

Astrophysique

6 – Les Planètes

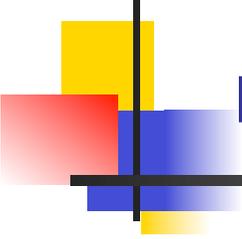


Alain Bouquet

Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

Université Denis Diderot Paris 7, CNRS, Observatoire de Paris & CEA





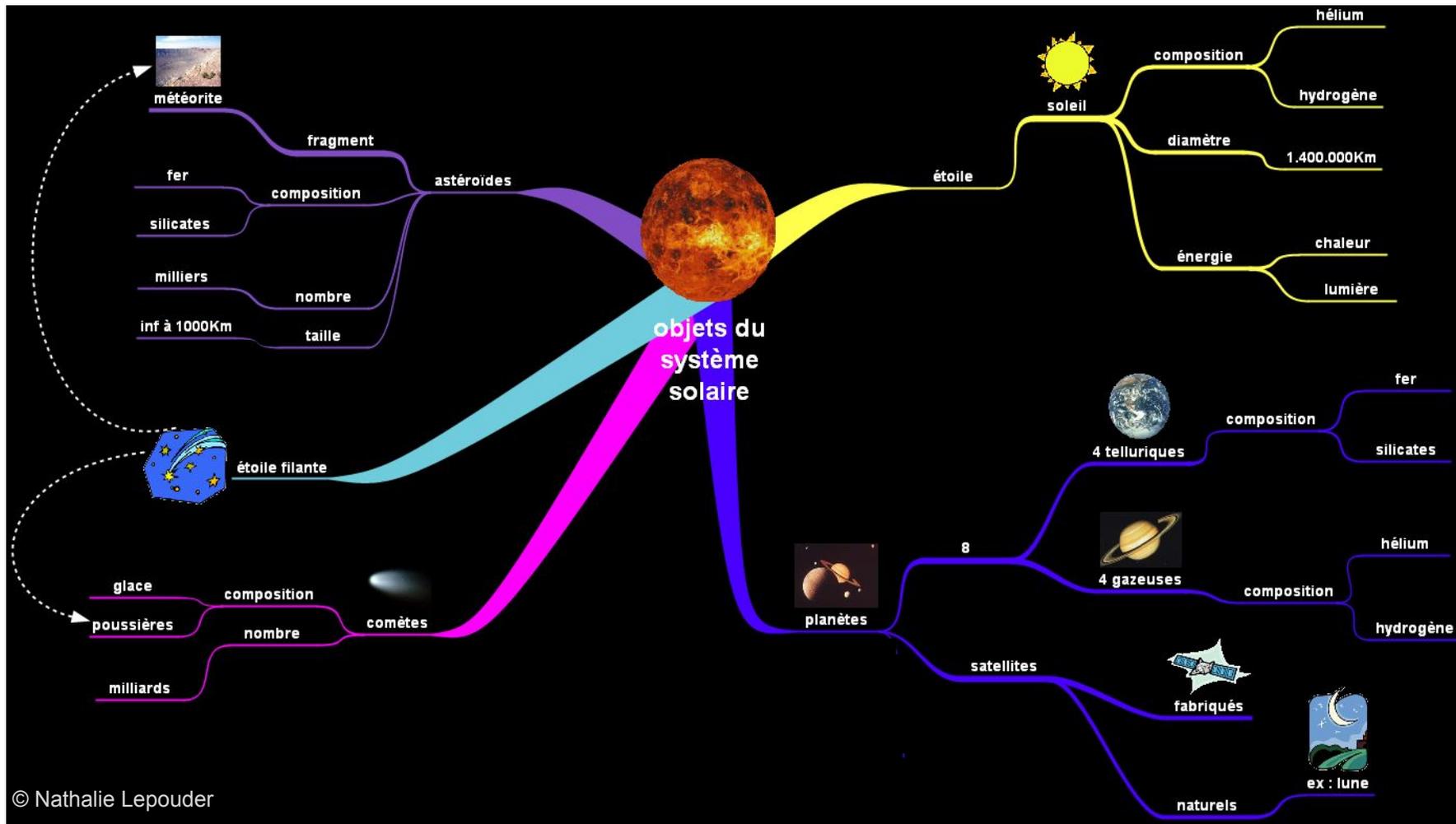
L'étude des planètes a...

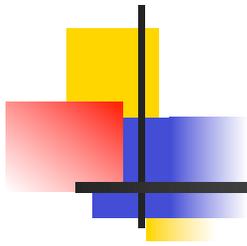
- constitué l'essentiel de l'astronomie jusqu'au XIX^e siècle

- subi une éclipse quand l'intérêt s'est porté vers les étoiles, puis les galaxies

- connu un prodigieux renouveau depuis 30 ans

Les objets du système solaire





OBSERVATIONS ET MÉTHODES

Définition d'une planète

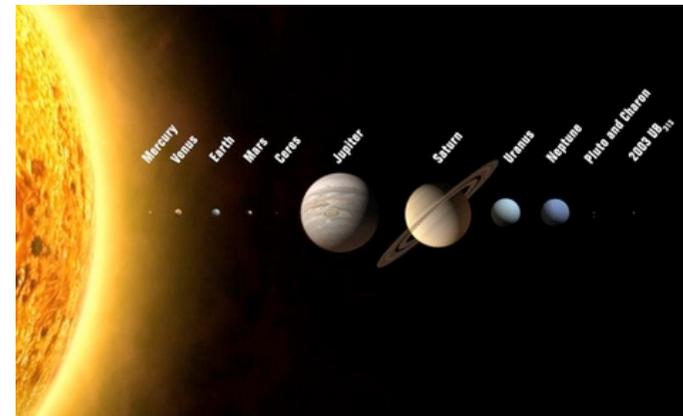
- Une planète est un objet qui
 - suit une orbite périodique autour du Soleil
 - possède une masse suffisante pour que sa gravitation propre lui donne une forme sphéroïdale
 - a éjecté de son orbite la plupart des corps plus petits
- Ne sont pas des planètes
 - Les planètes naines
 - Pluton
 - Cérés, Eris, Makemake, Haumea
 - les comètes
 - les astéroïdes



- → huit planètes

- Mercure
- Vénus
- La Terre
- Mars

- Jupiter
- Saturne
- Uranus
- Neptune



Distances, tailles, masses

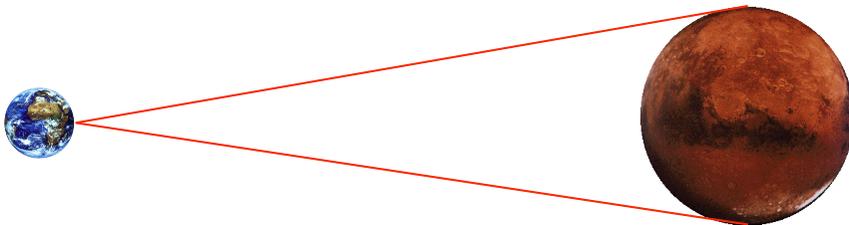
- Distance d'une planète à un instant donné → distances de toutes les planètes à tout instant via la 3^e loi de Kepler $T^2 = [4\pi^2/GM] D^3$

