

# Les atmosphères planétaires

## UE M1 Grandes Questions Environnementales

Aymeric SPIGA

Laboratoire de Météorologie Dynamique  
Université Pierre et Marie Curie (Paris)

Année universitaire 2013-2014



# Contact

- Téléphone : 01 44 27 28 47
- Bureau : Campus Jussieu, Tour 45-55, 3e étage, 305A
- Mail : aymeric [point] spiga [at] upmc [point] fr

Site internet : <http://www.lmd.jussieu.fr/~aslmd>

Twitter : [http://www.twitter.com/aymeric\\_spiga](http://www.twitter.com/aymeric_spiga)

# Cours magistral 1 : Taxonomie et phénoménologie

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

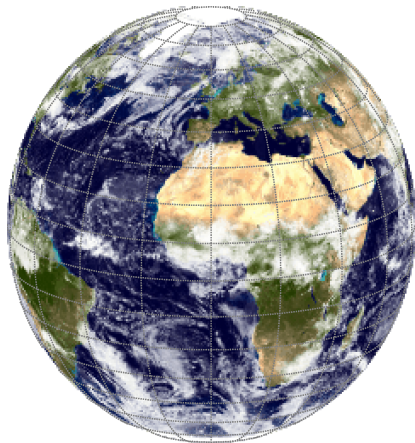
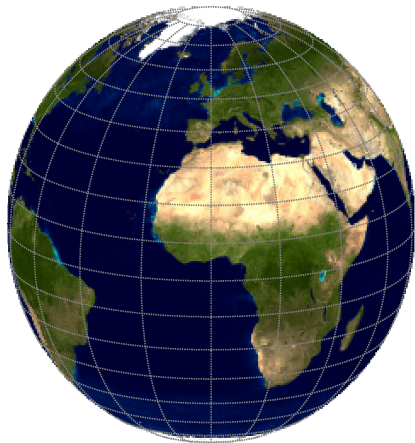
## C H A P I T R E I X.

*Des atmosphères des corps célestes.*

UN fluide rare, transparent, compressible et élastique, qui environne un corps, en appuyant sur lui, est ce que l'on nomme son *atmosphère*. Nous concevons autour de chaque corps céleste, une pareille atmosphère dont l'existence vraisemblable pour tous, est relativement au soleil et à Jupiter, indiquée par les observations.

[Pierre-Simon de Laplace]

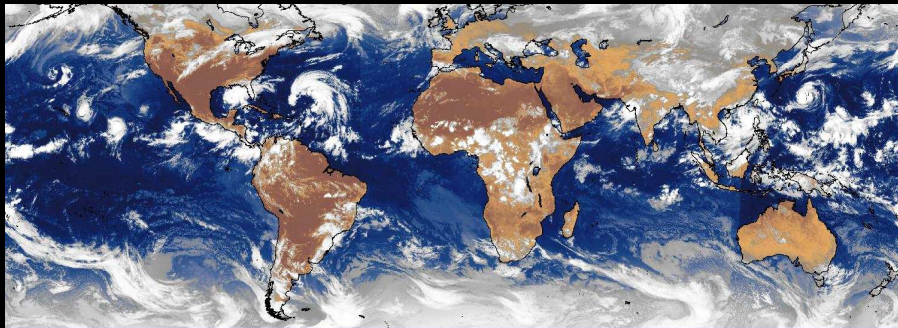
# Se représenter le système atmosphérique



[Construit d'après une image "Blue Marble" NASA du projet "Visible Earth"]

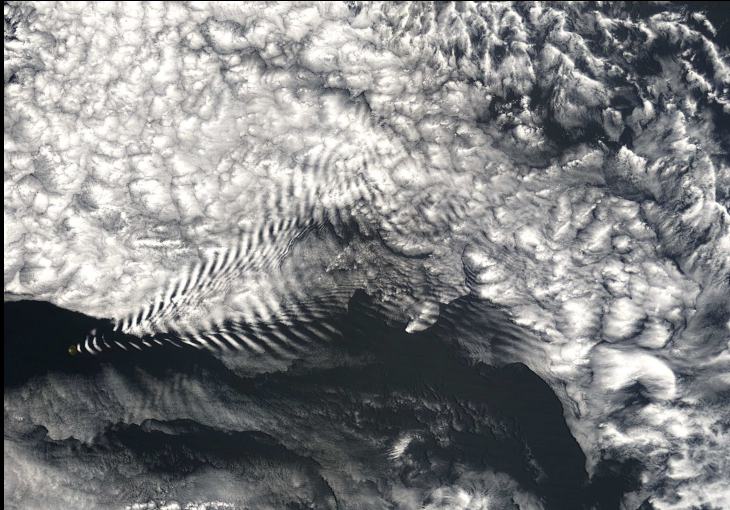
# Mosaïque IRC des géostationnaires [2 US + 2 UE + 1 JP]

22/09/2005 18h00 UTC



[Base de données SATMOS : <http://www.satmos.meteo.fr>]

# Nuages orographiques vus par TERRA/MODIS



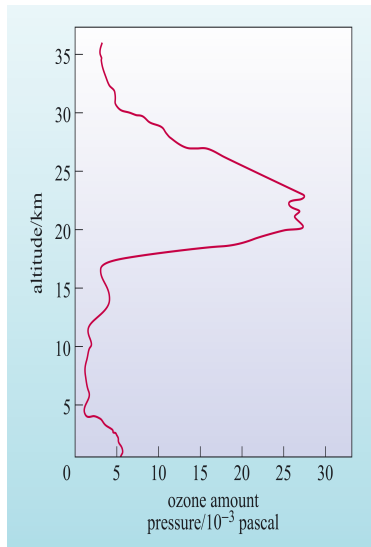
[NASA Earth Observatory : <http://earthobservatory.nasa.gov>]



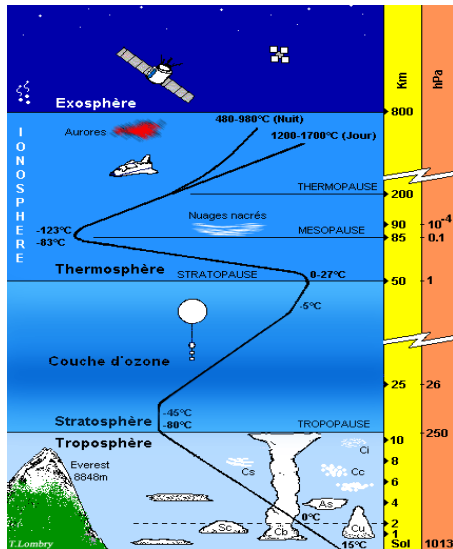
# Radiosondages sur Terre



# La Terre et sa stratosphère



[McBride and Gilmour, 2004]

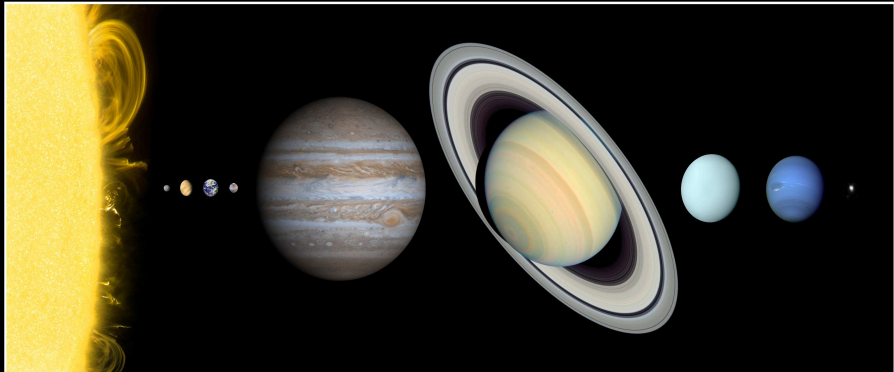


[Météo France]

# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

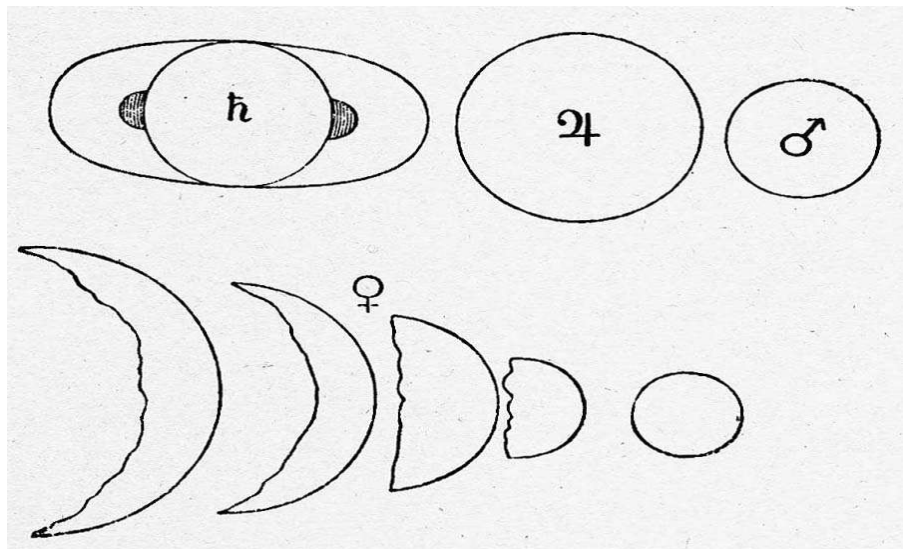
# Le système solaire



The Sun and Nine Planets

Copyright © Calvin J. Hamilton

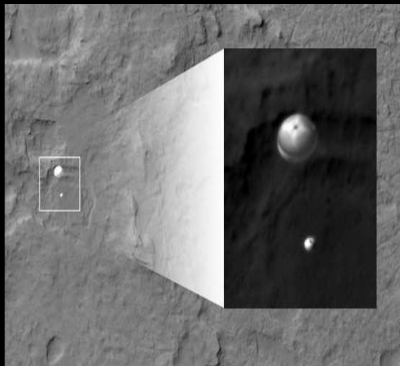
# Les planètes vues par Galilée



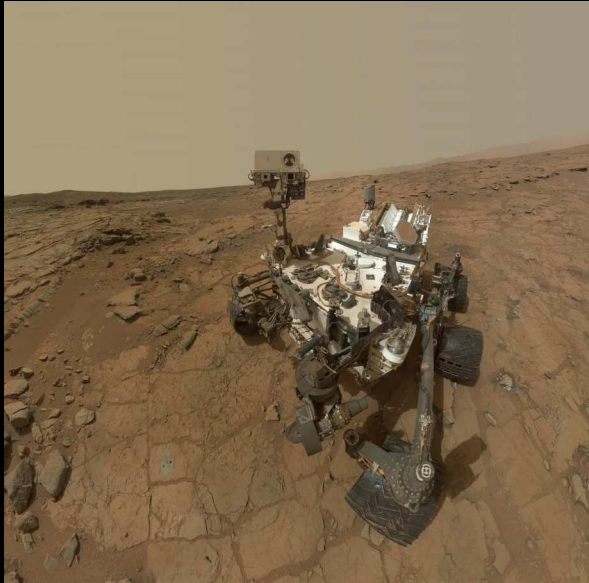
# Atterrissage de Curiosity en août 2012

Ces images...

... ne sont pas des vues d'artiste!



# Auto-portrait Curiosity hiver 2013



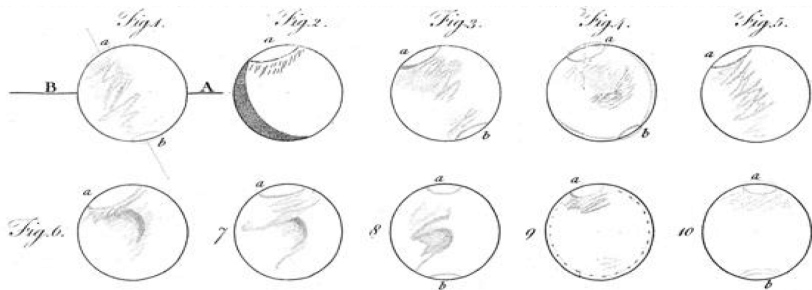
# [ $\Rightarrow$ XVIIe siècle] Mars, un objet astronomique



[Astronomie amateur (Tunc Tezel), 2003]



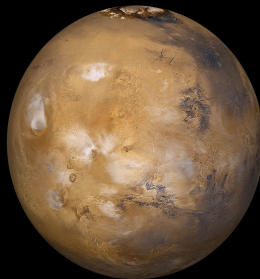
# [XVIIIe-XIXe siècle] Mars, une sphère planétaire



**XIX.** *On the remarkable Appearances at the Polar Regions of the Planet Mars, the Inclination of its Axis, the Position of its Poles, and its spheroidal Figure; with a few Hints relating to its real Diameter and Atmosphere.* By William Herschel, Esq. F. R. S.

