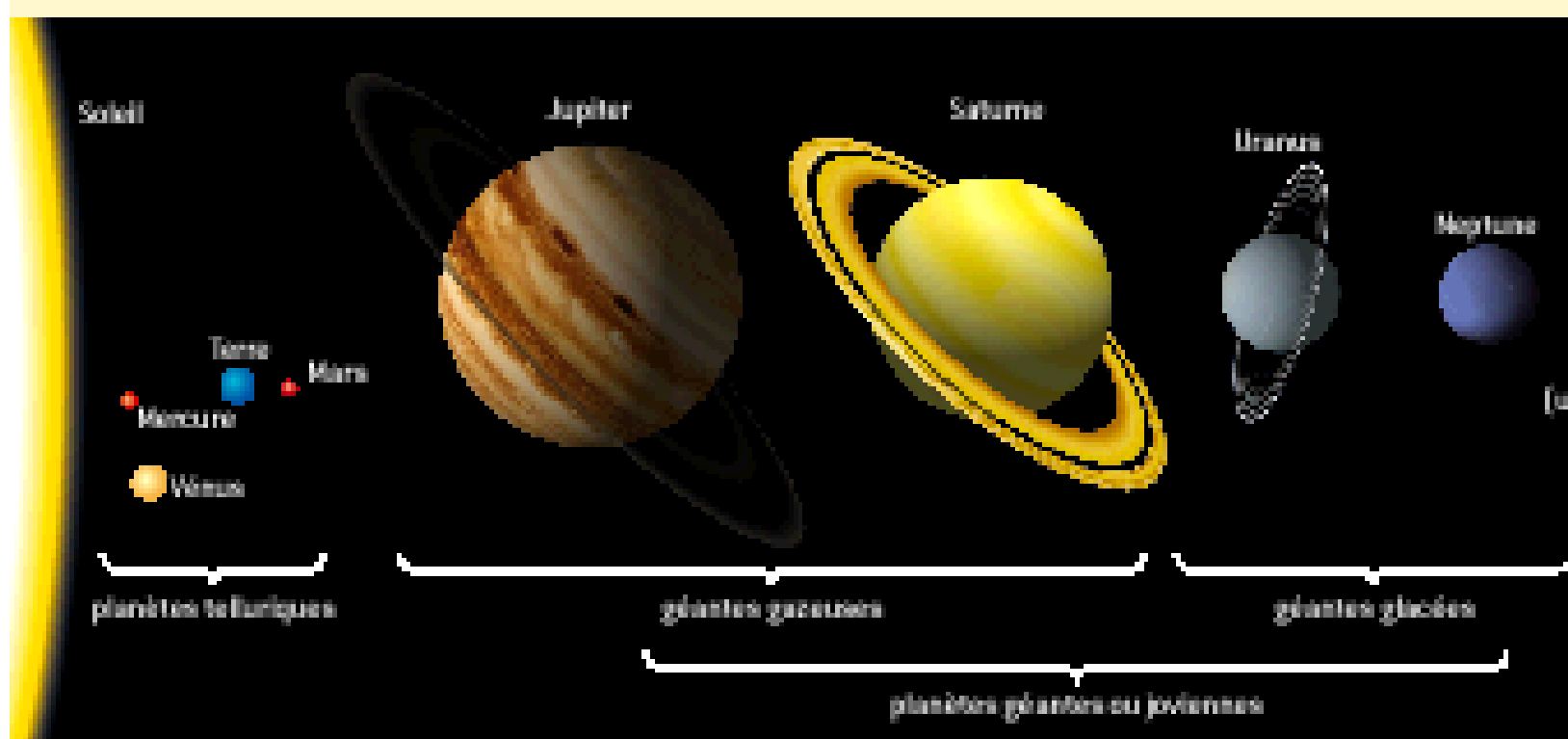


# Les planètes géantes et leur système



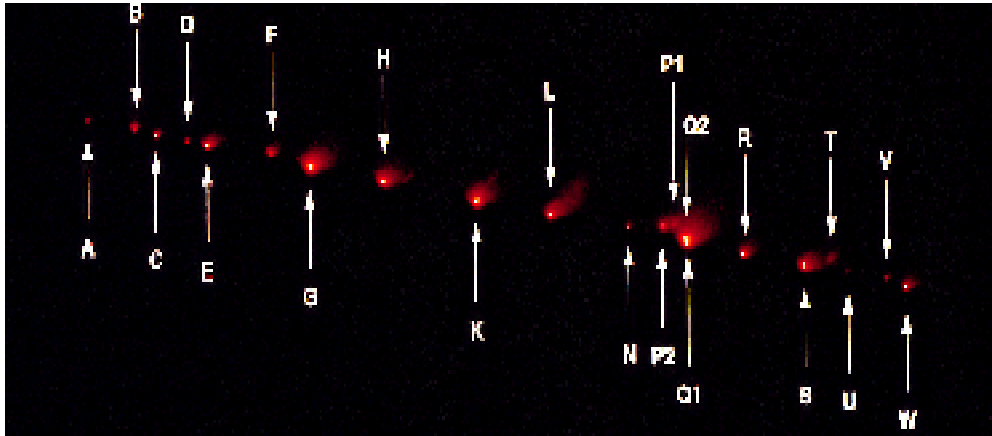
Jupiter et Saturne: géantes gazeuses ( $318-95 M_T$ )  
Uranus et Neptune: géantes glacées ( $14-17 M_T$ )

# Pourquoi deux classes de planètes géantes?

- Jupiter et Saturne: formées @ 5-10 UA
  - Grande masse disponible (juste au-delà de la ligne des glaces)
  - Croissance rapide (quelques Ma)
  - Effondrement d'une grande masse de gaz
  - -> géantes gazeuses
- Uranus et Neptune: formées au-delà de 10 UA
  - Moins de matière dans le disque -> croissance plus lente
  - Accrétion du noyau de  $12 M_T$  après la phase T-Tauri du Soleil et le balayage du gaz par le vent solaire
  - Très peu de gaz disponible pour l'accrétion
  - -> géantes glacées

