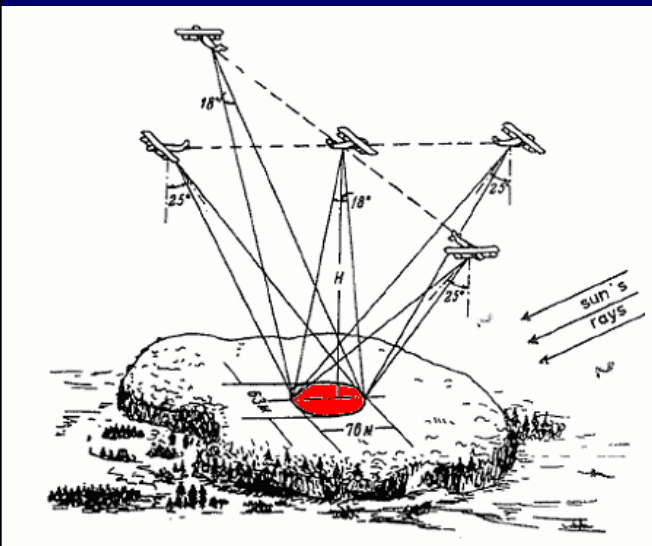
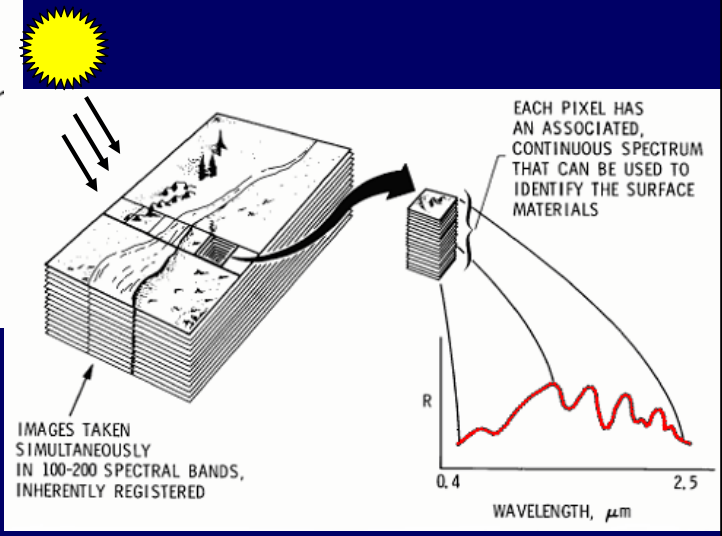
IX. Minéralogie et biochimie des surfaces

Réflectance spectrale et/ou directionnelle



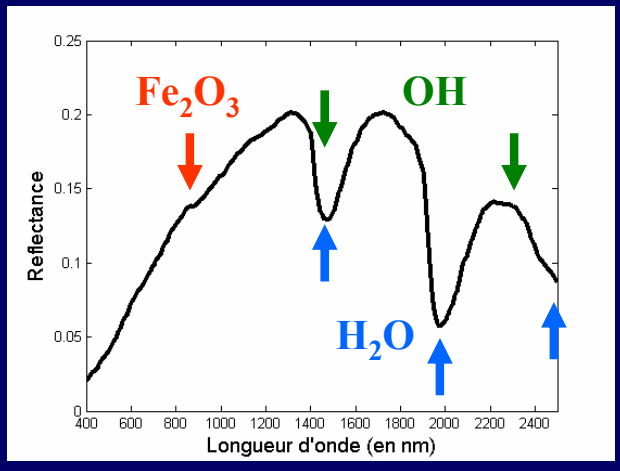
E.S. Arcybashev & S.V. Belov, 1958, The reflectance of tree species, In *Russian Data on Spectral Reflectance of Vegetation, Soil, and Rock Types* (D. Steiner & T. Guterman, eds), pp. 232. Juris Druck + Verlag Zurich.

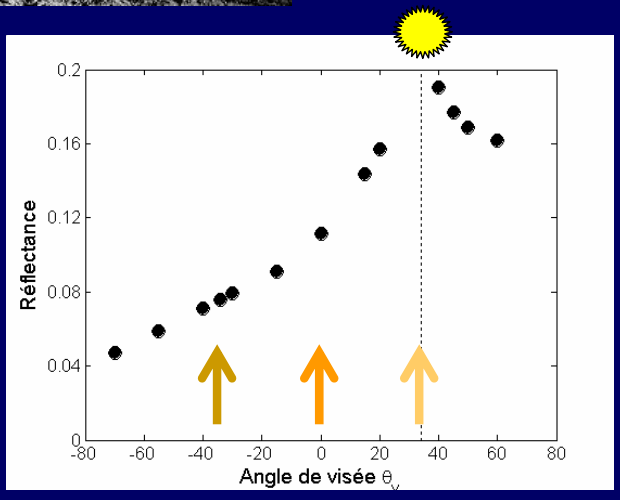


G. Vane & A.F.H. Goetz, 1988, Terrestrial imaging spectroscopy, *Remote Sensing of Environment*, 24:1-29.

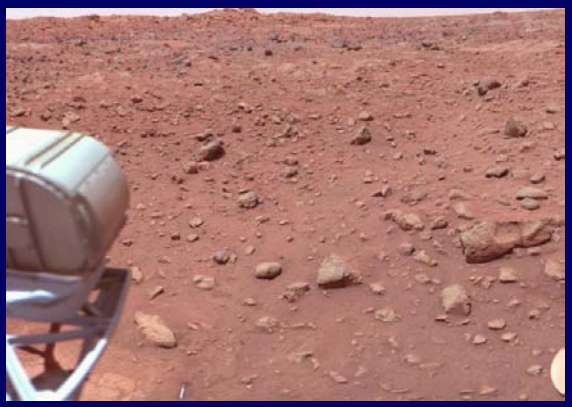
Réflectance des sols

Sol argileux





Réflectance spectrale des sols : les modèles de mélange



Viking 1 Lander, Mars, 20 juillet 1976

Un radiomètre multispectral :

- 0.465 µm (bleu)
- 0.545 µm (vert)
- 0.669 µm (rouge)
- 0.871 µm (infrarouge)
- 0.946 µm (infrarouge)
- 0.993 µm (infrarouge)

