etc ...	**...**	**...**	**...**

Un certain nombre d'indices de végétation ne sont utilisables que pour des couverts denses (pas de sol apparent), mais pas trop (sinon effet de saturation)(ex: rapport) et chlorophylliens, sans mélange de matière sèche sur pied avec la matière verte (ex : NDVI). Dans le cas d'un faible recouvrement par la végétation chlorophyllienne, il faut utiliser des indices comme le SAVI.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 90 à 91**.

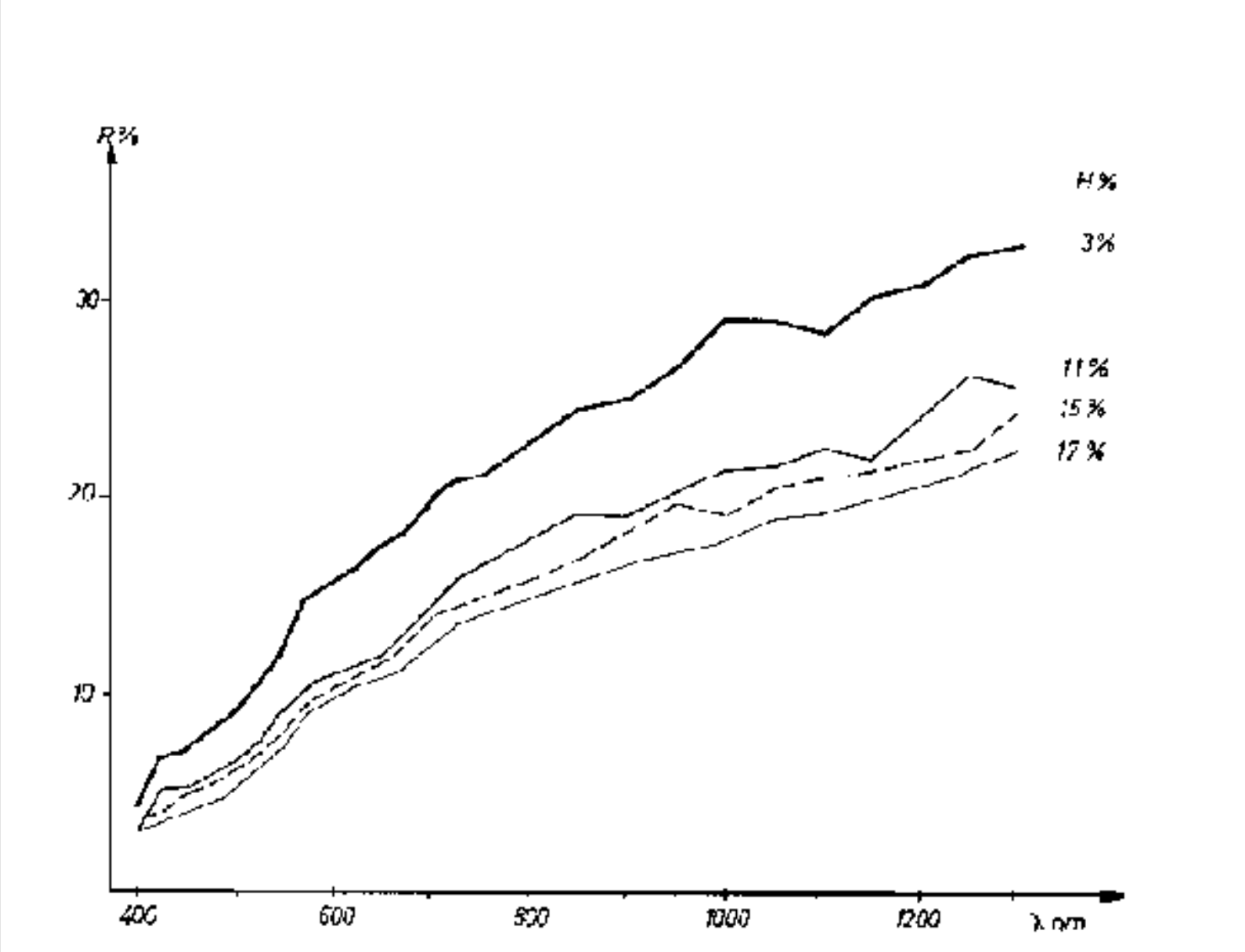
Comportements spectraux des sols

Ils se caractérisent par des valeurs de réflectance régulièrement croissantes dans le visible et le proche infrarouge, tandis qu'elles sont généralement faibles dans le moyen infrarouge réflectif.



Réflectances, mesurées sur le terrain, de sols de différentes couleurs.

