

*Mesure et modélisation de l'albédo
global et spectral de la Terre*



S. Jacquemoud, C. Duffour, F. Fluteau, G. Le Hir, L. Yan (IPGP)

L. Arnold (Observatoire de Haute Provence)

Y. Donnadieu (LSCE)

J. Schneider, D. Briot (Observatoire de Paris)

Les exoplanètes se ramassent à la pelle

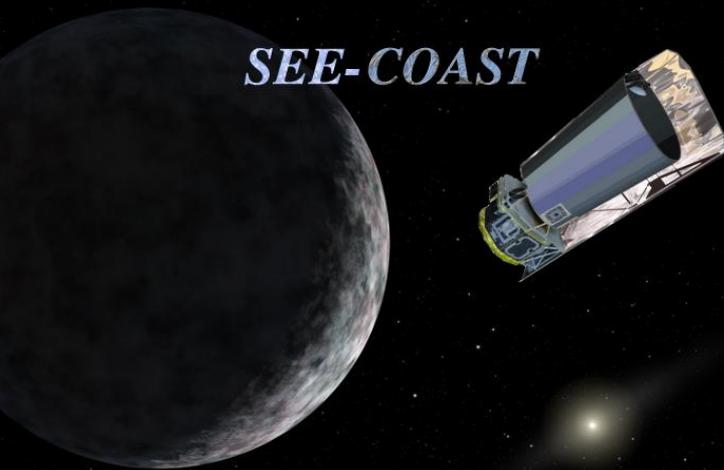
▶ Découverte de la première planète extrasolaire au début des années 90

▶ 778 exoplanètes identifiées au 15/06/2012

J. Schneider (Observatoire de Paris), *Encyclopédie des Planètes Extrasolaires*

<http://exoplanet.eu/>

▶ Très peu dans la zone habitable...



▶ Plusieurs projets de missions spatiales (Super-Earth Explorer / ESA, Terrestrial Planet Finder / NASA) ou de télescopes (Extremely Large Telescopes / ESO) capables de rechercher, par spectroscopie, des biosignatures dans la lumière réfléchiée ou émise par des planètes habitables analogues à la Terre

▶ Problème : absence d'information *a priori* sur les formes de vie extraterrestre

▶ Un modèle : la Terre

SEE-COAST (*Super Earth Explorer - Coronagraphic Off-Axis Space Telescope*)
Domaine spectral : 0.4-1.2 μm

Comment saura-t-on qu'une exoplanète abrite la vie ?

