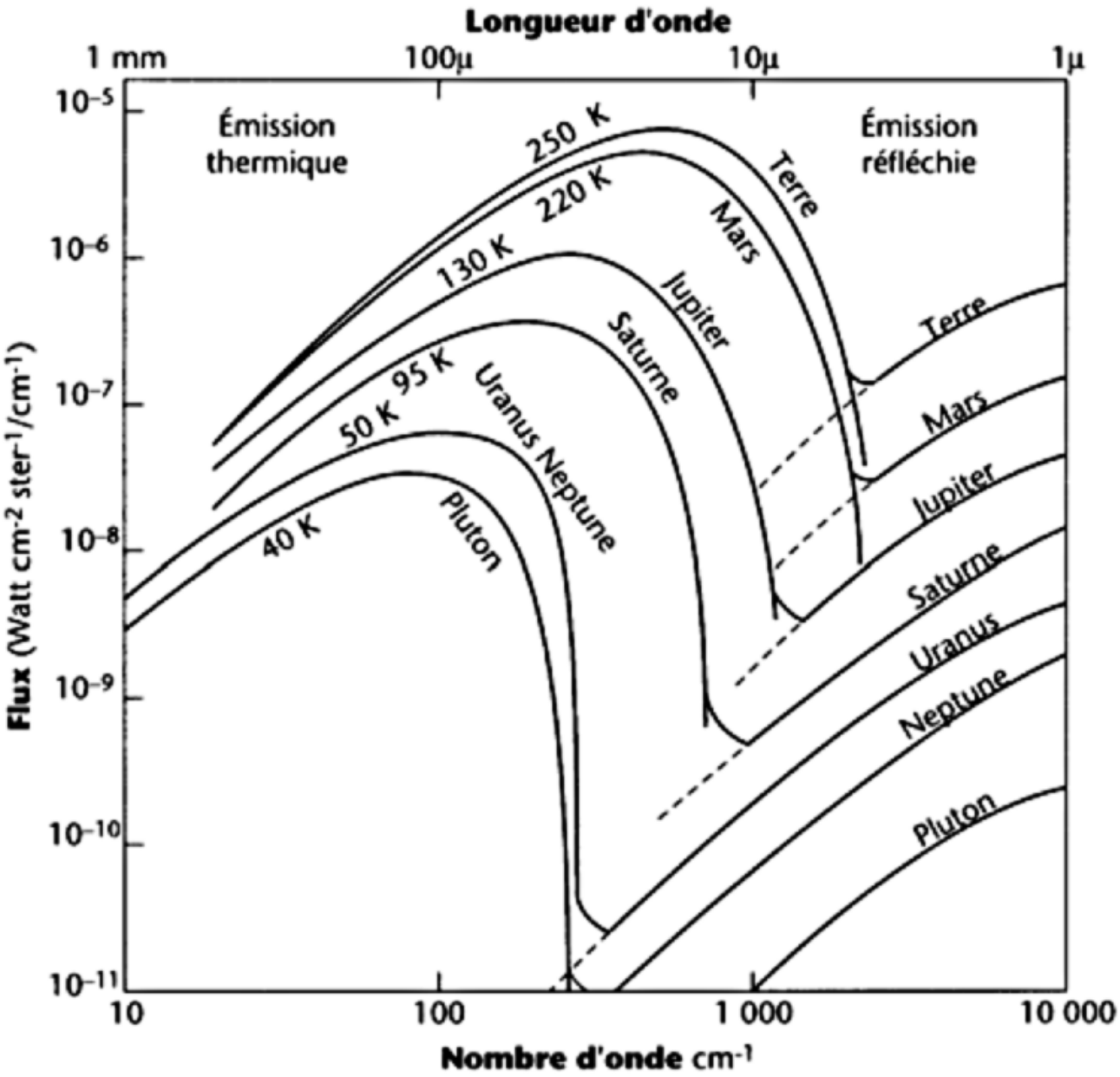
Transfert de rayonnement
IV
Applications aux planètes du système solaire

Emmanuel Marcq

LATMOS, Université de Versailles St-Quentin-en-Yvelines

M2 Planétologie et Exploration Spatiale – 2024-2025


Longueur d'onde
1 mm
100µ
10µ
1µ
Émission thermique
Émission réfléchie
250 K
220 K
130 K
95 K
50 K
40 K
Terre
Mars
Jupiter
Saturne
Uranus
Neptune
Pluton
Flux (Watt cm-2 ster-1/cm-1)
10-5
10-6
10-7
10-8
10-9
10-10
10-11
10
100
1 000
10 000
Nombre d'onde cm-1

Vénus, Mars

- Spectres IR proches dominés par CO_2.
- Absorptions par H_2O et CO.

Vénus

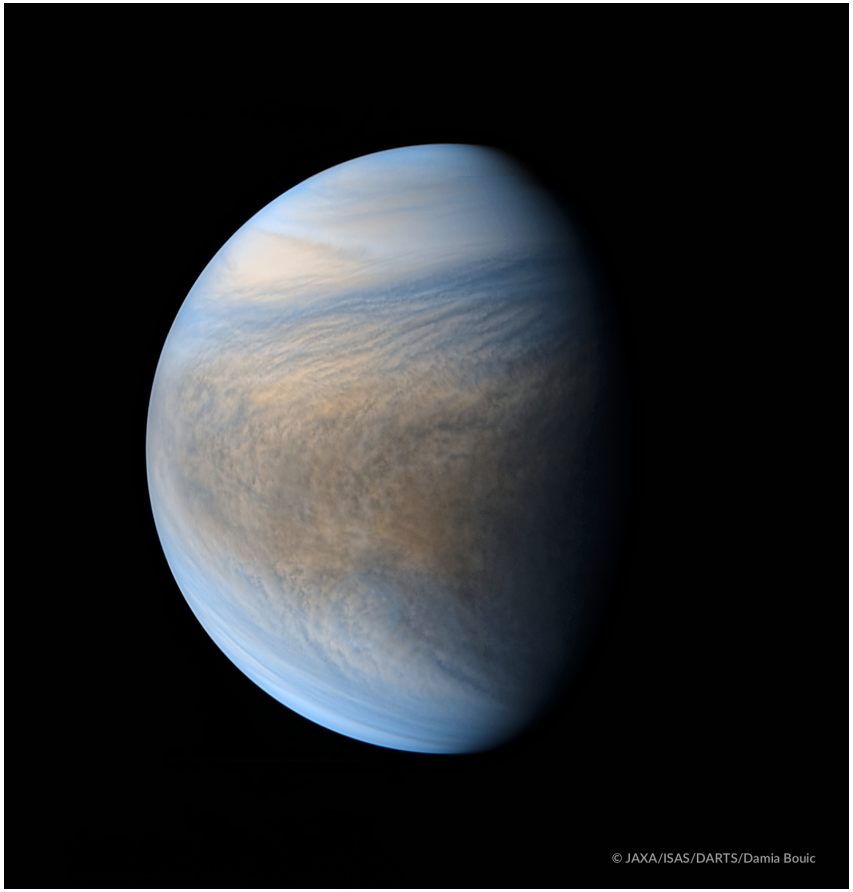
- Pénétration limitée au sommet des nuages de H_2SO_4
  $\tau \sim 20 - 30$, $z : 48 - 64\,\text{km}, T : 240 - 450\,\text{K}$
- Spectre UV dominé par SO_2 en dessous de $320\,\text{nm}$ et un absorbant inconnu $(300 - 450\,\text{nm})$

