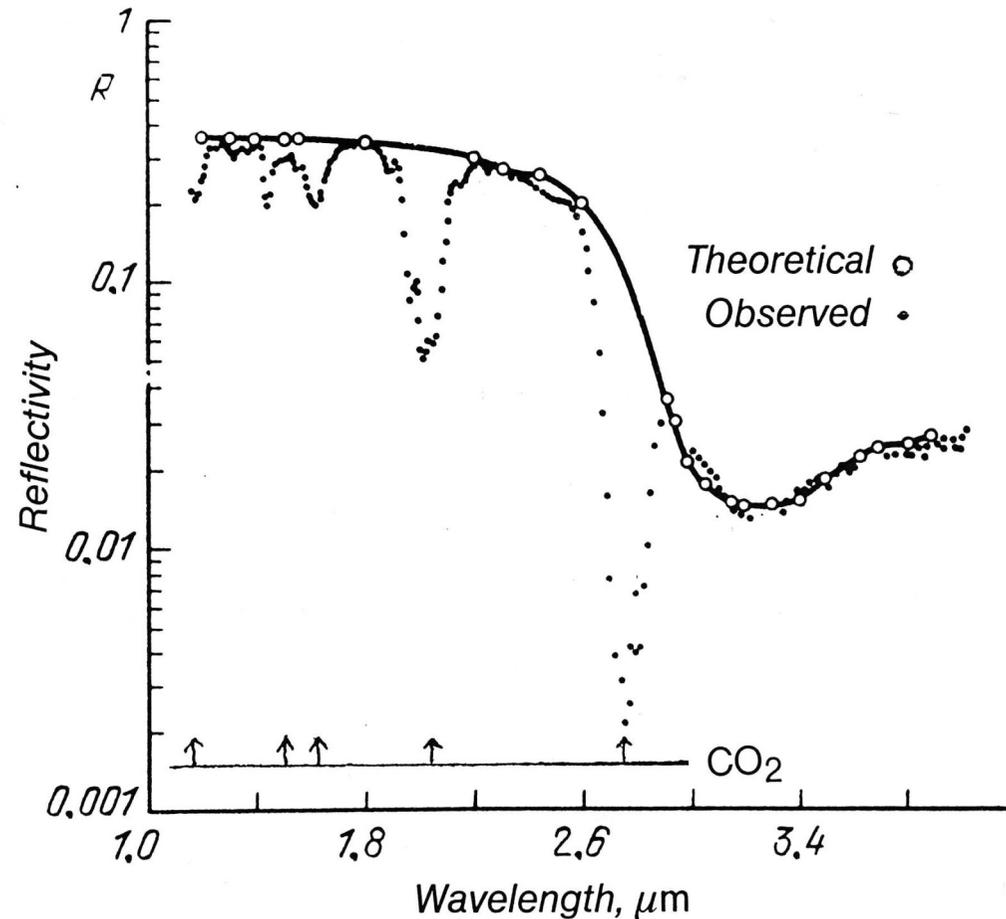


Planétologie comparative : atmosphère (1)



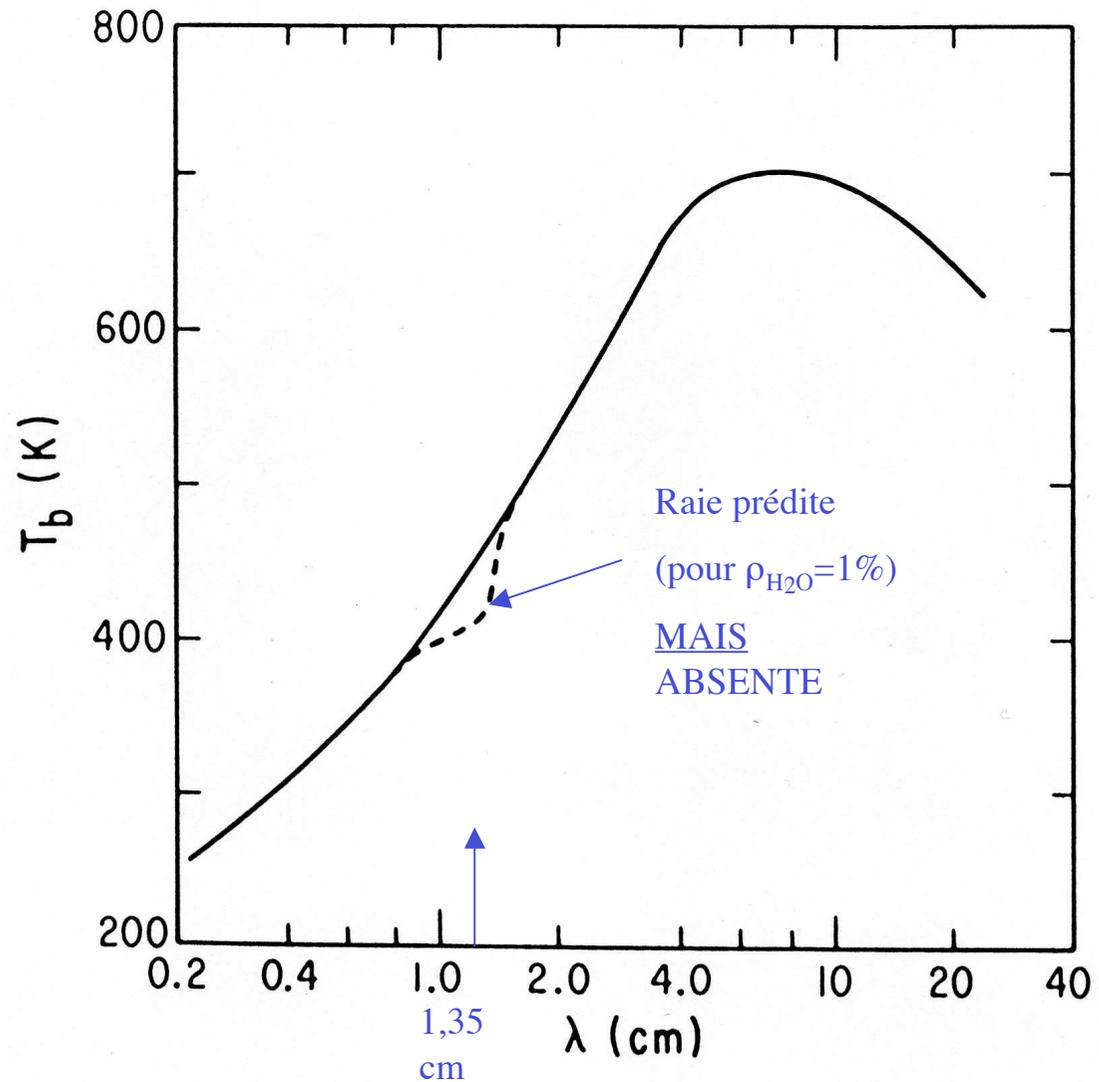
Premières observations de Vénus



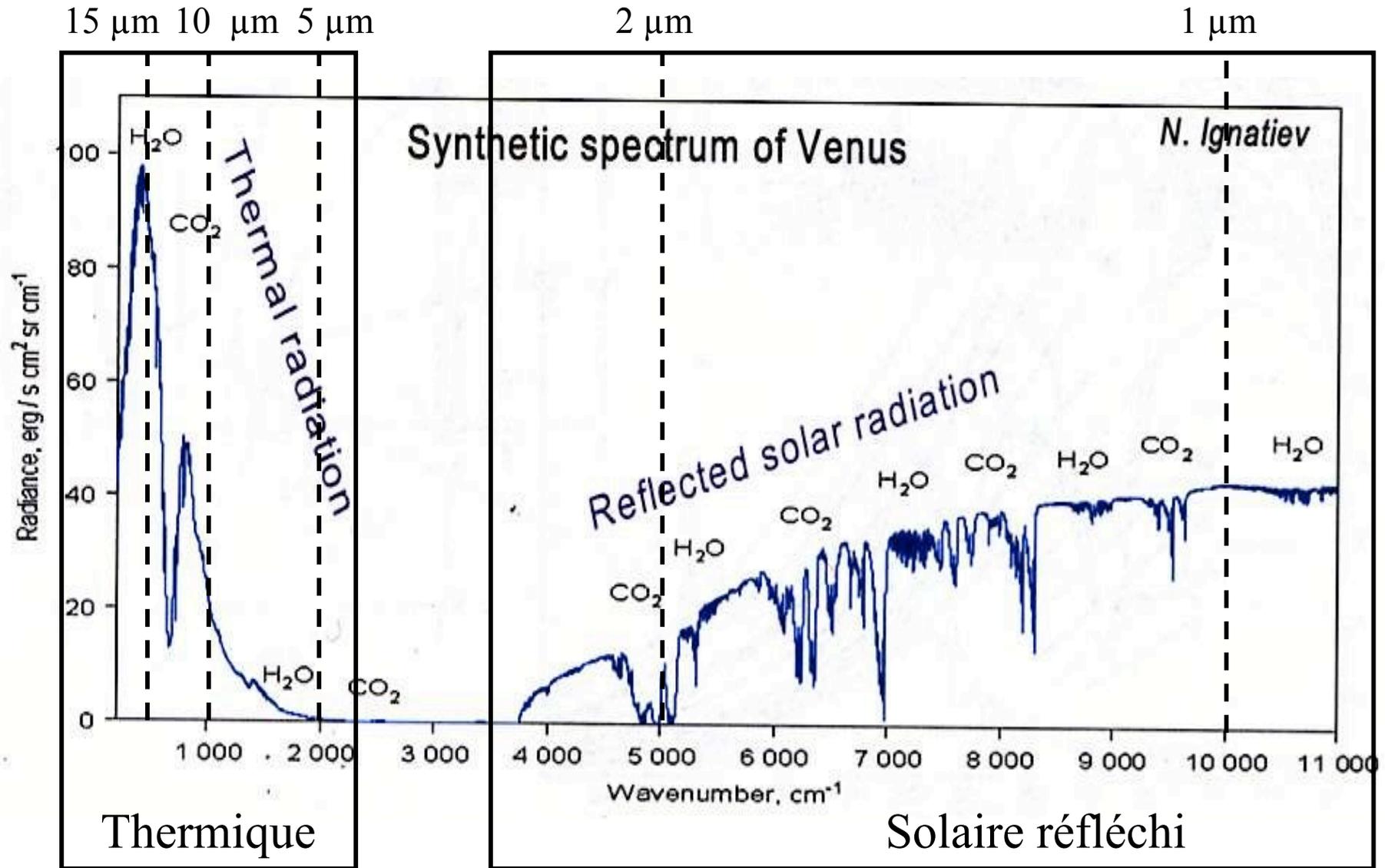
- Avant 1965, seul CO₂ détecté depuis la Terre (1932) : nombreuses bandes.
- En 1934, Rupert Wildt émet l'hypothèse d'un chauffage du sol par CO₂ (effet de serre).

