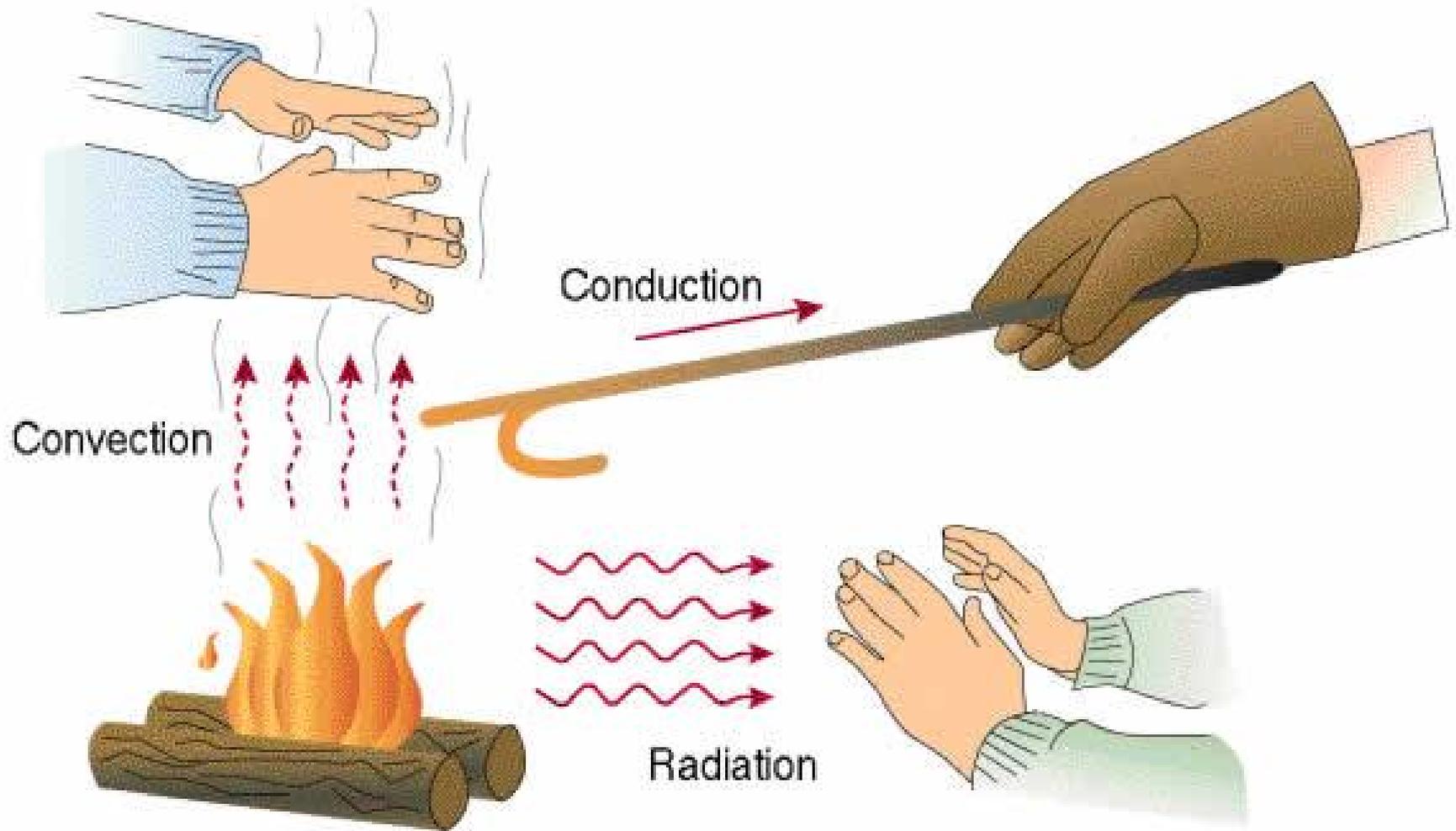


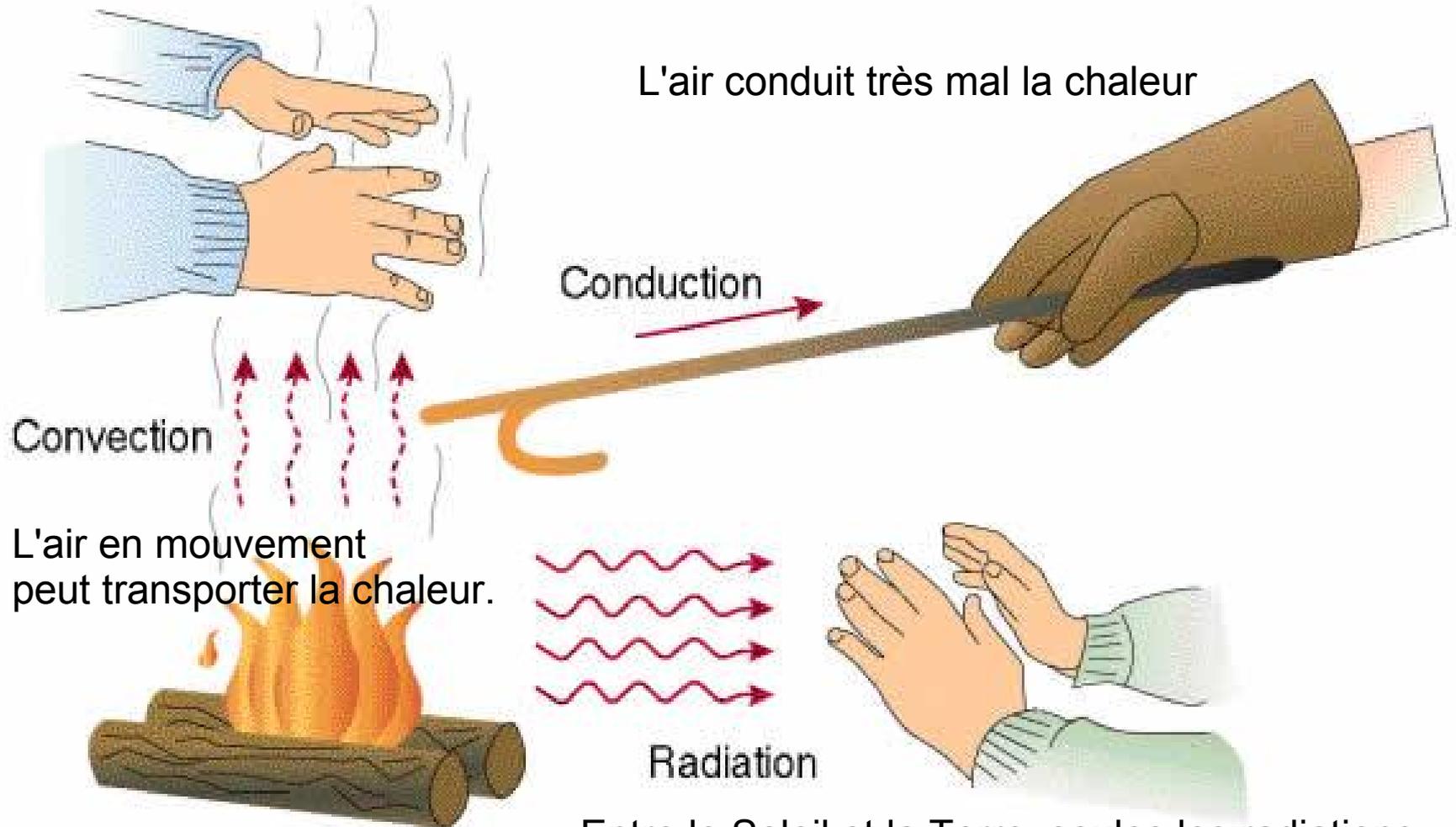
Atmosphères...

une affaire de lumière

Trois manières de chauffer

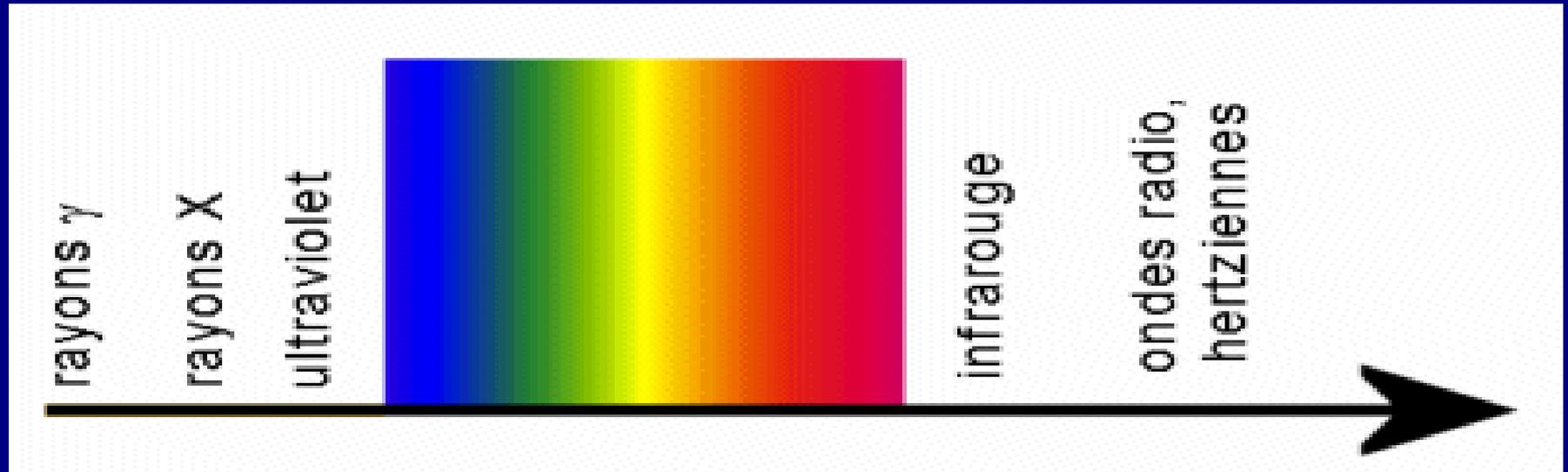


Trois manières de chauffer



Entre le Soleil et la Terre, seules les radiations (lumière, IR, UV) peuvent transporter la chaleur.

La lumière : pour échanger de la chaleur avec le Soleil.



Champ magnétique : boussole, forces aimants, moteurs électriques, dynamos.

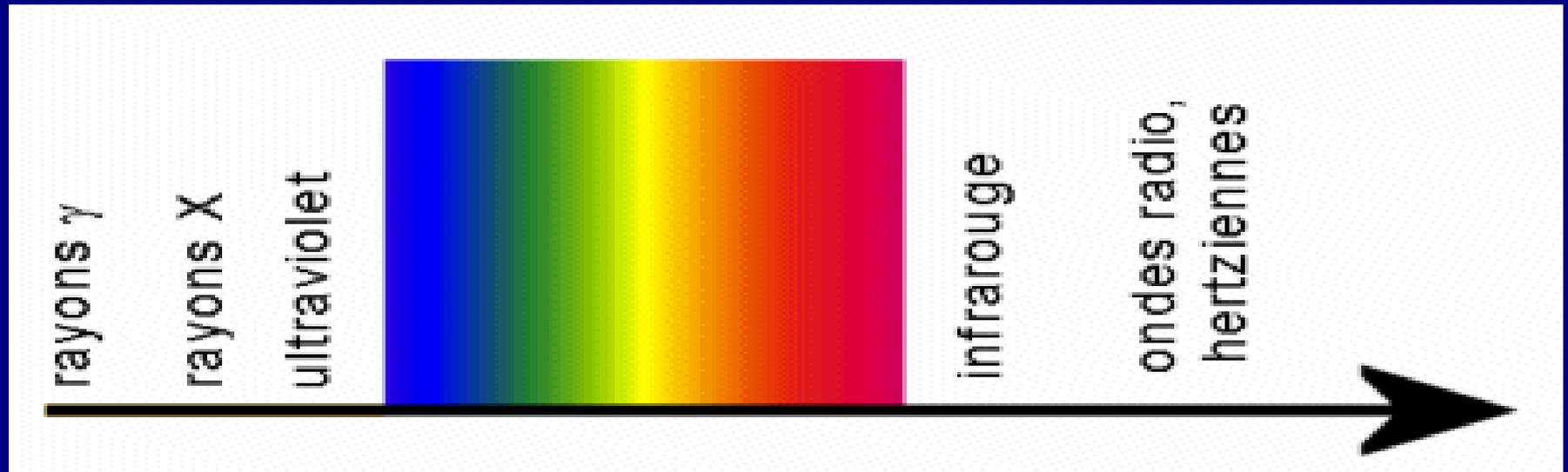
Champ électrique : dans les appareils électriques, dans les atomes et autour d'eux, dans les éclairs d'orages.

Ils peuvent chauffer la matière : un appareil électrique chauffe, un éclair d'orage brûle, etc.

Ces champs peuvent aussi exister dans le vide, mais dans une configuration bien spéciale : les ondes de lumière.

La lumière : une onde qui propage une variation de champs électrique et magnétique.

La lumière : pour échanger de la chaleur avec le Soleil.



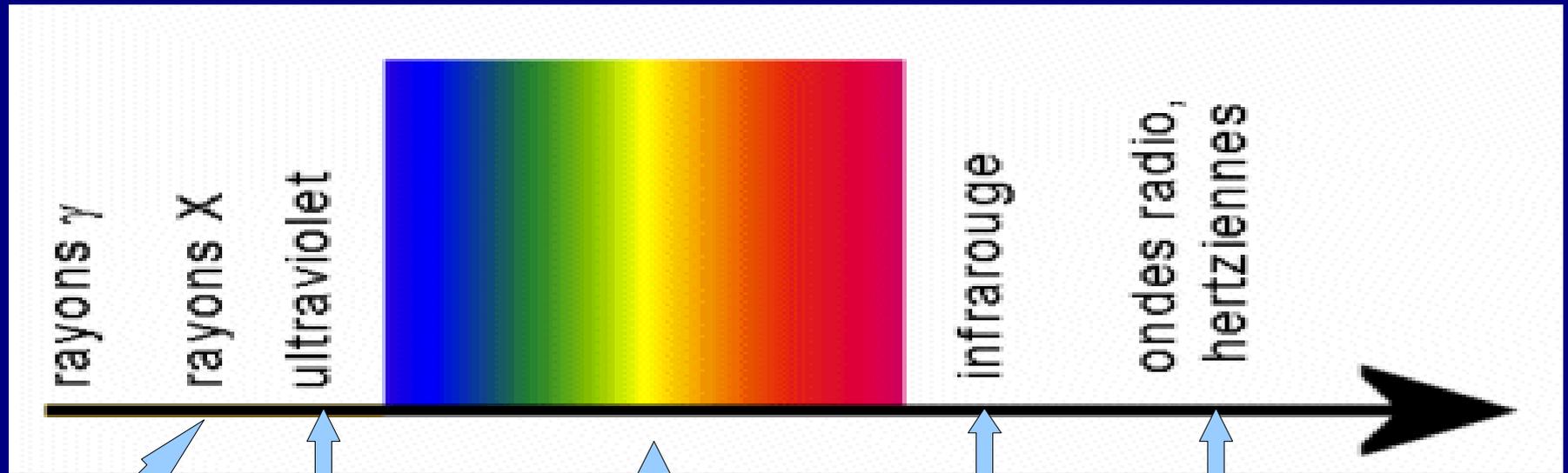
La lumière : une onde qui propage une variation de champs électrique et magnétique.

Sa vitesse (dans le vide) est $c = 300\,000\text{ km/s}$

Une onde peut avoir n'importe quelle forme, mais on peut la décomposer comme une combinaison d'ondes simples (sinusoïdes) caractérisées par une fréquence/une longueur d'onde.

Expérience du prisme : chaque couleur de l'arc en ciel correspond à une de ces ondes sinusoïdales.

La lumière qu'on voit, et celle qu'on ne voit pas.



Le corps est transparent aux rayons X, mais pas les os. Radiographies médicales.

Coups de soleil

Poissons, abeilles, tortues voient les ultraviolets

Ce qu'on voit avec nos yeux.