Mars

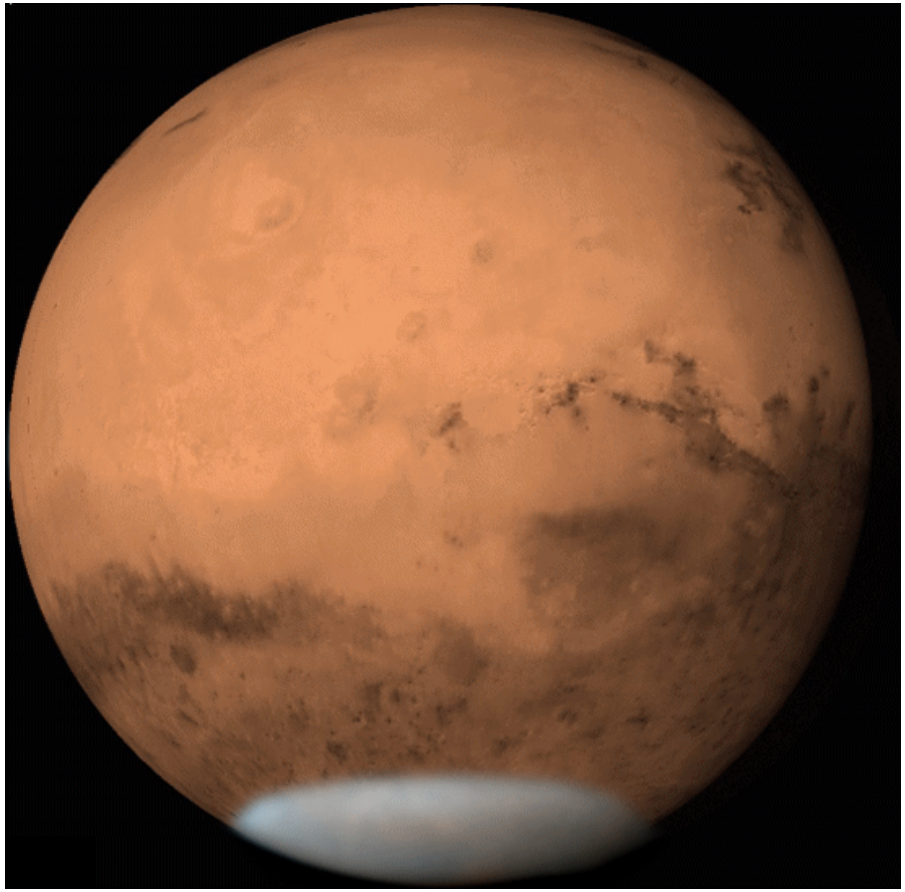
- Surface observable, teinte rouge (oxydes de fer).
- Diffusion Rayleigh limitée (sauf pour $\mu \to 0$), aérosols dominants.

Terre

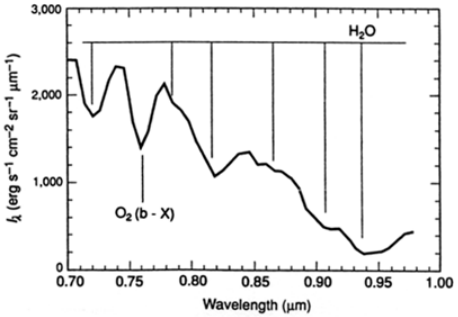
- H_2O et CO_2 dominent l'IR proche et le visible (nuages).
- O_2 et O_3 dominent dans l'UV.
- Surface observable à $\sim 50\%$: H_2O liquide et solide, chlorophylle, silicates.
- Diffusion Rayleigh dans l'atmosphère

