

A satellite-style map of the Mediterranean region, showing the coastlines of Europe, Africa, and Asia. The map is overlaid with numerous small blue dots, representing data points or sensor locations. The text is overlaid on this map.

Université Paris 7 - L3 Géosciences fondamentales

*Rayonnement, transfert radiatif,
télédétection*

Stéphane Jacquemoud, Pr

Janvier 2006

I. Définitions et historique

I.1. Définition

I.2. Quelques dates

II. Quelques bases physiques

II.1. Le rayonnement électromagnétique

II.2. Le spectre du rayonnement électromagnétique

II.3. Les sources de rayonnement

II.4. La constante solaire

III. Interactions onde / matière

III.1. Absorption du rayonnement électromagnétique

III.2. Interaction avec l'atmosphère

III.2. Interaction avec les surfaces terrestres

IV. Bilans radiatif et d'énergie à la surface de la Terre

IV.1. Bilan radiatif

IV.2. Bilan d'énergie

IV.3. Bilans radiatif et d'énergie annuels et globaux

V. Les capteurs de télédétection

V.1. Capteurs passifs dans le visible et l'infrarouge

V.2. Capteurs actifs dans le domaine optique

V.3. Capteurs actifs dans le domaine des hyperfréquences

VI. Les vecteurs

VI.1. Plates-formes terrestres

VI.2. Plates-formes aériennes

VI.3. Plates-formes spatiales

VII. Analyse des données de télédétection

VII.1. Le prétraitement des données

VII.2. Transformation des images

VII.3. Méthodes de classification

VIII. Télédétection de la végétation dans le domaine optique

VIII.1. Propriétés optiques des couverts végétaux

VIII.2. Extraction des paramètres biophysiques de la végétation

VIII.3. Application à la détection d'une contamination environnementale

Conclusion

Références

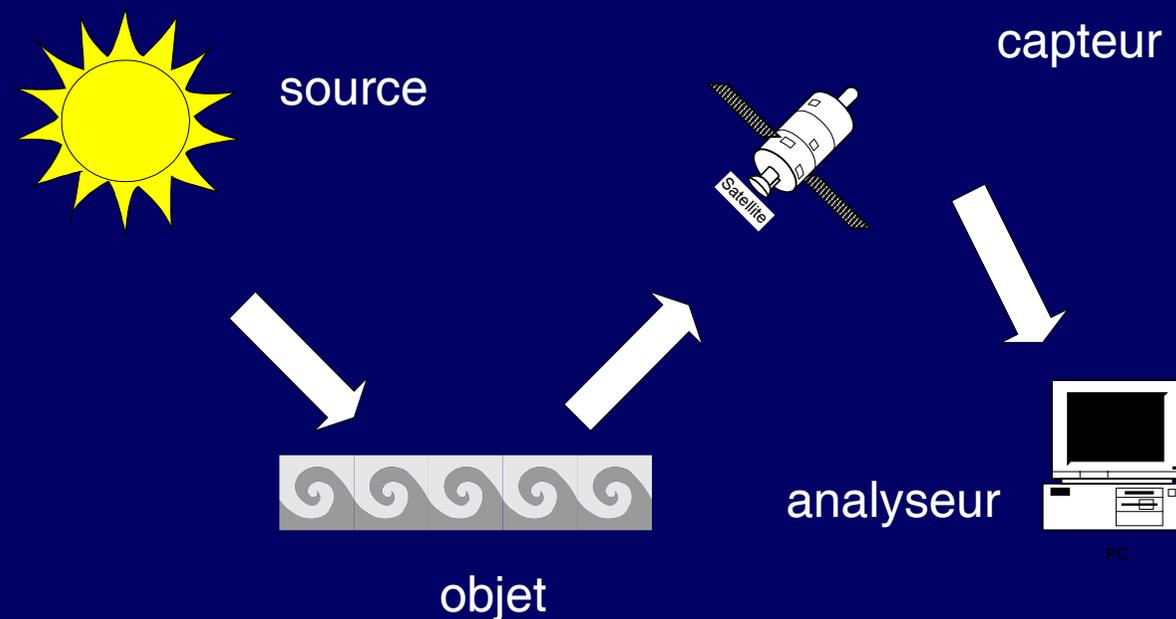
Principales revues

Adresses Web utiles

I. Définition et historique

I.1. Définition

Télédétection = 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



I.2. Quelques dates

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



Annonay, 4 juin 1783, les frères Joseph et Etienne Montgolfier réalisent la première expérience aérostatique publique. Ce premier aérostat, non monté, s'éleva jusqu'à une hauteur de 1000 m

Paris, 21 novembre 1783, premier vol humain à bord d'une montgolfière par le physicien Jean-François Pilâtre de Rozier



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



M. Huet par Louis
Daguerre, 1837

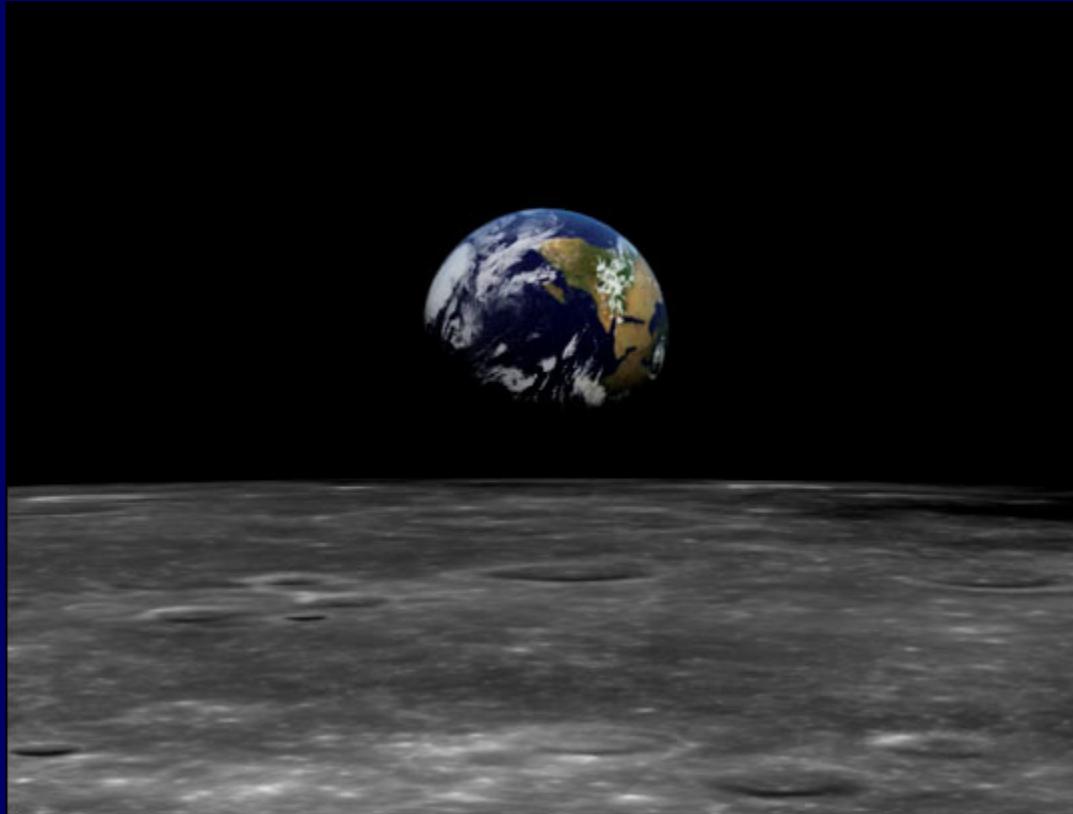


Photographie de la guerre civile américaine,
First Bull Run, Juillet 1861 (Library of Congress)



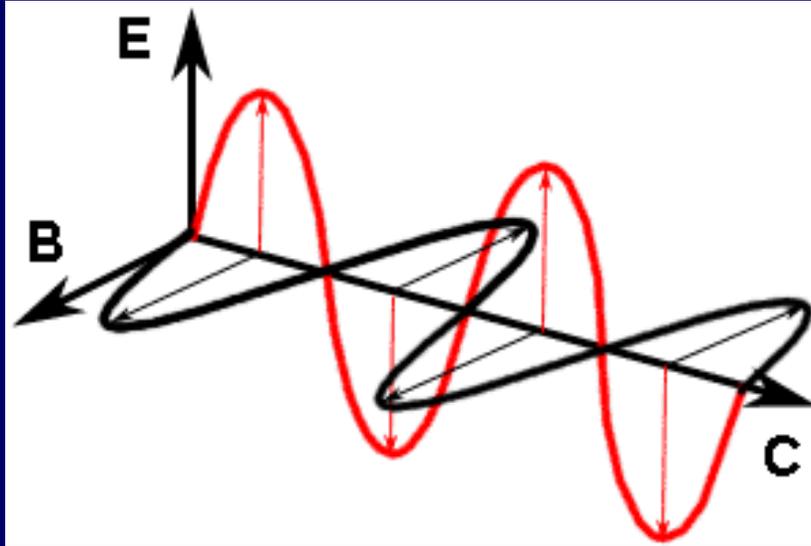
Nature morte, 1910, autochrome des frères
Lumière

- 1935 mise sur le marché de la première pellicule couleur diapositive Kodachrome par Kodak
- 1942 premier film commercial infrarouge
- 1961 Youri Gagarine est le premier homme à voler dans l'espace à bord du Vostok 1
- 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*)



II. Quelques bases physiques

II.1. Le rayonnement électromagnétique

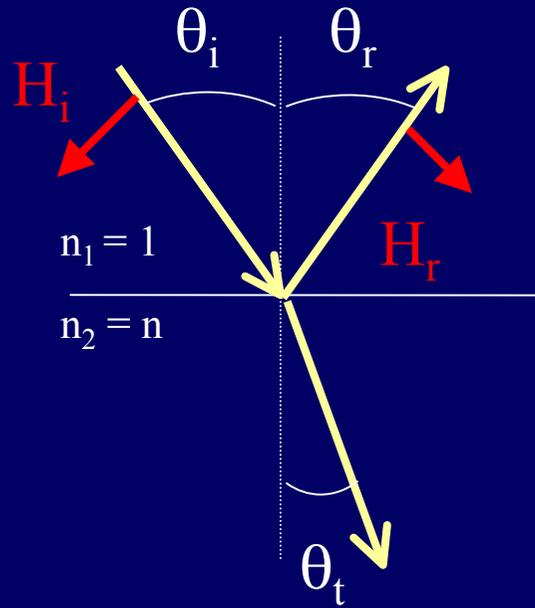


Champ électrique : \vec{E}

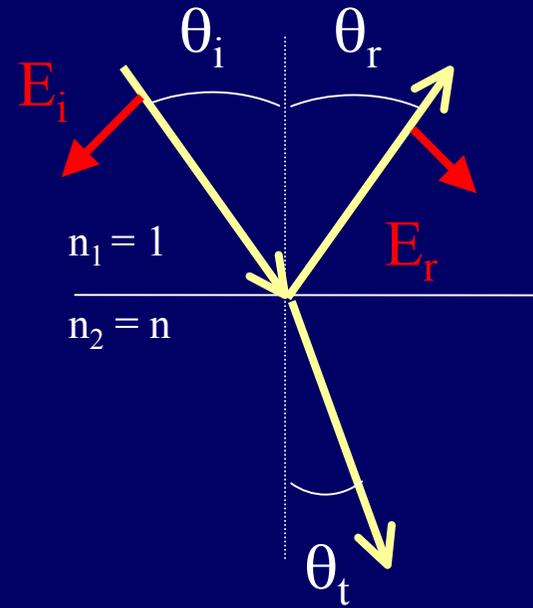
Induction magnétique : \vec{B}

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



Polarisation perpendiculaire



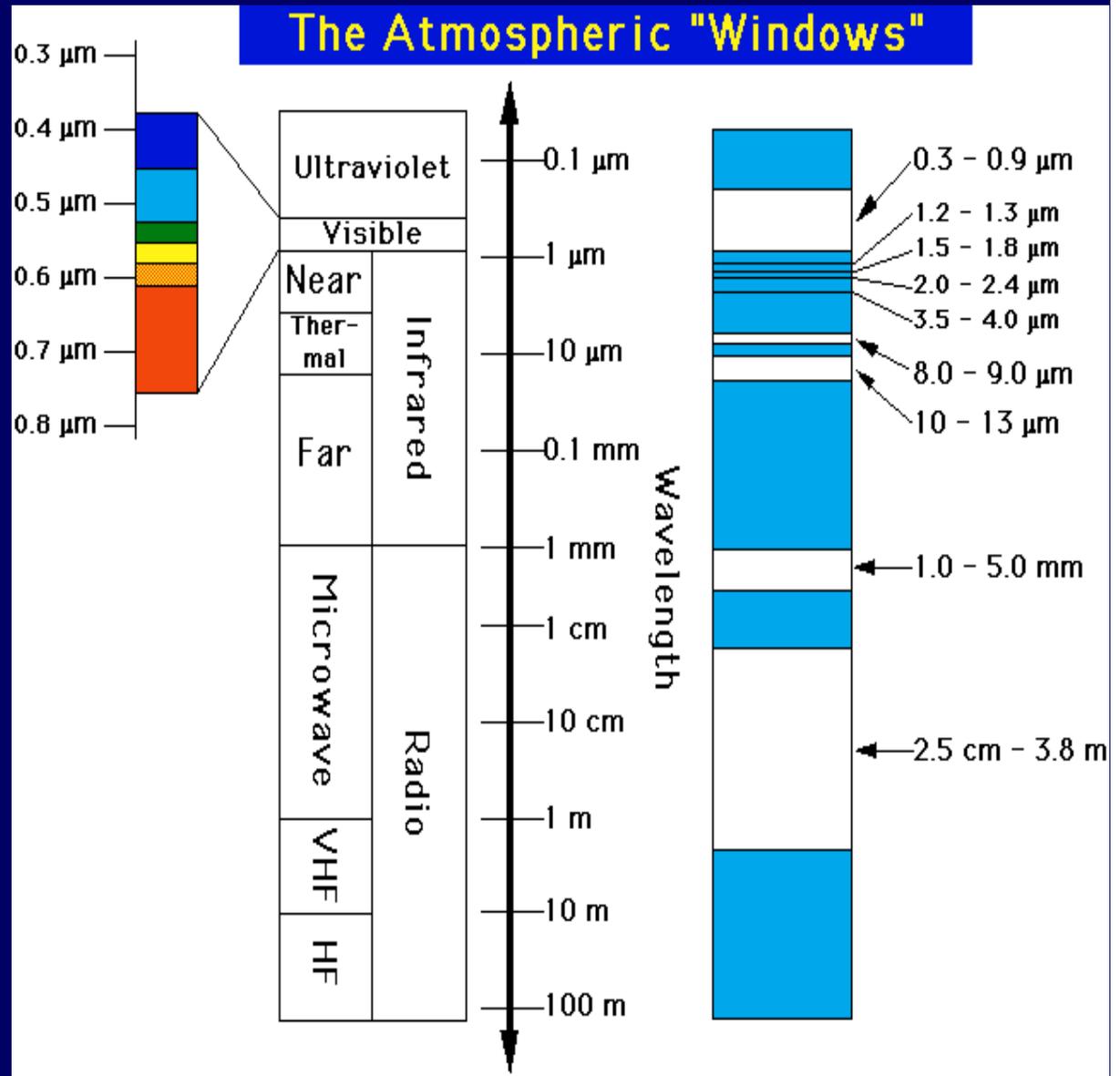
Polarisation parallèle

II.2. Le spectre du rayonnement électromagnétique

Domaine optique
300 nm - 3000 nm
⇒ réflectance

Infrarouge thermique
3 μm - 100 μm
⇒ température de surface

Domaine des hyperfréquences
1 mm - 1 m
⇒ coefficient de rétrodiffusion



II.3. Les sources de rayonnement

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 $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1} \text{sr}^{-1}$)

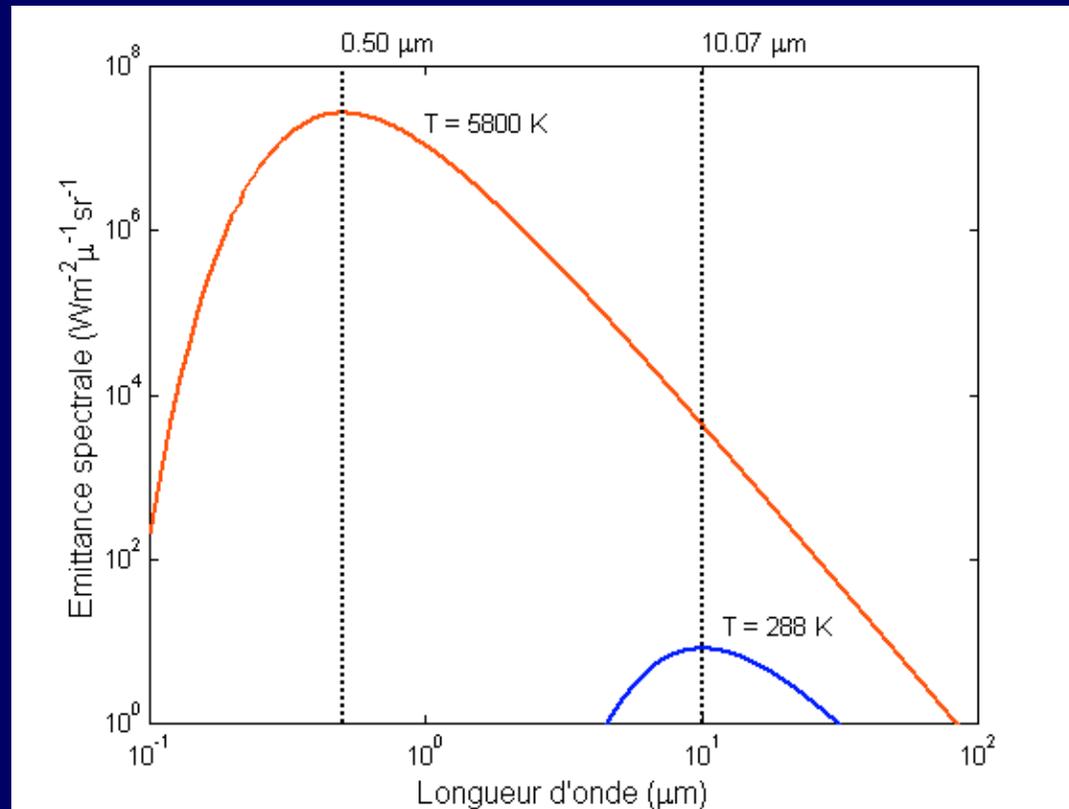
λ = longueur d'onde (en m)

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 ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$)



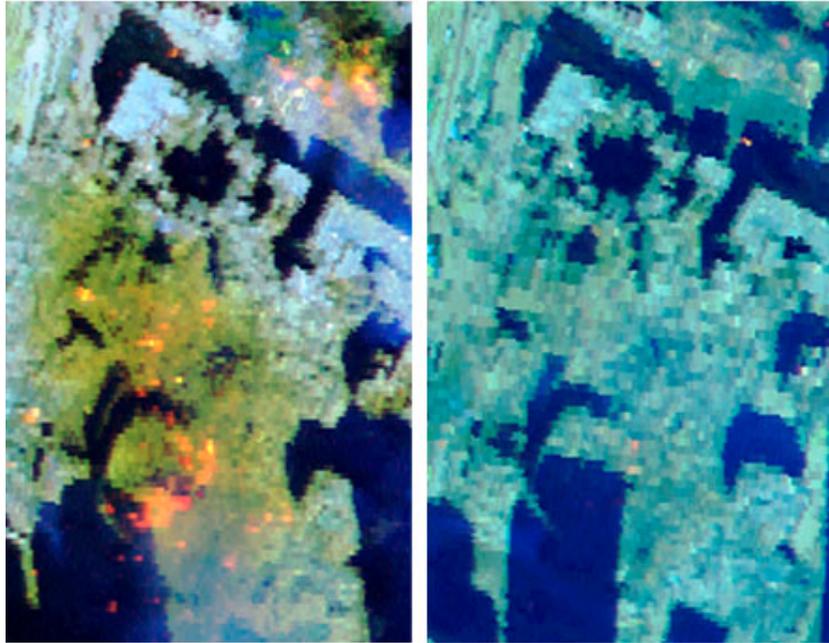
⇒ Loi du déplacement de Wien

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

⇒ Loi de Stefan-Boltzman

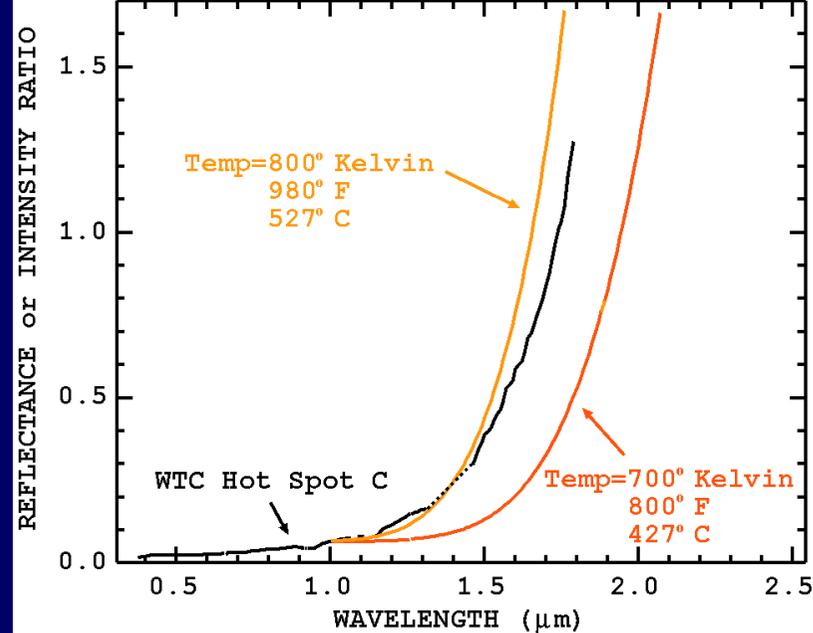
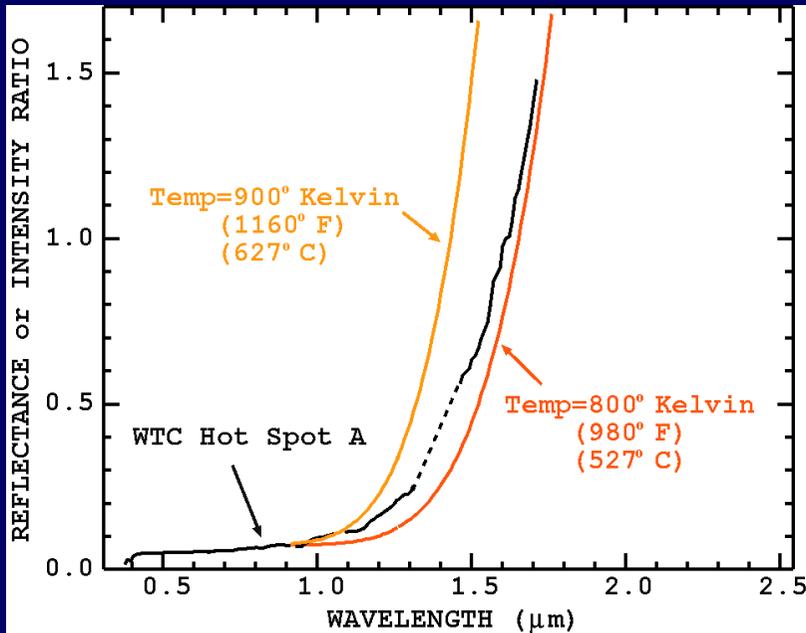
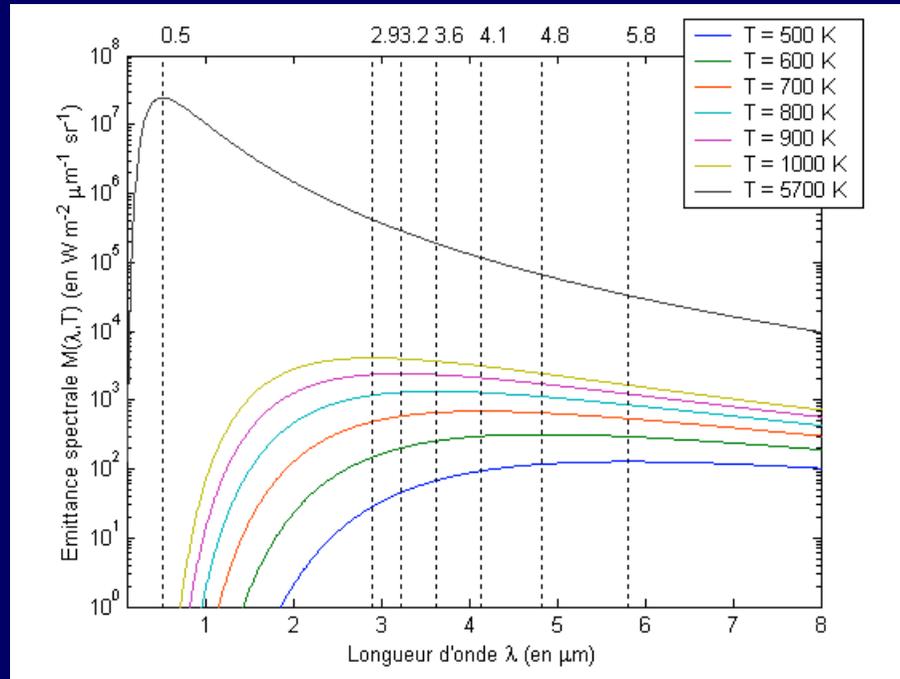
$$M(T) = \sigma T^4$$