Première mesure de la température de surface

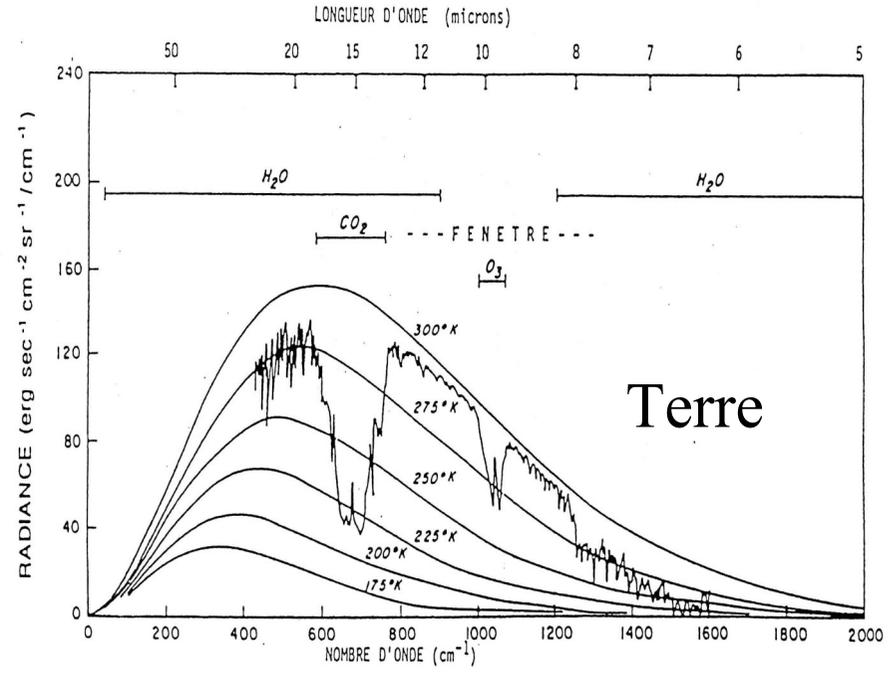
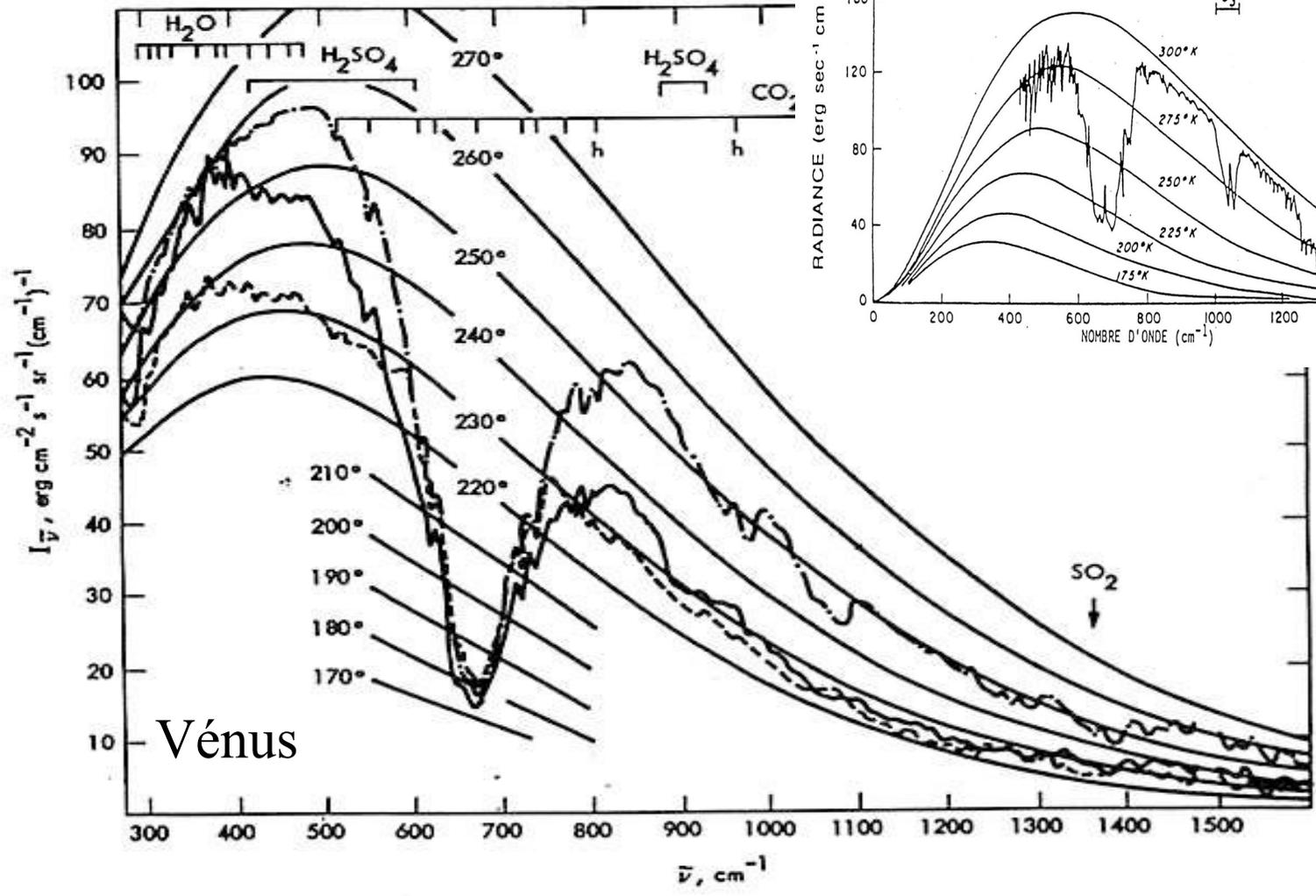
- 1958 : première mesure du spectre de Vénus : 400°C vers 3-4 cm (et peu ou pas de H₂O).
- 1962 : Carl Sagan reprend l'idée de Wildt et estime que 50 bars de CO₂ maintiennent la surface à 400°C.



Spectre synthétique de Vénus (Visible + IR)



Spectre d'émission infrarouge de Vénus



SO_2

Qu'observe-t-on sur le spectre d'émission?

- Solaire réfléchi et rayonnement thermique disjoints en longueur d'onde.
- Raies/ bandes d'absorption dans les deux cas. Dans le visible : absorption par les molécules. Dans l'IR?
- Le spectre d'émission de Vénus présente un maximum vers $15 \mu\text{m}$.

- Luminance énergétique du corps noir :

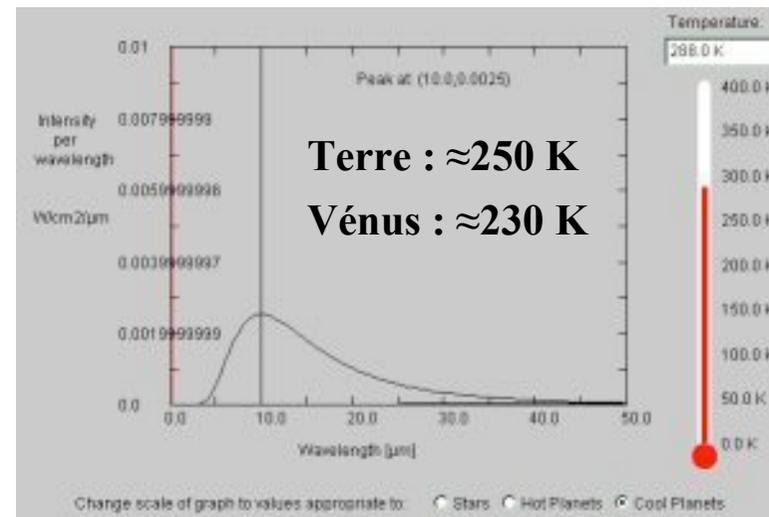
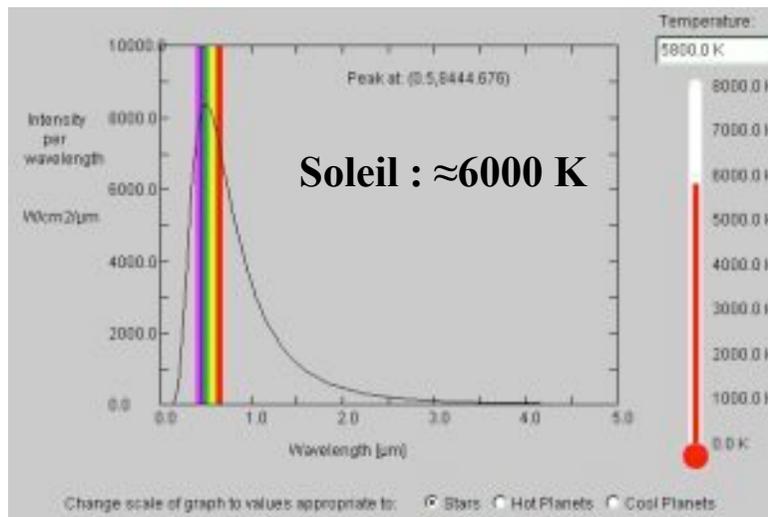
$$L(\nu)d\nu = (2h\nu^3/c^2)/(e^{h\nu/kT}-1)d\nu$$

- Loi de Stefan : $L_{\text{tot}} = \sigma T^4$

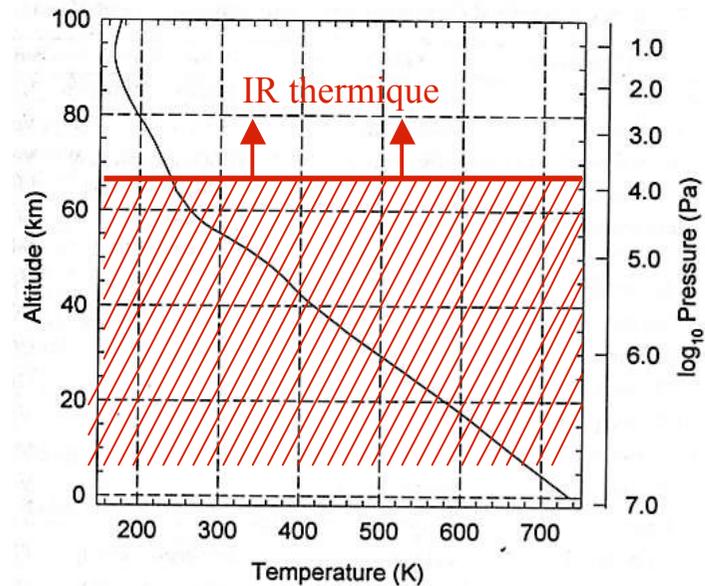
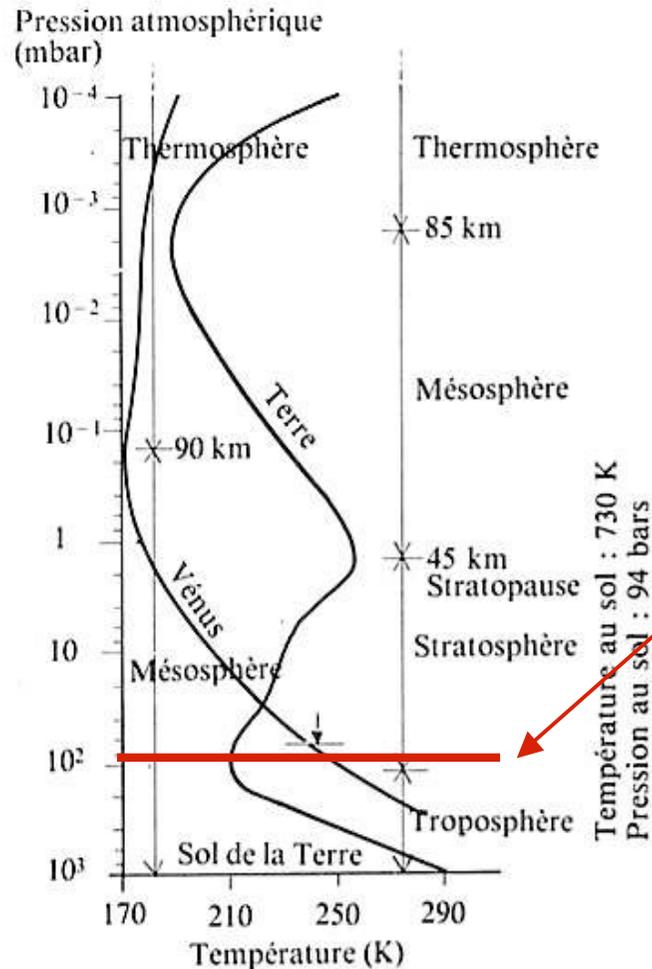
σ : cte de Stefan = $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