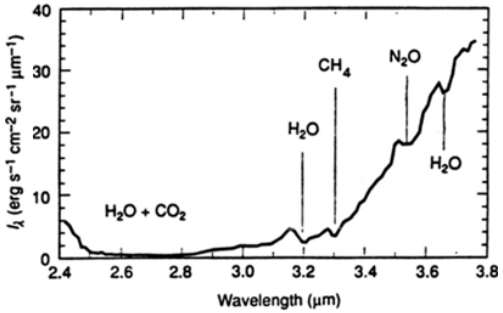


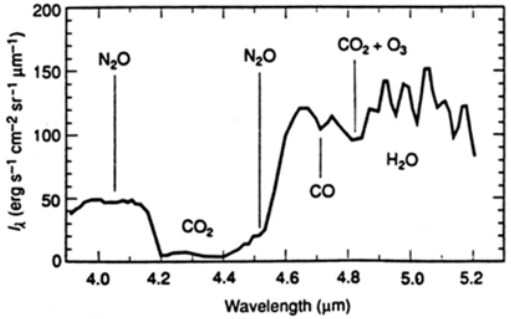
Vénus en UV



Mars en visible



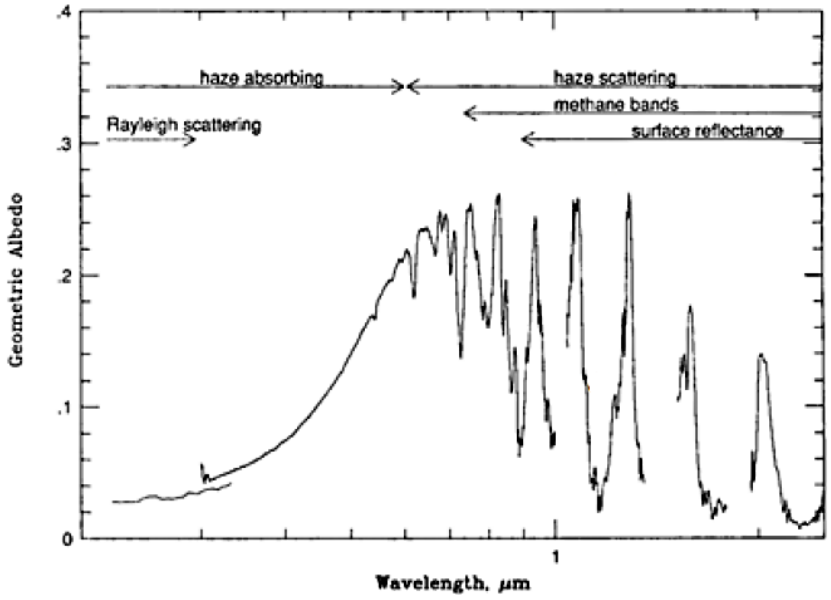


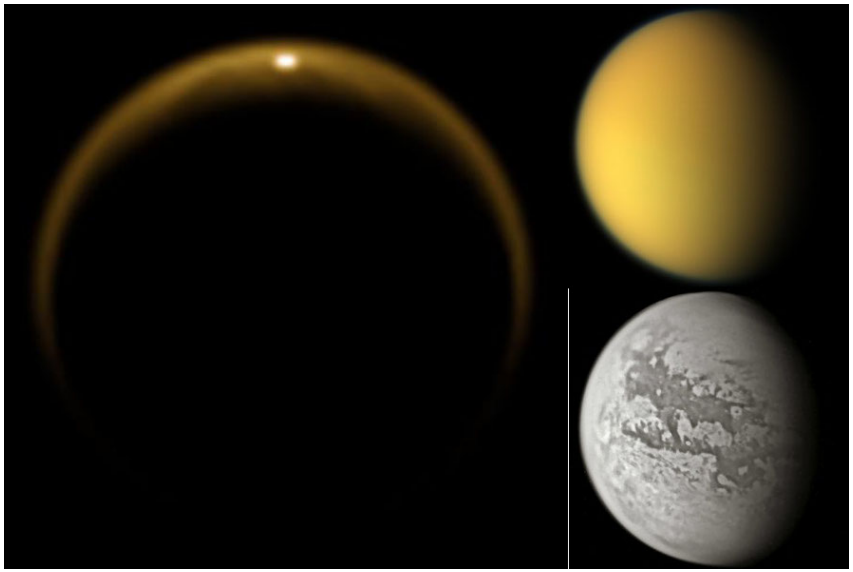


Spectres de la Terre observés par NIMS/Galileo

Titan

- Spectre dominé par CH_4 et brouillard photochimique ($\lambda < 0{,}5\,\mu m$)
- Pénétration du rayonnement solaire limitée par la diffusion dans le brouillard
- Au-delà de $0{,}8\,\mu m$, fenêtres atmosphériques entre les bandes de CH_4
- Zones claires et sombres (glace d'eau vs. composés organiques)
- Présence de lacs (rélexions spéculaires)



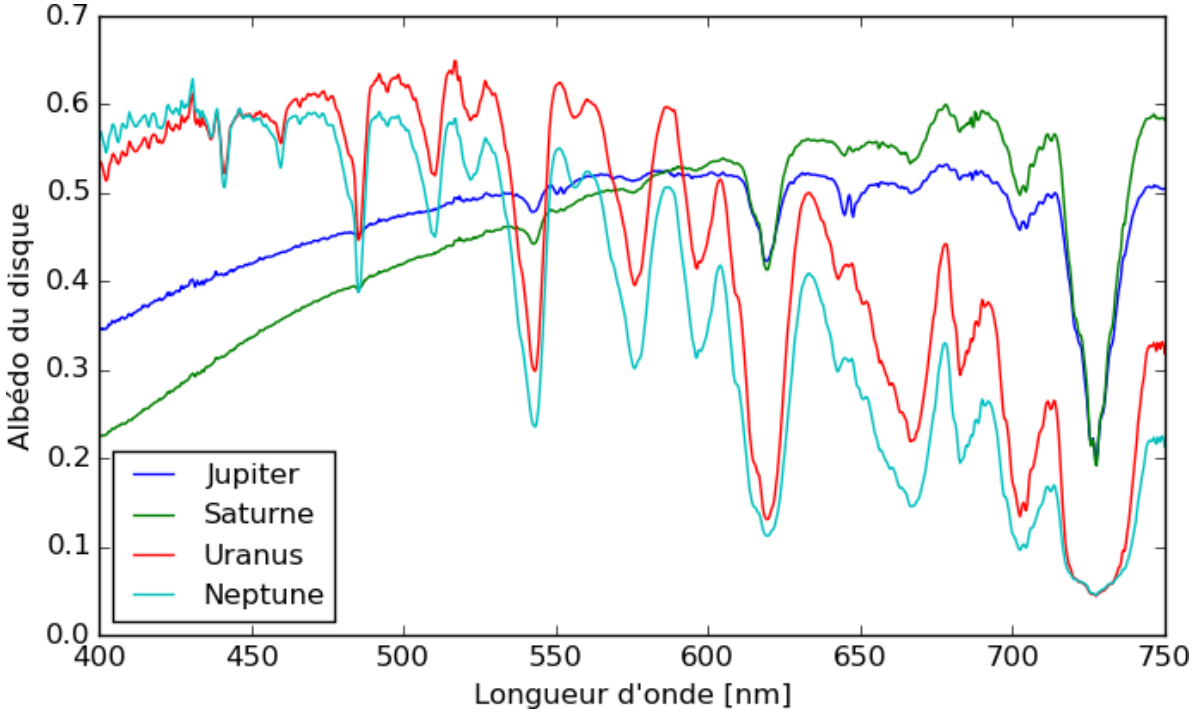


Pénétration limitée

- Au sommet des nuages de NH_3 pour Jupiter ($p : 0{,}2 - 0{,}45$ bar) et Saturne ($p : 0{,}15 - 0{,}35$ bar).
- Au sommet d'un nuage optiquement épais (H_2S ?) vers 3 bar sur Uranus et Neptune
  - Mais présence de nuages de CH_4 vers $1{,}5$ bar pouvant limiter aussi.