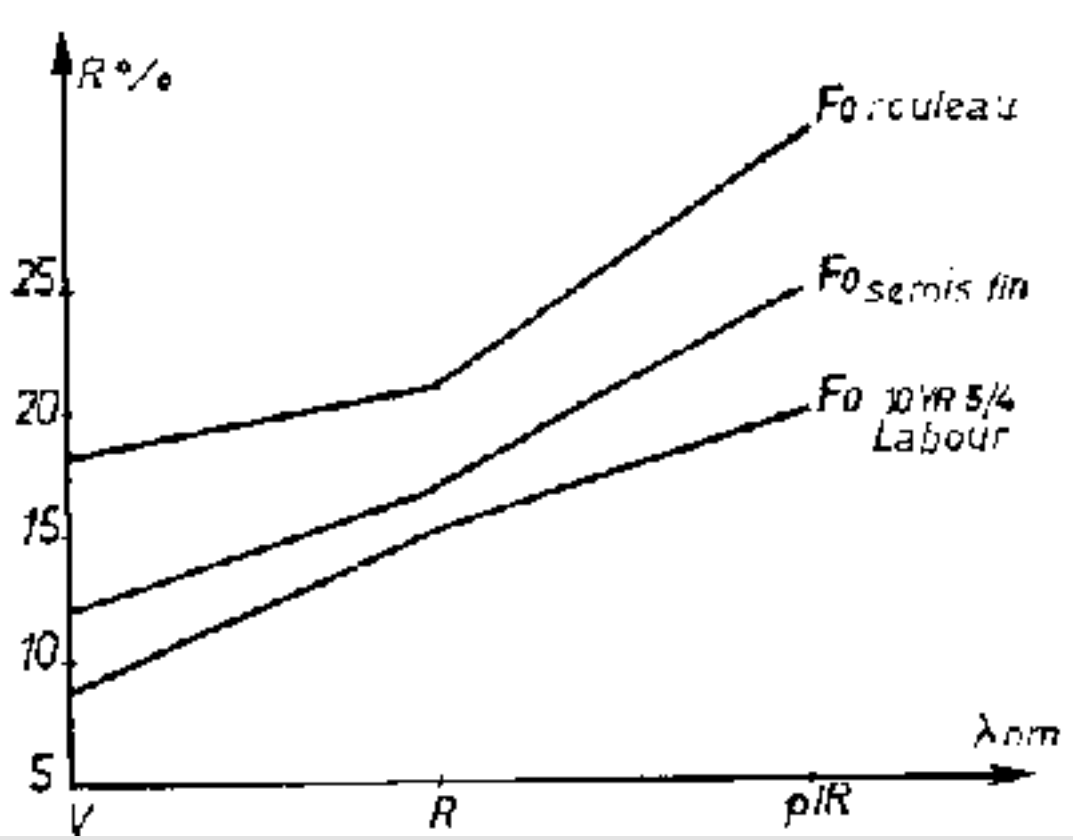
Ces valeurs, d'autant plus faibles que les sols sont plus humides, sont particulièrement faibles pour les bandes d'absorption de l'eau à 1,45, 1,95 et 2,45 µm.



Réflectances, mesurées sur le terrain, d'un même sol plus ou moins humide.

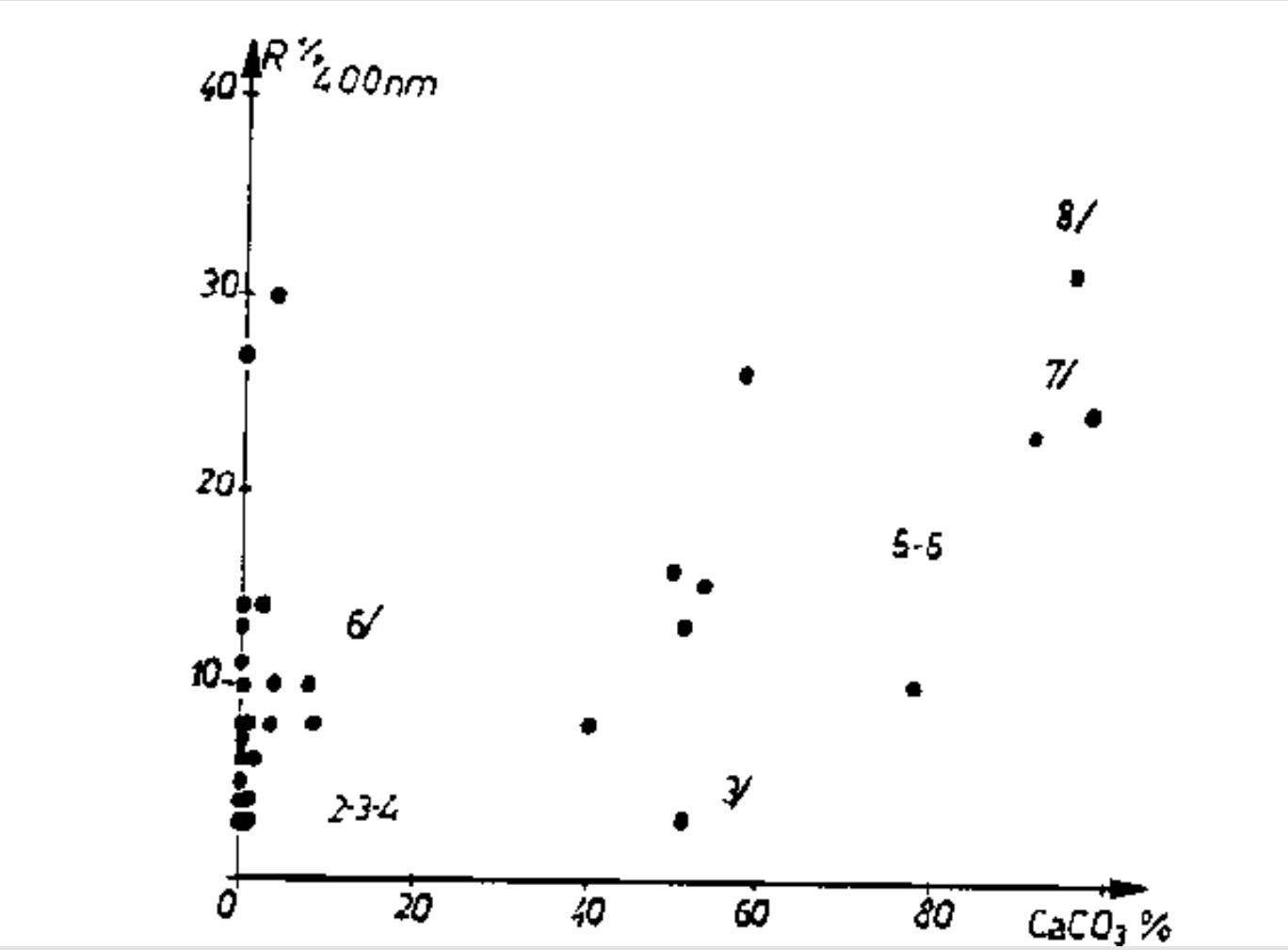
La teneur en eau n'est pas le seul facteur modifiant les valeurs de réflectance. Parmi les autres facteurs :