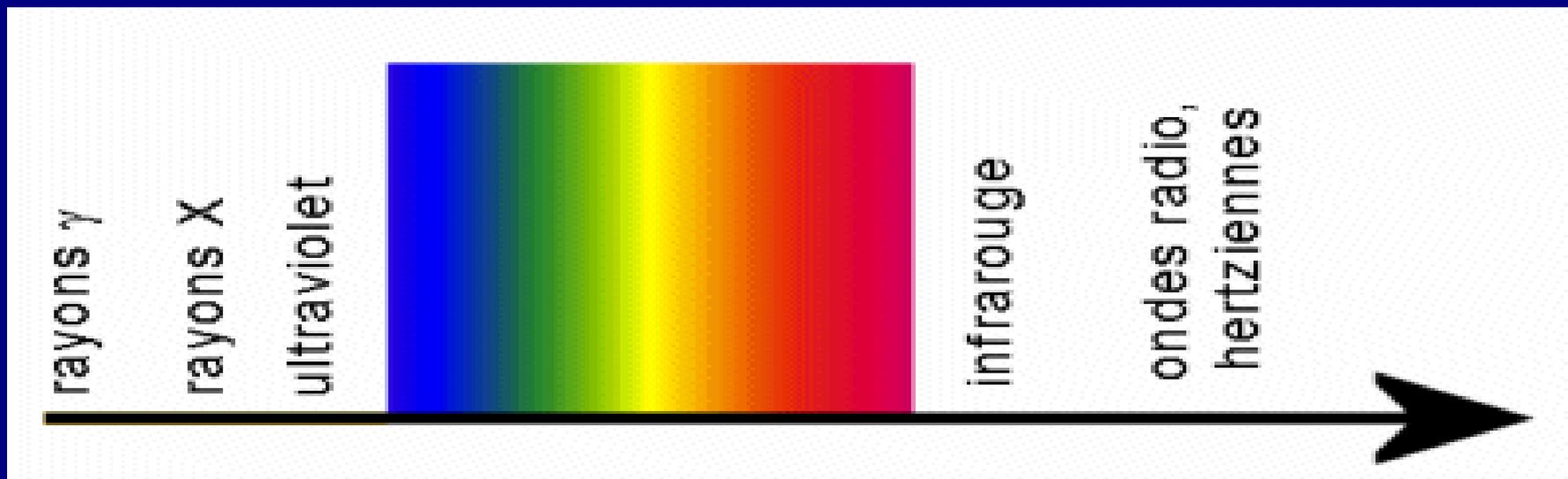
Chauffe.

Certains serpents « détectent » les infrarouges.

écouter la radio, regarder la télévision.

La lumière qu'on voit, et celle qu'on ne voit pas.

$$\text{longueur d'onde} * \text{fréquence} = c$$



0,1-10 nm

10-400 nm
 10^{15} Hz

550 nm
 10^{14} Hz

1000 nm
 10^{13} Hz

1cm-10 km
 $10^9 - 10^3$ Hz

Courtes longueurs
d'onde

Grandes longueurs
d'onde

Hautes fréquences.

Basse fréquences.

Atmosphères

la température à la surface
des planètes.

Température d'une planète

Deux sources de rayonnement d'une planète

- lumière réfléchie
- rayonnement thermique

Lumière réfléchie



Dans n'importe quel paysage, en visible, la lumière réfléchie domine.

Lumière réfléchi

La lumière est en général partiellement réfléchi.
L'albedo A caractérise la proportion de lumière réfléchi.
Pour un miroir idéal : $A = 1$. Pour du charbon $A = 0.04$.



$(1-A)$ caractérise la quantité de lumière absorbée.

En toute rigueur, A dépend de la longueur d'onde. C'est ce qui différencie les couleurs des objets qu'on regarde à la lumière.

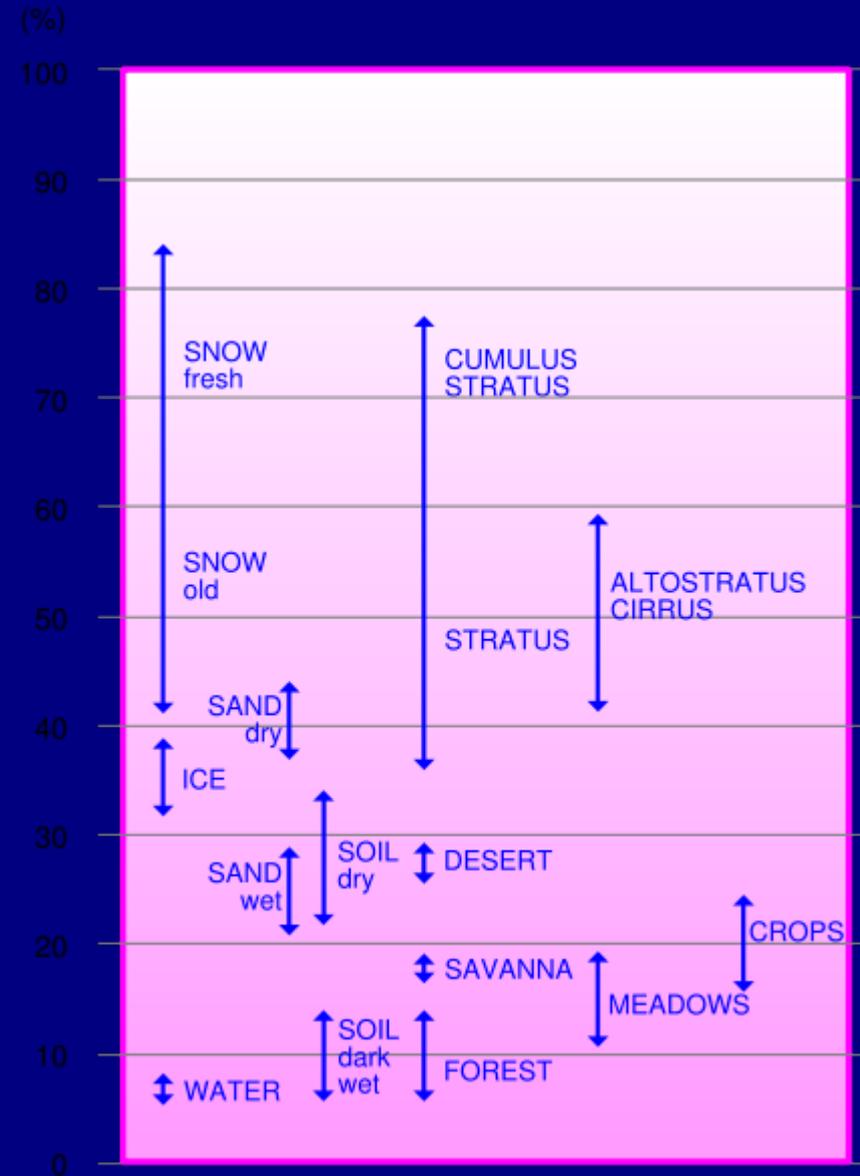
On peut aussi considérer un albédo global (toutes les couleurs confondues).

Lumière réfléchi

Albédo Terre 0,30
Albédo Vénus 0,60
Albédo Lune 0,07

Albédo Encelade (Saturne) 0,99
Albédo Eris (planète naine) 0,86

peinture acrylique noire 0,05
peinture acrylique blanche 0,80



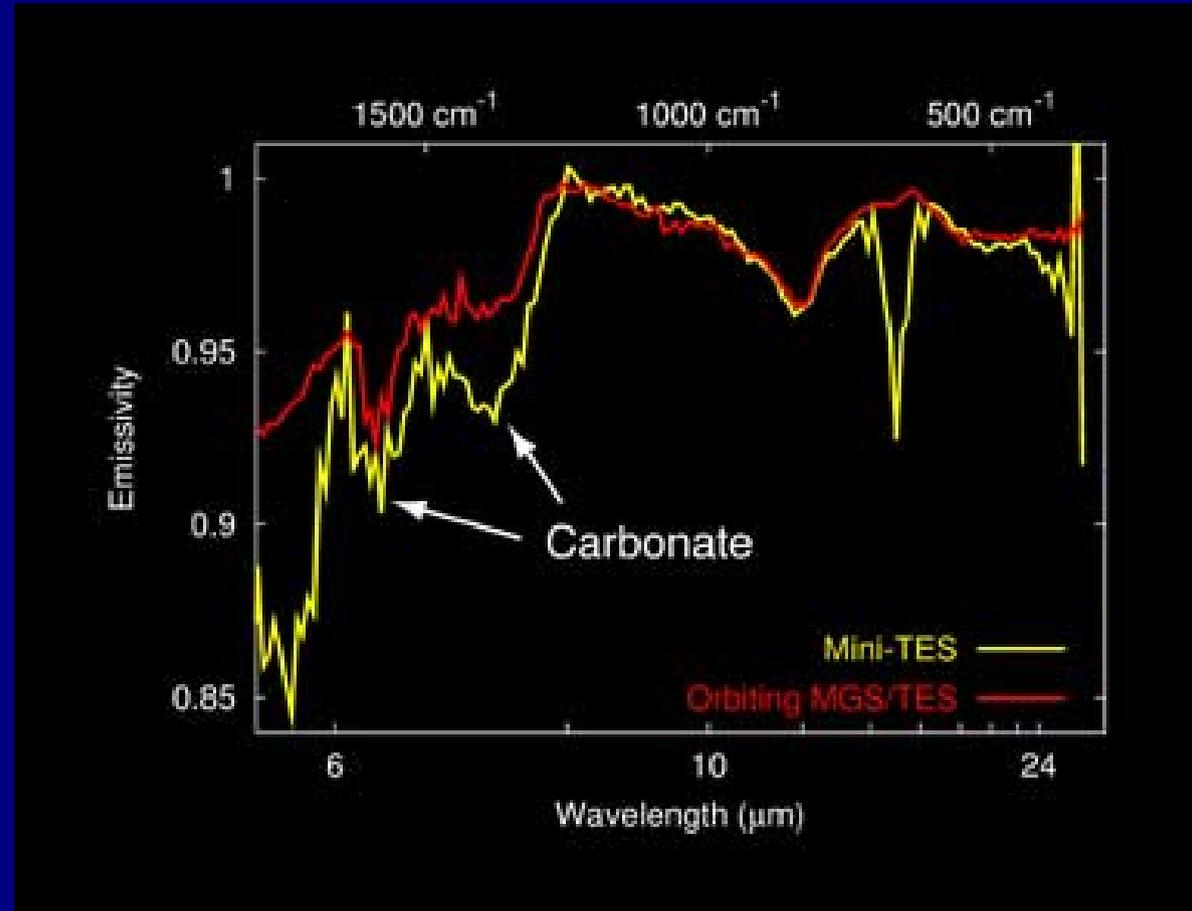
Lumière réfléchiée

La lumière réfléchiée peut révéler des caractéristiques chimiques de la surface réfléchissante.

Spectre IR martien, en orbite et depuis le sol (robot Spirit).

Dans la composante réfléchiée apparaissent des raies d'absorption (« albédo » faibles) caractéristiques de certaines composantes chimiques de la surface.

[NASA/JPL/Arizona State University]



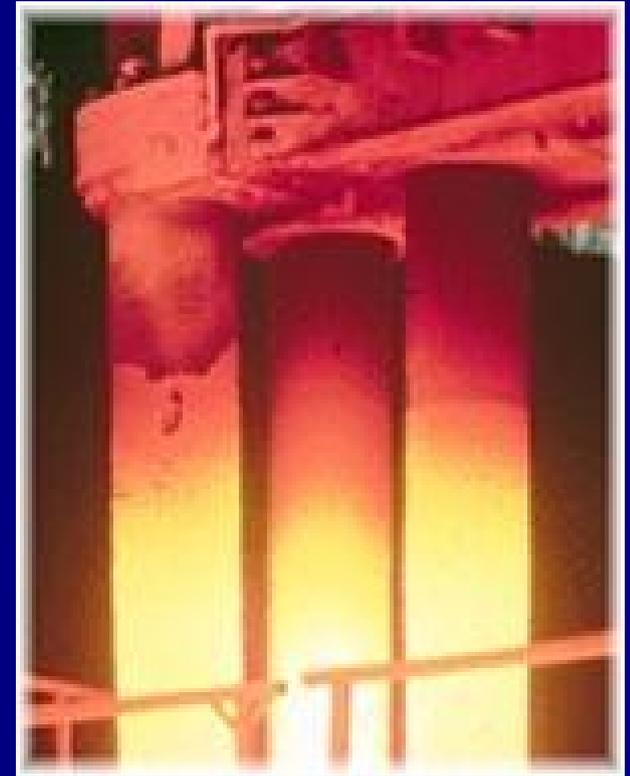
Température d'une planète

Rayonnement thermique

Un corps opaque à une certaine température, à l'état d'équilibre thermique.

De la lumière y existe. Sa répartition intensité/longueur d'onde répond à une loi bien connue, la loi de Planck.

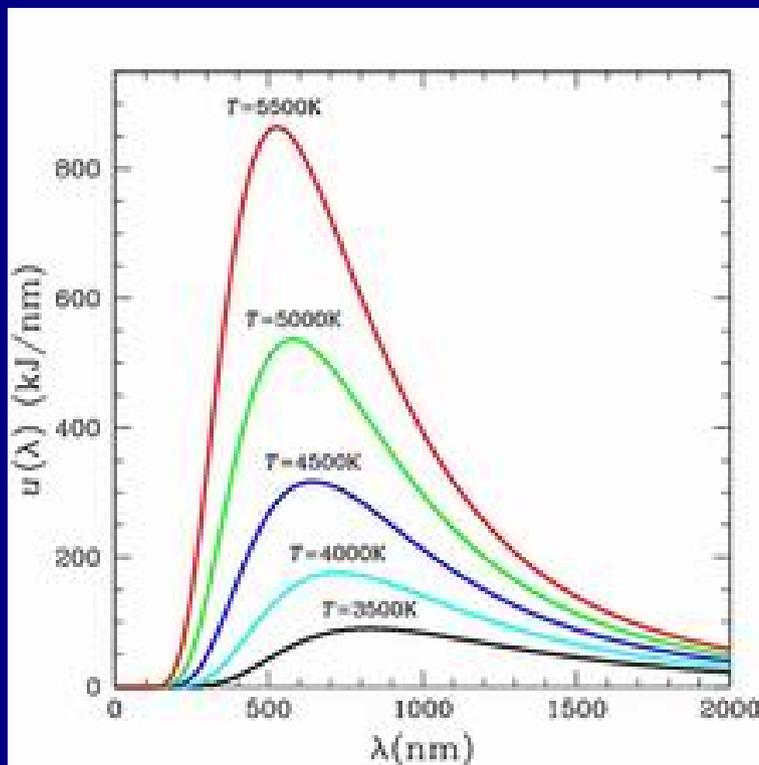
En pratique, sa couleur dominante dépend de sa température.