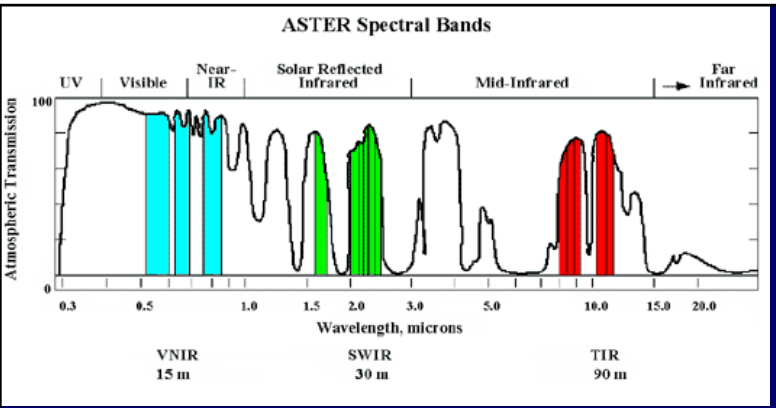
Un modèle de mélange :

$$\rho_s(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} f_i \times R_i(\lambda)$$

avec f_i la fraction et $R_i(\lambda)$ la réflectance du minéral i

⇒ palagonite = argile provenant de l'hydratation brutale du verre volcanique
⇒ andésite = roche volcanique gris-noir contenant entre 52% et 63% de silice

J.B. Adams, M.O. Smith & P.E. Johnson, 1986, Spectral Mixture Modeling: A New Analysis of Rock and Soil Types at the Viking Lander 1 Site, *Journal of Geophysical Research*, 91(B8):8098-8112

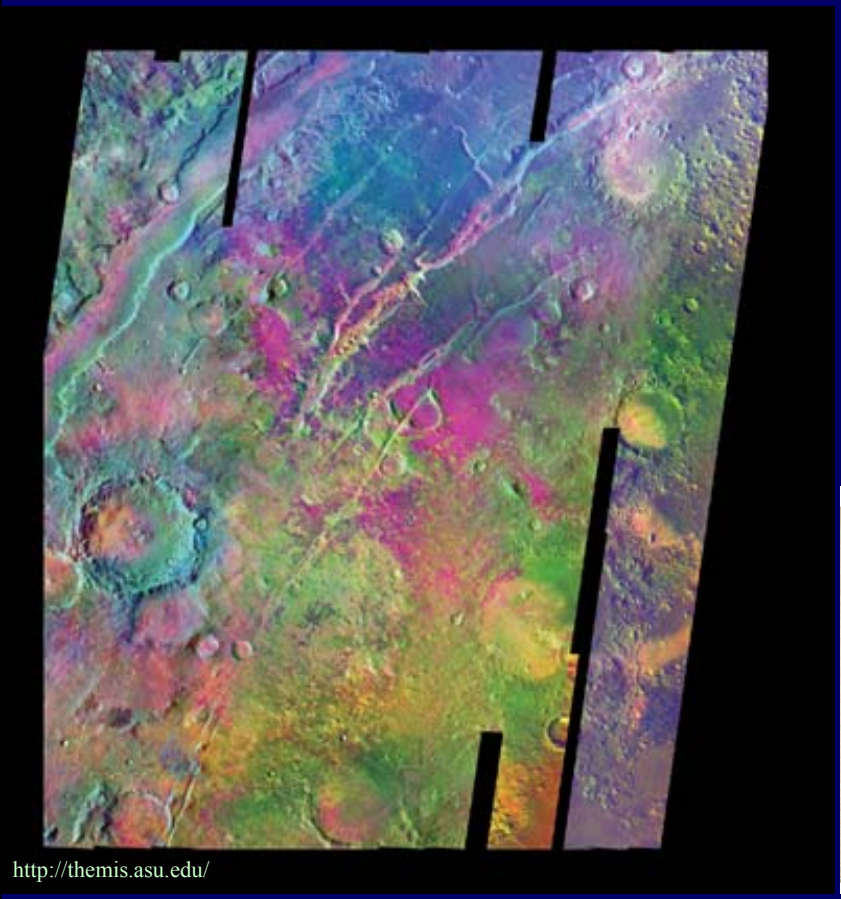


1 : 0.52-0.60 µm
2 : 0.63-0.69 µm
3 : 0.76-0.86 µm
4 : 1.600-1.700 µm
5 : 2.145-2.185 µm
6 : 2.185-2.225 µm
7 : 2.235-2.285 µm
8 : 2.295-2.365 µm
9 : 2.360-2.430 µm
10 : 8.125-8.475 µm
11 : 8.475-8.825 µm
12 : 8.925-9.275 µm
13 : 10.25-10.95 µm
14 : 10.95-11.65 µm

Composition colorée des bandes 1, 2, 3

Composition colorée des bandes 4, 6, 8

Image (30 km × 37 km) de la mine de Cu-Au-Ag d'Escondida (désert de l'Atacama, Chili) acquise par Terra–ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) le 23 avril 2000
⇒ télédétection de la minéralogie



http://themis.asu.edu/

Carte minéralogique de la Mars (Nili Fossae) obtenue à partir d'images THEMIS (*Thermal Emission Imaging System*) sur la sonde Mars Odyssey de la NASA. Les bandes 5 (9.35 µm, 1070 cm-1), 7 (11.04 µm, 906 cm-1), et 9 (12.57 µm, 796 cm-1) sont codées en bleu, vert et rouge. A l'intérieur de cette vaste région basaltique, les zones riches en olivine apparaissent en magenta et pourpre.

T.M. Hoefen, R.N. Clark, J.L. Bandfield, M.D. Smith, J.C. Pearl, & P.R. Christensen (2003) Discovery of olivine in the Nili Fossae region of Mars. *Science,* v. 302, p. 627-630.

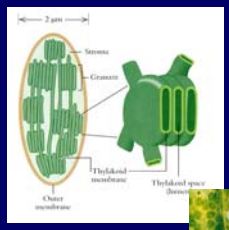
La végétation = source de bruit pour le géologue

- Elle cache les surfaces terrestres : état de surface, composition minéralogique des sols, topographie

La végétation = source d'information sur les processus de surface

- Elle joue un rôle primordial dans les échanges avec l'atmosphère
  → changements climatiques (échanges de CO_2)
- Elle contribue à la stabilité des sols
  → érosion gravitaire, éolienne ou pluviale
- Elle joue un rôle important dans la physico-chimie des sols
  → respiration (rapport C/N), altération chimique (carbonates)
- Elle est un indicateur de l'activité volcanique
  → réseau hydrothermal, dégazage (SO_2, CH_4, CO_2, etc.)

