

Exploration du système solaire : Des planètes aux exoplanètes



Thérèse Encrenaz,
LESIA, Observatoire de Paris
Cercle Pierre de Jumièges, 15 Novembre 2011

De la Lune à Neptune: Cinquante ans d'exploration spatiale

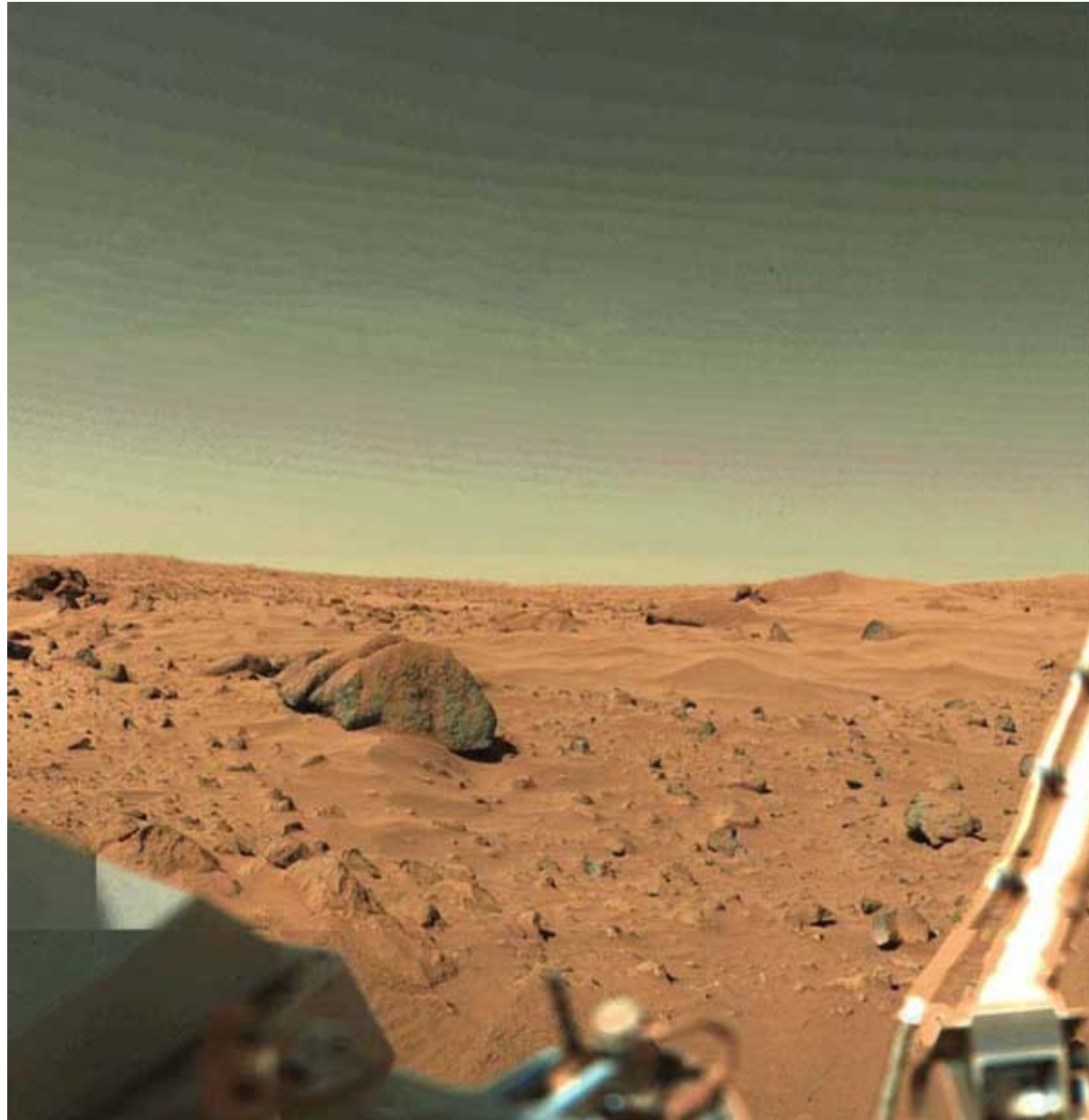
- Années 1960: L'homme sur la Lune (**Apollo, Lunakhod**)
- Années 1970:
 - La difficile conquête de Mars (**Mariner 9, Viking**)
 - Première exploration des planètes géantes (**Pioneer, Voyager**)
- Années 1980 (1978 – 1992):
 - L'exploration de Vénus (**Pioneer Venus, Venera, Magellan**)
 - Les survols de la comète de Halley (**Giotto, Vega**)
- Années 1990 & 2000:
 - **Galileo** @ Jupiter, **Cassini** @ Saturne et Titan
 - Retour à Mars (orbiters, landers & rovers)

Les missions Apollo

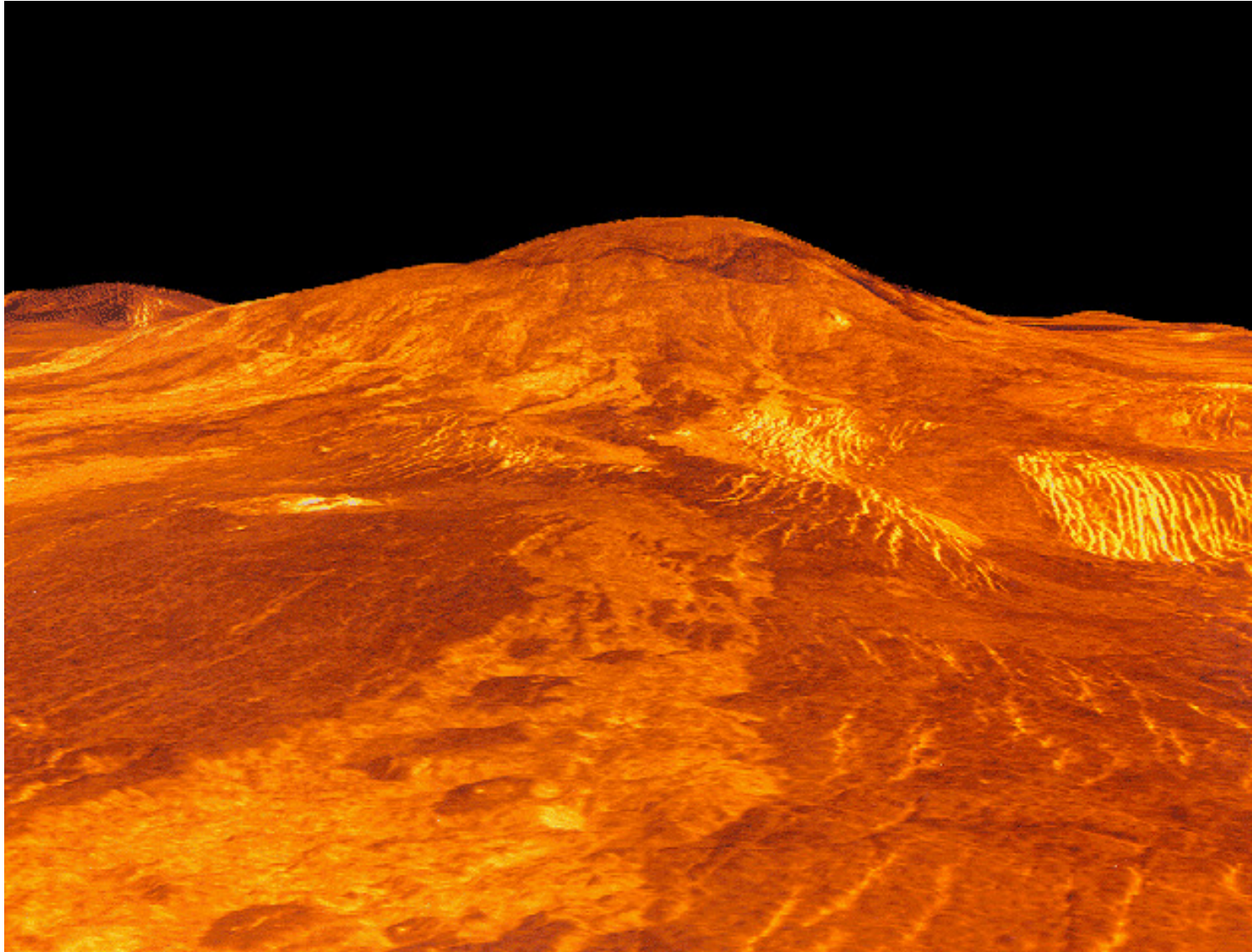


Collecte d'échantillons lunaires: analyse du vent solaire,
datation du système solaire

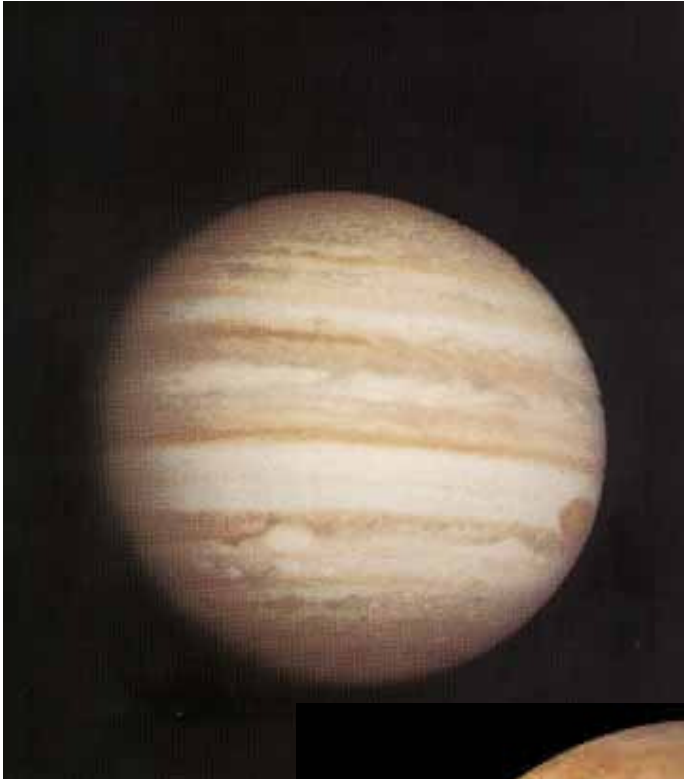
Le sol de Mars vu par Viking



Le sol de Venus
(images radar Magellan, 1992)



L'exploration spatiale de Jupiter

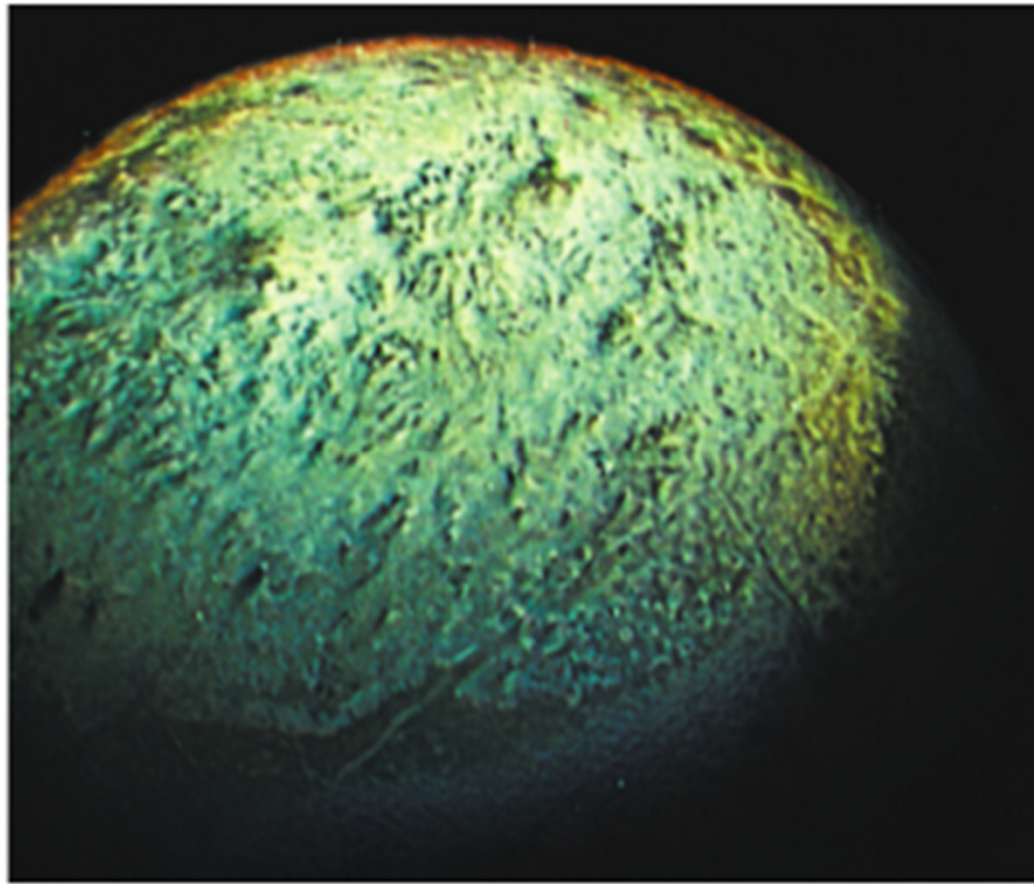


< Pioneer 10, 1976
Voyager 1, 1979

Galileo 1995
Cassini flyby
2000



Une découverte majeure des années 1990 par les observations au sol: la ceinture de Kuiper



Triton (probablement un TNO capturé par Neptune)
vu par Voyager 2 (1989)

Le système solaire: un bref inventaire

- Des **planètes**: quatre telluriques, quatre géantes et leur système (**anneaux, satellites**)
 - Entre telluriques et géantes: une ceinture d'**astéroïdes**
 - Pluton: une ancienne planète débaptisée... aujourd'hui un **objet trans-neptunien** de la **ceinture de Kuiper**
 - Des **comètes**...
- ...Et depuis 1995**: une multitude de **systèmes planétaires extrasolaires** (> 500 systèmes, près de 700 exoplanètes)

Comment le système solaire est-il né?