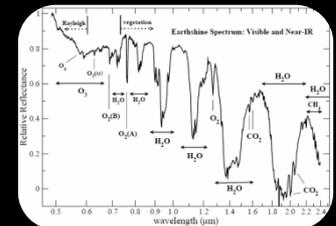
Recherche d'eau
liquide ou gazeuse



Recherche de
traces d'O₂ ou O₃



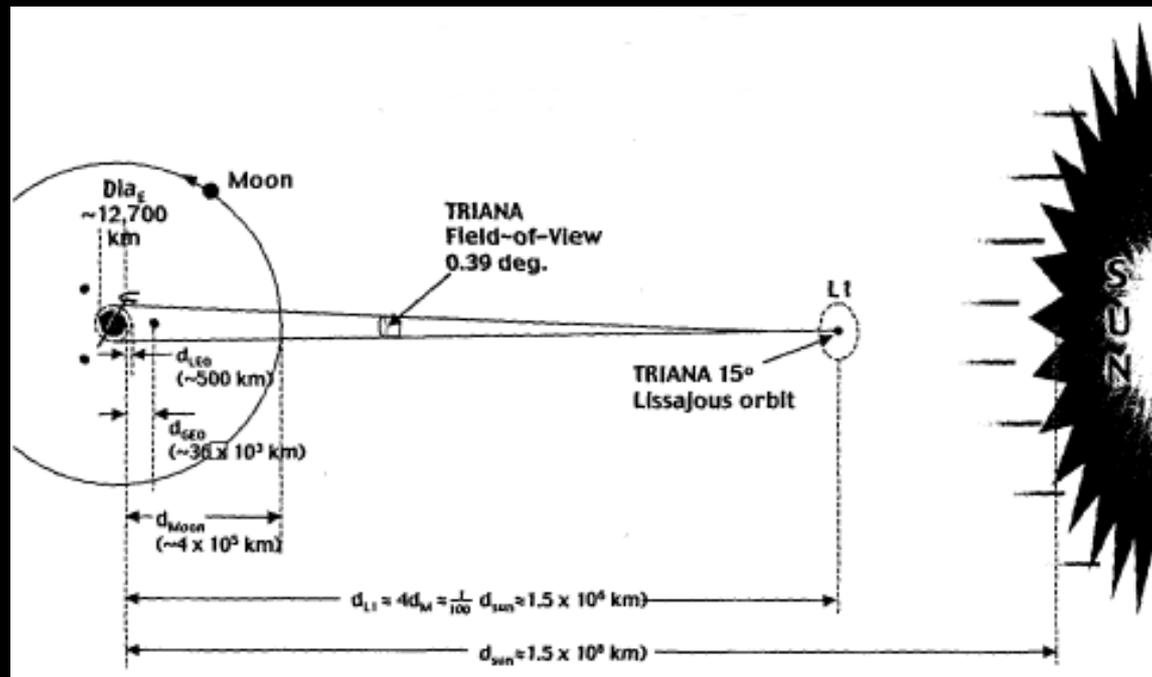
Recherche de
traces de CH₄



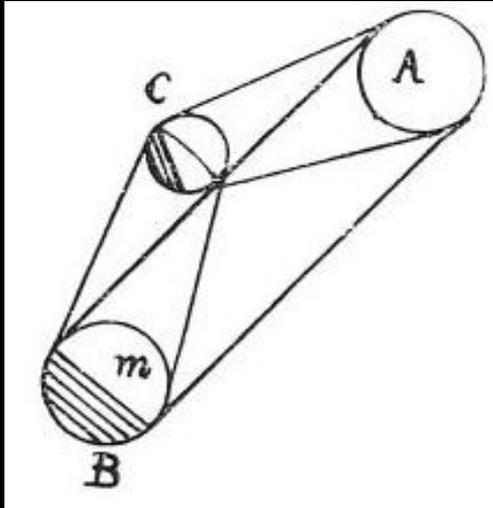
Spectroscopie
du rayonnement
réfléchi ou émis

Comment mesurer le spectre intégré de la Terre ?

- ▶ Satellites en orbite polaire ou géostationnaire : trop près
- ▶ Capteurs installés sur la Lune : à l'étude
- ▶ Satellites positionnés au point de Lagrange L1 : pas résolus spectralement
- ▶ Sondes d'exploration du système solaire : images trop rares
- ▶ Mesure de la lumière cendrée de la Lune : une bonne idée !



Principe de mesure de la lumière cendrée de la Lune



Source : L. de Vinci

De Vinci (1506-1509)
Galilée (1610)
Arcichovsky (1912)
Tikhov (1914)
Arnold et al. (2002)
Woolf et al. (2002)
etc.