- Loi de déplacement de Wien :

$$\lambda_{\text{max}} = 2900/T (\mu\text{m})$$



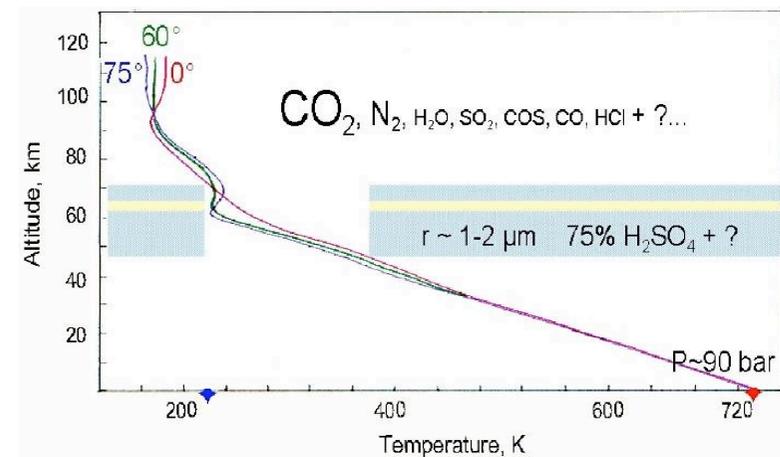
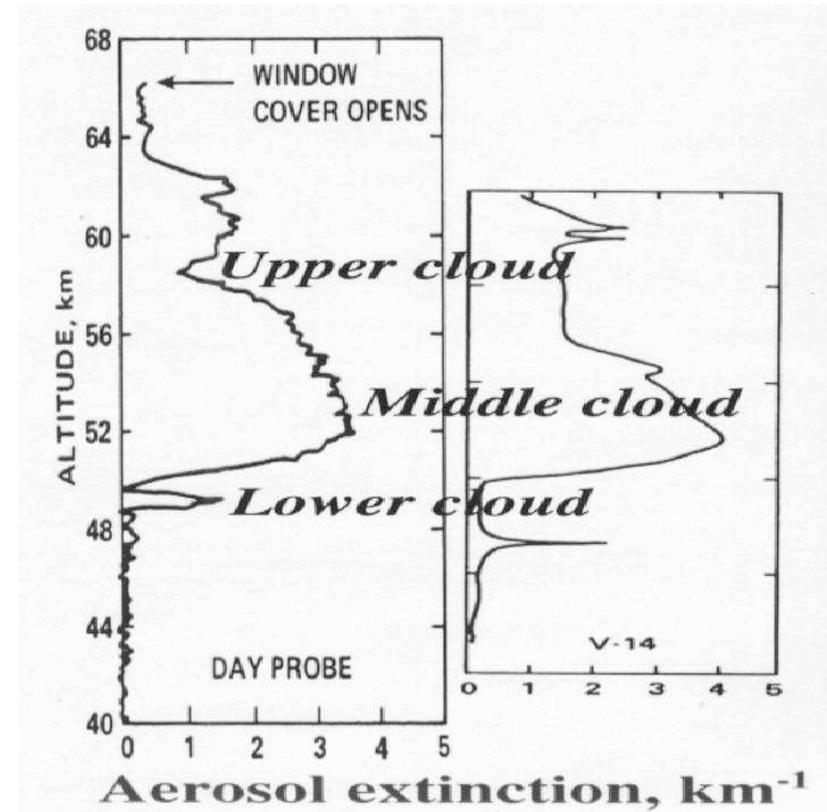
Structure thermique de l'atmosphère



- La température effective de Vénus (230 K) est la température atmosphérique à 100 mbar (65 km), au sommet des nuages.
- A la surface des nuages de Vénus, conditions p,T comparables à la Terre mais :
- Pas de stratosphère (due à O₃ sur la Terre)

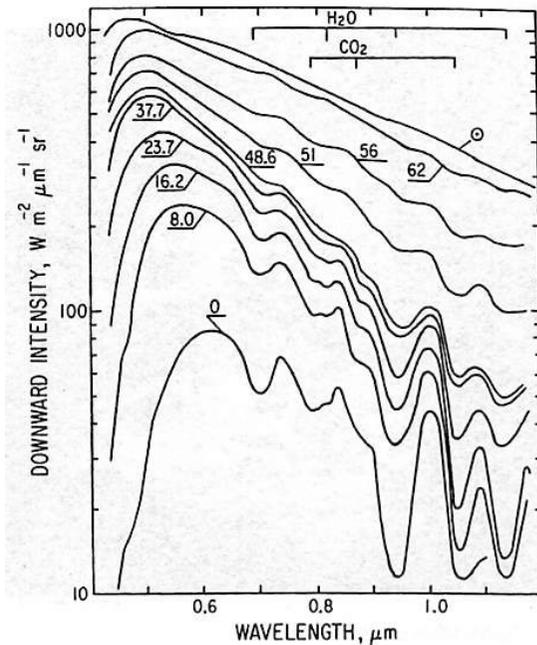
Principales caractéristiques des nuages

- Triple couche de gouttelettes de H_2SO_4 (et HCl) :
 - 57-68 km : rayon $3 \mu\text{m}$, densité $1\text{-}200 \text{ cm}^{-3}$.
 - 51-57 km : rayon $3,5 \mu\text{m}$, densité 250 cm^{-3}
 - 48-51 km : rayon $2\text{-}30 \mu\text{m}$ (comparable nuages terrestres), densité 50 cm^{-3}
- Brume au dessous : rayon $<0,5 \mu\text{m}$, densité $> 10^3 \text{ cm}^{-3}$.
- Opacité importante : épaisseur optique dans le visible de l'ordre de 40.

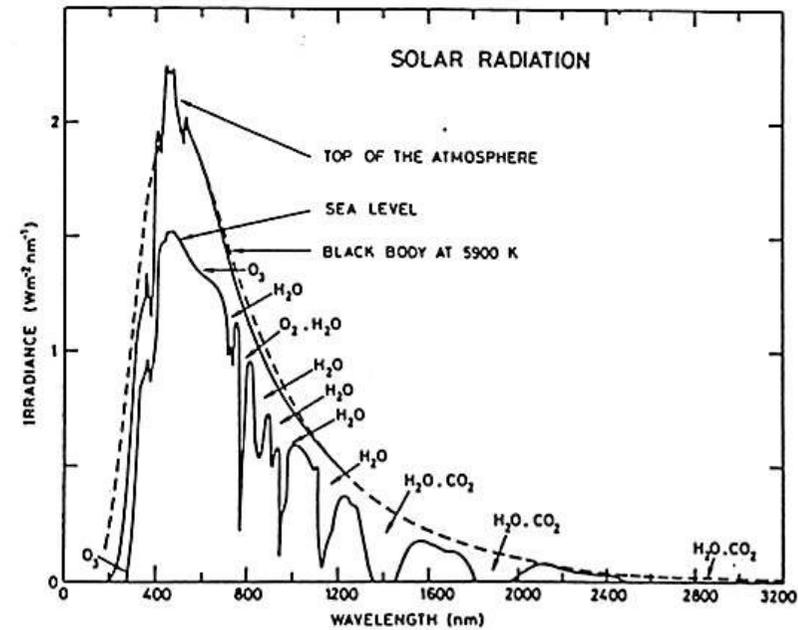


L'atténuation du rayonnement solaire par les nuages et l'atmosphère

Cas de Vénus



Cas de la Terre

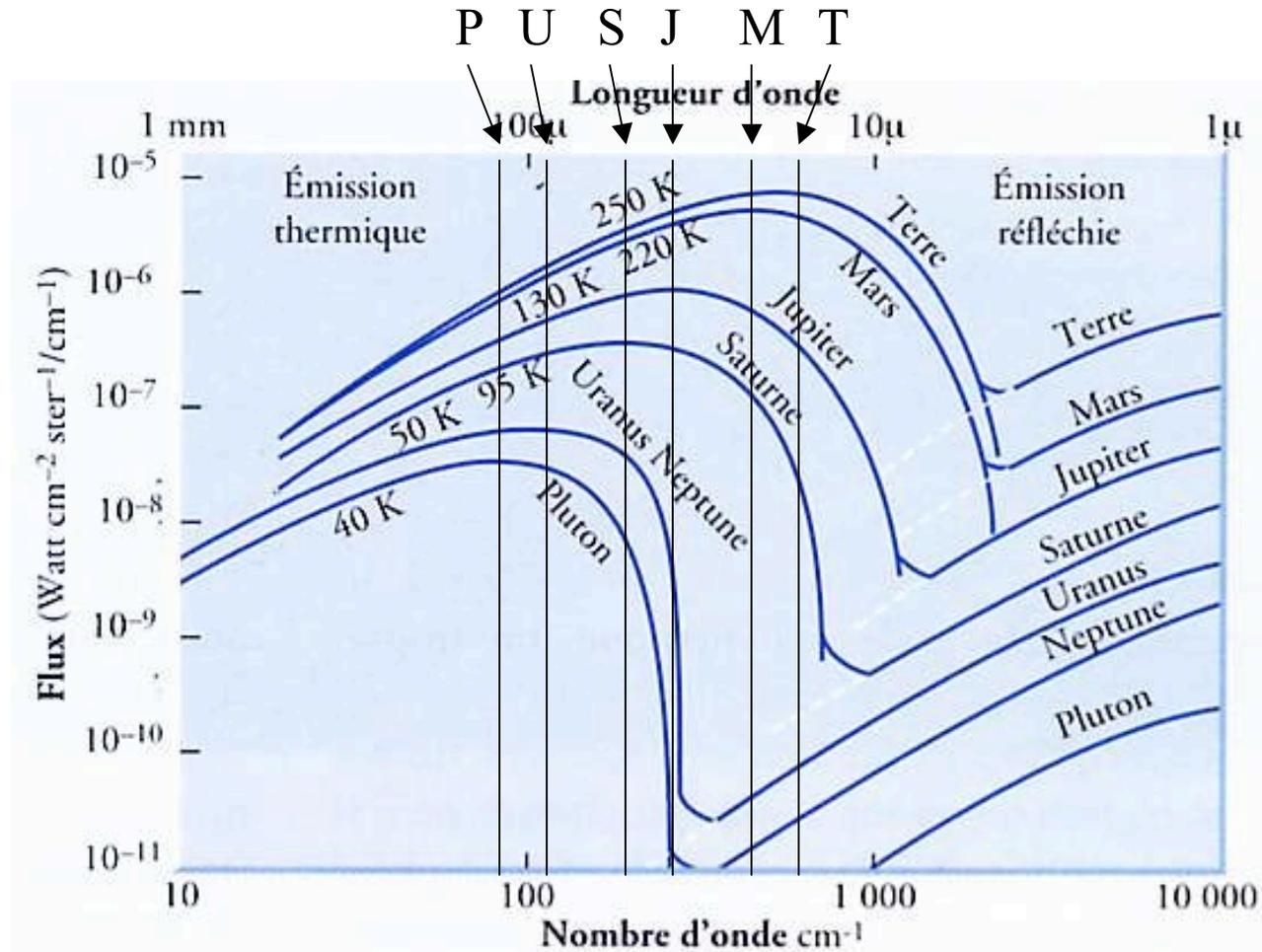


Moins de 10% du rayonnement solaire parvient à la surface de Vénus

Comment calculer la température d'émission de Vénus?