- **la rugosité de surface du sol** : une surface lisse (rouleau) est plus réfléchissante qu'une surface rugueuse (labour).



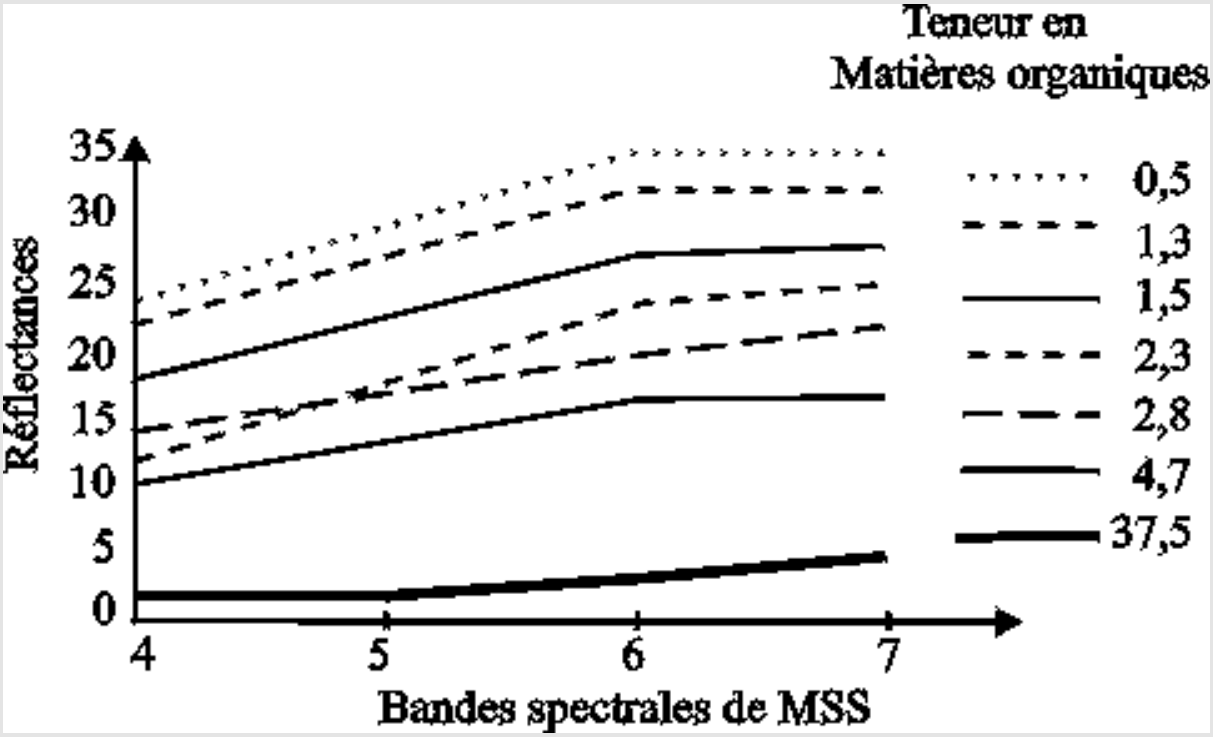
Réflectance, mesurée sur le terrain, de différents états de surface d'un même sol.

- **la teneur en calcaire** : la réflectance augmente avec le pourcentage de calcaire.



Relation entre le calcaire total et la réflectance à 400nm (6/ ,8/ ...clartés Munsell), *d'après D. Courault*.

- **la teneur en matière organique** : la réflectance diminue avec la teneur en matière organique.