Source : E. Aristidi

$$\text{Spectre Lune} = S * R_L * T_A$$

$$\text{Spectre LC} = S * R_T * R_L * T_A$$

avec S = irradiance solaire

R_L = albédo moyen de la Lune

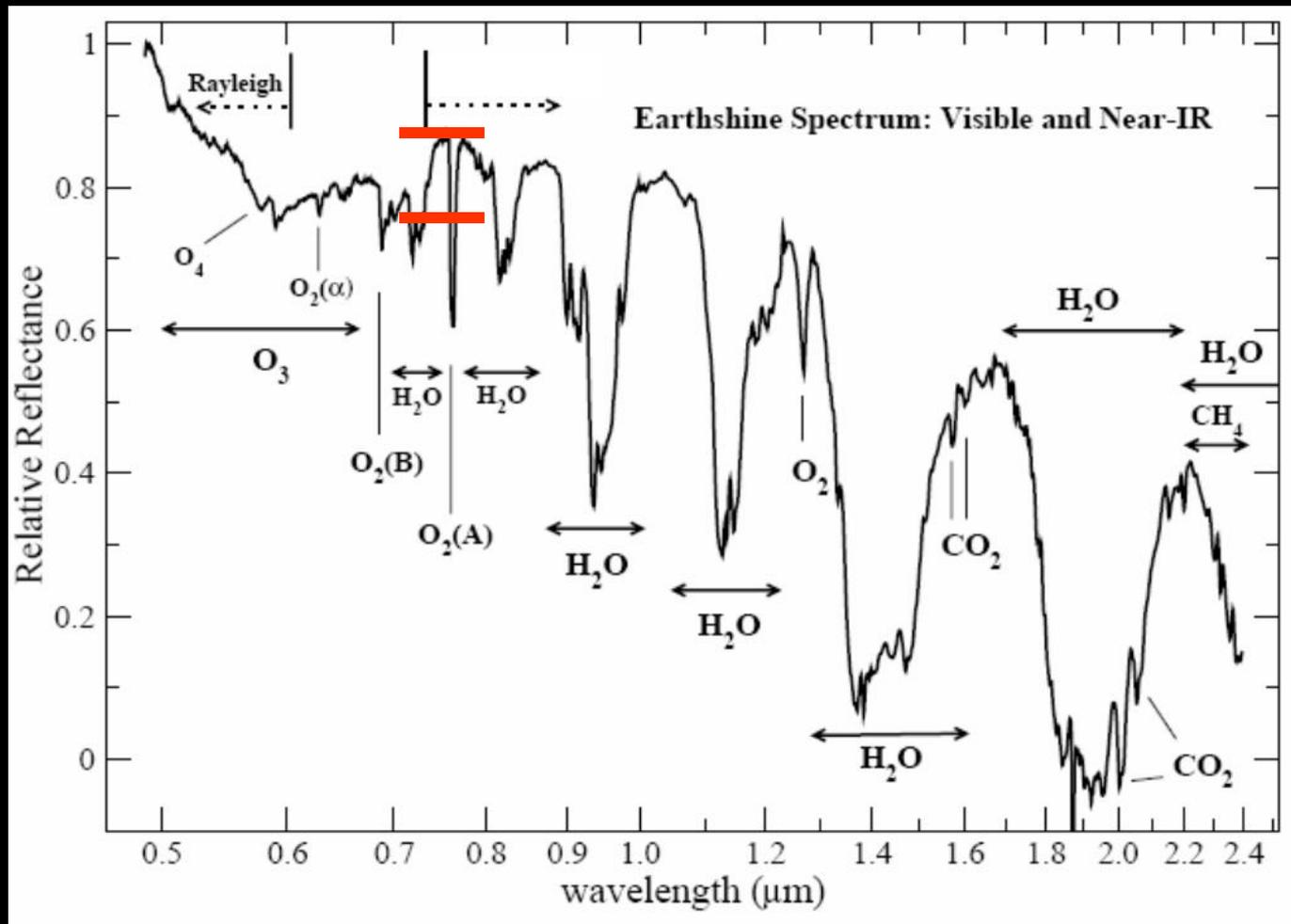
R_T = albédo moyen de la Terre

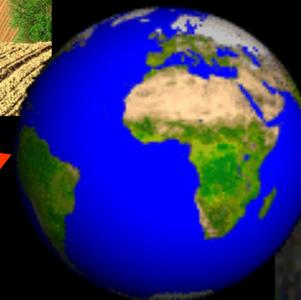
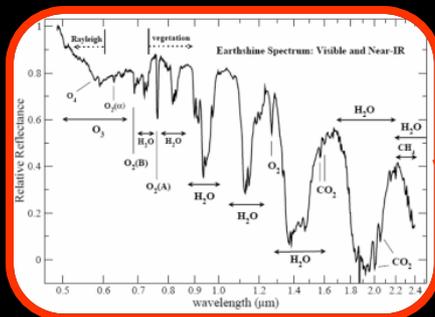
