

Astronomie, Astrophysique

Observer et comprendre l'Univers

Université inter-âges
Paris-Sorbonne

Frédéric Daigne, Institut d'Astrophysique de Paris
Université Pierre et Marie Curie
Institut Universitaire de France



Lundi 14 novembre 2011

**4. Panorama
du système solaire**

Retour sur Robert W. Bunsen (→ Cours n°3)

- Spectroscopie avec Gustav Kirchhoff :
 - utilisation du prisme
 - compréhension de l'association élément chimique ↔ raies
 - découverte du césium



- Spectre du Soleil en 1859, conduisant à la découverte de l'hélium par Janssen & Lockyer en 1868
→ cf. cours n°2
- Nom associé au bec Bunsen, en fait surtout mis au point par son assistant, Peter Desaga (1855).



Robert Wilhelm Bunsen (1811-1899)
& Gustav Kirchhoff (1824-1887)

Retour sur la rotation et le magnétisme du Soleil (→ cours n°2)

Le Soleil tourne sur lui-même :

- en 25 jours à l'équateur,
- en 34,5 jours aux pôles.

Le Soleil montre une activité magnétique, mesurable par exemple avec l'apparition des taches solaires.

Cette activité est variable sur plusieurs échelles de temps.

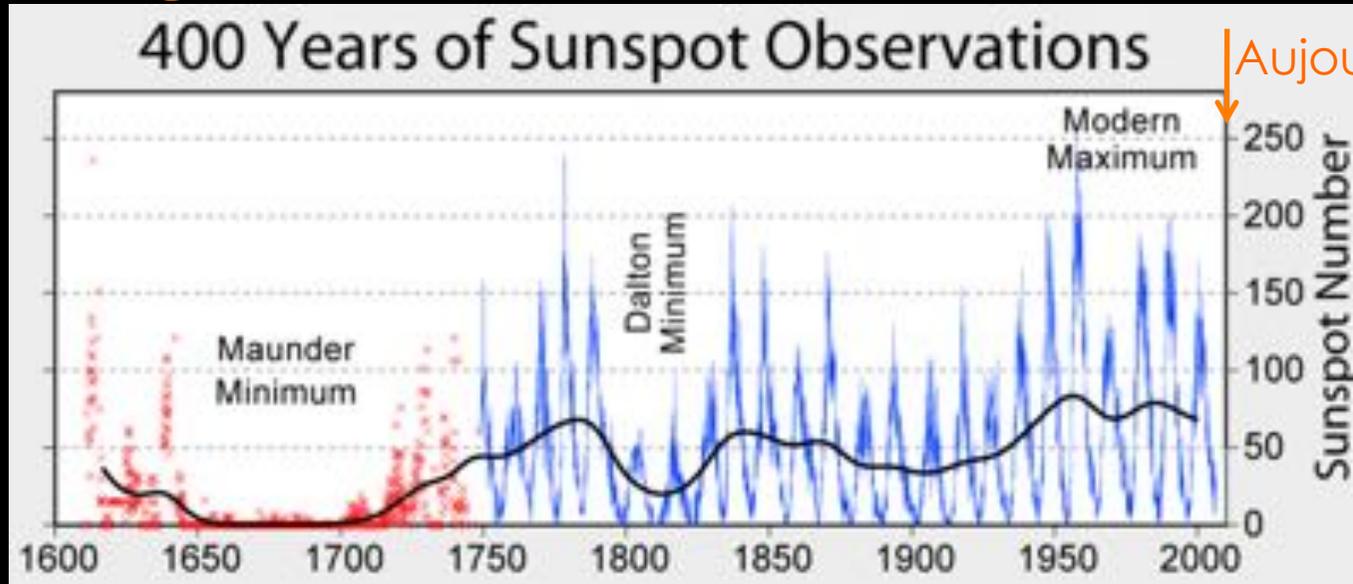
Le cycle principal est sur 11 ans.

La luminosité du Soleil est un peu plus faible dans les périodes de minimum d'activité magnétique.

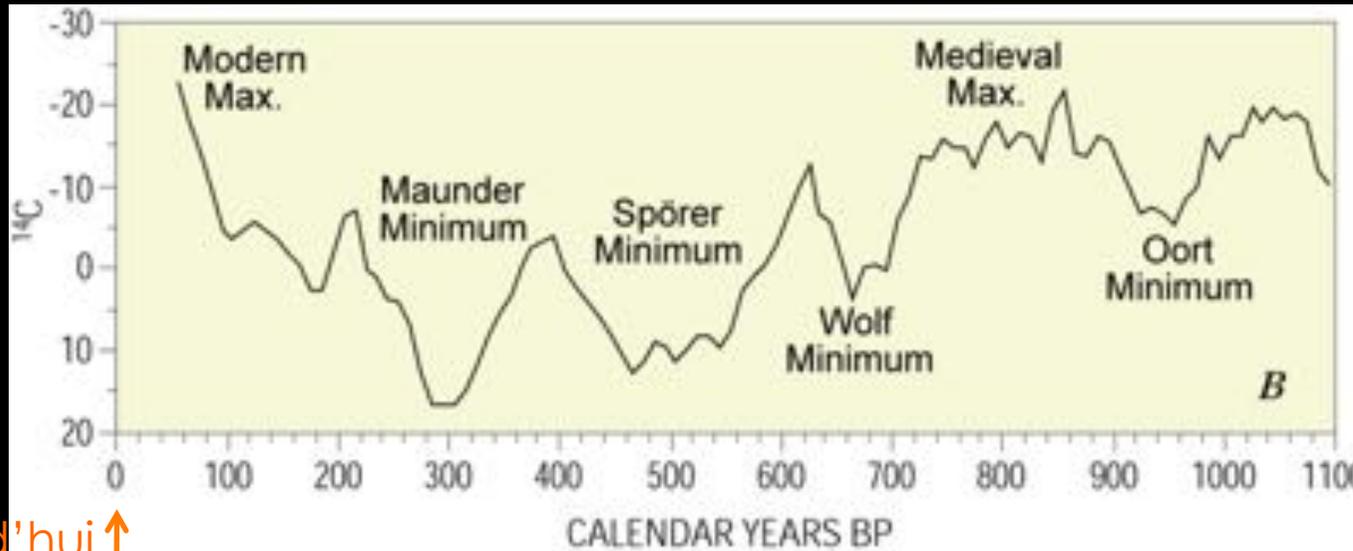


Retour sur la rotation et le magnétisme du Soleil (→ cours n°2)

Evolution de l'activité solaire



Impact sur la Terre : évolution de l'abondance du Carbone 14 dans l'atmosphère

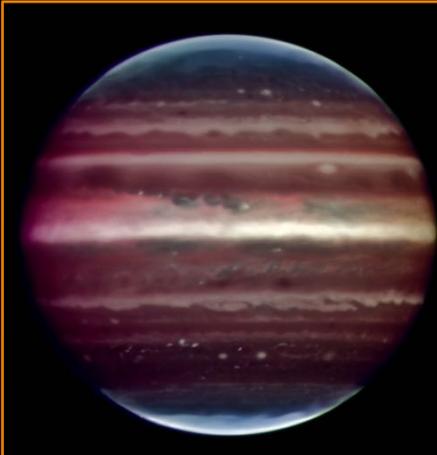
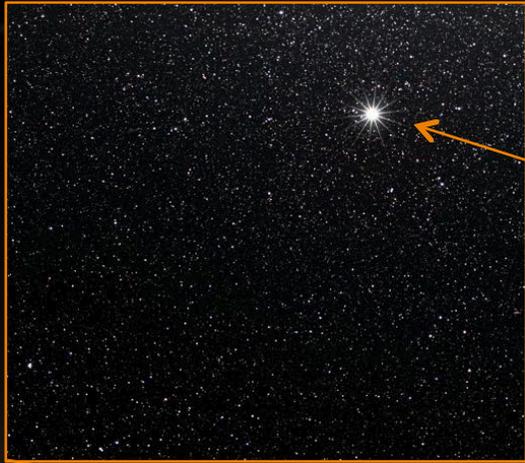


Aujourd'hui ↑

Le Système Solaire



Le Système Solaire



Infrarouge (VLT) Visible (Voyager 2)

La planète Jupiter
à 720 millions de km soit 4.8 U.A.



Jupiter



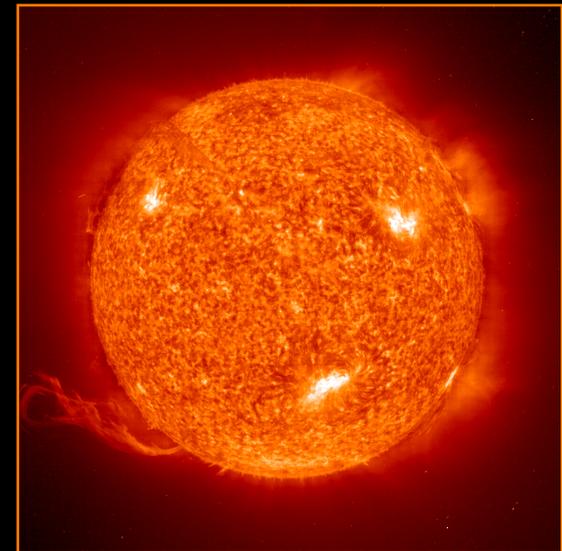
Vénus

Plan de l'écliptique

Les composants du système solaire

Le système solaire comporte

- Une étoile : le Soleil → Cours n°2



Les composants du système solaire

Le système solaire comporte

- Une étoile : le Soleil
- Des planètes qui tournent autour de l'étoile

4 planètes telluriques : Mercure, Vénus, Terre, Mars

4 planètes géantes : Jupiter, Saturne, Neptune, Uranus



La Terre

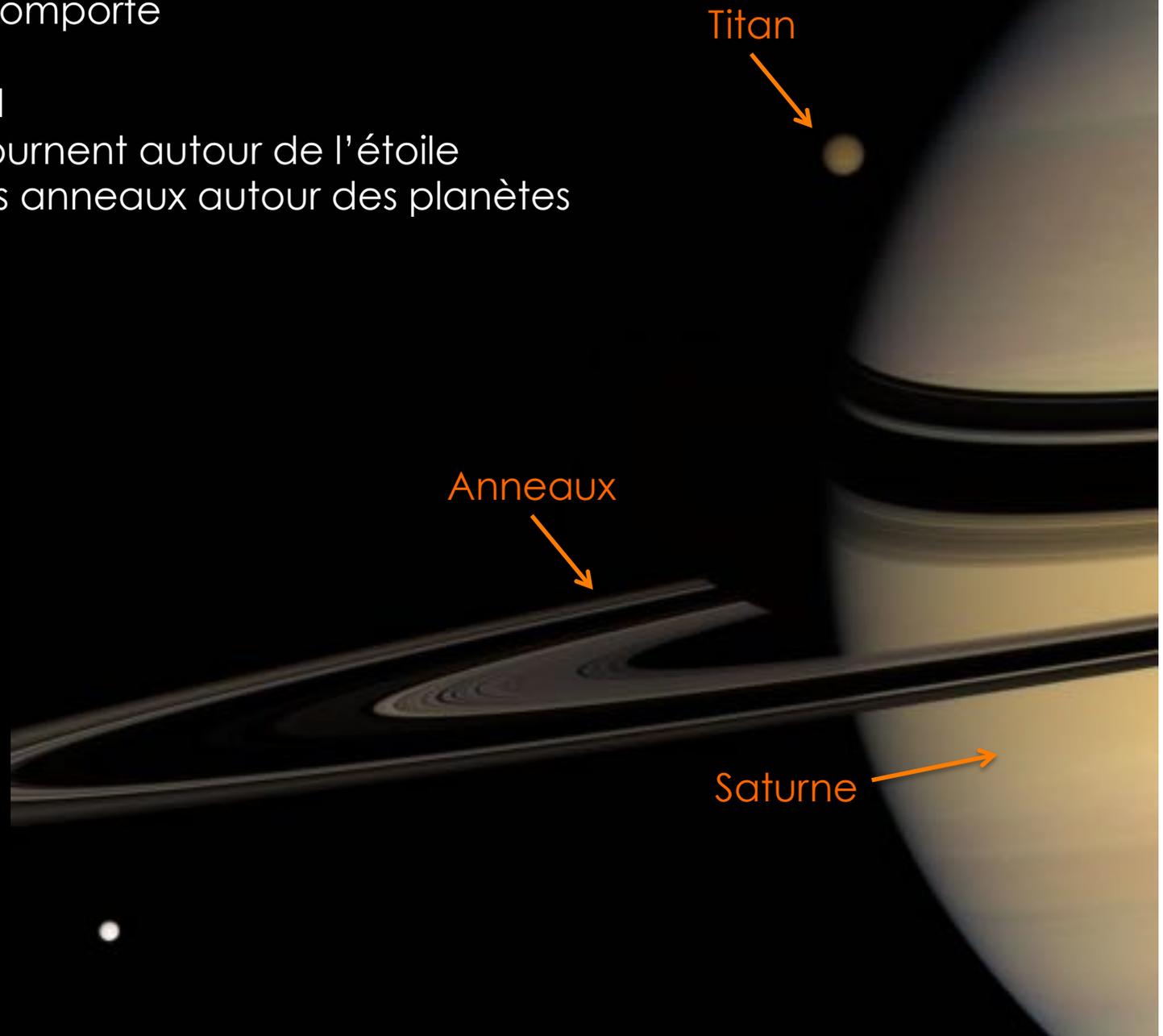


Jupiter

Les composants du système solaire

Le système solaire comporte

- Une étoile : le Soleil
- Des planètes qui tournent autour de l'étoile
- Des satellites et des anneaux autour des planètes



Les composants du système solaire

Le système solaire comporte

- Une étoile : le Soleil
- Des planètes qui tournent autour de l'étoile
- Des satellites et des anneaux autour des planètes
- Des petits corps : planètes naines, astéroïdes, comètes, ...



Le noyau de la
comète Tempel 1
(image Deep Impact)



La comète de Halley
(tapisserie de Bayeux)



La comète
Hale-Bopp (1997)



La comète Hale-Bopp
(image USNO)

Les composants du système solaire

Le système solaire comporte

- Une étoile : le Soleil
- Des planètes qui tournent autour de l'étoile
- Des satellites et des anneaux autour des planètes
- Des petits corps : planètes naines, astéroïdes, comètes, ...
- Un milieu interplanétaire avec
 - des poussières,
 - du plasma (vent solaire),
 - de la lumière (principalement issue du Soleil),
 - un champ magnétique (principalement celui du Soleil),
 - des particules très énergétiques : le rayonnement cosmique.

Ce milieu est extrêmement dilué : quelques particules par cm^3 !

Milieu interplanétaire

Une des manifestations de la présence d'un milieu interplanétaire est la lumière zodiacale, émission très faible, observable juste après le coucher du Soleil (ou juste avant son lever), dans un site avec une nuit bien noire...

Il s'agit de la réflexion de la lumière du Soleil sur les poussières interplanétaires.



Lumière zodiacale observée au site du Paranal (ESO/VLT).

Pourquoi la forme de disque ?

Les planètes et les autres corps sont tous à peu près contenus dans le même plan (le plan de l'écliptique). Ceci est un vestige de la formation du système solaire, et en particulier de la conservation du moment cinétique au cours de l'effondrement gravitationnel.

- La rotation et la conservation du moment cinétique, expliquées par un professeur de physique américain : Paul G. Hewitt.



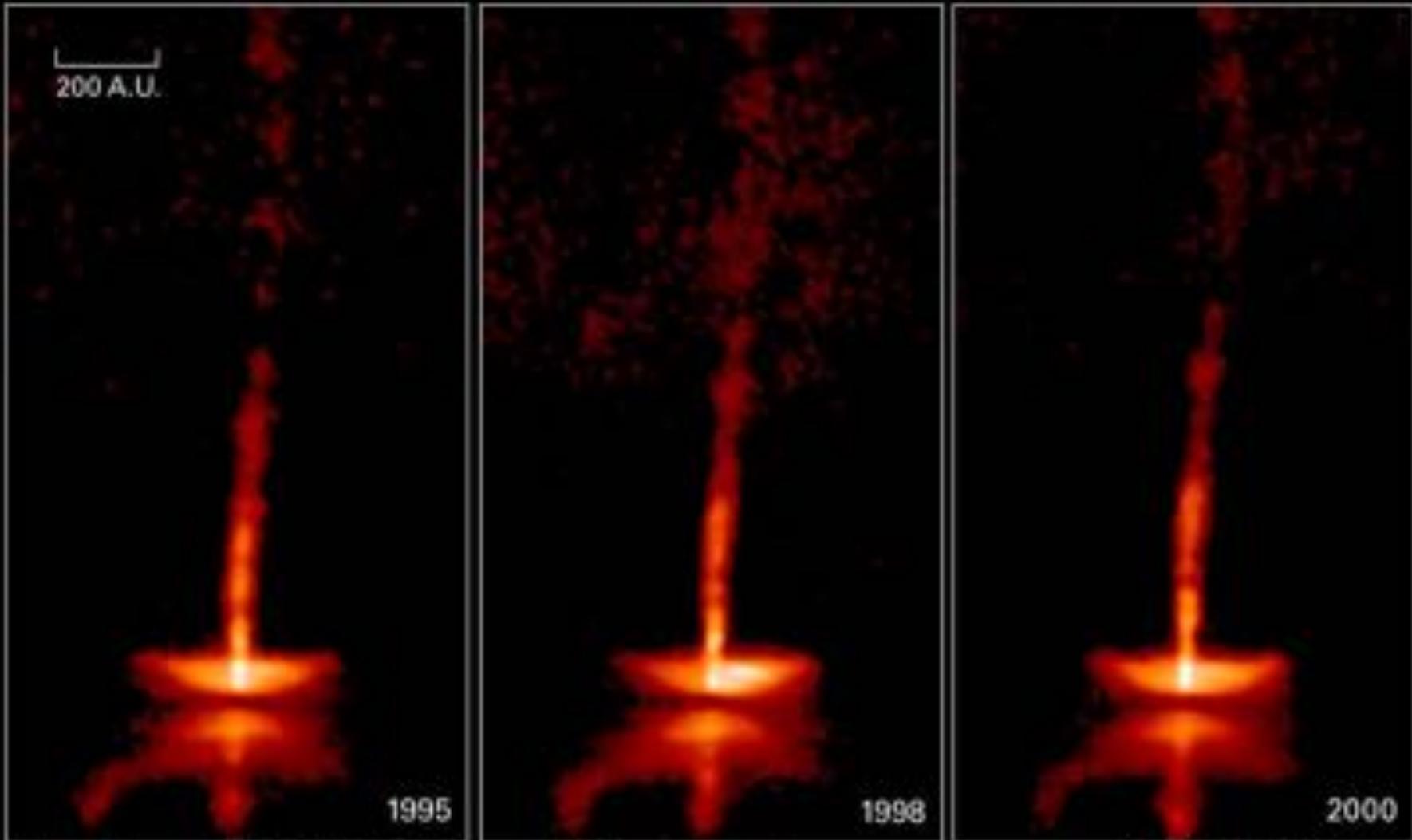
Pourquoi la forme de disque ?