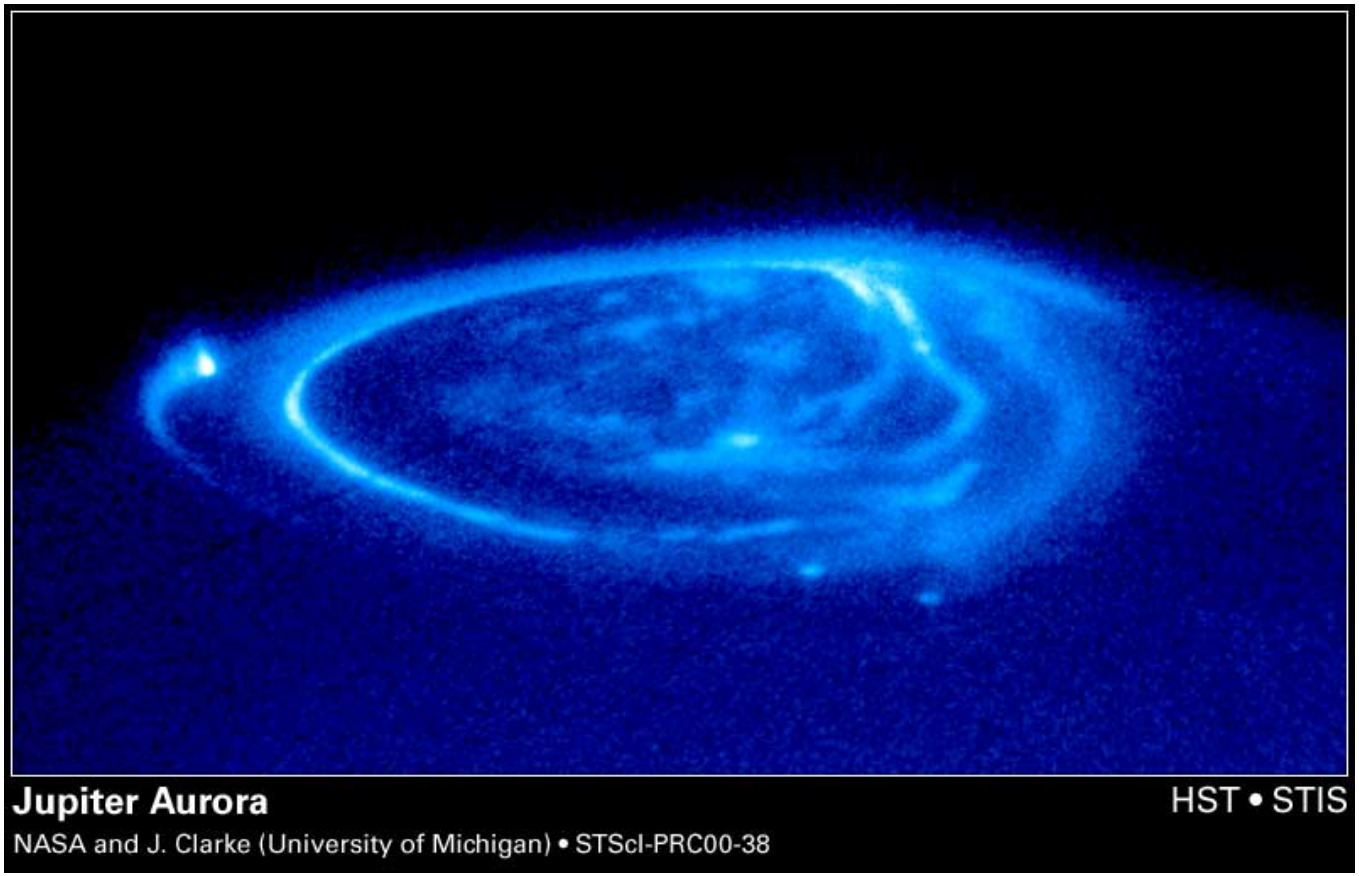
CH_4 domine le spectre IR proche – visible

- NH_3 gazeux détecté sur Jupiter et Saturne
- CH_4 très abondant sur Uranus et Neptune ⇒ teinte bleutée
- Chromophores absorbant le bleu sur Jupiter et Saturne ⇒ teinte jaune-orangée.



Émission propre : aurores

- Mécanisme similaire au mécanisme terrestre : particules du vent solaires piégées par $\vec{B}$ et ionisant la haute atmosphère
- Désexcitations en visible et UV.



Origine

- À haute densité :
  - Élargissement par collisions des raies très important.
  - De nouvelles transitions deviennent possibles (dimères).
- Conséquence :
  - Les ailes lointaines des raies se confondent les unes avec les autres.

Caractéristiques

- Dépendance **quadratique** avec la pression
- Décroît avec la température.
- Décroît avec la fréquence / croît avec la longueur d'onde.
- Dépendance spectrale très régulière, variations continues.

Pertinence

- Atmosphères très denses en IR thermique et fréquences inférieures.
  - Vénus (CO_2-CO_2)
  - Titan (N_2-CH_4-H_2)
  - géantes (H_2-He, H_2-H_2, ...)