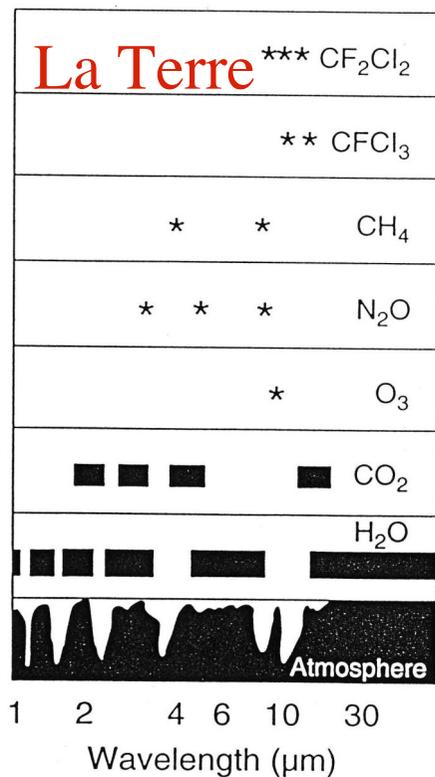
- En première approximation : la lumière solaire, (i) soit est réfléchi par la couche nuageuse (albedo $a \approx 0,75$), (ii) soit la traverse et ne ressort pas (absorbée au dessous des nuages).
- Bilan d'énergie à la surface des nuages :
 - $F d_{UA}^{-2} \pi r^2 (1-a) = 4 \pi r^2 \sigma T_e^4$ (F -cte solaire- = $1350 \text{ J m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)
 - Donc $T_e^4 = F d_{UA}^{-2} (1-a)/4\sigma$
 - Application numérique :
 - pour Vénus : $d_{UA} = 0,7, a \approx 0,75, T_e \approx 230 \text{ K}$
 - pour la Terre : $d_{UA} = 1, a \approx 0,30, T_e \approx 255 \text{ K}$
 - pour Mars : $d_{UA} = 1,5, a \approx 0,15, T_e \approx 220 \text{ K}$
- Comment varie T_e avec la distance au soleil? $T_e \approx d^{-1/2}$
- Comment varie λ_{\max} avec la distance au soleil? $\lambda_{\max} \approx d^{1/2}$

Spectres d'émission des planètes

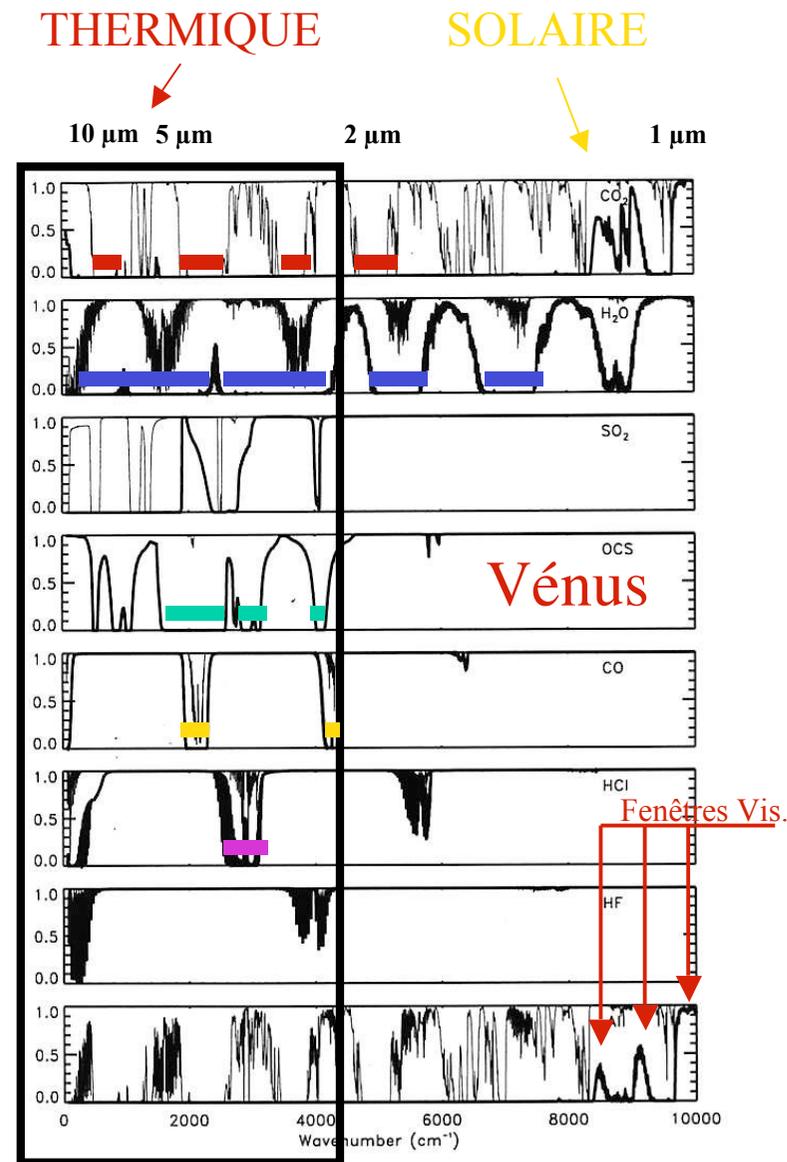


Planète	Distance
Terre	1
Mars	1,5
Jupiter	5,2
Saturne	9,5
Uranus/ Neptune	19/30
Pluton	39

Le blocage du rayonnement thermique du sol par l'atmosphère



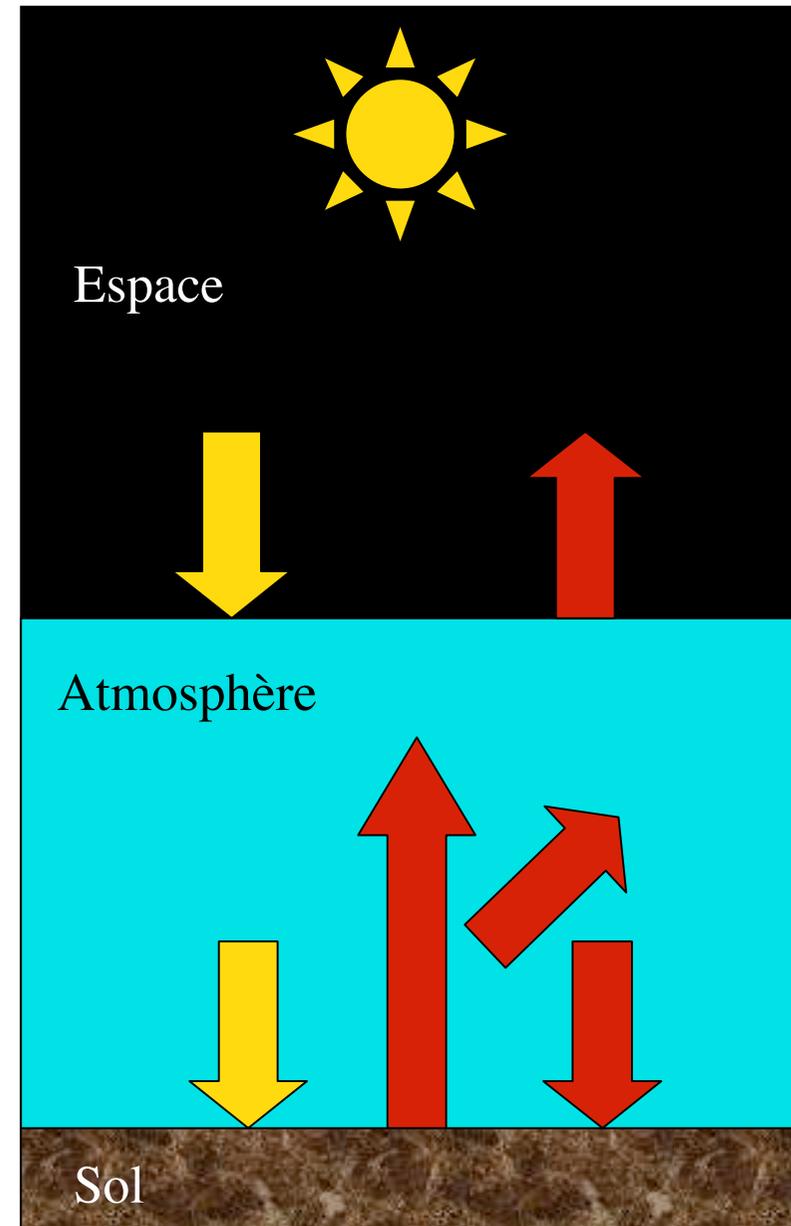
Coefficient d'absorption



Coefficient de transmission

Modèle à une couche opaque dans l'IR

- Atmosphère isotherme.
- Atmosphère opaque dans l'infrarouge
- Atmosphère transparente dans le visible.
- Dans ce cas : $T_s^4 = 2 T_e^4$.
- Cas terrestre : $(T_s/T_e)^4 = 1,62$ (transparence partielle dans l'IR), cas de Vénus : $(T_s/T_e)^4 = 104$ (variation verticale de T dans la couche opaque).



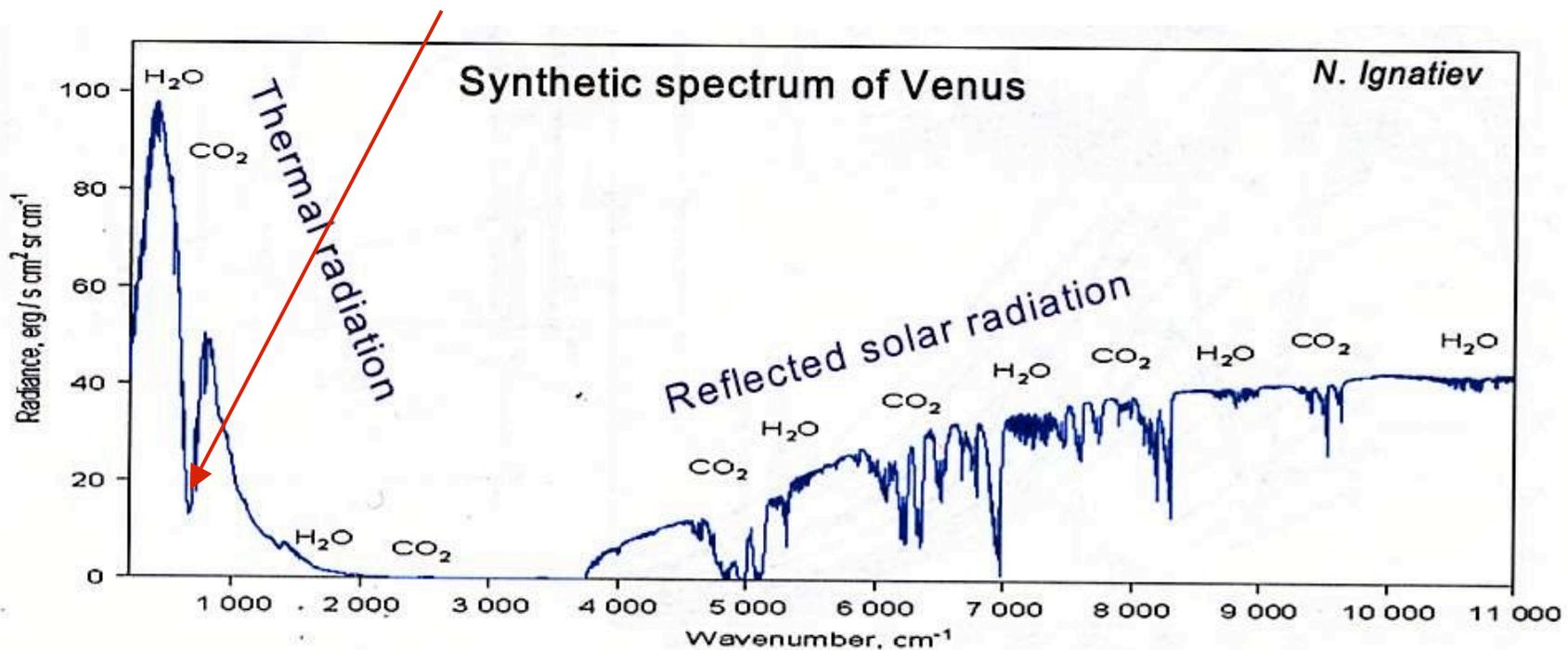
Température effective/ température de surface