Les planètes et les autres corps sont tous à peu près contenus dans le même plan (le plan de l'écliptique). Ceci est un vestige de la formation du système solaire, et en particulier de la conservation du moment cinétique au cours de l'effondrement gravitationnel.

- L'observation du système solaire actuel montre que
 - 99% de la masse est dans le Soleil ;
 - 98% du moment cinétique (de la « rotation ») est dans les planètes.
- En s'effondrant, la nébuleuse proto-solaire s'est mise à tourner de plus en plus vite. Pour former le Soleil, le cœur a dû évacuer son moment cinétique vers les régions périphériques : formation d'un disque protoplanétaire.
- Le mécanisme de transport du moment cinétique (« évacuation de la rotation du cœur vers la périphérie ») reste mal compris et implique vraisemblablement le champ magnétique de la nébuleuse proto-solaire.

Pourquoi la forme de disque ?

Des disques de gaz et de poussière sont observés autour des proto-étoiles ou des jeunes étoiles (→ cours n°6 et n°8).



The Dynamic HH 30 Disk and Jet

HST • WFPC2

NASA and A. Watson (Instituto de Astronomía, UNAM, Mexico) • STScI-PRC00-32b

Les planètes : (1) Mercure

Mercure est la planète la plus proche du Soleil.

- La plus petite planète
- Pas de satellite
- Pratiquement pas d'atmosphère
- Surface rocheuse avec de nombreux cratères
- Champ magnétique élevé
- Densité élevée : cœur de fer ?

Exploration :

- Sonde Mariner 10 (NASA; 1974-75)
- Sonde Messenger (NASA; 2008-09)
- BepiColumbo (ESA/JAXA; 2014)



Image prise par la sonde Messenger (2008)

Les planètes : (2) Vénus

Sous les nuages, l'enfer...

- Pas de satellite
- Atmosphère nuageuse (CO_2)
- Température de surface : 730 K
- Pression atmosphérique à la surface : 700 atm
- Pluies d'acide sulfurique

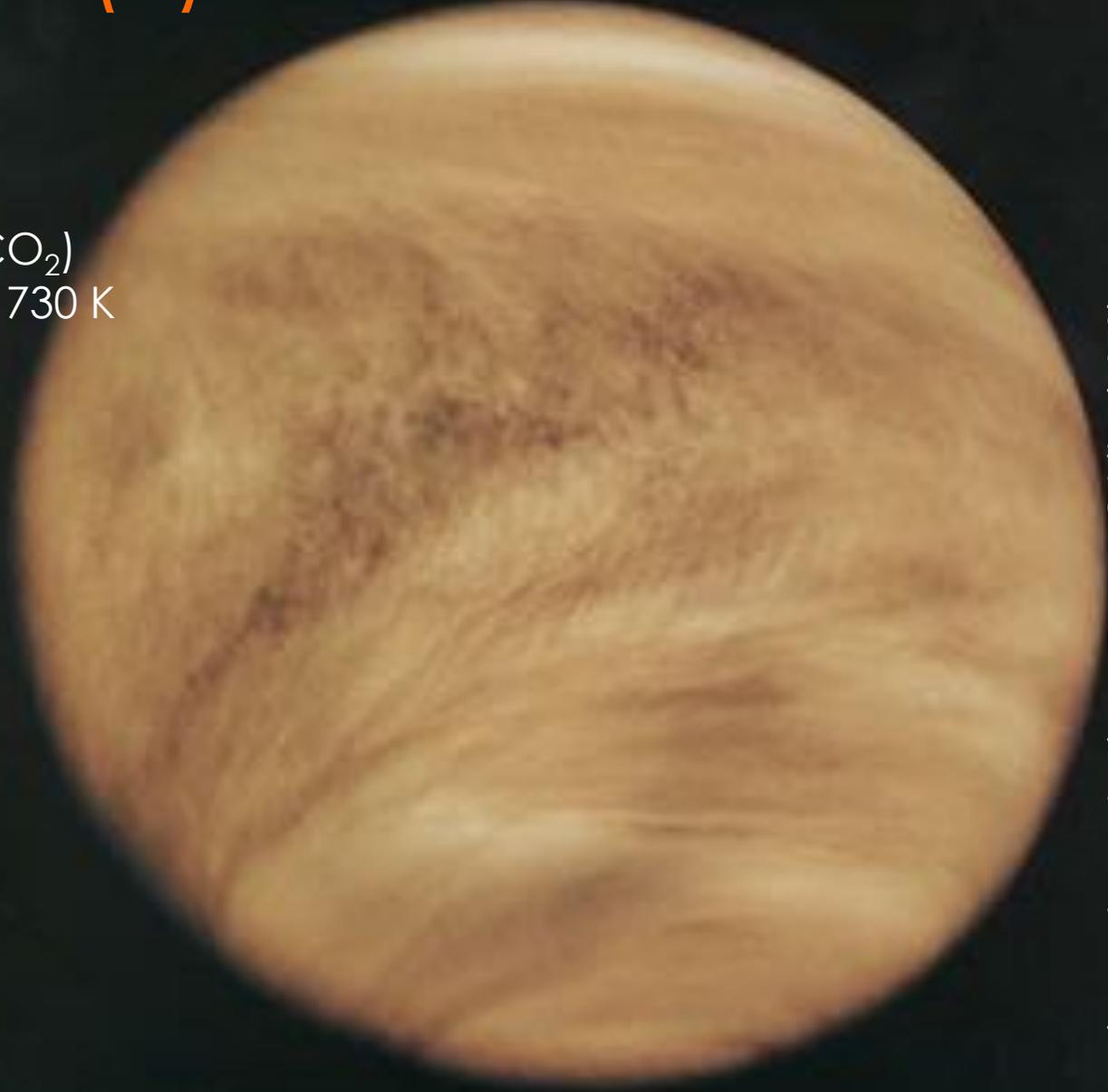


Image prise par la sonde Pioneer Venus Orbiter (1979)

Les planètes : (2) Vénus

Sous les nuages, l'enfer...

- Surface (par radar) : structures géologiques

Exploration :

- Programme Venera (URSS;60's)
- Programme Mariner (USA;60's)
- Pioneer Venus Project (NASA;1978)
 - un orbiteur (13 ans)
 - 4 sondes lâchées dans l'atmosphère
- Magellan probe (NASA; 1989)
- Venus Express (ESA; 2005)
- Survols par plusieurs sondes : Galileo, Cassini, Messenger, BepiColumbo.



Image prise par radar depuis la sonde Magellan (1991)

Les planètes : (3) La Terre

La Terre a une taille et une masse comparables à celle de Vénus, mais heureusement pour l'humanité, ne lui ressemble pas (encore ?).

- Un satellite, la Lune, le plus gros du système solaire
- Atmosphère nuageuse (O_2 et N_2)
- Sol rocheux avec
 - une activité géologique
 - une tectonique des plaques
 - des océans de H_2O
- Développement de la vie
- La présence de O_2 dans l'atmosphère est liée à la vie (photosynthèse).



Les planètes : (4) Mars

Mars est la dernière des quatre planètes telluriques.

- Deux petits satellites
Phobos & Déimos
- Atmosphère très ténue (CO_2)
- Surface observée depuis longtemps



Nuages de glace d'eau dans l'atmosphère de Mars (Phoenix, 2008)



Image prise par les sondes Viking (1980)

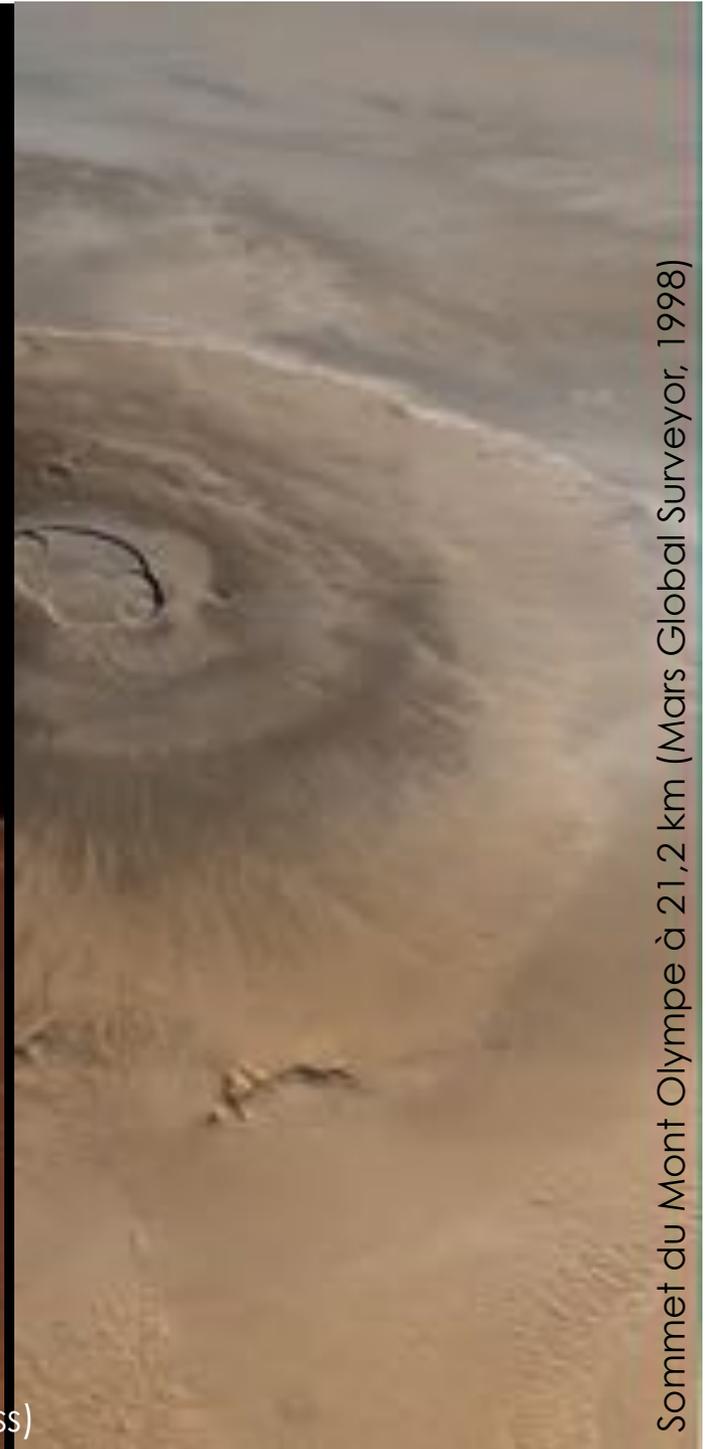
Les planètes : (4) Mars

La surface de Mars est connue en détails.

- activité géologique
- volcans, canyons, gorges, ...
- lits de rivière asséchées ?



Image en perspective de Kasei Valles et Sacra Fossae (Mars Express)



Sommet du Mont Olympus à 21,2 km (Mars Global Surveyor, 1998)

Les planètes : (4) Mars

La surface de Mars est connue en détails.

- activité géologique
- volcans, canyons, gorges, ...
- lits de rivière asséchées ?
- tempêtes de poussières, dunes (aspect changeant de Mars)

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



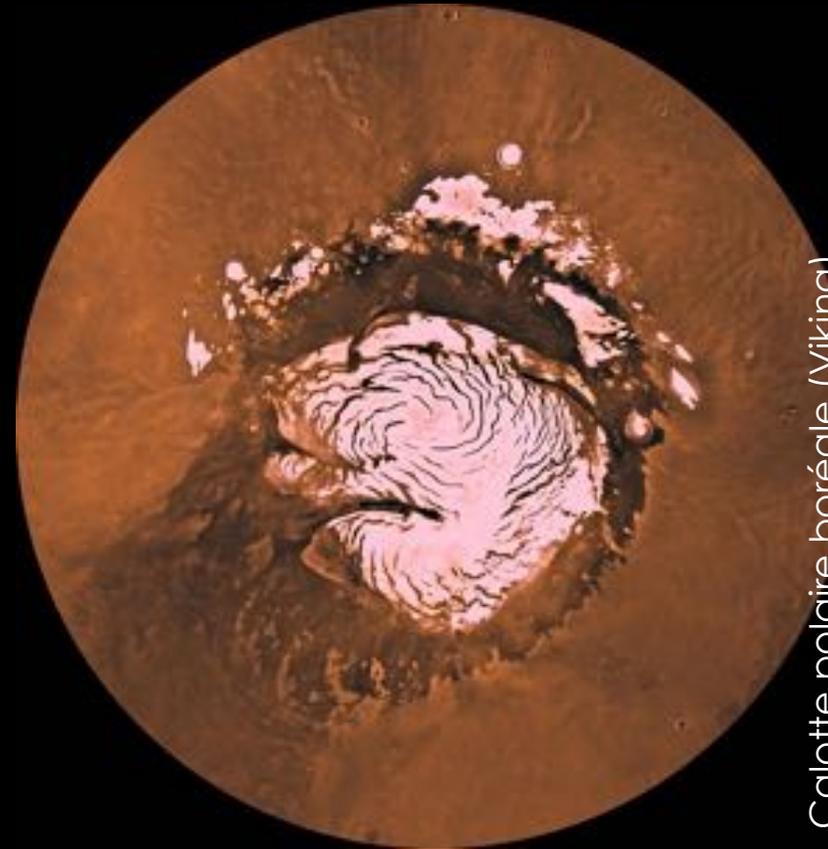
0000

Tempête de poussières photographiée par le Rover Spirit (2005)

Les planètes : (4) Mars

La surface de Mars est connue en détails.

- activité géologique
- volcans, canyons, gorges, ...
- lits de rivière asséchées ?
- tempêtes de poussières, dunes (aspect changeant de Mars)
- minéraux indiquant la présence d'eau dans le passé
- glaces d'eau dans les calottes polaires
- mer gelée recouverte de poussière ?



Calotte polaire boréale (Viking)

Une mer gelée observée par Mars Express ?

Les planètes : (4) Mars

Des conditions favorables à la vie ont peut être existé sur Mars dans le passé. Peut-être est-ce l'une des raisons pour laquelle c'est la planète la plus explorée. C'est aussi la planète où il le plus envisageable d'envoyer des hommes (mais le programme Constellation de la NASA pour une mission vers 2020 a été annulé).



Lever de Soleil sur le cratère Gusev (rover Spirit, 2005)



Vue panoramique du cratère Victoria (ø 730 m) par le rover Opportunity (2006)

Les planètes : (4) Mars

Mars est de loin la planète explorée avec le plus de détails (après la Terre).



Sol caillouteux de Mars (rover Spirit, 2006)



Gros plan (rover Opportunity)

Exploration :

- Survol : sondes Mariner 4,6,7,9 (NASA)
- Orbiteurs : Mars Global Surveyor (NASA) ; Mars Odyssey (NASA) ;
Mars Express (ESA) ; Mars Reconnaissance Orbiter (NASA)
- Atterrisseurs : Mars 2&3 (URSS) ; Viking 1&2 (NASA) ; Phoenix (NASA)
- Rovers : Spirit & Opportunity
- D'autres missions à venir...

Les planètes : (5) Jupiter

La première des planètes géantes est aussi la plus grande du système solaire.

- Les satellites galiléens:
Io, Europe, Ganymède et Callisto
- au moins 60 autres satellites,
la plupart découverts depuis 2000.
- 8 satellites (dont les galiléens)
ont une rotation prograde
et des orbites circulaires
- Les autres ont une rotation
rétrograde et des orbites
excentriques : ils ont été
capturés par Jupiter.
- Des anneaux ténus ont été
découverts par Voyager.



Les planètes : (5) Jupiter

La première des planètes géantes est aussi la plus grande du système solaire.

- Planète gazeuse (75% H ; 25 % He)
- Noyau incertain :
cœur rocheux entouré d'hydrogène liquide ?
- L'atmosphère structurée en latitude,
turbulence aux interfaces entre les bandes
- Nuages de cristaux d'ammoniac (NH_3).
- Grande tache rouge : gigantesque
tempête qui existe au moins depuis Galilée.
- Magnétosphère : aurores joviennes
(interaction avec le vent solaire → cours n°2).

Exploration :

- Survols : Pioneer 10 & 11 (NASA) ;
Voyager 1 & 2 (NASA) ; Ulysses (NASA/ESA) ;
Cassini (NASA/ESA) ; (NASA) New Horizons
- Plongeon dans l'atmosphère : Galileo (NASA)

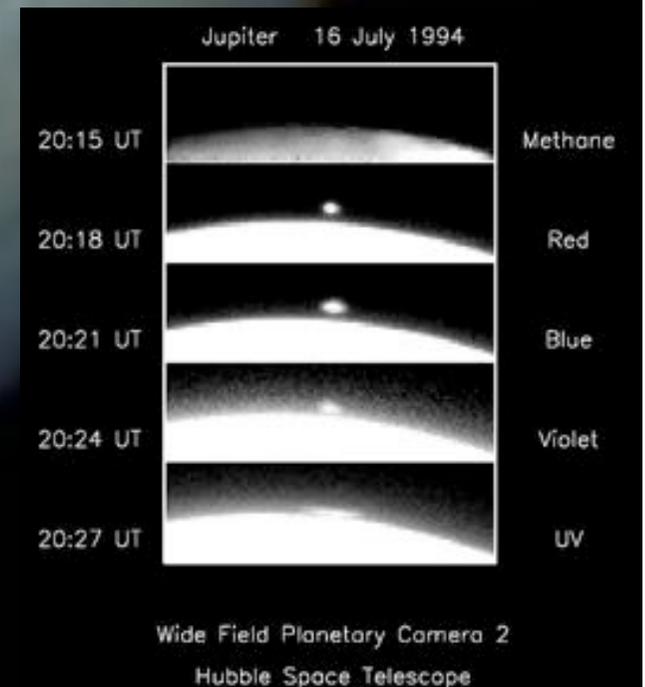


Les planètes : (5) Jupiter

Une sonde naturelle de l'atmosphère jovienne :
la comète Shoemaker-Levy 9.

Exemple d'étude :

l'analyse chimique (par spectroscopie) de la matière éjectée.



Les planètes : (6) Saturne

La deuxième planète géante dispose des anneaux les plus remarquables.

Beaucoup de similitudes avec Jupiter :

- Géante gazeuse
- Même hypothèse sur le noyau
- Au moins 62 satellites. Le plus gros : Titan, le seul satellite dans le système solaire avec une atmosphère.
- Les anneaux (glace d'eau + poussière) : ils s'étendent de 6000 à 120 000 km de Saturne, avec une épaisseur moyenne de 20 m !

