A satellite-style map of Europe and the Mediterranean region. The landmasses are shown in shades of grey and brown, while the oceans are dark blue. Numerous small, bright blue dots are scattered across the landmasses, particularly in Europe and the Mediterranean basin, representing data points or specific locations of interest.

Université Paris Diderot – Paris 7
UFR des Sciences de la Terre, de l'environnement et des planètes
L3 Géosciences fondamentales

*Rayonnement, transfert radiatif,
télédétection – 1/3*

Stéphane Jacquemoud

Février 2008

Première partie : bases physiques

I. Définitions et historique

I.1. Définition

I.2. Quelques dates

II. Quelques bases physiques

II.1. Le rayonnement électromagnétique (REM)

II.2. Le spectre du rayonnement électromagnétique

II.3. Les sources de rayonnement

II.4. La constante solaire

III. Le système Terre-atmosphère

III.1. L'atmosphère terrestre

III.2. Les surfaces terrestres

IV. Interactions onde / matière

IV.1. Absorption du REM

IV.2. Diffusion du REM par une particule

IV.3. Diffusion du REM par une surface

I. Définitions et historique

I.1. Définition

Journal officiel du 22/09/2000

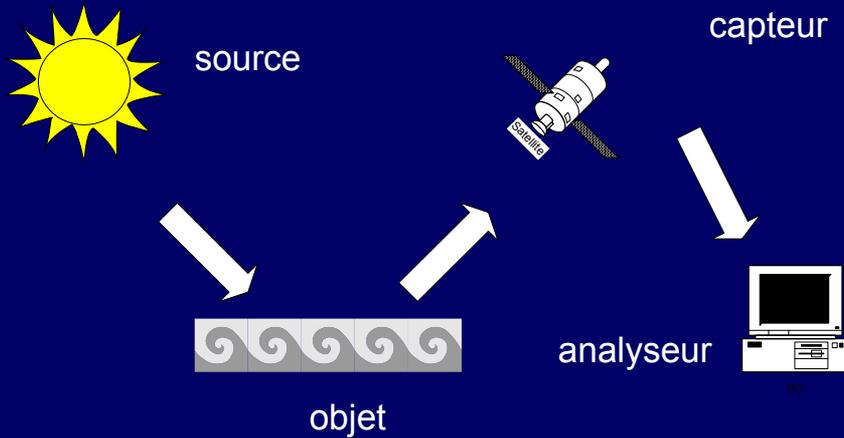
téledétection, n.f.

Domaine : PHYSIQUE-MÉTROLOGIE

Définition : 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.

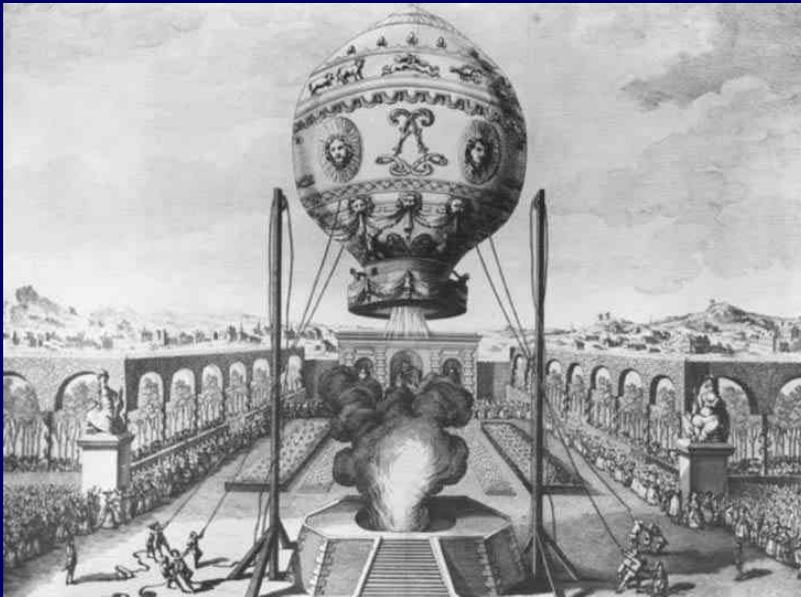
Note : La téledétection utilise généralement l'interaction du rayonnement électromagnétique avec la matière. Exemple : la téledétection en hyperfréquences.

Équivalent étranger : remote sensing (en)

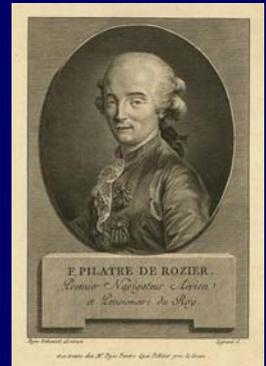


I.2. Quelques dates

1783 premier vol en ballon avec un être humain à son bord par Jean-François Pilâtre de Rozier



Paris, 21 novembre 1783



- 1837 invention de la plaque photographique par Louis Daguerre
- 1903 les frères Auguste et Louis Lumière inventent l'autochrome, plaque teintée des trois couleurs fondamentales
- 1935 mise sur le marché de la première pellicule couleur diapositive Kodachrome par Kodak
- 1942 premier film commercial infrarouge



M. Huet par Louis
Daguerre, 1837

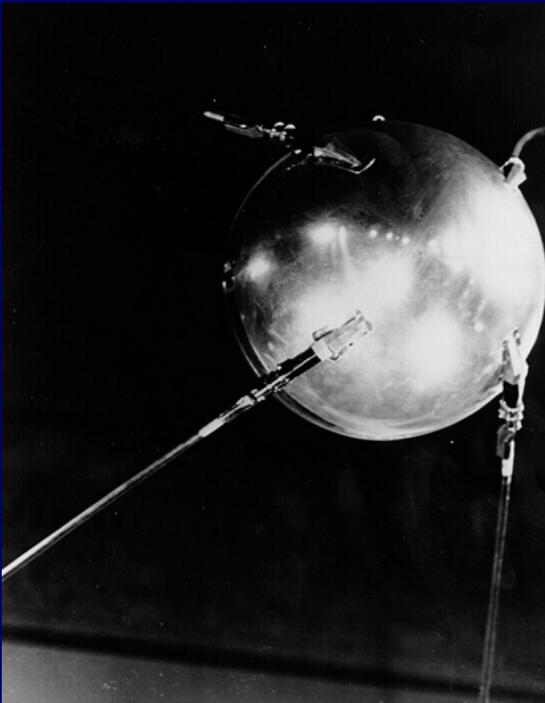


Photographie de la guerre civile américaine,
First Bull Run, Juillet 1861 (Library of Congress)

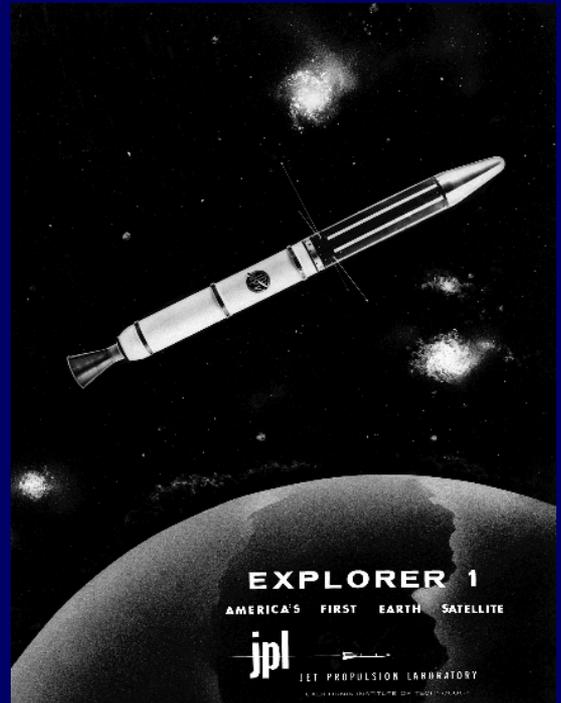


Nature morte, 1910, autochrome des frères
Lumière

- 1957 Lancement de **Sputnik 1** le 4 octobre 1957
- 1958 Lancement de **Explorer 1** le 31 janvier 1958
- 1961 Youri Gagarine est le premier homme à voler dans l'espace à bord du **Vostok 1**



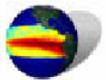
http://en.wikipedia.org/wiki/Sputnik_program



<http://www.jpl.nasa.gov/explorer/>

- 1962 survol de Vénus par **Mariner 2**
- 1965 survol de Mars par **Mariner 4**
- 1972 mise sur orbite du premier satellite de télédétection des ressources terrestres : **ERTS 1–MSS** (*Earth Resources Technology Satellite / Multi-Spectral Scanner*)
- 1977 lancement de Météosat F1
- 1979 survol de Jupiter par **Voyager 2** et survol de Saturne par **Pioneer 11**
- 1986 premier satellite de télédétection français : **SPOT 1–HRV** (*Satellite Probatoire d'Observation de la Terre / High Resolution Visible*)
- 1991 premier radar à synthèse d'ouverture de télédétection des ressources terrestres : **ERS1–AMI** (*Earth Resources Satellite / Active Microwave Instrument*)
- 1996 premier capteur multidirectionnel : **ADEOS–POLDER** (*Advanced Earth Observing Satellite / Polarization and Directionality of the Earth's Reflectances*)
- 1999 plate-forme spatiale **Terra**–**ASTER/CERES/MISR/MODIS/MOPITT** (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer / Clouds and the Earth's Radiant Energy System / Multi-angle Imaging SpectroRadiometer / MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer / Measurements Of Pollution In The Tropospher*)
- 2002 lancement de **MSG-1** (*Meteosat Second Generation*)
- 2006 lancement du satellite **ALOS** (*Advanced Land Observing Satellite*)
- 2007 lancement du satellite **COROT** (*COncvection, Rotation & planetary Transits*)

earth observatory



DATA & IMAGES



FEATURES



NEWS



REFERENCE



MISSIONS



EXPERIMENTS

<http://earthobservatory.nasa.gov/>



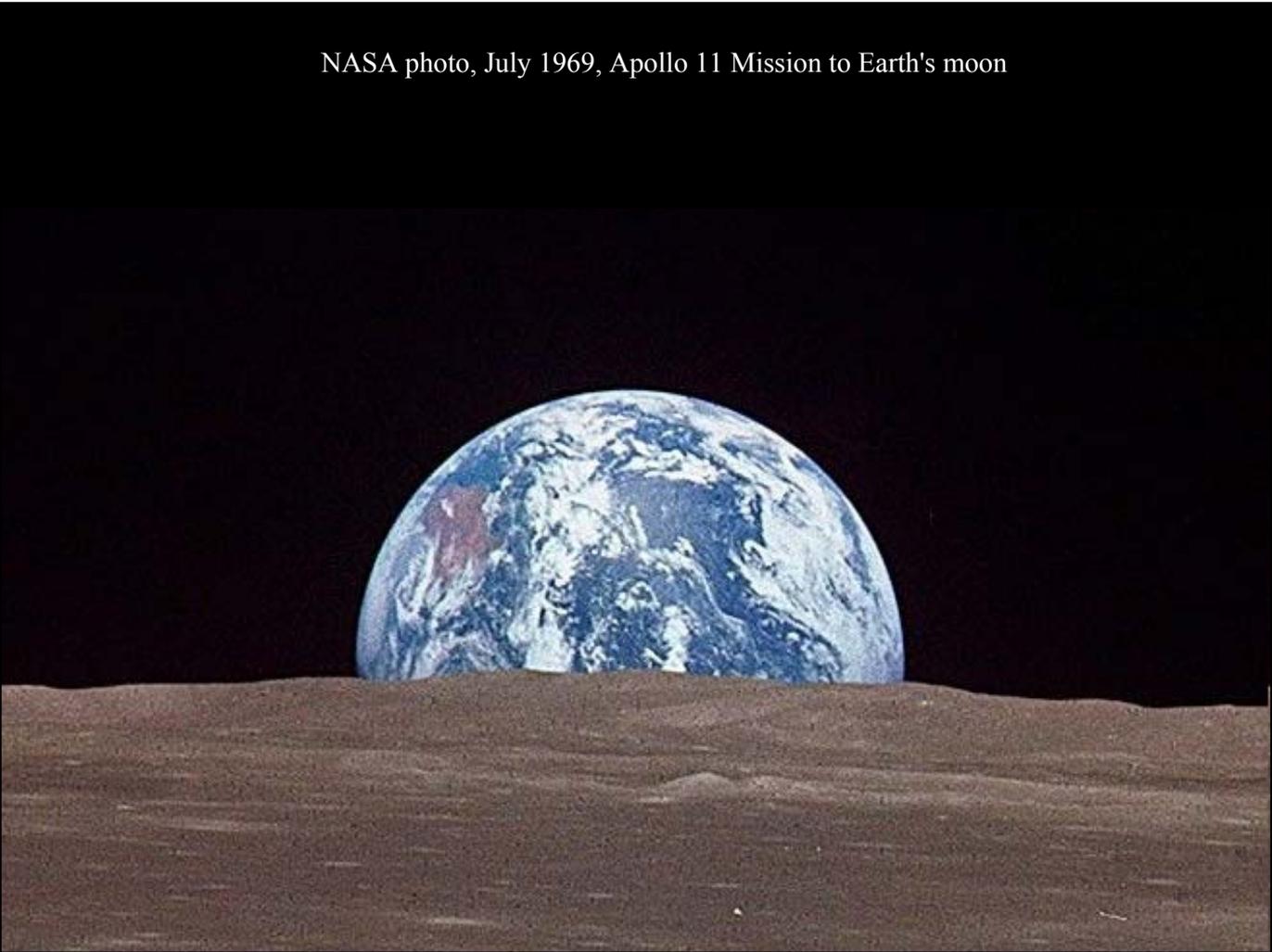
European Space Agency

<http://www.esa.int/>



<http://www.cnes.fr/>

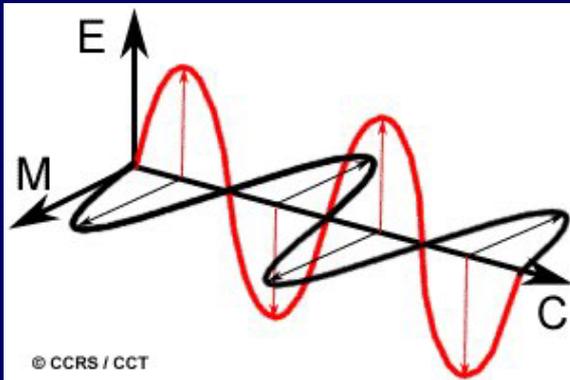
NASA photo, July 1969, Apollo 11 Mission to Earth's moon



II. Quelques bases physiques

II.1. Le rayonnement électromagnétique (REM)

Un rayonnement est une énergie transportée dans l'espace sous forme d'ondes ou de particules :
dualité ondes-particules



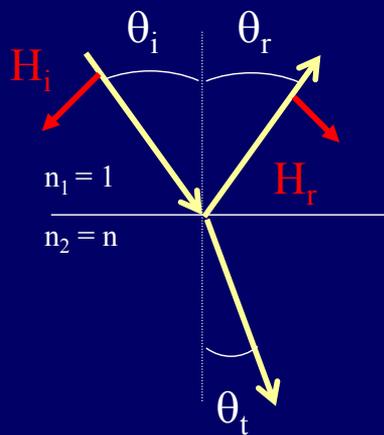
Champ électrique : \vec{E}

Induction magnétique : \vec{B}

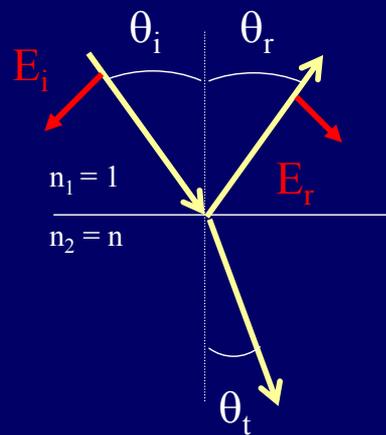
Le rayonnement électromagnétique (REM) est caractérisé par cinq quantités :