Les observations fondamentales

- Des orbites quasi-coplanaires, circulaires et concentriques, qui tournent dans le sens direct, celui de la rotation du Soleil

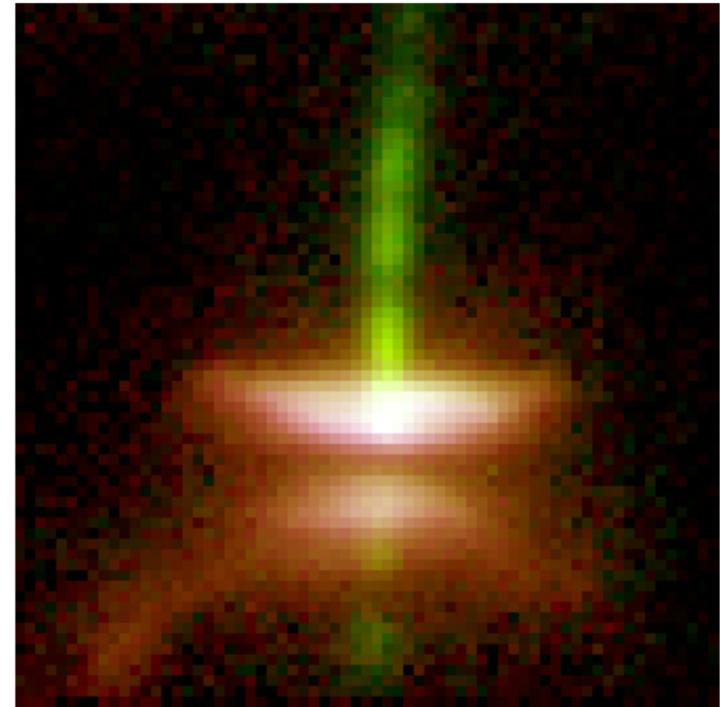


- Suggèrent fortement la formation des planètes au sein d'un disque, produit de l'effondrement gravitationnel d'une nébuleuse en rotation (Hypothèse de Kant et Laplace)

Un scénario confirmé par l'observation d'étoiles voisines

HH30

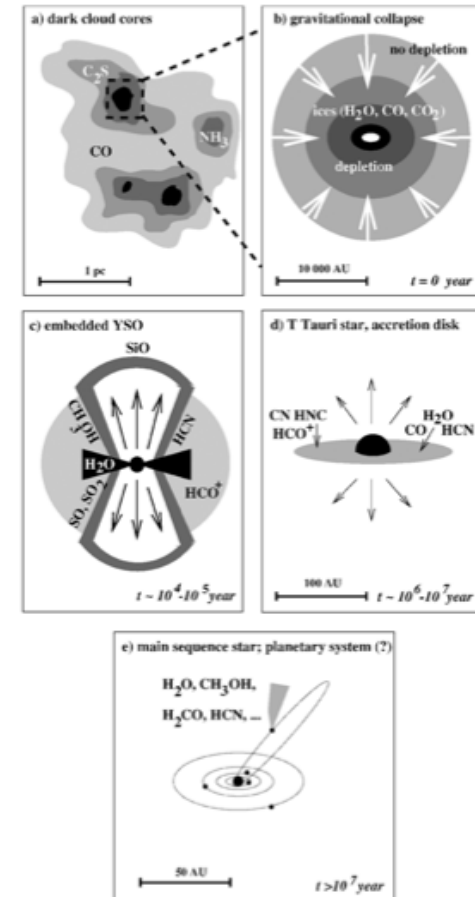
- Observation au sol et dans l'espace d'étoiles jeunes ou en formation
- Mise en évidence de disques et d'émission de jets bipolaires
- Observation de phases d'activité intense (phase T-Tauri) chez les étoiles jeunes

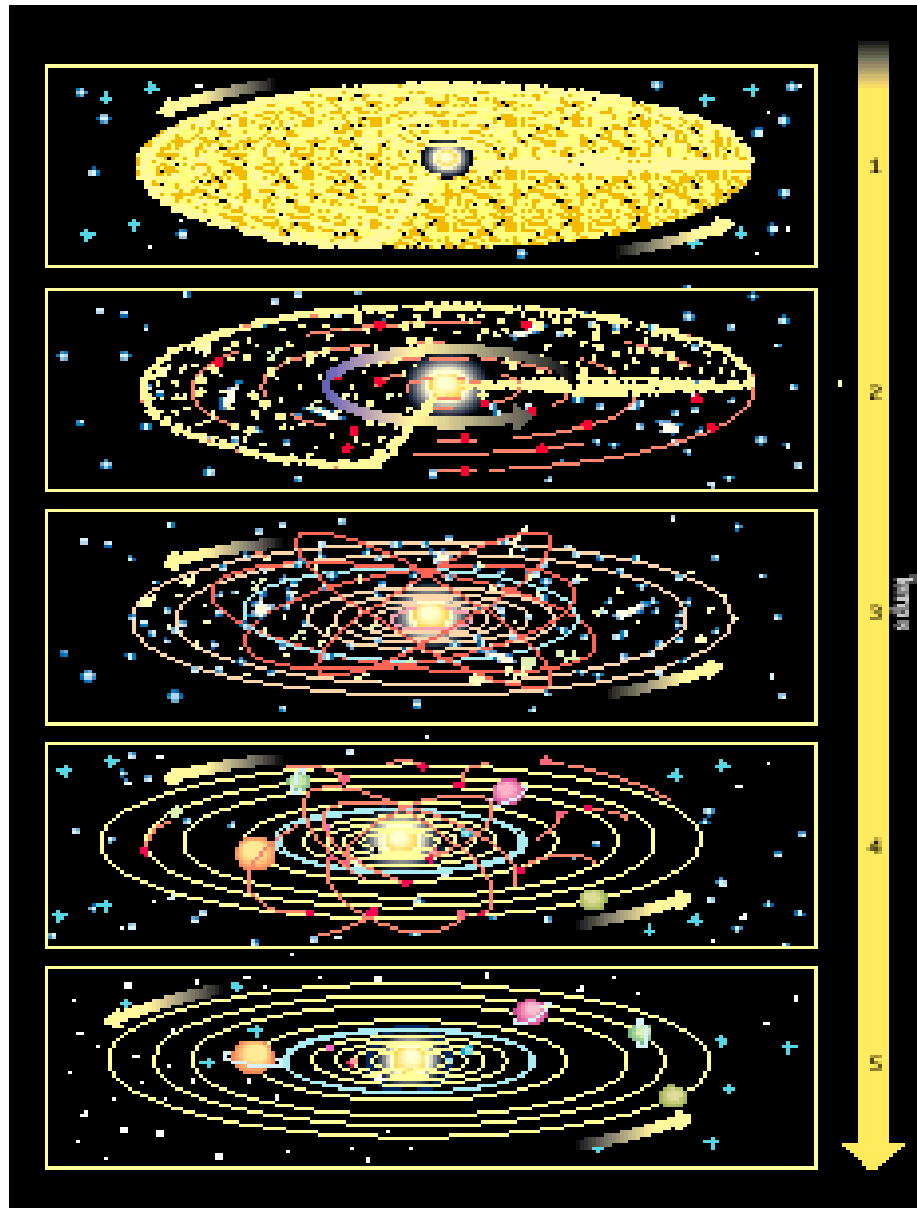


->La formation stellaire suite à l'effondrement d'un disque semble un phénomène courant dans l'Univers

Les grandes lignes du modèle d'effondrement

- **Contraction** d'un nuage protosolaire en rotation rapide
- **Effondrement** en un disque perpendiculaire à l'axe de rotation
- Apparition d'**inhomogénéités** au sein du disque turbulent
- **Agrégation** de particules solides
- Croissance des agrégats par le jeu des **collisions**
- Croissance des plus gros corps par **gravité**
- **Balayage** des débris par le vent solaire intense (phase T-Tauri)





La formation des planètes:

Agrégation de
particules solides

+

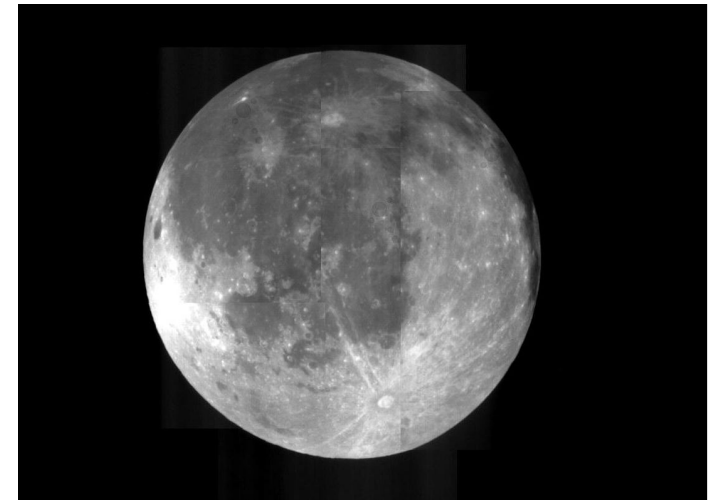
Collisions
Multiples

+

Croissance par
gravité

Comment connaît-on l'âge du système solaire ?

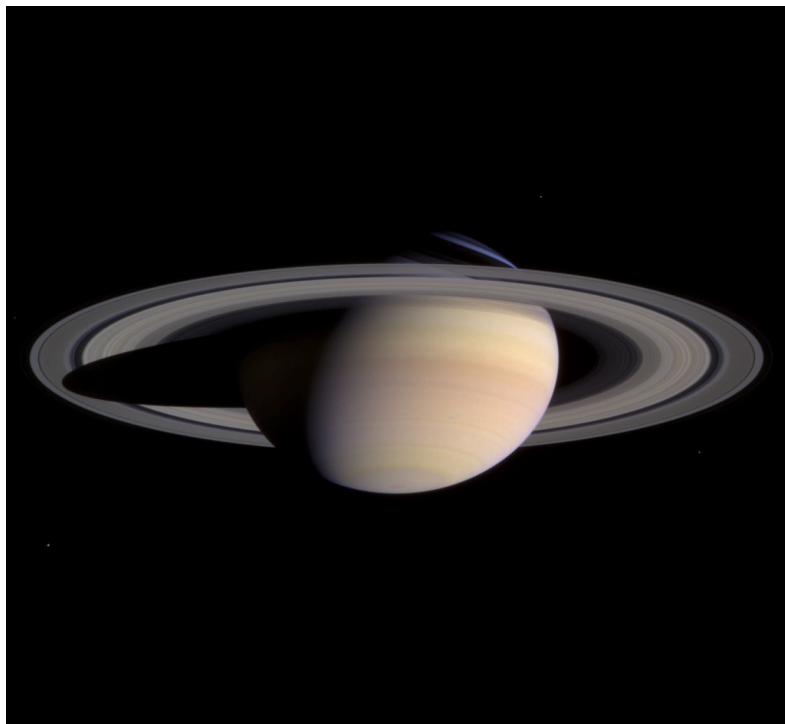
- Mesure des abondances isotopiques des éléments radioactifs dans les météorites et les échantillons lunaires
- Utilisation des éléments radioactifs de longue période :
 - $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$ (1,7 Ga), $^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$ (71 Ga), $^{238}\text{U} \rightarrow ^{238}\text{Pb}$ (66 Ga)
- -> L'âge du système solaire est 4.56 milliards d'années (âge des corps parents les plus anciens des météorites)
- Une autre méthode de datation:
le comptage des cratères sur les objets sans atmosphère
 - Lune, astéroïdes...