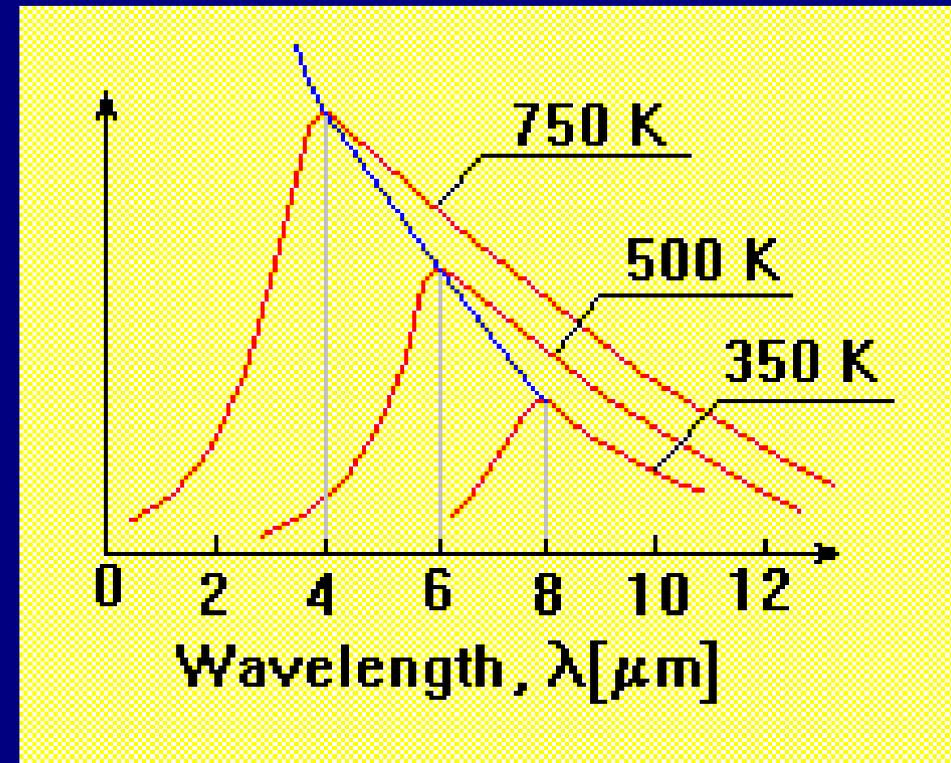
Ferraille fondue sortant
d'un four électrique.
[ac Toulouse]

Température d'une planète

Rayonnement thermique



Des corps à qq milliers de degrés rayonnent à qq 100 nm, c'est à dire en lumière visible (acier liquide, étoiles)



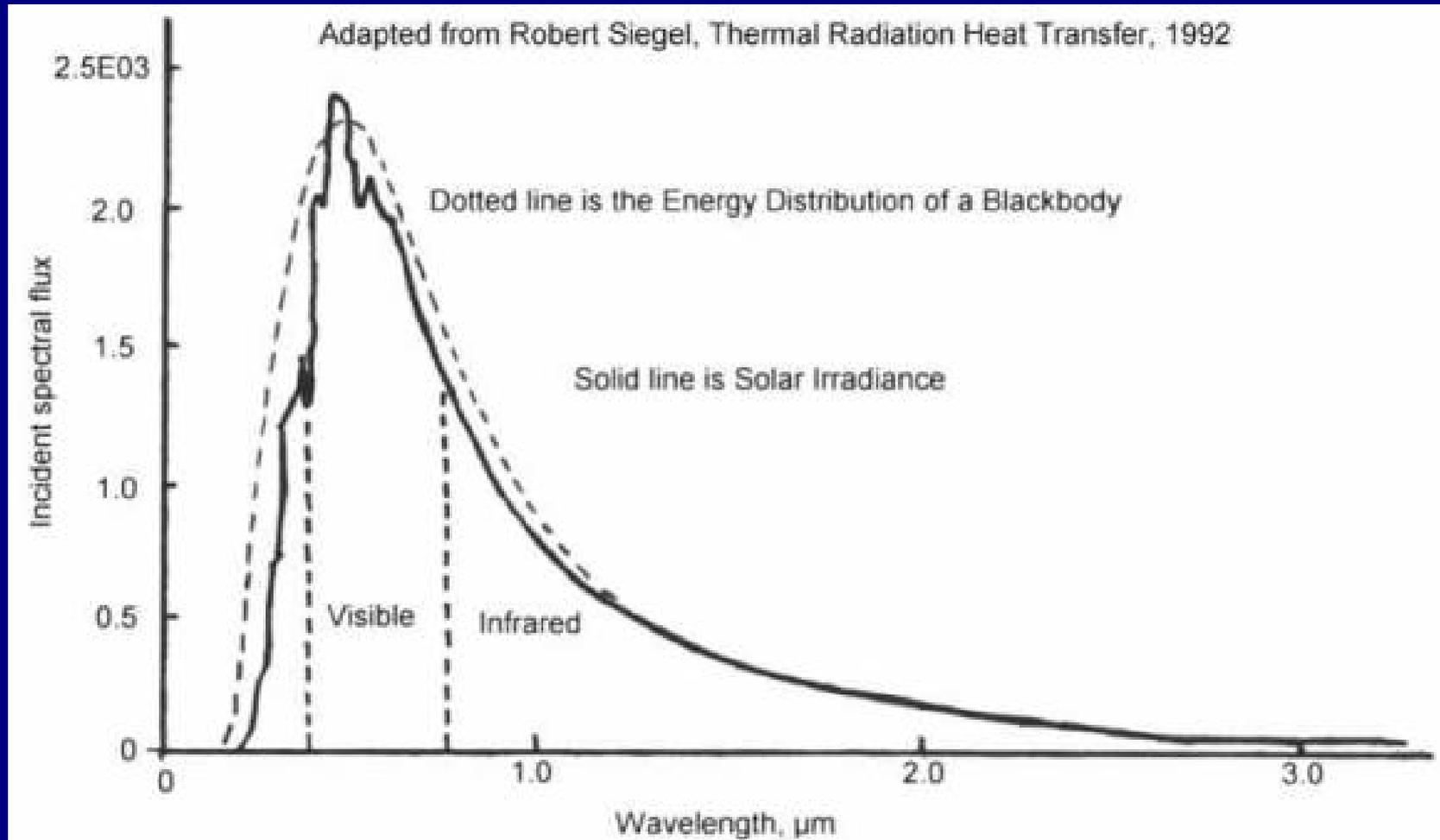
Des corps plus froids rayonnent à des longueurs d'onde de qq microns : infrarouges. (planètes, nous...)

Le rayonnement thermique infrarouge.



Si on n'éclaire pas une pièce et qu'on la photographie en IR, on ne voit que le rayonnement thermique :
le monsieur (pas ses lunettes), la trace de sa main dans sa poche, les murs..

Le Soleil, le grand luminaire des planètes



C'est un spectre très proche du corps noir. Les différences découlent d'interactions lumière-atomes dans son atmosphère.

Il brille fort en IR.

Une image en IR avec des composantes
thermiques et réfléchies.



Juste pour le plaisir.

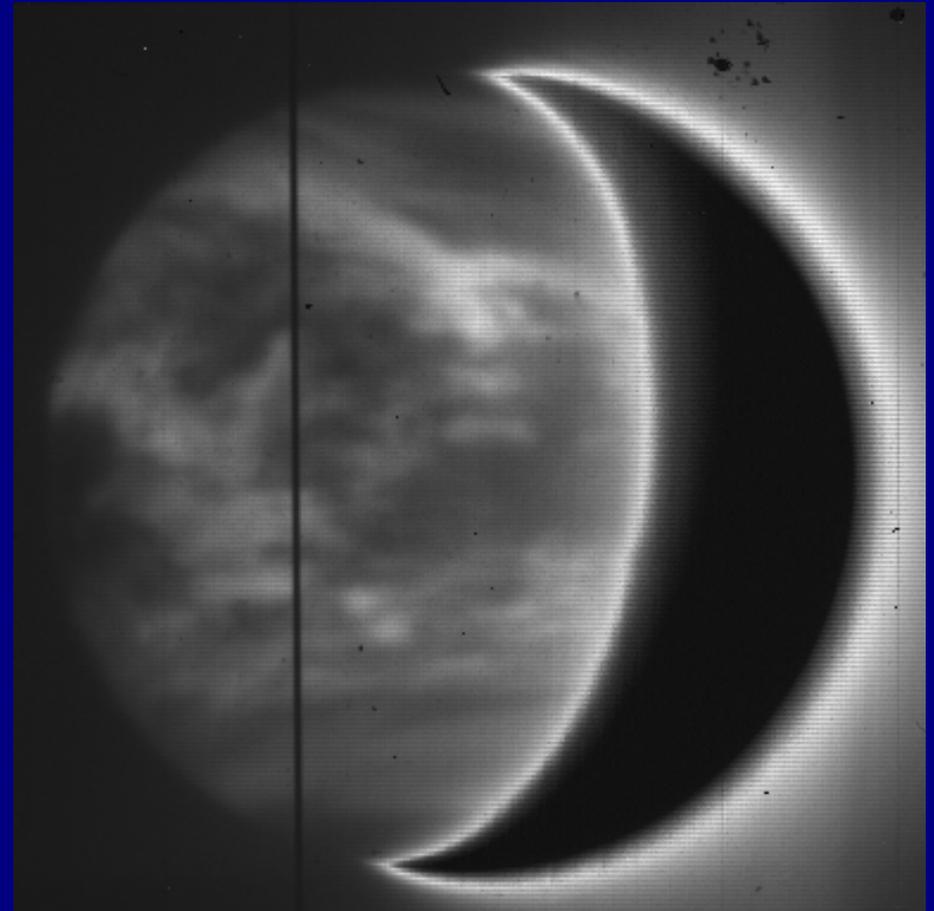
Les planètes rayonnent en IR

Image IR de Vénus prise à la caméra IRTF Hawaiï. longueur d'onde : 2.3 micron.

Le côté nuit est à gauche. Les zones claires correspondent à des zones transparentes où l'on voit le rayonnement thermique du sol (très chaud). Les zones sombres montrent des couches nuageuses plus élevées et plus froides (48-51 km).

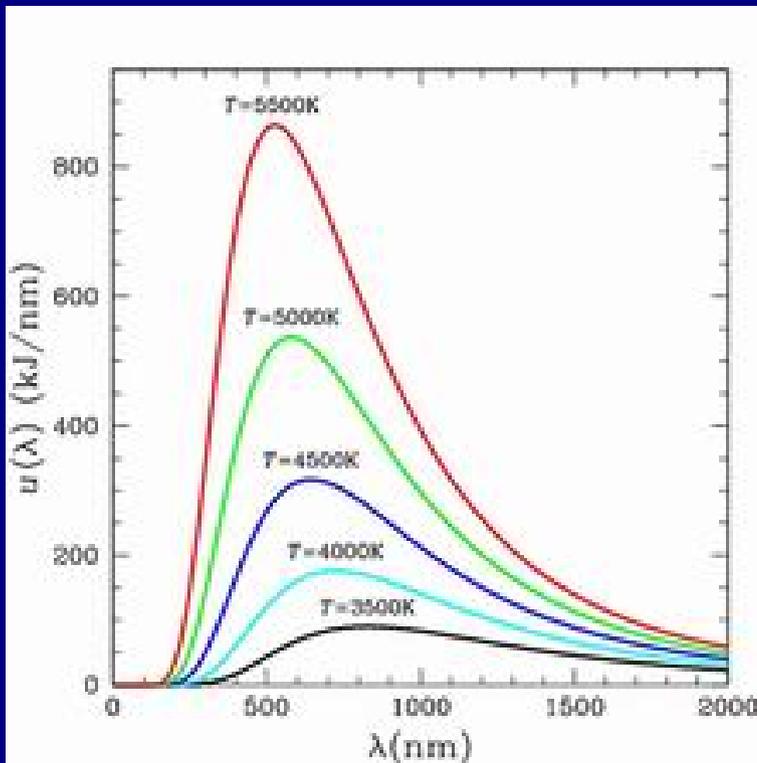
Le côté jour à droite. Surtout de la lumière réfléchié. Il est occulté pour éviter une saturation de l'image.

[SwRI Boulder Univ., Bullock, Young]



Température d'une planète

Rayonnement thermique



Quantité d'énergie émise sous forme de rayonnement thermique par mètre carré :

$$E = \sigma T^4$$

σ : Constante de Boltzmann.
 T : température.

La quantité totale d'énergie rayonnée par mètre carré est proportionnelle à la surface sous la courbe.

Calculer la température d'une planète.

On suppose que la lumière absorbée chauffe la surface de la planète, on suppose même que c'est la seule source de chaleur.

On suppose que cette chaleur provoque l'émission de rayonnement thermique. Le surplus de chaleur de la planète est évacué sous cette forme.

On suppose que la température est constante (on néglige des effets jour-nuit, météo etc.)

flux de chaleur absorbée = flux de chaleur en rayonnement thermique.

(astre tournant vite)

$$\pi R^2 (1-A) L_S / D^2 = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

(astre tournant lentement)

$$\pi R^2 (1-A) L_S / D^2 = 2 \pi R^2 \sigma T^4$$

Calculer la température d'une planète.

flux de chaleur absorbée = flux de chaleur en rayonnement thermique.

(astre tournant vite)

$$L_S \pi R^2 (1-A) / D^2 = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

(astre tournant lentement)

$$L_S \pi R^2 (1-A) / D^2 = 2 \pi R^2 \sigma T^4$$

L_S = luminosité du Soleil

R = Rayon de la planète (ne joue pas)

D = distance Soleil-planète

T = température de la surface d'émission (planète)

A = albédo de la dite surface.

Calculer la température d'une planète.

flux de chaleur absorbée = flux de chaleur en rayonnement thermique.

(astre tournant vite)

$$L_S \pi R^2 (1-A) / D^2 = 4 \pi R^2 \sigma T^4$$

(astre tournant lentement)

$$L_S \pi R^2 (1-A) / D^2 = 2 \pi R^2 \sigma T^4$$

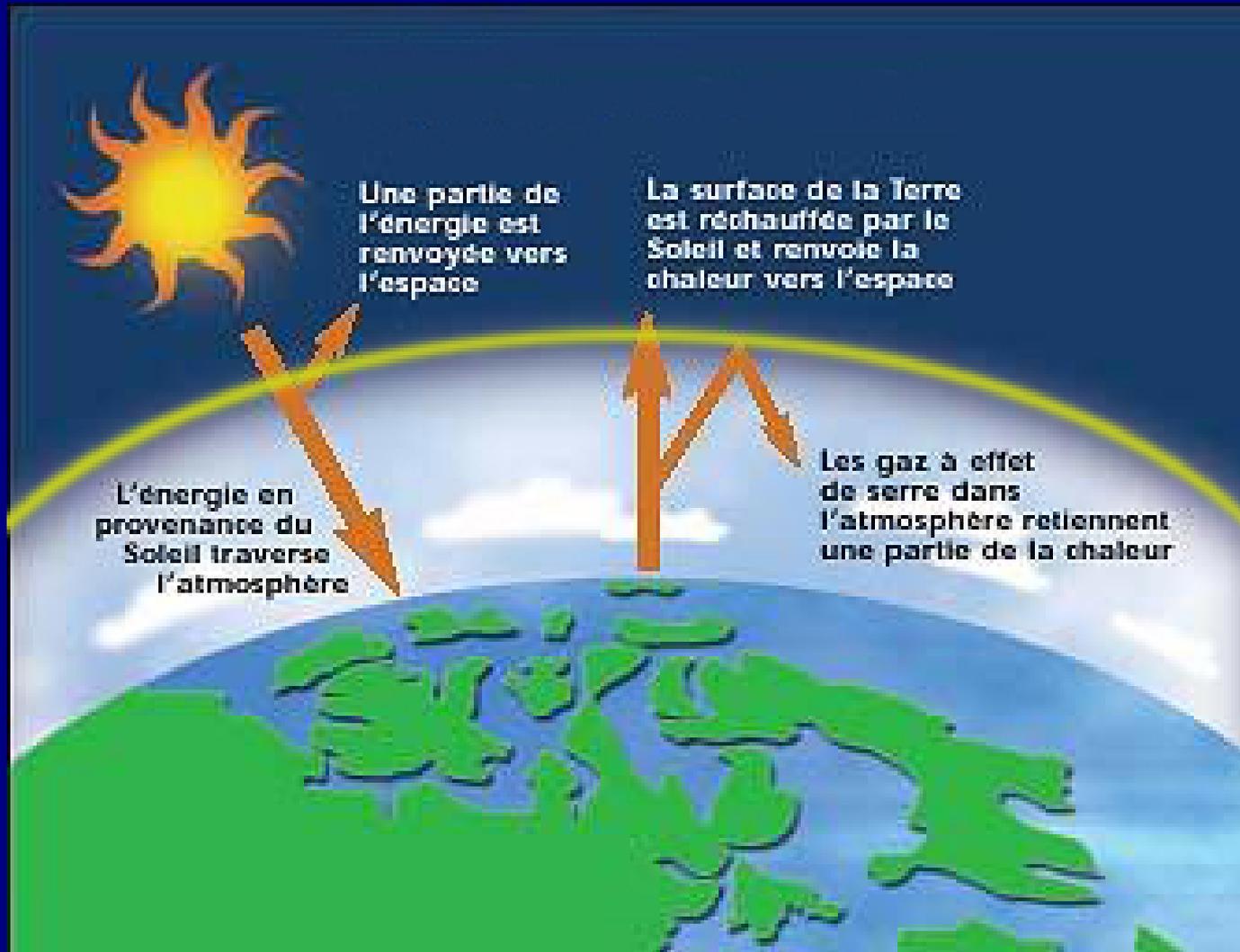
Terre : $T=255\text{K} = -18^\circ\text{C}$. En fait c'est $288\text{K} = 15^\circ\text{C}$

Vénus : $T= 313\text{ K} = 40^\circ\text{C}$. En fait c'est $700\text{ K} = 430^\circ\text{C} !!!$

Mars : $T=206\text{ K} = -67^\circ\text{C}$. En fait c'est $210\text{ K} = -63^\circ\text{C}$.

Lune, Mercure : pas d'atmosphère, mais peu servir à calculer la température du sol.

Calculer la température d'une planète : pourquoi n'est-ce pas juste ?