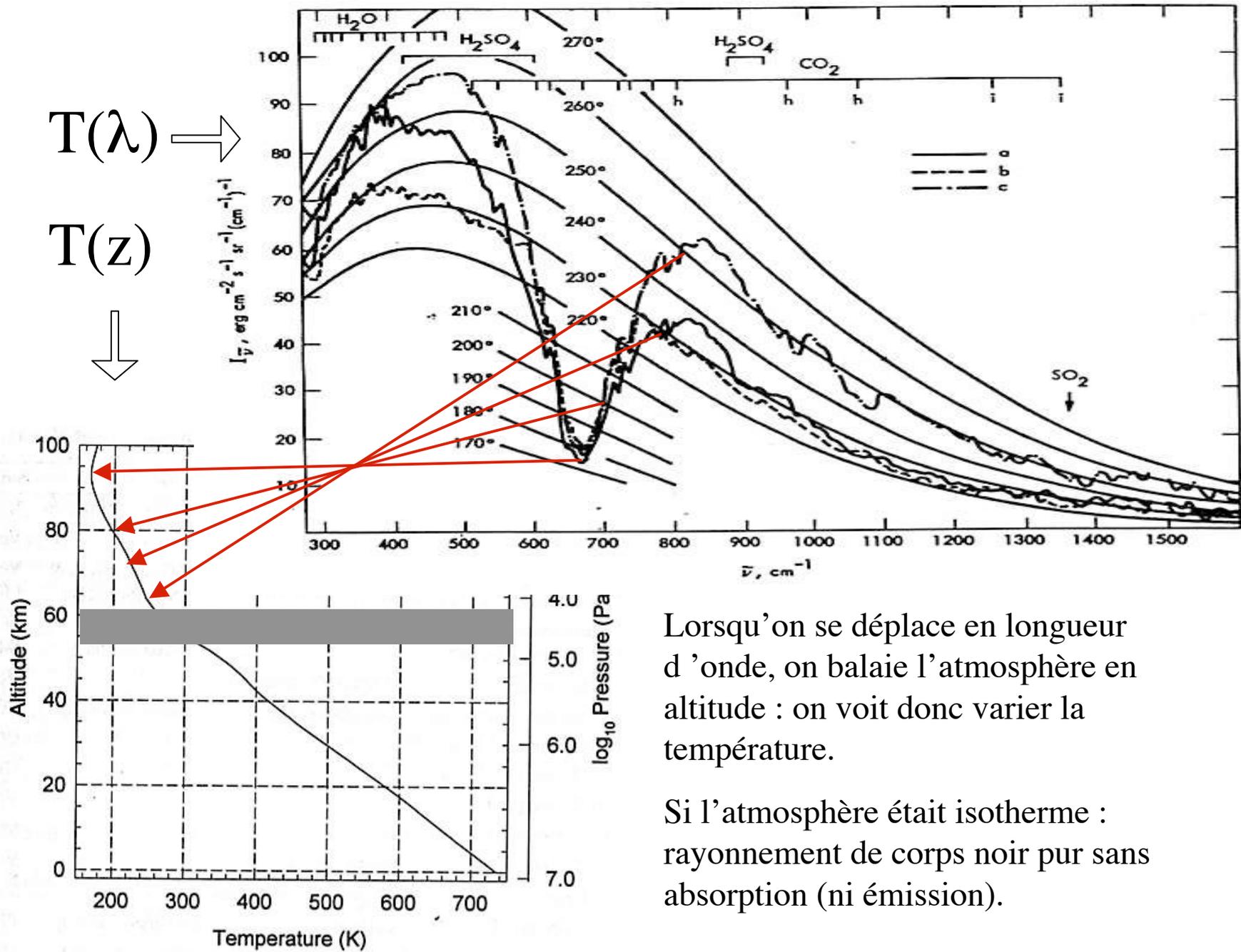
- Nuages de Vénus très réfléchifs et couverture globale (contrairement à la Terre : 50%) : Vénus absorbe moins d'énergie solaire que la Terre.
- Flux solaire absorbé = flux IR émis : $T_{\text{eff}} = 230 \text{ K}$ (température du corps noir émettant le même flux d'énergie que Vénus).
- Effet de serre énorme : $T_s - T_{\text{eff}} = 505 \text{ K}$ (33 K pour la Terre)

	Venus	Terre	Mars
Température de surface	735K	288K	218K
Température effective	230K	255K	215K
Gaz à effet de serre	CO ₂ , H ₂ O, SO ₂ , CO et nuages H ₂ SO ₄	H ₂ O, CO ₂ +...	CO ₂
ΔT effet de serre	505K	33K	3K

Pourquoi la bande de CO₂ à 15 μm est-elle vue en absorption dans le spectre de Vénus?

- Les photons provenant du centre de la raie (où l'opacité est grande) sont émis plus haut dans l'atmosphère que les photons provenant des ailes : ils sont « plus froids » ($T_{\text{emi}} = T_{\text{cin}}$ à l'équilibre thermodynamique local, vrai à $p > 0,1$ mbar).

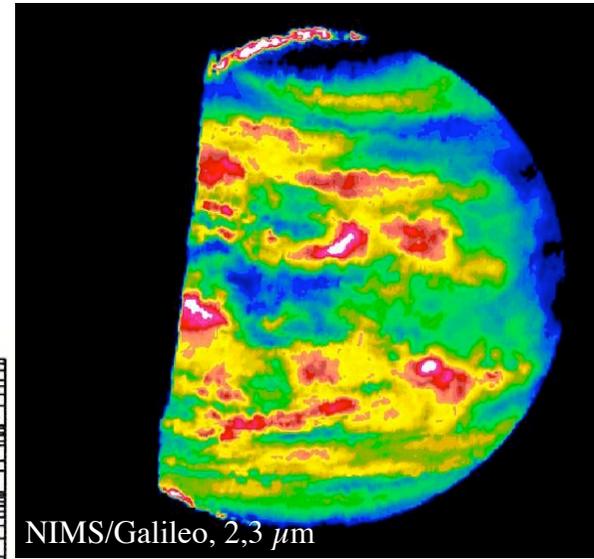
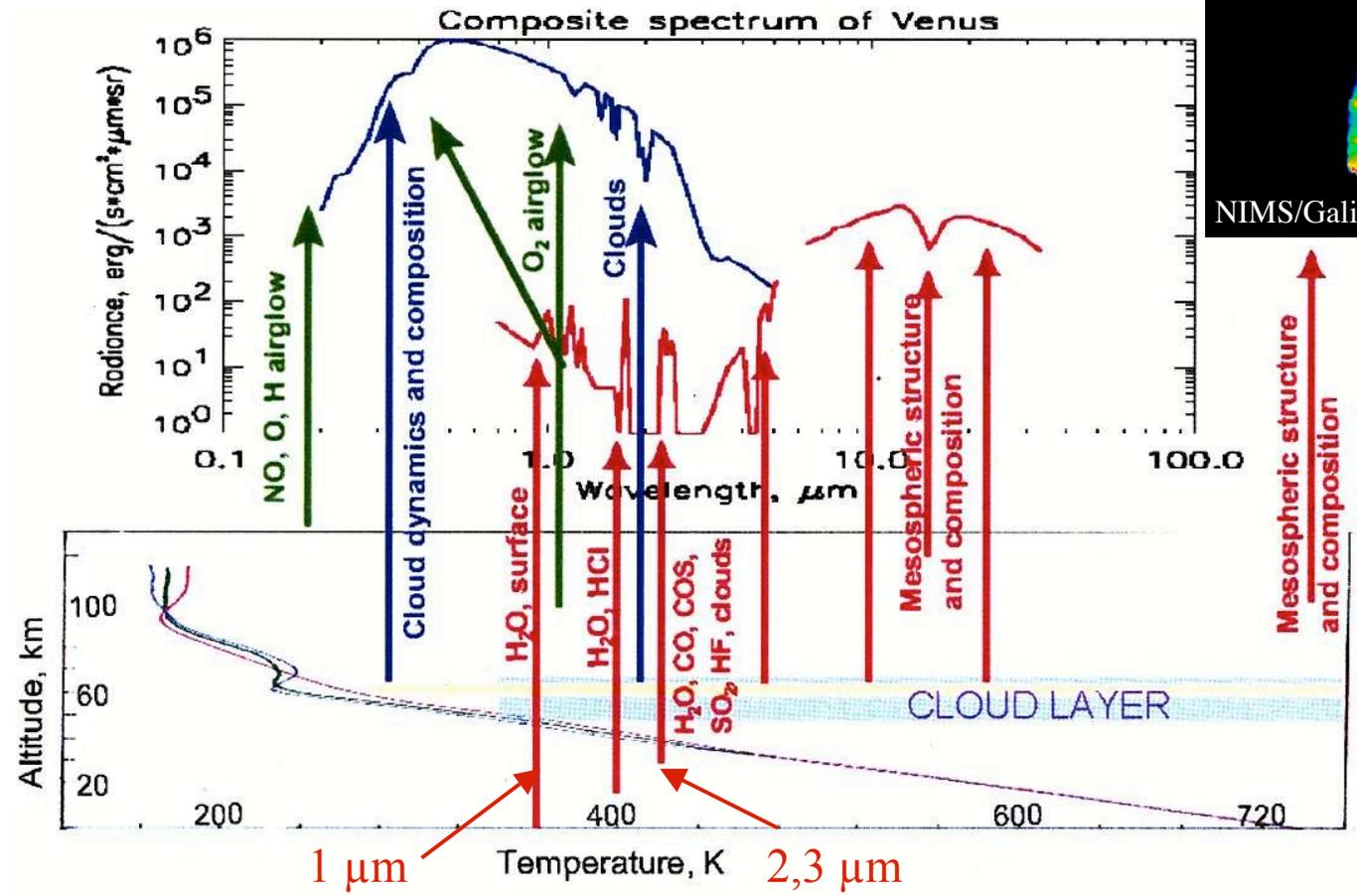