■ Distances

- Parallaxe (triangulation)
- Écho radar

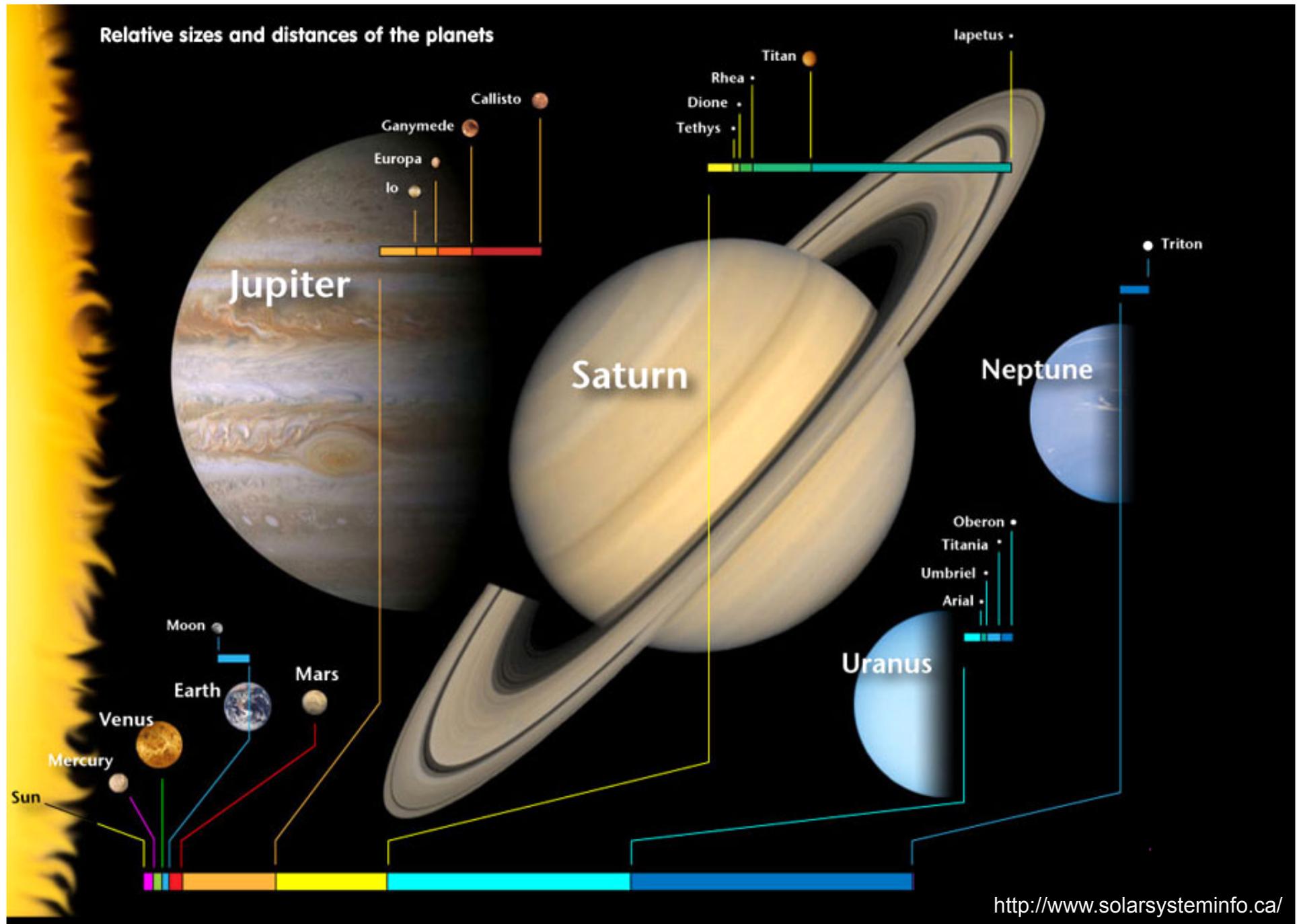
■ Tailles

- Diamètre = Diamètre angulaire x Distance

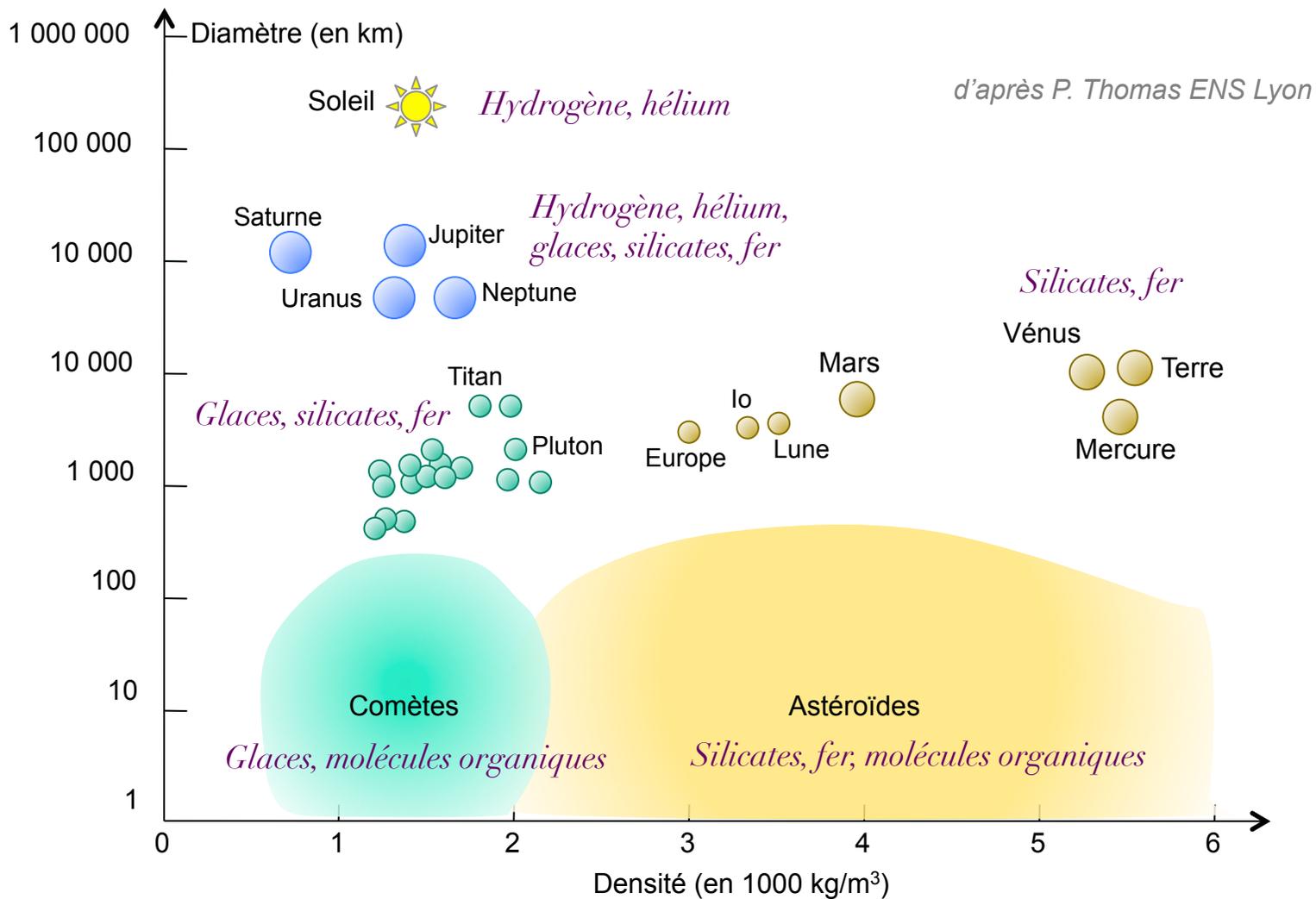


■ Masses

- Satellite → Kepler $T^2 = [4\pi^2/GM] D^3$
- Par exemple: Europe et Jupiter
 - Distance $D = 671\,000$ km
 - Période $T = 3,55$ jours
 - → Masse $M = 1,91 \times 10^{27}$ kg
- Et s'il n'y a pas de satellite ?
 - Estimer la composition (→ densité) et en déduire la masse connaissant la taille
 - Utiliser les perturbations des trajectoires des autres planètes pour en déduire la masse perturbatrice
 - Envoyer un satellite artificiel orbiter autour de la planète

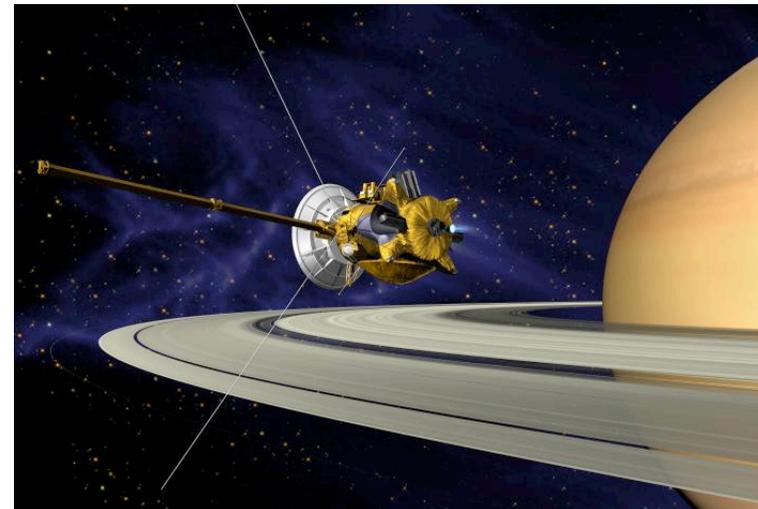


Les corps du système solaire



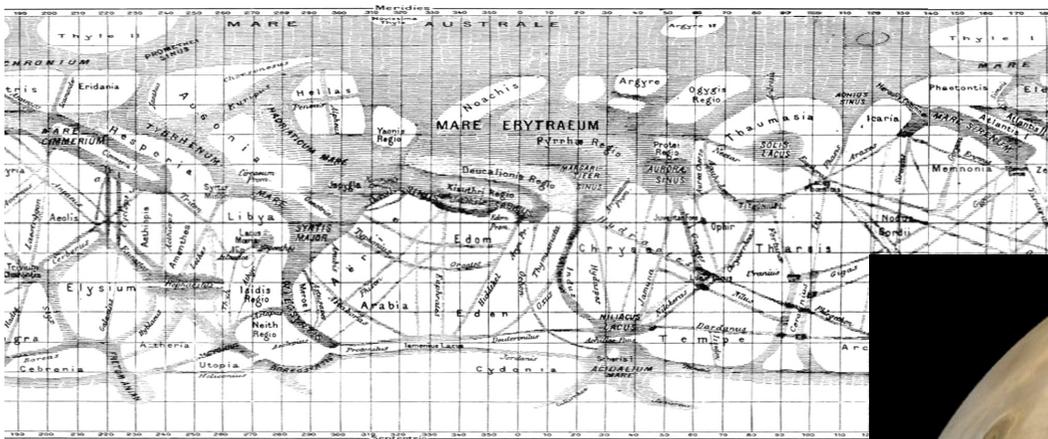
Les principales sondes planétaires

- **Mariner 4** (1965)
 - survol de Mars à 10000 km
- **Mariner 5** (1967)
 - survol de Vénus à 5000 km
- **Venera 7** (1970)
 - posée sur Vénus, suivie par 8 autres Venera
- **Mariner 10** (1974)
 - survol de Vénus à 6000 km puis de Mercure à 700 puis 300 km
- **Viking 1 et 2** (1976)
 - en orbite autour de Mars + atterrisseur
- **Voyager 1 et 2** (1977)
 - Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune
- **Galileo** (1989-1995-2003)
 - Jupiter et ses satellites (volcans de Io)
- **Magellan** (1989-1994)
 - en orbite autour de Vénus (carte radar)
- **Mars Global Surveyor** (1997-2006)
 - carte détaillée de Mars
- **Mars Pathfinder** (1997)
 - atterrissage + rover martien
- **Cassini-Huyghens** (1997-2004)
 - en orbite autour de Saturne
 - module Huyghens posé sur Titan
- **Mars Express** (2003)
 - étude détaillée de Mars
- **Mars Exploration Rover**
 - 2 rovers (Spirit et Opportunity)
- **Vénus Express** (2005)
 - en orbite autour de Vénus
- **Messenger** (2008)
 - survol de Mercure à 200 km

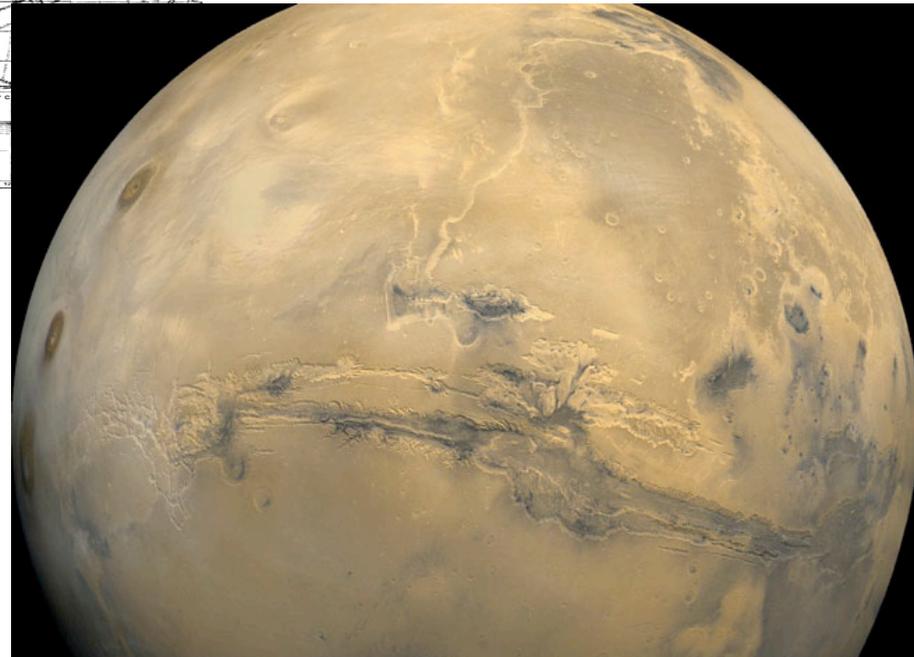


Imagerie

- Mars, vue par Schiaparelli en 1886 : des océans et des canaux

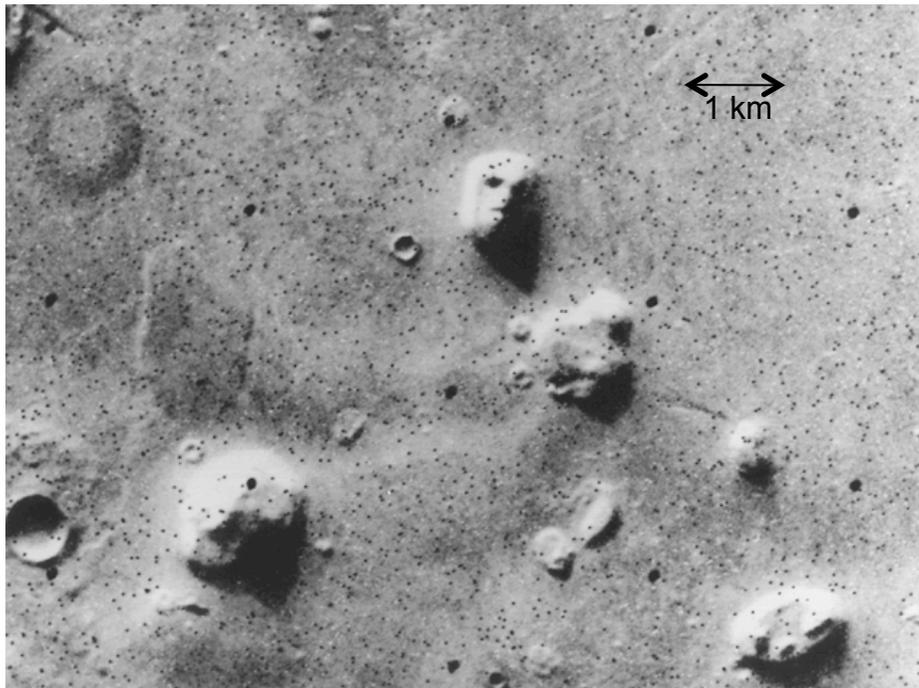


- Mars vue par Viking en 1976 (le rift de Valles Marineris)

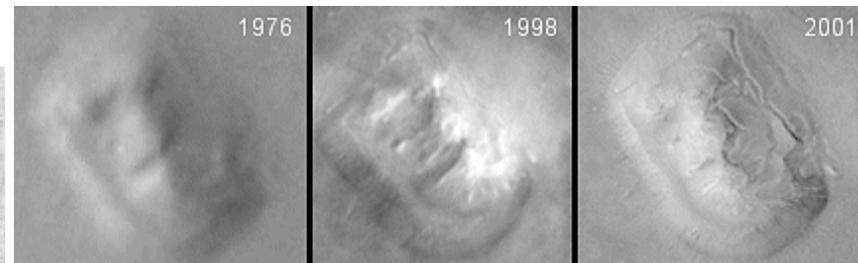


Un visage sur Mars ?

