



# Bases Physiques Principe de la Spectrométrie

**Véronique Carrère**  
**Xavier Briottet**

# Bases physiques

## Le signal enregistré par le capteur

**A - Source d'énergie ou d'illumination**

**B - Rayonnement et atmosphère**

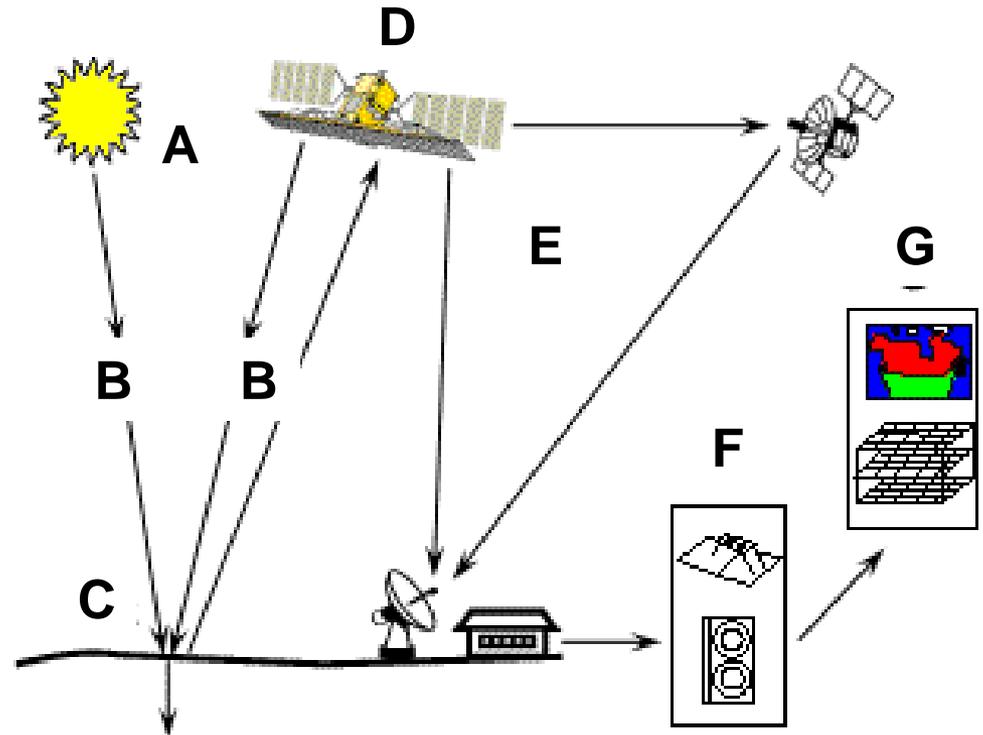
**C - Interaction avec la cible**

**D - Enregistrement de l'énergie par le capteur**

**E - Transmission, réception et pré-traitement**

**F - Interprétation et analyse**

**G - Applications**



# (A) Source d'énergie

**A - Source d'énergie  
ou d'illumination**

**B - Rayonnement et atmosphère**

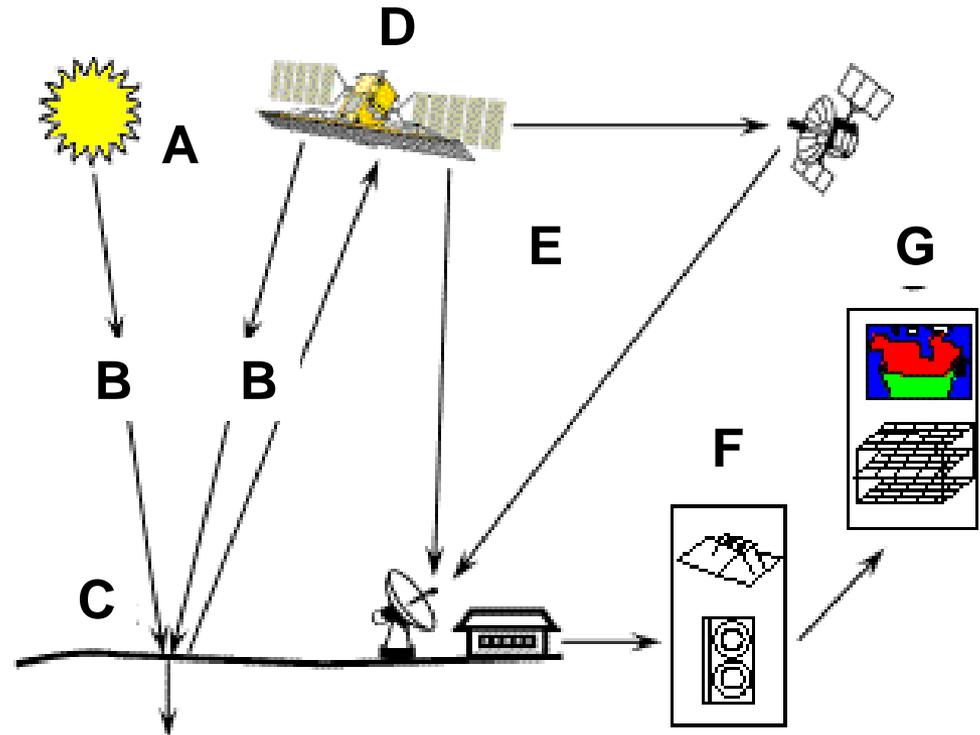
**C - Interaction avec la cible**

**D - Enregistrement de  
l'énergie par le capteur**

**E - Transmission,  
réception et pré-traitement**

**F - Interprétation et analyse**

**G - Applications**



- **(A) Source d'énergie** = rayonnement électromagnétique (Soleil ou autre)

L'énergie est transportée par les photons.

Energie associée à un photon émis à une longueur d'onde  $\lambda$  :

$$Q = h \cdot \nu \text{ (J), où}$$

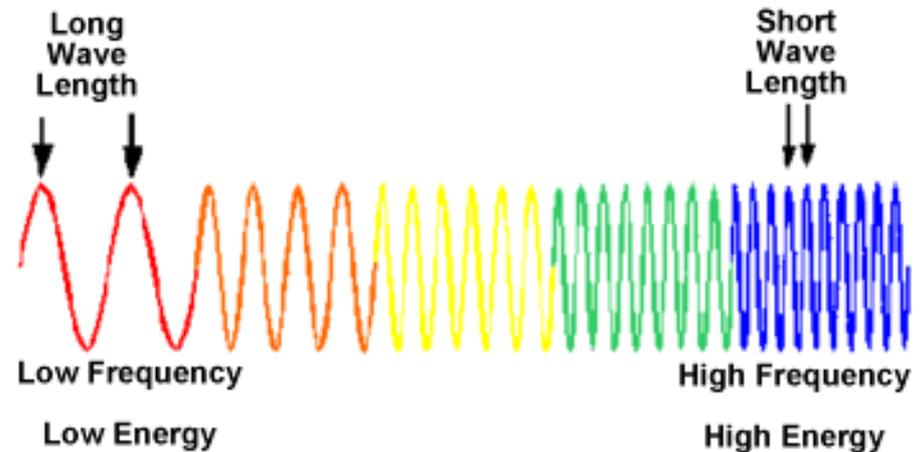
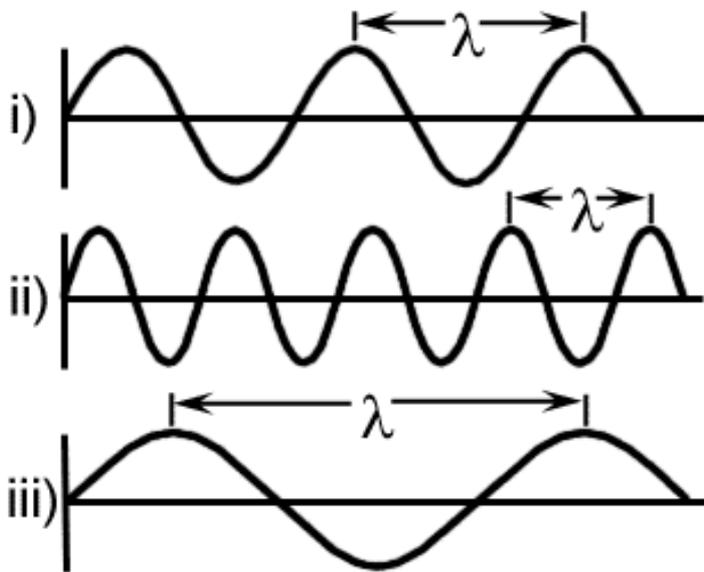
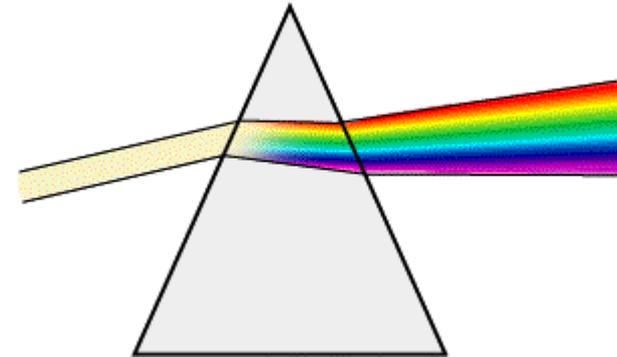
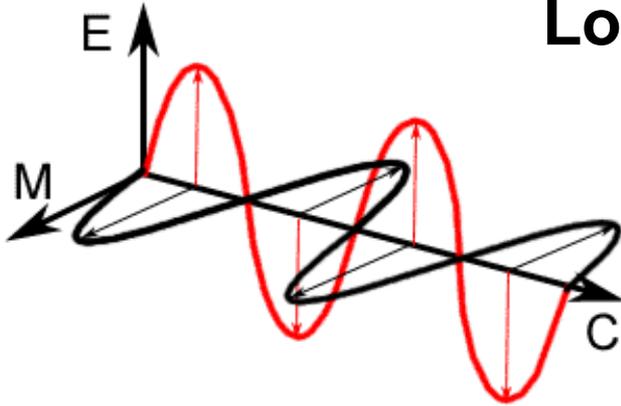
$$\nu = c / \lambda \text{ Hz}$$

$c = 2,998 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ , célérité de la lumière

$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ , constante de Planck

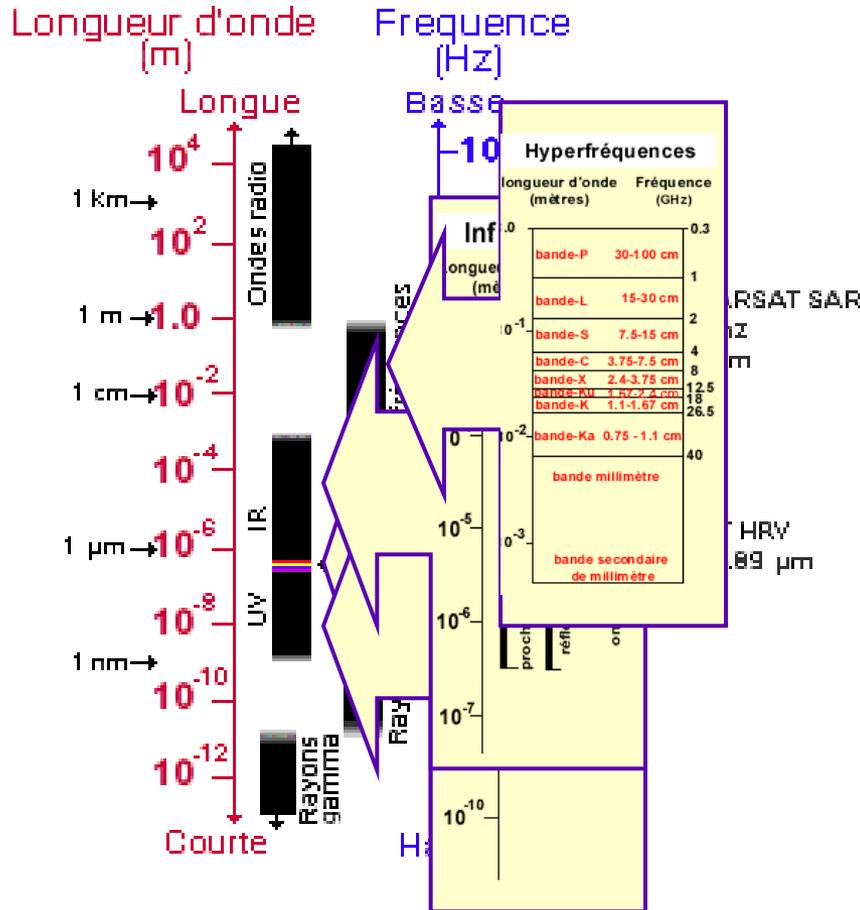
# Rayonnement électromagnétique

## Longueur d'onde



Longueurs d'onde (en nm,  $\mu\text{m}$  ou cm) ou fréquence (en Hz)

# • Les différents domaines du spectre électromagnétique



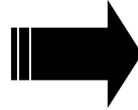
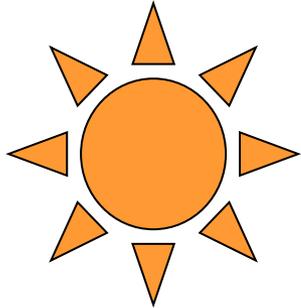
**Hyperfréquences : mm - m**

**IR :** proche 800 - 2500 nm  
 moyen 3 - 5 μm  
 thermique 8 - 12 μm

**VIS : 400 - 800 nm**

**UV : 1 - 400 nm**

- **Ce qui est enregistré :**

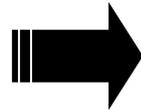


**Rayonnement réfléchi : VIS / PIR**

**Rayonnement réfléchi + émis : MIR**

**Rayonnement émis : IRT**

**Source  
artificielle**

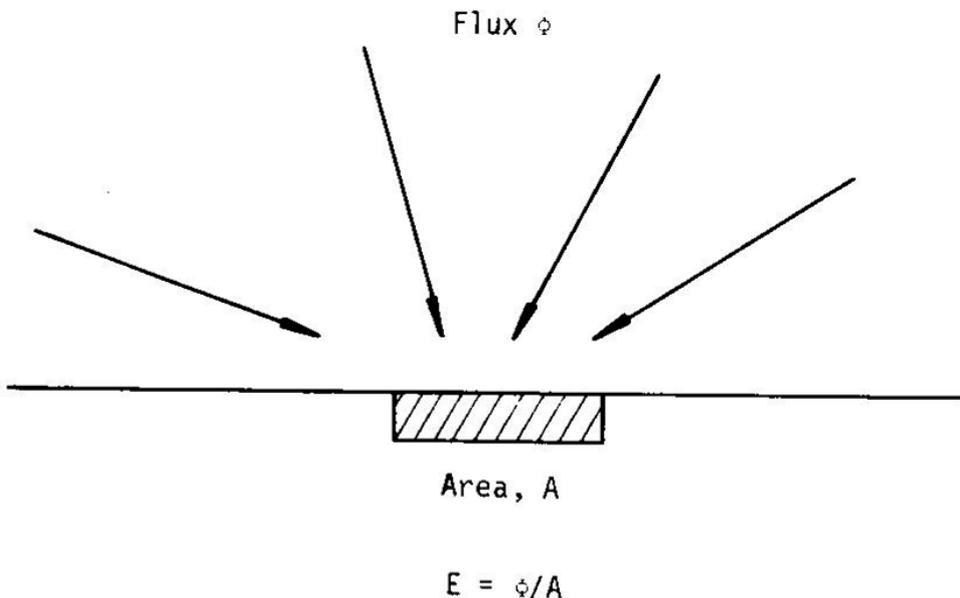


**Laser, LIDAR, RADAR, etc.**

# • Les grandeurs physiques (1) :

## Éclairement ou Irradiance en $W/m^2$

= flux intercepté par une surface plane divisée par la superficie de celle-ci = énergie par unité de surface



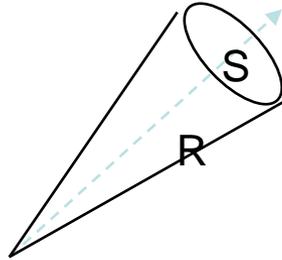
$$E = \frac{\Phi}{A}$$

### Ordres de grandeur :

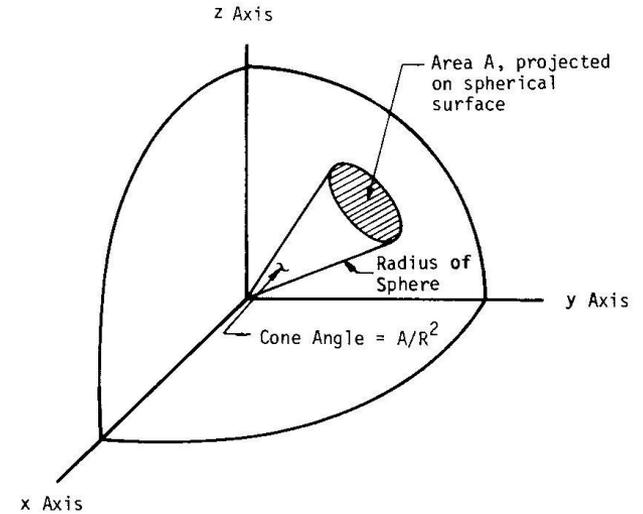
- éclairement solaire (soleil au zénith) :  **$\sim 900 W.m^{-2}$**
- éclairement diffus du ciel (dans le visible) :  **$\sim 25 W.m^{-2}$**

# • Les grandeurs physiques (2) :

\* **Angle solide en stéradian (sr) =**  
concept fondamental pour les mesures  
de flux = cône