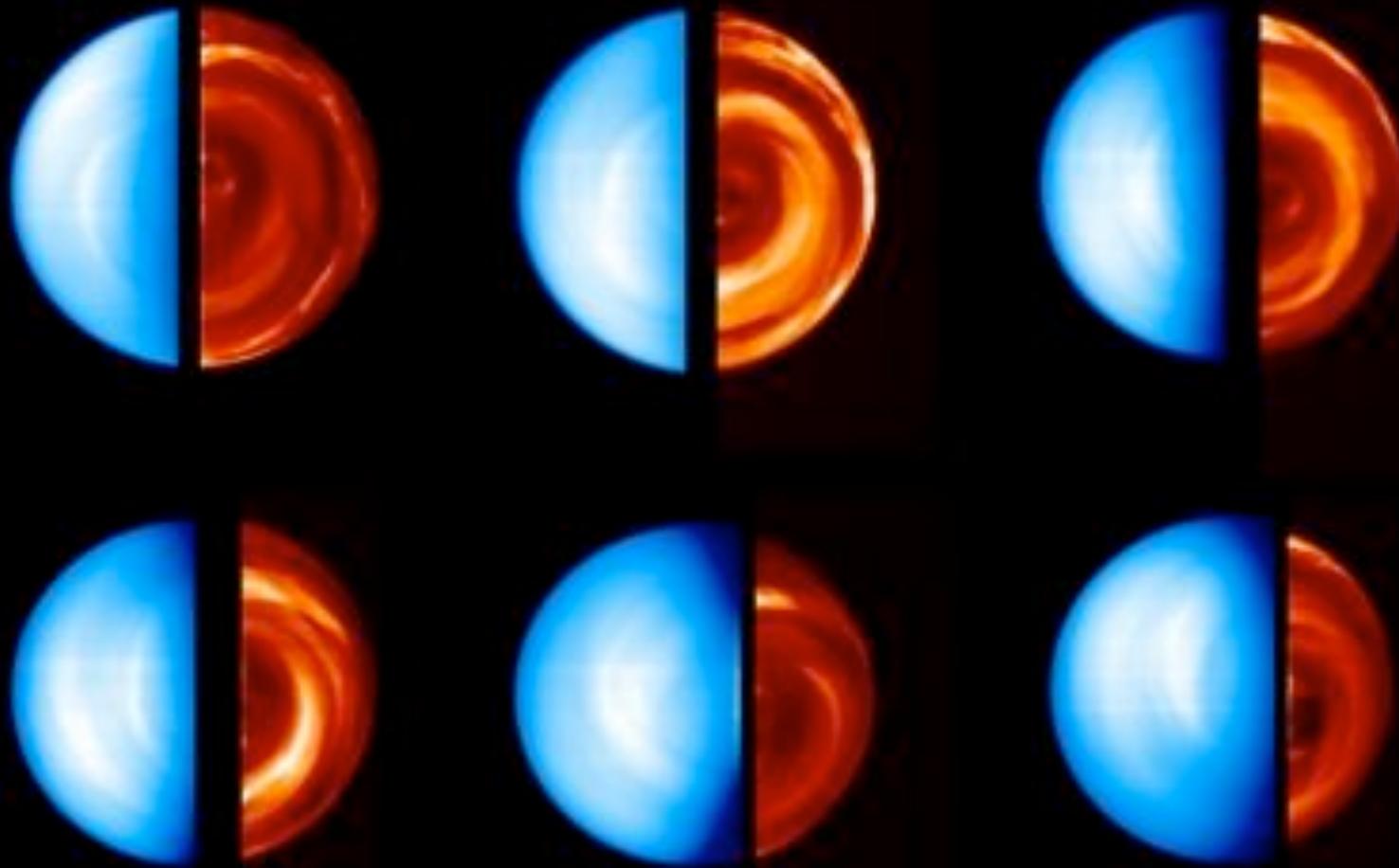
Lorsqu'on se déplace en longueur d'onde, on balaie l'atmosphère en altitude : on voit donc varier la température.

Si l'atmosphère était isotherme : rayonnement de corps noir pur sans absorption (ni émission).

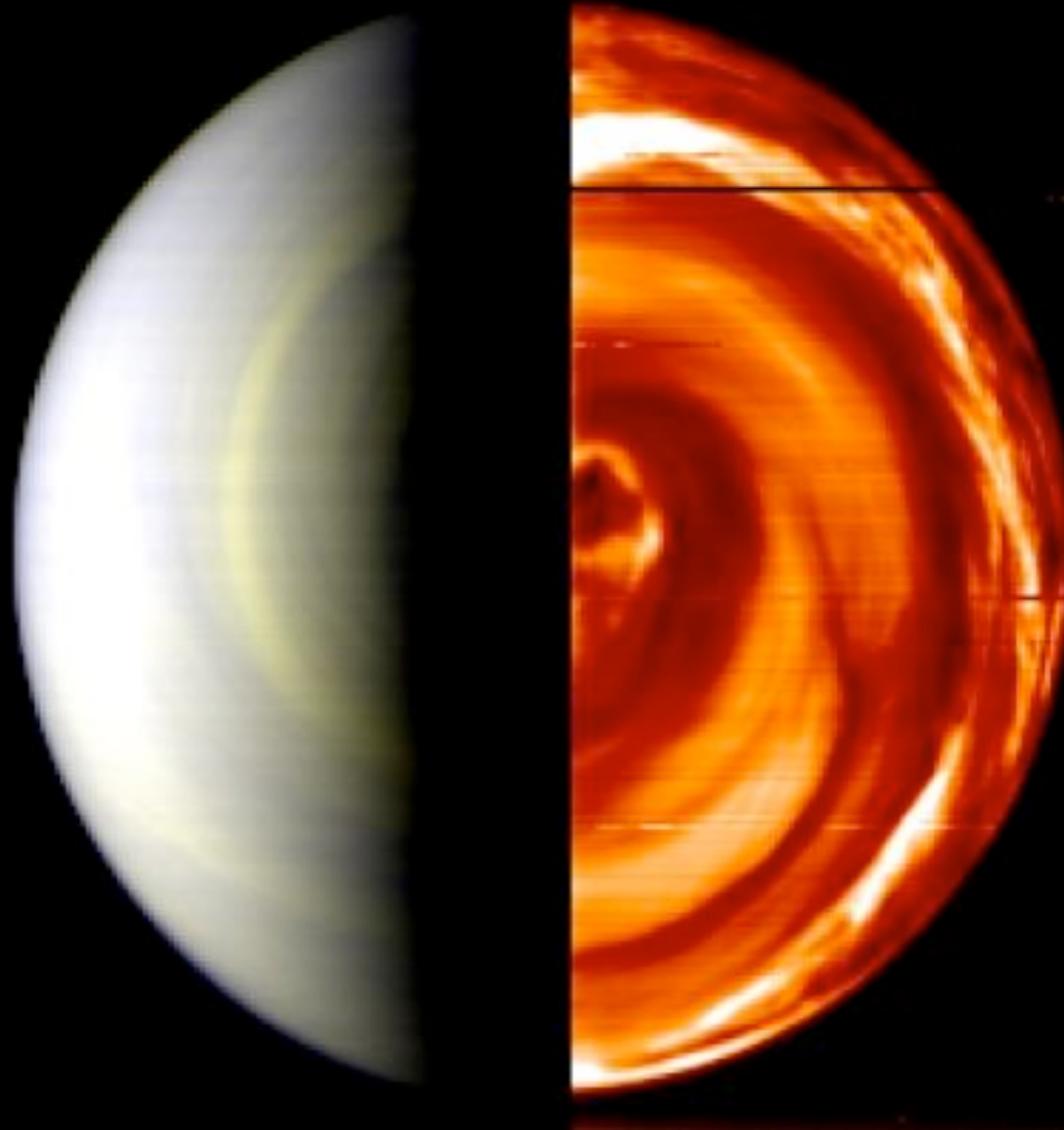
Le rayonnement sortant de Vénus : fenêtres atmosphériques

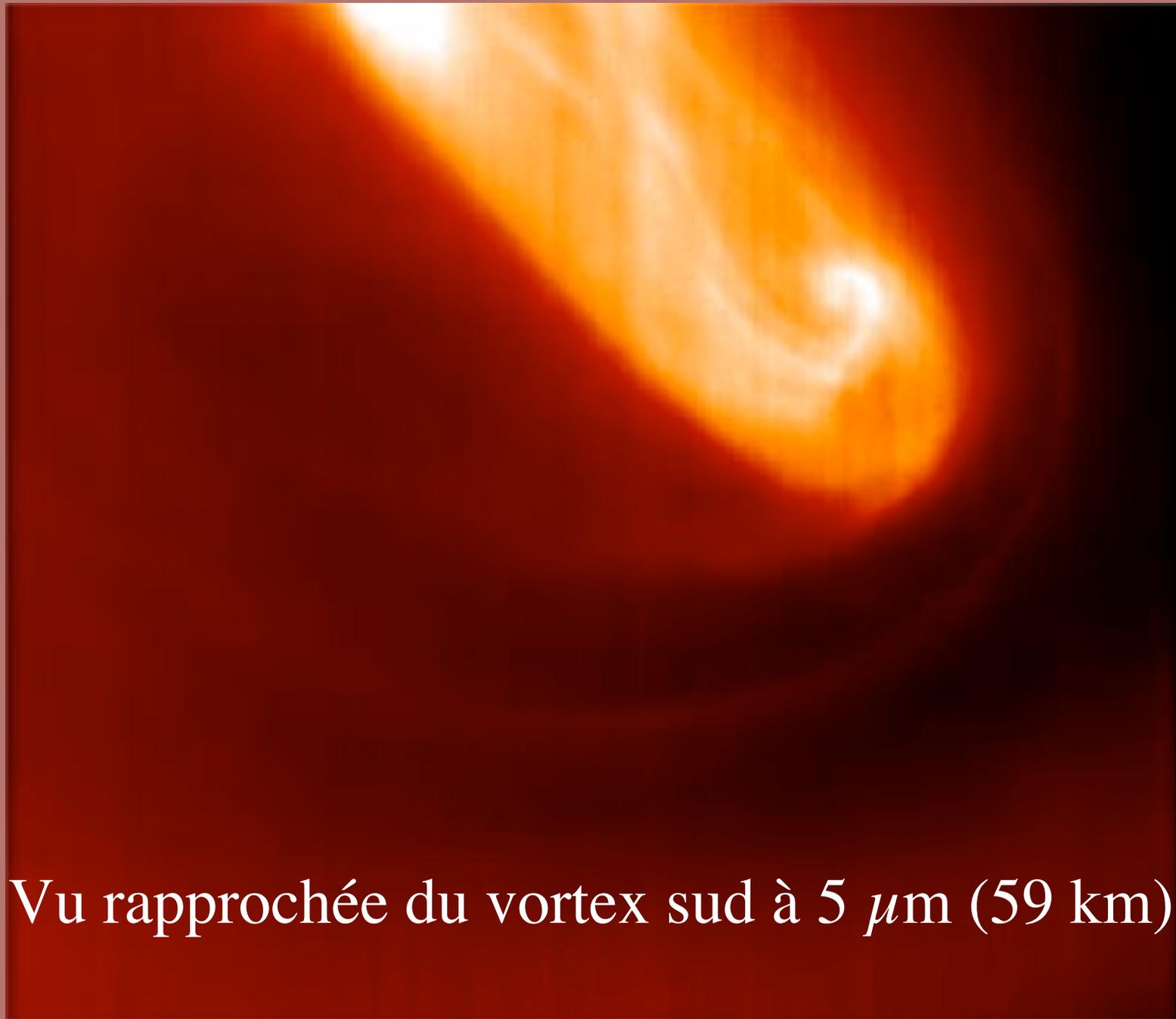


Vénus dans l'ultraviolet (380 nm, 65 km)
et l'infrarouge (1.7 μm , 25 km)