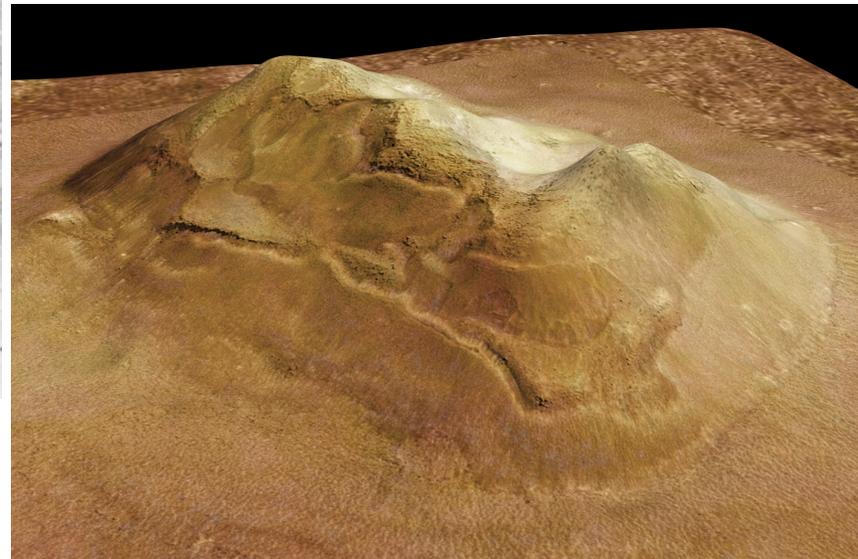
- La région de Cydonia vue par Viking en 1976



- par Mars Global Surveyor en 1998-2001

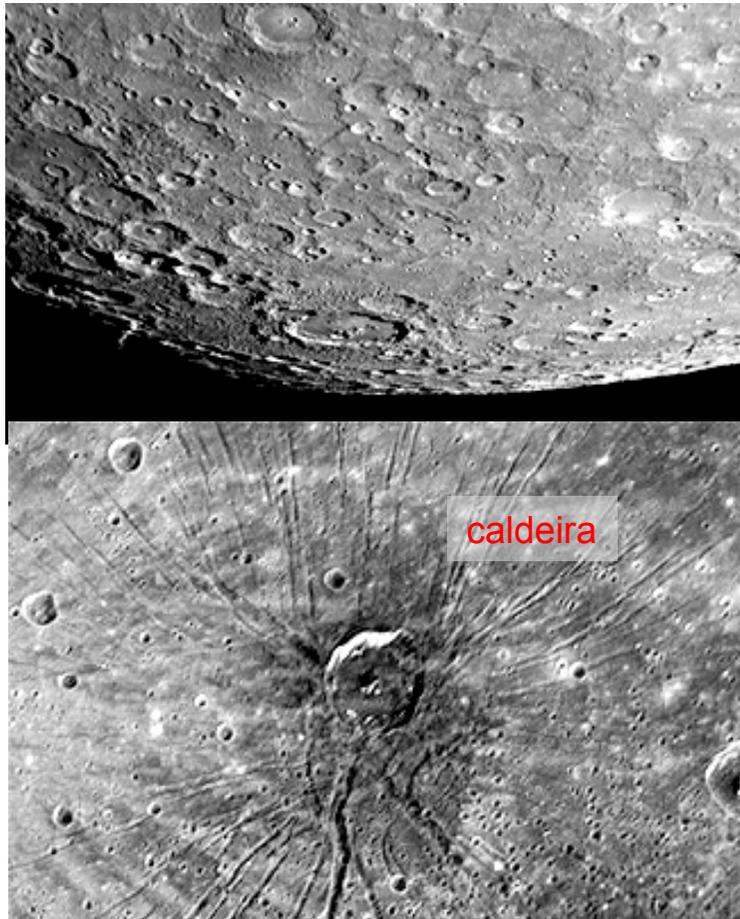


- et par Mars Express en 2006

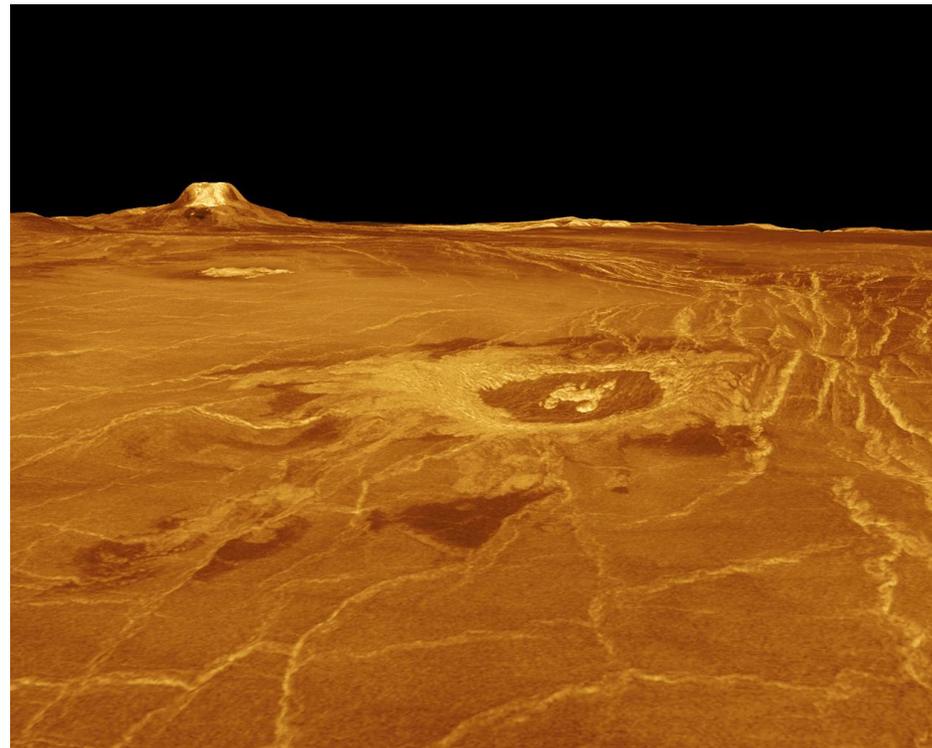


Imagerie

- Optique
- Mercure (sonde *Messenger* 2008)



- Radar
- Vénus (sonde *Magellan* 1989-1994)



Anneaux de Saturne

- Image composite (sonde *Cassini*)

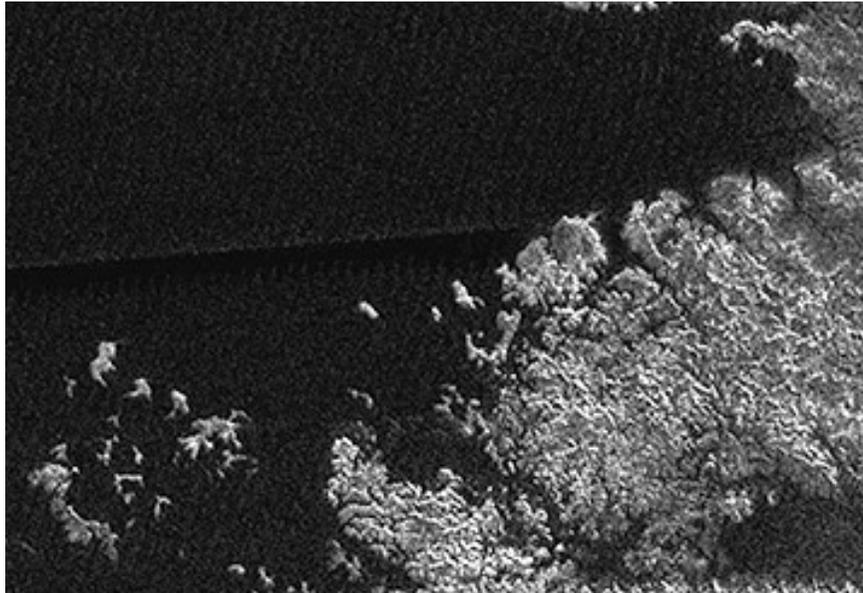


- Les anneaux en vraie couleur (sonde *Cassini*)



Titan

- Image radar de Titan (sonde *Cassini*)
 - Océans de méthane liquide et continents ?



- Image donnée par le module *Huyghens* au cours de sa descente

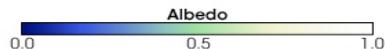
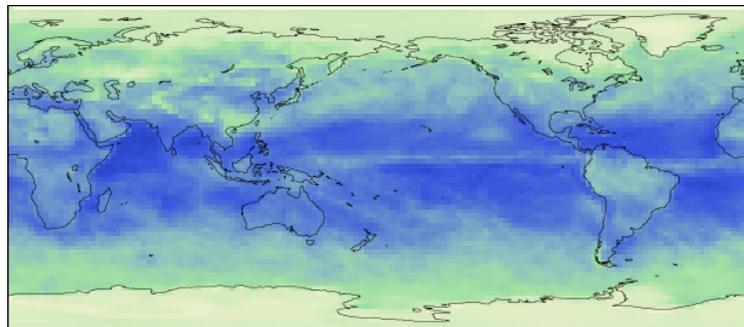


Photométrie

- Photométrie: quantité de lumière (énergie) reçue d'un corps céleste

- Albédo a : énergie réémise / énergie reçue par un corps (donc $0 < a < 1$)

- Lave 0,04
- Eau 0,05
- Sable 0,3
- Nuages 0,4 (stratus)
0,8 (cumulus)
- Neige 0,8



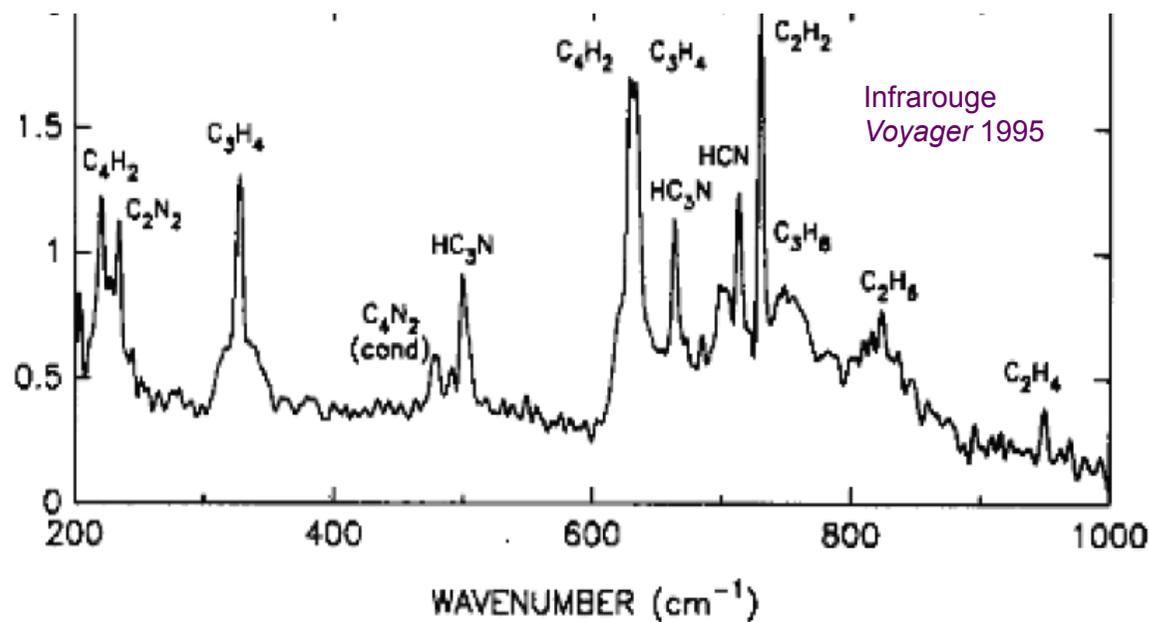
- Pour les planètes

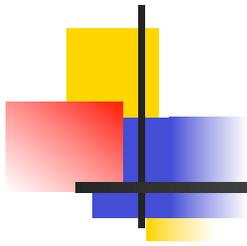
- Mercure 0,12
- Vénus 0,75 *nuages*
- Terre 0,31 *en moyenne!*
Lune 0,11
- Mars 0,25
- Jupiter 0,34
- Saturne 0,34
- Uranus 0,30
- Neptune 0,29