Approche



- Compréhension de l'absorption et de la diffusion du rayonnement électromagnétique par la matière (eau, pigments, parois cellulaires, etc.)
- Modélisation des propriétés optiques des couverts végétaux à différentes échelles (de la cellule à l'écosystème)
- Conception d'indices de végétation « biochimiques » et analyse de sensibilité

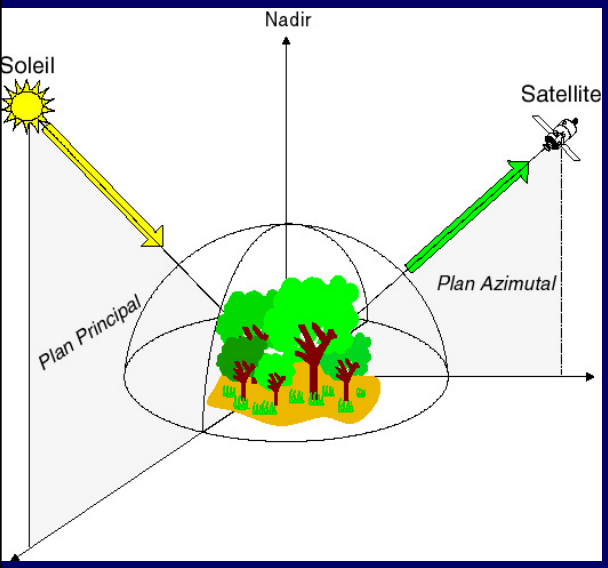
sens direct

sens inverse

- Cartographie de la composition biochimique des plantes et applications
- Inversion des modèles sur des images aéroportées ou spatiales
- Mesure de la réflectance spectrale à différentes échelles

Réflectance des couverts végétaux dans le domaine optique (0.4-2.5 µm)

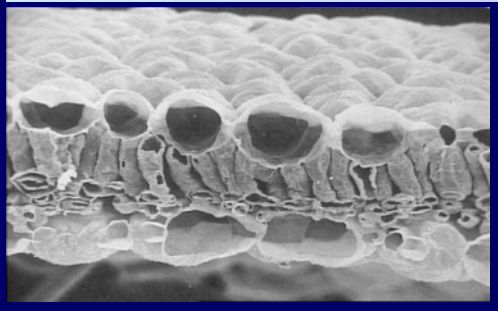
$$R(\lambda,\theta_s,\varphi_s,\theta_v,\varphi_v)=\frac{L(\lambda,\theta_s,\varphi_s,\theta_v,\varphi_v)}{E(\lambda,\theta_s,\varphi_s)}$$



La réflectance du couvert dépend :

- de la configuration de mesure
- de la réflectance du sol
- des propriétés optiques des feuilles
- de l'architecture du couvert
  - → indice folaire (LAI = *Leaf Area Index*)
  - → distribution d'inclinaisons des feuilles
  - → diamètre des feuilles / hauteur du couvert
  - → de la fraction de couverture
  - → etc.
- des conditions d'éclairement : diffus / direct

Une feuille



150 µm

Un couvert végétal

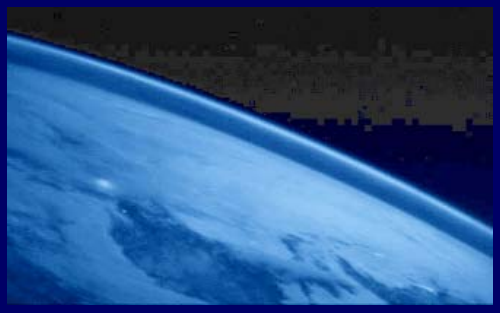
5 m

Un sol

50 cm

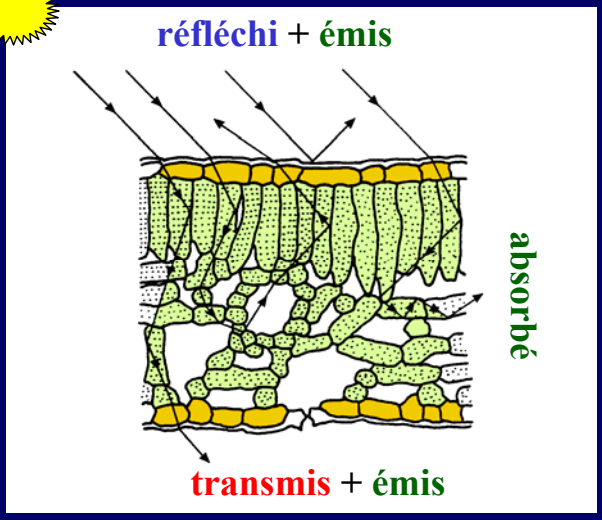
La Terre

70 km



Propriétés optiques des feuilles

Tessa Traeger, 1997, Sight



T.R. Sinclair, M.M. Schreiber & R.M. Hoffer, 1973, Diffuse reflectance hypothesis for the pathway of Solar radiation through leaves, *Agronomy Journal*, 65:276-283

MÉMOIRE
sur les Couleurs des Végétaux.

PAR M. ACHARD.

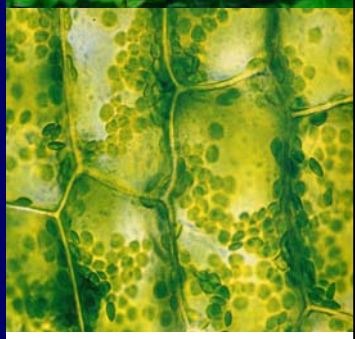
PREMIERE PARTIE.