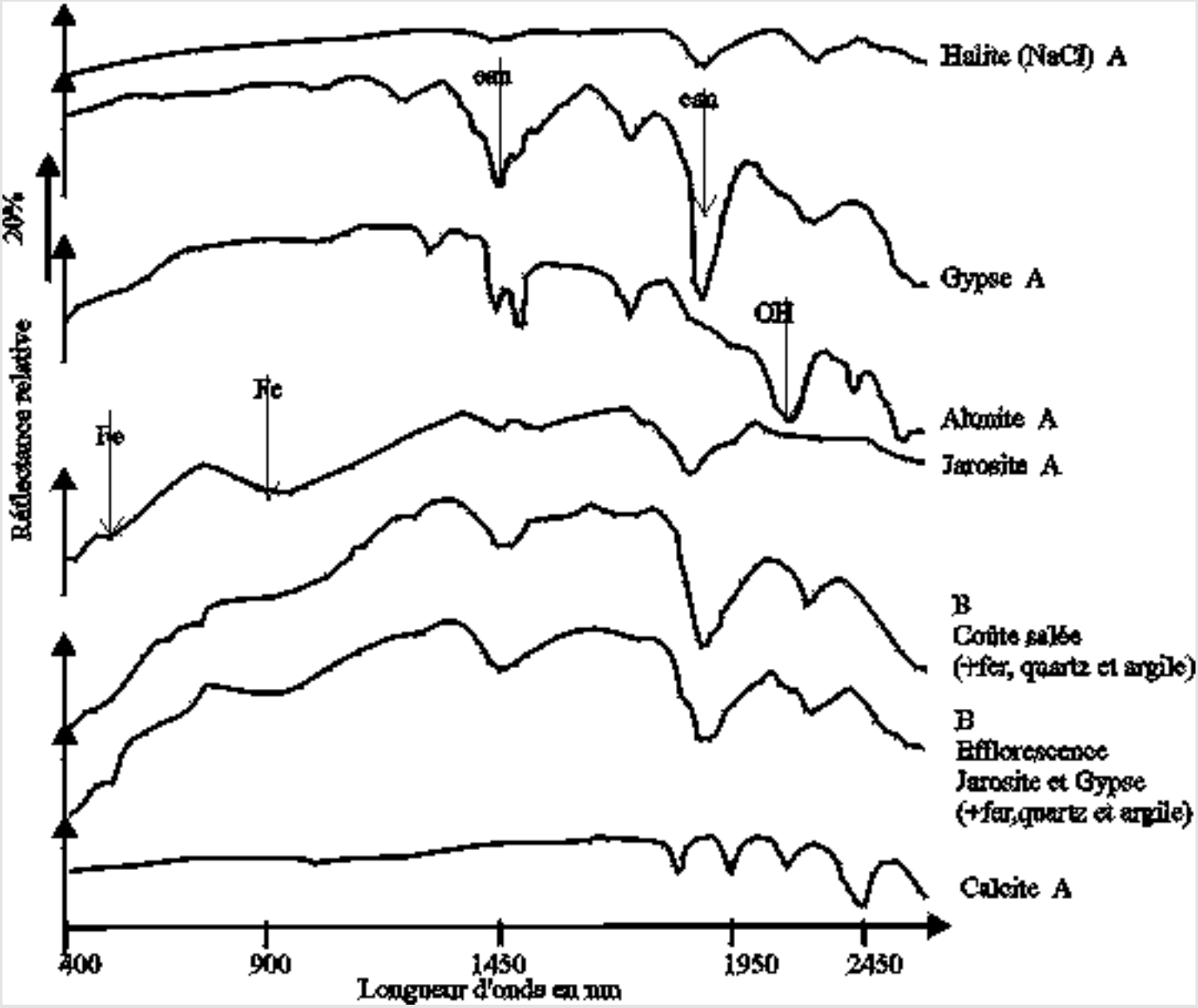


Réflectance, mesurée sur le terrain, de sols plus ou moins organiques.

- **le fer** : la réflectance diminue avec la teneur en fer.

- **la granulométrie** : il s'agit d'un effet indirect en fonction de la teneur en eau des différents éléments texturaux (argiles, limons, sables, graviers, cailloux, pierres, blocs).

- **les sels** : ils sont détectables particulièrement dans l'infrarouge proche et moyen réflectif.



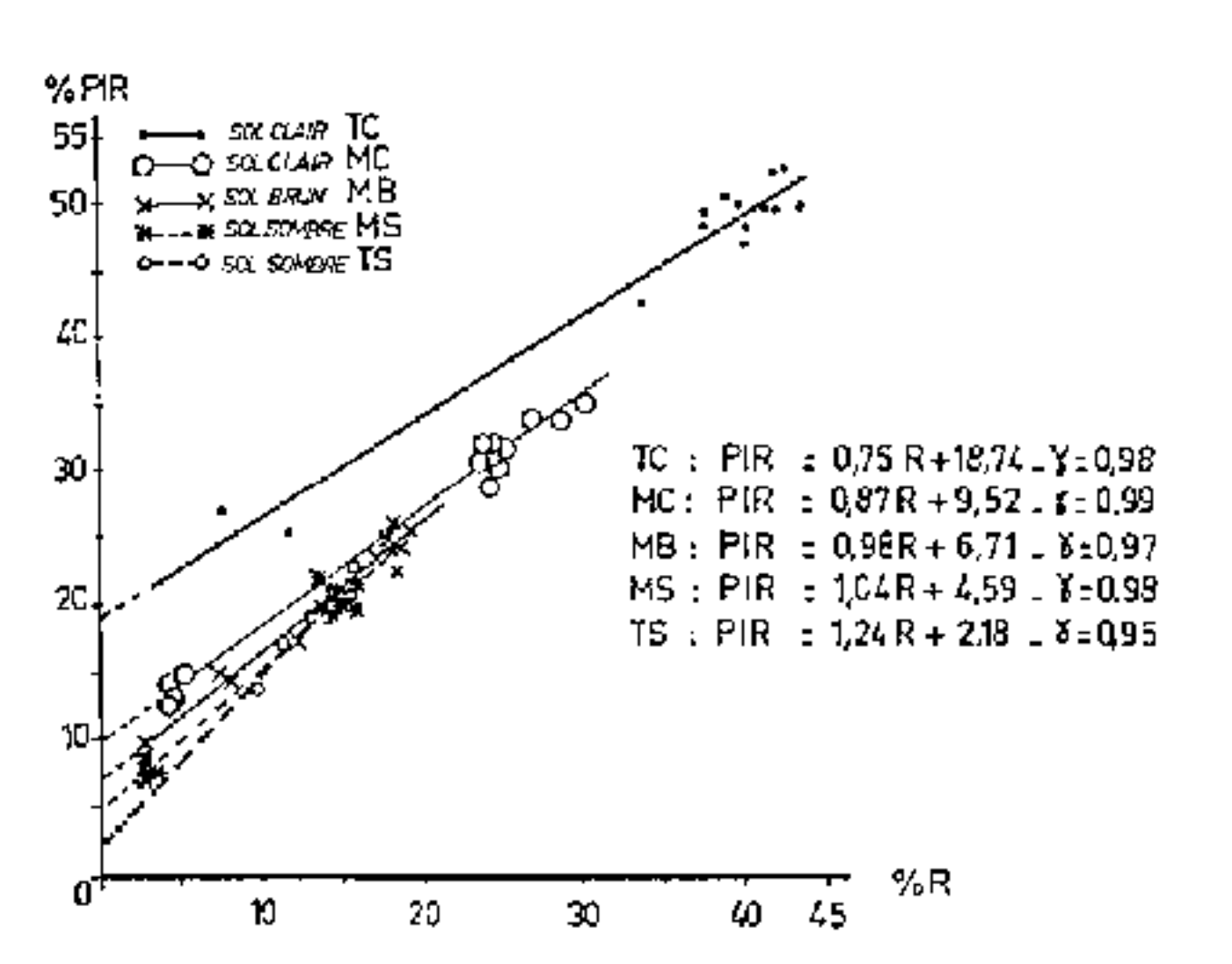
Réflectance spectrale de différents sels, au laboratoire (A), sur le terrain (B), *d'après B. Mougenot*.