# De l'eau à l'intérieur... et à l'extérieur

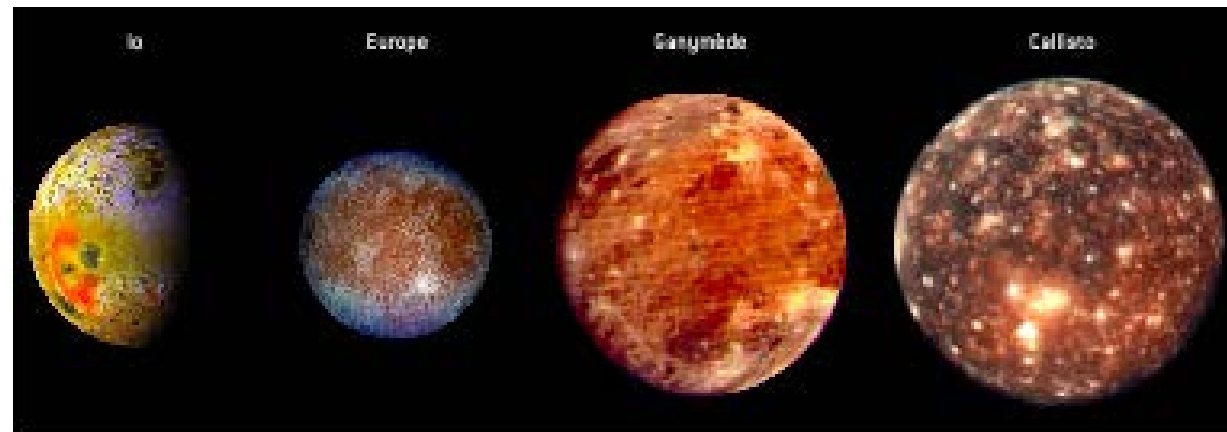
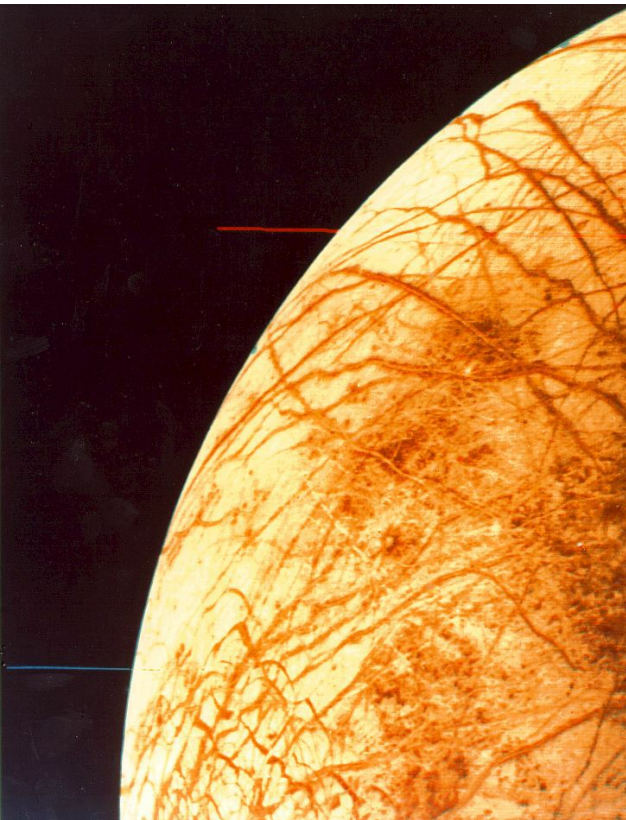
1994: Collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter



-> Injection de l'eau dans la haute atmosphère

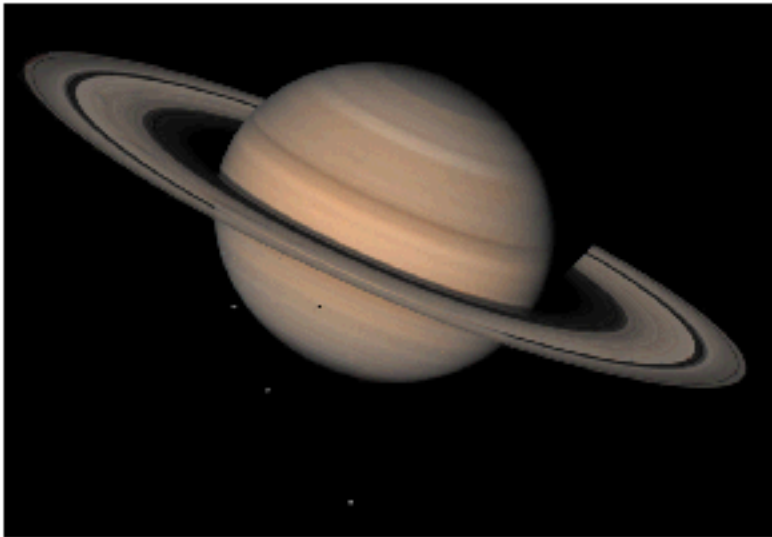
# Les satellites galiléens:

de la glace d'eau en surface...et peut-être de l'eau liquide à l'intérieur (à l'exception de Io)