- la direction de propagation
- l'intensité
- la longueur d'onde λ (ou la fréquence $\nu = c / \lambda$ ou le nombre d'onde $\sigma = 1 / \lambda$)
- la polarisation (parallèle ou perpendiculaire)
- la phase

Onde plane uniforme à incidence oblique sur une surface plane



Polarisation perpendiculaire



Polarisation parallèle

II.2. Le spectre du REM

Domaines utilisés en observation de la Terre :

Domaine solaire (300 nm - 3 µm)

UV-B (280 nm - 315 nm)

UV-A (315 nm - 400 nm)

VIS (400 nm - 700 nm)

IR-A ou PIR (700 nm - 1200 nm)

IR-B ou MIR (1200 nm - 3000 nm)

⇒ réflectance

Domaine infrarouge (3 µm - 1 mm)

IR-C ou IRT (3 µm - 100 µm)

FIR (100 µm - 1 mm)

⇒ température de surface

Domaine hyperfréquence (1 mm - 1 m)

Bande X (2.5 cm - 3.75 cm)

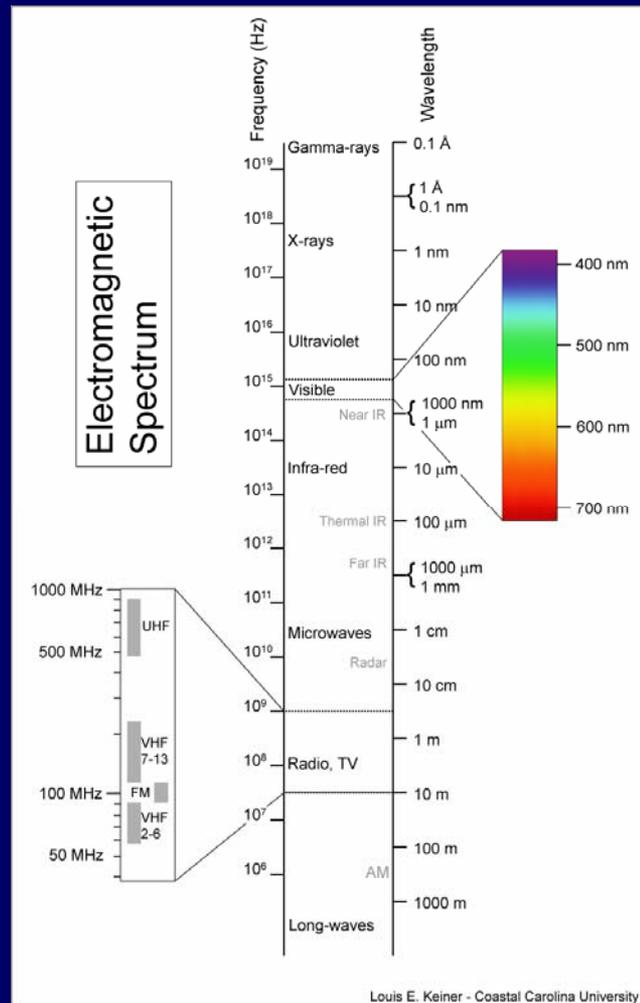
Bande C (3.75 cm - 7.5 cm)

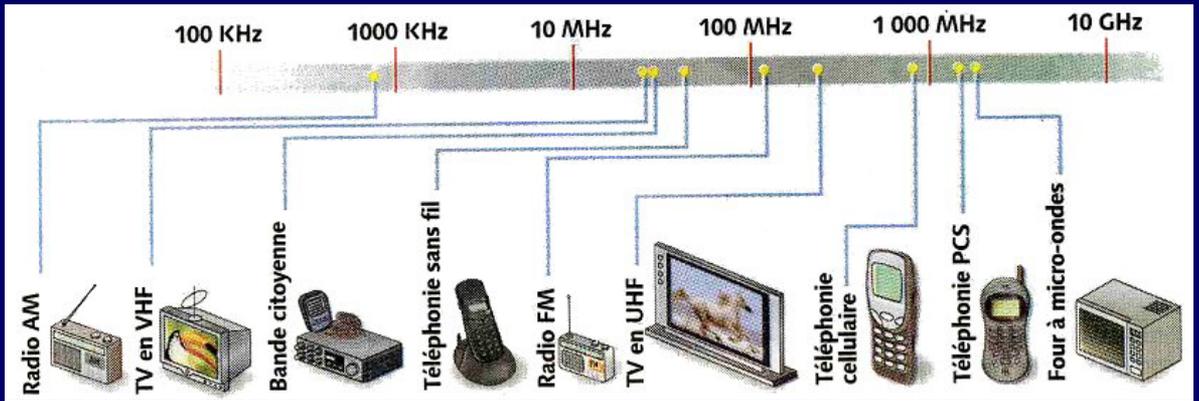
Bande S (7.5 cm - 15 cm)

Bande L (15 cm - 30 cm)

Bande P (30 cm - 100 cm)

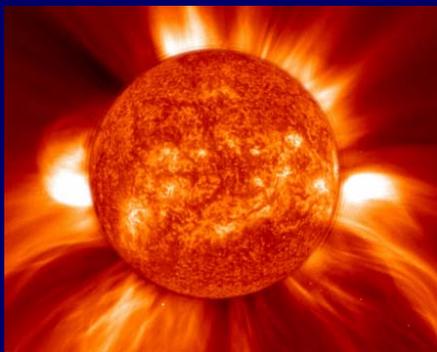
⇒ coefficient de rétrodiffusion





II.3. Les sources de rayonnement

Sources naturelles :
télédétection passive



Sources artificielles :
télédétection active



Loi de Planck

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

$L(\lambda, T)$ = luminance énergétique spectrale (en $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)

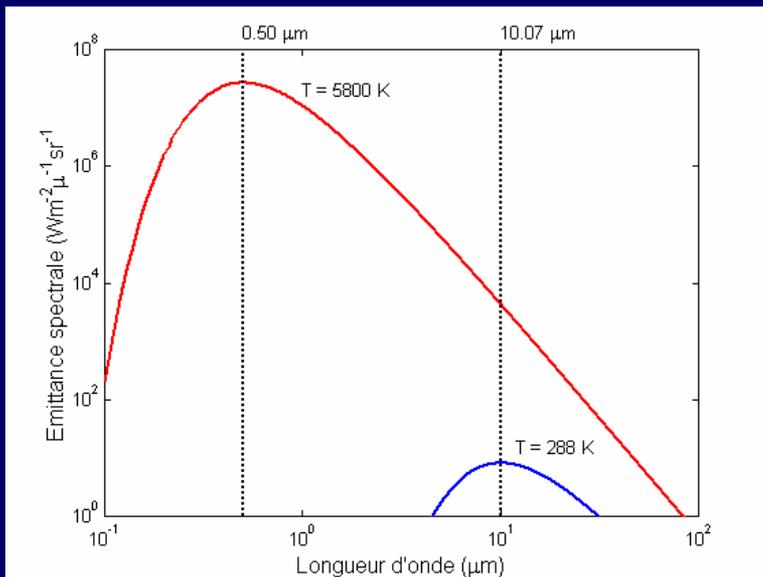
λ = longueur d'onde (en m)

T = température absolue (en K)

h = constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34} \text{ W s}^2$)

c = vitesse de la lumière dans le vide ($2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)

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



⇒ Loi du déplacement de Wien

$$\lambda_{\text{max}} \times T = \text{cte}$$

⇒ Loi de Stefan-Boltzman

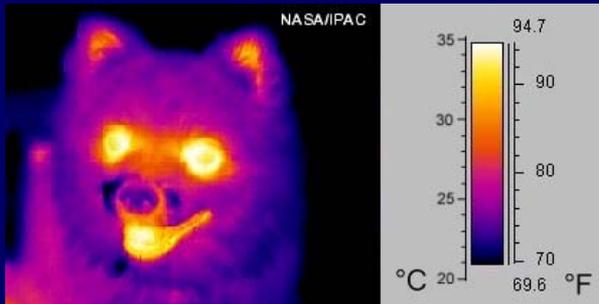
$$M(T) = \sigma T^4$$



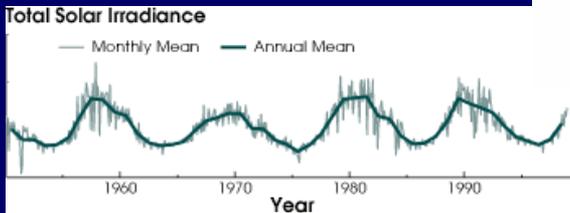
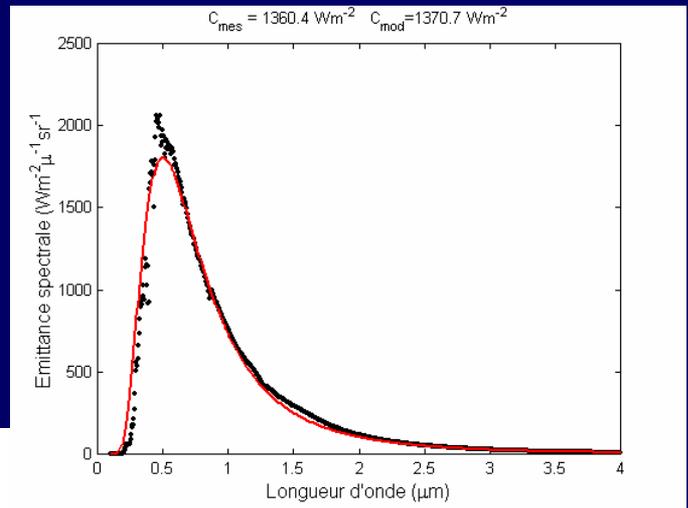
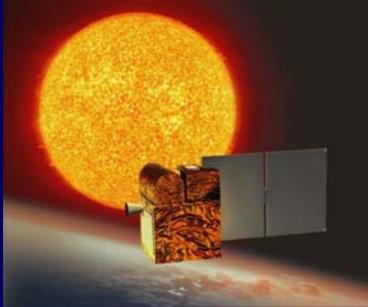
Torche oxyacétylène : 3200 K



Lave en fusion : 1000 K



II.4. La constante solaire



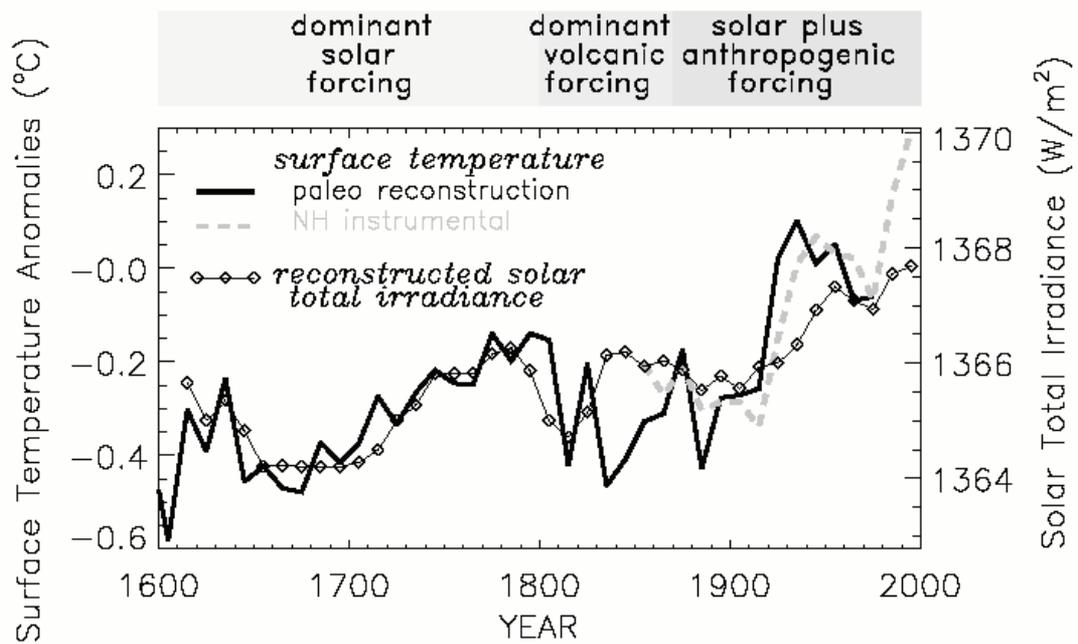
$$C_0 = \sigma T_s^4 \frac{\alpha^2}{4}$$

C_0 = constante solaire (en W m^{-2})

σ = constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

T = température absolue (en K)

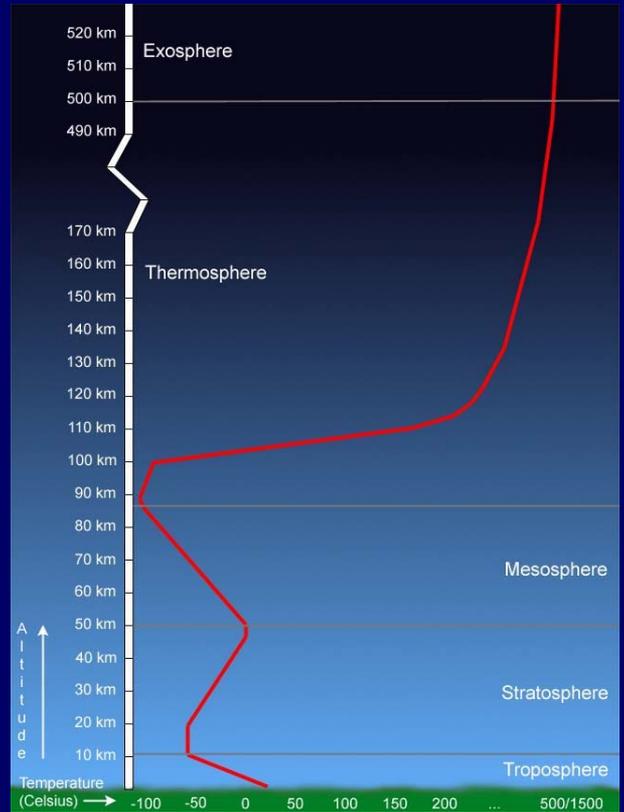
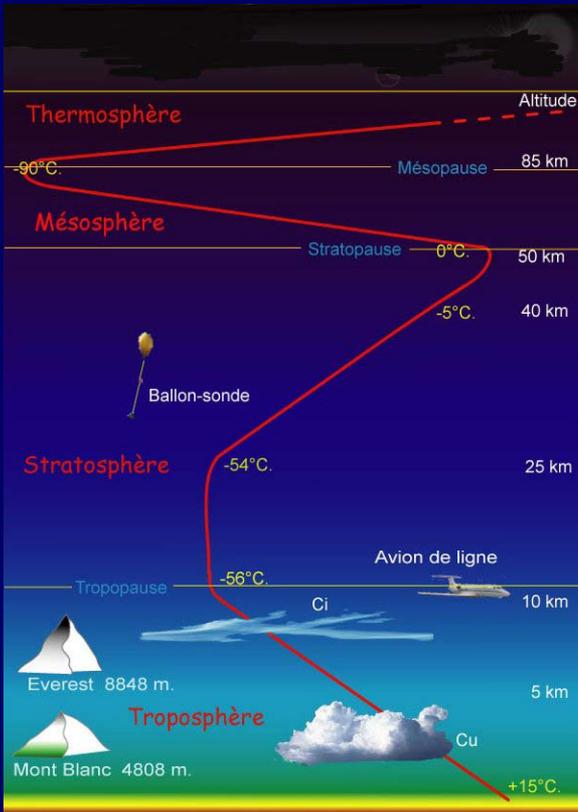
α = diamètre apparent du soleil (en rad)

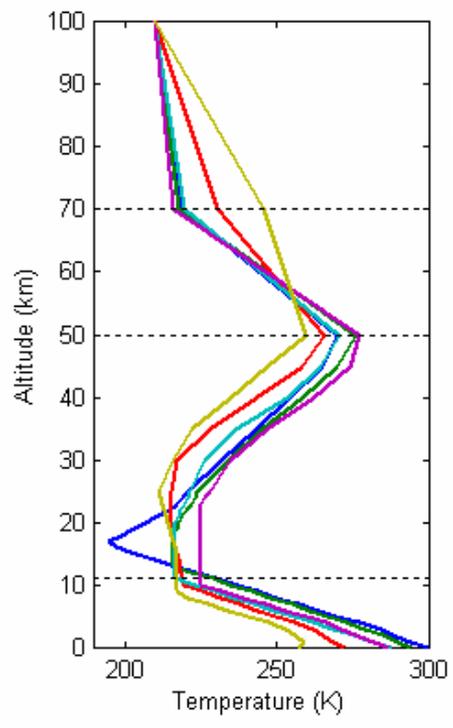
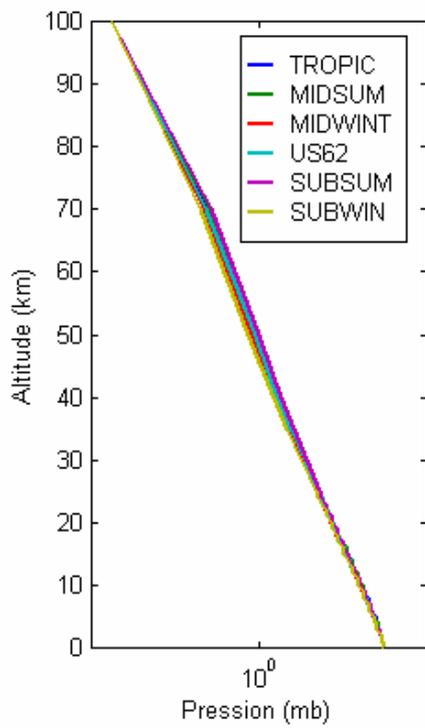


Comparaison entre la constante solaire (*reconstructed solar total irradiance*) et les anomalies de température estimées à partir de mesures des cernes des arbres (*paleo reconstruction*) et/ou d'instruments sur l'hémisphère nord (*NH instrumental*). Plusieurs éruptions volcaniques d'ampleur ont eu lieu en 1815 (Tambora, Indonésie), en 1831 (Babuyan, Philippines), 1835 (Cosiguina, Nicaragua) et en 1883 (Krakatoa, Indonésie).