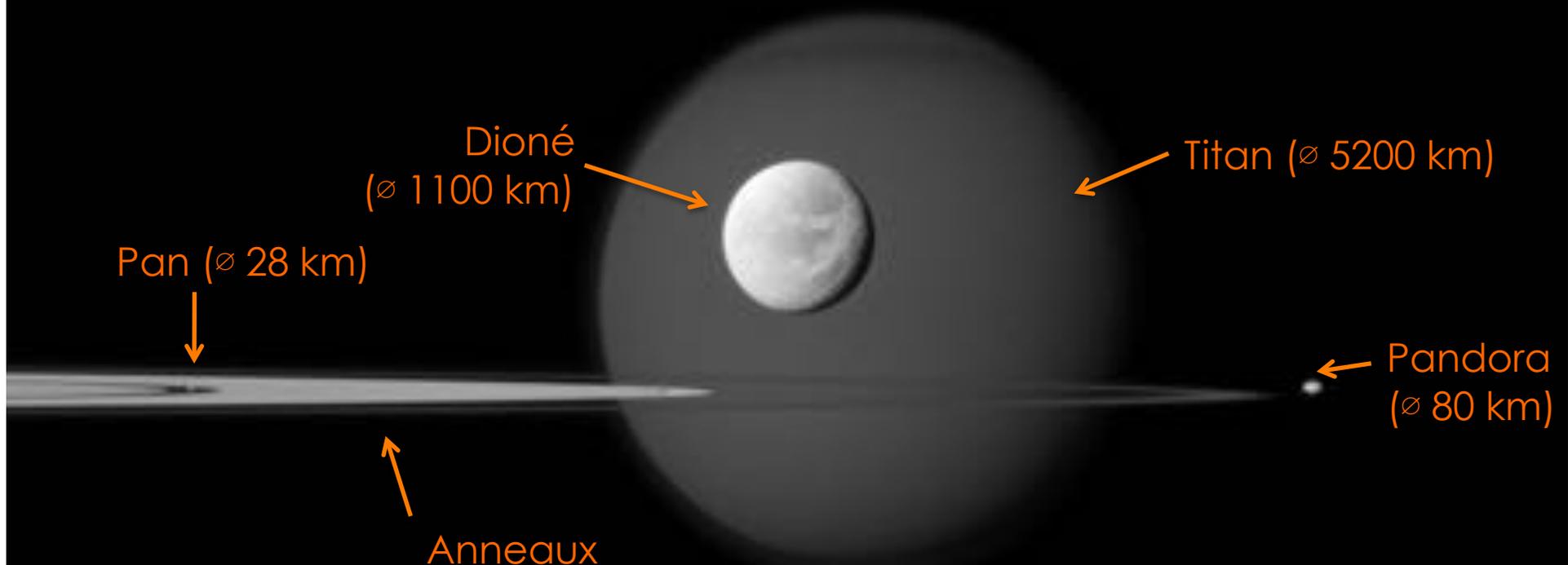


Image prise par la sonde Cassini

Les planètes : (6) Saturne

La mission Cassini-Huygens (NASA/ESA)

- une sonde en orbite autour de Saturne (Cassini)
- une sonde posée sur Titan (Huygens)



Les planètes : (6) Saturne

Les mesures de Huygens ont été effectuées :

- pendant les ~ 2h30 de chute
- pendant ~ 90min après l'impact



1270 km
21600 km/h



Les planètes : (7,8) Uranus & Neptune

Les deux dernières planètes géantes montrent aussi de grandes similarités avec Jupiter et Saturne.

- Géantes gazeuses (H, He) + noyau rocheux ?
- Nombreux satellites
- Anneaux
- Quelques différences néanmoins avec Jupiter et Saturne : proportion plus importante de glaces d'eau, de méthane et d'ammoniac dans l'atmosphère.



Uranus photographiée par Voyager 2 (1986)



Neptune photographiée par Voyager 2 (1989)

Les planètes : diversité

Une question centrale dans l'étude du système solaire est la compréhension physique de la diversité observée parmi les planètes.

Nom	Distance au Soleil (U.A.)	# satellites	Masse ($\times 10^{24}$ kg)	Densité moyenne	Température de surface (K)
Mercury	0,39	0	0,33	5,4	100-725
Vénus	0,72	0	4,9	5,2	733
Terre	1,00	1	6,0	5,5	288
Mars	1,52	2	0,64	3,9	215
Jupiter	5,20	≥ 64	1900	1,3	124
Saturne	9,54	≥ 62	570	0,69	95
Uranus	19,2	≥ 27	87	1,32	59
Neptune	30,1	≥ 13	100	1,64	59

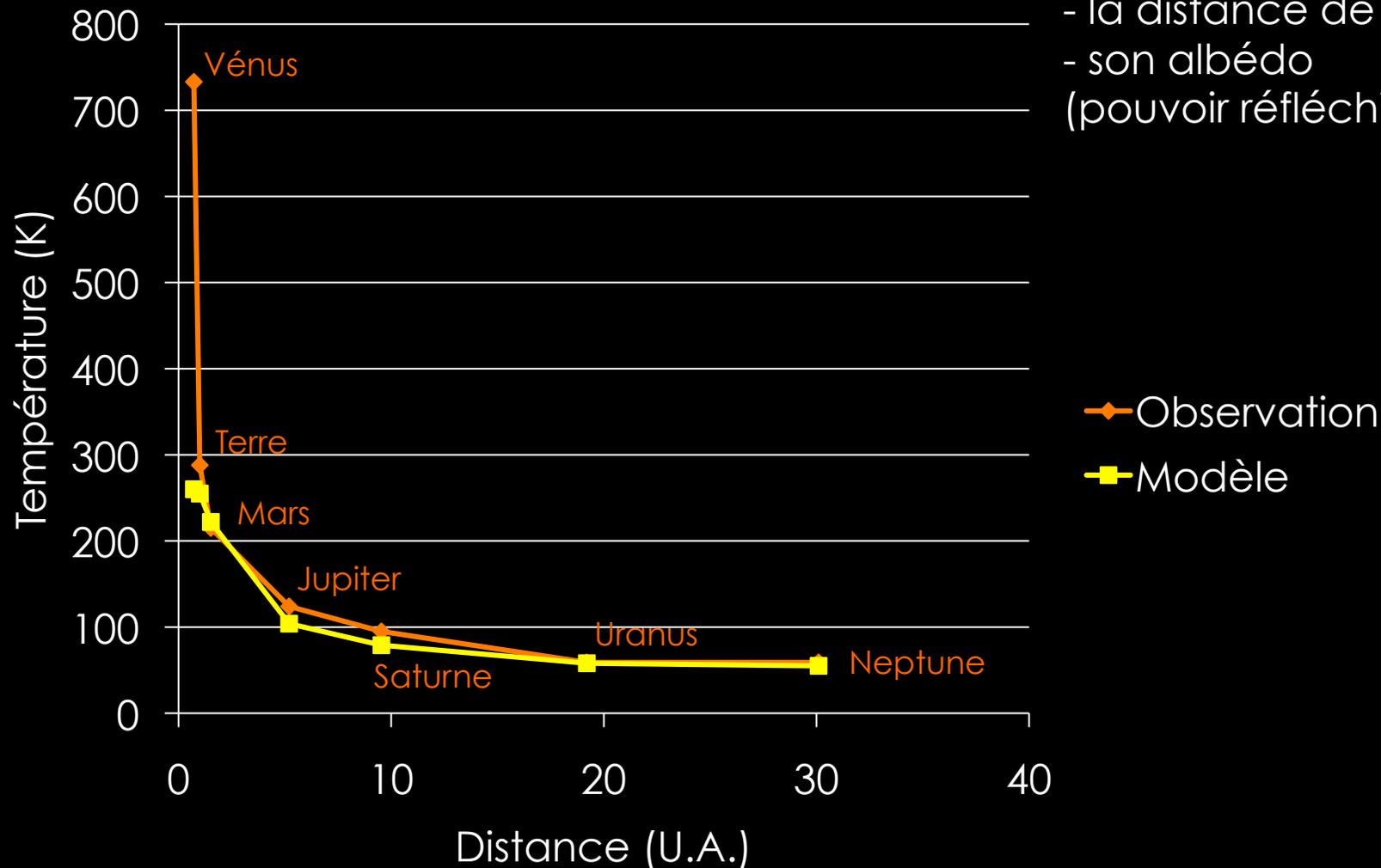
- Mercure a une rotation lente, d'où une grande différence de température entre le jour et la nuit.
- La différence de densité entre les planètes telluriques et géantes est une conséquence de la différence entre leurs compositions chimiques.

Pourquoi les planètes n'ont pas la même température ?

Les planètes sont chauffées par le Soleil : la température dépend de la distance.

On peut modéliser la température. Elle dépend de :

- la luminosité du Soleil
- la distance de la planète
- son albédo (pouvoir réfléchissant)



Pourquoi les planètes n'ont pas la même température ?

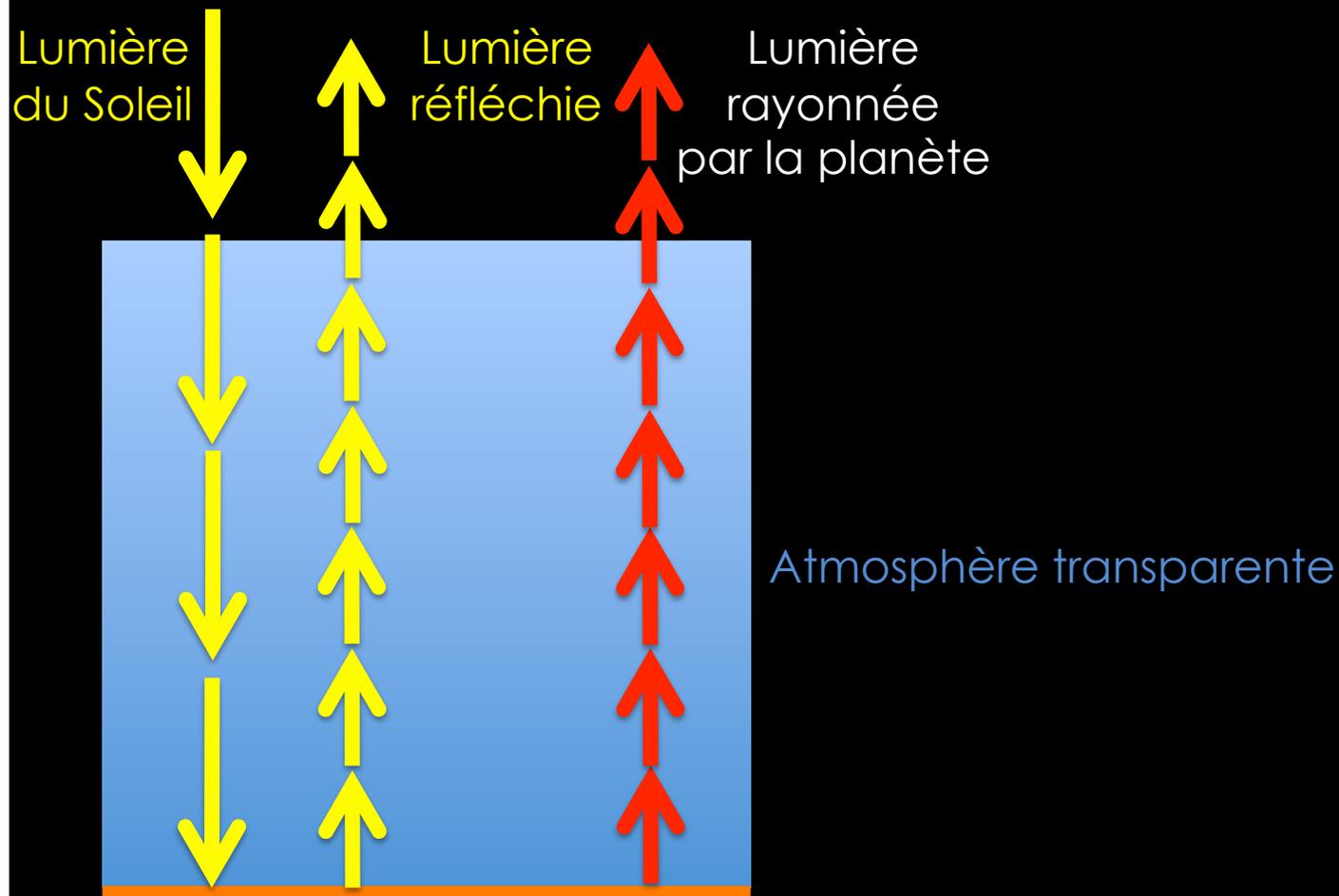
Jupiter et Saturne ont une température légèrement supérieure à celle prédite à cause d'une source *interne* d'énergie.

- L'énergie libérée par leur lente contraction gravitationnelle (cf. cours n°2, mécanisme de Kelvin-Helmholtz)
- L'énergie thermique emmagasinée lors de leur formation



Pourquoi les planètes n'ont pas la même température ?

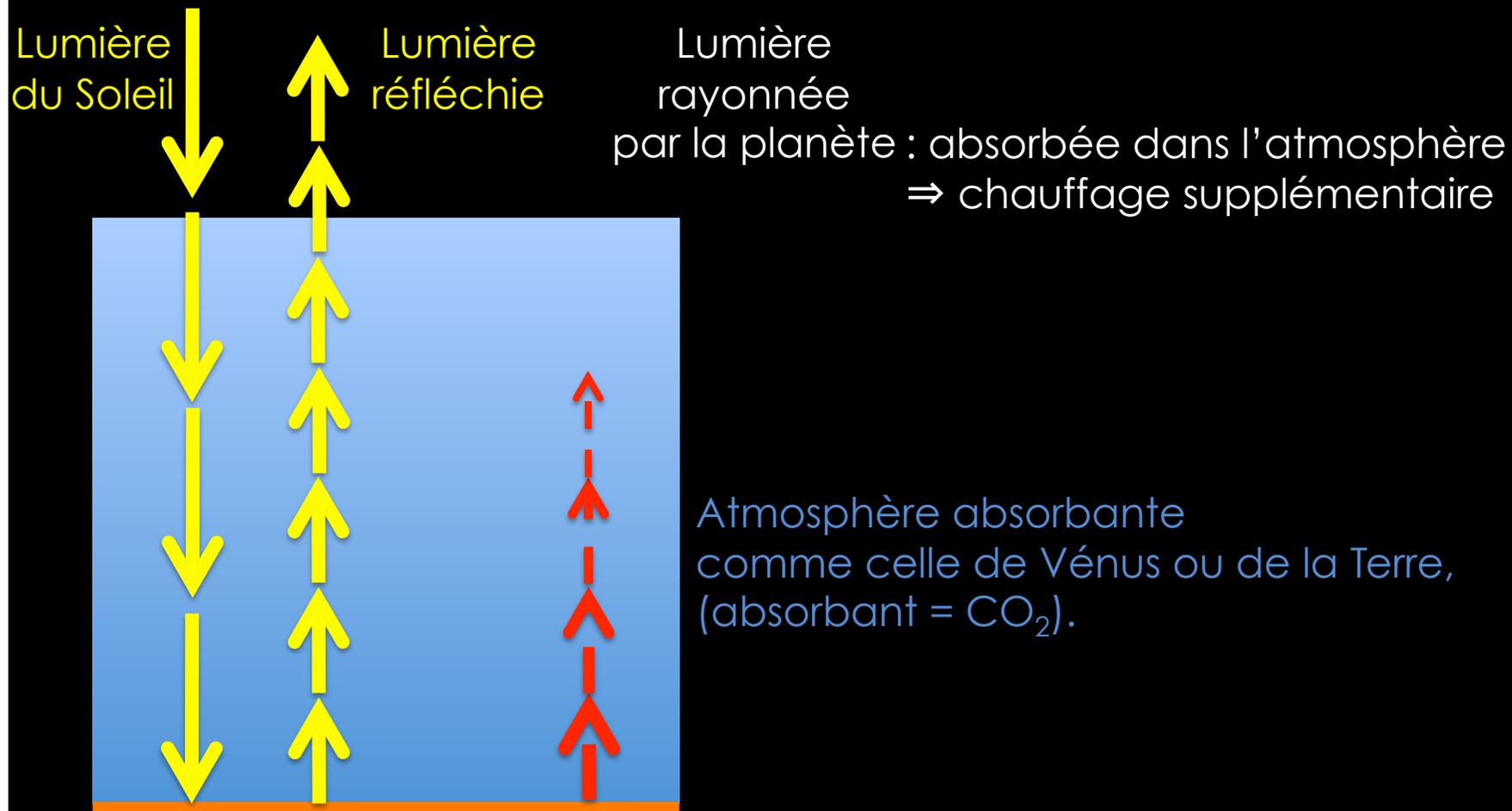
Vénus et la Terre ont une température nettement supérieure à celle prédite à cause de l'effet de serre dans leur atmosphère.



L'énergie qui n'est pas réfléchie est absorbée par la planète : chauffage.

Pourquoi les planètes n'ont pas la même température ?

Vénus et la Terre ont une température nettement supérieure à celle prédite à cause de l'effet de serre dans leur atmosphère.

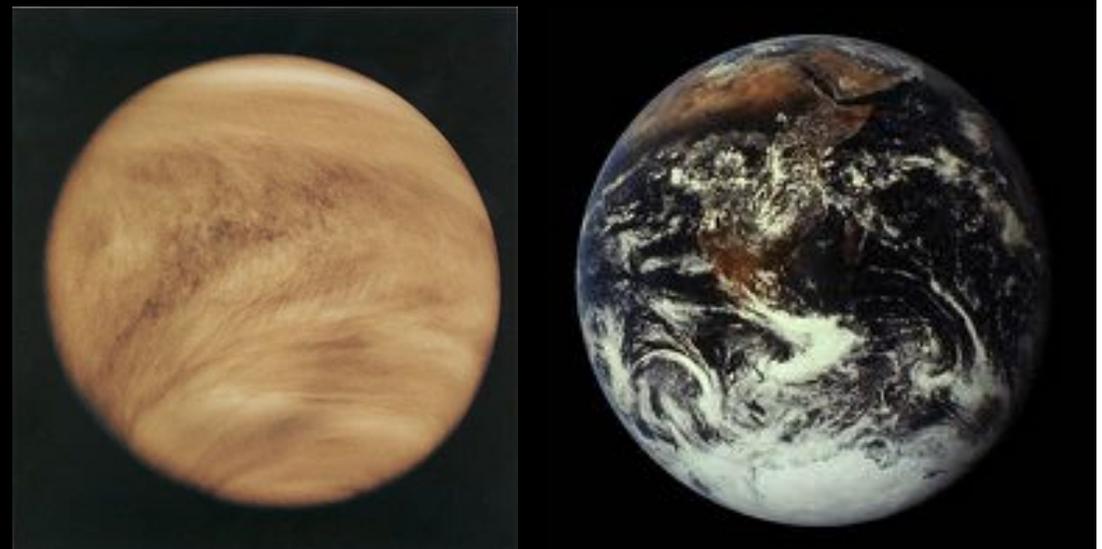


L'énergie qui n'est pas réfléchie est absorbée par la planète : chauffage.

Pourquoi les planètes n'ont pas la même température ?

Vénus et la Terre ont une température nettement supérieure à celle prédite à cause de l'*effet de serre* dans leur atmosphère.