[Herschel, Phil. Trans. 1784]

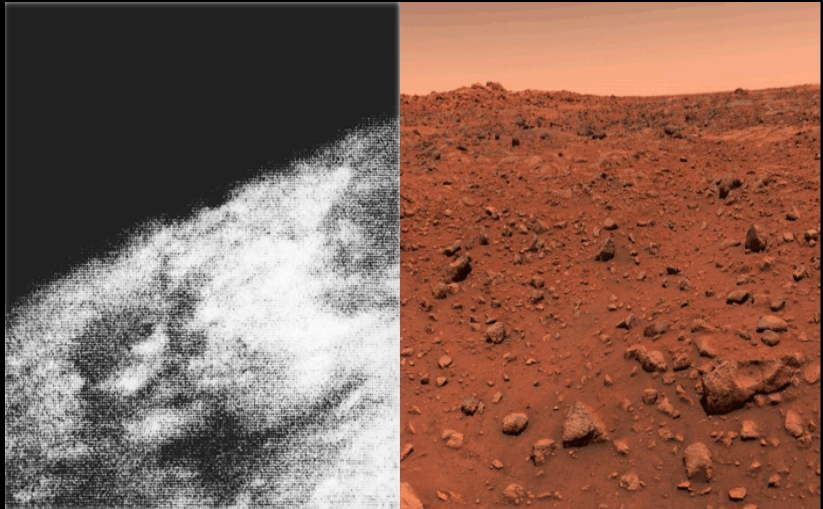
# [XXe-XXIe siècle] Mars, un système géophysique



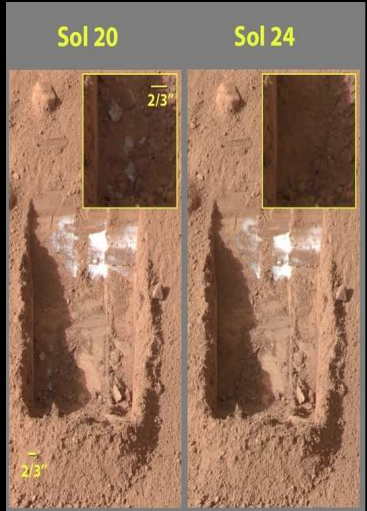
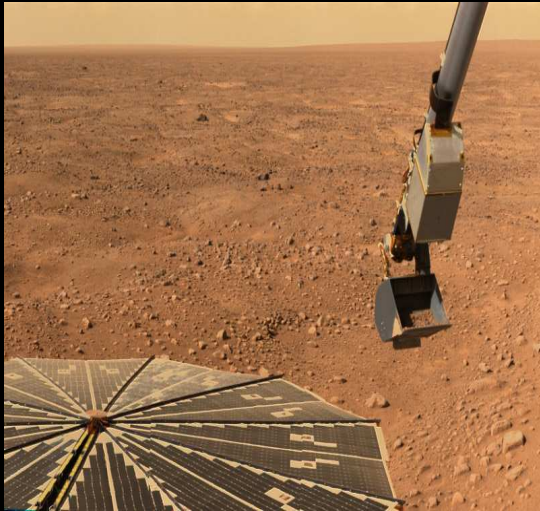
[Apollo 17, 1972; Mars Global Surveyor, 2002]

# Exploration de Mars

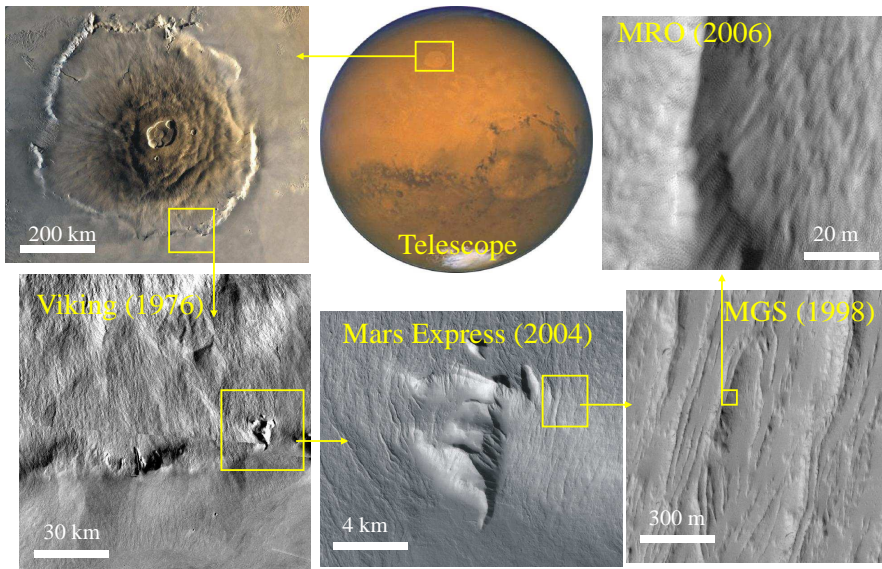
Mariner 4 flyby (july 1965) ... Viking lander (july 1976)



# Mission Phoenix



# IMAGERIE VISIBLE



# Préambule australien



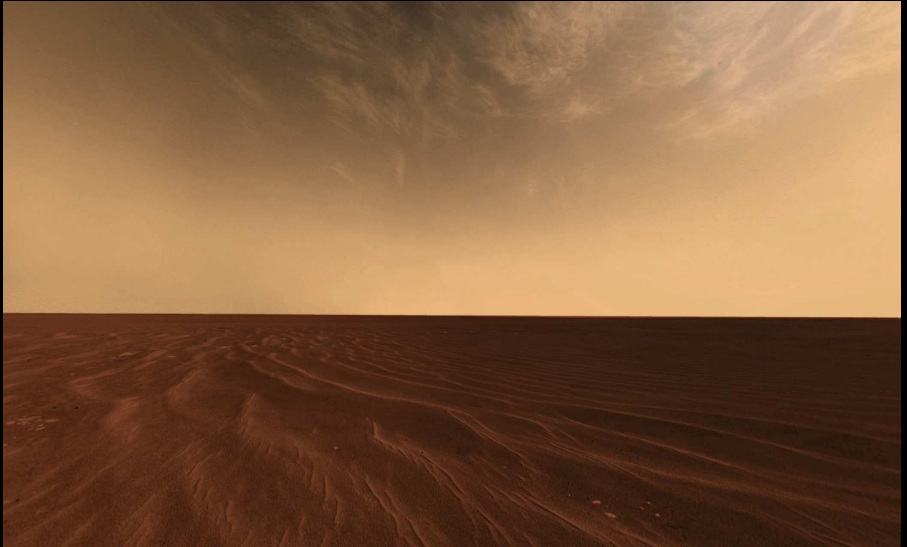
[Site internet The Big Picture [http://www.boston.com/bigpicture/2009/09/dust\\_storm\\_in\\_australia.html](http://www.boston.com/bigpicture/2009/09/dust_storm_in_australia.html)]

# Préambule australien ... pendant une tempête de poussière !



[Site internet The Big Picture [http://www.boston.com/bigpicture/2009/09/dust\\_storm\\_in\\_australia.html](http://www.boston.com/bigpicture/2009/09/dust_storm_in_australia.html)]

# The Martian environment



[Pancam on Opportunity Rover]



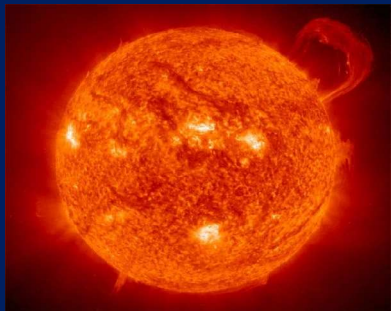
# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 **Composition et formation du système solaire**
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 **Composition et formation du système solaire**
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Le Soleil : notre étoile

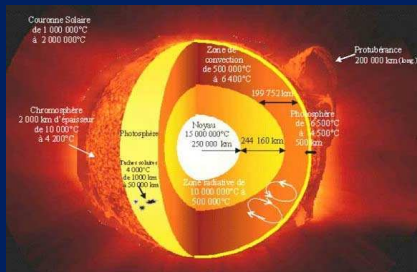


Le Soleil est une étoile de type G

Il est composé de 73,5% d'hydrogène et de 24,8% d'hélium (masse)

Il produit de l'énergie par fusion nucléaire créant ainsi un plasma

Principale source d'énergie à la surface des astres du système solaire



## Définition ETOILE:

Une étoile est une boule gazeuse dont la taille et la densité sont telles que la région centrale atteint la température nécessaire (de l'ordre du million de kelvins au minimum) à l'amorçage de réactions de fusion nucléaire

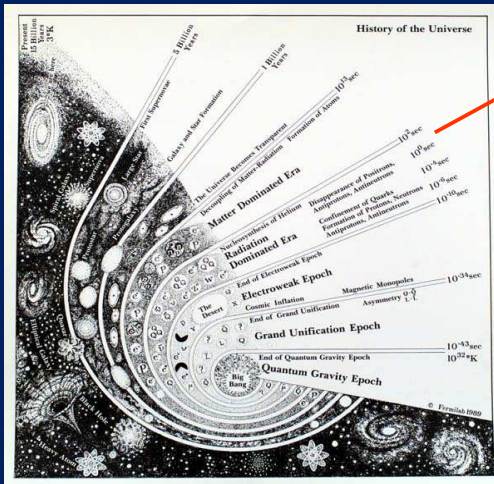
## Définition PLASMA:

Etat de la matière dans lequel les constituants des atomes - noyaux et électrons - sont dissociés

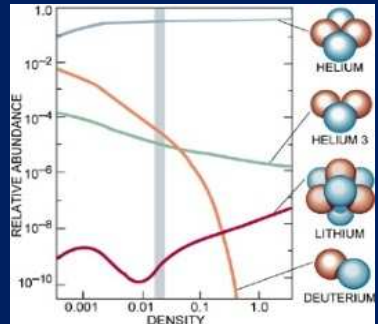
# Formation de la matière primordiale

## Nucleosynthèse :

La nucléosynthèse est un ensemble de processus physiques conduisant à la synthèse de noyaux atomiques, par fission ou fusion



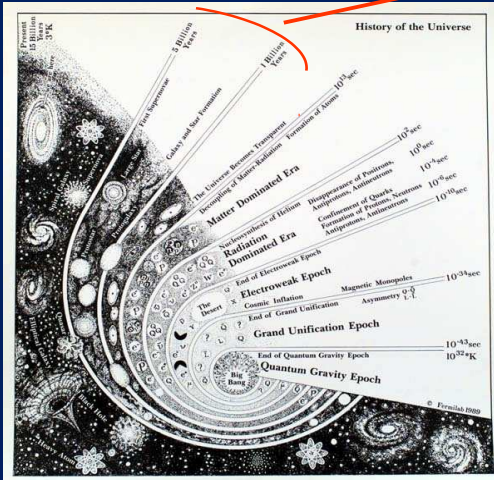
Nucléosynthèse primordiale :  
Formation de  $1D$ ,  $2He$ , et  $3Li$  par fusion



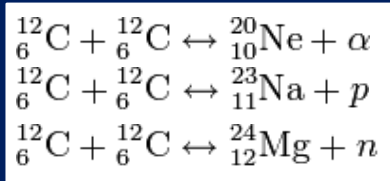
Chronologie de l'histoire de l'Univers

# Formation de la matière évoluée

Nucléosynthèse stellaire :  
Formation des éléments connus à partir des éléments légers



Chronologie de l'histoire de l'Univers



Exemple de nucléosynthèse stellaire basée sur le carbone ( $T=1$  GK)

## Définition ETOILE:

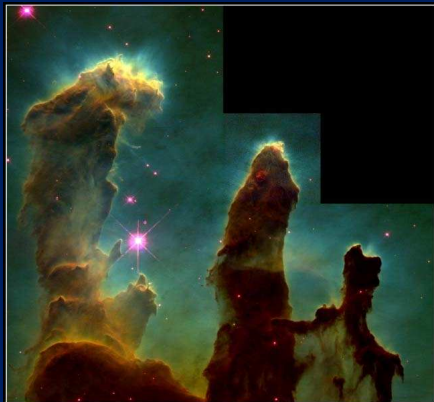
Objet céleste de forme approximativement sphérique constitué de masses gazeuses très denses à haute température émettant un rayonnement de lumière et de particules.

## Définition GALAXIE:

Ensemble d'étoiles, de poussières et de gaz interstellaires dont la cohésion est assurée par la gravitation.

Les galaxies sont formées :

- de plusieurs centaines de milliards (voire plus !) d'étoiles
- de nuages interstellaires



**Gaseous Pillars · M16**

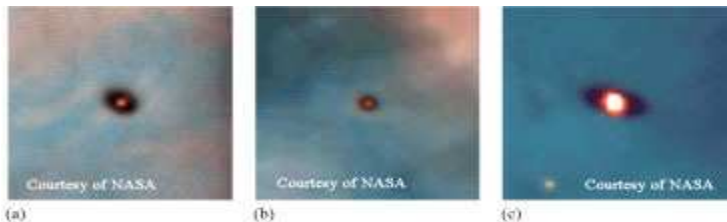
HST · WFPC2

PRC95-44a · ST Sci OPO · November 2, 1995  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA

Définition NUAGE INTERSTELLAIRE:  
Accumulations de gaz et de poussières  
présents entre les étoiles.



# Young stars and protoplanetary discs



[Hubble Space Telescope]

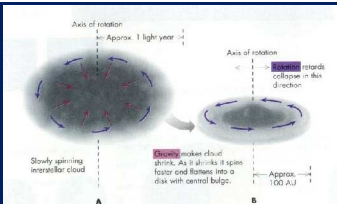
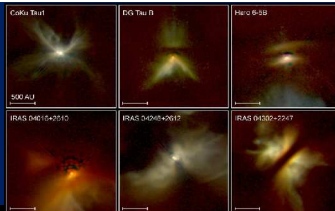
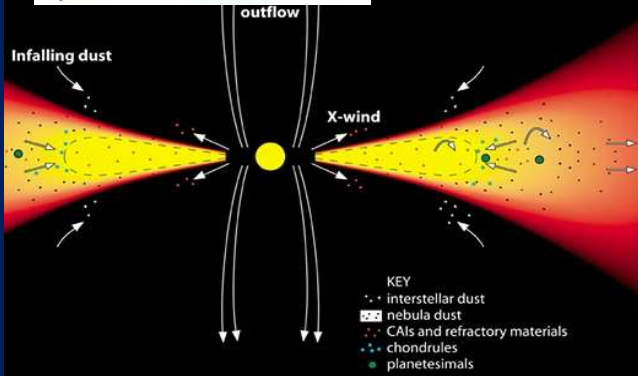


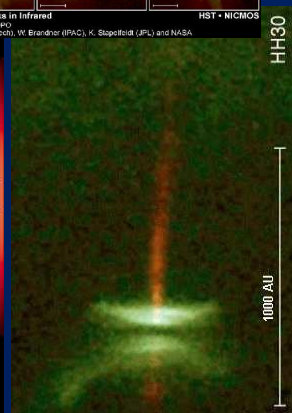
FIGURE OV4.5  
The Solar System's birth began with the collapse of an interstellar cloud of gas and dust.



Young Stellar Disks in Infrared  
 process=008 + 0150 OPD  
 D. Pasgett (IPAC/Caltech), W. Brandner (IPAC), K. Stapelfeldt (JPL) and NASA. HST • NICMOS



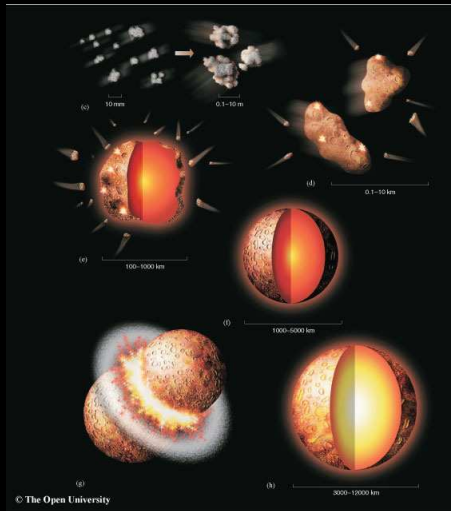
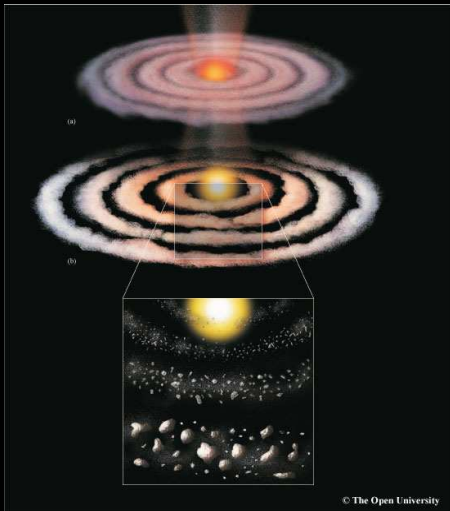
(PSRD graphic by Nancy Hurbirt, based on a conceptual drawing by Edward Scott, Univ. of Hawaii.)