III. Le système Terre-atmosphère

III.1. L'atmosphère terrestre





thermosphère

mésosphère

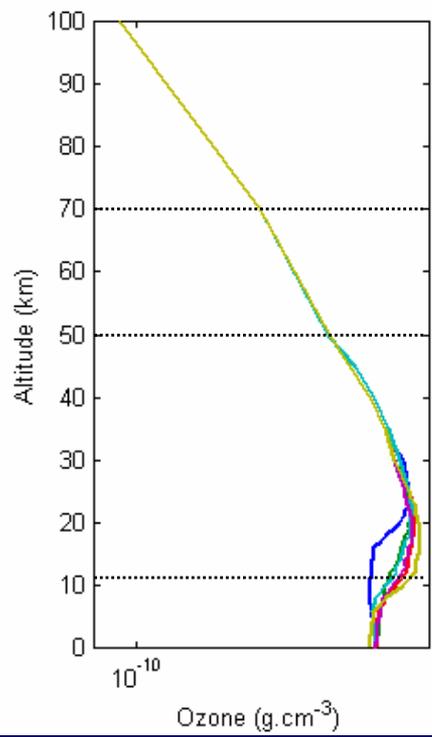
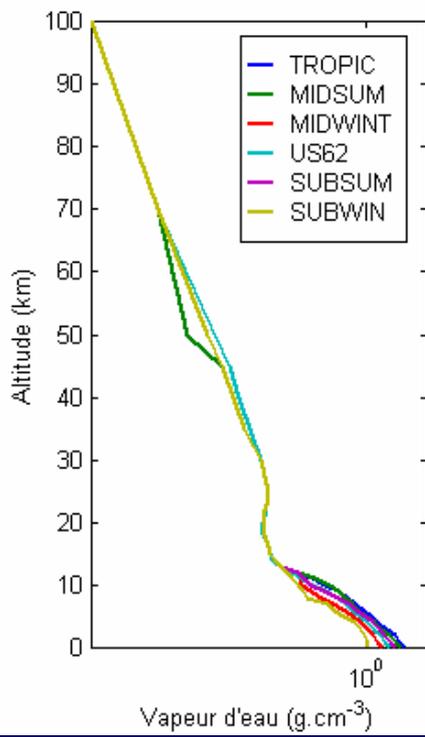
stratosphère

troposphère

Composition gazeuse

	Gaz	% vol.	M (g mol⁻¹)
gaz principaux	azote N ₂	78,1	28
	oxygène O ₂	20,1	32
	vapeur d'eau H ₂ O	0,1–1,0	18
	argon Ar	0,934	40
	dioxyde de carbone CO ₂	0,035	44
gaz trace	néon Ne	$1,8 \times 10^{-3}$	20
	hélium He	$5,2 \times 10^{-4}$	4
	méthane CH ₄	$1,6 \times 10^{-4}$	16
	krypton Kr	$1,0 \times 10^{-4}$	84
	hydrogène H ₂	$5,0 \times 10^{-5}$	2
	oxyde nitreux N ₂ O	$3,0 \times 10^{-5}$	46
	monoxyde de carbone CO	$1,0 \times 10^{-5}$	28
	dioxyde de soufre SO ₂	$< 1,0 \times 10^{-5}$	64
	ozone O ₃	$< 1,0 \times 10^{-5}$	48
	xénon Xe	$9,0 \times 10^{-6}$	131
air sec	100,00	28.964	

H = 1 ; C = 12 ; N = 14 ; O = 16 ; S = 32

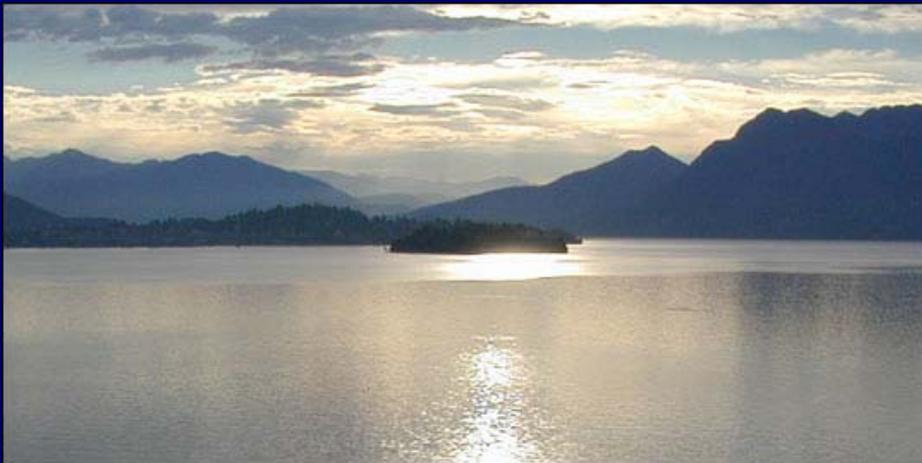


thermosphère

mésosphère

stratosphère

troposphère



<http://earthobservatory.nasa.gov/Laboratory/>

Différents types d'aérosols



Soot

$75\% \text{H}_2\text{SO}_4$



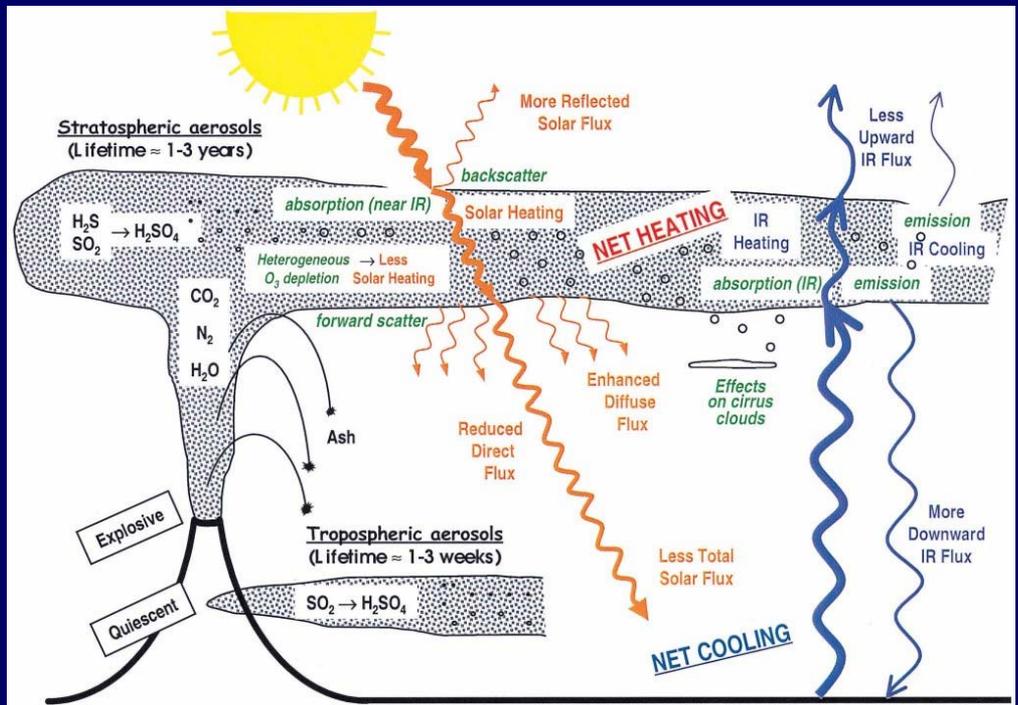
Water soluble



Dust-like



Oceanic



http://science.nasa.gov/headlines/y2006/03oct_novarupta.htm

Souvent des nuages

de 0 à 2 km d'altitude



extension verticale



de 2 à 6 km d'altitude



de 5 à 13 km d'altitude



Nuages + aérosols

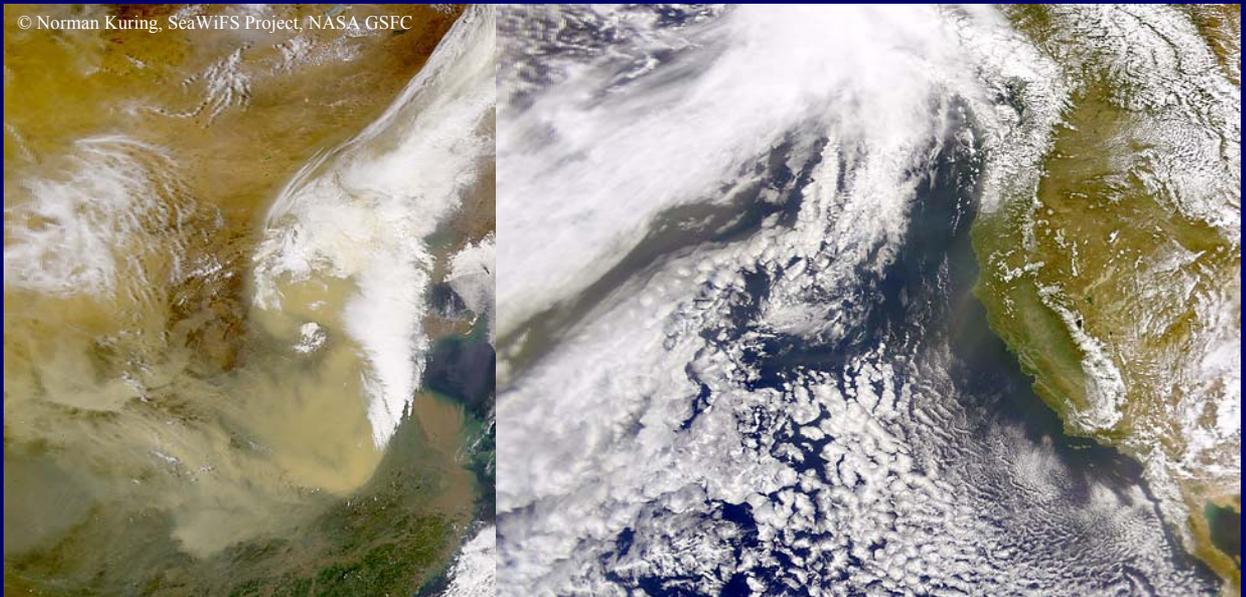
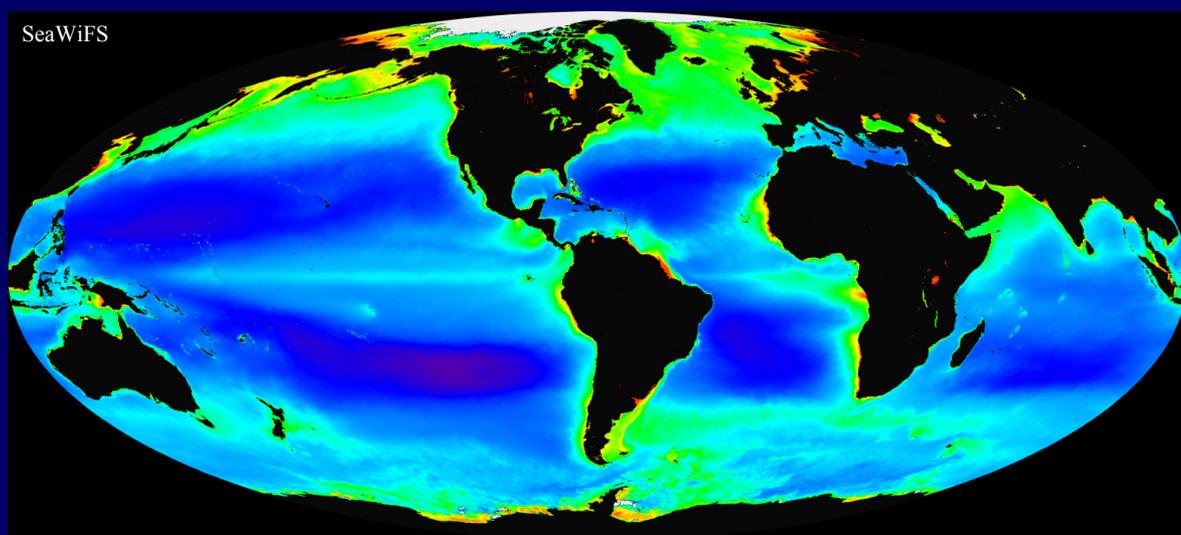


Image du satellite SeaWiFS acquise le 16 avril 1998 montrant le développement d'une large tempête de sable en Chine et ses interactions avec le système météorologique qui transporte la poussière vers l'Océan Pacifique

Image du satellite SeaWiFS acquise le 25 avril 1998 montrant l'arrivée du nuage de poussières sur la côte ouest des Etats Unis