Planètes telluriques et planètes géantes

- Planètes telluriques

- Forte densité: 3-5 g/cm³
- Atmosphère peu massive
- Peu ou pas de satellites



- Planètes géantes

- Grand diamètre, faible densité (0.7-1.7 g/cm³)
- Atmosphère massive, dominée par H₂ et He
- Anneaux et nombreux satellites réguliers

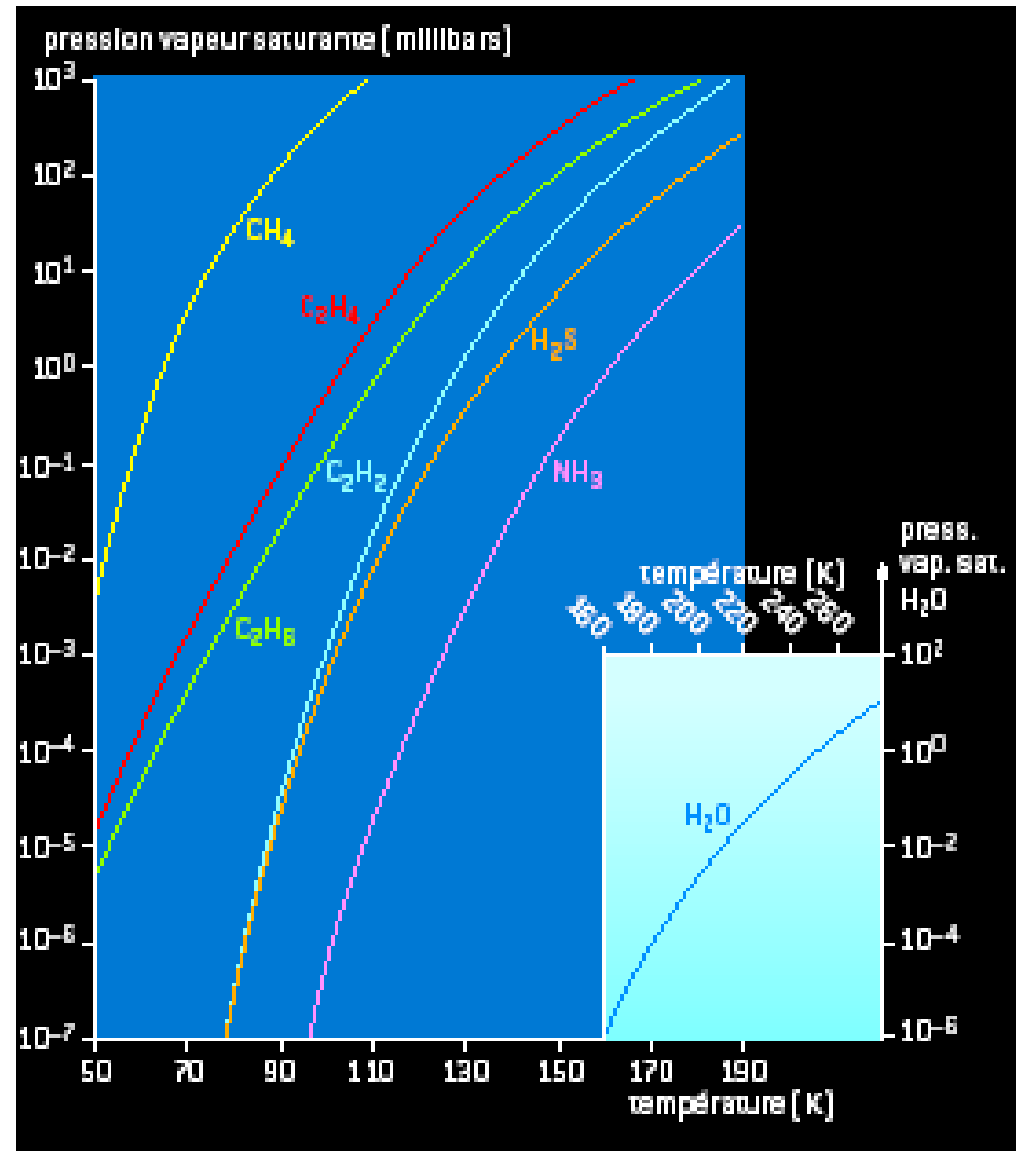
Pourquoi deux classes de planètes?

- Dans le disque, T décroît quand la distance au Soleil augmente
- Les éléments les plus abondants sont H, He, C, N, O, les éléments les plus lourds sont les moins abondants
- Près du Soleil (<300 K environ) seuls les silicates et les métaux sont sous forme solide -> faible masse solide disponible -> **planètes telluriques**
- Loin du Soleil, les éléments H₂O, CH₄, NH₃... sont sous forme de glace -> disponibles pour former de gros noyaux -> effondrement du gaz protosolaire environnant (H, He) dès que $M_N > 10-15 M_T$ -
> **planètes géantes**
- **Entre telluriques et géantes, la condensation de l'eau marque la ligne des glaces**

Courbes de saturation des glaces

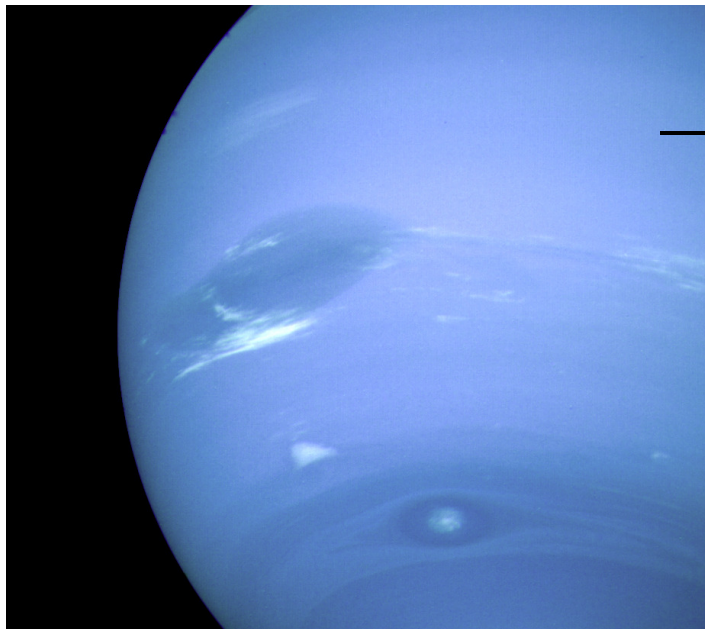
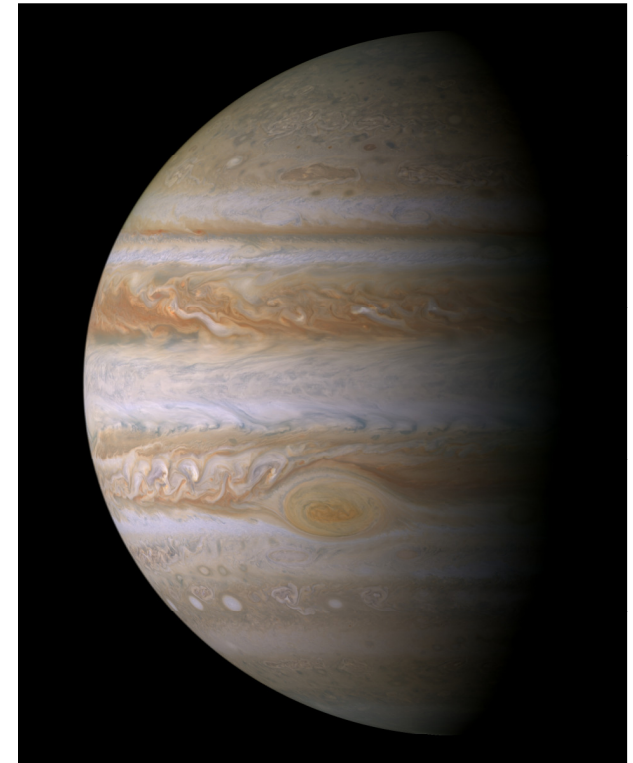
Un constituant majeur: l'eau

L'eau est la première glace à condenser dans le disque quand la température décroît



Pourquoi deux classes de planètes géantes?

- **Jupiter et Saturne: (5 - 10 UA)**
 - Grande masse disponible (juste au-delà de la ligne des glaces) -> 100-300 M_T
 - Croissance rapide (quelques Ma)
 - Effondrement d'une grande masse de gaz -> géantes gazeuses



Uranus et Neptune: (> 10 UA)

- Moins de matière dans le disque
 - > croissance plus lente
- Accrétion du noyau de 10 M_T après le balayage du gaz par le vent solaire -> 14 - 17 M_T
 - > Moins de gaz disponible pour l'accrétion-> géantes glacées

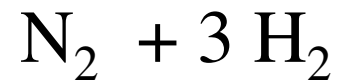
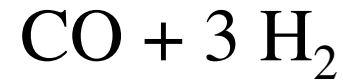
Comment expliquer la composition atmosphérique des planètes ?

A l'équilibre thermochimique :



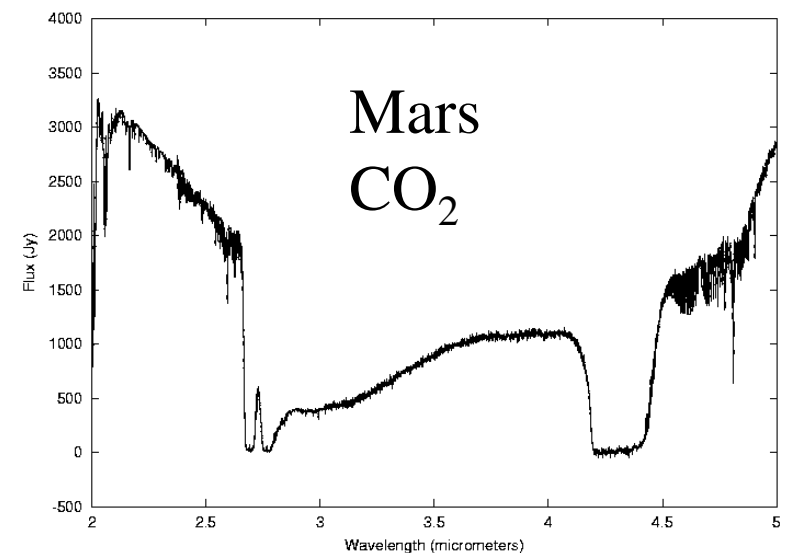
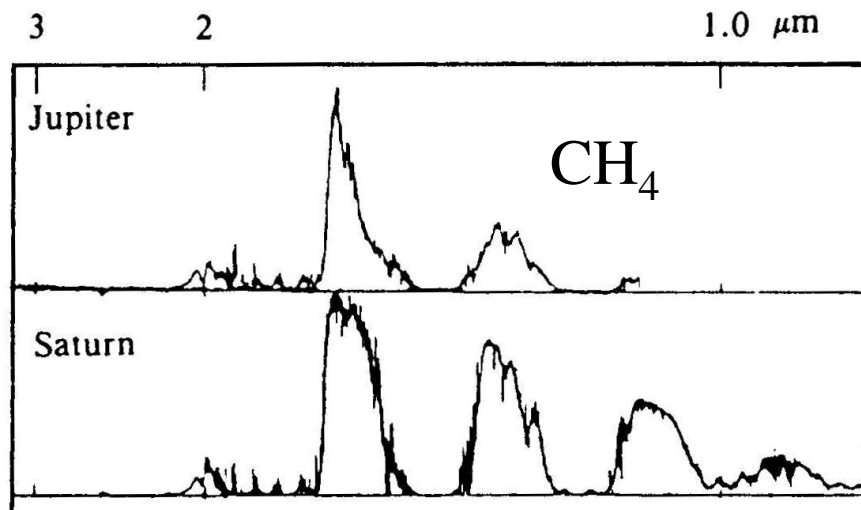
(basse température)

-> Planètes géantes:



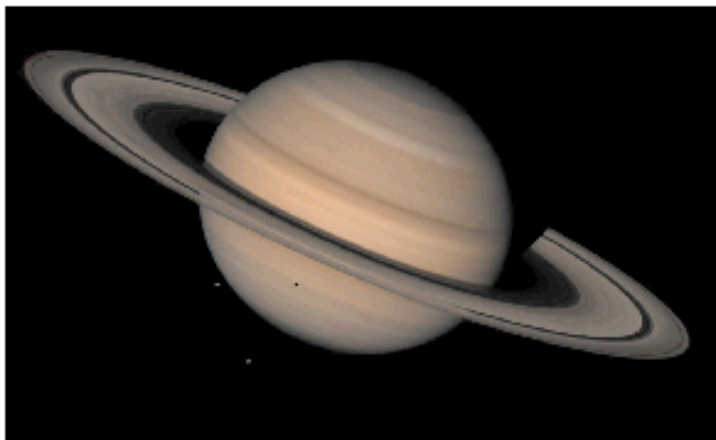
(haute température)

-> Plan. telluriques:

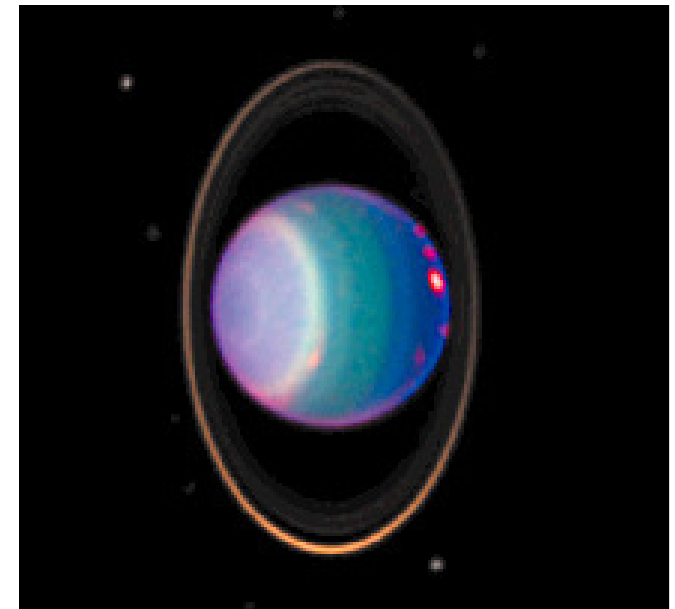


Les planètes géantes: pourquoi des satellites réguliers et un système d'anneaux?

- Après la formation du noyau initial: effondrement gravitationnel de la nébuleuse environnante
- Formation d'un disque équatorial -> formation de satellites au sein du disque (« mini-système solaire ») -> **nombreux satellites réguliers**
- A proximité de la planète: destruction des satellites par effets de marée

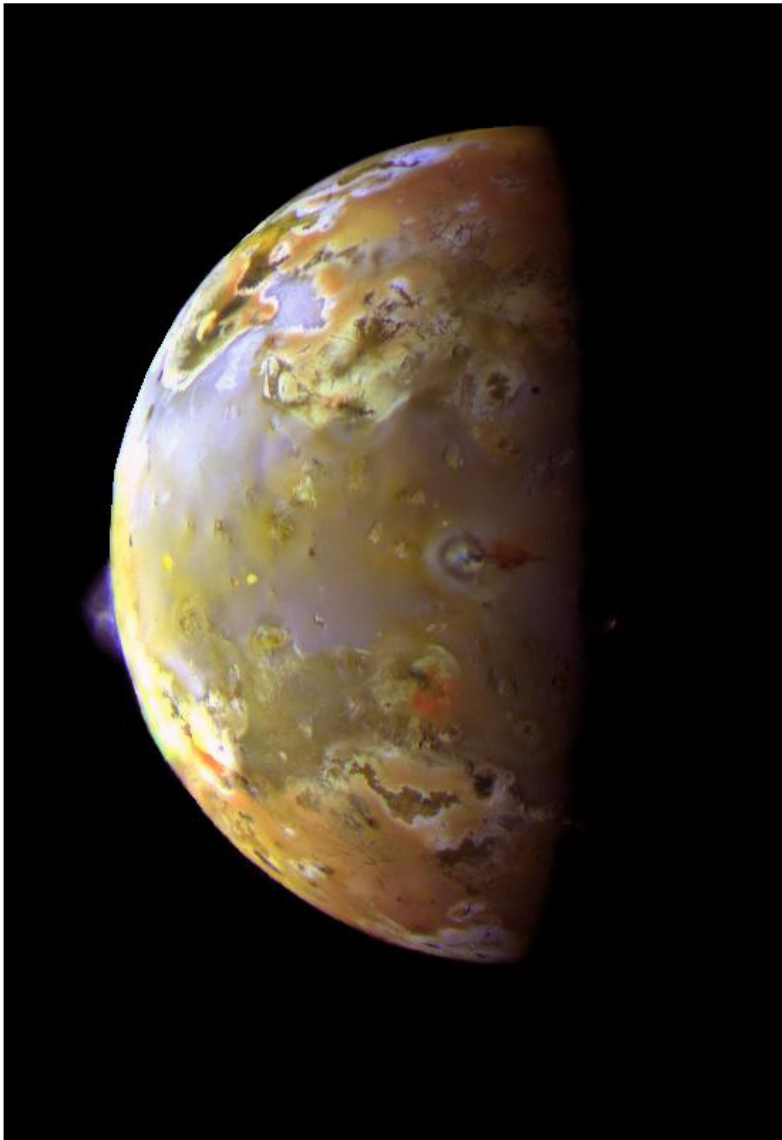


-> **formation d'anneaux**

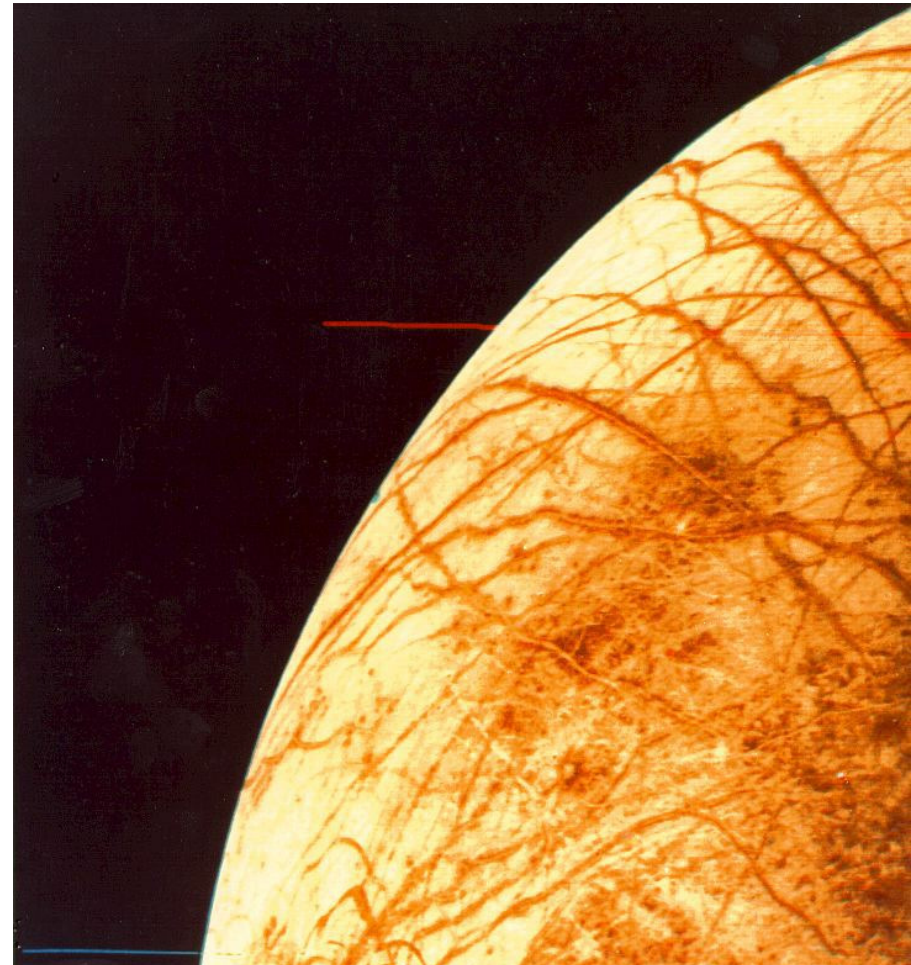


Les satellites galiléens de Jupiter

< **Io**: un volcanisme actif (SO_2)

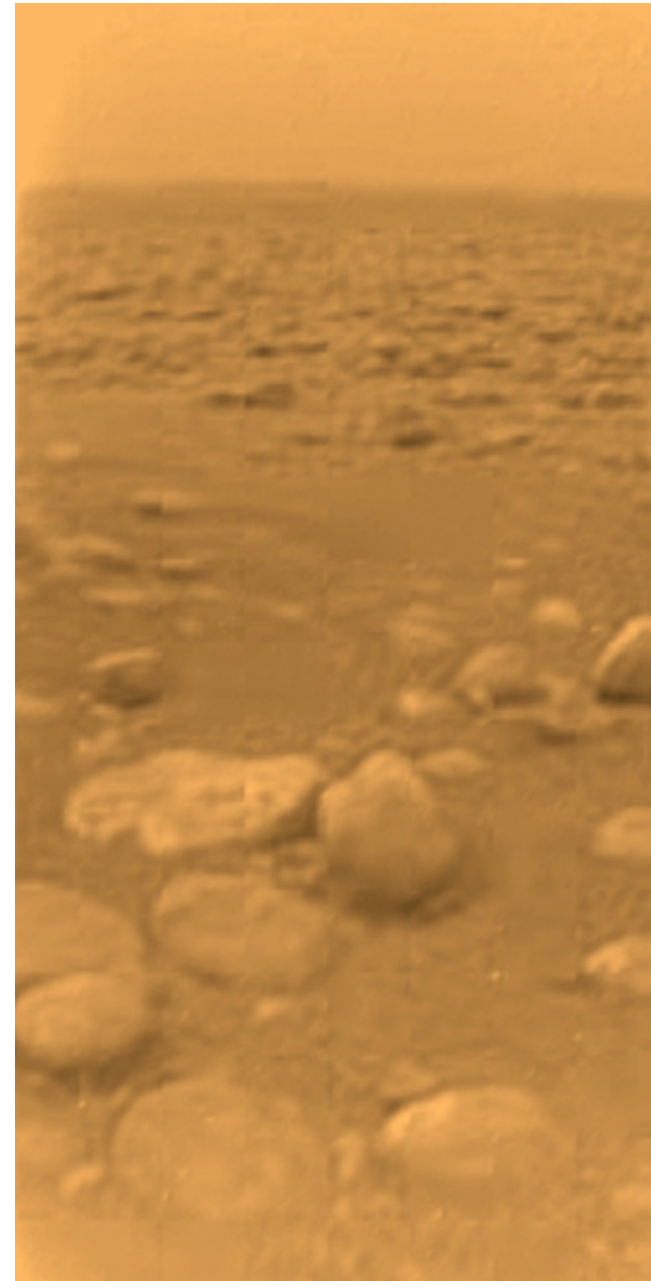


Europe: Un océan
sous la surface? >



La surface de Titan (descente de la sonde Huygens le 14 Janvier 2005):

Des galets de glace d'eau sur un
dépôt d'hydrocarbures



...Mais des lacs d'hydrocarbures ont aussi
été détectés par le radar de Cassini (2007)

Les planètes telluriques



Venus

$P_s = 93 \text{ bar}$

$T_s = 730 \text{ K}$

Terre

$P_s = 1 \text{ bar}$

$T_s = 288 \text{ K}$

Mars

$P_s = 6 \text{ mbar}$

$T_s = 230 \text{ K}$

Des atmosphères primitives comparables,
mais des destins très différents...