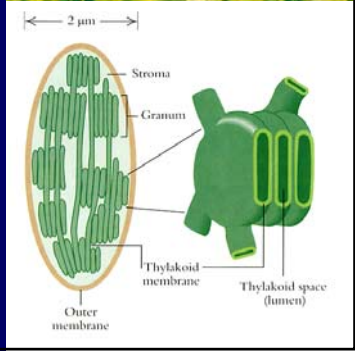
Les Phyſiciens ſont encore très peu d'accord ſur la cauſe à laquelle l'on doit attribuer la couleur des fleurs & des autres parties des végétaux; il paroît même que ce ſujet n'a encore été examiné par perſonne dans un détail ſuffiſant. Le célebre Hales, qui dans l'analyſe qu'il a faite des végétaux paroît avoir eu principalement en vue de déterminer la quantité d'air qu'ils contiennent, attribue dans ſa Statique des Végétaux Chap. 7. p. 277 les couleurs des fleurs aux principes aëriens ſubtiliſés. Bécher dans ſa Phyſique ſouterraine & Stahl dans ſes Élémens de Chymie attribuent la couleur verte des végétaux au fer que l'on trouve, ſuivant les expériences que Lémeri rapporte dans un Mémoire imprimé dans les Mémoires de l'Académie de Paris de l'Année 1706, dans les cendres des matieres végétales. Henckel paroît n'être pas décidé, s'il doit attribuer la couleur verte des végétaux au fer ou au cuivre. L'illuſtre Pott attribue dans ſa Lithogéognoſie indiſtinctement la couleur de tous les corps naturels au phlogiſtique.

F.K. Achard, 1778, Mémoire sur les Couleurs des Végétaux. Première partie, *Nouveaux Mémoires de l'Académie Royale des Sciences et Belles-Lettres de Berlin*, 1:62-69.

Composition biochimique des feuilles

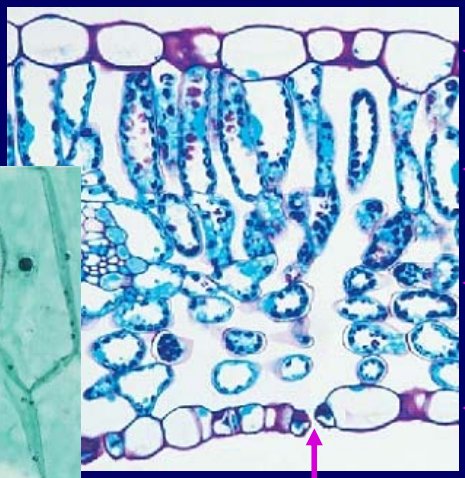
- eau (vacuole) : 90-95%
- matière sèche (parois cellulaires) : 5-10%
  - cellulose : 15-30%
  - hémicellulose : 10-30%
  - protéines : 10-20%
  - lignine : 5-15%
  - amidon : 0.2-2.7%
  - sucres
  - etc.
- chlorophylles *a* and *b* (chloroplastes)
- autres pigments
  - caroténoïdes : β-carotène, xanthophylles
  - anthocyanes, flavones
  - pigments bruns
  - etc.





Structure anatomique d'une feuille de dicotylédone

coupe transversale



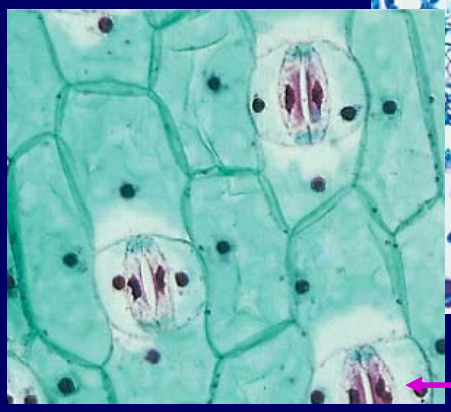
épiderme supérieur

parenchyme palissadique

parenchyme lacunaire

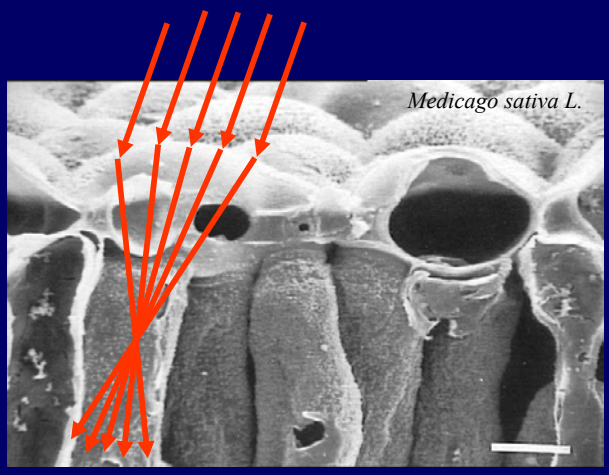
épiderme inférieur

épiderme inférieur



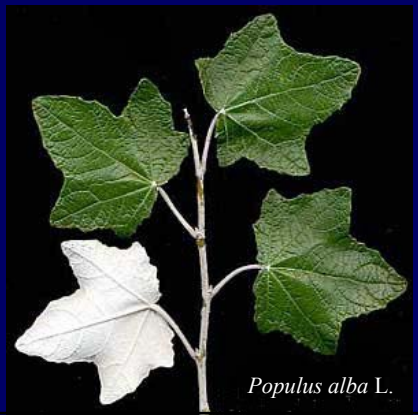
stomate

Interception de la lumière



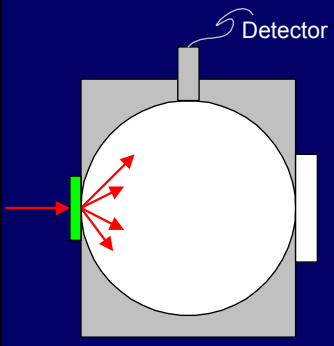
D.W. Lee, 1986, Unusual strategies of light absorption in rain-forest herbs, in *On the Economy of Plant Form and Function* (T.J. Givnish, ed), Cambridge University Press, pp. 105-131.

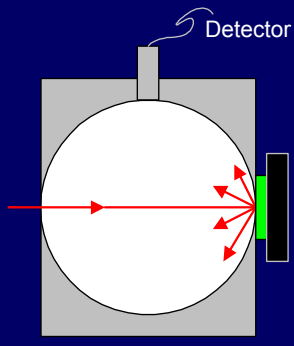
D.W. Lee & J.B. Lowry, 1975, Physical basis and ecological significance of iridescence in blue plants, *Nature*, 254:50-51.

