

# La structure de l'univers

## 4. Le système solaire

### Formation des planètes

Planètes: sous-produit naturel de la formation des étoiles

### Structure des planètes

Trois types d'objets: telluriques, ganymédiens, joviens

Température des planètes - Effet de serre

Rétention d'une atmosphère

Effets de marée: Anneaux planétaires - Limite de Roche

Les petits corps du système solaire:

astéroïdes

comètes & météores

ceinture de Kuiper

## La formation des planètes

### Sous-produits naturels de la formation des étoiles

Sect. 14.3

#### Résumé des principes généraux gouvernant la formation stellaire :

- 10 à 15 % de la masse galactique se trouve sous la forme de matière interstellaire  
(99% gaz : H I, H II, éléments plus lourds et molécules + 1% poussières)  
principalement dans le plan galactique (Voie lactée)
- cette matière interstellaire provient majoritairement de la matière éjectée par les étoiles en fin de vie
- une partie du nuage de matière interstellaire peut s'effondrer sous l'effet de sa propre gravité pour former de nouvelles étoiles
- cette contraction locale est déclenchée par
  - des ondes de choc ( $v > c_{son}$ ) de supernovae proches  
→ formation stellaire en cascade, à la périphérie des nuages moléculaires ( $> 10^4 M_{sun}$ )  
amas de ~ 10 - 1000 étoiles se forment ; « piliers de la création »
  - des ondes de densité (bras spiraux)
  - des collisions de galaxies

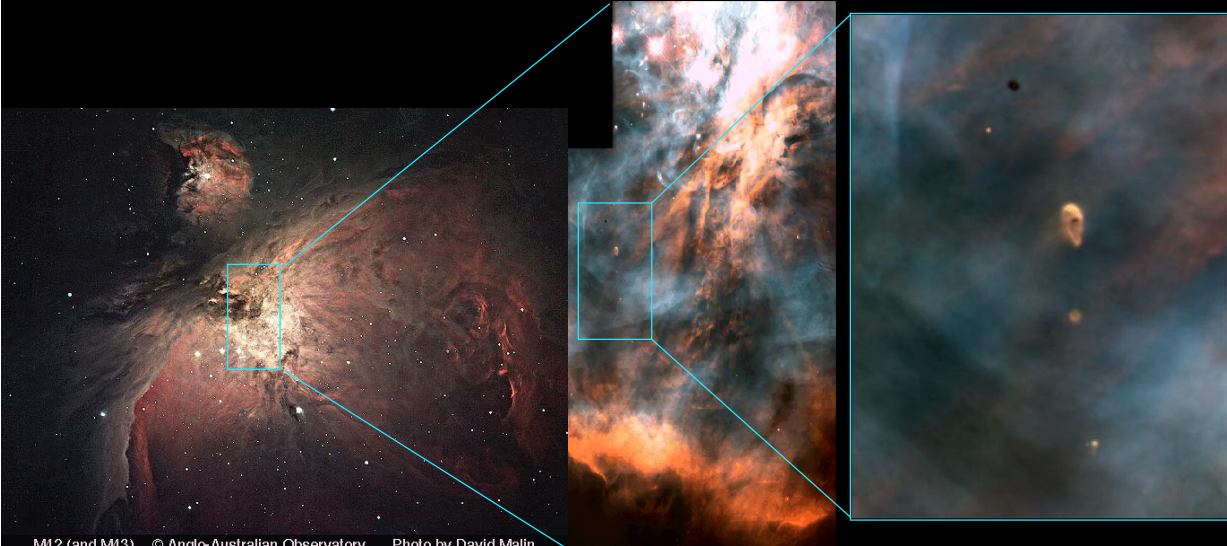


# La formation des planètes

Sous-produits naturels de la formation des étoiles

Sect. 14.3

Un exemple de région de formation stellaire:  
la nébuleuse d'Orion



disques protoplanétaires (*Proplyds*)

# La formation des planètes

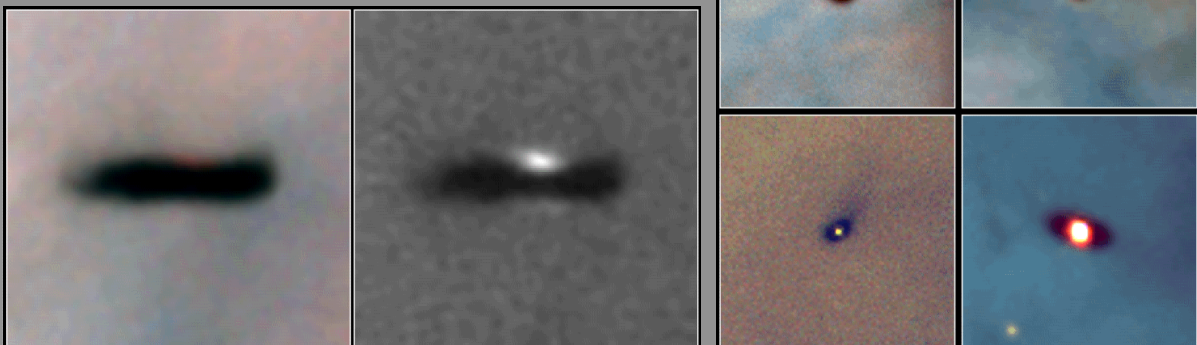
Sous-produits naturels de la formation des étoiles

Sect. 14.3

~1 million d'années après le début de la contraction du globule, celui-ci s'est transformé en disque  
(sous l'effet de la rotation initiale conduisant à un aplatissement suite à l'effet centrifuge).

Dans ce disque des planètes se forment, dans une course contre la montre entre

- la dispersion du disque sous l'effet de la pression de radiation de plus en plus forte
- l'agglomération de poussières/glaces en petits blocs d'abord, en planètes ensuite



## La formation des planètes

### Sous-produits naturels de la formation des étoiles

Sect. 14.3

~1 million d'années après le début de la contraction du globule, celui-ci s'est transformé en disque  
 (sous l'effet de la rotation initiale conduisant à un aplatissement suite à l'effet centrifuge).

Dans ce disque des planètes se forment, dans une course contre la montre entre

- la dispersion du disque sous l'effet de la pression de radiation de plus en plus forte
- l'agglomération de poussières/glaces en petits blocs d'abord, en planètes ensuite

Conséquences:

- les systèmes planétaires sont des systèmes plats  
 (toutes orbites ~dans le même plan)
- tous les mouvements de rotation s'effectuent dans le même sens
- il existe un lien entre la position des planètes dans le système et leur structure interne

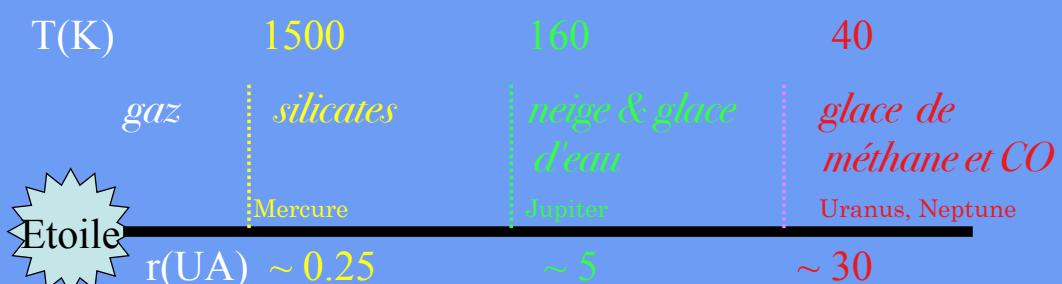
## La formation des planètes

### Sous-produits naturels de la formation des étoiles

Sect. 14.3



Variation de la température au sein d'un disque protoplanétaire:



## La formation des planètes Structure des planètes

Sect. 14.3

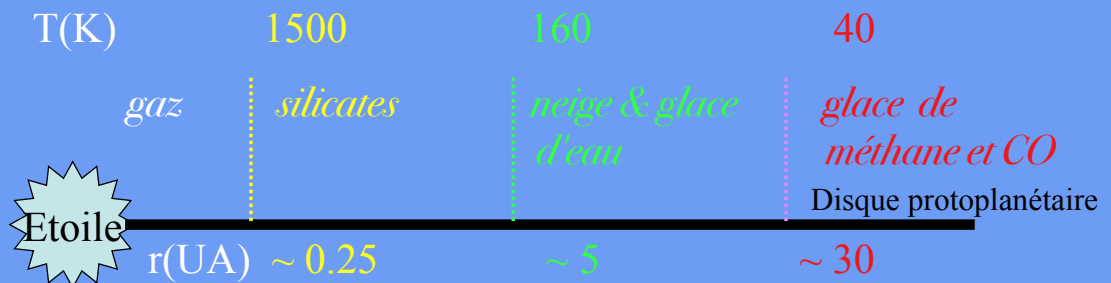
Pas de glace, seulement  
poussières et petits cailloux

- Noyaux de condensation  
moins gros
- Pas d'attraction du gaz par  
gravitation
- Les **planètes telluriques** se  
forment **lentement** par  
agglomération de cailloux  
dans des régions sans glace  
( $r < 5$  UA)
- **Pas d'enveloppe gazeuse**

Neige & glace d'eau  
= noyaux de condensation croissant  
rapidement

- attraction du gaz par gravitation
- Les **planètes géantes** se forment  
**rapidement**

au-delà de  $\sim 5$  UA ( $T \leq 160$  K):



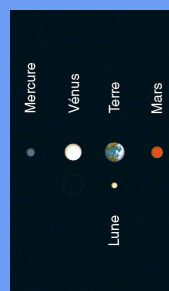
## La formation des planètes Structure des planètes

Sect. 14.3

Pas de glace, seulement  
poussières et petits cailloux

- Noyaux de condensation  
moins gros
- Pas d'attraction du gaz par  
gravitation
- Les **planètes telluriques** se  
forment **lentement** par  
agglomération de cailloux  
dans des régions sans glace  
( $r < 5$  UA)
- **Pas d'enveloppe gazeuse**

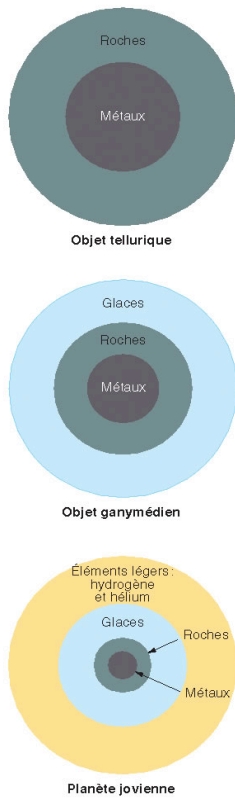
Crédit:  
<http://www.astro.virginia.edu/~mnc3z/images/astro121/Accretion.jpg>



# La formation des planètes

## Structure des planètes et satellites

Sect. 14.1



Différenciation des intérieurs planétaires:

Impacts de planétésimaux lors de la formation

- libération de chaleur
- fusion
- forme sphérique
- métaux denses se rassemblent au centre

Fig. 14.2

# La formation des planètes

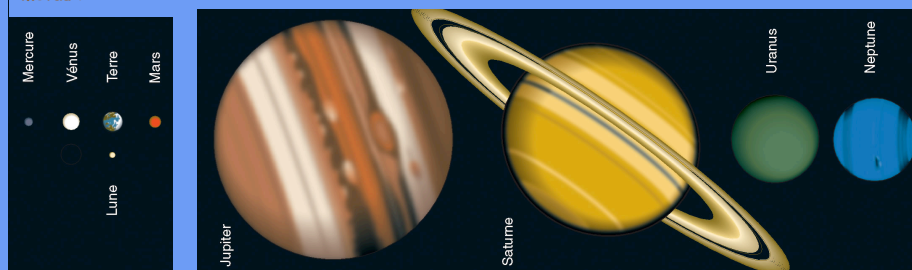
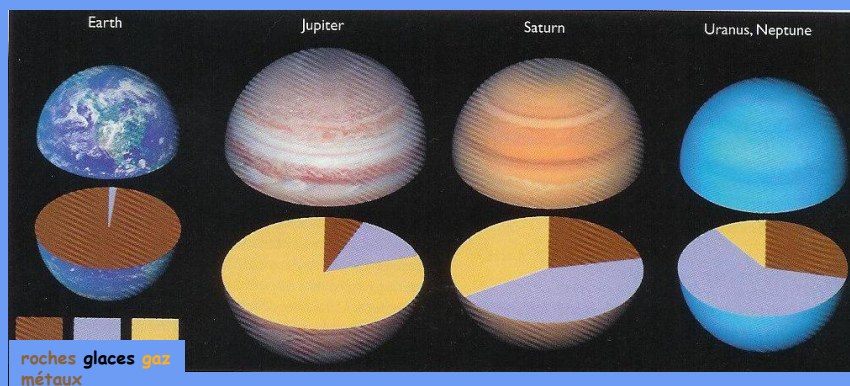
Sect. 14.3

Pas de glace, seulement poussières et petits cailloux

- Noyaux de condensation moins gros
- Pas d'attraction du gaz par gravitation
- Pas d'enveloppe gazeuse

Neige & glace d'eau

- = noyaux de condensation croissant rapidement
- attraction du gaz par gravitation
- Enveloppe gazeuse



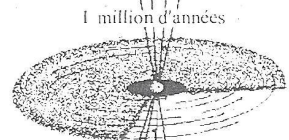
# La formation des planètes

## Séquence de formation

Sect. 14.3

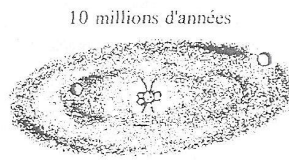


Disque très dense, enfoui dans un «cocoon»



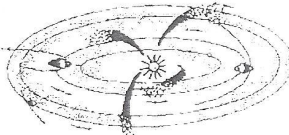
1 million d'années

Disque opaque observé en ombre chinoise



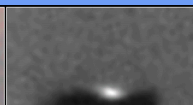
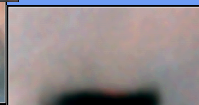
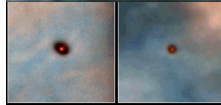
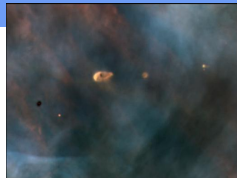
10 millions d'années

Les «jupiters» sont achevés



100 millions d'années

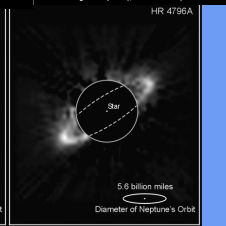
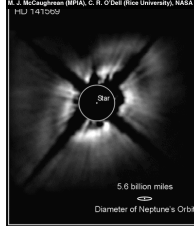
Disque de débris, les «terres» sont achevés



Protoplanetary Disks  
Orion Nebula  
PRC09-490 - ST ScI OPO - November 20, 1995  
M. J. McCaughan (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA  
MLJ 1-412099

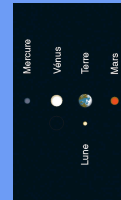
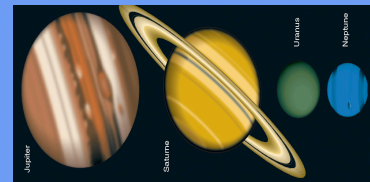
Edge-On Protoplanetary Disk  
Orion Nebula  
PRC09-490 - ST ScI OPO - November 20, 1995  
M. J. McCaughan (MPIA), C. R. O'Dell (Rice University), NASA

HST - WFPC2

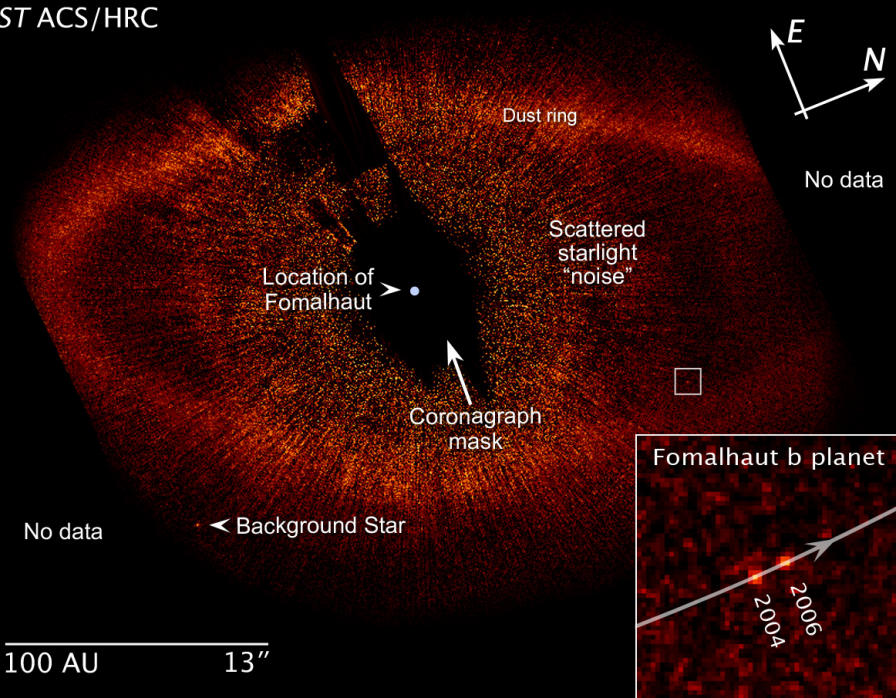
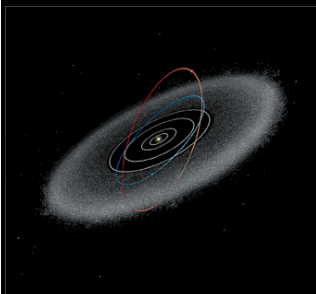


Dust Disks around Stars  
PRC09-03 - STScI OPO - January 8, 1999  
B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona), E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA

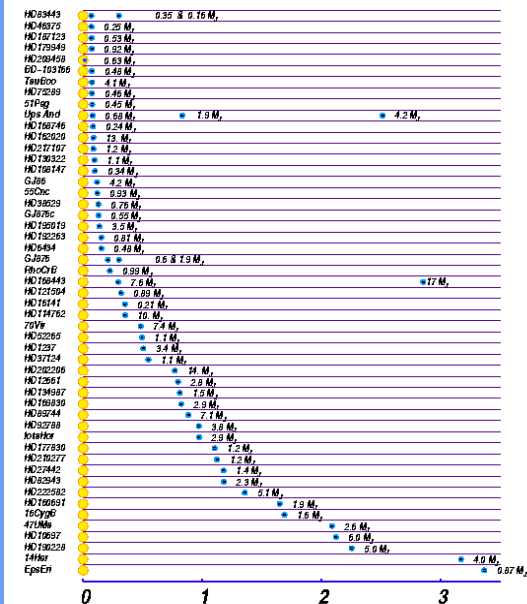
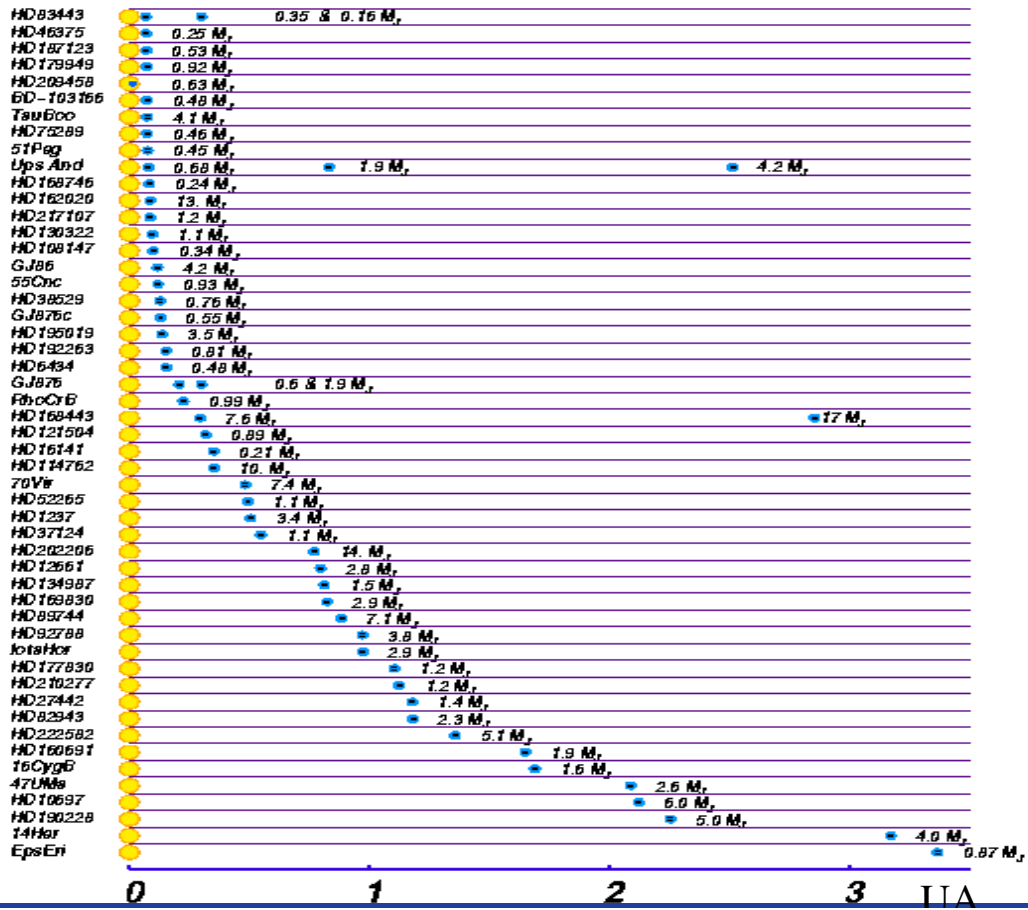
HST - NICMOS



### Fomalhaut : 25 a-1 Constellation du Poisson Austral HST ACS/HRC



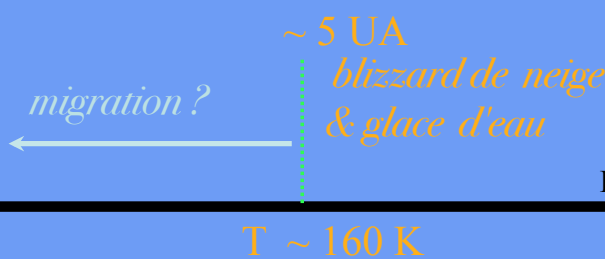
# EXOPLANETES



Sect. 14.3

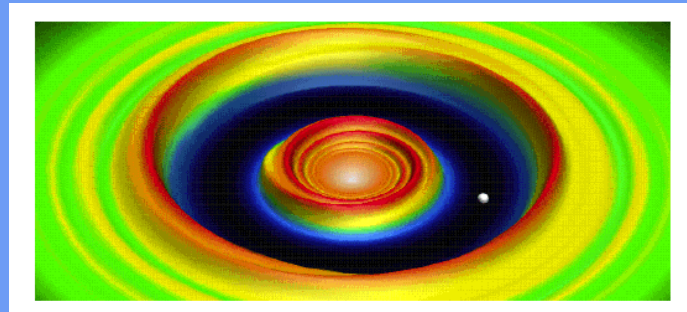
## Théorie révisée de formation de systèmes planétaires

Formation des planètes géantes à ~ 5 UA, dans le blizzard de neige, puis migration vers l'étoile?



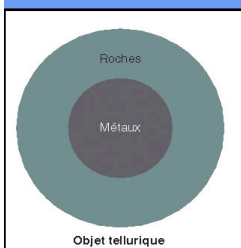
Disque protoplanétaire

## Théorie révisée de formation de systèmes planétaires



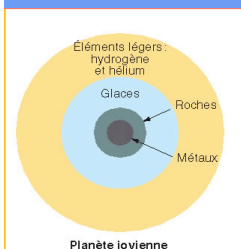
Un transfert de moment angulaire de la planète vers le disque peut conduire à la migration de la planète vers l'étoile  
 La **théorie détaillée** de ces processus sort du cadre de la présente leçon!

## La formation des planètes Trois types d'objets



Planètes telluriques

$R < 5 \text{ UA}$



Planètes géantes ou joviennes  $R > 5 \text{ UA}$

Fig. 14.2



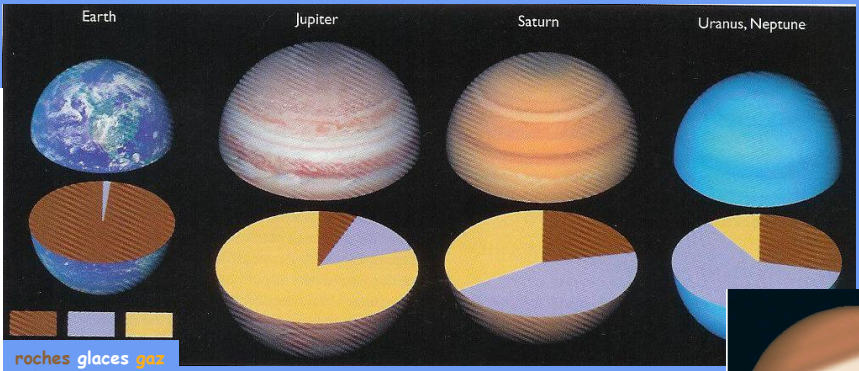
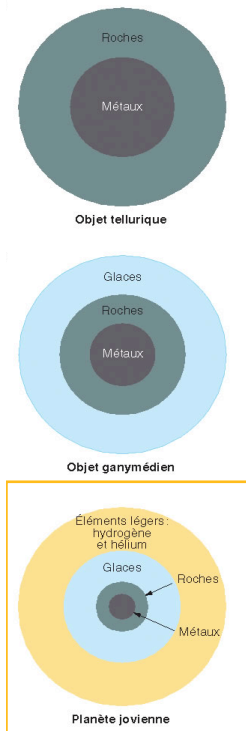
Fig. 12.3



# La formation des planètes

## Trois types d'objets

Sect. 14.1



roches glaces gaz métaux

**Planètes géantes (ou joviennes):**

- pas de surface solide/liquide
- enveloppe de gaz
- zone intermédiaire liquide
- cœur de glaces, roches et métaux

Masse volumique moyenne ~ 0.7 à 1.8 g cm<sup>-3</sup>

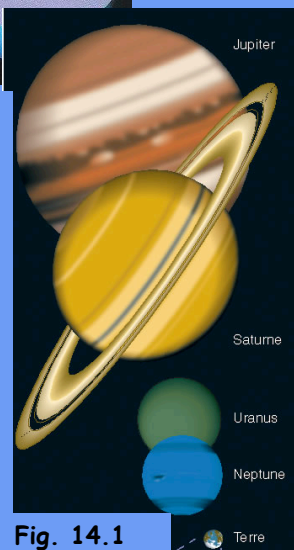


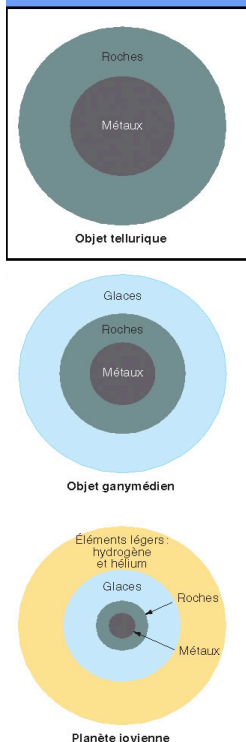
Fig. 14.1

Fig. 14.2

# La formation des planètes

## Trois types d'objets

Sect. 14.1



**Objets telluriques: (Planètes & satellites)**

- croûtes solides
- roches & métaux

Masse volumique moyenne ~ 3.3 à 5.5 g cm<sup>-3</sup>

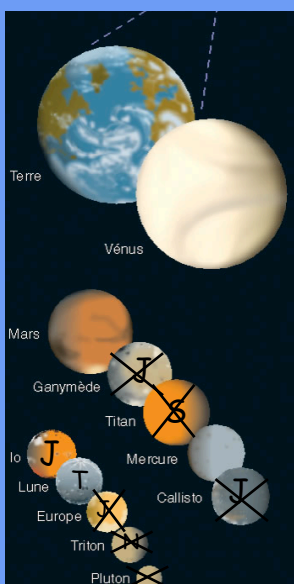


Fig. 14.2

Fig. 14.1

# La formation des planètes

## Structure des planètes et satellites

Sect. 14.1

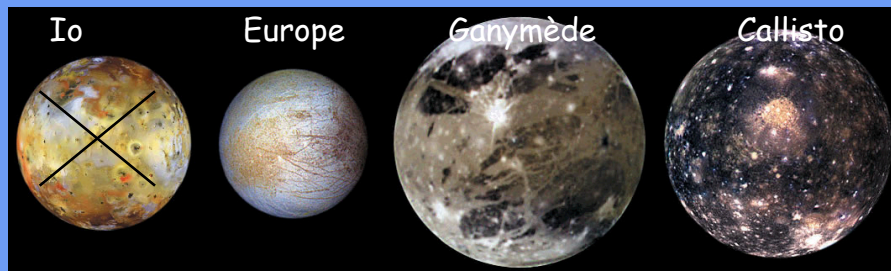
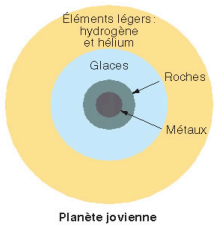
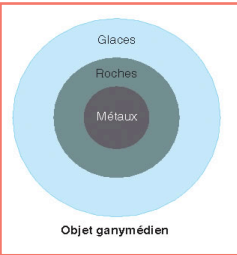
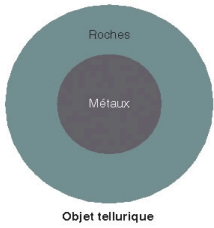


Fig. 13.3: Satellites galiléens de Jupiter



**Objets ganymédiens :**

- croûtes de glace
- cœur de roches & métaux

Masse volumique moyenne  
~ 1.9 g cm<sup>-3</sup>

Fig. 14.2

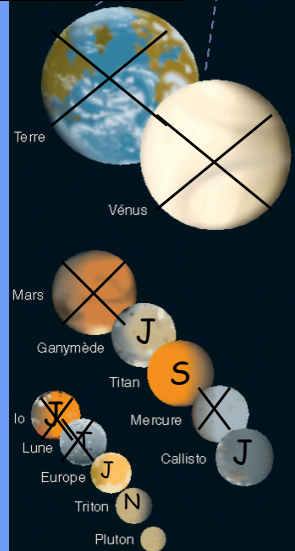
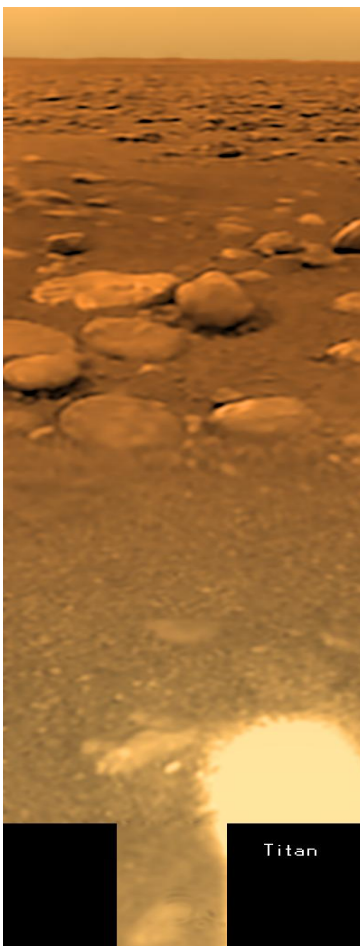


Fig. 14.1



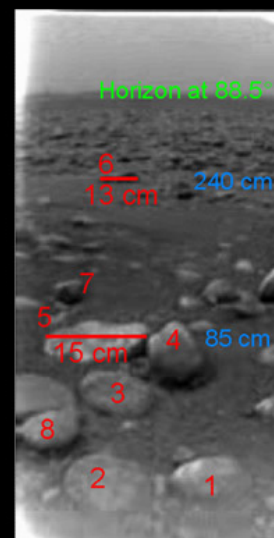
Titan



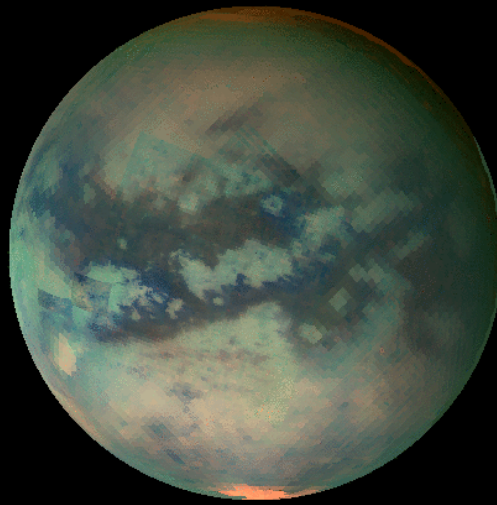
Moon at Similar Scale

Surface de Titan:  
Cassini - Huygens (14 janvier 2005)

Blocs de glace d'eau  
Sable de glace pilée  
Boue de méthane et hydrocarbures  
Nuages/pluie de méthane et éthane (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>)



La surface de Titan vue en infrarouge par la sonde Cassini:  
La nature des différentes taches est un mystère  
(lacs d'hydrocarbures, coulées volcaniques de glace, ??)