World Trade Center area, New York

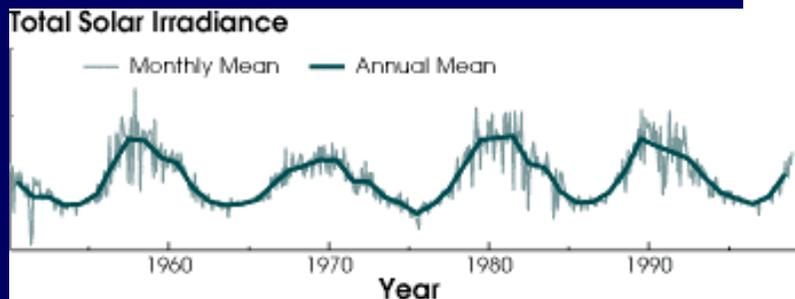
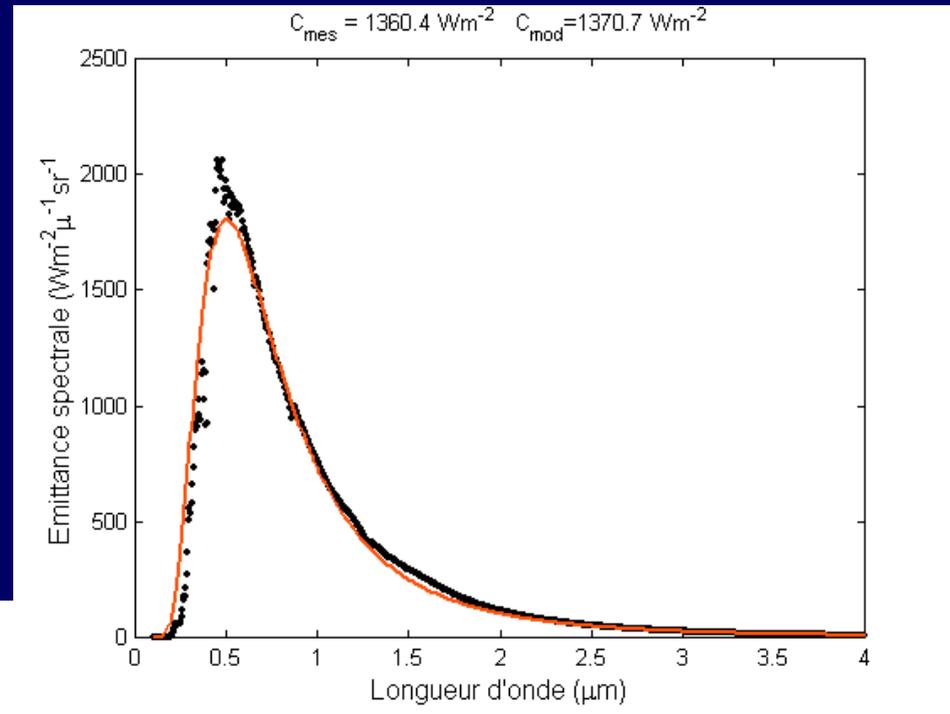
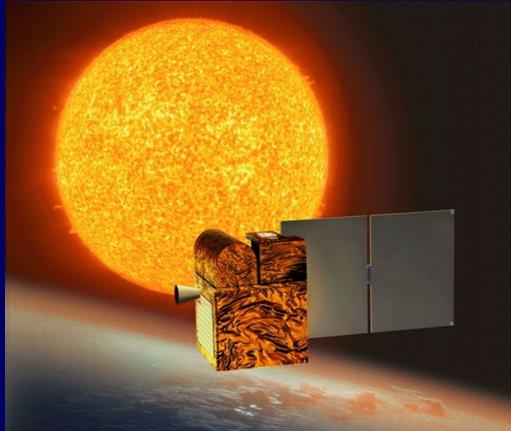


Thermal Hot Spots
 September 16, 2001 September 23, 2001

Carte des points chauds



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)

III. Interactions onde / matière

incident

réfléchi



absorbé

Facteur de réflexion ρ
ou réflectance

$$\rho = \frac{E_{\text{réfléchi}}}{E_{\text{incidente}}}$$

Facteur de transmission τ
ou transmittance

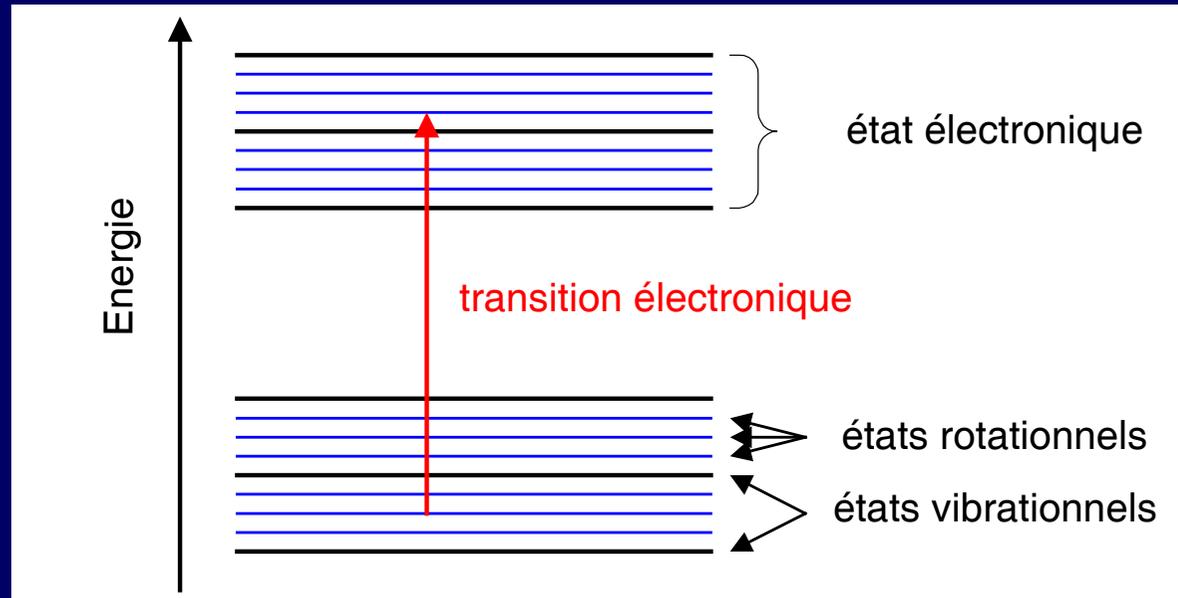
$$\tau = \frac{E_{\text{transmise}}}{E_{\text{incidente}}}$$

Facteur d'absorption α
ou absorptance

$$\alpha = \frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{incidente}}}$$

transmis

III.1. Absorption du rayonnement électromagnétique



Les molécules possèdent :

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

$$E_t = E_e + E_v + E_r$$

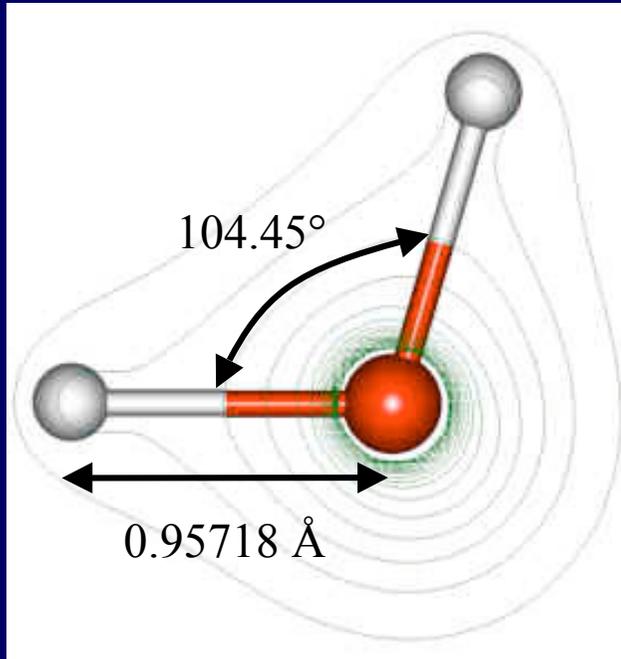
$$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

h = constante de Planck

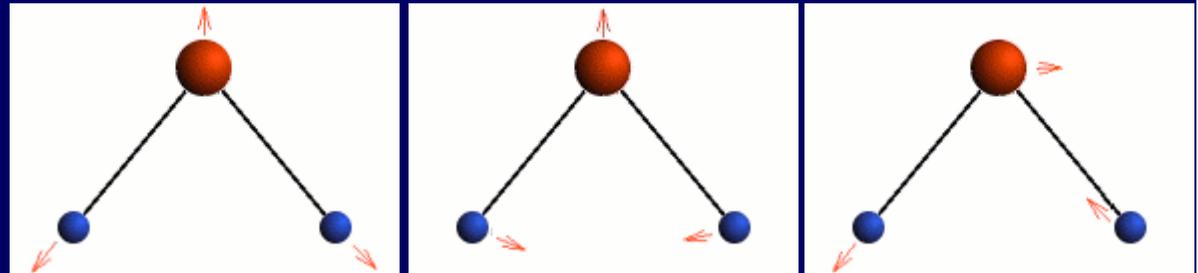
c = vitesse de la lumière dans le vide

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

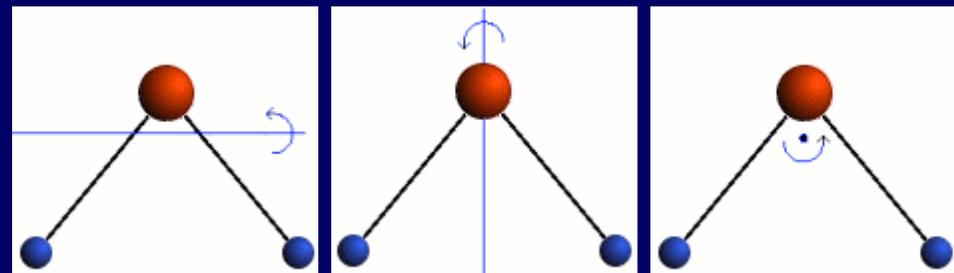
Exemple : la molécule d'eau



L'eau possède trois degrés de liberté vibrationnels



L'eau possède trois degrés de liberté rotationnels

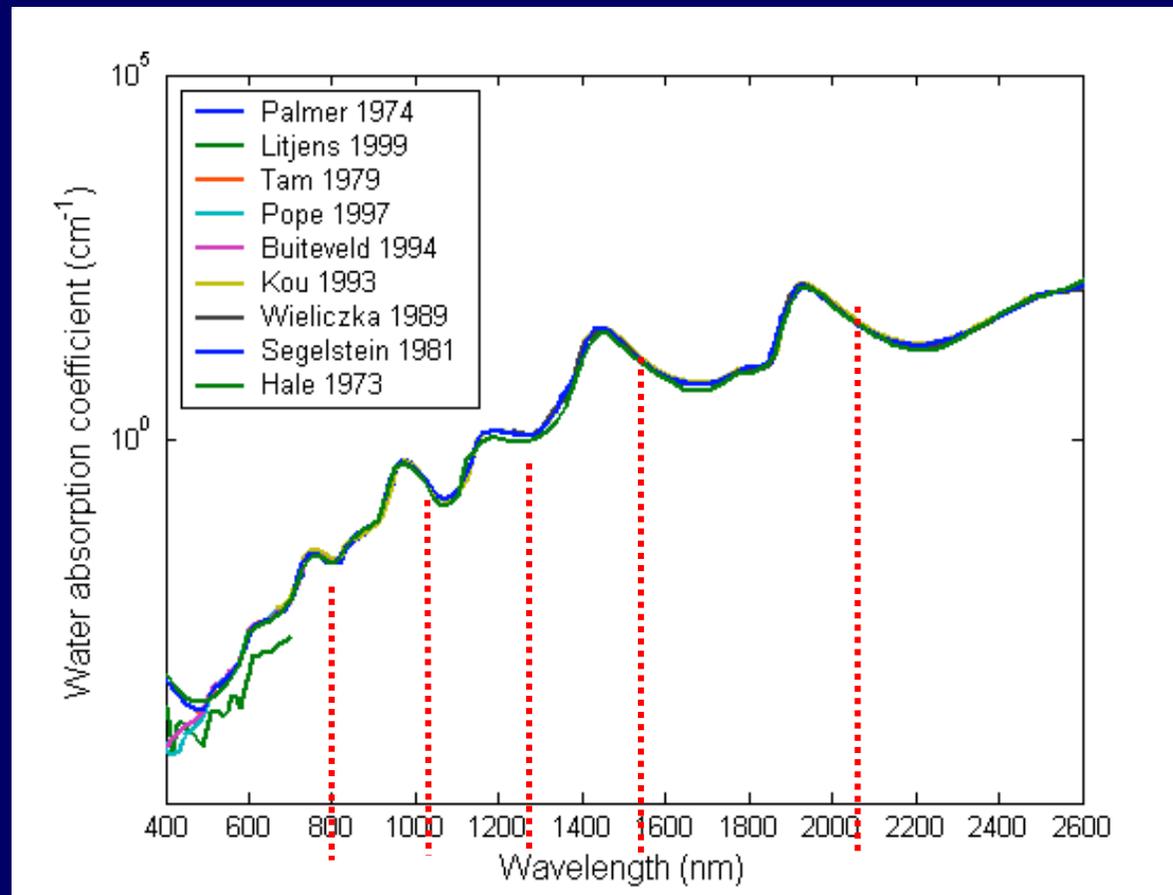


Rotation A

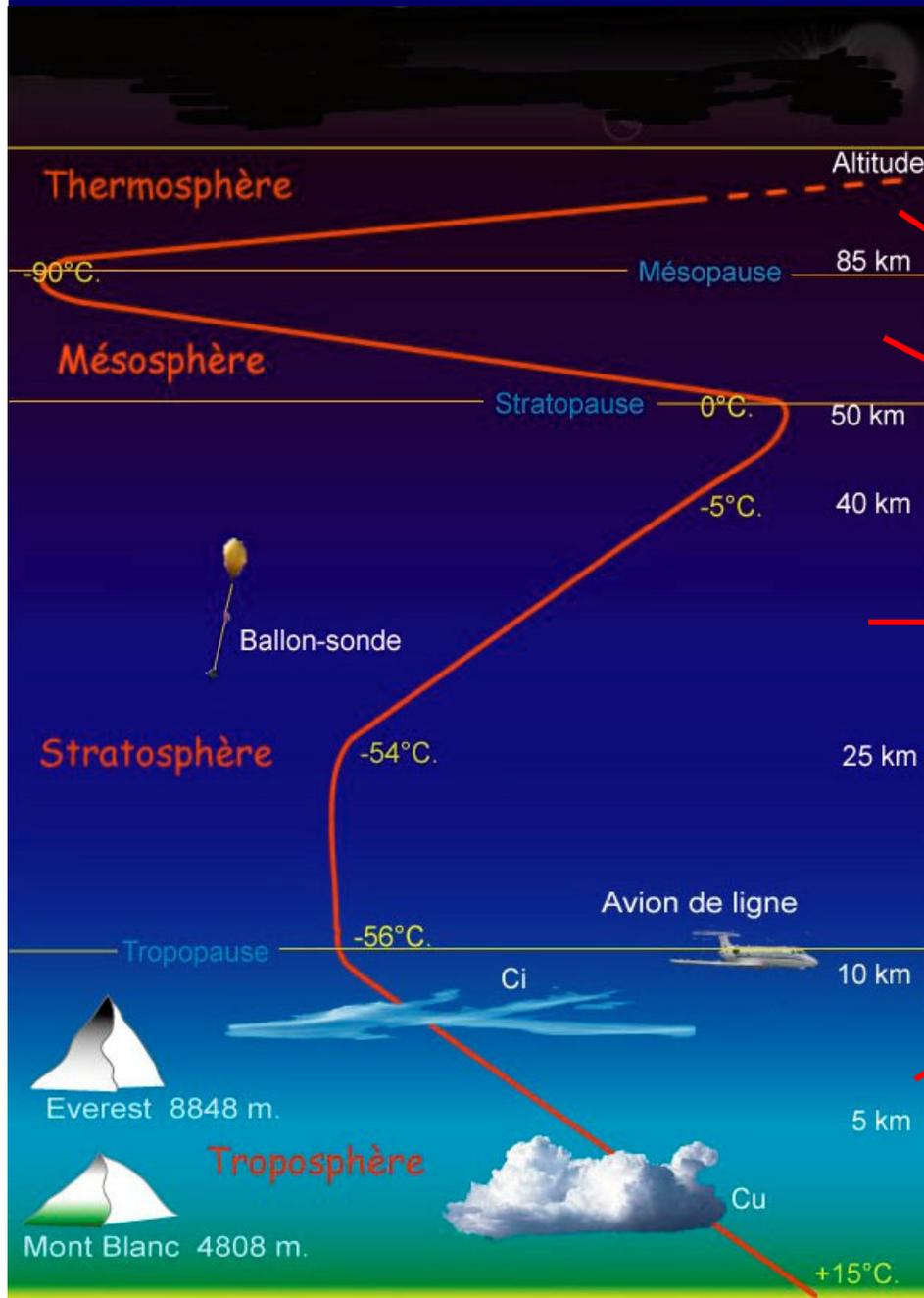
Rotation B

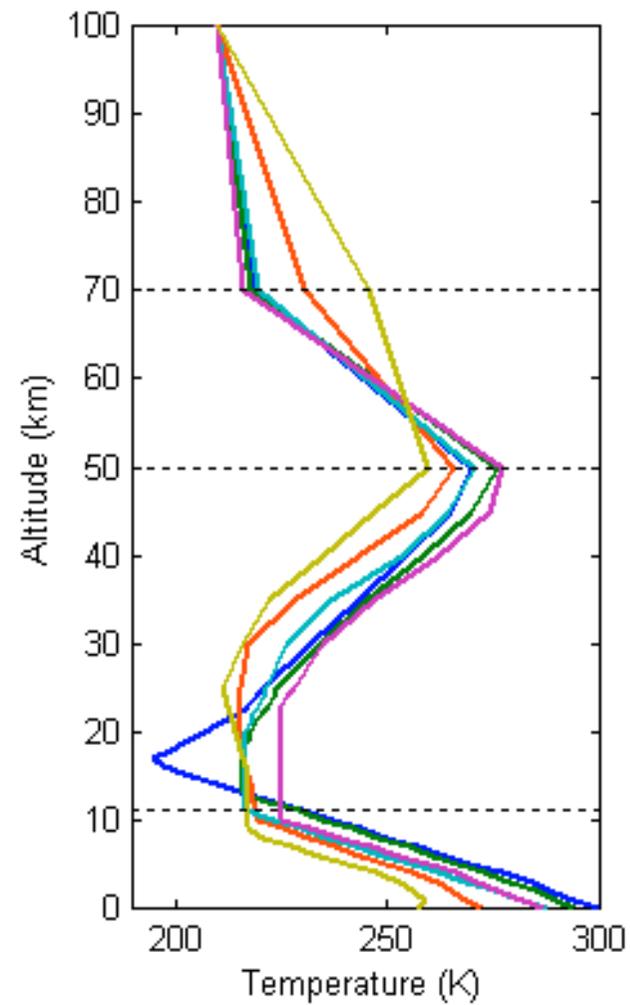
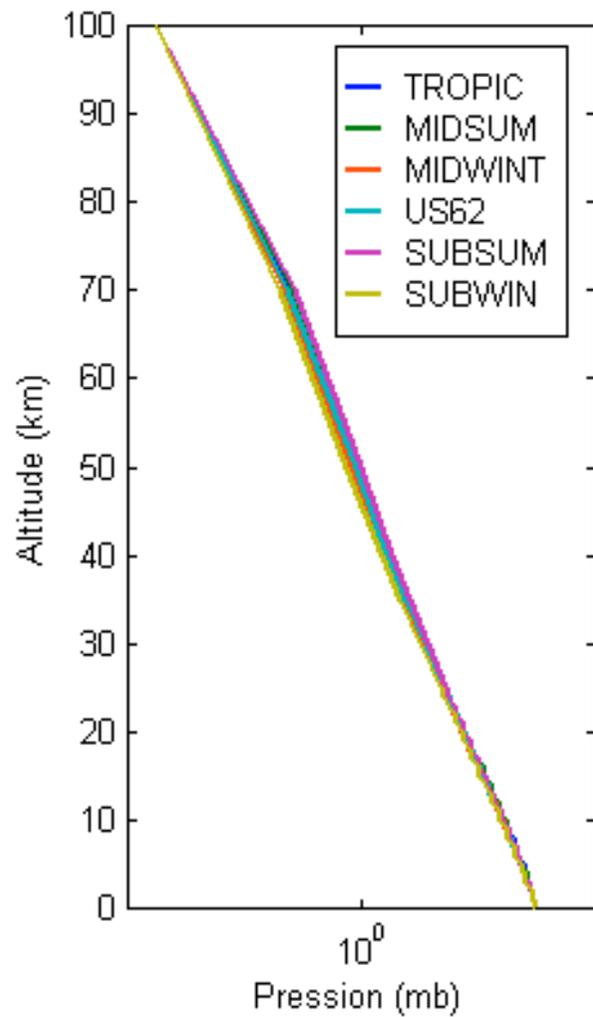
Rotation C

Transition	Etat liquide	Etat gazeux	Combinaison	Etat liquide	Etat gazeux
ν_1	2.73 μm	2.87 μm	$\nu_1 + \nu_3$	0.739 μm	
ν_2	6.27 μm	6.08 μm	$2 \nu_1 + \nu_3$	0.970 μm	1.004 μm
ν_3	2.66 μm	2.90 μm	$\nu_1 + \nu_2 + \nu_3$	1.200 μm	1.272 μm
			$\nu_1 + \nu_3$	1.450 μm	1.536 μm
			$\nu_2 + \nu_3$	1.940 μm	1.990 μm