Spectroscopie

- Spectroscopie: répartition de l'énergie émise en fonction de la longueur d'onde (→ couleur)
 - Optique: atomes
 - Infrarouge: molécules
 - Informations indirectes sur la température et la densité

- Exemple: Titan



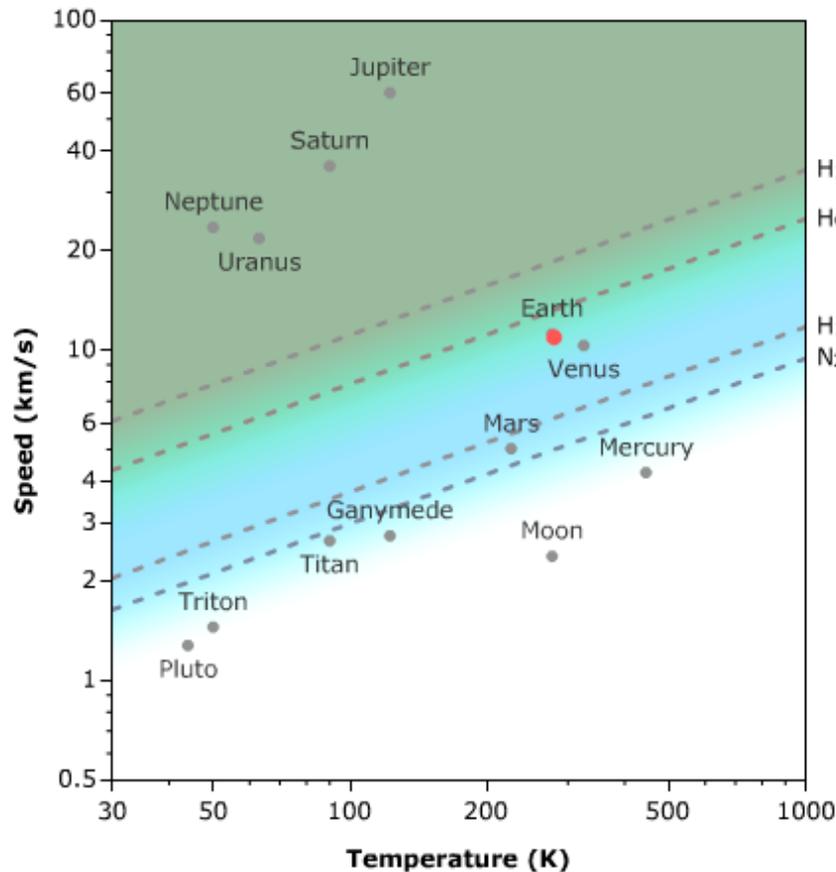


ATMOSPHERES



Pour avoir une atmosphère...

- ...un corps doit avoir une gravité suffisante



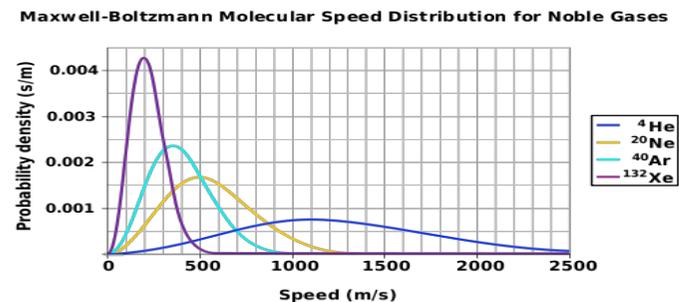
- Gravité → vitesse minimale $V_{\text{libération}}$

- Température T → vitesse moyenne

$$\frac{1}{2} m \langle V^2 \rangle = \frac{3}{2} kT$$

- → possibilité pour les plus légers des gaz de s'échapper (évaporation) si leur vitesse dépasse la vitesse «de libération»

- En fait on a une *distribution* de vitesse (Maxwell-Boltzmann)



Température

- Calcul en principe simple
- Énergie reçue du Soleil à distance D

$$E_{\text{reçue}} = \pi R^2 L_{\odot} / 4\pi D^2$$

- Température donnée par la loi de Stefan-Boltzmann

$$E = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

- Par exemple, la Terre

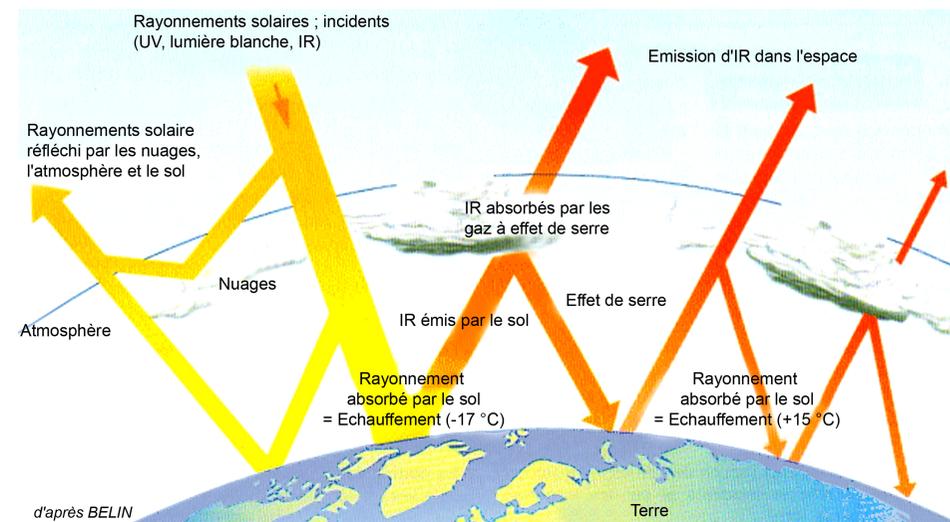
- $R = 6,4 \times 10^6 \text{ m}$
- $D = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$
- $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$
- $\rightarrow T = 279 \text{ K} (6^{\circ}\text{C})$
- En réalité $T_{\text{moyenne}} = 288 \text{ K} (15^{\circ}\text{C})$
- Pas si mal ?

- **Non**, d'autres facteurs entrent en jeu

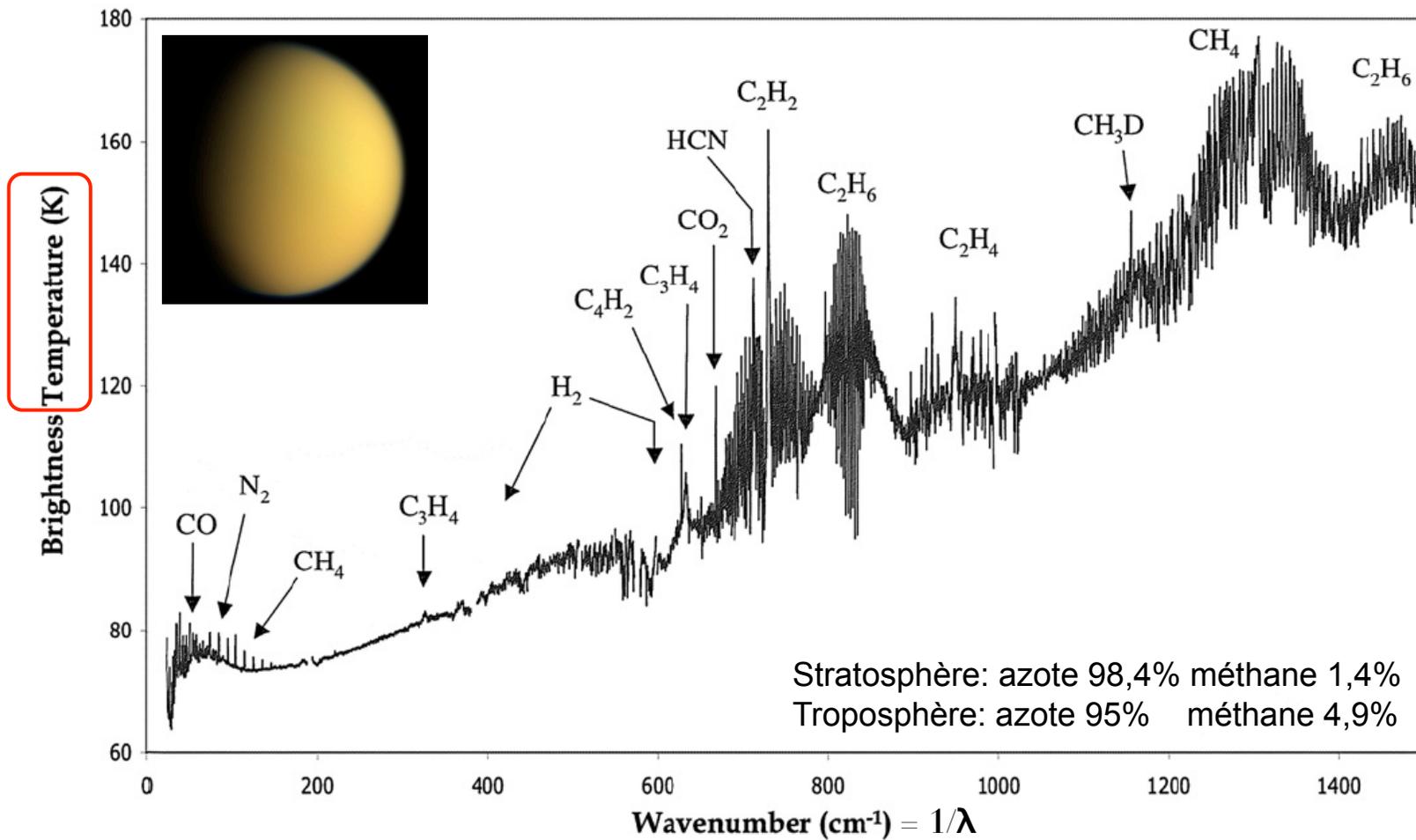
1. réémission de la lumière (albedo a)

- Terre : 30% de l'énergie reçue est immédiatement renvoyée ($a = 0,306$)
- $\rightarrow T = 255 \text{ K} (-19^{\circ}\text{C})$

