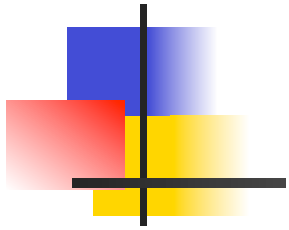


INTRODUCTION À L'ASTROPHYSIQUE LES PLANÈTES



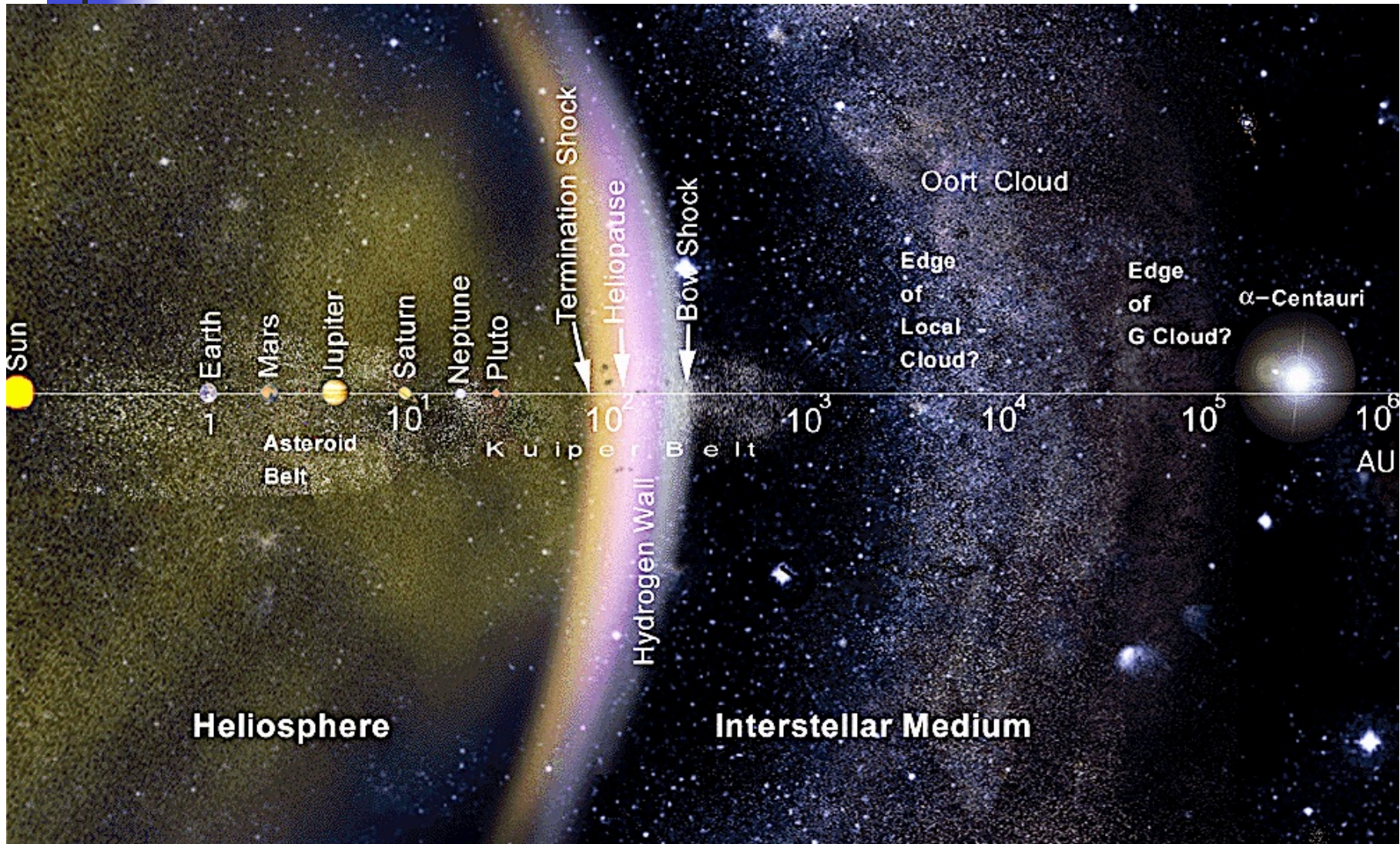
Alain Bouquet

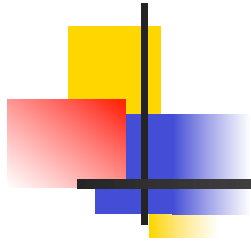
Laboratoire AstroParticule & Cosmologie

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



Le système solaire (en échelle logarithmique !)





~~SEPT~~

~~SIX SEPT HUIT NEUF~~

**HUIT
PLANÈTES**

Définition d'une planète

- Une planète est un objet qui

1. suit une orbite périodique autour du Soleil
2. possède une masse suffisante pour que sa gravitation propre lui donne une forme sphéroïdale
3. a éjecté de son orbite la plupart des corps plus petits

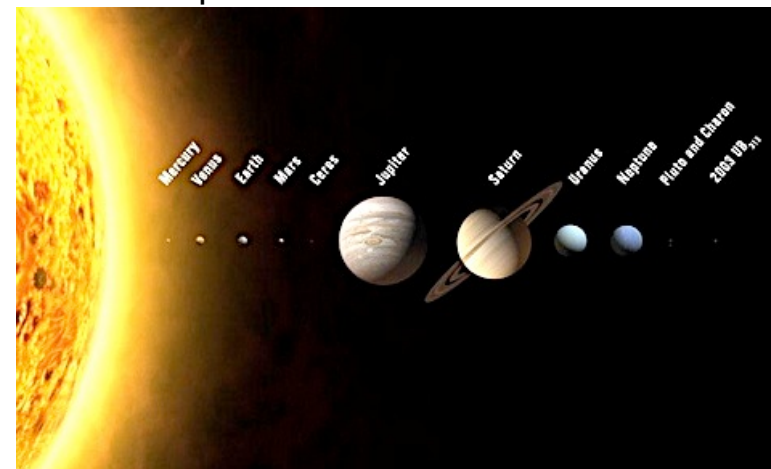
- Ne sont pas des planètes

- les planètes naines
 - Pluton
 - Cérès, 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

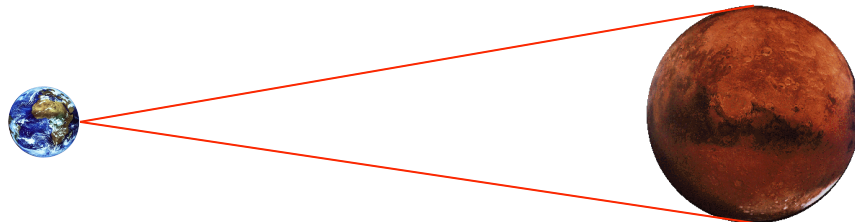
$$T^2 = [4\pi^2/GM_{\odot}] D^3$$

- Distances

- Parallaxe (triangulation)
- Écho radar

- Tailles

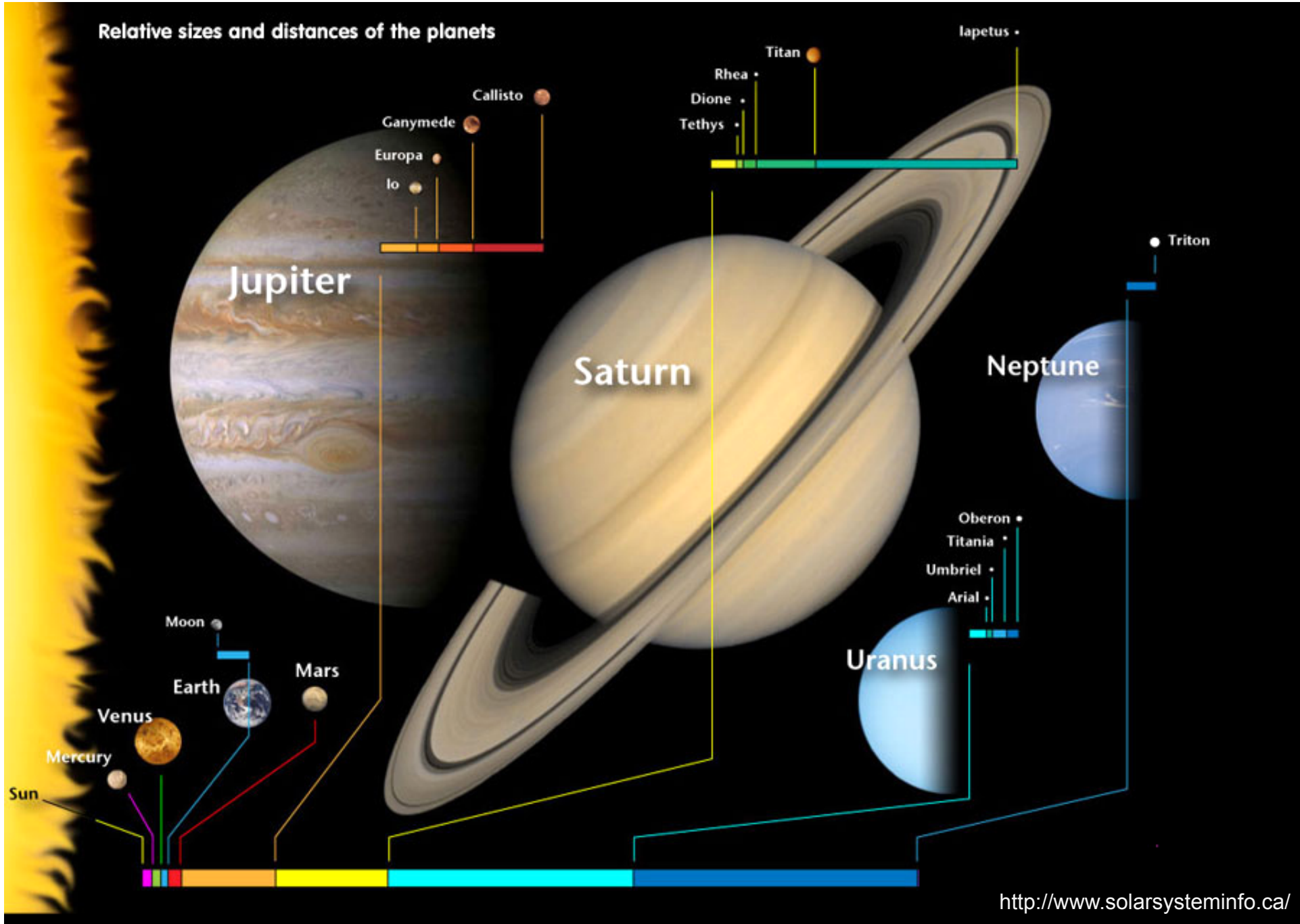
- Diamètre = Diamètre angulaire x Distance