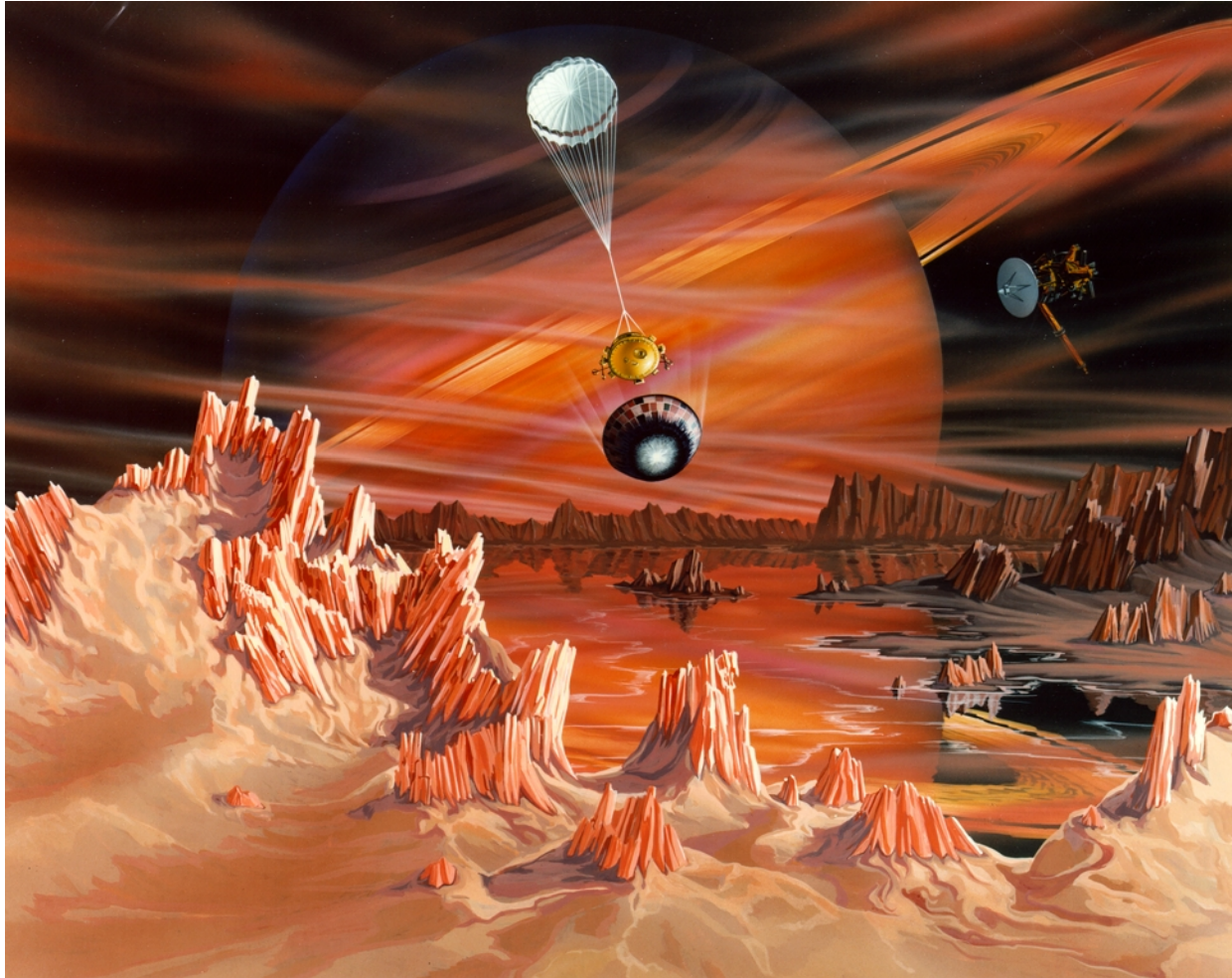
Europe : une cible de choix pour l'exobiologie  
(l'océan liquide pourrait être en contact avec le sol silicaté)