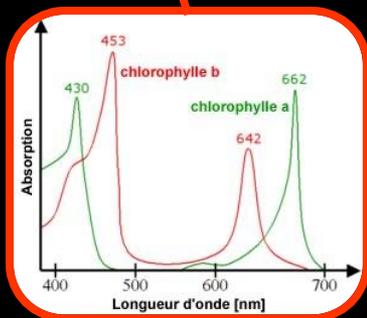
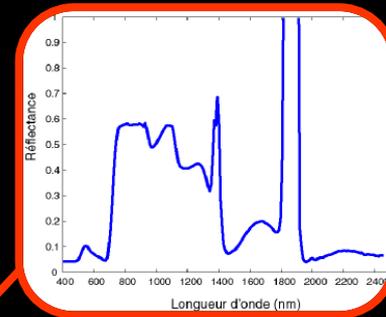
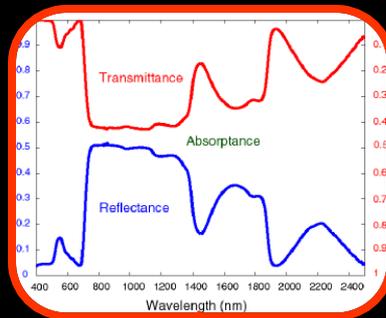
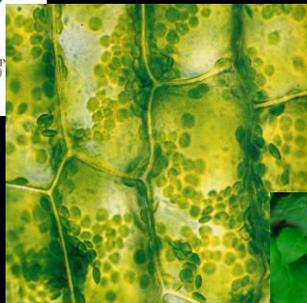
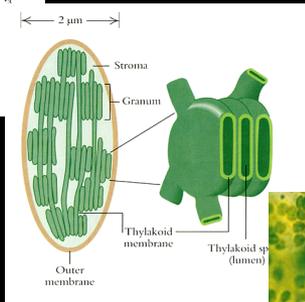
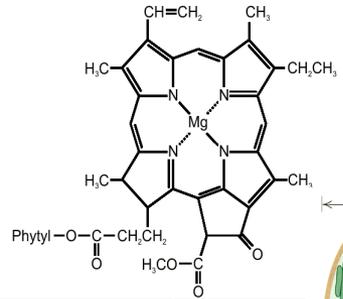
T_A = transmittance de l'atmosphère