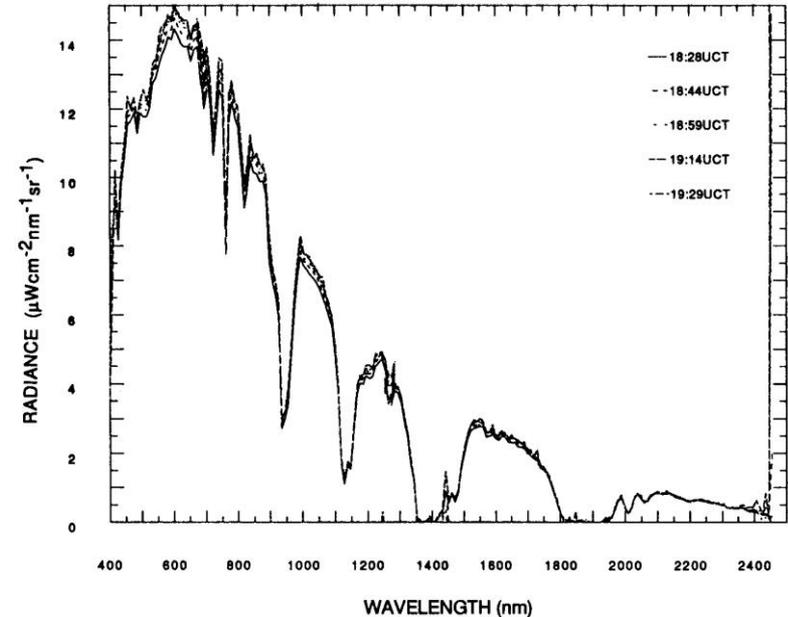
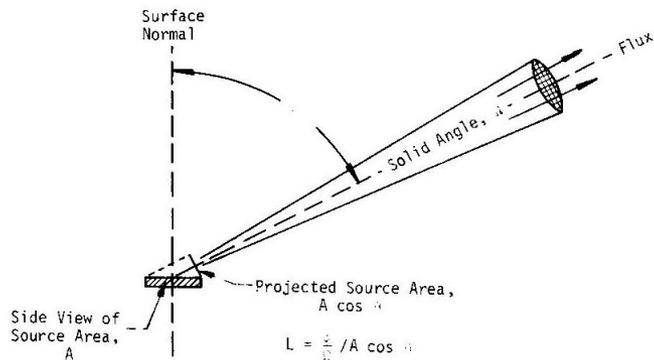


$$\omega = \frac{S}{R^2}$$



\* **Luminance (radiance) L en W/m²/sr =**  
intensité énergétique par unité de surface  
dans une direction considérée

$$L = \frac{I}{A \cos \theta}$$



- **(B) Interactions rayonnement – atmosphère (1) :**

**A - Source d'énergie ou d'illumination**

**B - Rayonnement et atmosphère**

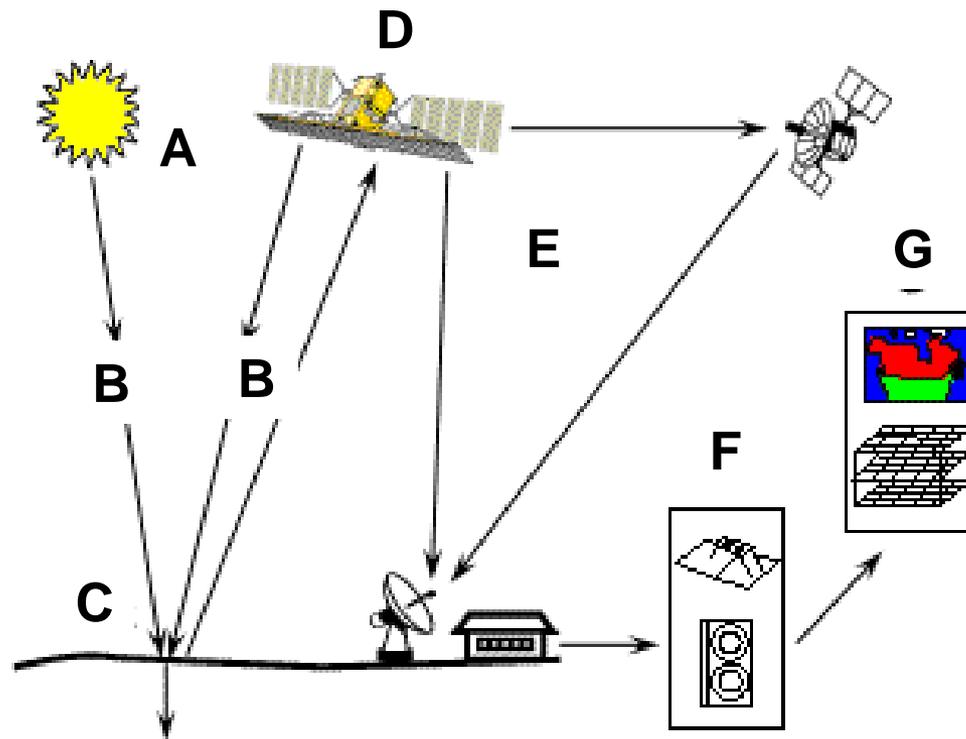
**C - Interaction avec la cible**

**D - Enregistrement de l'énergie par le capteur**

**E - Transmission, réception et pré-traitement**

**F - Interprétation et analyse**

**G - Applications**



- Interactions rayonnement – atmosphère (2) :

Ce qui joue un rôle :

**Composition**

Connue, ± fixe : gaz ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ , Ar,  $O_3$ , ...)

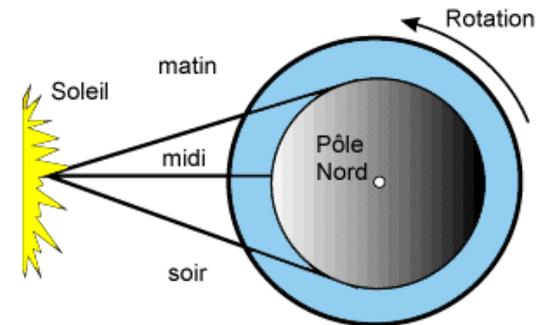
Variable :  $H_2O$  (temps, espace)

Aérosols (concentration, taille, composition)

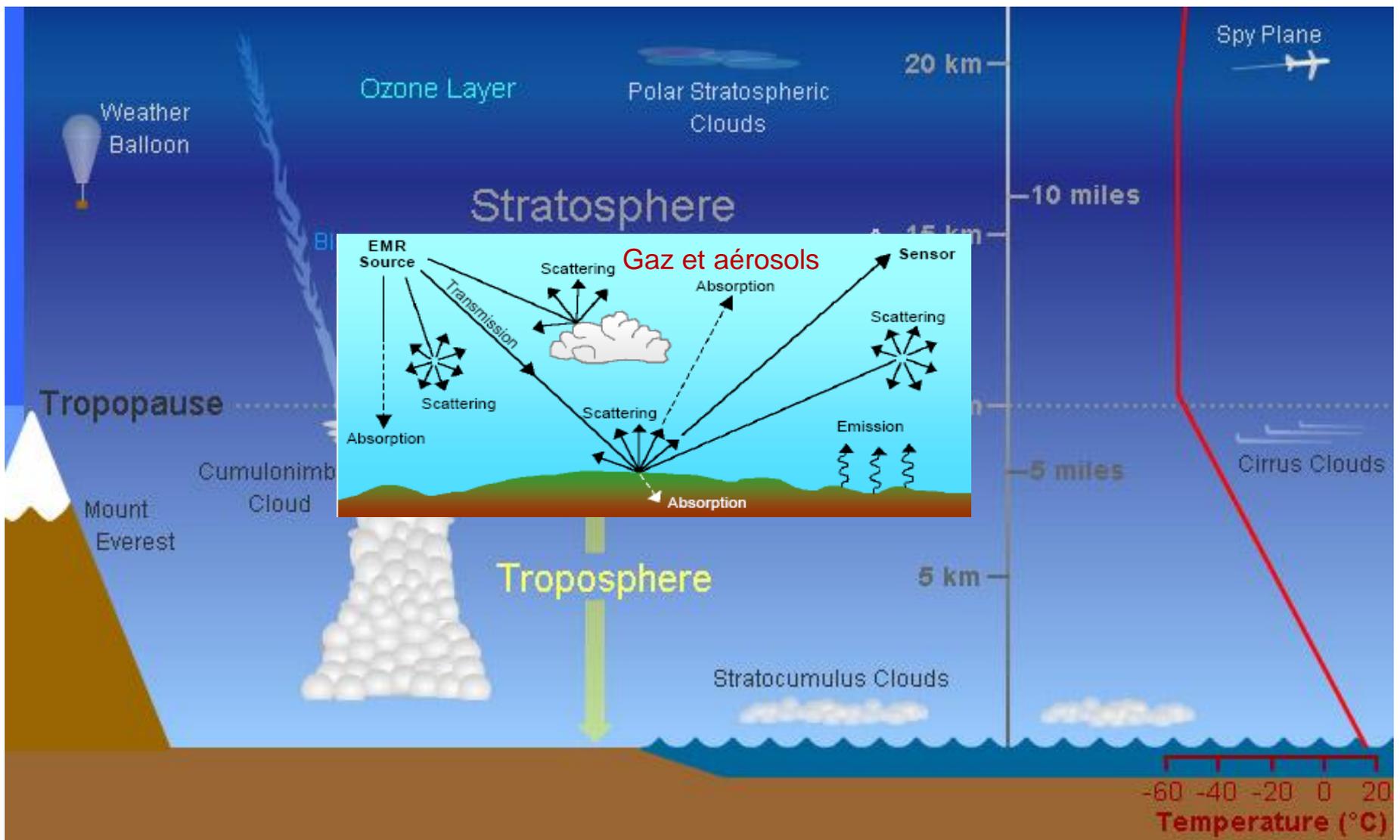
**Géométrie**

Trajet ± long

+ position capteur

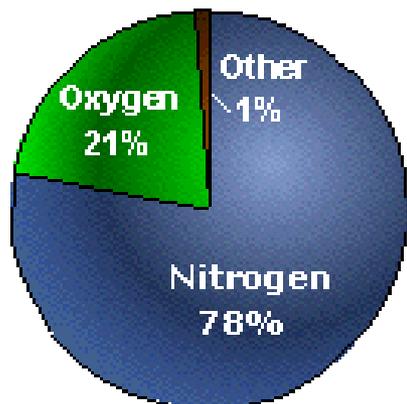


- Interactions rayonnement – atmosphère (3) :

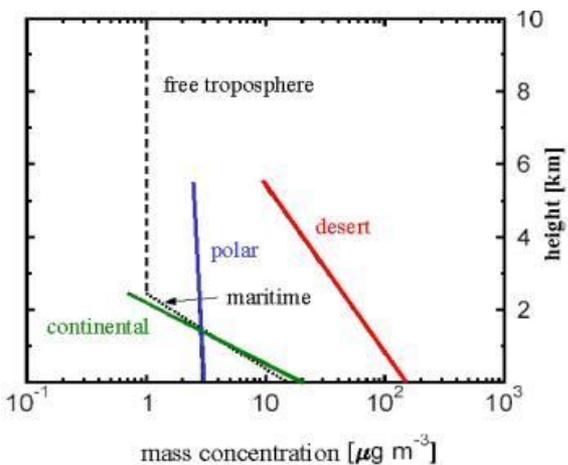
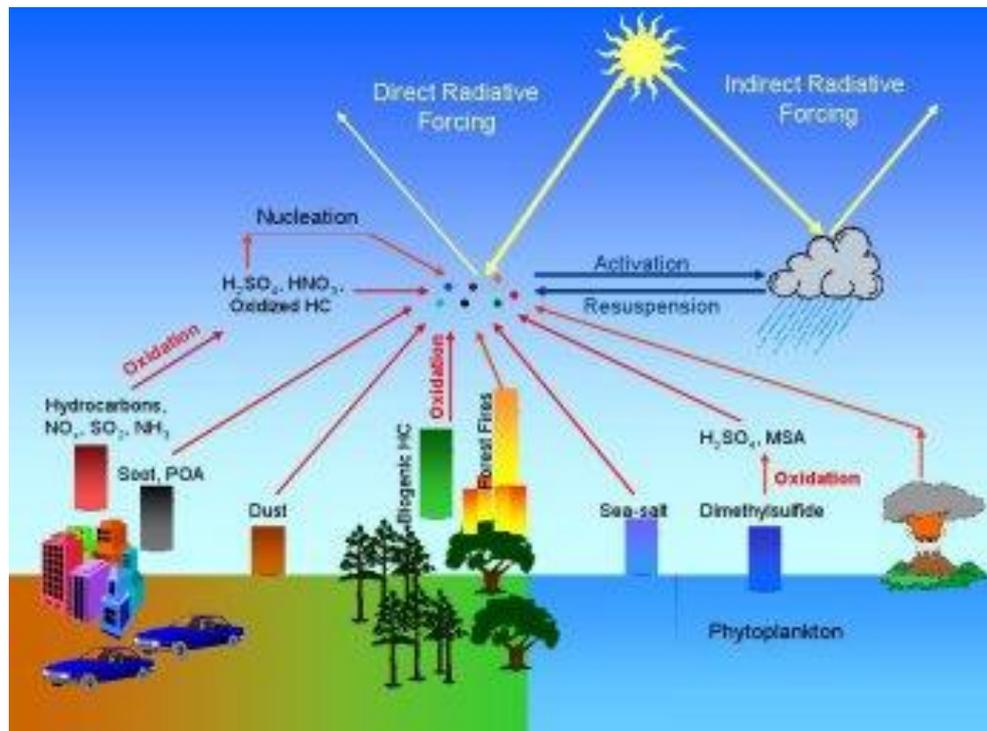


# Effets atmosphériques (1):

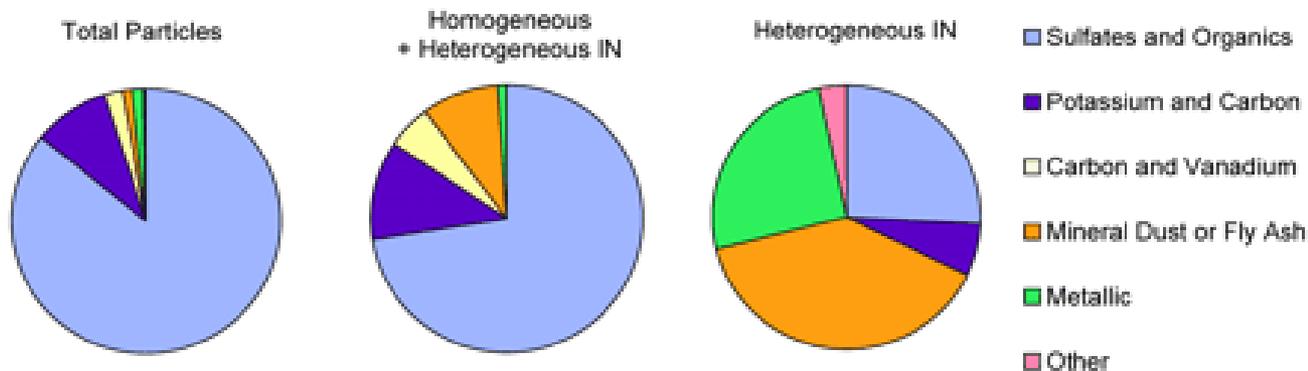
## Principaux gaz



+ H<sub>2</sub>O

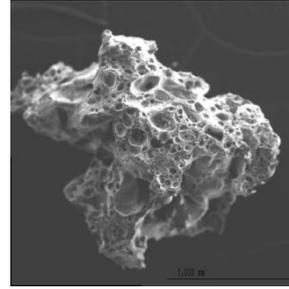
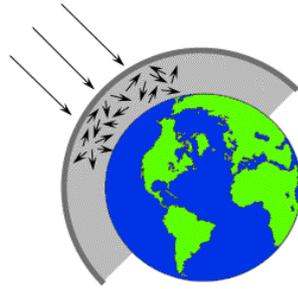


## Particules en suspension (aérosols)



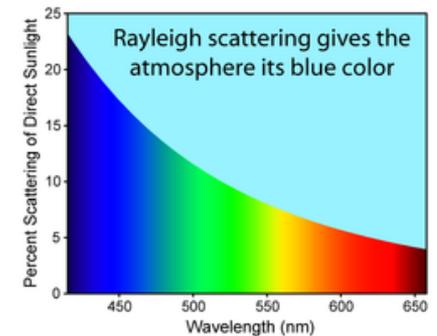
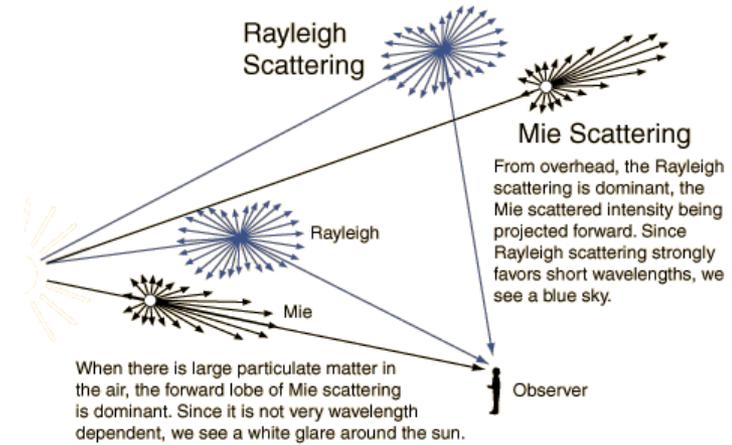
- Effets atmosphériques (2):

Diffusion (1)



AEROSOLS

Particules (solides ou liquides) en suspension dans l'atmosphère :  
 $0.001 \mu\text{m} < \text{taille} < 100 \mu\text{m}$   
 = cendres, fumée, poussières, brouillard, brume, etc.



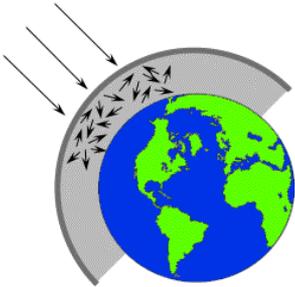
- Effets atmosphériques (3) :

## Diffusion (2)

**Rayleigh : taille particules  $\ll \lambda$  (poussières, molécules d'azote ou d'oxygène, etc.)**

**prédominante dans les couches supérieures de l'atmosphère**

**Ciel bleu = plus forte dispersion des *longueurs d'onde courtes* (bleu)**



$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N\alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2\theta)$$

Scattering at right angles is half the forward intensity for Rayleigh scattering

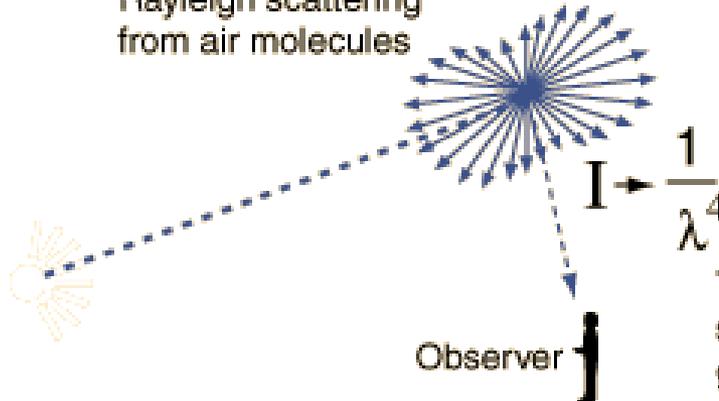
Rayleigh scattering from air molecules

$N$  = # of scatterers

$\alpha$  = polarizability

$R$  = distance from scatterer

$$I \propto 1/\lambda^4$$



The strong wavelength dependence of Rayleigh scattering enhances the short wavelengths, giving us the blue sky.