Terre : $255\text{K} = -18^\circ\text{C}$. En fait c'est $288\text{K} = 15^\circ\text{C}$
Vénus : $313\text{K} = 40^\circ\text{C}$. En fait c'est $700\text{K} = 430^\circ\text{C} !!!$
Mars : $206\text{K} = -67^\circ\text{C}$. En fait c'est $210\text{K} = -63^\circ\text{C}$.

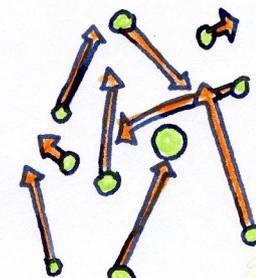
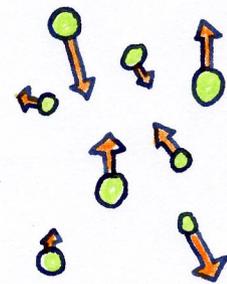
Pourquoi les très petites planètes
n'ont pas d'atmosphère ?

Pourquoi n'y a-t-il pas d'hydrogène
sur les petites (alors que Jupiter et
Saturne en regorgent) ?

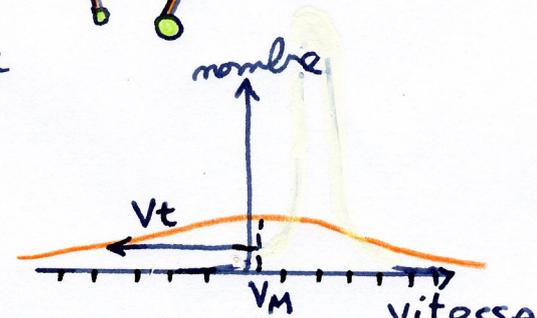
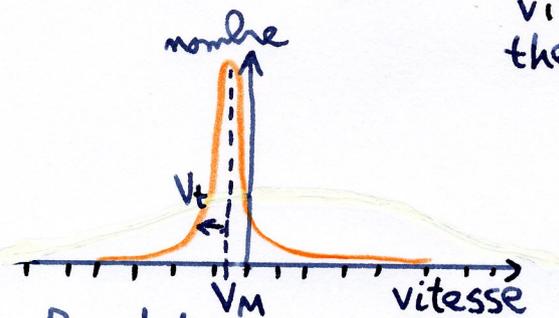
La température d'un gaz : interprétation « au microscope »

Gaz "froid"

Gaz "chaud"

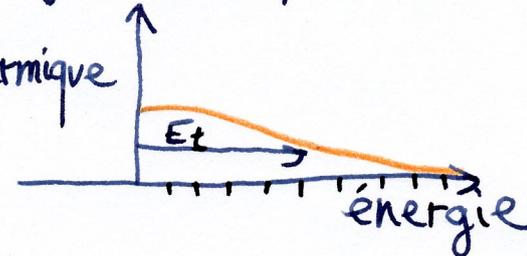
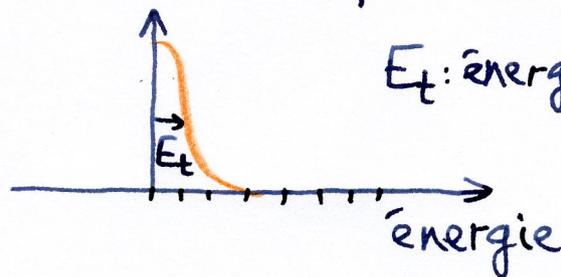


température
 $kT = \frac{1}{2} m v_t^2 = E_t$
↑
vitesse thermique



faible dispersion

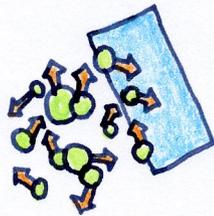
grande dispersion



E_t : énergie thermique

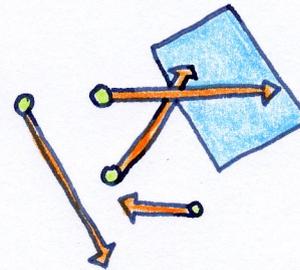
La pression dans un gaz parfait

Pression dynamique



augmente avec
la densité n

$$P = n k T$$



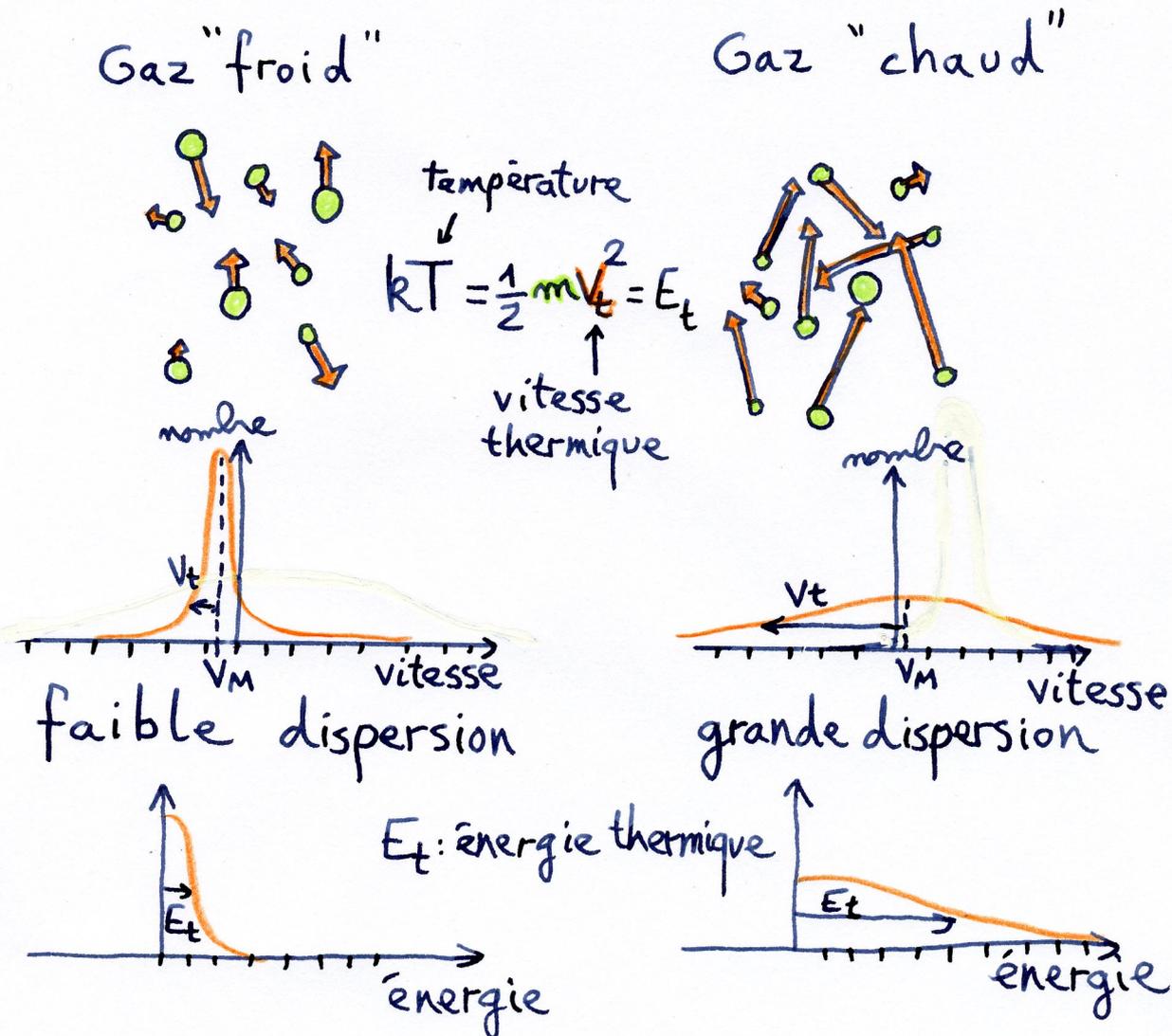
augmente avec la
vitesse thermique v_t
température T

L'échappement des éléments légers (et chauds)

Les atomes/molécules d'un gaz vont d'autant plus vite qu'ils sont légers (cas de l'hydrogène) et que le gaz est chaud (cas des planètes proches du Soleil).

Si leur vitesse dépasse la vitesse de libération gravitationnelle, alors ils quittent la planète... et n'y reviennent pas (en général).

Or moins la planète est massive, moins la vitesse de libération est élevée.



L'échappement des éléments légers (et chauds)

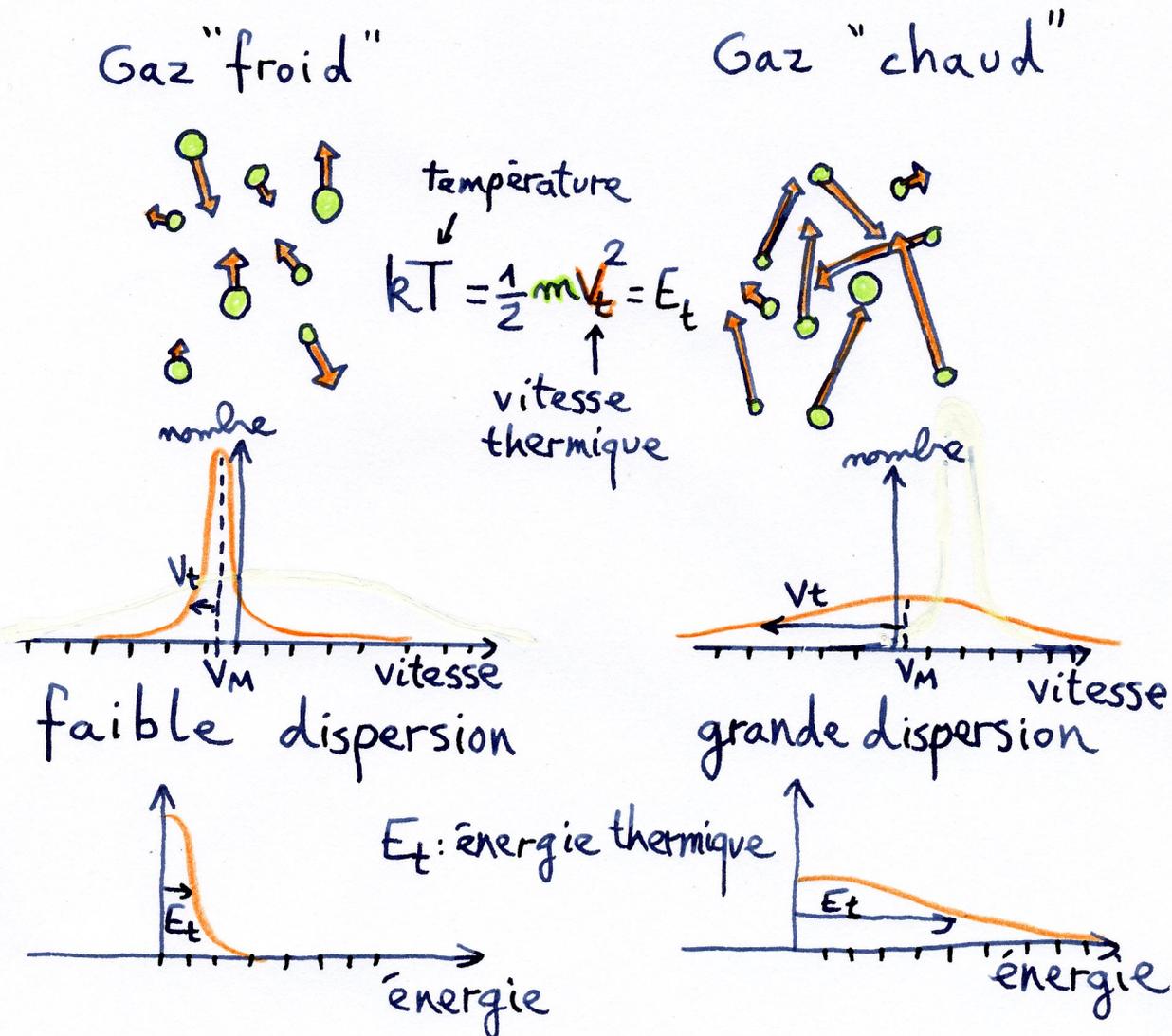
Donc plus la planète est proche du Soleil, et petite, moins elle aura d'atmosphère.

C'est le cas de Mercure et de la Lune qui n'ont pas d'atmosphère.

Vénus n'a pas d'hydrogène.

La Terre et Mars en ont peu.

Les satellites de Jupiter et Saturne sont froids mais assez petits, et soumis à l'influence de Jupiter. Ils tendent à perdre leur atmosphère, sauf Titan.



Comment varie une atmosphère
avec l'altitude.

Atmosphère isotherme

Cela veut dire que la température est la même partout.
C'est un cas simple où l'on sait tout calculer.

La densité décroît en fonction de l'altitude suivant une loi dite exponentielle.

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{Mg}{RT}z}$$

$$H_0 = \frac{RT^0}{Mg}$$

On caractérise cela par la hauteur d'échelle :

Dès qu'on monte de H_0 , la densité diminue d'un facteur $e=2,718...$

Sur Terre, près du sol, l'atmosphère est à peu près isotherme, et la hauteur d'échelle est de 8 km. A 24 kilomètres, la densité de l'air ne serait que de 5% de celle du sol, mais ...