$$\text{Albédo moyen de la Terre} = \text{Spectre LC} / \text{Spectre Lune}$$

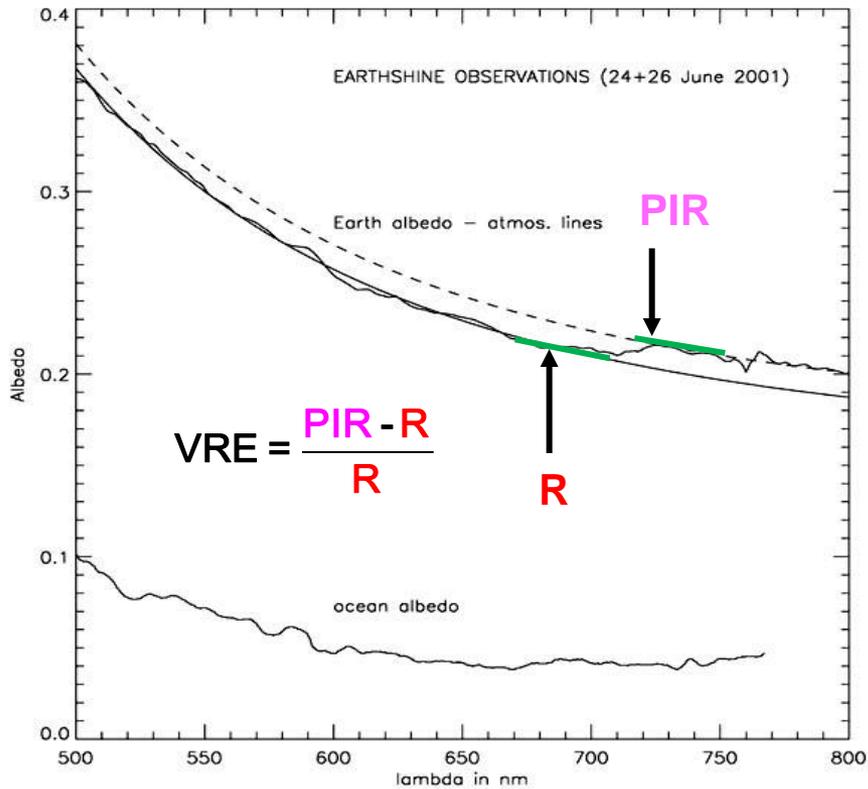
mesures spectrales

Spectre de la lumière cendrée de la Lune



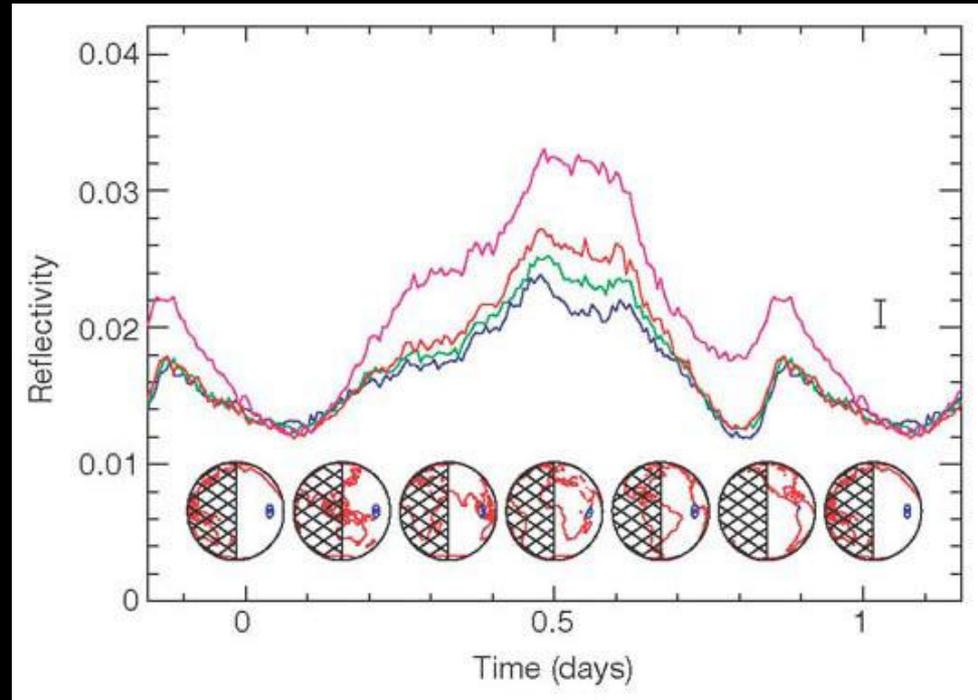


Observations : spectre de la lumière cendrée dans le visible-proche infrarouge montrant un *Vegetation Red Edge* (VRE) de l'ordre de quelques pourcents



Arnold et al. (2002), *Astronomy & Astrophysics*, 392:231-237.