*Schéma et image d'un disque protosolaire*



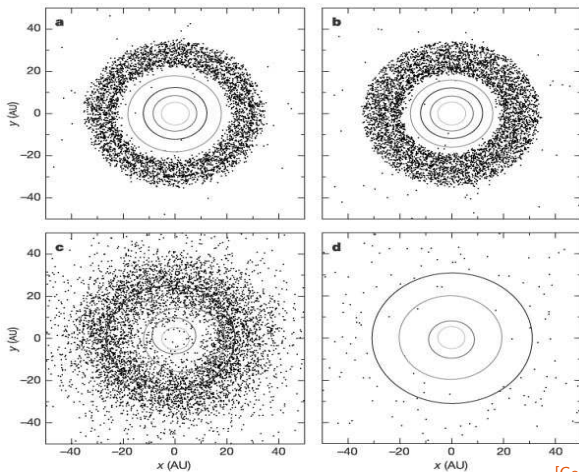
# The formation of planets



[Mcbride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

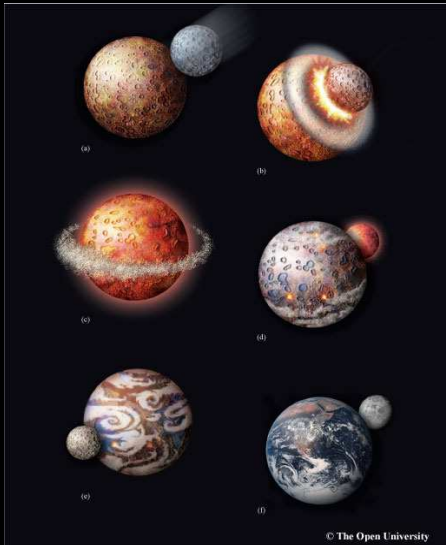
# Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets

The LHB was triggered by the rapid migration of the giant planets



[Gomes et al. Nature 2005]

# The formation of the Moon

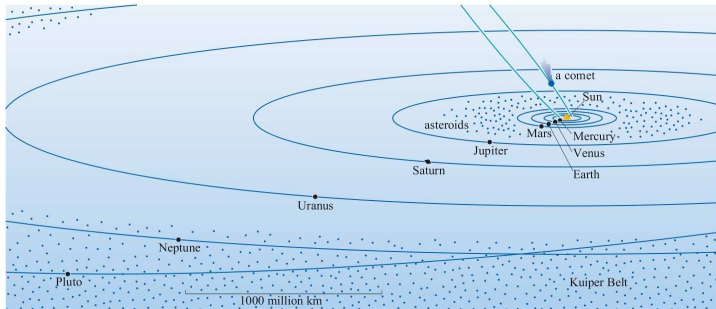


Science Magazine, October 2013  
Where did the moon come from? For 3 decades, planetary scientists have agreed that it happened something like this: While the solar system was still forming, a body the size of Mars struck Earth a glancing blow that reduced both to rubble. The cloud of debris reformed itself into the modern Earth and moon. This "giant impact" theory neatly explained why the rocks Apollo astronauts brought back from the moon closely resembled rocks on Earth—or so it seemed at first. Actually, recent computer models show, such a collision wouldn't have scrambled the two bodies together enough to explain the similarity. Meeting last month in London to discuss the problem, scientists agreed that the origin of the moon must have been messier and more complicated than anyone had assumed.

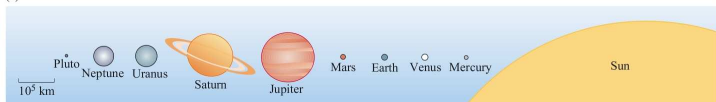
# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire**
  - Histoire et formation
  - **Inventaire du système solaire et définitions**
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# The Solar System



(a)



(b)



[Mcbride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

# Définition de l'IAU en 2006

## Planète

Une planète est un objet céleste qui :

- ☞ est en orbite autour du Soleil (n'est pas un satellite)
- ☞ possède une masse suffisante pour que sa gravité surpasse les forces des corps rigides pour que sa forme corresponde à un équilibre hydrostatique (forme quasiment sphérique)
- ☞ a nettoyé le voisinage de son orbite (accrétion par gravité)

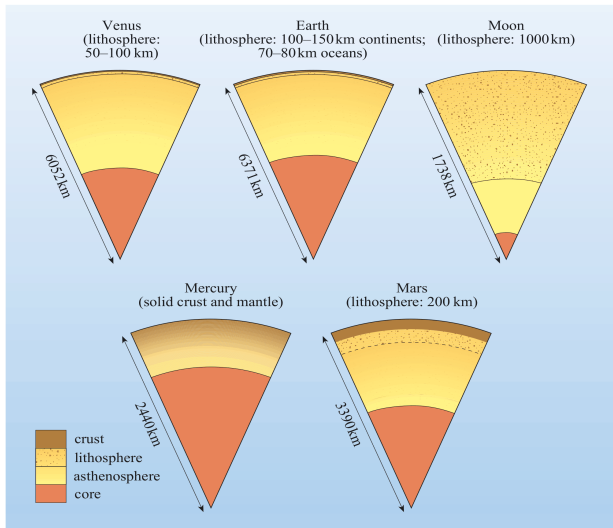
## Planète naine

Une planète naine est un corps céleste qui :

- ☞ est une planète SAUF
- ☞ qu'elle n'a pas nettoyé le voisinage de son orbite (accrétion par gravité)

# Structure interne des planètes telluriques et de la Lune

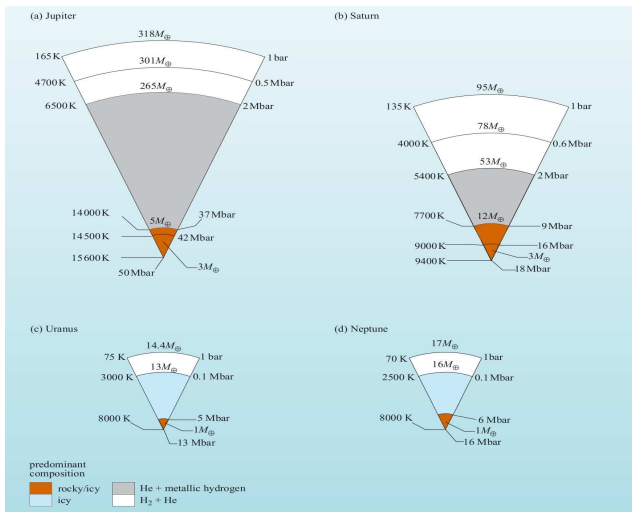
These diagrams are mainly based on model calculations. We only have well-constrained interior data (based on seismic studies) for the Earth and Moon.



**Figure 2.17** A comparison of lithospheric, and/or asthenospheric thicknesses, and core in the terrestrial planets and the Moon.

[McBride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

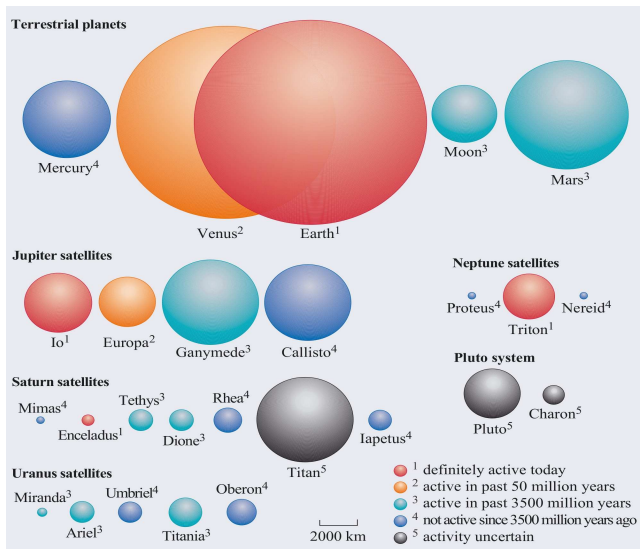
# Structure interne des géantes gazeuses



[McBride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

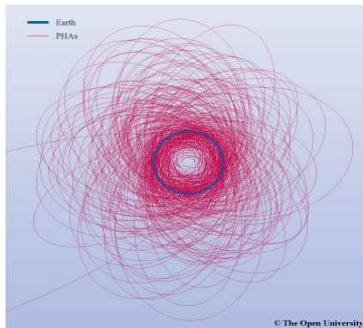
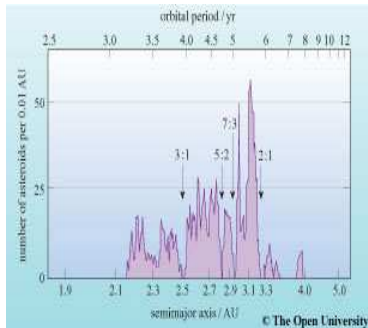


# Surface altering activity



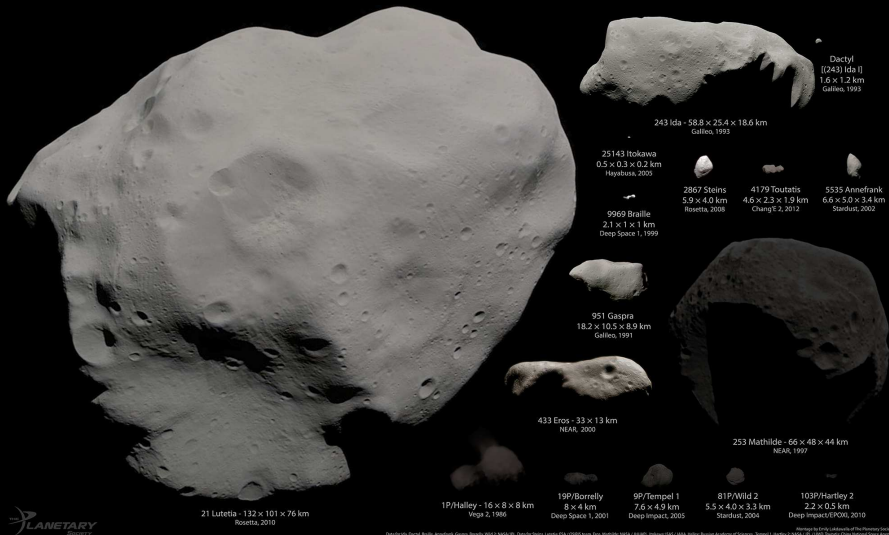
[McBride and Gilmore, An Introduction to the Solar System, 2004]

# Astéroïdes



[McBride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

# Astéroïdes visités par des sondes spatiales hors Vesta

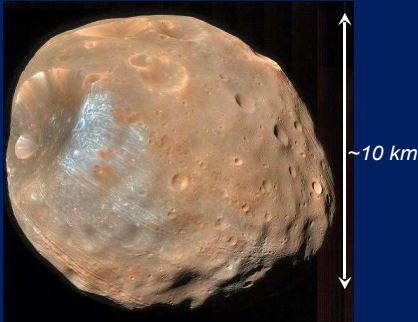


[Montage par E. Laddawalla (décembre 2012)]

# Satellites des planètes telluriques

Très peu de satellites

## Satellites de Mars



*Image de Phobos  
(mission Mars Express)*



*Image de Deimos  
(mission Mars Express)*

Composition minéralogique différente de celle de Mars

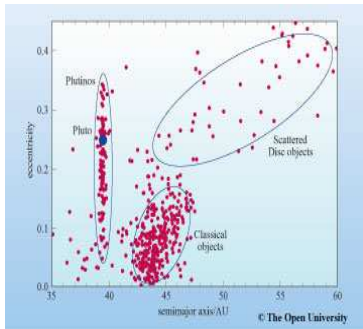
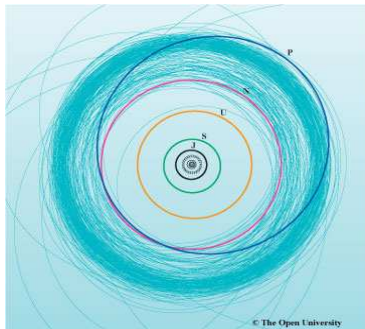
□ probablement des astéroïdes (type C) piégés par gravité autour de Mars

# Météorite de Chelyabinsk (février 2013)



[Photo prise par Uragan TT référencée dans l'article correspondant Wikipedia]

# Objets de la ceinture de Kuiper



[McBride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

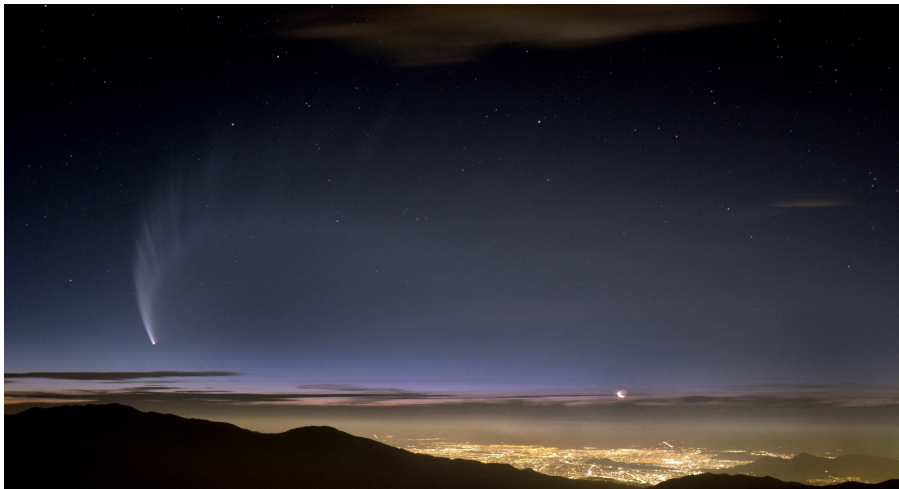
# Comète de Halley et tapisserie de Bayeux en 1066

Invasion de l'Angleterre par Guillaume Le Conquérant



[Cité dans de Pater et Lissauer, Planetary Sciences, 2010 d'après Beatty et al. 1999]

# Comètes



Credit: Stéphane Guisard

## Comet McNaught above Santiago, Chile

ESO Press Photo 05h/07 (19 January 2007)

This image is copyright © ESO. It is released in connection with an ESO press release and may be used by the press on the condition that the source is clearly indicated in the caption.