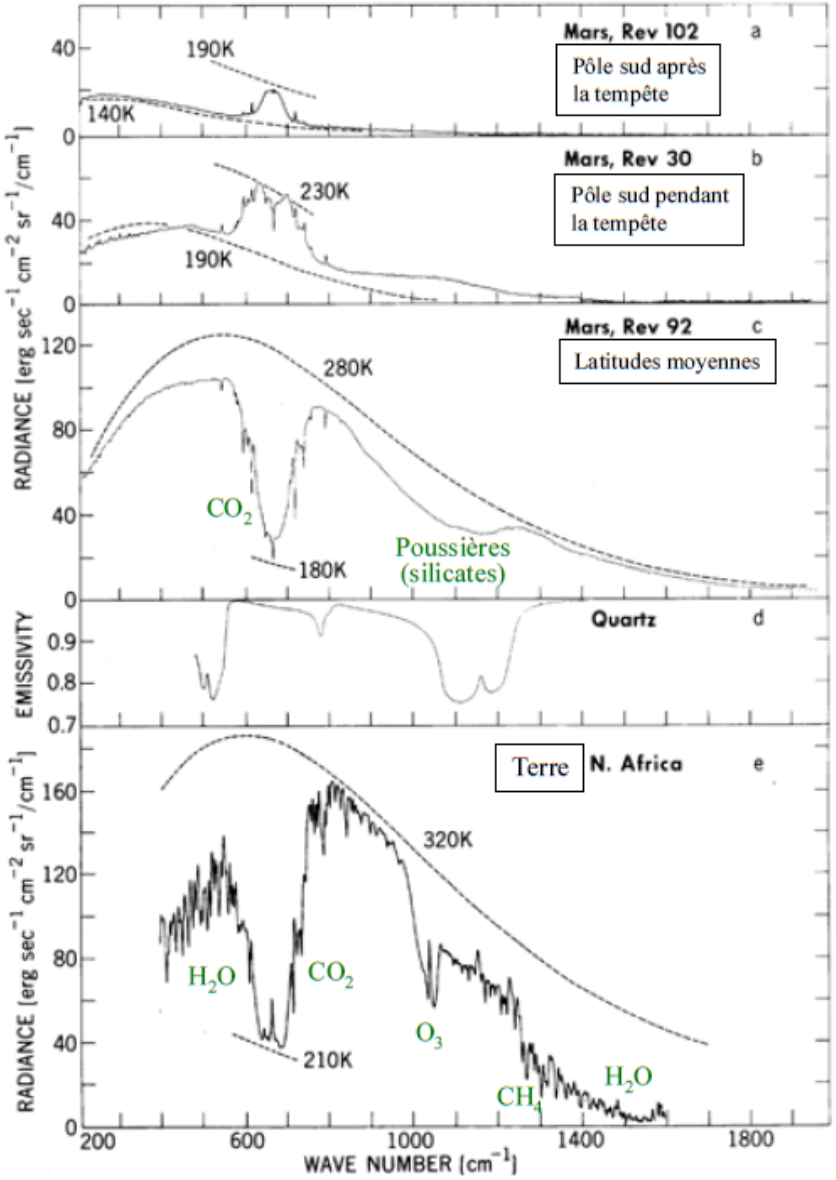
Sources d'opacité

Vénus, Terre, Mars

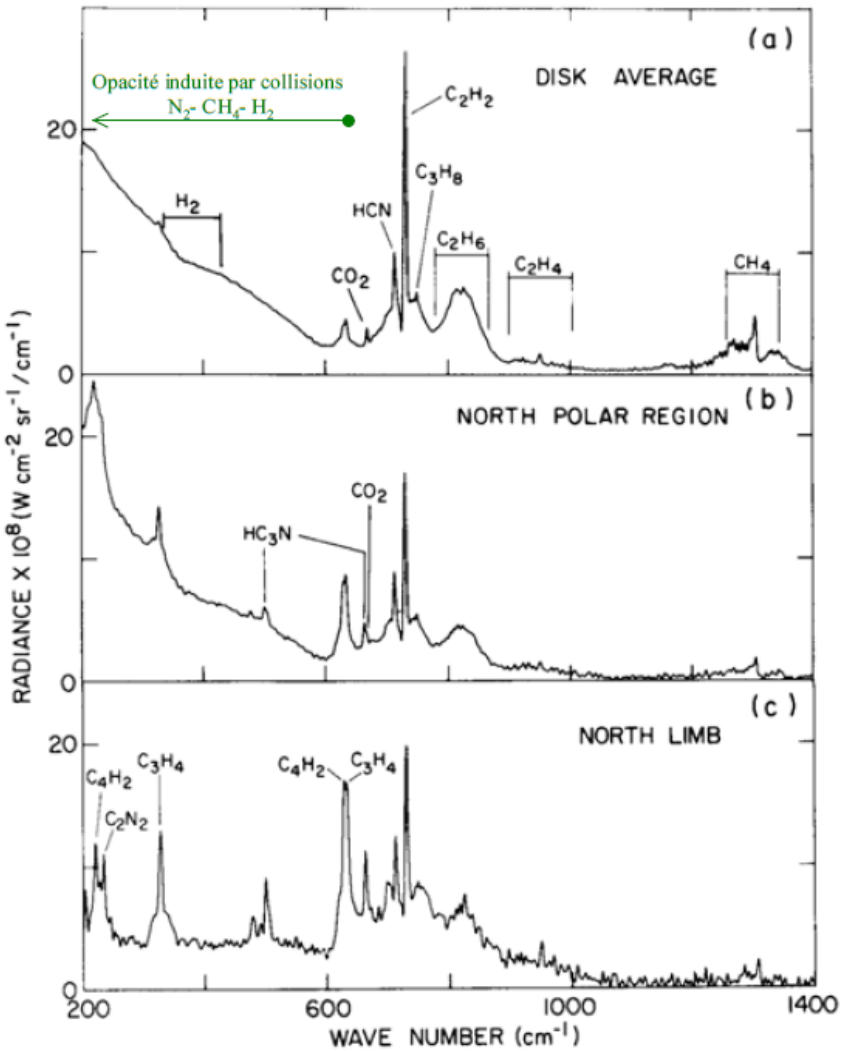
N_2,O_2	Pas de transitions dipolaires permises. Transitions interdites faibles. Vibration de N_2 à $4{,}29\,\mu$m.
H_2O	Bandes de vibration-rotation vers $6{,}3$ et $2{,}7\,\mu$m. Très important sur Terre.
CO_2	Bandes de vibration-rotation (15 ; $4{,}3$; $2{,}7\,\mu$m). Très important.
O_3, CH_4	Vers $9{,}6\,\mu$m (O_3) et $7{,}67\,\mu$m (CH_4). Très important sur Terre.
Aérosols	H_2O (Terre), H_2SO_4 (Vénus), H_2O et poussières (Mars). Très important.

Titan

N_2-CH_4-H_2	Par collisions (troposphère)
H_xC_y,Nitriles	Important dans la stratosphère
Aérosols	Nuages de CH_4 (troposphère), brouillard photochimique (stratosphère).