- Masses

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

Relative sizes and distances of the planets



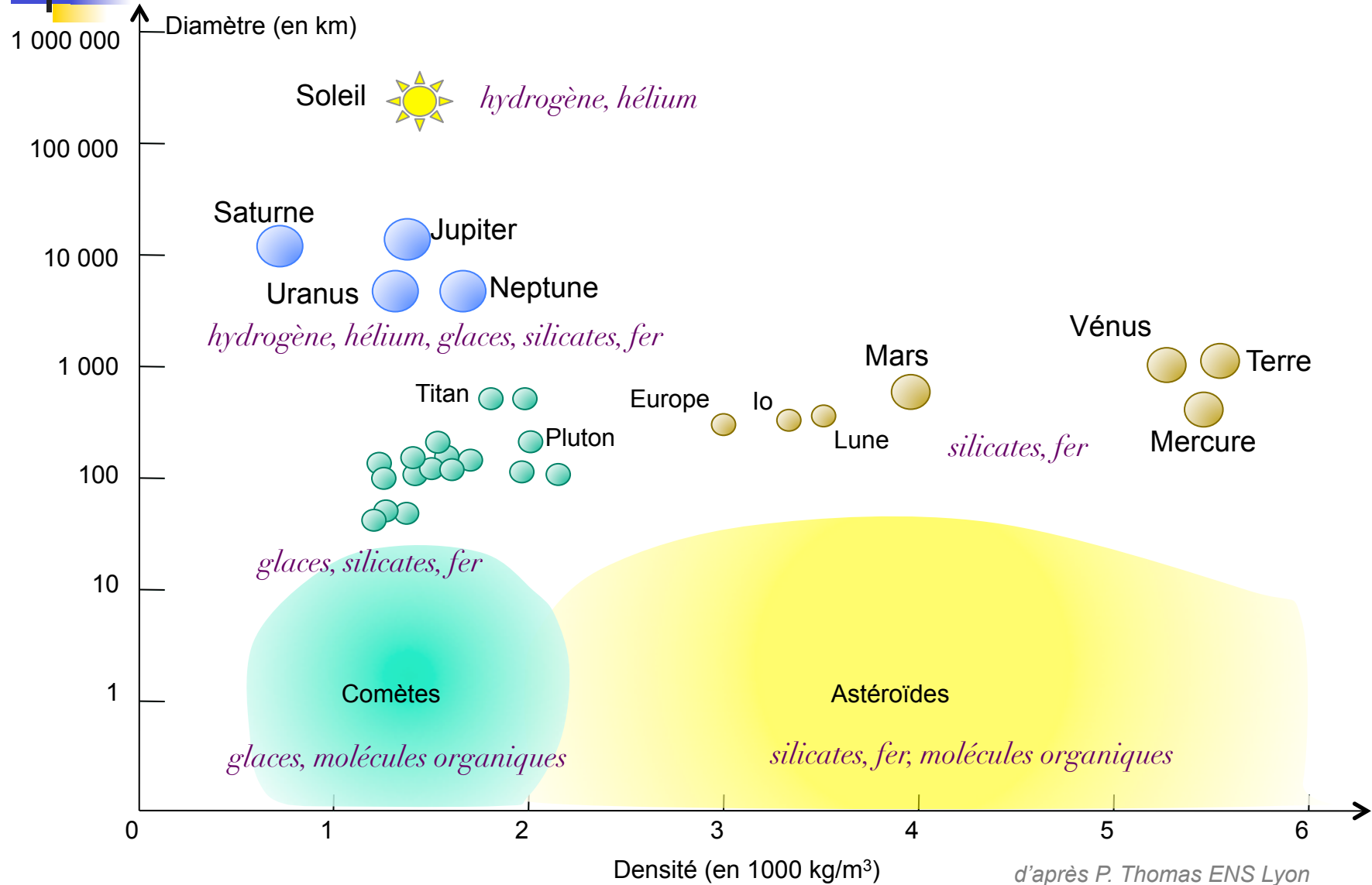
<http://www.solarsysteminfo.ca/>



Le Soleil et ses planètes

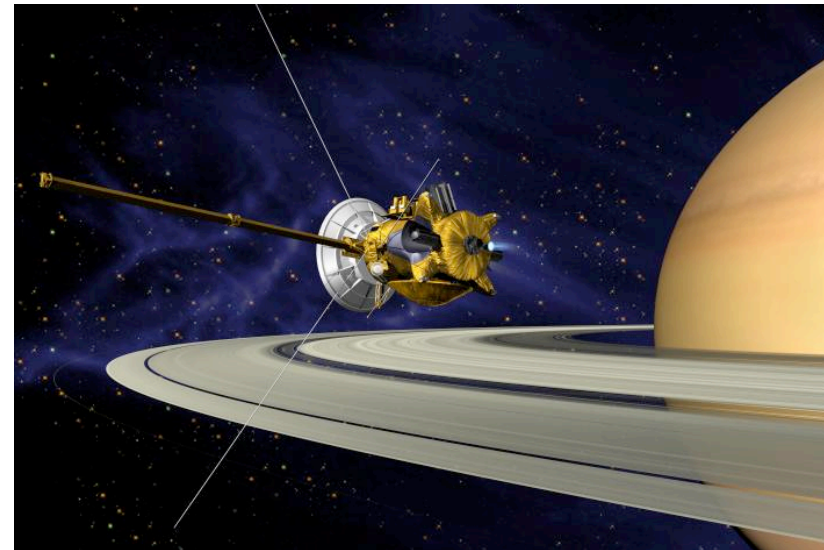
	diamètre	masse	½ grand axe	Période orbitale (an)	Inclin. orbite % équateur solaire	Période rot. (j)	Inclin. axe rot.	satellites	composition
Soleil	109	332 830	–	–	–	24 à 31	–	–	H, He
Mercure	0,38	0,06	0,39	0,24	3,38°	58,64	0,03°	0	Si, Fe
Vénus	0,95	0,83	0,72	0,62	3,86°	– 243,02	177,36°	0	Si, Fe
Terre	1	1	1	1	7,25°	1	23,44°	1	Si, Fe
Mars	0,53	0,11	1,52	1,88	5,65°	1,03	25,19°	2	Si, Fe
Jupiter	11,2	318	5,20	11,86	6,09°	0,41	3,12°	63	H, He
Saturne	9,5	95	9,54	29,46	5,51°	0,43	26,73°	53	H, He
Uranus	4,0	15	19,23	84,01	6,48°	– 0,72	97,77°	27	H, He
Neptune	3,9	17	30,07	164,8	6,43°	0,67	29,58°	13	H, He

Les divers corps du système solaire

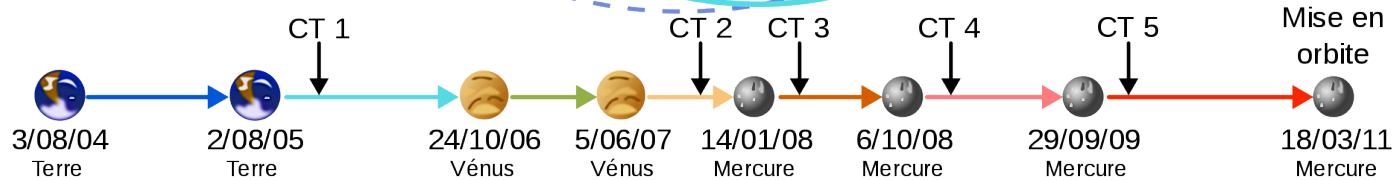
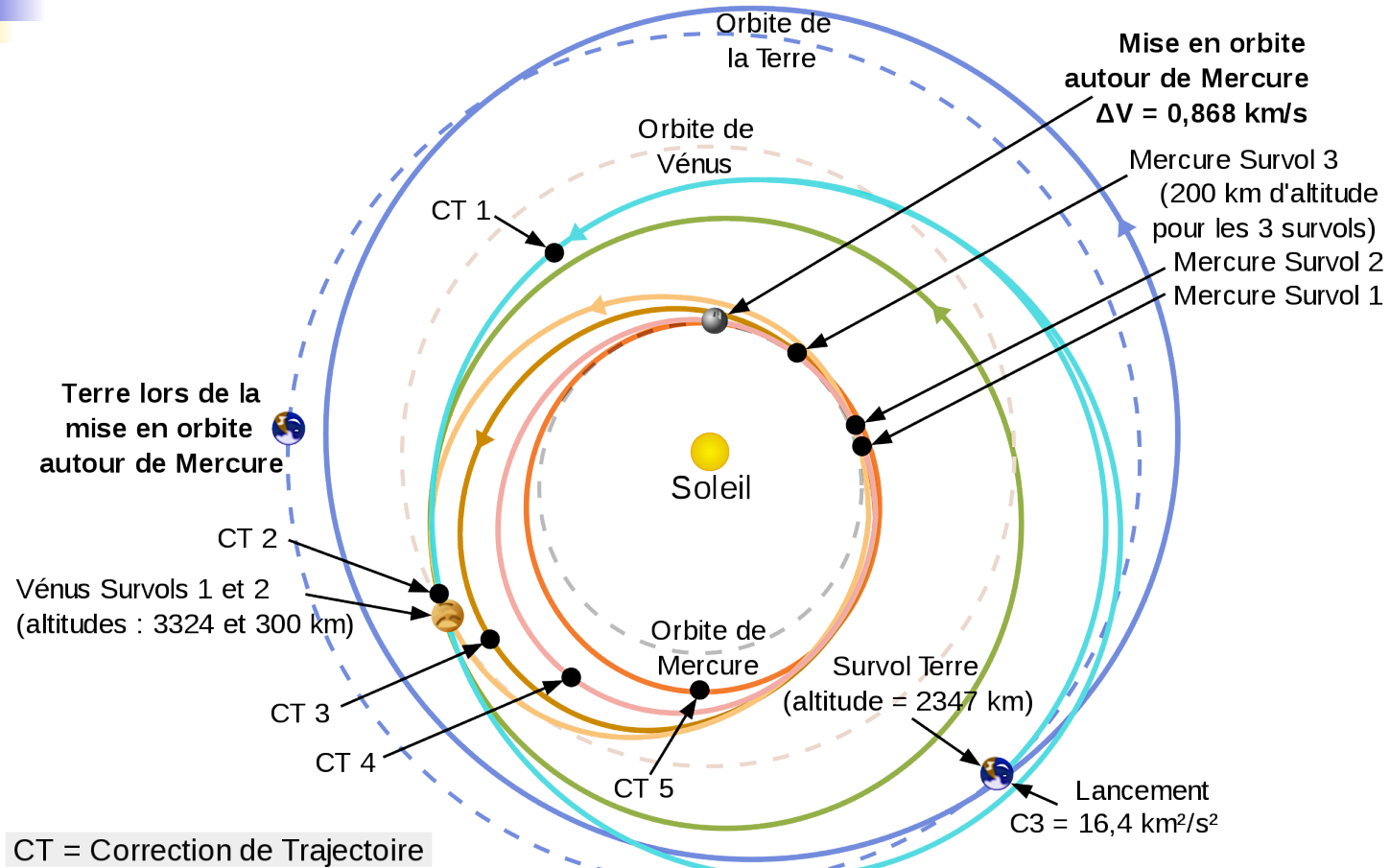


Les principales sondes planétaires

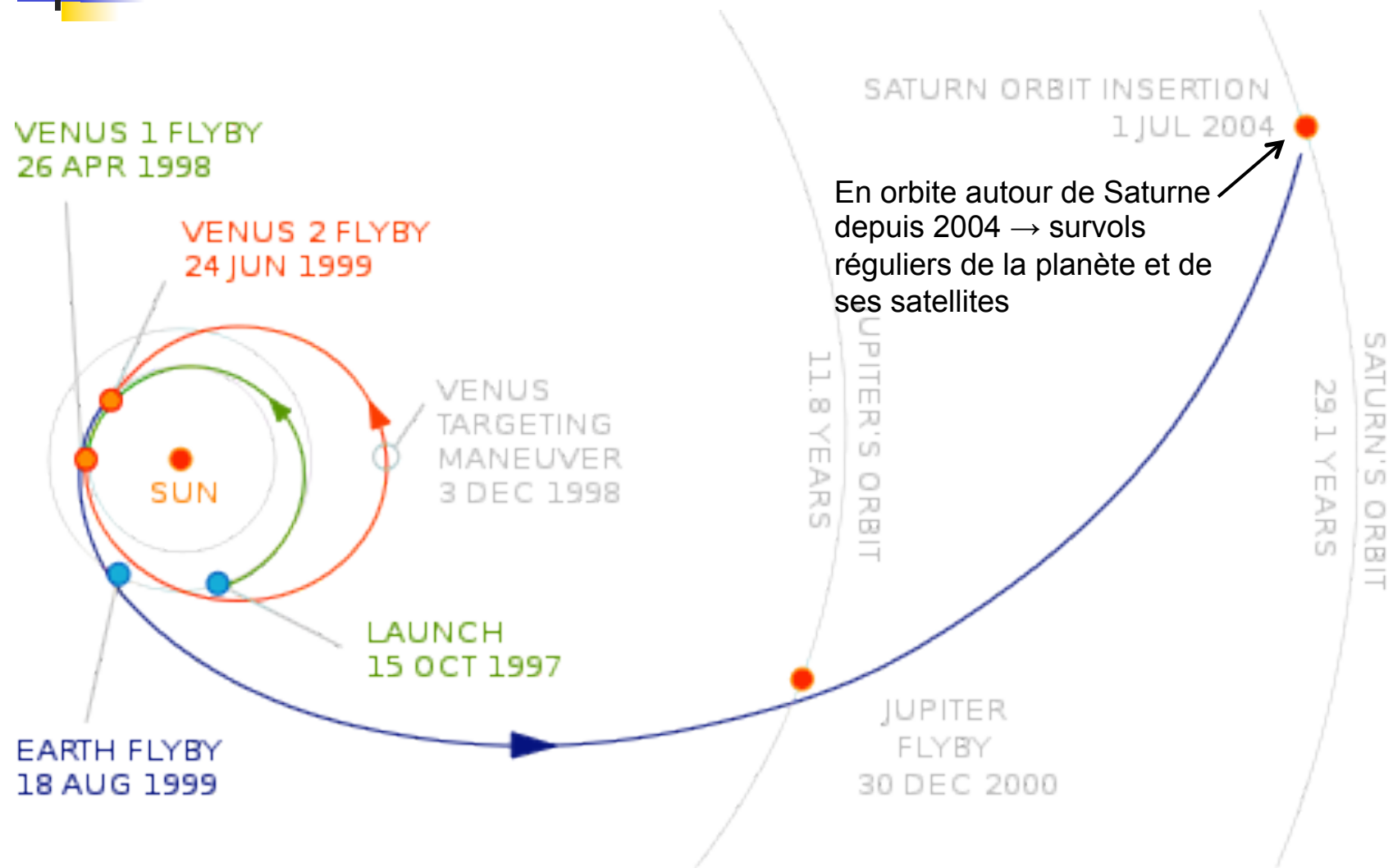
- **Mariner 4** (1965)
 - survol de Mars à 10000 km
- **Mariner 5** (1967)
 - survol de Vénus à 5000 km
- **Venera 7** (1970)
 - posée sur Vénus, suivie par 8 autres Venera
- **Mariner 10** (1974)
 - survol de Vénus à 6000 km puis de Mercure à 700 puis 300 km
- **Viking 1 et 2** (1976)
 - en orbite autour 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** (2003)
 - 2 rovers (Spirit et Opportunity)
- **Vénus Express** (2006)
 - en orbite autour de Vénus (périastre 250 km)
- **Messenger** (2011)
 - en orbite autour de Mercure (périastre 200 km)
- **New Horizons** (2015)
 - Jupiter en 2006, passage prévu près de Pluton