Sur les données de télédétection, le comportement spectral observé, résulte le plus souvent de l'interaction de ces divers facteurs.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 415 à 429**.

Le faisceau de droites des sols

Défini par la relation linéaire entre les luminances spectrales dans le visible et le proche infrarouge. Bien qu'il s'agisse d'un faisceau, la notion de "droite du sol" a été utilisée comme référence pour les études de couverts végétaux peu couvrants.



Faisceau de 5 droites de sol, *d'après D. Courault.*

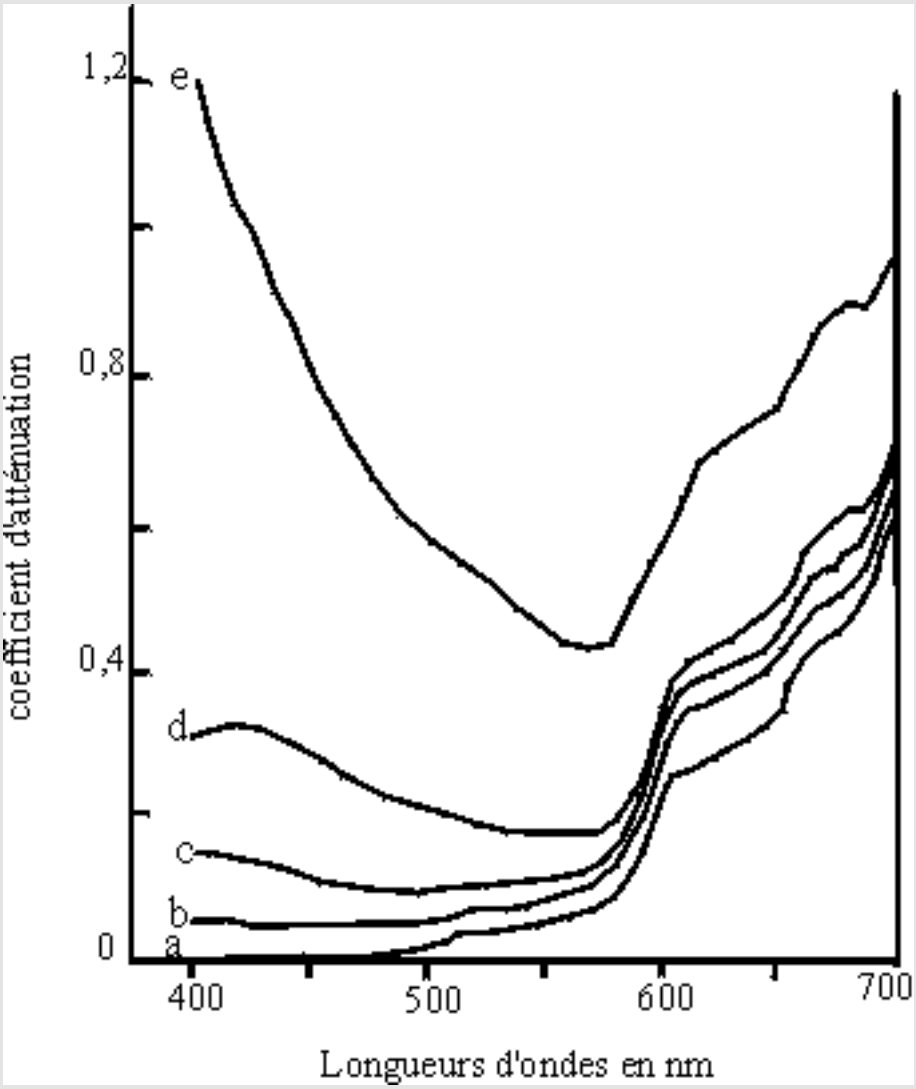
Sur cet exemple, les sols, en fonction de leurs caractéristiques physico-chimiques, correspondent à des droites d'équations assez différentes en fonction de leurs réflectances dans la bande du rouge et celle du proche infrarouge.