III.2. Interaction avec l'atmosphère



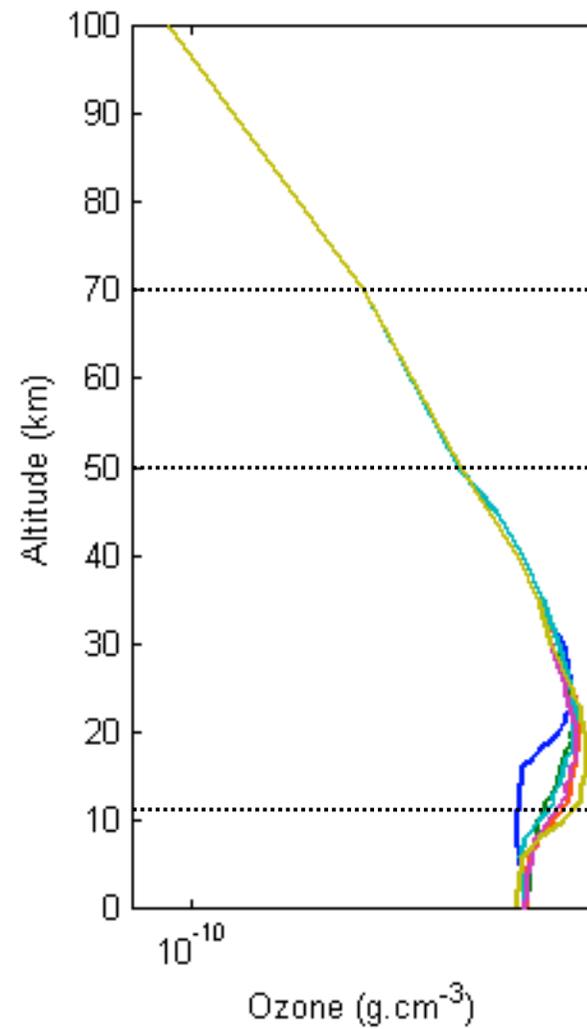
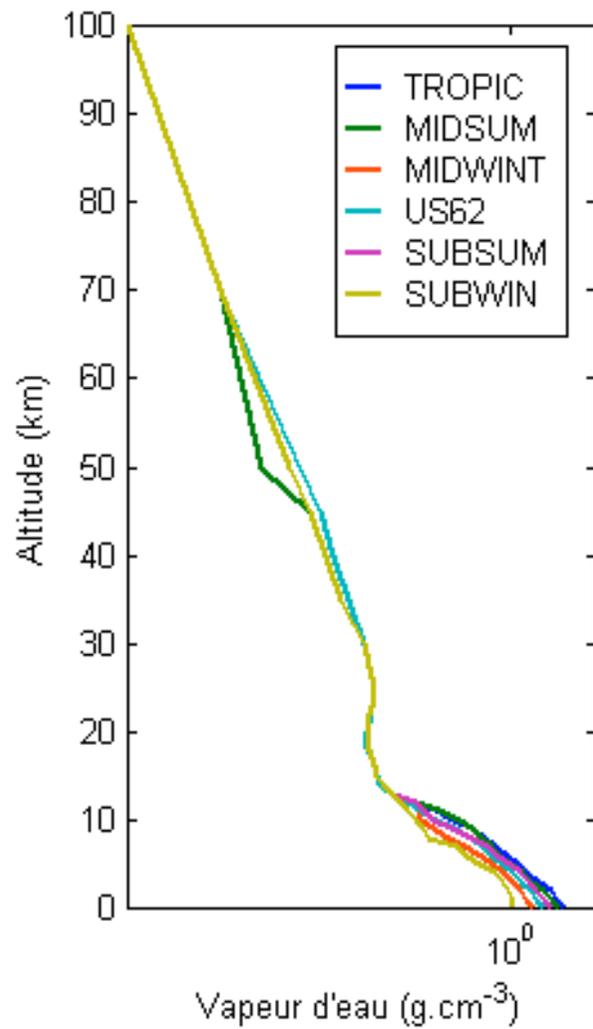


thermosphère

mésosphère

stratosphère

troposphère



thermosphère

mésosphère

stratosphère

troposphère

Les gaz

	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

Les aérosols



Soot

75% H_2SO_4



Water soluble



Dust-like



Oceanic

Les nuages

de 0 à 2 km d'altitude



extension verticale



de 2 à 6 km d'altitude

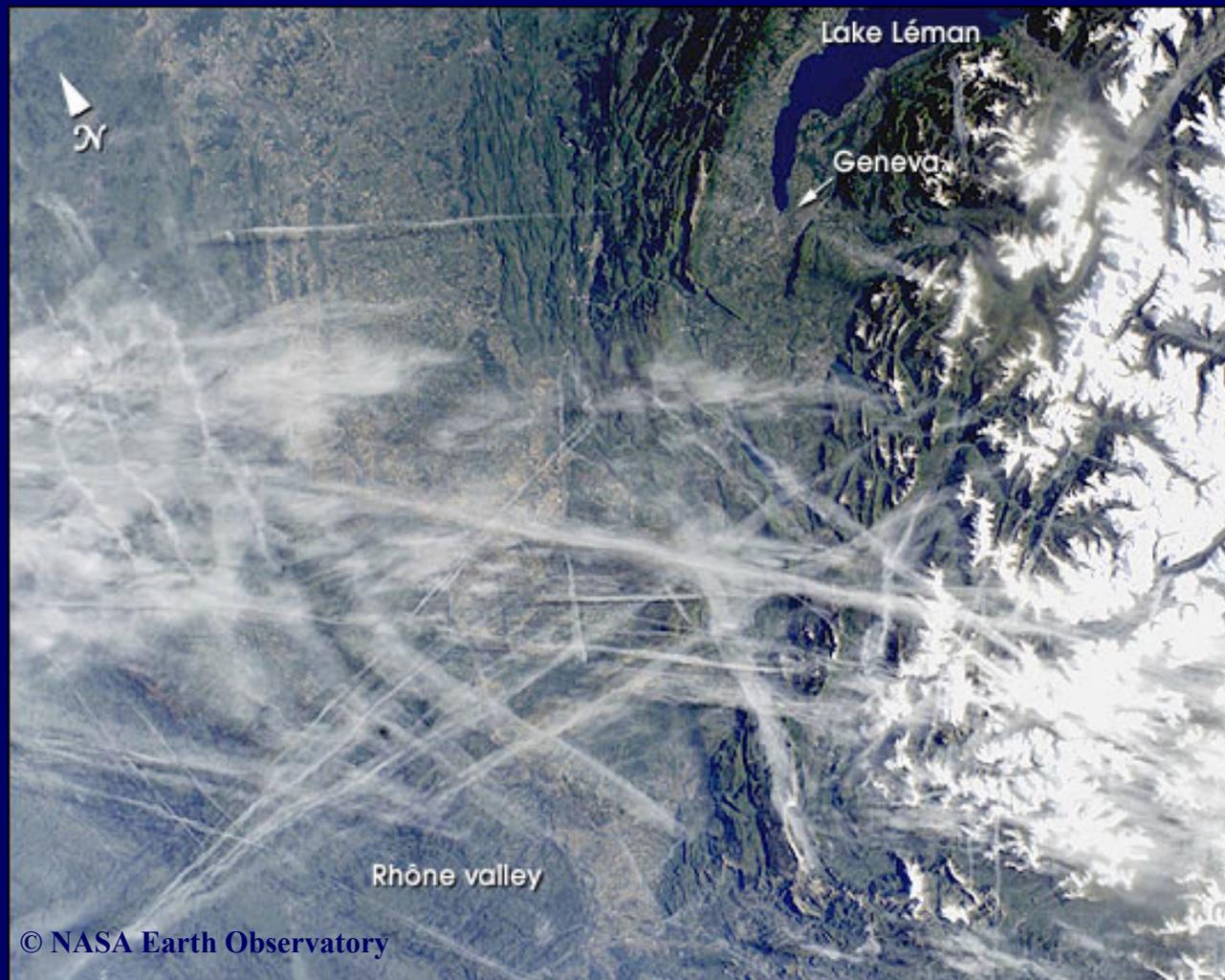


de 5 à 13 km d'altitude



Photographie numérique prise à partir de la Station Spatiale Internationale le 15 mai 2002.

Lorsque la température de l'air descend au dessous de -40°C , les avions à réaction produisent des traînées de condensation (*contrails*) constituées de cristaux de glace. On estime que ces nuages artificiels couvrent 0,1 % de la surface du globe !



Nuages + aérosols

© Norman Kuring, SeaWiFS Project, NASA GSFC

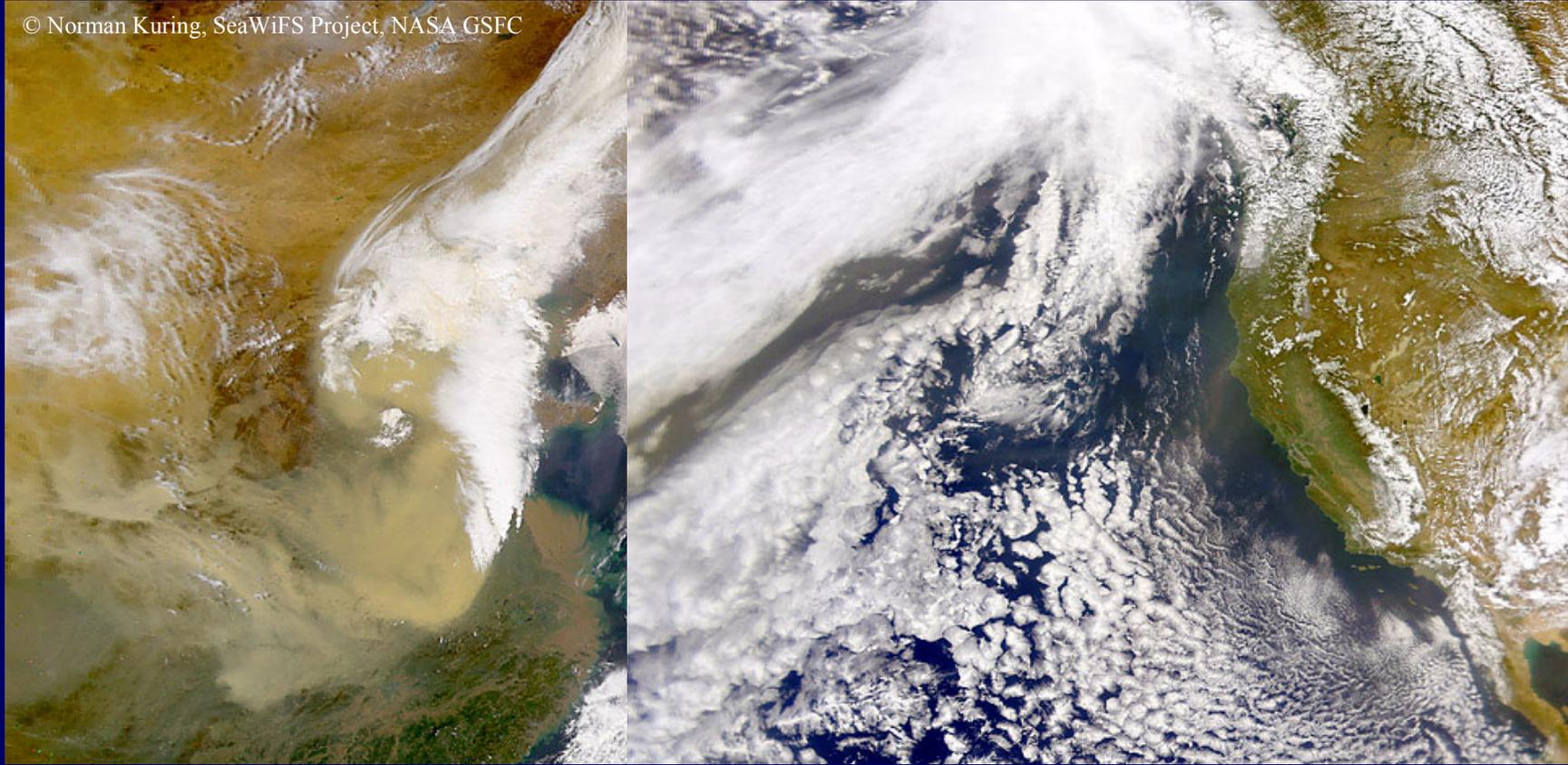
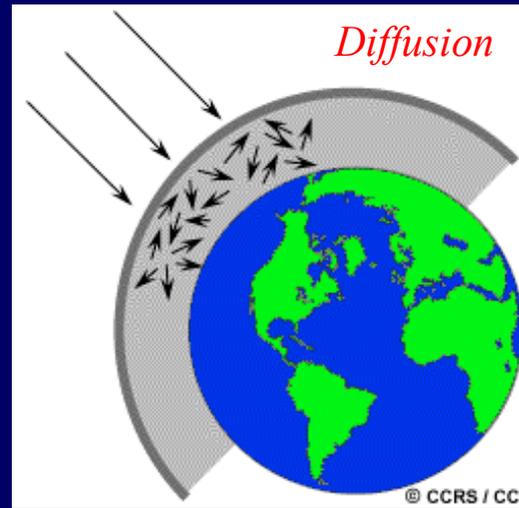
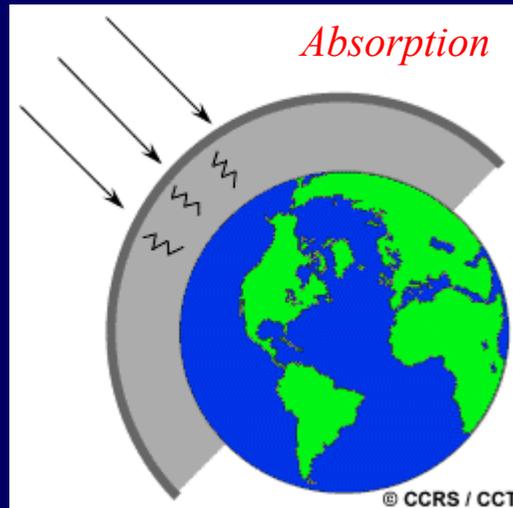


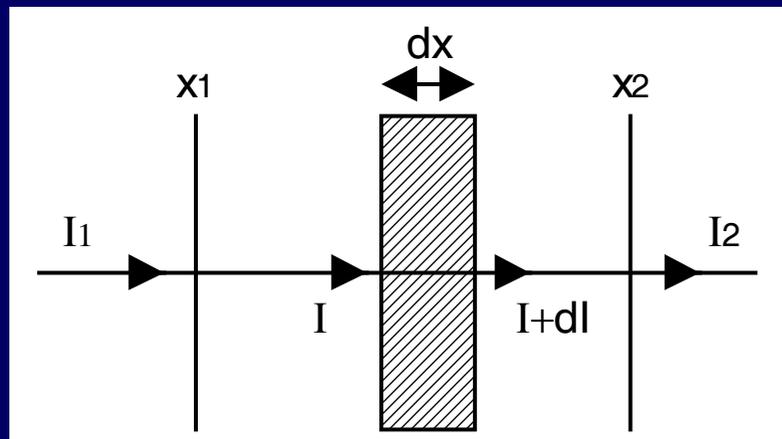
Image du satellite SeaWiFS acquise le 16 avril 1998 montrant le développement d'une large tempête de sable en Chine et ses interactions avec le système météorologique qui transporte la poussière vers l'Océan Pacifique

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

Extinction du rayonnement électromagnétique



extinction = absorption + diffusion



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

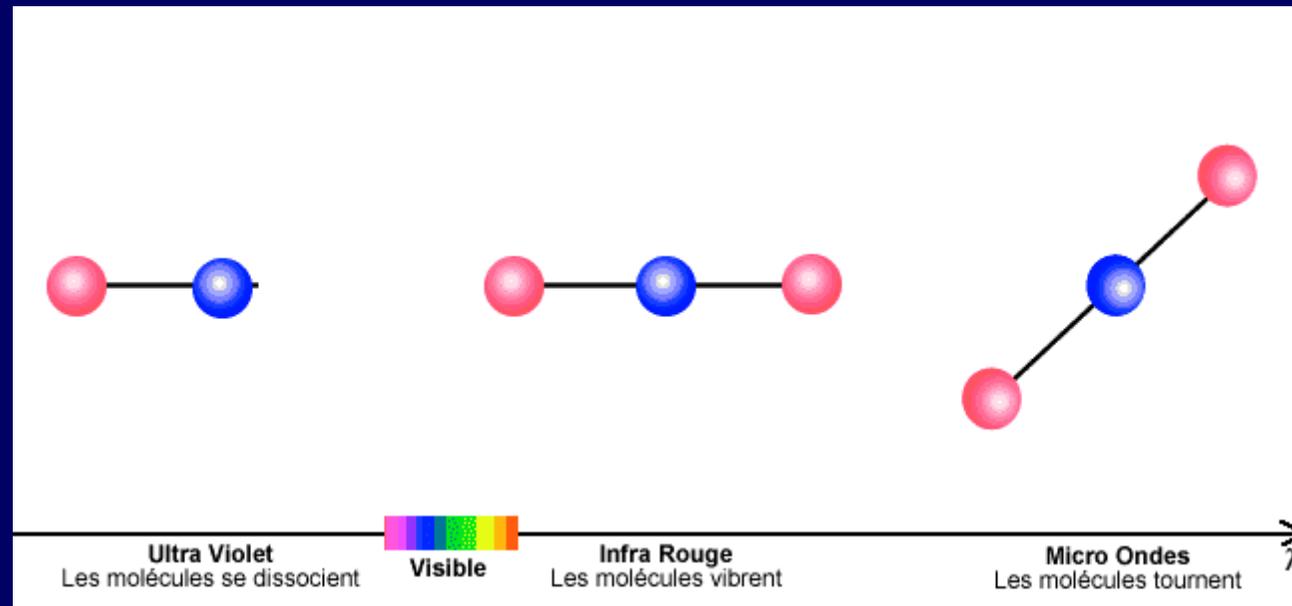
$$dI = -\sigma_e(x)I dx$$

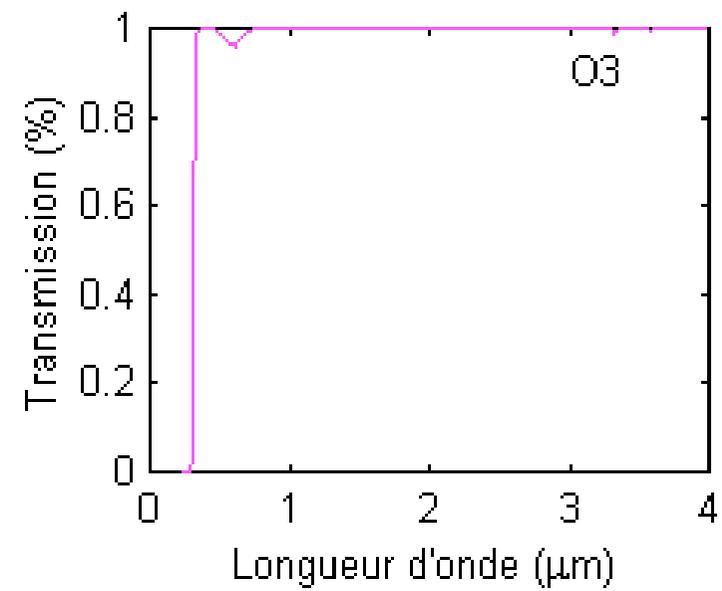
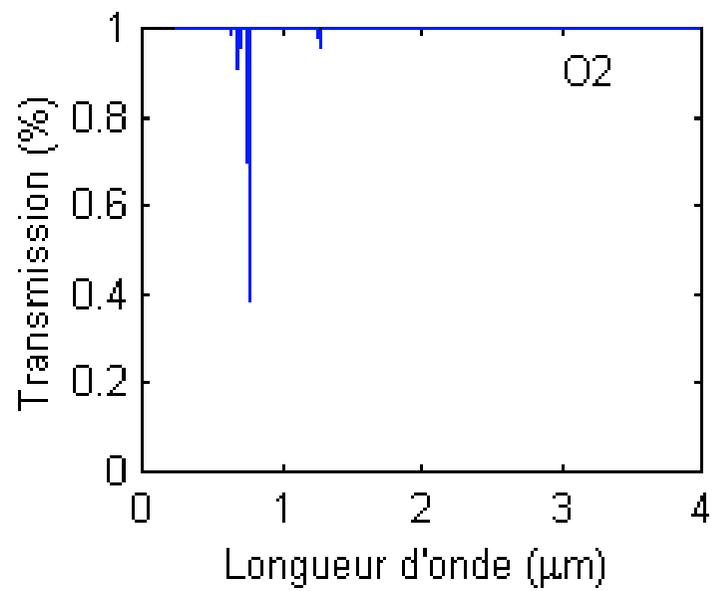
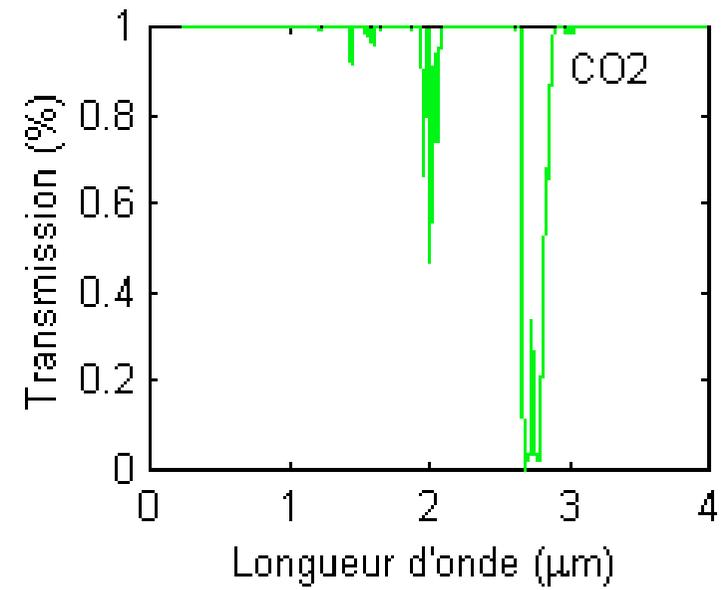
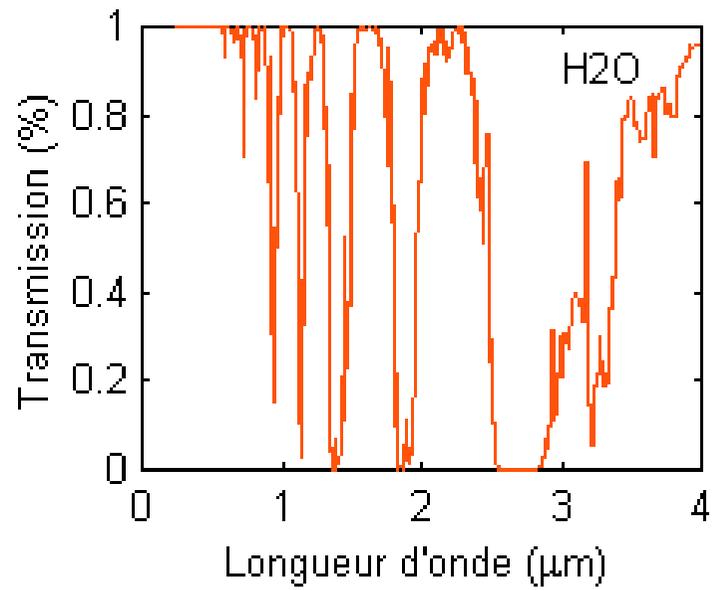
$$\Rightarrow I_2 = I_1 \exp\left(-\int_{x_1}^{x_2} \sigma_e(x) dx\right)$$

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

épaisseur optique du milieu : $\tau = -\ln T = -\ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right) = \int_{x_1}^{x_2} \sigma_e(x) dx$