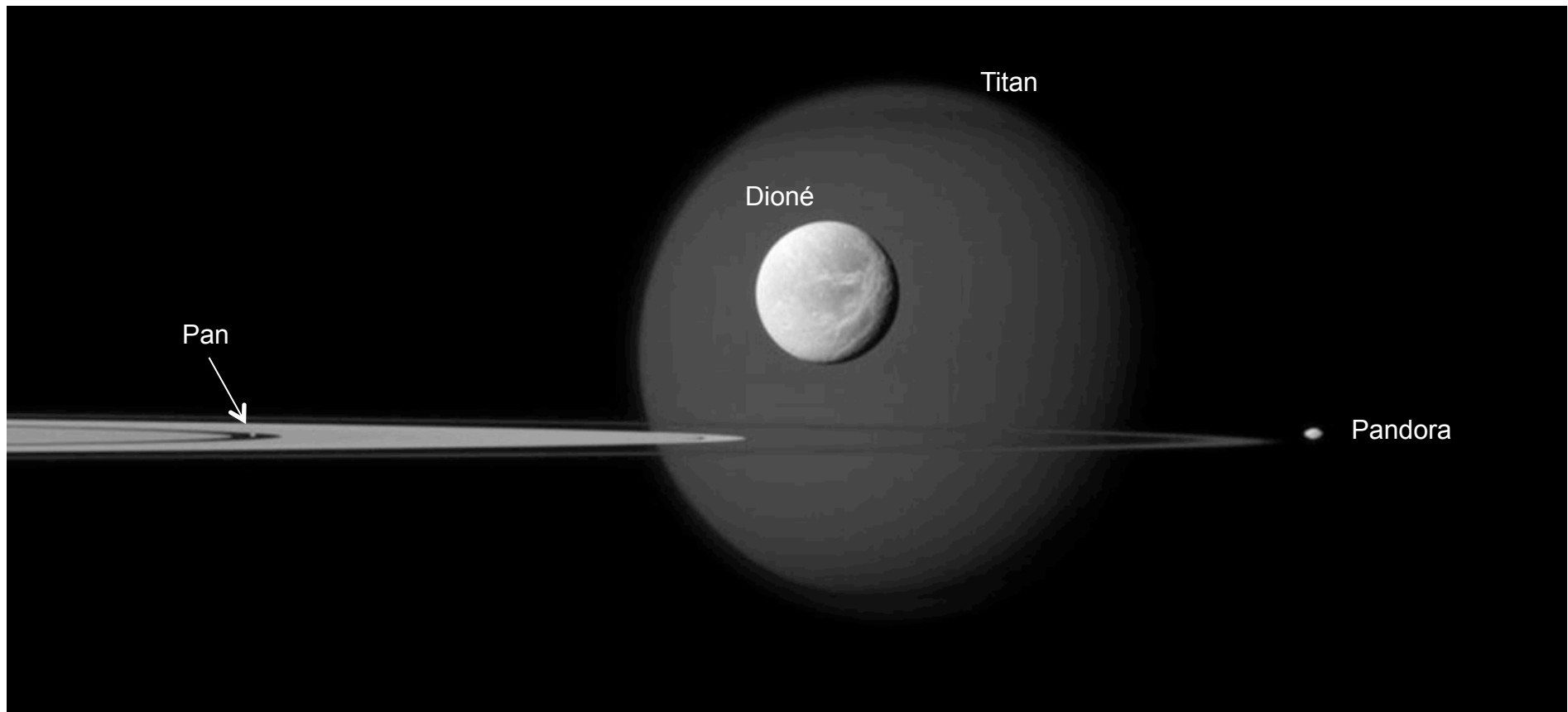
La route de *Messenger* de la Terre à Mercure



Le billard gravitationnel de *Cassini-Huyghens*



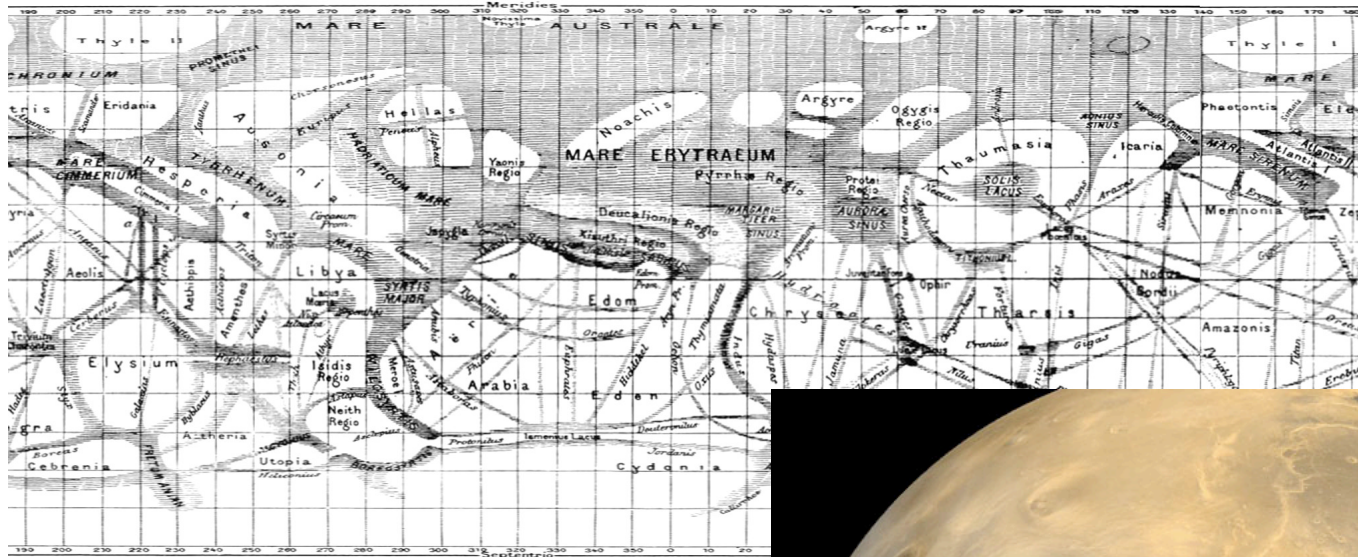
Quatre lunes de Saturne



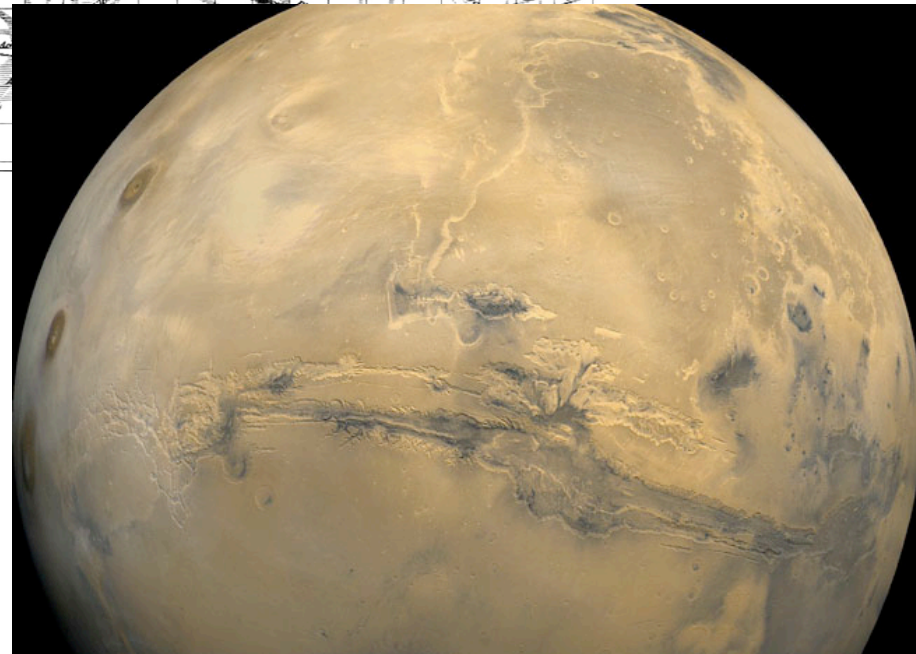
Sonde *Cassini* (ESA-NASA) Décembre 2011

Imagerie

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

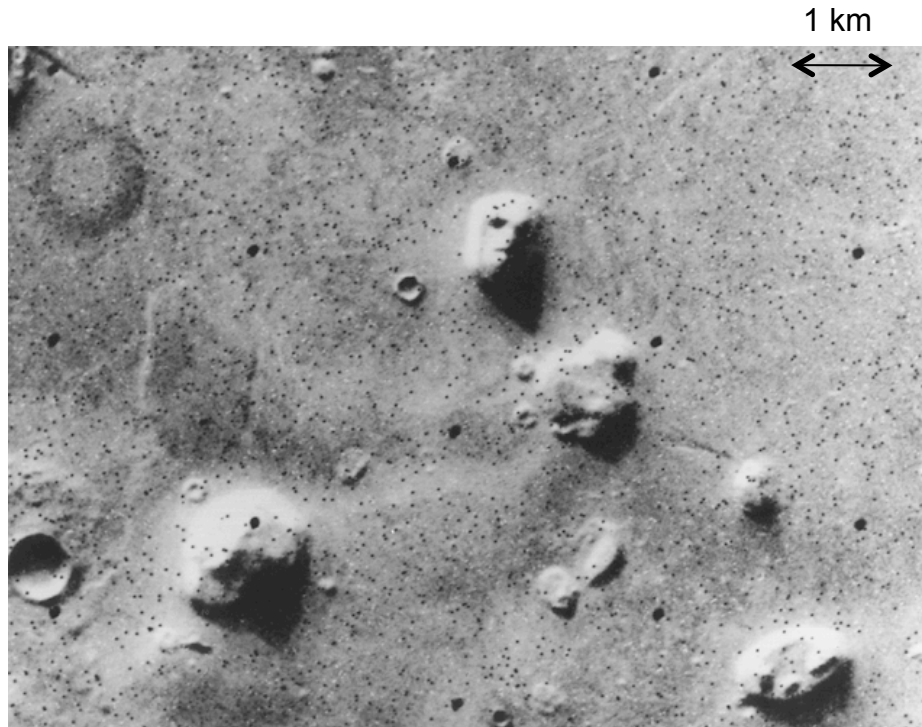


- Mars vue par Viking en 1976 (le rift de Valles Marineris)

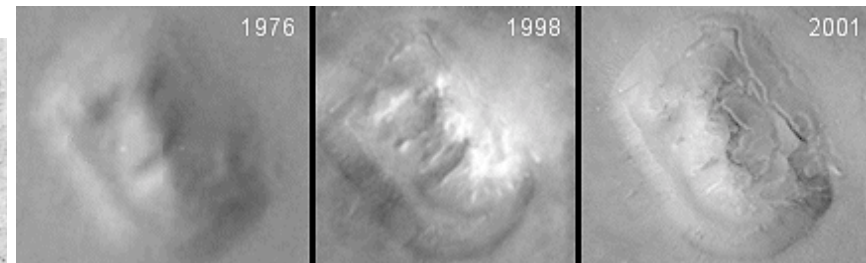


Un visage sur Mars ?