La basse atmosphère de Vénus: un effet de serre galopant

- Le rayonnement solaire visible chauffe la surface qui émet dans l'infrarouge
- Les gaz atmosphériques absorbent ce rayonnement et chauffent à leur tour -> la température de surface augmente et l'effet s'amplifie
- Les gaz à effet de serre les plus efficaces sont CO_2 , H_2O et CH_4

L'eau lourde dans l'atmosphère de Vénus: un indice de son histoire passée

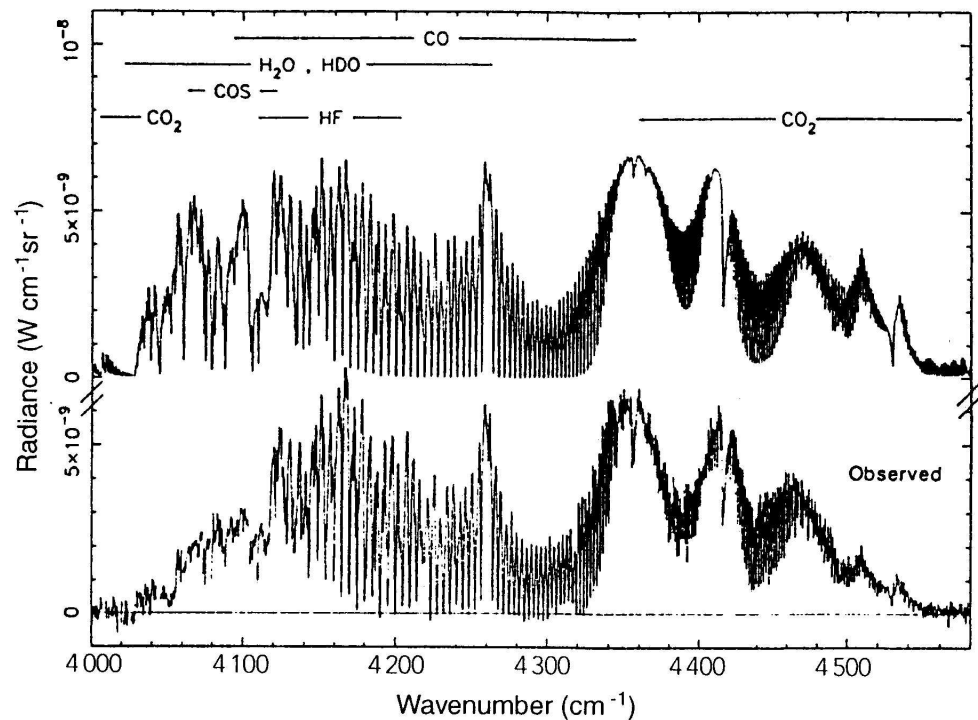
Dans la basse atmosphère de Vénus: signatures spectrales de HDO et H₂O

->

$$[D/H]_V = 120 \times [D/H]_T !$$

Implication: L'eau a été très abondante dans l'atmosphère primitive de Vénus.

Elle s'est échappée massivement, l'eau lourde HDO s'échappant moins facilement.



Bézard et al. 1990

L'eau lourde dans l'atmosphère de Mars

-Observation de raies

HDO à 3.7 μm

(FTS-CFHT, Mauna Kea)

-> mesure de HDO

-Comparaison à H₂O

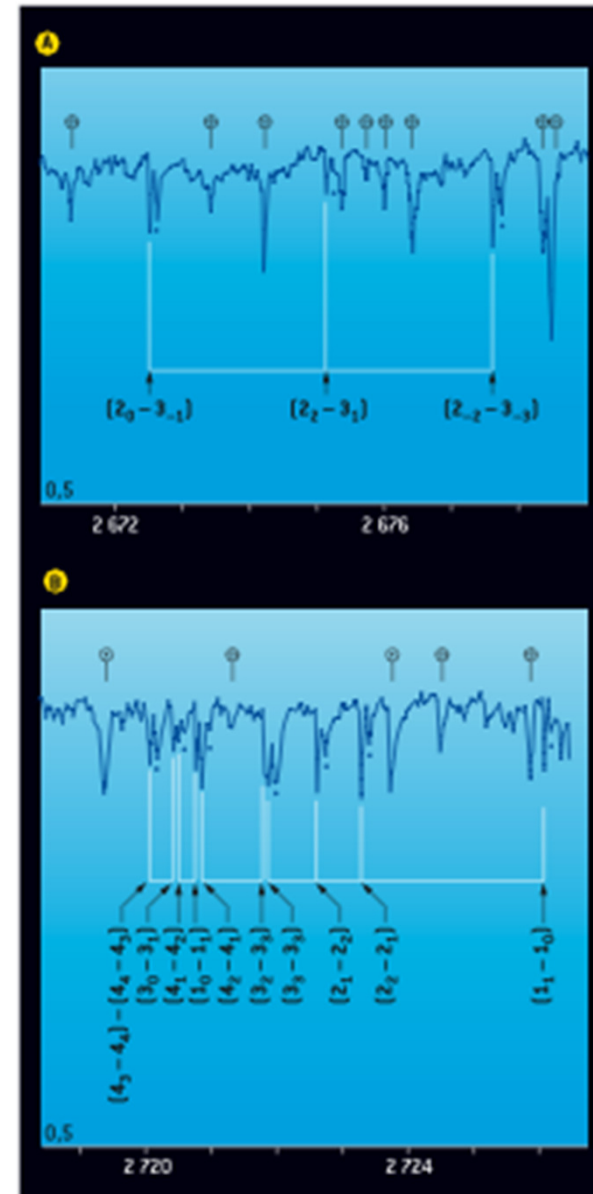
(estimé indépendamment)

-> $[\text{D}/\text{H}]_{\text{M}} = 5-6 [\text{D}/\text{H}]_{\text{T}}$

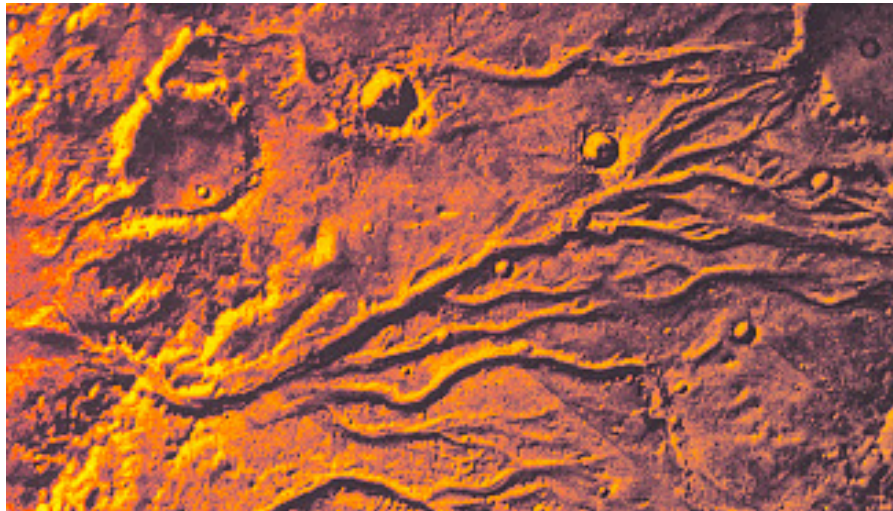
-Interprétation: dégazage
de H₂O au début de l'histoire
de la planète

-> atmosphère primitive
plus dense

(Owen et al., 1988)



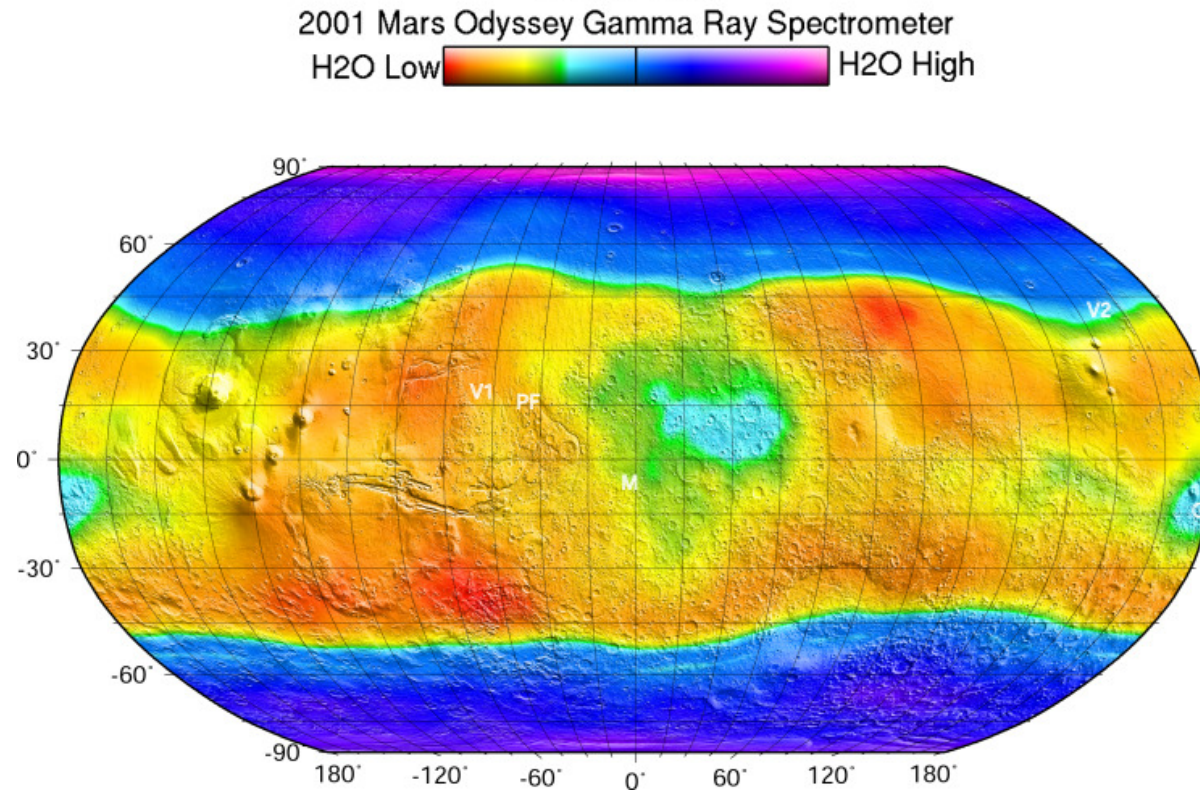
Qu'est devenue l'eau de Mars?



Des traces d'écoulement
fluvial, preuve que l'eau
a coulé sur Mars dans le passé...



L'eau est présente aux pôles, sous la surface de Mars



OMEGA/Mars Express: Minéralogie de la surface (2005-2010)

Détection d'argile dans les terrains anciens (hémisphère sud)

Détection de sulfates dans les régions chaotiques

-> L'eau a coulé en abondance au cours du premier milliard d'années, et ensuite épisodiquement

Mars: les questions ouvertes

- Où est passée l'eau de Mars? (sous la surface, sous les calottes? Quel volume?)
- Mars a-t-elle connu un climat plus chaud et humide dans le passé?
- D'après Mars Express, l'eau liquide a coulé en abondance autrefois sur les terrains anciens. Si oui, la vie a-t-elle pu y apparaître?
- Si oui, existe-t-il des traces de vie fossile?
- Comment faire pour détecter ces traces avec les missions spatiales futures?
- Les projets : Rovers et orbiteurs (MSL/Curiosity, MAVEN, ExoMars)

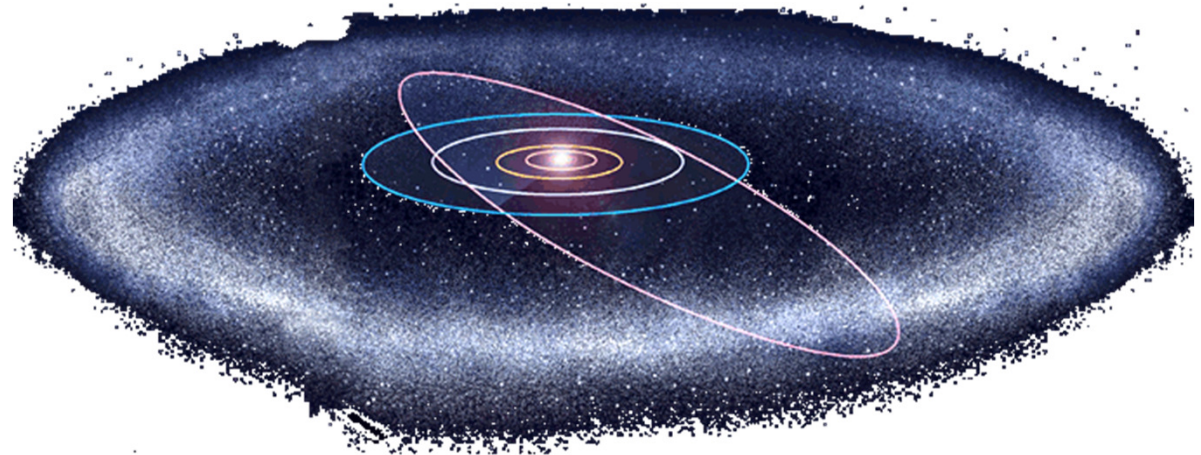
Evolution comparative des planètes telluriques:

Le rôle de l'eau et de l'effet de serre

- **Au départ:** des atmosphères de composition comparable (CO_2 , N_2 , H_2O , CO) mais des températures différentes
- **Sur Vénus:** H_2O gazeux \rightarrow effet de serre qui s'amplifie $\rightarrow T_s = 730 \text{ K}$ (460° C)!
- **Sur la Terre:** H_2O liquide $\rightarrow \text{CO}_2$ piégé dans les océans \rightarrow effet de serre modéré, T_s approx. Constant ($288 \text{ K} = 15^\circ \text{ C}$)
- **Sur Mars:** H_2O solide(/liquide?) et planète peu massive \rightarrow faible activité interne \rightarrow l'effet de serre disparaît, $T_s =$ environ 230 K (-140° C)