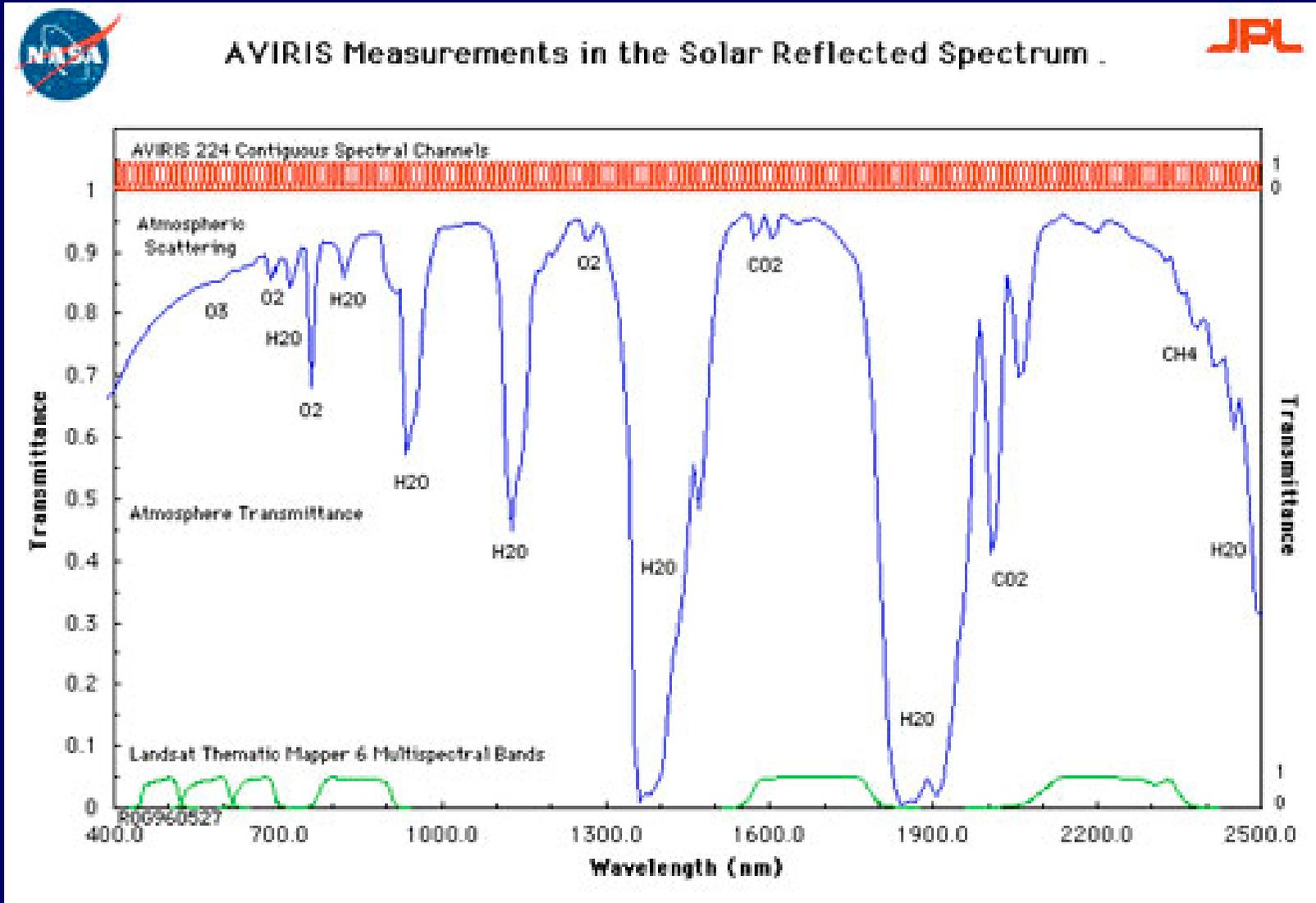
Absorption par les molécules gazeuses

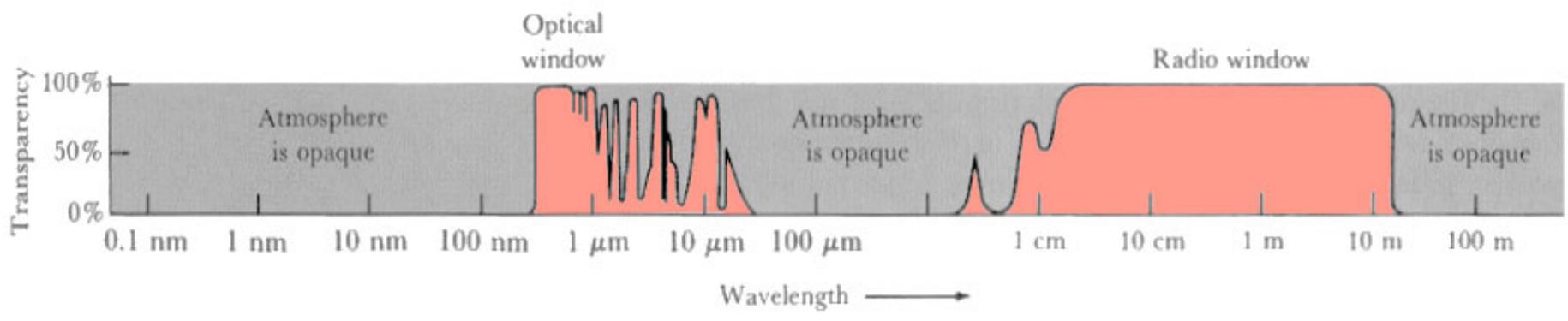
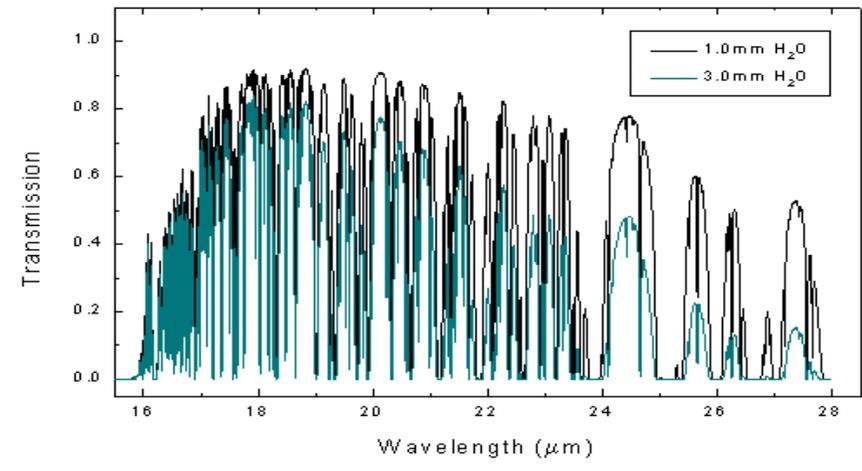
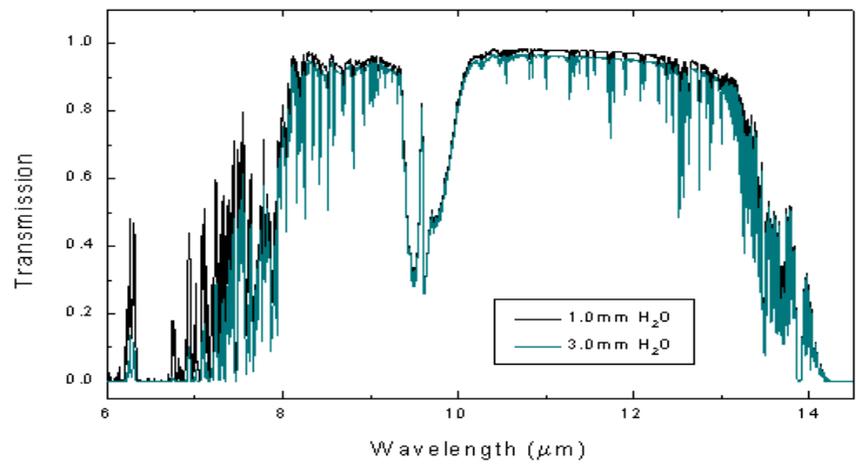
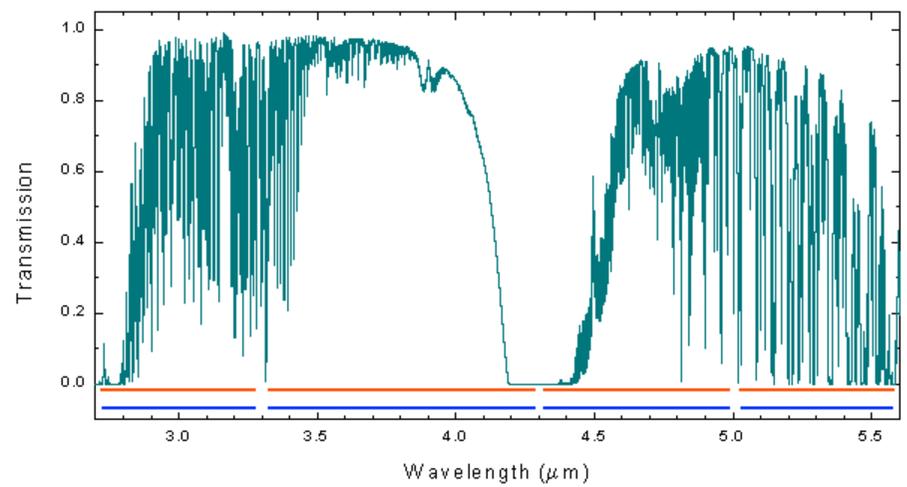
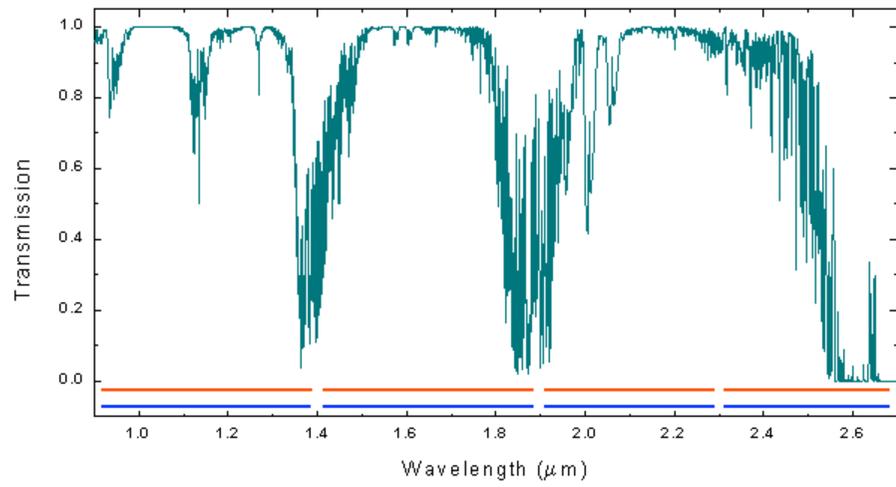




Notion de fenêtre atmosphérique

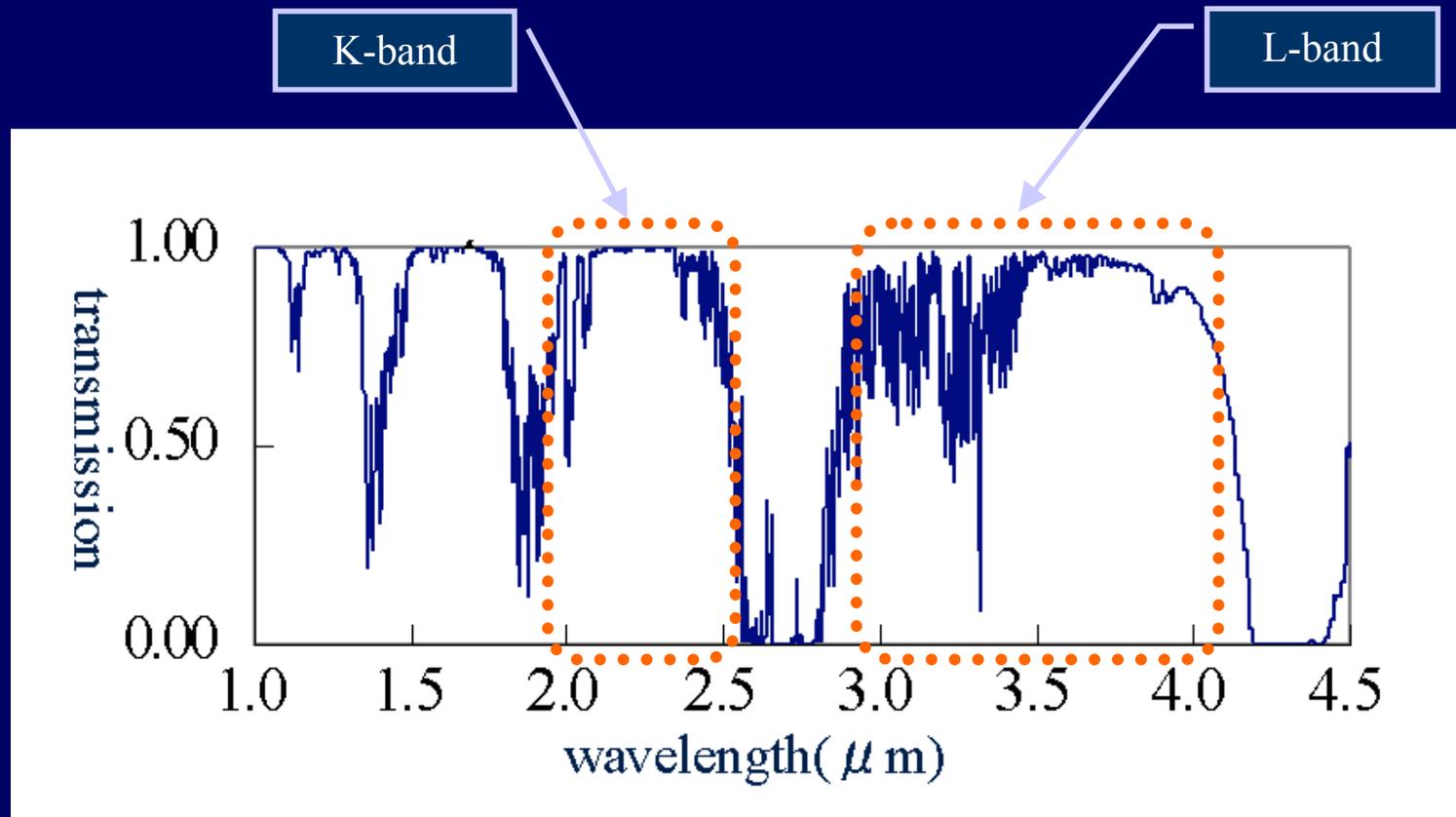
$$T_{\text{atm}}(\lambda) = T_{\text{H}_2\text{O}}(\lambda) \times T_{\text{CO}_2}(\lambda) \times T_{\text{O}_2}(\lambda) \times T_{\text{O}_3}(\lambda) \times \dots$$





Application

Estimation du rapport C_2H_6 / CH_4 sur Pluton grâce au télescope SUBARU (ouverture de 8m20) situé à 4200 m d'altitude au sommet du Mont Mauna Kea, Hawaii, et géré par le National Astronomical Observatory of Japan. Le télescope est équipé de l'Infrared Camera and Spectrograph (IRCS)



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)

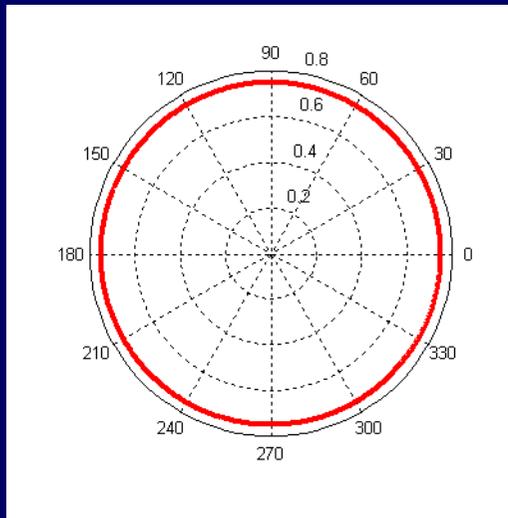
T = température absolue (en K)

P = pression (en Pa)

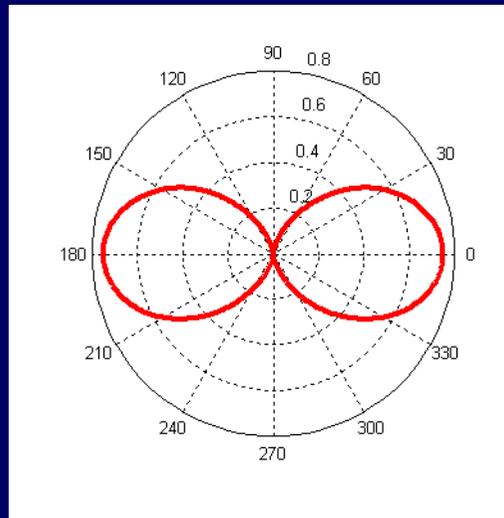
n_0 = indice de réfraction de l'air

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

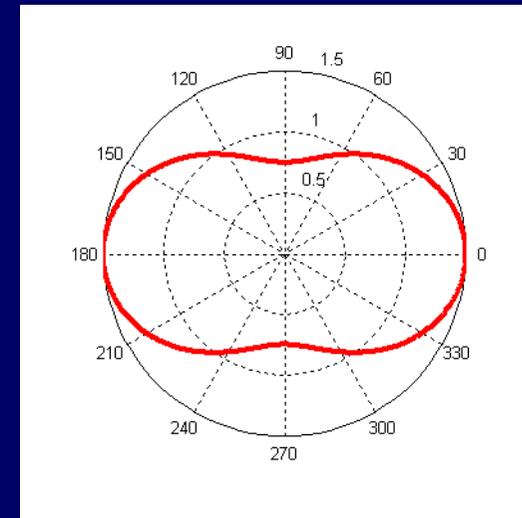
Et la fonction de phase des molécules gazeuses $P(\theta)$ par : $P(\theta) = \frac{3}{4}(1 + \cos^2 \theta)$



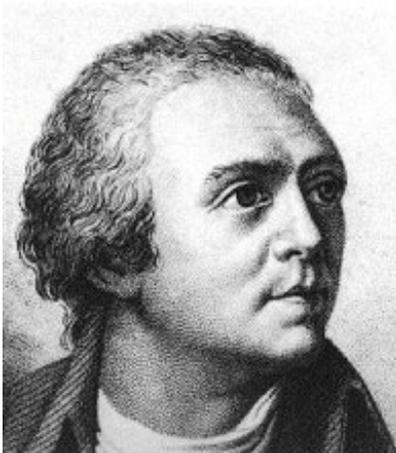
polarisation perpendiculaire



polarisation parallèle

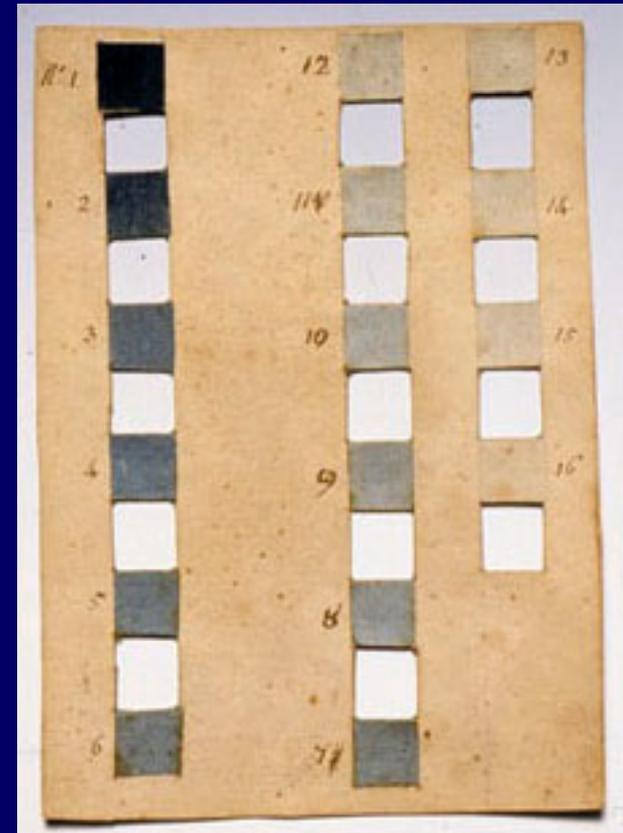


lumière naturelle



Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799)

Le cyanomètre : 16 niveaux de bleu

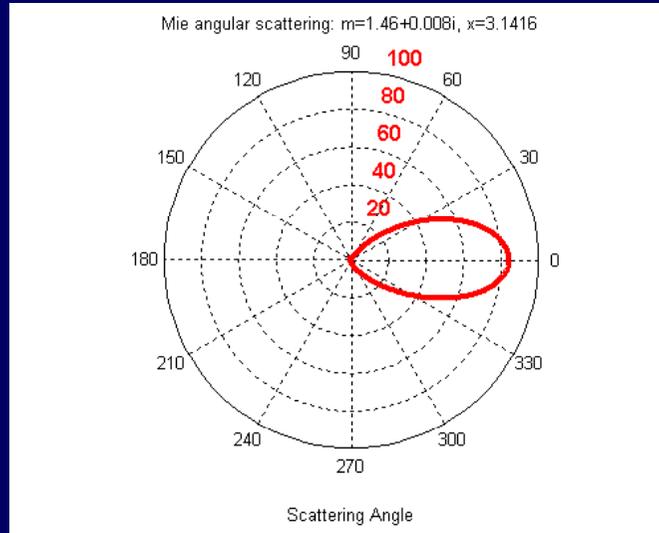


Expérience de 1787 :

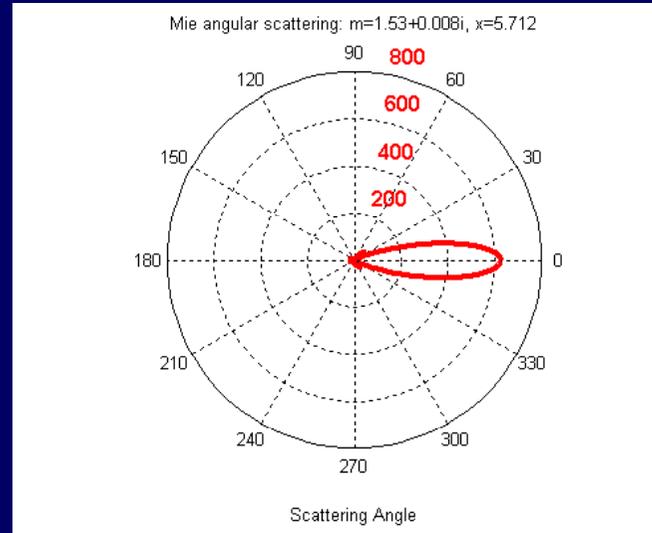
- (1) Mont Blanc = 1-2
- (2) Chamonix = 5-6
- (3) Genève = 7

Diffusion par les aérosols : diffusion de Mie

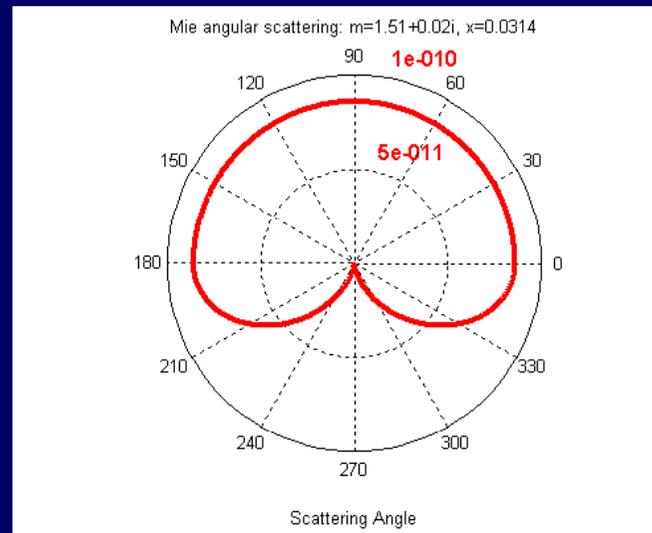
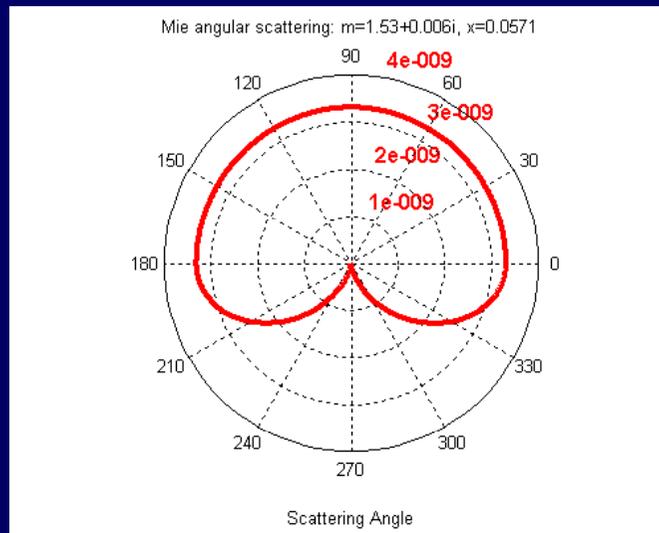
0.55 μm