# Saturne, le seigneur des anneaux



Les anneaux de Saturne, une multitude de grains de glace de toutes tailles

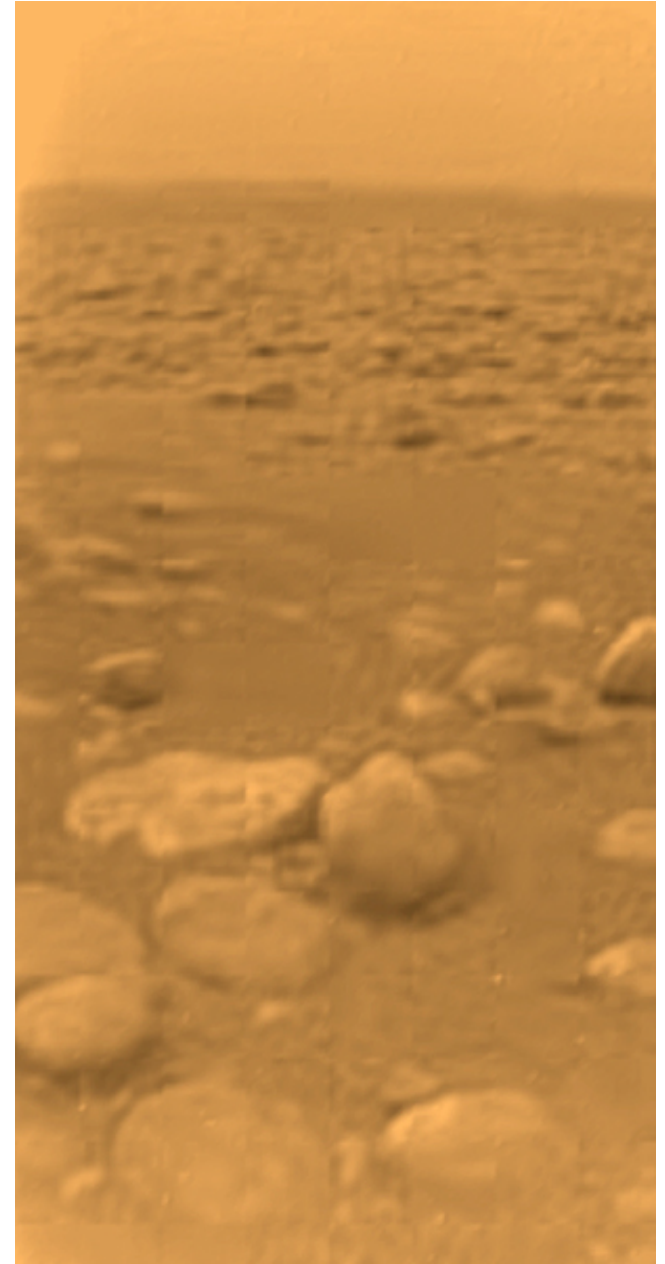
# L'exploration de Titan par la mission Cassini-Huygens: Ce que l'on attendait....



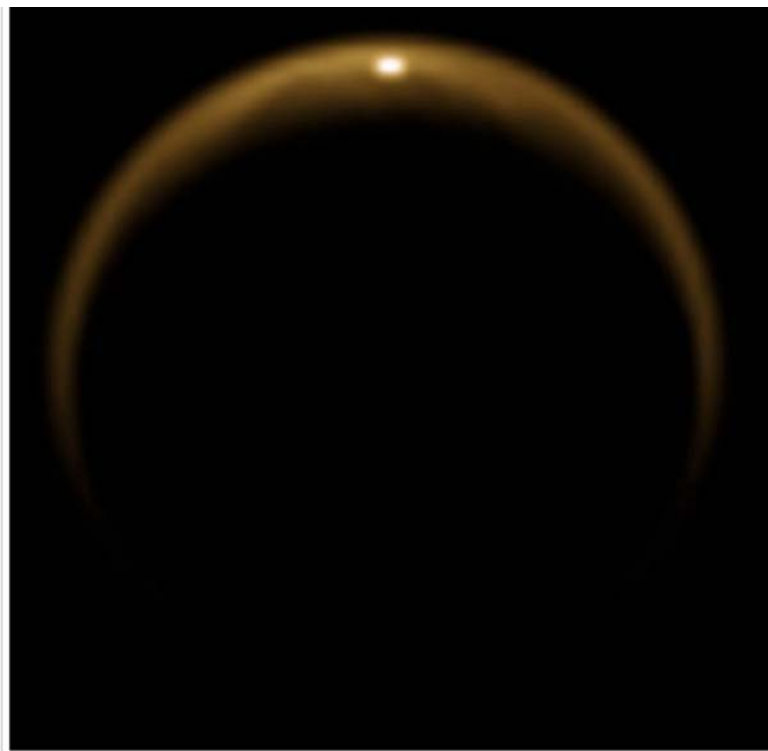
... et ce que l'on a vu  
(descente de la sonde  
Huygens le 14 janvier 2005):