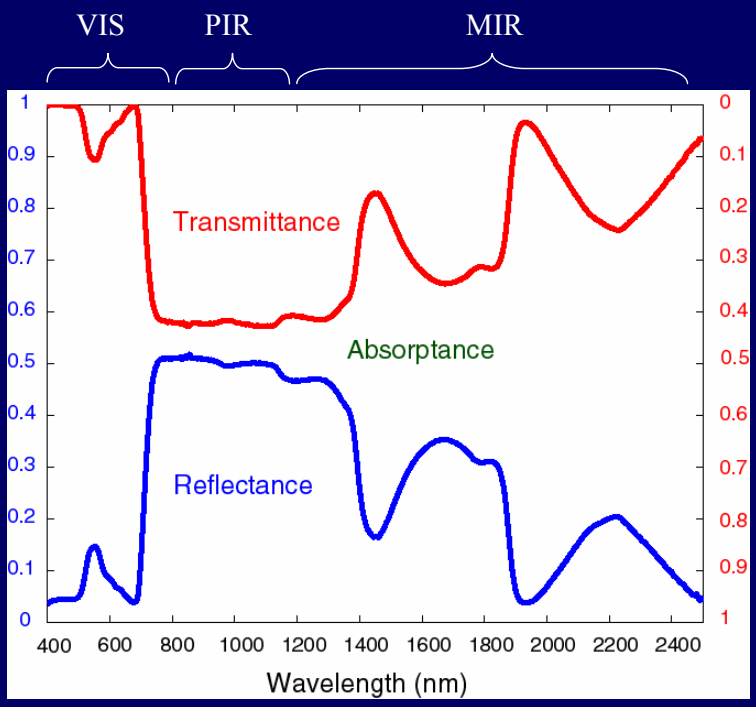


C.A. Shull, 1929, A spectrophotometric study of reflection of light from leaf surfaces, *Botanical Gazette*, 87:583-607.

Propriétés optiques spectrales

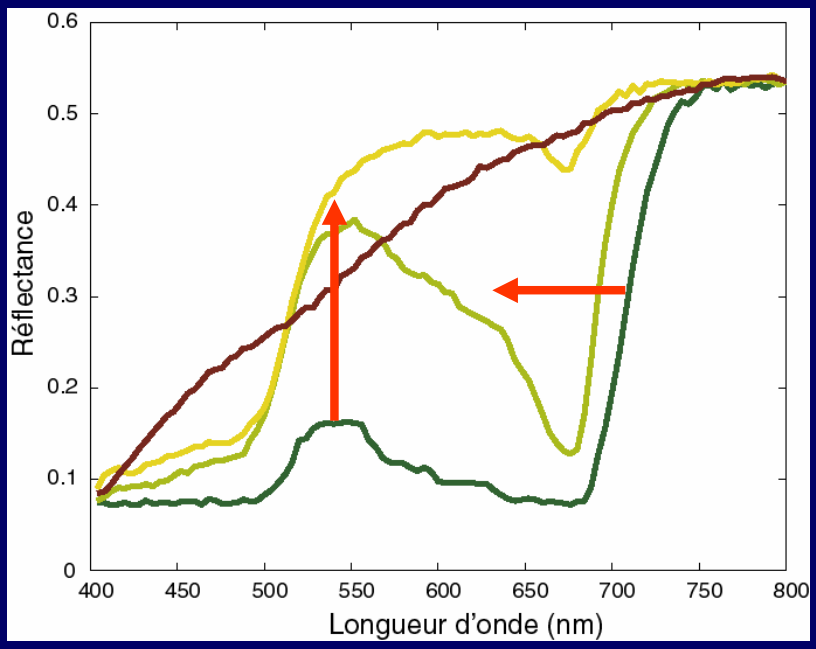




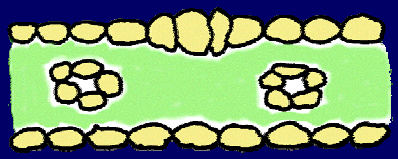


Trifolium pratense

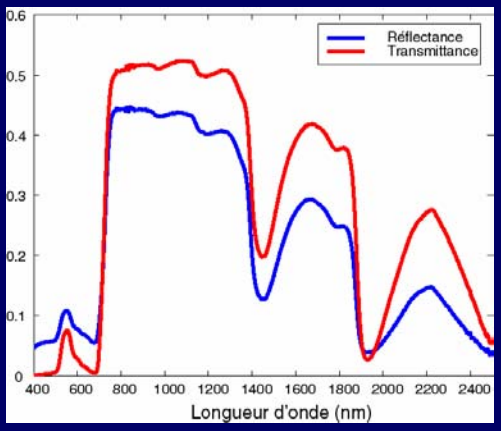
Propriétés optiques spectrales : variation de la teneur en pigments

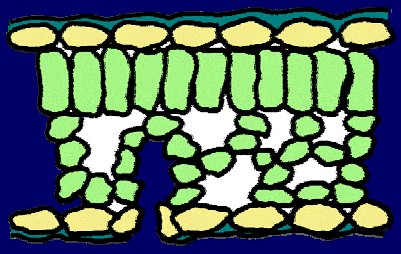


Propriétés spectrales : variation de la structure anatomique

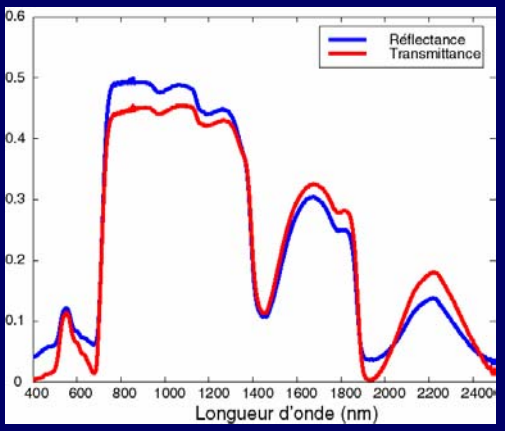


maïs (*Zea mays*)

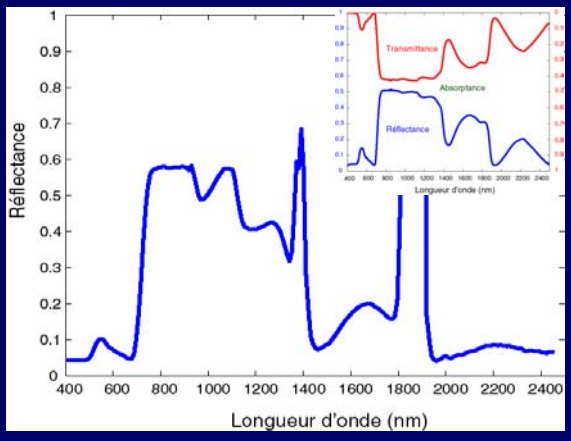




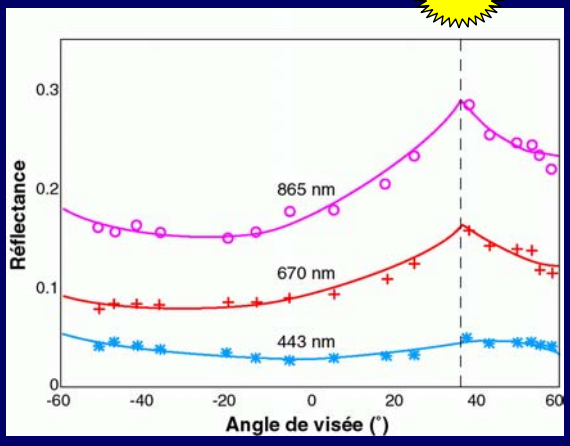
tournesol (*Helianthus annuus*)