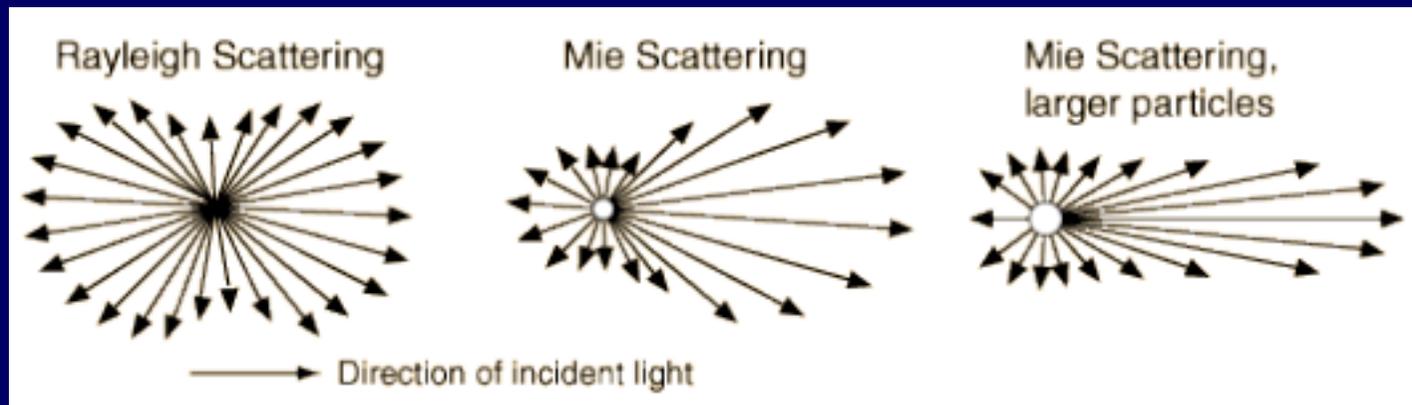
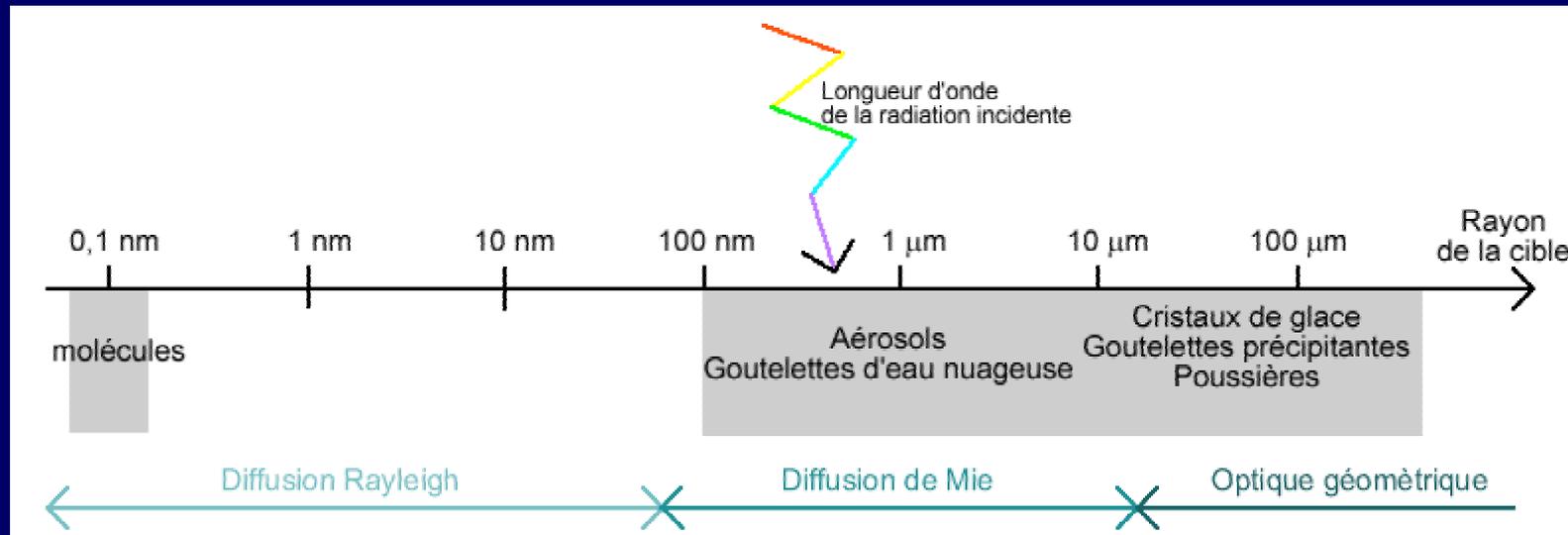
1.30 μm



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



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



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})

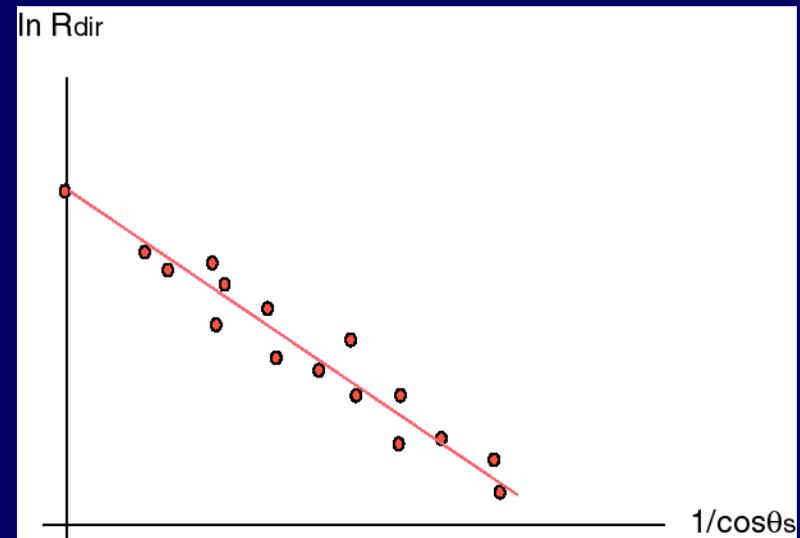
E_0 = irradiance solaire au delà de l'atmosphère (en W m^{-2})

τ = épaisseur optique de l'atmosphère

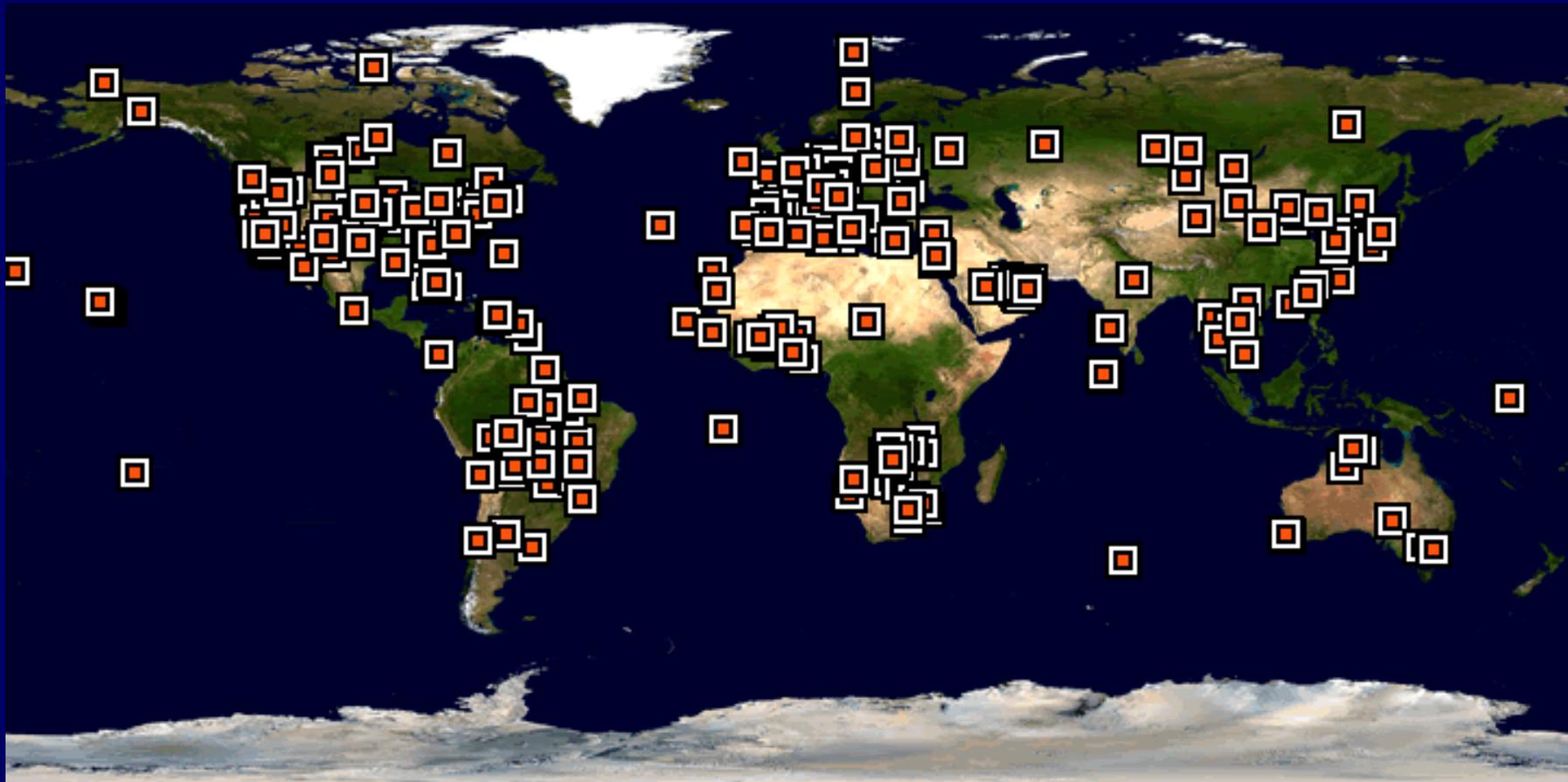
$$= \tau_{\text{gaz}} + \tau_{\text{Rayleigh}} + \tau_{\text{Mie}}$$

θ_s = angle zénithal solaire (en rad)

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



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)



III.3. Interaction avec les surfaces terrestres

T R A I T É D'OPTIQUE

SUR

LES REFLEXIONS, REFRACTIONS,
INFLEXIONS, ET LES COULEURS,

DE

L A L U M I E R E.

Par Monsieur LE CHEVALIER NEWTON.

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

SECONDE EDITION FRANCOISE,
beaucoup plus correcte que la premiere.

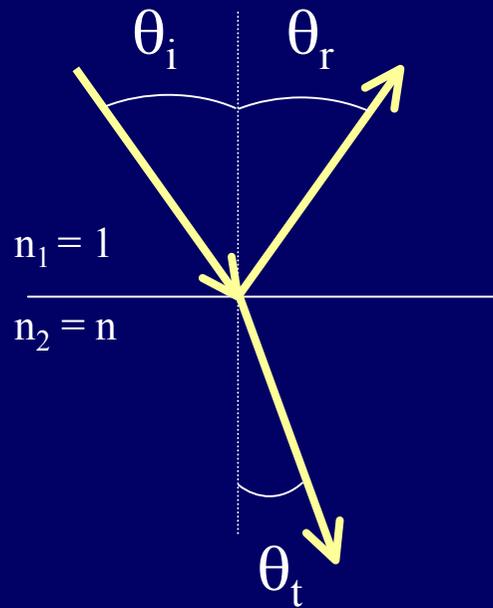


A P A R I S,

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

M. DCC. XXII.

Surface lisse



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.

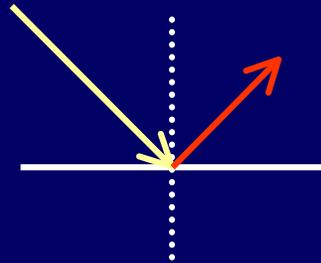
L'Angle de Reflexion est égal à l'Angle d'Incidence.

AXIOME IV.

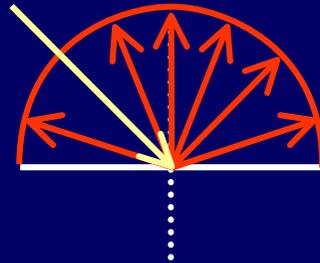
Quand un Rayon passe d'un Milieu plus rare dans un Milieu plus dense, la Refraction se fait en approchant de la Perpendiculaire, de sorte que l'Angle de Refraction se trouve moindre que l'Angle d'Incidence.

Surface rugueuse

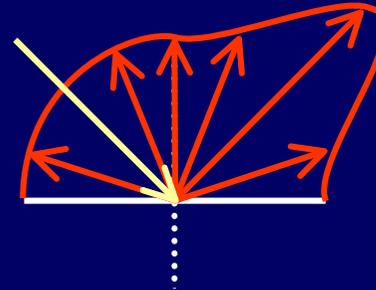
A l'échelle microscopique



surface spéculaire

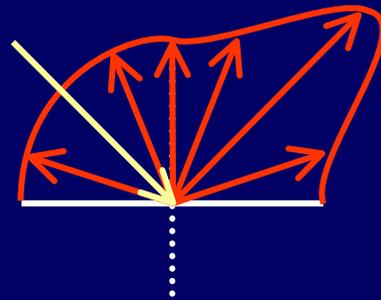


surface isotrope

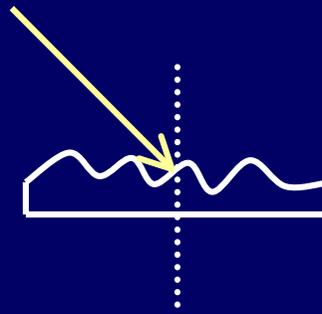


surface mixte

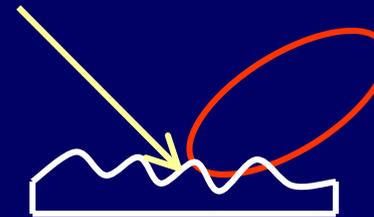
A l'échelle macroscopique



surface mixte

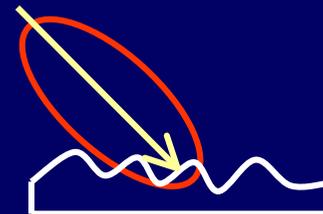


rugosité



diffusion avant

ou



diffusion arrière

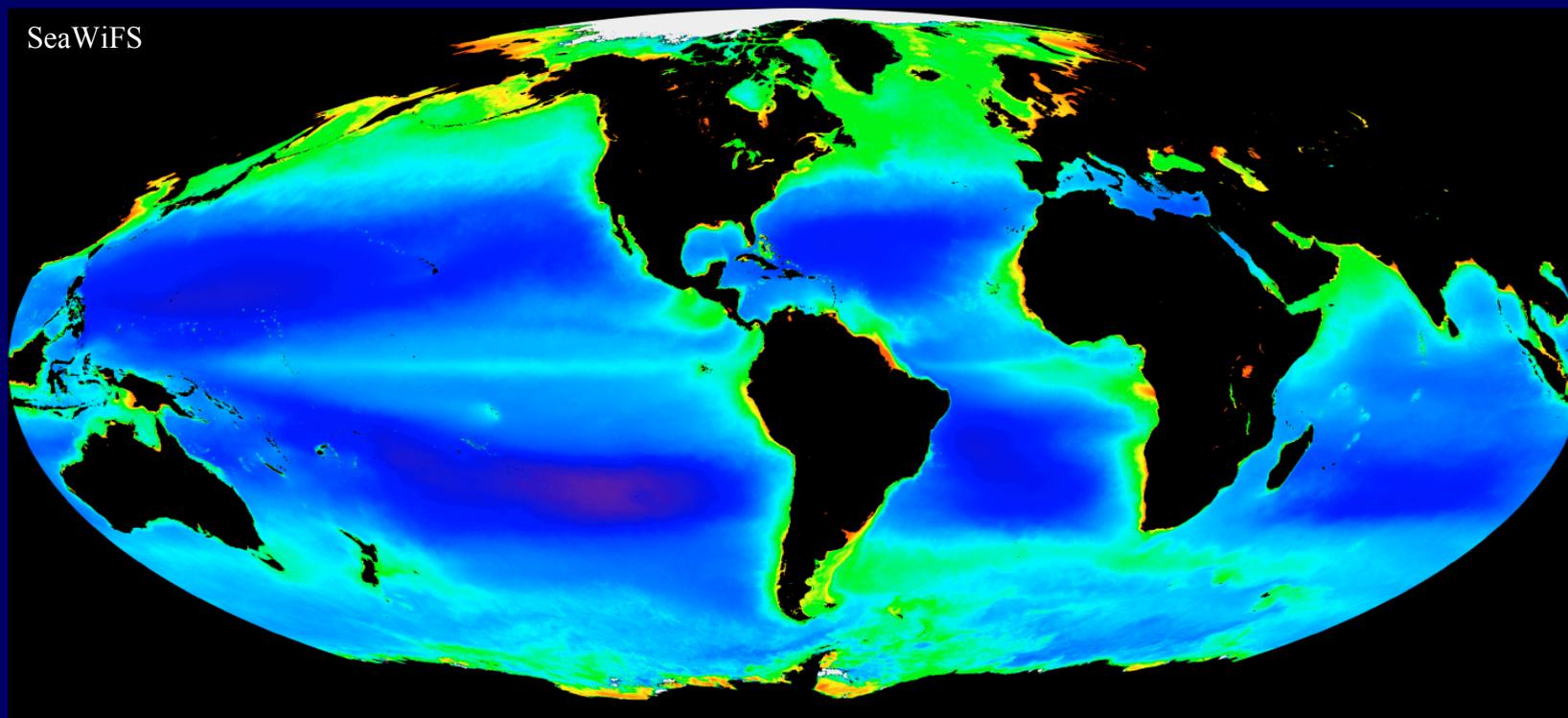
DIXIÈME PROPOSITION:

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.

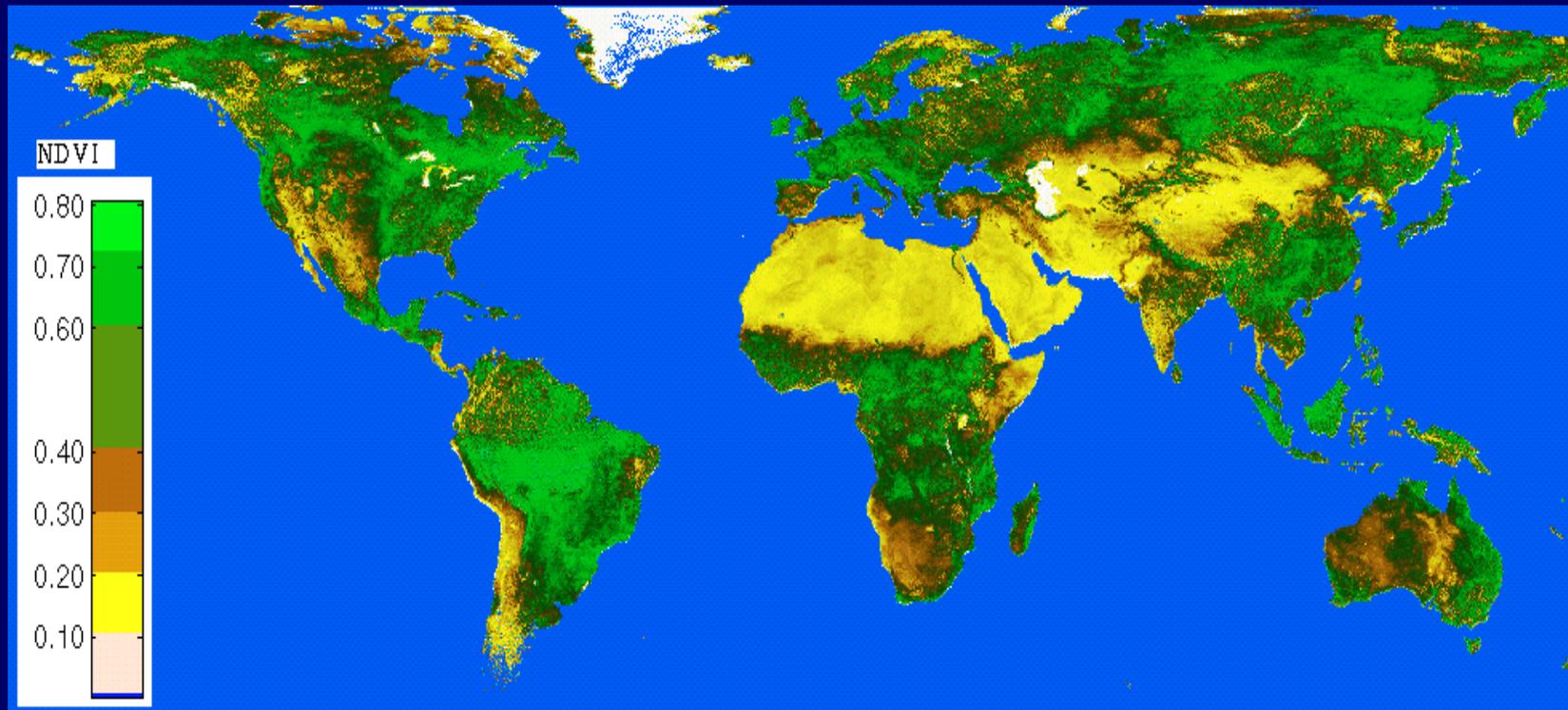
A l'échelle globale, les océans couvrent ~ 70% de la surface de la Terre



Source : Cyril Moulin (LSCE-IPSL)

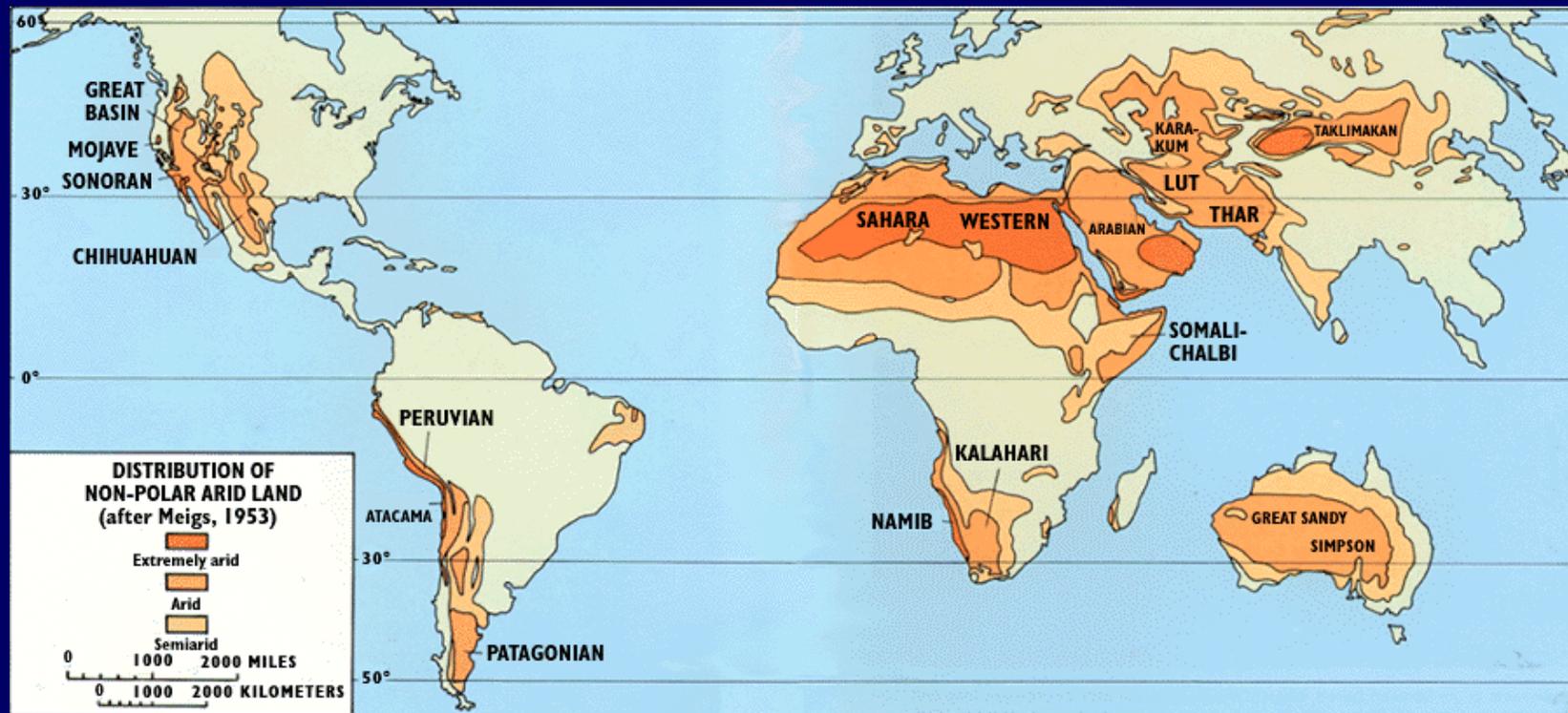
A l'échelle globale, les océans couvrent ~ 70% de la surface de la Terre

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



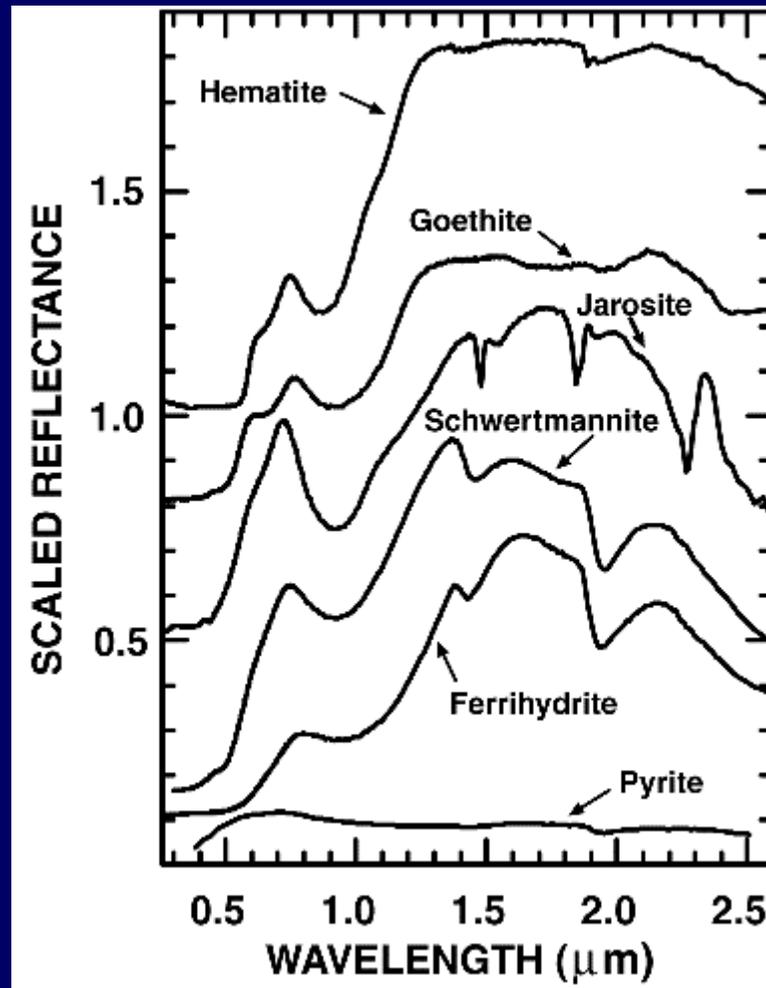
A l'échelle globale, les océans couvrent ~ 70% de la surface de la Terre

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



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.