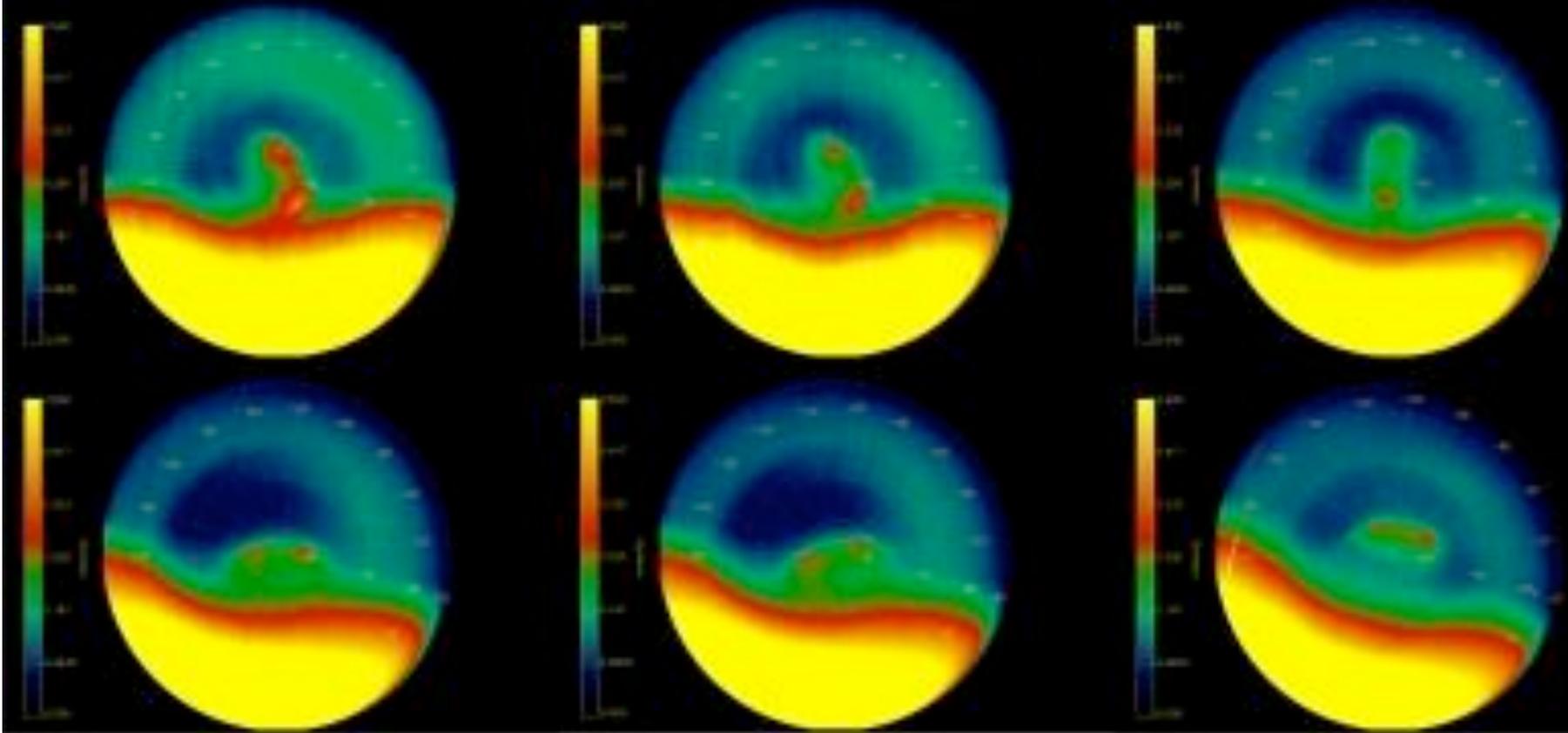
Pôle sud de Vénus vu par VIRTIS dans le visible
(65 km) and l'infrarouge (1.7 μm , 25 km)

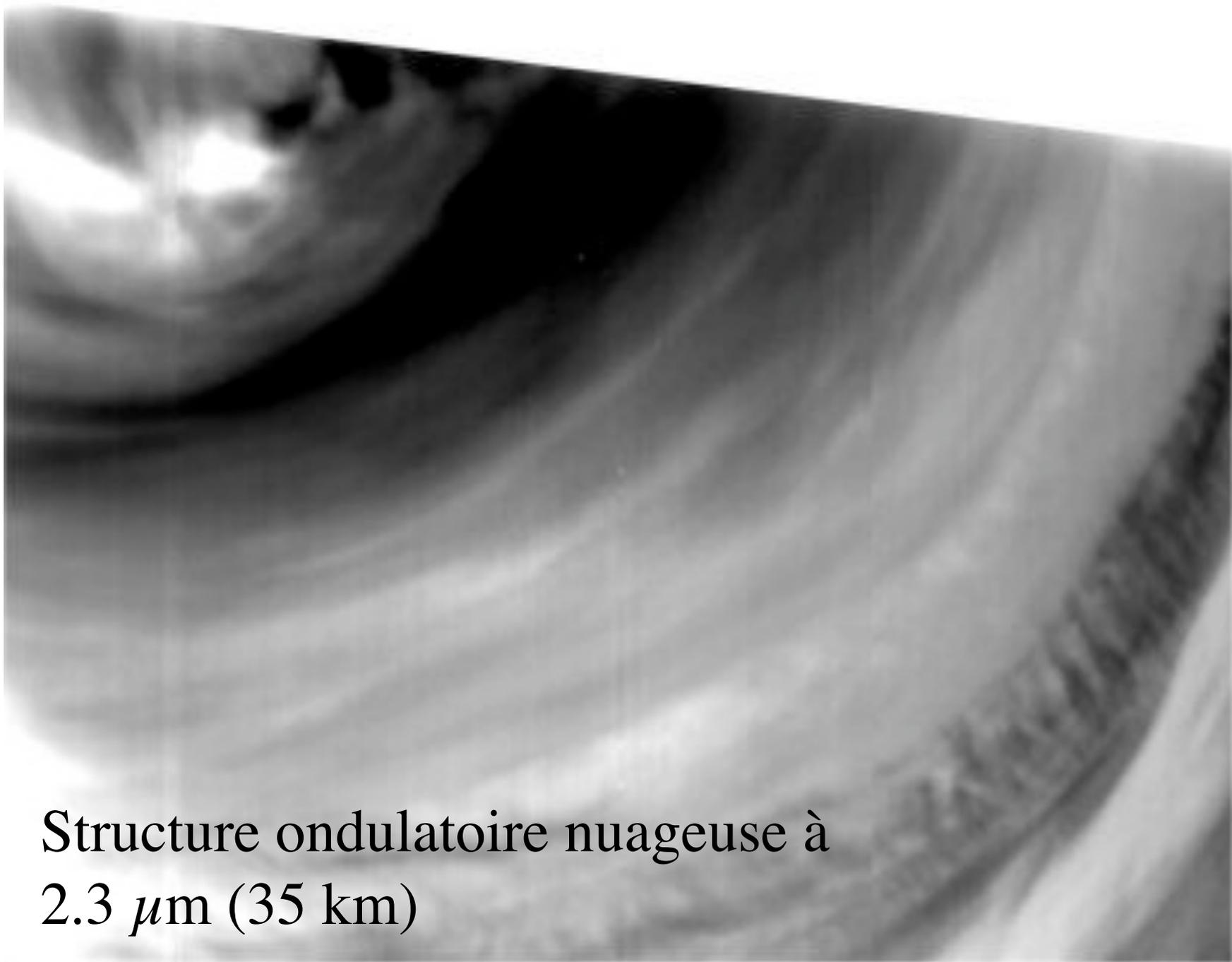




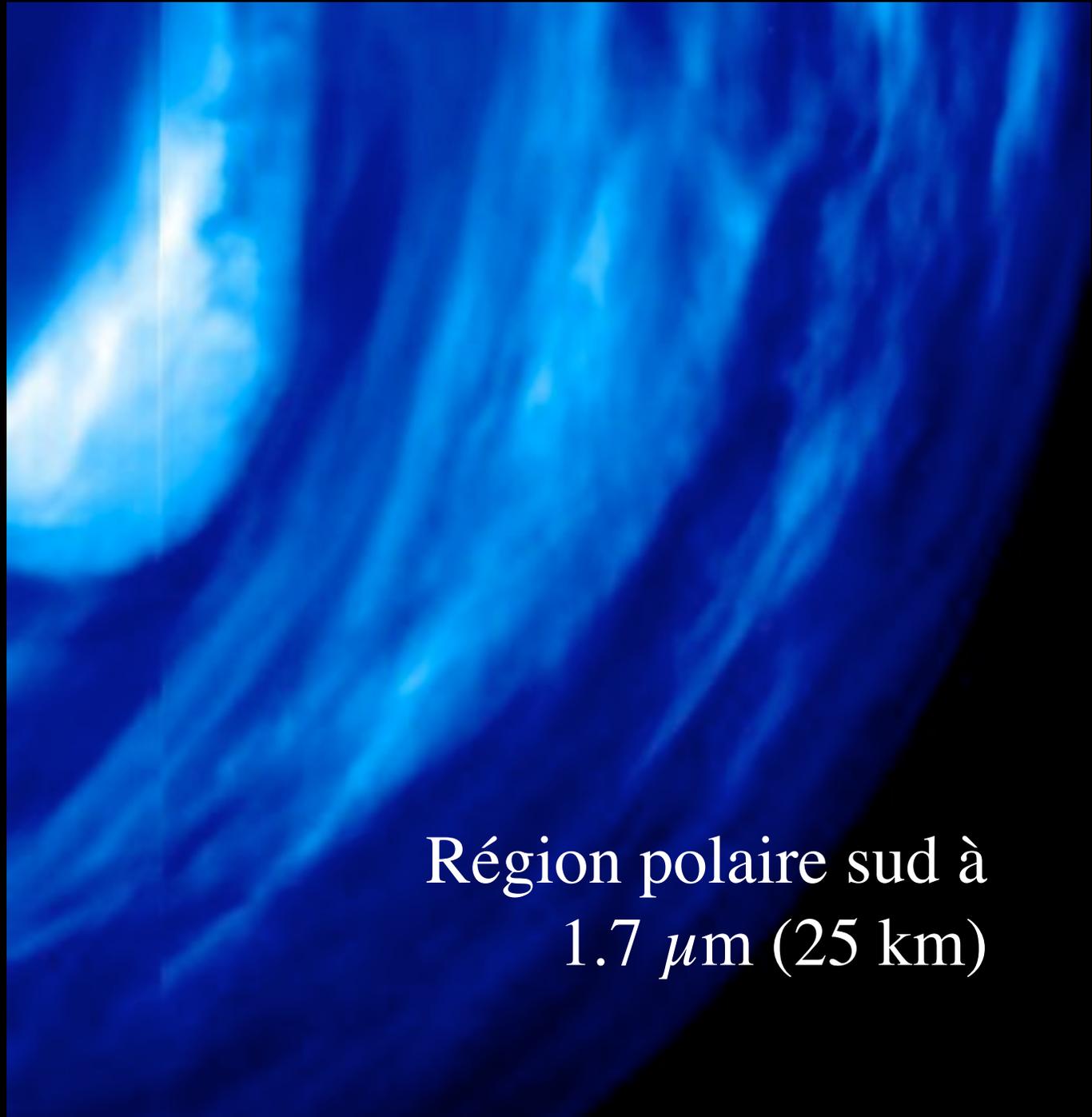
Vu rapprochée du vortex sud à $5 \mu\text{m}$ (59 km)

Le double vortex du pôle sud à $5 \mu\text{m}$ (59 km)