Crédit: <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA02146>

## La formation des planètes Structure des planètes et satellites

Sect. 13.2

Objets ganymédiens :

- croûtes de glace
- cœur de roches & métaux

Masse volumique moyenne  
 $\sim 1.9 \text{ g cm}^{-3}$

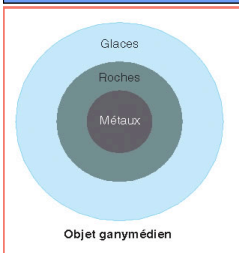


Fig. 14.2

Image de la croûte de glace de Callisto:  
Remarquer les rides consécutives à un impact météoritique, et la glace fraîche, blanche exposée suite à un autre impact

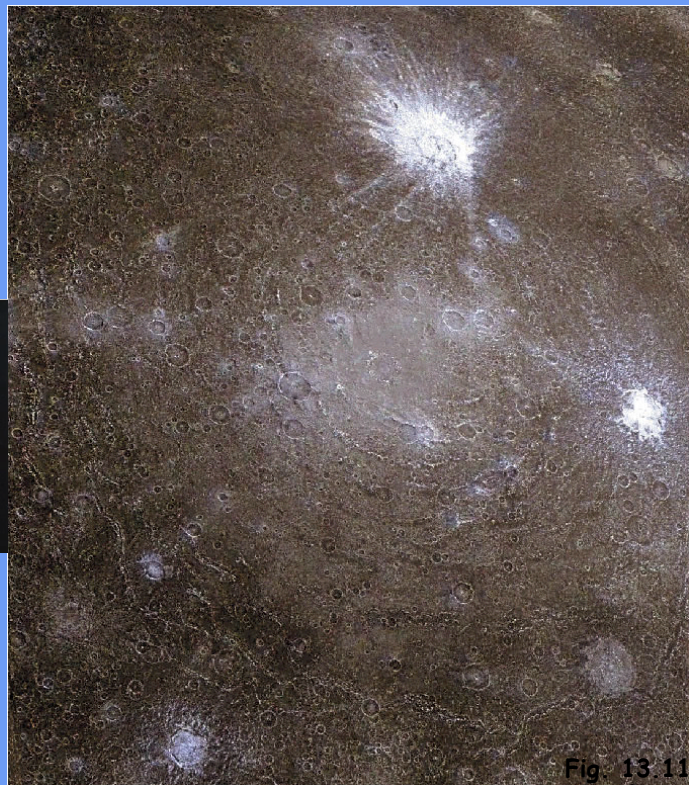


Fig. 13.11

# La formation des planètes

## Structure des planètes et satellites

Sect. 13.2

Vue satellite de la banquise Arctique  
<http://www.passporttothepoles.org>

- Objets ganymédiens :**
- croûtes de glace
  - cœur de roches & métaux

Masse volumique moyenne  
 ~ 1.9 g cm<sup>-3</sup>

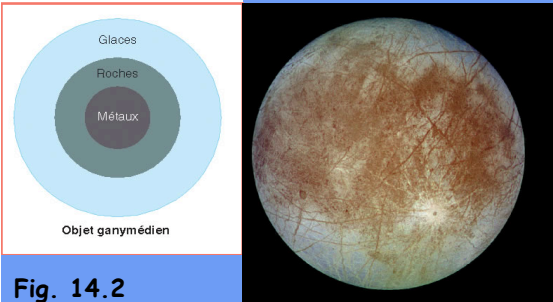


Fig. 14.2

Image de la croûte de glace de Europe:  
 Remarquer les plaques de glace morcelées, et  
 Les fissures les traversant

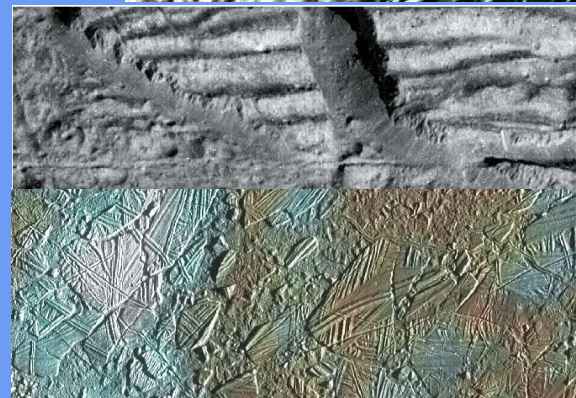
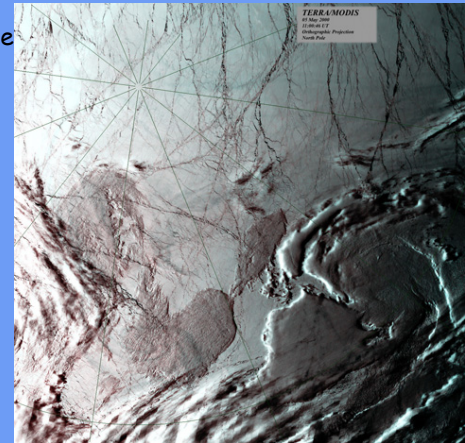


Fig. 13.8

# La formation des planètes

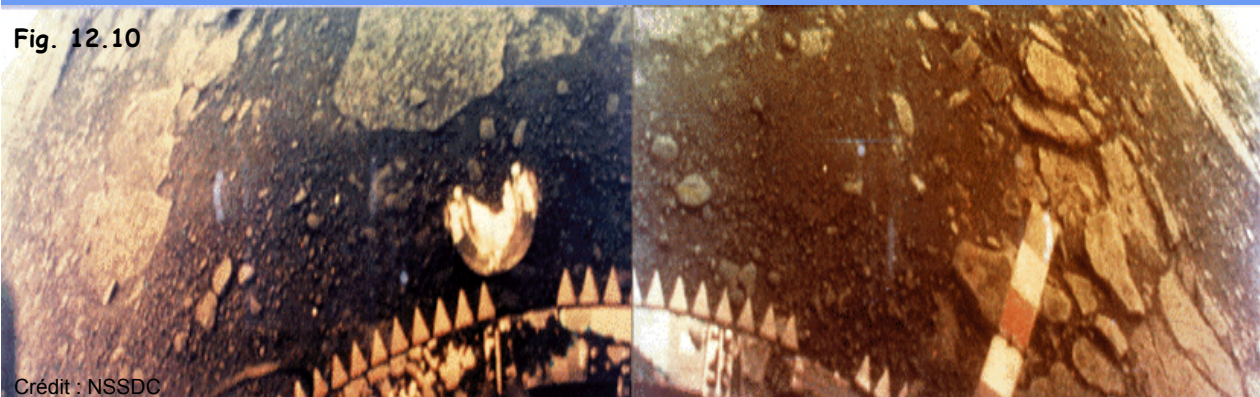
## Atmosphères

Sect. 12.4

- Venus: 90 bars (1 bar ~ pression atmosphérique terrestre)
- CO<sub>2</sub> 96% en masse (Tableau 12.4)
- N<sub>2</sub> 3.5%
- H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> traces (0.5%)
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nuages

La sonde Venera-13 (1982) a fonctionné pendant deux heures avant de succomber aux températures (477 °C = 750 K) et aux pressions extrêmes qui règnent à la surface de Vénus. Image panoramique s'étendant sur environ 170 degrés.

Fig. 12.10



Crédit : NSSDC

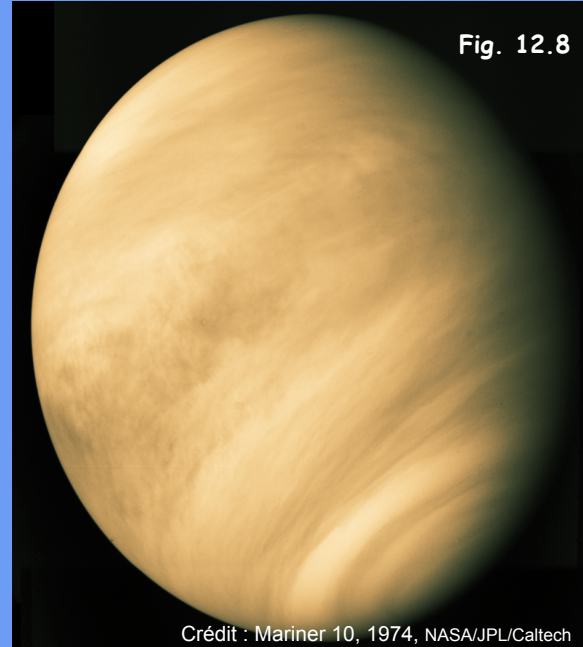
# La formation des planètes

## Atmosphères

Sect. 12.4

- Venus: 90 bars  
CO<sub>2</sub>  
N<sub>2</sub>  
H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

(1 bar ~ pression atmosphérique terrestre)  
96% en masse  
3.5%  
traces  
nuages



Crédit : Mariner 10, 1974, NASA/JPL/Caltech

# La formation des planètes

## Atmosphères

Sect. 11.7

- Venus: 90 bars  
CO<sub>2</sub>  
N<sub>2</sub>  
H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub>  
H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

96% en masse  
3.5%  
traces (0.5%)  
nuages

- Terre: 1.013 bar (~1.013 10<sup>5</sup> N·m<sup>-2</sup>)

N<sub>2</sub> 78.1% en masse  
O<sub>2</sub> 21.0%  
Ar 0.93%  
CO<sub>2</sub> 0.037%  
Ne 0.002 %  
H<sub>2</sub>O nuages (0 à 4%)

(Tableau 11.3)

Composition de l'atmosphère  
très différente de la composition  
système solaire !

Pourquoi?

# La formation des planètes

## Atmosphères

Sect. 12.6

- Venus: **90 bars**
  - CO<sub>2</sub> 96% en masse
  - N<sub>2</sub> 3.5%
  - H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> traces (0.5%)
  - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nuages
- Terre: **1.013 bar (~1.013 10<sup>5</sup> N·m<sup>-2</sup>)** (Tableau 11.3)
  - N<sub>2</sub> 78.1% en masse
  - O<sub>2</sub> 21.0%
  - Ar 0.93%
  - CO<sub>2</sub> 0.037%
- Mars: **0.008 bar** (Tableau p. 479)
  - CO<sub>2</sub> 95%
  - N<sub>2</sub> 3% en masse
  - O<sub>2</sub> traces
  - H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> nuages

# La formation des planètes

## Atmosphères

Sect. 12.6

- Venus: **90 bars**
  - CO<sub>2</sub> 96% en masse
  - N<sub>2</sub> 3.5%
  - H<sub>2</sub>O, SO<sub>2</sub> traces (0.5%)
  - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> nuages
- Terre: **1.013 bar (~1.013 10<sup>5</sup> N·m<sup>-2</sup>)**
  - N<sub>2</sub> 78.1% en masse
  - O<sub>2</sub> 21.0%
  - Ar 0.93%
  - CO<sub>2</sub> 0.037%
- Mars: **0.008 bar**
  - CO<sub>2</sub> 95%
  - N<sub>2</sub> 3% en masse
  - O<sub>2</sub> traces
  - H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> nuages

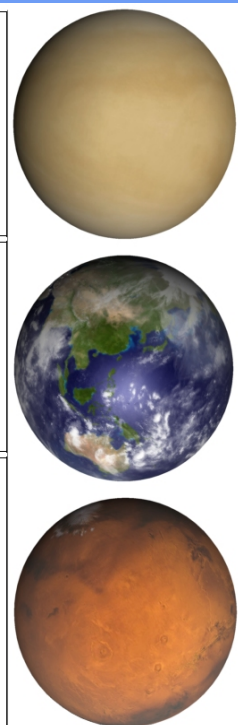
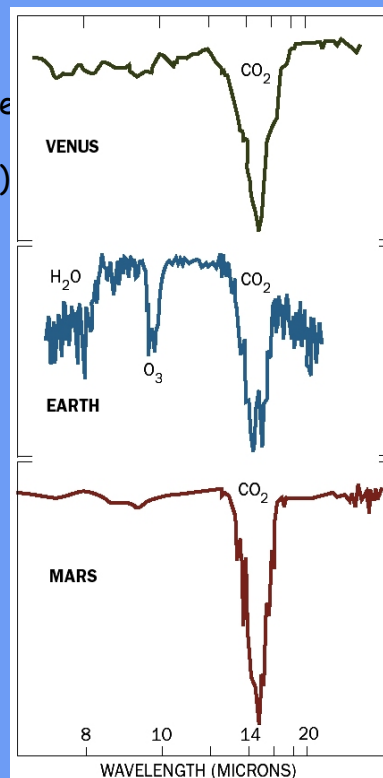
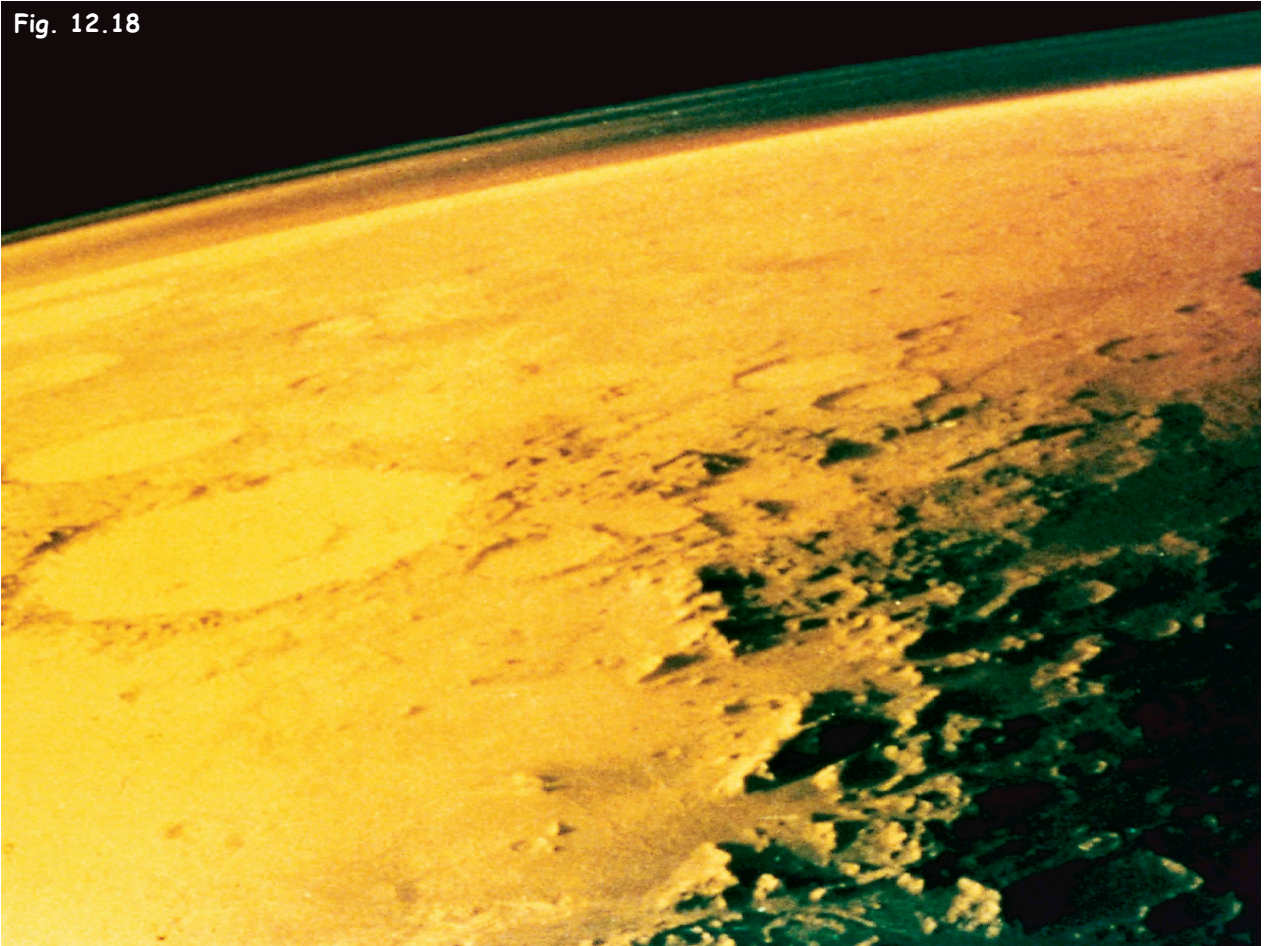


Fig. 12.18



## La formation des planètes Atmosphères

Sect. 13.2

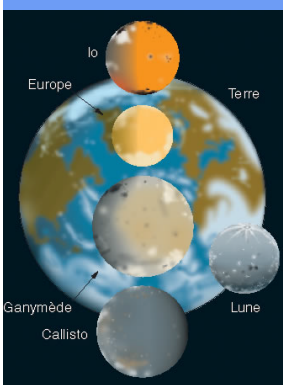
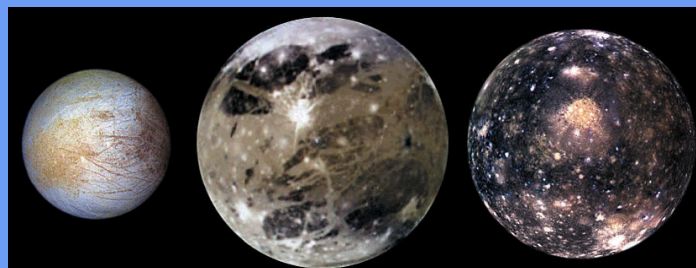
- Europe, Ganymède, Callisto (satellites galiléens de Jupiter):

$O_2$  traces ( $10^{-11}$  bar)  
(photodissociation de glace de  $H_2O$  par photons UV:  
 $H_2$ , plus léger, s'échappe...)

Europe

Ganymède

Callisto



## La formation des planètes Atmosphères

Sect. 13.2

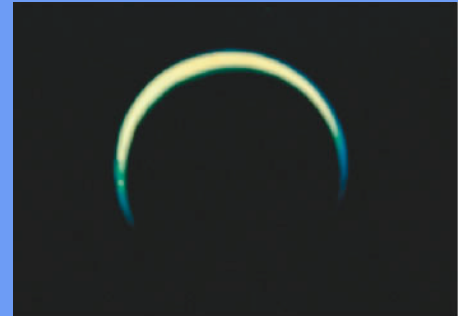
- Titan (satellite de Saturne): 1.5 bar

composés azotés	90%
CH <sub>4</sub>	10%

Janvier 2005 :

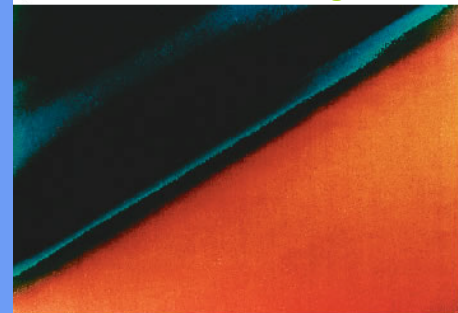
Spectaculaire descente du module Huygens (ESA) au-travers de l'atmosphère de Titan et atterissage

Voir vidéo...



b)

Fig. 13.15



## La formation des planètes Atmosphères

Sect. 13.5

- Triton (satellite de Neptune): 10<sup>-5</sup> bar (variable - geysers)

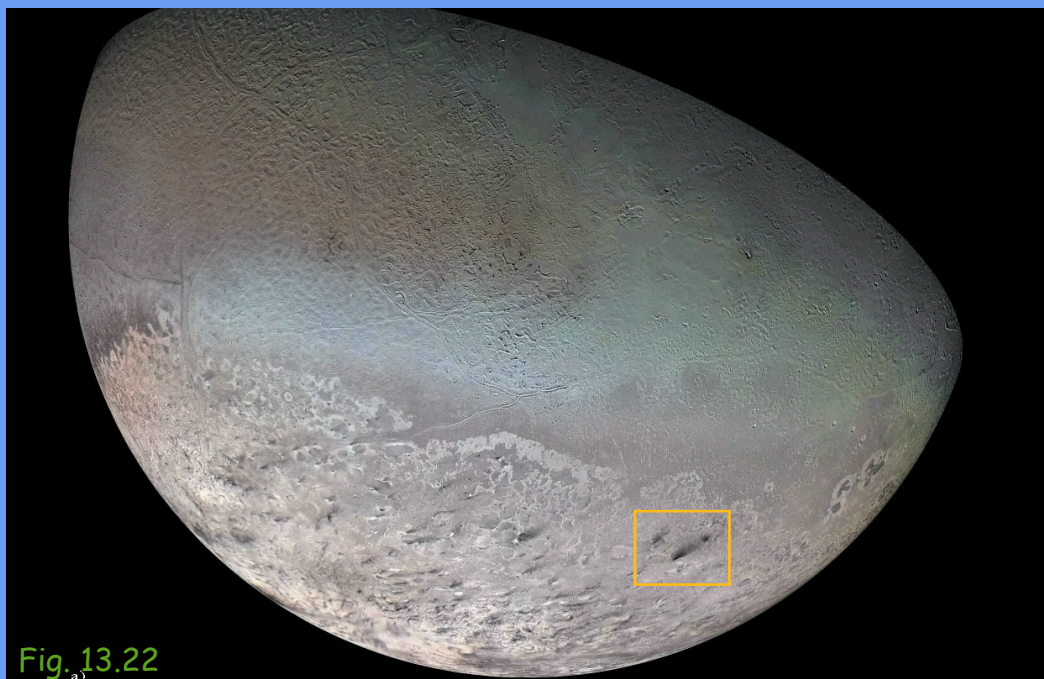


Fig. 13.22  
a)



## La formation des planètes

### Température d'une atmosphère planétaire (I)

Sect. 11.6  
Compl. 11.1

Soit une étoile de luminosité  $L$  située à une distance  $D$  d'une planète;  
Cette luminosité se répartit sur une sphère d'aire  $4\pi D^2$ .

Par unité de surface, l'atmosphère de la planète faisant face directement  
à l'étoile reçoit donc un flux d'énergie  $L/4\pi D^2$ .

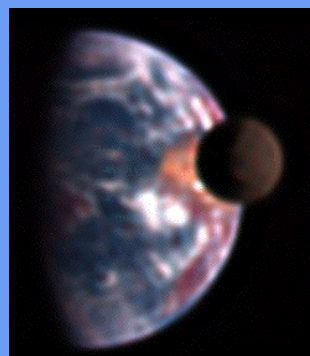
La planète en réfléchit une fraction  $A = \text{albédo}$ .

Exemples:

Astre Albédo

Terre 0.35

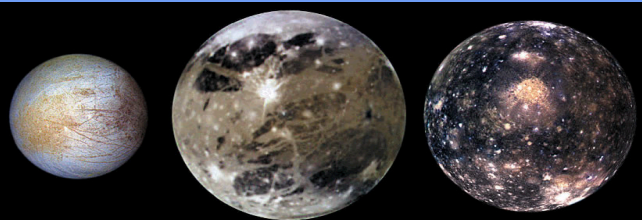
Lune 0.07



Europe  
0.7

Ganymède  
0.4

Callisto  
0.2



## La formation des planètes

### Température d'une atmosphère planétaire (II)

Sect. 11.6  
Compl. 11.1

Soit une étoile de luminosité  $L$  située à une distance  $D$  d'une planète;  
Cette luminosité se répartit sur une sphère d'aire  $4\pi D^2$ .

Par unité de surface, l'atmosphère de la planète faisant face directement  
à l'étoile reçoit donc un flux d'énergie  $L / 4\pi D^2$ .

La planète en réfléchit une fraction  $A = \text{albédo}$ .

La luminosité absorbée par unité de surface de l'atmosphère de la planète  
faisant face directement à l'étoile est donc  $L (1-A) / 4\pi D^2$

Toutes les parties de l'atmosphère de la planète ne font pas directement face  
à l'étoile; cependant, l'ensemble de la surface planétaire intercepte la même  
quantité de lumière qu'un disque d'aire  $\pi r^2$ , où  $r$  est le rayon de la planète;

La luminosité totale absorbée par la planète vaut donc  $\pi r^2 L (1-A) / 4\pi D^2$

## La formation des planètes

### Température d'une atmosphère planétaire (III)

Sect. 11.6  
Compl. 11.1

La luminosité totale absorbée par la planète vaut donc  $\pi r^2 L (1-A) / 4\pi D^2$ .

Dans la situation stationnaire où la température de l'atmosphère est constante, il y a équilibre entre la quantité d'énergie absorbée et celle réémise dans l'espace, sous forme de **radiation de corps noir**.

Soit  $T_{eq}$  la température à laquelle cet équilibre est réalisé.

Par unité de surface, un corps noir émet une puissance lumineuse  $\sigma T_{eq}^4$   
(loi de Stefan-Boltzmann)

Puisque toute la surface  $4\pi r^2$  de la planète contribue à rayonner l'énergie vers l'espace, la luminosité totale de la planète vaut donc  $4\pi r^2 \sigma T_{eq}^4$ .

En égalant l'énergie absorbée et celle réémise, on obtient

$$\pi r^2 L (1-A) / 4\pi D^2 = 4\pi r^2 \sigma T_{eq}^4 \quad \text{soit} \quad T_{eq} = \left( \frac{(1-A) L}{16\pi D^2 \sigma} \right)^{1/4}$$

## La formation des planètes

### Température d'une atmosphère planétaire (IV)

Sect. 11.6  
Compl. 11.1

$$T_{eq} = \left( \frac{(1-A) L}{16\pi D^2 \sigma} \right)^{1/4}$$

ou, en unités 'astronomiques' :

$$T_{eq}(\text{K}) = 280 \left( \frac{(1-A) L(L_{\odot})}{D^2 (\text{UA})} \right)^{1/4}$$

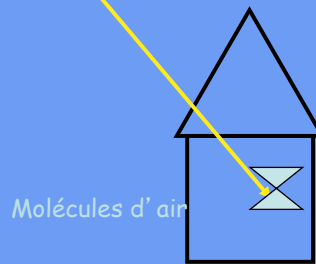
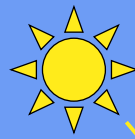
Pour la Terre:  $D = 1 \text{ UA}$ ,  $A = 0.35$ , soit  $T_{eq} = 251 \text{ K}$ , soit  $-22 \text{ }^{\circ}\text{C}$  !

La raison de cette discordance: **Importance de l'effet de serre!**

# La formation des planètes

Sect. 11.6

## L' effet de serre (I)



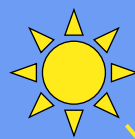
Molécules d'air

T ↗  
car l'air chauffé reste piégé  
par les parois de verre

# La formation des planètes

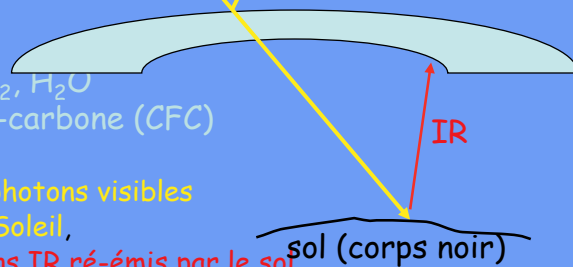
Sect. 11.6

## L' effet de serre (II)



Atmosphère,  
contenant des  
molécules de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$   
et chloro-fluoro-carbone (CFC)

Laisse passer les photons visibles  
en provenance du Soleil,  
absorbe les photons IR ré-émis par le sol



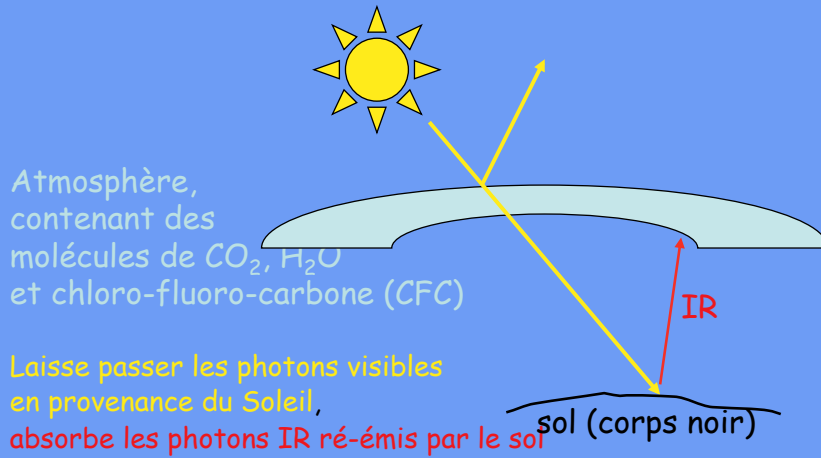
T ↗  
car l'absorption des photons IR  
chauffe l'atmosphère

N.B. « Effet de serre » =  
terminologie malheureuse,  
car le verre des parois de la serre  
est transparent aux photons IR!

# La formation des planètes

Sect. 11.6

## L' effet de serre (III)



T ↗  
car l'absorption des photons IR chauffe l'atmosphère

L' effet de serre est essentiel à la vie:  
Sans lui, la température moyenne de la Terre serait de -22°C

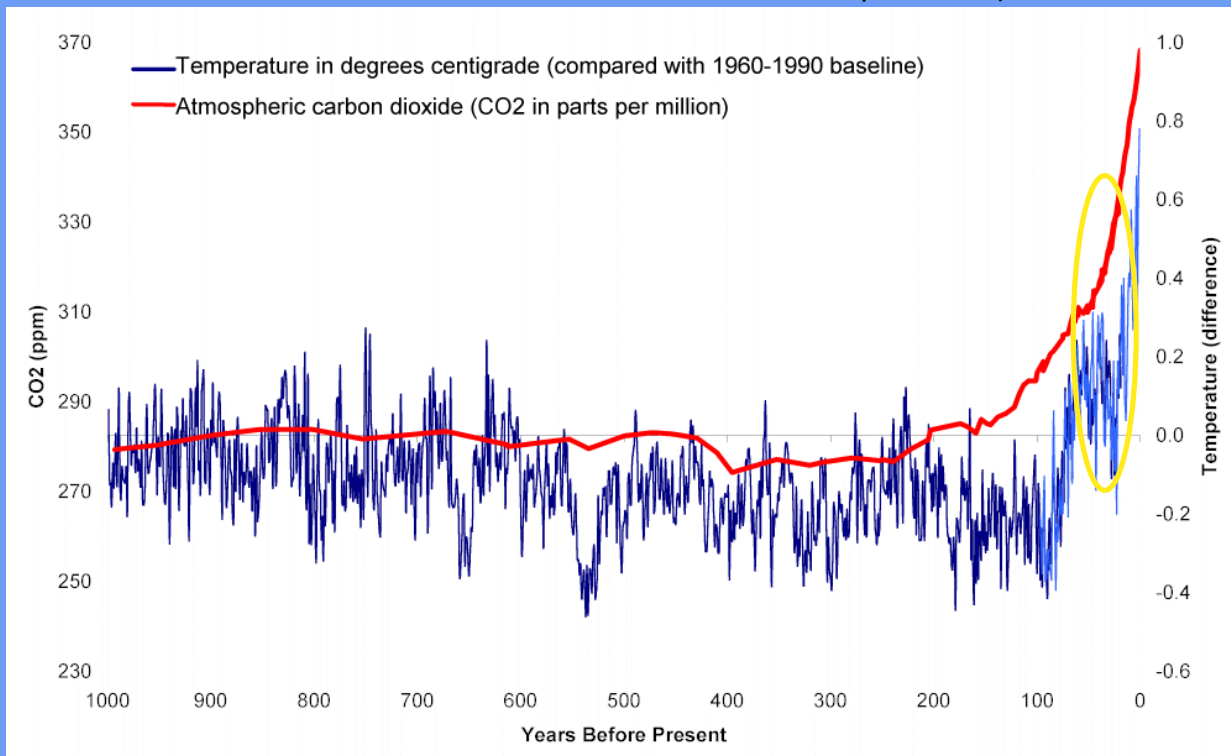
Mais, trop c' est trop...!

# La formation des planètes

Sect. 11.6

## L' effet de serre (IV)

Esprit critique nécessaire...

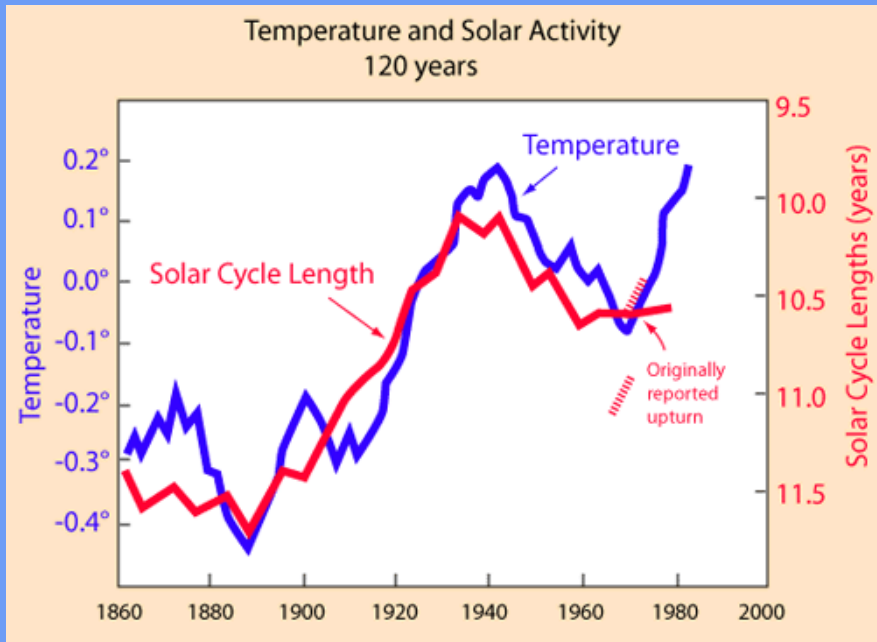


# La formation des planètes

Sect. 11.6

L' effet de serre (V)

Esprit critique nécessaire...