# • Effets atmosphériques (4) :

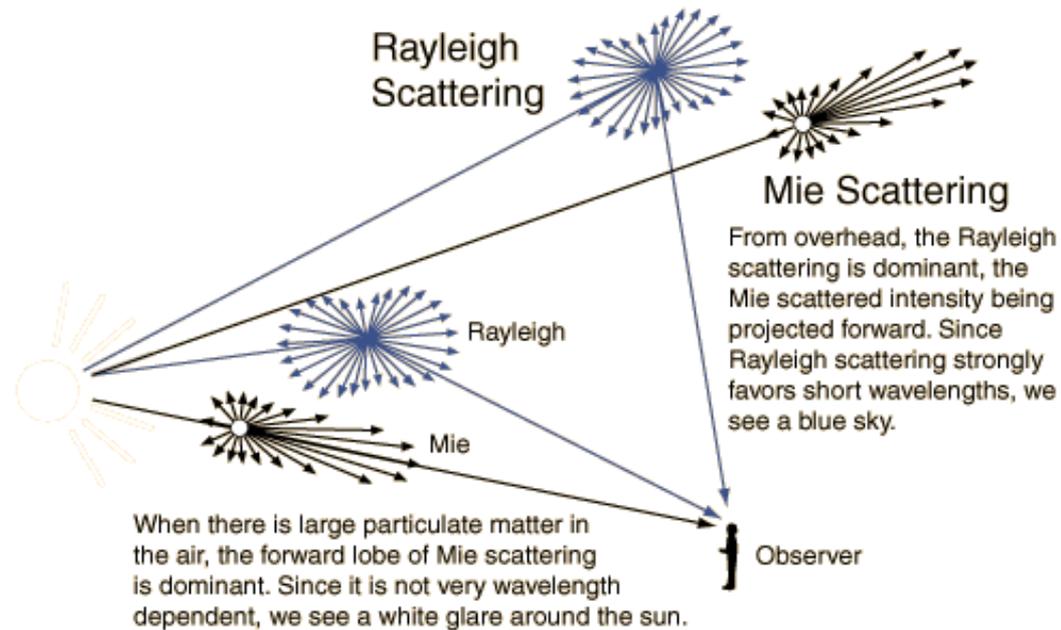
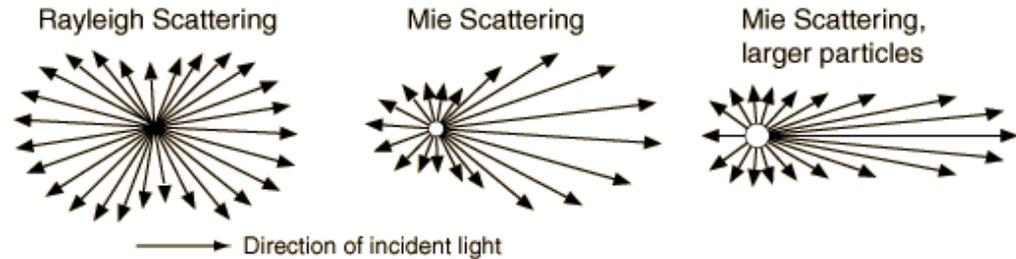
## Diffusion (3)

**Mie** : taille particules =  $\lambda$   
(poussières, pollen, fumée, eau, etc.)

- affecte les plus **grandes longueurs d'onde**

- prédominante dans les couches inférieures de l'atmosphère où les grosses particules sont plus abondantes

- domine le ciel ennuagé



## Comparaison Rayleigh / Mie

- Effets atmosphériques (5) :

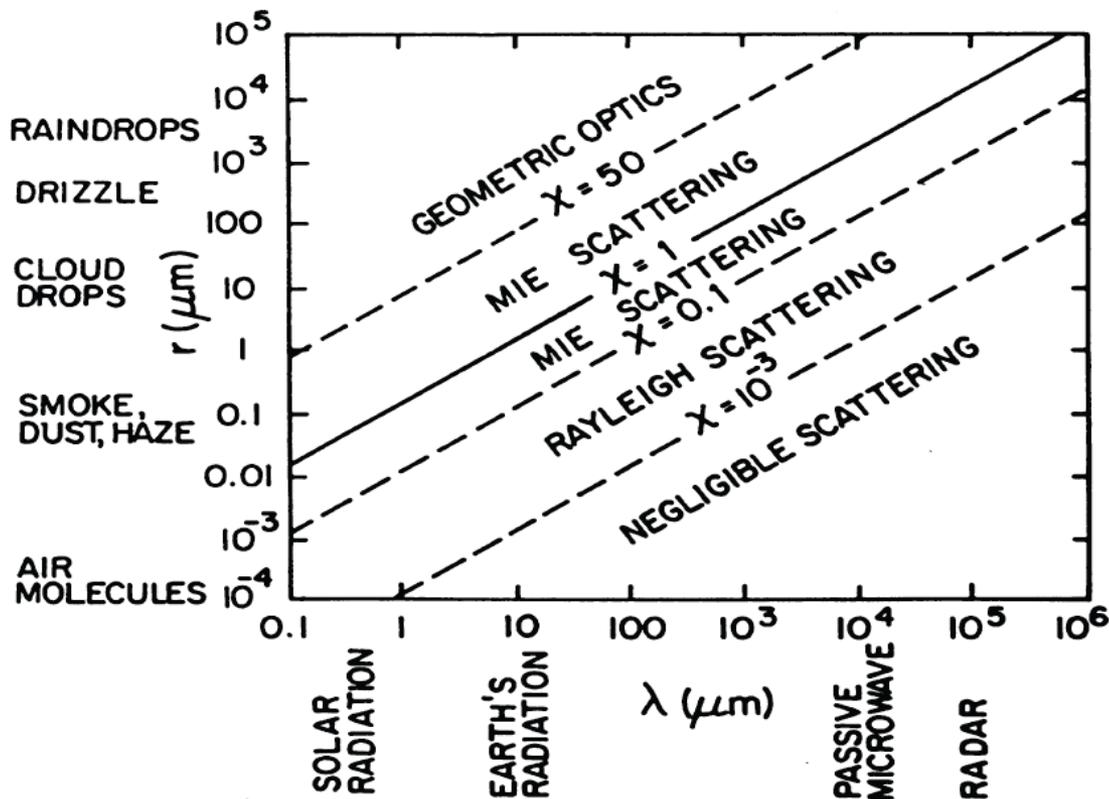
### Diffusion (4)



**Non sélective : taille  
particules  $> \lambda$**

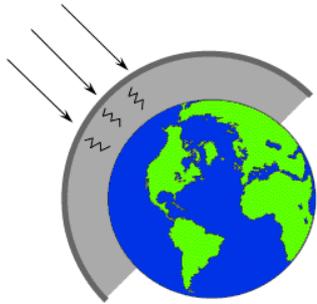
rayonnement « blanc »

Relations longueurs d'ondes / taille de particule /  
type de diffusion



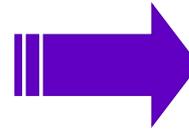
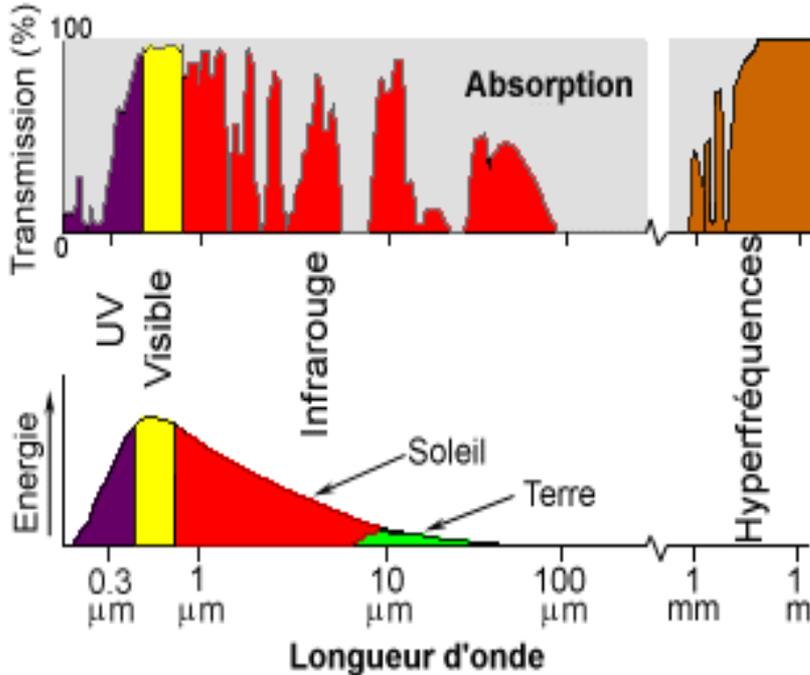
# Effets atmosphériques (6) :

## Absorption



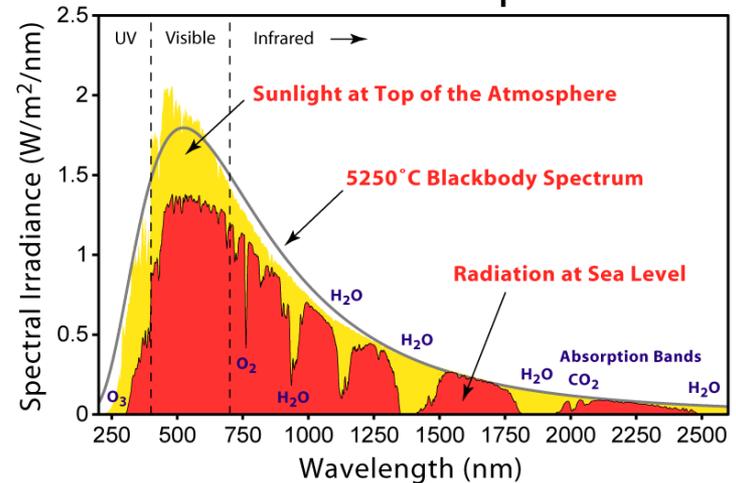
Absorption de l'énergie par les molécules à des **longueurs d'onde caractéristiques de la composition chimique de l'atmosphère** :

- $O_3 = \text{U.V.}$
- $H_2O = 1.4, 1.9 \mu\text{m}$
- $O_2 = 760 \text{ nm, etc.}$



« **Fenêtres atmosphériques** »  
 Atmosphère « transparente » ou « opaque »

### Solar Radiation Spectrum



- Interactions rayonnement – surface (1) :

A - Source d'énergie ou d'illumination

B - Rayonnement et atmosphère

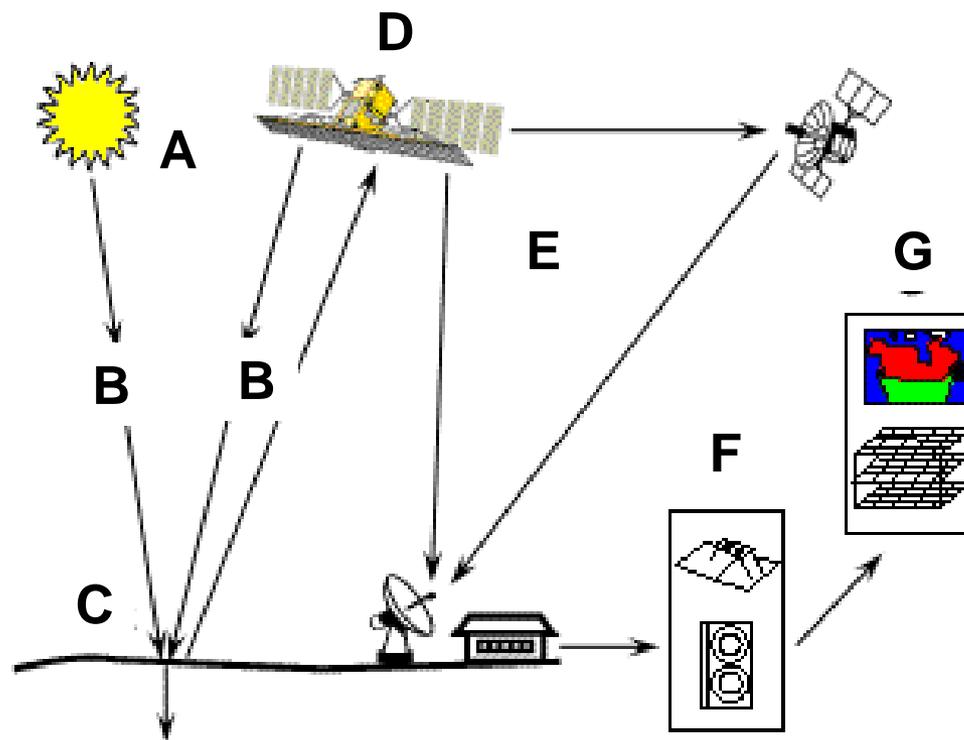
C - Interaction avec la cible

D - Enregistrement de l'énergie par le capteur

E - Transmission, réception et pré-traitement

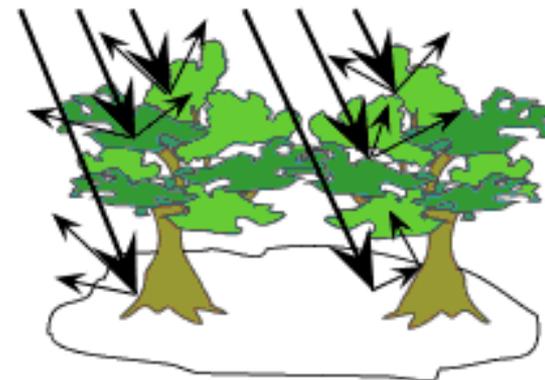
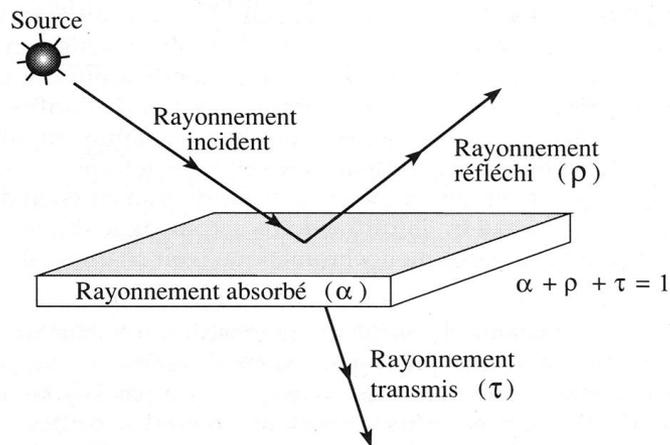
F - Interprétation et analyse

G - Applications



## • Interactions rayonnement – surface (2) :

3 modes d'interaction =  $f(\lambda, \text{nature, conditions de la surface})$



**Absorption (A)**

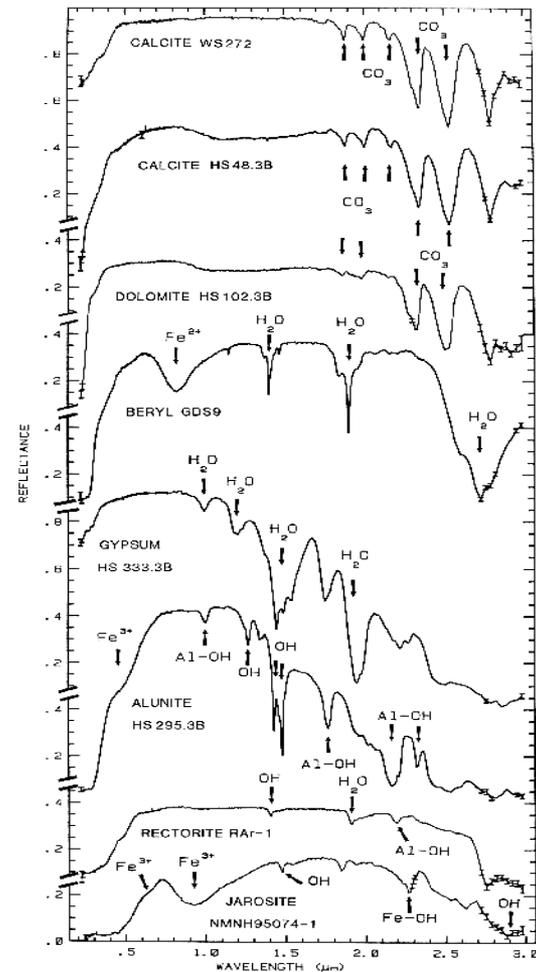
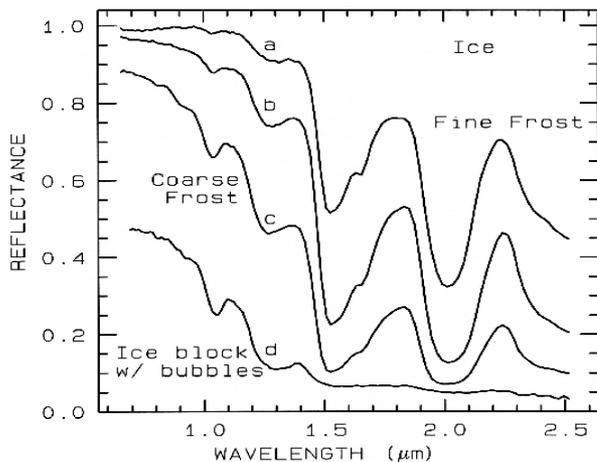
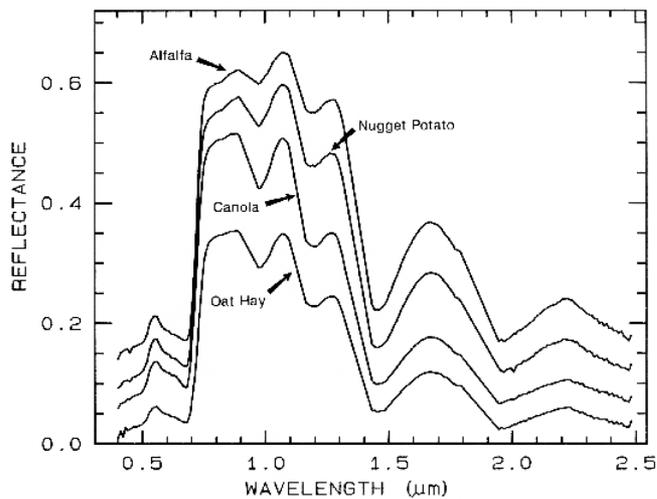
**Réflexion (R) (ou émission si on est dans l'IRT)**

**Transmission (T)**

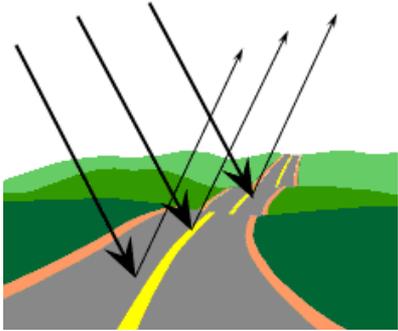
# • Interactions rayonnement – surface (3) :

\* **Réflectance sans dimension** = Rapport entre la quantité d'énergie réfléchiée par une surface (luminance) et la quantité d'énergie reçue par cette même surface (irradiance)

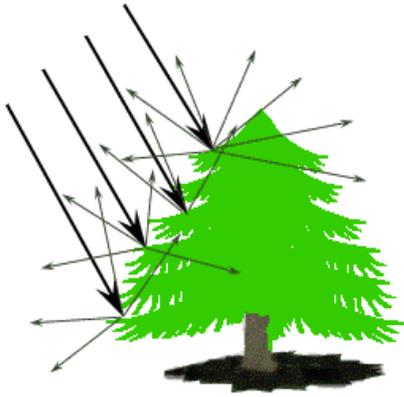
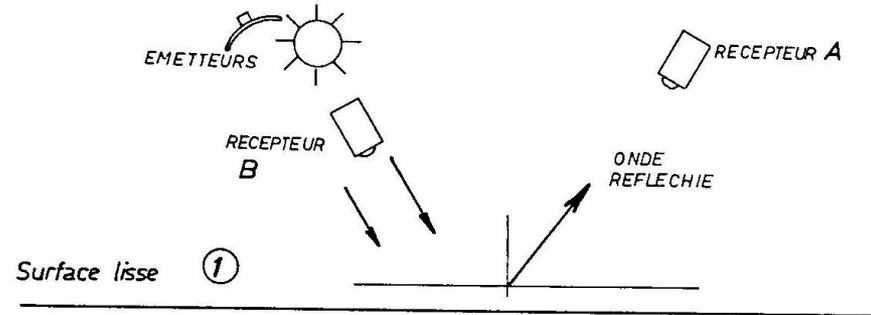
$$\rho = \frac{\pi L}{E} = \frac{E_R}{E_S}$$