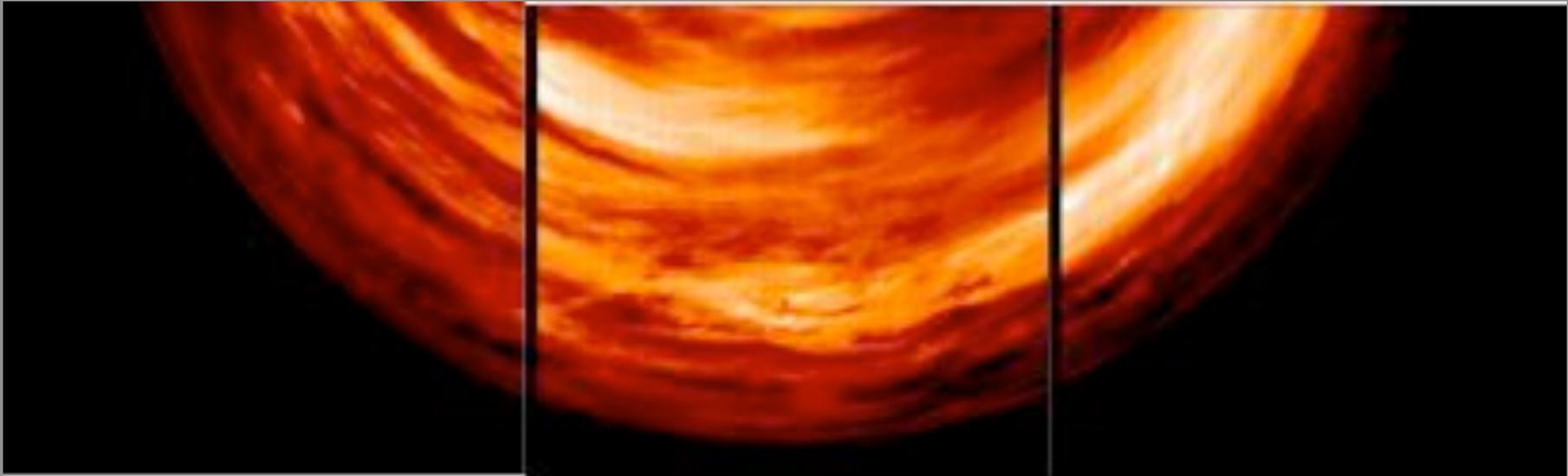


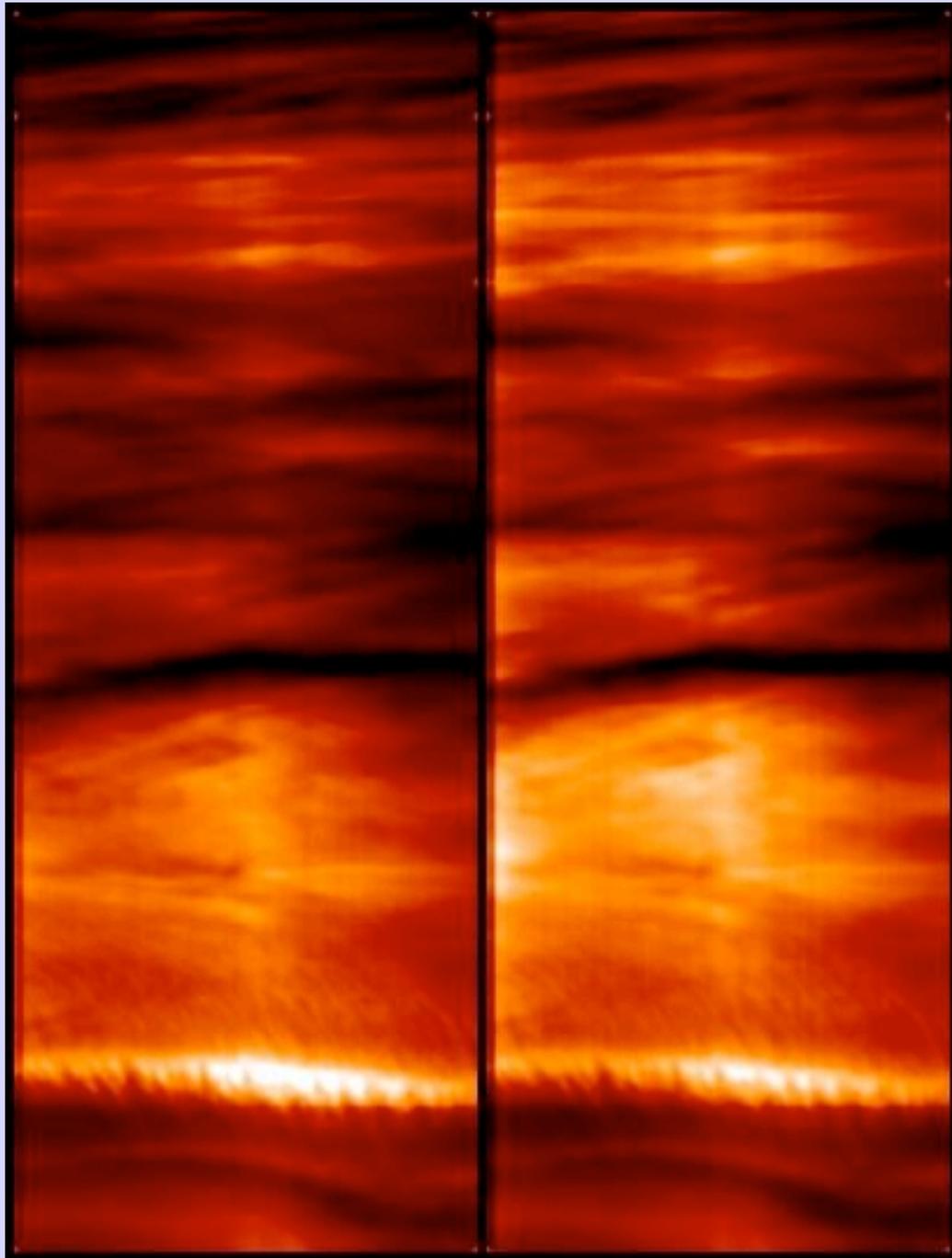
Structure ondulatoire nuageuse à
 $2.3 \mu\text{m}$ (35 km)



Région polaire sud à
 $1.7 \mu\text{m}$ (25 km)

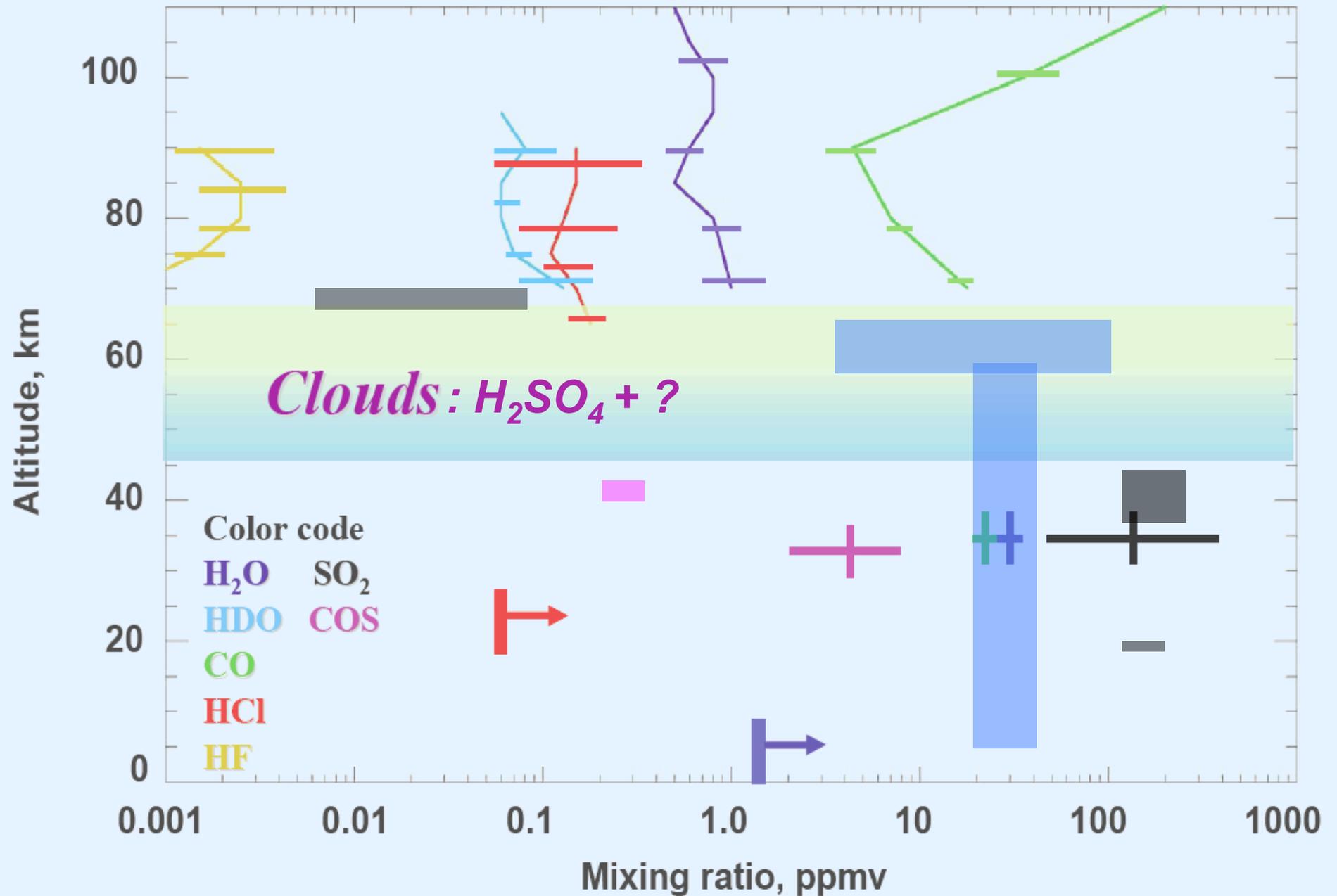
Vénus à $1.7 \mu\text{m}$ (25 km)





Nuages de Vénus
dans l'infrarouge à
 $2.3 \mu\text{m}$ -gauche- (35
km) and $1.7 \mu\text{m}$ -
droite- (25 km)

Synthèse des mesures de composition



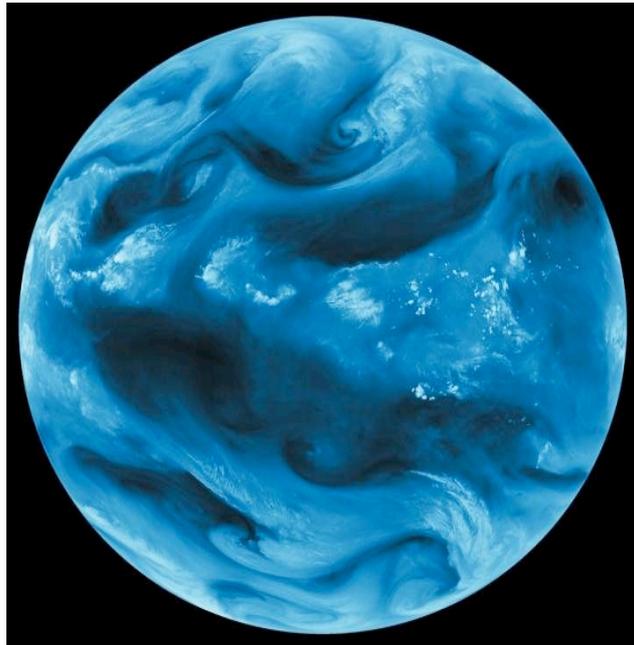
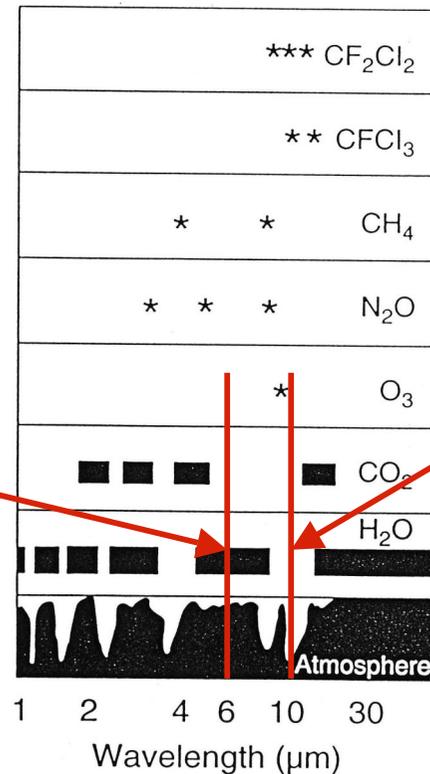


Image Météosat de la Terre dans le canal 5,7-7,1 μm (zone d'opacité de H_2O)

Sondage infrarouge de l'atmosphère terrestre



Image Météosat de la Terre dans le canal 10,5-12,5 μm (fenêtre de transparence de l'atmosphère)



Sondage IR de l'atmosphère de Vénus dans la bande à $4.3 \mu\text{m}$ du CO_2