<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/solact.html>

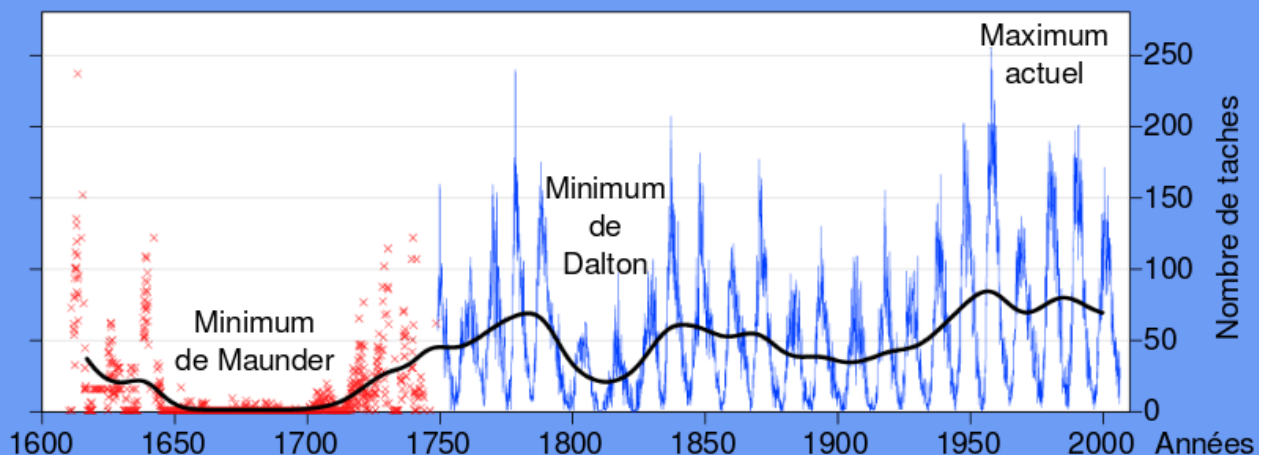
# La formation des planètes

Sect. 11.6

L' effet de serre (VI)

Esprit critique nécessaire...

## Evolution du nombre de taches solaires par an



Paysage d'hiver brabançon, Pieter Brueghel le Jeune, 1565



[http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sunspot\\_Numbers-fr.svg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sunspot_Numbers-fr.svg)

Soon 2005,  
Geophysical Research Letter,  
vol. 32, L16712

L' effet de serre (VII)

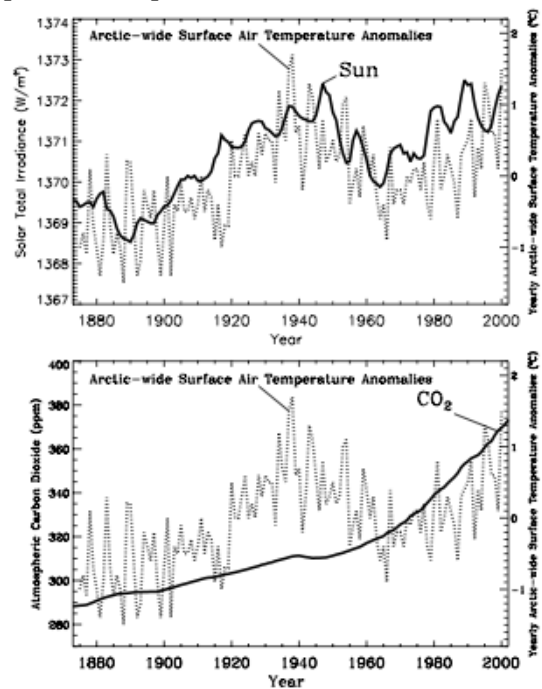
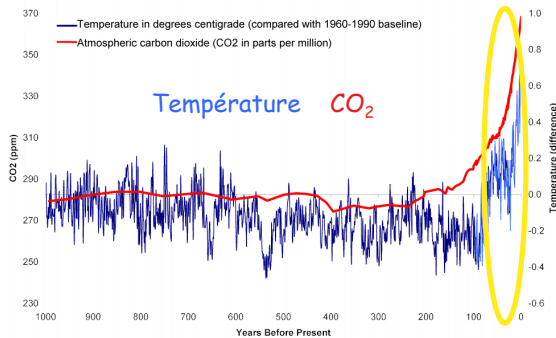
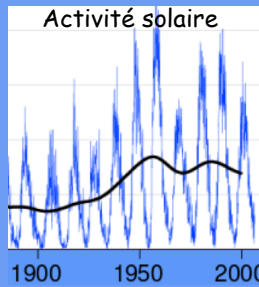


Figure 1. Annual-mean Arctic-wide air temperature anomaly time series (dotted lines) correlated with the estimated total solar irradiance (top panel; solid lines) and with the atmospheric carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, mixing ratio (bottom panel; solid lines) from 1875 to 2000.

GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, VOL. 32, L16712, doi:10.1029/2005GL023429, 2005

**Variable solar irradiance as a plausible agent for multidecadal variations in the Arctic-wide surface air temperature record of the past 130 years**

Willie W.-H. Soon

Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Cambridge, Massachusetts, USA

Received 9 May 2005; revised 12 July 2005; accepted 29 July 2005; published 27 August 2005.

Esprit critique nécessaire...

[20] **Acknowledgments.** I thank Igor Polyakov for kind access to his Arctic SAT data, Peter Frick for sharing his insights and programs on wavelet transform, and Gene Avrett and David R. Legates for comments. I further thank Julia Pham and Benjamin Soon for motivation. Both referees offered helpful suggestions for significant improvements. This scientific research was supported by generous grants from the Charles G. Koch Charitable Foundation, American Petroleum Institute, and Exxon-Mobil Corporation. The views expressed herein are solely those of the author and are independent of sources providing support.

L' effet de serre (VIII)

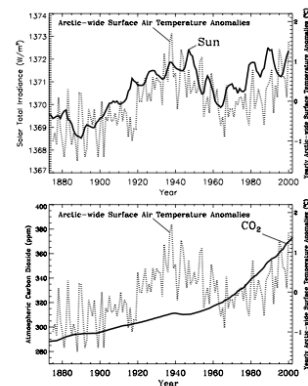


Figure 1. Annual-mean Arctic-wide air temperature anomaly time series (dotted lines) correlated with the estimated total solar irradiance (top panel; solid lines) and with the atmospheric carbon dioxide, CO<sub>2</sub>, mixing ratio (bottom panel; solid lines) from 1875 to 2000.

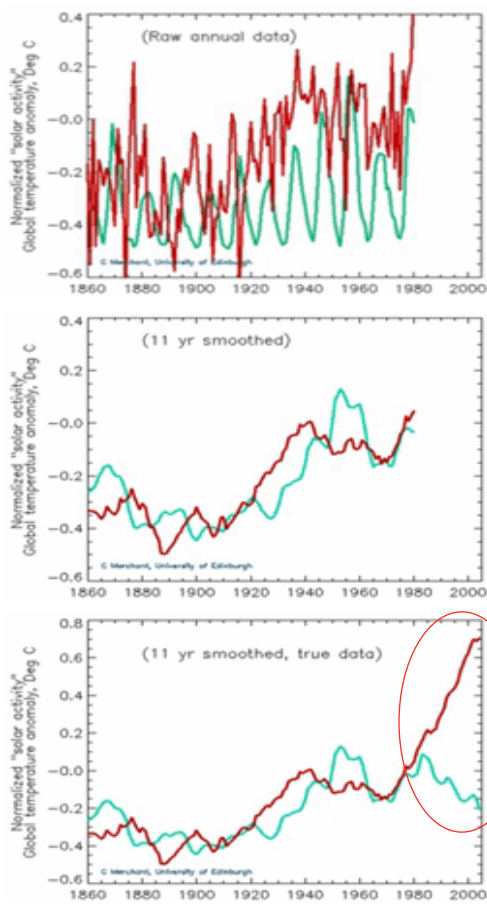
## Un climatosceptique de renom démasqué

LE MONDE | 23.02.2015 à 11h29 • Mis à jour le 23.02.2015 à 15h59 |

Par Stéphane Lauer (New York, correspondant)

Willie Soon s'est-il approché trop près du soleil ? Ce climatosceptique du Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics martèle justement depuis des années que c'est cet astre qui serait à l'origine de l'élévation globale des températures et non pas l'activité humaine, comme le prétend l'immense majorité des chercheurs. Il est ainsi l'un des noms que l'on brandit lorsque l'on veut contester le fait que ce serait les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) qui sont à l'origine du réchauffement climatique. Wei-Hock Soon, de son vrai nom, a multiplié les conférences, les articles dans les revues scientifiques, les plateaux télévisés et a même été amené à témoigner devant le Congrès américain. Le problème est que la plupart de ses travaux ont été financés par les industriels du pétrole et du charbon et qu'il a omis de mentionner ces liens, s'affranchissant ainsi de l'obligation de signaler d'éventuels conflits d'intérêts, susceptibles d'entacher l'objectivité de son travail. L'astrophysicien a pourtant accepté, au cours de la dernière décennie, pas moins de 1,3 million de dollars (1,1 million d'euros), versés par des lobbys industriels, selon des documents révélés par l'association Greenpeace. Pas moins de onze articles ont ainsi été publiés depuis 2008 sans faire mention de ses liens avec l'industrie des énergies fossiles, dont huit en violation évidente avec les règles éthiques des publications qui ont accepté de l'accueillir.

En savoir plus sur [http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/02/23/un-climatosceptique-de-renom-demasque\\_4581570\\_3244.html#EaPIRWJkQAGOOX2.99](http://www.lemonde.fr/planete/article/2015/02/23/un-climatosceptique-de-renom-demasque_4581570_3244.html#EaPIRWJkQAGOOX2.99)



### L' effet de serre (IX)

Sect. 11.6

Esprit critique nécessaire...

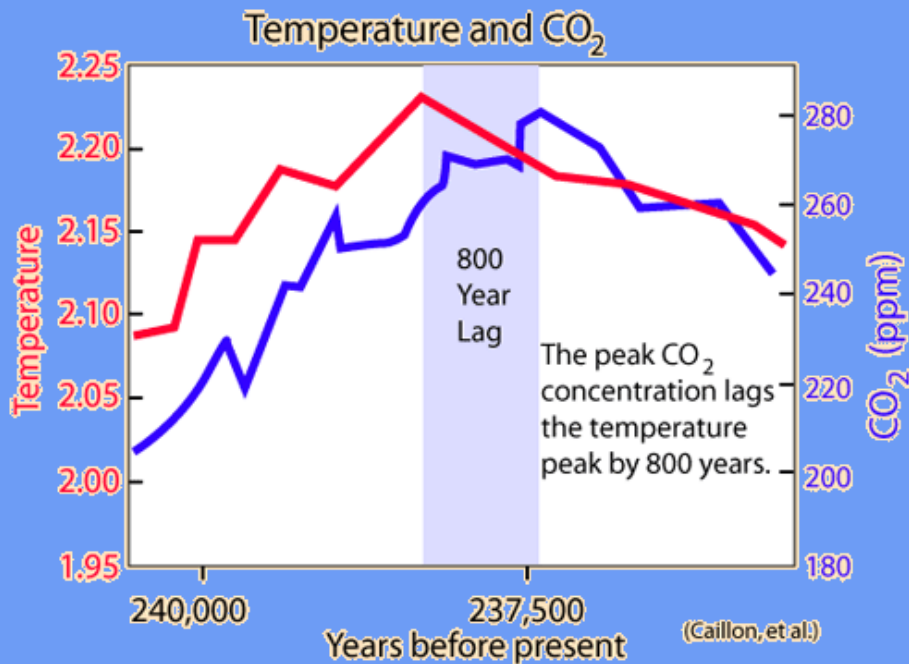
Rôles respectifs des forçages naturel et anthropique dans le réchauffement global ?

## L' effet de serre (X)

Sect. 11.6

Esprit critique nécessaire...

Rôles respectifs des forçages naturel et anthropique dans le réchauffement global ?



Températures déduites du rapport isotopique <sup>18</sup>O/<sup>16</sup>O dans les carottes glaciaires (lac Vostok), et CO<sub>2</sub> des bulles d'air

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/thermo/icecore.html#c1>

## L' effet de serre (XI)

Sect. 11.6

Esprit critique nécessaire...

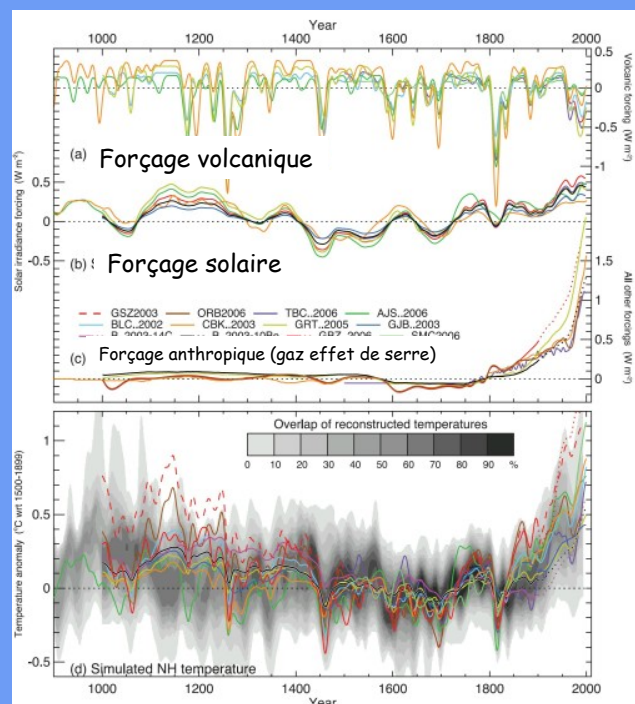
Forçages radiatifs et températures de l'hémisphère Nord simulées du dernier millénaire

(a) : activité volcanique ;  
 (b) : variations de l'irradiance solaire ;  
 (c) : autres forçages, différents selon les modèles mais incluant toujours les gaz à effet de serre et, excepté pour ceux en lignes pointillées après 1900, les aérosols sulfatés troposphériques.

(d) températures (°C) de l'hémisphère Nord simulées à partir des forçages "a" à "c".

Les forçages et les températures sont exprimés en anomalies par rapport à la moyenne 1500 à 1899 et sont moyennés sur 30 ans

(International Panel on Climate Change, 2007)



<http://www.ccstib.fr/Climats-du-passe-4,211.html>



## La formation des planètes

Sect. 12.4

### L' effet de serre (XII)

## Vénus:

Température sans effet de serre:

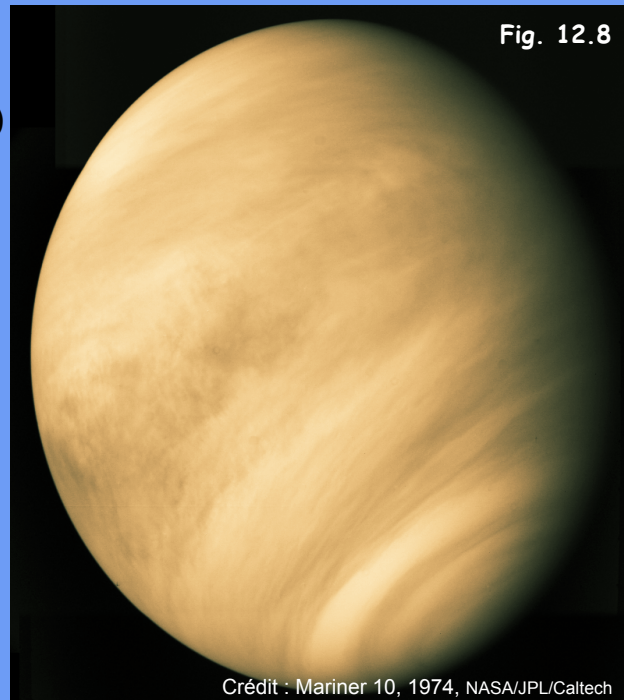
253 K = - 20°C (Albédo = 0.65  
D = 0.723 UA )

Température mesurée:

750 K = 477 °C

L' effet de serre augmente  
la température de Vénus  
de près de 500 degrés !

Son atmosphère possède  
une pression de 90 bars  
et contient plus de 90% de CO<sub>2</sub> !



Crédit : Mariner 10, 1974, NASA/JPL/Caltech

## La formation des planètes

Sect. 11.7

### Rétention d' une atmosphère (I)

La gravité joue un rôle essentiel dans la rétention d' une atmosphère:

La Terre possède une atmosphère,  
La Lune, moins massive, n' en possède pas...

Mais ce n' est pas le seul facteur:

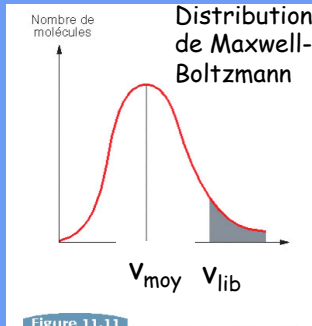
L' atmosphère terrestre ne contient ni hydrogène ni hélium,  
qui constituent pourtant 99% de la masse de l' univers...  
Pourquoi est-elle constituée plutôt d' éléments plus rares,  
comme N ou Ar?

## La formation des planètes Rétention d'une atmosphère (II)

Sect. 11.7

Au niveau moléculaire, la rétention d'une atmosphère se traduit par une **lutte entre** gravité, qui a tendance à retenir les molécules, et **énergie cinétique des molécules**, qui a tendance à les libérer du champ de gravité

$$\text{Energie cinétique} = 1/2 m v^2 = 3/2 kT$$



$$\text{Vitesse moyenne : } \bar{v} = \sqrt{\frac{8k}{\pi}} \sqrt{\frac{T}{m}}$$

$$\rightarrow \bar{v} \text{ (m/s)} = 146 \sqrt{\frac{T \text{ (K)}}{m \text{ (m}_p\text{)}}$$

$$\text{Ex. à } T = 293 \text{ K: } v \text{ (H}_2\text{)} = 1.8 \text{ km/s, } v \text{ (O}_2\text{)} = 0.44 \text{ km/s}$$

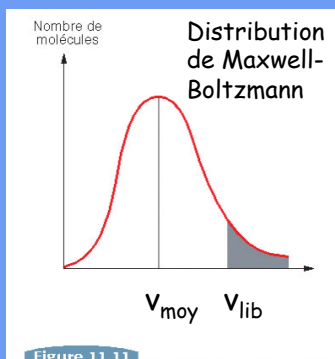
Pour savoir si la gravité de la Terre est capable de retenir un gaz donné, il faut comparer la vitesse des molécules de celui-ci à la vitesse de libération:  
(Compl. 3.7)

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 11.2 \text{ km/s pour la Terre}$$

## La formation des planètes Rétention d'une atmosphère (III)

Sect. 11.7

Vitesse moyenne (distribution de Maxwell-Boltzmann):



$$\bar{v}_{\text{moy}} \text{ (m/s)} = \sqrt{\frac{8k}{\pi}} \sqrt{\frac{T}{m}} = 146 \sqrt{\frac{T \text{ (K)}}{m \text{ (m}_p\text{)}}$$

$$\text{Ex. à } T = 293 \text{ K: } v_{\text{moy}} \text{ (H}_2\text{)} = 1.8 \text{ km/s, } v_{\text{moy}} \text{ (O}_2\text{)} = 0.44 \text{ km/s}$$

$$v_{\text{lib}} = \sqrt{\frac{2GM}{R}} = 11.2 \text{ km/s pour la Terre}$$

Même si  $v_{\text{moy}} < v_{\text{lib}}$ , il existe dans la distribution certaines molécules possédant une vitesse supérieure à  $v_{\text{lib}}$

On estime qu'un gaz donné restera prisonnier de l'atmosphère si  $R = v_{\text{lib}} / v_{\text{moy}} > 10$

Ex:  $R \text{ (H}_2\text{)} = 11.2 / 1.8 = 6 \rightarrow$  s'échappe ainsi que He ( $R = 9$ )  
 $R \text{ (O}_2\text{)} = 11.2 / 0.44 = 25 \rightarrow$  piégé ainsi que H<sub>2</sub>O ( $R = 19$ ),  
 CO<sub>2</sub> ( $R = 30$ ), N<sub>2</sub> ( $R = 24$ )

Effet de marée (I)

Définition: Conséquence de l'attraction **différentielle** exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

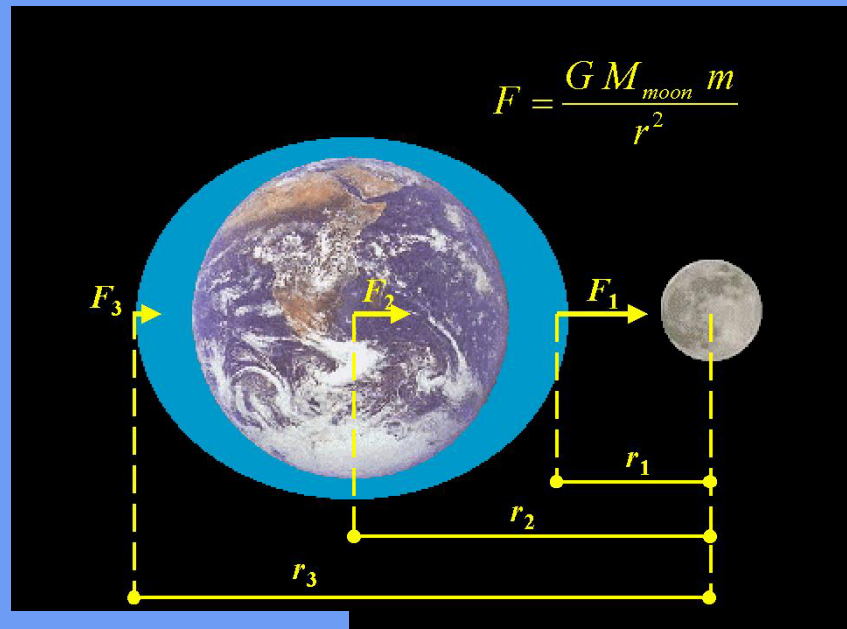


Fig. 11.17

Crédit: <http://www.astro.virginia.edu/~mnc3z/images/astro121/tideexp1.jpg>

Effet de marée (I)

Définition: Conséquence de l'attraction **différentielle** exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

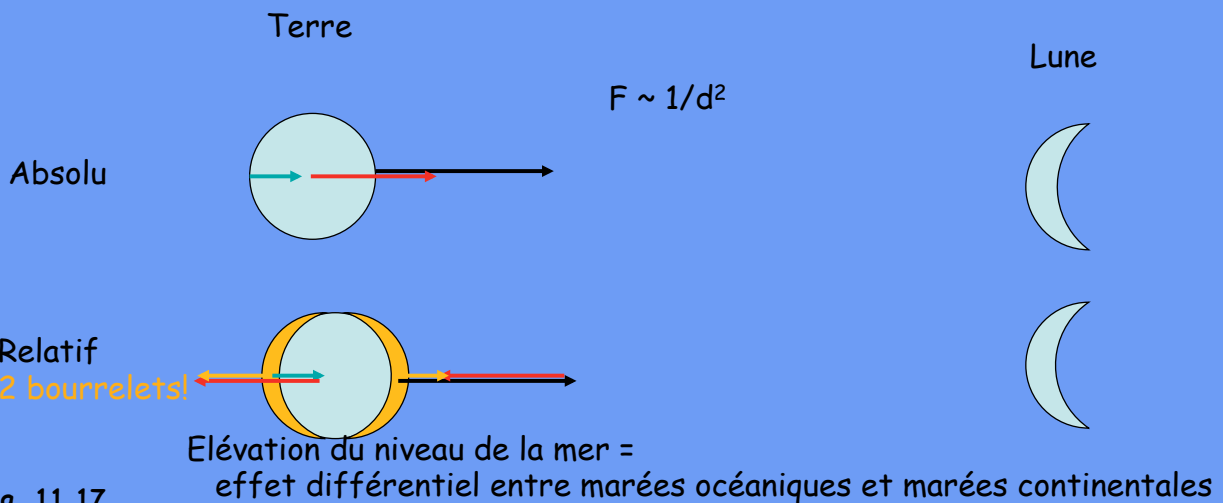


Fig. 11.17

## Effet de marée (II)

Définition: Conséquence de l'attraction **différentielle** exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Terre

Lune

$$\Delta g = -\frac{Gm}{(R+d)^2} + \left(\frac{Gm}{d^2}\right) \cong \frac{2GmR}{d^3} \quad R \ll d$$

Compl. 11.2

## Effet de marée (III)

Définition: Conséquence de l'attraction **différentielle** exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Terre

Lune ou Soleil

$$\Delta g = -\frac{Gm}{(R+d)^2} + \left(\frac{Gm}{d^2}\right) \cong \frac{2GmR}{d^3} \quad R \ll d$$

$m_{\odot} / m_L$	$2.7 \cdot 10^7$
$d_{\odot} / d_L$	391
$(d_{\odot} / d_L)^3$	$6 \cdot 10^7$
$\Delta g_{\odot} / \Delta g_L$	0.45

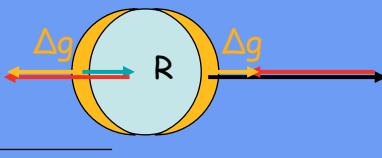
Compl. 11.2

## Effet de marée (IV)

Définition: Conséquence de l'attraction **différentielle** exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Importance relative Soleil - Lune  
Marées de vive-eau, morte-eau

Terre



$m_{\odot} / m_L$	$2.7 \cdot 10^7$
$d_{\odot} / d_L$	391
$(d_{\odot} / d_L)^3$	$6 \cdot 10^7$
$\Delta g_{\odot} / \Delta g_L$	0.45

$$\Delta g = -\frac{Gm}{(R+d)^2} + \left(\frac{Gm}{d^2}\right) \cong \frac{2GmR}{d^3} \quad R \ll d$$

Compl. 11.2

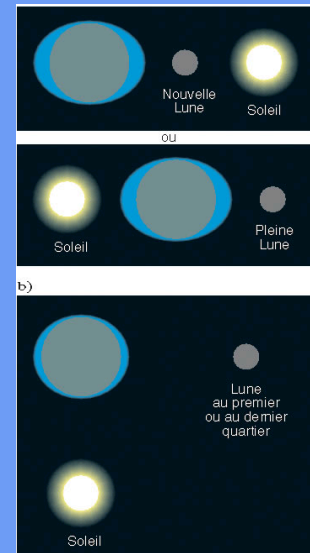


Figure 11.18

## Effet de marée (V)

Marées: Conséquence de l'attraction **différentielle** exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- **ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)**

Allongement de la durée du jour:

1 jour augmente de 0.045 micro sec par j  
 = 1 sec par 61 000 ans  
 = 1 h par  $220 \cdot 10^6$  ans  
 1 année comportait alors 381 jours !

A terme (plusieurs  $10^{10}$  ans), la rotation terrestre sera synchronisée avec la lunaison: La Lune occupera toujours le même point dans le ciel terrestre.

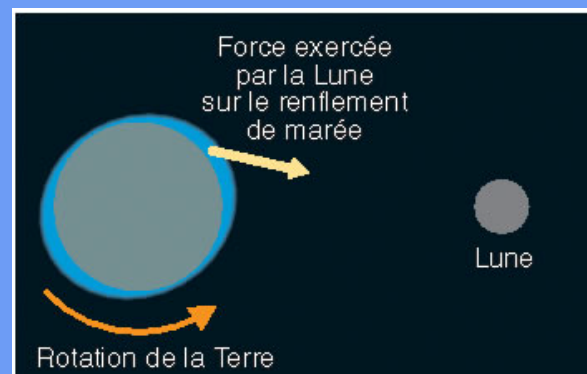


Figure 11.20

Vue au-dessus du pôle

## Effet de marée (VI)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre
- **synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison**

Cette synchronisation est déjà atteinte pour la Lune:  
Rotation Lune = Lunaison

car les forces de marée causées par la Terre sur la Lune sont plus efficaces que de la Lune sur la Terre

D'où: la Lune présente toujours la même face à la Terre;

La Terre ne bouge pas dans le ciel de la lune

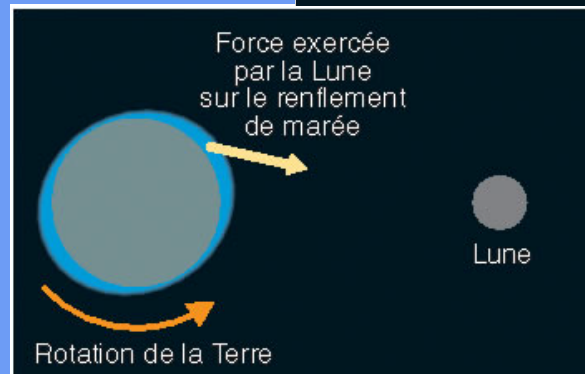
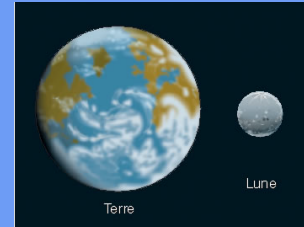


Figure 11.20

Vue au-dessus du pôle

## Effet de marée (VII)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- **synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison**

Le cas de Pluton-Charon:

synchronisation complète !

car:

	Pluton	Charon
diamètre	1	0.56
masse	1	0.17
distance	-	19 400 km
Période	-	~ 0.05 Terre-Lune 6.39 jours

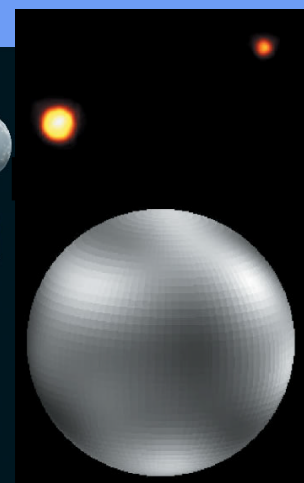
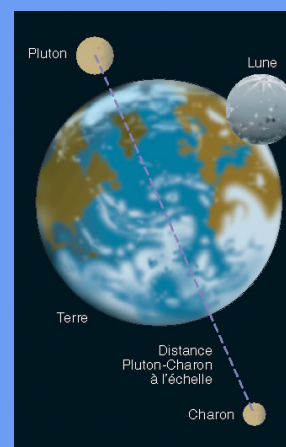


Fig.13.23

## Effet de marée (VIII)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison
- éloignement de la Lune

Conservation du moment angulaire du système Terre - Lune (rotations + orbite):

$$h_{\text{rotation Terre}} + h_{\text{orbite Lune}} + h_{\text{rotation Lune}} = \text{constante}$$

$$h_{\text{rotation Terre}} \text{ diminue} \implies h_{\text{orbite Lune}} \text{ augmente}$$

$$? h_{\text{orbite Lune}} ? \quad \underline{J} = m \underline{h} = m \underline{v} \times \underline{r}$$

$$\text{Orbite circulaire: } h = \frac{2\pi a}{P} \times a = \frac{2\pi a^2}{P}$$

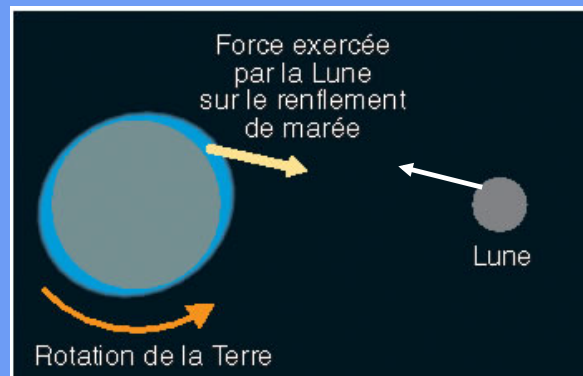


Figure 11.20

Vue au-dessus du pôle

## Effet de marée (IX)

2<sup>e</sup>me loi de Kepler (1609): le rayon-vecteur balaie des aires égales en des durées égales

= expression de la conservation du moment angulaire orbital

$$\text{Orbite circulaire: } h = \frac{2\pi a}{P} \times a = \frac{2\pi a^2}{P}$$

Orbite elliptique : « loi des aires »

$$\implies h_{\text{orbite Lune}} = \frac{2 \text{ surface ellipse}}{P} = \frac{2\pi ab}{P}$$

où  $b = a(1 - e^2)^{1/2}$

(Phys. & Math: exercicel)

$$\implies h_{\text{orbite Lune}} = \frac{2\pi a^2 (1 - e^2)^{1/2}}{P}$$

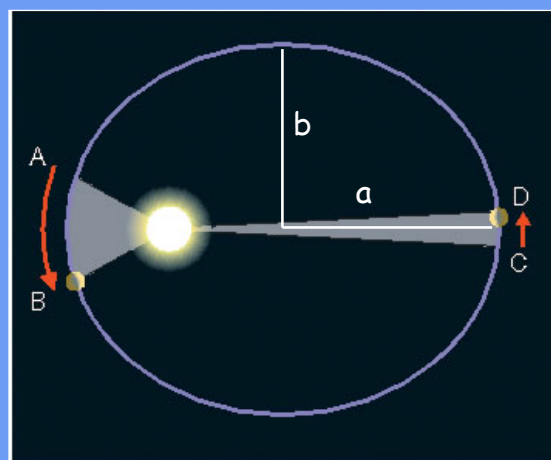


Figure 3.4

$$3^{\text{e}} \text{ loi de Kepler: } a^3 / P^2 = G(M+m) / 4\pi^2 \implies 1/P = [G(M+m) / a^3 4\pi^2]^{1/2}$$

$$\implies h_{\text{orbite Lune}} = [a(1 - e^2) G(M + m)]^{1/2}$$

## Effet de marée (X)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison
- éloignement de la Lune

Conservation du moment angulaire du système Terre - Lune (rotations + orbite):

$$h_{\text{rotation Terre}} + h_{\text{orbite Lune}} + h_{\text{rotation Lune}} = \text{constante}$$

$$h_{\text{rotation Terre}} \text{ diminue} \implies h_{\text{orbite Lune}} \text{ augmente}$$

$$\implies h_{\text{orbite Lune}} = [a(1 - e^2)G(M + m)]^{1/2}$$

Donc si  $h_{\text{orbite Lune}}$  augmente,  $a_{\text{Lune}}$  augmente  
La Lune s'éloigne de la Terre de 3 à 4 cm par an !