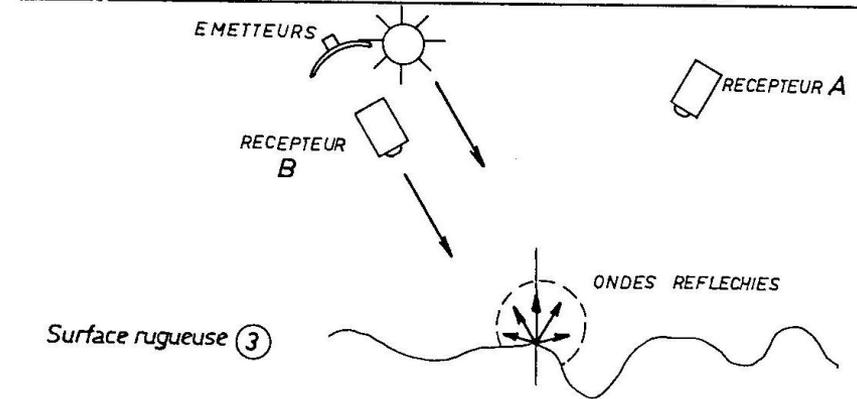
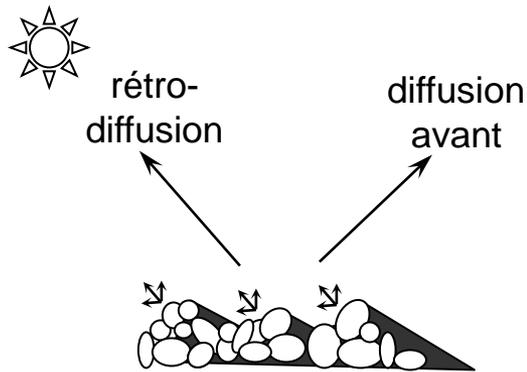
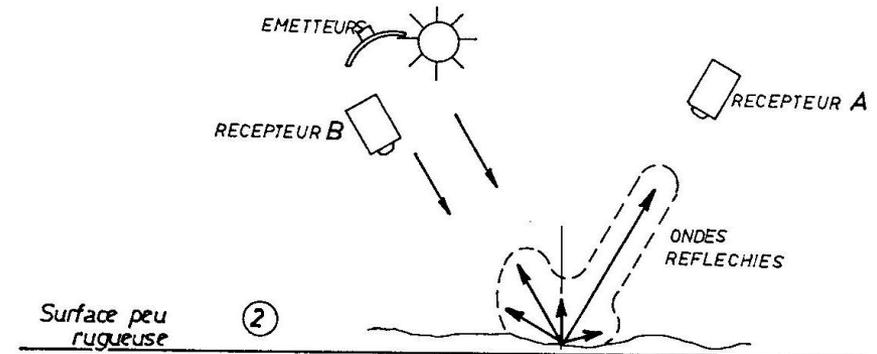
• Interactions rayonnement – surface (4) : **Réflexion (1)**



**Surface lisse :  
réflexion  
spéculaire**

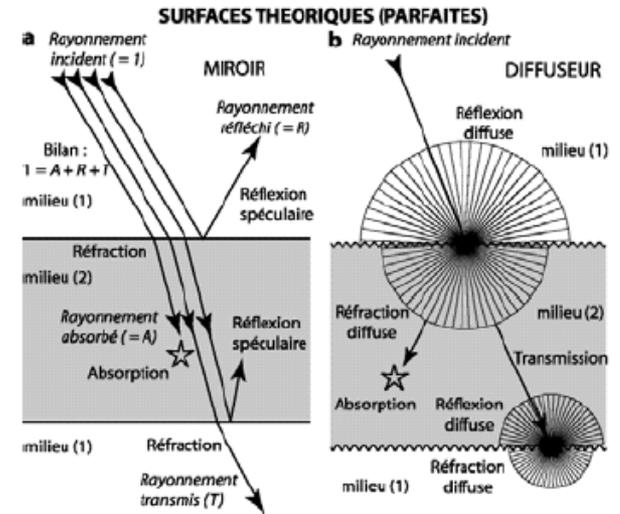
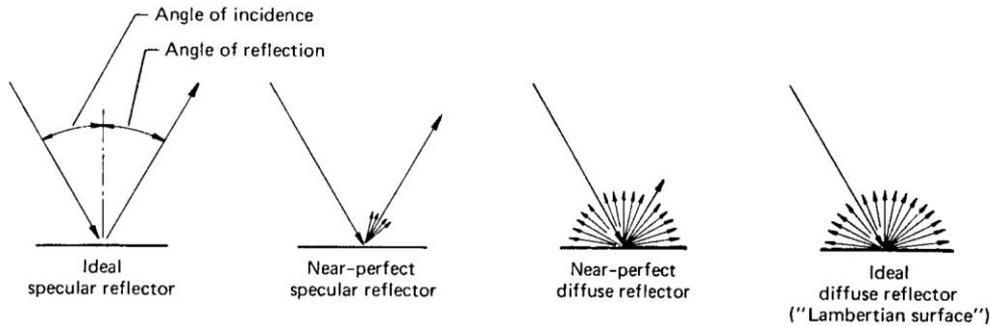


**Surface rugueuse :  
réflexion diffuse**



- Interactions rayonnement – surface (5) :

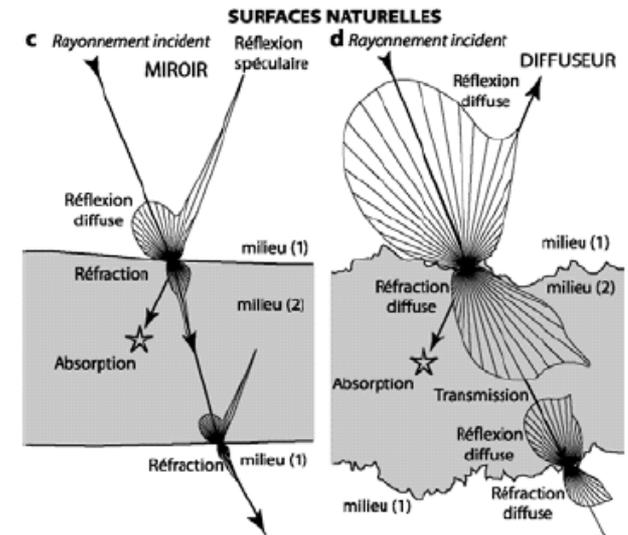
## Réflexion (2)



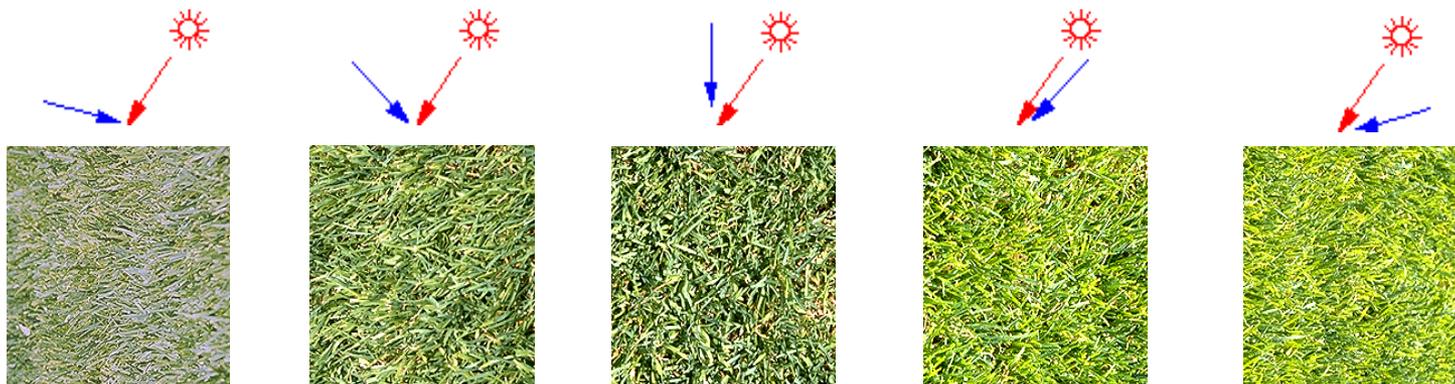
**Surfaces naturelles = non lambertiennes (réflecteur parfait, réflectance  $\rho = 1$ )**



**Effets directionnels**

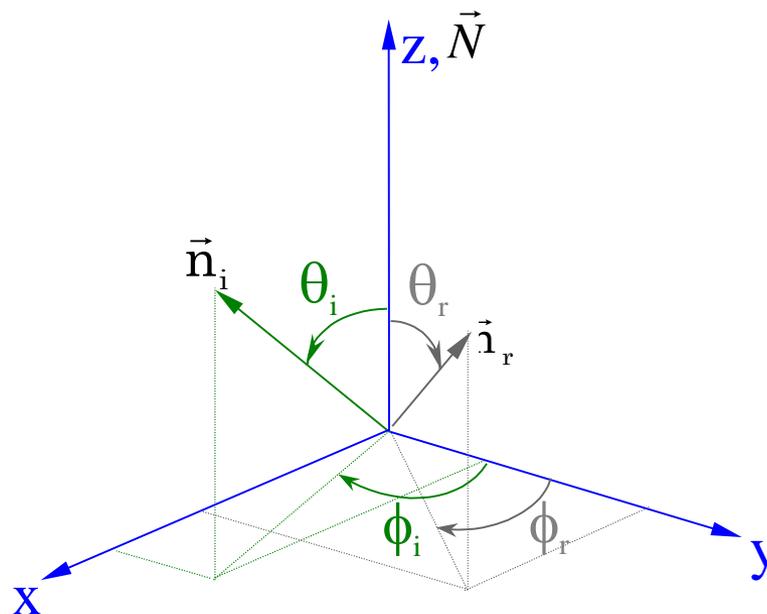


- Interactions rayonnement – surface (6) : Réflexion (3)



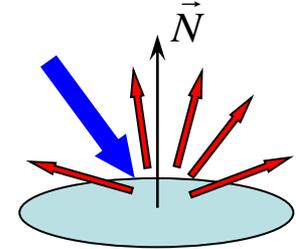
Réflectance **bidirectionnelle** :

$$\rho_{\lambda}^{dd}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \frac{\pi \cdot L_{\lambda}(\theta_r, \phi_r)}{E_{\lambda}(\theta_i, \phi_i) \cdot \cos \theta_i}$$



- Interactions rayonnement – surface (7) : Réflexion (4)

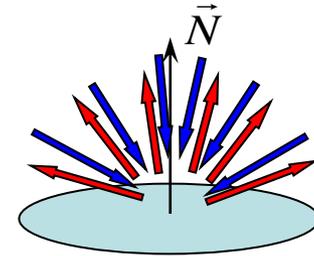
Réflectance **directionnelle hémisphérique** :



$$\rho_{\lambda}^{dh}(\theta_i, \phi_i) = \rho_{\lambda}^{hd}(\theta_i, \phi_i) = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \rho_{\lambda}^{dd}(\theta_i, \phi_i, \theta, \phi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi$$

Réflectance **hémisphérique hémisphérique** :

$$\rho_{\lambda}^{hh} = \frac{1}{\pi} \int_{\theta=0}^{\pi/2} \int_{\phi=0}^{2\pi} \rho_{\lambda}^{dh}(\theta, \phi) \cdot \cos(\theta) \cdot \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\phi$$

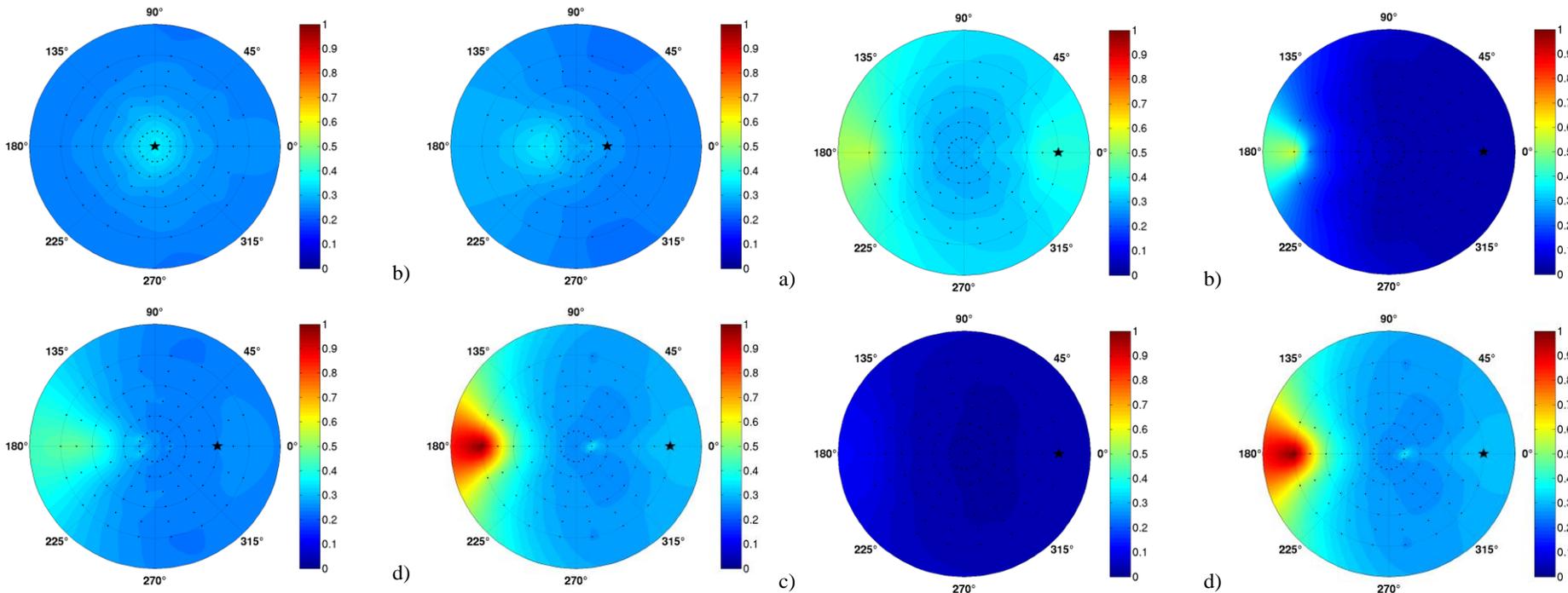


- hypothèse courante : symétrie de la réflectance / plan solaire

$$\rho_{\lambda}^{dd}(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) = \rho_{\lambda}^{dd}(\theta_i, \theta_r, \Delta\phi = \phi_r - \phi_i)$$

$$\rho_{\lambda}^{dh}(\theta_i, \phi_i) = \rho_{\lambda}^{dh}(\theta_i)$$

• Interactions rayonnement – surface (8) : Réflexion (5)



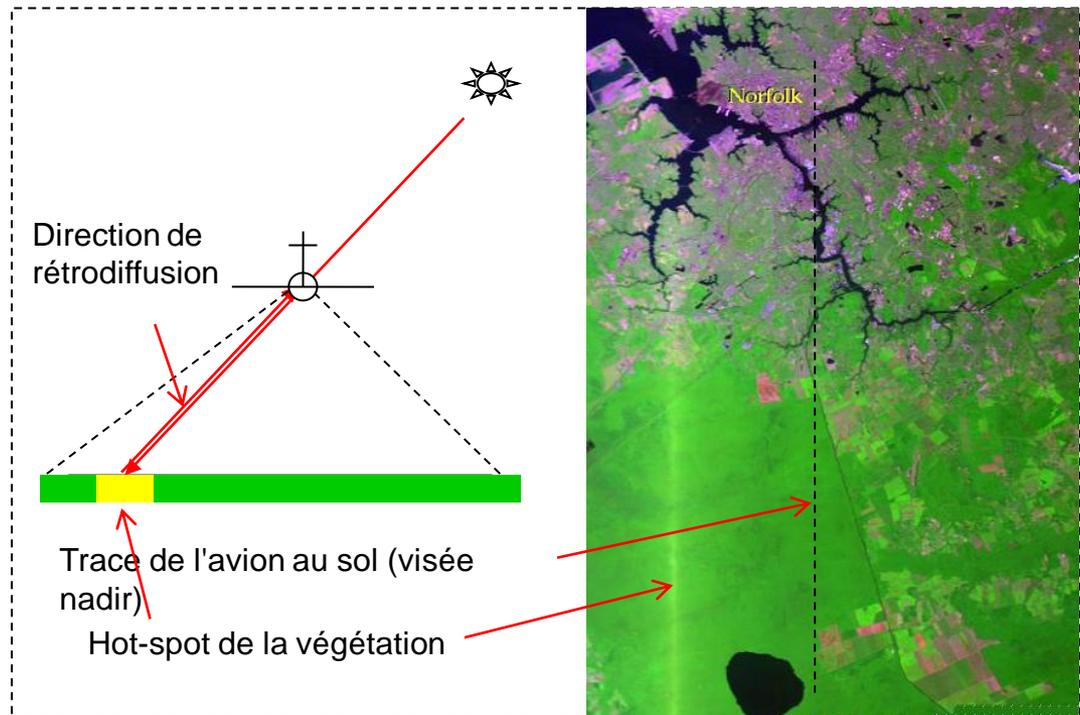
Réflectance bidirectionnelle du granit rose à 550 nm pour un angle d'illumination zénithal incident de a) 0°, b) 20°, c) 40° et d) 60° - (résolution spatiale : 20 cm). (ONERA)

Réflectance bidirectionnelle de différents matériaux urbains à 550 nm pour un angle d'illumination zénithal incident de 60° (résolution spatiale : 20 cm) a) béton, b) asphalte rouge, c) enrobé, d) granit rose. (ONERA)

- Interactions rayonnement – surface (9) : Réflexion (6)