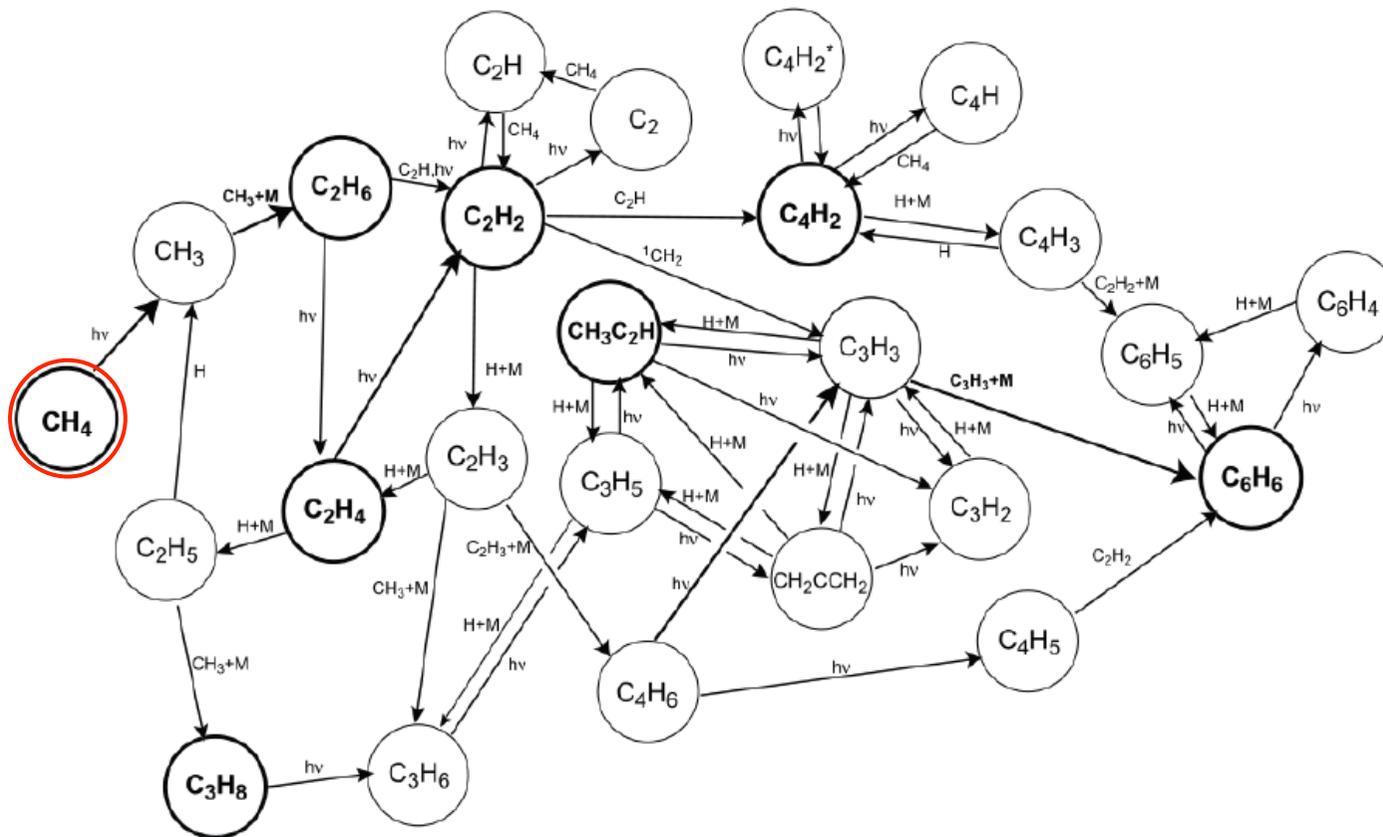
2. effet de serre de l'atmosphère



L'atmosphère de Titan (satellite de Saturne)

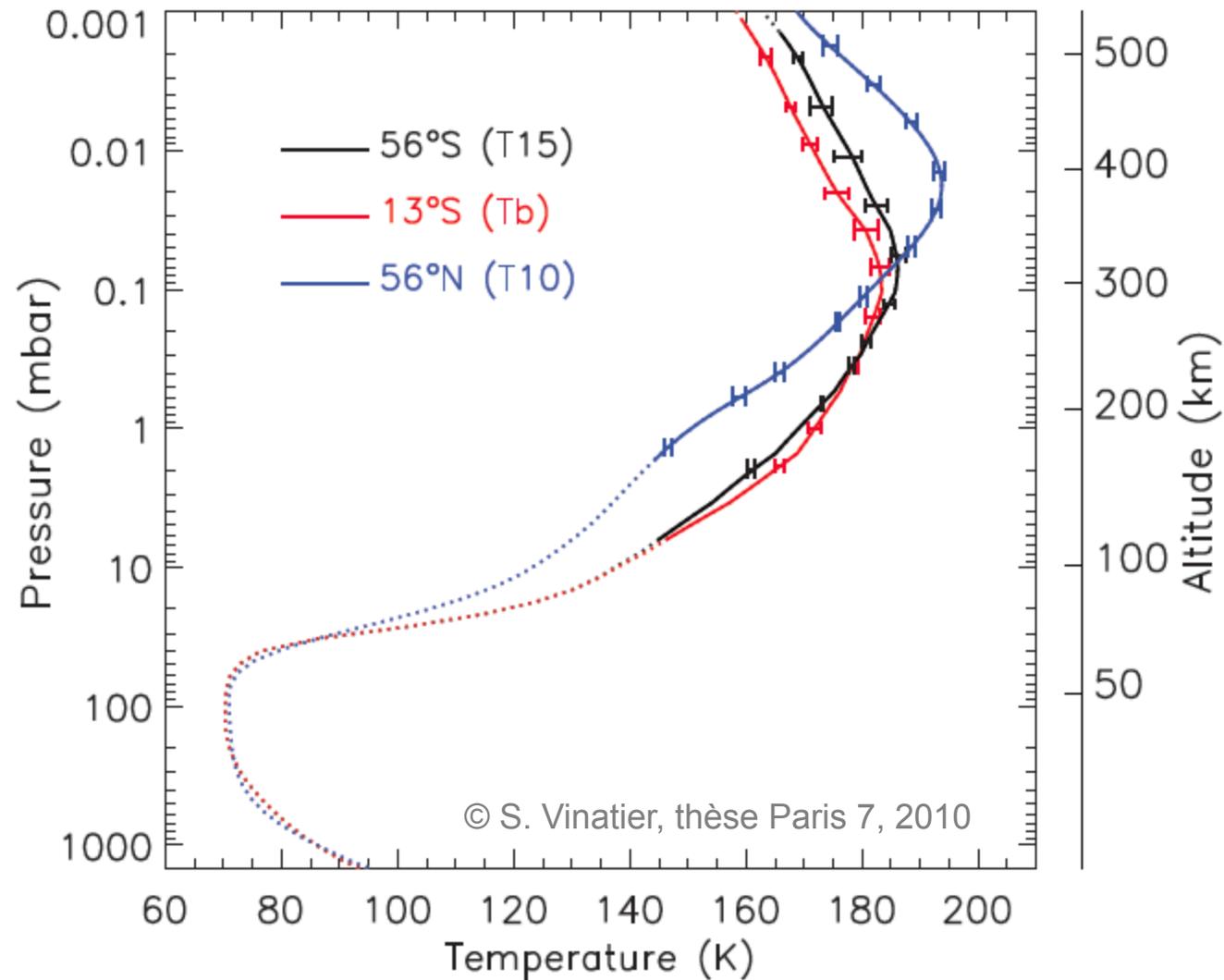


Un peu de chimie ?



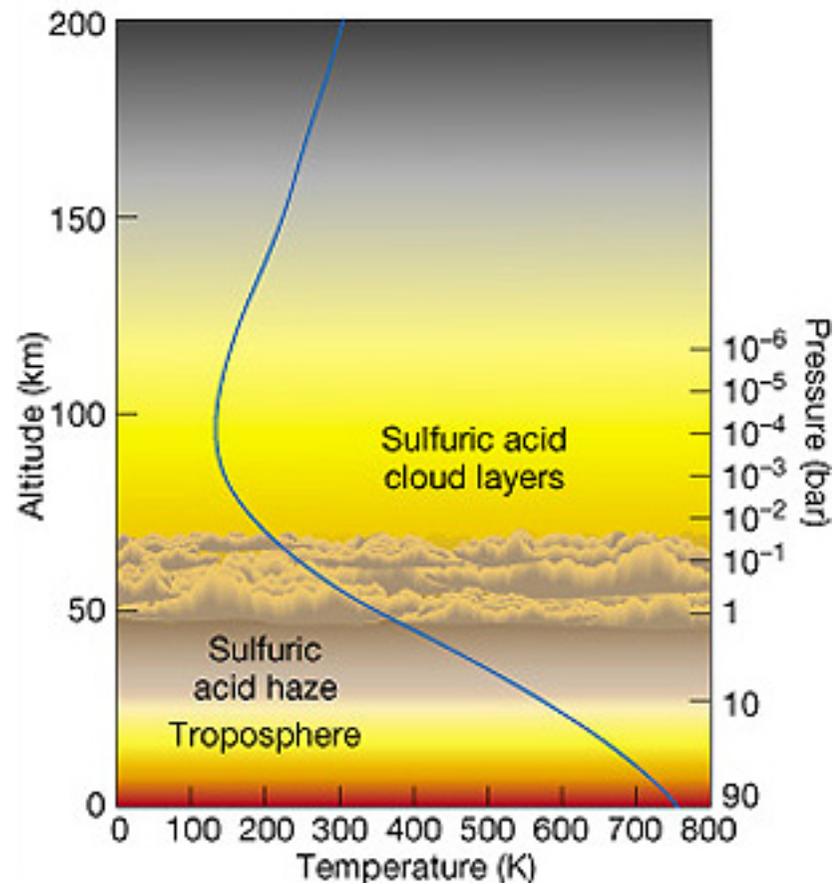
Chimie des hydrocarbures dans l'atmosphère de Titan
(S. Vinatier, thèse Paris 7, 2010, d'après Wilson et Atreya 2004)