Réflectance de la végétation



Betterave à sucre - Brooms Barn

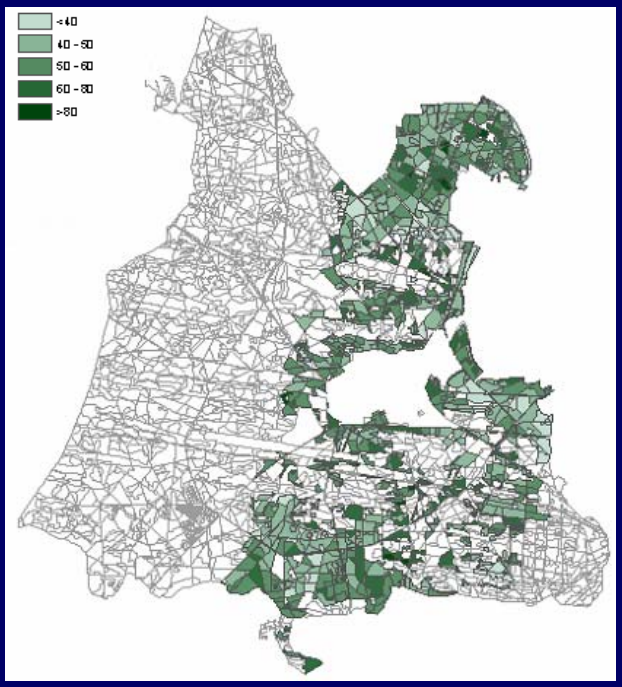


Savane - Niger

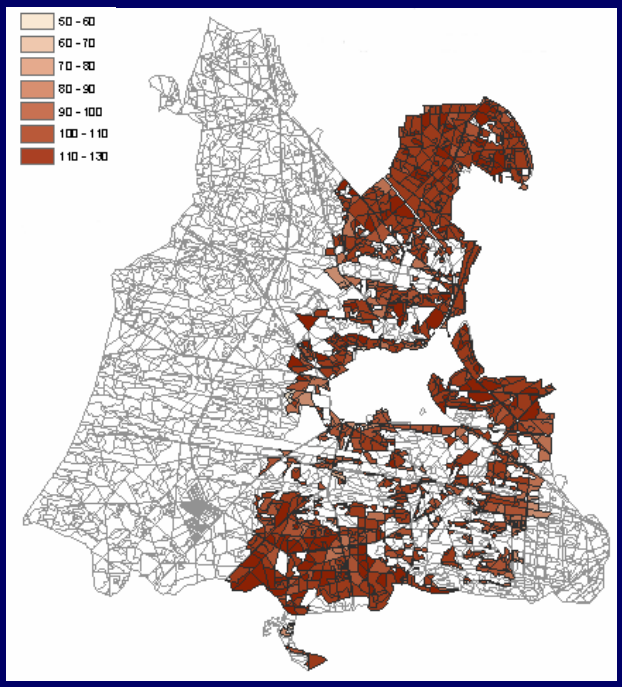
AVIRIS, MODIS, MERIS

POLDER, MISR

Chlorophylle (µg cm^{-2})



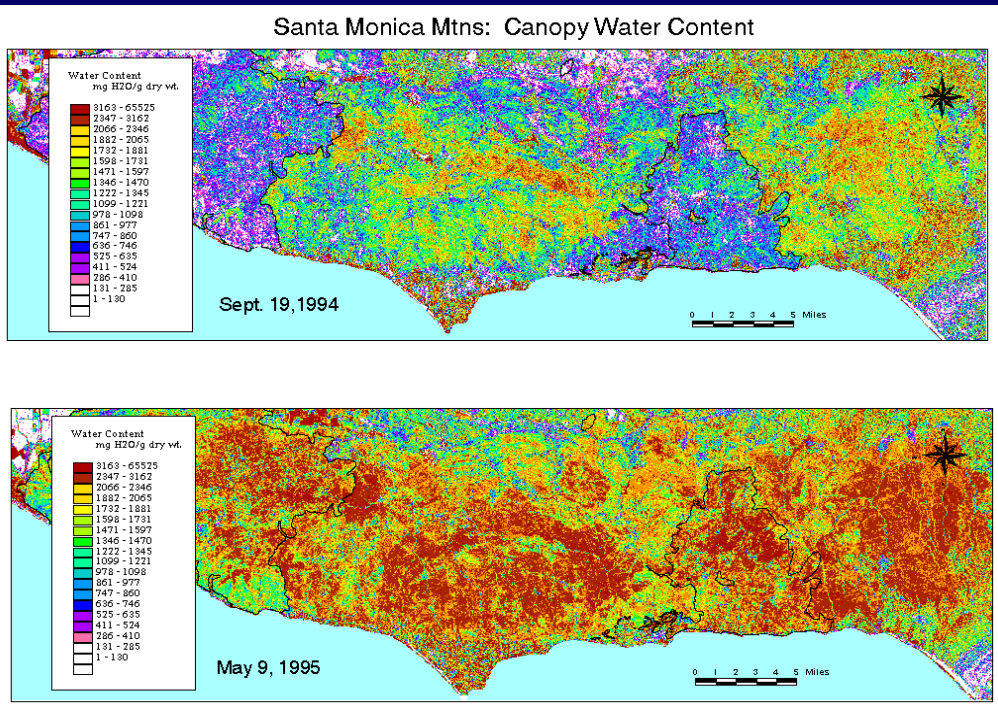
*Matière sèche (*g m^{-2})



G. Le Maire, 2005, Modélisation des flux et des stocks de carbone à l'échelle régionale (forêts et cultures), Ph.D. Thesis, University of Paris-Sud, 201 pp.