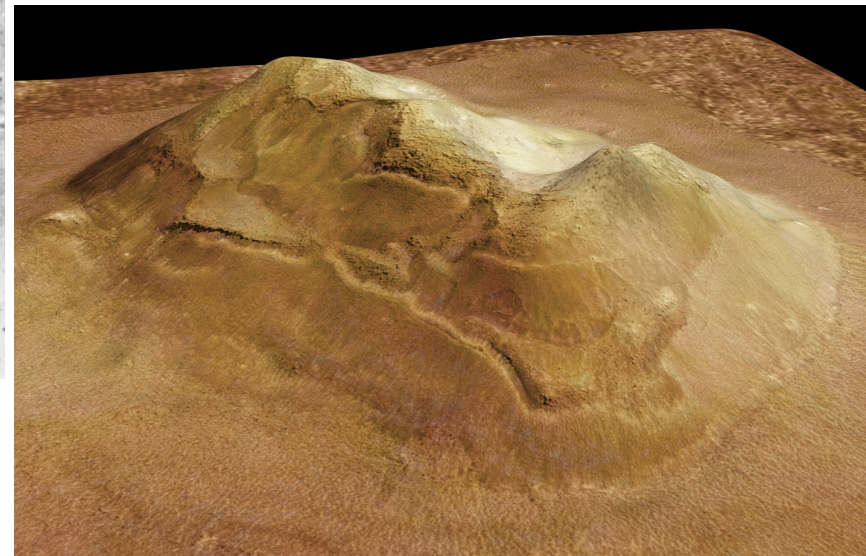
- La région de Cydonia vue par Viking en 1976



- par Mars Global Surveyor en 1998-2001



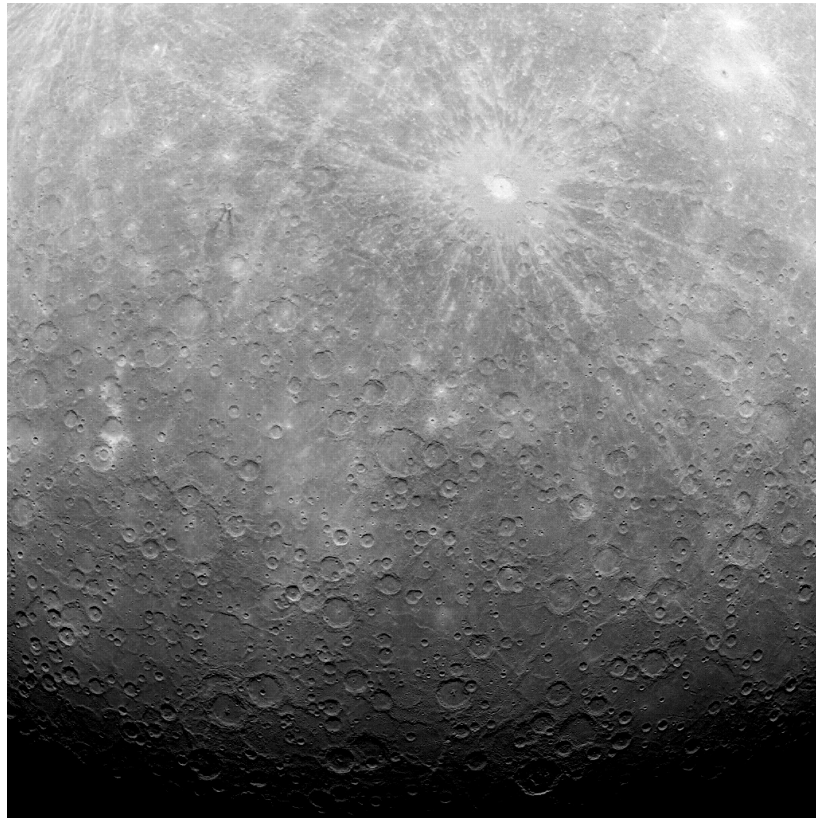
- et par Mars Express en 2006



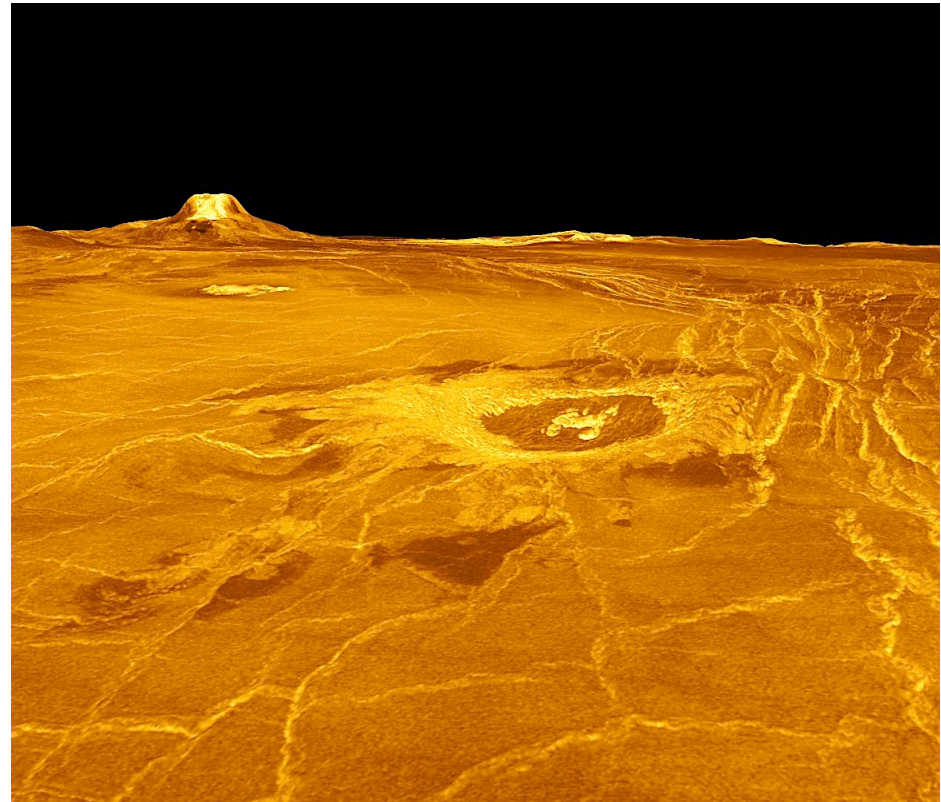


Imagerie

- Optique



- Radar



Anneaux de Saturne

- Image composite (sonde *Cassini*)

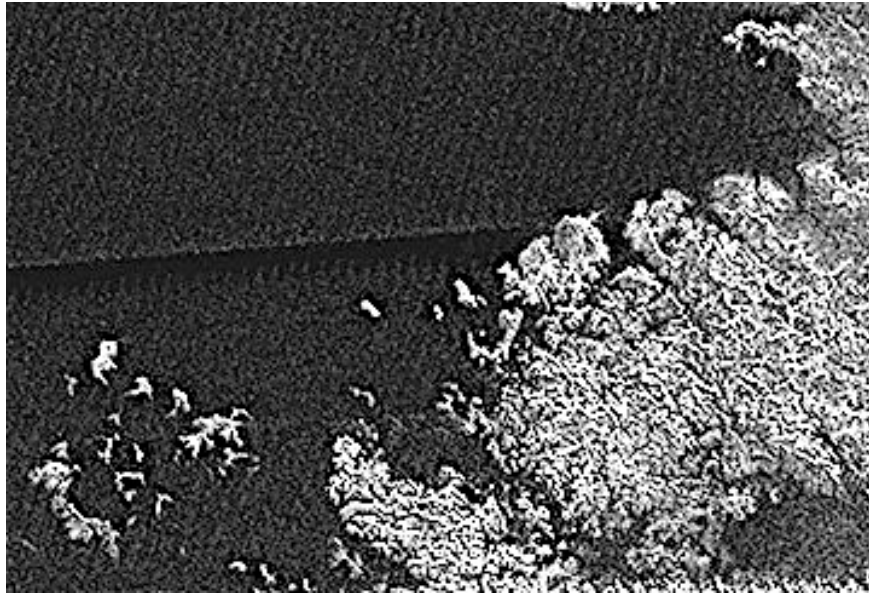


- Les anneaux en vraie couleur (sonde *Cassini*)



Titan

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

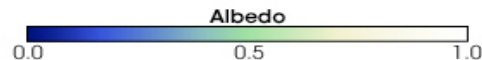
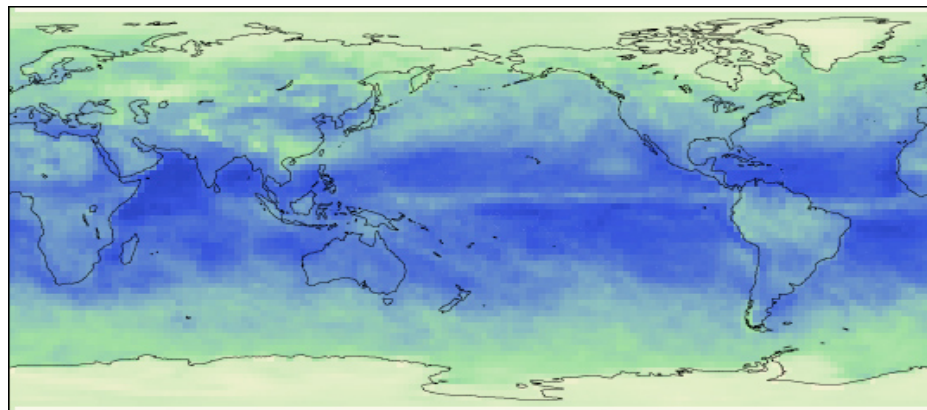


- Image donnée par le module *Huyghens* au cours de sa descente



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

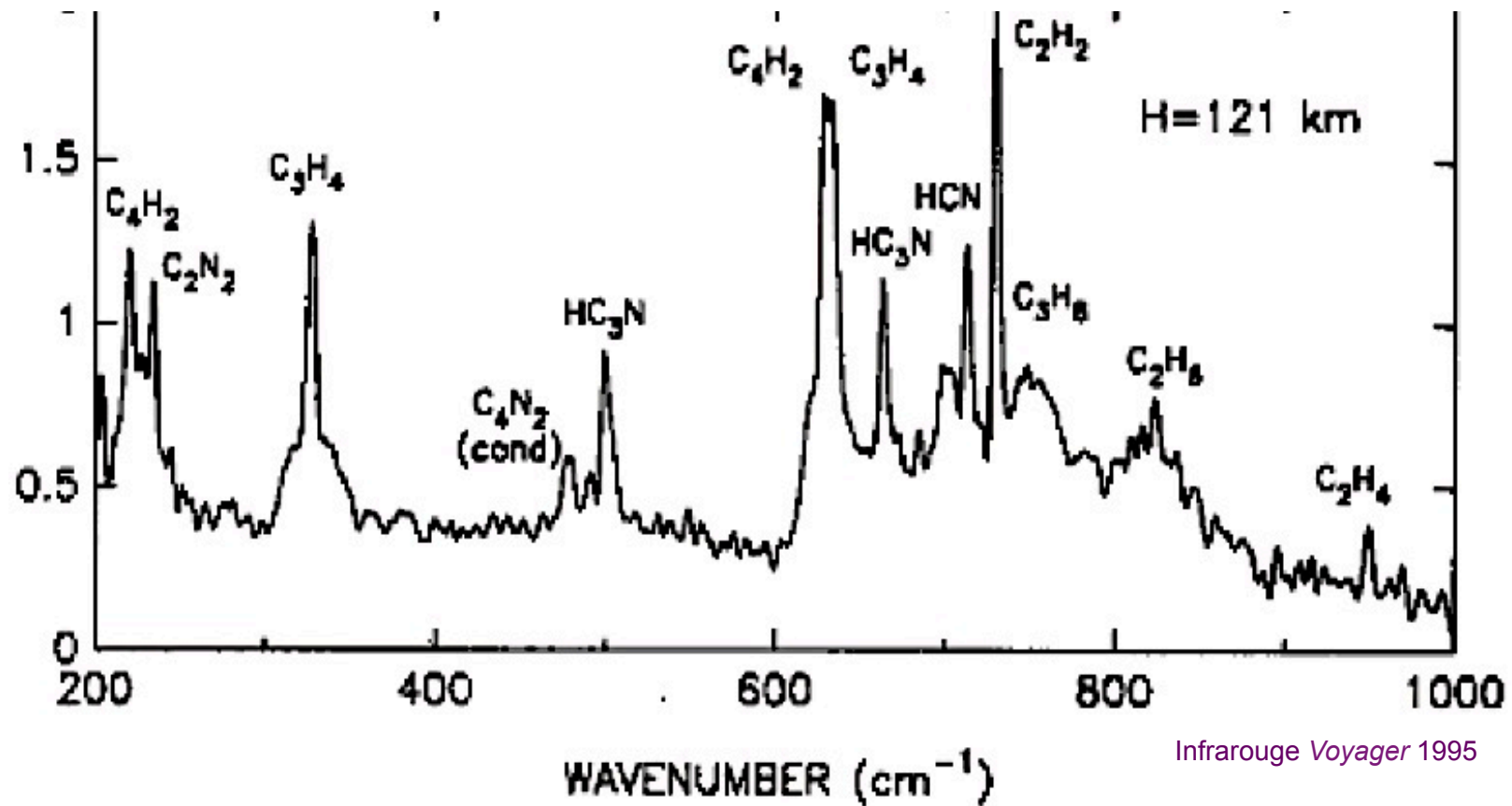


- Pour les planètes

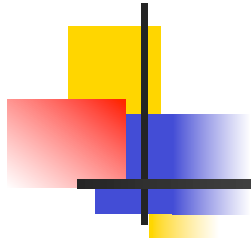
■ Mercure	0,12	
■ Vénus	0,75	<i>nuages</i>
■ Terre	0,31	<i>en moyenne!</i>
■ Lune	0,11	
■ Mars	0,25	
■ Jupiter	0,34	
■ Saturne	0,34	
■ Uranus	0,30	
■ Neptune	0,29	

Spectroscopie

- Optique: atomes
- Infrarouge: molécules
- Exemple: Titan



Infrarouge Voyager 1995

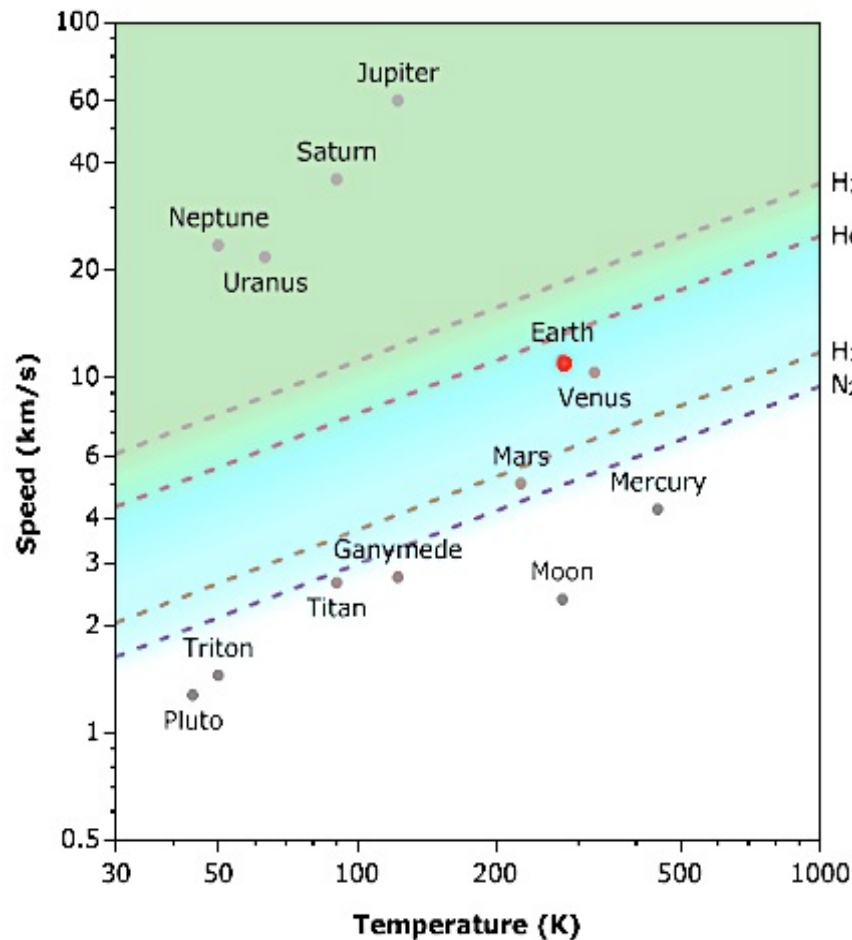


ATMOSPHERES



Pour avoir une atmosphère...