→ Profil de température de l'atmosphère de Titan

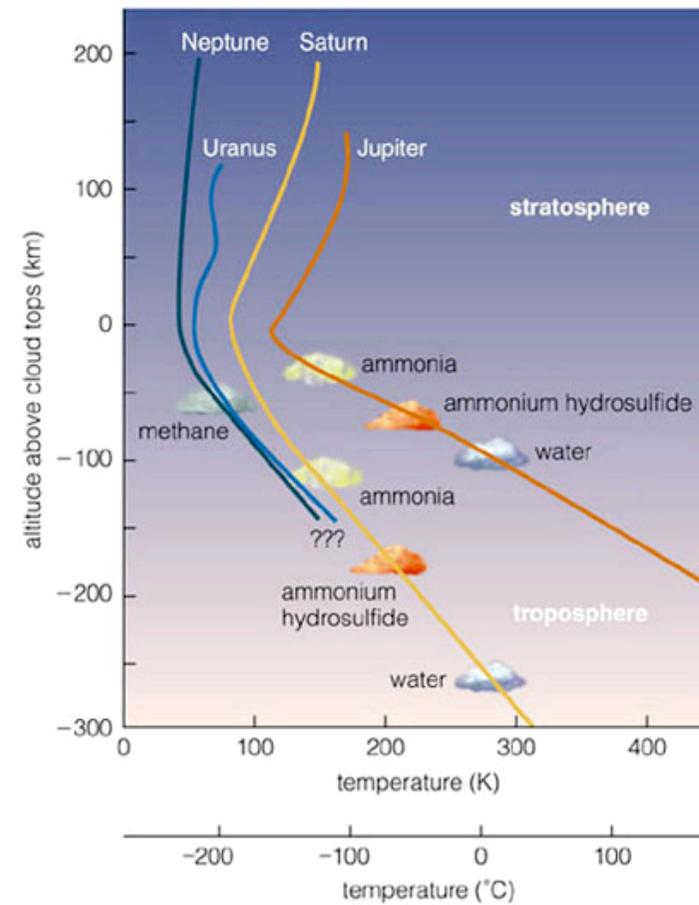


→ Profils de température

■ Vénus

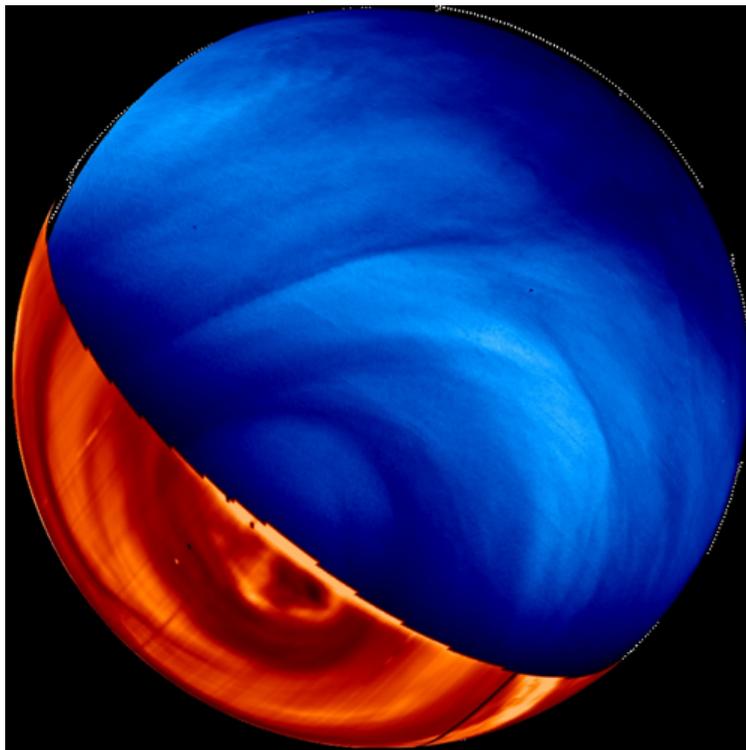


■ Planètes gazeuses

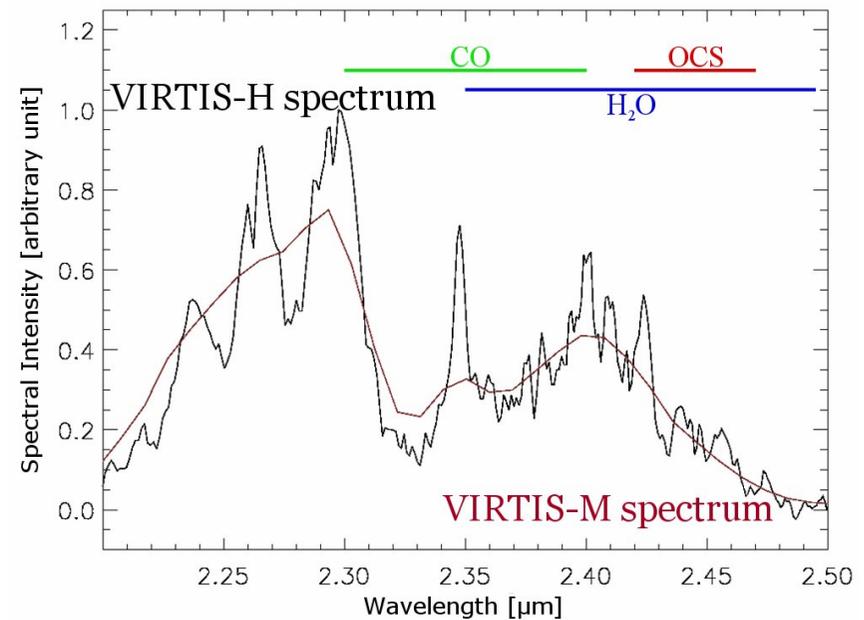


Composition: exemple de Vénus

- Vénus en infrarouge et en ultraviolet (mission Venus Express)



- Détection du CO₂ dès 1932 en infrarouge à 0,8μm
- Spectre infrarouge (émission thermique et absorptions)



Effet de serre

■ Vénus

- Température par Stefan-Boltzmann

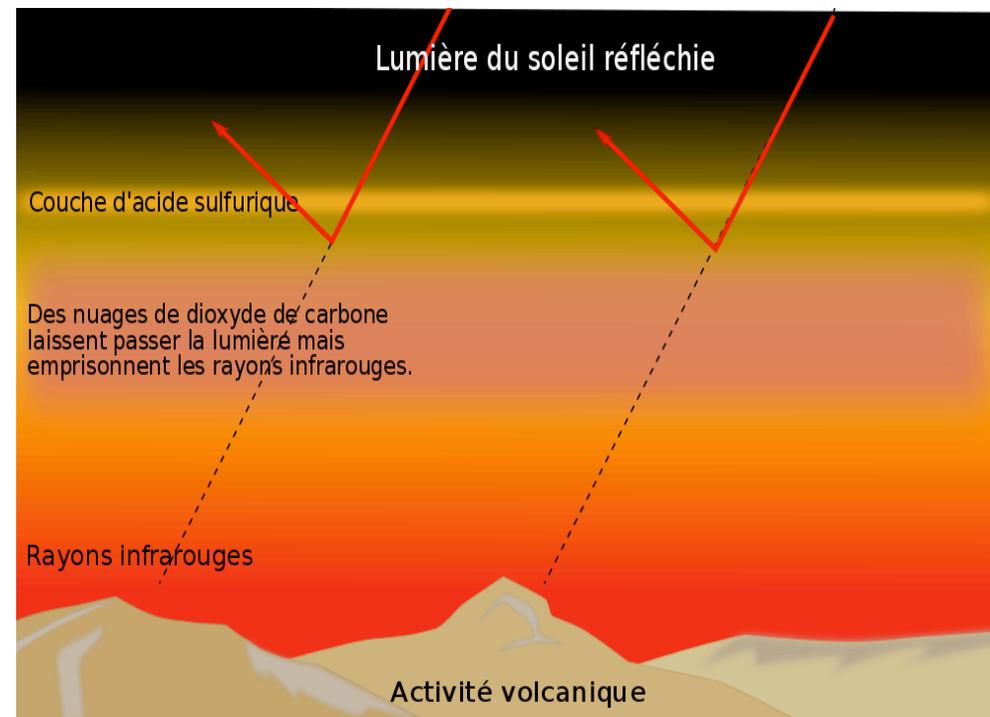
$$E_{\text{reçue}} = (1-a) \pi R^2 L_{\odot} / 4\pi D^2 = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

- albedo $a = 0,75$
- $D = 1,08 \times 10^{11} \text{ m}$
- $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$
- $\rightarrow T_{\text{corps noir}} = 232 \text{ K } (-41^{\circ}\text{C})$

- En réalité $T_{\text{moyenne}} = 735 \text{ K } (462^{\circ}\text{C})$

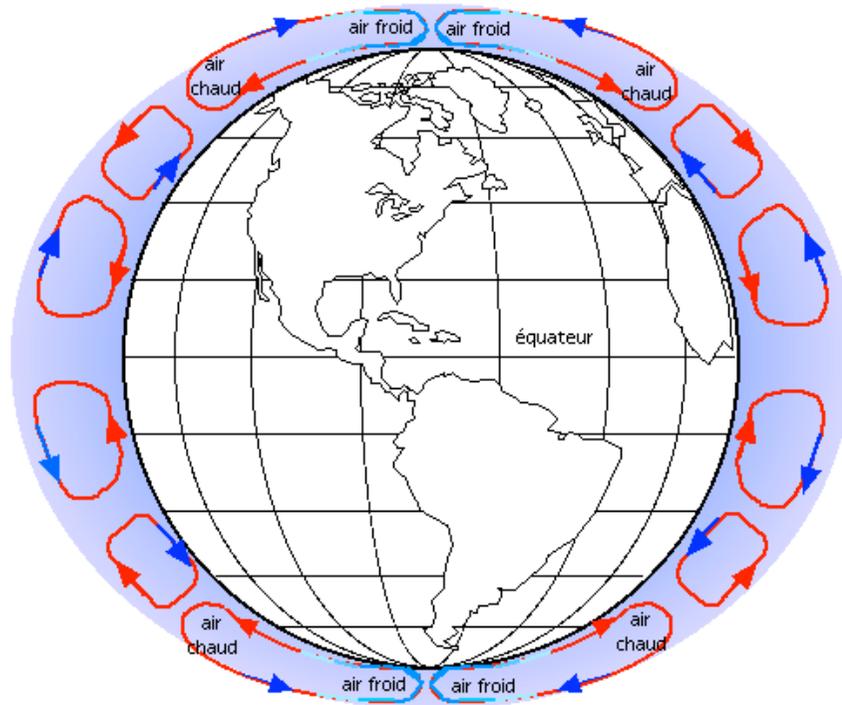
■ Atmosphère de Vénus

- 96.5% de gaz carbonique
- 3,5% d'azote
- Dioxyde de soufre

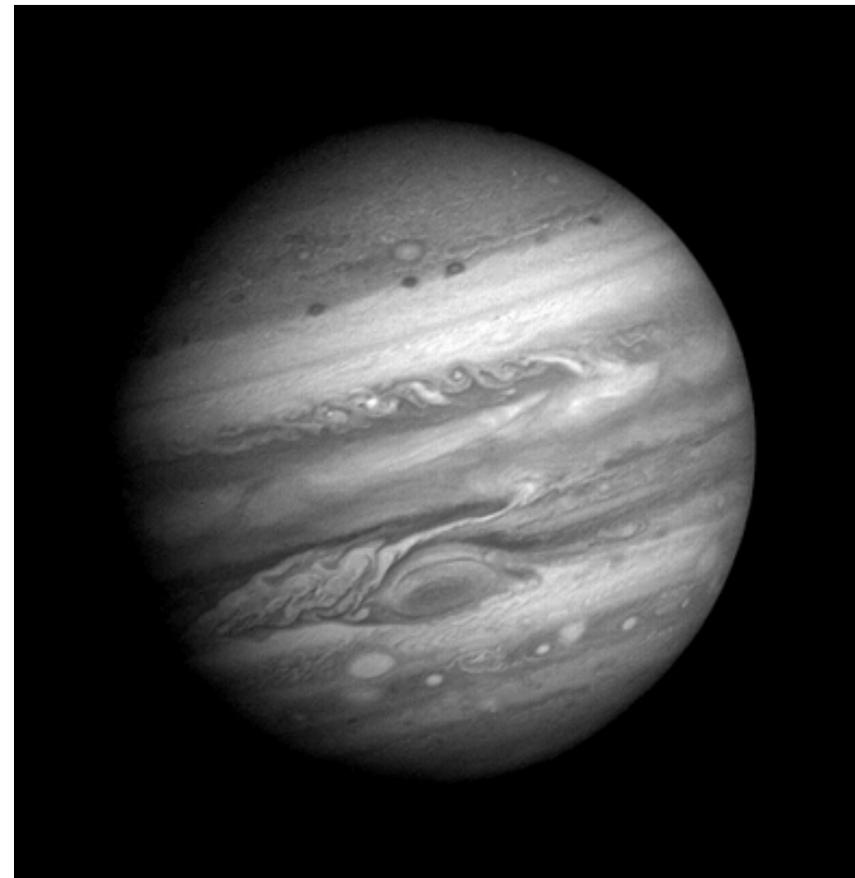


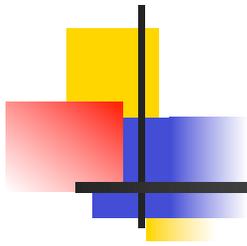
Météorologie...

- Cellules de convection, modulées par
 - les différences de température pôles-équateur
 - la rotation de la planète (Coriolis)

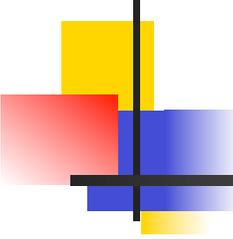


- Jupiter





INTÉRIEURS



De quoi est formé l'intérieur des planètes ?