Simulations : 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



Ford et al. (2001), *Nature*, 412:885-887.



Photo : E. Bondoux

LUCAS

LUmière
Cendrée en
Antarctique par
Spectroscopie



7 runs en 2009, dont 3 de plus de 6 heures, données en cours de traitement

Végétation terrestre...

► Sur Terre, la couleur des végétaux est liée au spectre d'émission du Soleil, donc à sa température de surface, et la taille des plantes est contrainte par la pesanteur terrestre



Végétation terrestre...

► Sur Terre, la couleur des végétaux est liée au spectre d'émission du Soleil, donc à sa température de surface, et la taille des plantes est contrainte par la pesanteur terrestre



► Mais il fut un temps où, dans un environnement physique similaire, les végétaux étaient très différents de ceux d'aujourd'hui



Carbonifère (360-300 Ma)



Jurassique (200-150 Ma)



Crétacé (150-70 Ma)

Modélisation des paléo-albédos de la Terre

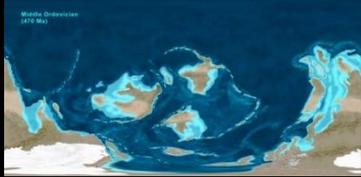
488.3–443.7 Ma

439–416 Ma

228.7–216.5 Ma

99.6–93.5 Ma

Présent



Ordovicien



Dévonien sup.



Carnien (Trias sup.)



Cénomannien
(Crétacée sup.)



Anthropocène

FOAM (*Fast Ocean Atmosphere Model*)

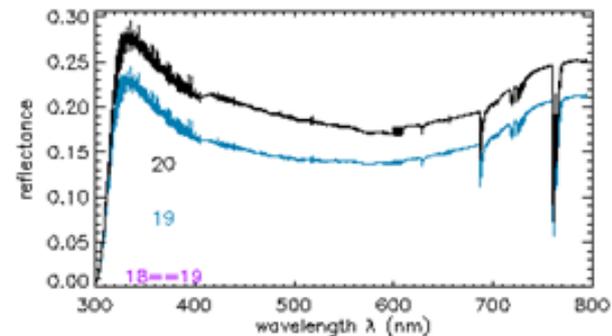
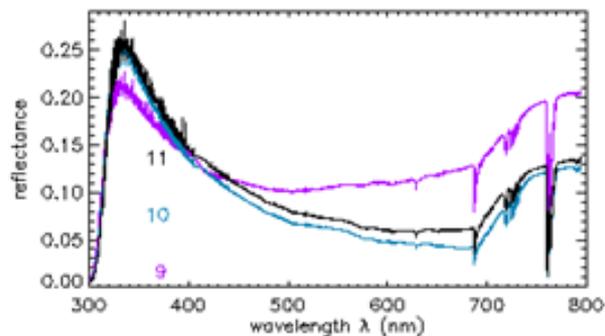
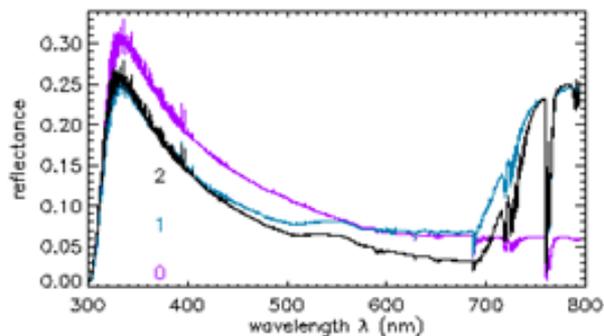
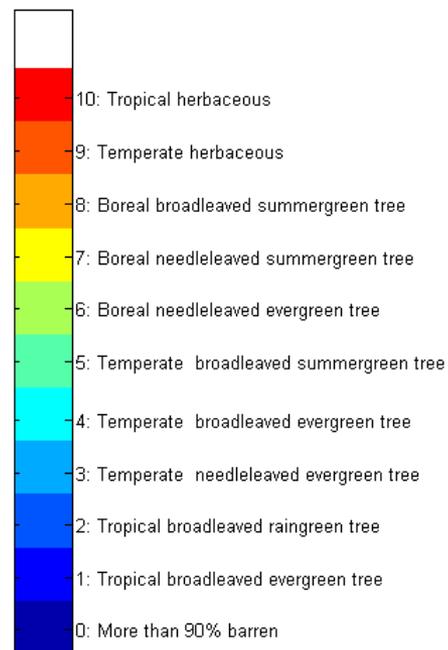
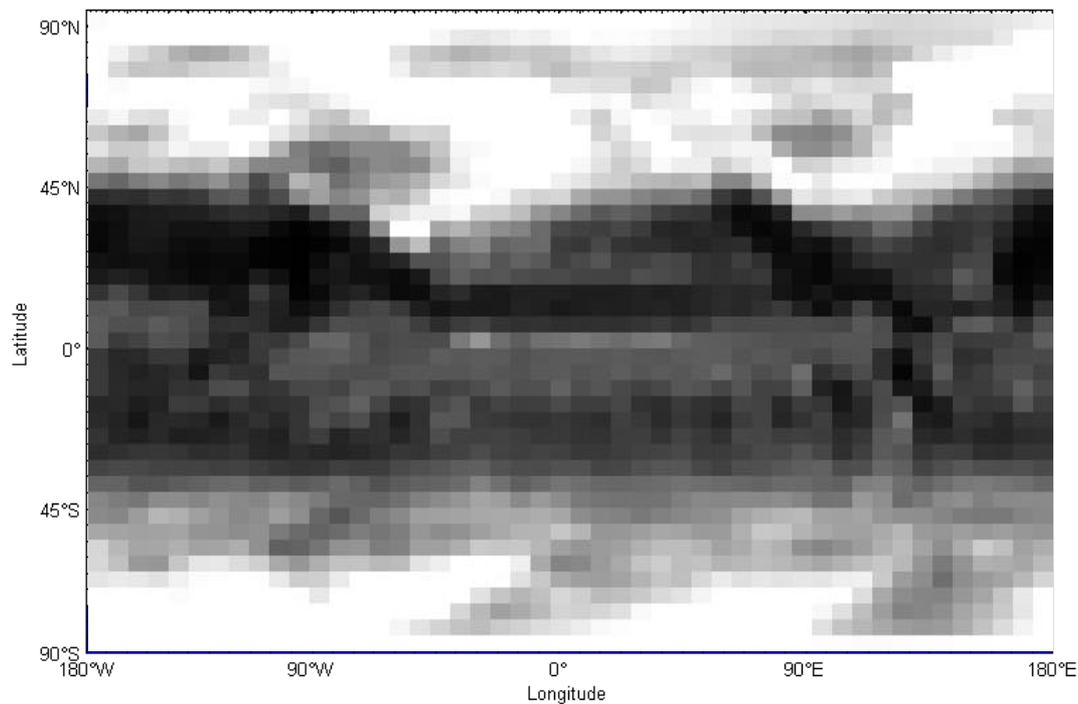
LPJ (*Lund-Potsdam-Jena*)