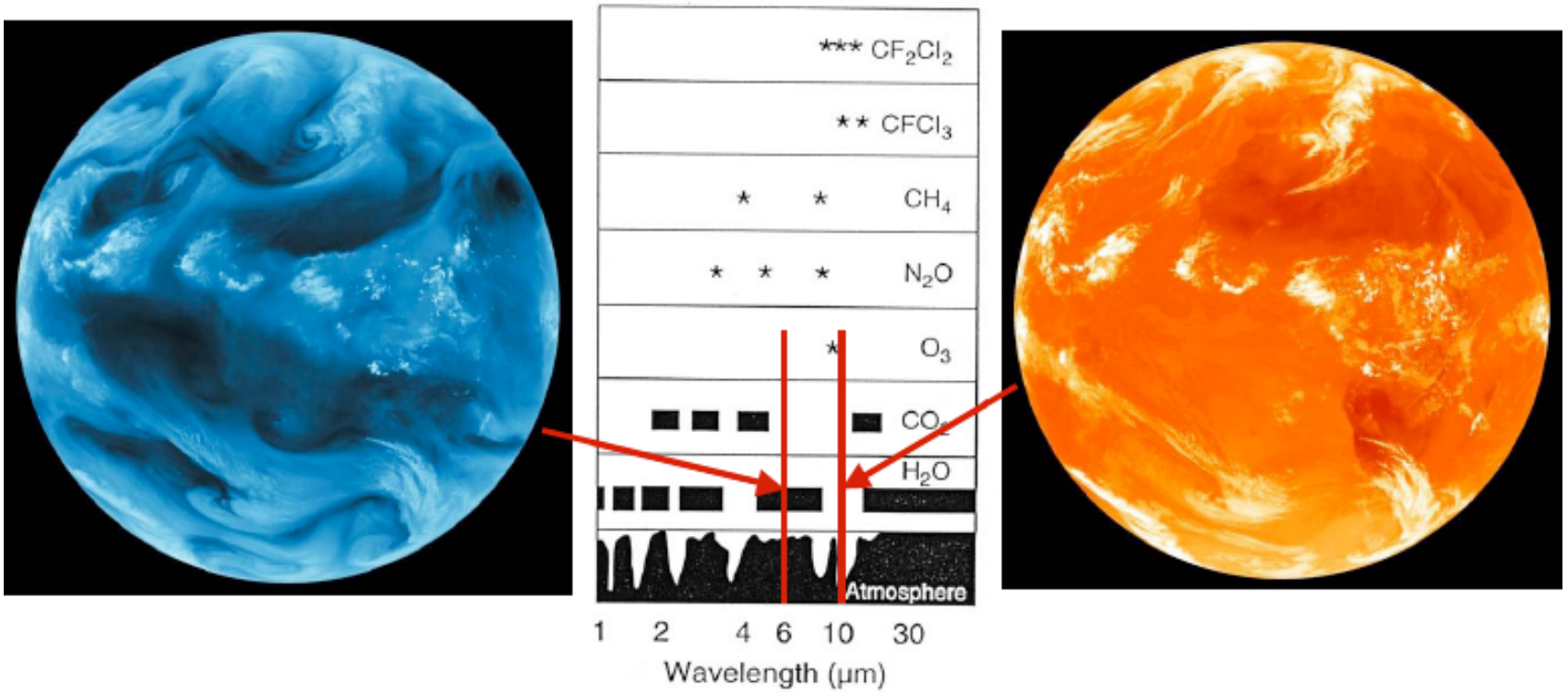
Emission thermique de Titan



Terre

Fenêtres de transparence par exemple $10{,}5$ à $12{,}5\,\mu\text{m}$

Fenêtres d'opacité par exemple H_2O de $5{,}7$ à $7{,}1\,\mu\text{m}$



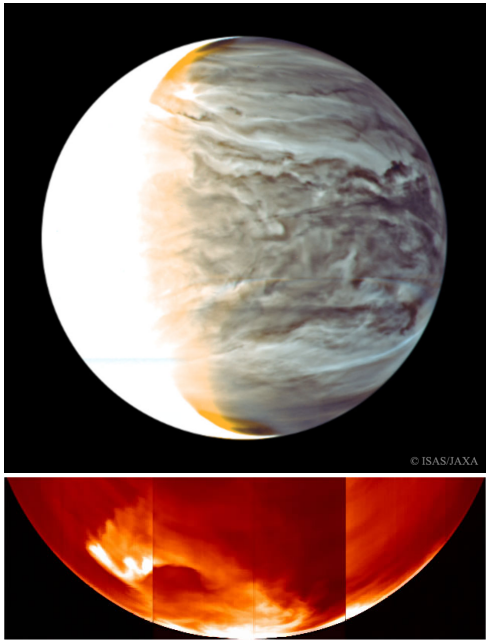
Vénus

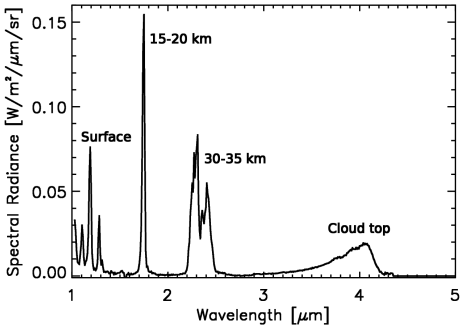
Fenêtres IR

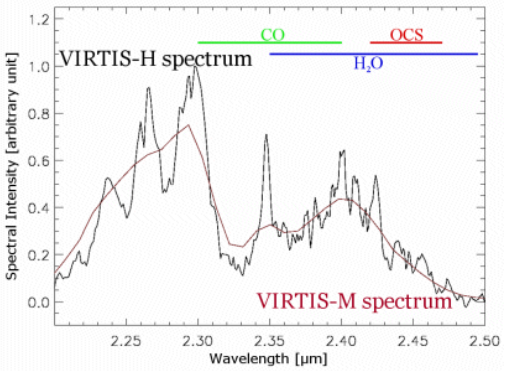
- H_2SO_4 peu absorbant à $\lambda < 2{,}5\,\mu m$
- Émission thermique de l'atmosphère profonde (et chaude) détectable côté nuit
- Mesures de composition (CO, OCS, H_2O, HDO, SO_2, HF, HCl)

Autres

- Fluorescences (recombinaison de O_2 et NO).



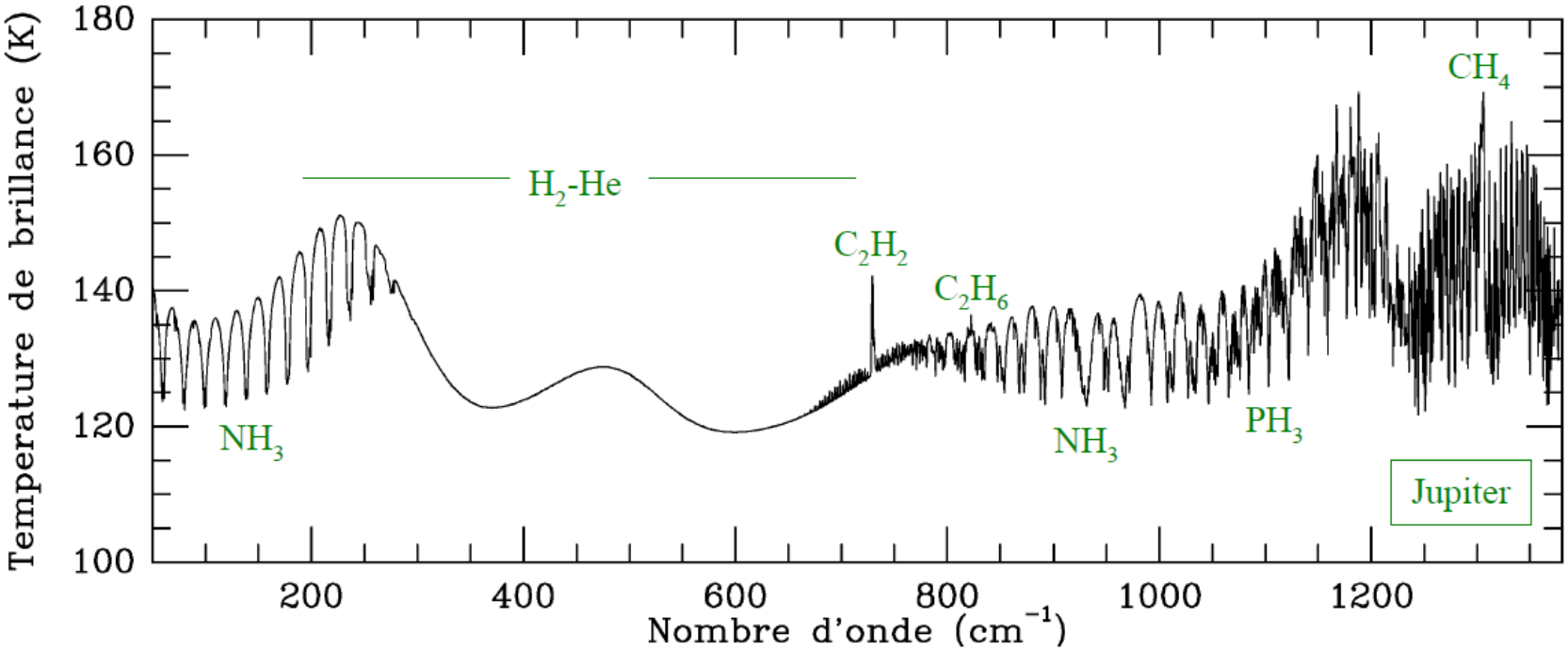




H_2, He Opacité induite par collisions H_2-H_2 et H_2-He. Importantes dans la troposphère.