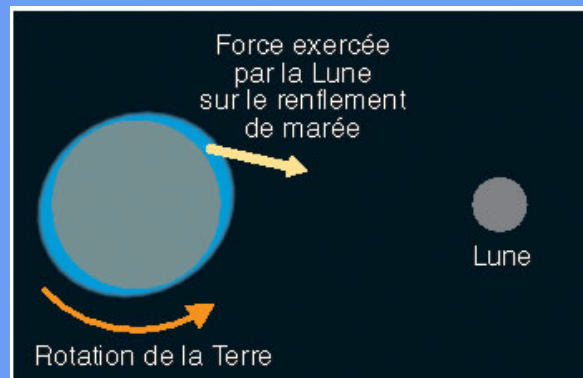


Figure 11.20

Vue au-dessus du pôle

## Effet de marée (XI)

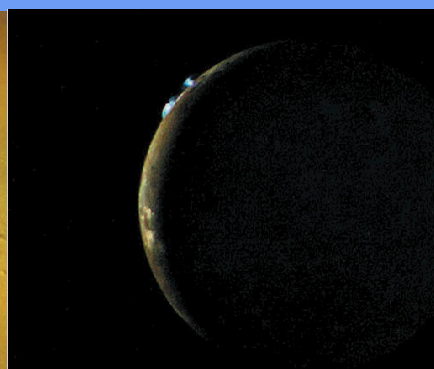
Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison
- éloignement de la Lune
- volcanisme sur Io, le satellite le plus proche de Jupiter (Sect. 13.2)

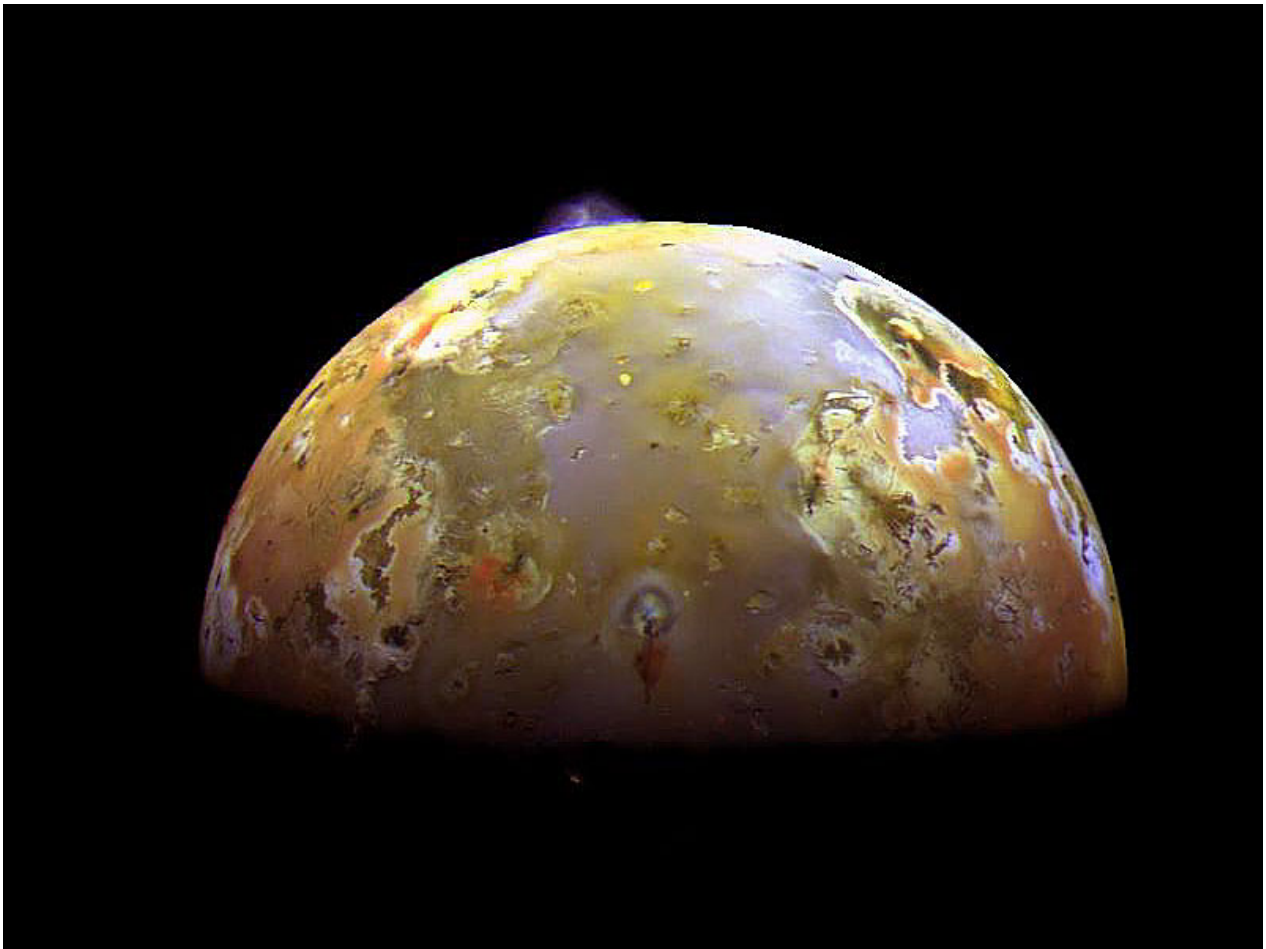


Fig. 13.5

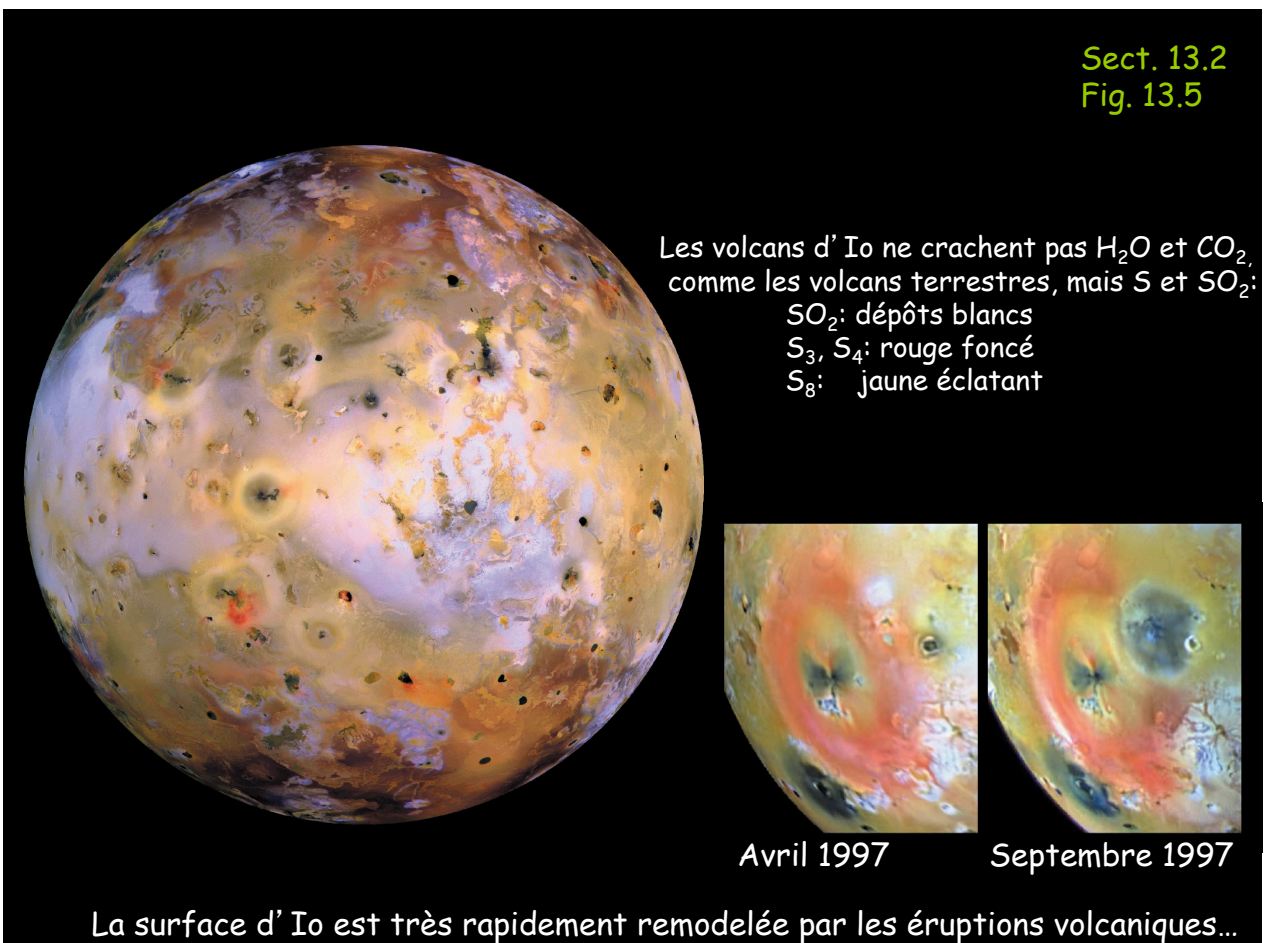


Les importantes forces de marée (dus à la proximité de Jupiter) et les perturbations des autres satellites empêchent d'atteindre une situation synchrone permanente: Ces effets de marée variables empêchent la solidification de l'intérieur d'Io.





Sect. 13.2  
Fig. 13.5



Les volcans d'Io ne crachent pas  $H_2O$  et  $CO_2$ ,  
comme les volcans terrestres, mais S et  $SO_2$ :

$SO_2$ : dépôts blancs  
 $S_3, S_4$ : rouge foncé  
 $S_8$ : jaune éclatant

Avril 1997

Septembre 1997

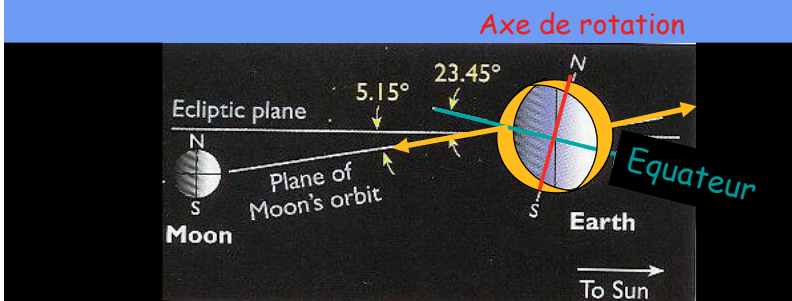
La surface d'Io est très rapidement remodelée par les éruptions volcaniques...

## Effet de marée (XII)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- éloignement de la Lune
- synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison
- volcanisme sur Io, le satellite le plus proche de Jupiter
- **précession des équinoxes** (Sect. 0.8)



Les forces de marée constituent un couple de forces qui agissent sur la Terre en rotation et qui tendent à ramener le plan de l'équateur sur le plan de l'écliptique

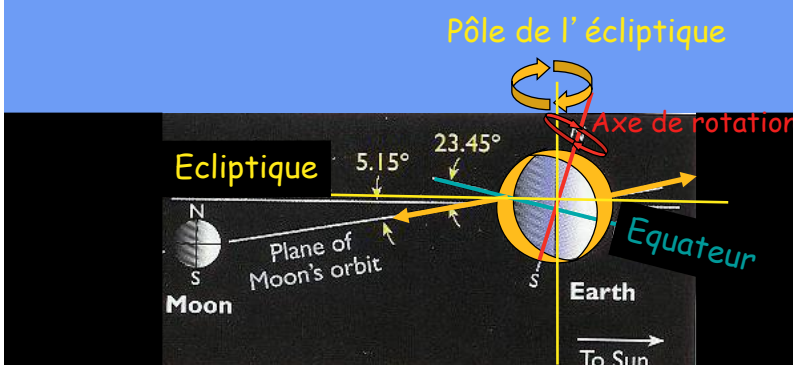
(Sect. 0.8)

## Effet de marée (XIII)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- éloignement de la Lune
- synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison
- volcanisme sur Io, le satellite le plus proche de Jupiter
- **précession des équinoxes**



Cependant, parce que la Terre tourne, la conséquence de ce couple de forces est un effet de précession de l'axe de rotation de la Terre autour du pôle de l'écliptique

Analogie avec toupie dans le champ de la pesanteur!

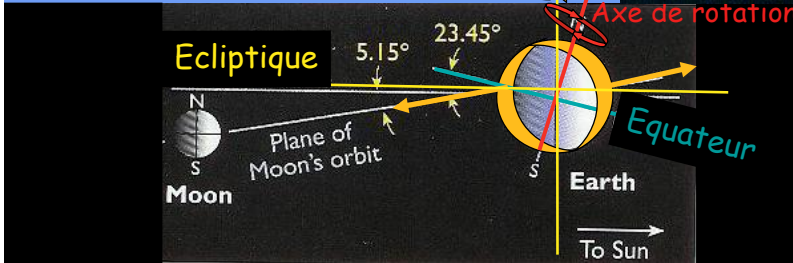
### Effet de marée (XIV)

Cependant, parce que la Terre tourne, la conséquence de ce couple de forces est un **effet de précession** de l'axe de rotation de la Terre autour du pôle de l'écliptique

Analogie avec toupie dans le champ de la pesanteur!



Fig. 0.21



### Effet de marée (XV)

Cependant, parce que la Terre tourne, la conséquence de ce couple de forces est un **effet de précession** de l'axe de rotation de la Terre autour du pôle de l'écliptique

Analogie avec toupie dans le champ de la pesanteur!

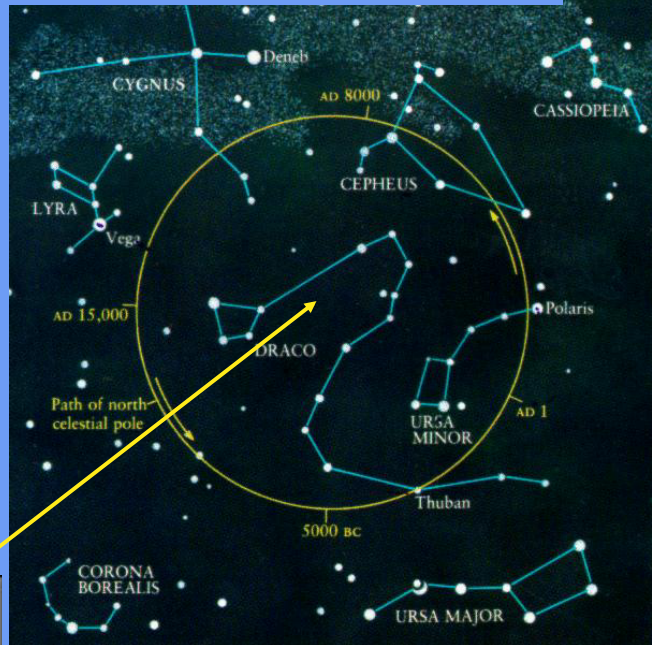
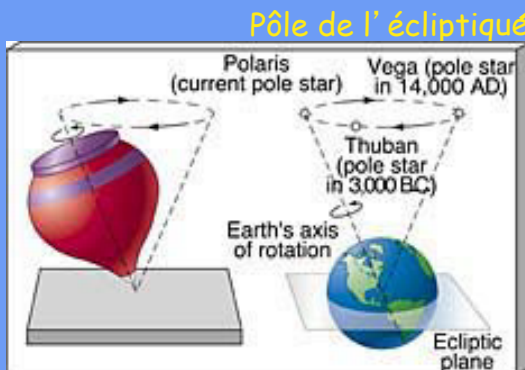


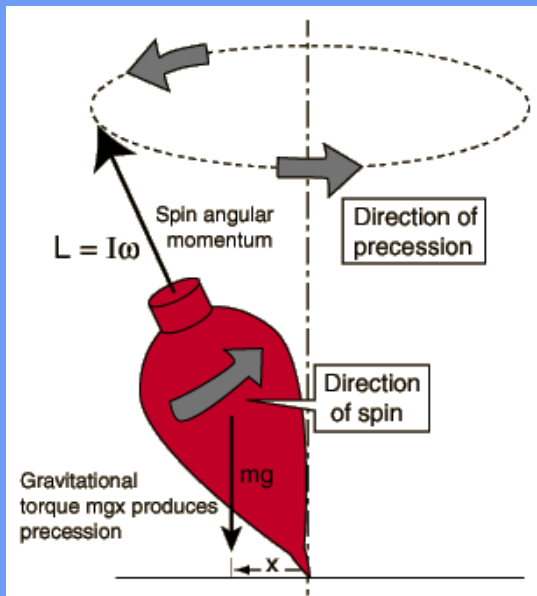
Fig. 0.21



## Effet de marée (XVI)

### Effet de précession:

Analogie avec toupie dans le champ de la pesanteur!



Crédit: [hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/top.html](http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/top.html)

Sect. 11.9

## Effet de marée (XVII)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Lune ou Soleil) sur les différentes parties d'un autre (Terre)

Conséquences diverses:

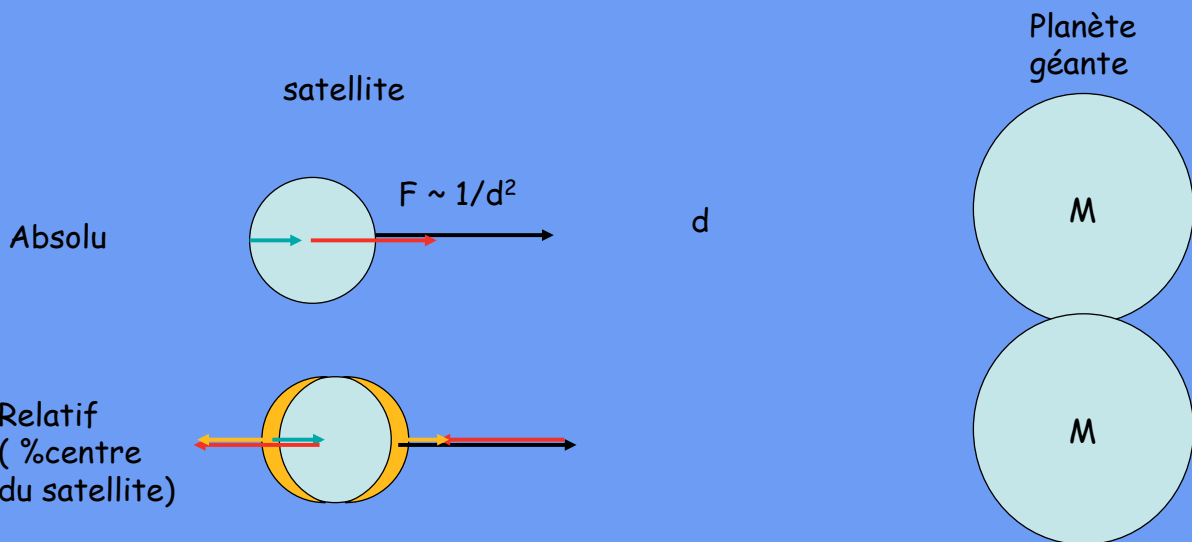
- marées océaniques
- marées continentales
- ralentissement de la rotation de la Terre (= augmentation de la durée du jour)
- éloignement de la Lune
- synchronisation de la rotation lunaire avec la lunaison
- volcanisme sur Io, le satellite le plus proche de Jupiter
- précession des équinoxes
- **limite de Roche, rupture d'un satellite, et formation des anneaux**

# La formation des planètes

Sects. 11.9 & 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (I)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Planète) sur les différentes parties d'un autre (satellite)



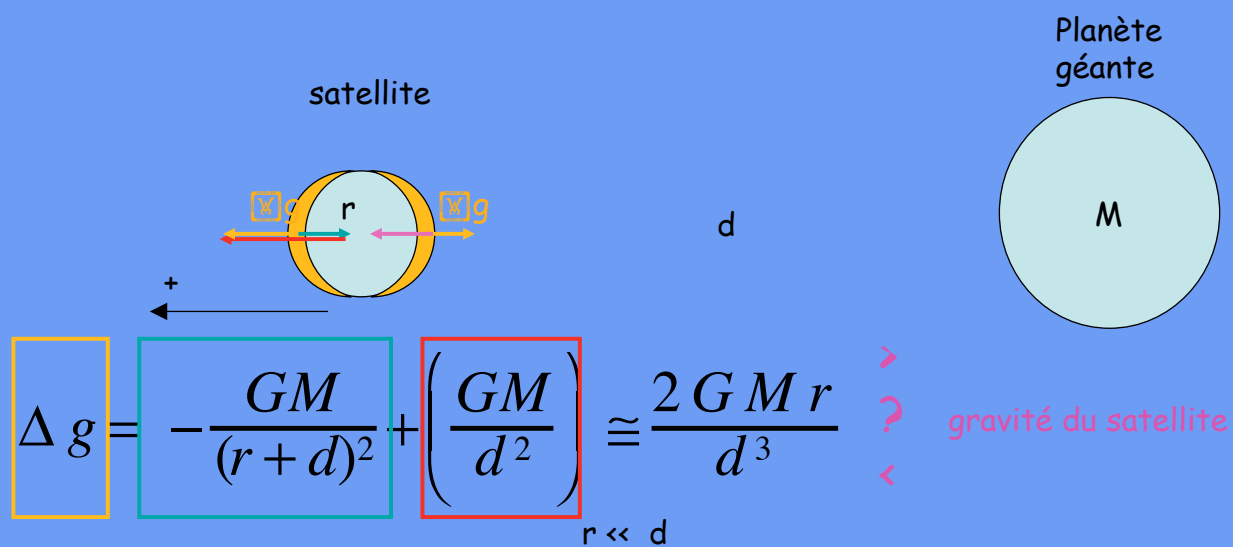
Compl. 13.1

# La formation des planètes

Sects. 11.9 & 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (I)

Marées: Conséquence de l'attraction différentielle exercée par un corps céleste (Planète) sur les différentes parties d'un autre (satellite)



Compl. 13.1

# La formation des planètes

Sect. 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (II)

satellite

Planète géante

$$\Delta g = -\frac{GM}{(r+d)^2} + \left(\frac{GM}{d^2}\right) \cong \frac{2GM r}{d^3} \begin{matrix} > \\ ? \\ < \end{matrix} \frac{Gm}{r^2}$$

$r \ll d$

Compl. 13.1

# La formation des planètes

Sect. 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (III)

satellite

Planète géante

$$\Delta g = -\frac{GM}{(r+d)^2} + \left(\frac{GM}{d^2}\right) \cong \frac{2GM r}{d^3} > \frac{Gm}{r^2}$$

$r \ll d$

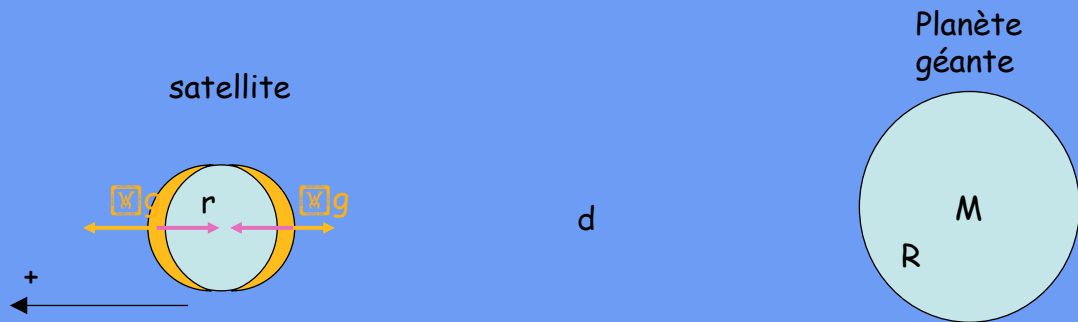
→ Satellite rompu

Compl. 13.1

# La formation des planètes

Sect. 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (IV)



$$\frac{2GM r}{d^3} > \frac{Gm}{r^2} \Rightarrow d < r \left( \frac{2M}{m} \right)^{1/3} \rightarrow \text{Satellite rompu}$$

$$M = \left( \frac{4\pi}{3} \right) R^3 \rho_M \text{ et } m = \left( \frac{4\pi}{3} \right) r^3 \rho_m \rightarrow d < 1.26 \left( \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

Compl. 13.1

# La formation des planètes

Sect. 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (V)

Calcul plus détaillé, tenant compte:

- de la rotation du satellite
- de sa forme ovoïde

Edouard Roche (1849)

$$d < R_{\text{Roche}} = 2.45 \left( \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

→ Satellite rompu



Compl. 13.1

# La formation des planètes

Sect. 13.7

## Formation des anneaux et limite de Roche (VI)

Calcul plus détaillé, tenant compte:

- de la rotation du satellite
- de sa forme ovoïde

Edouard Roche (1849)

$$d < R_{\text{Roche}} = 2.45 \left( \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R \approx 2.5 R$$

➔ Satellite rompu

Gros satellites



d/R

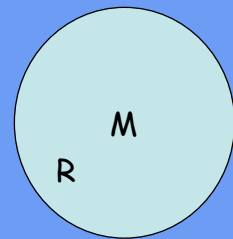
←  $R_{\text{Roche}} / R = 2.5$

satellites rompus

➔ Anneaux

(ou petits satellites dont la cohésion n'est pas dominée par la gravitation)\*

Planète géante



\* Nous vivons sans dommages à l'intérieur de la limite de Roche !!

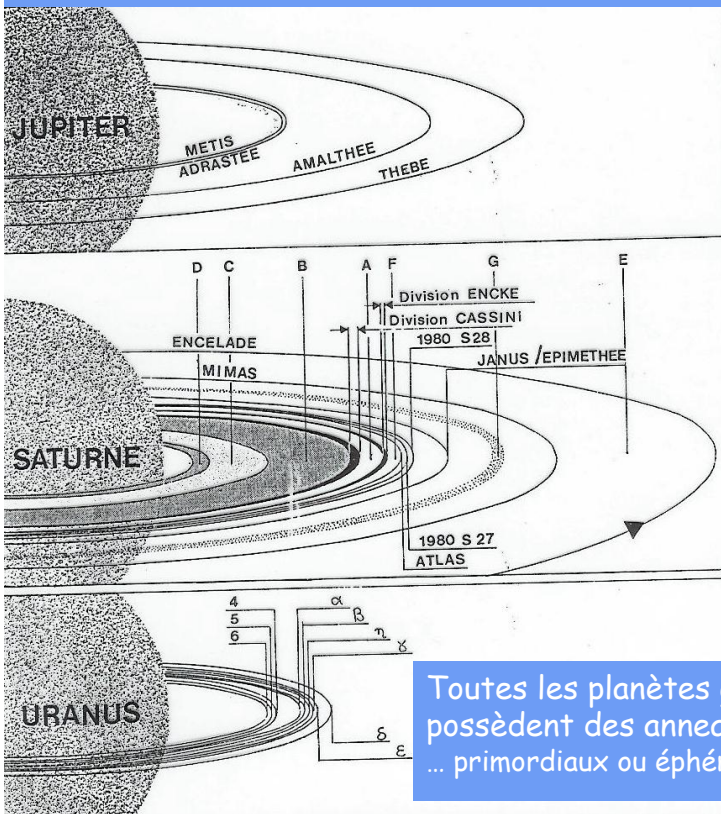
Compl. 13.1

## Formation des anneaux et limite de Roche (VII)

Sect. 13.7

$$d < R_{\text{Roche}} = 2.45 \left( \frac{\rho_M}{\rho_m} \right)^{1/3} R$$

$$d < R_{\text{Roche}} \approx 2.5 R$$

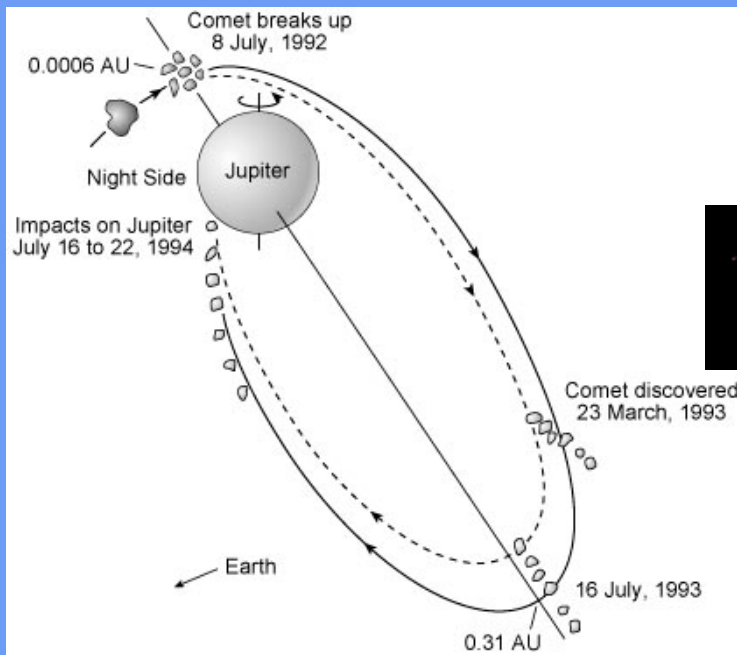


Toutes les planètes géantes possèdent des anneaux...  
... primordiaux ou éphémères??

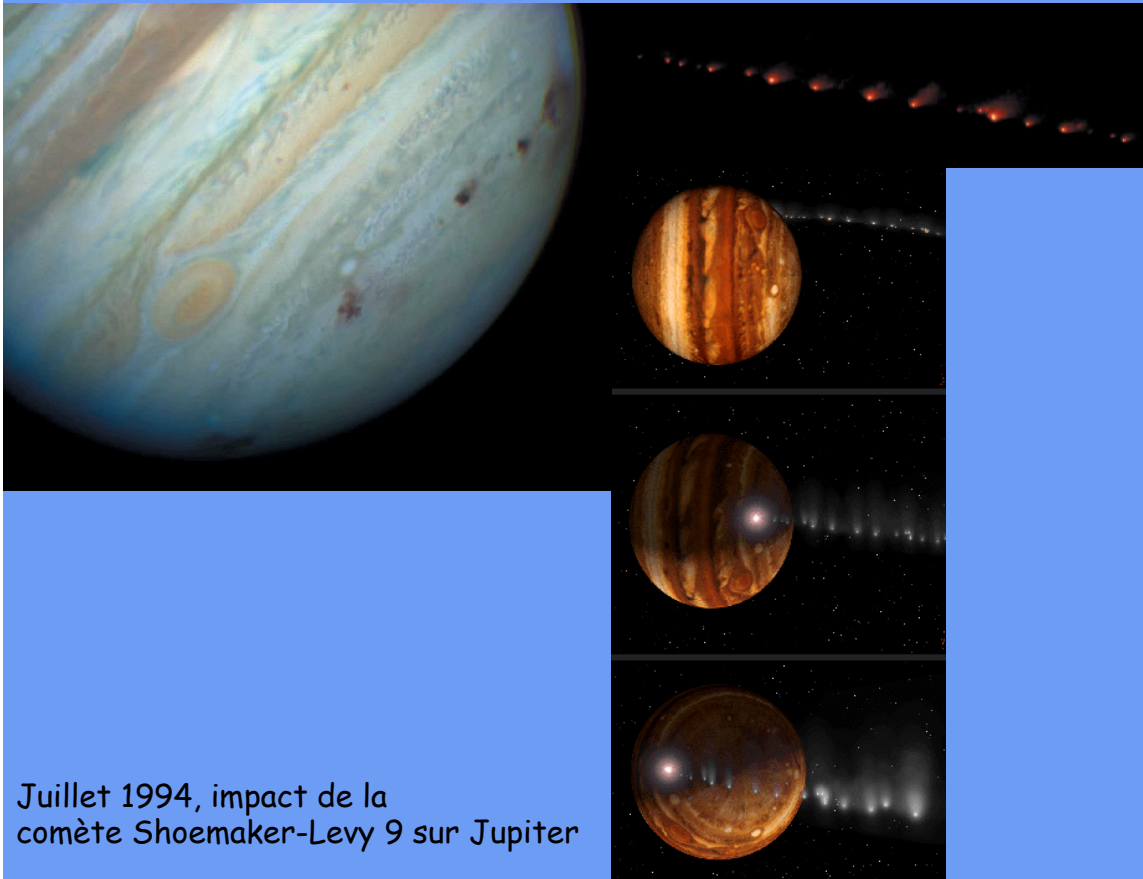
Tableau 13.3 (adapté)	r <sub>orbite</sub> / R <sub>planète</sub>	Taille (km)
<b>Système de Jupiter</b>		
Métis	1.79	30 x 17
Adrastée	1.81	102 x 7
Amalthée	2.54	125 x 64
Thebe	3.10	58 x 42
<b>Système de Saturne</b>		
(sans nom)	1.97	15
Pan	2.23	10
Atlas	2.30	18 x 14
Prométhée	2.32	74 x 34
Pandore	2.36	55 x 31
Epiméthée	2.51	69 x 53
Janus	2.51	99 x 76
Mimas	3.08	199
Encelade	3.95	249



## Orbite de la comète Shoemaker-Levy 9



Crédit: K.R. Lang, [http://ase.tufts.edu/cosmos/view\\_picture.asp?id=765](http://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=765)



Juillet 1994, impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter

## La formation des planètes

Sect. 13.7

### Formation des anneaux et limite de Roche (VIII)

Toutes les planètes géantes possèdent des anneaux:

#### Jupiter

Anneau très ténu, découvert par les sondes Voyager en 1979, alimenté par la lente désagrégation des satellites Métis et Adrastée?