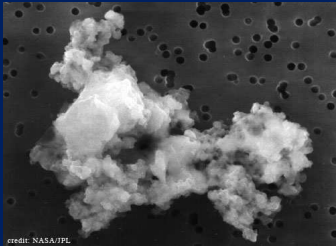




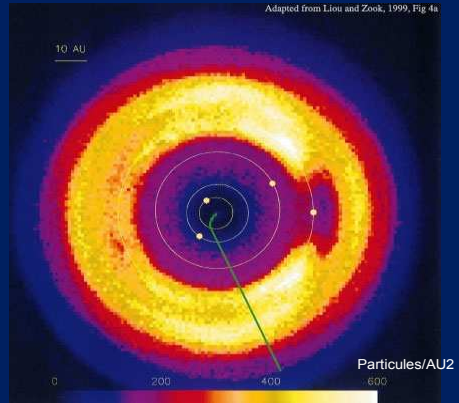
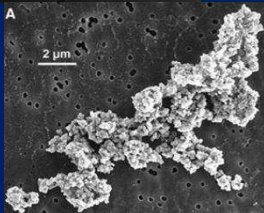
# Les poussières interplanétaires

Les poussières interplanétaires sont des grains de poussière qui voyagent dans le système solaire. Leur source peut être :

- le système solaire et ses objets
- l'environnement interstellaire



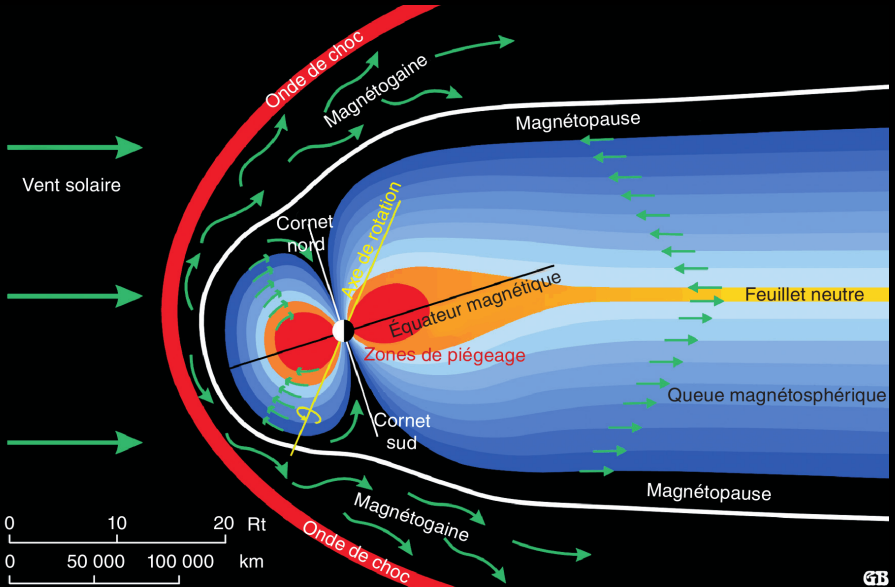
credit: NASA/JPL



# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 **Composition et formation du système solaire**
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - **Un peu sur la stabilité atmosphérique**
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Environnement ionisé de la Terre et flux de matière



[J. Liliensten et T. Dudok de Wit in *Le Climat à Découvert*, CNRS éditions, 2011]

## Les champs magnétiques planétaires

Les champs magnétiques des planètes ne sont pas dûs à des aimants permanents solides (type métal aimanté de boussole) car :

- la température des noyaux des planètes est supérieure à celle de la température de fusion des métaux
- le champ magnétique de la Terre est trop variable



le champ magnétique est donc généré (dynamique)

Seulement, le mécanisme de génération est aujourd'hui difficilement contraint.

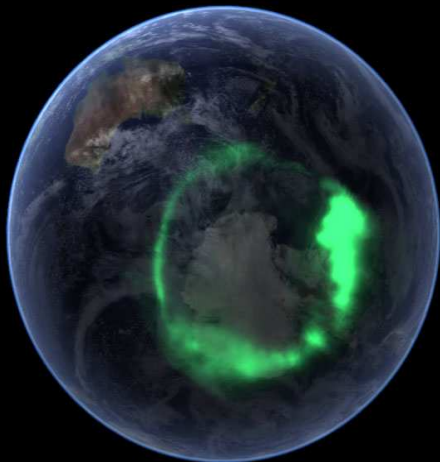
On sait qu'un fluide conducteur en mouvement génère un champ magnétique

□ on pense que le noyau métallique liquide des planètes à champ magnétique peut être en rotation rapide et générer ce champ (géodynamo)

Si cette hypothèse est vraie, cela signifie qu'une planète à champ magnétique :

- possède un gros noyau liquide
- que ce noyau est en grande partie métallique
- la planète a une vitesse de rotation rapide

# Aurores boréales sur Terre e.g. Aurora Australis



[Vue depuis le satellite IMAGE UV + visible]



[Vue depuis la Station Spatiale]

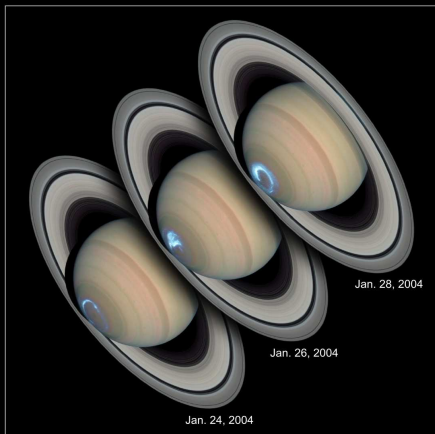
# Aurores boréales sur les planètes géantes



**Jupiter Aurora**

PRC98-04 • ST ScI OPO • January 7, 1998  
J. Clarke (University of Michigan) and NASA

HST • STIS • WFPC2



**Saturn Aurora**

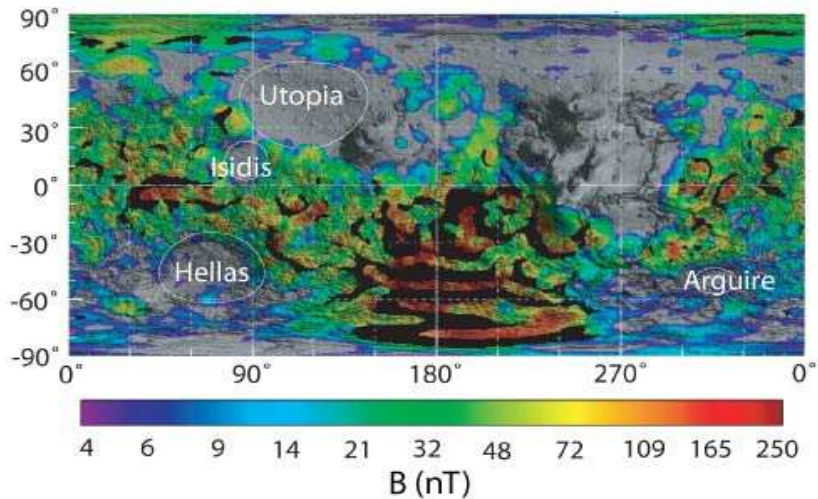
Hubble Space Telescope • ACS • STIS

NASA, ESA and J. Clarke (Boston University)

STScI-PRC05-06a

[Image composite HST visible et UV]

# Mars crustal magnetic field



[Lillis et al. 2008. MGS Electron Reflectometer data]

# Echappement simple si $V_{th} > V_e$

## Vitesse thermique $V_{th}$

Vitesse d'une molécule atmosphérique d'énergie cinétique  $\frac{3}{2}kT$

$$V_{th} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

## Vitesse d'échappement $V_e$

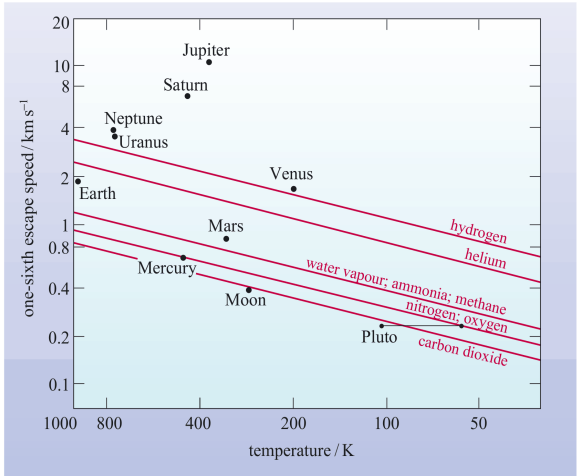
Vitesse d'une molécule permettant de se libérer de l'attraction de la planète.

$$V_e = \sqrt{\frac{2GM_P}{R+h}}$$



# Echappement atmosphérique

**Figure 5.4** Graph summarizing conditions of temperature (at the altitude from which molecules are able to escape) and escape velocity for which planetary bodies can retain the common gases hydrogen  $H_2$ , helium  $He$ , water vapour  $H_2O$ , ammonia  $NH_3$ , methane  $CH_4$ , nitrogen  $N_2$ , oxygen  $O_2$ , and carbon dioxide  $CO_2$  in their atmospheres for long periods. For bodies that do not have a substantial atmosphere, approximate surface temperatures are shown.



[McBride and Gilmour, An Introduction to the Solar System, 2004]

[?]

# Composition des atmosphères planétaires

Objet	T (K)	P (Atm)	H <sub>2</sub>	He	Ar	Ne	H <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
<i>Soleil</i>	5780*	-	0.89 (H)	0.11	10 <sup>-6</sup>	-	-	-	-	-	-
<i>Venus</i>	732	90	-	2x10 <sup>-5</sup>	7x10 <sup>-5</sup>	1.5x10 <sup>-4</sup>	2 x 10 <sup>-5</sup>	-	0.965	0.035	-
<i>Terre</i>	288	1	5.3x10 <sup>-3</sup>	5.2x10 <sup>-6</sup>	9.3x10 <sup>-3</sup>	1.8x10 <sup>-5</sup>	0 – 0.07	1.7x10 <sup>-6</sup>	3.5x10 <sup>-4</sup>	0.781	0.209
<i>Mars</i>	223	0.006	-	-	1.6x10 <sup>-2</sup>	2.8x10 <sup>-6</sup>	3x10 <sup>-4</sup>	-	0.953	0.027	1.3x10 <sup>-3</sup>
<i>Jupiter</i>	170*	-	0.90	0.10	-	-	5x10 <sup>-6</sup>	2.4x10 <sup>-3</sup>	-	-	-
<i>Saturne</i>	130*	-	0.96	0.004	-	-	5x10 <sup>-6</sup>	2x10 <sup>-3</sup>	-	-	-
<i>Uranus</i>	59*	-	0.85	0.15	-	-	-	-	-	-	-
<i>Neptune</i>	59*	-	0.85	0.15	-	-	-	3 x 10 <sup>-5</sup>	-	-	-
<i>Titan</i>	95*	1.6	2x10 <sup>-3</sup>	-	-	-	-	3 x 10 <sup>-2</sup>	-	0.82	-

T,P : température et pression à la surface

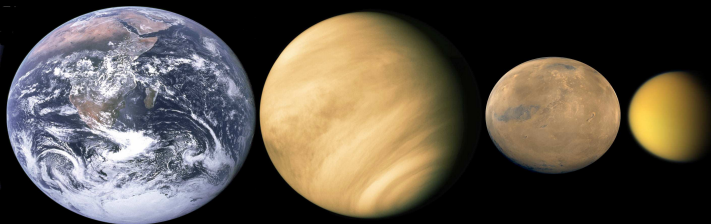
\* température au niveau de pression P = 1 atm

[Cours de F. Codron, LMD]

# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Planètes telluriques (ayant une atmosphère substantielle)

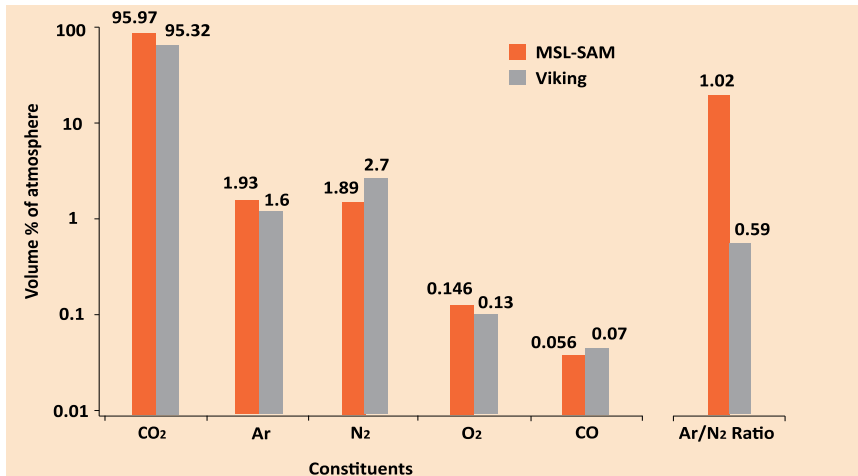


	<b>Vénus</b>	<b>Terre</b>	<b>Mars</b>	<i>Titan</i>
$d$ (UA)	0.72	1	1.52	9.55
$a$ (km)	6052	6378	3394	2575
$g_{\text{surface}}$ ( $\text{m s}^{-2}$ )	8.86	9.81	3.72	1.35
$T_{\text{surface}}$ (K)	730	288	220	95
$\Omega$ ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )	0.03	7.3	7.1	0.46
$\mu$ ( $\text{g mol}^{-1}$ )	43.4	28.9	43.3	27.8
$c_p$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$ )	0.85	1.00	0.84	1.04

# Plan

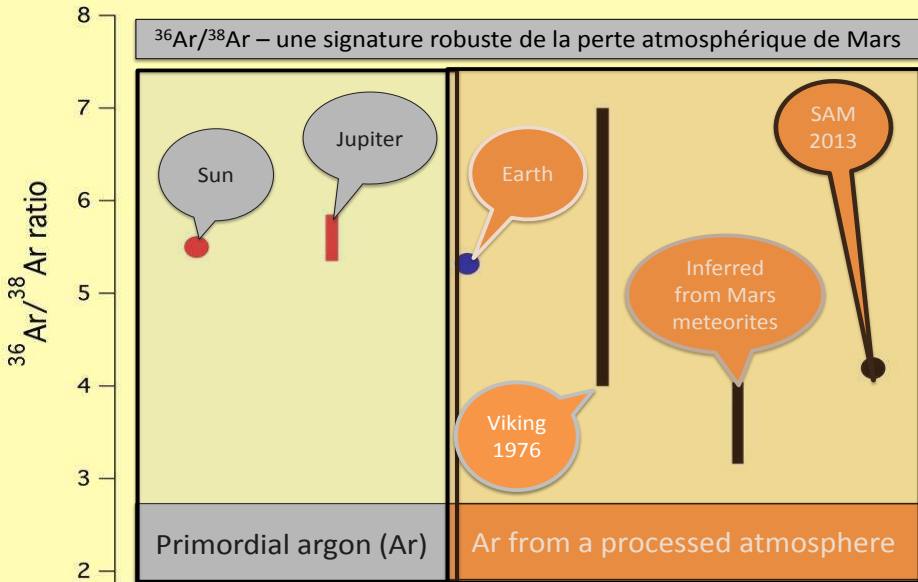
- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Highlight 1 : composition atmosphérique martienne