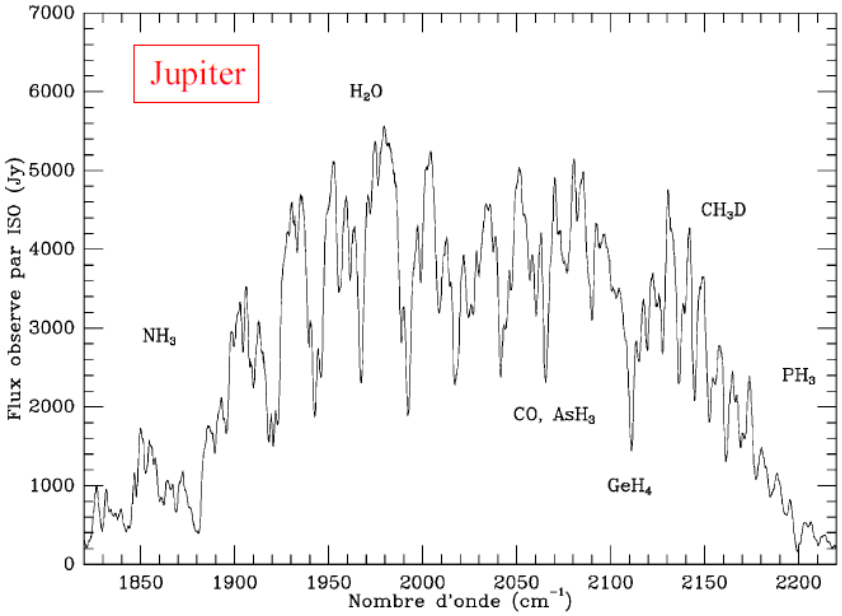
NH_3, PH_3 NH_3 pour Jupiter, PH_3 pour Saturne, raies rotationnelles et bandes de vibration-rotation.

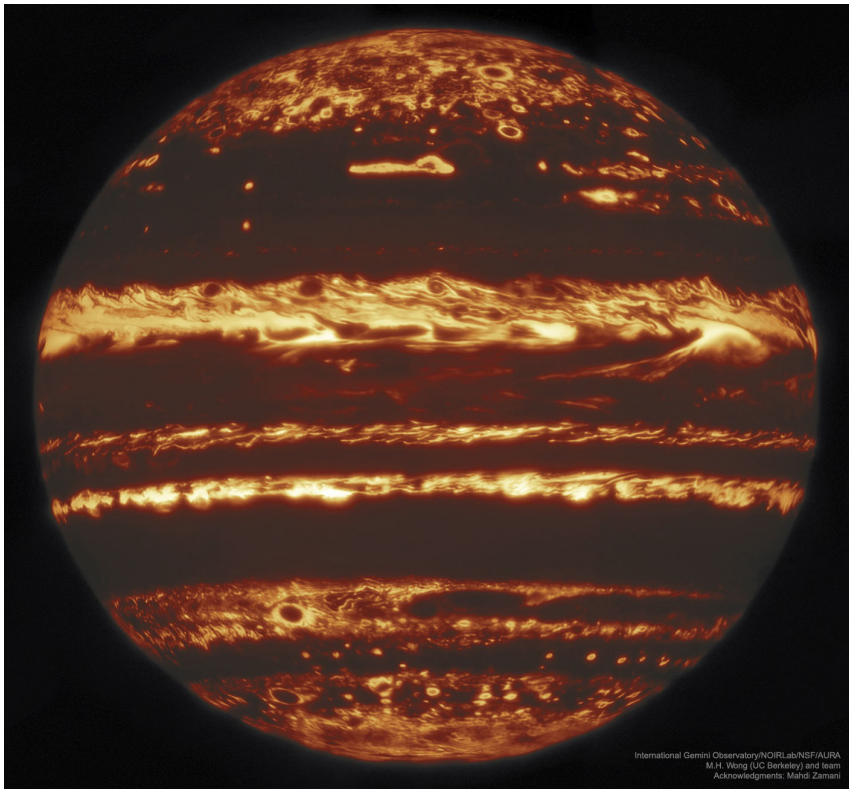
C_xH_y Bandes de vibration-rotation dans la stratosphère (CH_4 à 7,67 µm, C_2H_6 à 12,2 µm, C_2H_2 à 13,7 µm).



Fenêtres (Jupiter & Saturne)

- Sondent vers 4 à 7 bar
- Détection de H_2O, CO, NH_3, PH_3, CH_3D, GeH_4, AsH_3 ($0{,}2$ ppb !)