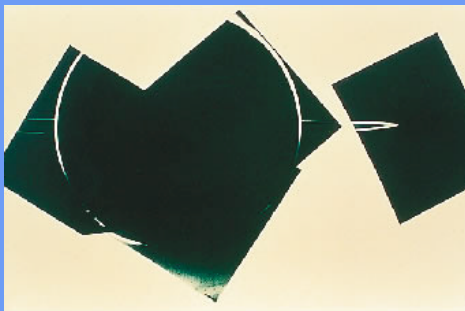
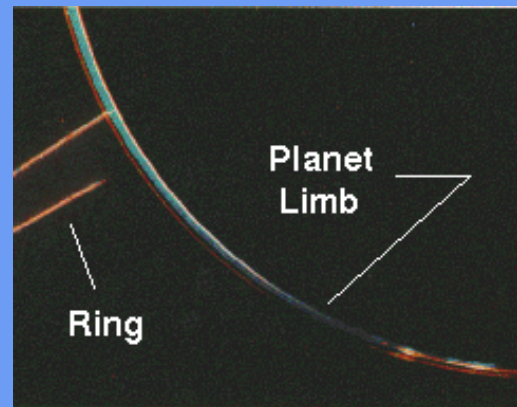


Fig. 13.24

Tableau 13.2

	Masse des anneaux ( $10^{17}$ kg $= M_{\text{phobos}}$ )	albédo
Jupiter	0.000 001	faible
Saturne	1000	0.6
Uranus	0.01	0.05
Neptune	0.000 1	0.05



## La formation des planètes

Sect. 13.7

### Formation des anneaux et limite de Roche (IX)

Toutes les planètes géantes possèdent des anneaux:

#### Saturne

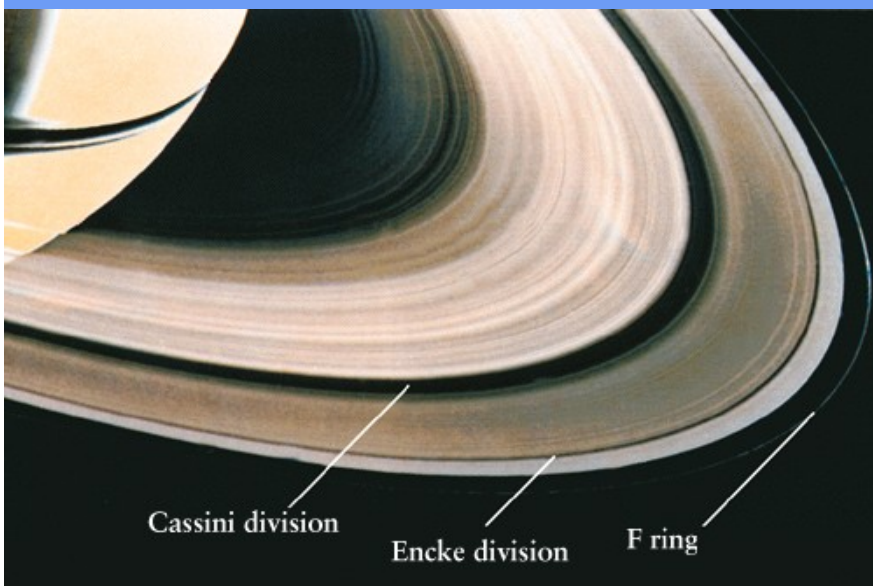
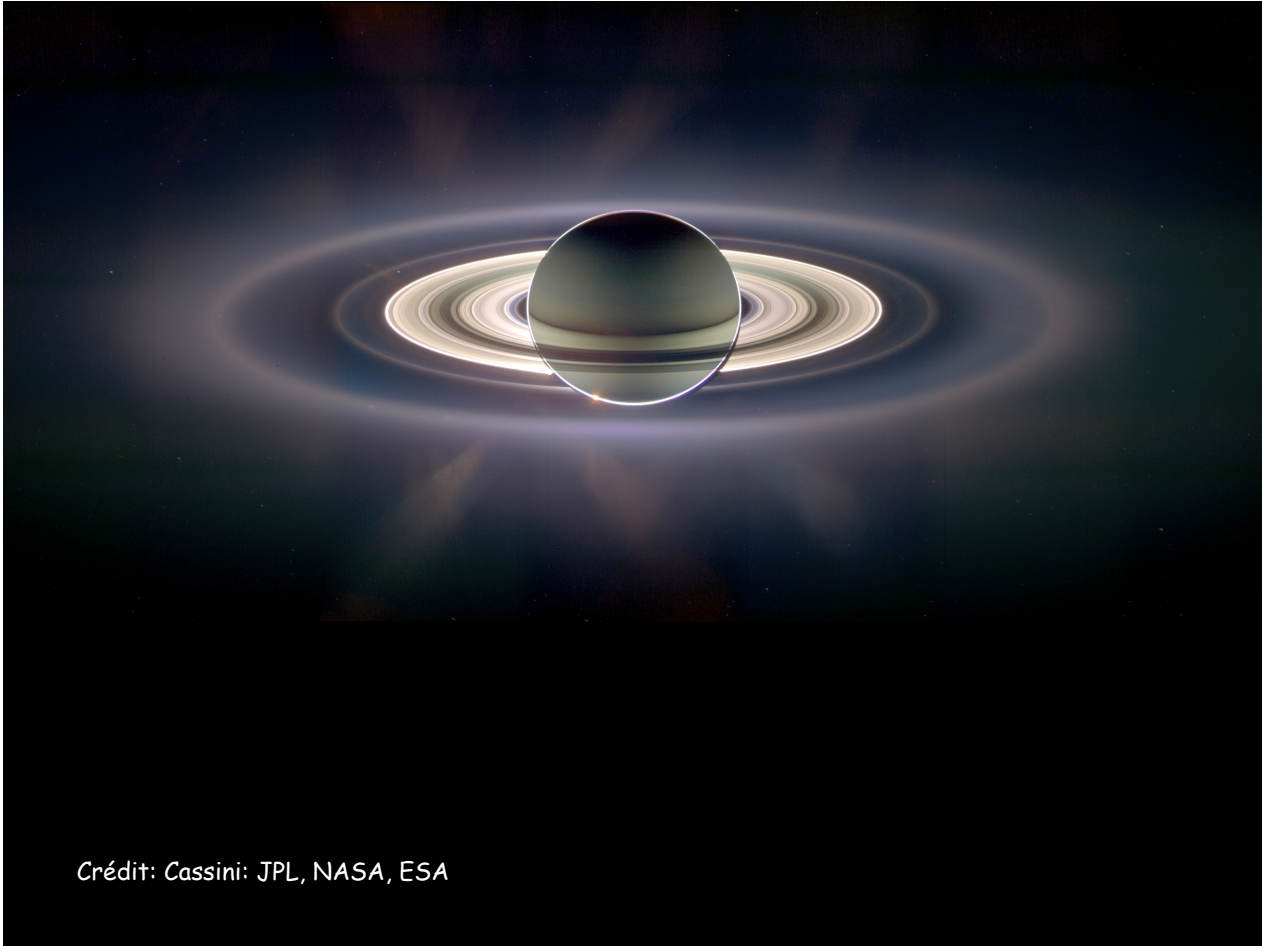


Tableau 13.2

	Masse des anneaux ( $10^{17}$ kg $= M_{\text{phobos}}$ )	albédo
Jupiter	0.000 001	faible
Saturne	1000	0.6
Uranus	0.01	0.05
Neptune	0.000 1	0.05

Découverts par Galilée en 1610, très minces (1 km d'épaisseur), albédo suggérant de la glace



Crédit: Cassini: JPL, NASA, ESA



Vues d'artiste des anneaux de Saturne

Fig. 13.25

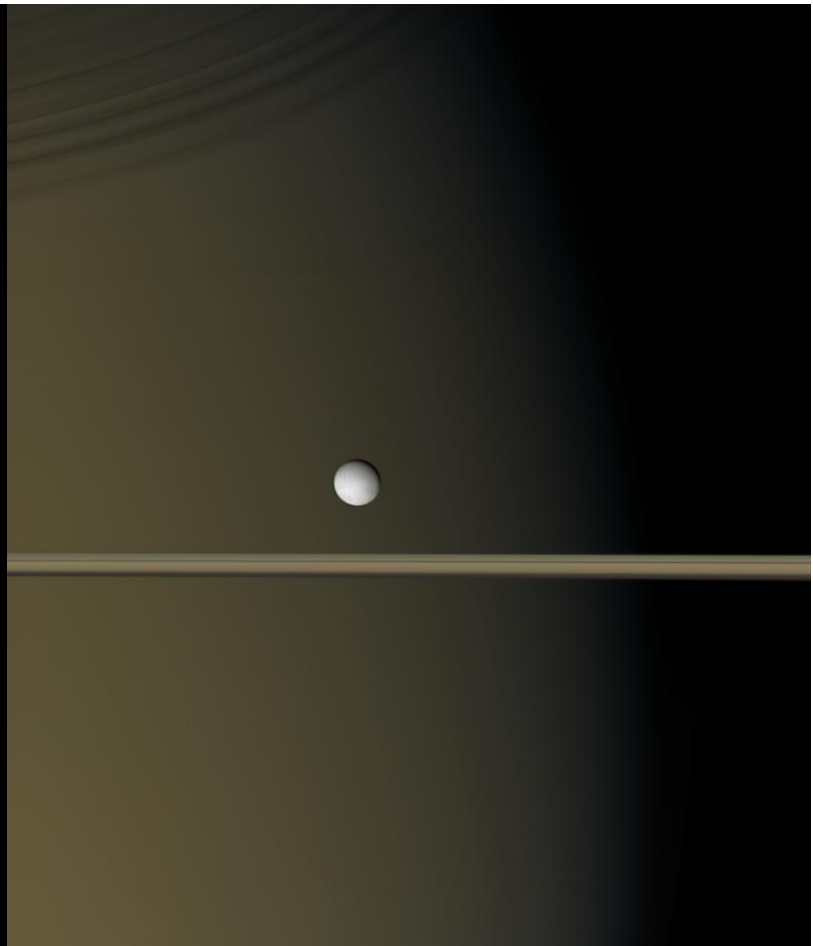
Ombre des anneaux

Encelade

Anneaux

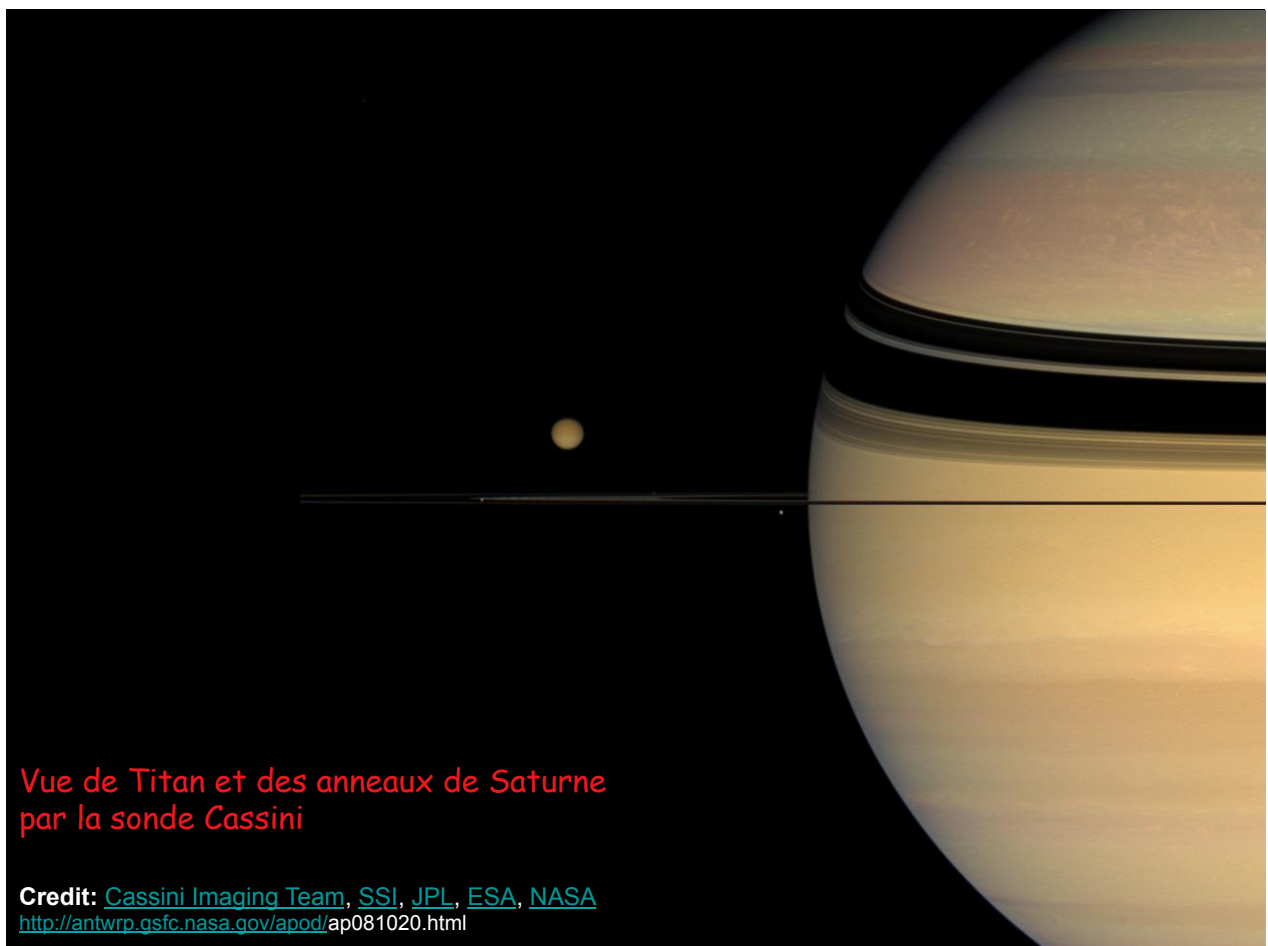
Vue des anneaux de Saturne  
par la sonde Cassini

[http://antwrrp.gsfc.nasa.gov/apod/  
ap060322.html](http://antwrrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap060322.html)

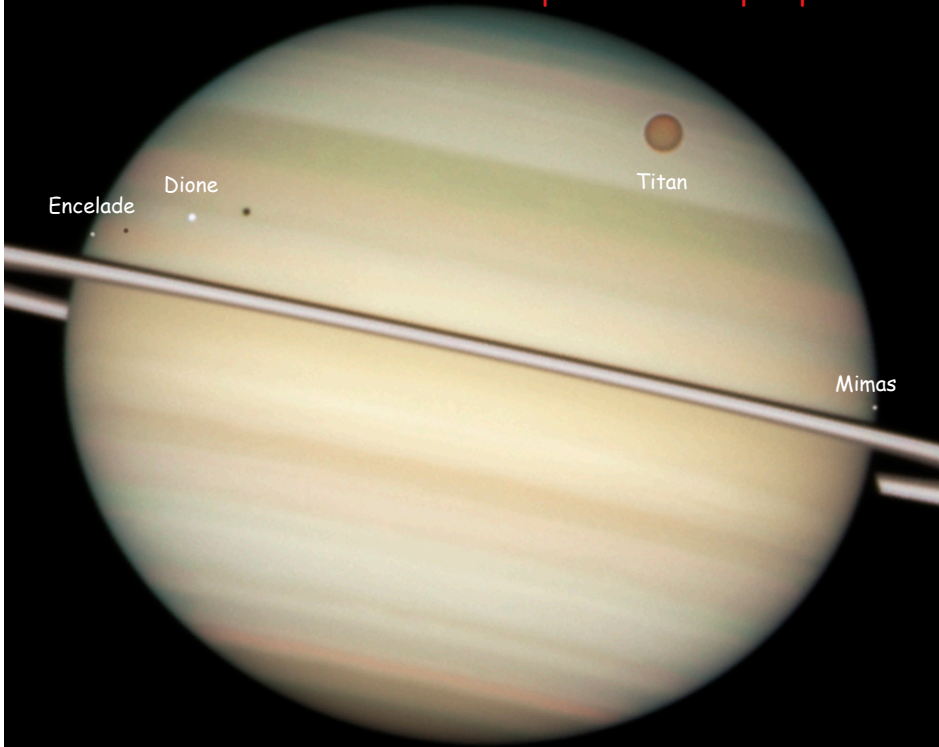


Vue de Titan et des anneaux de Saturne  
par la sonde Cassini

Credit: [Cassini Imaging Team](#), [SSI](#), [JPL](#), [ESA](#), [NASA](#)  
<http://antwrrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap081020.html>

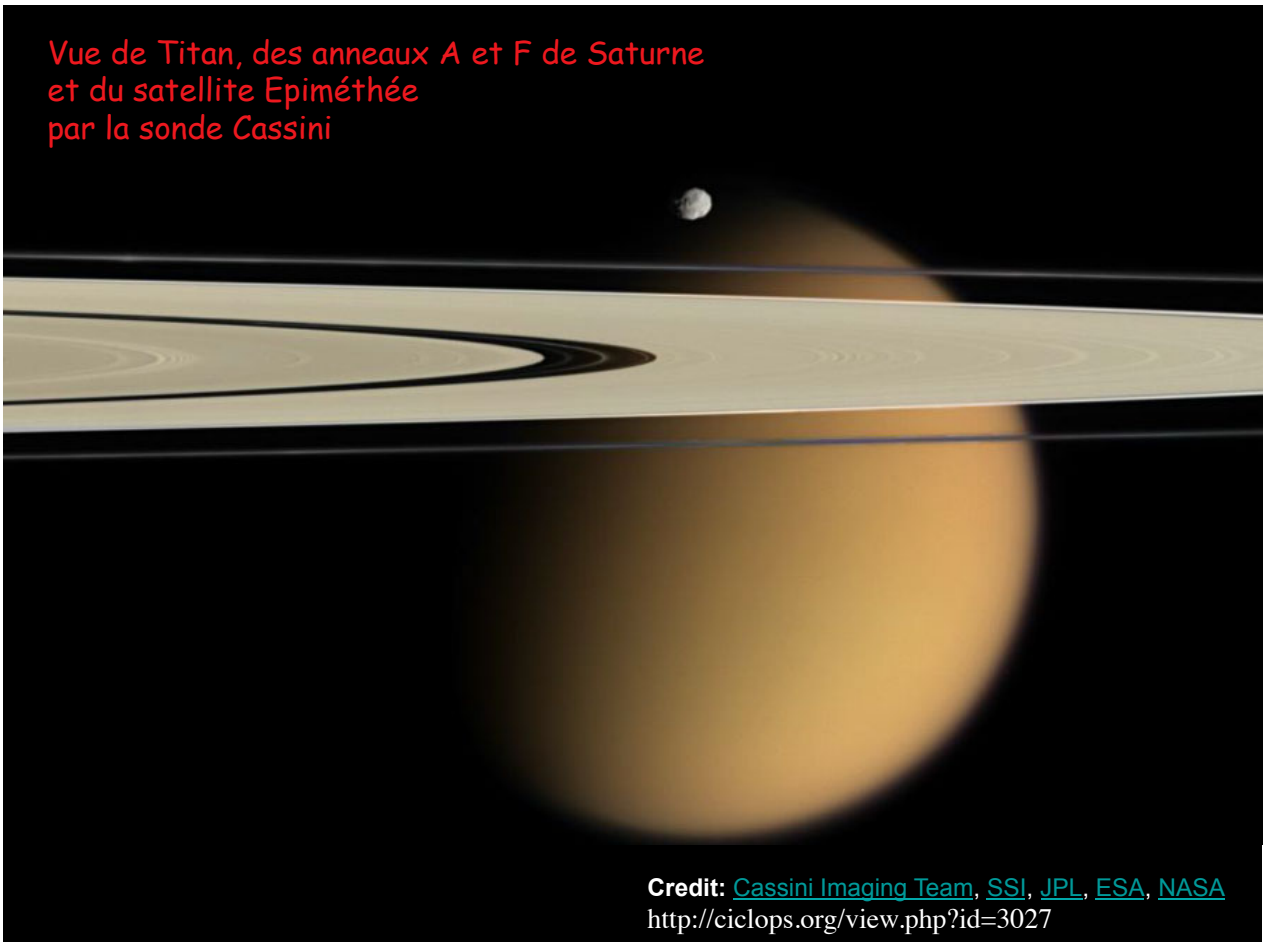


Vue de 4 satellites et des anneaux de Saturne par le télescope spatial Hubble



Credit: [Hubble Space Telescope](http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap090319.html)  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap090319.html>

Vue de Titan, des anneaux A et F de Saturne et du satellite Epiméthée par la sonde Cassini



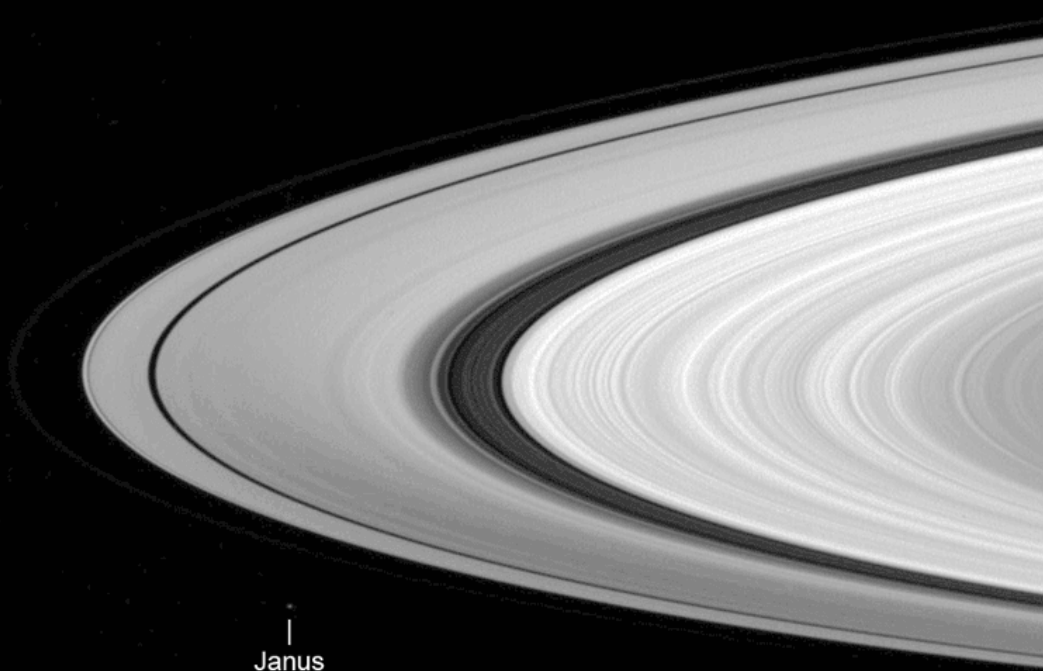
Credit: [Cassini Imaging Team](http://ciclops.org/view.php?id=3027), [SSI](#), [JPL](#), [ESA](#), [NASA](#)  
<http://ciclops.org/view.php?id=3027>

*Anneau B vu par Voyager*



[http://www.planetary.org/saturn/images\\_saturn\\_rings.html](http://www.planetary.org/saturn/images_saturn_rings.html)

*Anneaux vus par Cassini*



Janus

## La formation des planètes

Sect. 13.7

### Formation des anneaux et limite de Roche (X)

Toutes les planètes géantes possèdent des anneaux:

Tableau 13.2

#### Uranus

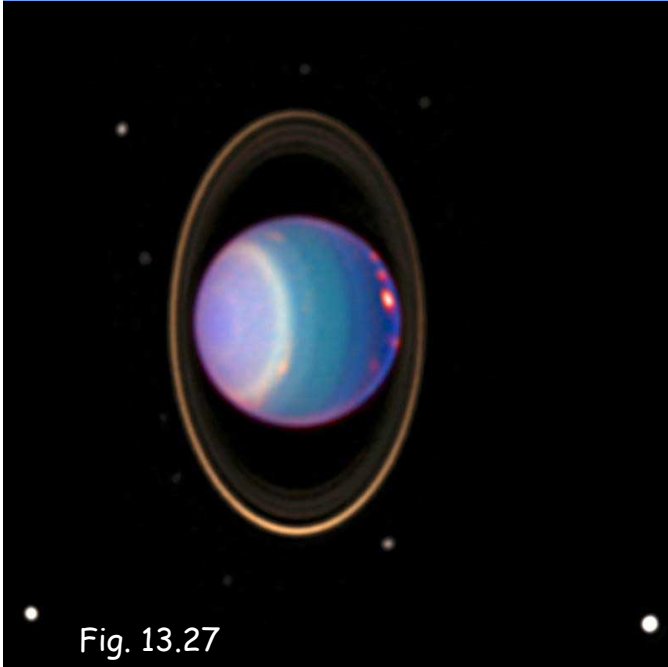


Fig. 13.27

	Masse des anneaux ( $10^{17}$ kg = $M_{\text{phobos}}$ )	albédo
Jupiter	0.000 001	faible
Saturne	1000	0.6
Uranus	0.01	0.05
Neptune	0.000 1	0.05

Découverts depuis la Terre le 10 mars 1977

albédo suggérant de la glace d'eau mélangée à de la glace sombre de méthane

## La formation des planètes

Sect. 13.7

### Formation des anneaux et limite de Roche (XI)

Toutes les planètes géantes possèdent des anneaux:

Tableau 13.2

#### Neptune

Découverts depuis la Terre le 22 juillet 1984;  
albédo suggérant de la glace d'eau mélangée à de la glace sombre de méthane;  
anneaux incomplets = arcs

	Masse des anneaux ( $10^{17}$ kg = $M_{\text{phobos}}$ )	albédo
Jupiter	0.000 001	faible
Saturne	1000	0.6
Uranus	0.01	0.05
Neptune	0.000 1	0.05

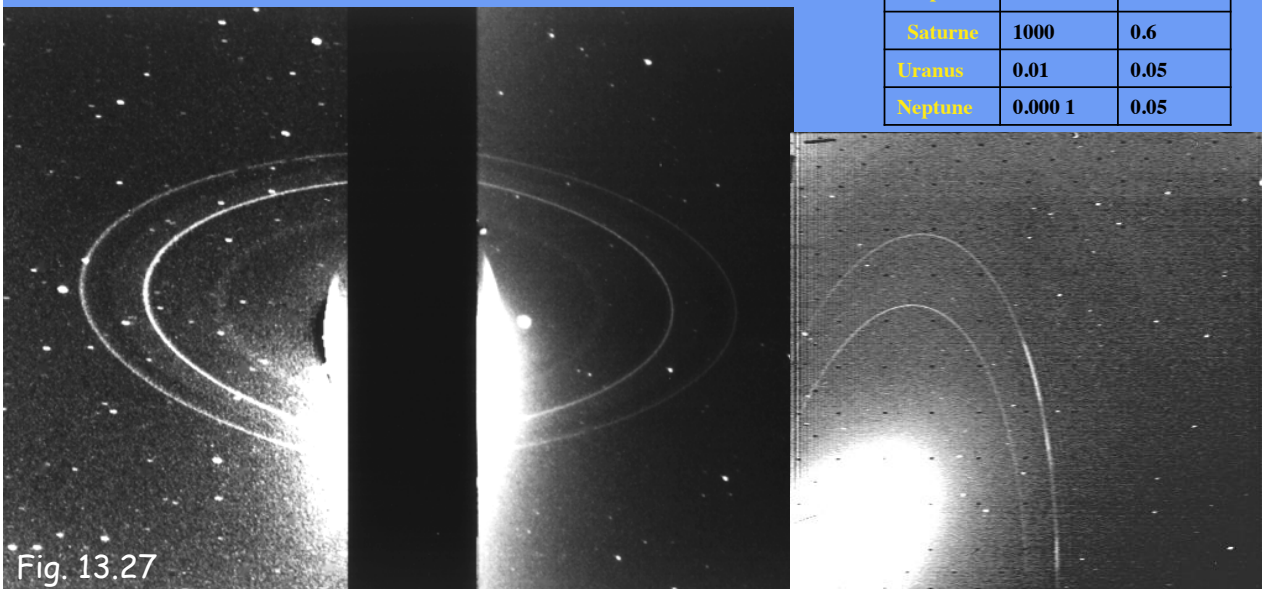


Fig. 13.27

## Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

- Ceinture d' astéroïdes:
  - Ceinture principale
  - Famille Apollo - Amor
    - Impacts terrestres
- Satellites capturés
- Ceinture de Kuiper ou objets transneptuniens (Anomalies Pluton-Charon)
- Comètes et nuage de Oort
  - Comètes à longue période
  - Comètes à courte période
  - Captures
  - Essaims de météores

## Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

### Ceinture d' astéroïdes

Loi de Titius-Bode: Curiosité mathématique ou loi physique?  
Titius (1766) - Bode (1778):

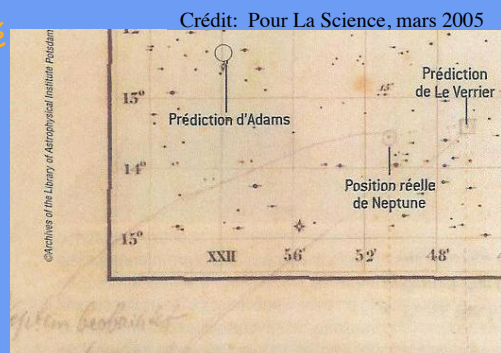
Tableau 12.4

$A_n$ (UA) = $(3 \times 2^n + 4) / 10$		prédit	observé
$n = -\infty$	Mercure	0.4	0.39
$n = 0$	Vénus	0.7	0.72
$n = 1$	Terre	1	1.00
$n = 2$	Mars	1.6	1.52
$n = 3$	?	2.8	?
$n = 4$	Jupiter	5.2	5.20
$n = 5$	Saturne	10	9.54
$n = 6$	?	19.6	19.2
$n = 7$	?	38.8	30.1

Uranus, découverte en 1781 par W. Herschel !

NON !

Neptune, découverte en 1846 par Le Verrier, Adams et Galle





## Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

### Ceinture d'astéroïdes

Loi de Titius-Bode: Curiosité mathématique ou loi physique?  
Titius (1766) - Bode (1778):

Tableau 12.4

$A_n$ (UA) = $(3 \times 2^n + 4) / 10$		prédit	observé	
$n = -\infty$	Mercure	0.4	0.39	
$n = 0$	Vénus	0.7	0.72	
$n = 1$	Terre	1	1.00	
$n = 2$	Mars	1.6	1.52	
$n = 3$	?	2.8	?	
$n = 4$	Jupiter	5.2	5.20	
$n = 5$	Saturne	10	9.54	
$n = 6$	?	19.6	19.2	OK!
	Uranus, découverte en 1781 par W. Herschel!			
$n = 7$	?	38.8	30.1	NON!
	Neptune, découverte en 1846 par Le Verrier, Adams et Galle			
$n = 8$	?	77.2	39.7	NON!
	Pluton, découverte en 1930 par Tombaugh, sur suspicion de P. Lowell			

Quoiqu' il en soit, cette loi eut le mérite de motiver la recherche de la planète « prédite » par la loi de Titius-Bode en  $n = 3$

## Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

### Ceinture d'astéroïdes

Loi de Titius-Bode: Curiosité mathématique ou loi physique?  
Titius (1766) - Bode (1778):

Quoiqu' il en soit, cette loi eut le mérite de motiver la recherche de la planète « prédite » par la loi de Titius-Bode en  $n = 3$

En 1801, Piazzi annonce la découverte d'un nouveau corps (Cérès) avec  $A = 2.77$  UA alors que la loi de Titius-Bode prévoit  $A = 2.8$  UA pour  $n = 3$  !

Cérès est cependant très petit :            diamètre = 940 km            (Terre: 12 760 km)

Surprise: en 1802, Olbers découvre Pallas (diam. = 540 km)  
                  1804, Harding                    Junon (diam. = 265 km)  
                  1807, Olbers                    Vesta (diam. = 510 km)

...