- Densité
 - différence entre
 - planètes telluriques densités ~5
 - planètes gazeuses densités ~1
- Aplatissement de la planète
 - indication sur la fluidité de l'intérieur
- Précession de l'axe de rotation de la planète → indique si la masse est ou non concentrée au centre
- Rotation en bloc (corps solide) ou rotation différentielle (corps fluide)
- Albédo → idée de la composition de surface
- Spectroscopie → idée de la composition
 - De l'atmosphère
 - Sinon, de la surface
- Présence ou non de volcans
- Champ magnétique
 - → le noyau contient du fer, du cobalt ou du nickel (ferromagnétiques) sous forme liquide (planètes telluriques)
 - → le noyau est de l'hydrogène sous forme métallique conductrice (planètes gazeuses)

Champ magnétique

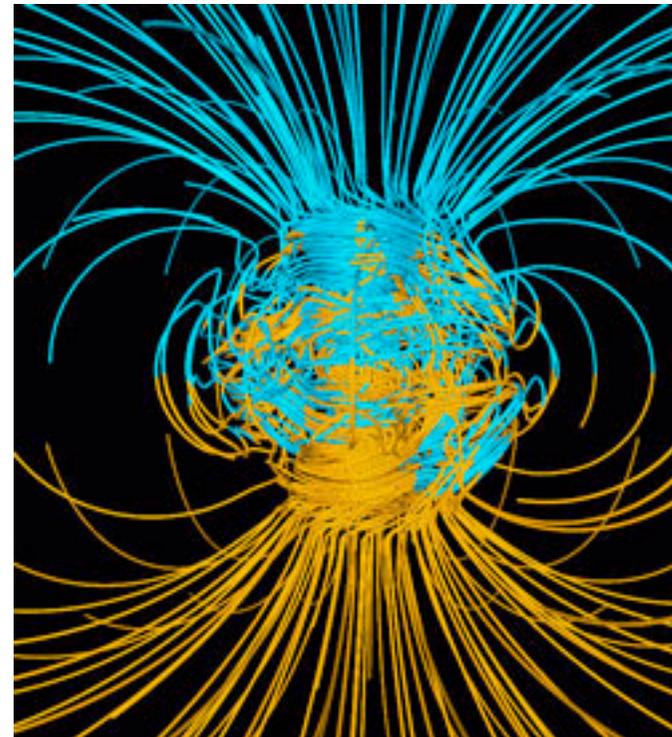
■ Dynamo

- conducteur en mouvement dans un champ magnétique
- → courant électrique
- → champ magnétique

■ Trois conditions nécessaires

1. Un fluide conducteur: noyau de fer liquide ou d'hydrogène métallique
2. Une source de chaleur mettant ce fluide en mouvement (convection)
3. Une planète en rotation: la force de Coriolis dévie les mouvements convectifs

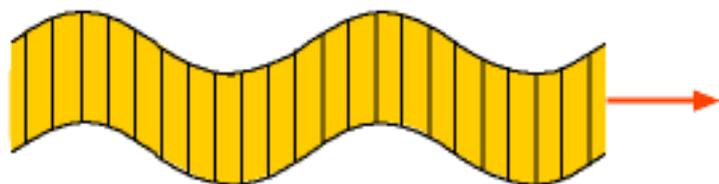
■ Modélisation



© Gary Glatzmaier, University of California

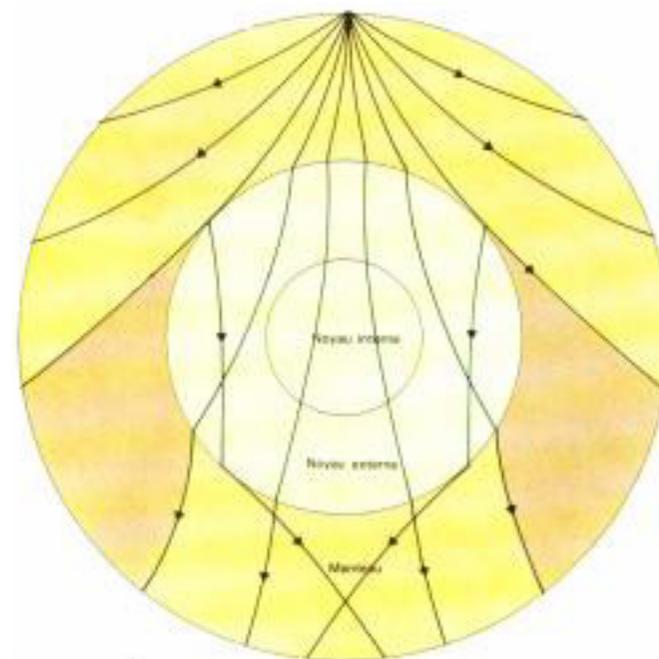
Sismologie

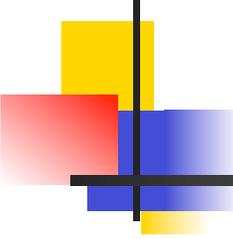
- Deux types d'ondes sismiques
 - Pression (liquides, gaz ou solides)
 - Cisaillement (dans les solides)



- Encore limité (faute de sismomètres)
 - à la Lune, depuis Apollo
 - à Jupiter (impacts de la comète Shoemaker-Levy 9 en 1994)
 - Projets pour Mars, Mercure et la comète 67P/Tchourioumov-Guerassimenko (sonde Rosetta)

- Propagation des ondes → vitesse du son → densité et pression internes

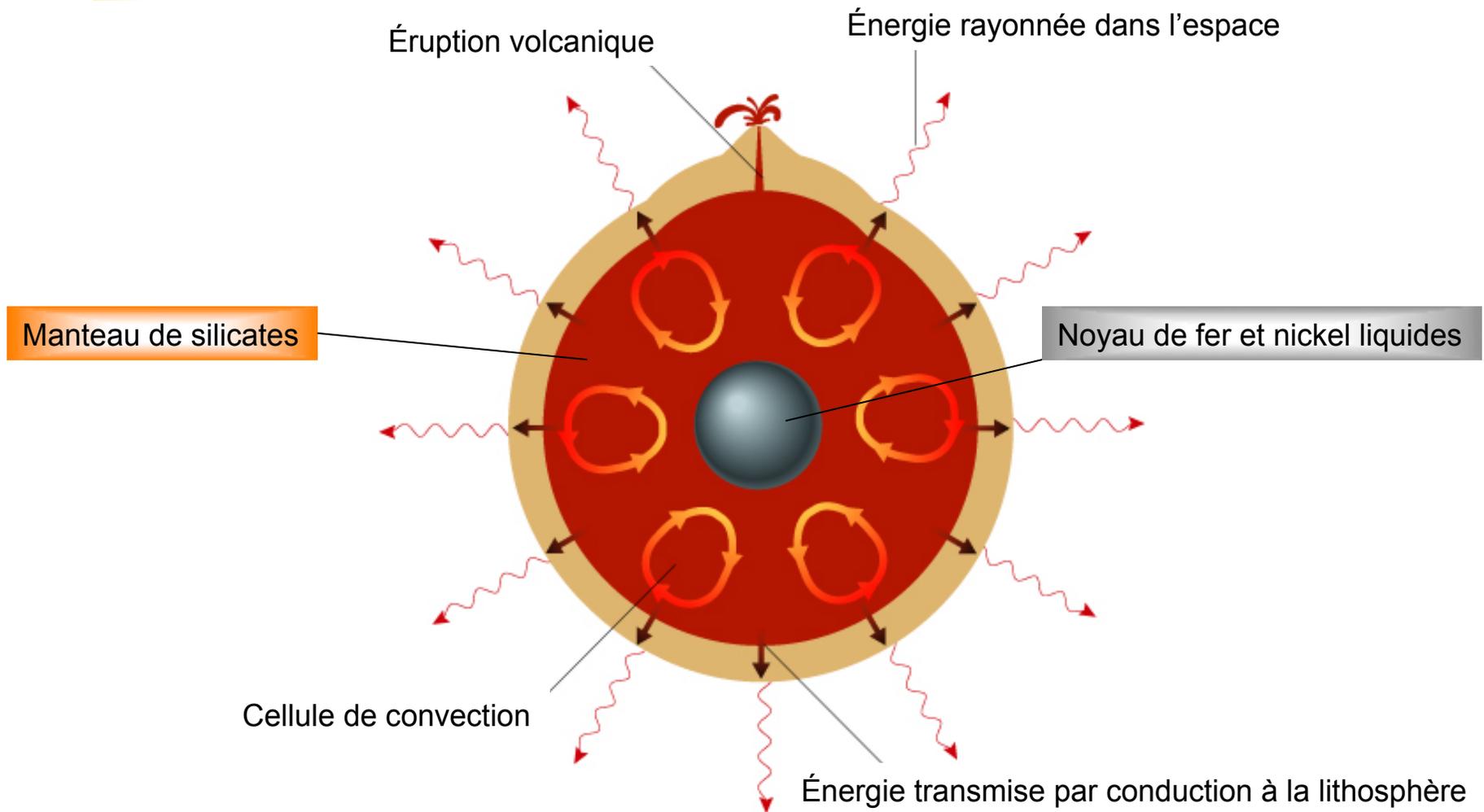




Tectonique et volcanisme

- Le centre des planètes est plus chaud que la surface
 - énergie apportée par l'accrétion (compression gravitationnelle et bombardement par les météorites)
 - énergie libérée par la radioactivité
 - énergie due aux marées (cas de Io avec Jupiter et Europe)
- Pressions ~ 300 à 400 GPa (Terre)
 - 1 atmosphère = 100 kPa
 - 300 GPa = 3 millions d'atmosphères
- Températures ~ 5 400 K (Terre)
- Transfert vers la surface par
 - conduction
 - convection
- Volcans
 - Mercure et Mars (éteints)
 - Vénus et Terre (actifs)
 - Gros satellites
 - Lune (éteints)
 - Io, Europe (très actifs) ← marées
 - Différence entre Vénus et la Terre
 - croûte continue pour Vénus
 - plaques continentales pour la Terre
 - différence due à la présence d'eau?