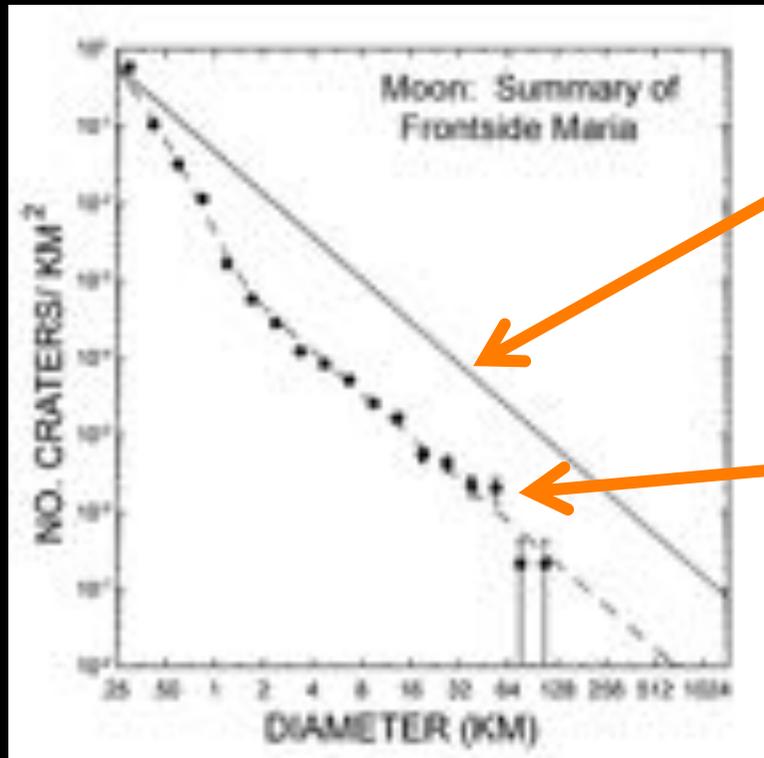
- L'effet de serre a transformé Vénus en un enfer à 733 K (460°C)
- L'effet de serre a permis à la Terre d'atteindre une température suffisante pour avoir de l'eau liquide (288 K au lieu de 260 K, soit 15°C au lieu de -13°C)
- Le réchauffement climatique observé actuellement sur Terre est dû à une augmentation de l'*effet de serre* à cause du CO₂ injecté dans l'atmosphère par l'activité humaine.



Quel âge ont les surfaces des planètes ?

La cratérisation peut être utilisée pour dater les sols.

- Plus il y a de cratères, plus le sol est âgé.
- La méthode peut être calibrée avec la lune où des roches ont été datées précisément avec les isotopes radioactifs.



« terres » lunaires
(i.e. régions plus anciennes, non affectées par la lave)

Datation : ~ 4,4 milliards d'années

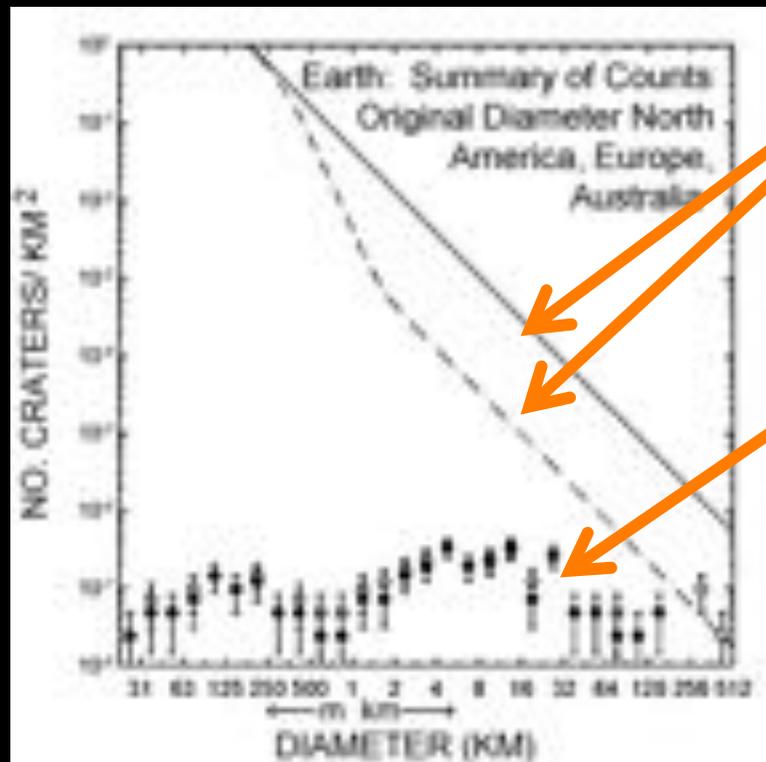
« mers » lunaires
(i.e. plaines de laves)

Datation : ~ 3 à 3,5 milliards d'années

Quel âge ont les surfaces des planètes ?

La cratérisation peut être utilisée pour dater les sols.

- La cratérisation des surfaces géologiquement actives est beaucoup plus faible (exemple : sur Terre, la surface est renouvelée en ~ 500 millions d'années, du fait de l'érosion, de la tectonique des plaques, de la sédimentation, ...)



Lune : *terrae et maria*

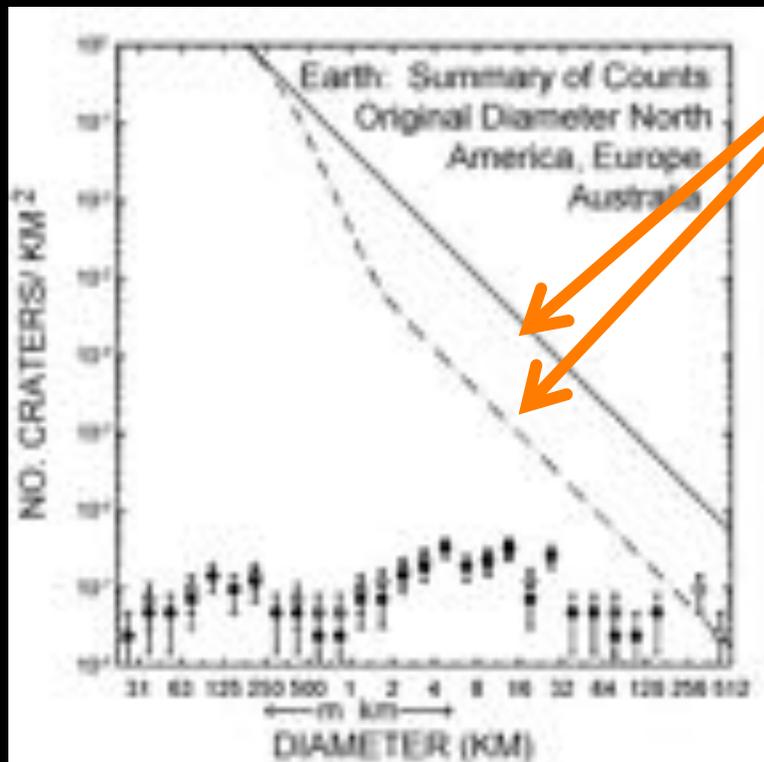
Terre : on remarque que les grands cratères survivent plus longtemps.

Quel âge ont les surfaces des planètes ?

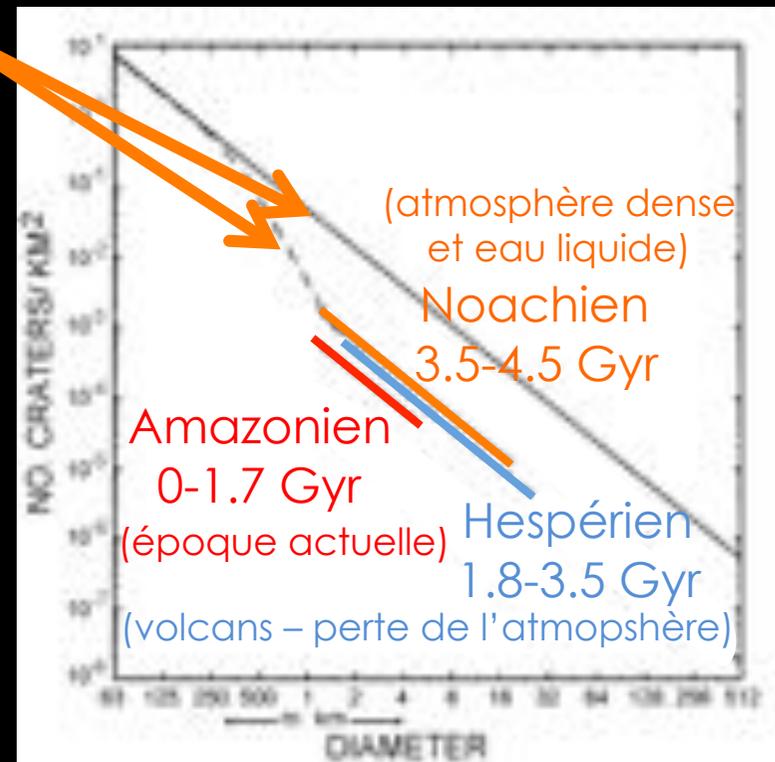
La cratérisation peut être utilisée pour dater les sols.

- La Terre, Vénus sont géologiquement actives : surfaces jeunes
- Mercure et la Lune sont géologiquement inactives
- Mars : 3 grands époques sont identifiées dans l'histoire géologique.

Lune : *terrae et maria*



Terre



Mars

Pourquoi certains corps ne montrent pas d'activité géologique récente ?

- Lors de leur formation, les corps du système solaire sont chauds.
L'énergie thermique initiale E est proportionnelle au volume, soit R^3
- Les corps perdent ensuite cette énergie thermique en rayonnant.
La puissance rayonnée P est proportionnelle à la surface, soit R^2 .
- Le temps nécessaire pour se refroidir est $t \sim E / P$.
Le temps de refroidissement est donc proportionnel à R .

Les petits corps (Mercure, Lune) se sont refroidis rapidement. Une fois froids, l'activité géologique s'arrête.

Les gros corps (Terre, Vénus) ne sont pas encore complètement refroidis. Il y a encore une activité géologique.

Mars est dans une situation intermédiaire : activité géologique terminée, mais plus récemment que pour Mercure et la Lune.

Pourquoi Mercure et Mars ont des atmosphères si ténues ?

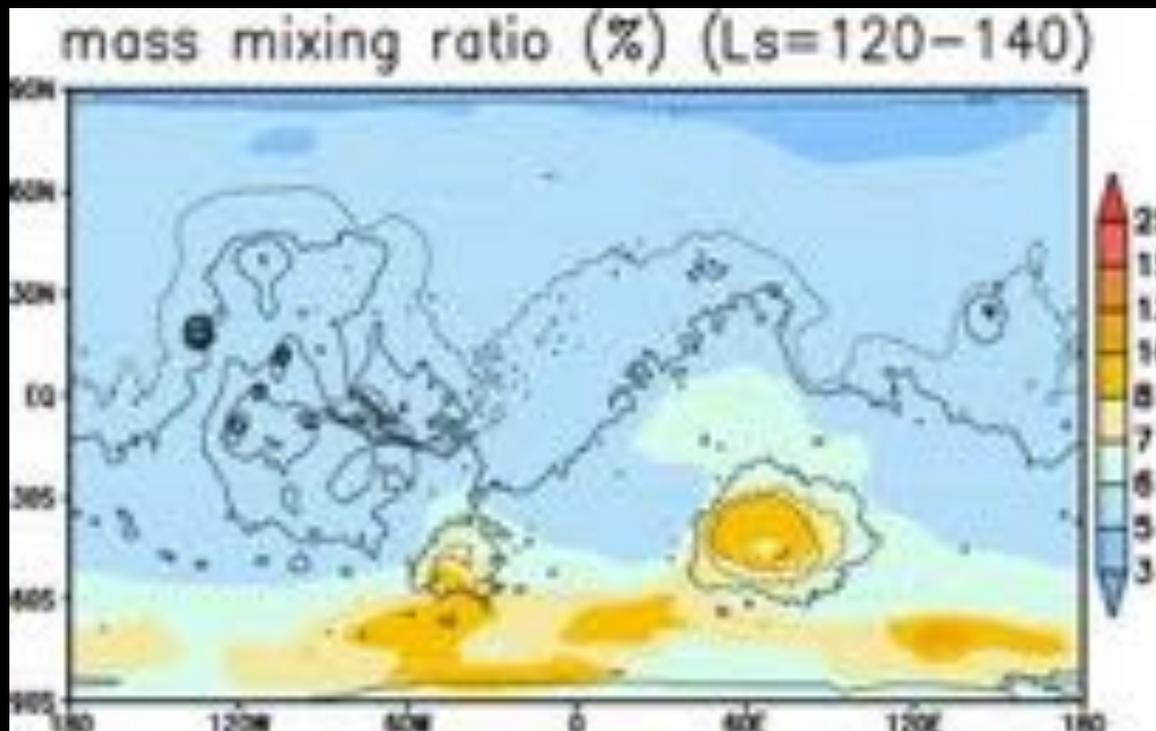
La capacité d'une planète à retenir son atmosphère dépend :

- de sa gravité, qui fixe la vitesse de libération à la surface :
 - Mercure : 4,4 km/s
 - Vénus : 10,5 km/s
 - Terre : 11,2 km/s
 - Mars : 5,0 km/s
- de sa température, qui fixe la vitesse des composants :
 - plus la température est élevée, plus la vitesse moyenne est élevée
 - plus le composé est lourd, plus sa vitesse moyenne est faible
- Les composants ayant une vitesse supérieure à celle de libération s'échappent. Les composés légers (e.g. H₂) sont ceux qui s'échappent le plus facilement.
- Mercure souffre à la fois d'une température élevée et d'une faible gravité : pas d'atmosphère.
- Mars a une faible gravité comparée à la Terre. Il est probable que son atmosphère était initialement plus dense et s'est en grande partie échappée.

Climatologie comparée

Le système solaire offre des planètes avec des conditions très différentes, fort utiles pour tester et calibrer les modèles de climat.

Exemple : le modèle du Laboratoire de Météorologie Dynamique (X, ENS, UPMC) est appliqué également à Vénus, Mars, Titan, etc. Les termes dominants ne sont pas les mêmes dans chaque cas et chaque corps permet des tests uniques. Ultimement, le même modèle climatique reproduit le climat observé sur chacun des corps. C'est une étape importante dans la validation du modèle.



Le modèle de climat du LMD appliqué à la circulation dans l'atmosphère de Mars

Pourquoi des planètes telluriques et des planètes géantes ?

Une des manifestations les plus flagrantes de diversité entre les planètes et la distinction entre les planètes telluriques et les planètes géantes.

- Les planètes géantes et les planètes telluriques ont des tailles très différentes.
- Les planètes telluriques sont les 4 plus proches du Soleil, les planètes géantes les 4 plus éloignées.
- Les planètes géantes ont la même composition que le Soleil : 74% H ; 24 % He + 2% traces d'autres éléments.
- Les planètes telluriques ont une composition correspondant uniquement au 2% des traces : elles ont perdu H et He.

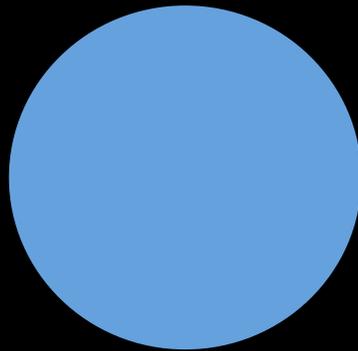


Pourquoi des planètes telluriques et des planètes géantes ?

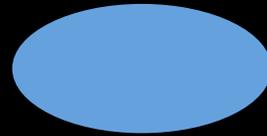
Une des manifestations les plus flagrantes de diversité entre les planètes et la distinction entre les planètes telluriques et les planètes géantes.

Cette distinction est sans doute reliée à la formation du système solaire.

Nébuleuse protosolaire
homogène



Effondrement,
aplatissement



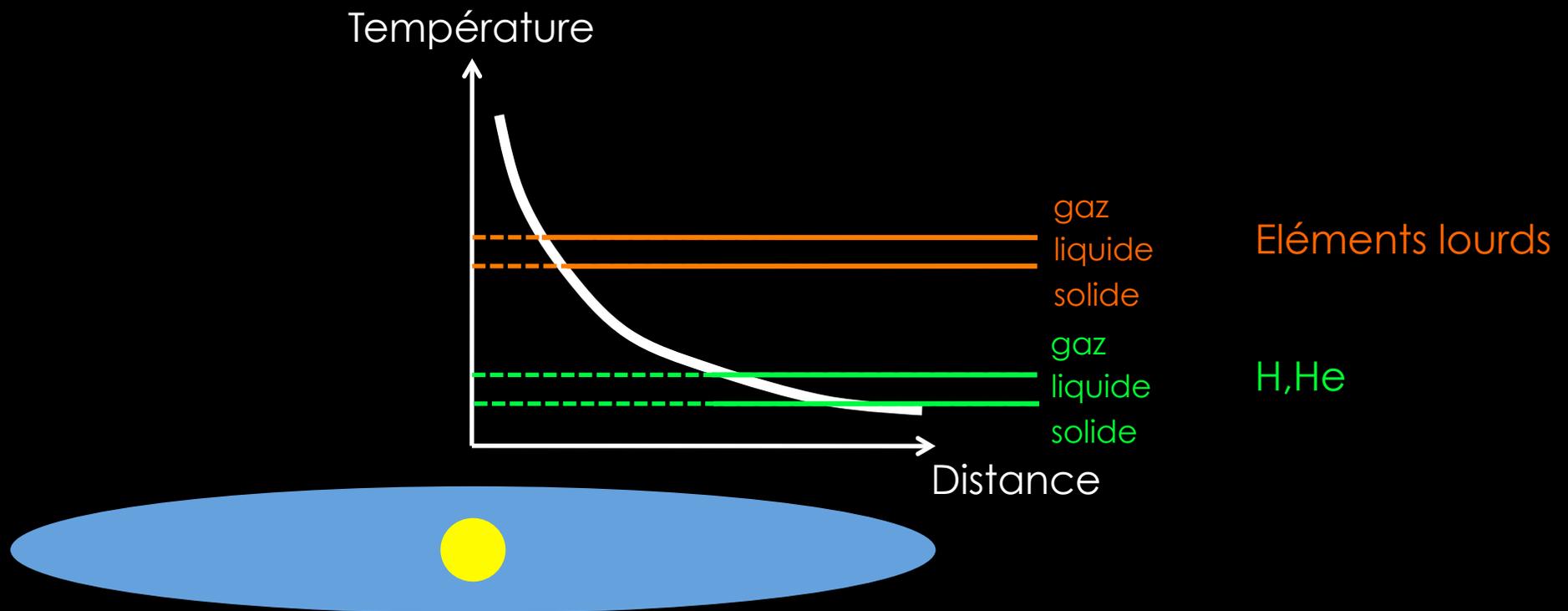
Soleil
+ disque circumstellaire



Pourquoi des planètes telluriques et des planètes géantes ?