Propriétés optiques des surfaces terrestres : les minéraux



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

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

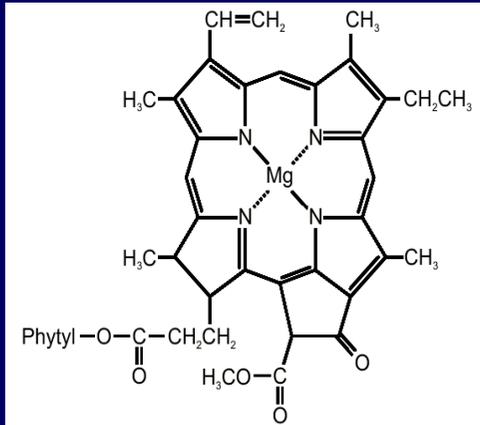
Jarosite : $\text{K Fe}^{3+}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6 \rightarrow$ sulfate

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

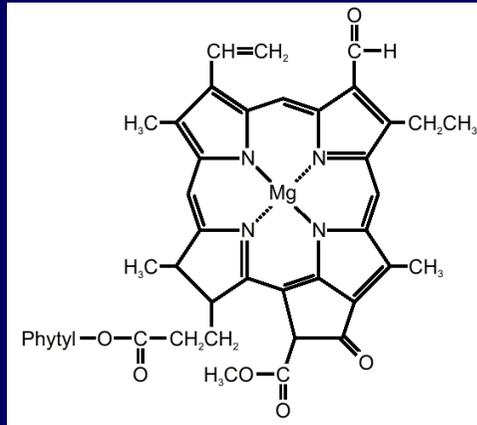
Ferrihydrite : $\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_3 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O}) \rightarrow$ oxide

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

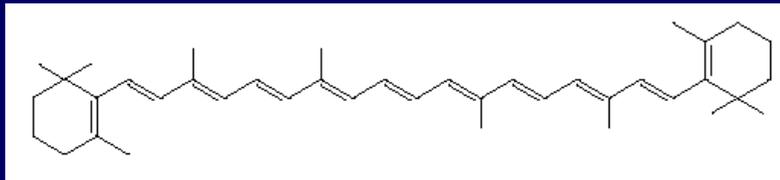
Propriétés optiques des surfaces terrestres : les pigments



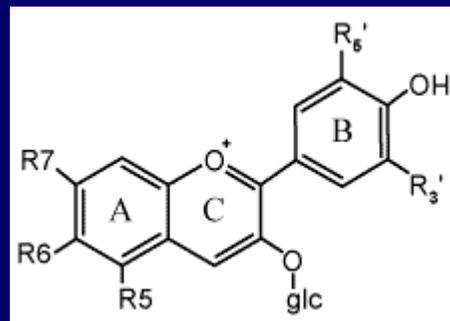
chlorophylle *a*



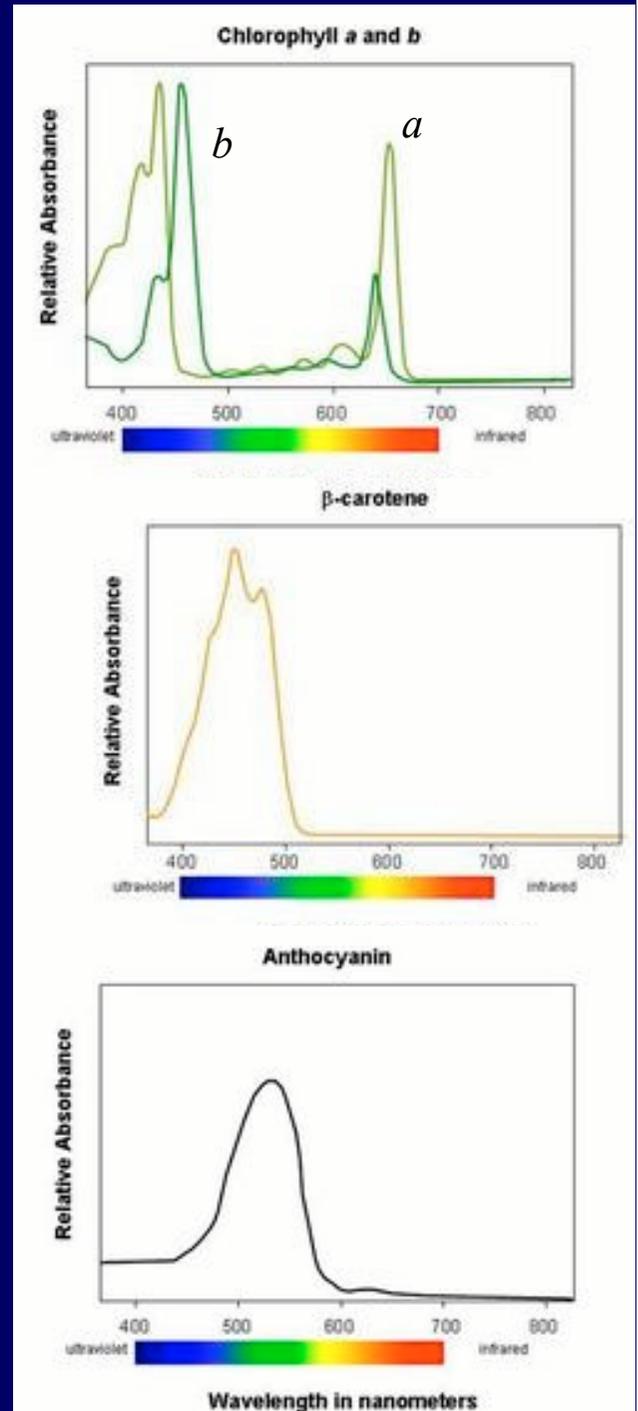
chlorophylle *b*

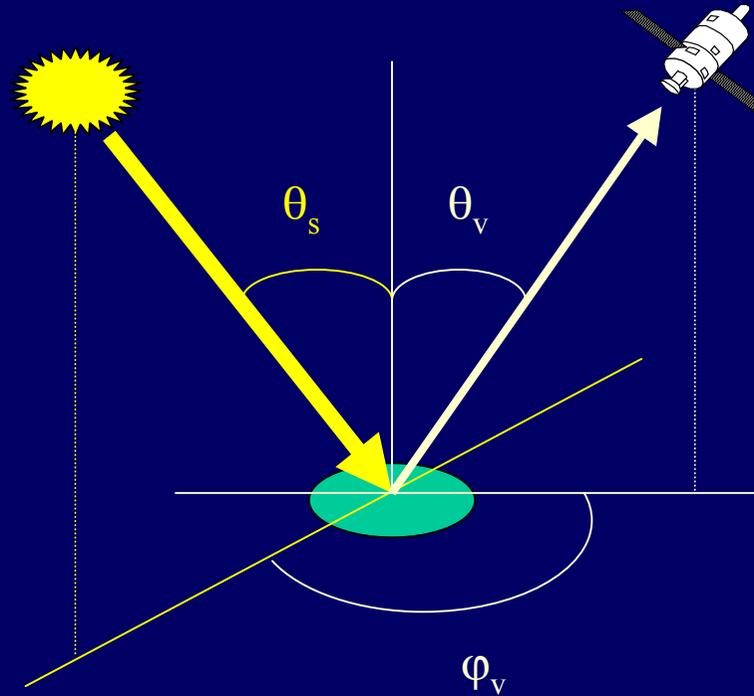


β -carotène



anthocyane + glucose





⇒ propriétés optiques directionnelles

θ_s = angle zénithal solaire ($0 < \theta_s < \pi/2$)

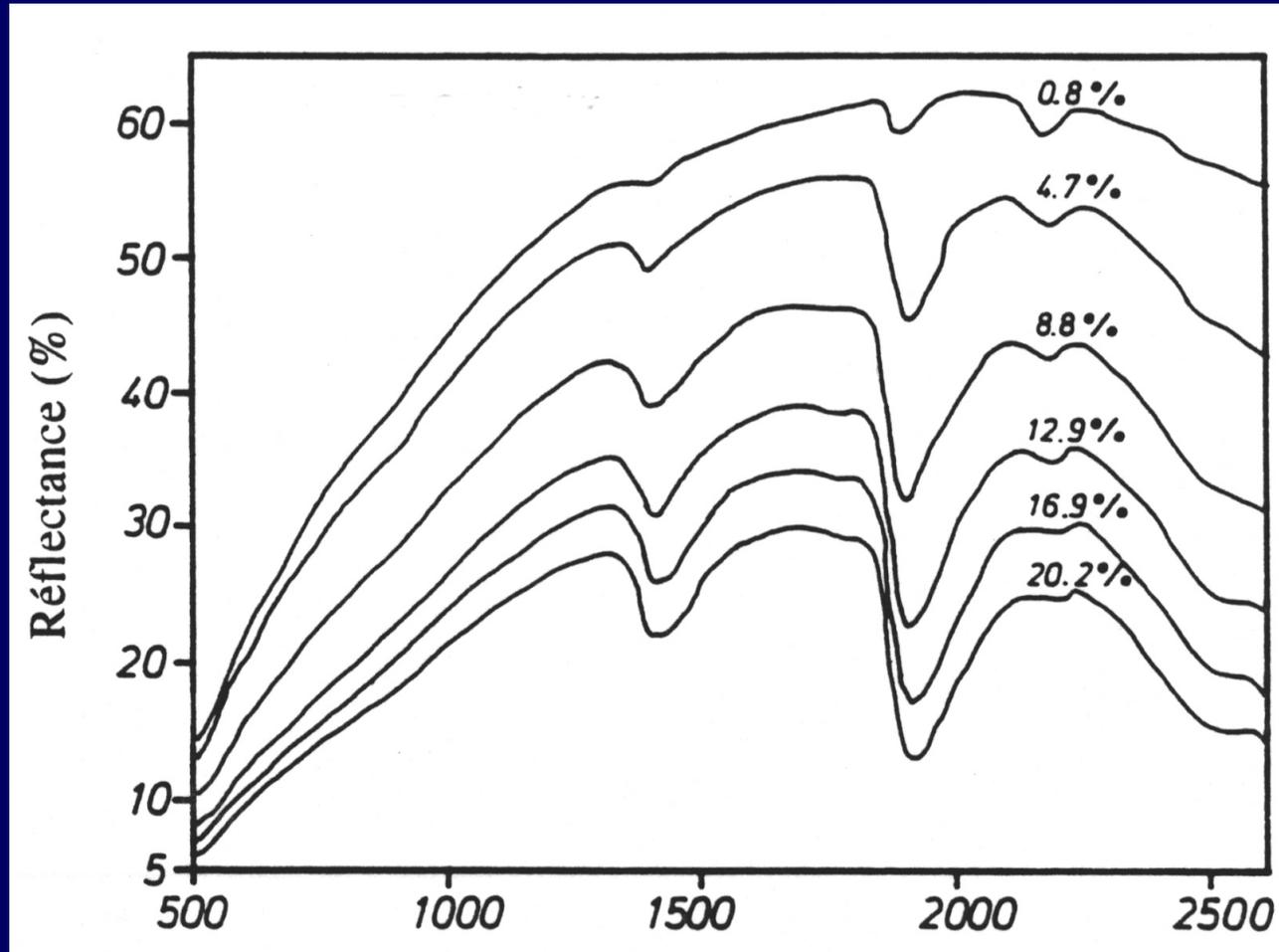
θ_v = angle zénithal de visée ($0 < \theta_v < \pi/2$)

ϕ_v = angle azimutal de visée relatif ($0 < \phi_v < 2\pi$)

⇒ propriétés optiques spectrales

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

Propriétés optiques des surfaces terrestres : les sols

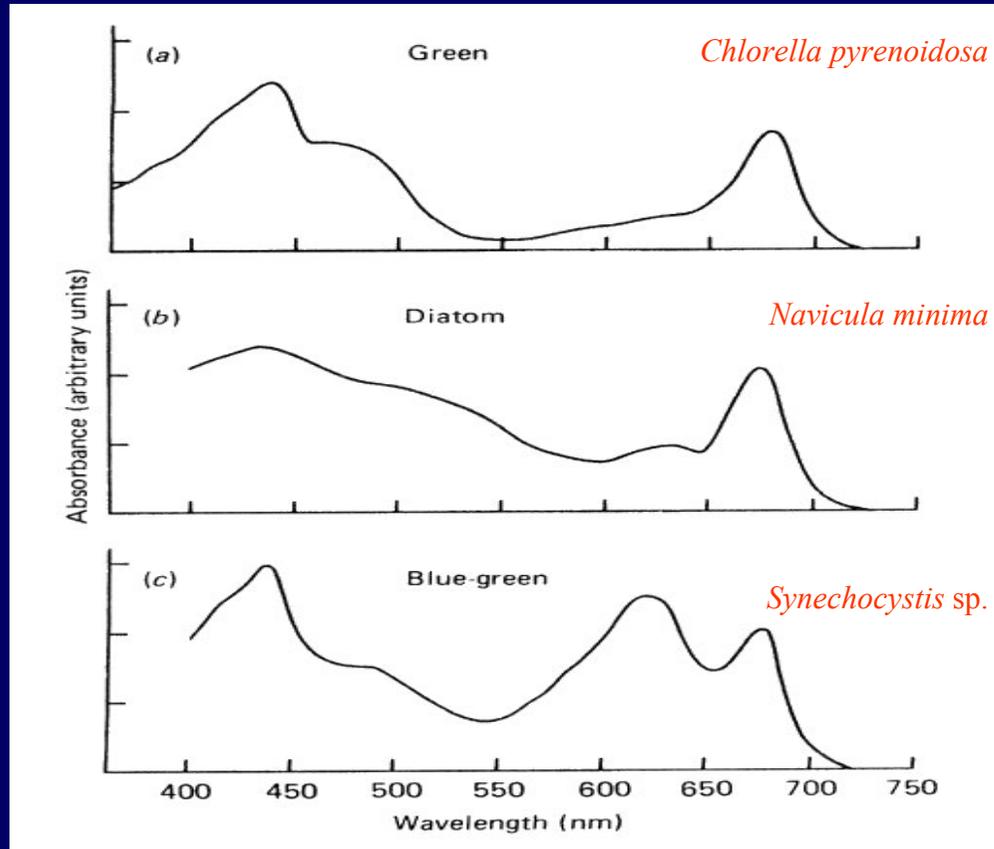
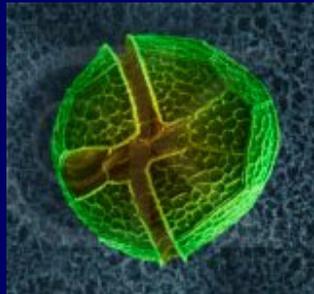
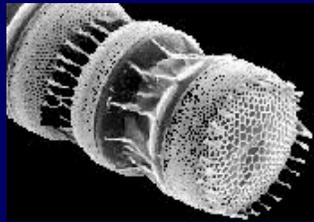


variation de teneur en eau

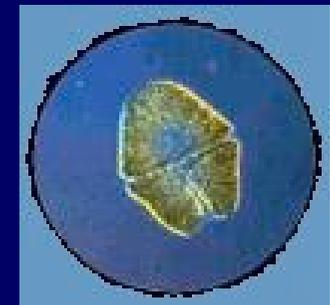
variation de couleur



Propriétés optiques des surfaces terrestres : le phytoplancton

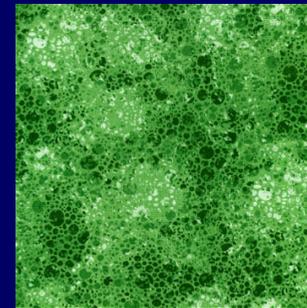
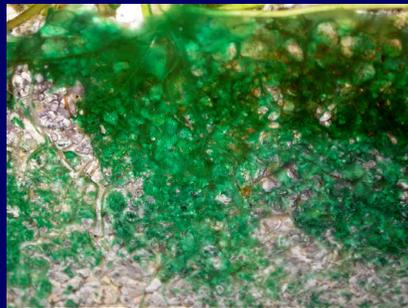
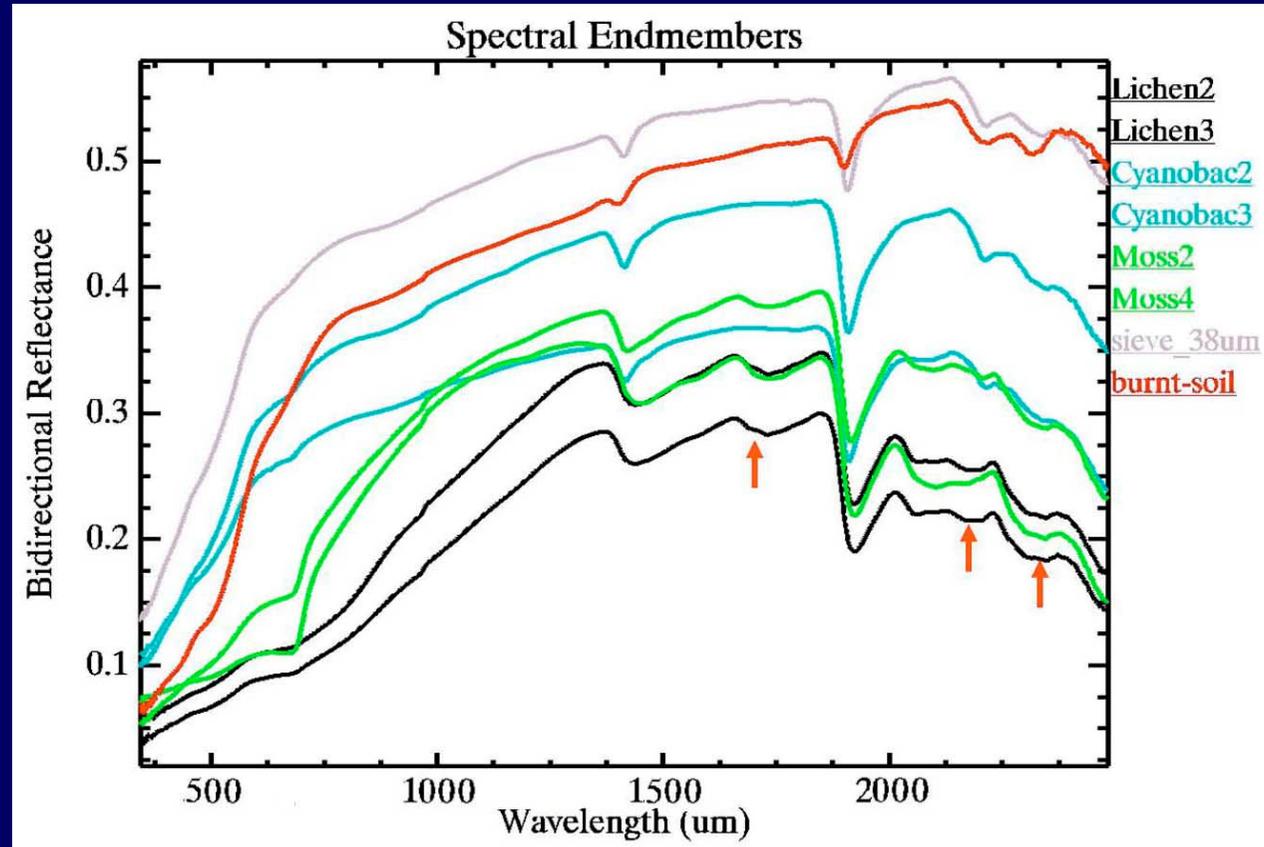


J.T.O. Kirk, 1994, *Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems*, Cambridge university Press, 509 pages.