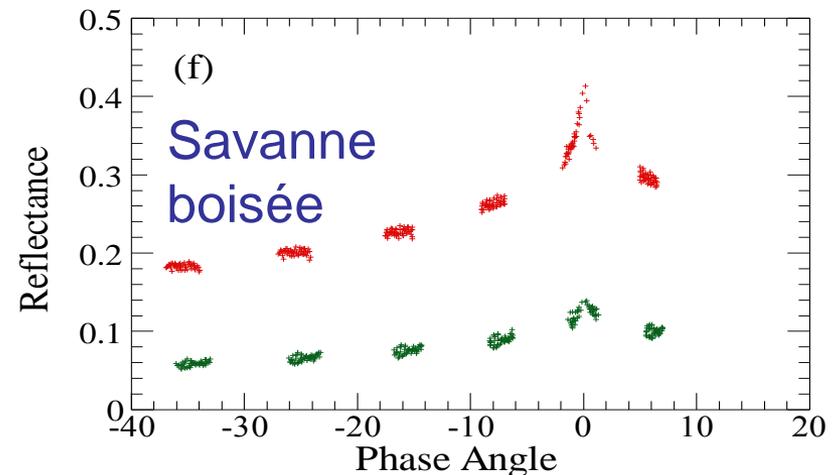
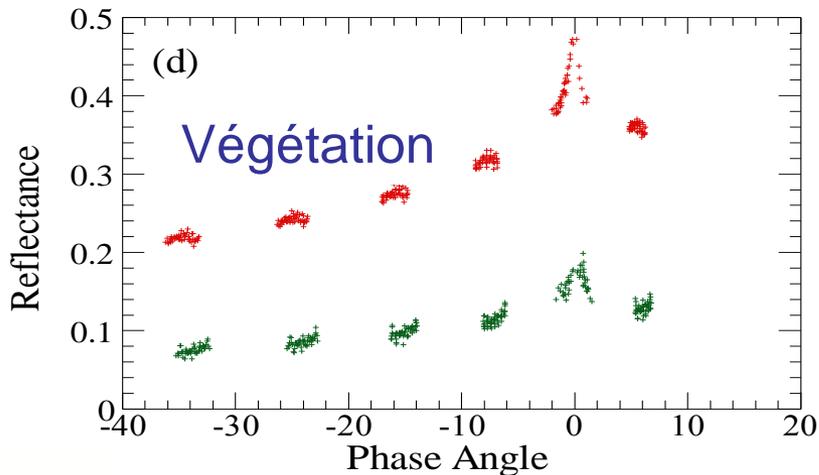
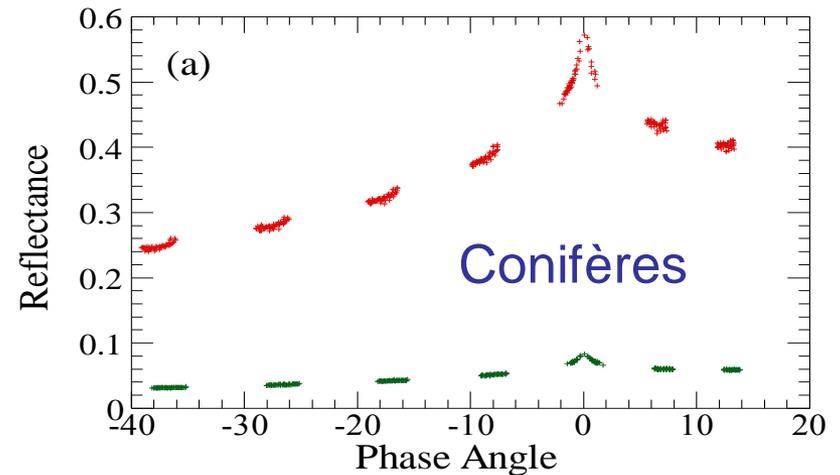
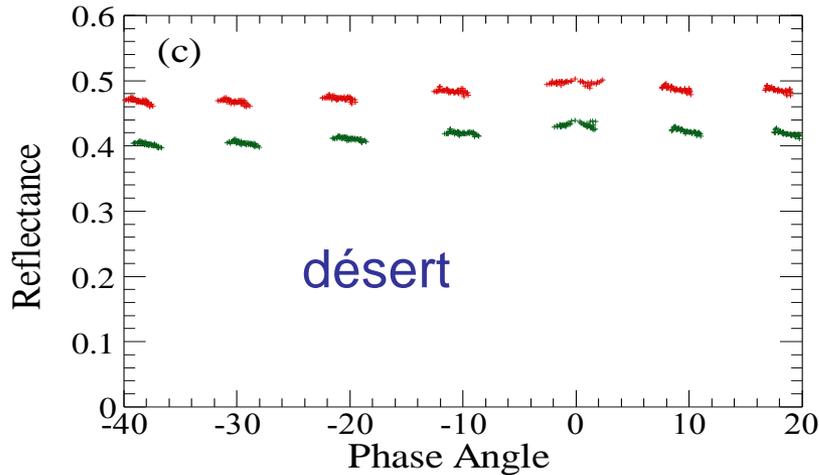
## Hot spot de la végétation: image MAS

- image aéroportée,
- barrette CCD,
- centre barrette en visée nadir,
- déplacement avion bas → haut



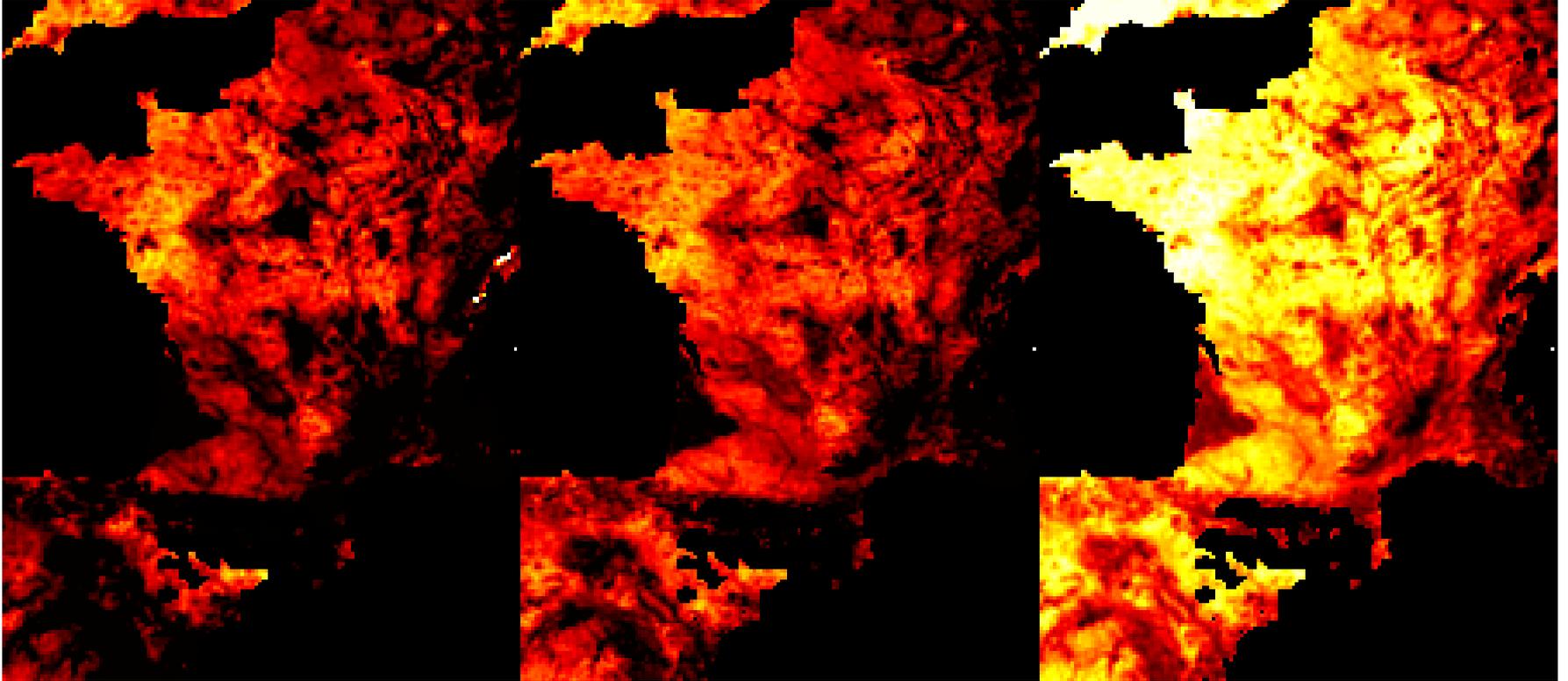
- Interactions rayonnement – surface (10) : Réflexion (7)

Réflectance en fonction de l'angle de phase: vert pour 670 nm, rouge pour 865 nm (Bréon 2001)



- Interactions rayonnement – surface (11) : Réflexion (8)

## Effets directionnels dans le PIR



Images POLDER (CNES) : visées avant, nadir et arrière

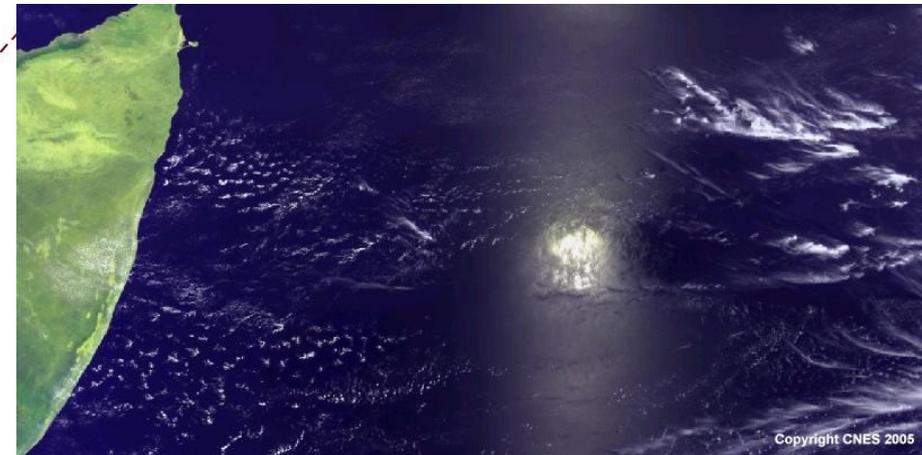
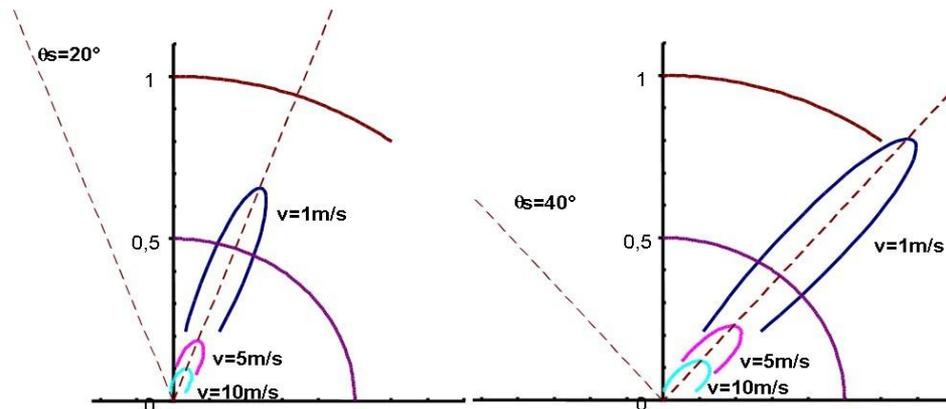
- Interactions rayonnement – surface (12) : Réflexion (9)

Spécularité : vitre, peinture

Exemple : Image PELICAN (ONERA – CNES)

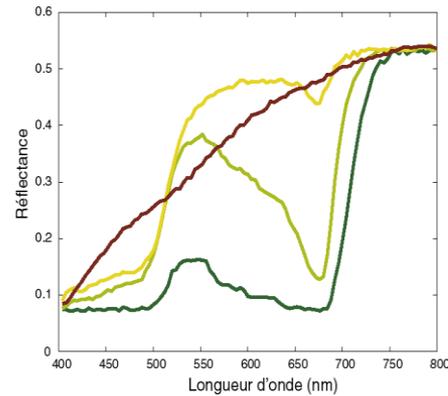
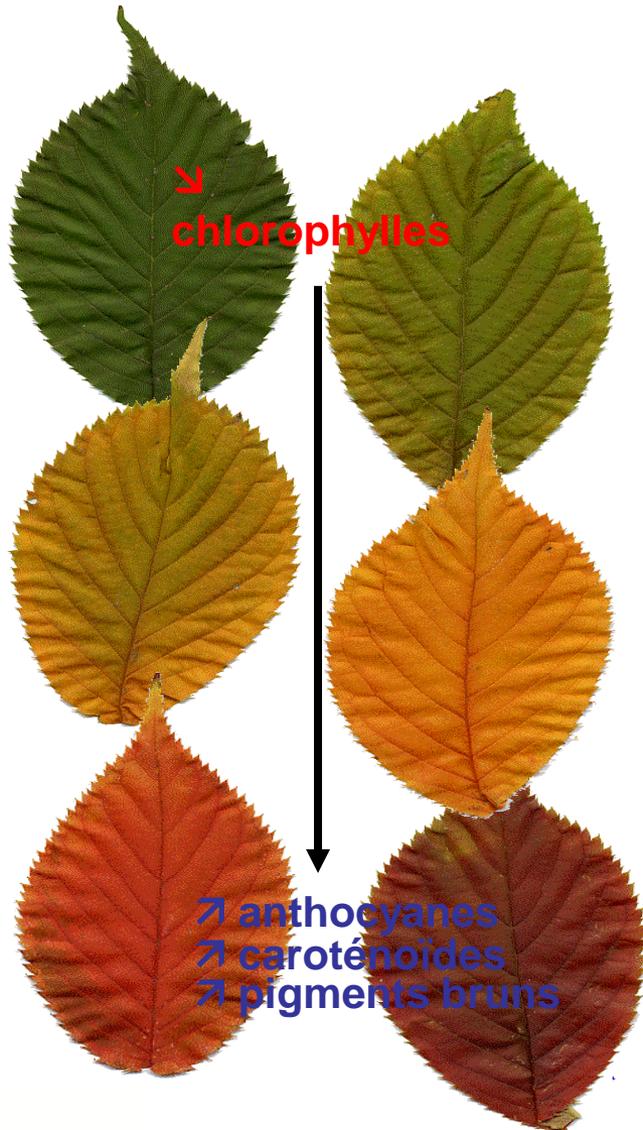


Glitter: réflexion spéculaire à la surface de la mer

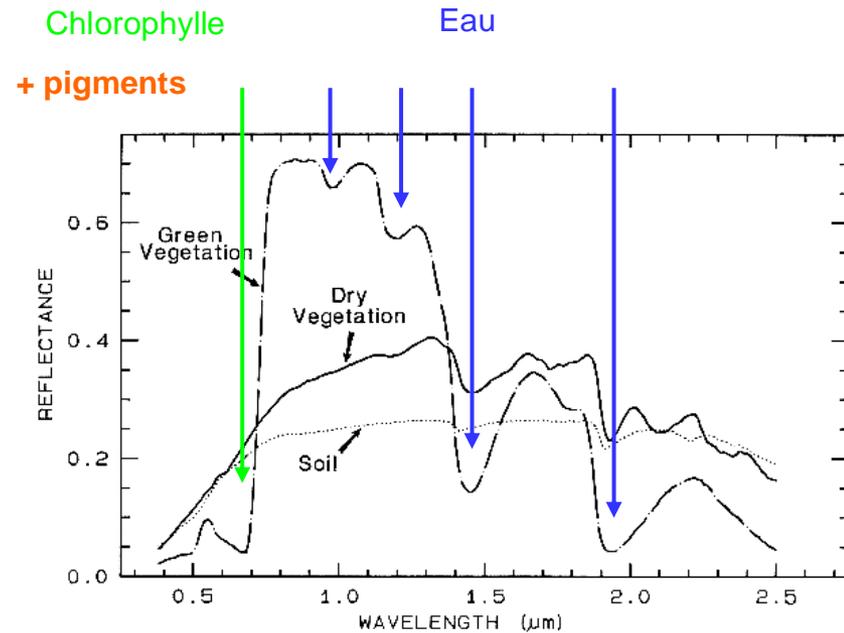


**Phénomène de glitter sur une image acquise, le 30 mars 2005, au large de la Somalie par l'instrument VEGETATION (CNES)**

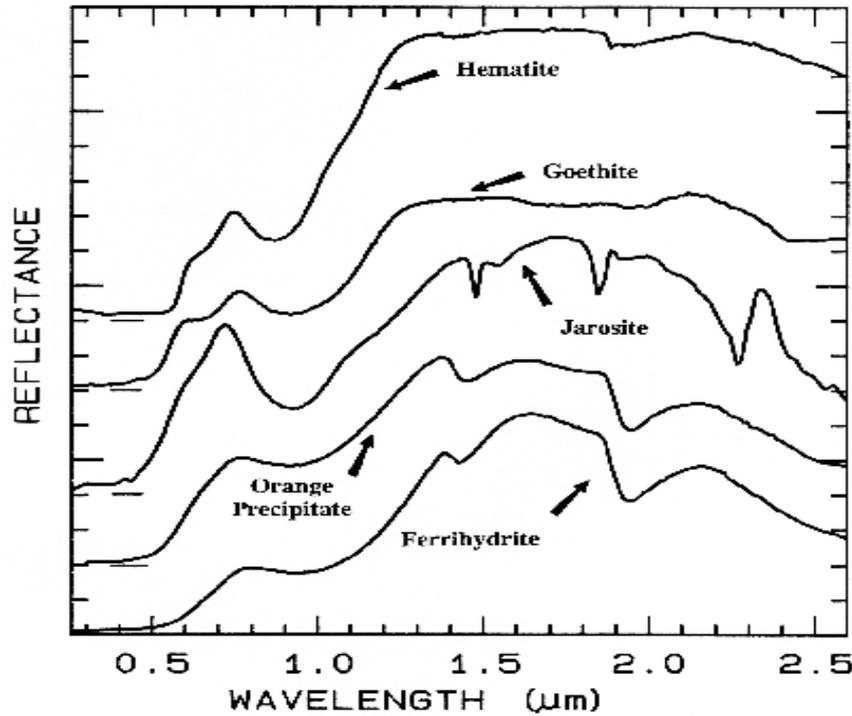
• Interactions rayonnement – surface (13) : **Absorption (1)**



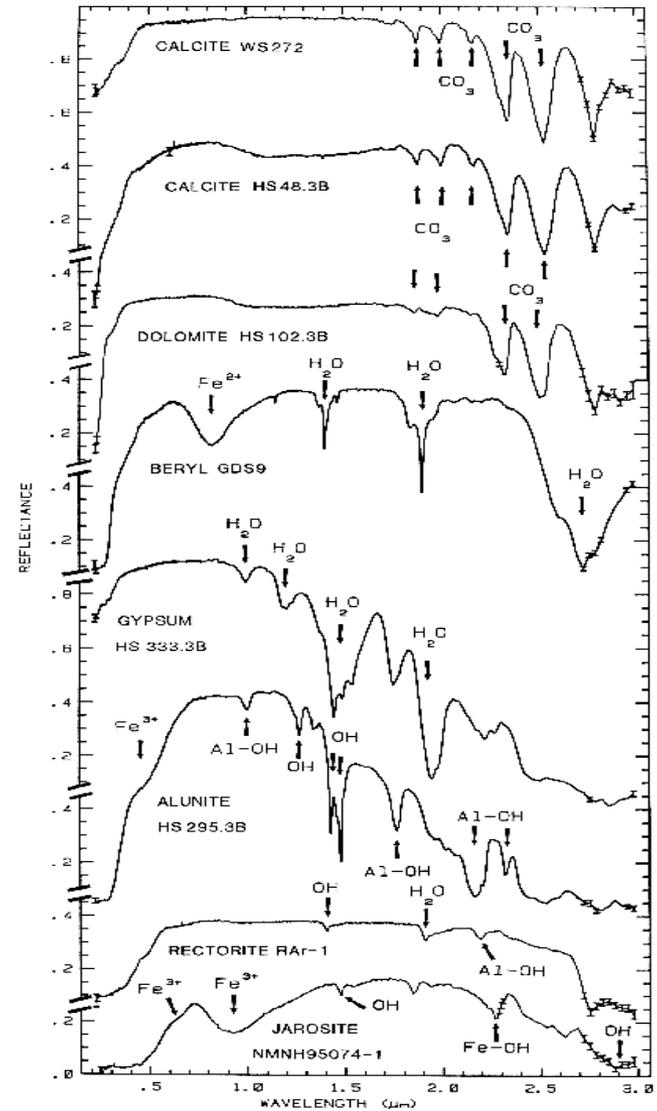
D'après S. Jacquemoud, IPGP



- Interactions rayonnement – surface (14) : **Absorption (2)**



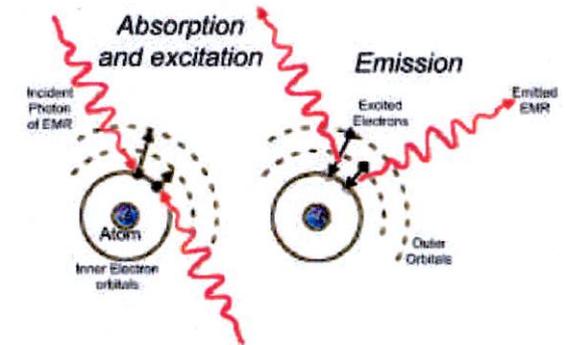
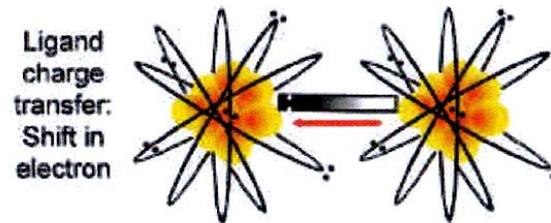
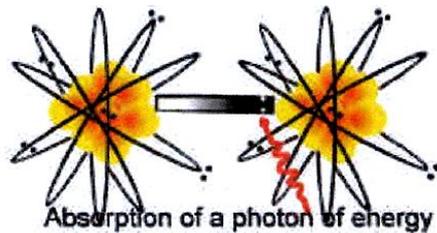
Minéraux