Une des manifestations les plus flagrantes de diversité entre les planètes et la distinction entre les planètes telluriques et les planètes géantes.

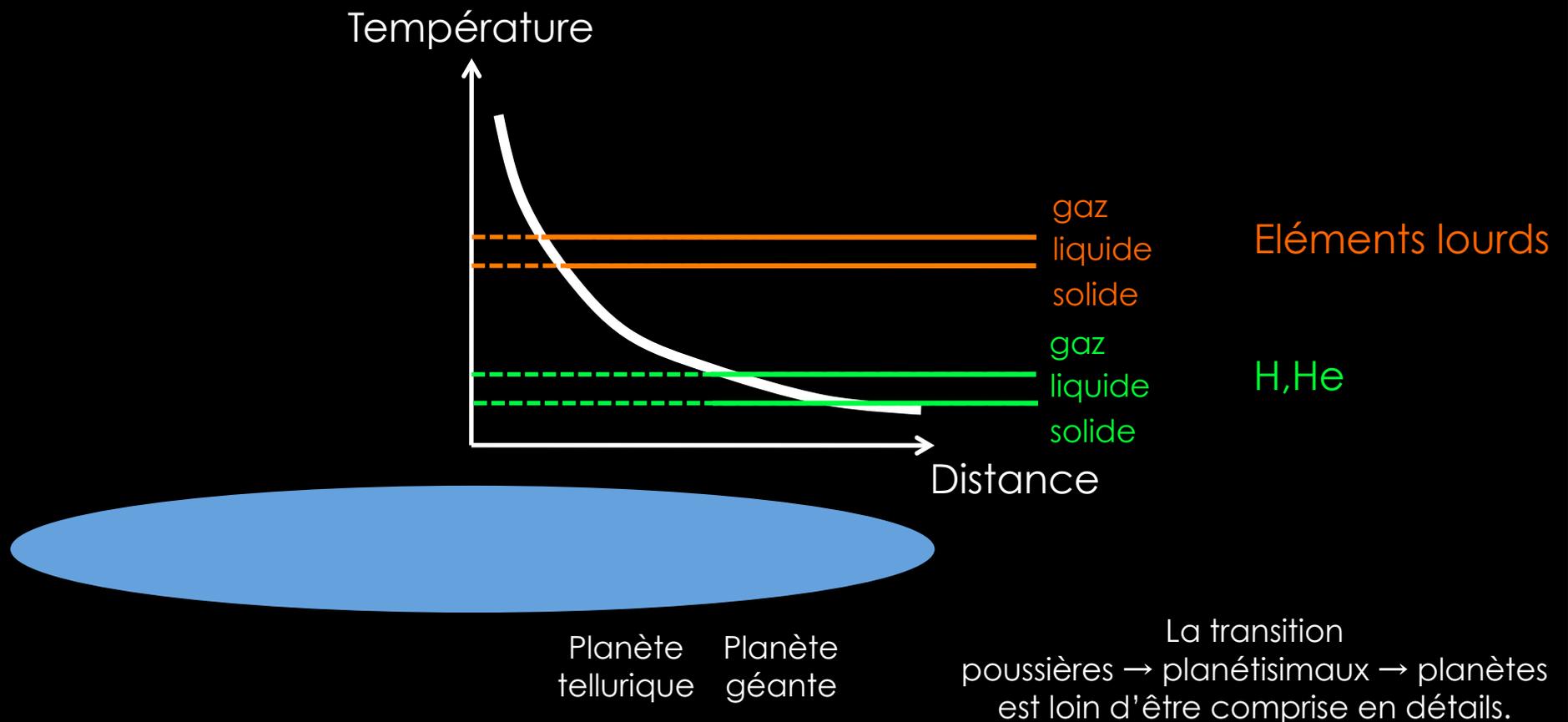
Cette distinction est sans doute reliée à la formation du système solaire.



Pourquoi des planètes telluriques et des planètes géantes ?

Une des manifestations les plus flagrantes de diversité entre les planètes et la distinction entre les planètes telluriques et les planètes géantes.

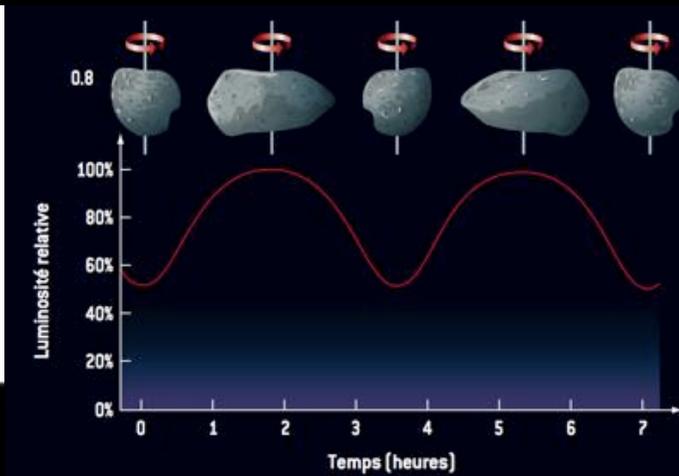
Cette distinction est sans doute reliée à la formation du système solaire.



Les petits corps : (1) astéroïdes

Les astéroïdes sont des petits corps irréguliers, formés de roches, de poussières et de glaces, avec une taille allant de quelques dizaines de mètres à quelques kilomètres. On estime leur nombre à plusieurs centaines de milliers. Leur contribution à la masse du système solaire est négligeable.

- Découverte du premier astéroïde en 1801 (Piazzi, Sicile).
- Découverte de la ceinture d'astéroïdes entre Mars et Jupiter au XIX^e siècle.
- Découverte de la ceinture de Kuiper au delà de Neptune en 1992. Les astéroïdes qu'on y trouve ont plus de glace et moins de roche et de métaux.



Etude indirecte de la forme et de la rotation d'un astéroïde
Gauche: méthode « radar »
Droite: étude des variations de luminosité

L'astéroïde Ida (56 km)
et son satellite Dactyl (1,5 km)
photographiés par Galileo en 1993

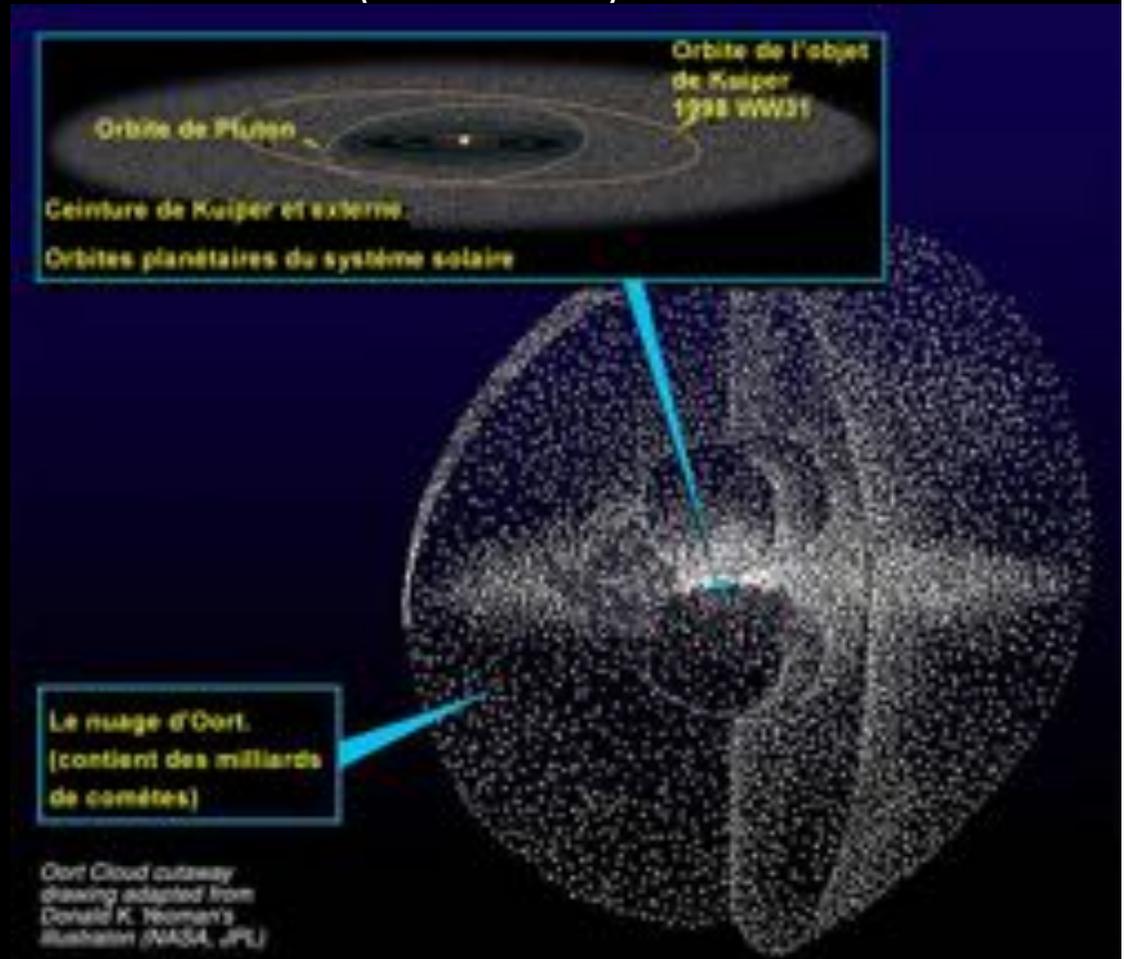
Exploration

- en cours avec la sonde Dawn (NASA) lancée vers Vesta et Cérès.

Les petits corps : (2) comètes

Les comètes sont des petits corps constitués d'un noyau de glace et de poussières. Elles deviennent actives lorsqu'elles se rapprochent du Soleil.

- Réservoirs de comètes :
 - ceinture de Kuiper pour les comètes à courte période
 - Hypothétique nuage de Oort à 50 000 U.A. (Oort, 1950) pour les comètes à longue période



Les petits corps : (2) comètes

Les comètes sont des petits corps constitués d'un noyau de glace et de poussières. Elles deviennent actives lorsqu'elles se rapprochent du Soleil.

- Noyau :
solide (glaces + poussières)
taille ~ 100 m à 10 km.
- Chevelure :
gaz et poussières qui s'échappent du noyau
- Queues :
 - opposées au Soleil
 - queue de plasma rectiligne
(poussée par le vent solaire)
 - queue plus large
(poussée par le rayonnement solaire)



Exploration :

- La sonde Rosetta (ESA) va rejoindre la comète Tchourioumov-Guerassimenko en 2014 (orbiter+lander)

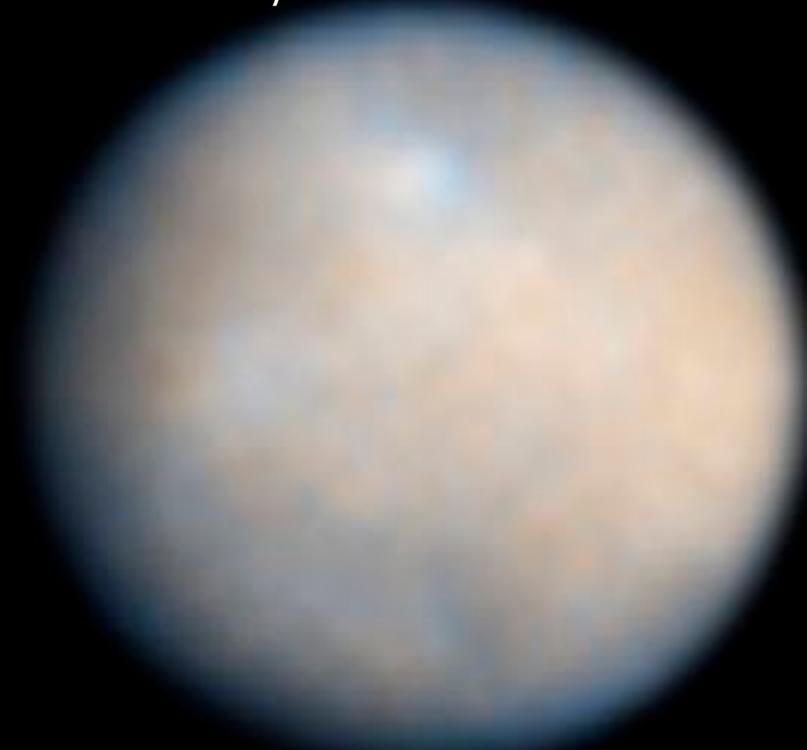
Les petits corps : (3) planètes naines

Les planètes naines sont une catégorie introduite à la suite du débat sur la nature de Pluton en 2005-2006.

- Cérès (~900 km) : le plus gros corps de la ceinture d'Astéroïdes
- Pluton (~2300 km) : orbite au delà de Neptune, plus excentrique
Satellite : Charon (~600 km)
- Eris (~2400 km) : le plus gros corps au-delà de l'orbite de Neptune (TNO)
- Makemake (~1200-1900 km) & Haumea (~200-2500 km) : autres TNOs
- D'autres candidats ...

Exploration :

- Dawn survolera Cérès en 2015.
- New Horizons survolera Pluton en 2015



Cérès (HST)

Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?



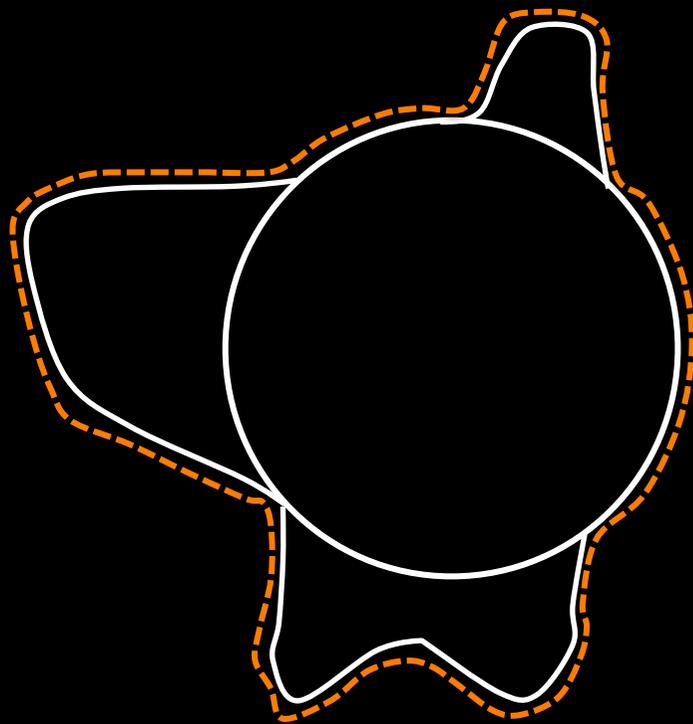
L'astéroïde Lutetia de taille ~ 100 km
(photographié la sonde Rosetta)



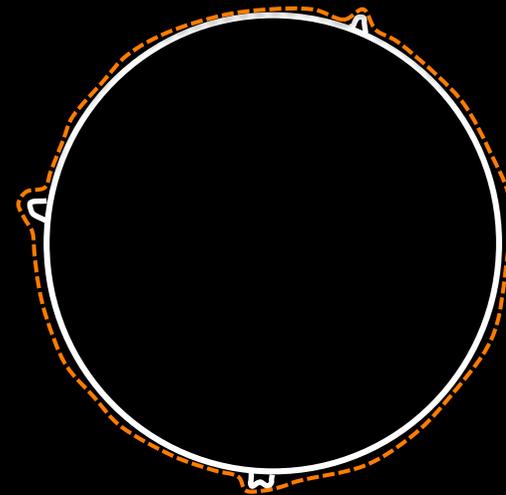
La planète Mars de rayon 3400 km
(photographiée par la sonde Viking)

Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Tout est lié à la taille maximum d'une montagne...



La taille maximum d'une montagne
est comparable à la taille du corps :
corps cabossé



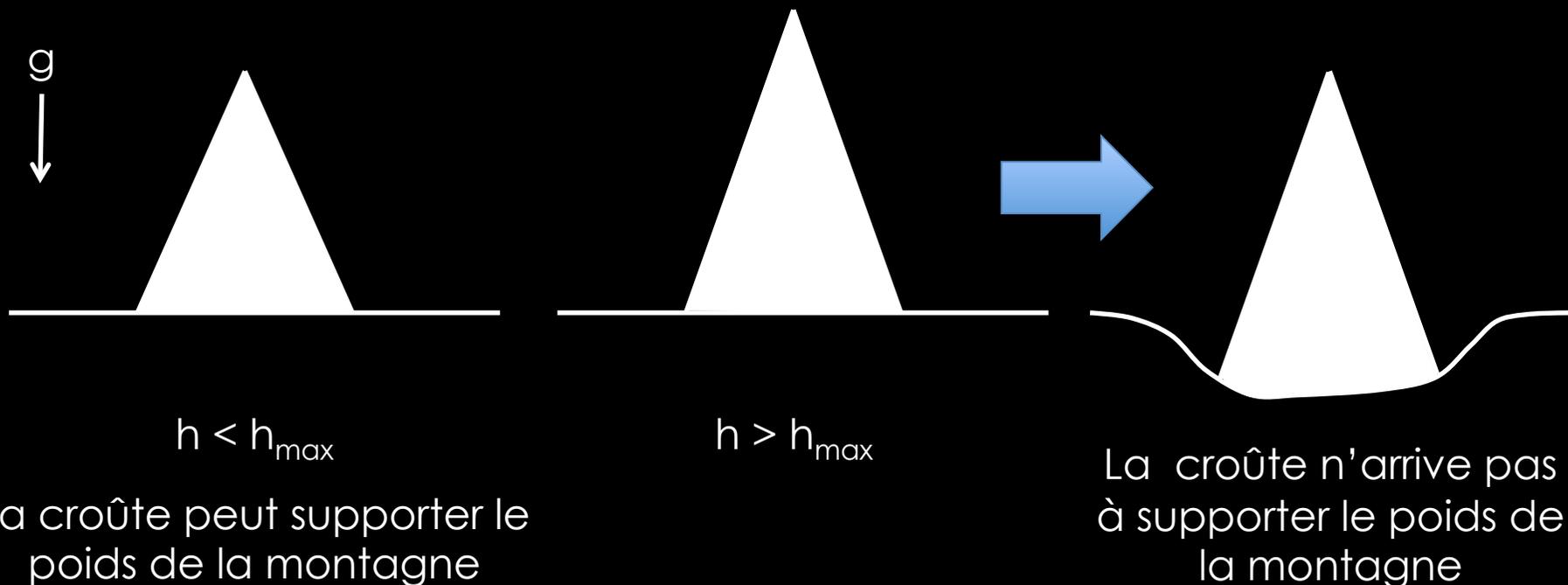
La taille maximum d'une montagne
est très petite devant la taille du corps :
corps rond

Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Tout est lié à la taille maximum d'une montagne...