Couverture nuageuse
Continents / Neiges continentales
Océans / Glaces océaniques

Biomes

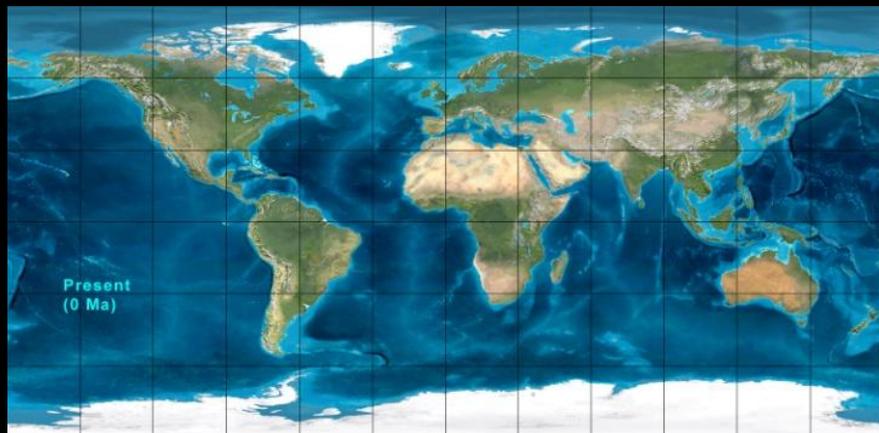
Albédo spectral et global

Carte de PFT - Présent

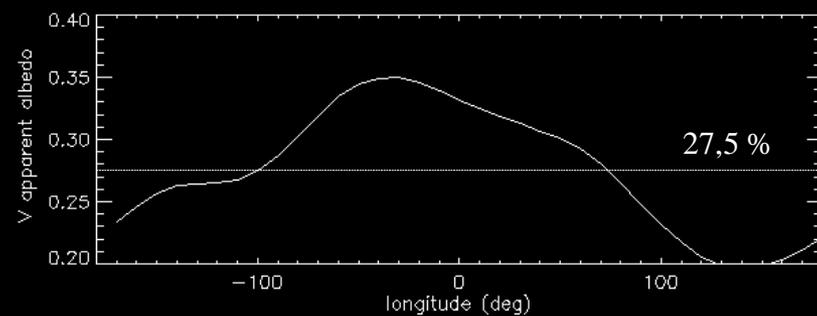
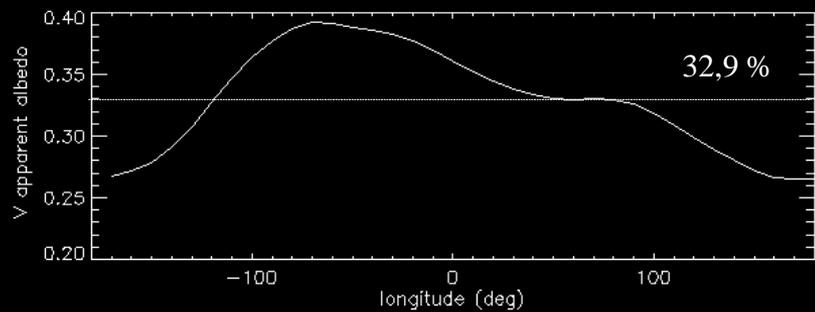
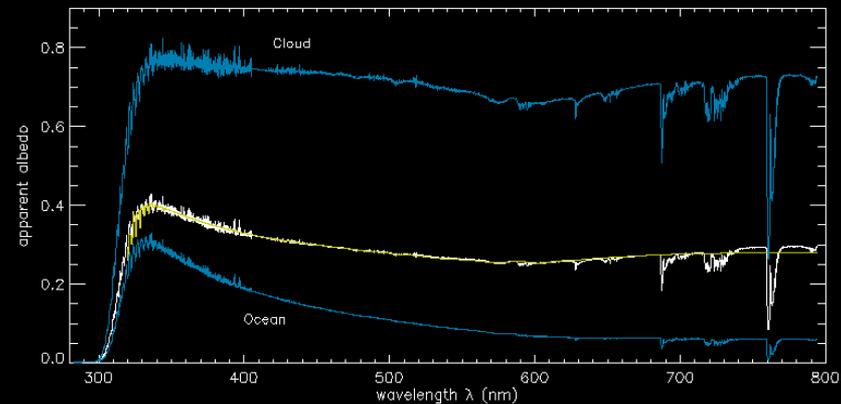
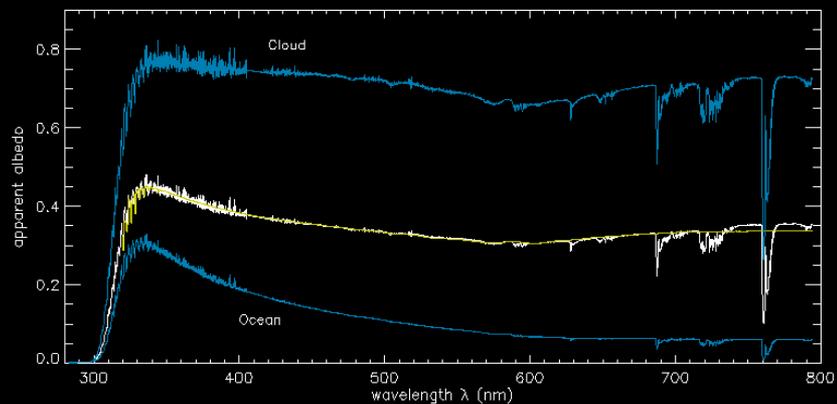
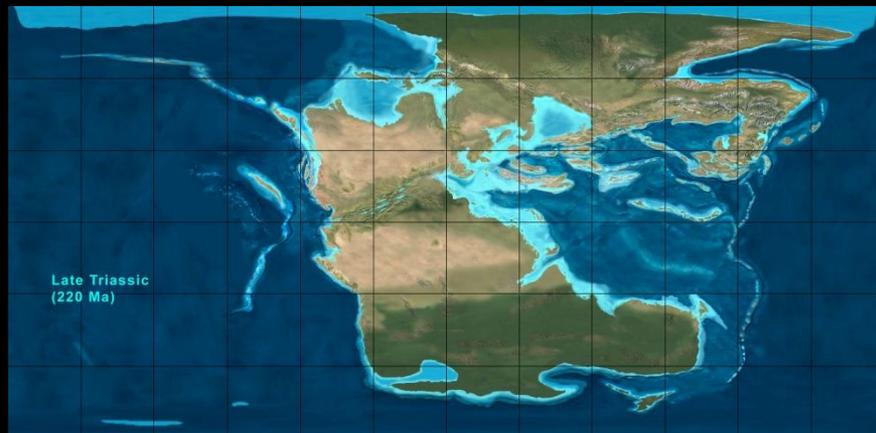