- ...un corps doit avoir une gravité suffisante

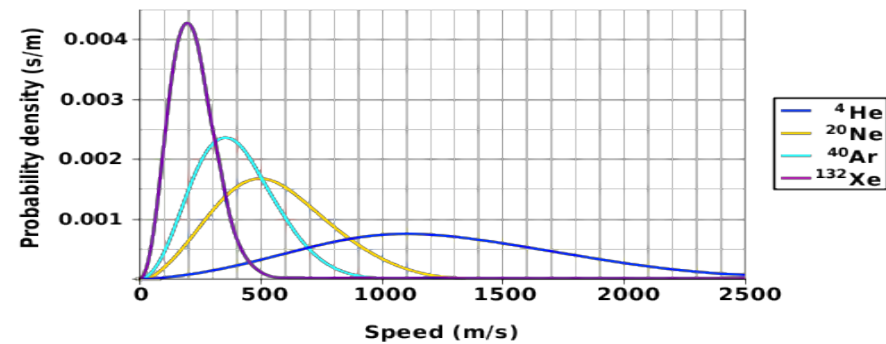


- Gravité \Rightarrow vitesse minimale $V_{\text{libération}}$
- Température $T \Leftrightarrow$ vitesse moyenne

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

- \Rightarrow 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)

Maxwell-Boltzmann Molecular Speed Distribution for Noble Gases



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

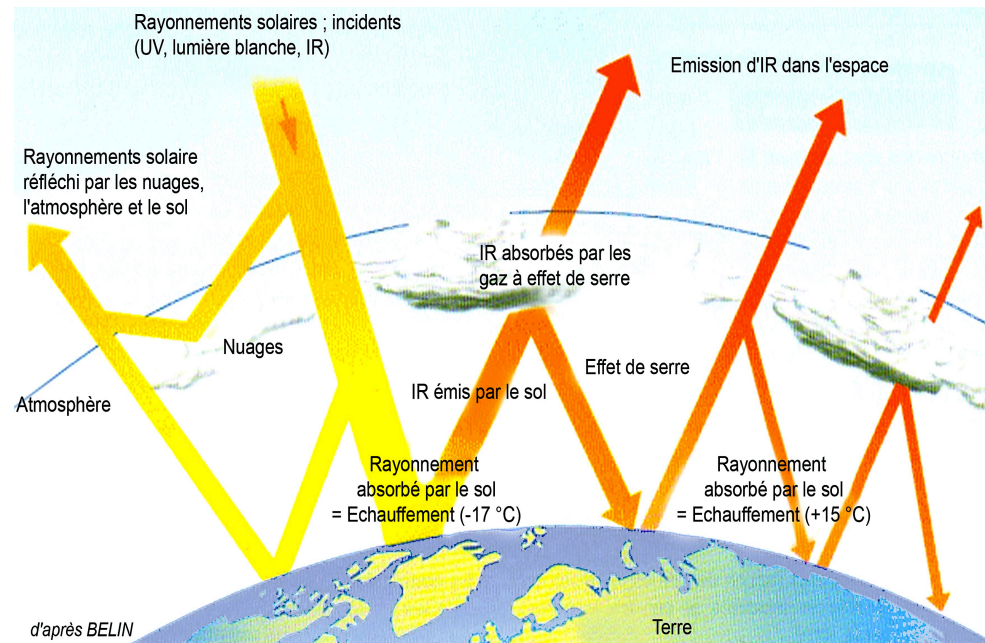
- $R = 6,4 \times 10^6 \text{ m}$
- $D = 1,49 \times 10^{11} \text{ m}$
- $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$
- $\Rightarrow T = 279 \text{ K} (6^{\circ}\text{C})$
- En réalité $T_{\text{moyenne}} = 288 \text{ K} (15^{\circ}\text{C})$
- Pas si mal ?

- **Mais** d'autres facteurs entrent en jeu

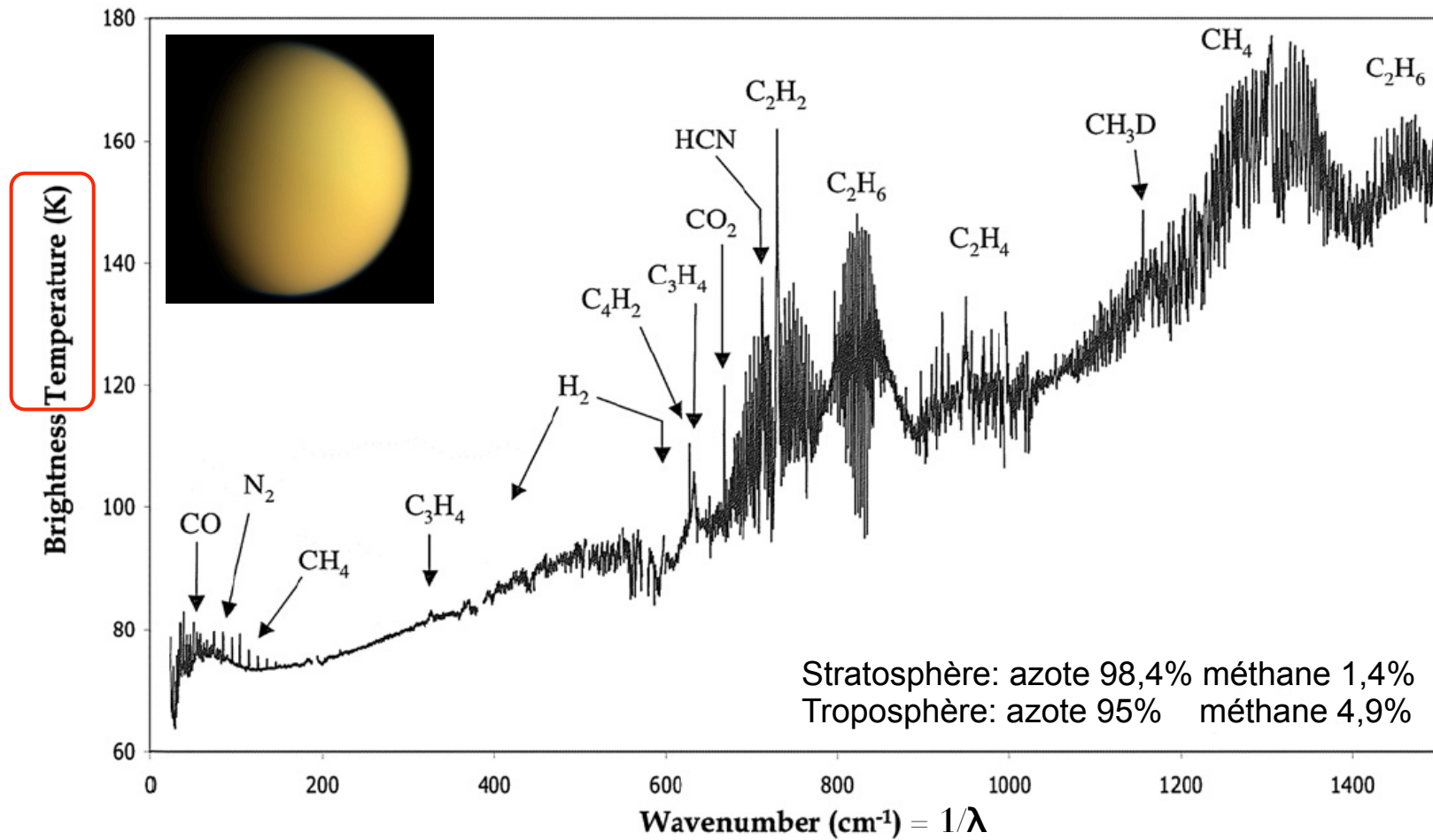
1. réémission de la lumière (albedo a)

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

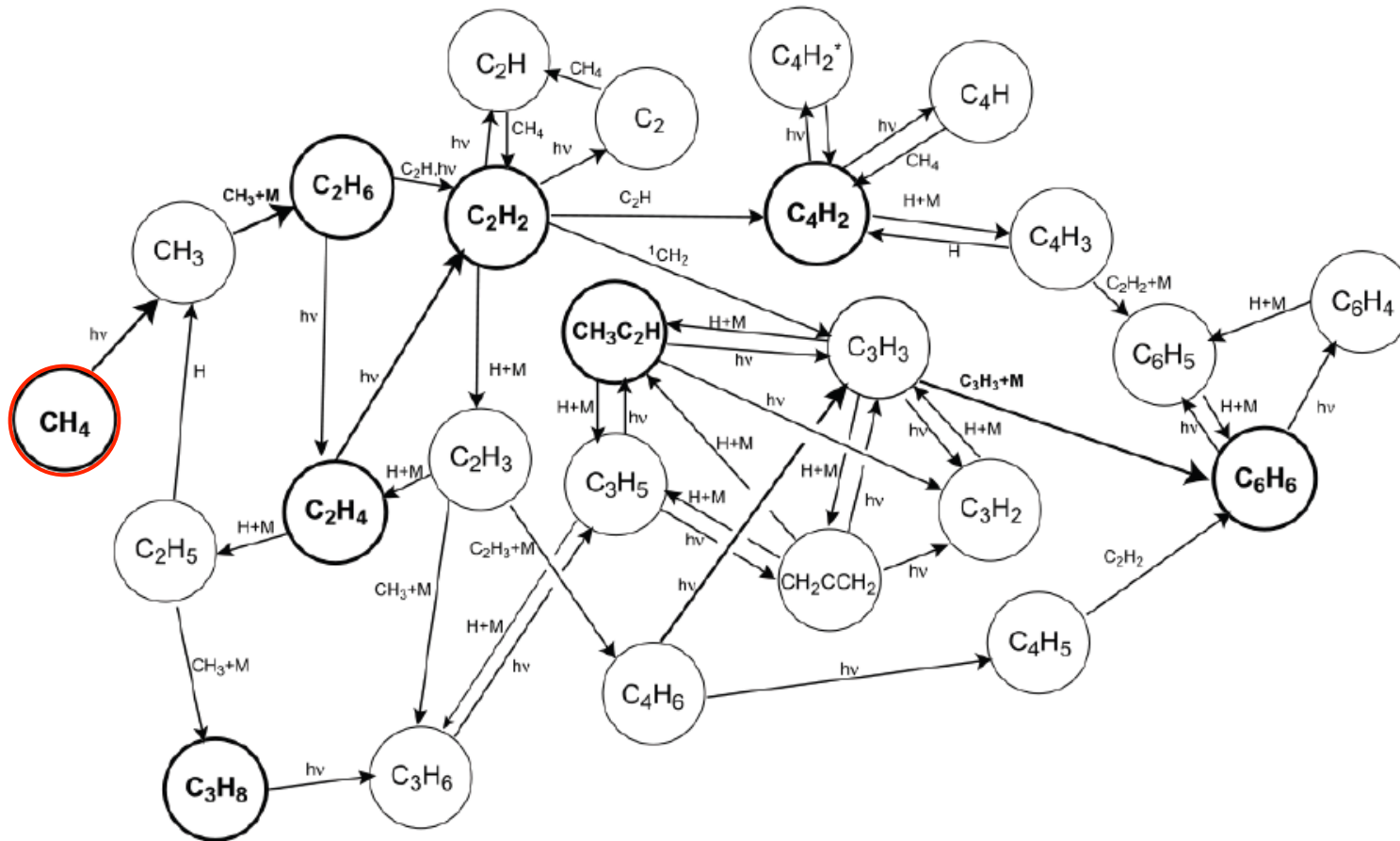
2. effet de serre de l'atmosphère



L'atmosphère de Titan (satellite de Saturne)