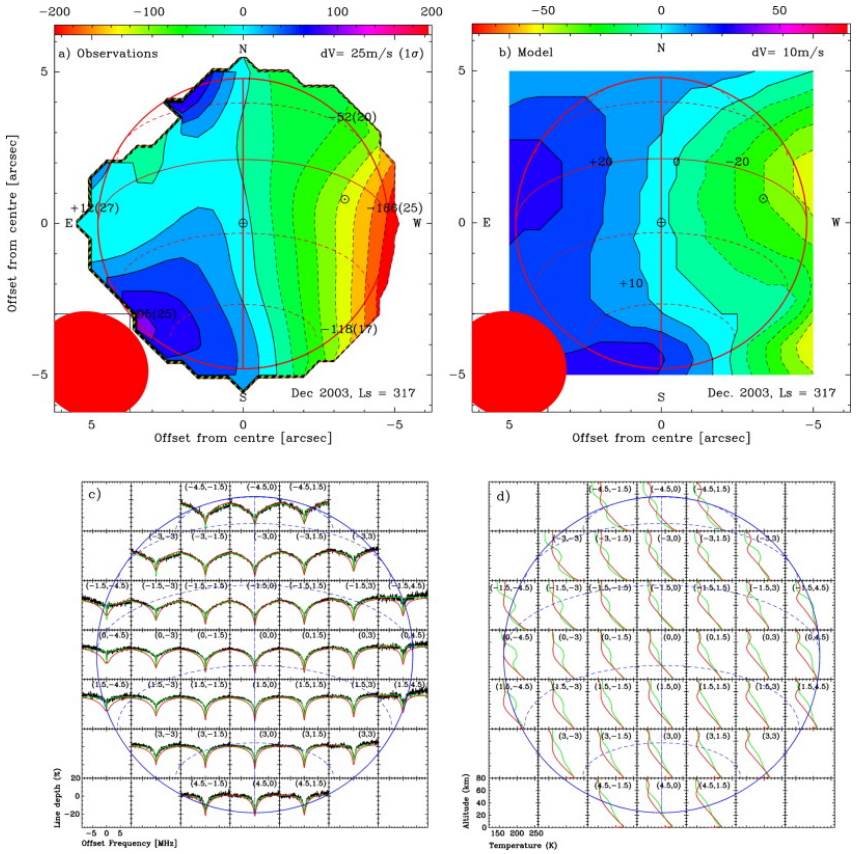


Processus

- Objets « froids » (quelques dizaines de K)
- Raies rotationnelles de CO (Vénus, Mars)
  - Inversion de $T(z)$
  - Cartes Doppler : vitesse des vents

Mesures

- Instruments hybrides entre radiotélescopes et télescopes optiques (ou IR).
- Atmosphère terrestre presque opaque : nécessité d'observatoires en altitude ou spatiaux.



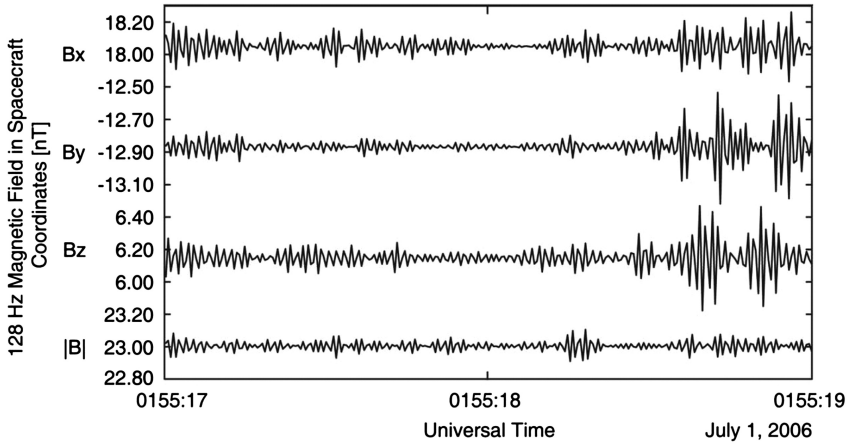
Raie rotationnelle de CO (0-1) observée sur Mars et carte Doppler

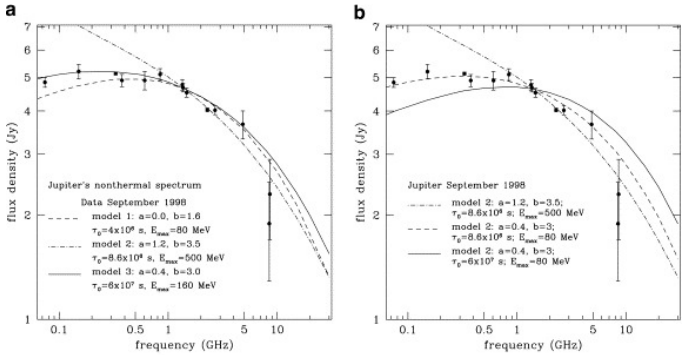
Processus

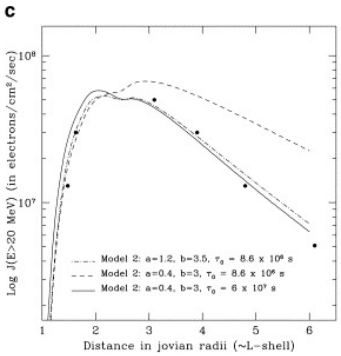
- Principalement **non thermiques**
  - Rayonnement synchrotron (e^- dans $\vec{B}$).
  - Rayonnement free-free (freinage e^- dans plasma)
  - Signature d'orages (Vénus, Terre, Jupiter), de phénomènes magnétosphériques et/ou ionosphériques.

Mesures

- Au sol : radio-télescopes.
- Unité de flux spectral : le *Jansky* ($1\,\mathrm{Jy} = 10^{-26}\,\mathrm{W.m^{-2}.Hz^{-1}}$).
- Utilisé de façon active : radar, réfraction.





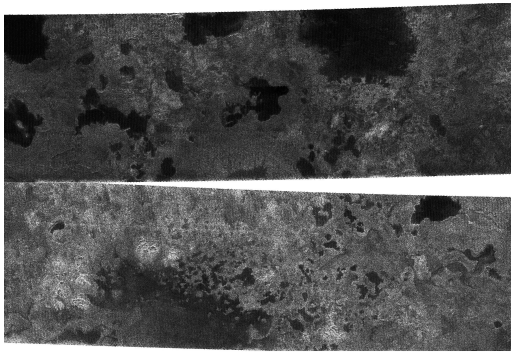


Principe

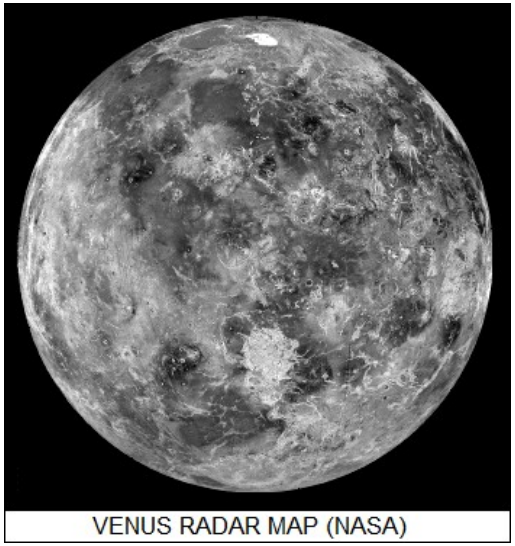
- Analyse d'ondes réfléchies par l'objet et émises par l'observateur (sondage actif)
  - Distribution angulaire et en longueur d'onde
  - Temps de retour : altimétrie
- Domaine radio : *radar*
- Domaine visible/NIR/UV avec laser : *lidar*

Utilisation en planétologie

- Examen de la rugosité des surfaces solides ou liquides.
- Altimétrie, stratigraphie



Titan *(Cassini)*



Vénus *(Magellan)*