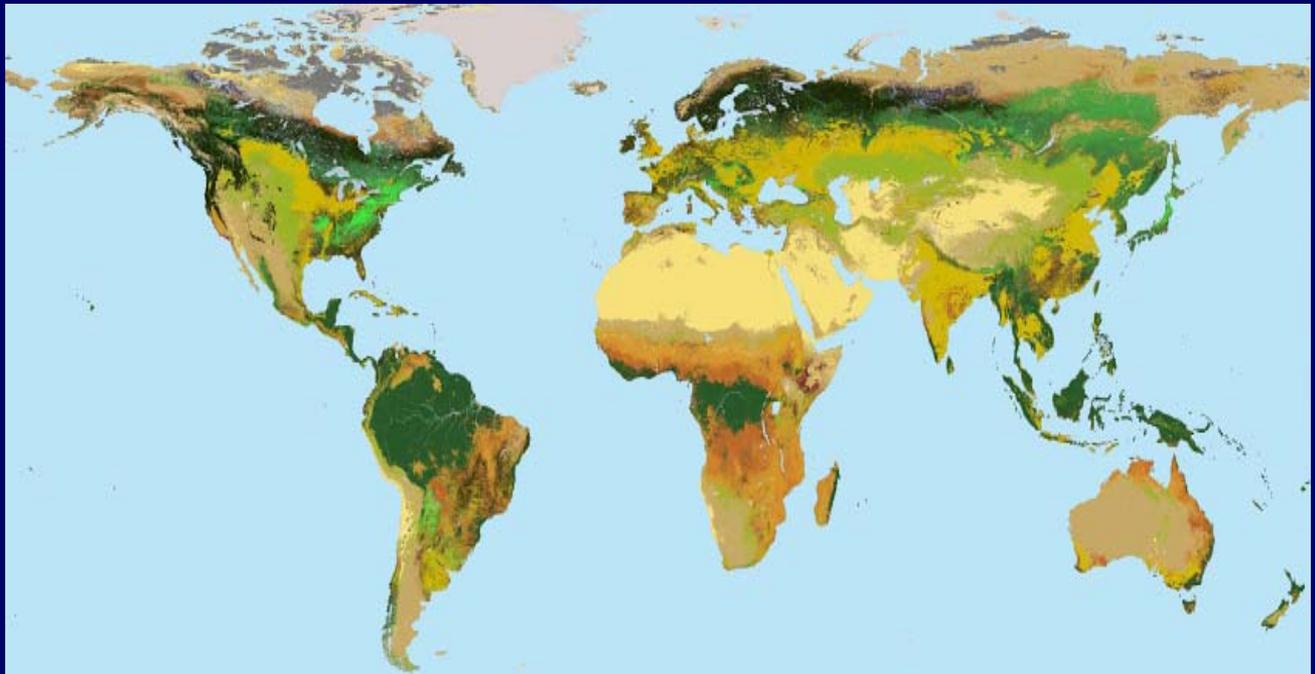
III.2. Les surfaces terrestres

A l'échelle globale, les océans couvrent ~ 70% de la surface de la Terre



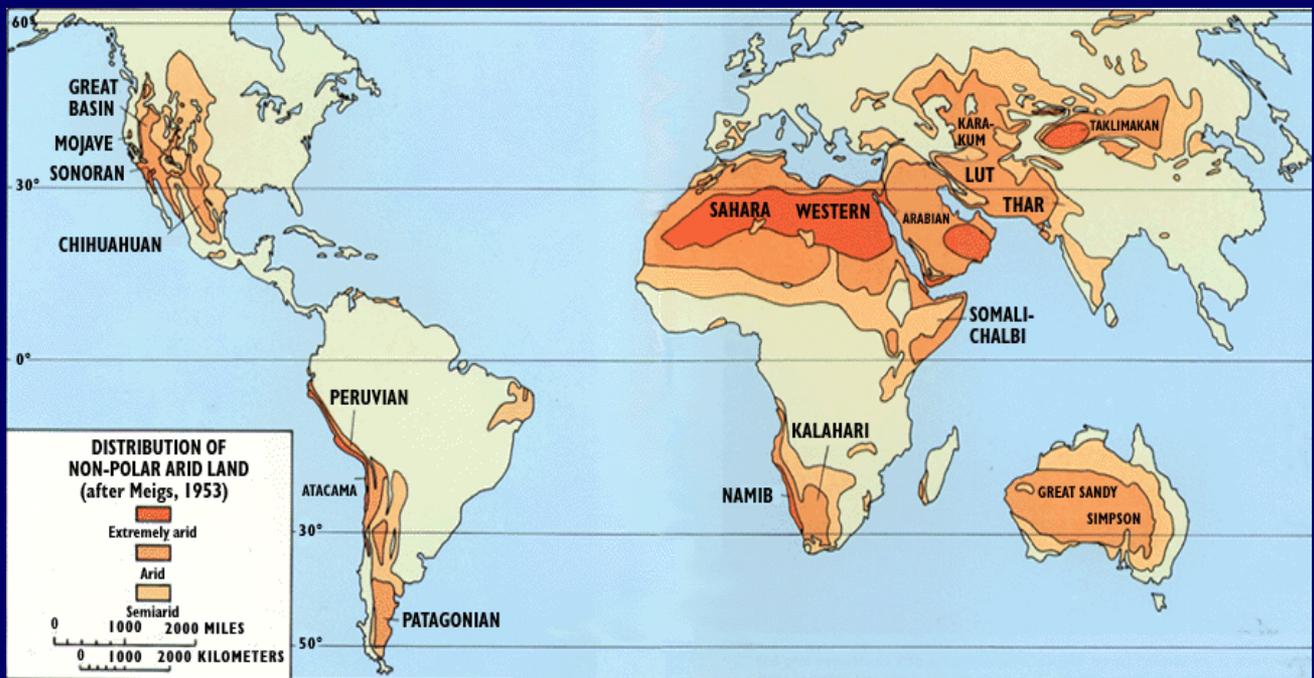
Source : Cyril Moulin (LSCE-IPSL)

A l'échelle globale, les continents couvrent environ **30%** de la surface de la Terre et la végétation couvre environ **65%** des continents (forêts 24%, prairies et toundra 15%, savanes 15%, cultures 11%)



0 Water	6 Closed Shrublands	12 Croplands
1 Evergreen Needleleaf Forest	7 Open Shrublands	13 Urban and Built-Up
2 Evergreen Broadleaf Forest	8 Woody Savannas	14 Cropland/Natural Veg. Mosaic
3 Deciduous Needleleaf Forest	9 Savannas	15 Snow and Ice
4 Deciduous Broadleaf Forest	10 Grasslands	16 Barren or Sparsely Vegetated
5 Mixed Forests	11 Permanent Wetlands	17 Tundra

© NASA GSFC



P. Meigs, 1953, *World distribution of arid and semi-arid homoclimates*. In: *Reviews of research on arid zone hydrology*, pp. 203-209. Paris, United Nations Educational, Scientific, and Cultural Organization, Arid Zone Programme-1.

IV. Interactions onde / matière

TRAITÉ
D'OPTIQUE

SUR

LES RÉFLEXIONS, REFRACTIONS,
INFLEXIONS, ET LES COULEURS,

DE

LA LUMIÈRE.

Par Monsieur LE CHEVALIER NEWTON.

*Traduit par M. COSTE, sur la seconde Edition Angloise,
augmentée par l'Auteur.*

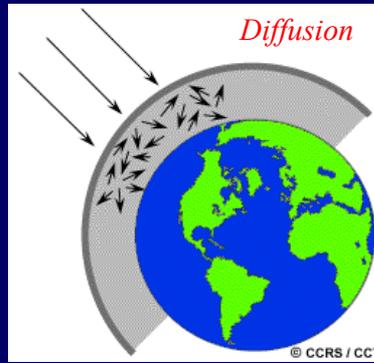
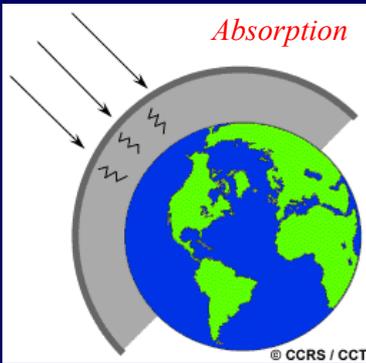
SÉCONDE ÉDITION FRANÇOISE,
beaucoup plus correcte que la première.



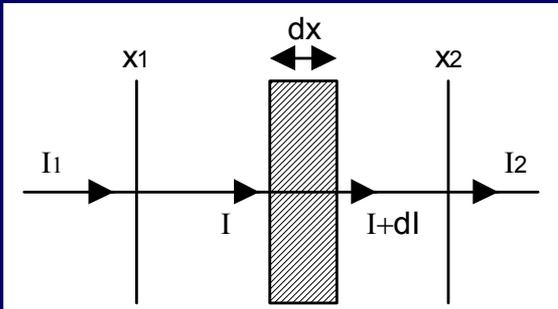
A PARIS,
Chez MONTALANT, Quay des Augustins, du côté
du Pont saint Michel.

M. DCC. XXII.

Interaction du REM avec un milieu diffusant



extinction = absorption + diffusion



σ_e = coefficient d'extinction du milieu (en m^{-1})

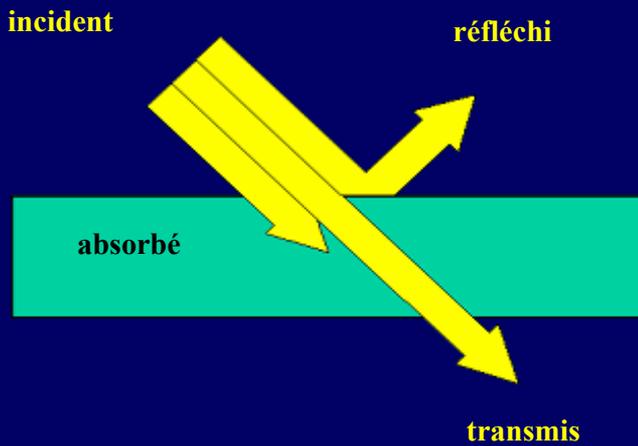
$$dI(\lambda) = -\sigma_e(\lambda, x)I(\lambda)dx$$

$$\Rightarrow I_2(\lambda) = I_1(\lambda) \exp\left(-\int_{x1}^{x2} \sigma_e(\lambda, x)dx\right)$$

transmittance du milieu : $T(\lambda) = \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)}$

épaisseur optique du milieu : $\tau(\lambda) = -\ln T(\lambda) = -\ln \frac{I_2(\lambda)}{I_1(\lambda)} = \int_{x1}^{x2} \sigma_e(\lambda, x)dx$

Interaction du REM avec un milieu non diffusant



Facteur de réflexion ρ
ou réflectance

$$R(\lambda) = \frac{E_{\text{réfléchi}}(\lambda)}{E_{\text{incidente}}(\lambda)}$$

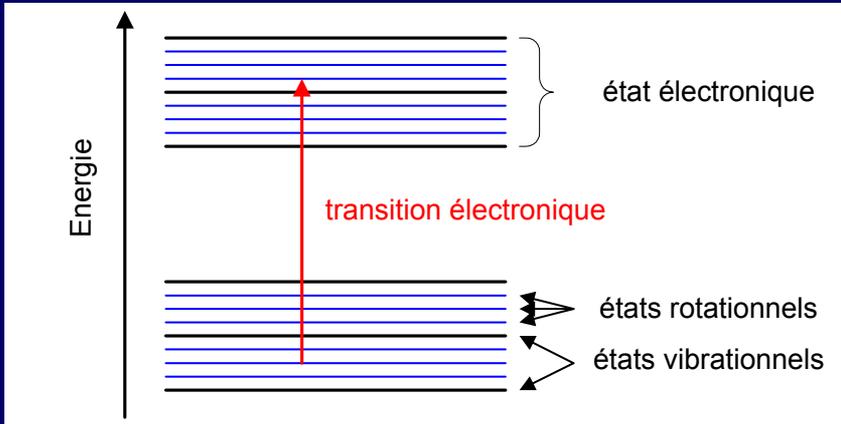
Facteur de transmission τ
ou transmittance

$$T(\lambda) = \frac{E_{\text{transmise}}(\lambda)}{E_{\text{incidente}}(\lambda)}$$

Facteur d'absorption α
ou absorptance

$$A(\lambda) = \frac{E_{\text{absorbée}}(\lambda)}{E_{\text{incidente}}(\lambda)}$$

IV.1. Absorption du REM



Les molécules possèdent :

- une énergie électronique E_e
- une énergie de vibration E_v
- une énergie de rotation E_r

$$E_t = E_e + E_v + E_r$$

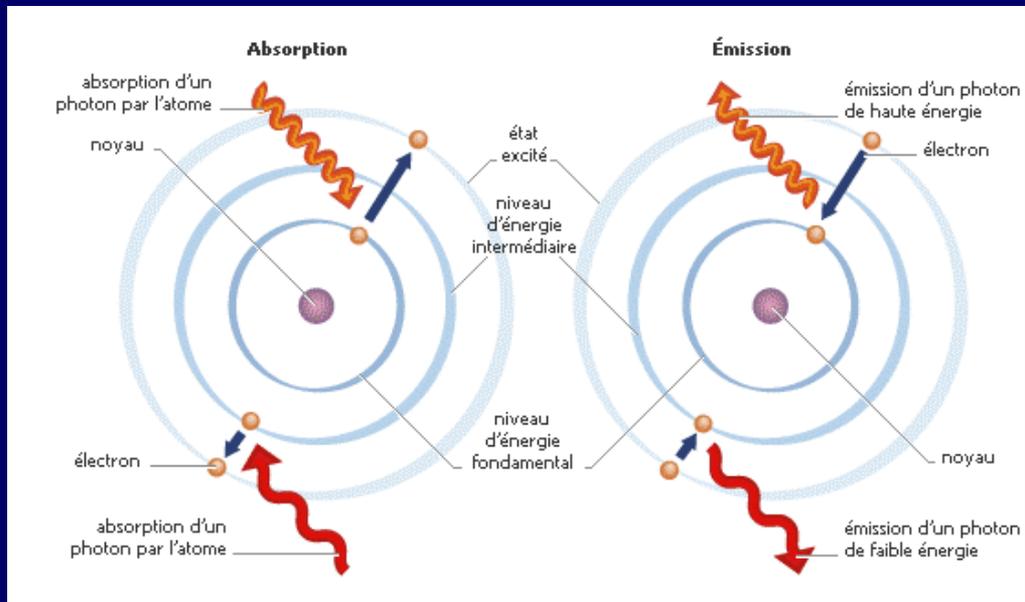
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

h = constante de Planck

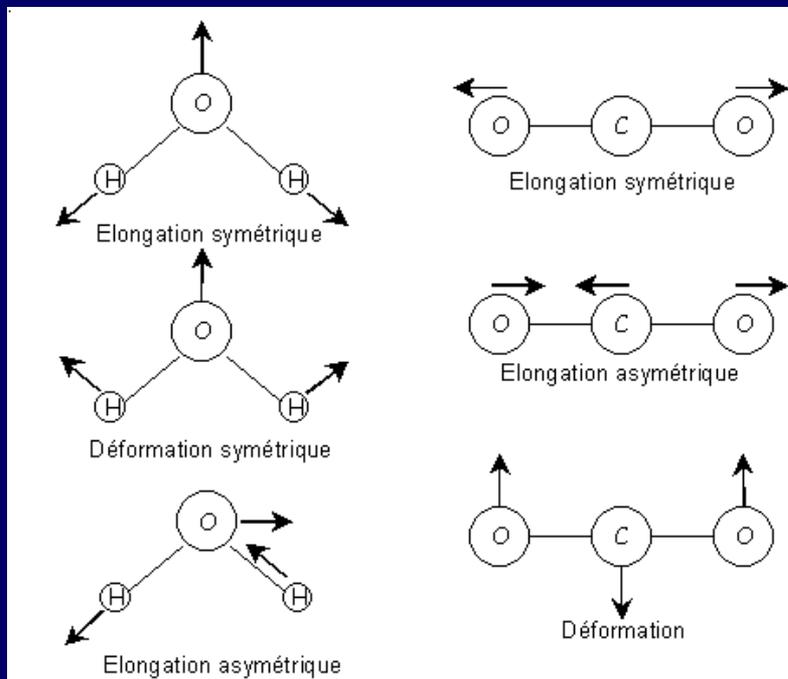
c = vitesse de la lumière dans le vide

Transition	ΔE (eV)	$\nu = \Delta E / h$ (Hz)	$\lambda = c / \nu$	Région spectrale
électronique	10	2.4×10^{15}	83,3 nm	ultraviolet et visible
vibrations	10^{-1}	2.4×10^{13}	8,33 μm	infrarouge moyen et thermique
rotations	10^{-3}	2.4×10^{11}	0,833 mm	micro-ondes