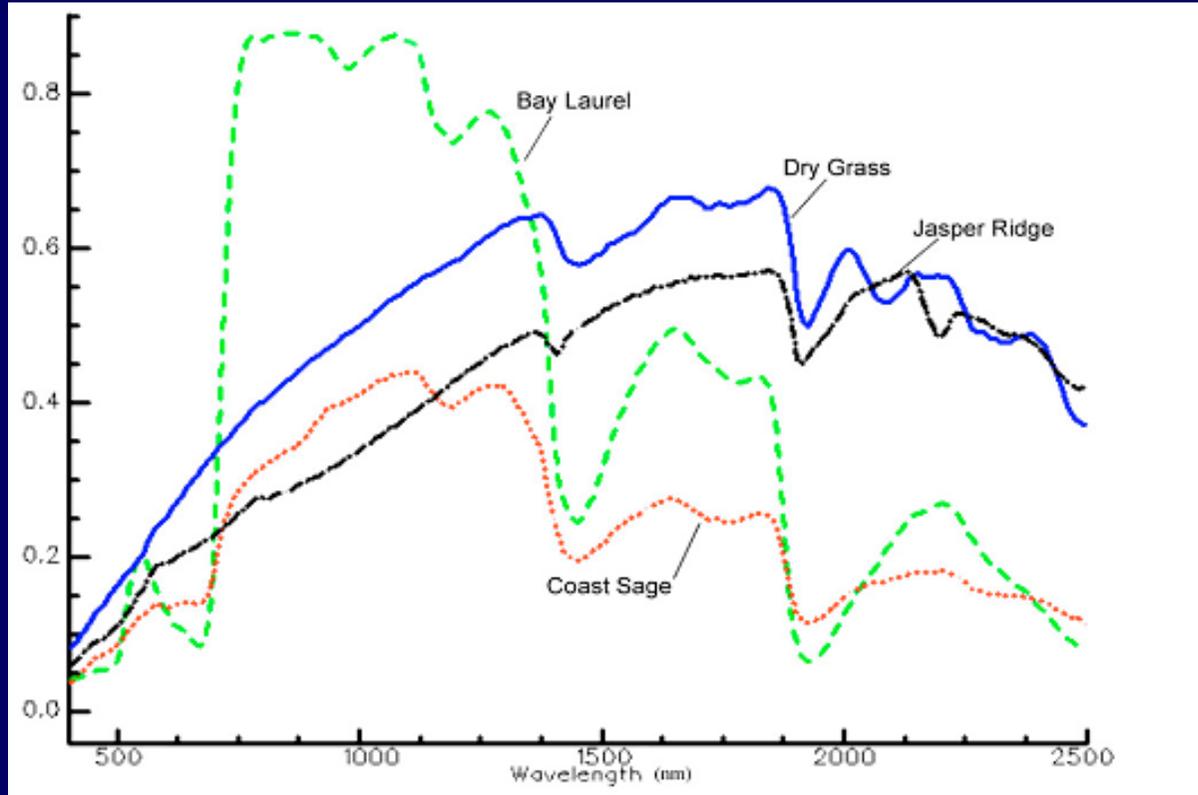


Propriétés optiques des surfaces terrestres : les végétaux inférieurs

Mojave ecosystem
Nevada Test Site
Source : Susan Ustin (UC Davis)

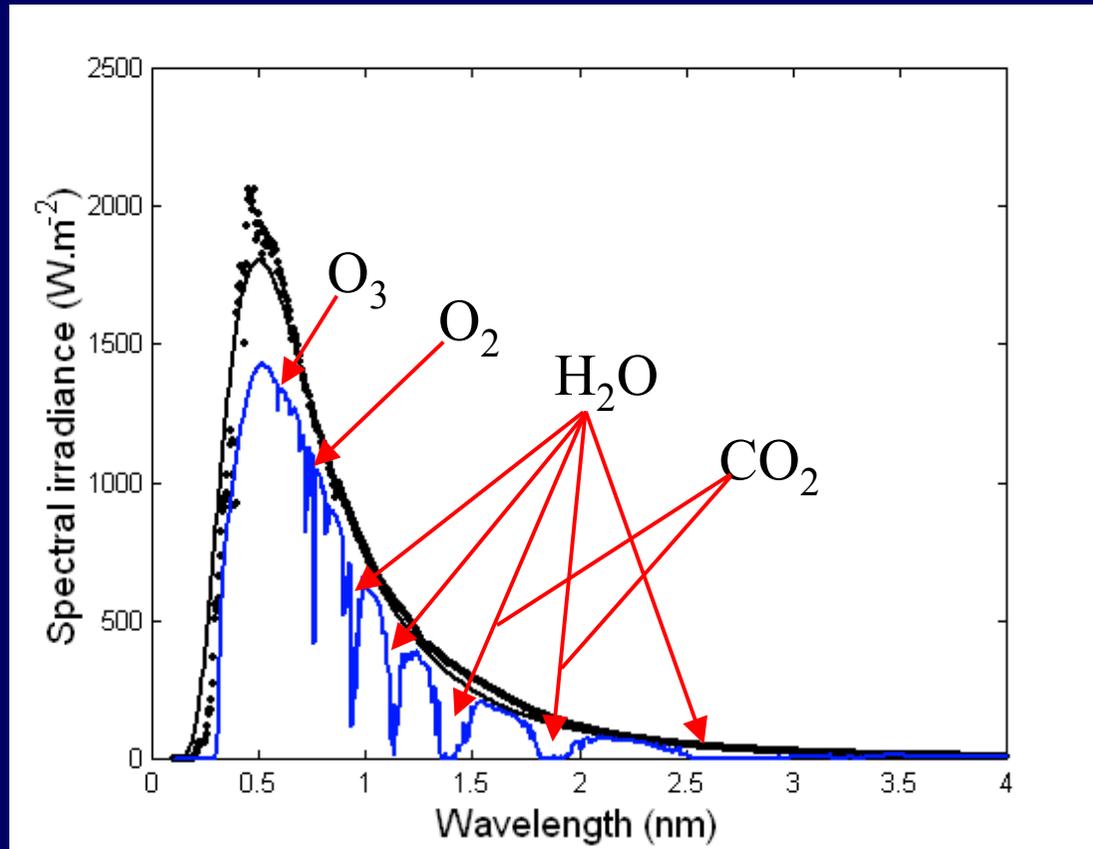


Propriétés optiques des surfaces terrestres : les végétaux supérieurs



IV. Bilan radiatif et d'énergie

IV.1. Bilan radiatif



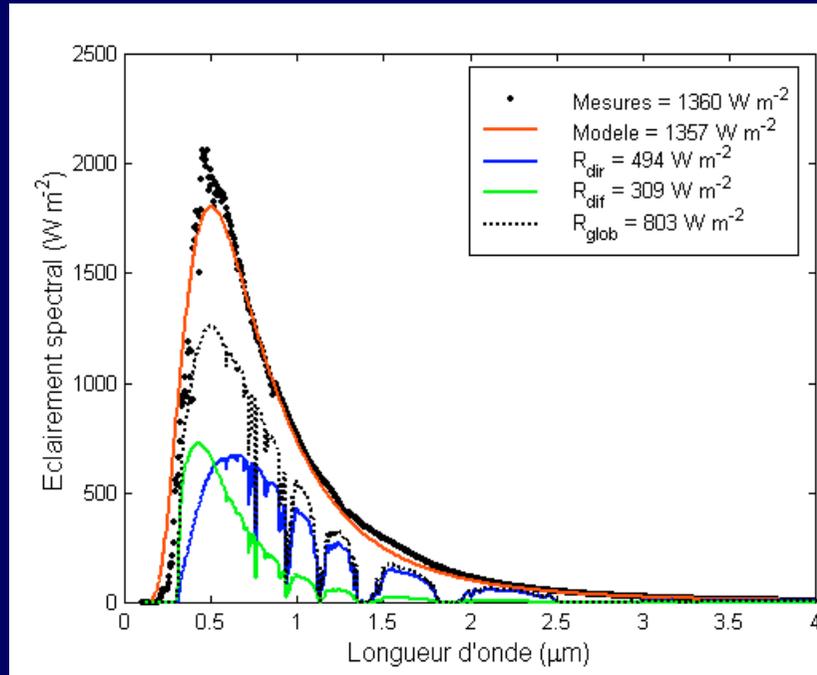
Modèles de transfert
radiatif

5S, 6S, MODTRAN
LOWTRAN,
HITRAN

- Réflectance de la surface
- Visibilité horizontale
- Modèle d'atmosphère
- Modèle d'aérosol

$R^*(\lambda, \theta)$

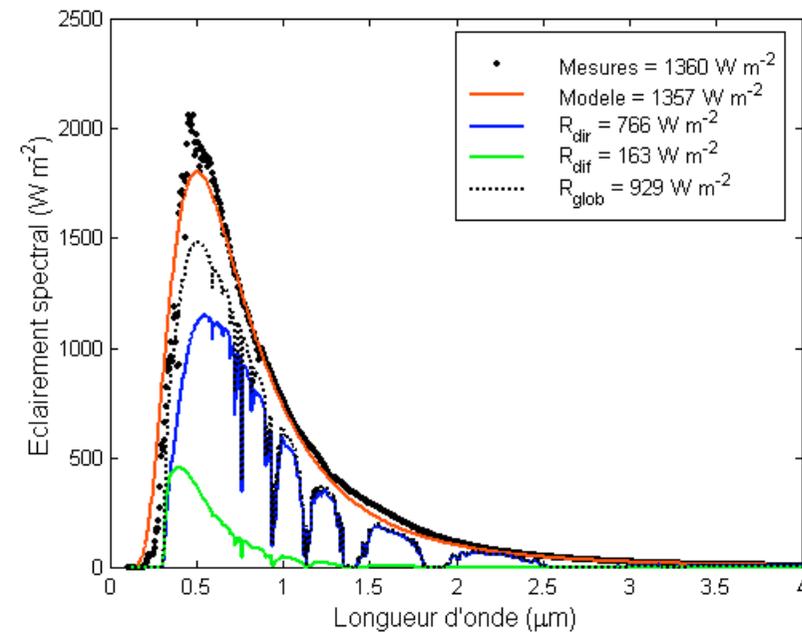
Ciel sans nuages



Paris ($45^{\circ}50'$ lat N, $2^{\circ}16'$ long E)
22 juin 2002, 12 h TU

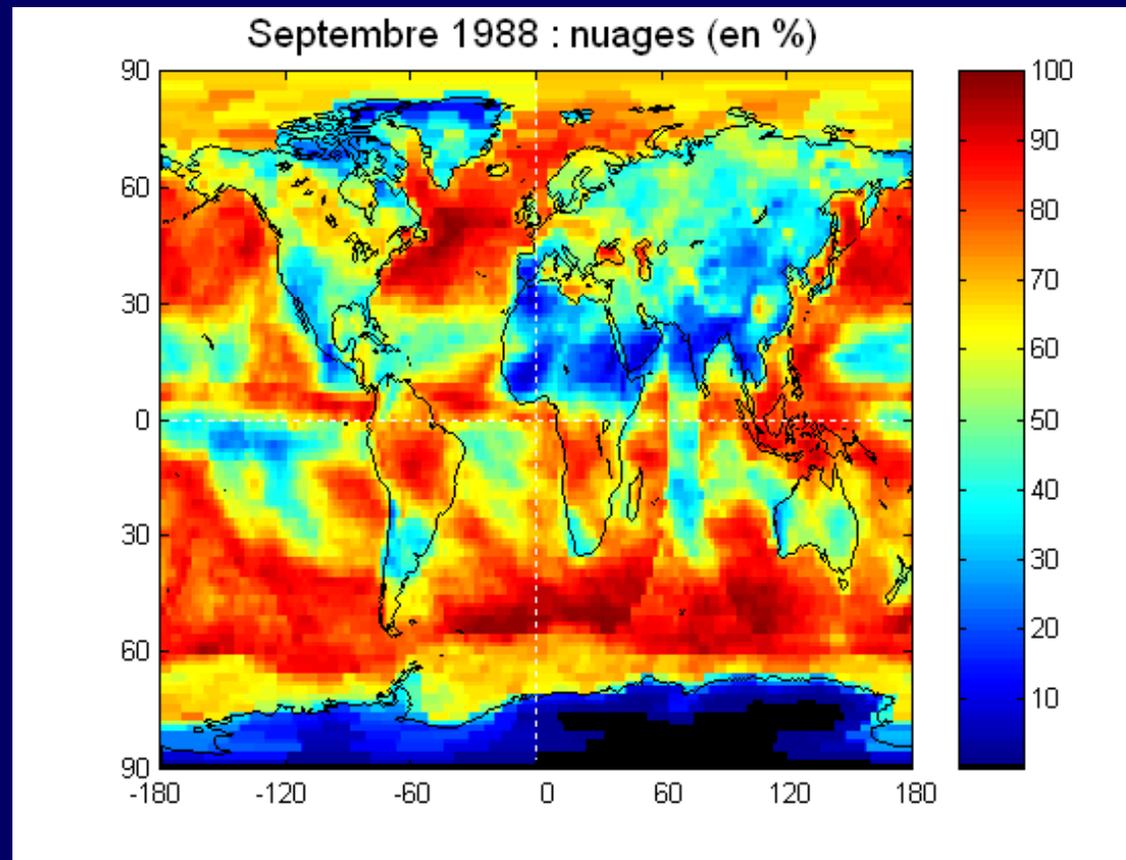
← visibilité horizontale $vis = 5 \text{ km}$

visibilité horizontale $vis = 25 \text{ km} \Rightarrow$



Ciel avec nuages

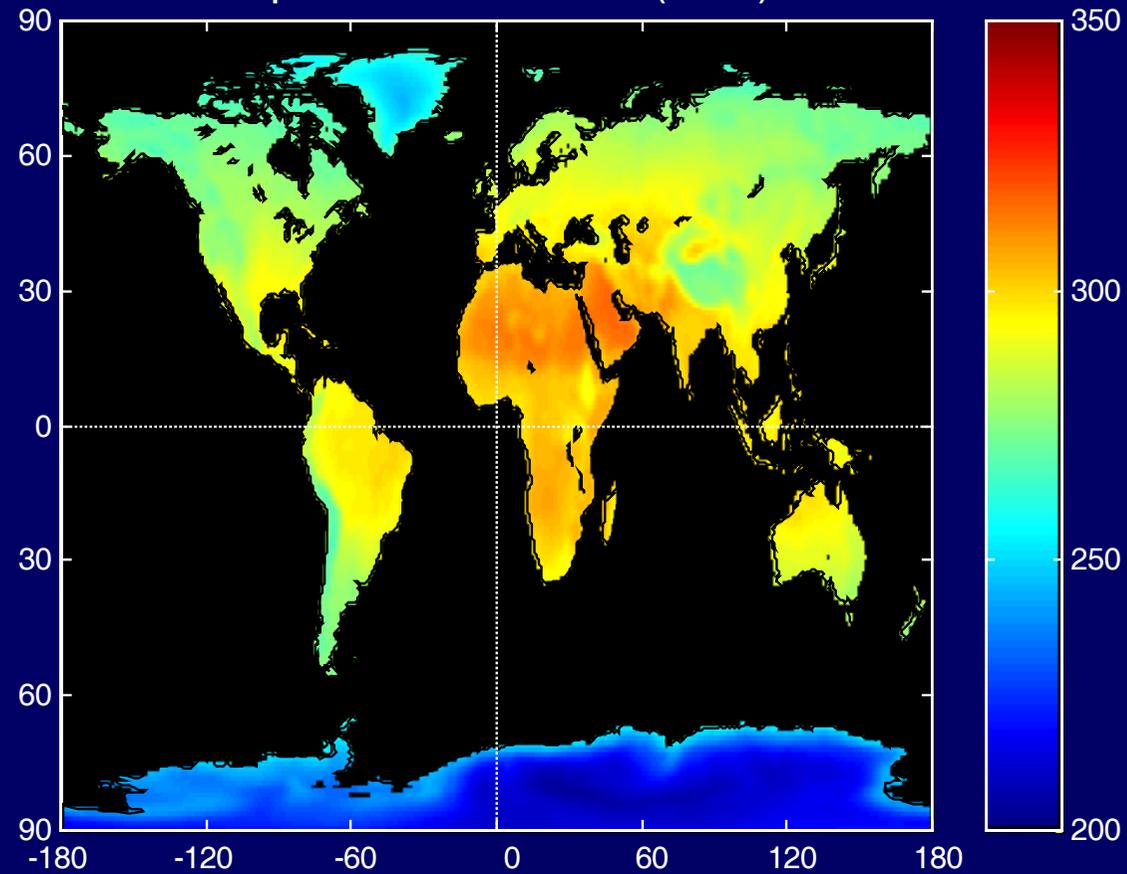
Nuages hauts	Transmittance	Nuages moyens	Transmittance	Nuages bas	Transmittance
cirrus	0.83	altocumulus	0.50	stratocumulus	0.34
cirrostratus	0.80	altostratus	0.41	stratus	0.25
				nimbostratus	0.18
				brouillard	0.17



Rayonnement atmosphérique

$$R_{L\downarrow} = (0,56 + 0,08\sqrt{e_a}) \sigma T_a^4$$

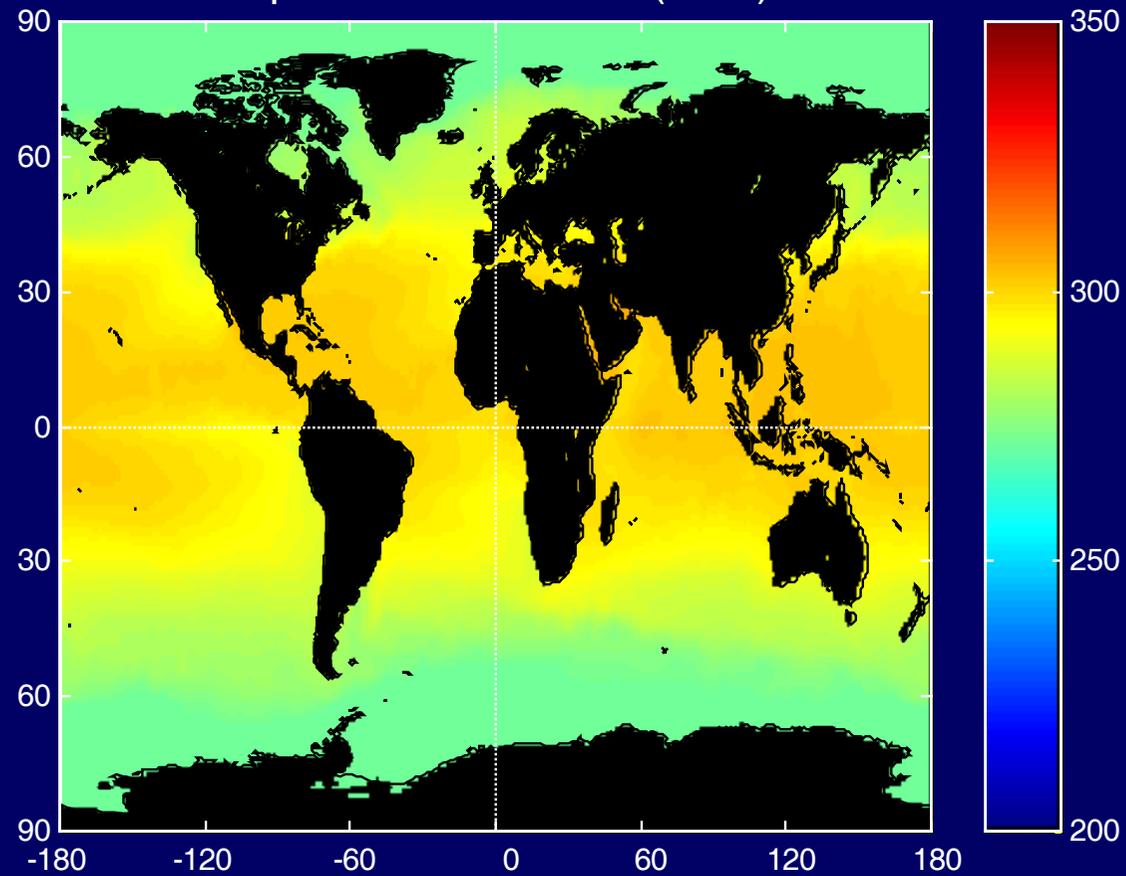
Septembre 1988 : T_a (en K)



Rayonnement terrestre

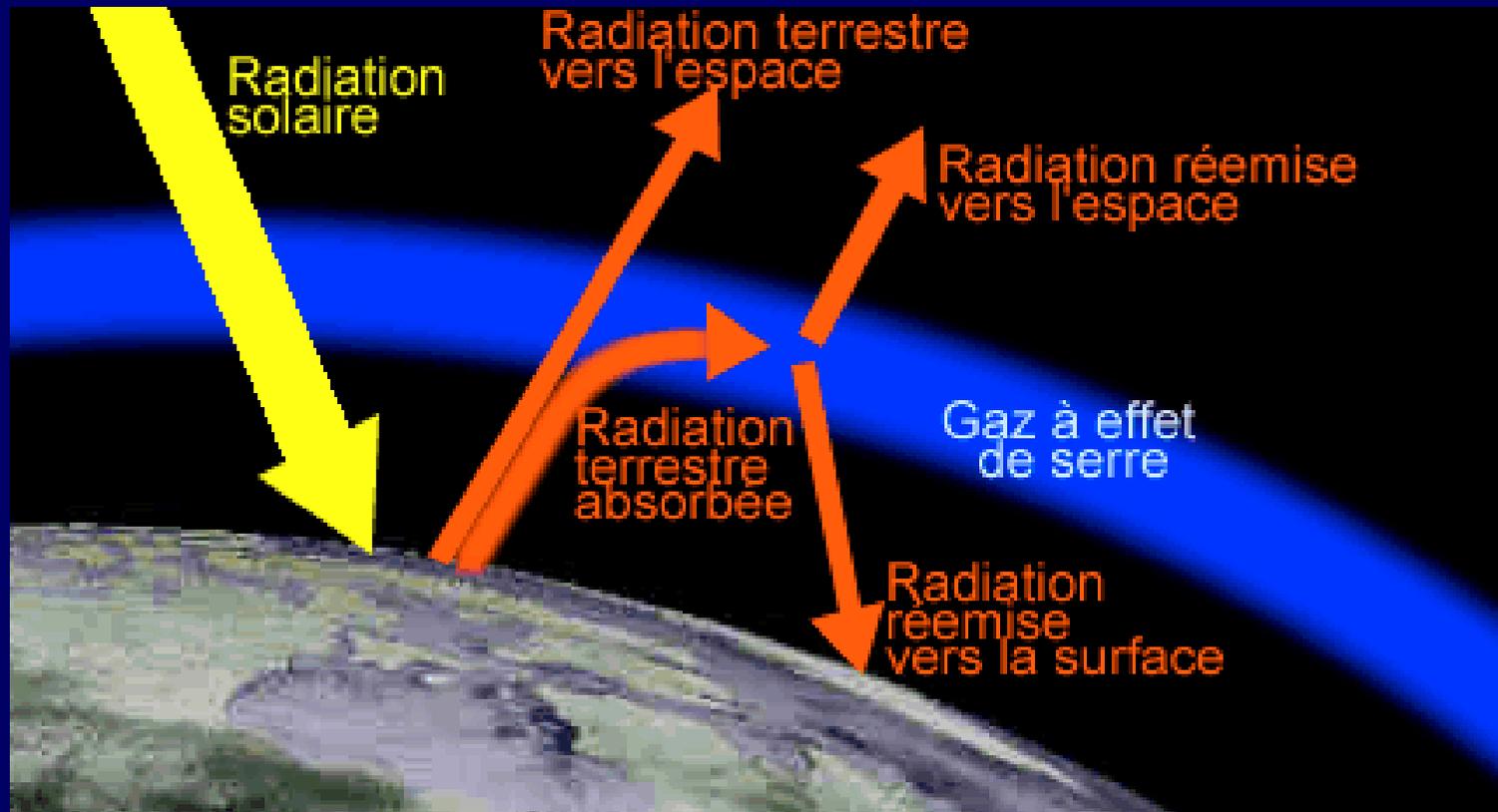
$$R_{L\uparrow} = \varepsilon \sigma T_s^4$$

Septembre 1988 : T_s (en K)

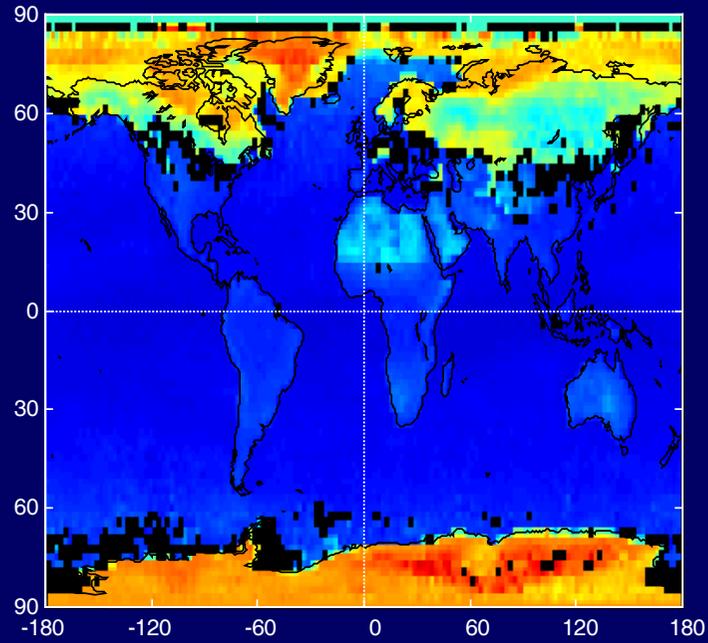


Rayonnement net

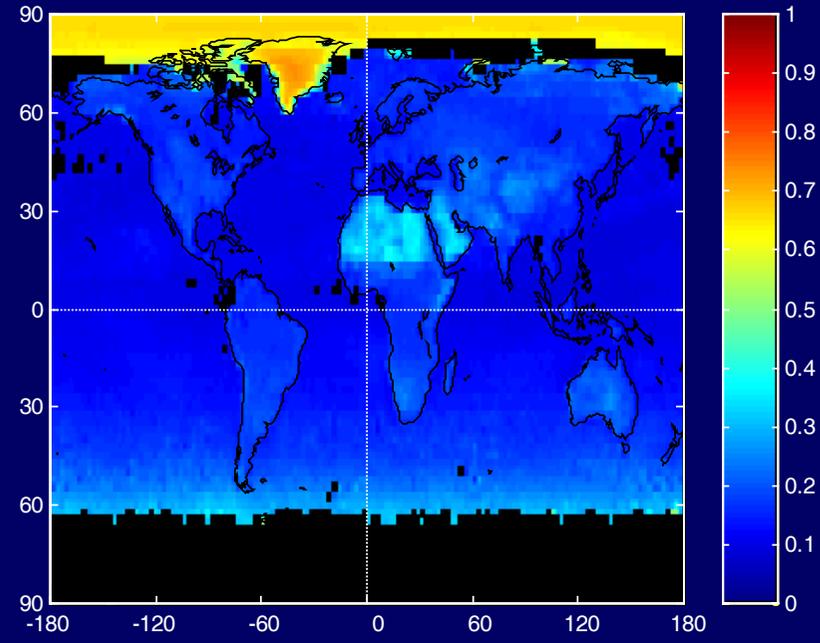
$$R_N = R_{glob} (1 - \alpha) + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow}$$