Pour les planètes rocheuses :

- La gravité g à la surface est proportionnelle au rayon R
- La pression exercée par une montagne de hauteur h sur la croûte est proportionnelle à $h \times R$
- La roche de la croûte peut supporter au maximum une pression P_{\max}
- La taille maximum h_{\max} d'une montagne varie donc comme $1/R$



Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Tout est lié à la taille maximum d'une montagne...

- $R_{\text{Terre}} / R_{\text{Mars}} \sim 2$ donc Mars peut avoir des montagnes deux fois plus grandes.

- Observations :

sur Terre	Everest	$h = 8,5 \text{ km}$
	Mauna Loa	$h = 9 \text{ km}$

sur Mars	Mont Olympe	$h = 22 \text{ km}$
----------	-------------	---------------------

on retrouve à peu près le facteur 2



Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Le même type de modèle permet aussi de montrer que la pression au cœur des gros corps est tellement élevée que la roche est liquide : le magma.

- Exemple : la Terre
 - Au centre de la Terre, la pression est de l'ordre de 1,7 millions d'atm.
 - La pression maximum que peut supporter la roche terrestre est ~ 10000 atm.Seule la couche superficielle est solide (~ 100 km) : la *lithosphère*.
(épaisseur mesurée par les études sismologiques)
- La frontière entre gros corps ronds avec un intérieur liquide et petits corps solides et cabossés se situe vers $R \sim 400-500$ km (Cérès est à la frontière).



Vesta filmé par la sonde Dawn en 2011



Trois images à l'échelle :

-Vesta (astéroïde $R \sim 270$ km)

-Cérès (planète naine $R \sim 470$ km)

-Lune (plus gros satellite du système solaire $R \sim 1700$ km)

Qu'est-ce qu'une planète ?

En 2005, la découverte d'Eris a conduit la communauté scientifique à s'interroger sur la définition d'une planète.

Chronologie :

- 1781 : découverte de la 7^{ème} planète, Uranus (W. Herschel, Allemagne/UK)
- 1801 : découverte de Cérès, le plus gros corps de la ceinture d'astéroïdes (Piazzi, Italie)
- 1846 : découverte de la 8^{ème} planète, Neptune (calcul: Le Verrier, France ; observation: Galle, Allemagne)
- 1930 : découverte d'une 9^{ème} planète, Pluton (C. Tombaugh, USA)
- 1978 : découverte d'un satellite de Pluton presque aussi massif, Charon (J. Christy, USA)
- 1992 : découverte de la ceinture de Kuiper et des objets trans-neptuniens (TNO) (Edgeworth, USA, 1943; Kuiper, Pays-Bas, 1951; D. Jewitt & J. Luu, USA).
- 2004-2005 : découverte de plusieurs gros TNOs, dont Haumea, Makemake et surtout Eris, plus massif que Pluton (M. Brown et al., USA)

En 2005, l'UAI nomme une commission pour proposer une définition de planète.

Qu'est-ce qu'une planète ?

En 2005, la découverte d'Eris a conduit la communauté scientifique à s'interroger sur la définition d'une planète.

Proposition du *Planet Definition Committee* :

1. Le corps est en orbite autour du soleil.
2. Le corps est assez massif pour être sphérique.

Avec cette définition, il y a en 2005 douze planètes dans le système solaire (8 + Pluton & Charon, Eris, Cérès).

Cette proposition est soumise au vote de l'assemblée générale de l'UAI à Prague (août 2006).

Qu'est-ce qu'une planète ?

En 2005, la découverte d'Eris a conduit la communauté scientifique à s'interroger sur la définition d'une planète.

La proposition du *Planet Definition Committee* est rejetée ! Il paraît inacceptable de mettre Pluton, Eris, etc. dans la même catégorie que les 8 planètes, car cela cache des différences fondamentales (classification inefficace).

Proposition alternative adoptée par l'*Assemblée Générale de l'UAI* en 2006 :

1. Le corps est en orbite autour du soleil.
2. Le corps est assez massif pour être sphérique.
3. Le corps doit être beaucoup plus grand que les autres corps sur la même orbite.

Avec cette définition, la liste des planètes reste à 8. Pour consoler les défenseurs de Pluton, l'UAI introduit alors une nouvelle classe, les *planètes naines* : seules les conditions 1. et 2. sont vérifiées.

La dynamique du système solaire

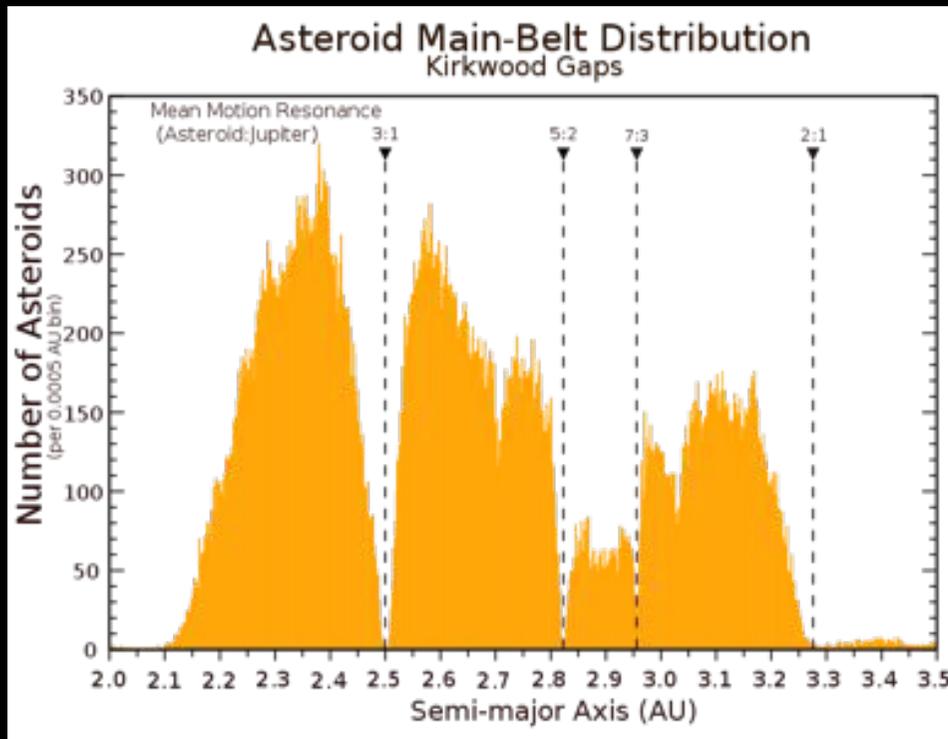
En première approximation, la dynamique des corps du système solaire est régie par les lois de Képler (→ cours n°1). Cependant, le fait que le système soit un système à plus de deux corps introduit beaucoup d'effets supplémentaires. Cela fait intervenir des mathématiques très compliquées (Lagrange, Poincaré, ...)

- Certaines orbites sont stables
(c'est le cas en particulier de celles des 8 planètes)
- D'autres sont instables
- Le système solaire est plein ! Toutes les orbites stables ont occupées...
- Les comètes sont un exemple d'objets situés sur des orbites instables. Une petite perturbation peut suffire à les fait plonger vers le soleil depuis la ceinture de Kuiper ou le nuage de Oort.

La dynamique du système solaire

Quelques exemples d'orbites instables :

- Les *centaures*, des astéroïdes de la ceinture de Kuiper avec des orbites très excentriques qui croisent Saturne, Uranus et Neptune.
(un centaure est expulsé du système solaire en ~ 100 millions d'années)
- Dans la ceinture d'astéroïdes, certaines orbites sont instables et vides.



L'instabilité est due principalement à Jupiter, avec une amplification dans certaines régions due au phénomène de *résonance*.

Toutes les résonances ne sont pas instables. Exemple, Pluton est en résonance 2:3 avec Neptune.

La dynamique du système solaire

Les points de Lagrange d'un système à deux corps (exemples: Soleil-Terre ; Terre-Lune, etc.) sont des points où le bilan des forces (forces gravitationnelles + force centrifuge) est nul.

- Les points L_1 , L_2 et L_3 sont instables.
- Les points L_4 et L_5 sont stables.

- Système Soleil-Jupiter :
Astéroïdes troyens en L_4 et L_5

- Système Soleil-Terre :
 - Formation de la Lune par collision ?
Le corps (*Théia*) entrant en collision avec la proto-Terre est probablement issu de L_4 ou L_5 .
 - Sonde SOHO en L_1
(hélioseismologie → cours n°2)
 - Satellites Planck et Herschel en L_2
(rayonnement fossile → cours n°11
observation IR → cours n°8 et n°11)

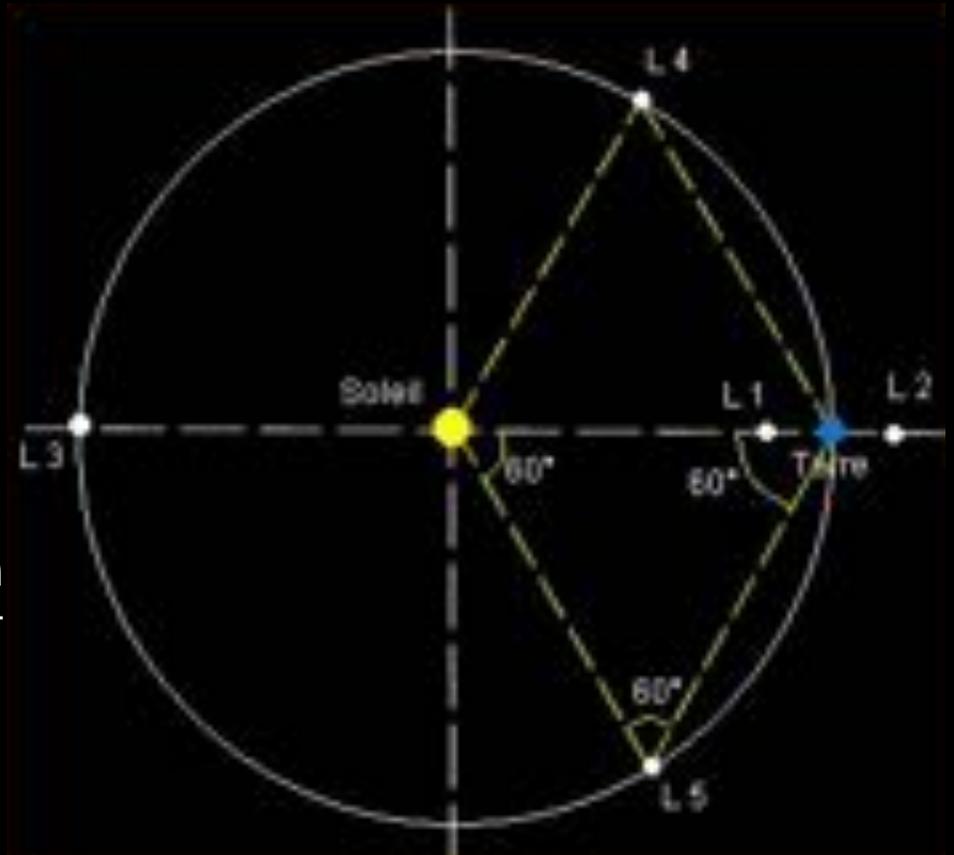
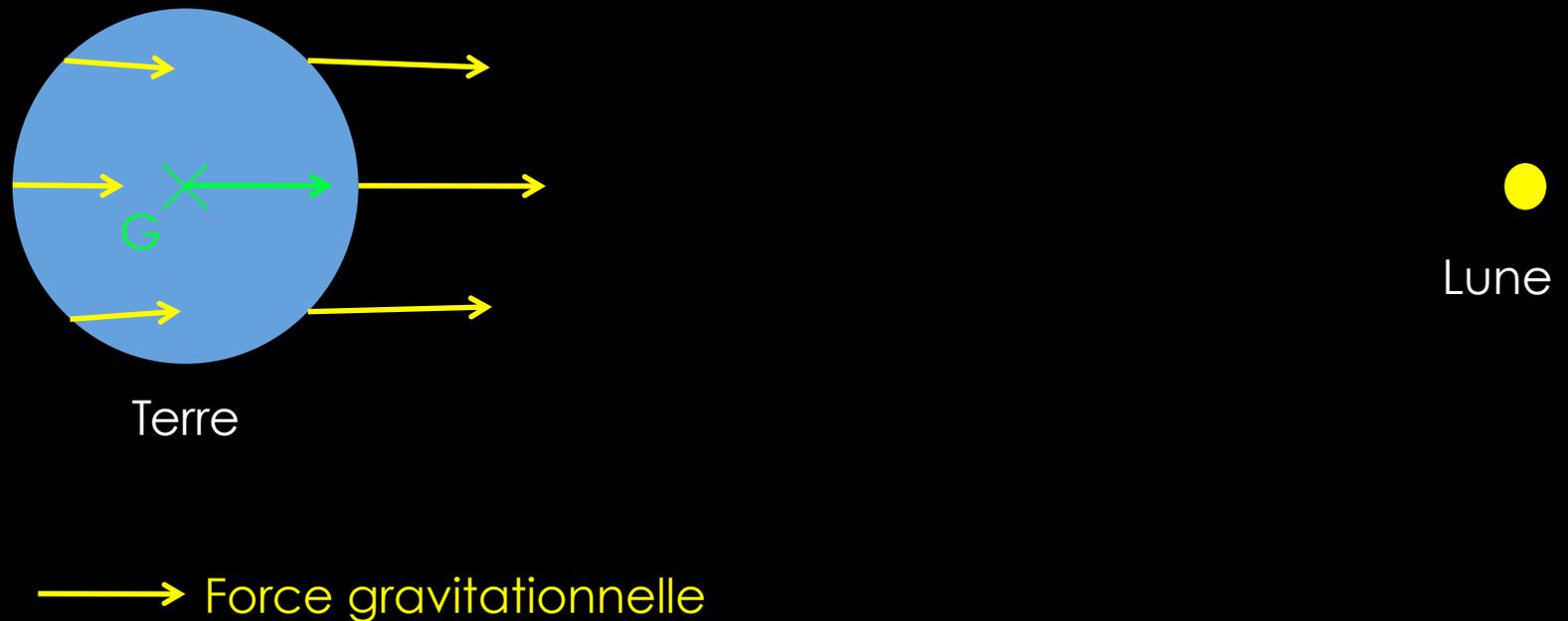


Figure dans un référentiel tournant où la Terre et le Soleil sont fixes.

La dynamique du système solaire

Un autre effet important : l'*effet de marée* : les corps du système solaire ne sont pas des points et les forces gravitationnelles ne sont donc pas les mêmes partout sur l'objet.

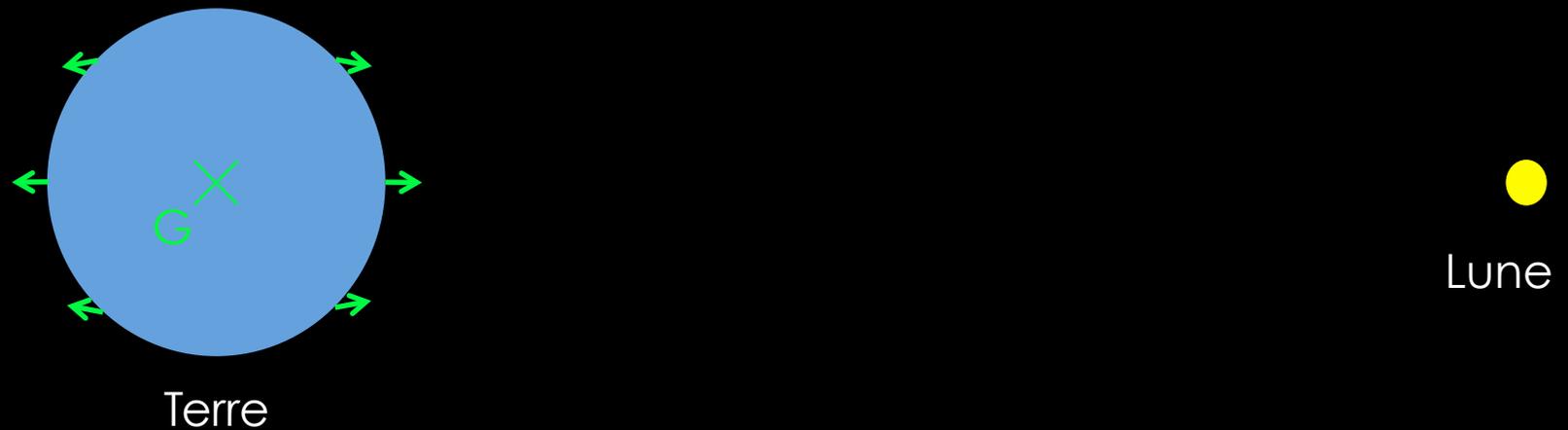
- Exemple : les marées terrestres (système Terre-Lune)



La dynamique du système solaire

Un autre effet important : l'*effet de marée* : les corps du système solaire ne sont pas des points et les forces gravitationnelles ne sont donc pas les mêmes partout sur l'objet.

- Exemple : les marées terrestres (système Terre-Lune)



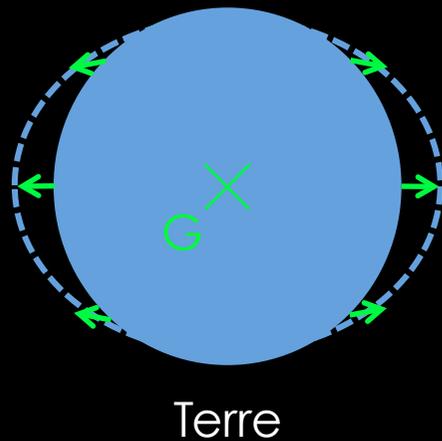
→ Force gravitationnelle – Force gravitationnelle au centre de gravité de la Terre

L'effet de marée est un effet différentiel.

La dynamique du système solaire

Un autre effet important : l'*effet de marée* : les corps du système solaire ne sont pas des points et les forces gravitationnelles ne sont donc pas les mêmes partout sur l'objet.

- Exemple : les marées terrestres (système Terre-Lune)



Lune

- La surface de la Terre est déformée le long de l'axe Terre-Lune :
2 marées par jour
- Effet supplémentaire du Soleil : grandes marées à la nouvelle/pleine Lune
(alignement Terre-Lune-Soleil)

La dynamique du système solaire

Un autre effet important : l'*effet de marée* : les corps du système solaire ne sont pas des points et les forces gravitationnelles ne sont donc pas les mêmes partout sur l'objet.

- La déformation régulière de la Terre à cause des marées : dissipation
- Ceci affecte la rotation de la Terre sur elle-même et autour du Soleil :
 - Il y a 350 millions d'années, l'année durait 400 jours (étude de fossiles de coraux et bivalves)
 - La durée du jour s'allonge lentement (étude des éclipses sur 2000 ans ; mesure précise avec les horloges atomiques : ajoute de temps en temps d'une seconde intercalaire comme en 2005)
- Le même effet affecte la Lune, avec une intensité plus grande :
 - La Lune est synchronisée avec la Terre :
période orbitale = période de rotation = 27,3 jours
 - La Lune présente toujours la même face à la Terre
- Conséquence pour le système Terre-Lune : la distance augmente lentement.