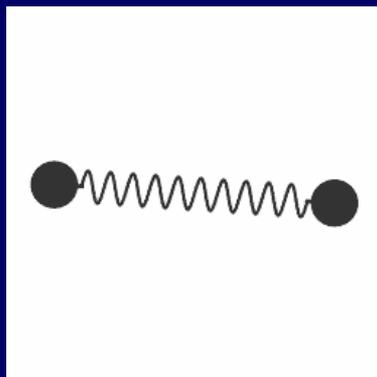
Energie électronique



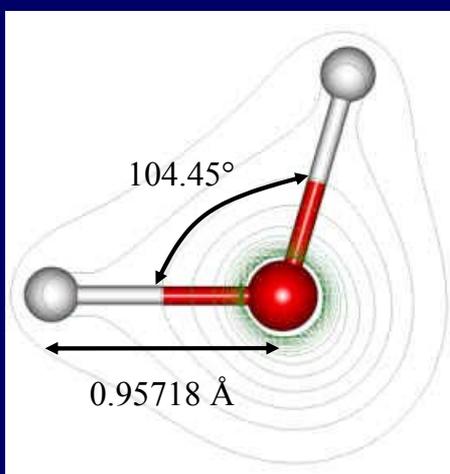
Energie de vibration



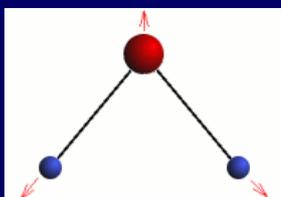
Energie de rotation



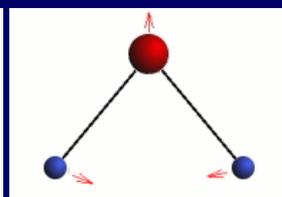
Exemple : la molécule d'eau



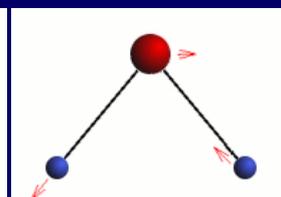
L'eau possède trois degrés de liberté vibrationnels



Etirement
symétrique ν_1

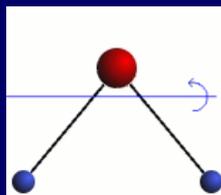


Piage ν_2

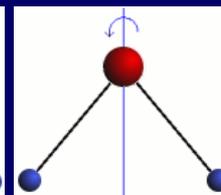


Etirement
asymétrique ν_3

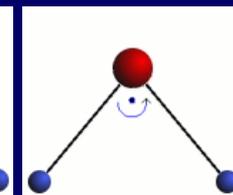
L'eau possède trois degrés de liberté rotationnels



Rotation A



Rotation B



Rotation C

Transition	a+b	Etat liquide	Etat gazeux
a v1 +b v3	a+b=6	0.514 μm	
a v1 +b v3	a+b=5	0.606 μm	
a v1 + v2 + b v3	a+b=4	0.660 μm	
a v1 +b v3	a+b=4	0.739 μm	
a v1 + v2 + b v3	a+b=3	0.836 μm	
a v1 +b v3	a+b=3	0.970 μm	1.004 μm
a v1 + v2 + b v3	a+b=2	1.200 μm	1.272 μm
a v1 +b v3	a+b=2	1.470 μm	1.536 μm
a v1 + v2 + b v3	a+b=1	1.940 μm	1.990 μm
v3 étirement asymétrique		2.870 μm	2.900 μm
v1 étirement symétrique		3.050 μm	
v2 liaison		6.080 μm	6.270 μm
L2 rotations		15.000 μm	
L1 rotations		25.000 μm	

Absorption par les gaz

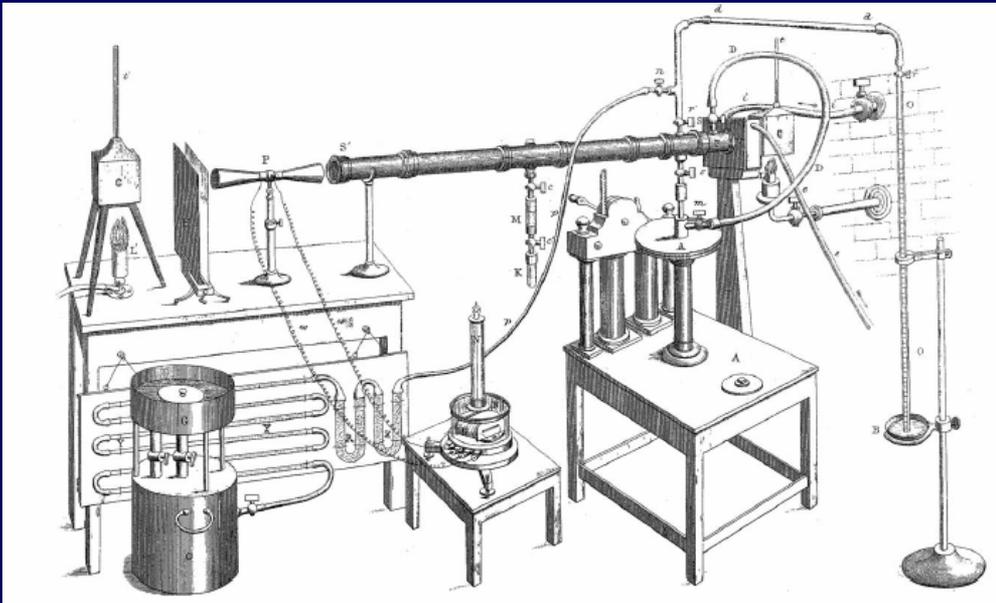
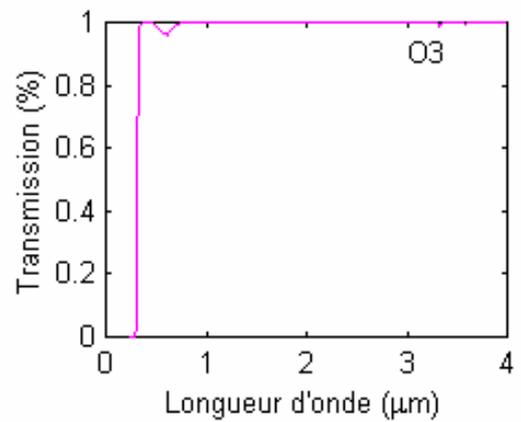
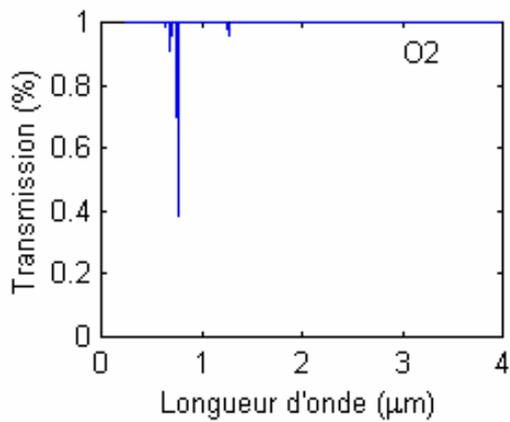
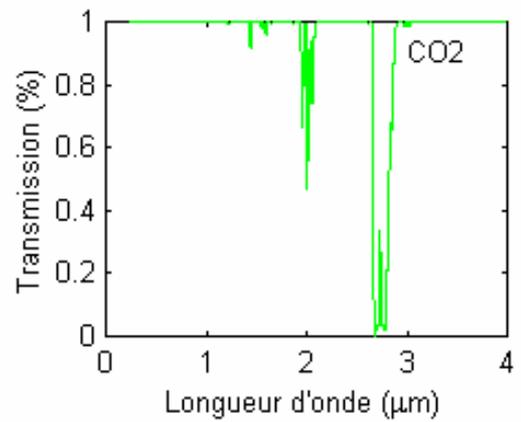
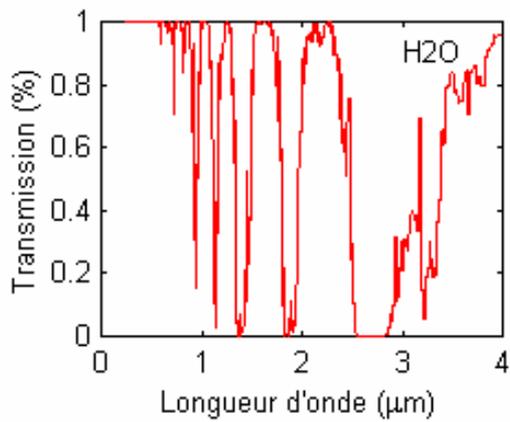
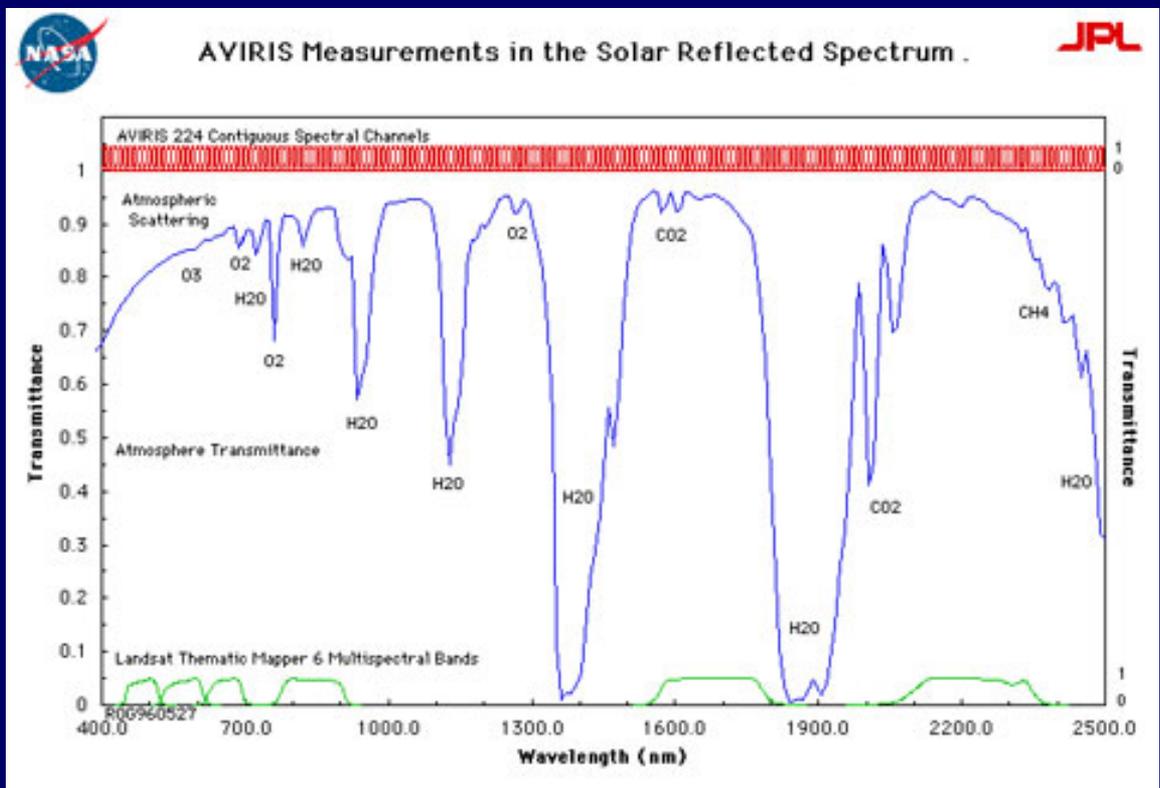


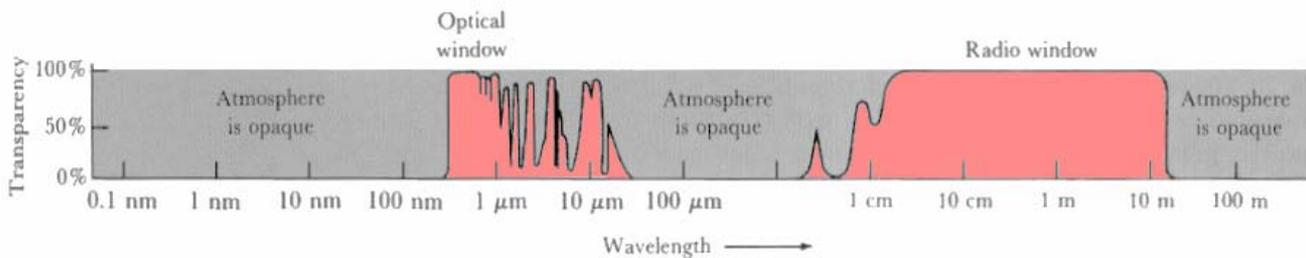
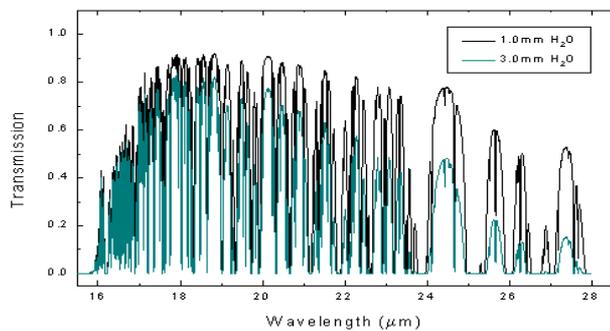
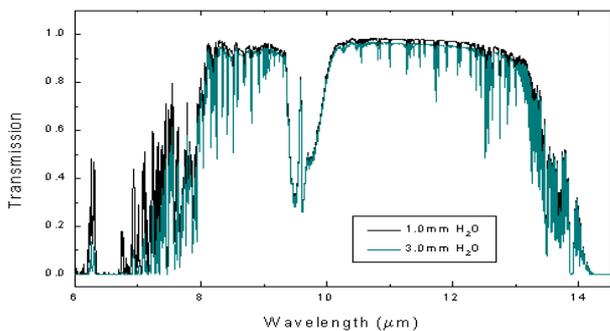
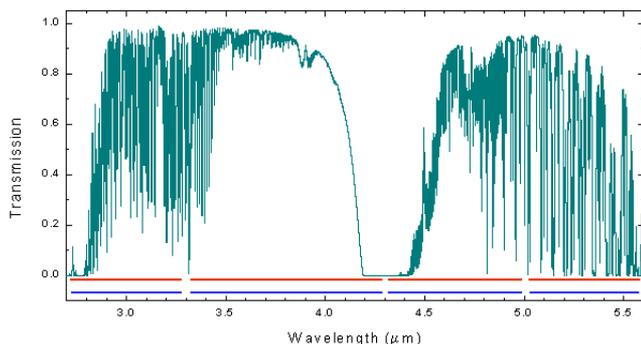
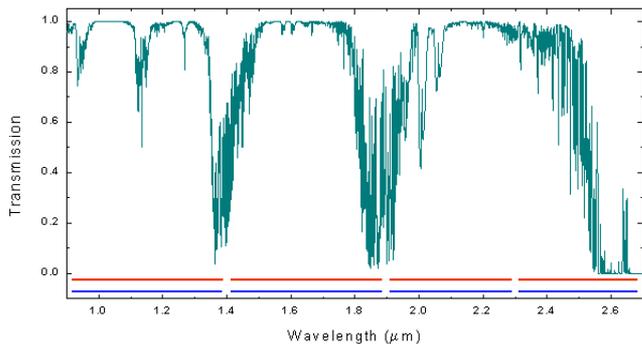
Fig. 8. Spectrophotomètre de John Tyndall [47]. L'appareil est constitué d'un long tube de cuivre pouvant être rempli de différents gaz. Les deux extrémités sont obturées par des tranches de sel gemme, matériau relativement transparent au rayonnement infrarouge. Un cube d'eau bouillante, servant de source de chaleur, est placé à l'avant du tube. Le rayonnement incident interagit avec la colonne de gaz, puis entre dans un réflecteur conique conduisant à une pile contenant des couples thermoélectriques Bi-Sb en série. L'émission d'une seconde source de chaleur réchauffe un écran avant d'entrer dans un second cône conduisant à la deuxième face de la thermopile. Celle-ci est connectée à un galvanomètre qui mesure le courant qui dépend de la différence de température des deux faces de la thermopile. Ce montage permet de comparer quantitativement l'intensité des deux rayonnements et de déduire l'effet d'absorption du gaz contenu dans le tube. Le dispositif est particulièrement sensible, car il permet de réaliser une compensation exacte des flux de chaleur incidente en translantant l'écran d'étain placé devant la seconde source de chaleur. Avec cet appareil, Tyndall analyse le pouvoir d'absorption de nombreux composés tels que la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'éthylène (*olefiant gas*), le méthane (*marsh gas*), l'oxyde d'éthyle (*sulphuric ether*), le chloroforme, les alcools méthylique et éthylique, les acides formique et acétique, le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac, le chlore, le brome, le protoxyde d'azote, les acides sulfurique et bromique, ou encore l'ozone.