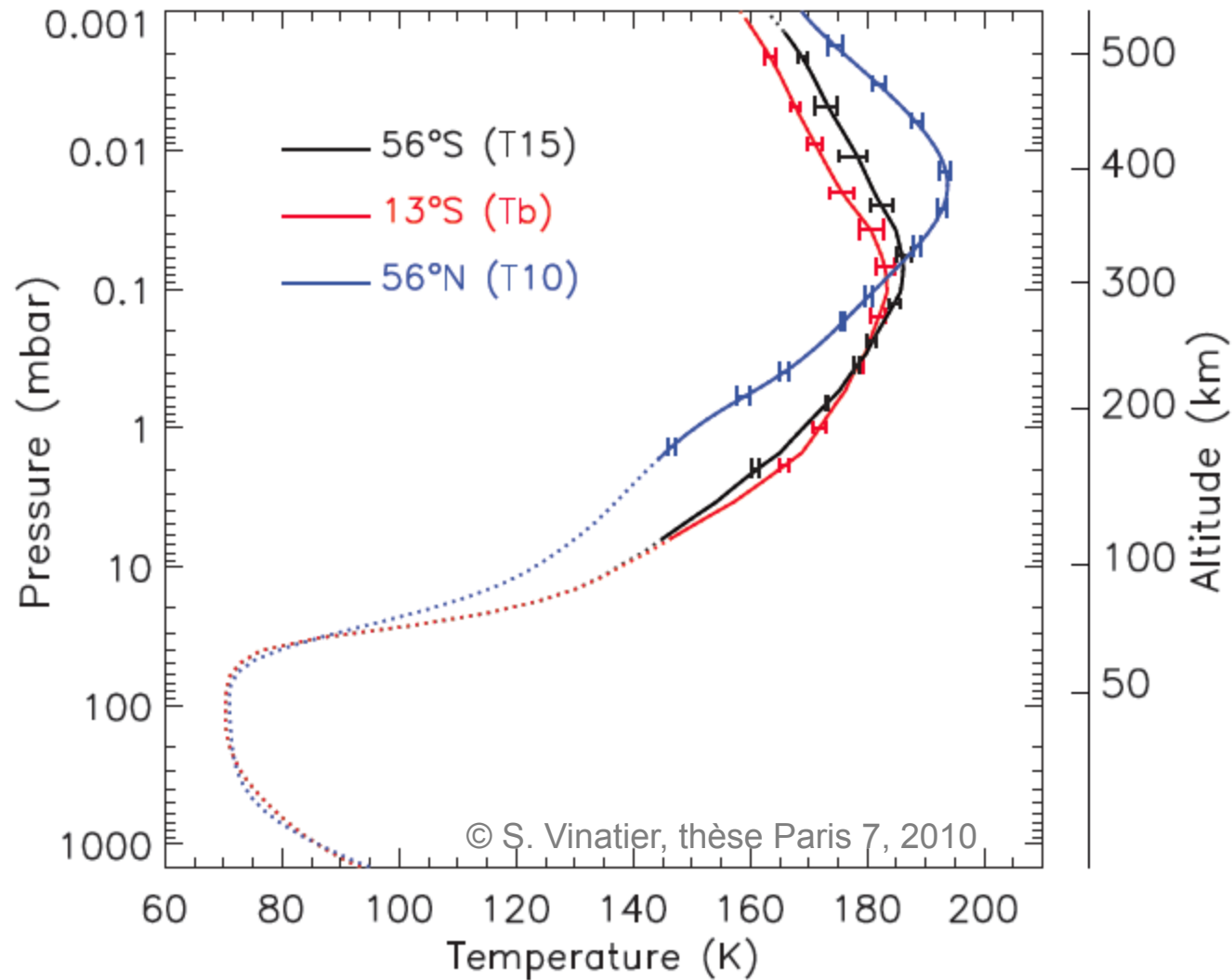


Un peu de chimie ?



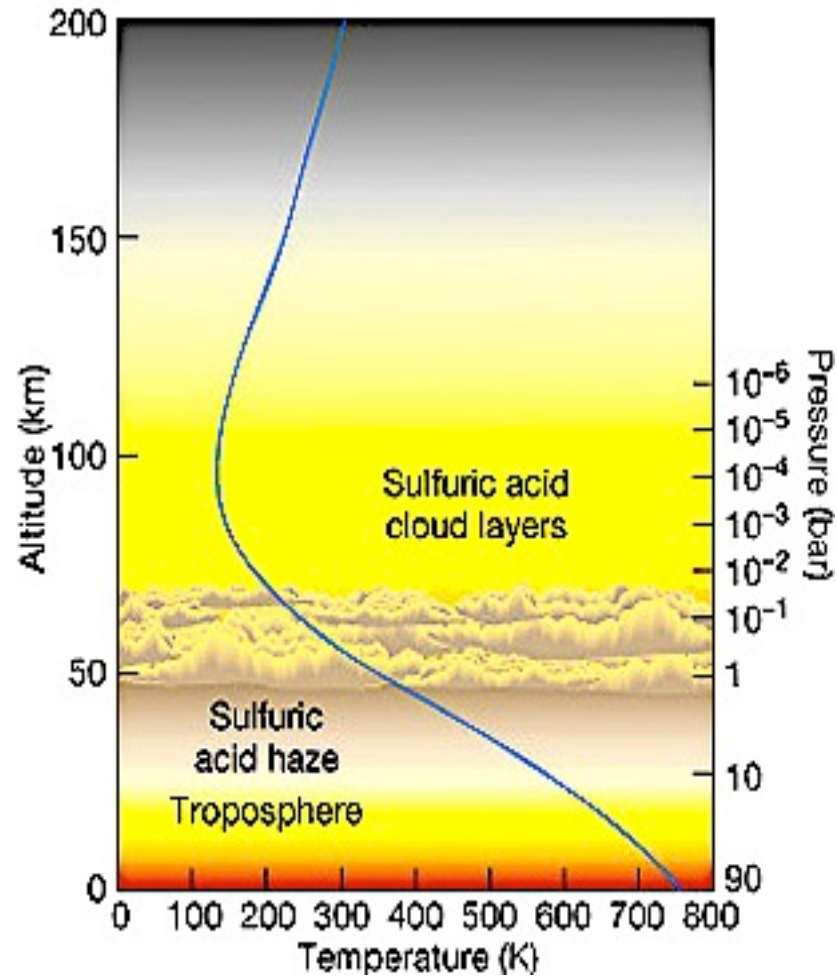
Chimie des hydrocarbures dans l'atmosphère de Titan
(S. Vinatier, thèse Paris 7, 2010, d'après Wilson et Atreya 2004)

Profil de température de l'atmosphère de Titan

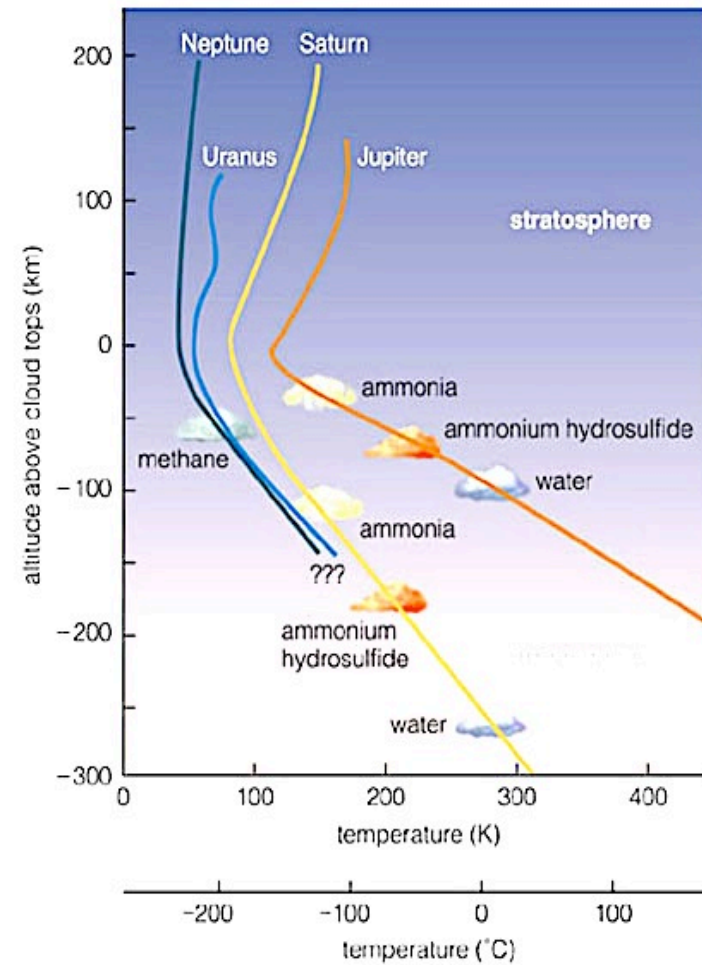


→ Profils de température

■ Vénus

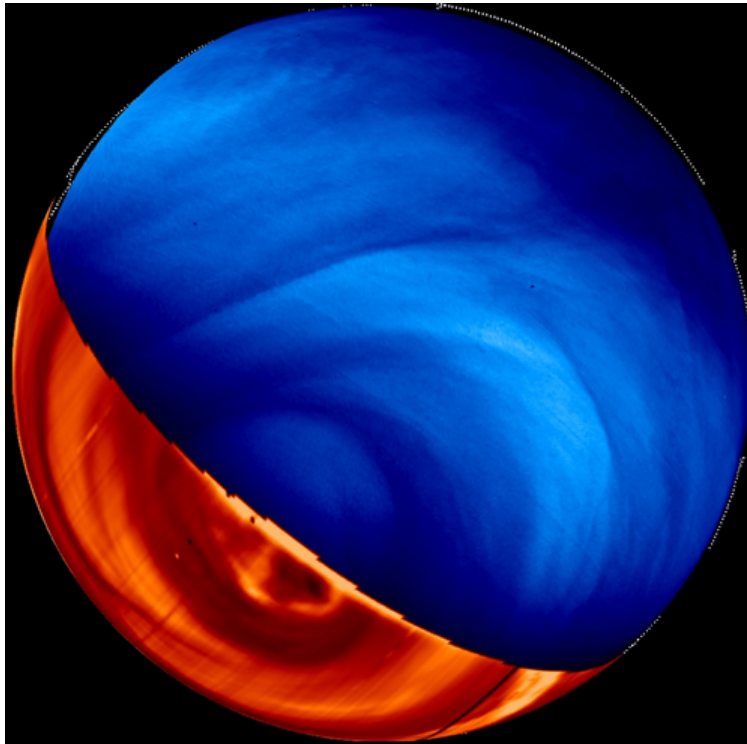


■ Planètes gazeuses

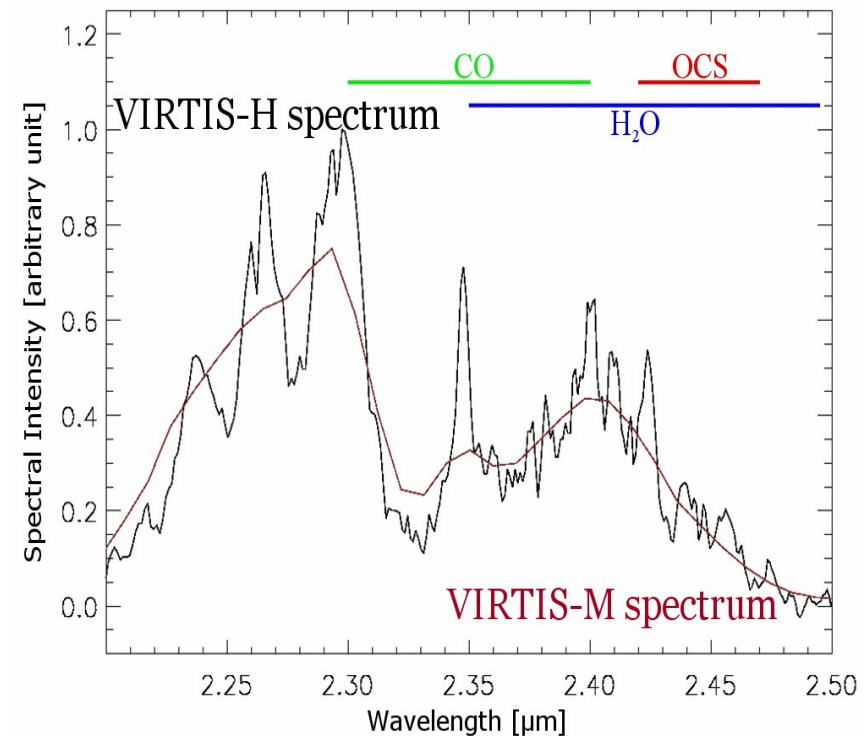


Composition: exemple de Vénus

- 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)