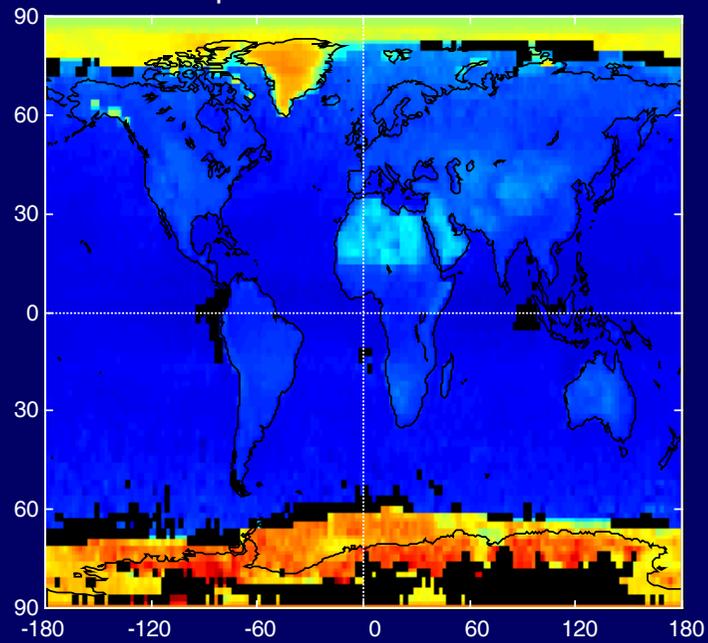
Mars 1988 : albedo



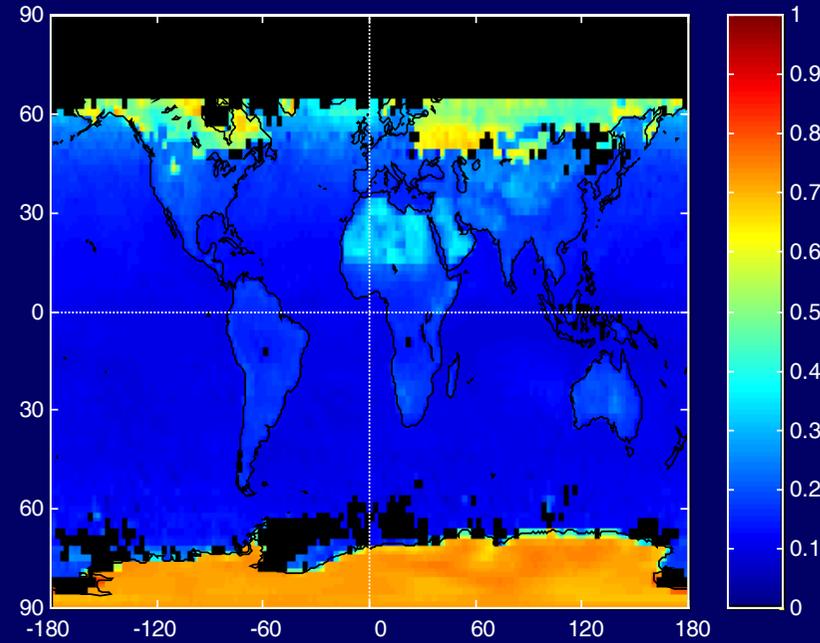
Juin 1988 : albedo



Septembre 1988 : albedo



Decembre 1988 : albedo



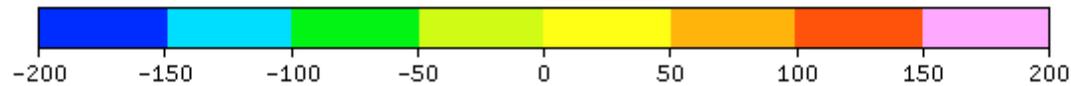
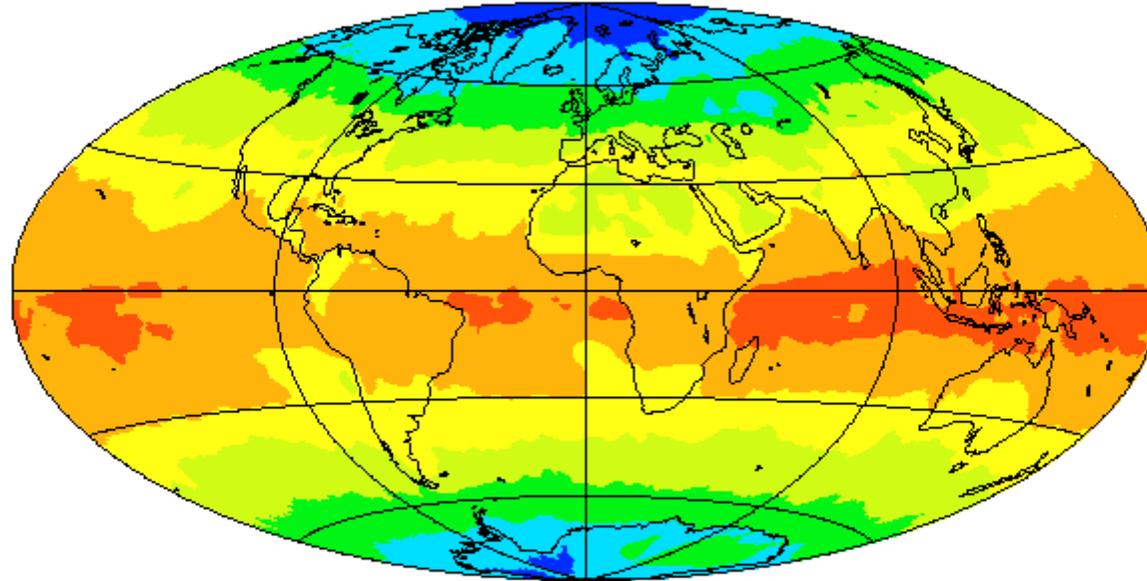
Earth's Radiation Budget Experiment (ERBE)

$$\text{Net Radiation}_{\text{TOA}} = \text{Net}_{\text{SW}} - \text{Net}_{\text{LW}}$$

NET RADIATION

NOAA10, 2.5 DEG SCANNER, MARCH 1988

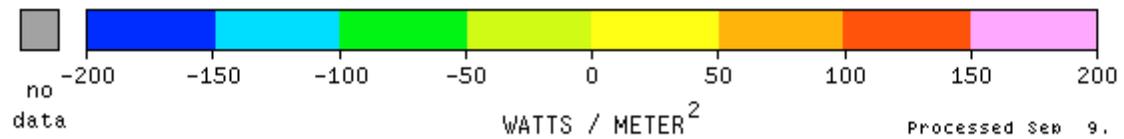
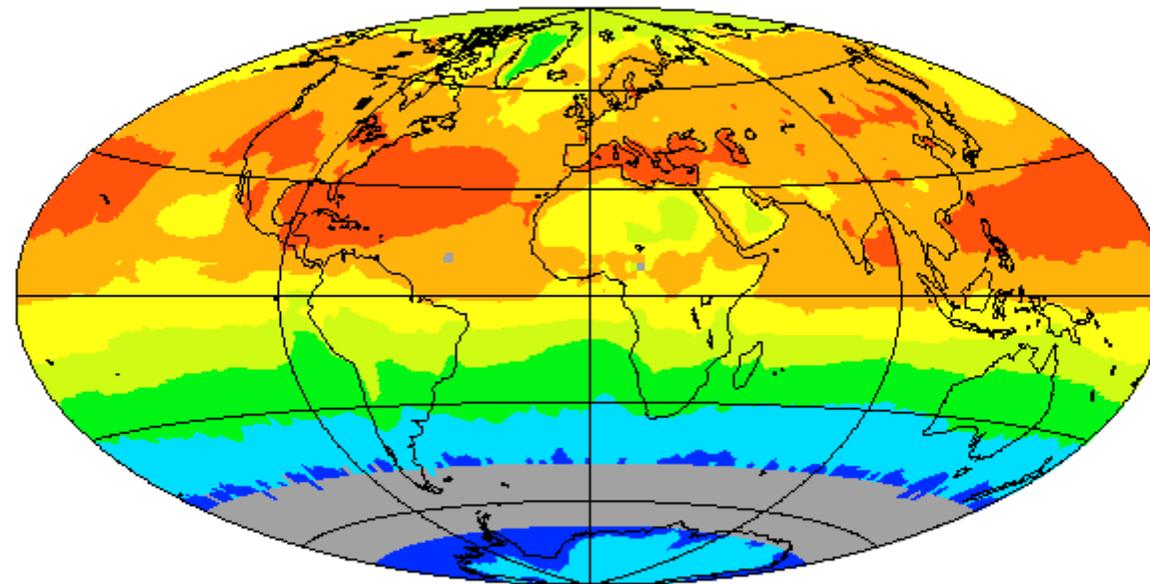
GLOBAL MEAN: (60S-60N = 32.5); (90S-90N = 12.9) W/M²



WATTS / METER²

Processed Aug 2, 1991

NET RADIATION
NOAA10, 2.5 DEG SCANNER, JUNE 1988
GLOBAL MEAN: (60S-60N = 14.0); (90S-90N = 8.7) W/M²



Processed Sep 9, 1991

IV.2. Bilan d'énergie

$$R_N = LE + G + H + s$$

R_N = rayonnement net

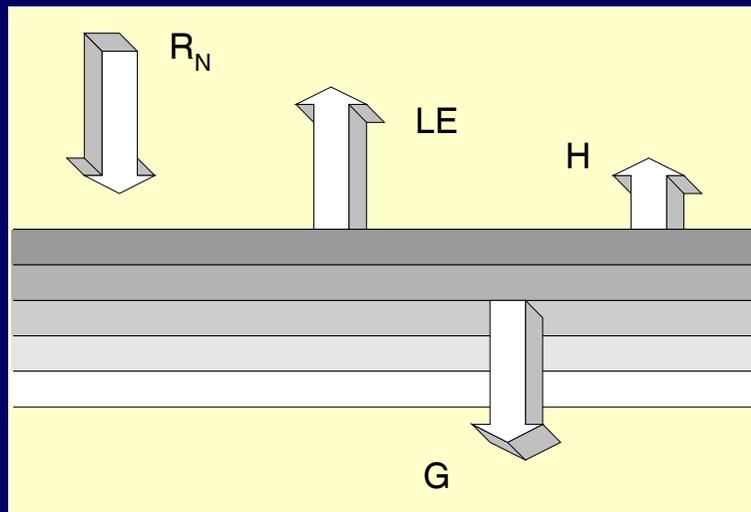
LE = flux de chaleur latente dans l'air

= chaleur latente de vaporisation de l'eau (2454 kJ kg^{-1}) \times masse d'eau évaporée par unité de temps

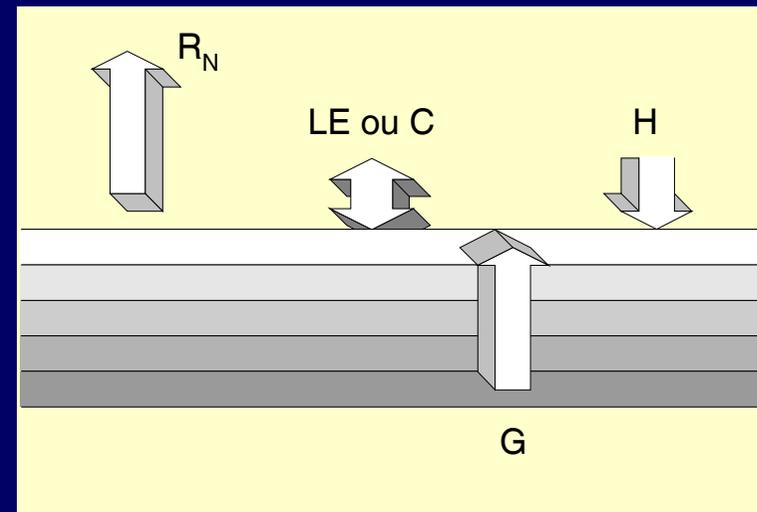
H = flux de chaleur sensible

G = flux de chaleur dans le sol

S = photosynthèse

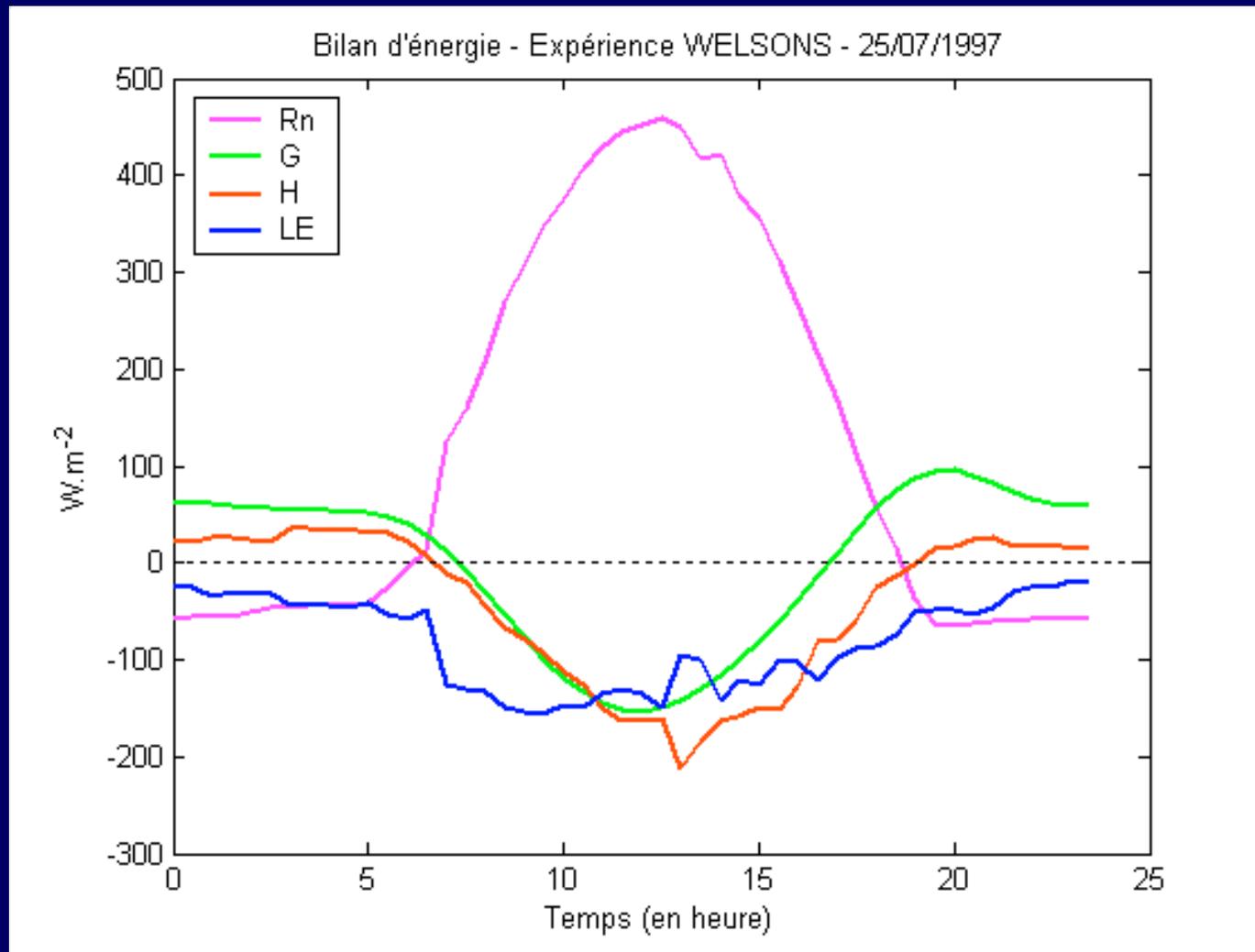


JOUR



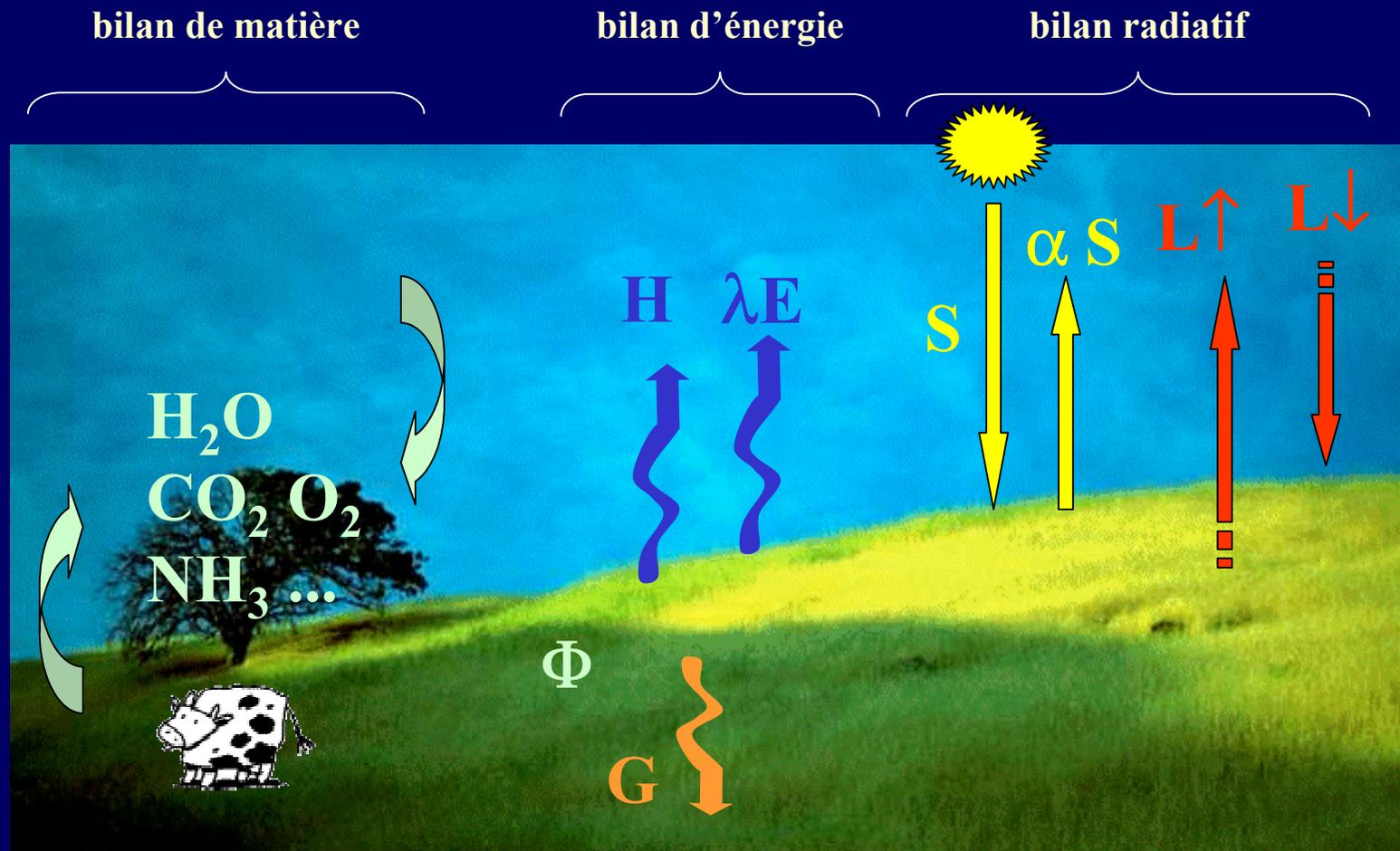
NUIT

Variations journalières sur un sol nu du nord de l'Espagne



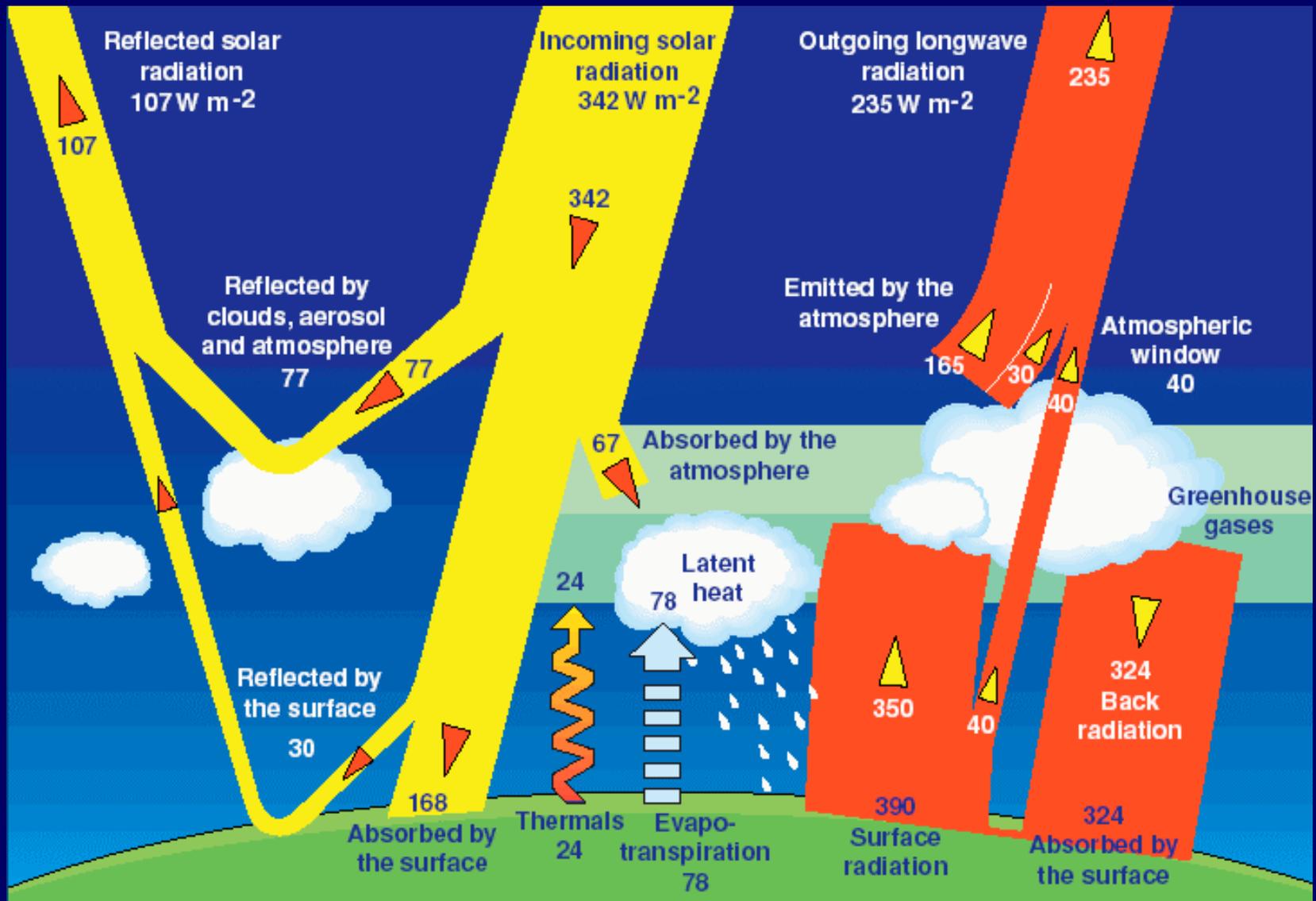
Source : Daniel Richard (IPGP)

IV.3. Couplage des bilans



Physique de l'environnement : étude des interactions entre les organismes vivants et leur environnement (Monteith, 2000) → échanges d'énergie et de matière dans le *continuum* sol-plante-atmosphère

flux solaire moyen (moyenne globale et annuelle) à la limite de l'atmosphère : 342 W m^{-2}



J.T. Kiehl, K.E. Trenberth, 1997, Earth's annual global mean energy budget, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(2):197-208.