Les petits corps du système solaire: des vestiges de sa formation

- La ceinture principale des astéroïdes: les restes d'une planète inachevée
 - La cause: l'intense champ de gravité de Jupiter
- Les astéroïdes géocroiseurs
 - des voisins de la Terre... et des menaces potentielles de collision
- Au delà de Neptune: la ceinture de Kuiper et les TNOs (dont Pluton)



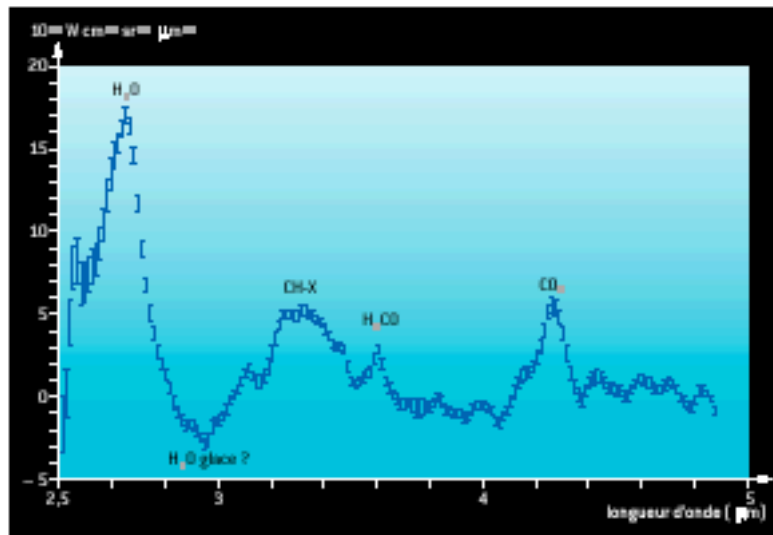
Les comètes... hier et aujourd'hui

- Des fragments de glace qui voyagent du plus loin au plus près
- Certaines d'entre elles sont connues depuis l'Antiquité et reviennent périodiquement
- Des vestiges des premiers âges du système solaire
- **Deux réservoirs possibles:**
 - le nuage de Oort
(40000 UA) pour les comètes à longue période
 - la ceinture de Kuiper
(40-100 UA) pour les comètes à courte période



Halley 1986: une exploration par cinq sondes spatiales

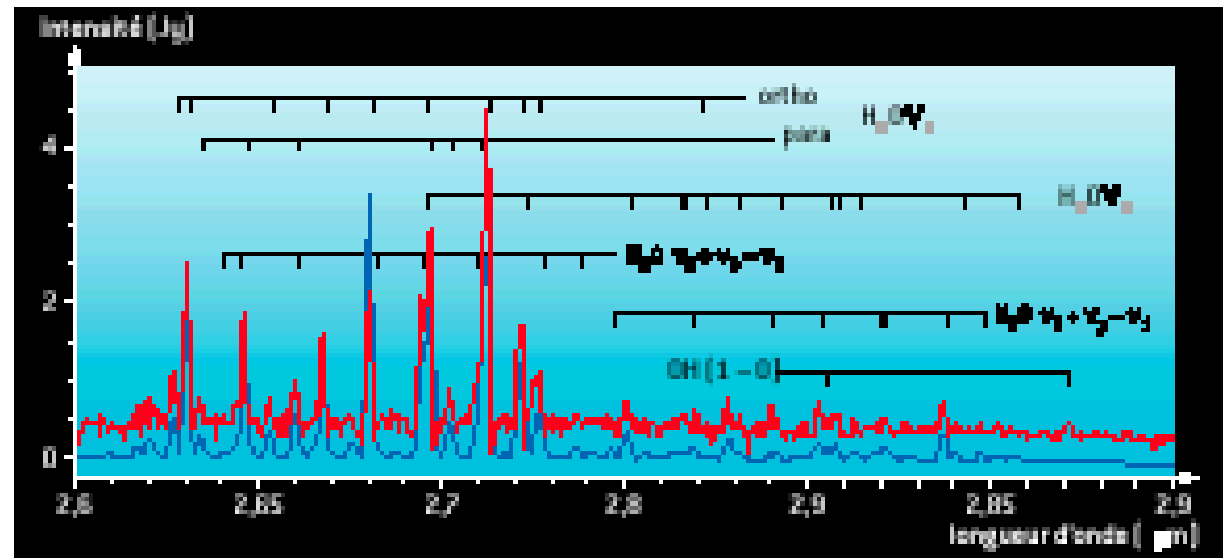
- Sonde Giotto (ESA):
observation du noyau
- Sondes Vega (URSS-Europe):
détection de l'eau et de
molécules hydrocarbonées
complexes



1997: Hale-Bopp, la comète géante



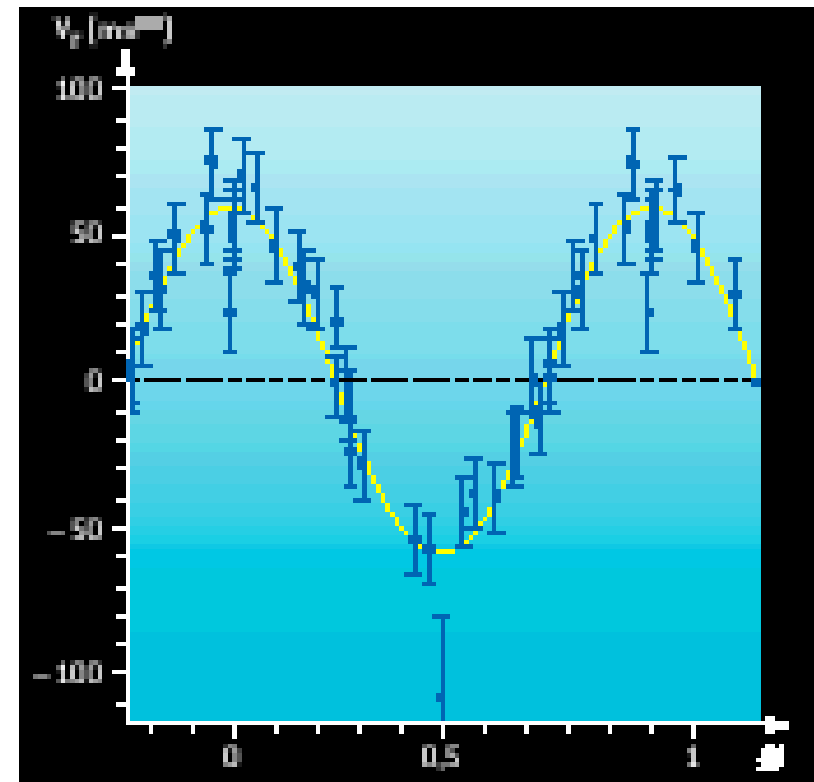
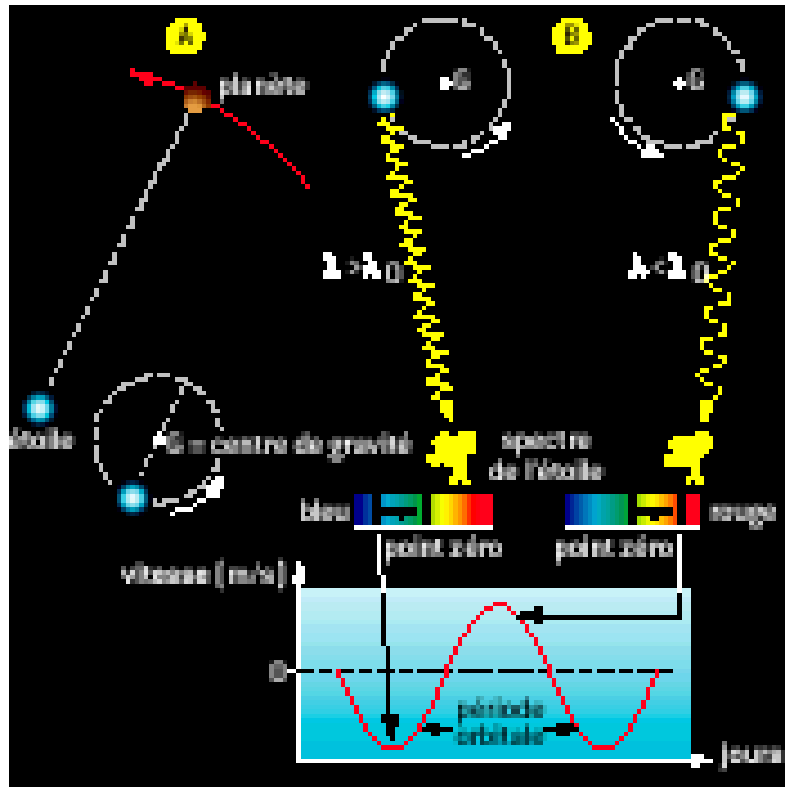
Le spectre de l'eau
vu par le satellite
ISO (2.66 μm)



Le système solaire: une exception dans l'Univers? Non!

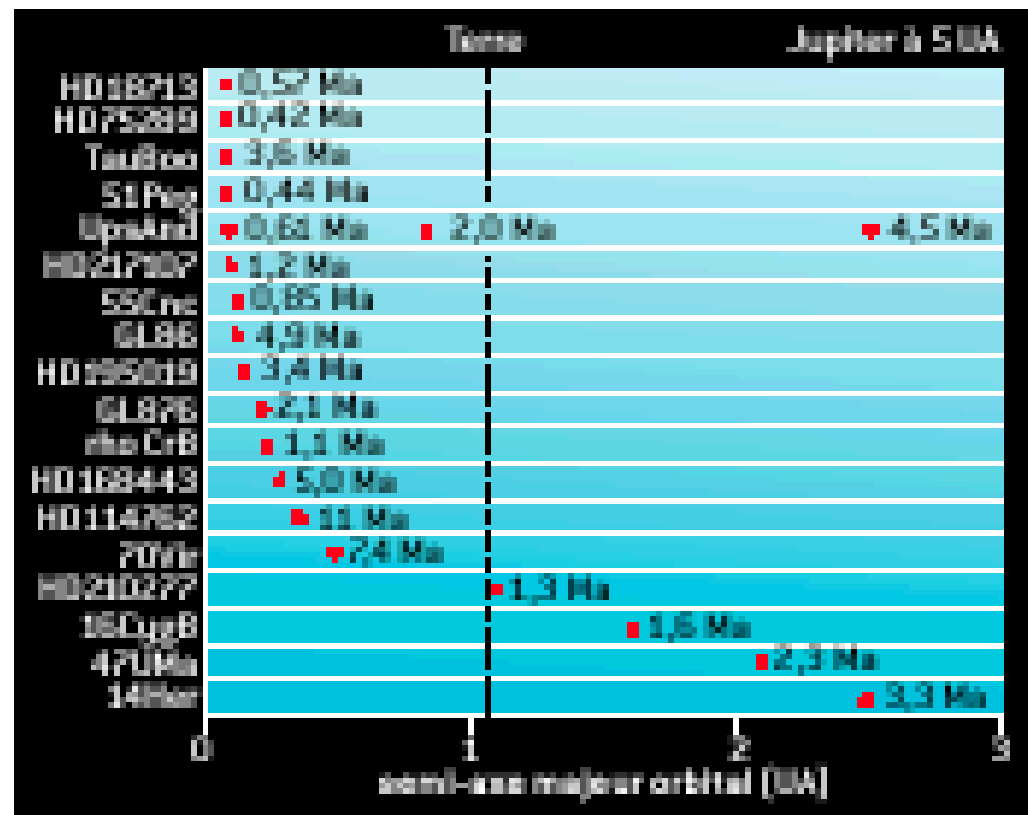
- La découverte des planètes extrasolaires: une révolution astronomique!
- Depuis 1995: près de 700 planètes extrasolaires géantes (« exoplanètes ») découvertes autour d'étoiles proches
- Principale méthode utilisée: vélocimétrie (mesure du déplacement de l'étoile autour du centre de gravité du système)
- Autre méthode complémentaire: mesure des transits (mesure du flux stellaire lors du passage de la planète devant son étoile)

Exoplanètes: La méthode de vélocimétrie



Première détection: 51 Peg b
(Mayor et Queloz, 1995, Observatoire de Haute Provence)

Une surprise: les exoplanètes géantes sont très proches de leur étoile!



Le modèle de formation des exoplanètes est différent de celui du système solaire

Le système solaire: un cas atypique?