Les sols clairs ont une ordonnée à l'origine plus grande et une pente de leur droite de régression plus faible que les sols sombres.

Comportements spectraux : eau, neige

Eau

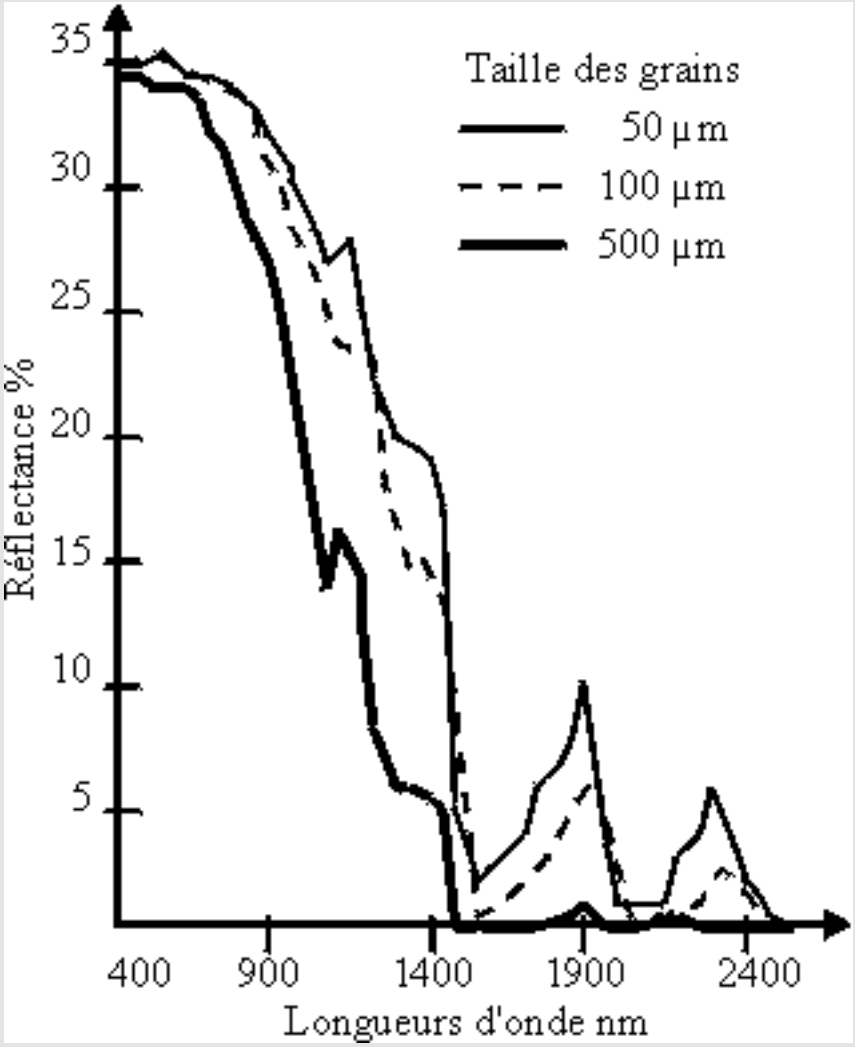
La réflectance de l'eau pure, assez forte dans la bande bleue du visible, diminue ensuite rapidement pour devenir très faible dès le proche infrarouge. Des particules minérales, du plancton ou des végétaux, en suspension ou flottant dans l'eau, modifient ces caractéristiques en augmentant la réflectance dans le visible .



Spectres du coefficient d'atténuation diffuse pour l'éclairement de différents types d'eau.

Neige et glace

La neige a une réflectance forte dans le visible et faible dans le proche infrarouge. Dans ce domaine spectral, elle est d'autant plus réfléchissante que les cristaux sont plus petits.



Réflectance de la neige calculée à partir d'un modèle pour différentes tailles de grains, *d'après Fily et al.1997*.

Le classement par réflectances décroissantes est le suivant :

neige fraîche > neige ancienne > névé > glace

Les compositions colorées

Sur un écran d'ordinateur, l'impression de couleurs est obtenue selon le principe des "couleurs additives" tandis que sur papier s'applique le principe des "couleurs soustractives".

Les *couleurs primaires additives* sont bleu, vert, rouge, elles sont combinées pour produire des couleurs secondaires : jaune, magenta et cyan, le noir est constitué par l'absence de couleur.

COMPOCOL.html_txt_couleurs_cmp.gif (5157 bytes)

Les *couleurs soustractives* procèdent de manière inverse

Sur les émulsions photographiques la restitution colorée se fait de la façon suivante :

Bandes spectrales	Bleu	Vert	Rouge	infrarouge
Film couleur				
sensibilité normale	***bleu***	***vert***	***rouge***	pas de sensibilité spectrale
couleur des couches	jaune	magenta	cyan	
couleur résultante	**bleu**	**vert**	**rouge**	
Film IRC				
sensibilité normale	***bleu***	***vert***	***rouge***	***infrarouge***
après filtrage		vert	rouge	infrarouge
couleur des couches		jaune	magenta	cyan
couleur résultante		**bleu**	**vert**	**rouge**

Les émulsions couleur et infrarouge couleur

INSERER DES IMAGES CORRESPONDANT A LA MEME ZONE EN DIVERSES EMULSIONS

Par analogie avec les émulsions photographiques, pour obtenir des compositions colorées correspondant aux couleurs naturelles ou à l'infrarouge couleurs, on affecte les bandes spectrales aux 3 composantes couleur de base comme suit :

couleurs	Bleu	Vert	Rouge	Végétaux chlorophylliens	Sols nus	Eau pure	Eau turbide
Couleurs naturelles	TM1	TM2	TM3				

IRC	TM2	TM3	TM4				
	B1	B2	B3				
Autre composition	TM3	TM4	TM5				
	B2	B3	B4				

Compositions colorées sur moniteur couleur avec données Landsat TM et SPOT

Avec la composition IRC les sols nus apparaissent de couleur bleu-vert, la végétation chlorophyllienne de couleur magenta, l'eau non turbide est de couleur noire, tandis que l'eau turbide apparaît en cyan.