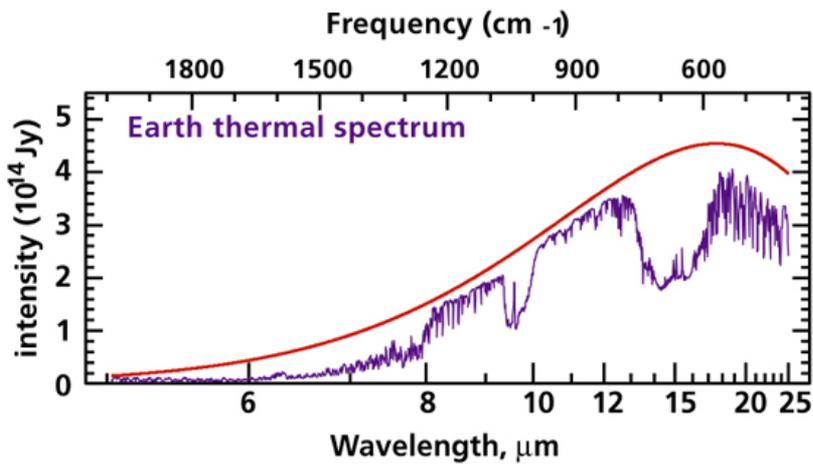
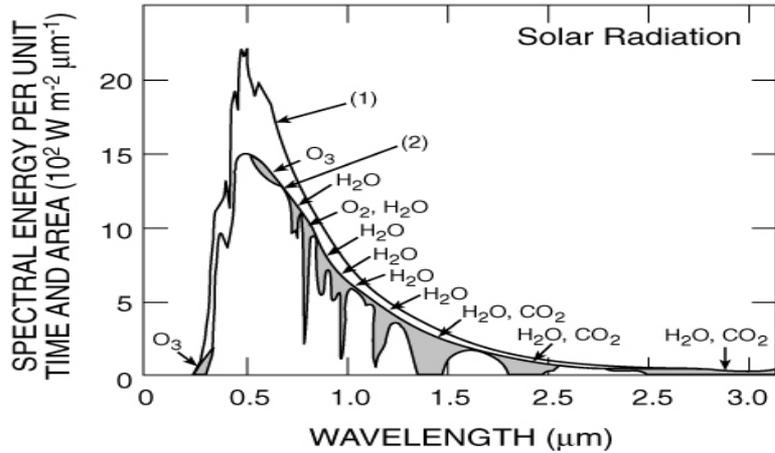


Notion de fenêtre atmosphérique

$$T_{\text{atm}}(\lambda) = T_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \times T_{\text{CO}_2}(\lambda) \times T_{\text{O}_2}(\lambda) \times T_{\text{O}_3}(\lambda) \times \dots$$







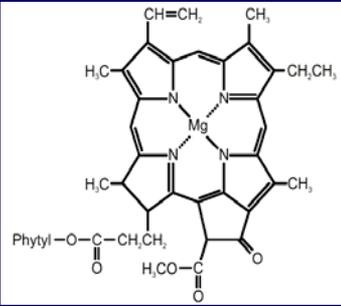
DIXIÈME PROPOSITION :

Problème V.

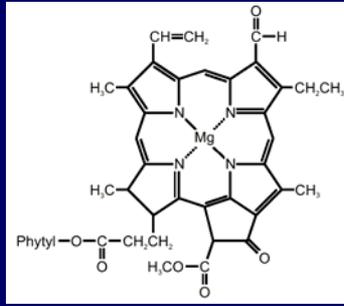
*Par les Propriétés de la Lumière déjà découvertes ,
expliquer les Couleurs permanentes
des Corps Naturels.*

CEs Couleurs proviennent de ce que parmi les Corps Naturels les uns réfléchissent certaines espèces de Rayons, les autres certaines autres espèces, en plus grande abondance qu'ils n'en réfléchissent aucune autre. La Mine de Plomb réfléchit en plus grande abondance les Rayons les moins refrangibles, ou producteurs du Rouge; & par cela même elle paroît rouge. Les *Violettes* réfléchissent en plus grande abondance les Rayons les plus refrangibles; & c'est de-là que vient leur couleur.

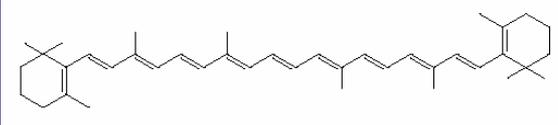
Propriétés optiques des surfaces terrestres : les pigments



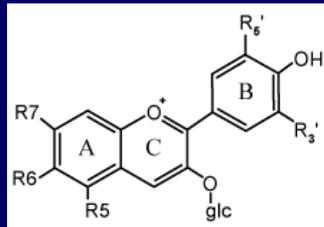
chlorophylle *a*



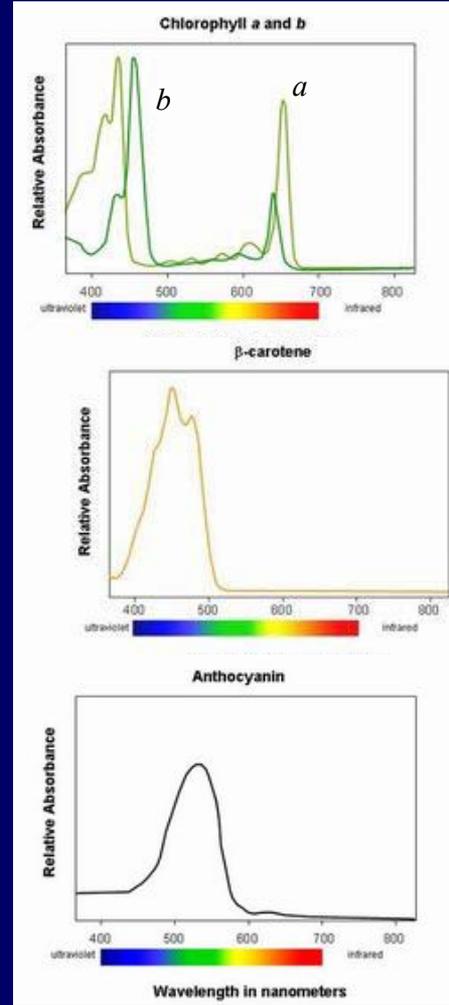
chlorophylle *b*



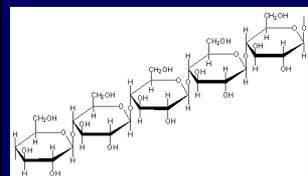
β -carotène



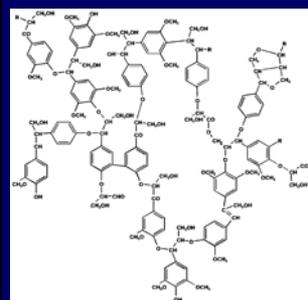
anthocyane + glucose



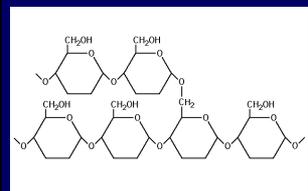
Propriétés optiques des surfaces terrestres : la matière sèche



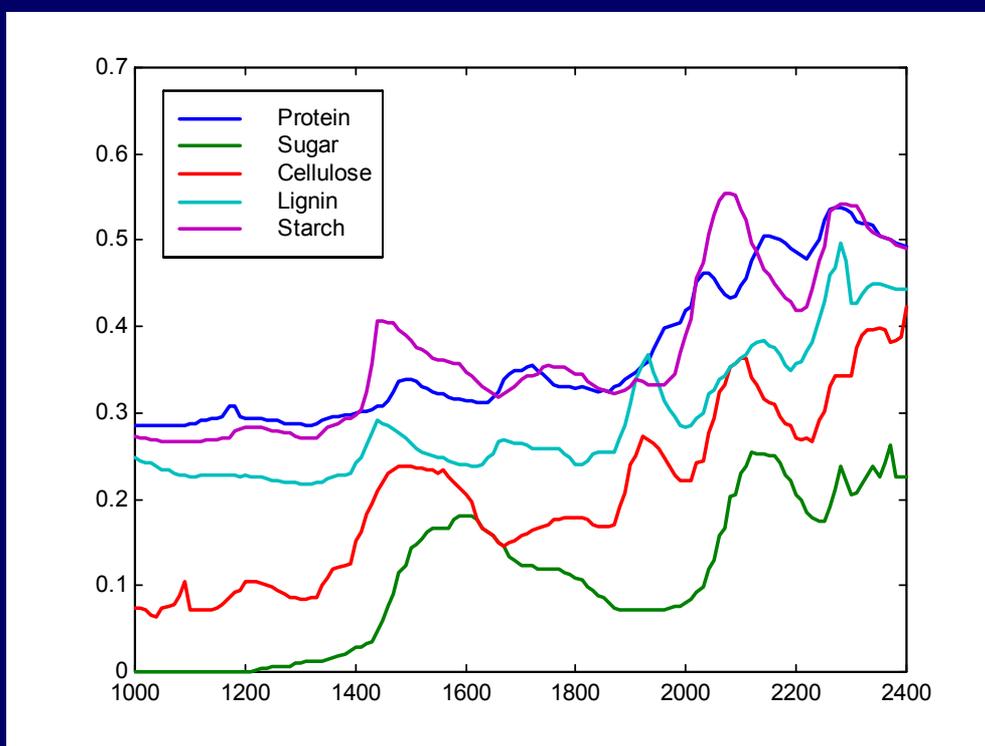
cellulose



lignine

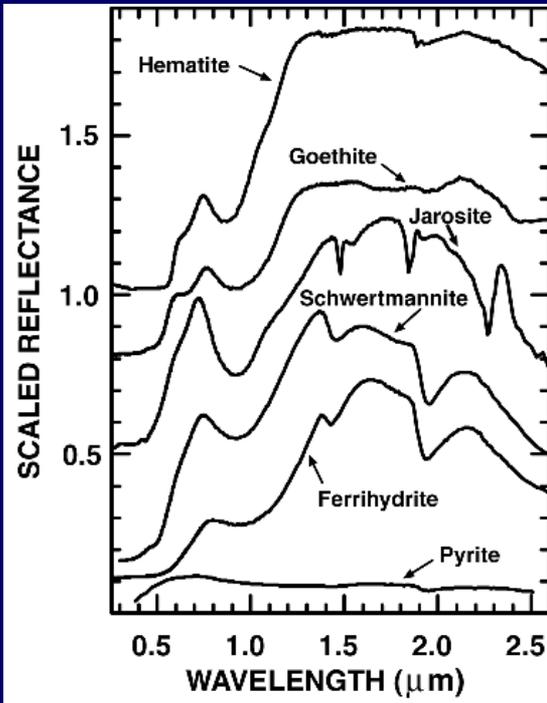


amidon



C.A. Wessman, 1990, Evaluation of canopy biochemistry, in *Remote Sensing of Biosphere Functioning* (R.J. Hobbs & H.A. Mooney, eds), Springer-Verlag, New York, pp. 135-156.

Exemple : les minéraux



Hématite : $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow$ oxide

Goethite : $\text{Fe}^{3+}\text{O}(\text{OH}) \rightarrow$ hydroxide

Jarosite : $\text{K Fe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \rightarrow$ sulfate

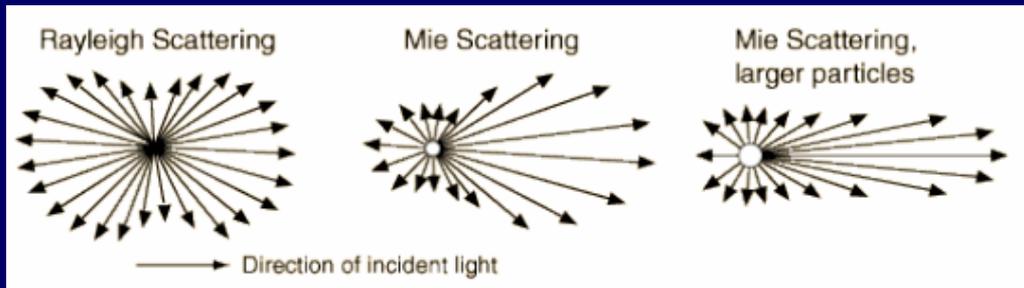
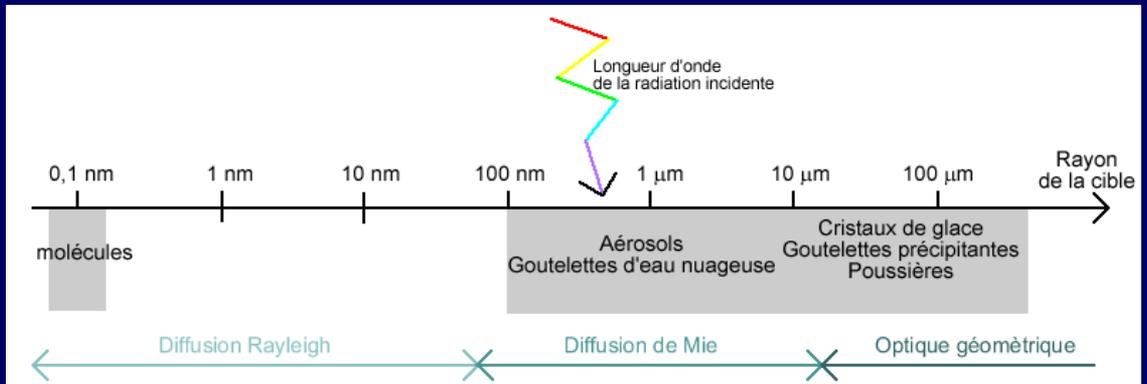
Schwertmannite : $\text{Fe}^{3+}_{16}\text{O}_{16}(\text{OH})_{12}(\text{SO}_4)_2$

Ferrihydrite : $\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O}) \rightarrow$ oxide

Pyrite : $\text{Fe S}_2 \rightarrow$ sulfide



IV.2. Diffusion du REM par une particule



Diffusion par les molécules gazeuses : diffusion de Rayleigh

$$\sigma_s(z) = \frac{8\pi^3}{3N_0\lambda^4} (n_0^2 - 1)^2 \frac{T_0 \times P(z)}{P_0 \times T(z)}$$

σ_s = coefficient de diffusion du milieu (en m^{-1})

N_0 = nombre de molécules par unité de volume (en m^{-3})

λ = longueur d'onde (en m)

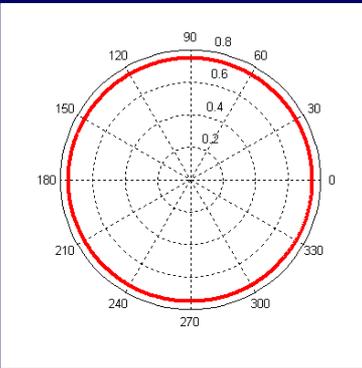
T = température absolue (en K)

P = pression (en Pa)

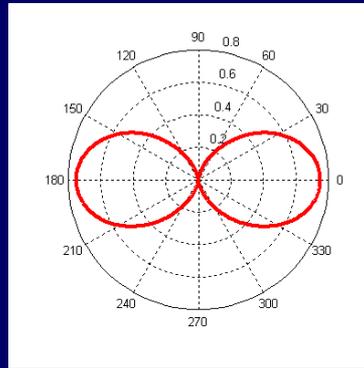
n_0 = indice de réfraction de l'air

L'épaisseur optique moléculaire $\tau_R(\lambda)$ est donnée par : $\tau_R(\lambda) = \int_0^\infty \sigma_s(\lambda, x) dx$

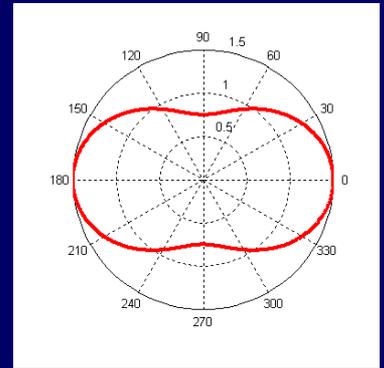
Et la fonction de phase des molécules gazeuses $P(\theta)$ par : $P(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta)$