l'atmosphère n'est pas isotherme

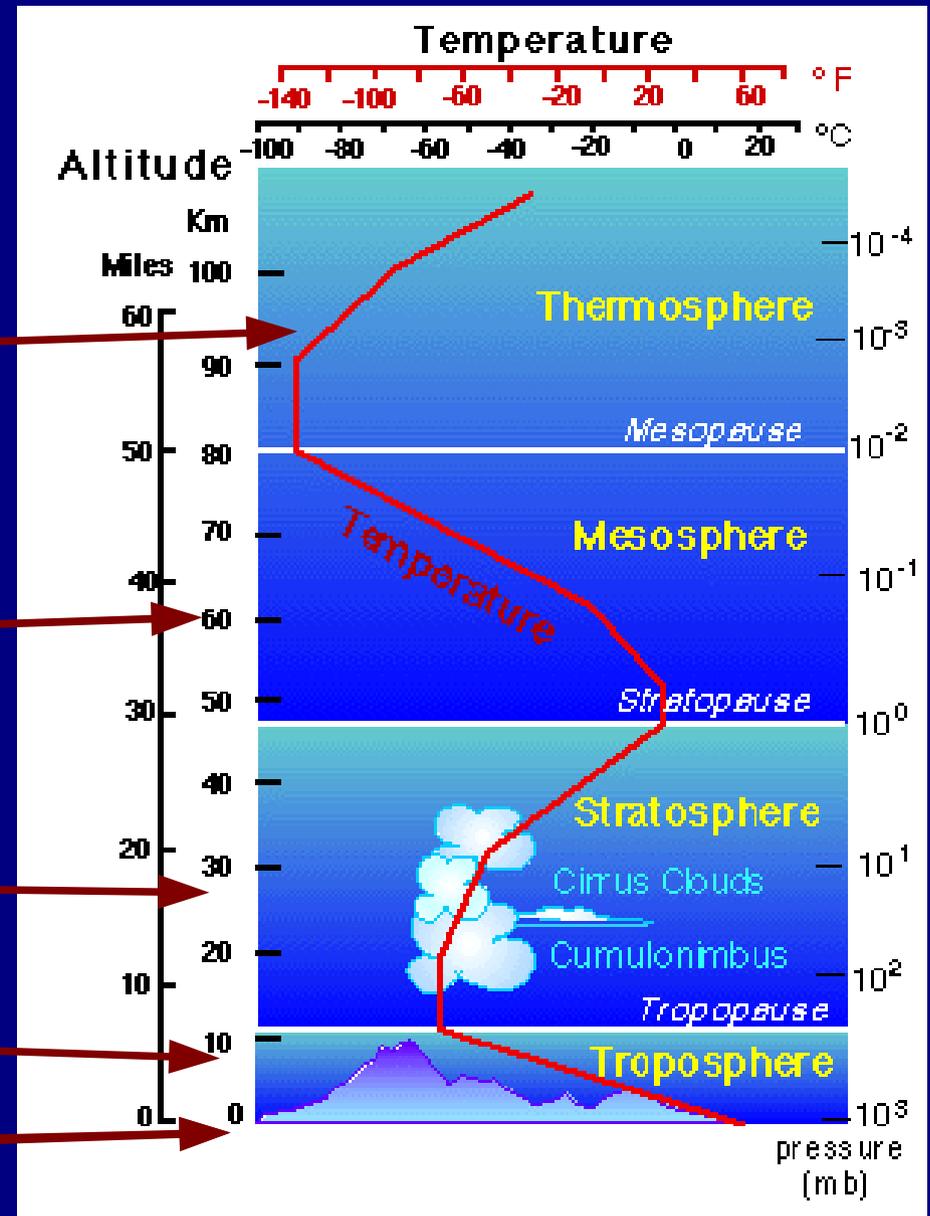
Chauffé par absorption d'UV

Pas de chauffage

Chauffé par absorption d'UV

Pas de chauffage

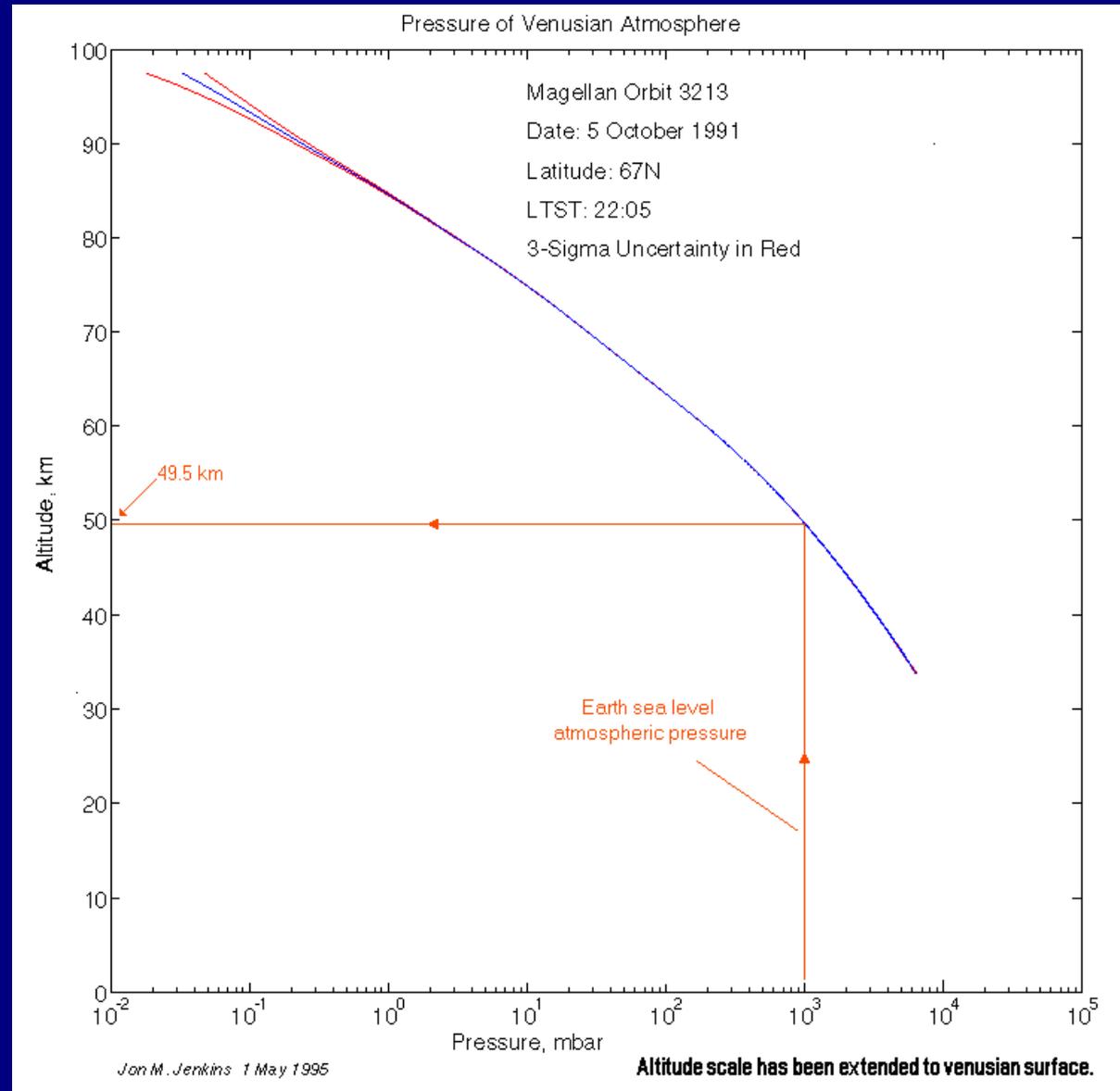
Chauffé par le sol (opaque)



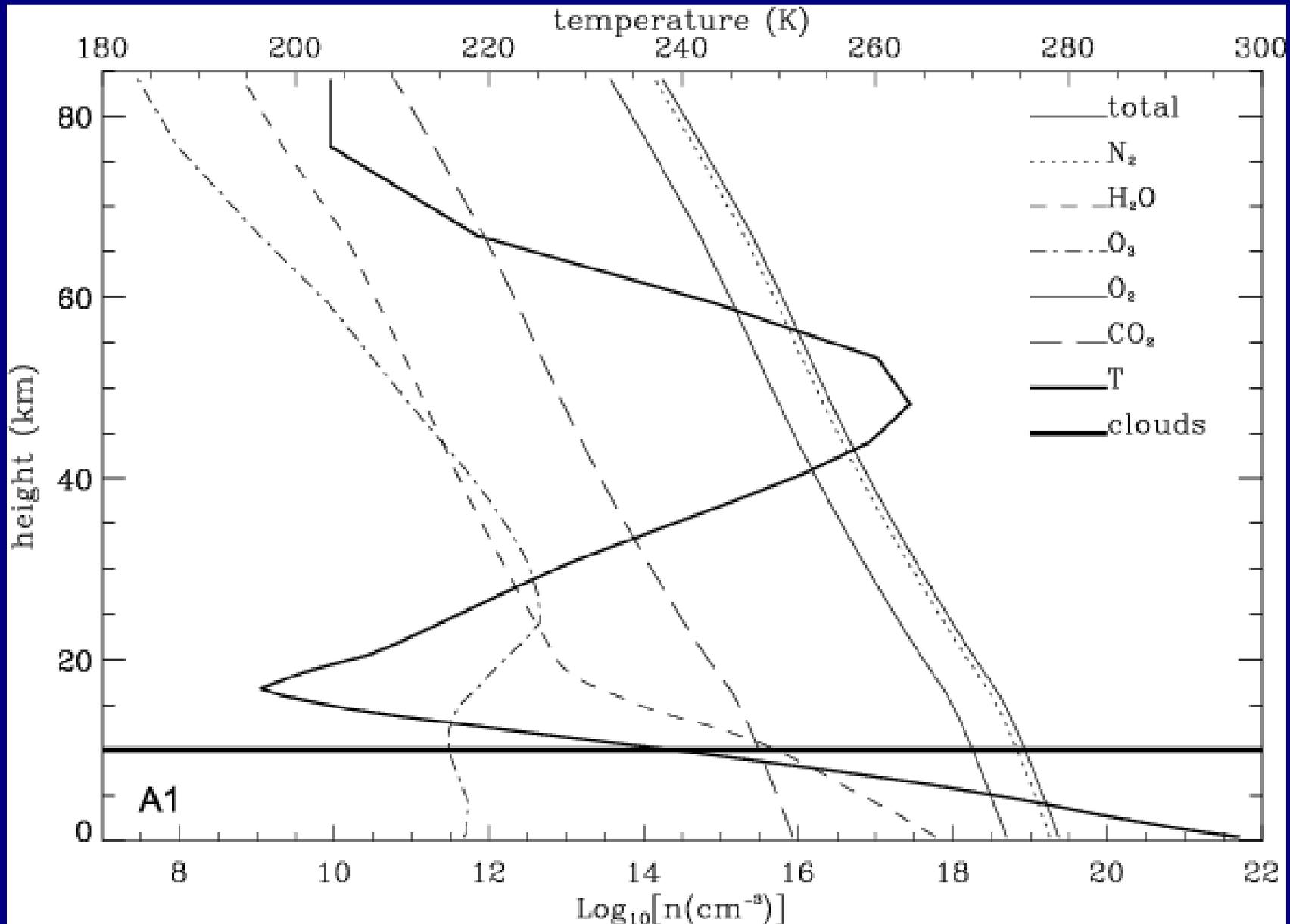
L'atmosphère chaude et opaque de Vénus

- Gaz carbonique CO₂ : 96,5 %, gaz à effet de serre.
- Azote N₂ : 3,5%
- dioxyde de soufre SO₂ : 0,02%
- Très peu de vapeur d'eau, qui réagit avec le SO₂ pour se transformer en acide sulfurique H₂SO₄.
- He, Ne, Ar : pas de réactions chimiques.