INSERER DES IMAGES CORRESPONDANT AUX DIVERSES COMPOSITIONS COLOREES

L'autre composition utilise les bandes du visible, proche infrarouge et infrarouge moyen réflectif. Cette composition colorée fait apparaître les sols nus dans diverses teintes de violet-mauve, la végétation chlorophyllienne dans diverses teintes de vert et l'eau apparaît de couleur noire.

On peut réaliser toutes les combinaisons possibles de canaux, affectés de différentes couleurs de base. En fonction des thèmes étudiés, certaines sont plus lisibles que d'autres. Il est bon de se reporter à des ouvrages spécialisés sur les couleurs et la sémiologie graphique pour faire les choix les plus judicieux.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 59 à 73**.

Calendrier agricole

Sa connaissance est indispensable pour pouvoir interpréter correctement les images et les valeurs de comptes numériques des données de télédétection.

Exemple de calendrier agricole pour la Région Parisienne (climat tempéré)

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Sept.	Oct.
Betterave	Sol nu						S	ì couvert						R
Maïs	Sol nu							S	ì couvert				R	R
Blé d'hiver	Sol nu	S	ì couvert								M	R	Sol nu	
Blé de printemps	Sol nu					S	ì couvert				M	R	Sol nu	
Orge d'hiver	S	ì couvert									M	R	Sol nu	

S : semis ou plantation M : maturation R : récolte

Pour des exemples d'applications consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 339 à 438**.

Interprétation visuelle

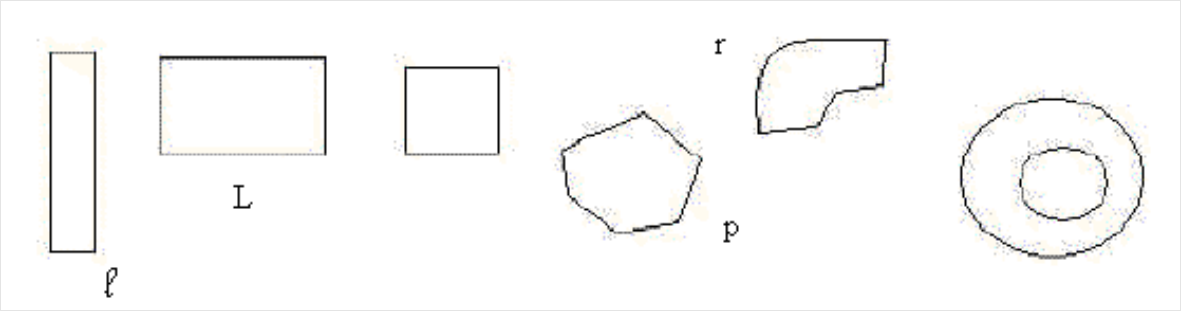
Elle s'applique à des photographies aériennes ou spatiales ou des images satellitales et utilise les critères suivants :

- **La forme** (régulière ou irrégulière)

Forme	Formule	Description
Lanière	L x l avec L≥ 3 l	rectangles très allongés
Rectangulaire	L x l avec 3 l >L	quatre côtés plus ou moins perpendiculaires, trapèzes, parallélépipèdes
Damier	L x L ou l x l	quatre côtés de dimensions équivalentes ou carrés
Polygonale	np	plus de quatre côtés de dimensions équivalentes
Courbe	L x r	un ou deux côtés courbes
Arrondie	r x r	cercles complets, ou, au moins, plus de deux côtés courbes

Exemples de formes de parcelles

avec L : côté le plus long, l : côté le plus petit, p : côtés de dimensions équivalentes, r : côtés courbes



- **Le relief** (en cas de vision stéréoscopique)
- **La taille**
- **Le motif** (agencement spatial des objets)
- **La teinte** ou **la couleur**
- **La texture** (fréquence de changements de teintes) ð responsable de l'aspect lisse ou hétérogène
- **Les ombres** (qui aident à l'identification de formes et à l'évaluation de variations topographiques, surtout en l'absence de vision stéréocopique)
- **La position** (topographique ou géographique)
- **Le voisinage** (association de certains objets à d'autres)

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 101 à 118**.

Classifications

Les diverses méthodes de classification peuvent être séparées en deux groupes:

- **Les méthodes de classifications non assistées**.

Les données sont classées en fonction de leurs caractéristiques spectrales, sans aucune information a priori sur la nature des objets à classer. L'interprète intervient pour fixer un nombre de groupes, des seuils, ... (en anglais *non supervised classifications*). Les méthodes les plus courantes sont des classifications ascendantes hiérarchiques (CAH) ou des classifications à partir de centres mobiles.

- **Les méthodes de classification assistées**.