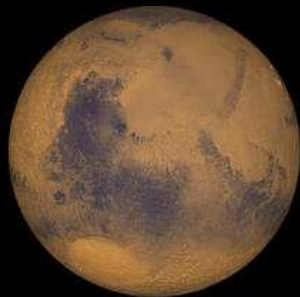
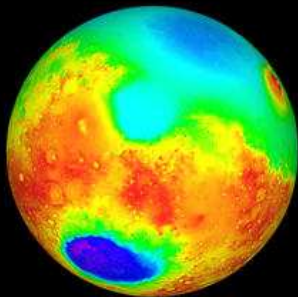


**<sup>40</sup>Ar/N<sub>2</sub> est utile pour évaluer le degré de mélange entre les composants gazeux internes et les volatiles atmosphériques des météorites martiennes**

$^{36}\text{Ar}/^{38}\text{Ar}$  – une signature robuste de la perte atmosphérique de Mars



# Propriétés de surface





# Martian northern polar cap

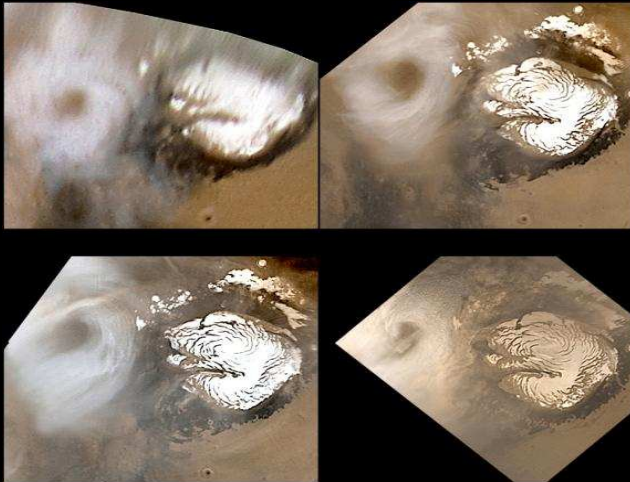


[MGS/MOC visible image]



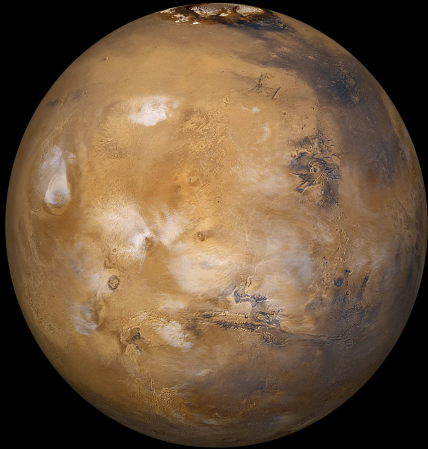
[HRSC visible image (3D-projected)]

# Weather systems near polar caps

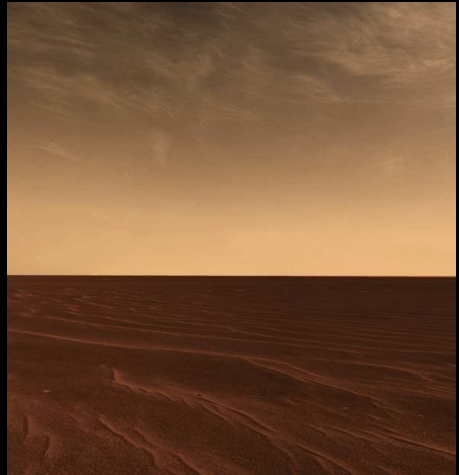


[Observations MGS/MOC à 4 années distinctes]

# Sur Mars, de fins nuages de glace d'eau

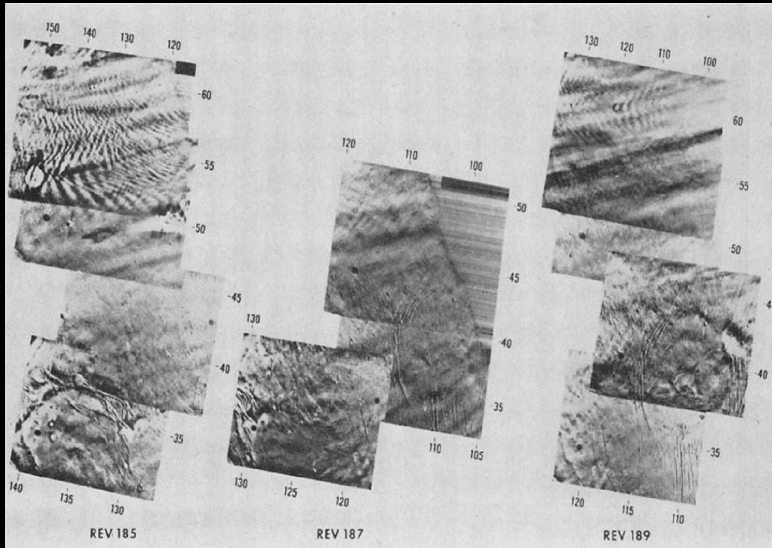


[Mars Global Surveyor, 2002]



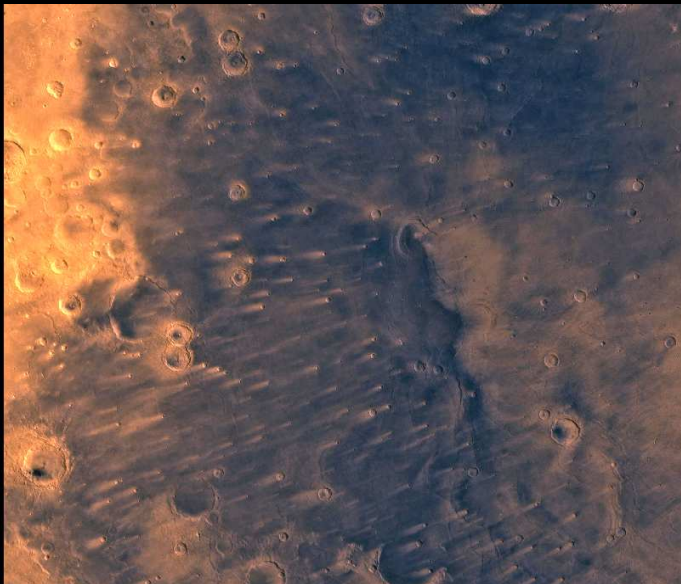
[Mars Opportunity panorama, 2006]

# GWs are ubiquitous on Mars e.g. Mariner 9 images



[Briggs and Leovy, BAMS 1974]

# Streaks et vents de grande échelle

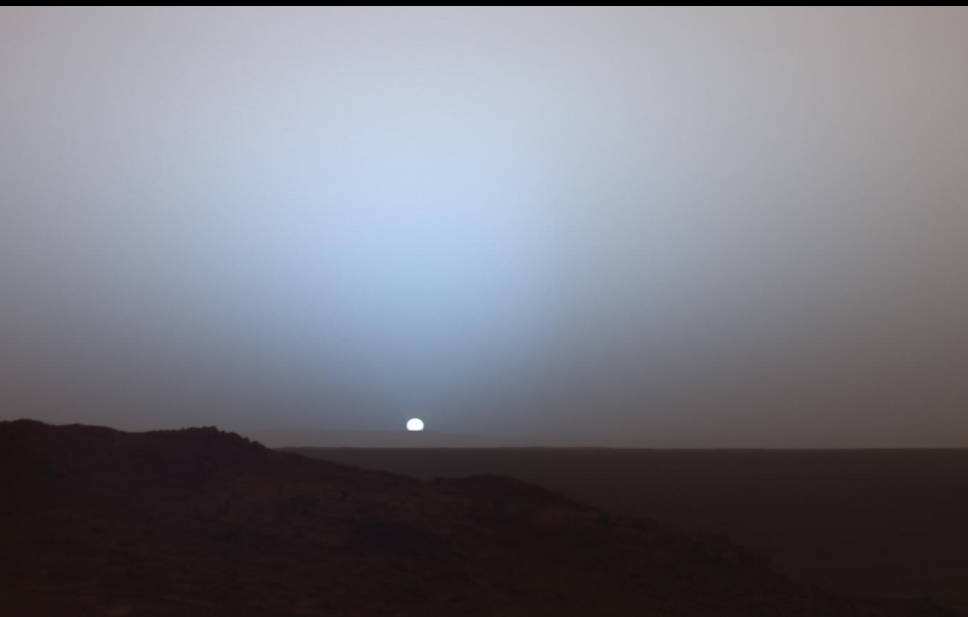


# Coucher de soleil martien

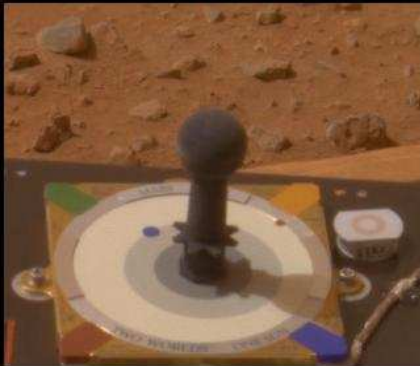


[Image par Pancam à bord de Spirit 2005 (référence PIA07997)]

# Coucher de soleil martien



# Le cycle des poussières sur Mars : Accumulation



**Spirit sol 9 (Jan. 11, 2004)**

**Spirit sol 357 (Jan. 3, 2005)**



[Pancam on Spirit rover PIA07303]



# Nettoyage du rover Spirit ! Images prises à 10 jours d'intervalle

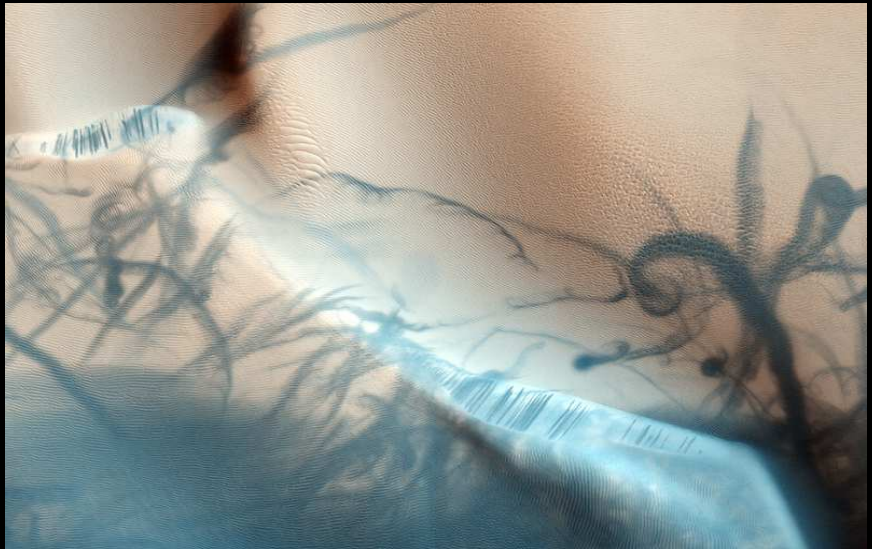


[Pancam on Spirit rover PIA07492]

# Dust devils observed by Spirit

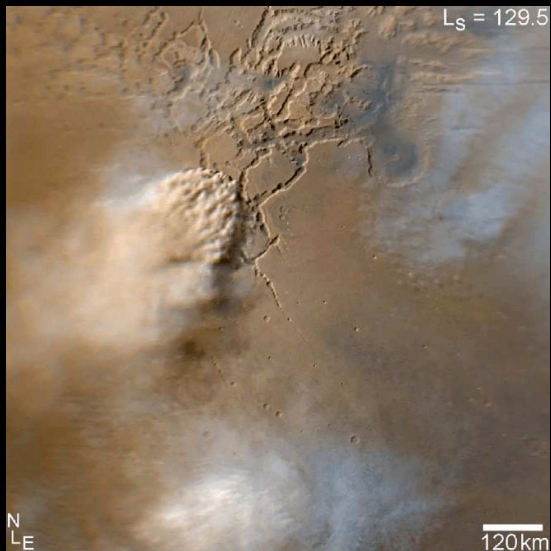


# Graffitis martiens ! Champ de dunes Arabia Terra



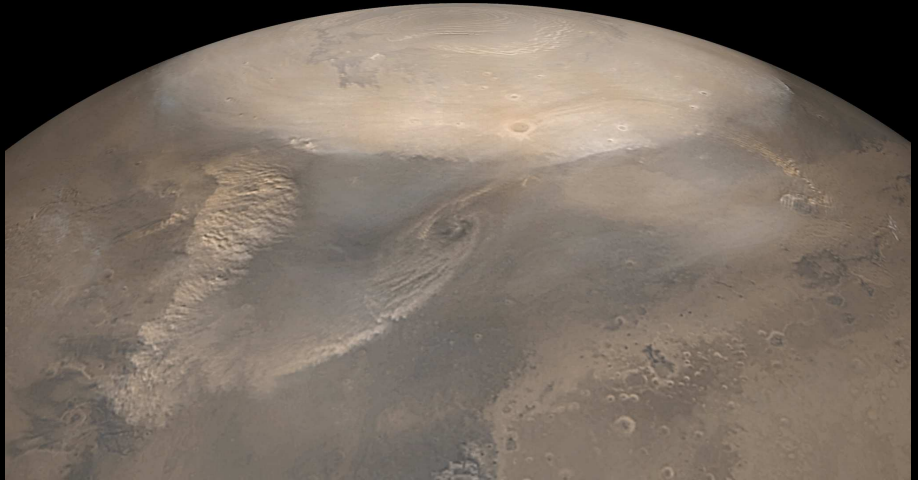
[HiRISE, Mars Reconnaissance Orbiter, 2009]

# Regional dust storm



[Malin et al. Icarus 2008]

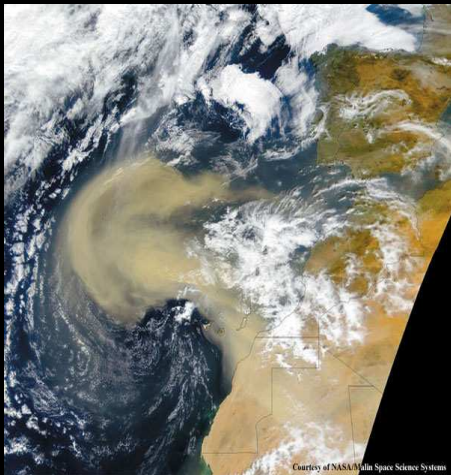
# Fronts poussérieux et ondes baroclines



[Image MOC sur Mars Global Surveyor 2002 (printemps nord martien)]

# Tempêtes de poussière

Terre



Courtesy of NASA/Malin Space Science Systems

Mars



Courtesy of NASA/Malin Space Science Systems

[Référence image PIA02807]