La dynamique du système solaire

Il y a beaucoup d'exemples de rotations synchrones dans le système solaire :

- La Lune autour de la Terre
- Pluton et Charon (les deux corps se montrent réciproquement la même face)
- etc.
- Mercure est une exception, au lieu d'être en rotation synchrone autour du Soleil, elle s'est stabilisée en *résonance spin-orbite* 3:2 :

lorsque Mercure tourne 2 fois autour du Soleil, elle tourne 3 fois sur elle-même.

-Période de rotation sur elle-même (spin) = 58,6 jours

-Période de rotation autour du Soleil (orbite) = 88,0 jours = $1,5 \times 58,6$ jours

Durée du jour solaire sur Mercure = $2 \times 88,0 = 176$ jours !

(sur Mercure, un « jour » dure deux « ans » ...)

Ceci explique les fortes variations de température jour/nuit : 725 K / 100 K

La dynamique du système solaire

Les effets de marée expliquent aussi la diversité des satellites de Jupiter.

- Les 4 satellites galiléens n'ont pas des masses très différentes.
- Pourtant ils montrent une grande diversité à cause des forces de marée.

Distance à Jupiter →

← Intensité des forces de marées dues à Jupiter



Io

[doit ses couleurs à un intense volcanisme]



Europe

[sa surface glacée est craquelée]



Ganymède

[sa surface est jeune, indiquant une activité géologique malgré sa taille]



Callisto

[sa surface est très âgée]

Stabilité à long terme du système solaire

Poincaré a montré que les systèmes gravitationnels à N corps pouvaient être chaotiques : la prévision de l'évolution dynamique du système solaire sur plus de 100 millions d'années est très difficile.

- Des techniques modernes, combinant des outils analytiques puissants et de longs calculs sur ordinateur, permettent d'étudier certains aspects de la dynamique du système solaire sur de plus longues durées.
- L'orbite de Pluton est chaotique sur une échelle de 20 millions d'années.
- Certaines orbites d'astéroïdes peuvent soudain devenir instables et croiser par exemple l'orbite de la terre.
- Les variations de l'axe de rotation de la terre seraient chaotiques sans la présence stabilisatrice de la Lune.
- Les travaux récents de Jacques Laskar à l'IMCCE ont montré de manière statistique que sur une échelle de 5 milliards d'années, dans 99% des cas le système solaire restait stable, et dans 1% des cas devenait instable avec des collisions multiples... Les conditions initiales diffèrent très peu (quelques mètres sur la position initiale des planètes).

Résumé du cours 4

Pendant longtemps, l'astronomie s'est limitée essentiellement à l'observation du système solaire, les étoiles restant des points sur une sphère céleste à l'infini. Malgré son ancienneté, l'étude du système solaire connaît actuellement une évolution très rapide grâce à l'exploration spatiale.

Depuis l'épopée des sondes Voyager 1 & 2 :

- Toutes les planètes ont été visitées, certaines avec une exploration très en détail de leur surface (Mars).
- Les astéroïdes sont en cours d'exploration (mission NASA Dawn vers Vesta et Cérès)
- Les comètes sont en cours d'exploration (en particulier avec la mission ESA Rosetta vers Tchourioumov-Guerassimenko)
- Les planètes naines sont en cours d'exploration (missions NASA Dawn vers Cérès et New Horizons vers Pluton)

Quant aux sondes Voyager, elles atteignent actuellement les limites de l'héliosphère...

Notre vision du système solaire s'en trouve fortement changée, conduisant à redéfinir certaines notions « élémentaires » comme celle de planète, et à préciser le scénario de formation.

Depuis 1995, une autre révolution a commencé : la quête des exoplanètes (→ cours n°5). Ces découvertes interrogent le scénario de formation et permettent d'apporter un regard nouveau à la question de la vie dans l'Univers.

Prochains cours



Montage ESO de photographies prises au Chili (La Silla & Paranal) et aux Canaries (La Palma)

Prochains cours

Cours n°5 – A la recherche d'autres mondes : les exoplanètes (lundi 21 nov.)

Cours n°6 – Vie et mort des étoiles (lundi 5 déc.) [pas de cours lundi 28 nov.]



Prochains cours

Construire la vision moderne de l'Univers

1. Introduction: qu'est ce que l'astrophysique
 2. Notre étoile, le Soleil
 3. De la lunette de Galilée
aux télescopes spatiaux :
l'observation en astronomie
 4. Panorama du système solaire
 5. A la recherche d'autres mondes,
les exoplanètes
 6. Vie et mort des étoiles
 7. Explosions et monstres cosmiques :
supernovae, étoiles à neutrons, trous noirs
 8. Les nuages interstellaires
et la formation des étoiles
 9. La Voie Lactée et les galaxies proches
 10. L'Univers lointain
 11. La cosmologie moderne :
un Univers en évolution
 12. Conclusion :
les défis pour l'astrophysique contemporaine
- 

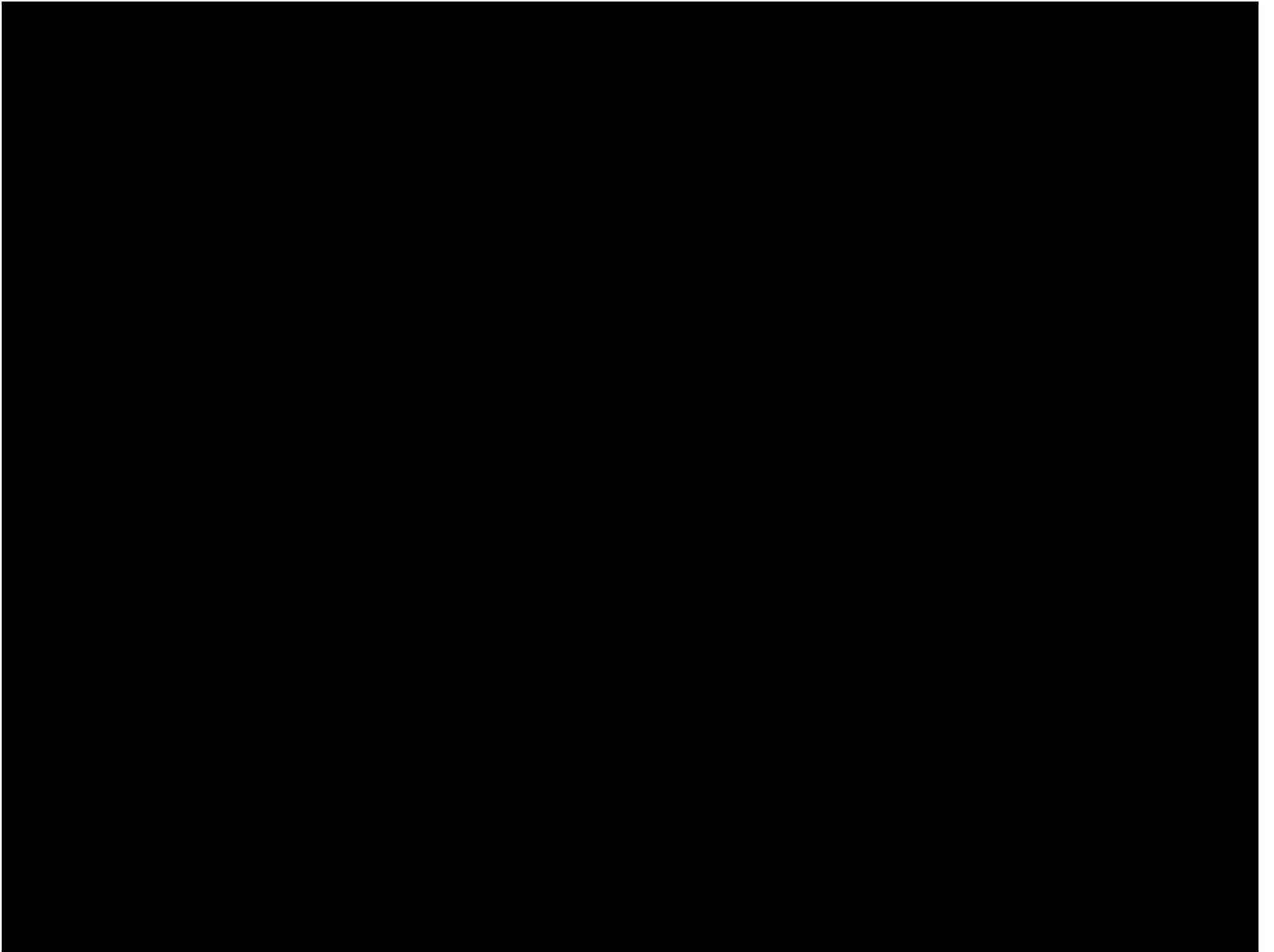
Page web du cours

Les transparents + quelques liens + une courte bibliographie

http://www.iap.fr/users/daigne/FD_IAP/UIA2011.html

Courriels :

Patrick Boissé :	boisse@iap.fr
Frédéric Daigne :	daigne@iap.fr



Quelques suppléments

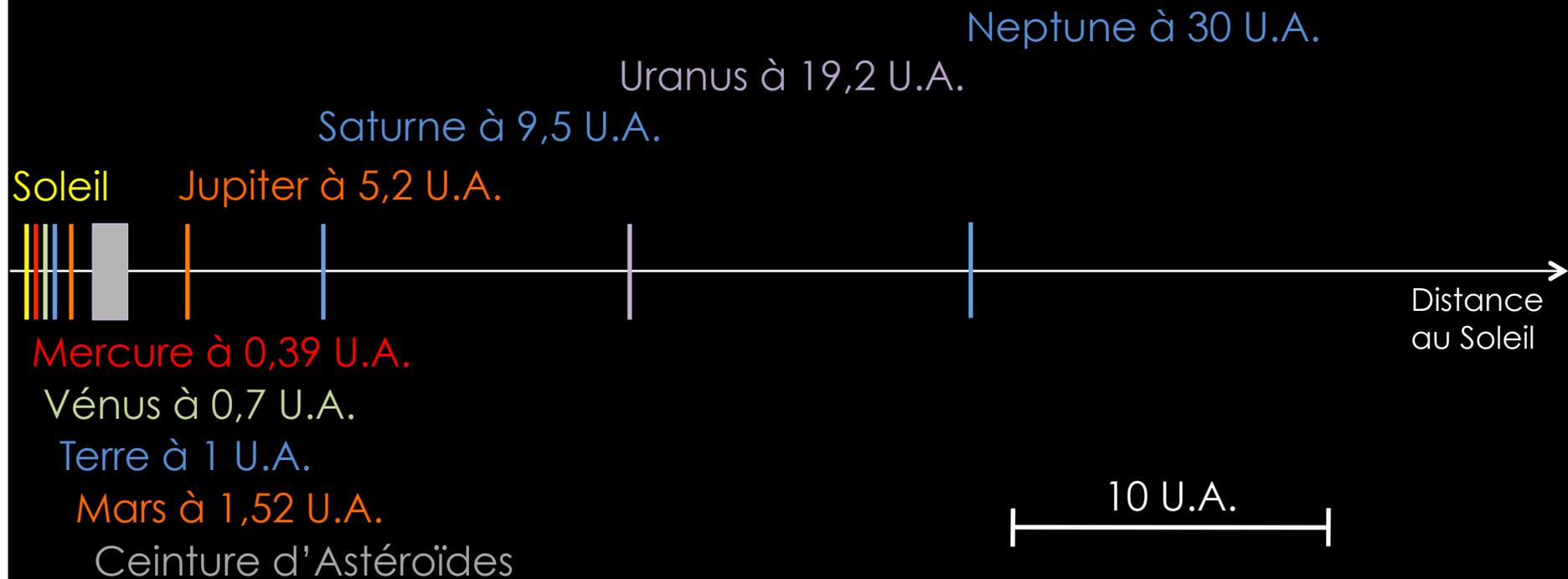
Peut-on faire un dessin du système solaire qui respecte les proportions ?

Non, il faut choisir entre respecter la taille ou la distance...



Peut-on faire un dessin du système solaire qui respecte les proportions ?

Non, il faut choisir entre respecter la taille ou la distance...

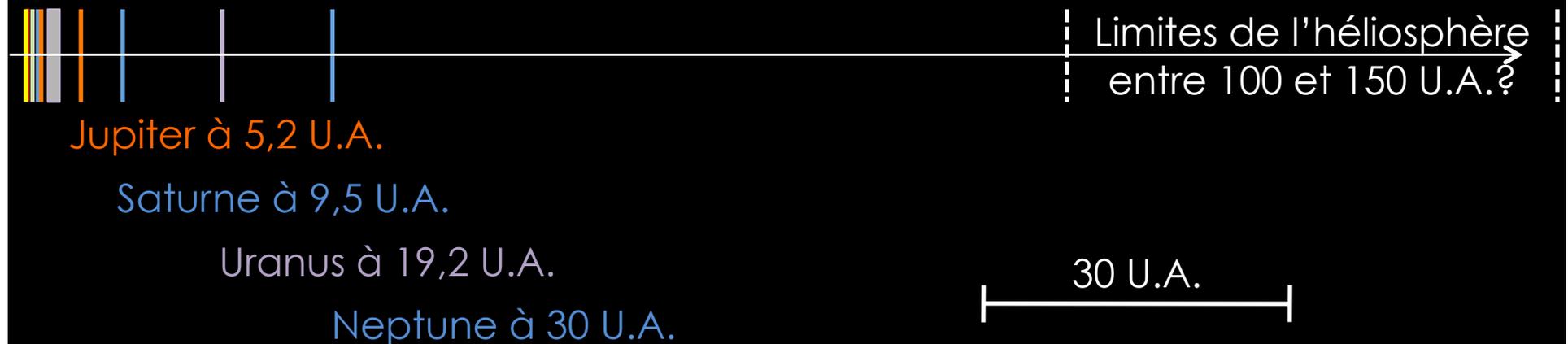


Ici les distances sont à l'échelle mais il est impossible de représenter la taille des planètes. Même le Soleil serait un point de rayon 2% de mm...

Peut-on faire un dessin du système solaire qui respecte les proportions ?

Non, il faut choisir entre respecter la taille ou la distance...

Soleil

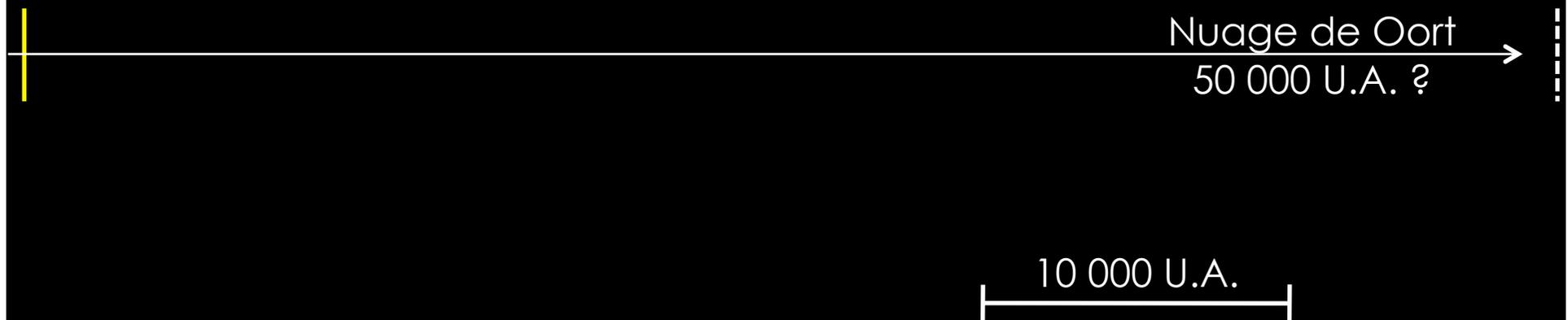


Si on veut ajouter les limites de l'héliosphère, il devient difficile de voir les planètes telluriques...

Peut-on faire un dessin du système solaire qui respecte les proportions ?

Non, il faut choisir entre respecter la taille ou la distance...

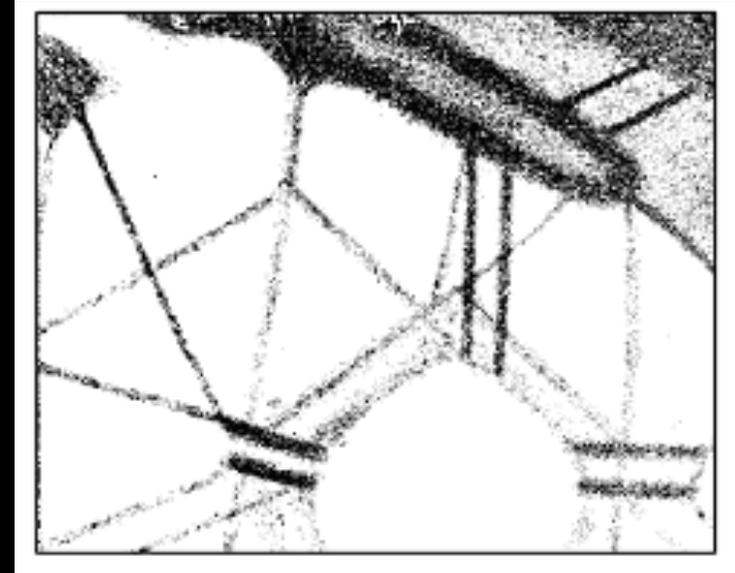
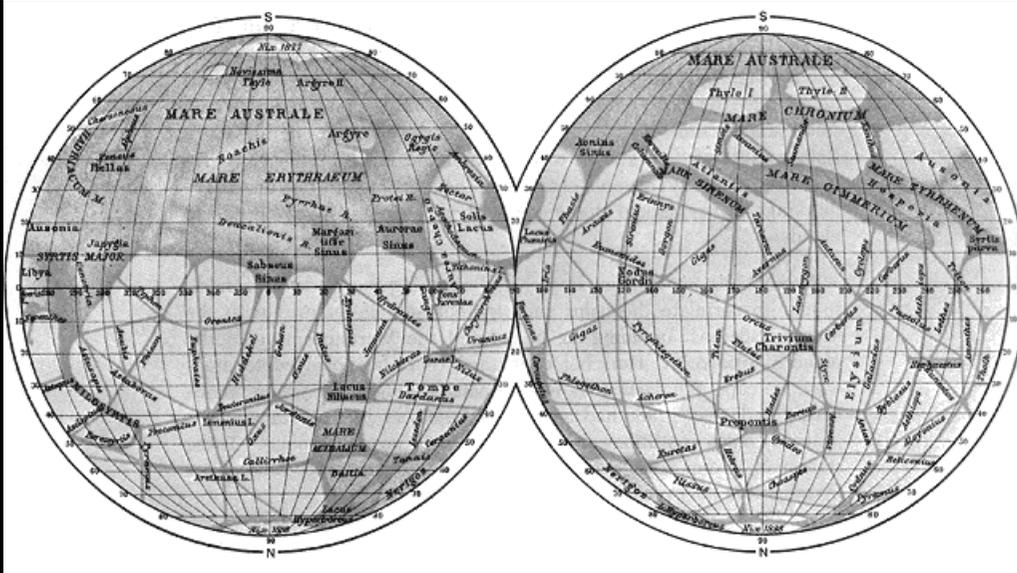
Soleil



Si on veut ajouter le nuage de Oort (réservoir des comètes à longue période), on ne voit plus rien...