Les données sont classées vis à vis d'objets de référence, choisis par l'interprète. Ceux-ci peuvent être soit définis à partir de comptes numériques sur un histogramme à plusieurs dimensions (méthode hypercube, *cross-plots* en anglais), soit à partir de polygones d'entraînement repérés géographiquement sur l'image (zones-test, zones d'apprentissage) (méthode du maximum de vraisemblance). En anglais *: supervised classifications*.

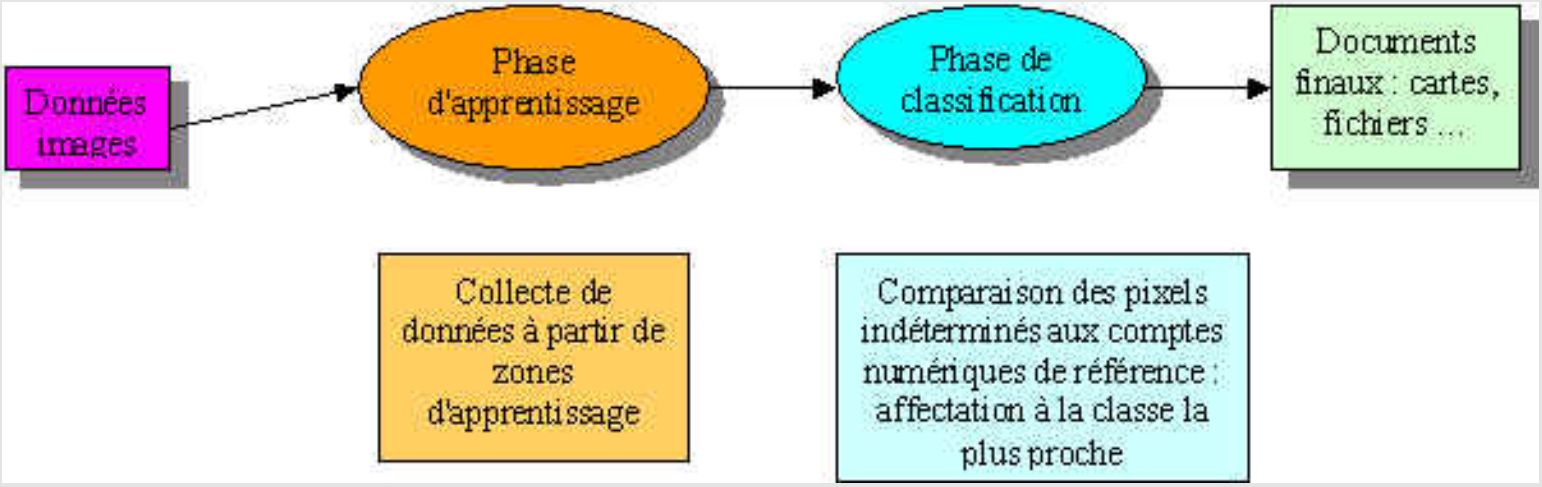
Les liens hypertexte devraient renvoyer ici aux notices respectives de TeraVue et de MultiSpec

Intérêt des différentes méthodes

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Classifications non assistées	Utiles pour réaliser une première segmentation des images en grands thèmes d'occupation du sol. Cette segmentation pourra être utilisée pour réaliser un masquage des thèmes non concernés par l'étude	Le regroupement des valeurs de comptes numériques crée des classes dont la signification thématique est parfois difficile à identifier
Classifications assistées	Les classes obtenues ont une signification thématique précise	Le temps de réalisation est long, en particulier pour le choix et la délimitation des zones d'apprentissage

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 157 à 205 et CD Rom**.

Les différentes étapes d'une classification assistée



- Données images : choisir celles où le phénomène étudié est le plus visible et présente le maximum de contraste vis à vis des autres thèmes de la scène.

- Phase d'apprentissage : choisir des zones d'apprentissage pour caractériser toutes les classes et représentatives de celles-ci. Les zones d'apprentissages doivent être spectralement les plus homogènes possible (à vérifier sur une matrice de divergence ou de séparabilité) et distribuées un peu partout sur la scène étudiée.

- Phase de classification : être vigilant quant à l'adéquation entre les caractéristiques statistiques des données et la méthode de classification.

- Documents finaux : la forme de restitution doit être choisie en fonction de l'utilisation des résultats. Le choix des couleurs et des figurés est important pour assurer la lisibilité et une compréhension rapide des résultats. Pour cela appliquer les connaissances en sémiologie graphique. FAIRE UN RENVOI A UN SITE WEB OU DES REFERENCES BIBLIO SUR CE SUJET.

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 183 à 205 et CD Rom**.

Qualité des zones d'apprentissage pour la définition des classes

Après analyse de la matrice de divergence ou séparabilité :

- les zones d'apprentissage sont correctes (affectées à plus de 70% dans la classe qu'elles sont censées représenter) :

ON LES GARDE

ATTENTION l'ajout de nouvelles zones d'apprentissage peut diminuer la qualité de l'ensemble.

- certaines classes sont spatialement voisines d'autres selon un motif spécifique :

EN CONTROLER LA SIGNIFICATION THEMATIQUE SUR LA CLASSIFICATION

- certaines classes sont spectralement proches d'autres :

CHOISIR DE NOUVELLES ZONES D'APPRENTISSAGE

- une classe est peu séparable d'une autre :

LES REGROUPER EN UNE SEULE CLASSE

- pour minimiser le nombre de pixels rejetés :

CREER DE NOUVELLES CLASSES

Pour plus de détails consultez GIRARD M.C. & GIRARD C.M. 1999. Traitement des données de télédétection. DUNOD Ed. Paris, **pages 192 à 205**.