# • Causes des absorptions (1) : Echanges d'énergie

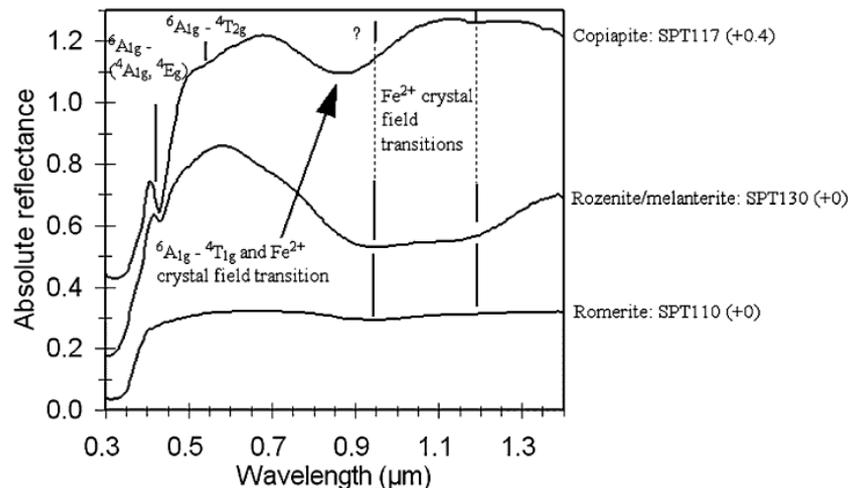
**VIS-PIR (0.3 – 1.05  $\mu\text{m}$ ) : transitions électroniques, champ cristallin et transfert de charges ( $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Ti, Cr, ...) (Burns, 1993)**

**⇒ Absorptions larges**



*Transfert de charges*

*Champ cristallin*



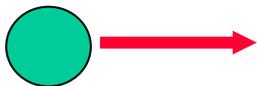
Présence de  $\text{Fe}^{2+}$   
= absorption entre 0.9 – 1.2  $\mu\text{m}$  due aux transitions électroniques dans les sulfates

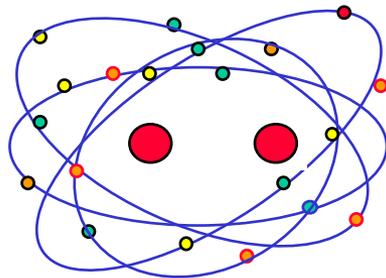
*Cloutis et al., 2006*

# • Causes des absorptions (2) : Echanges d'énergie

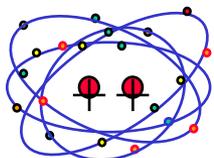
Excitation :

Rayonnement 

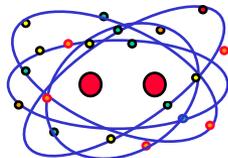
collisions 



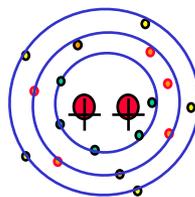
Etats excités :



Rotationnelle

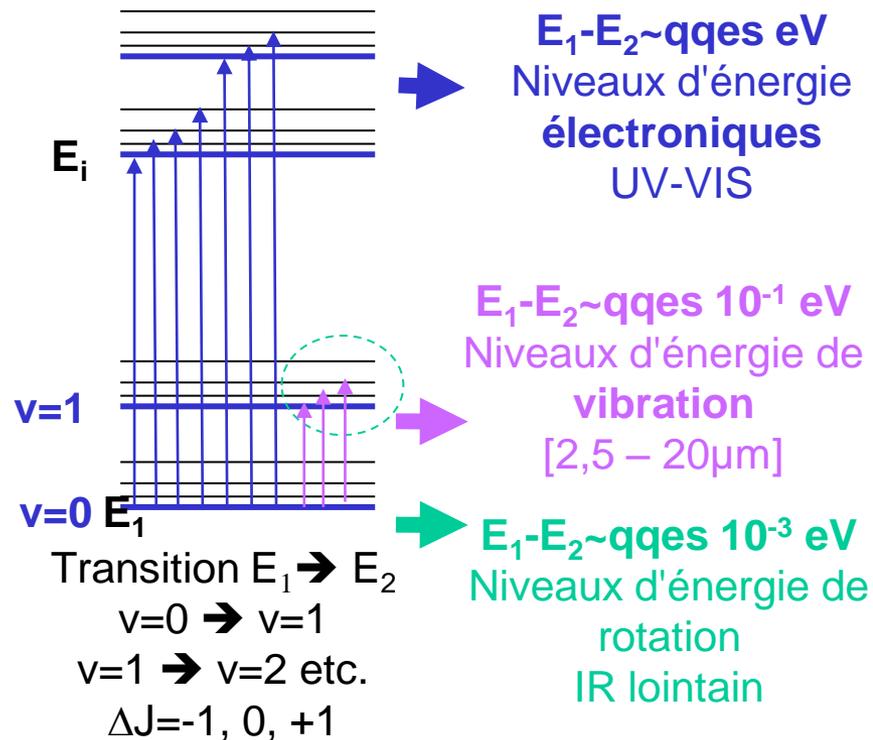
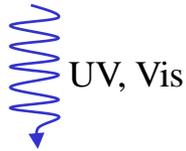
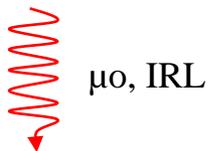


Vibrationnelle



Électronique

Désexcitation :



**Transition  $\rightarrow$  absorption  $\rightarrow$  spectre  
d'absorption, transmission, réflexion**

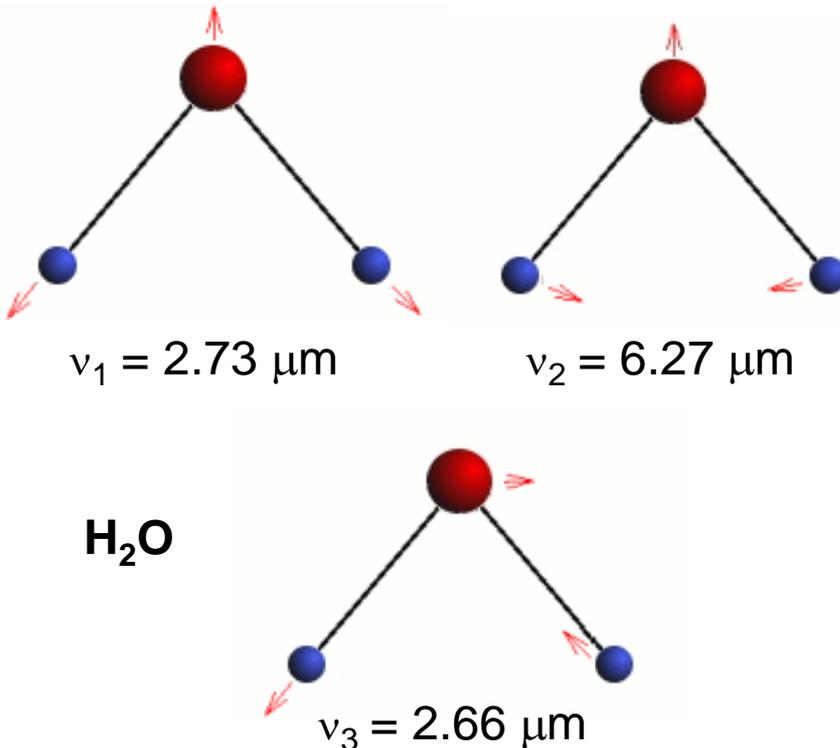
**Propriétés optiques :**

Conservation de l'énergie :  $\rho + a + t = 1$

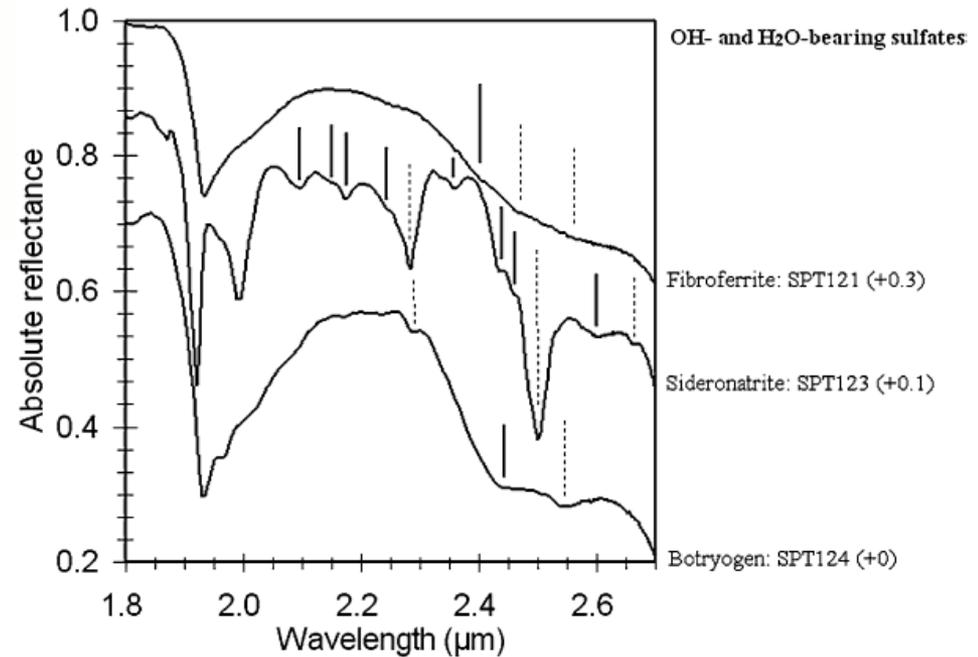
# • Causes des absorptions (3) : Echanges d'énergie

**SWIR 2 (1.95 – 2.5  $\mu\text{m}$ )** : vibrations atomiques et moléculaires (cation-OH avec cation = Al, Mg, Fe,...; H<sub>2</sub>O) (Farmer, 1974; Hunt, 1977)

⇒ **Absorptions étroites**



## Combinaison H<sub>2</sub>O et OH dans les sulfates

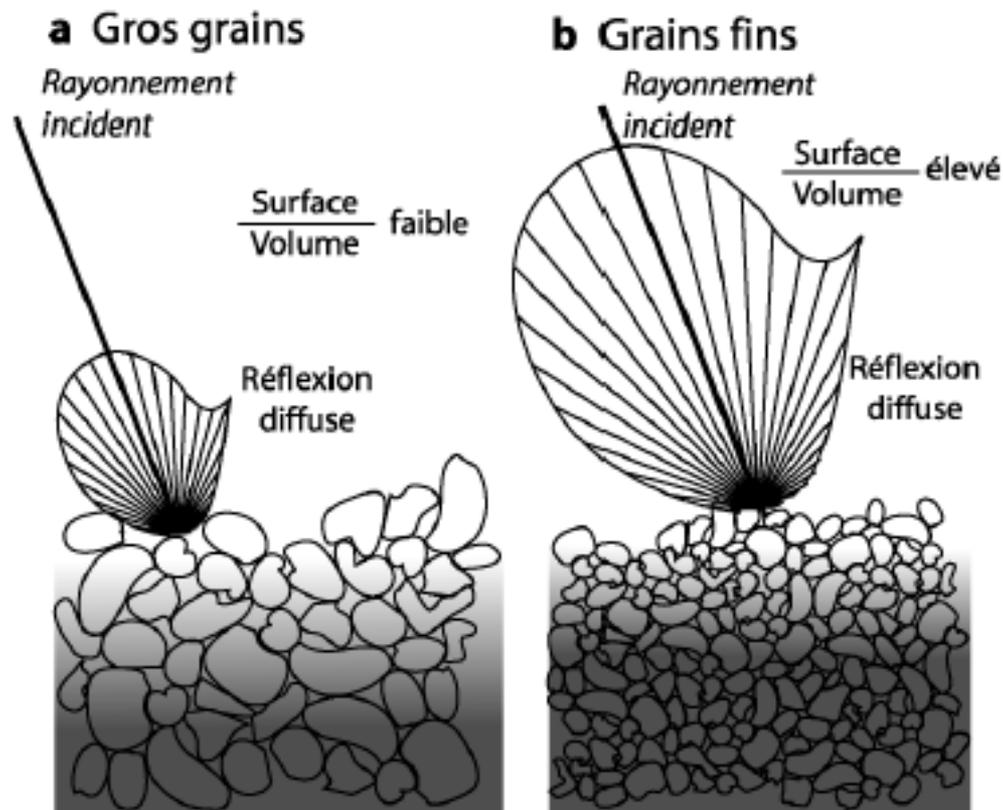


Cloutis et al., 2006

- Effets de la taille de grain (1) :

**Grain « gros »** = trajet plus long  
 -> absorption selon la loi de Beer-Lambert :  $I = I_0 e^{-kx}$

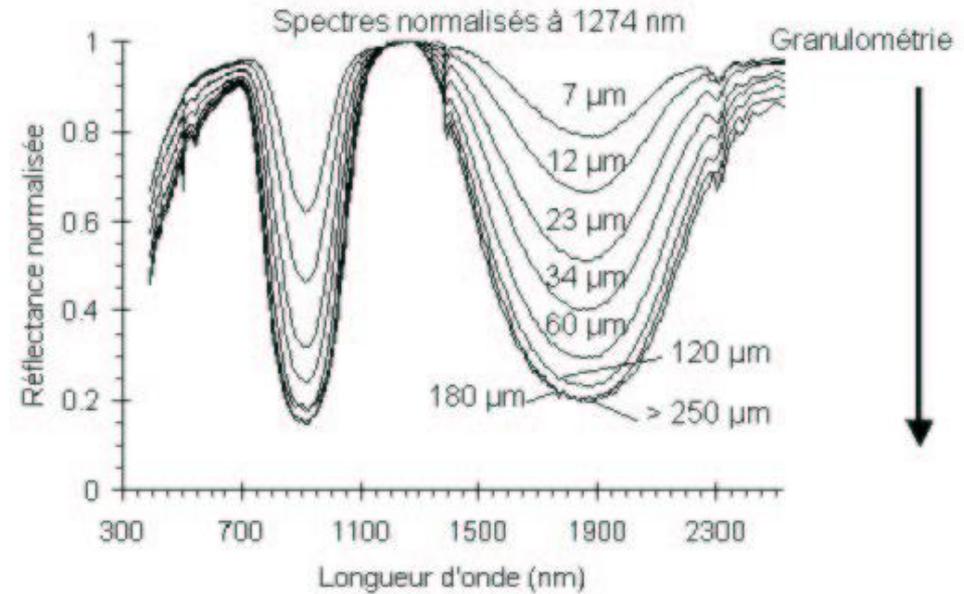
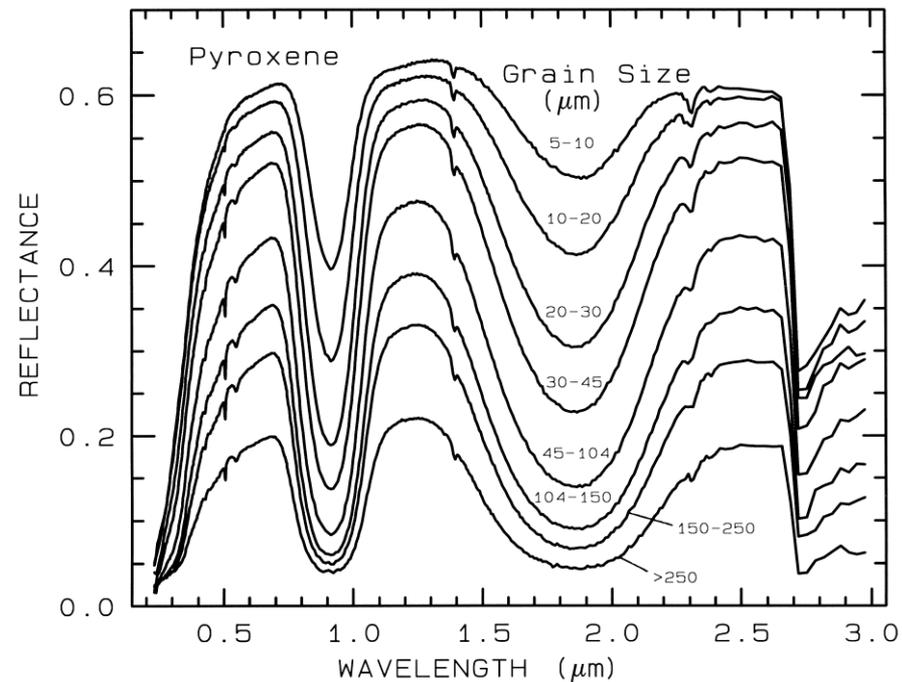
**Grain « petit »** = réflexions internes et à la surface prépondérantes / trajet.