AVIRIS
airborne • visible • infrared • imaging • spectrometer

Eau (mg H_2O / g poids sec)



S.L. Ustin, D.A. Roberts, J.E. Pinzón, S. Jacquemoud, M. Gardner, G. Scheer, C.M. Castañeda & A. Palacios-Orueta, 1998, Estimating canopy water content of chaparral shrubs using optical methods, *Remote Sensing of Environment*, 65:280-291.

X. Exobiologie

De la végétation sur Mars ?

- Johann H. Lambert (1728-1777) , mathématicien, physicien et philosophe allemand d'origine française, suggère la présence d'une végétation rouge sur Mars.

- Emmanuel Liais (1826-1900), astronome, botaniste et explorateur français, se livre également des observations de la planète Mars : dans son ouvrage "*L'espace céleste*" publié en 1865, il émet l'hypothèse que les taches de faible albédo observées à la surface sont liées à la présence de végétation plutôt qu'à la présence d'eau → hypothèse en vigueur jusque vers les années 1950.

- Camille Flammarion (1842-1925), astronome français, reprend cette idée en 1873 dans son ouvrage "*La planète Mars*". Il estime que les surfaces ocres de Mars sont recouvertes d'une végétation ... rougeâtre ! « Après tout, pourquoi la végétation martienne serait-elle verte », s'interroge-t-il ?

- William H. Pickering (1858-1938), astronome américain, avance en 1892 que les grandes étendues sombres observées sur Mars devaient être formées par un prodigieux entrelacement d'espèces végétales qui expliquent la teinte verdâtre observée.

- Percival Lowell (1855-1916), astronome amateur américain aisé, est connu pour avoir soutenu la présence de canaux sur Mars. Doté d'une imagination débridée, il imagine qu'une bande de végétation d'une trentaine de kilomètres borde les principaux canaux...

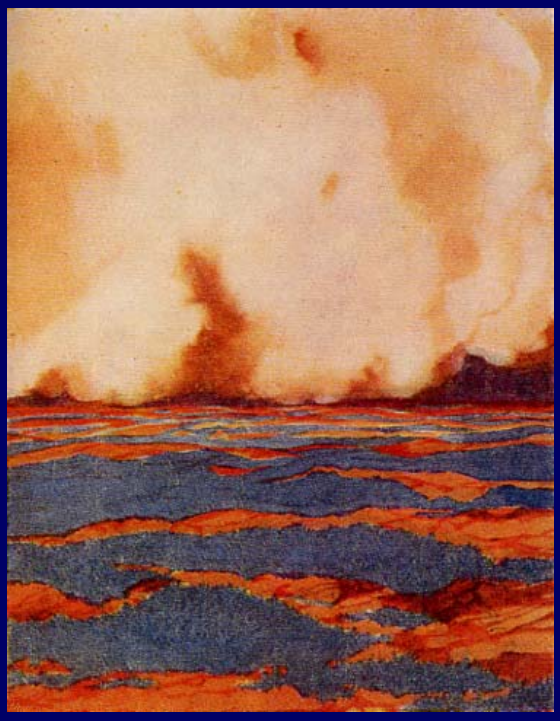
- Gavriil A. Tikhov (1875-1960), astrophysicien et astrobiologiste russe, a mené de nombreuses études sur les propriétés optiques de végétaux terrestres poussant sous des climats extrêmes, et a montré que la bande d'absorption de la chlorophylle pouvait s'élargir jusqu'à disparaître complètement.

- Gerard P. Kuiper (1905-1973), astronome américain d'origine néerlandaise, après avoir détecté le CO_2 dans l'atmosphère martienne, a supposé en 1947 que des végétaux de type lichens (« a touch of moss green ») puissent exister à la surface.

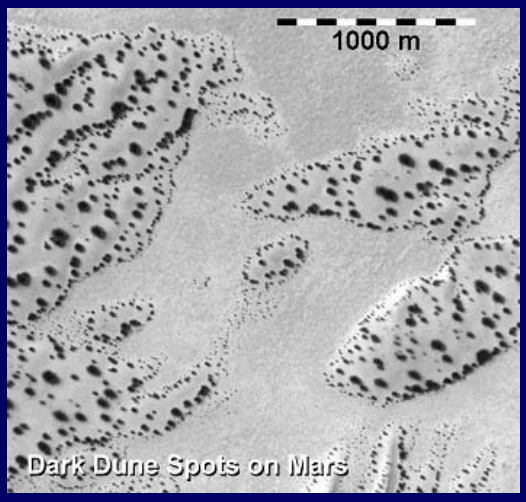
- William M. Sinton (1925-), astronome américain, a attribué en 1957 des transitions vibrationnelles mesurées sur des spectres infrarouge à la présence de végétation → interprétation infirmée en 1963 (eau lourde atmosphérique).

- Tibor Ganti (1933-), Eörs Szathmary (1959-) et Andras Horvath (1941-), scientifiques hongrois, ont prétendu en 2001 avoir trouvé des signes de végétation sur des images de la mission Mars Global Surveyor (MGS).

- Carol Stoker ( ) et Pascal Ashwanden ( ), du NASA Ames Research Center, ont détecté en 2002 sur les images multispectrales de la sonde Pathfinder (15 bandes spectrales entre 440 et 1100 nm) des caractéristiques spectrales de la chlorophylle...



« Paysage probable de Mars : une basse végétation de couleur bleue sur un sol rouge »
G. Tikhov, 1960, *L'énigme des planètes*