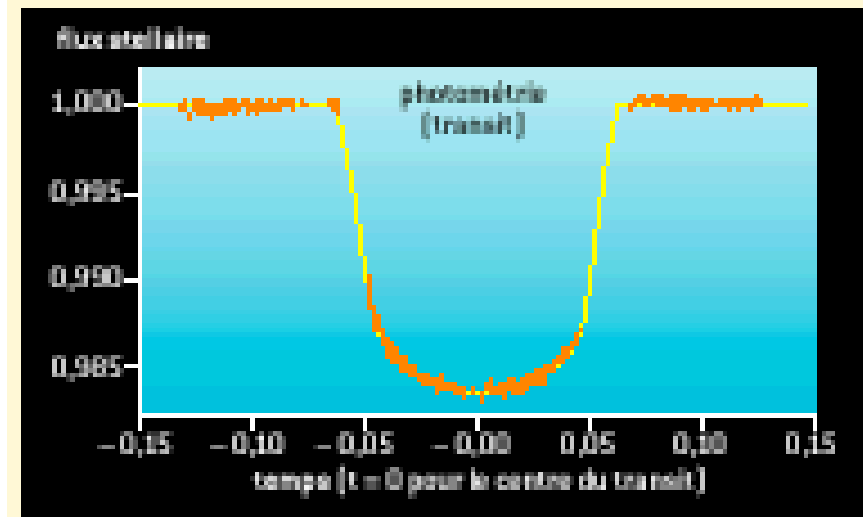
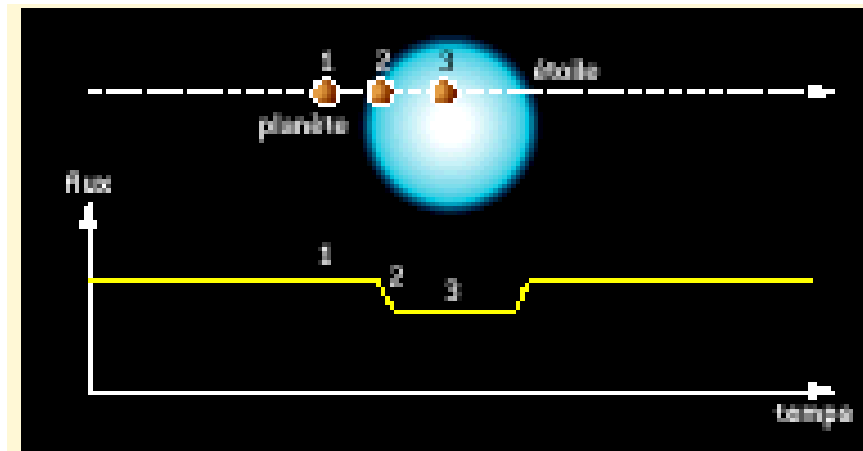
- Comment expliquer la présence d'exoplanètes géantes près de leur étoile?
- Un mécanisme très étudié: **la migration**
 - Formation des exoplanètes géantes loin de l'étoile
 - Rapprochement par interaction entre l'exoplanète et le disque
 - Une migration modérée semble avoir eu lieu pour les planètes géantes du système solaire
- Attention au biais observationnel: les exoplanètes les plus faciles à détecter sont les géantes à courte période!
- D'autres systèmes planétaires semblables au nôtre restent peut-être à découvrir...
- Pour rechercher les exoterras: la méthode des transits

La méthode des transits

Passage de la planète devant l'étoile -> diminution du flux stellaire (Jupiter: 1%; Terre: 0.01%)

->

Détection possible des exoplanètes géantes depuis la Terre, des exoplanètes telluriques (« exoterras ») depuis l'espace



Détection de l'exoplanète HD209458B

La mission spatiale COROT

Mission française (CNES)

Objectif: recherche des exoterres par observation photométrique de champs stellaires

Lancement: 27/12/2006

Durée de vie: > 6 ans

25 exoplanètes découvertes,
plusieurs dizaines de candidats à confirmer
(vélocimétrie)

Kepler (2009) -> plusieurs centaines de candidats



Quelques objets

exotiques...

Osiris (1er transit)

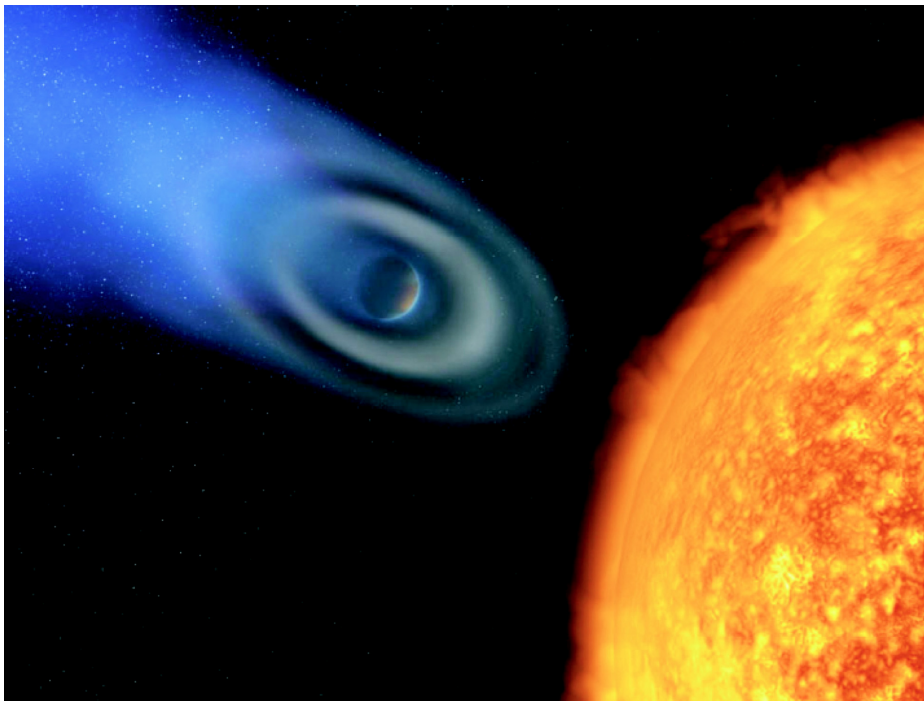
$M = 0.7 M_J$

$R = 1.3 R_J \rightarrow d = 0.4 \text{ g/cm}^3$

CoRoT-7b \rightarrow

$R = 1.7 R_E$

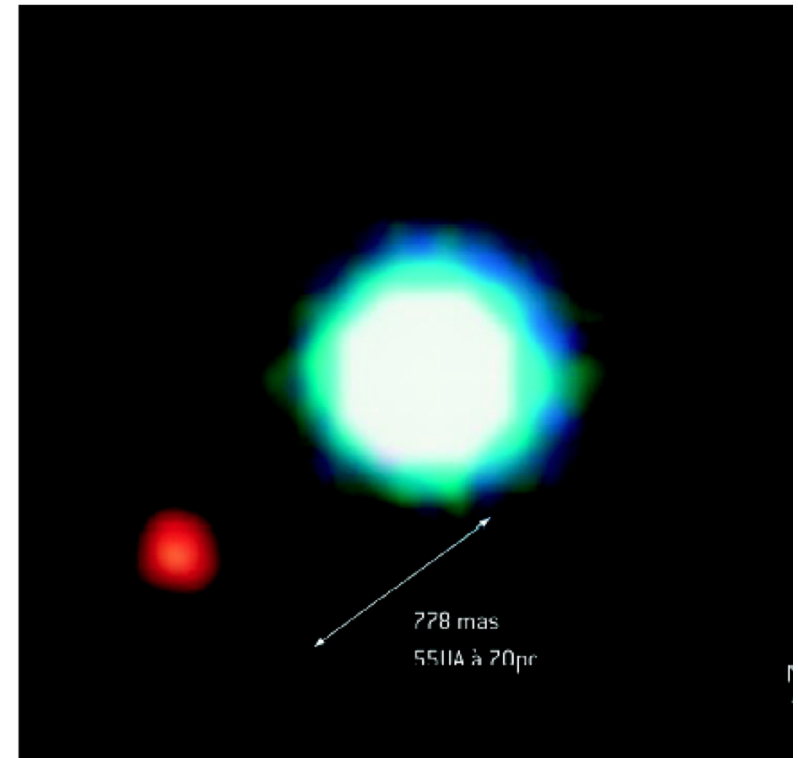
$P < 1 \text{ day}$



2M 12071ère détection directe

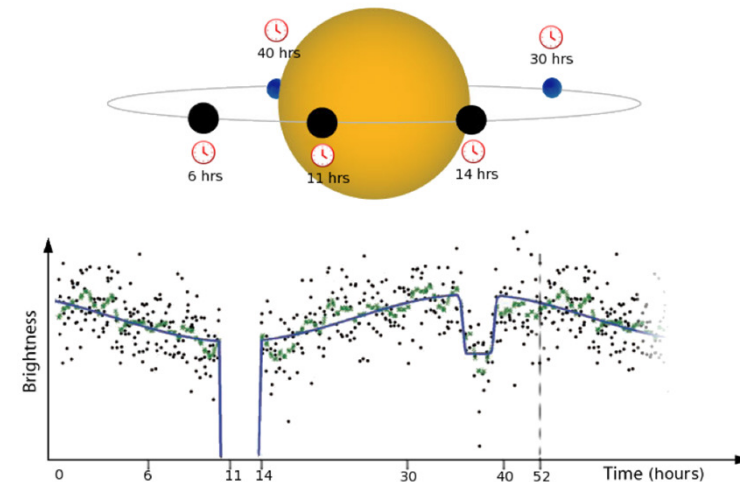
Naine brune, $0.025 M_S$

$M = 5 M_J$, $D = 55 \text{ AU}$



De la détection à la caractérisation: La spectroscopie des exoplanètes par transit

- **Transits primaires**
 - Spectroscopie par transmission
 - Sondage de l'atmosphère supérieure au terminateur
 - Bien adapté aux Jupiters chauds
- **Transits secondaires**
 - Emission thermique des exoplanètes
 - Nécessite la connaissance du profil thermique de la planète

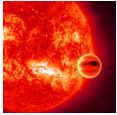


Transit
Primaire

Transit
Secondaire

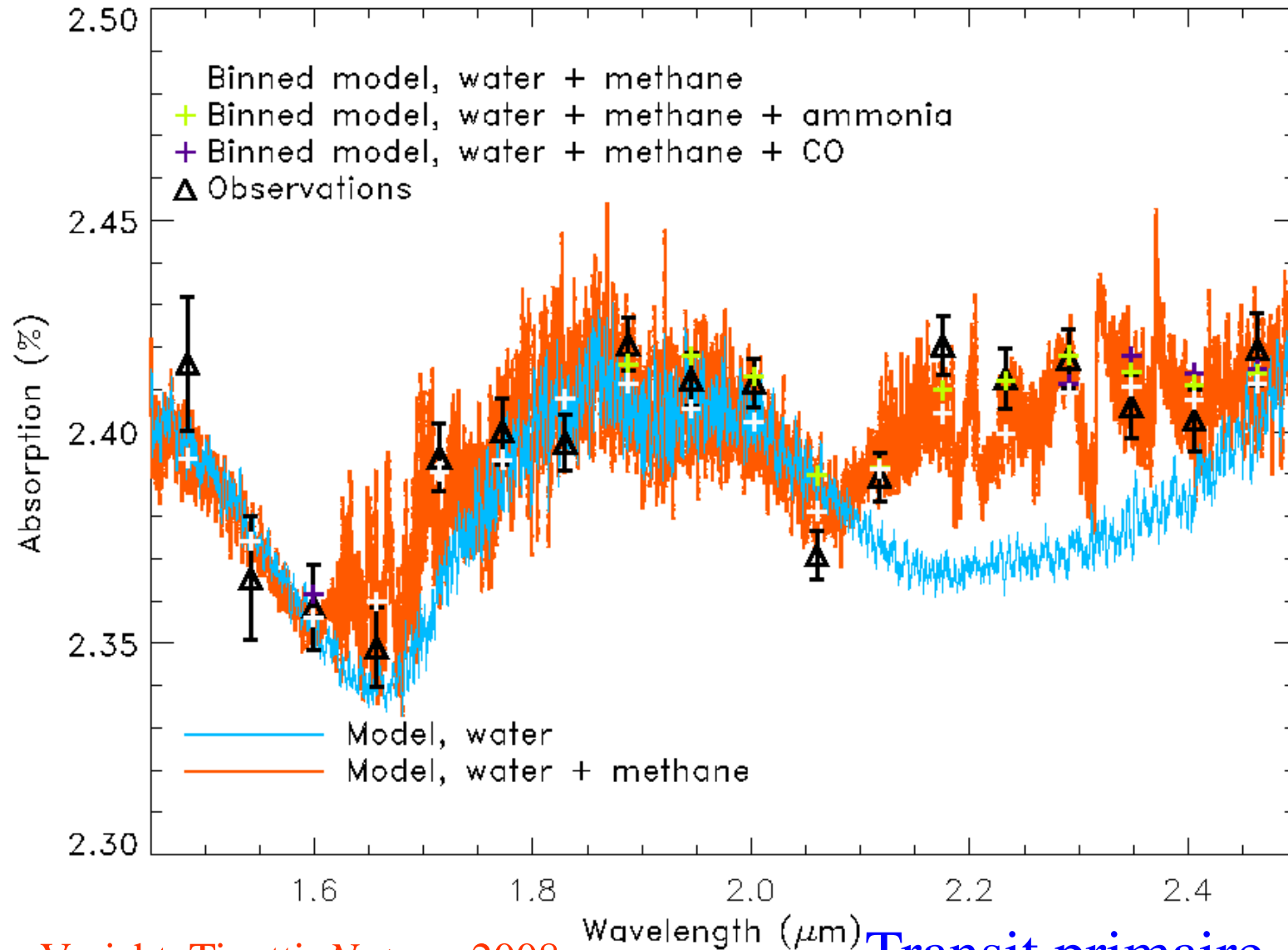
Moyens d'observation actuels: HST, Spitzer (espace)