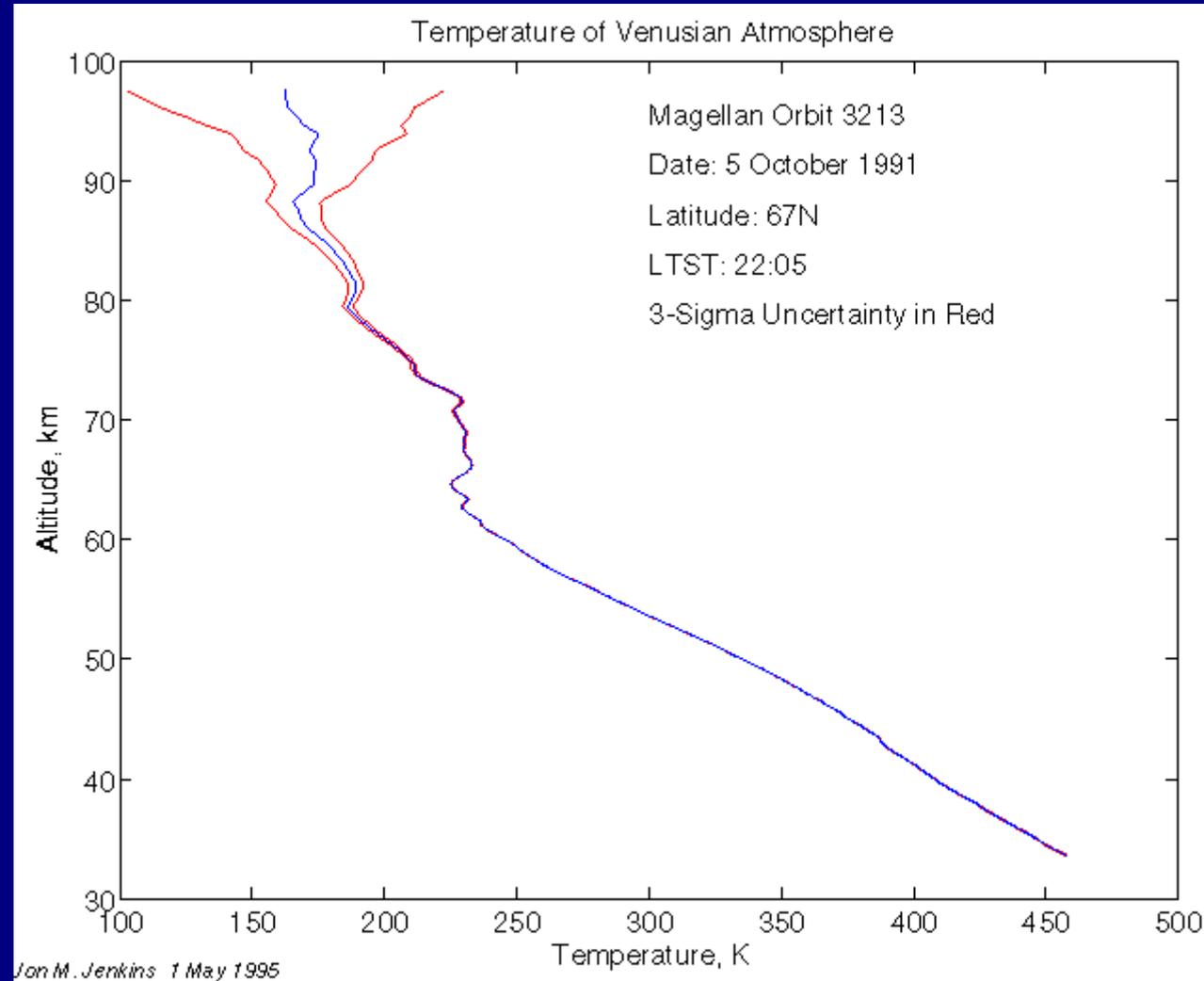
L'atmosphère dense de Vénus



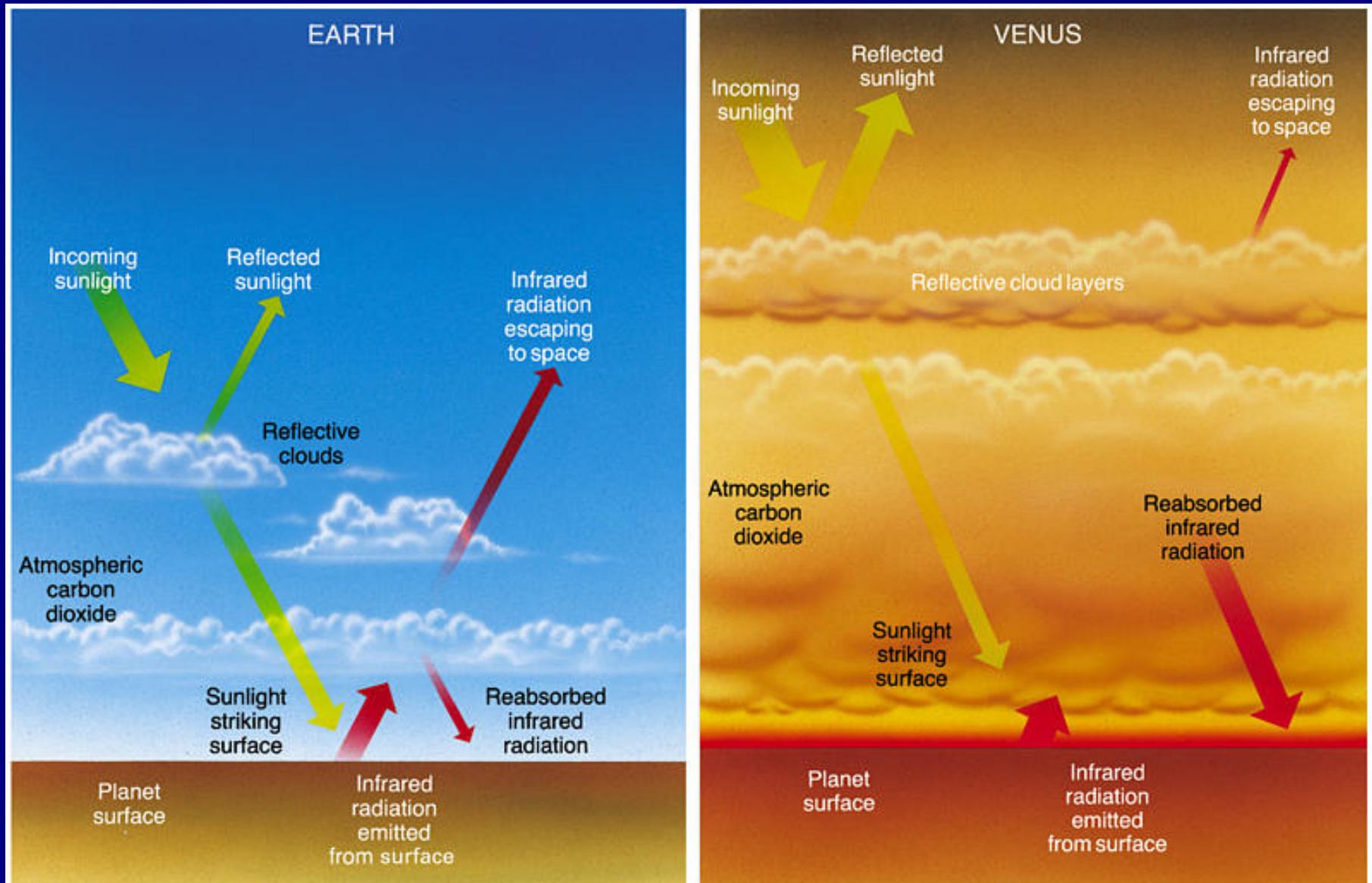
L'atmosphère dense de Vénus



L'atmosphère très chaude de Vénus



L'effet de serre Terre/Vénus



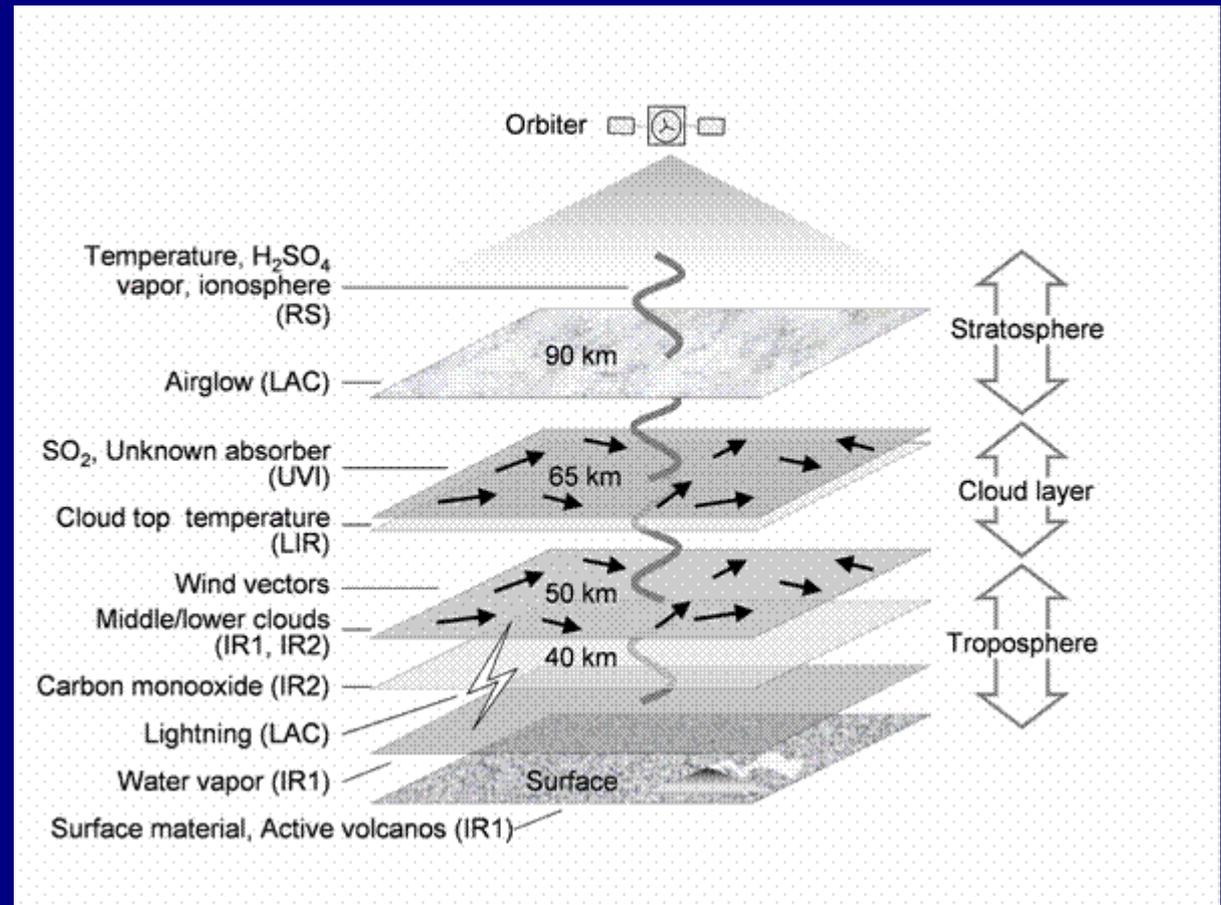
Les vents de Vénus

Pas de vent au niveau du sol.

Des vents en altitude.

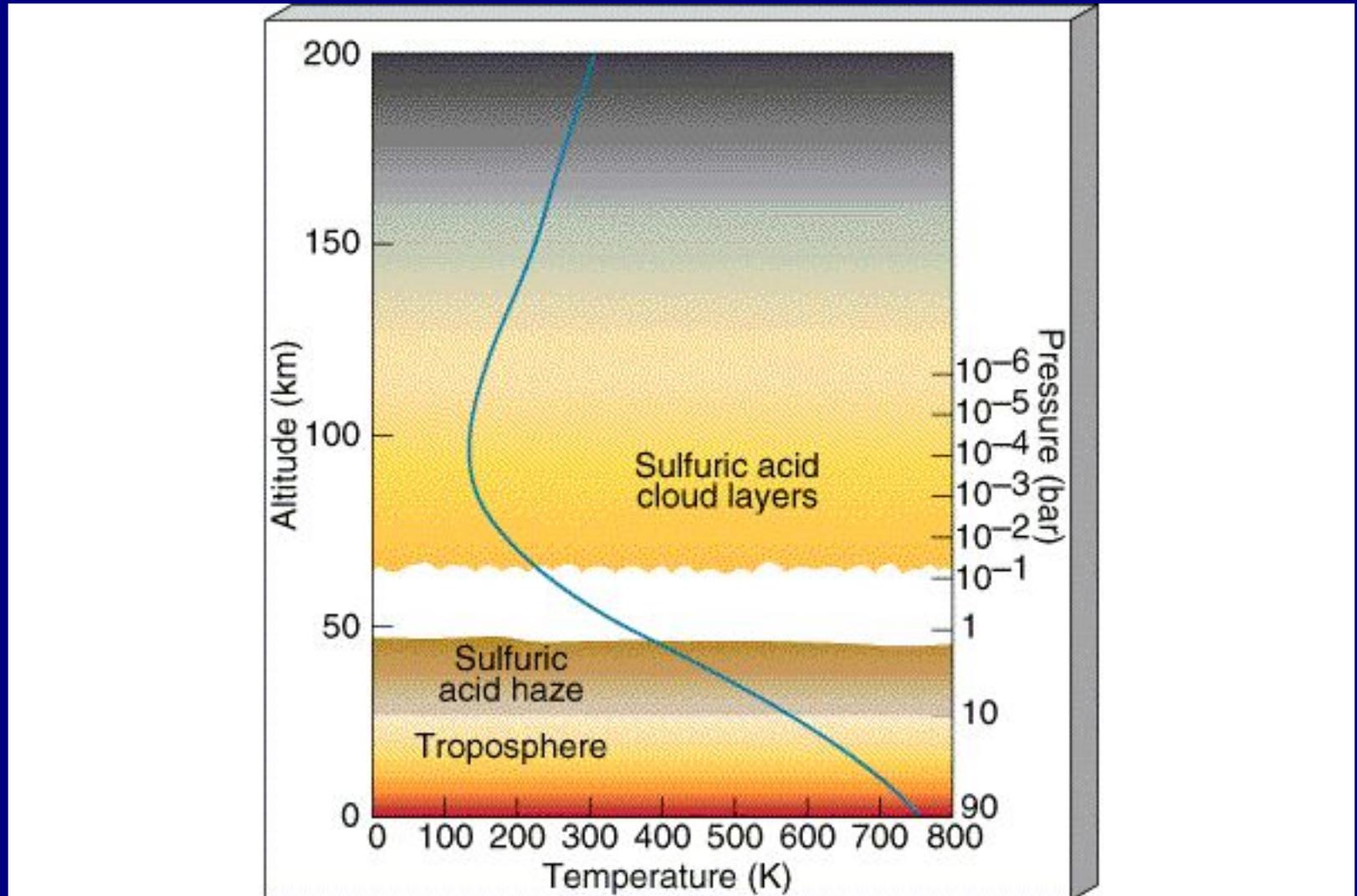
Une circulation générale de l'atmosphère.

Vénus tourne très lentement sur elle même (-273 jours) mais l'atmosphère fait le tour de la planète en 4-5 jours. Super-rotation atmosphérique : un phénomène encore inexpliqué.



[Climate Orbiter Planet C, NASA]

L'atmosphère chaude et opaque de Vénus



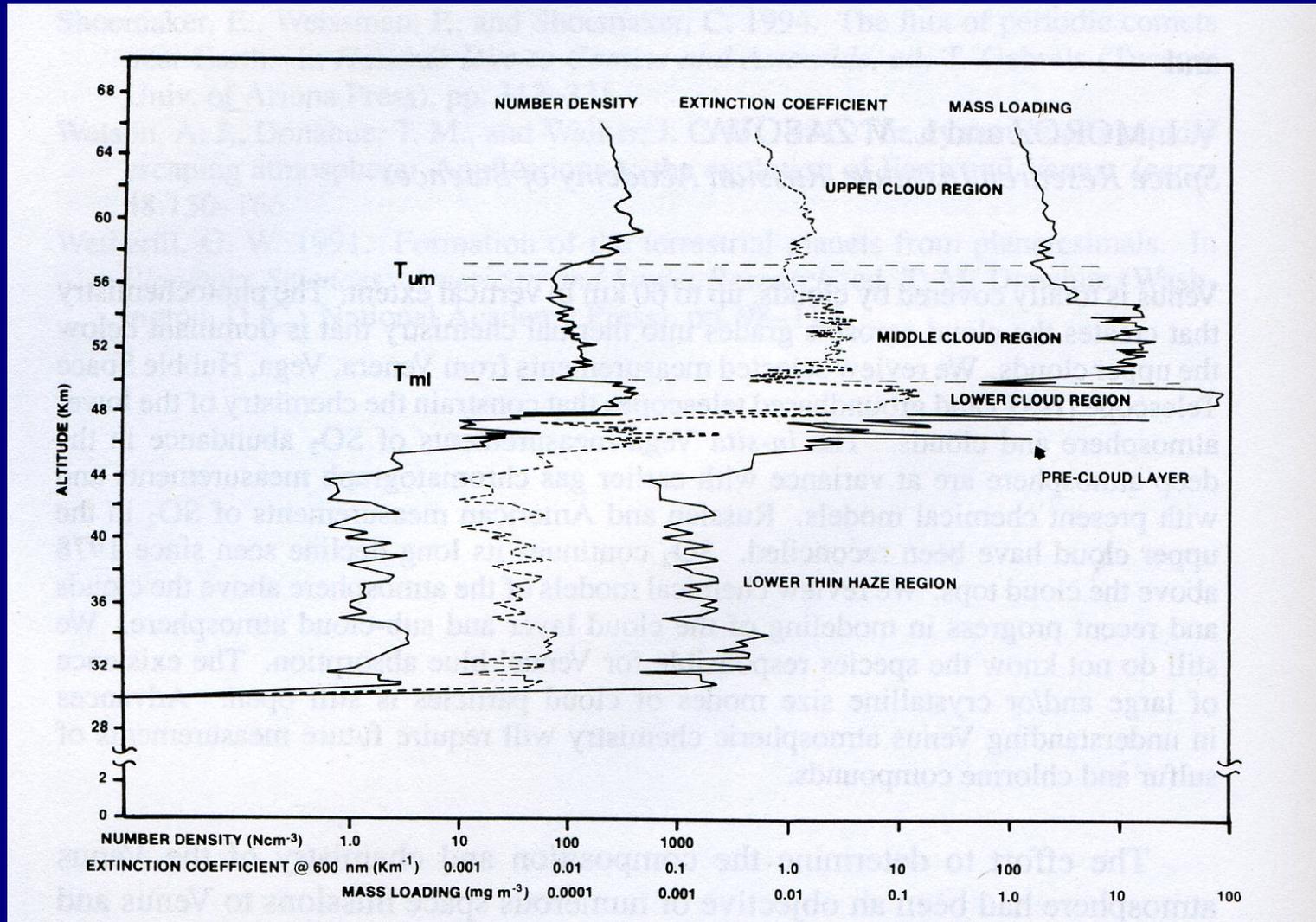
[D. Darling, Pearson Prentice Hall 2005]

Les nuages de Vénus

Ce que l'on voit de Vénus (ici en UV) : des nuages, vers 60 km d'altitude, principalement constitués d'acide sulfurique.

Ces nuages sont tout blancs en visible, présentent des contrastes en UV, et sont partiellement transparents dans certaines gammes (« couleurs ») de l'infrarouge.

Les nuages de Vénus



La répartition des nuages en fonction de l'altitude. Jusqu'à 25 km, le ciel est clair. Puis viennent des brumes, puis les nuages (60 km) avec leurs pluies acides. Les pluies acides tombent de 50 à 30 km puis s'évaporent.

D'où vient l'acide sulfurique ?

Le SO_2 et l'eau viennent d'en bas. Il faut en produire (volcanisme, ou réactions chimiques entre le sol et l'atmosphère).

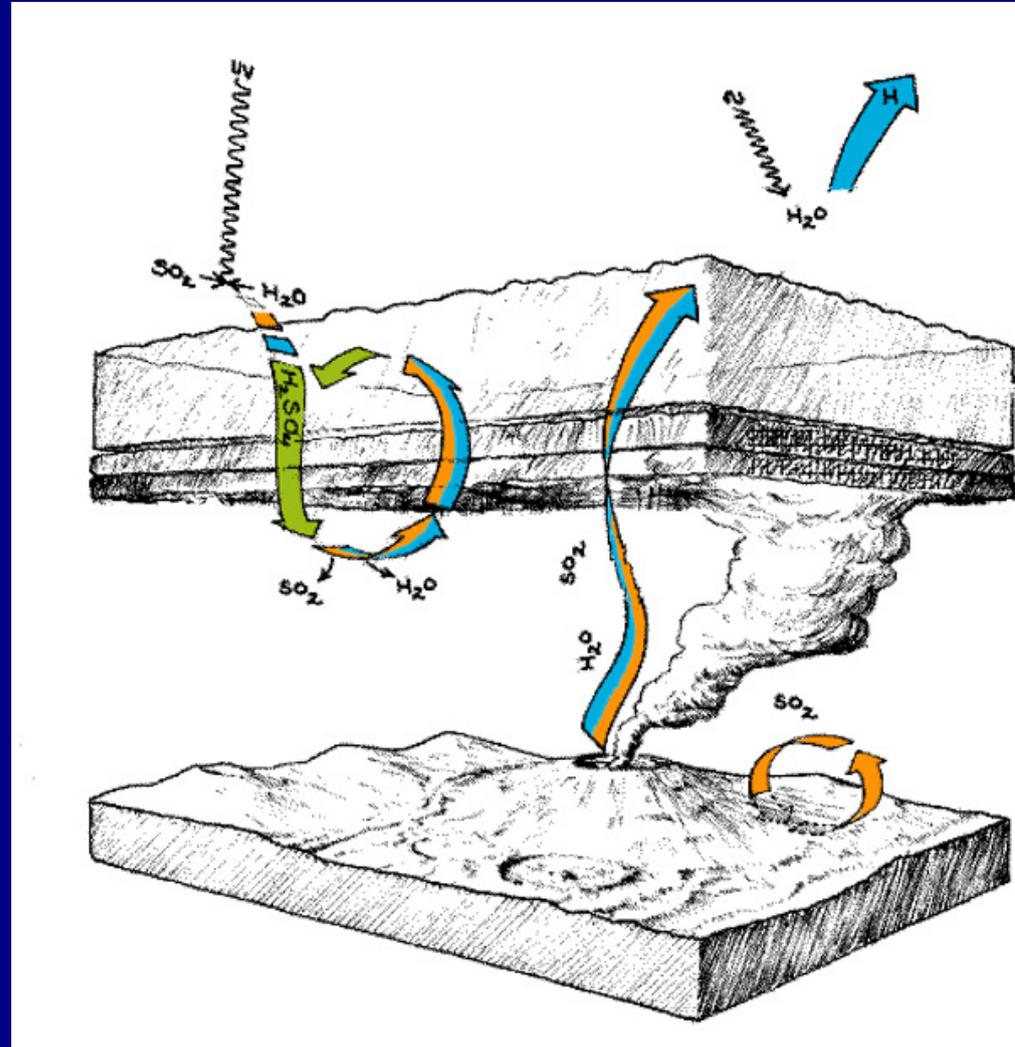
Au dessus des nuages, avec les UV solaires, réaction chimique : Il se fabrique du SO_3 .

fabrication de l'acide sulfurique (H_2SO_4) avec eau et SO_3 .

L'acide est liquide, il tombe en gouttes : pluie acide.