Grande longueur de parcours moyen d'un photon dans la matière :  
 Forte probabilité d'interaction avec la matière :  
**absorption favorisée**

Faible longueur de parcours moyen d'un photon dans la matière :  
 Forte probabilité d'interaction avec une interface :  
**diffusion favorisée**

## • Effets de la taille de grain (2) : Exemples



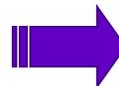
**Remarque : Si grains supérieurs à 180  $\mu\text{m}$  -> saturation des absorptions**

**MAIS intensité de la diffusion aussi fonction de la relation taille de grain / longueur d'onde**

**-> impact sur la forme générale = continuum**

# • Résumé (1)

Surface = Signature spectrale  
 = f(absorption, diffusion)  
 = f(chimie, structure)

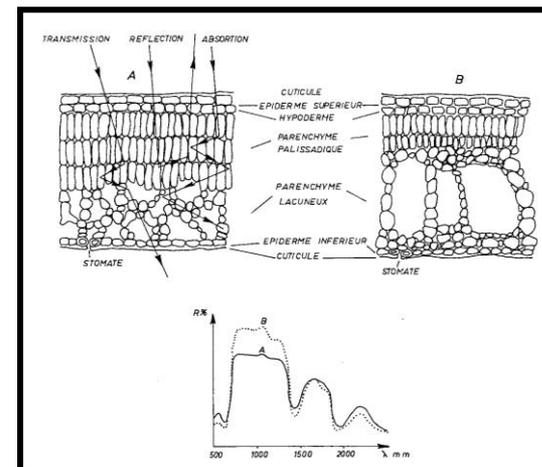
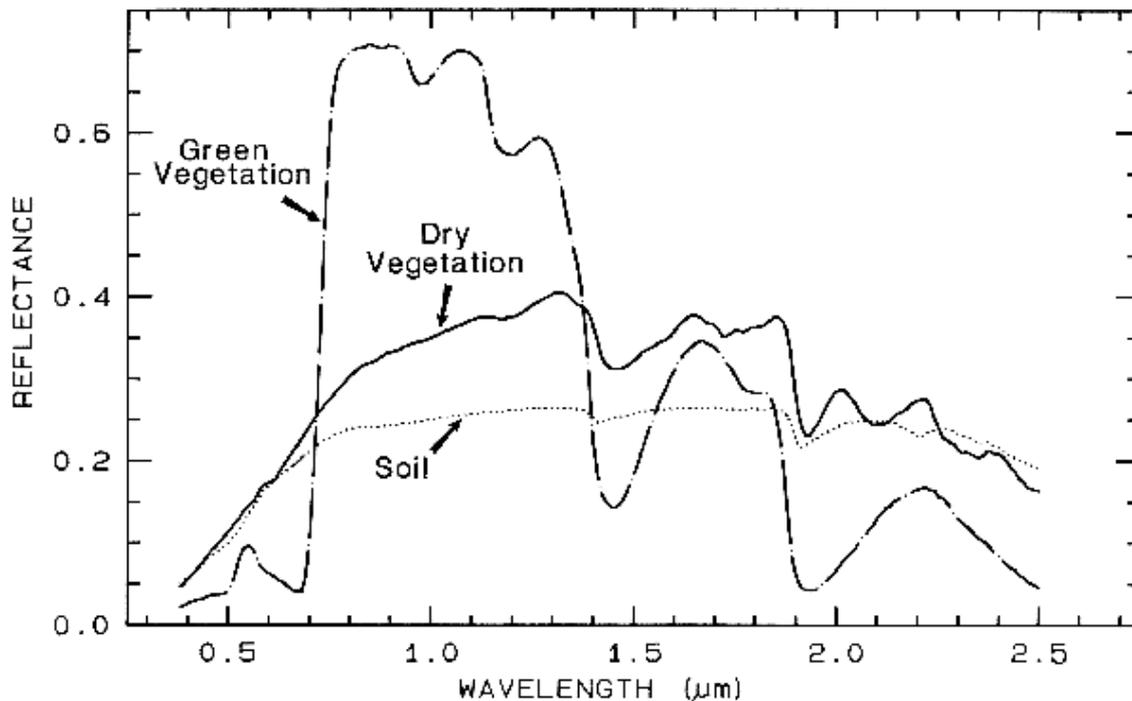


## IDENTIFICATION

Absorption  
 Chlorophylle +  
 autres  
 pigments

Diffusion  
 cellulaire

Absorption Eau  
 + lignine et cellulose



## • Résumé (2)

**A - Source d'énergie ou d'illumination**

**B - Rayonnement et atmosphère**

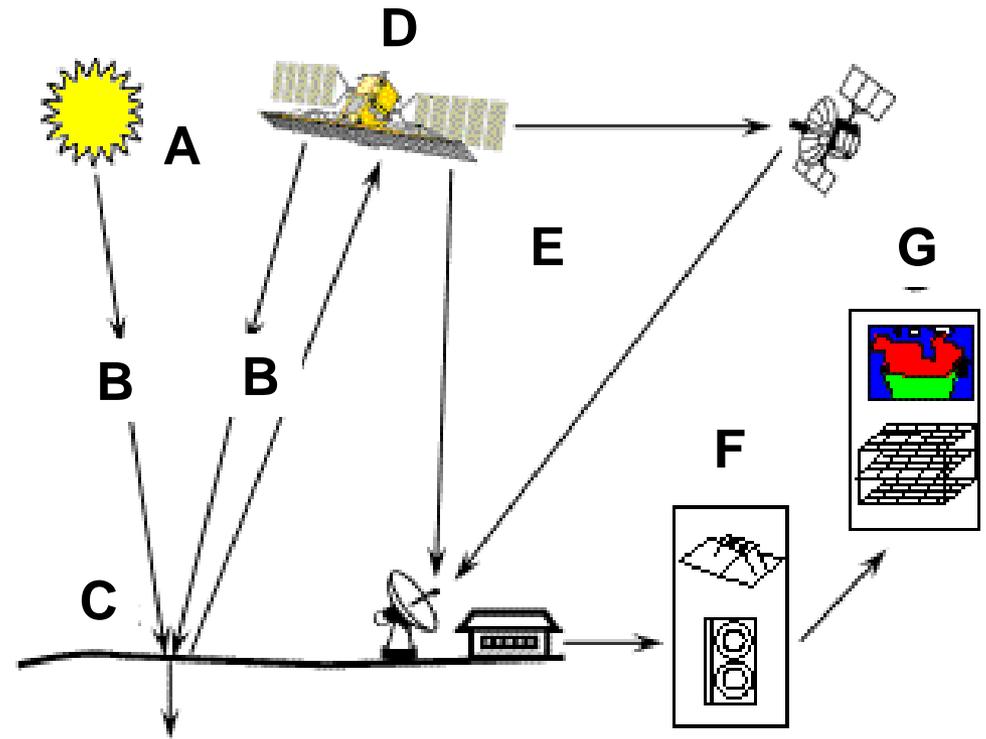
**C - Interaction avec la cible**

**D - Enregistrement de l'énergie par le capteur**

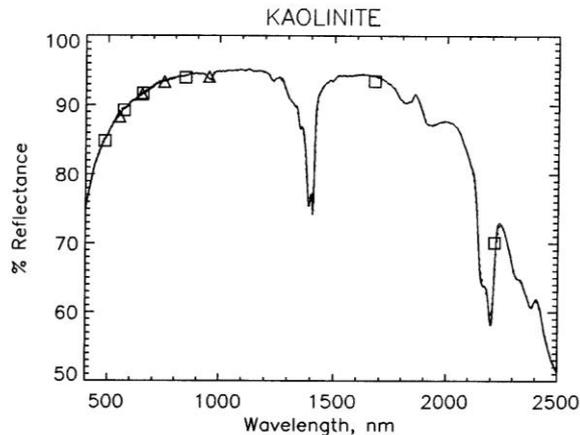
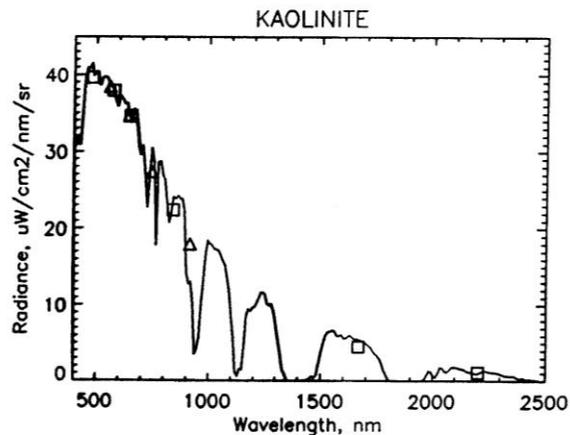
**E - Transmission, réception et pré-traitement**

**F - Interprétation et analyse**

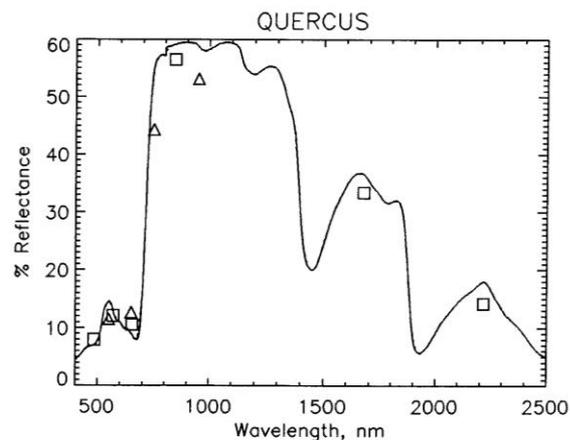
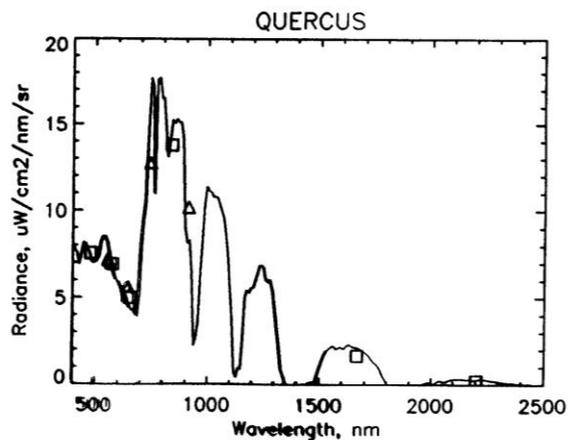
**G - Applications**



- **Résumé (3)**



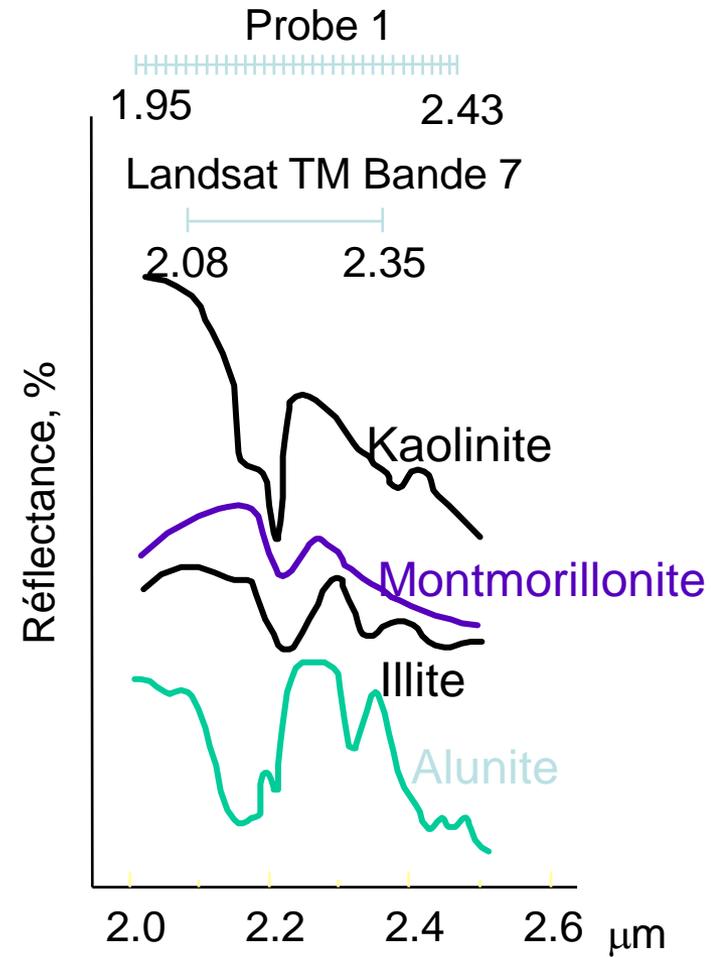
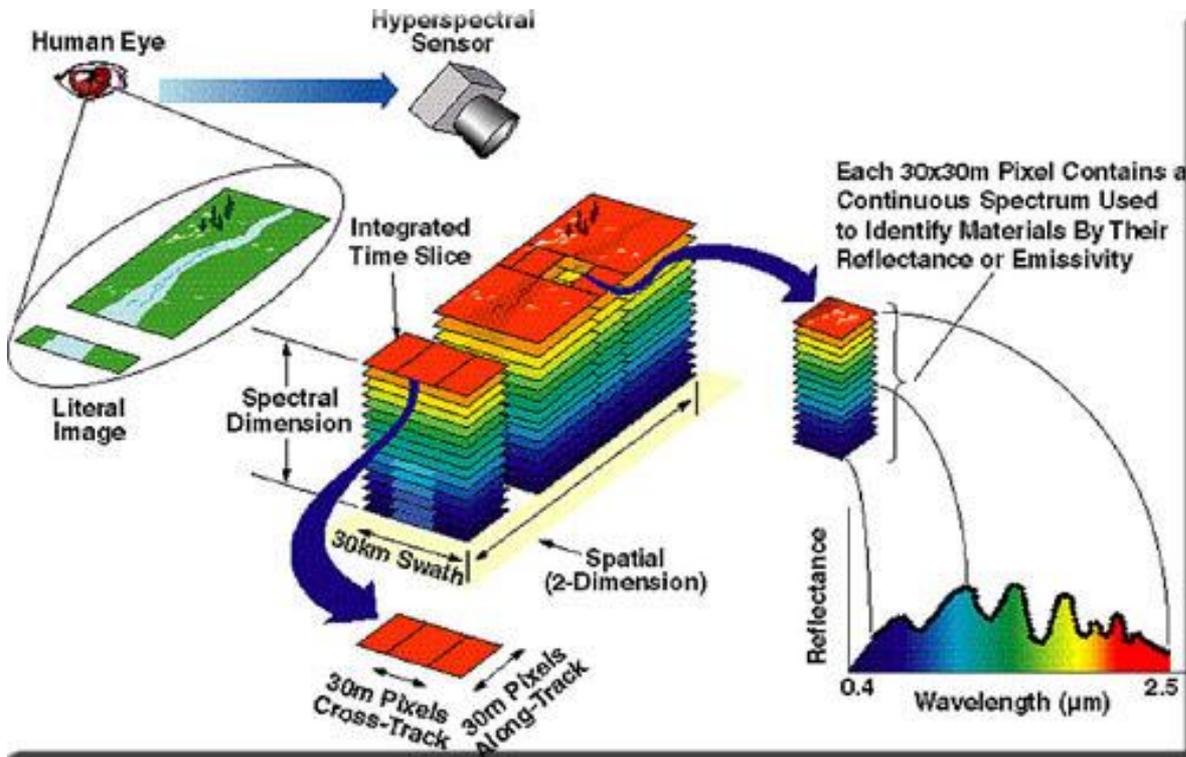
**Corr.  
Atmosph.**



**Enregistré par le capteur  
(Luminance)**

**Signature spectrale de la surface  
(Réflectance)**

# Intérêt de la spectrométrie



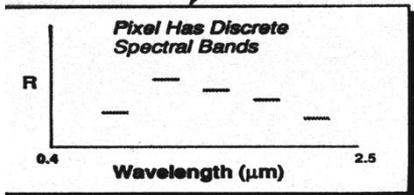
- **Intérêt par rapport au multi/superspectral**

Permet l'*identification* et la *quantification in situ* de manière *non destructive*

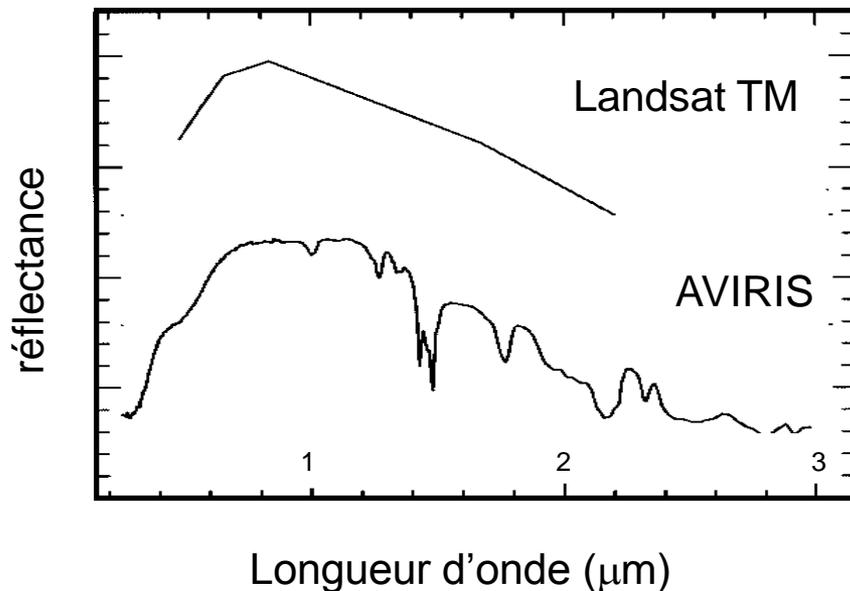
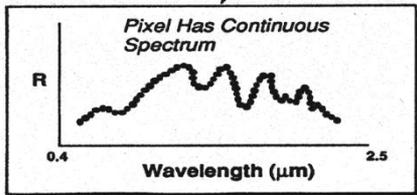
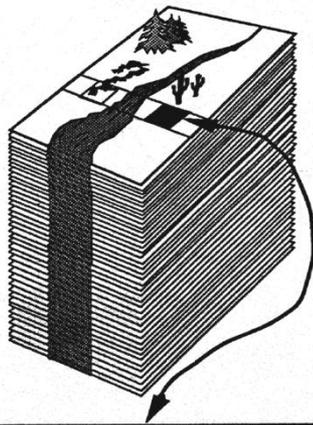
Avantage par rapport aux capteurs "classiques":

Les systèmes d'imagerie multispectrale *sous-échantillonnent* le spectre  
-> Identification et quantification difficiles