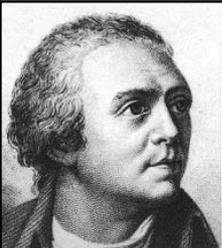
polarisation perpendiculaire



polarisation parallèle

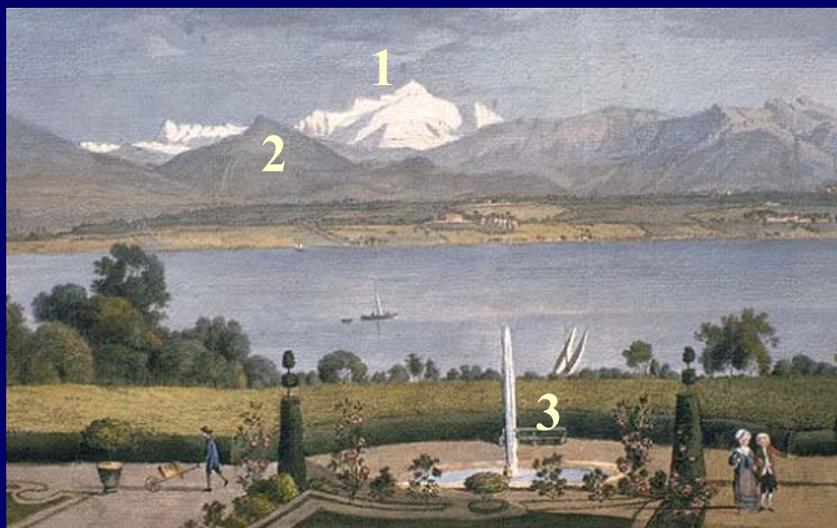
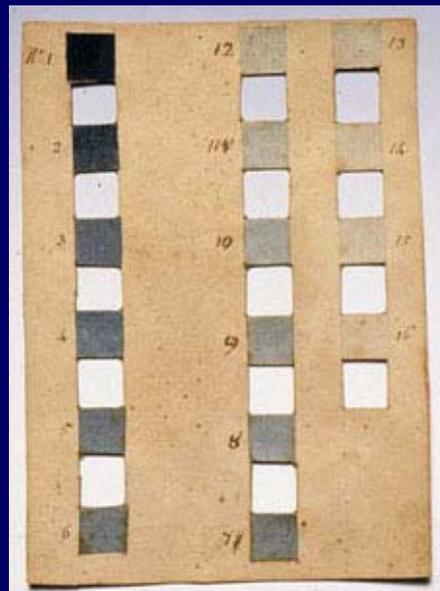


lumière naturelle



Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799)

Le cyanomètre : 16 niveaux de bleu

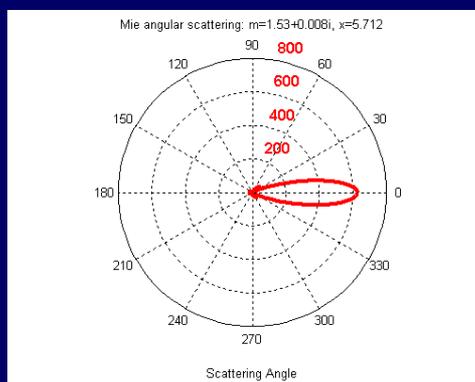


Expérience de 1787 :

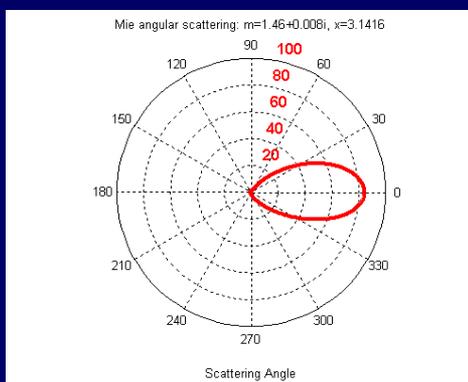
- (1) Mont Blanc = 1-2
- (2) Chamonix = 5-6
- (3) Genève = 7

Diffusion par les aérosols : diffusion de Mie

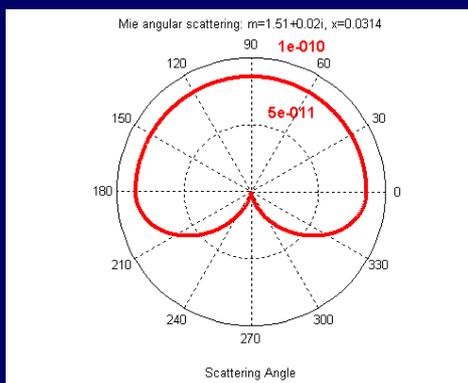
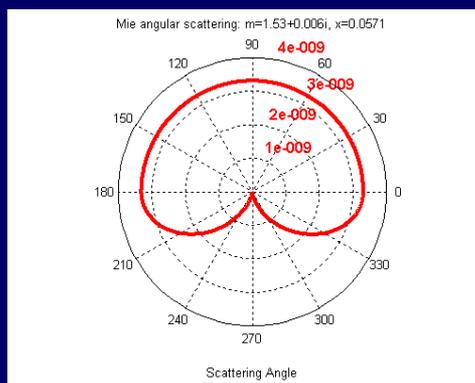
0.55 μm



1.30 μm

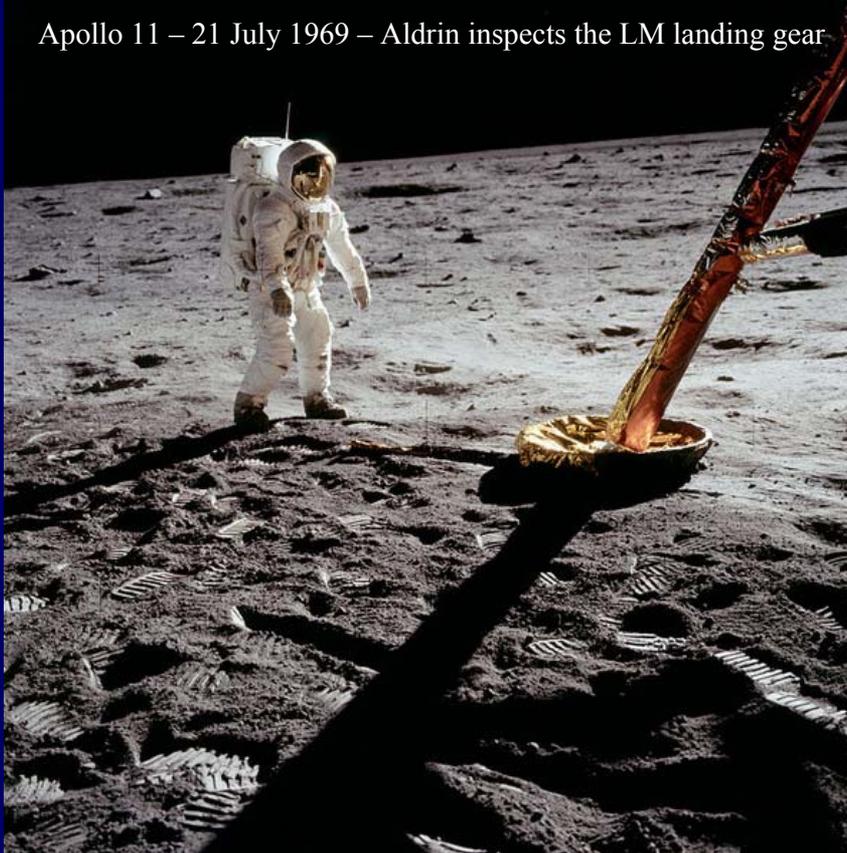


*Dust-like
 $r = 0.5 \mu\text{m}$*



*Water soluble
 $r = 0.005 \mu\text{m}$*

Apollo 11 – 21 July 1969 – Aldrin inspects the LM landing gear



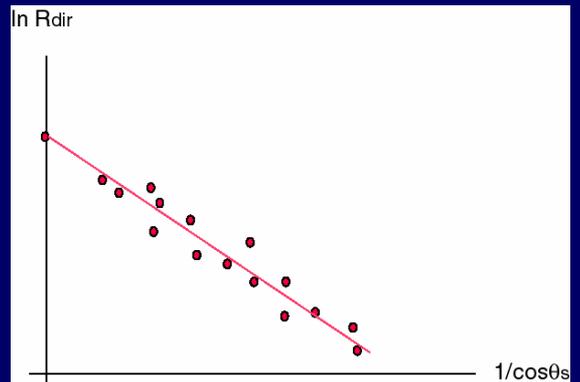
Conséquence : la loi de Langley-Bouguer



$$R_{dir}(\lambda) = E_0(\lambda) e^{-\frac{\tau(\lambda)}{\cos\theta_s}}$$

R_{dir} = rayonnement direct au niveau du sol (en W m^{-2})
 E_0 = irradiance solaire au delà de l'atmosphère (en W m^{-2})
 τ = épaisseur optique de l'atmosphère
= $\tau_{\text{gaz}} + \tau_{\text{Rayleigh}} + \tau_{\text{Mie}}$
 θ_s = angle zénithal solaire (en rad)

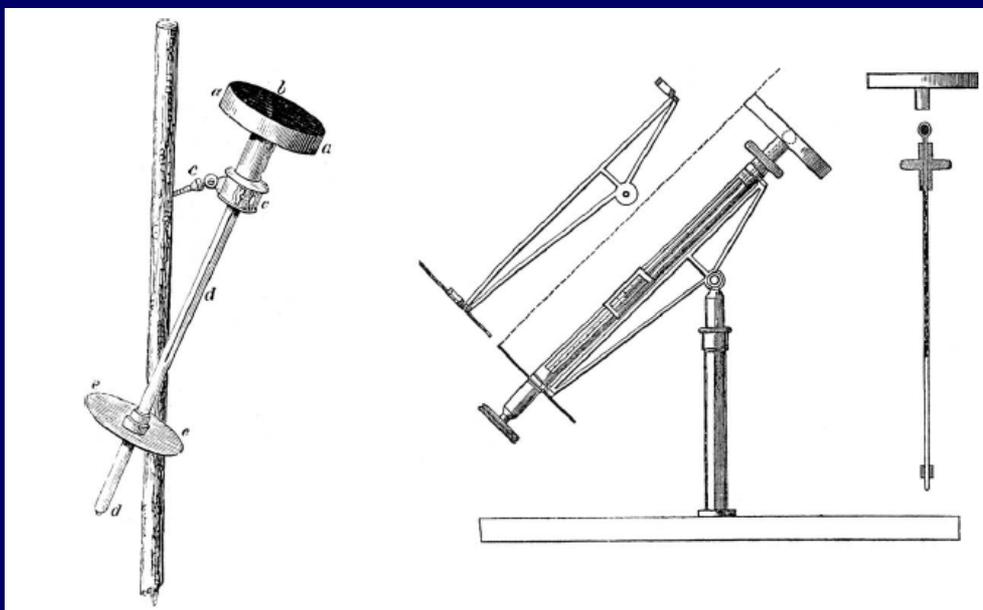
$$\ln R_{dir} = \ln E_0 - \tau \frac{1}{\cos\theta_s}$$





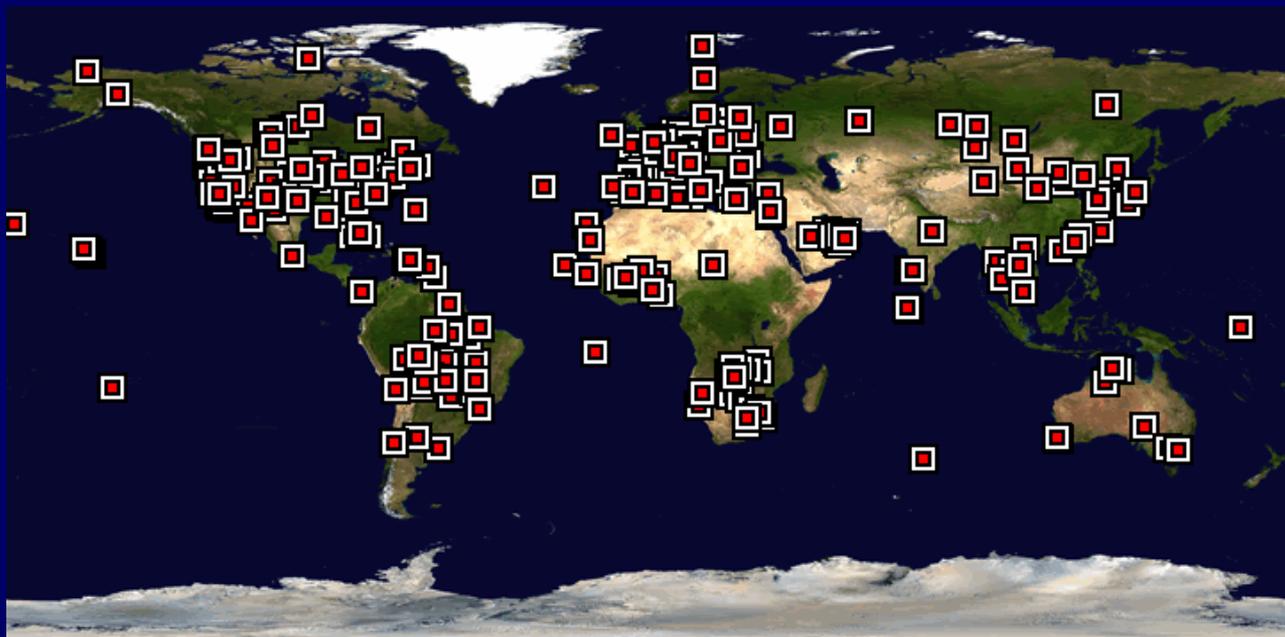
Claude Pouillet (1790-1868)

Pyrhéliomètre

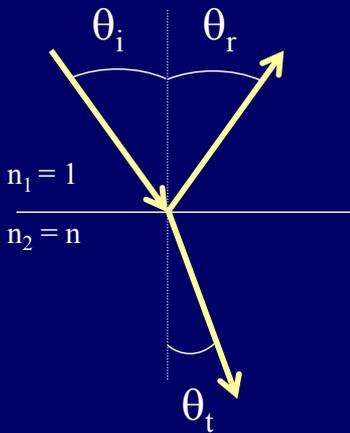


C. Pouillet (1838), Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique, et sur la température de l'espace, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 7:24–65.

Le réseau AERONET : les données de tous les sites de mesure sont envoyées toutes les heures au Wallops Receiving Center par transmission satellite (GOES, METEOSAT)



IV.3. Diffusion du REM par une surface



Loi de Snell-Descartes

DEFINITION III.

La Reflexibilité des Rayons, est leur disposition à être réfléchis ou renvoyés du Milieu, sur la surface duquel ils tombent, dans le Milieu d'où ils sont partis; & les Rayons sont plus ou moins reflexibles, selon qu'ils sont renvoyés avec plus ou moins de facilité.

AXIOME I.

LES Angles d'Incidence, de Reflexion & de Refraction sont dans un seul & même Plan.

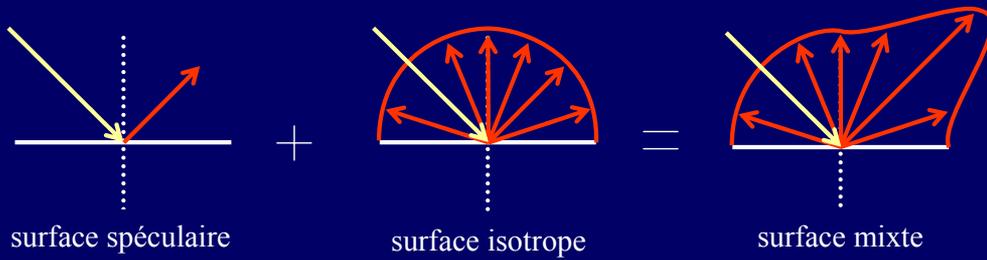
AXIOME II.