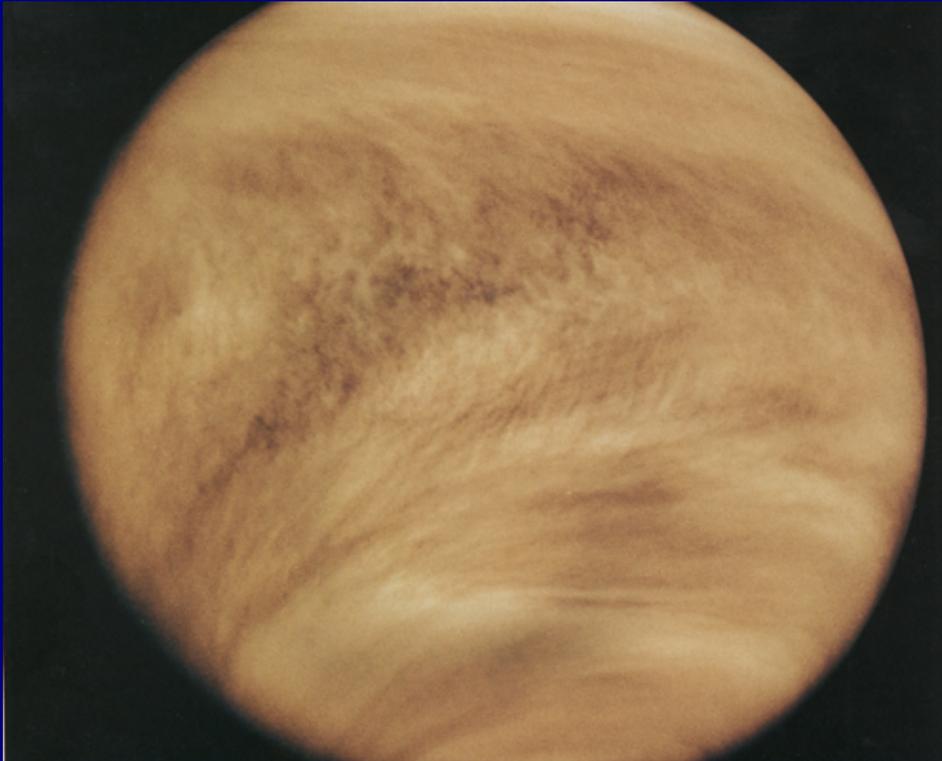
C'est la même chimie que celle des pluies acides sur Terre (SO_2 industriel ou volcanique).

En bas, avec la chaleur il s'évapore et se dissocie.

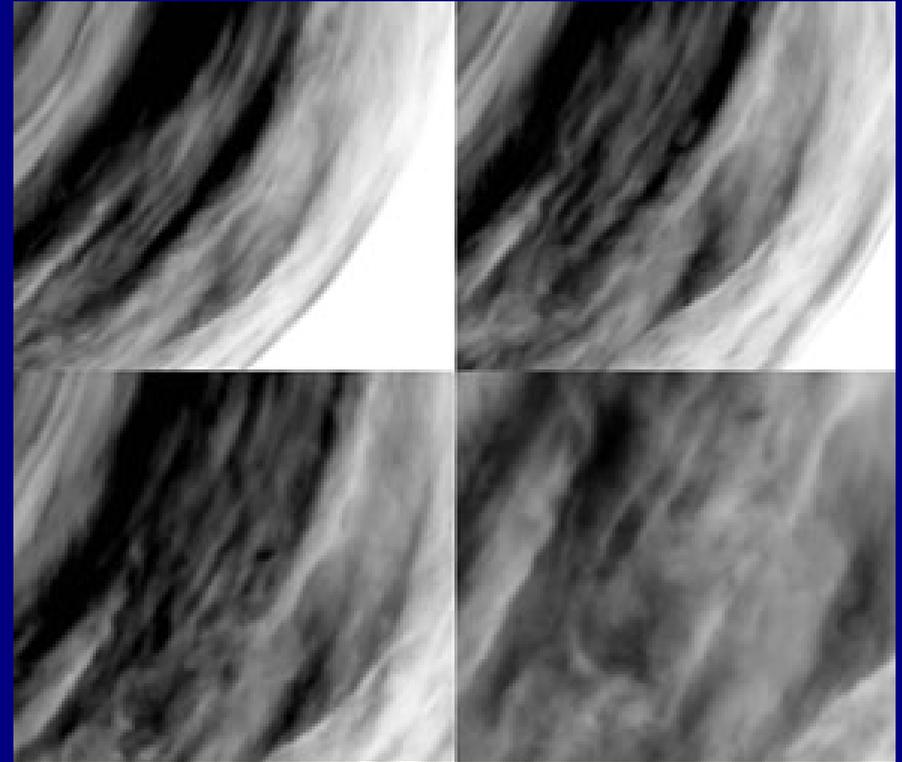


[cours de planétologie du LASP, U Colorado]

Les nuages de Vénus



Vénus en UV [Pioneer Venus Orbiter, 1979]



Vénus en IR [Venus Express, ESA, Virtis]

Ce que l'on voit de Vénus : des nuages, vers 60 km d'altitude, principalement constitués d'acide sulfurique.

Les nuages dans leur mouvement reflètent les vents qui soufflent (fort) aux mêmes altitudes.

Le jeu des deux erreurs



Point douteux sur cette image : éclair, et brume au raz du sol.

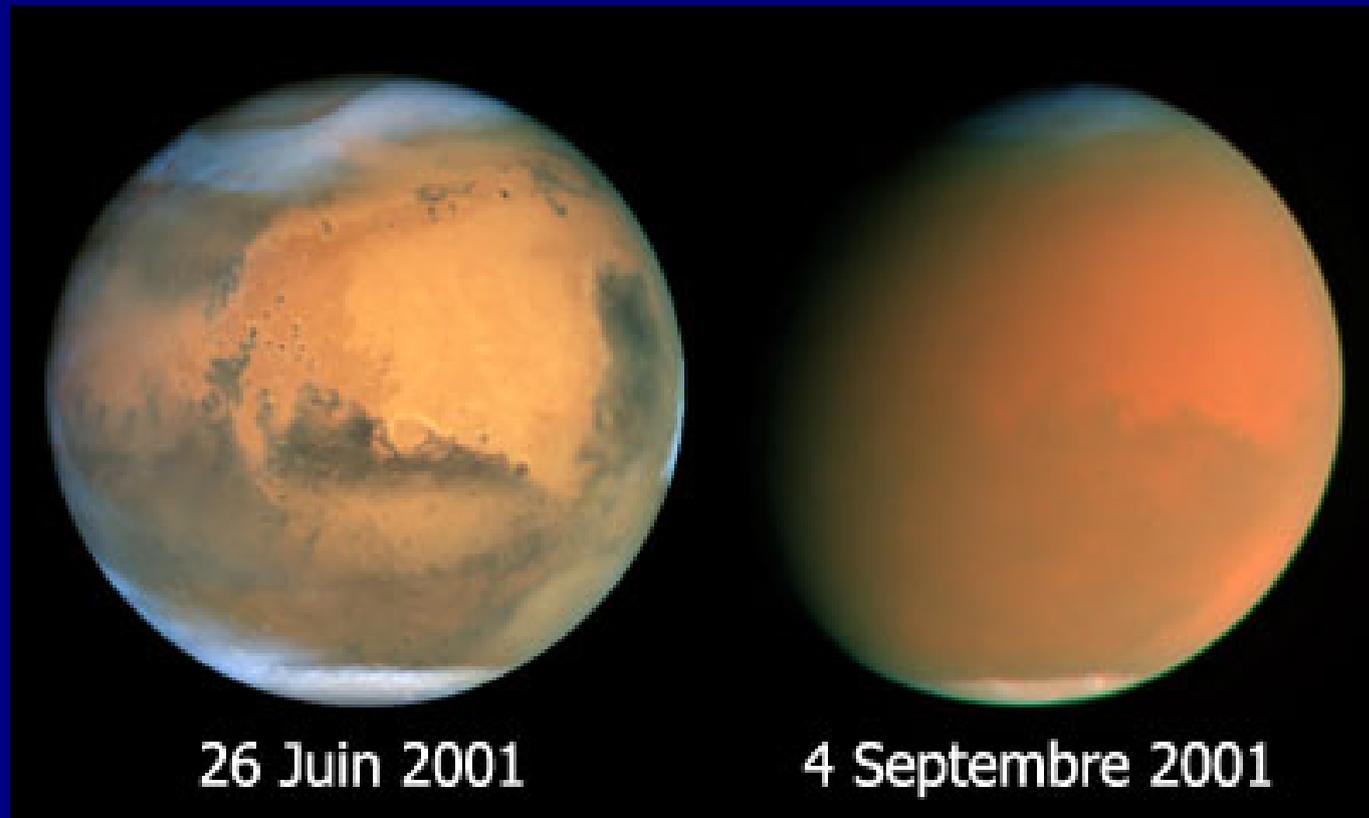
L'atmosphère dense et opaque de Vénus

- 90 fois plus dense que celle de la Terre
- Très chaude, effet de serre.
- CO₂, un peu d'azote.
- très peu d'oxygène, très peu d'eau (réagissent avec le soufre)
- Nuages à haute altitude, d'acide sulfurique.
- Au sol, ciel clair, pas de vent.
- Vent à haute altitude.
- L'atmosphère tourne plus vite que la planète.

D'autres atmosphères : Mars

- Une atmosphère 100 fois moins dense que sur Terre (tandis que celle de Vénus l'est 100 fois plus).
- Composée principalement de CO₂.
- Pas d'effet de serre : atmosphère trop transparente aux IR (car peu dense)
- Du vent, des tempêtes saisonnières.

Mars, ses tempêtes



Les tempêtes de Mars sont liées au gel ou au dégel des calottes polaires, à cause du CO₂ qui s'y condense (ou évapore).
Ces tempêtes recouvrent toute la planète, et soulèvent des poussières qui nous cachent tout.

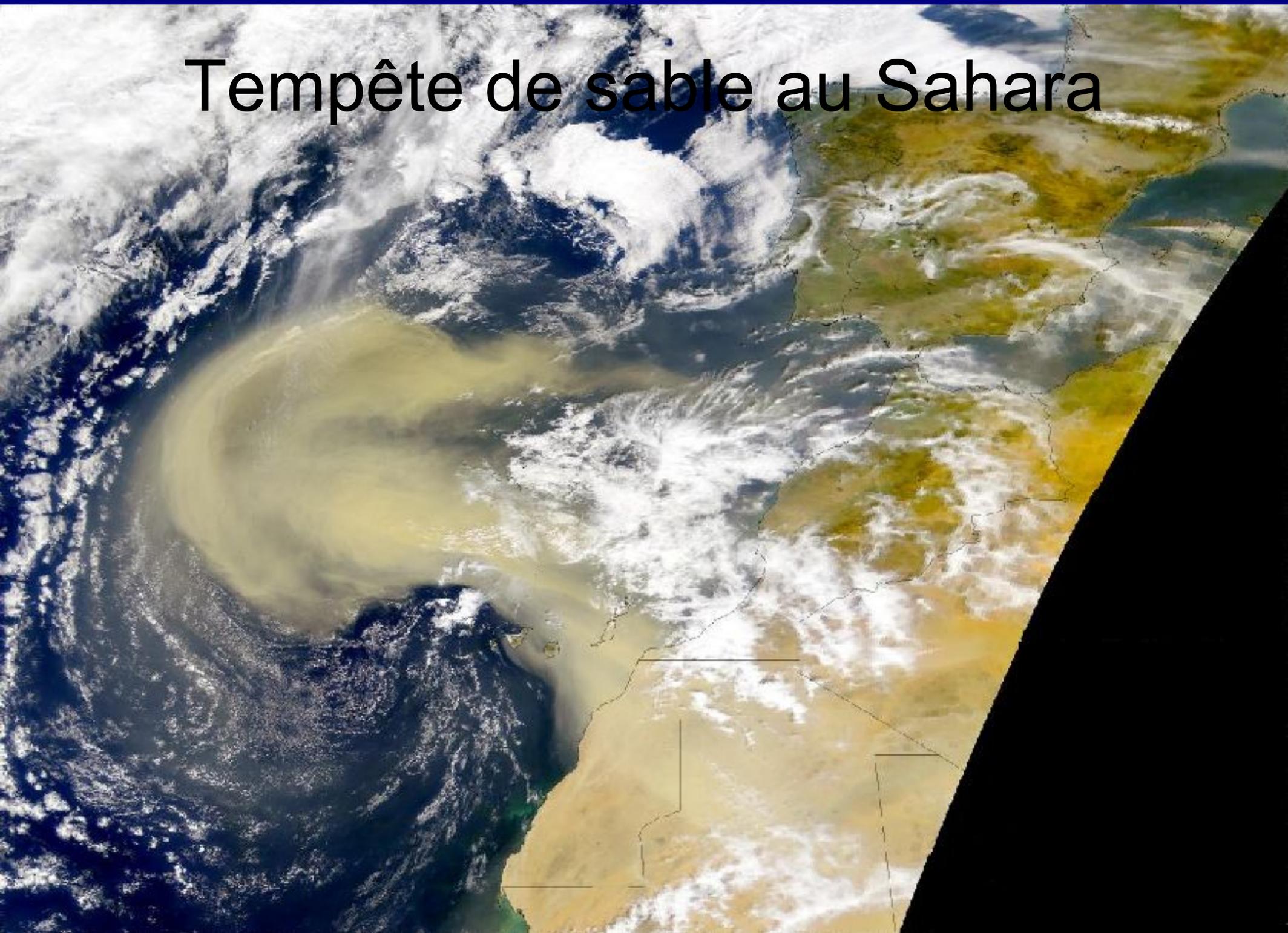
Tempête de sable en Irak (sur une base américaine)



Tempête de sable en Irak (sur une base américaine)