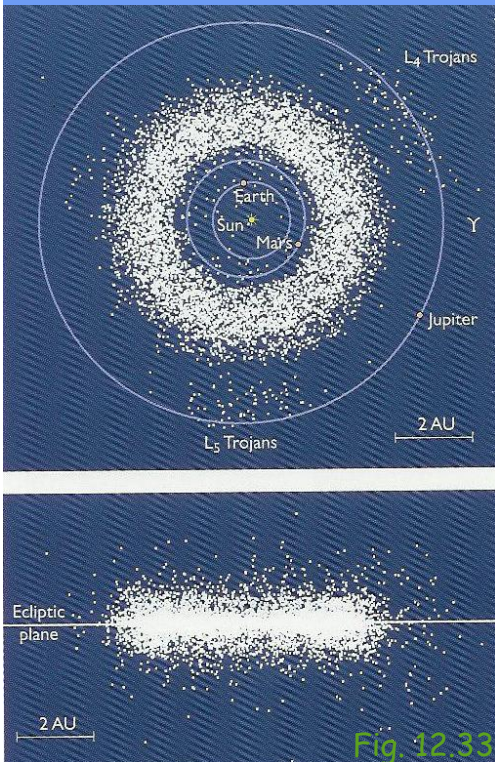
Aujourd' hui: 22 000 astéroïdes dont l' orbite est connue  
                  100 000 astéroïdes dont la taille est supérieure à 1 km (estimation)  
                  Au total, les astéroïdes agglomérés formeraient un corps de  
                  - 1500 km de diamètre (soit 1/2 de la Lune)  
                  - avec une masse de l' ordre du 1/10 de celle de la Lune

# Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

## Ceinture d'astéroïdes

Crédit: The new solar system, Beatty et al., Cambridge UP, 1999



Aujourd'hui: 22 000 astéroïdes dont l'orbite est connue  
100 000 astéroïdes dont la taille est supérieure à 1 km (estimation)

Au total, les astéroïdes agglomérés formeraient un corps de  
- 1500 km de diamètre (soit 1/2 de la Lune)  
- avec une masse de l'ordre du 1/10 de celle de la Lune

La majorité sont situés entre les orbites de Mars et Jupiter, avec  $2.2 \leq A \text{ (UA)} \leq 3.3$  correspondant à la **ceinture principale**

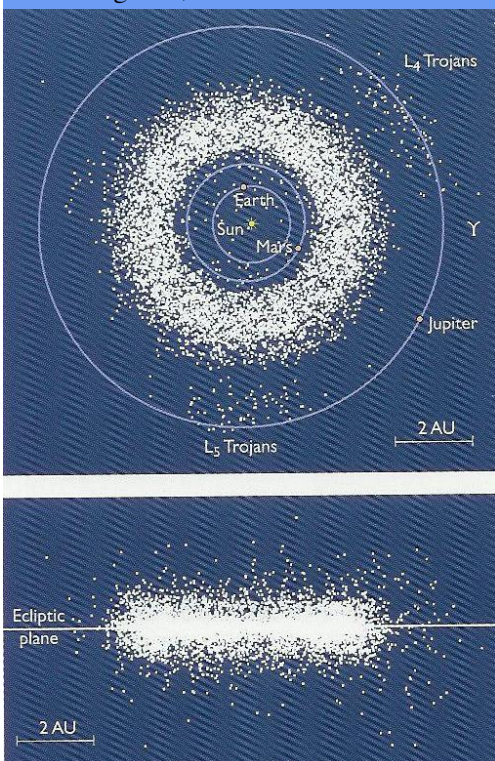
- Astéroïdes: pas planète éclatée, mais planète jamais formée !  
à cause des perturbations gravitationnelles de Jupiter,
- qui a éjecté les objets qui s'y trouvaient lors de la formation des planètes
  - qui a rendu difficile l'agglomération d'une planète de taille terrestre

# Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

## Ceinture d'astéroïdes

Crédit: The new solar system, Beatty et al., Cambridge UP, 1999

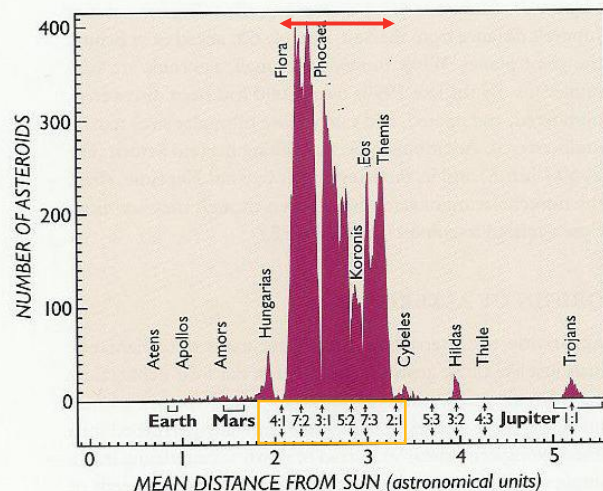


22 000 astéroïdes dont l'orbite est connue

$2.2 \leq A \text{ (UA)} \leq 3.3$ : **ceinture principale**

lacunes de Kirkwood,

lorsque  $P_{\text{Jupiter}} / P_{\text{astéroïde}} = m / n$



# Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

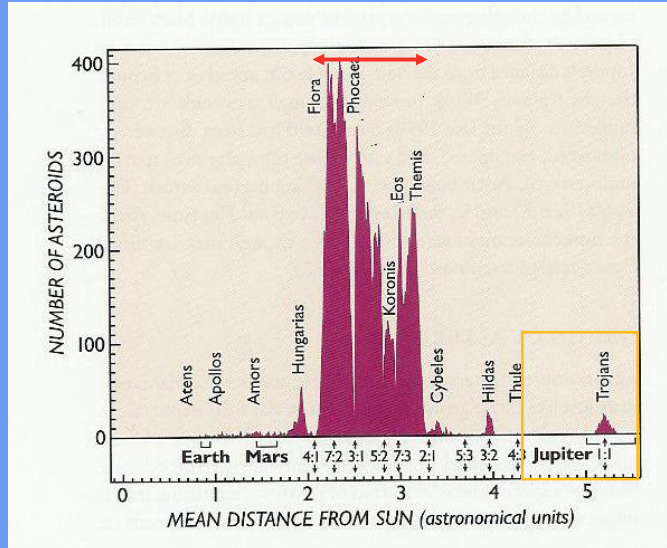
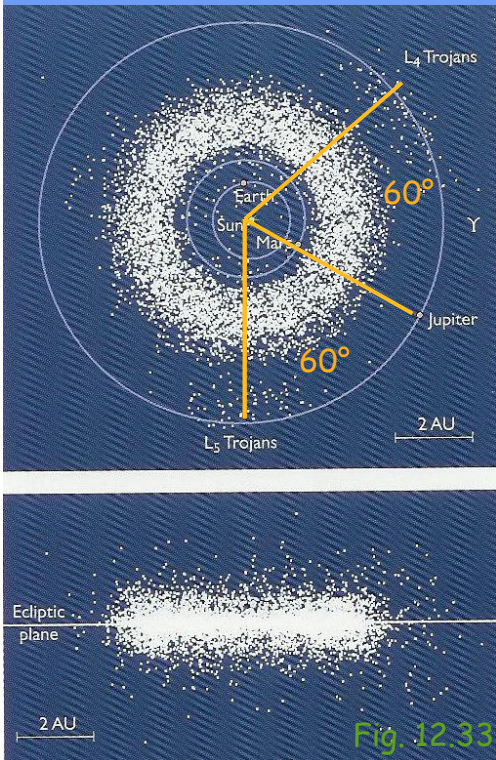
## Ceinture d'astéroïdes

Crédit: The new solar system, Beatty et al., Cambridge UP, 1999

22 000 astéroïdes dont l'orbite est connue

$A$  (UA) = 5.2: astéroïdes troyens

$$P_{\text{Jupiter}} / P_{\text{astéroïde}} = 1 / 1$$



# Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

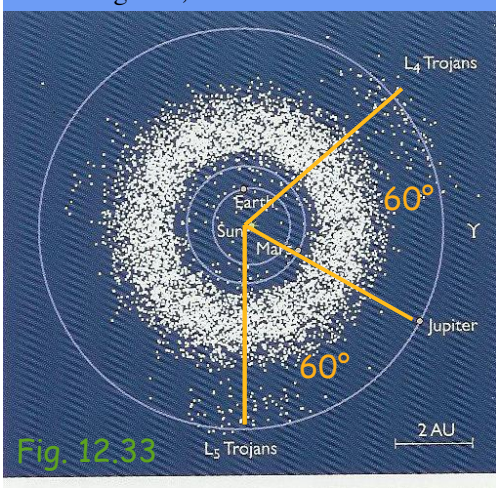
## Ceinture d'astéroïdes

Crédit: The new solar system, Beatty et al., Cambridge UP, 1999

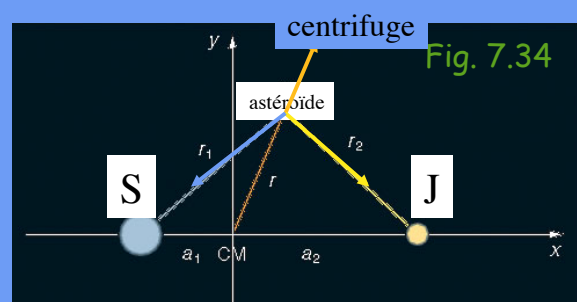
22 000 astéroïdes dont l'orbite est connue

$A$  (UA) = 5.2: astéroïdes troyens

$$P_{\text{Jupiter}} / P_{\text{astéroïde}} = 1 / 1$$



Math. & Phys. : Compl. 7.5 : Points de Lagrange  $L_4$  et  $L_5$  stables car  $M_J / M_{\text{soleil}} < 0.04$



# Petits corps du système solaire

## Ceinture d'astéroïdes

Les astéroïdes troyens occupent les points de Lagrange L4 et L5 du système Soleil - Jupiter

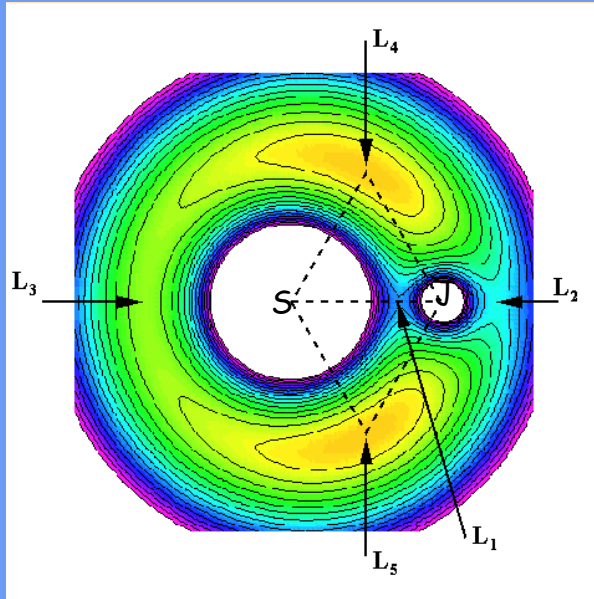
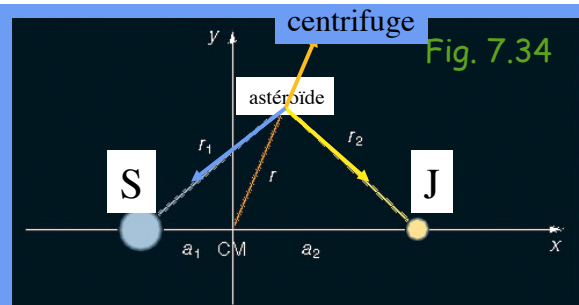
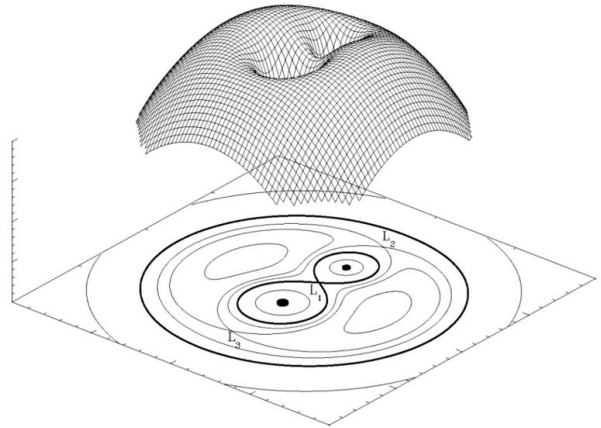


Fig. 7.37



# Petits corps du système solaire

Sects. 12.7 & 13.8

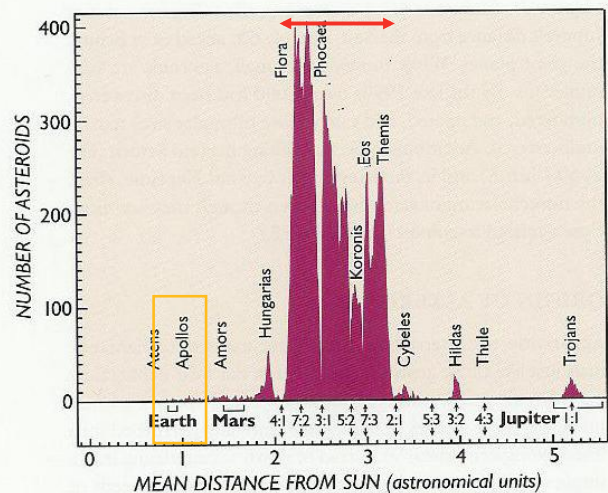
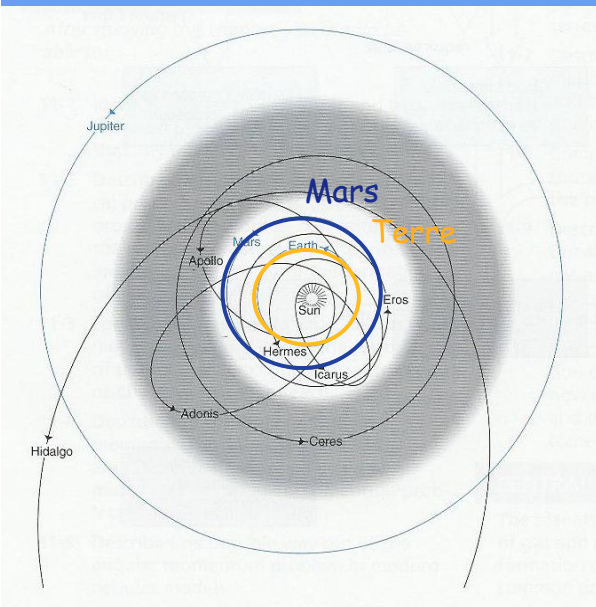
## Ceinture d'astéroïdes

22 000 astéroïdes dont l'orbite est connue

A (UA) ~ 1: **astéroïdes Apollo**

Crédit: M. Zeilik, Astronomy, The evolving universe, Cambridge UP, 2002

**Danger de collision avec la Terre !**



# Petits corps du système solaire

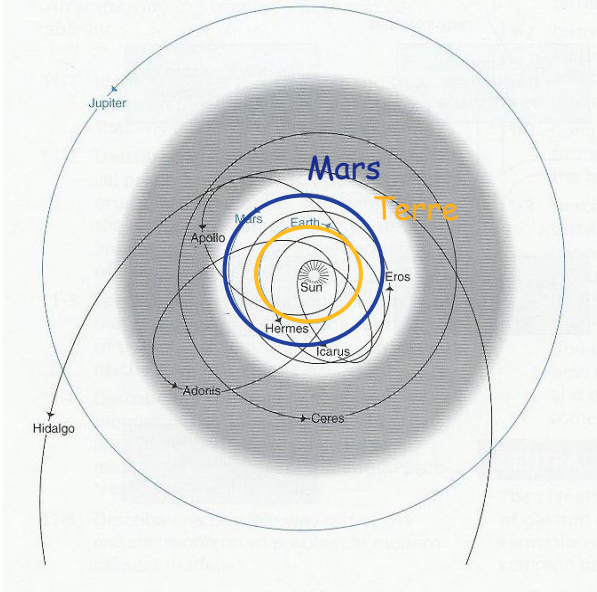
Sects. 12.7 & 13.8

## Astéroïdes Apollo

<http://cfa-www.harvard.edu/iau/Animations/Animations.html>

$6.6 \cdot 10^6$       $D < 6.6 \cdot 10^6$  km  
 $13.2 \cdot 10^6$  km  $< D$

Crédit: M. Zeilik, Astronomy, The evolving universe, Cambridge UP, 2002



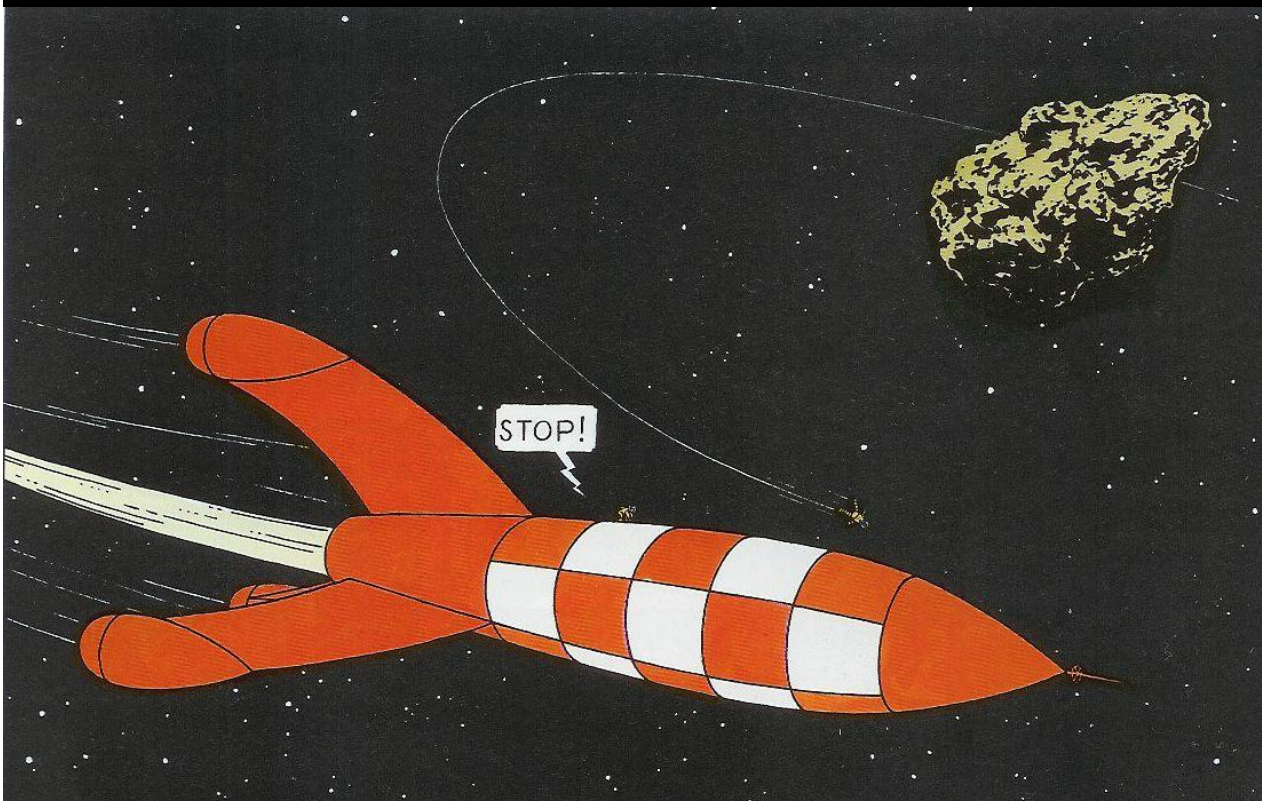
### *A Ride With the Earth*

An animation centered on Earth showing the known objects that have approached to within 20 million km during 2002.

See the Animations Page on the MPC website for a description of the symbols used in this animation.

### Astéroïde Adonis

*On a marché sur la Lune, Hergé, 1954*



## Petits corps du système solaire

Sect. 13.10

Les pierres qui tombent du ciel:

- Un bel exemple de résistance au progrès de la part de la communauté scientifique... malgré de nombreux témoignages:
  - 800 av. J.C.: *Iliade*, Homère
  - 100 ap. J.C.: *Apocalypse (Nouveau Testament)*, 8: 8-9

« ...Une énorme masse embrasée, comme une montagne, fut projetée dans la mer, et le tiers de la mer devint du sang: il périt un tiers des créatures vivant dans la mer... »

Crédit:

[http://news.nationalgeographic.com/news/2004/03/0309\\_040309\\_chicxulubdinosaurs.html](http://news.nationalgeographic.com/news/2004/03/0309_040309_chicxulubdinosaurs.html)



## Petits corps du système solaire

Sect. 13.10

Les pierres qui tombent du ciel:

- Un bel exemple de résistance au progrès de la part de la communauté scientifique... malgré de nombreux témoignages:
    - 800 av. J.C.: *Iliade*, Homère
    - 100 ap. J.C.: *Apocalypse (Nouveau Testament)*, 8: 8-9
    - roche noire de La Mecque
    - L' Aigle (France) : 26 avril 1803 - Jean-Baptiste Biot
  - Un fait surprenant dans le contexte scientifique d' une époque ne peut intégrer le corpus scientifique que s' il est formellement avéré
- Une telle résistance est en fait **souhaitable** !

## Petits corps du système solaire

Sect. 13.10

Les pierres qui tombent du ciel:

10 août 1972, Grand Teton National Park (Wyoming)



10 m de  
diamètre?

Crédit: [http://impact.arc.nasa.gov/reports/spaceguard/figure\\_2-1.gif](http://impact.arc.nasa.gov/reports/spaceguard/figure_2-1.gif)

## Petits corps du système solaire

Les pierres qui tombent du ciel:

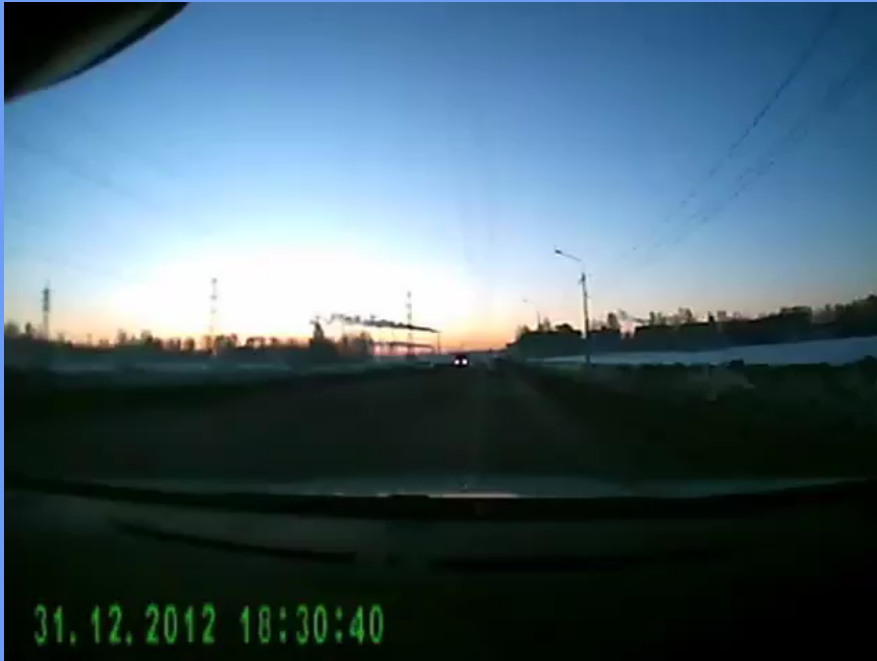
20 novembre 2008 (17:30), Edmonton (Canada)



## Petits corps du système solaire

Les pierres qui tombent du ciel:

15 février 2013, Tcheliabinsk (Oural, Russie)



## Petits corps du système solaire

Sect. 13.10

Les pierres qui tombent du ciel:

30 juin 1908, Tunguska (Sibérie), explosion d'un bolide dans l'atmosphère

énergie dégagée  
équivalente à 10 Mt TNT,  
soit 1000 explosions  
nucléaires d'Hiroshima



Crédit: <http://www.tmeg.com/artifacts/tunguska/map.gif>



## Petits corps du système solaire

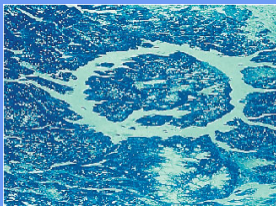
Sect. 13.10

Les cratères d'impact terrestres sont assez nombreux:

Voir par exemple <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/CIDiameterSort.html>



Désert du Tchad (45 x 60 km<sup>2</sup>)



Manicougan, Québec (diamètre 100 km, âge 210 10<sup>6</sup> ans)



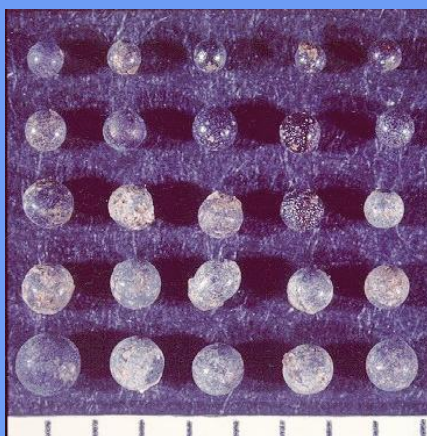
Meteor Crater, Arizona  
(diamètre 1.2 km, profondeur 200m, âge 25 000 ans,  
météorite de 60 m de diamètre)

Figs. 13.36, 13.38

## Petits corps du système solaire

Sect. 13.10

Les cratères d'impact terrestres sont assez nombreux:



mm

L'origine météoritique du « Meteor Crater » ne fut clairement établie que depuis la découverte de « tectites » dans son voisinage

Crédit:

<http://dsaing.uqac.quebec.ca/~mhiggins/MIAC/chicxulub.htm>



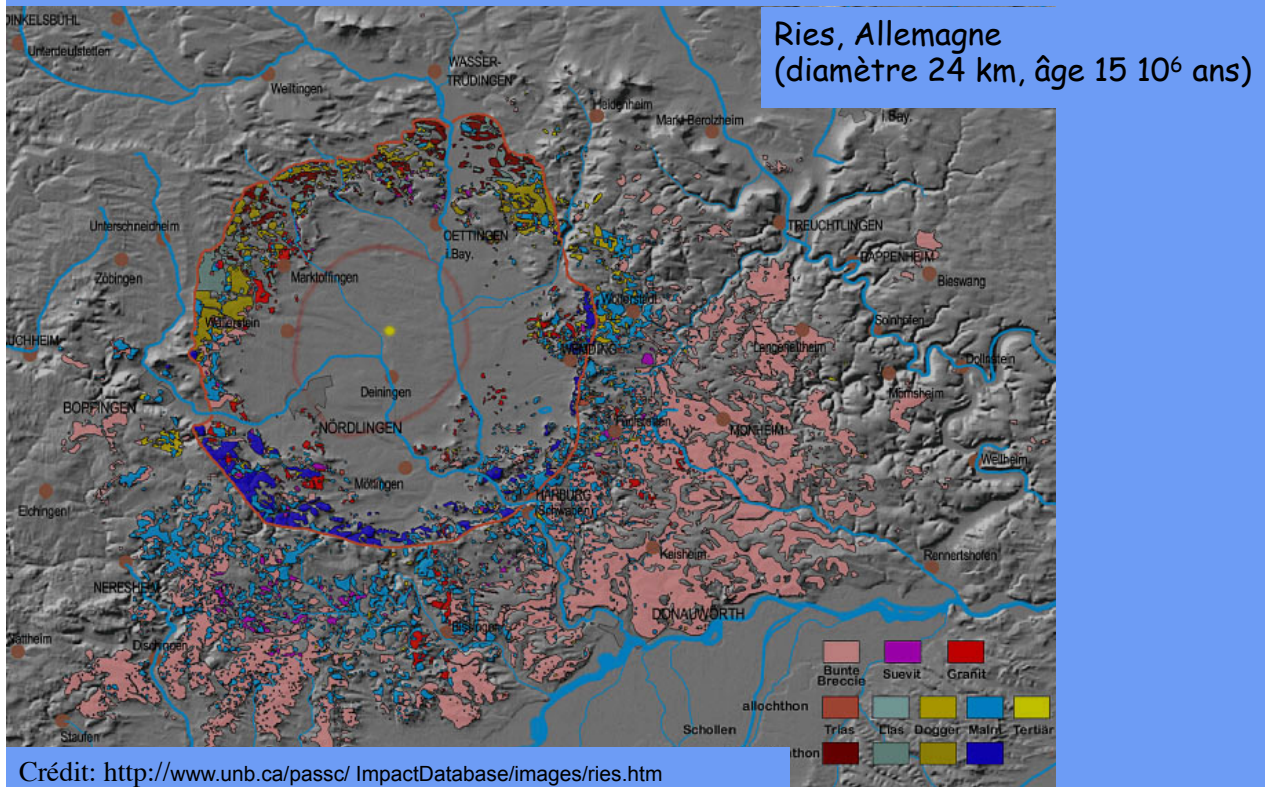
Meteor Crater, Arizona  
(diamètre 1.2 km, profondeur 200m, âge 25 000 ans,  
météorite de 60 m de diamètre)

Figs. 13.36, 13.38

## Petits corps du système solaire

Sect. 13.10

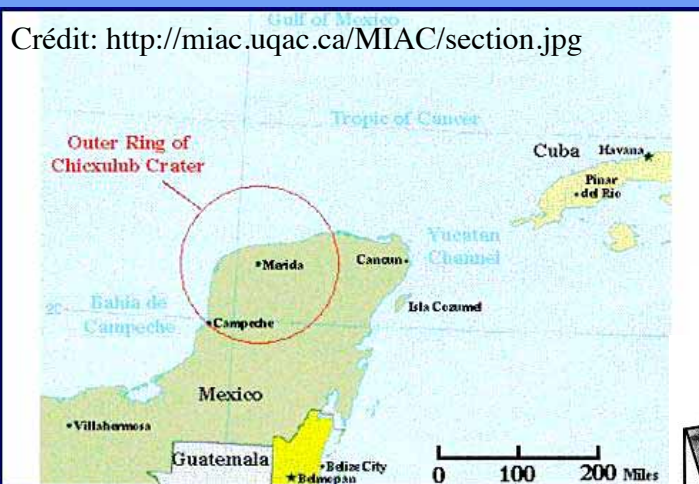
Les cratères d'impact terrestres sont assez nombreux:



## Petits corps du système solaire

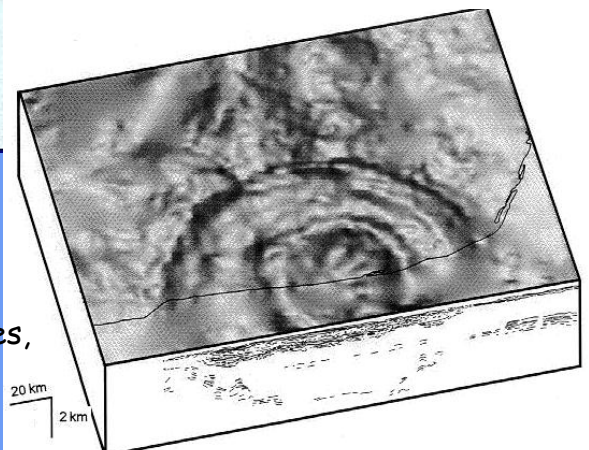
Sect. 13.10

Les cratères d'impact terrestres sont assez nombreux:

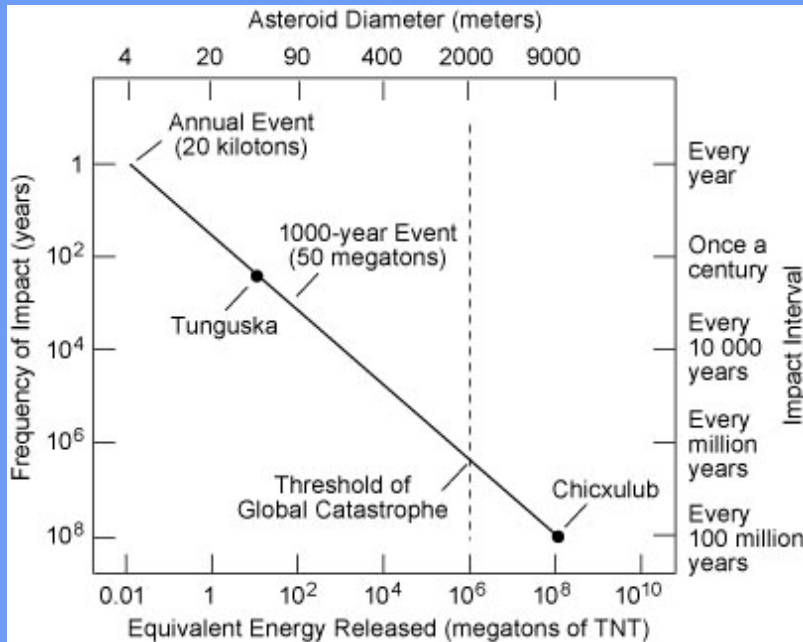


<http://dsaing.uqac.quebec.ca/~mhiggins/MIAC/chicxulub.htm>

Cratère de Chicxulub (Yucatan):  
Diamètre 200 km, âge  $65 \cdot 10^6$  ans  
Météorite de 10 km de diamètre?  
Énergie dégagée  $\sim 10^8$  Mt TNT,  
se produit tous les 50 à 100 millions d'années,  
Cause des extinctions massives d'espèces

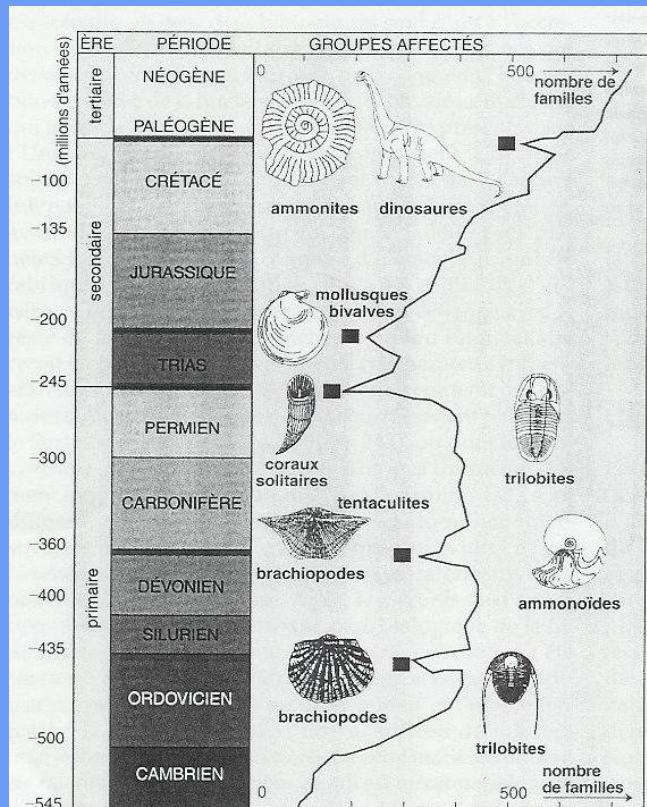


Fréquence des impacts terrestres :