L'Angle de Reflexion est égal à l'Angle d'Incidence.

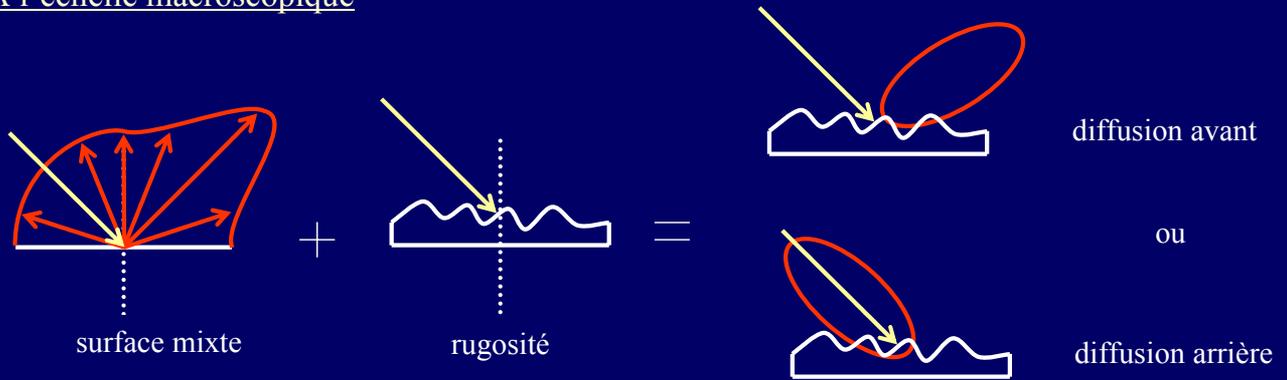
AXIOME IV.

Quand un Rayon passe d'un Milieu plus rare dans un Milieu plus dense, la Refraction se fait en approchant de la Perpendiculaire, de sorte que l'Angle de Refraction se trouve moindre que l'Angle d'Incidence.

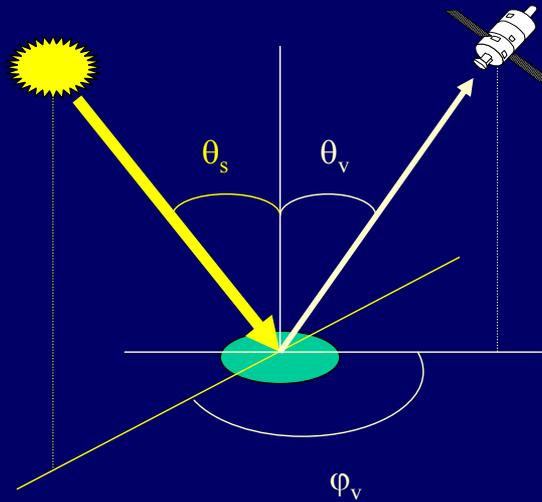
A l'échelle microscopique



A l'échelle macroscopique



Notion de réflectance spectrale et directionnelle



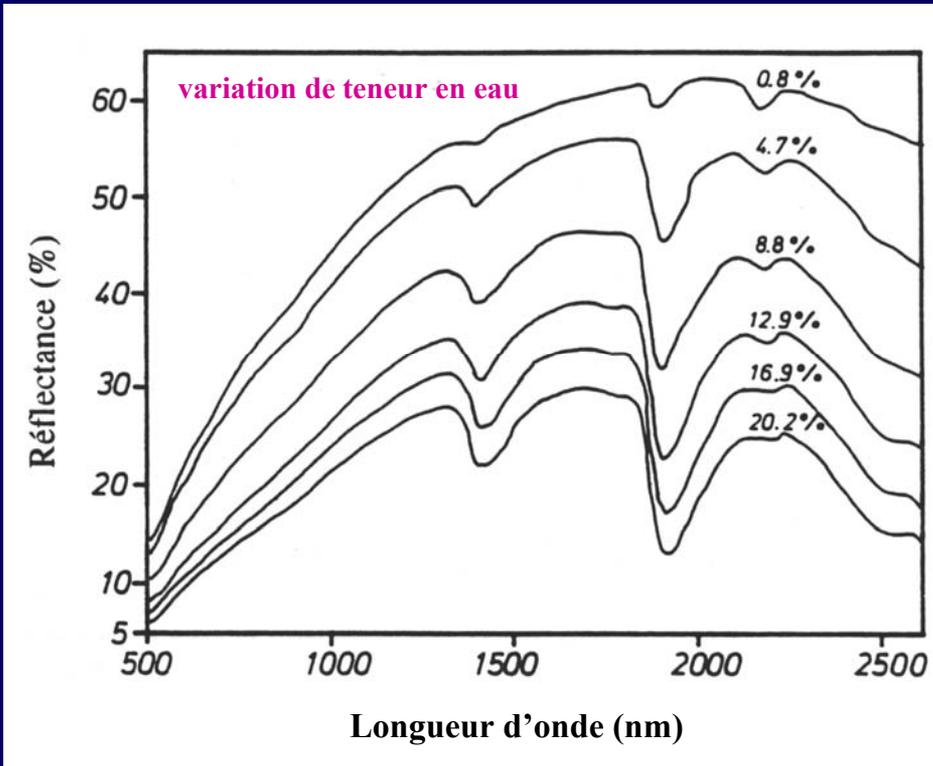
⇒ propriétés optiques directionnelles

θ_s = angle zénithal solaire ($0 < \theta_s < \pi/2$)
 θ_v = angle zénithal de visée ($0 < \theta_v < \pi/2$)
 φ_v = angle azimutal de visée relatif ($0 < \varphi_v < 2\pi$)

⇒ propriétés optiques spectrales

λ = longueur d'onde ($300 \text{ nm} < \lambda < 3000 \text{ nm}$)

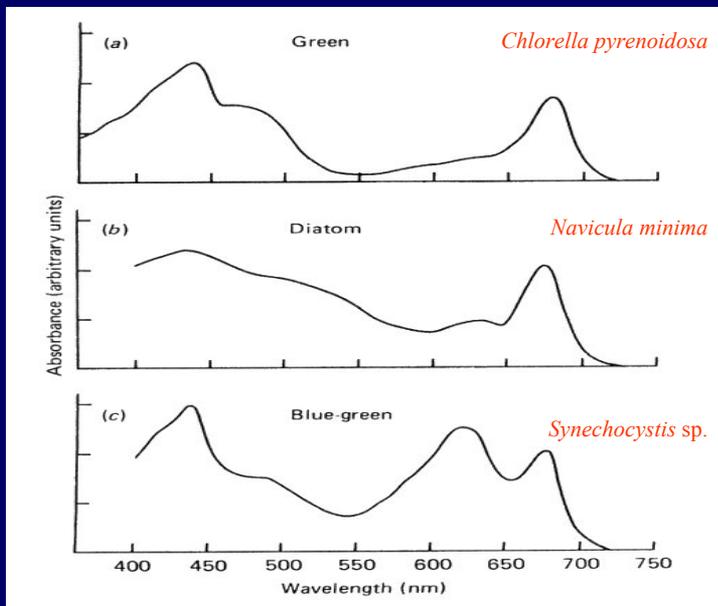
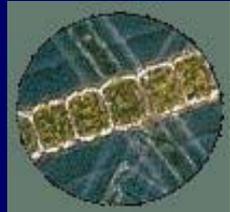
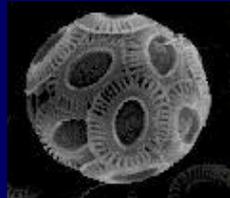
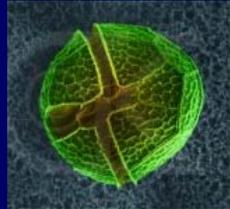
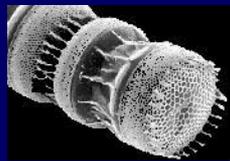
Propriétés optiques des surfaces terrestres : les sols



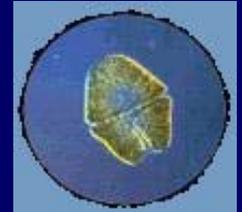
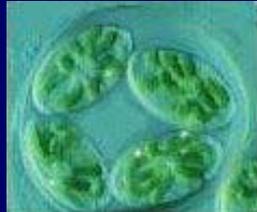
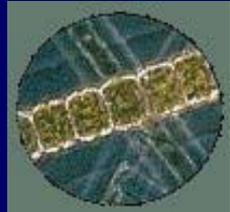
variation de couleur



Propriétés optiques des surfaces terrestres : le phytoplancton



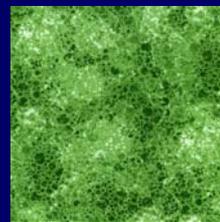
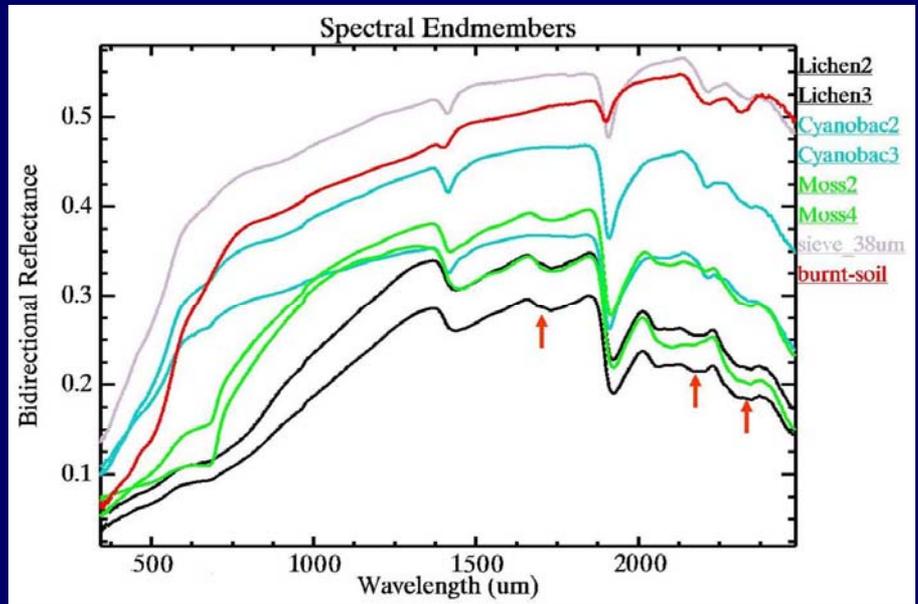
J.T.O. Kirk, 1994, *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge university Press, 509 pages.



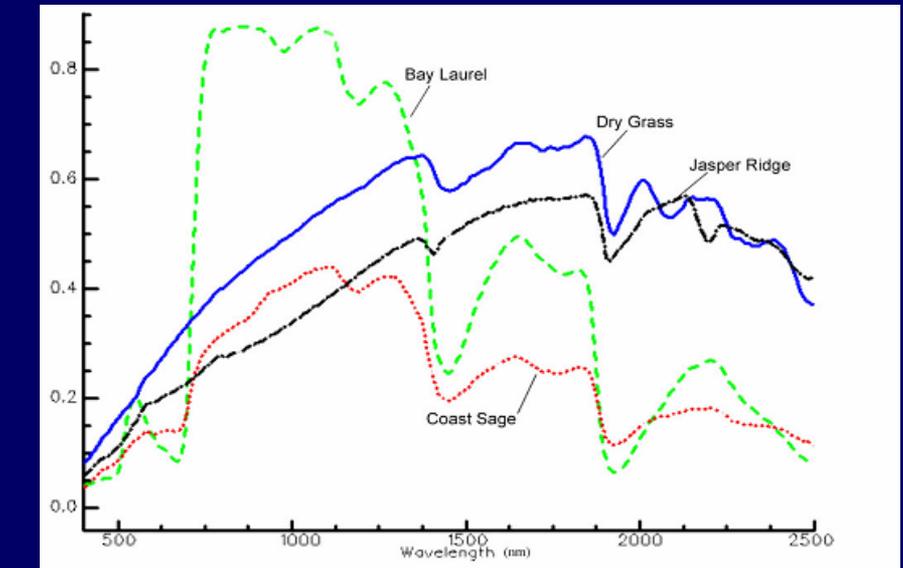
Propriétés optiques des surfaces terrestres : les végétaux inférieurs

Mojave ecosystem
Nevada Test Site

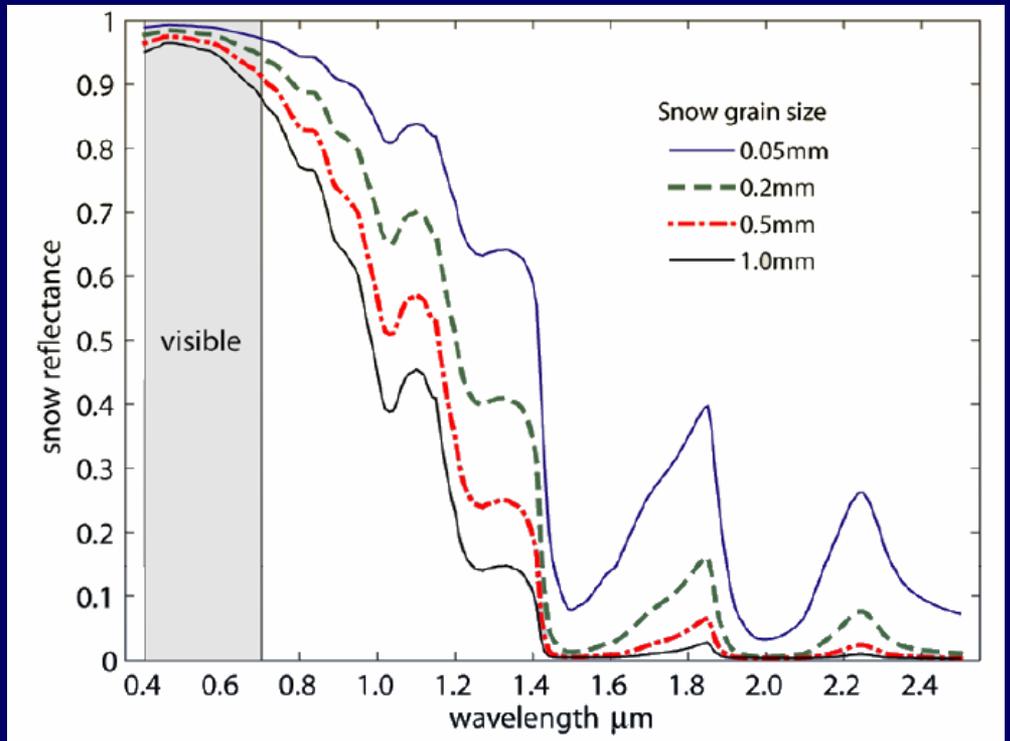
Source : Susan Ustin (UC Davis)



Propriétés optiques des surfaces terrestres : les végétaux supérieurs

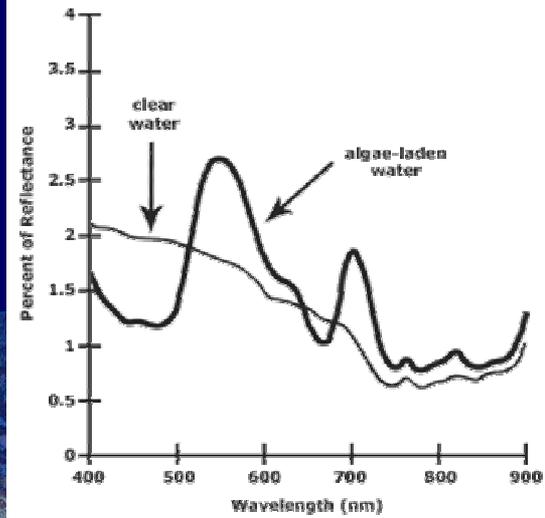


Propriétés optiques des surfaces terrestres : la neige



Source : Jeff Dozier (UC Santa Barbara)
<http://www.ices.ucsb.edu/hydro/aviris/optics.html>

Propriétés optiques des surfaces terrestres : l'eau



Propriétés optiques des surfaces terrestres : notion de signature spectrale