Spectres GOME (Global Ozone Monitoring Experiment)

Présent

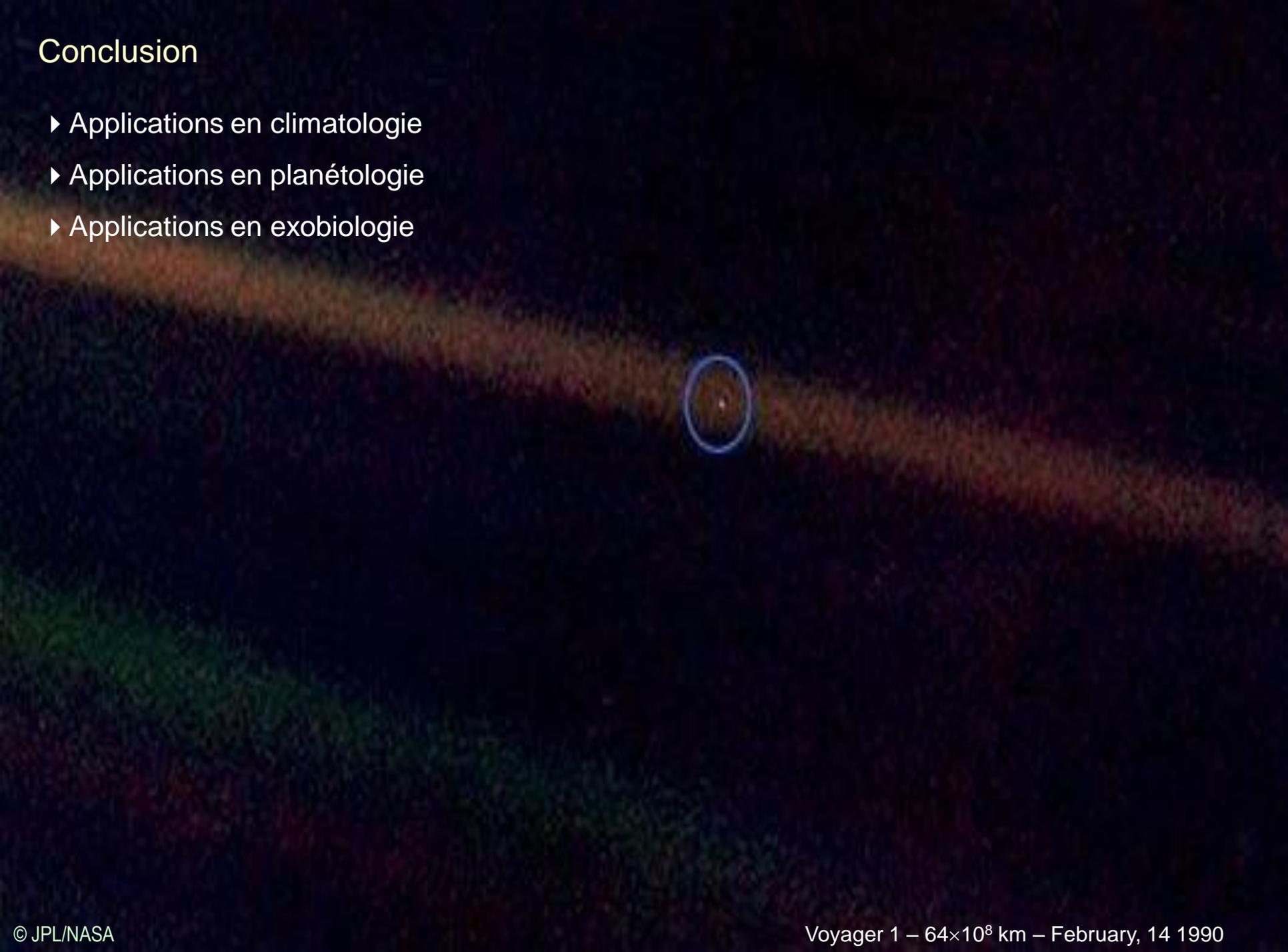


Carnien (~220 Ma)



Conclusion

- ▶ Applications en climatologie
- ▶ Applications en planétologie
- ▶ Applications en exobiologie



...végétation extraterrestre

► Dans un environnement différent, la végétation pourrait prendre des formes et des couleurs qui ne nous sont pas familières



« Pourquoi astreindre la nature à avoir construit sur Mars des végétaux de même espèce que les nôtres ? Les conditions de milieu, de température, de densité et de pesanteur s'y opposent ; donc la différence qui existe forcément entre la végétation martienne et la végétation terrestre peut parfaitement s'étendre jusqu'aux variations de couleurs »

Camille Flammarion (1892)

« Life on other planets might take unfamiliar or even unrecognizable forms »

Stephen Jay Gould (1985)