+ télescopes au sol



NICMOS: transmission spectroscopy

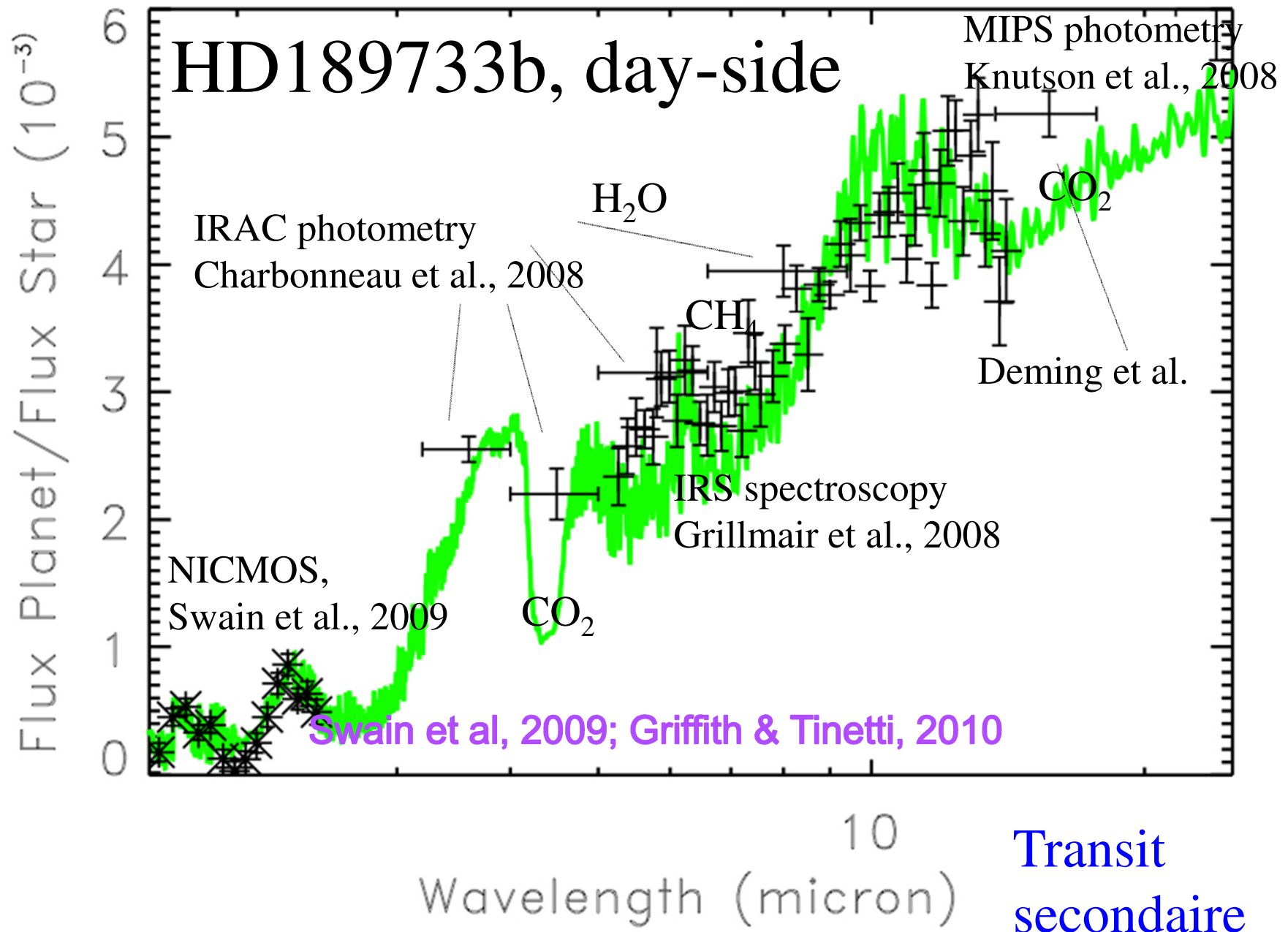
HD189733b, terminator



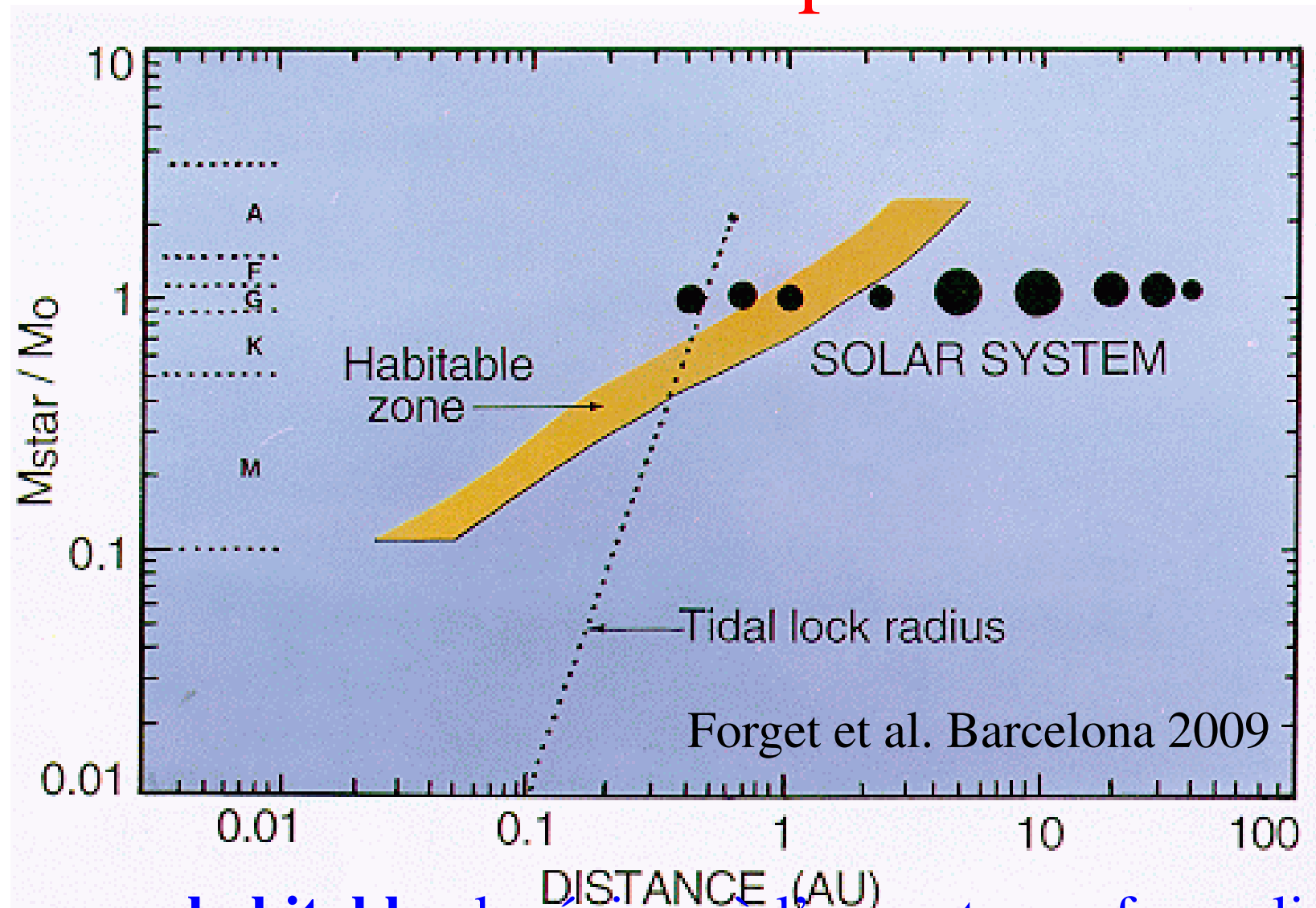
Swain, Vasisht, Tinetti, *Nature*, 2008

Transit primaire

NIR-MIR emission spectroscopy



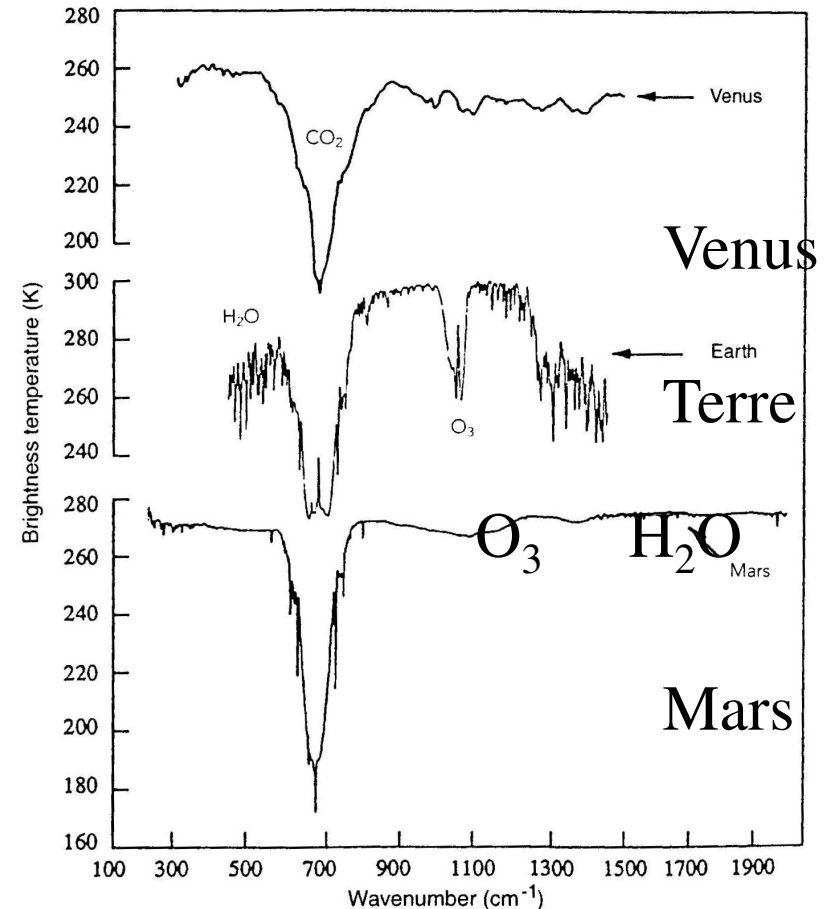
Le but ultime: la recherche de la vie dans les exoplanètes



La zone habitable : la région où l'eau est sous forme liquide

Comment rechercher la vie dans les exoplanètes?

- Recherche de l'**oxygène**
- **Traceurs**: les biomarqueurs moléculaires (spectroscopie infrarouge)
 - Meilleur contraste de flux P/*
 - O₃ (plus facile à identifier que O₂)
 - CO₂ + CH₄
- **Etape suivante**: imagerie directe



CO₂

En conclusion...

- **Le système solaire**: une extrême variété d'objets au sein de chaque famille
- Nous comprenons les grandes lignes du mécanisme de sa formation (accrétion au sein d'un disque)
- Ce mécanisme semble largement répandu dans l'Univers
- Il existe de nombreuses **exoplanètes** autour des étoiles proches...mais celles-ci ne ressemblent pas aux planètes du système solaire!
- Leur mode de formation est différent de celui du système solaire, et reste mal compris (migration?)
- **Un grand défi pour demain**: rechercher les exoterres et chercher si la vie a pu y émerger