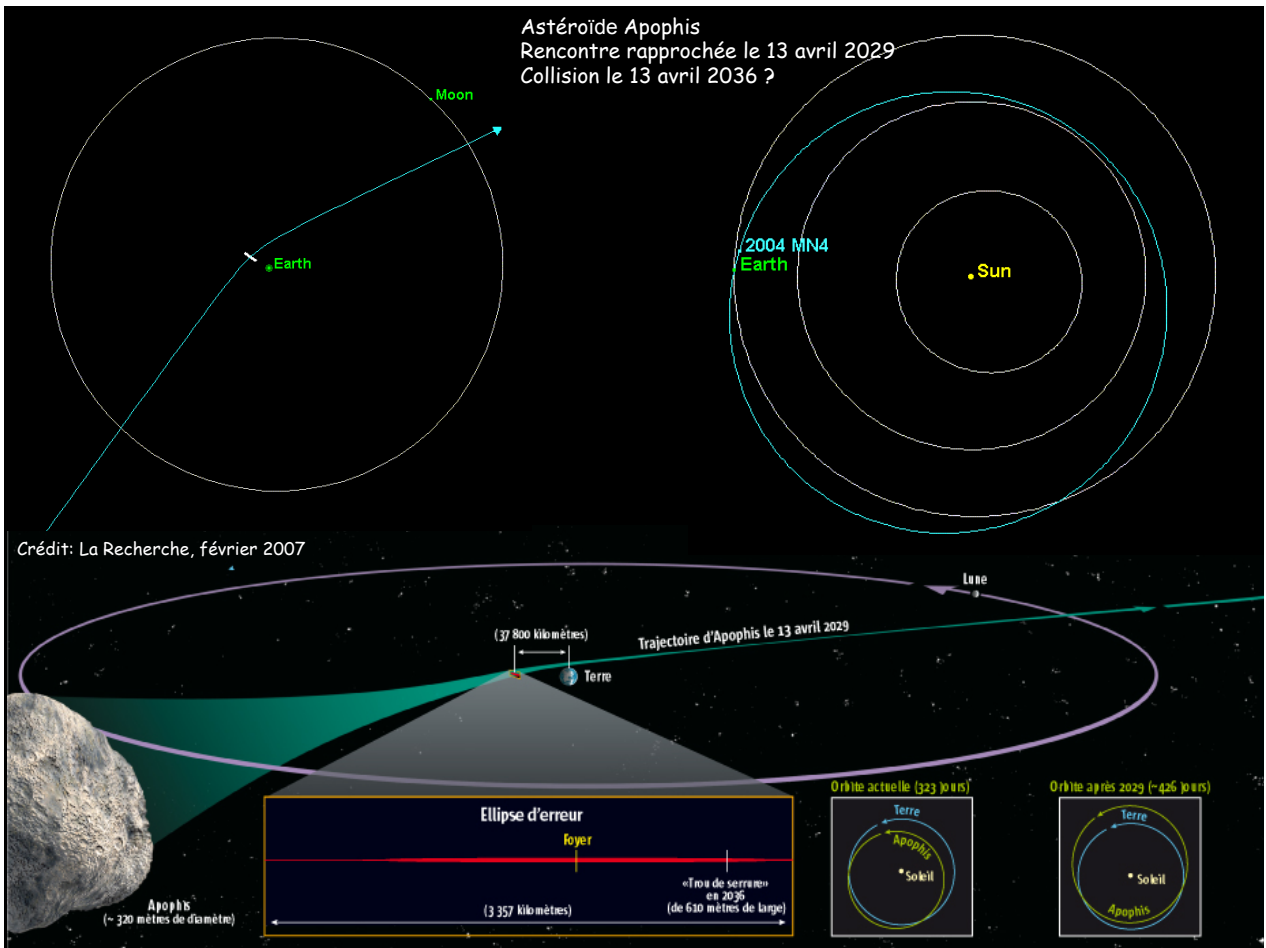


Crédit: K.R. Lang, [http://ase.tufts.edu/cosmos/view\\_picture.asp?id=773](http://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=773)

Fréquence des extinctions massives :



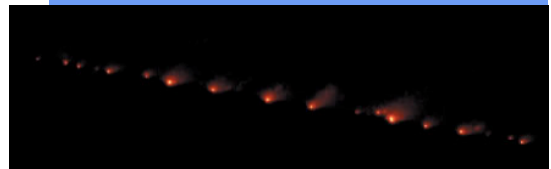
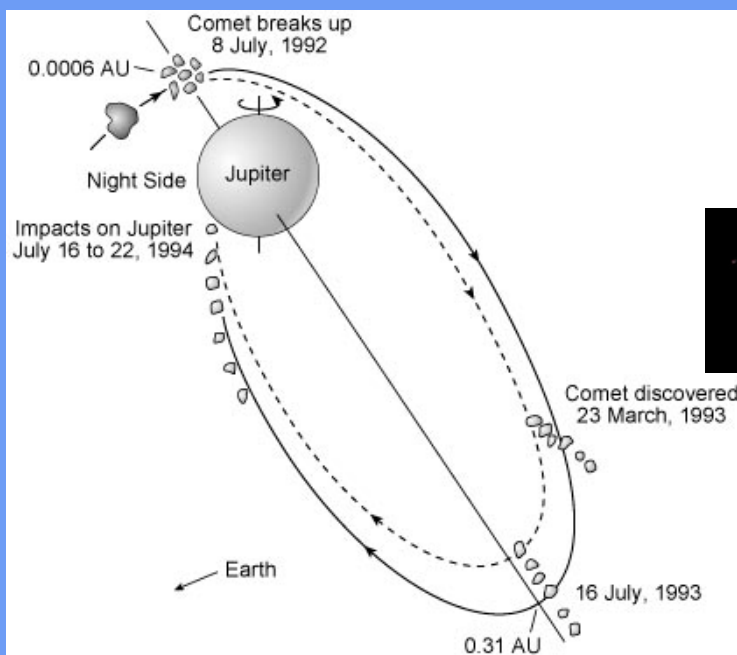
Crédit: R. Rocchia, E. Robin, Pour La Science, octobre 2002



## Petits corps du système solaire

Sect. 13.9

### Orbite de la comète Shoemaker-Levy 9



Crédit: K.R. Lang, [http://ase.tufts.edu/cosmos/view\\_picture.asp?id=765](http://ase.tufts.edu/cosmos/view_picture.asp?id=765)

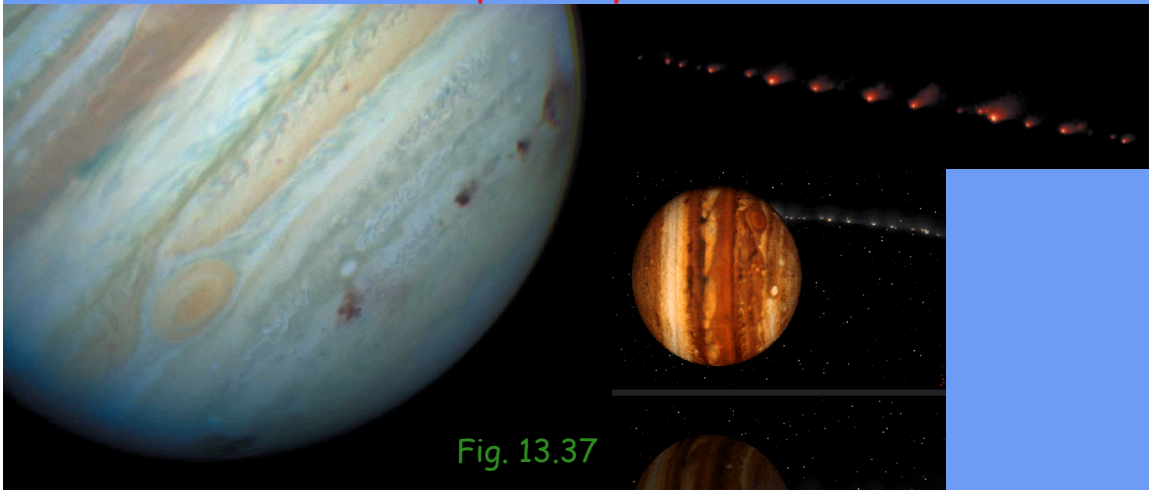
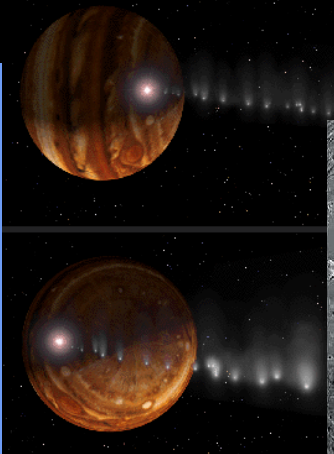


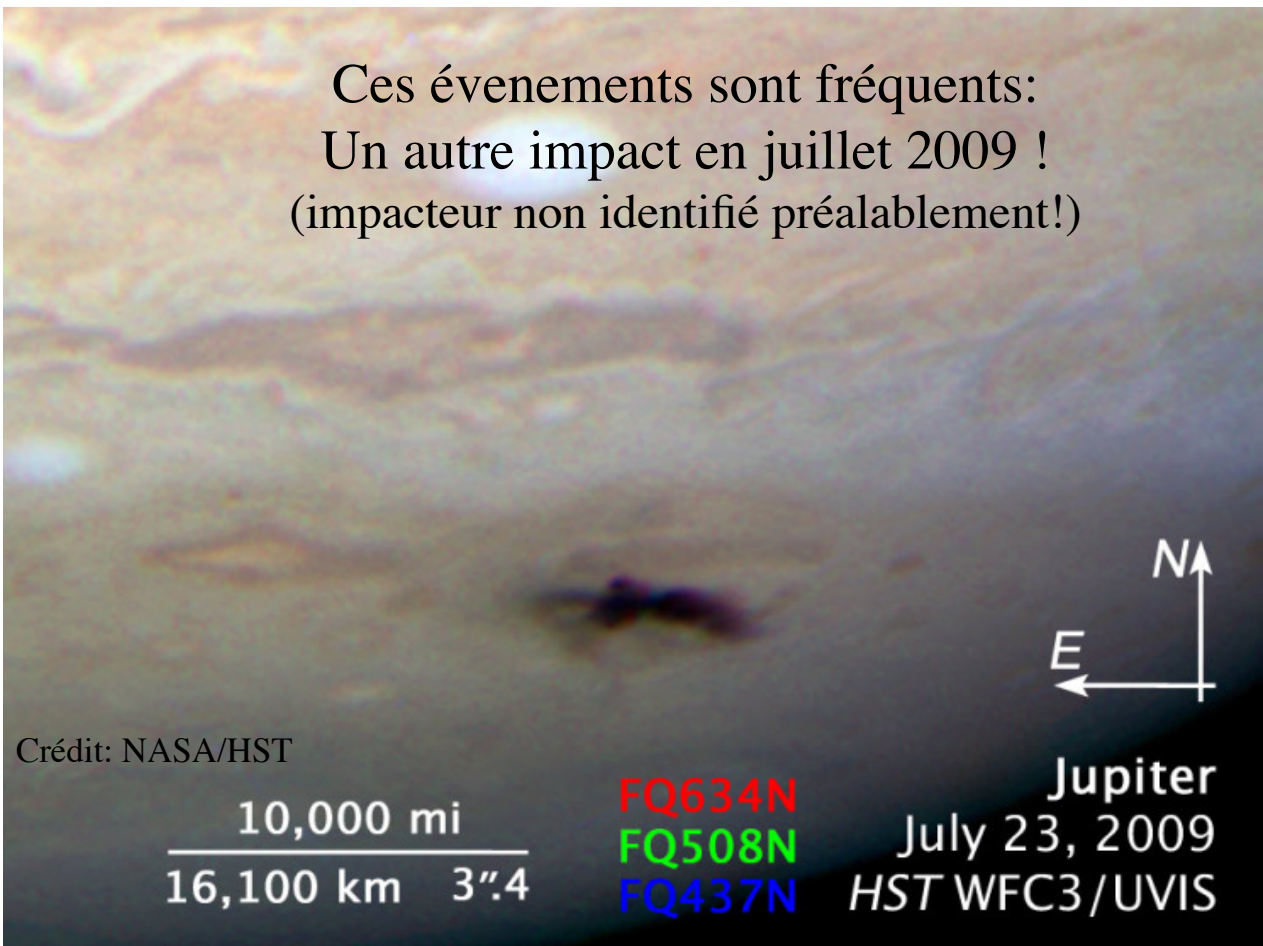
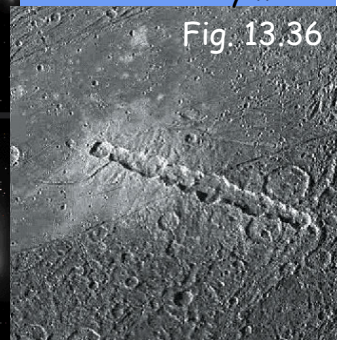
Fig. 13.37

Juillet 1994, impact de la comète Shoemaker-Levy 9 sur Jupiter



Ganymède

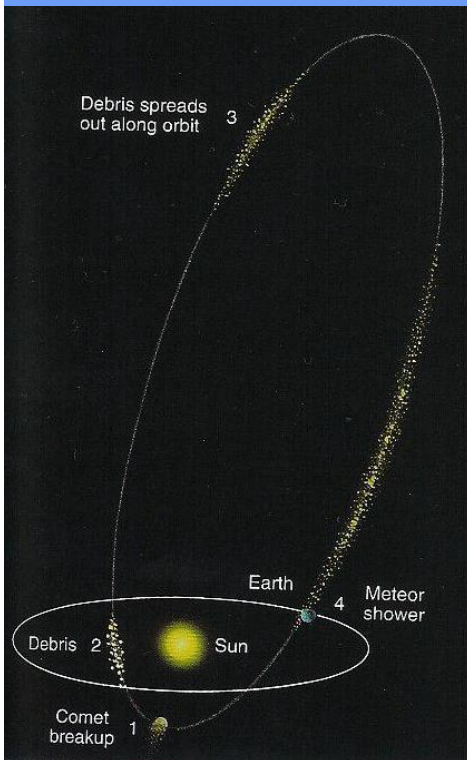
Fig. 13.36



## Petits corps du système solaire

Sect. 13.9

### Essaims de météores: Comète rompue



Crédit: Chaisson & McMillan,  
Astronomy Today, Prentice Hall, 1996

Credit: H. Weaver (JHU) et al., European Southern Observatory  
<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap000811.html>



## Petits corps du système solaire

Sect. 13.9

### Essaims de météores: Comète rompue

Essaim des **Perséides** (10-12 août),  
associé à la comète Swift-Tuttle

**Perséides:**  
Les météores  
semblent  
provenir de la  
constellation  
de **Persée (Per)**

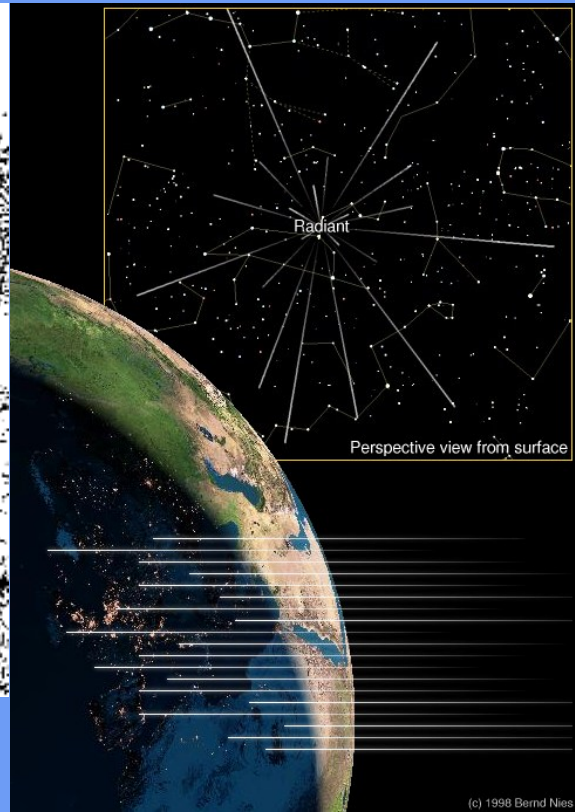


Credit: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap080911.html>

## Petits corps du système solaire

Sect. 13.9

### Essaim de météores: effet de perspective



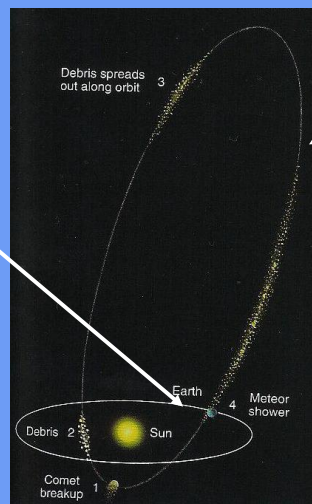
## Petits corps du système solaire

Sect. 13.9

### Quelques essaims de météores

Tableau 13.6

Nom	Date du maximum	Météores / heure au maximum	Corps parent	Période (ans)
Quadrantides	Jan. 4	110	Machholz 1	5.2
Perséides	Aug. 12	68	Comète 1862 III (Swift-Tuttle)	120
Orionides	Oct. 21	30	Comète P /Halley	76
Léonides	Nov. 17	10	Comète P/Tempel-Tuttle	33



# Petits corps du système solaire

## Les comètes

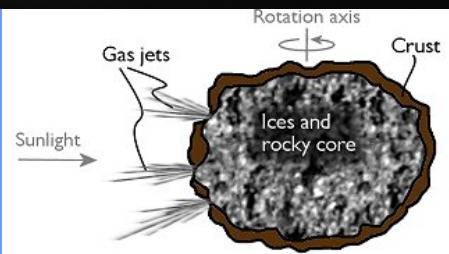
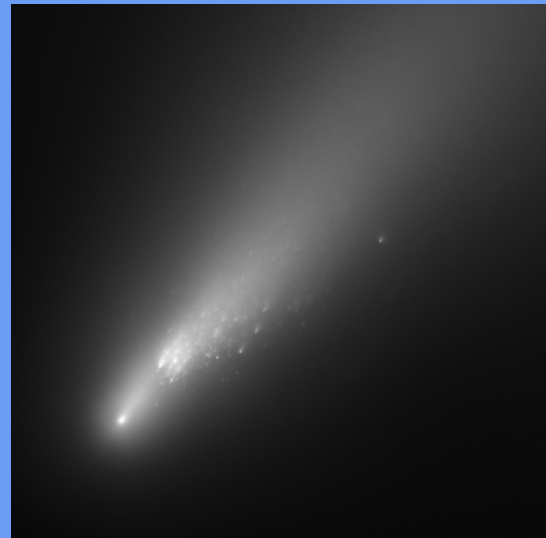
Sect. 13.8

Comète Schwassmann-Wachmann 3

16 mai 2006 :  $25 d_{TL} = 9.6 \cdot 10^6 \text{ km}$



Crédit : <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap060504.html>

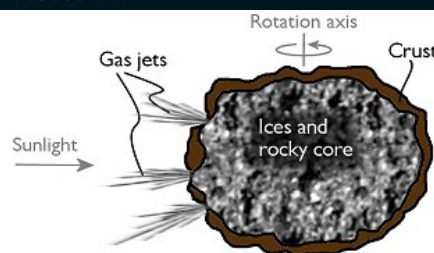
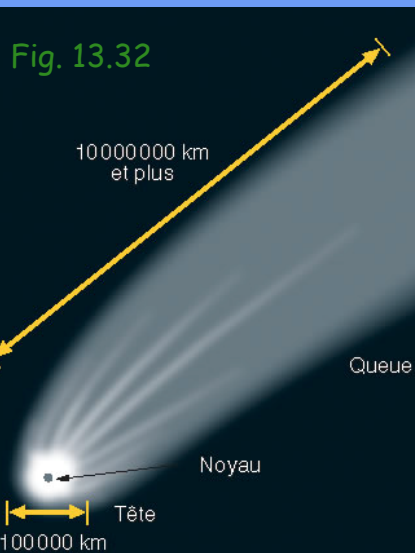


# Petits corps du système solaire

## Les comètes

Sect. 13.8

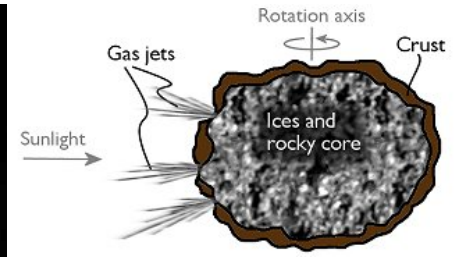
Comète Ikeya-Seki (1965)





700 km sous la comète Hartley 2  
Sonde EPOXI (NASA/JPL)

Crédit: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap101108.html>



Petits corps du système solaire

Sect. 13.8

Comète Hale-Bopp (1996)



Crédit : Malcolm Ellis, England  
<http://www.ifa.hawaii.edu/faculty/jewitt/tail-HB.html>

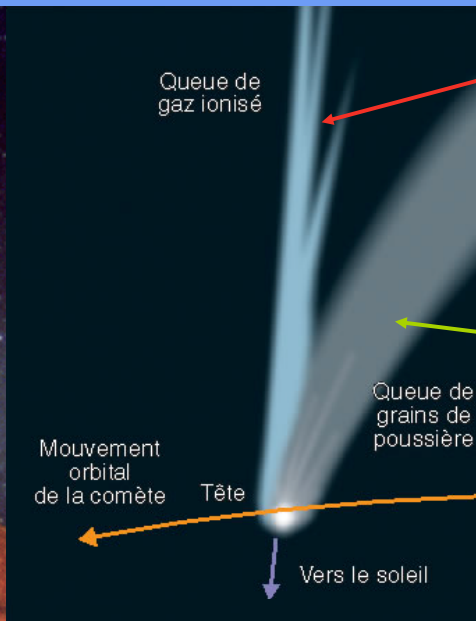


Fig. 13.35

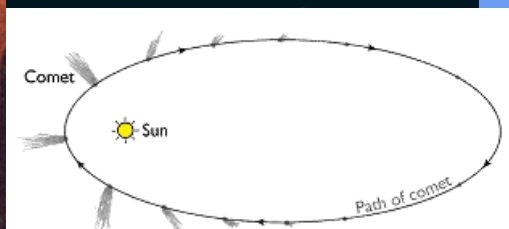
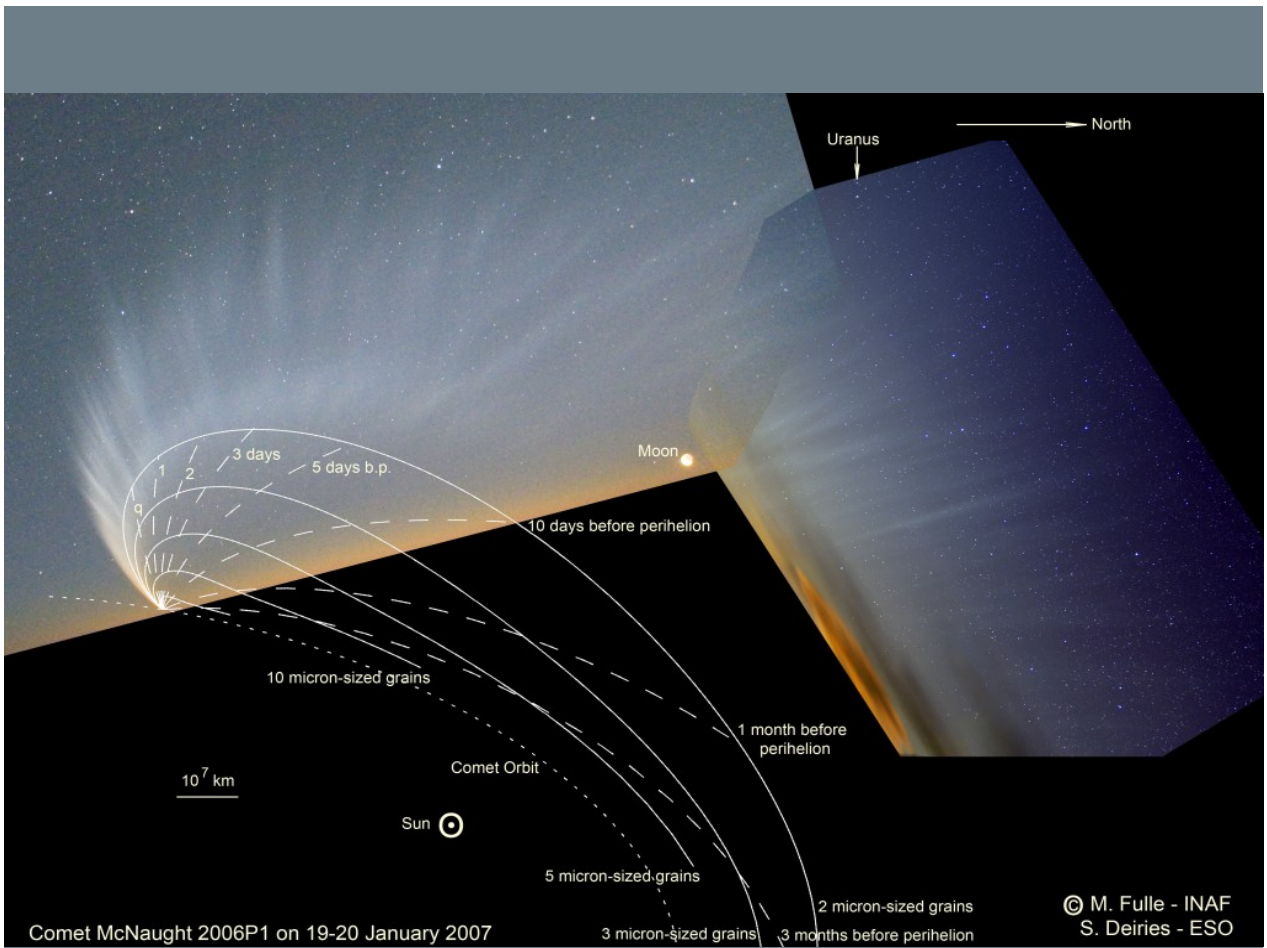


Fig. 13.34



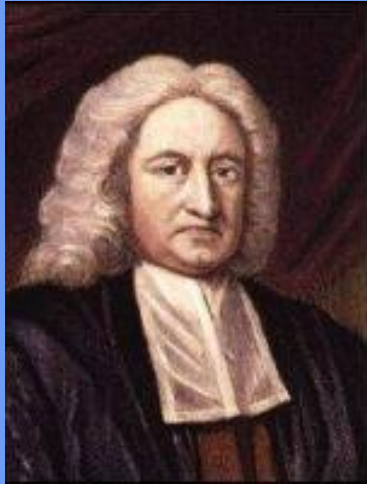
Comète Holmes (Novembre 2007) et amas d'étoiles ☒ Per

Crédit: Tony Cook, <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap081024.html>



### La comète de Halley

- En 1705, Edmond Halley (1656 - 1742) utilise les lois de Newton à peine énoncées (1687) pour prédire le retour en 1758 (après sa mort en 1742) de la comète vue en 1531, 1607 et 1682.



Crédit: <http://users.telenet.be/kosmonet/ astronomie/kuiper.html>  
Barney Magrath/Science Source

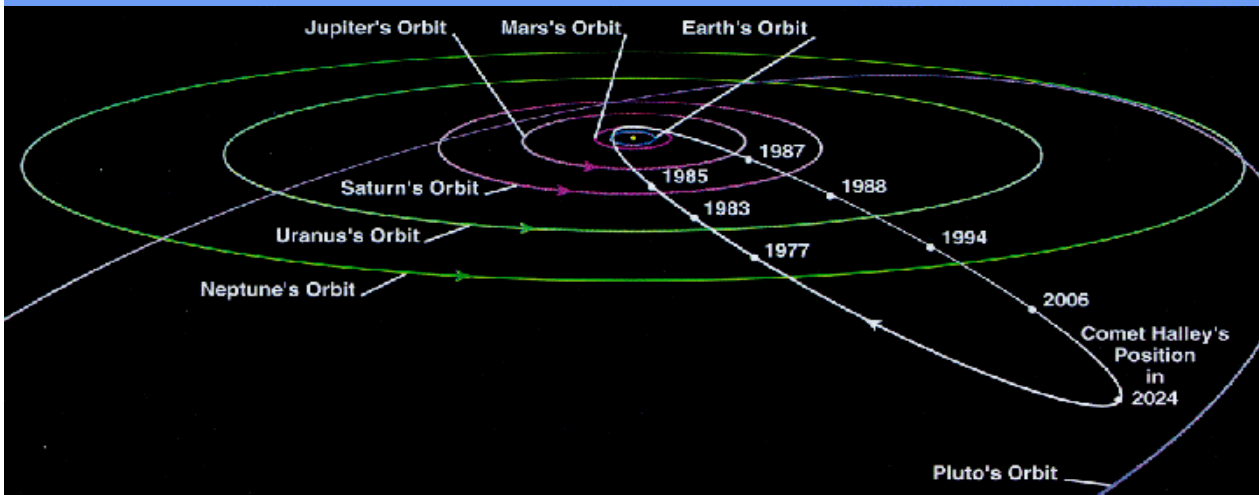
### La comète de Halley

- En 1705, Edmond Halley (1656 - 1742) utilise les lois de Newton à peine énoncées (1687) pour prédire le retour en 1758 (après sa mort en 1742) de la comète vue en 1531, 1607 et 1682.
- Première apparition historique en -239; aussi en -163, ..., 1066 (tapisserie de Bayeux: bataille de Hastings), 1145, 1222, 1304 (Giotto: Adoration des Mages), ...