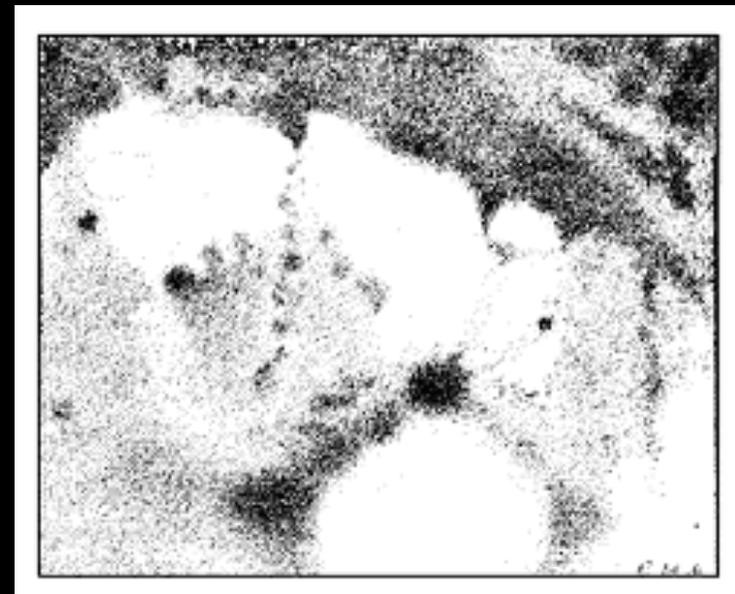
Les « canaux » sur Mars

Des « canaux » ont été identifiés sur Mars par Schiaparelli en 1877.



Dessin de Schiaparelli

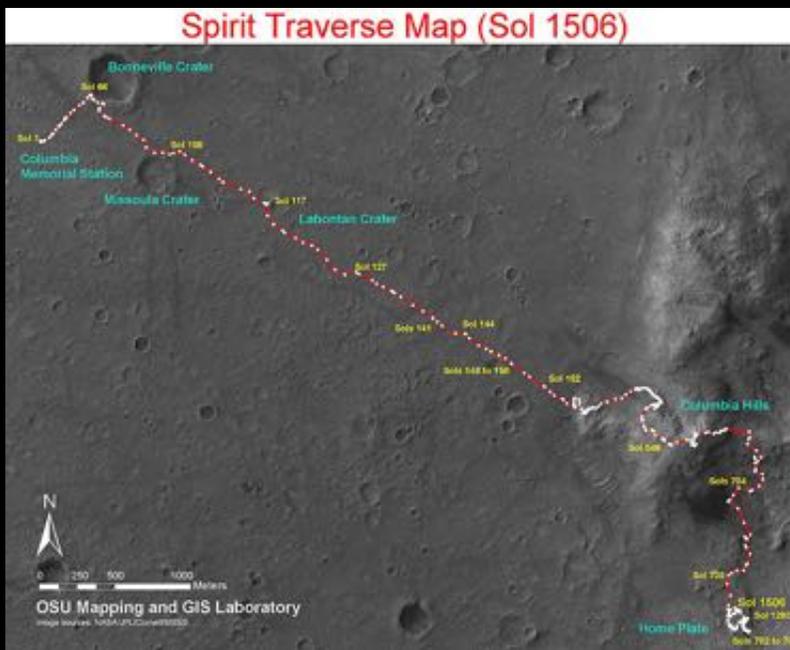
Avec la grande lunette de Meudon, Antoniadi montre en 1909 que le canaux n'existent pas.



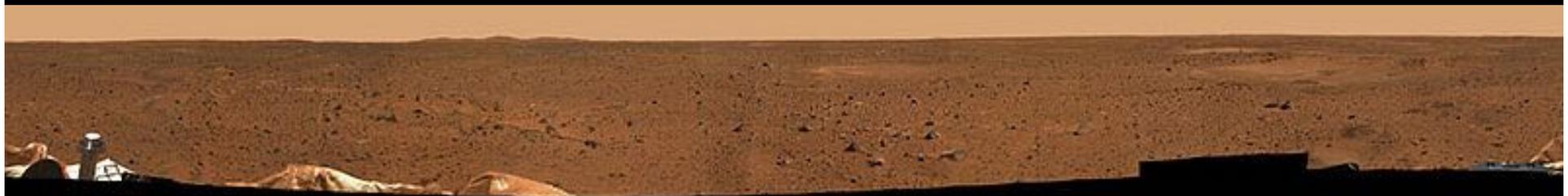
Dessin de Antoniadi

Les rovers sur Mars

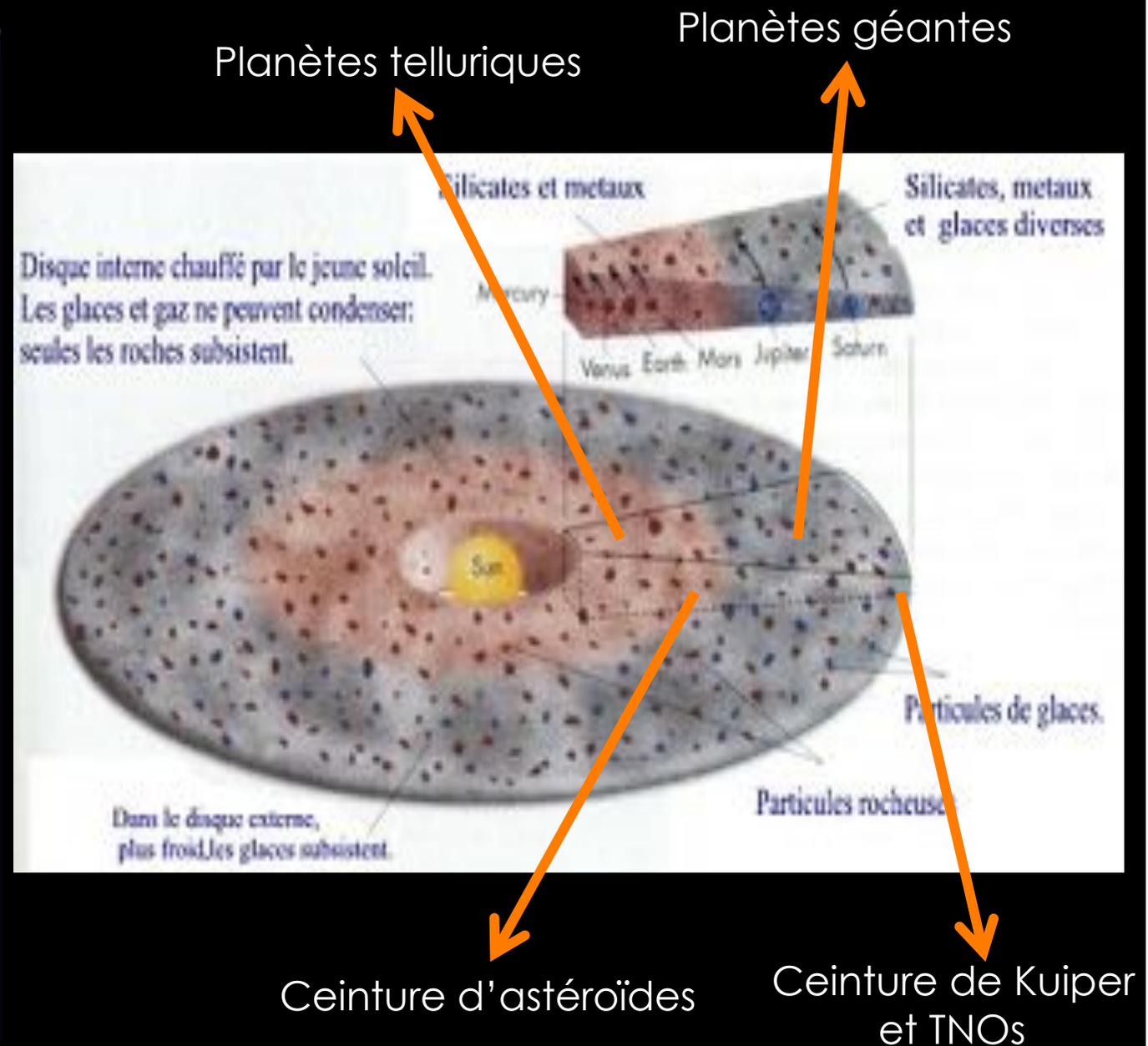
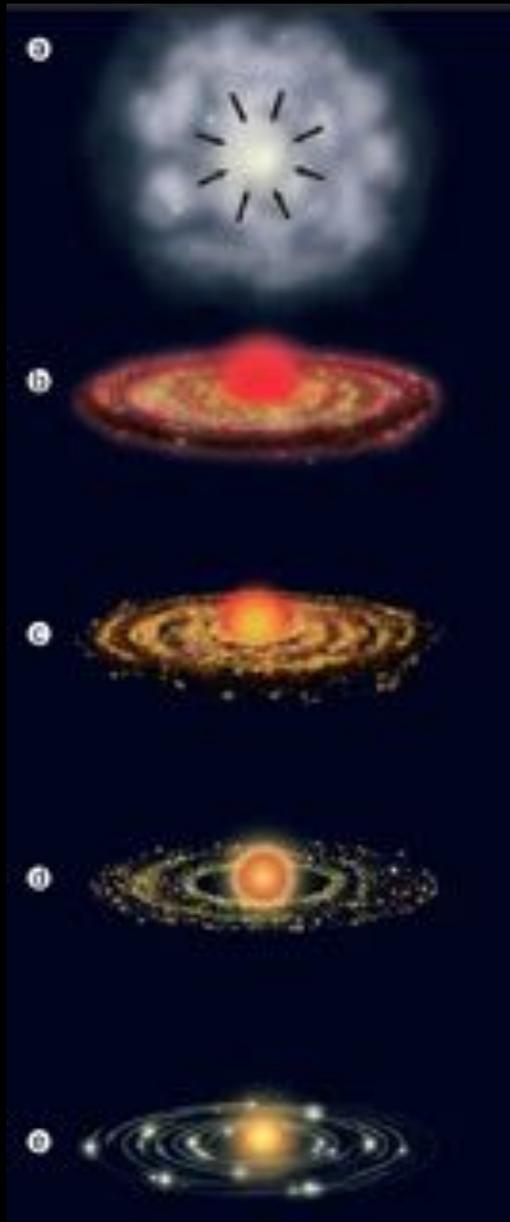
Le rover Opportunity s'est posé en 2004 et explore encore.
Le rover Spirit posé en 2006 et enlisé depuis 2009.



90 sols de Spirit en 90 secondes...



La formation du système solaire



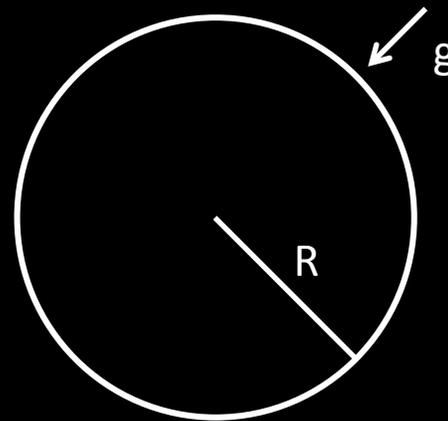
Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Tout est lié à la taille maximum d'une montagne...

Si on considère des corps rocheux de densité comparable :

- La masse augmente comme R^3 (R taille du corps)
- Le champ de pesanteur $g = GM/R^2$ à la surface est proportionnel à R

Mars a une taille de 50 % celle de la Terre : g est deux fois plus faible.

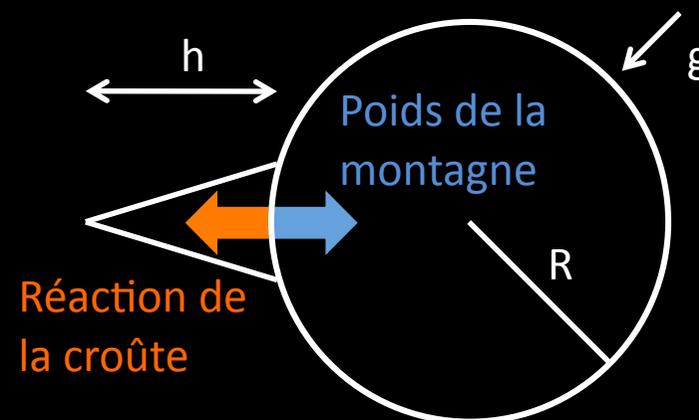


Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Tout est lié à la taille maximum d'une montagne...

Sur un corps de rayon R , une montagne rocheuse de taille h :

- a une surface S au sol proportionnelle à h^2
- a un volume proportionnel à h^3 et donc une masse m proportionnelle à h^3
- a un poids $m g$ proportionnel à $h^3 R$
- exerce une force par unité de surface sur la croûte de la planète :
 $P = m g / S$ proportionnelle à $h \times R$

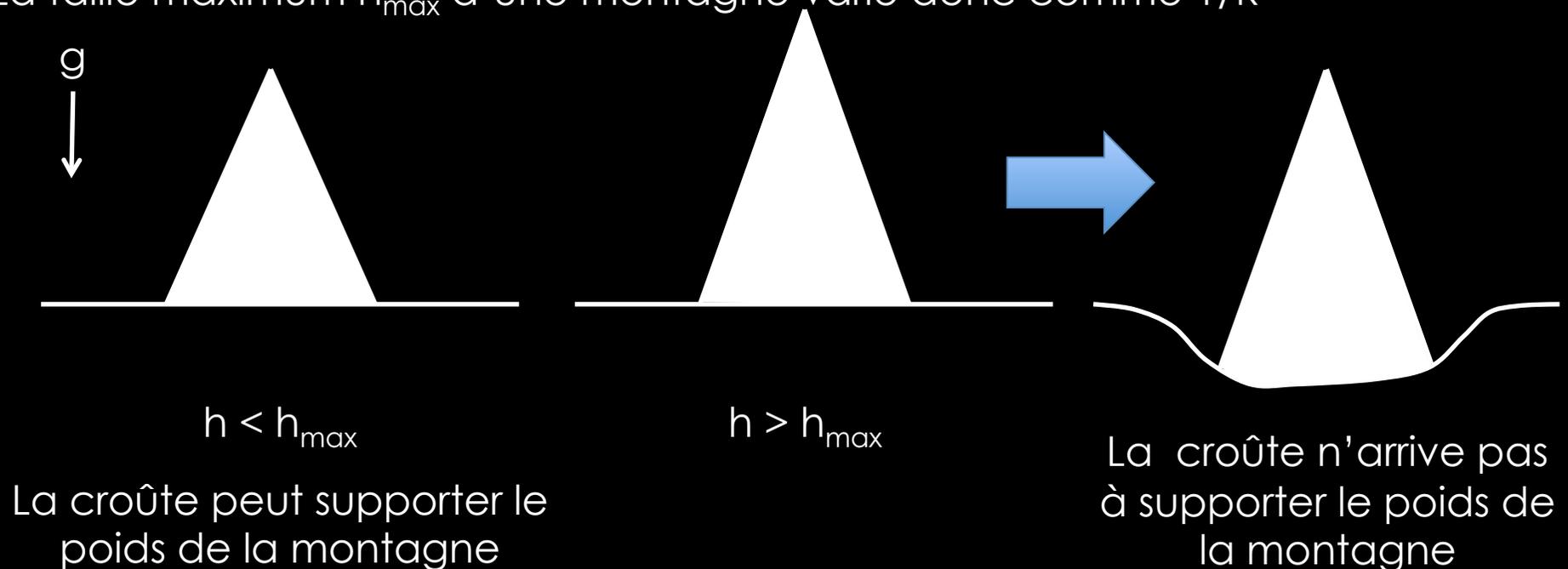


Pourquoi les planètes sont rondes et les petits corps cabossés ?

Tout est lié à la taille maximum d'une montagne...

Pour une montagne de hauteur h sur un corps de rayon R :

- La montagne exerce sur la roche une pression P proportionnelle à $h \times R$
- La roche de la croûte peut supporter au maximum une pression P_{\max}
- La taille maximum h_{\max} d'une montagne correspond au cas $P = P_{\max}$
- La taille maximum h_{\max} d'une montagne varie donc comme $1/R$



Formation de la Lune

Plusieurs modèles :

- Fission du manteau terrestre par une Terre liquide en rotation rapide (2h)

Problèmes :

- Plusieurs objections dynamiques
 - Des différences de composition entre le manteau terrestre et la lune
 - Capture de la Lune par la Terre
- Principal problème :
- Les études dynamiques montrent que ce type de capture est très rare.
- etc ...

Le modèle qui semble le plus probable :

- Collision entre la proto-Terre et une corps de la taille de Mars (*Theia*)
- Les collisions dans le système solaire jeune sont beaucoup plus fréquentes que les captures
 - L'orbite actuelle de la Lune est compatible avec ce scénario
 - La composition proche, mais non identique, de la Lune comparée à la Terre est aussi en accord avec le scénario.

Origine de l'eau sur Terre

Plusieurs hypothèses :

- Accrétion en fin de formation de chondrites carbonées contenant de l'eau. (chondrites = une certaine classe de météorites)
- Apport par des comètes après la phase d'accrétion. (comète : 80% de glace)
- Dégazage lors d'une période primitive de volcanisme intensif (le magma contient de l'eau)

Il y a en fait sans doute une combinaison d'au moins deux de ces causes.

En effet, on constate par exemple que la proportion de deutérium dans l'eau terrestre est différente de celle des comètes.

Même type de mécanismes sur Vénus ou Mars mais évolution climatique différente.

Impact Terre-Astéroïde

Les effets dépendent de la taille de l'astéroïde :

- Taille < 10 m
 - Fréquence : ~ 200 / an
 - Désintégration dans l'atmosphère : étoile filante
- Taille de 10 à 100 m
 - Fréquence : ~ 1 / siècle
 - Exemples : Meteor Crater, Arizona, il y a 50 000 ans ;
Toungouska, Sibérie, 1908.
 - Effet : sur une ville (peu probable) : destruction ; dans l'eau = raz de marée
- Taille de 100 m à 1 km
 - Fréquence : ~1 / (5000 à 30000 ans)
 - On estime que cela provoquerait des destructions majeures
(5 à 100 millions de morts)
- Taille > 5 km
 - Fréquence : ~ 1 / 100 millions d'années
 - Catastrophe globale : hiver nucléaire ; disparition de l'humanité ...
(extinction des dinosaures en partie due à un astéroïde de ~ 10 km il y a 65 millions d'années = cratère de Chicxulub au Mexique).