# “Global” dust storms

## Mars • Global Dust Storm



June 26, 2001



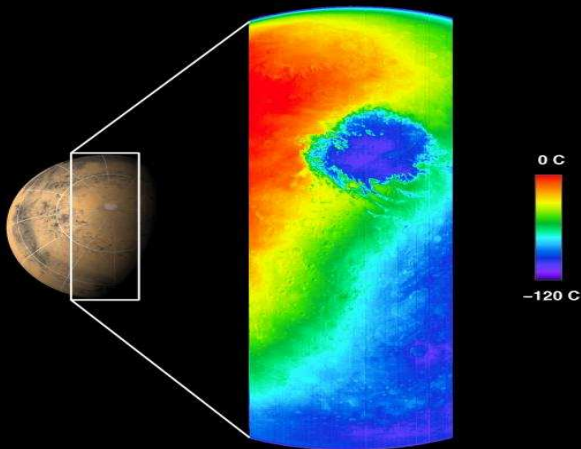
September 4, 2001

**Hubble Space Telescope • WFPC2**

NASA, J. Bell (Cornell), M. Wolff (SSI), and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • STScI-PRC01-31

# Le cycle du CO<sub>2</sub> sur Mars

Illustration: calotte polaire saisonnière sud de CO<sub>2</sub> à la fin du printemps

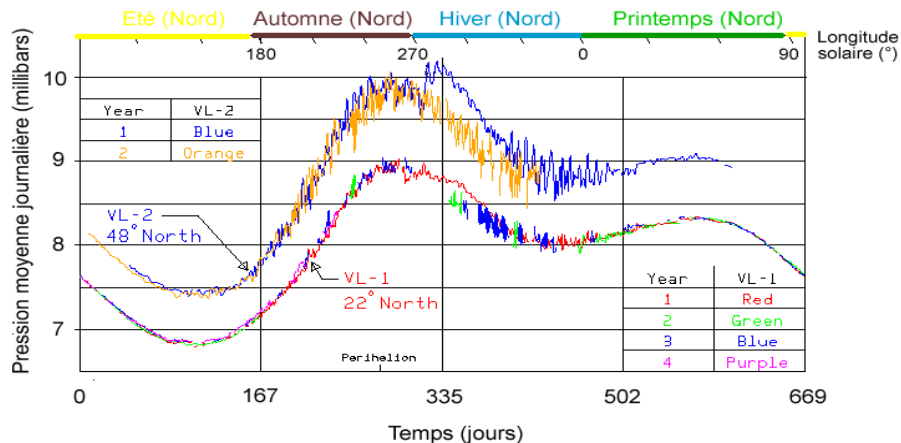


[First THEMIS image on board Mars Odyssey 2001 reference PIA03459]



# Observations de pression Viking

Chaque point est une moyenne sur une journée



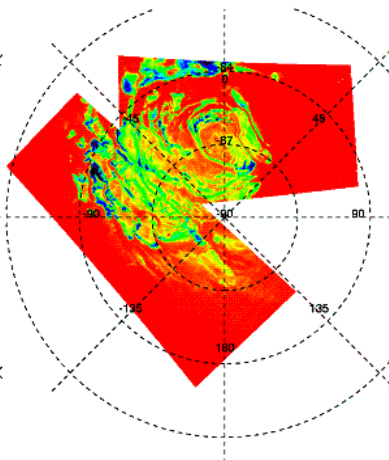
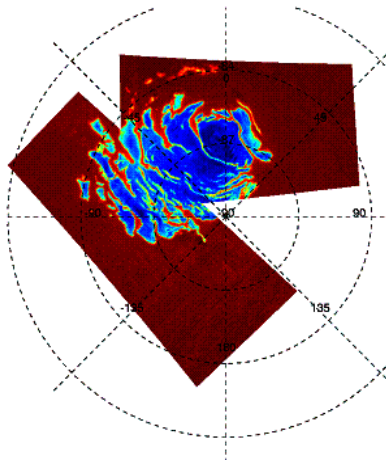
[emprunté au site PlanetTerre, d'après Hess et al., JGR 1981]

# Calotte australe permanente [ $\sim 300$ km de large]

Observations OMEGA  $\Rightarrow$  bleu = riche en glace

Glace de  $\text{CO}_2$  ( $2.28 \mu\text{m}$ )

Glace d'eau ( $1.50 \mu\text{m}$ )

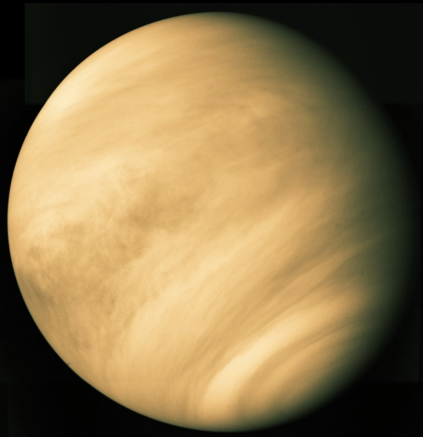


[Bibring et al. Nature 2004]

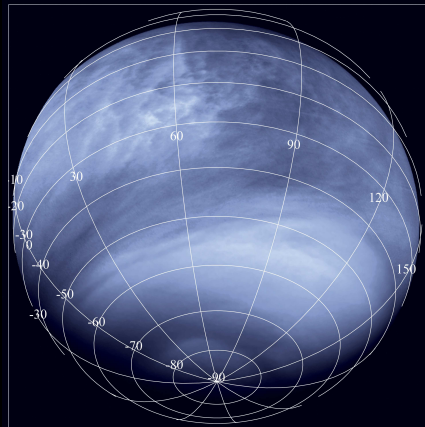
# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - **Vénus**
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Vénus



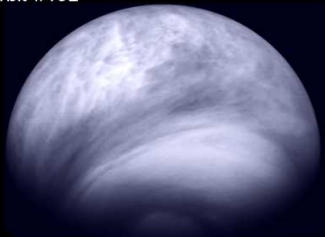
[Pioneer Venus, 1979]



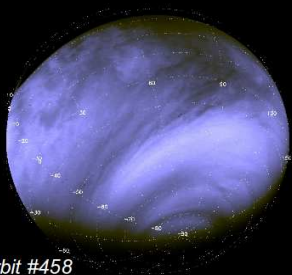
[Venus Express, 2006]

# Sur Vénus, d'épais nuages d'acide sulfurique

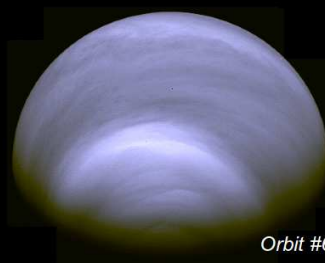
Orbit #462



Orbit #673



Orbit #458

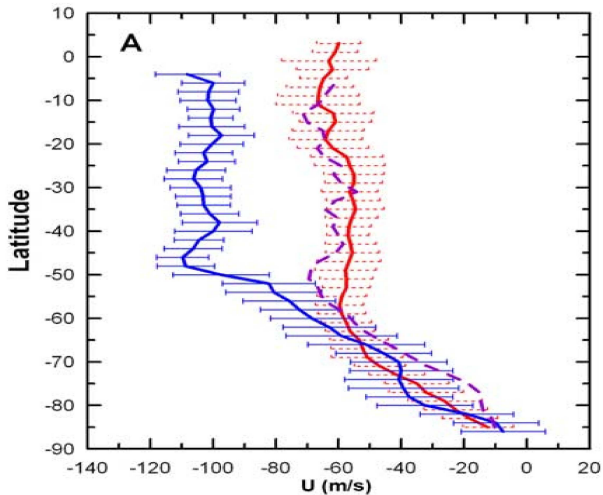


Orbit #679

[VMC canal UV sur Venus Express]

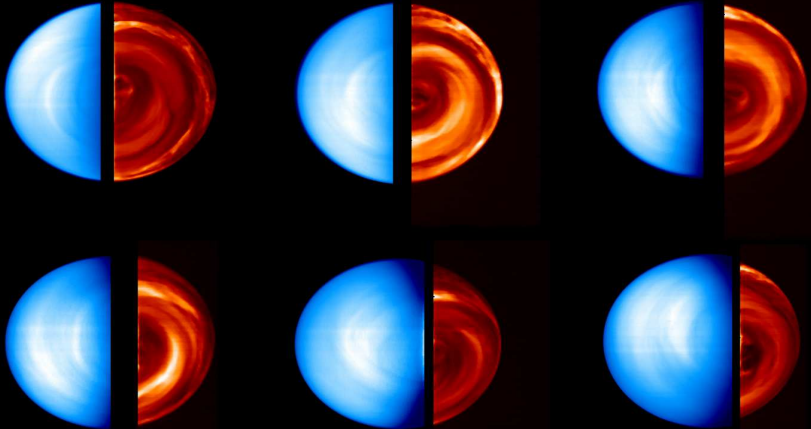
# Vents en super-rotation sur Vénus

Récentes observations Venus Express / VIRTIS cloud tracking



[Sanchez-Lavega et al., 2008]

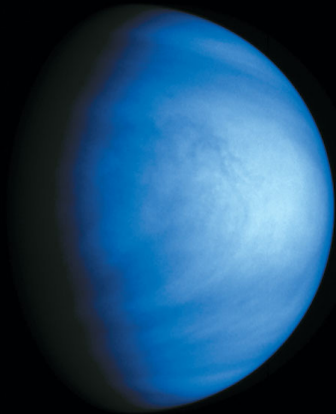
# Vortex polaire de Vénus



[Image composite Venus Express / VIRTIS : bleu  $\Rightarrow$  visible 380 nm côté jour, rouge  $\Rightarrow$  infrarouge 1.7  $\mu\text{m}$  côté nuit]

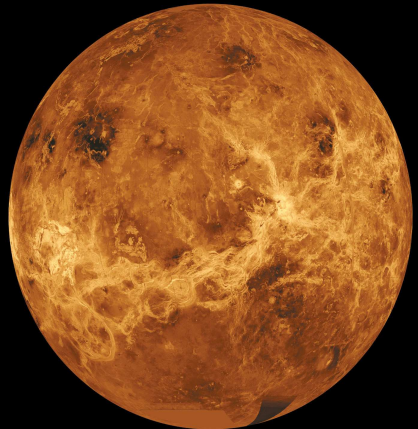
# Vénus

vue par Galileo (image visible  
fausses couleurs)



Courtesy of NASA

vue par Magellan  
(cloud-penetrating radar)



Courtesy of NASA



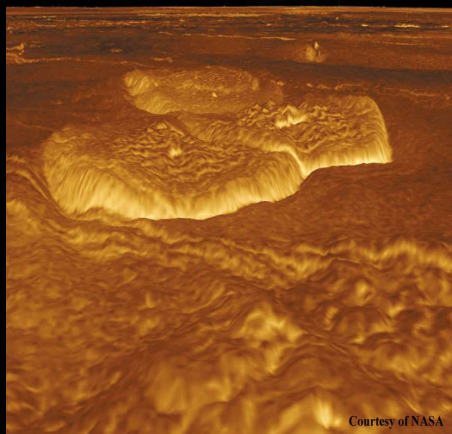
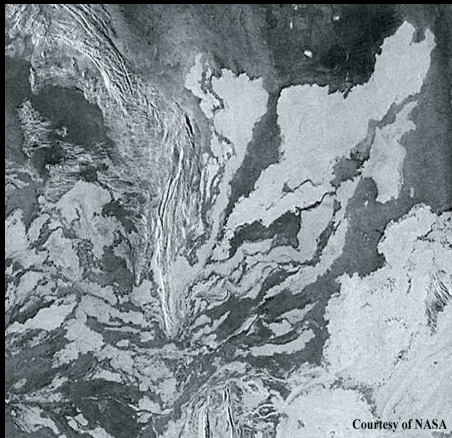
# A la surface de Vénus

$p = 90$  bars et  $T = 450^{\circ}\text{C}$

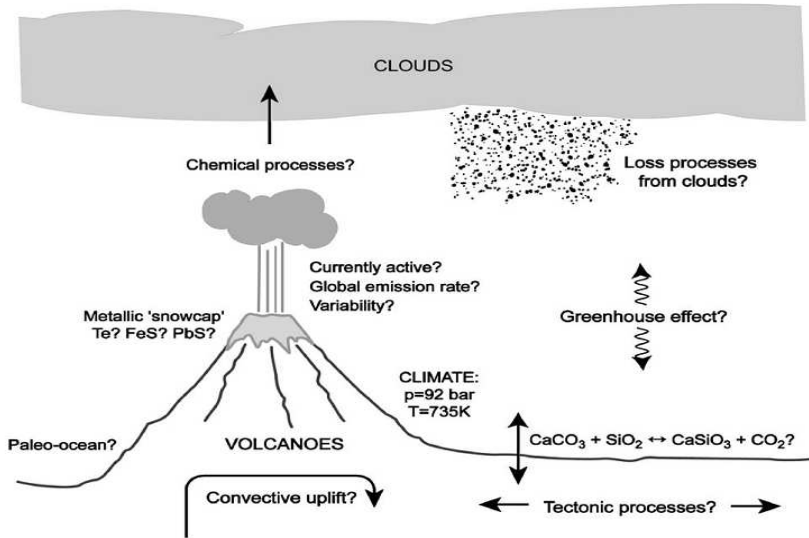


[Image capturée par Venera 13 en 1982]

# Traces de volcanisme sur Vénus



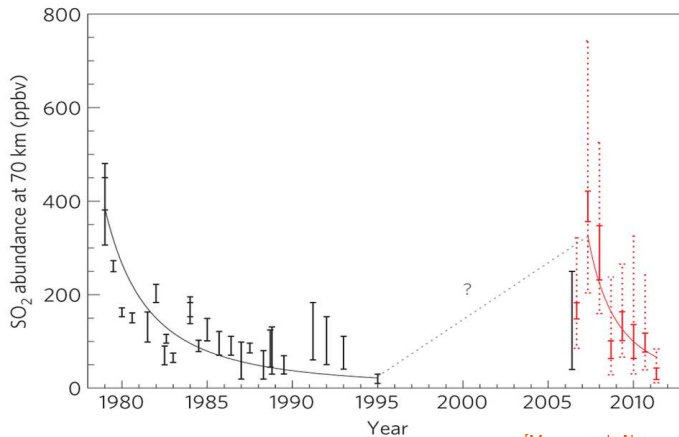
# Cycle du SO<sub>2</sub> sur Vénus



[Taylor et al. 2006]

# Variability of SO<sub>2</sub> in Venus' atmosphere

*We suggest that episodic sulphur dioxide injections to the cloud tops may be caused either by periods of increased buoyancy of volcanic plumes, or, in the absence of active volcanism, by long-period oscillations of the general atmospheric circulation.*

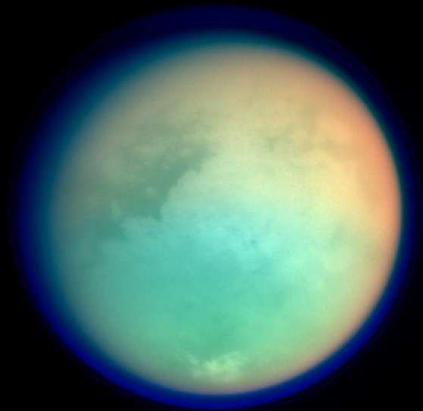


[Marcq et al. Nature Geoscience 2013]

# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 **L'atmosphère des planètes telluriques**
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Titan



[Cassini-Huygens, 2004]



[Cassini-Huygens, 2009; Stephan et al., 2010]

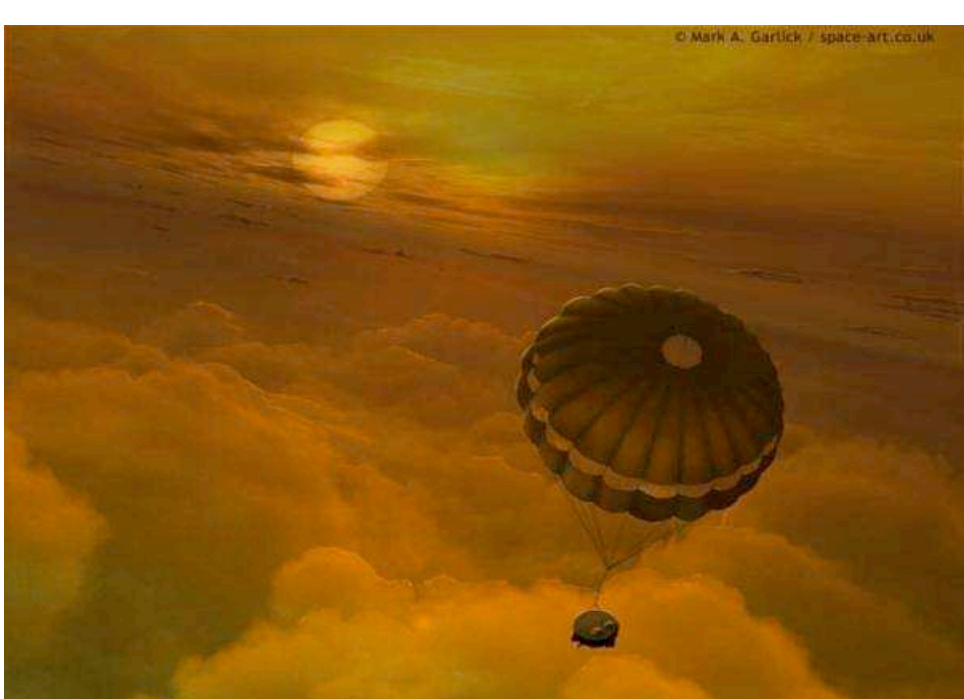
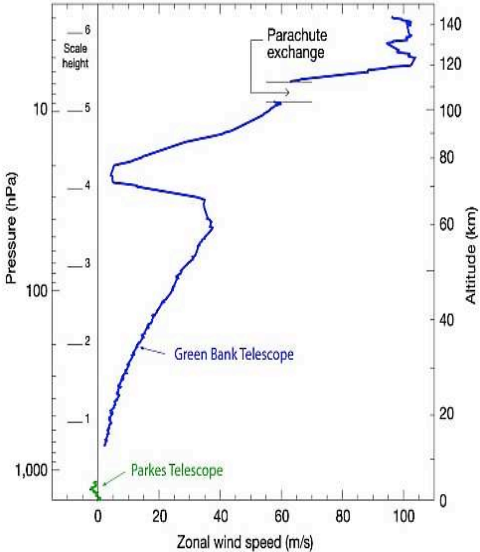
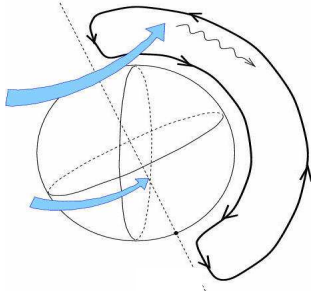


Image d'artiste, atterrisseur Huygens

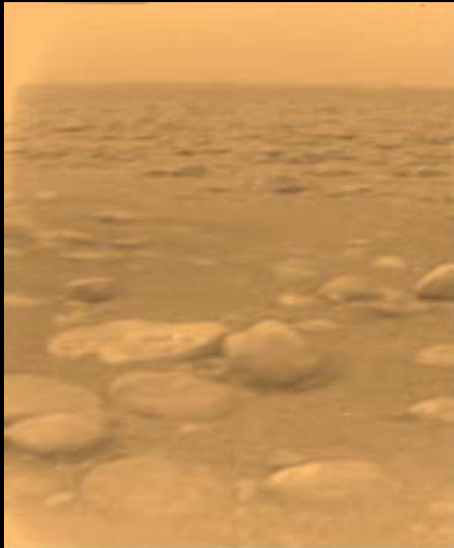
# Main characteristics of Titan's atmosphere

- Super-rotation
- Methane cycle
- One Hadley cell. Equinox reversal
- Radiative time scale  $\sim 2.5$  Titan years
  - Weak diurnal cycle ( $\Delta T_s < 1$  K)
  - Circulation  $\sim$  Mean circulation
- Pressure influenced by gravitational tides induced by Saturn





# Surface de Titan vue par la sonde Huygens 2005

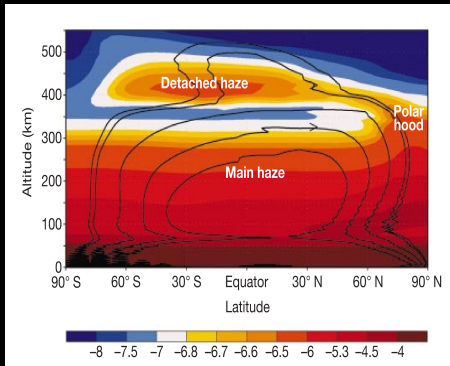


[Huygens Titan probe panorama, 2005]

# Titan : Origine dynamique de la couche détachée

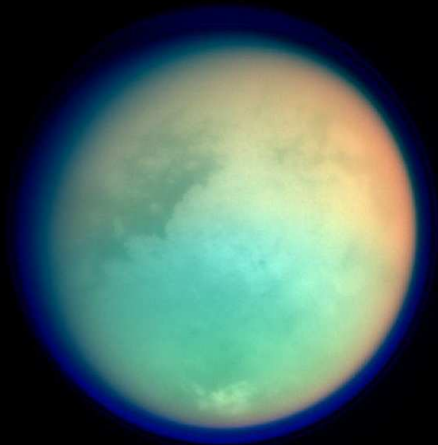


[Cassini Image PIA06090]

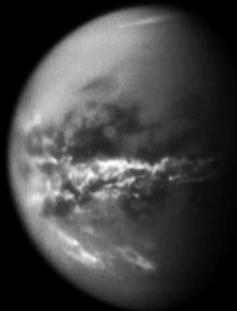


[Rannou et al., 2002]

# Sur Titan, nuages et cycle du méthane complet



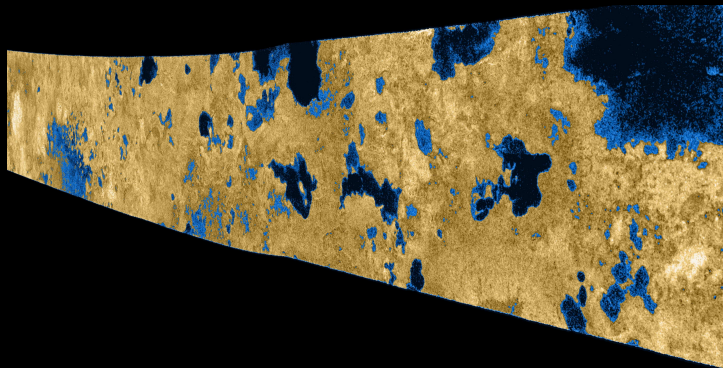
[Cassini-Huygens, 2004]



[Cassini-Huygens, 2010]

# Des lacs d'hydrocarbures sur Titan

Image radar Cassini. Les lacs sont sombres car rétrodiffusion limitée



[référence PIA09102]

# Plan

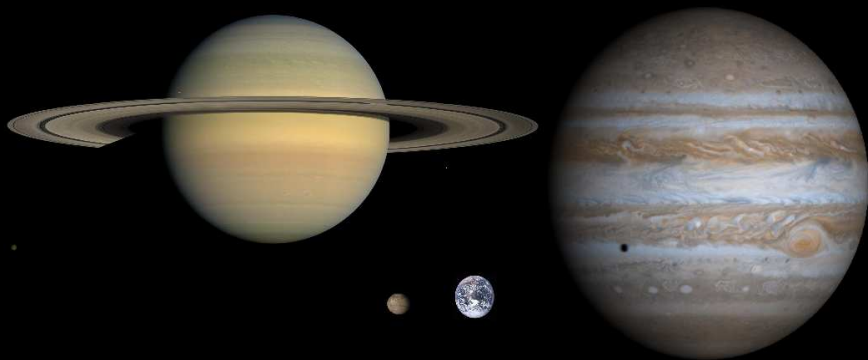
- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 **Les planètes géantes**
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Planètes géantes (absence de surface)



	Jupiter	Saturne	Uranus	Neptune
$d$ (UA)	5.2	9.55	19.22	30.11
$a$ (km)	71492	60271	25559	24766
$g$ ( $\text{m s}^{-2}$ )	23.1	9.1	8.7	10.9
$T_{\text{equivalente}}$ (K)	109.5	82.3	58.2	45.9
$T_{\text{effective}}$ (K)	124.4	95.0	59.1	59.3
$\Omega$ ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )	17.6	16.4	10.1	10.8
$c_p$ ( $\text{J K}^{-1} \text{ g}^{-1}$ )	12.6	14.1	11.0	11.2

# A geophysical approach for astronomical objects



# Les géantes gazeuses: courants-jets et tourbillons

Jupiter

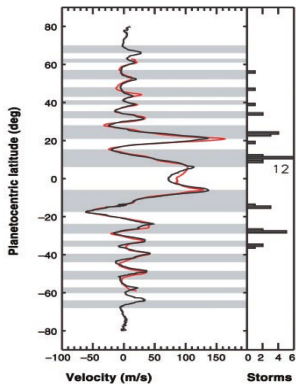


Saturne

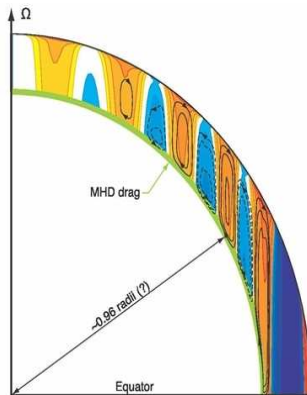




# Les planètes à rotation rapide : Jupiter, Saturne, ...



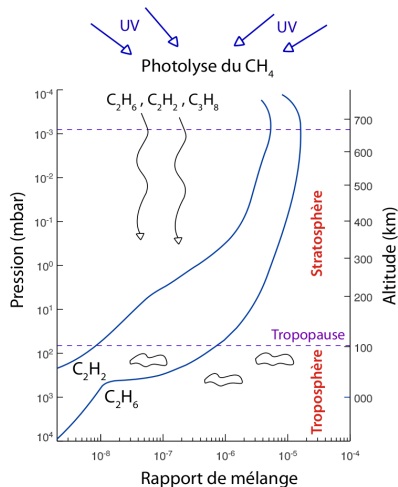
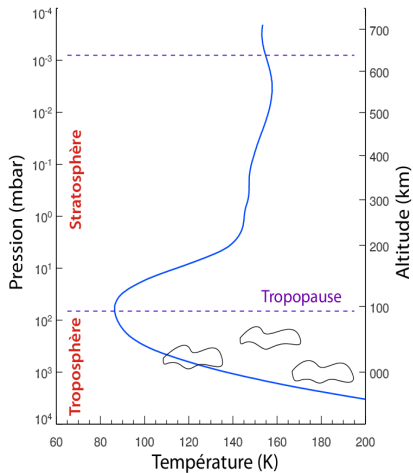
[Observations : Porco et al., 2003]



[Modélisation : Schneider and Liu, 2009]

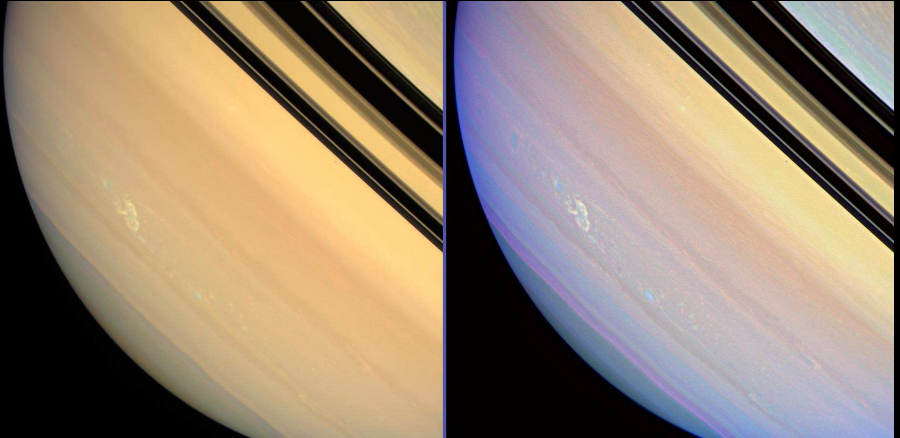
Attention aux analogies trop poussées : Neptune et Uranus sont des planètes à rotation rapide et pourtant elles ne montrent pas de structures en bande aussi marquées ! Les flux de chaleurs internes et les ondes entrent en compétition avec le chauffage différentiel.