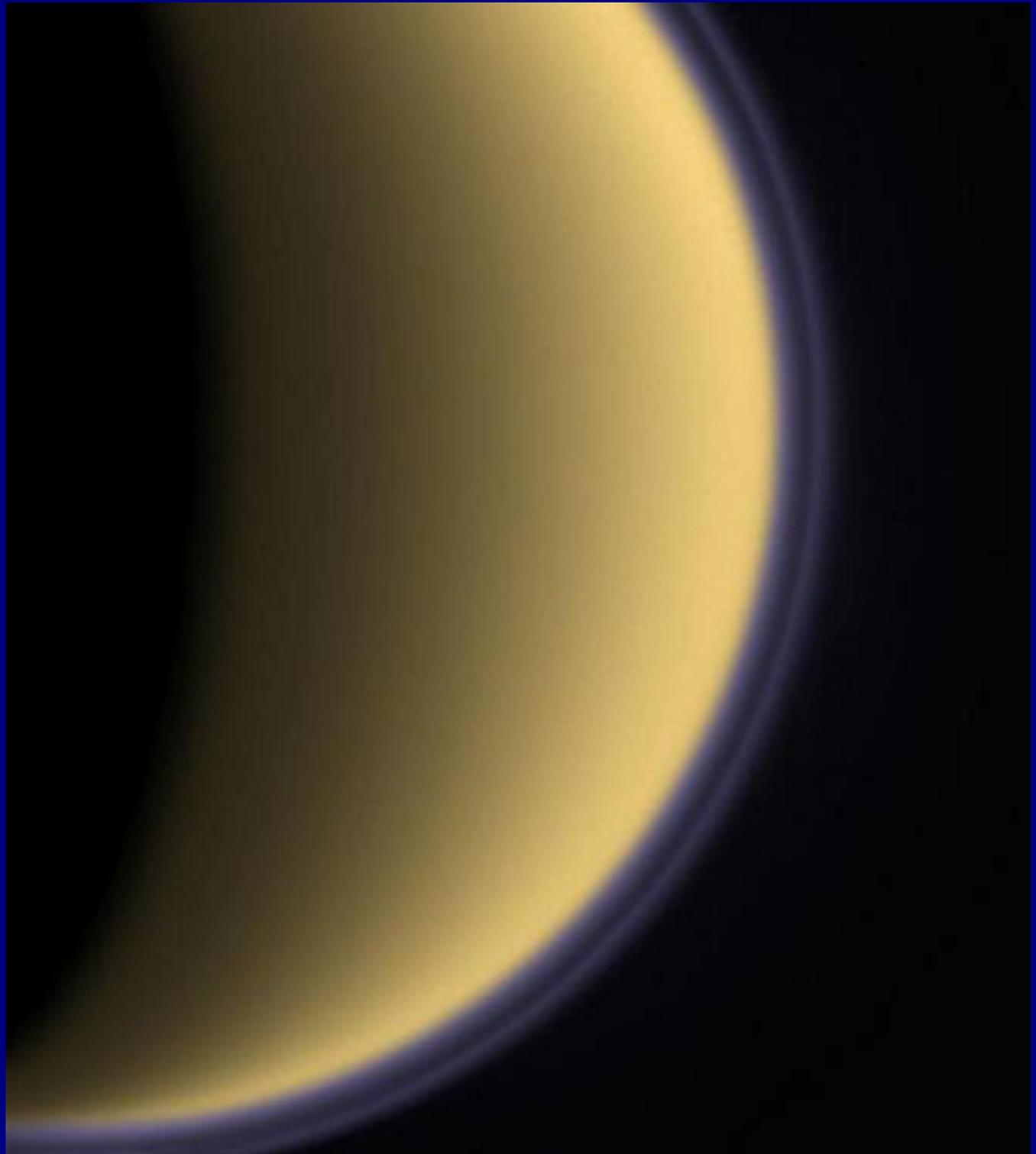
Tempête de sable au Sahara



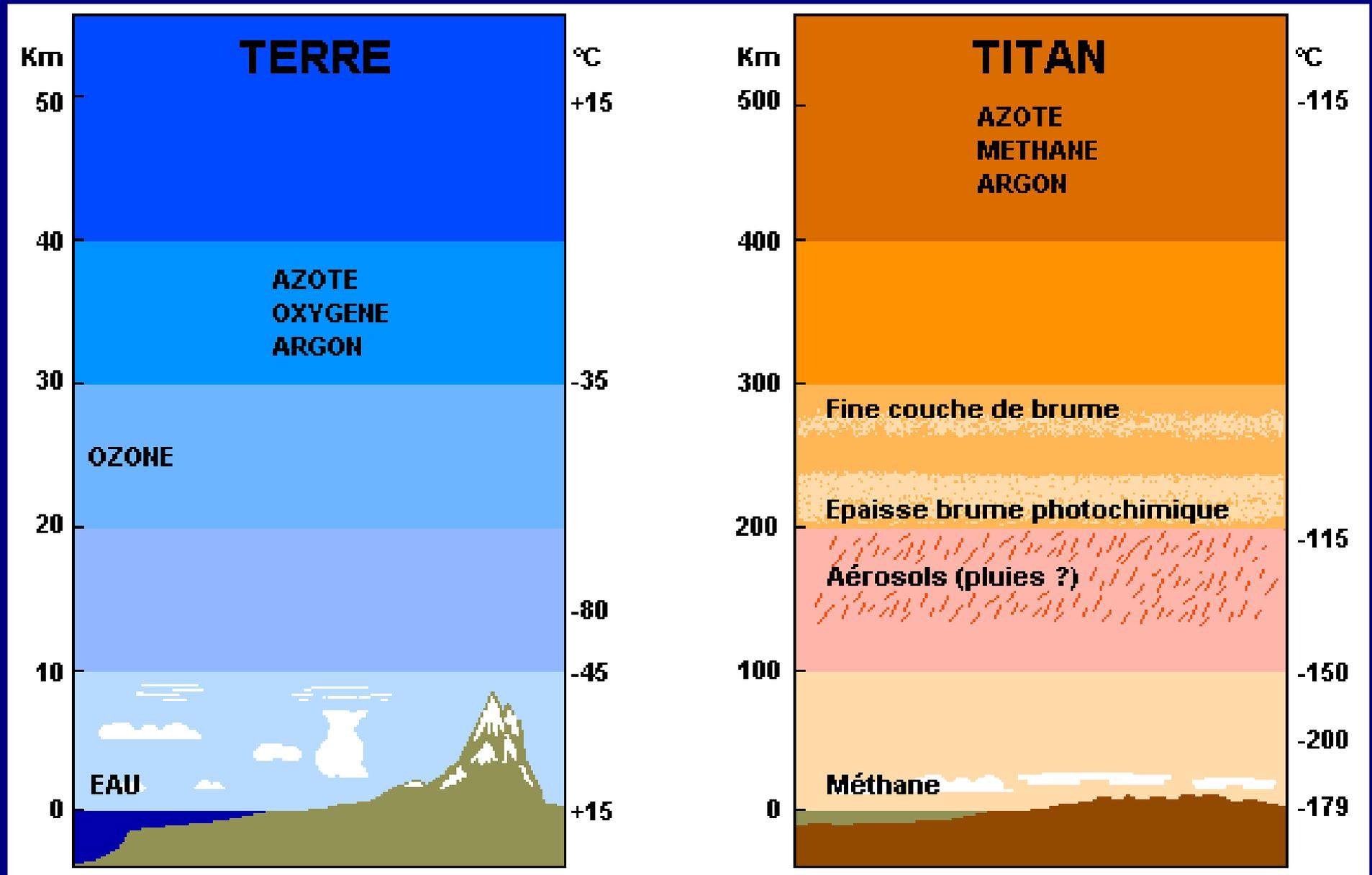
D'autres
atmosphères :

Titan

[Cassini, NASA]



Titan, ses brumes



Une atmosphère dense (pression = 2 fois comme sur Terre). La brume est permanente.

D'autres atmosphères : Titan

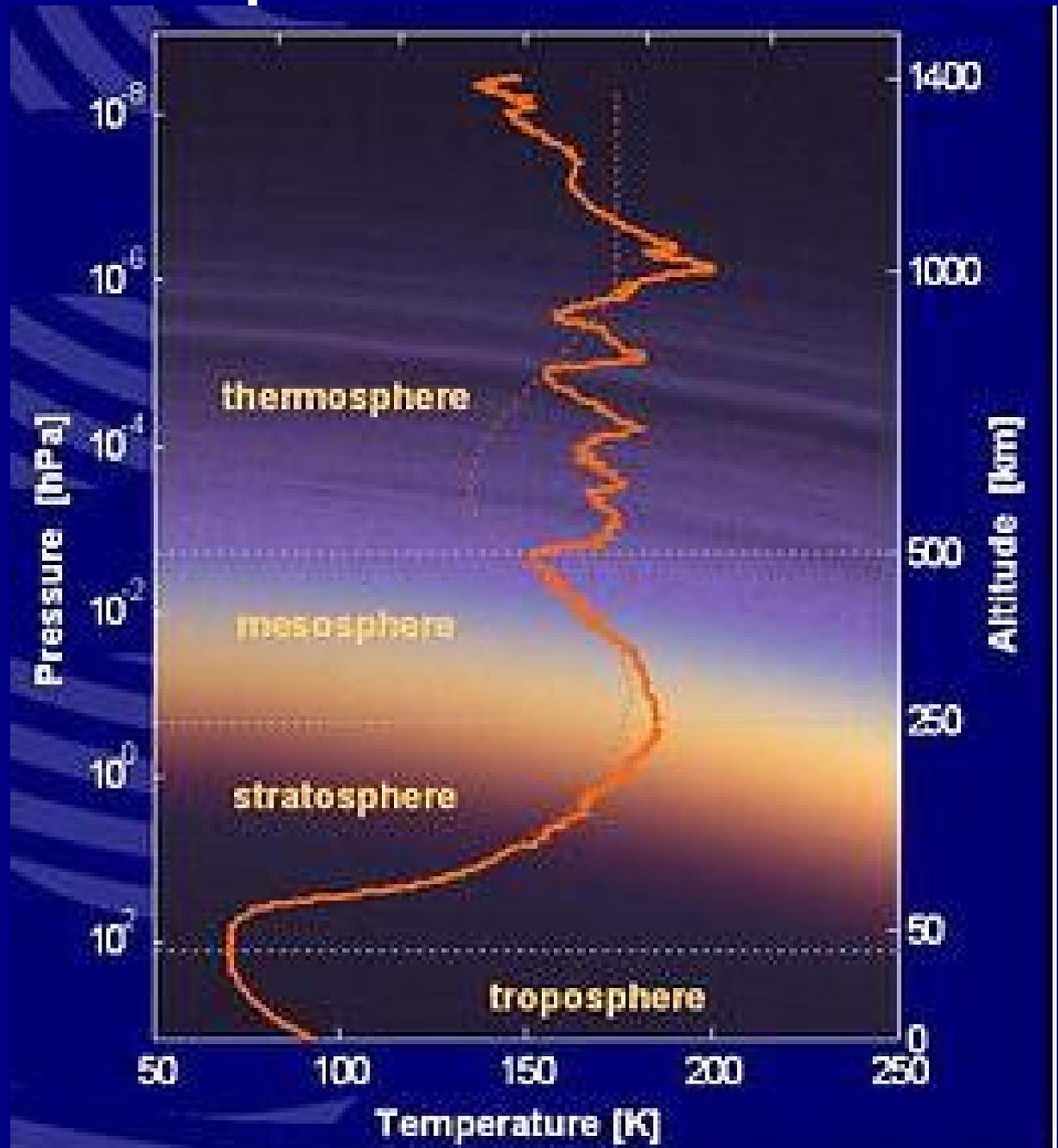
Si loin du Soleil, il fait froid.

Le méthane (un gaz inflammable chez nous) peut se condenser en liquide sur Titan.

Pluies de méthane ?

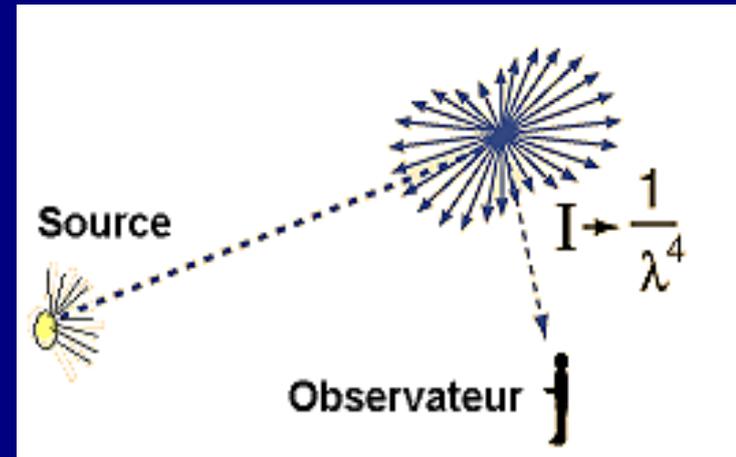
En tout cas, des gouttelettes de quelque chose en suspension : aérosol.

La sonde Huygens montre une chimie complexe, autour du méthane, avec des échanges chimiques entre le gaz, les gouttes (liquides) et le sol.



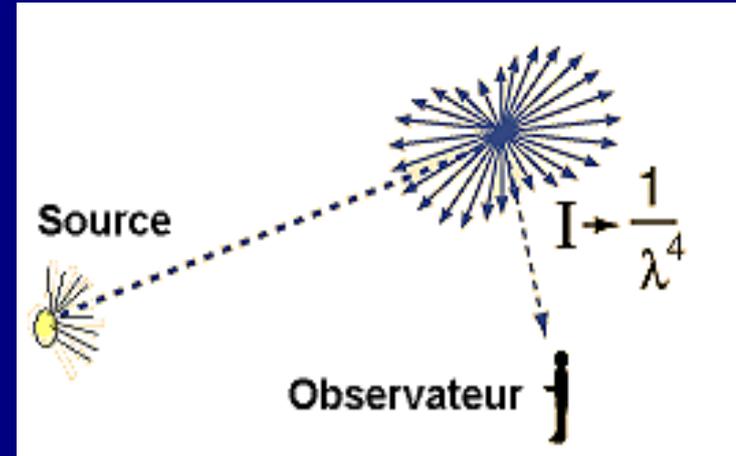
Les couleurs du ciel

Pourquoi le ciel est-il bleu ?



- La lumière est une onde avec un champ électrique qui peut faire bouger les électrons d'une atome.
- Les électrons qui bougent émettent à leur tour de la lumière dans d'autres directions.
- Avec la lumière visible et des atomes, c'est la diffusion de Rayleigh.
- Théorie : Elle correspond au cas d'une longueur d'onde plus grande que l'atome.
- Effets pratiques : les atomes de l'atmosphère de la Terre diffusent surtout la lumière aux courtes longueur d'onde. Efficace dans l'UV et le bleu. Moins dans le rouge, pas du tout en IR.

Pourquoi le ciel est-il blanc ?



- La diffusion Rayleigh ne fonctionne qu'avec des obstacles à la lumière qui sont plus petits que la longueur d'onde.
- Taille d'un atome : 0,1 nano-mètre.
- Longueur d'onde bleue : 400 nano-mètres.
- Longueur d'onde rouge : 650 nano-mètres.
- MAIS taille d'une petite poussière > 1000 nanomètres > longueur d'onde.
- Les grosses poussières renvoient la lumière dans (presque) toutes les directions (diffusion), mais avec leur propre couleur.
- Les gouttes d'eau, encore plus grosses, diffusent la lumière, mais sans changer sa couleur. C'est pour cela que les nuages sont blancs.

Pourquoi le soleil est-il jaune ?



Le Soleil émet une lumière qui nous paraît blanche (même si elle brille le plus en jaune). Quand on regarde vers le soleil, on voit de la lumière qui arrive directement, elle n'est pas diffusée. Comme la lumière bleue a été très diffusée, il reste surtout du rouge et du jaune. Et comme le Soleil est plus jaune que rouge, on voit surtout du jaune. Plus le Soleil est bas, plus il a traversé d'air, plus il est jaune, puis orange (quand même le jaune a été diffusé, colorant le ciel comme sur cette image.)

Pourquoi le ciel est-il noir sur la Lune ?



Comme il n'y a ni air, ni gaz, ni poussière (pas en suspension du moins) il n'y a pas de diffusion. Rien n'éclaire donc le ciel. Il est noir.

Pourquoi le soleil est-il blanc sur la Lune ?



Si on regarde vers le Soleil, toute sa lumière nous arrive, et elle nous paraît blanche (elle a gardé toutes ses couleurs et le mélange donne du blanc).

Pourquoi le ciel est-il rougeâtre sur Mars ?



C'est la couleur des poussières martiennes, soulevées du sol par le vent. Mais en fait, la lumière diffusée par les poussières l'est surtout de côté ou en arrière, pas devant les poussières.

Pourquoi le ciel est-il rougeâtre sur Mars ?



Quand on regarde vers le Soleil, la lumière est moins diffusée par les poussières (car elles diffusent plutôt en arrière). La lumière près du Soleil est donc moins rouge.

Mais tout autour, il y a le gaz carbonique qui diffuse en Rayleigh (moins que sur Terre), d'où une légère coloration bleue..

Le ciel est-il rougeâtre sur Mars ?

Coucher de Soleil sur le cratère Gusev, vu par Mars Rover Explorer, 2005

La lumière est moins rouge, légèrement bleutée par la diffusion Rayleigh

[NASA]



Le ciel est-il rougeâtre sur Mars ?

Coucher de Soleil sur le cratère Gusev, vu par Mars Rover Explorer, 2005

La lumière est moins rouge, légèrement bleutée par la diffusion Rayleigh

[NASA]



Pourquoi les compositions chimiques sont-elles si diverses ?

Sea, effet de serre and Sun.

Où comment l'eau a joué un rôle déterminant dans l'évolution des atmosphères de Vénus, de la Terre et de Mars.

Pourquoi les compositions chimiques sont-elles si diverses ?

- On suppose qu'à l'origine il y avait beaucoup d'eau H₂O et de gaz carbonique CO₂.
- L'eau était :

Gazeuse sur Vénus

Liquide sur Terre

Glacée sur Mars.

Pourquoi les compositions chimiques sont-elles si diverses ?

Vénus

- L'eau est un gaz à effet de serre. L'atmosphère de Vénus a donc beaucoup chauffé.
- Vénus est très exposée aux UV solaires (car proche du Soleil). Donc la photo-dissociation de l'eau (casser une molécule d'eau avec des UV) a du être efficace.
- Comme l'atmosphère était chaude, les hydrogènes ainsi produits ont du s'échapper.
- L'oxygène restant a pu se recombinaison, par exemple pour produire plus de CO₂.

Pourquoi les compositions chimiques sont-elles si diverses ?

Terre

- L'eau est liquide, la Terre est couverte par un océan. Peu d'eau gazeuse, peu d'effet de serre, donc une température « clémente ».
- La présence d'eau liquide favorise des réactions chimiques de piégeage du CO₂ par le sol, notamment avec des roches riches en calcium, pour former du CaCO₃ (-> calcaire).
- L'atmosphère est donc peu dense (comparée à Vénus), pauvre en CO₂.
- L'enrichissement en oxygène est exclusivement dû à la respiration des plantes.

Pourquoi les compositions chimiques sont-elles si diverses ?

Mars

- Dans le passé, il y aurait pu avoir de l'eau liquide, comme dans le cas de la Terre. Chauffée par l'activité interne de Mars dans son premier milliard d'années.
- Mars est petite, l'échappement atmosphérique est donc plus fort.
- On cherche où l'eau a pu passer : échappée, ou piégée dans le sous-sol ?
- Et le carbone : piégé sous forme de carbonates dans le sol ?