La machinerie interne des planètes telluriques



Volcans

- Maats Mons sur Vénus

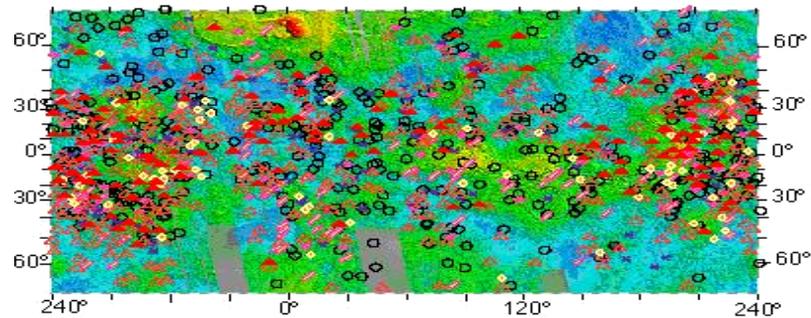


- Olympus Mons sur Mars

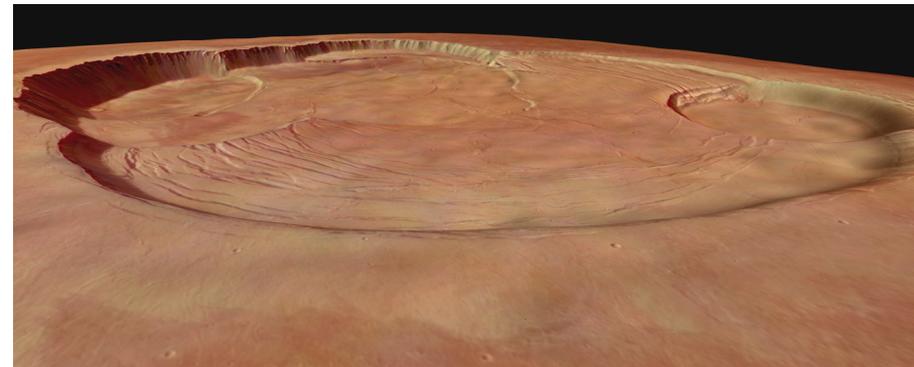


et sa *caldeira*

- Carte des volcans sur Vénus



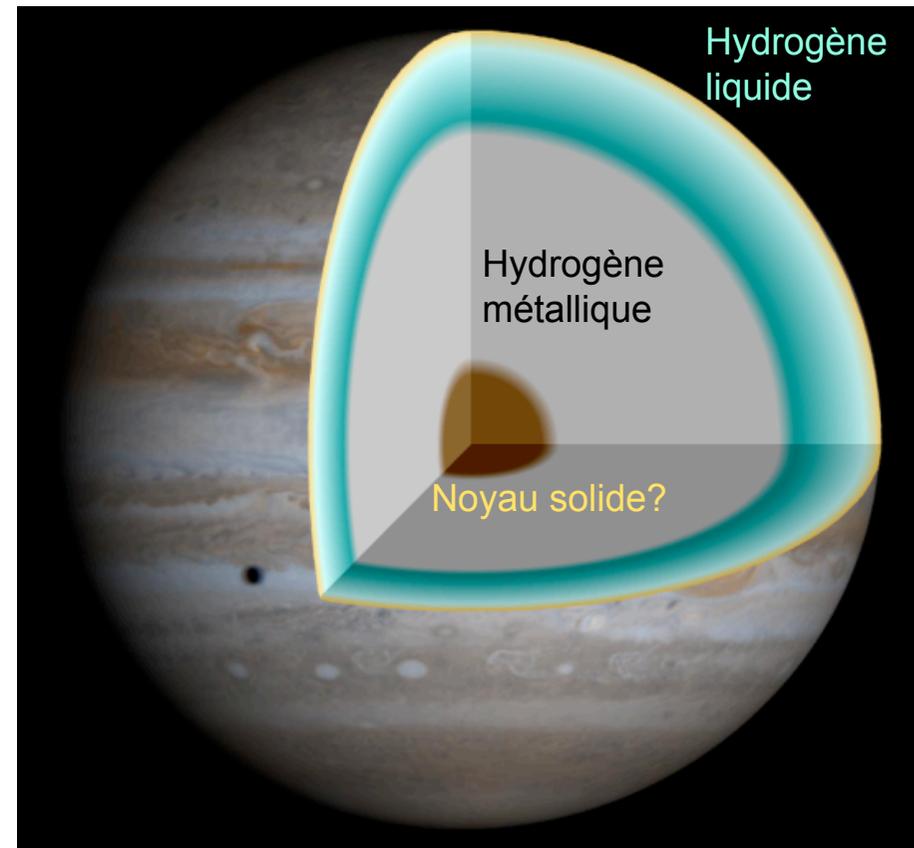
1° décembre 2010



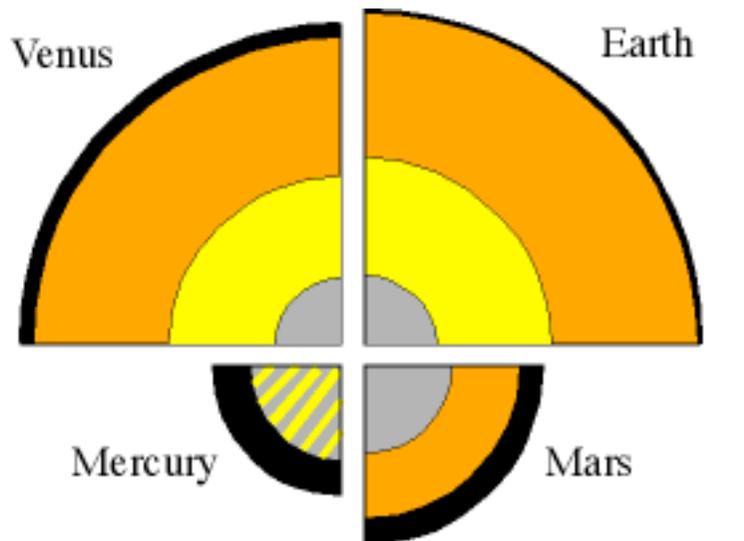
L'intérieur des planètes gazeuses

- Très peu d'informations directes
- → appliquer la physique !
 - Équilibre hydrostatique
 - Équations d'état
 - Transferts d'énergie
 - Conditions aux limites
 - Masse, rayon, pression et température de surface, champ magnétique
 - → températures très élevées
 - → pressions très élevées
 - → hydrogène gazeux puis liquide
 - → puis hydrogène métallique ($P > 150$ GPa, $T > 3\,000$ K)
 - → peut-être noyau solide ($P > 3\,000$ GPa, $T > 30\,000$ K). Silicates? Fer?

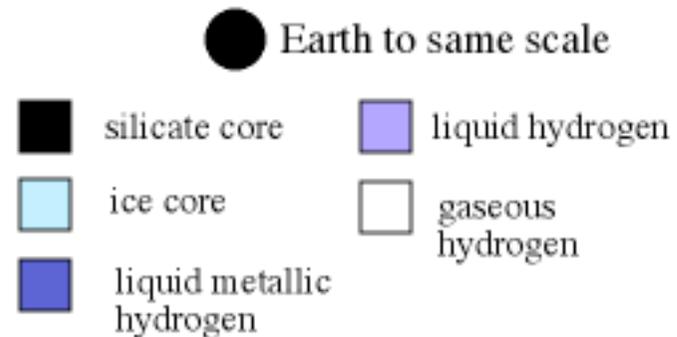
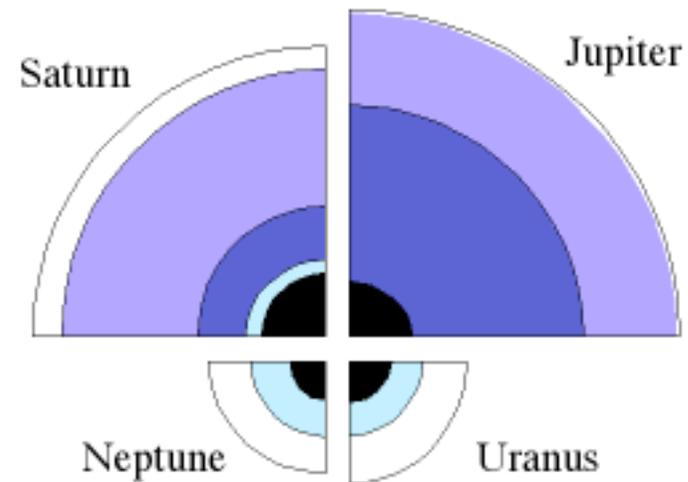
- L'intérieur de Jupiter ?



Structure interne des planètes



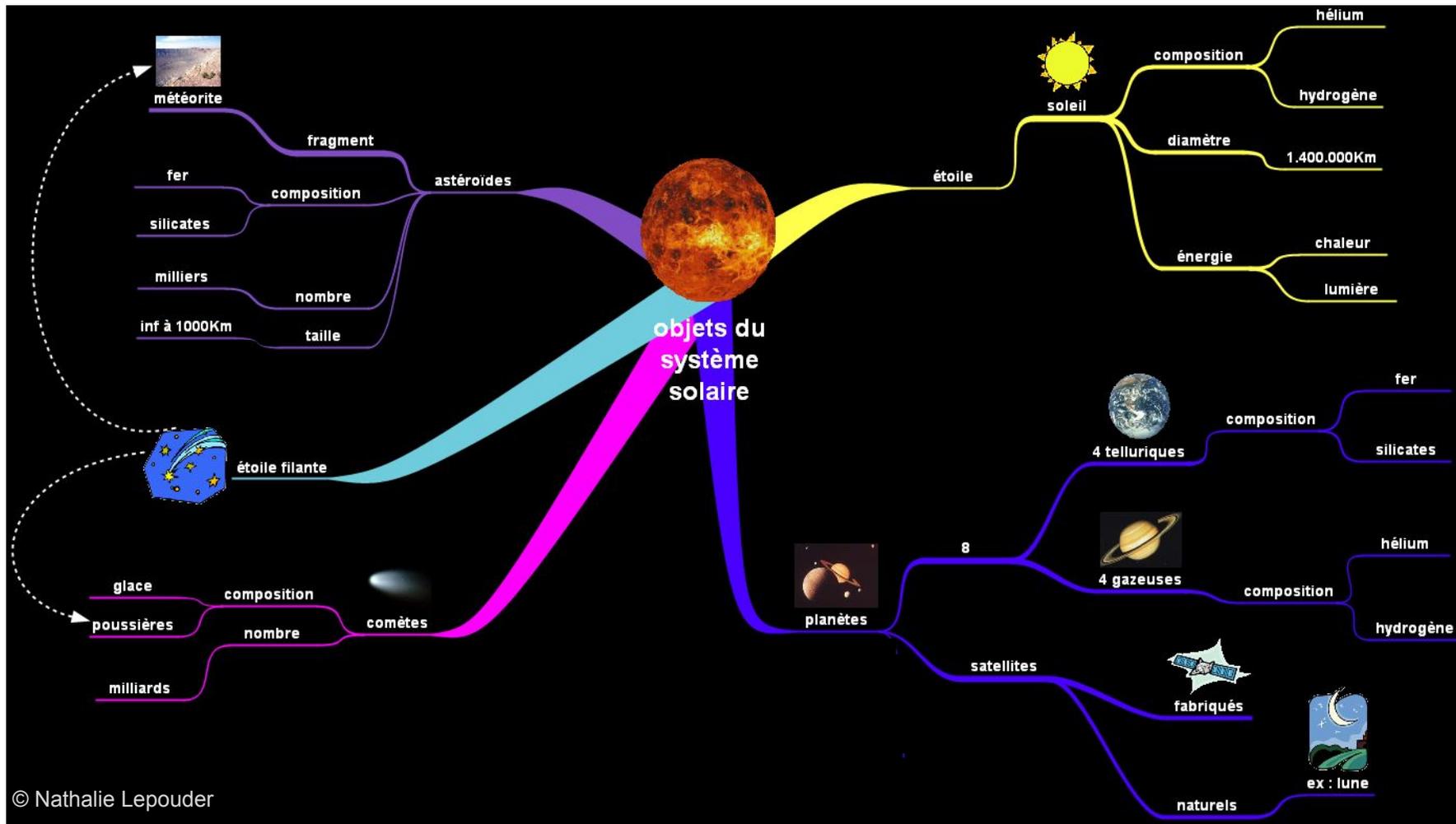
Terrestrial planet interiors to same scale



Jovian planets interiors to same scale

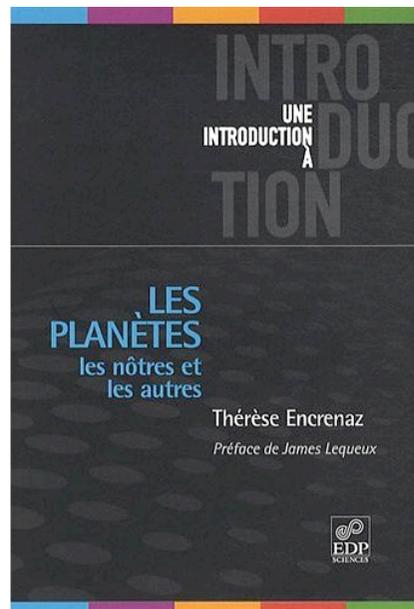
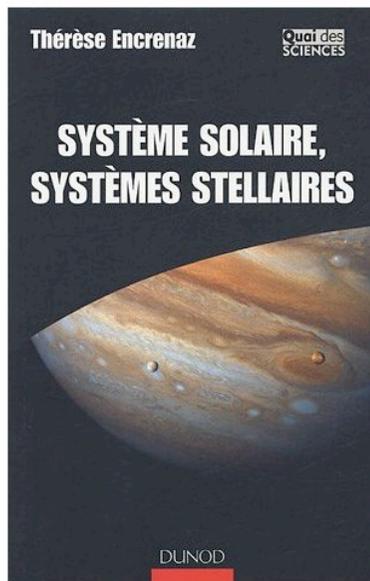
© Nick Strobel

Les objets du système solaire

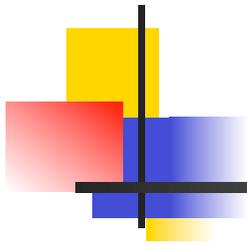


Pour en savoir plus...

- Les livres de Thérèse Encrenaz (et/ou ses collaboratrices)
- Et sur Internet



- **Wikipedia !**
- Cours d'astronomie de Nick Strobel
www.astronomynotes.com



Merci de votre attention !