# Saturn: thermal structure and hydrocarbons



[Courtesy of S. Guerlet]

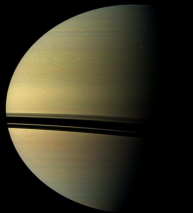
# Sur les géantes, des orages convectifs humides



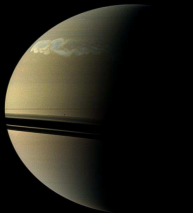
[Image de Saturne acquise par la sonde Cassini en 2007]

# Les orages géants sur Saturne *Great White Spots*

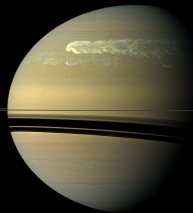
Dec 5, 2010



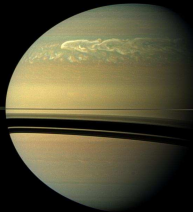
Jan 2, 2011



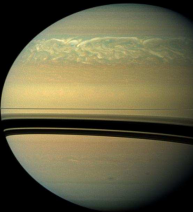
Feb 25, 2011



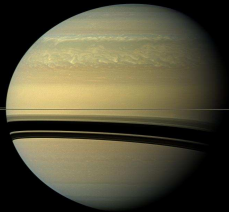
Apr 22, 2011



May 18, 2011



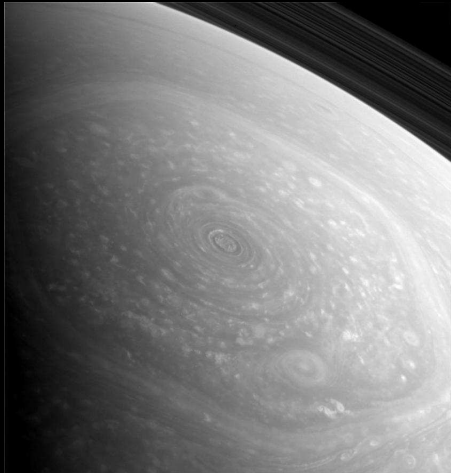
Aug 12, 2011



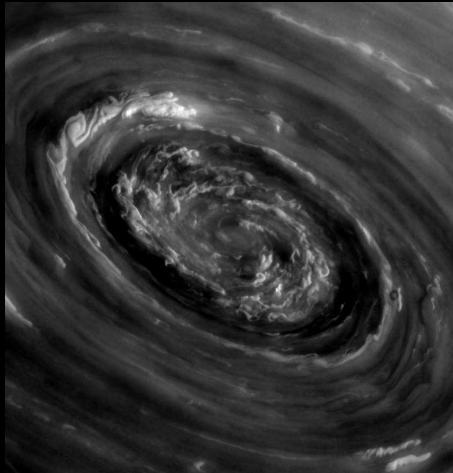
[Images Cassini-Huygens PIA14905]

# Saturn polar vortex

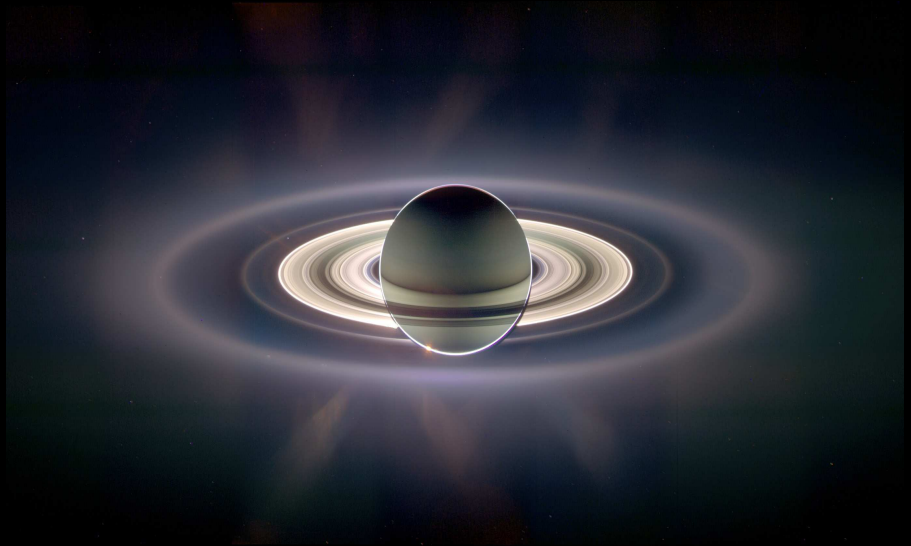
Hexagonal shape



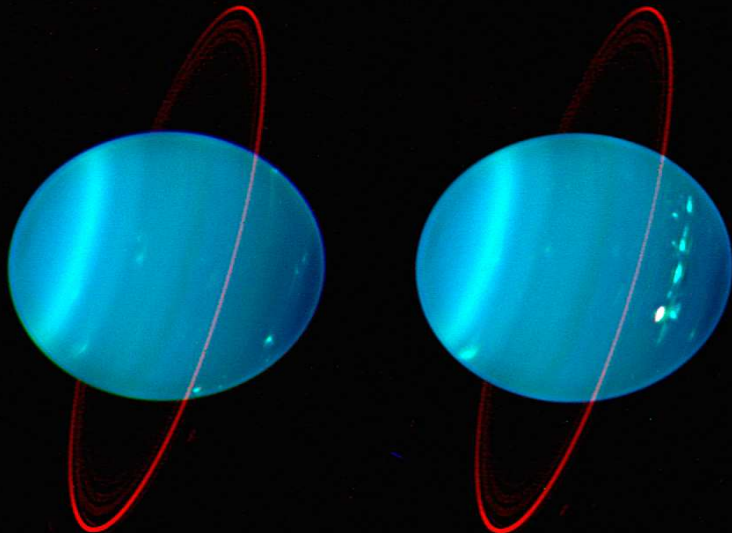
Turbulent center



# Saturne et ses anneaux (vue en éclipse par Cassini)



# Uranus et ses nuages orageux



# Neptune et son "Great Dark Spot" (image Voyager 2)



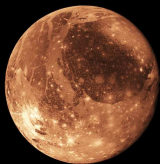
Courtesy of NASA



# Plan

- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Les plus grandes lunes et les plus petites planètes



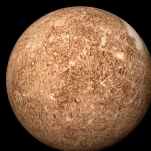
**Ganymede**

**5262 km**



**Titan**

**5150 km**



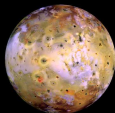
**Mercury**

**4880 km**



**Callisto**

**4806 km**



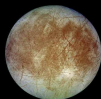
**Io**

**3642 km**



**Moon**

**3476 km**



**Europa**

**3138 km**



**Triton**

**2706 km**



**Pluto**

**2300 km**



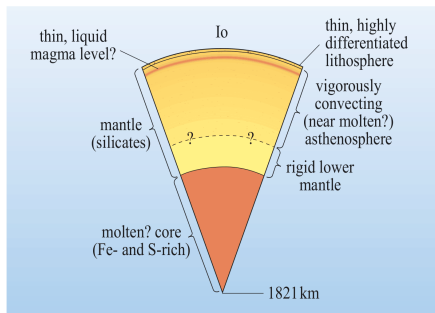
**Titania**

**1580 km**

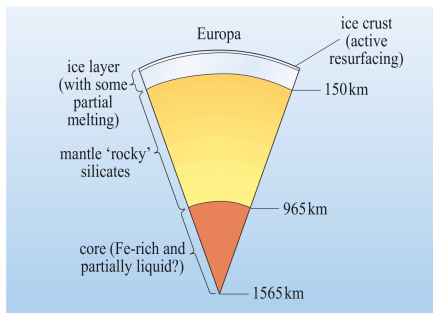
**The Largest Moons and Smallest Planets**

© Copyright 1999 by Calvin J. Hamilton

# Structure interne des satellites



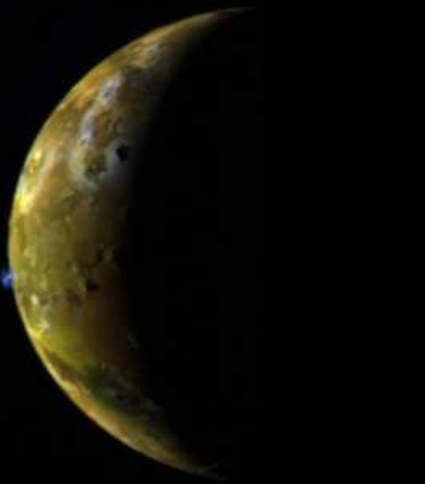
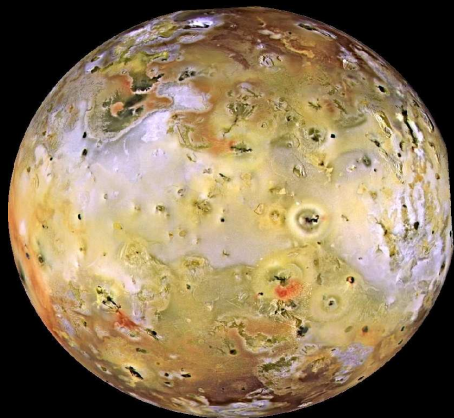
**Figure 2.26** Schematic model for the internal structure of Io. The planetary layering within Io is assumed to be highly differentiated because of continual partial melting resulting from the tidally generated high heat flow.



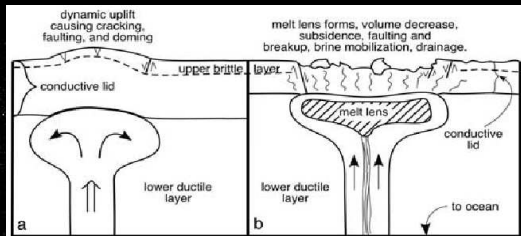
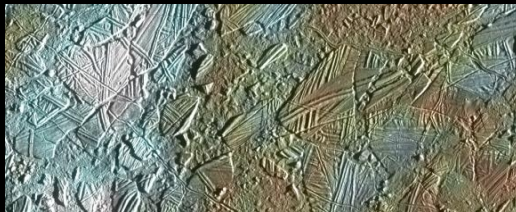
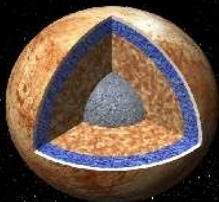
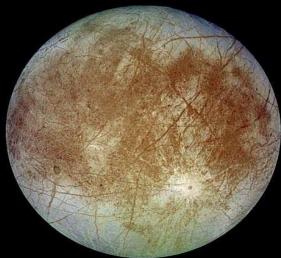
**Figure 2.27** Schematic model for the internal structure of Europa.

[Mcbride and Gilmour, *An Introduction to the Solar System*, 2004]

# Io et son volcanisme intense (images Galileo)



# Europe



Sotin et al. 2002

# Autres satellites de Jupiter

Ganymède



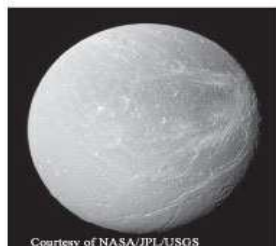
Courtesy of NASA

Callisto



Courtesy of NASA

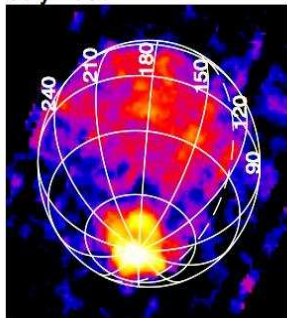
# Cryo-volcanisme sur Encelade et Dione



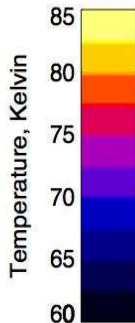
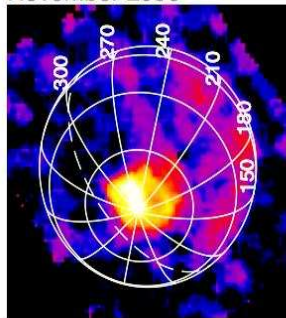
# Tidal forcing on Enceladus' south pole

Surface temperature 15 K than expected

July 2005



November 2006

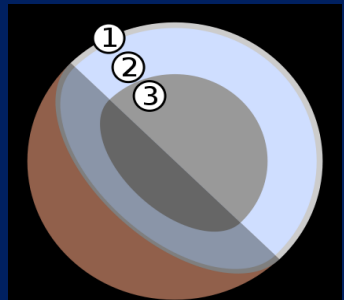
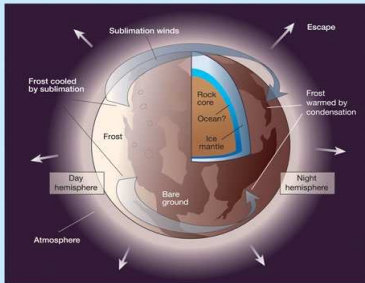


[Cassini Composite InfraRed Spectrometer map PIA09037]



# Pluton

Pluton possède une atmosphère très ténue (0,3 Pa au sol;  $T=43\text{K}$ ) composée de  $\text{N}_2$  et  $\text{CH}_4$



Structure interne théorique de Pluton

1. Glace d'azote
2. Glace d'eau (+eau liquide ?)
3. Roche

# Pluto and Triton

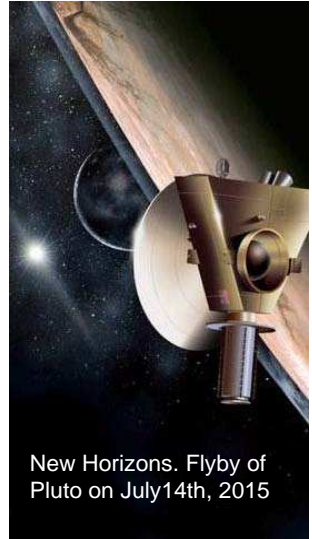
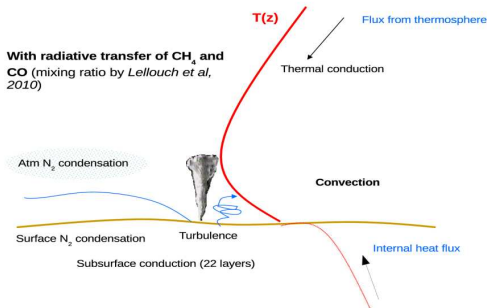
**Triton  $P_s=1.4 \text{ Pa}$  ( $\text{N}_2$ )** observed by Voyager 2 (1989)

First GCM : retro-super-rotation; observed winds explained  
Seasonal model for ices (run over 3000 years!)

**Pluton  $P_s= 2\text{Pa}$  ( $\text{N}_2 + 0,5\% \text{ CH}_4$ )**

First complete GCM  
Circulation , methane cycle, organic haze

**Preparation of the NASA New Horizons mission**→



# Plan

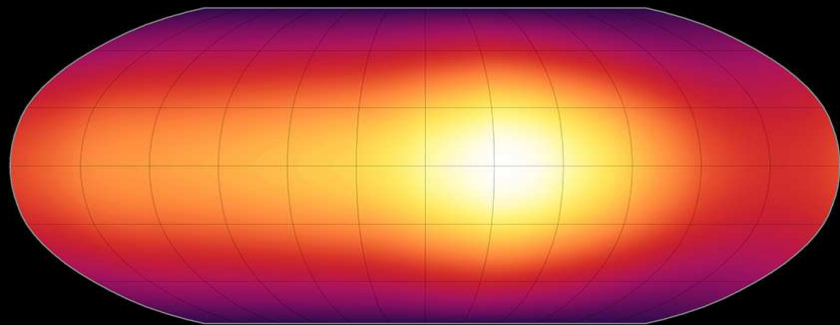
- 1 Préambule: l'atmosphère de la Terre
- 2 Introduction: l'exploration des planètes
- 3 Composition et formation du système solaire
  - Histoire et formation
  - Inventaire du système solaire et définitions
  - Un peu sur la stabilité atmosphérique
- 4 L'atmosphère des planètes telluriques
  - Mars
  - Vénus
  - Titan... une presque planète
- 5 Les planètes géantes
- 6 Les satellites des planètes géantes
- 7 Planètes extrasolaires

# Planètes extrasolaires

Hot Jupiters! ex: 189733b ... Super Earths! ex: Gliese 581d



# Champ de température sur 189733b



Sun-Facing Longitude

[Grid Spacing: 30°]

**Global Temperature Map for Exoplanet HD 189733b**

NASA / JPL-Caltech / H. Knutson (Harvard-Smithsonian CfA)

**Spitzer Space Telescope • IRAC**

ssc2007-09a