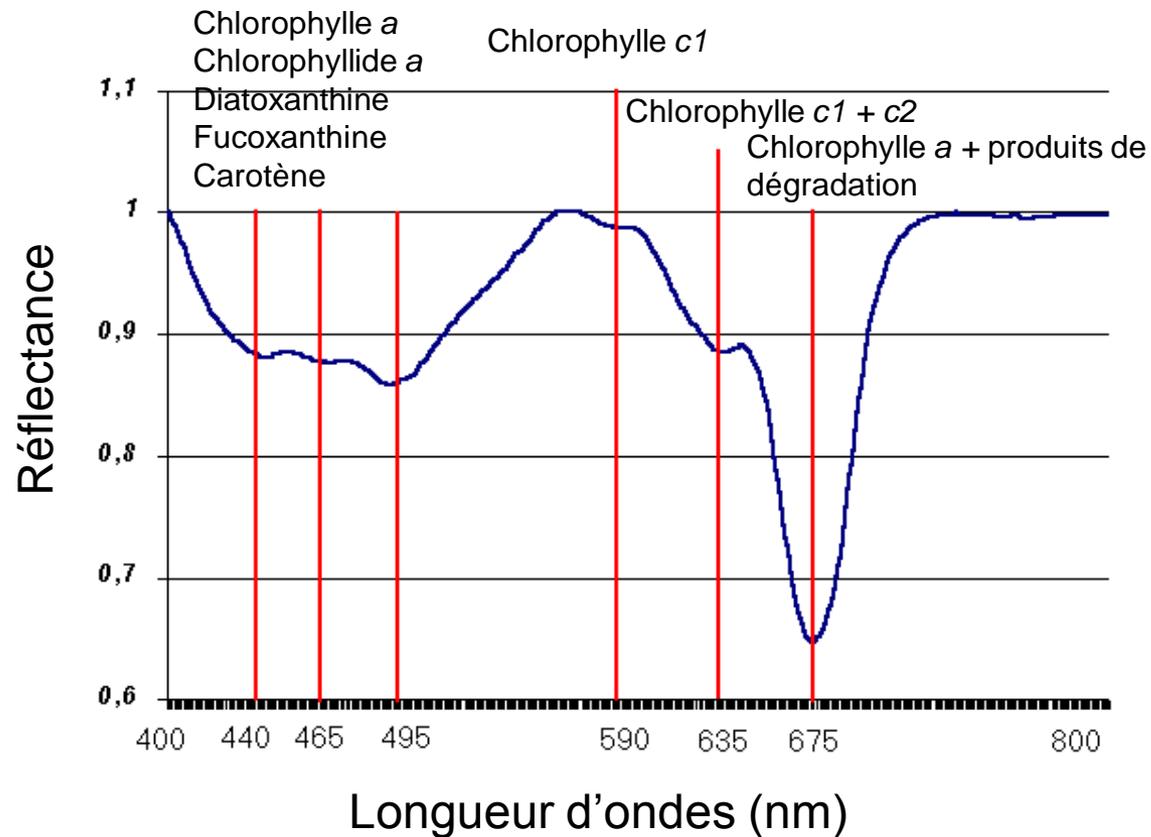
Multispectral



Hyperspectral

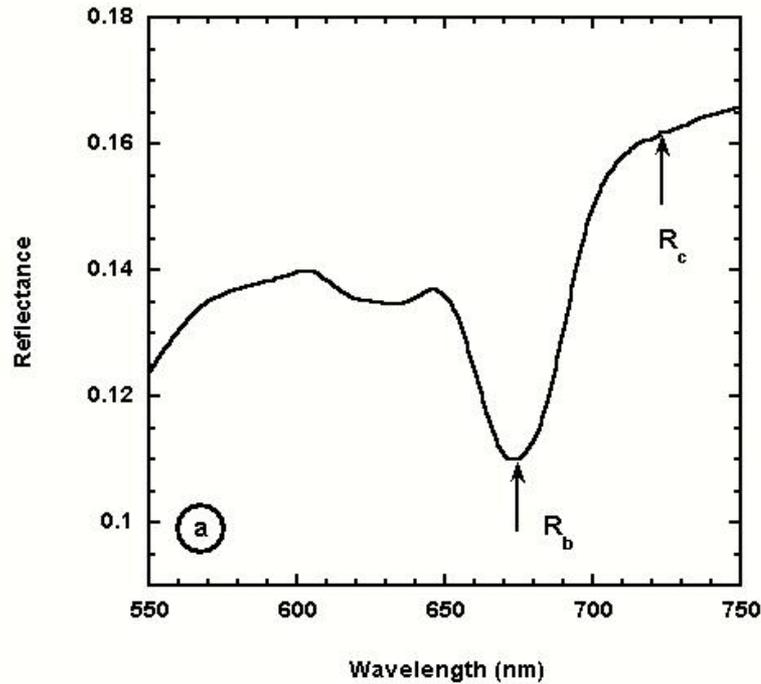


- Intérêt : **Absorptions** ➡ Identification, concentration

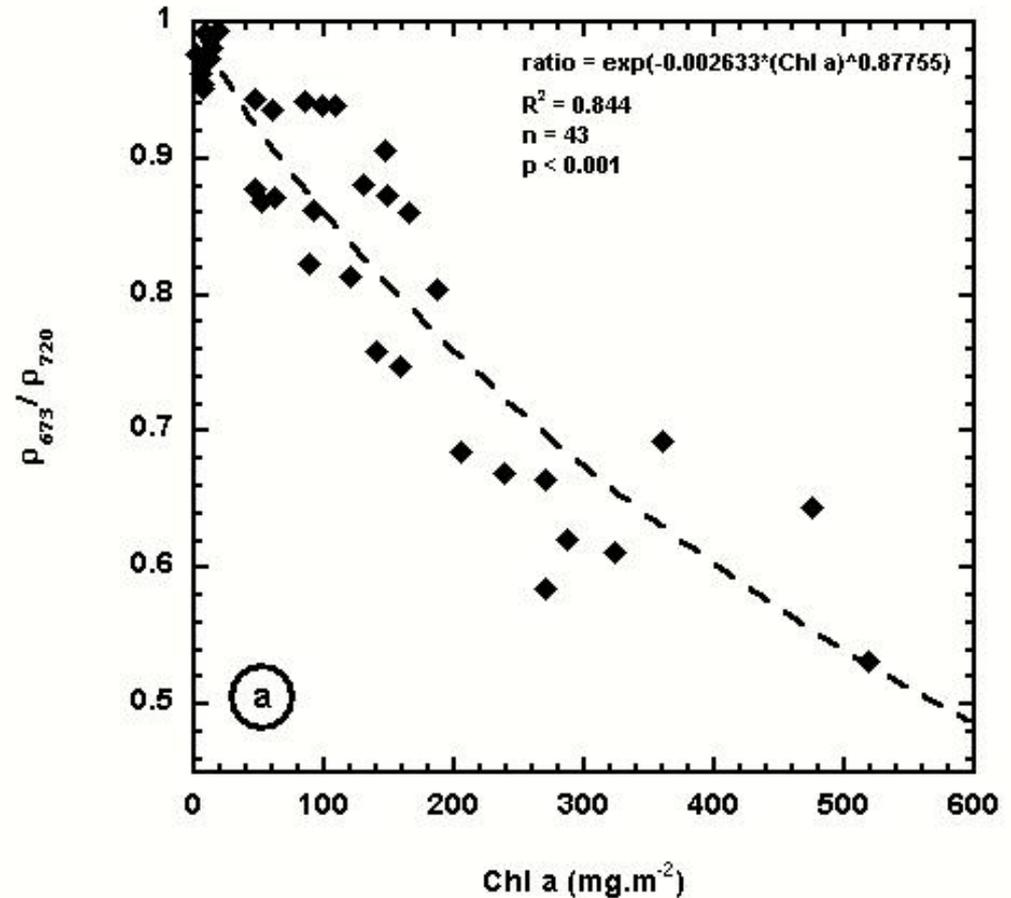


• Intérêt : Absorptions 

Identification, concentration



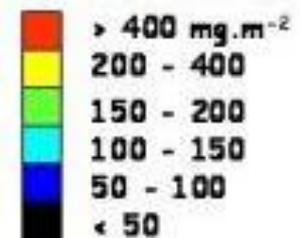
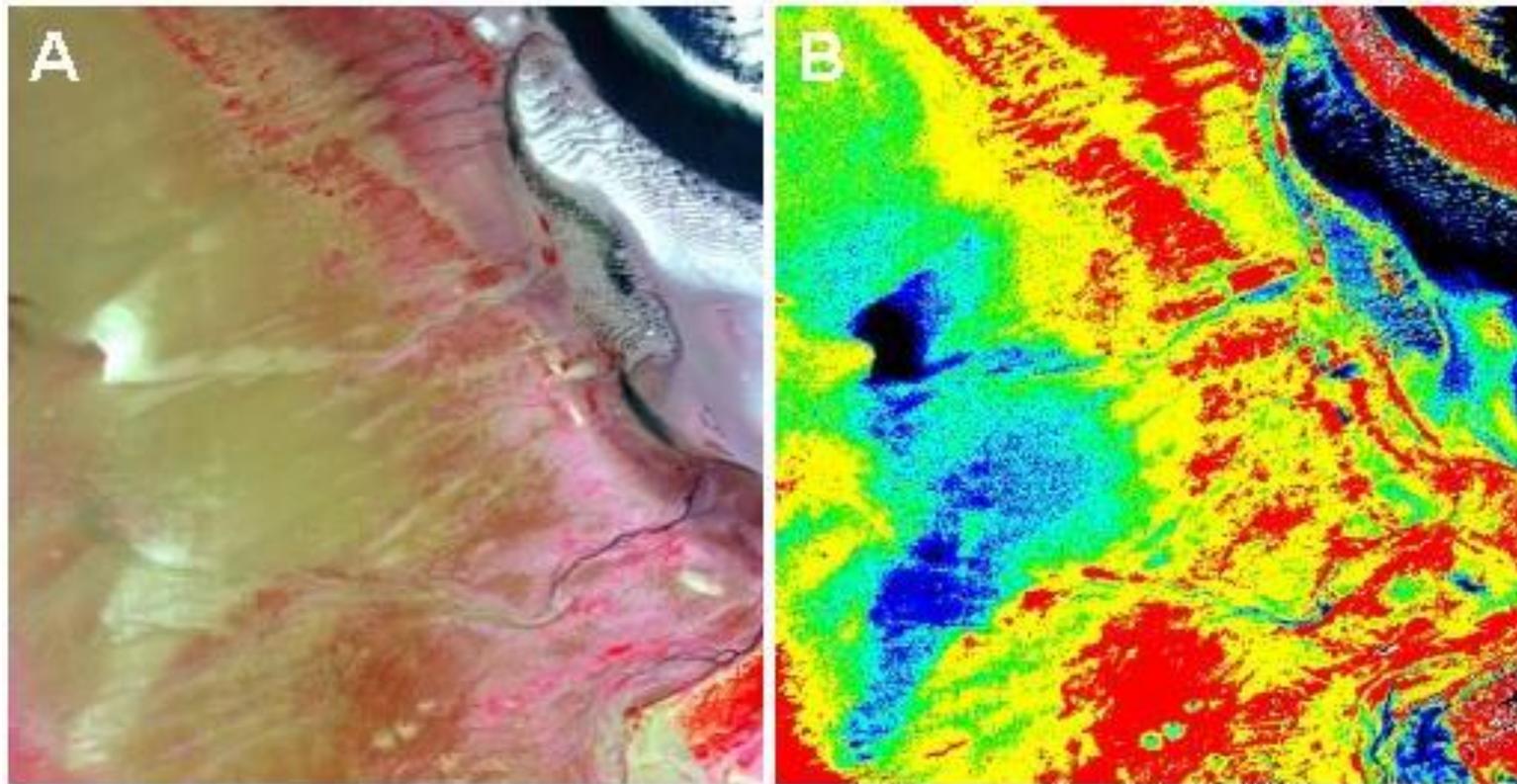
$$\rho_{673} / \rho_{720}$$



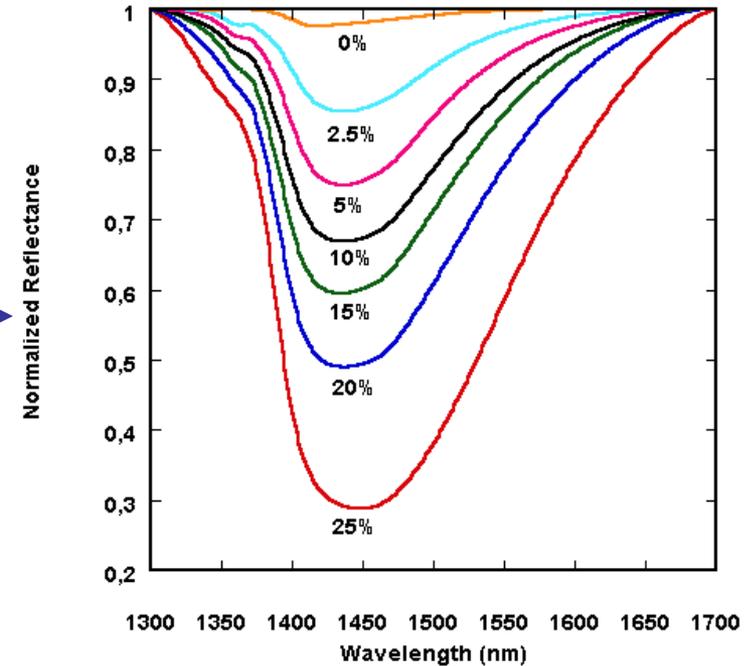
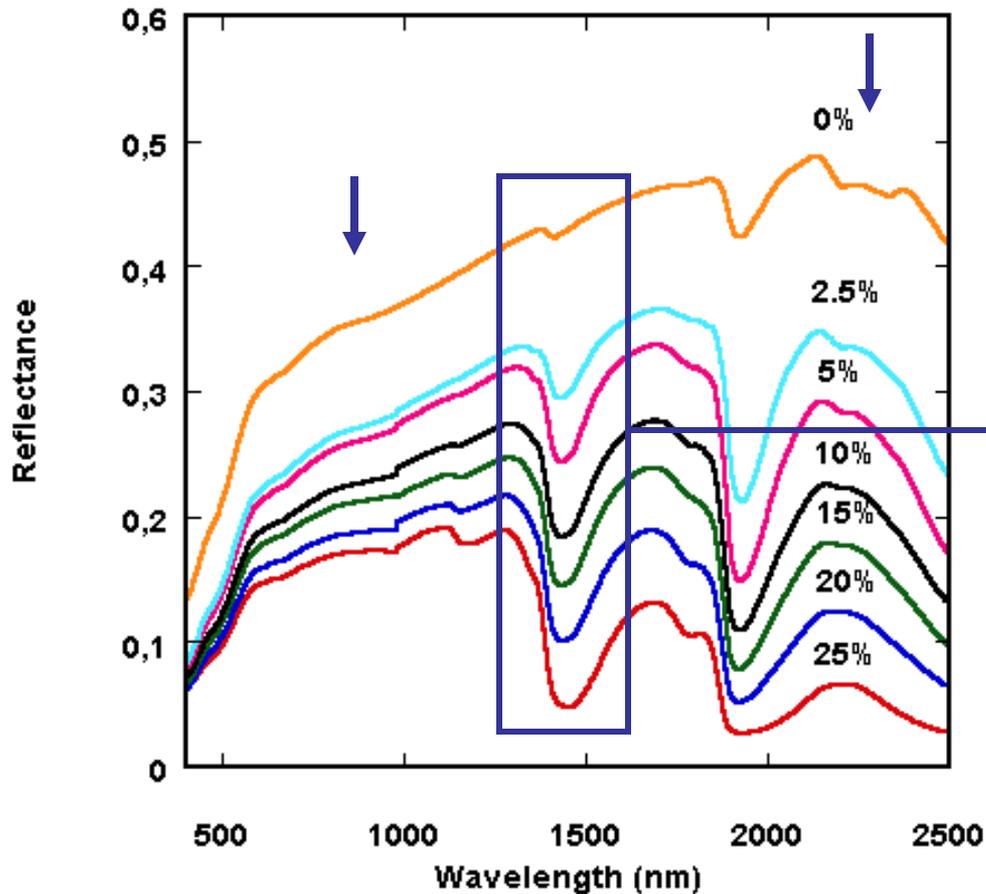
Spectres de terrain + [Chl] échantillons

- **Intérêt : Application aux images – cartographie quantitative**

Inversion -> Cartes de concentration en Chlorophylle a

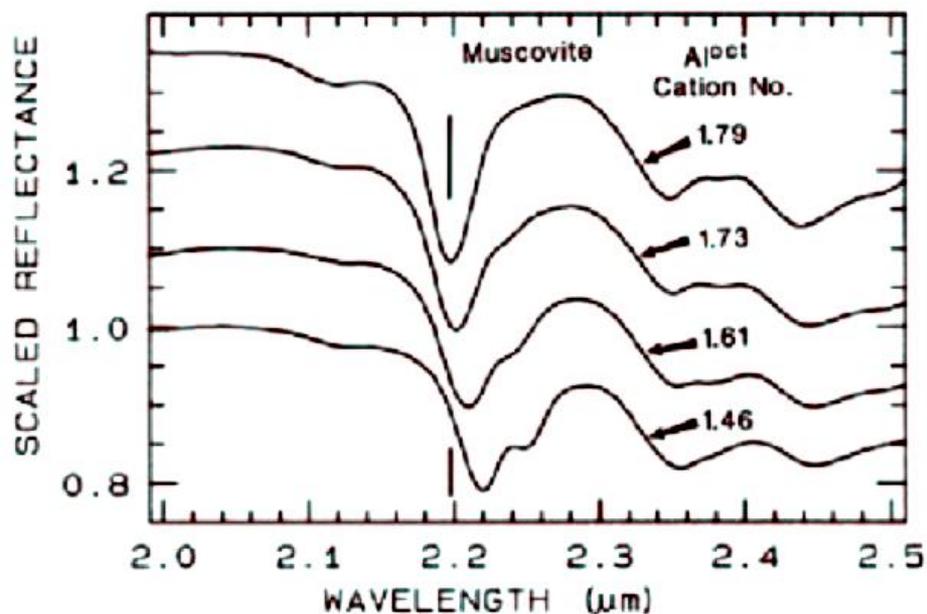


- **Intérêt : Application aux images – cartographie quantitative**

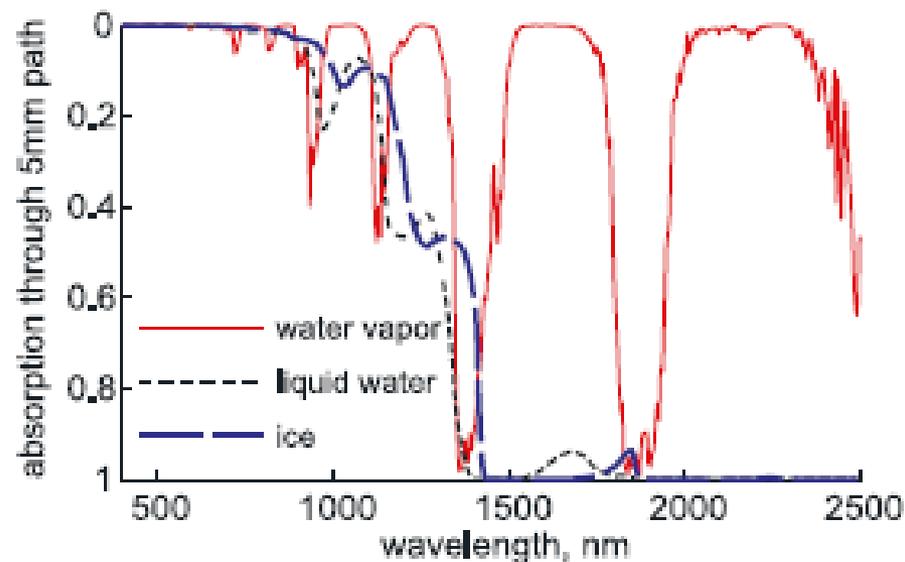


**Humidité**

- **Intérêt :** **Décalages spectraux : Substitutions de cations, Eau liquide, vapeur, glace**

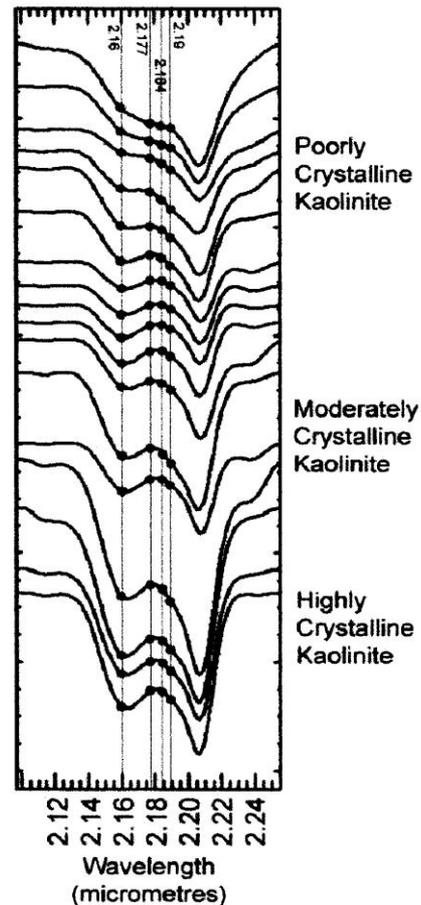


**Al dans Muscovite**



**Eau liquide, vapeur, glace**

- Intérêt : **Ordre / Désordre cristallin - Exemple de la kaolinite**



**Sol en place ou non**

Figure 4.19 Kaolinite crystallinity parameters relating to the 2.16-2.18  $\mu\text{m}$  features of the hull quotient spectrum. Crystallinity is calculated using the formula:  $(2.184/2.19 \mu\text{m} - ((2.16/2.177 \mu\text{m}) - (2.184/2.19 \mu\text{m})))$  of hull quotient removed data. The spectra are from samples from the White Dam area, measured using an ASD FieldSpec Pro FR (figure adapted from Pontual *et al.* 1997).

- **Résumé :**
  - **Identification / chimie grâce à absorptions spécifiques**
  - **Quantification (concentration) grâce à profondeur d'absorption**
  - **Décalage spectraux faibles -> chimie fine, cristallinité**
  - **Importance de la forme des absorptions (mélanges)**
  - **“Granulométrie” grâce à forme générale du spectre (continuum)**
  - **...**