Un exemple d'effet de serre

■ Vénus

- Température par Stefan-Boltzmann

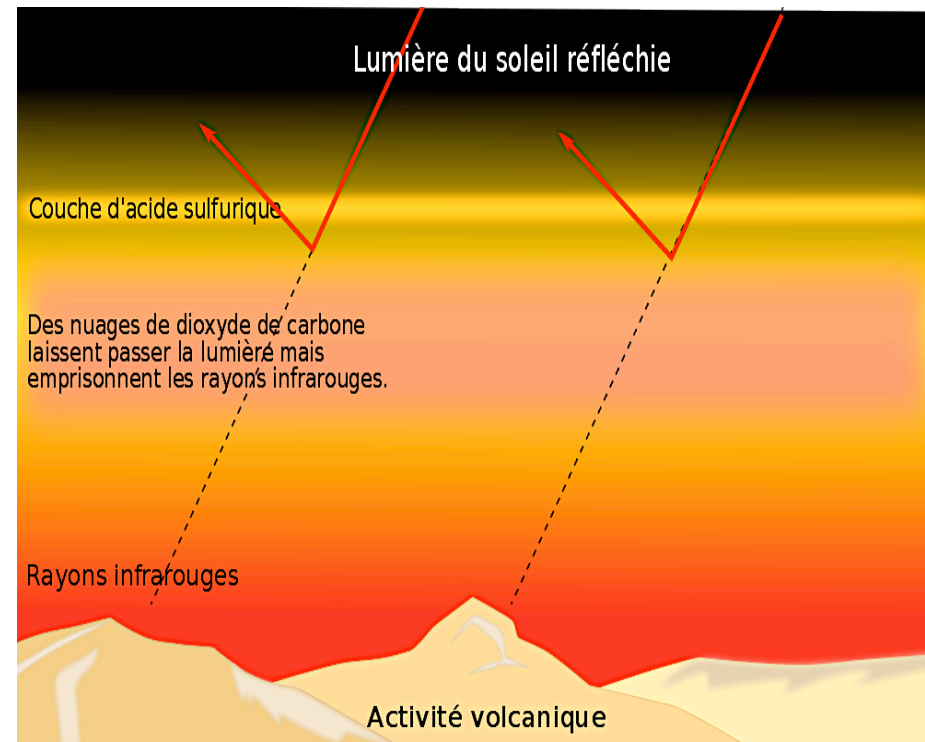
$$E_{\text{reçue}} = (1-a) \pi R^2 L_{\odot} / 4\pi D^2 = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

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

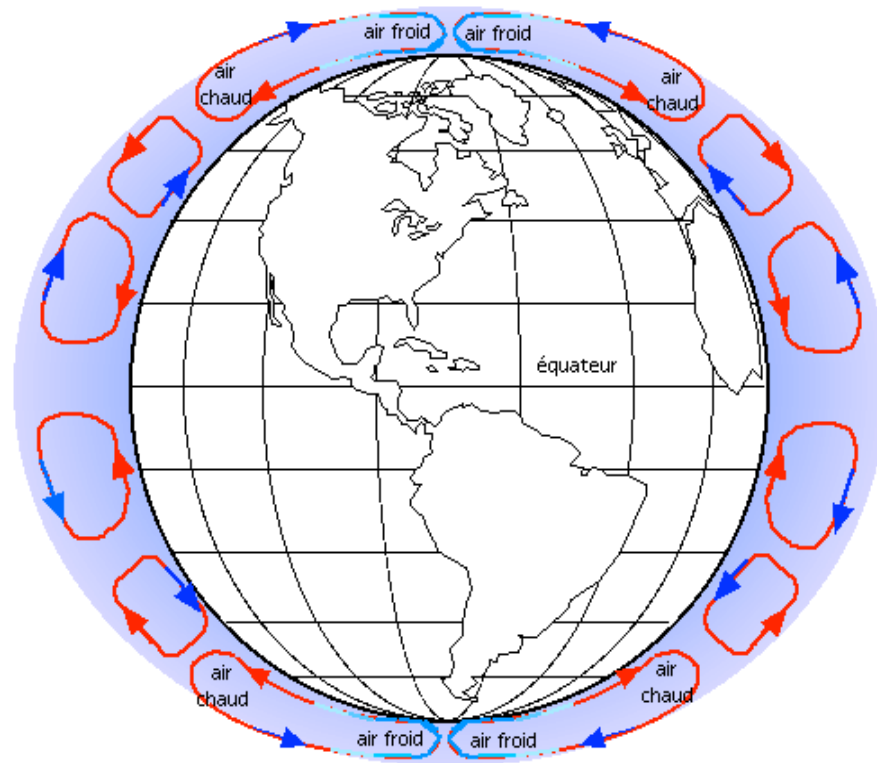
■ Atmosphère de Vénus

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

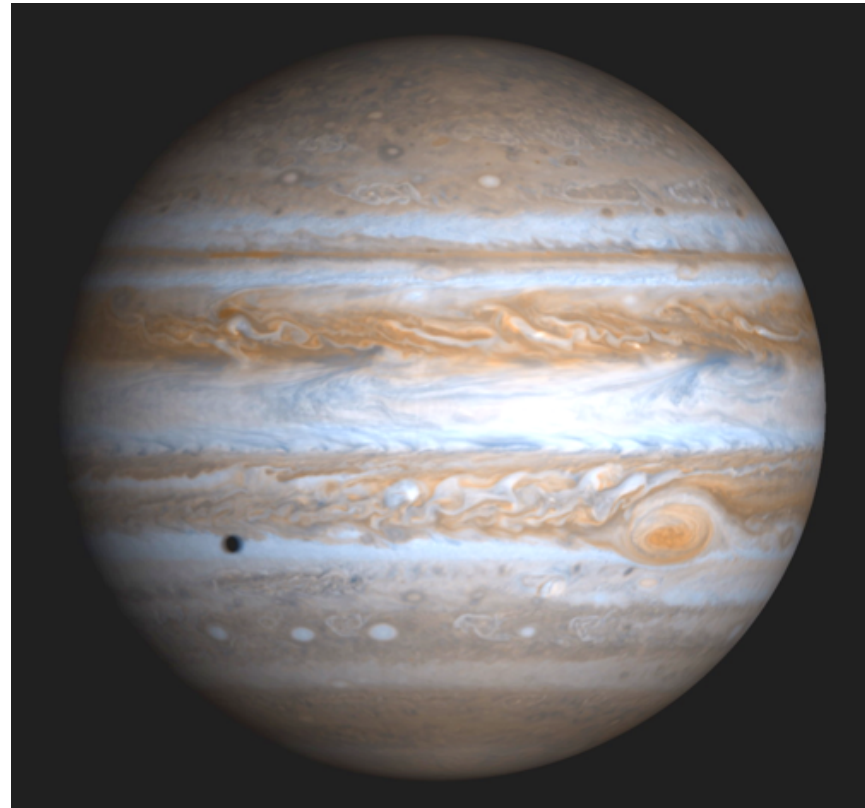


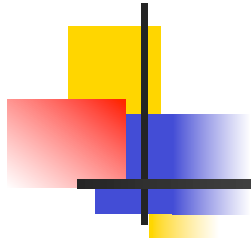
Météorologie...

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



- Jupiter





INTÉRIEURS



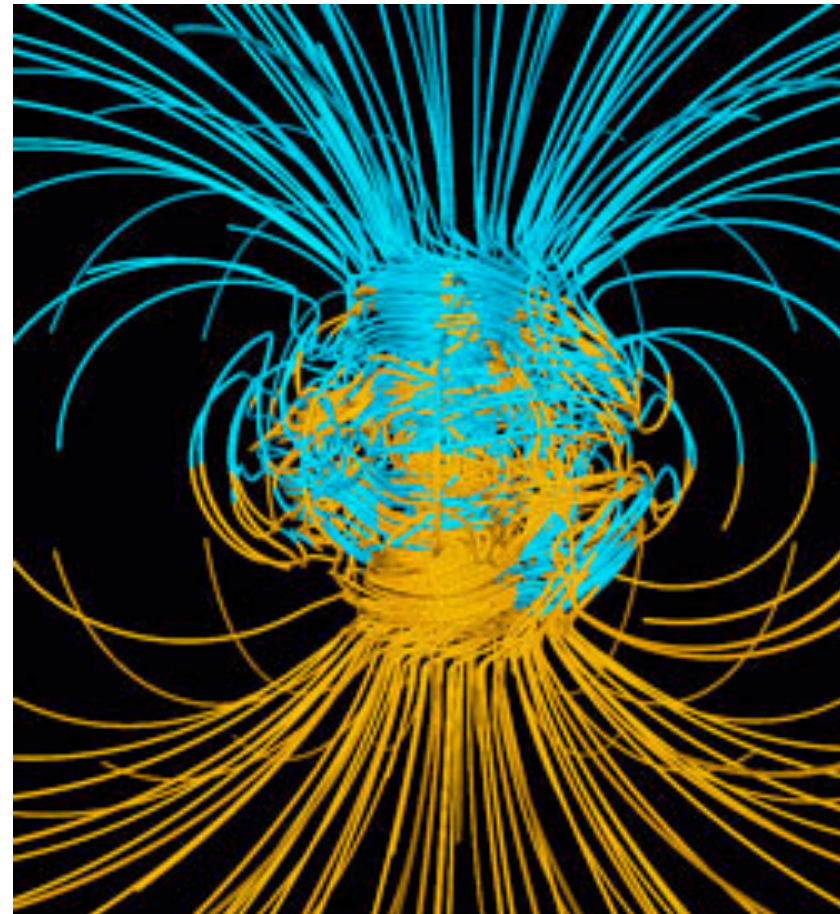
De quoi est formé l'intérieur des planètes ?

- Forte différence de densité 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
 - \Rightarrow courant électrique
 - \Rightarrow champ magnétique

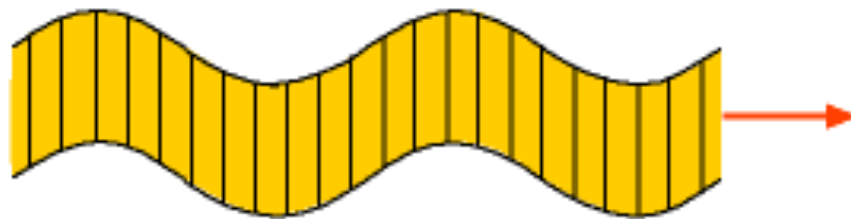
- Trois conditions nécessaires
 1. Un fluide conducteur: noyau de fer liquide ou d'hydrogène métallique
 2. Une source de chaleur mettant ce fluide en mouvement (convection)
 3. Une planète en rotation: la force de Coriolis dévie les mouvements convectifs



© Gary Glatzmaier, University of California

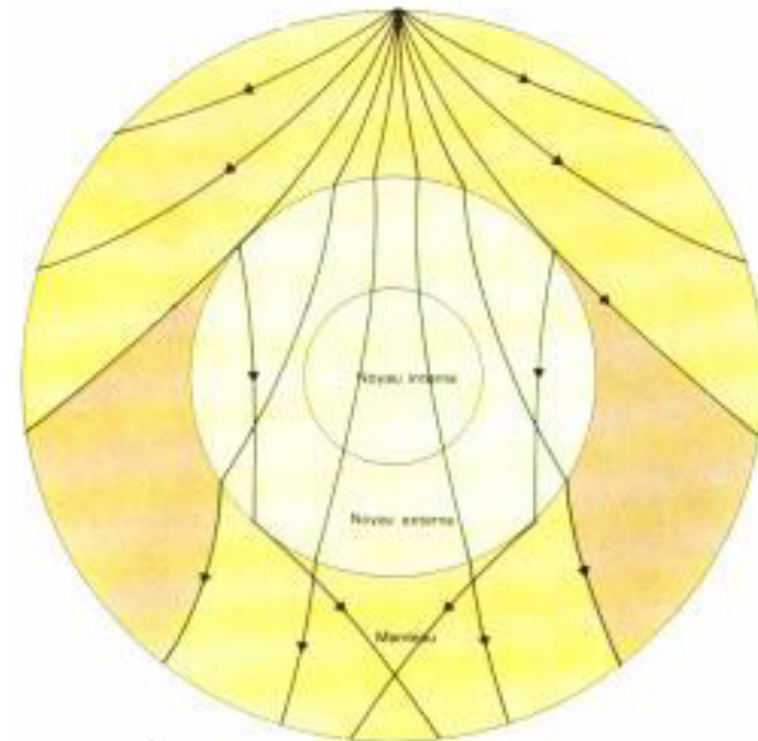
Sismologie

- Deux types d'ondes sismiques
 - Pression (liquides, gaz ou 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