### La comète de Halley

- En 1705, Edmond Halley (1656 - 1742) utilise les lois de Newton à peine énoncées (1687) pour prédire le retour en 1758 (après sa mort en 1742) de la comète vue en 1531, 1607 et 1682.
- Période (moyenne) de 76 ans, variant selon les époques entre 76.0 ans (en 1986) et 79.3 ans (en 451 et 1066), à cause des perturbations planétaires et des éjections de gaz
- Orbite rétrograde, très excentrique (0.967), inclinée de 18 degrés sur l'écliptique



### La comète de Halley

- En 1705, Edmond Halley (1656 - 1742) utilise les lois de Newton à peine énoncées (1687) pour prédire le retour en 1758 (après sa mort en 1742) de la comète vue en 1531, 1607 et 1682.
- Période (moyenne) de 76 ans, variant selon les époques entre 76.0 ans (en 1986) et 79.3 ans (en 451 et 1066), à cause des perturbations planétaires et des éjections de gaz
- Perte de 0.1 % de sa masse à chaque passage, soit 1000 périodes avant de devenir inactive, ou 76 000 ans

## La comète de Halley

- Noyau = « boule de neige sale »
  - albédo 0.03  
(plus sombre que le charbon!)
  - taille 16 x 8 x 8 km
  - densité 0.1 g cm<sup>-3</sup>
- visité par de nombreuses sondes spatiales lors de son dernier retour en 1986, dont Giotto (ESA)



Barney Magrath/Science Source

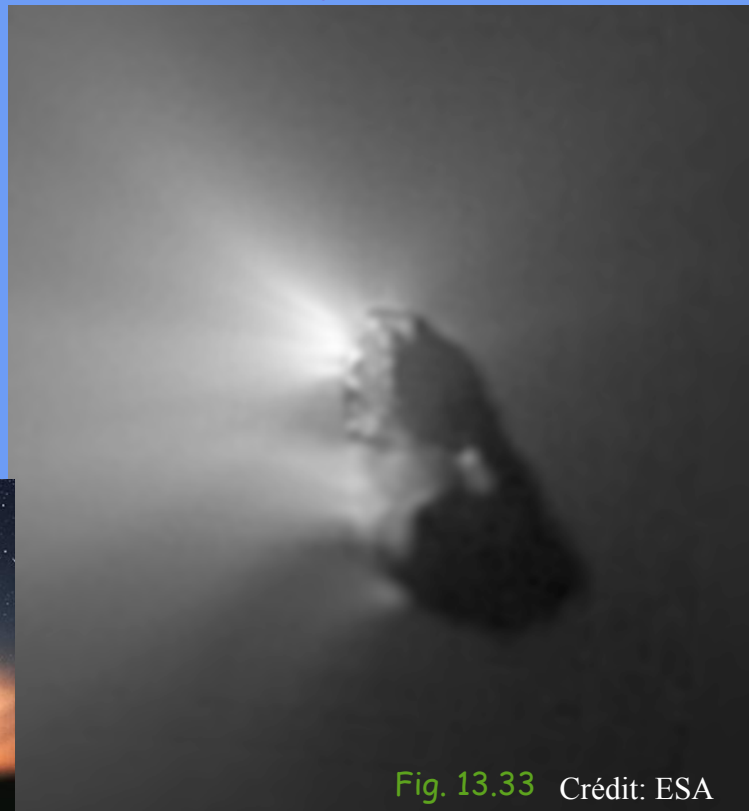


Fig. 13.33 Crédit: ESA

## La comète de Halley

Giotto passe à 600 km du noyau de la comète de Halley (1986)

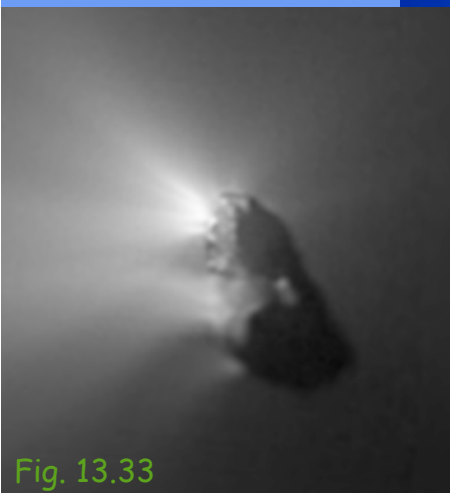
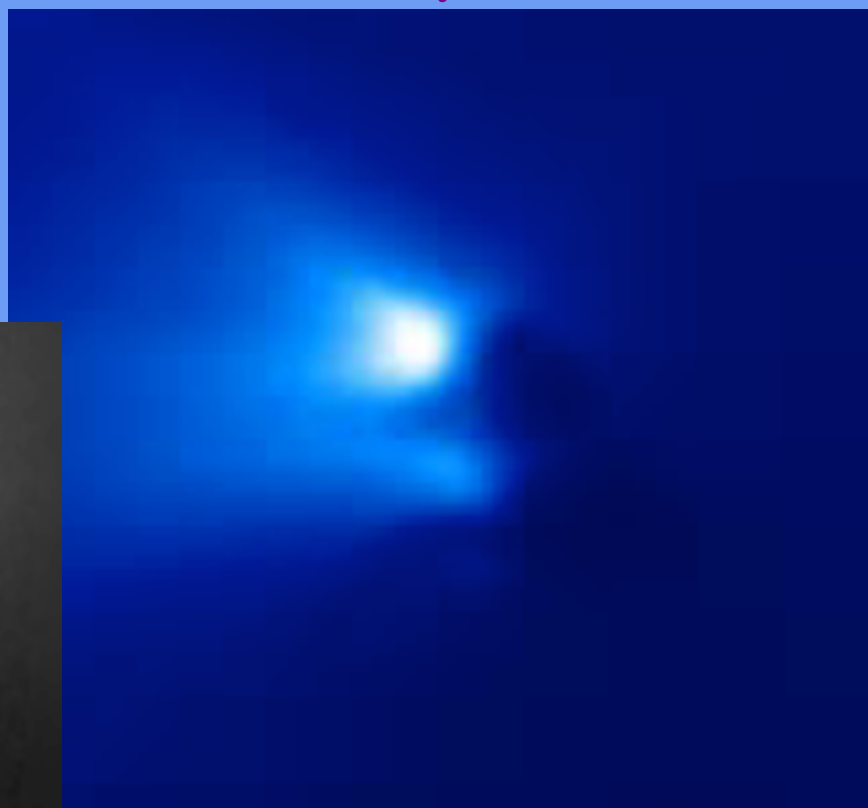


Fig. 13.33



## Petits corps du système solaire

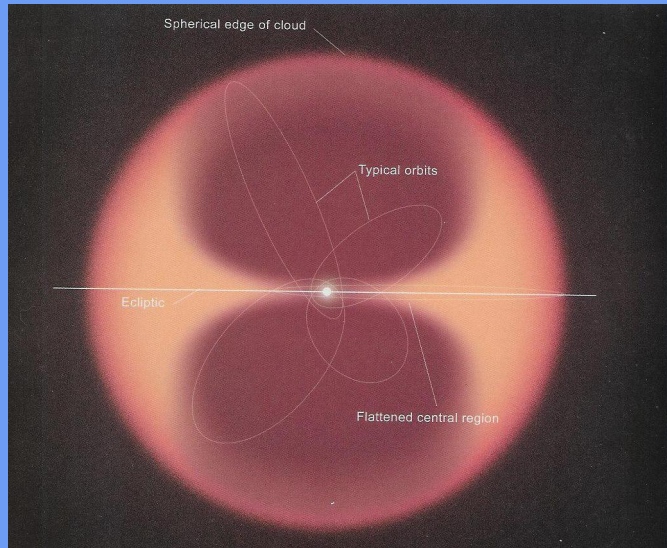
Sect. 13.8

### D' où viennent les comètes?

#### Nuage de Oort

L'existence d'un réservoir de comètes postulé par J. Oort en 1950 sur base des propriétés orbitales des comètes à très longue période:

- distance aphélique d' environ 50 000 U $\neq$
- orbites orientées au hasard
- comètes s' en détachent par collisions mutuelles ou perturbations stellaires
- résidu du système solaire primitif



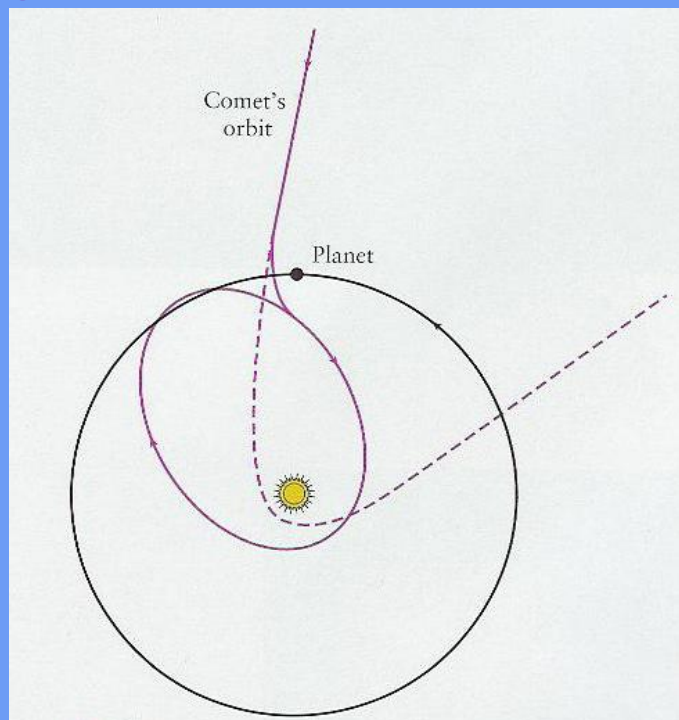
## Petits corps du système solaire

Sect. 13.8

### D' où viennent les comètes?

#### Nuage de Oort

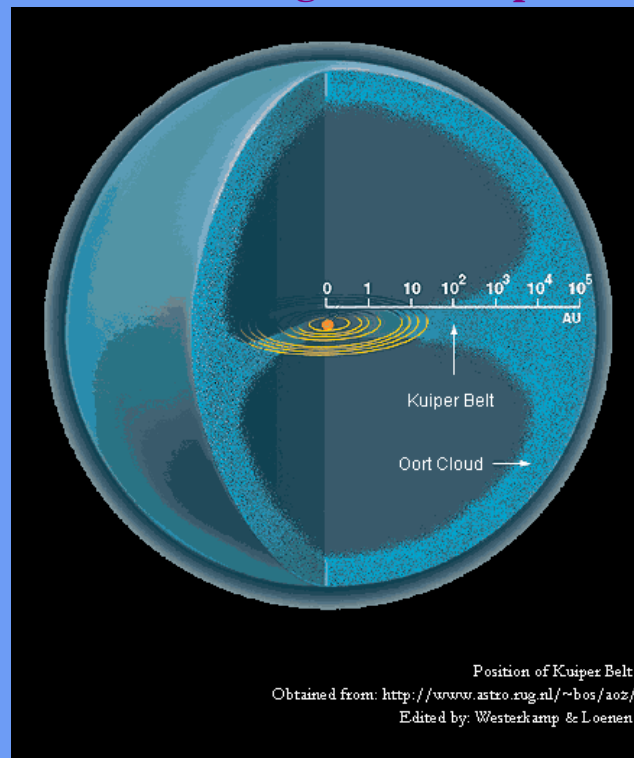
Transformation d' une orbite longue période ( $P > 200$  ans) en une orbite courte période ( $P < 200$  ans)



# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8

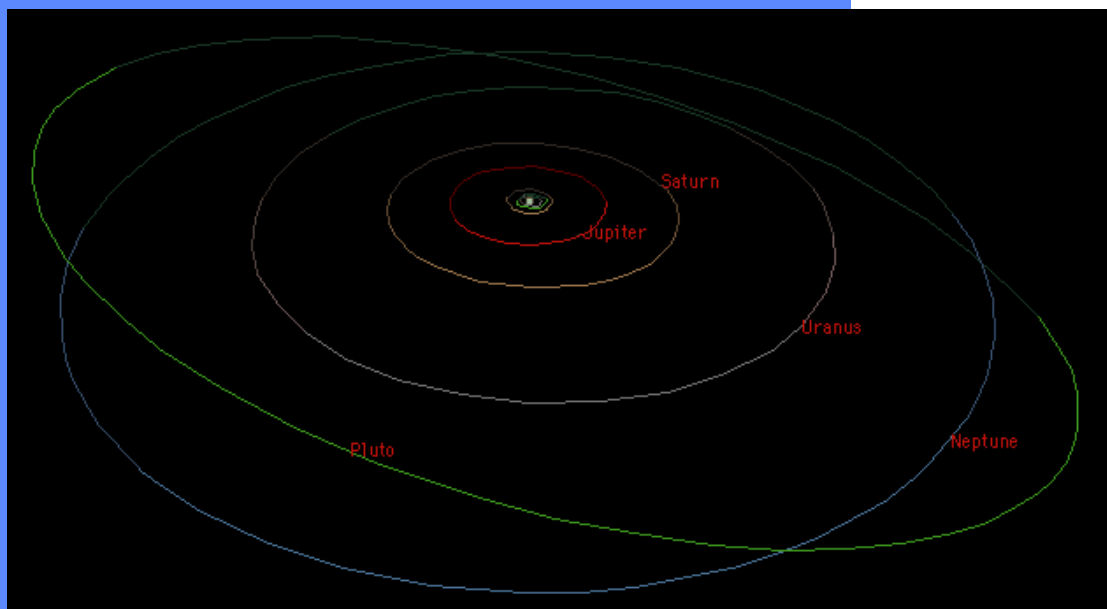
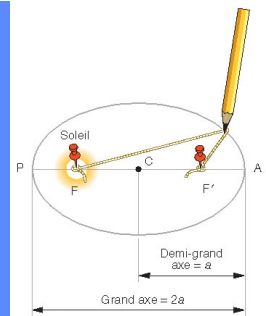


Sect. 13.8

# Petits corps du système solaire

## Anomalies Pluton:

- Orbite très excentrique ( $0.25 = CF/CP$ ),
- Orbite très inclinée sur l'éclyptique ( $17^\circ$ )

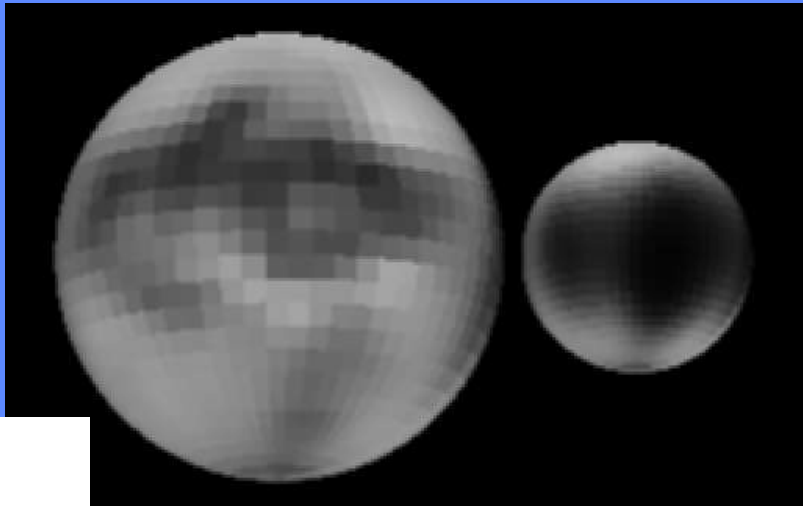


## Anomalies Pluton:

- Orbite très excentrique (0.25),
- Orbite très inclinée sur l' éclipseptique (17°)
- Planète glacée, plutôt que géante
- Planète double:

**Pluton** (diamètre 2300 km)

+ **Charon** (diamètre 1300 km)



Credit: M. W. Buie, D. J. Tholen,  
and K. Horne (St. Andrews)  
<http://apod.gsfc.nasa.gov/apod/ap98070.html>

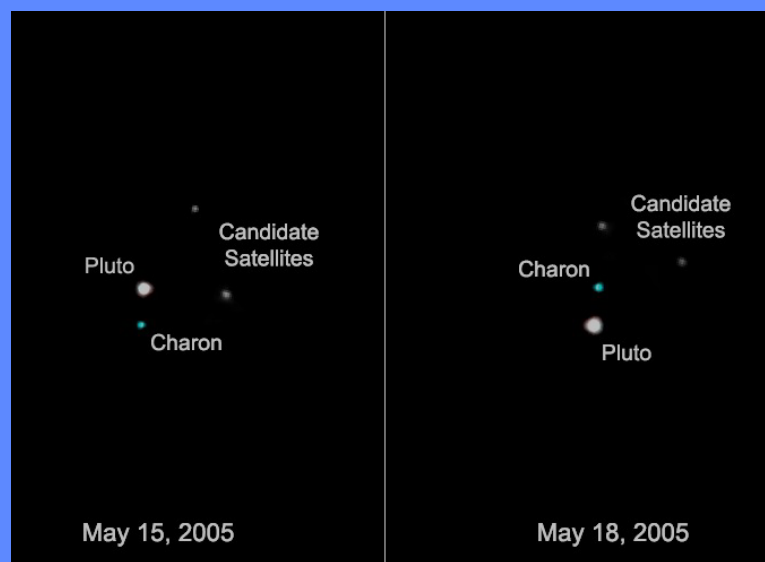
## Anomalies Pluton:

- Orbite très excentrique (0.25),
- Orbite très inclinée sur l' éclipseptique (17°)
- Planète glacée, plutôt que géante
- Planète double:

**Pluton** (diamètre 2300 km)

+ **Charon** (diamètre 1300 km)

+ **2 petits satellites (Nix et Hydra)**  
(60 & 200 km)



Credit : H. Weaver, A. Stern,  
and the HST Pluto Companion Search  
Team, ESA, NASA



# Petits corps du système solaire

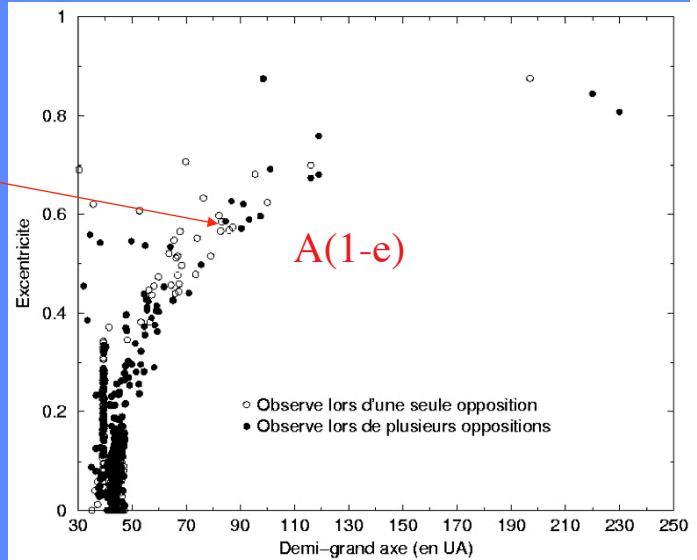
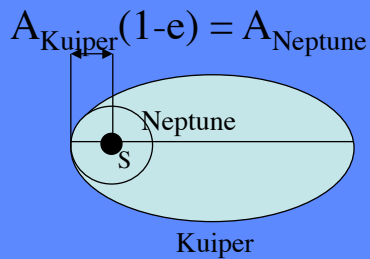
Sect. 13.8

## Anomalies Pluton:

- Orbite très excentrique (0.25),
- Orbite très inclinée sur l'écliptique (17°)
- Planète glacée, plutôt que géante
- Planète double: Pluton (diamètre 2300 km) + Charon (diamètre 1300 km) + 2 petits satellites ? (60 & 200 km)
- **résonance 3:2 avec Neptune** ( $P_{\text{Pluton}} / P_{\text{Neptune}} = 3 / 2$ )

## Ceinture de Kuiper

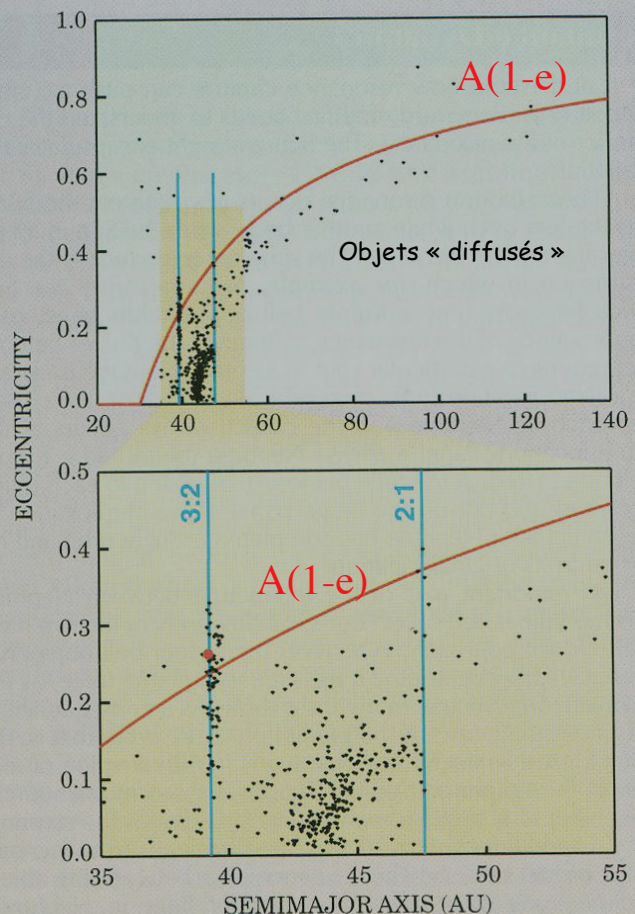
Objets de la ceinture de Kuiper passant au périhélie au niveau de l'orbite de Neptune



## Ceinture de Kuiper

### Anomalies Pluton:

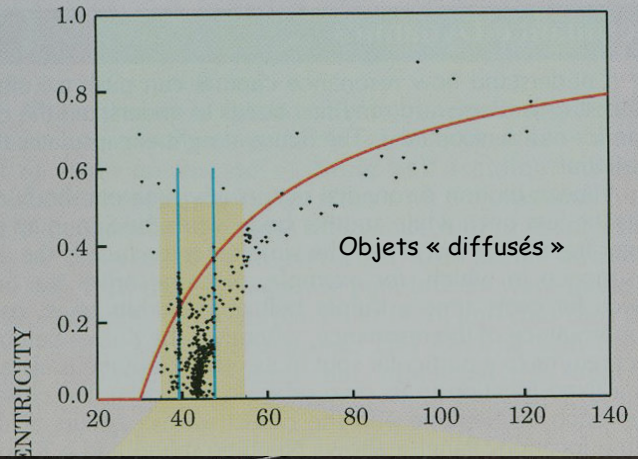
- Orbite très excentrique (0.25),
- Orbite très inclinée sur l'écliptique
- Planète glacée, plutôt que géante
- Planète double
- **résonance 3:2 avec Neptune** ( $P_{\text{Pluton}} / P_{\text{Neptune}} = 3 / 2$ )



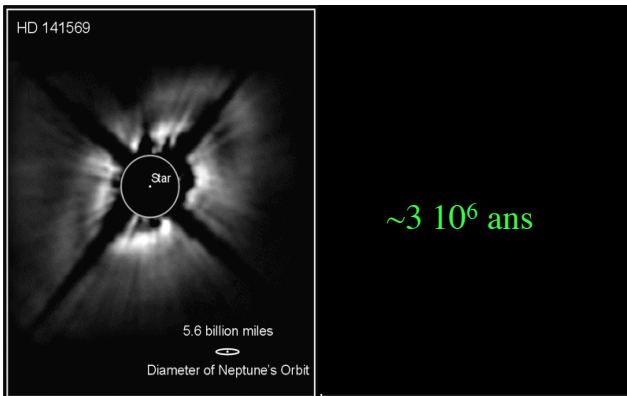
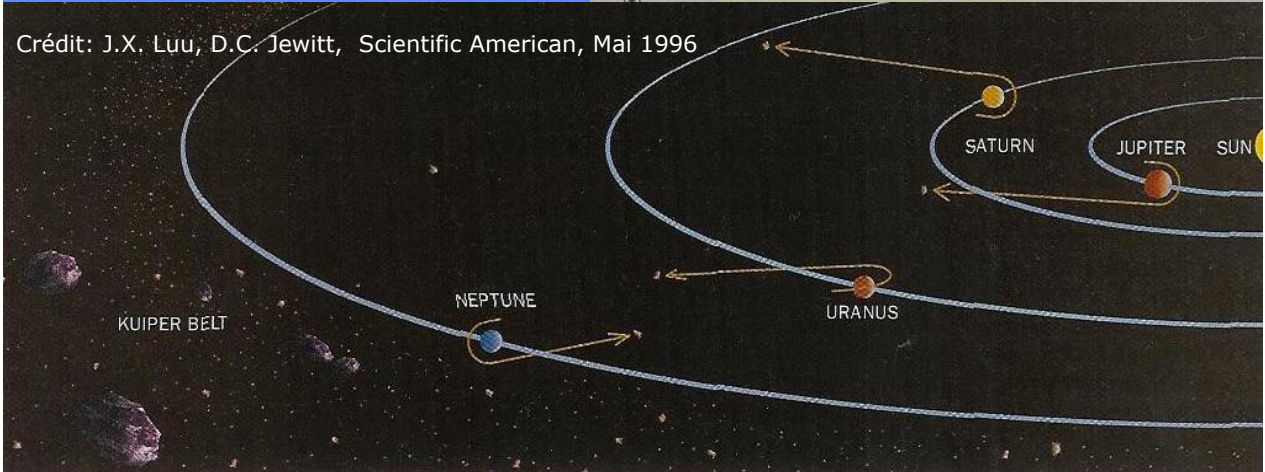
## Ceinture de Kuiper

### Anomalies Pluton:

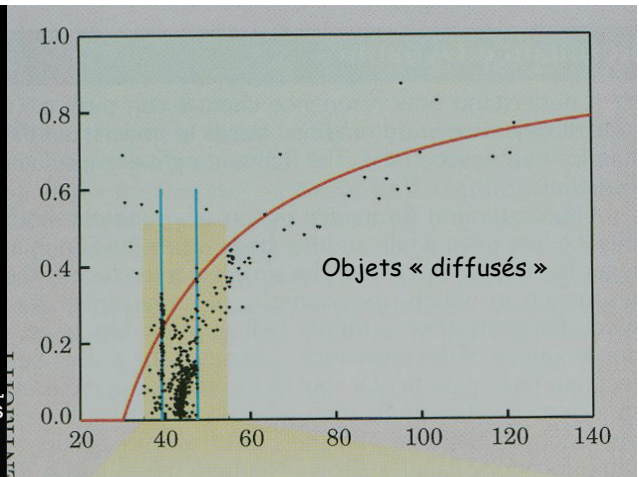
- Orbite très excentrique (0.25),
- Orbite très inclinée sur l'écliptique
- Planète glacée, plutôt que géante
- Planète double
- **résonance 3:2 avec Neptune**  
( $P_{\text{Pluton}} / P_{\text{Neptune}} = 3 / 2$ )



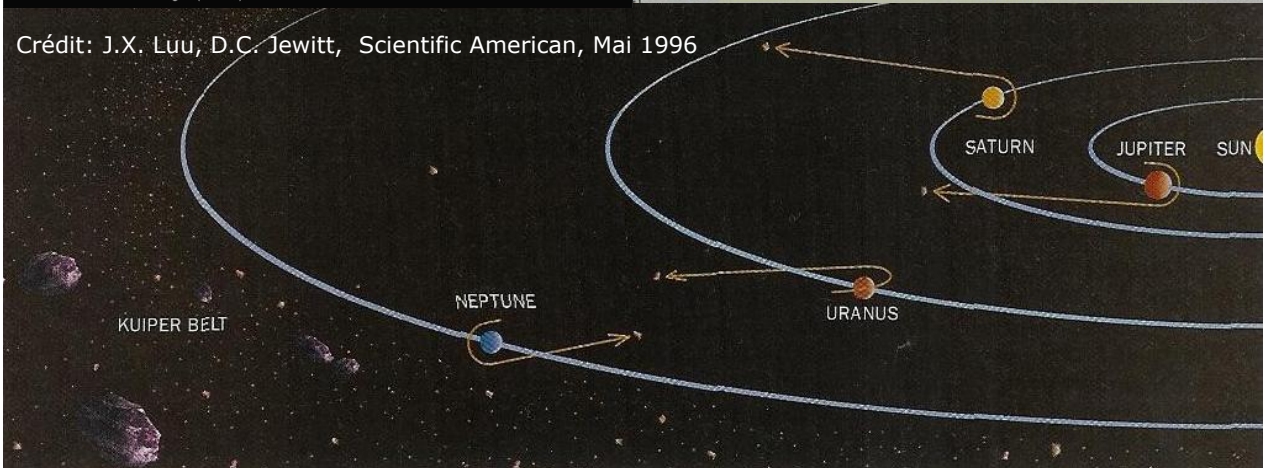
Crédit: J.X. Luu, D.C. Jewitt, Scientific American, Mai 1996



Dust Disks around Stars  
 PRC99-03 • STScI OPO • January 8, 1999  
 B. Smith (University of Hawaii), G. Schneider (University of Arizona),  
 E. Becklin and A. Weinberger (UCLA) and NASA



Crédit: J.X. Luu, D.C. Jewitt, Scientific American, Mai 1996



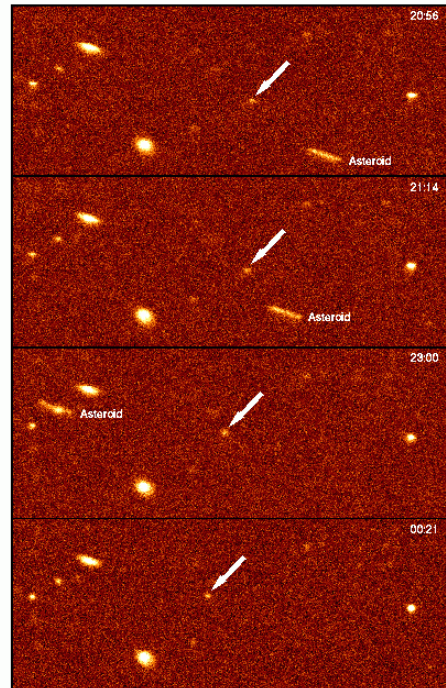
# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8

1992 QB<sub>1</sub>:

Troisième objet découvert  
de la ceinture de Kuiper  
les 1er et 2e étant Pluton et Charon!

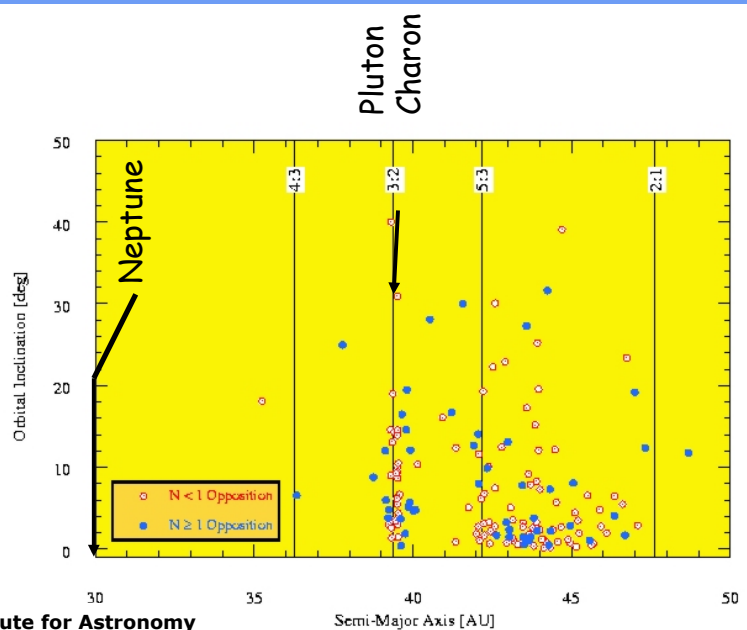


Crédit: D. Jewitt, University of Hawaii, Institute for Astronomy

# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8

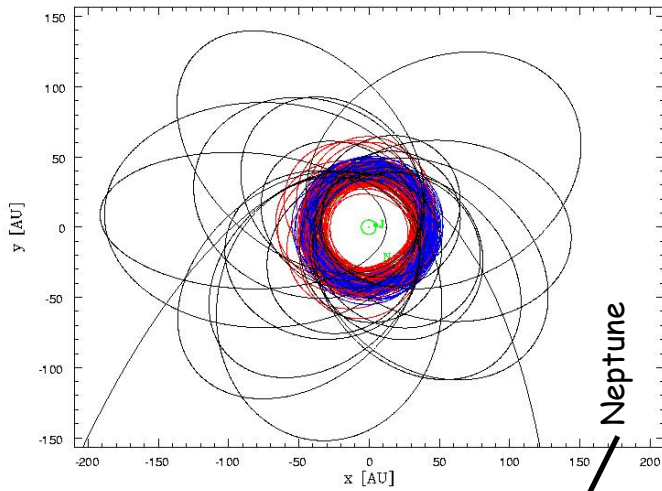


Crédit: D. Jewitt, University of Hawaii, Institute for Astronomy

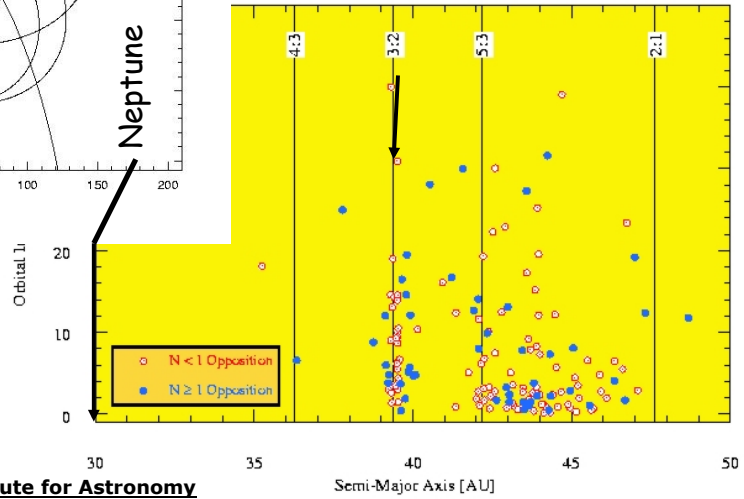
# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8



Pluton  
Charon

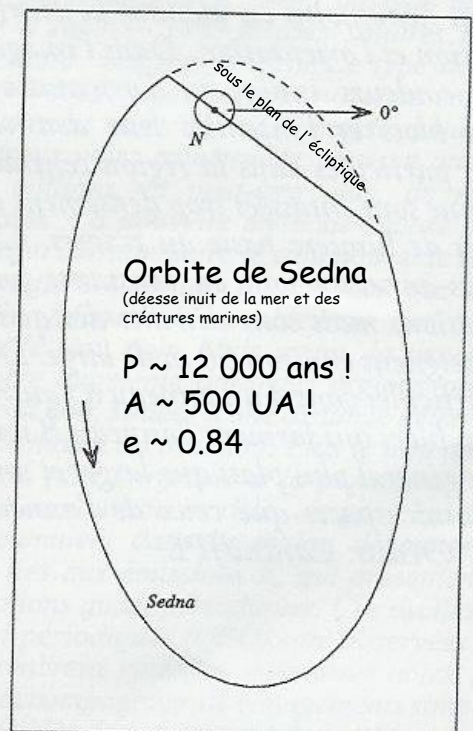
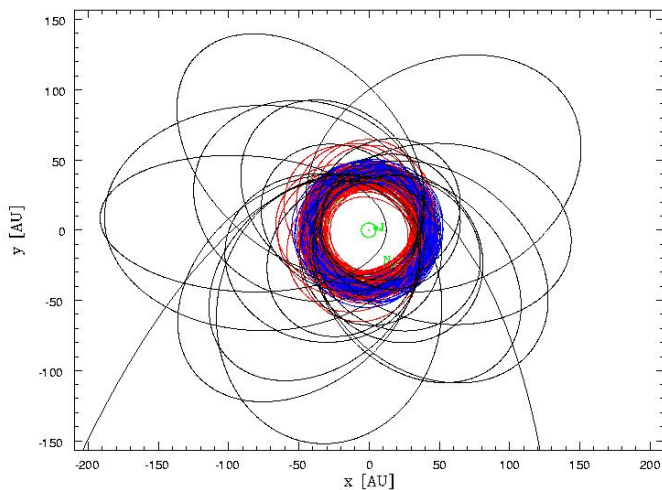


Crédit: D. Jewitt, University of Hawaii, Institute for Astronomy

# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8



# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8



**Découverte de 2003 UB<sub>313</sub> annoncée le 29 juillet 2005.**

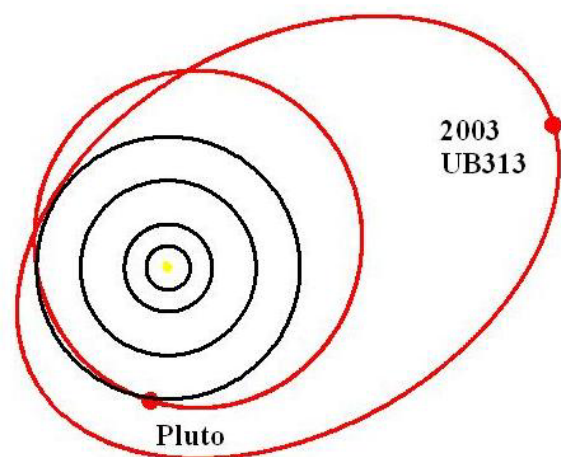
**Plus grosse que Pluton, à 97 UA du Soleil!**

# Petits corps du système solaire

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Sect. 13.8

Crédit: Nature



# Petits corps du système solaire

Sect. 13.8

## Ceinture de Edgewood-Kuiper

Crédit: Nature