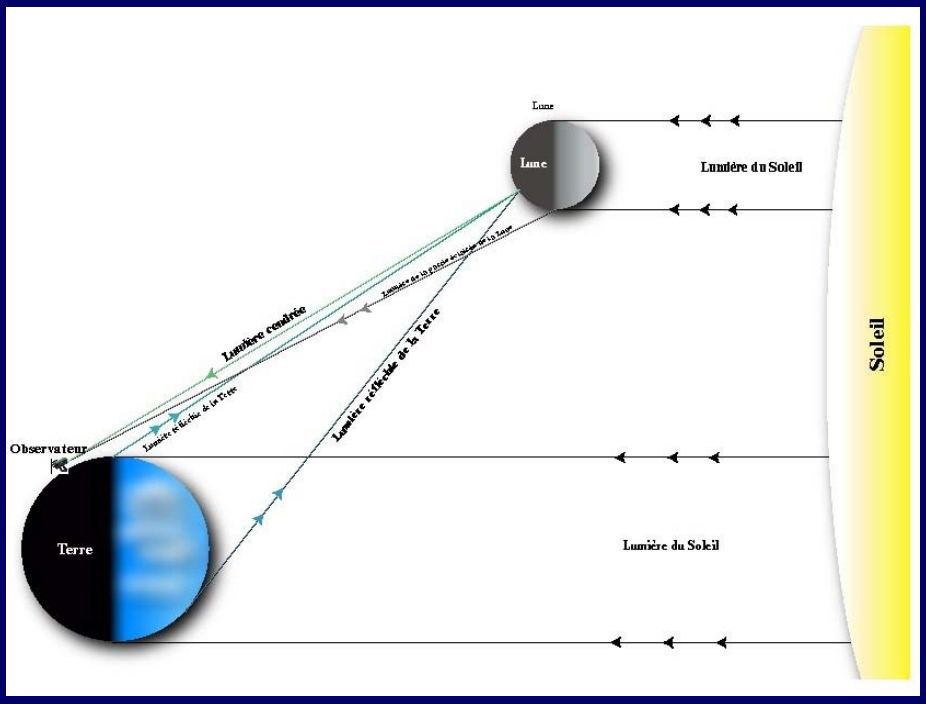


Mars Global Surveyor Mars Orbiter Camera
Horvath et al., 2004, 35th COSPAR Conference
© NASA/JPL/Malin Space Science Systems

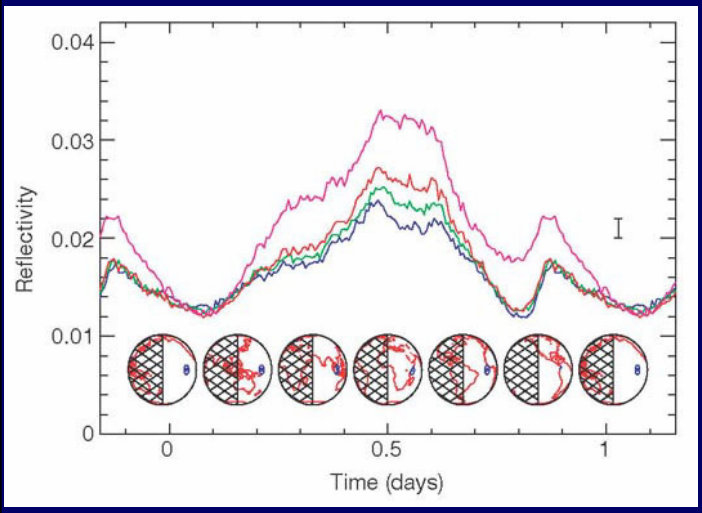
« life on other planets might take unfamiliar or even unrecognizable forms » Stephen Jay Gould

© National Geographic

Lumière cendrée de la Lune

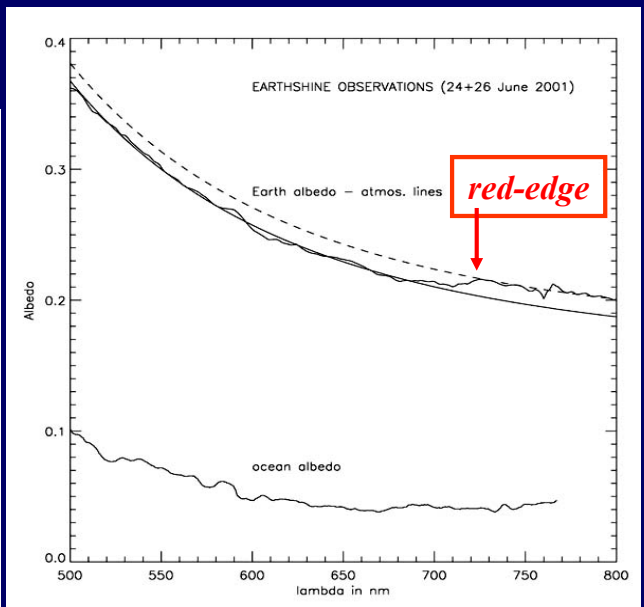


Simulation de la variation journalière de l'albédo global d'un modèle de Terre sans nuages. Les courbes rose, rouge, verte et bleue correspondent à 750, 650, 550 et 450 nm



E.B. Ford, S. Seager & E.L. Turner, 2001, Characterization of extrasolar terrestrial planets from diurnal photometric variability, *Nature*, 412:885-887.

Spectre de la lumière cendrée montrant un *Vegetation Red Edge* de l'ordre de 8-10%



L. Arnold, S. Gillet, O. Lardiere, P. Riaud & J. Schneider, 2002, A test for the search for life on extrasolar planets, *Astronomy & Astrophysics*, 392:231-237.

0°
30°
30°
60°
60°
80°
90°
90°
120°
120°
150°
150°
180°
OCÉAN ATLANTIQUE
OCÉAN INDIEN
OCÉAN PACIFIQUE
Terre de la Nouvelle Souabe
Péninsule de Riiser-Larsen
Dronning Maud Land
Kohnen
Halley
Terre de la Reine Maud
Dôme Fuji
Terre d'Enderby
Mawson
Terre Mac Robertson
Cap Darnley
Soyus
Davis
Mer de Weddell
Terre de Graham
Ice-shelf de Fiehner
Île Adélaïde
Terre de Palmer
Île Alexandre
Île Berkner
Ice-shelf de Ronne
ANTARCTIQUE
Pôle Sud
Mer de Bellingshausen
Amundsen-Scott
Mirny
Mer de Davis
Terre d'Ellsworth
Île Pierre Ier (Norvège)
Île Thurston
Vostok
Terre de la Reine Mary
Mer d'Amundsen
Terre Marie Byrd
Dôme C
Terre de Wilkes
Casey
Île Roosevelt
Île de Ross
Concordia
Mc Murdo
Scott base
Terra Nova Bay
Mer de Ross
Terre de Oates
Terre Georges V
Terre Adélie
Dumont d'Urville
Cap Adare
Mer Dumont d'Urville

LUCAS

Lumière
Cendrée en
Antarctique par
Spectroscopie

l'Observatoire de Paris

Observatoire de Haute-Provence

IPGP
INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS

université PARIS DIDEROT PARIS 7

Université Nice SOPHIA ANTIPOLIS