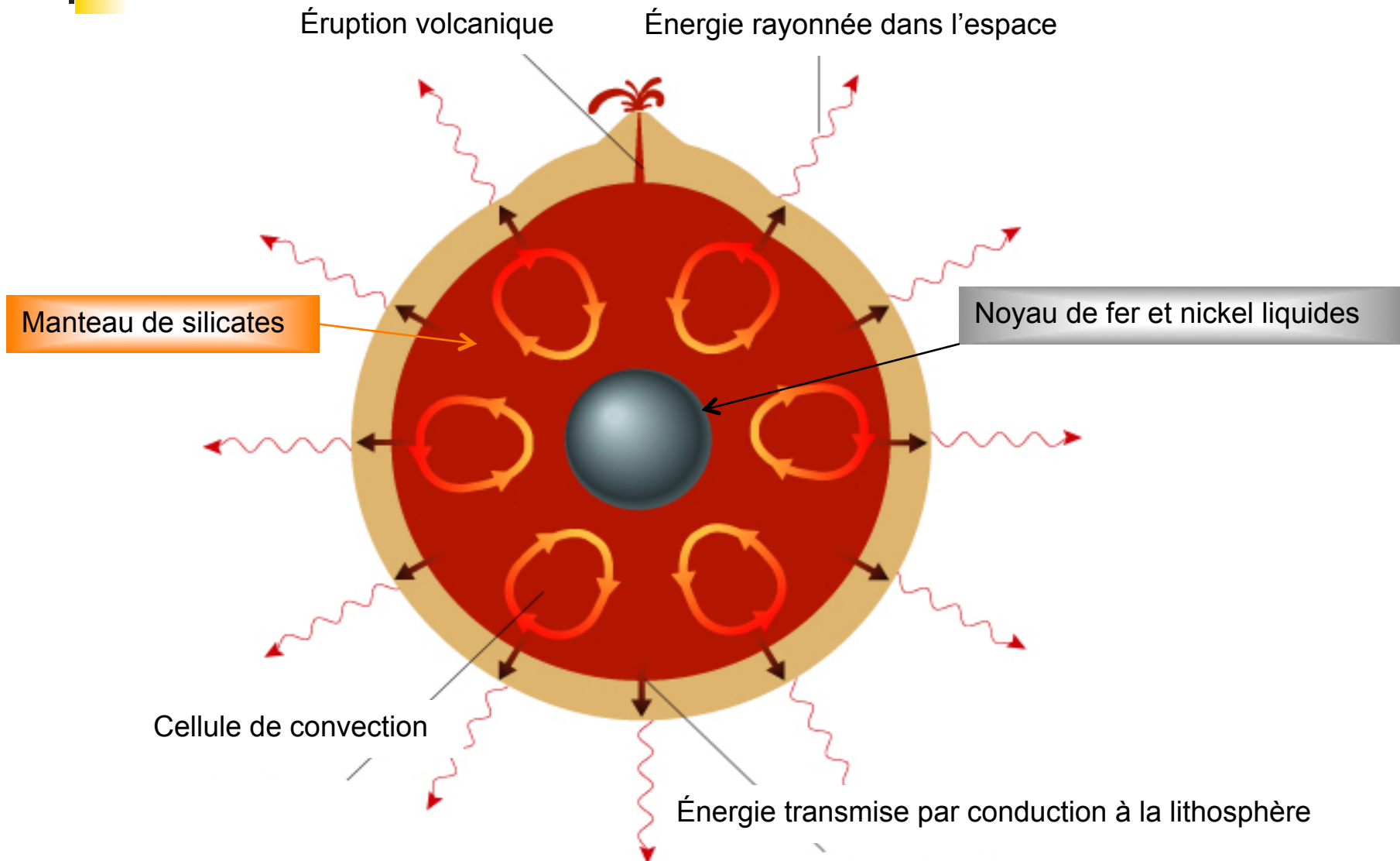




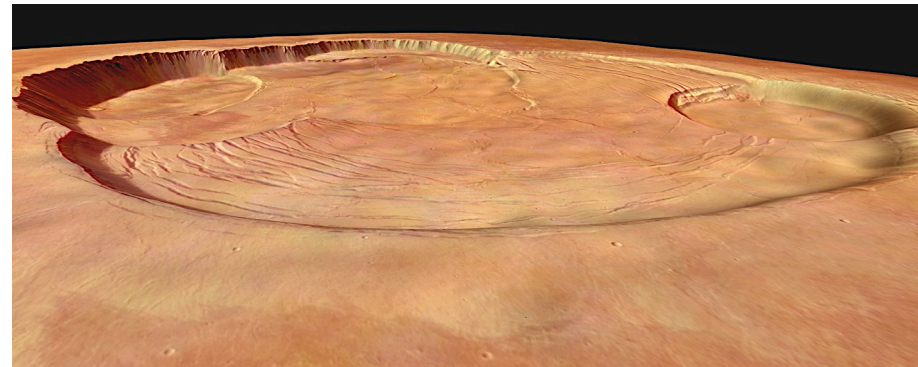
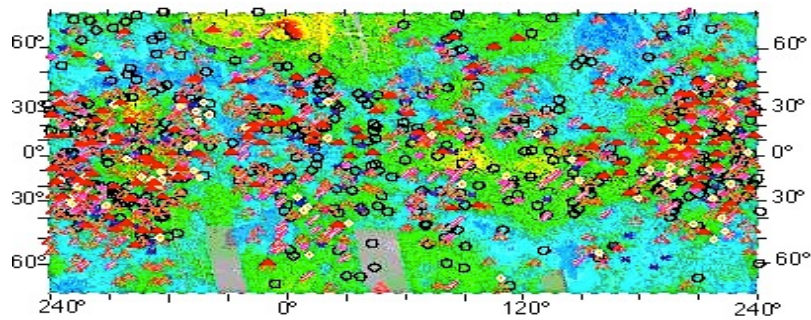
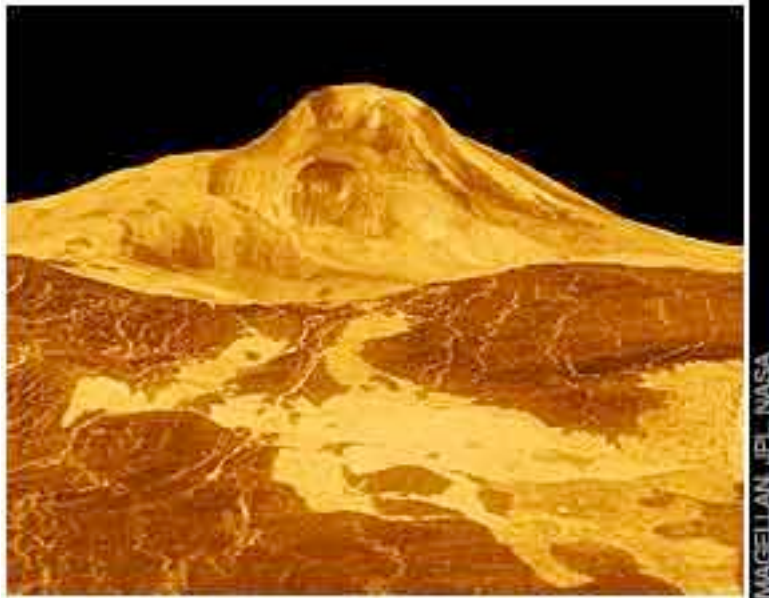
Tectonique et volcanisme

- 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



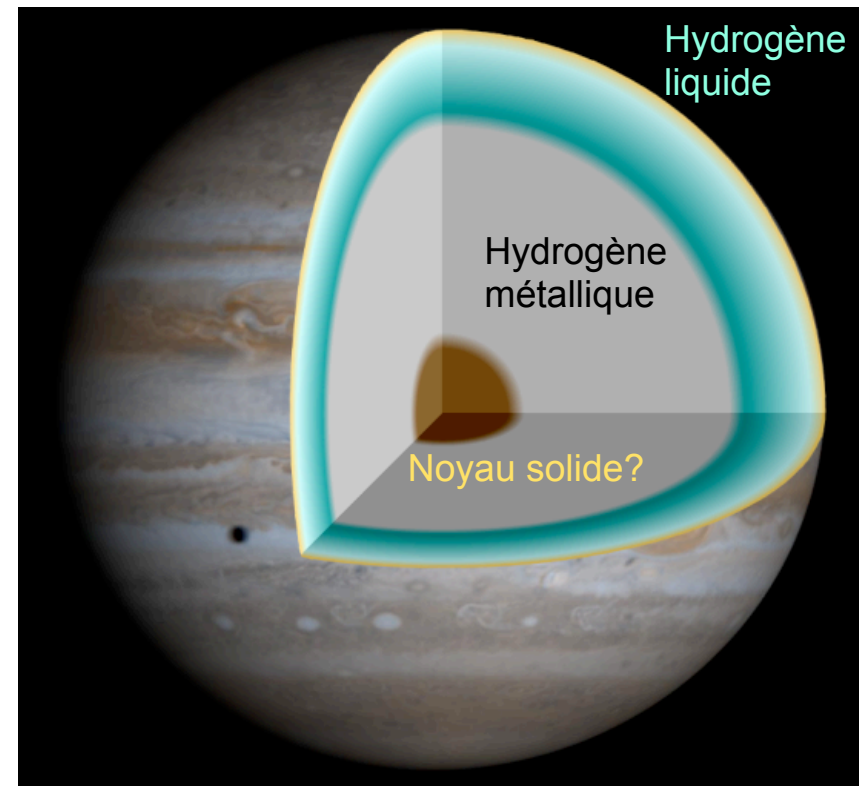
Volcans



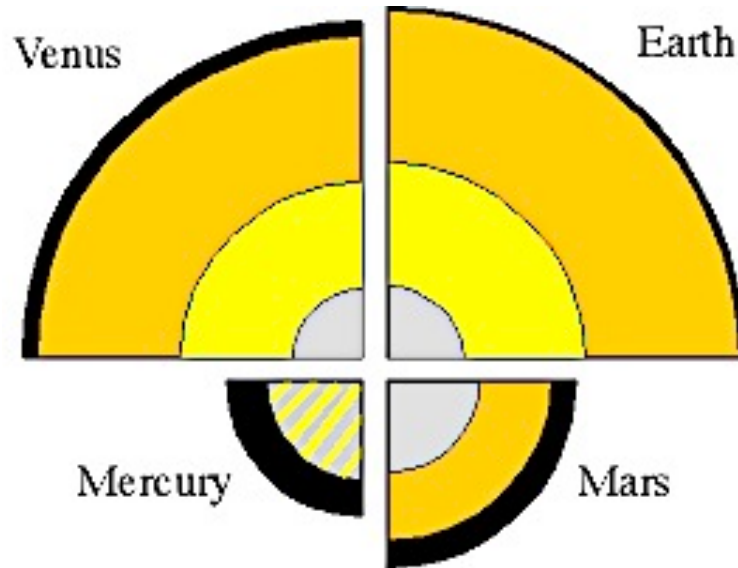
L'intérieur des planètes gazeuses

- 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 métallique ($P > 150 \text{ GPa}$, $T > 3\,000 \text{ K}$)
 - peut-être noyau solide ($P > 3\,000 \text{ GPa}$, $T > 30\,000 \text{ K}$). Silicates? Fer?

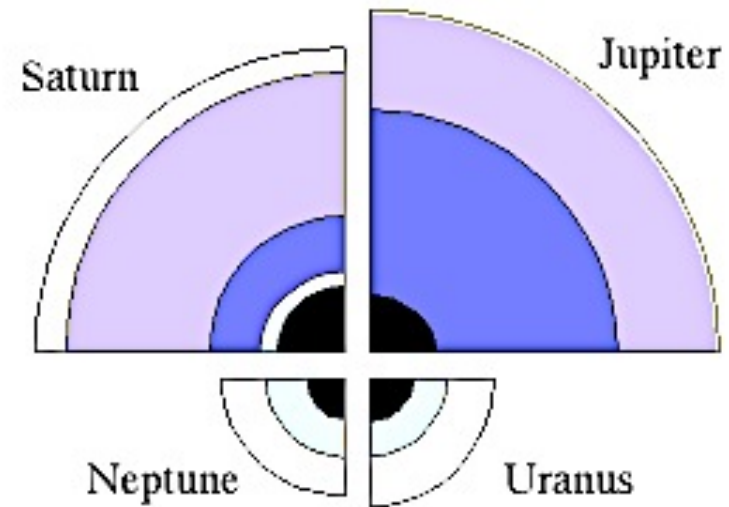
- L'intérieur de Jupiter ?



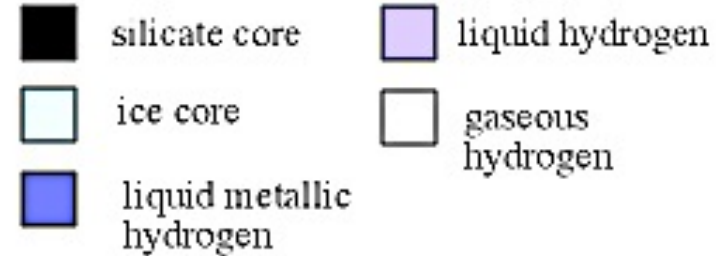
Structure interne des planètes



Terrestrial planet interiors to same scale

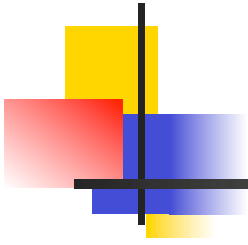


Earth to same scale



Jovian planets interiors to same scale

© Nick Strobel



Merci de votre attention !