Un sol relativement plat,  
des galets (sans doute  
formés de glace  $H_2O$ )  
soumis à une forte érosion  
fluviale (dépôt  
d'hydrocarbures)

Mais en 2007: détection de  
lacs par le radar de Cassini



# Des lacs sur Titan!



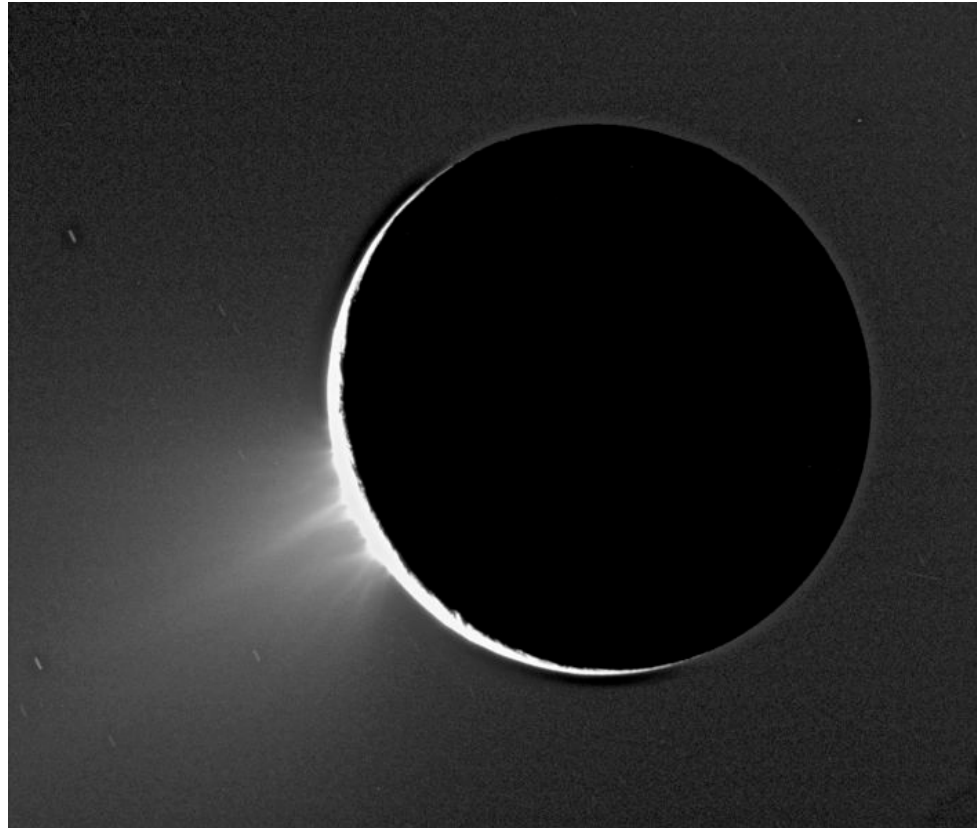
VIMS: Image de réflexion spéculaire près du pôle Nord (© NASA/Cassini)



Radar: Détection d'un lac (Kraken Mare, région polaire Nord comparée au lac Ontario)(©Cassini)

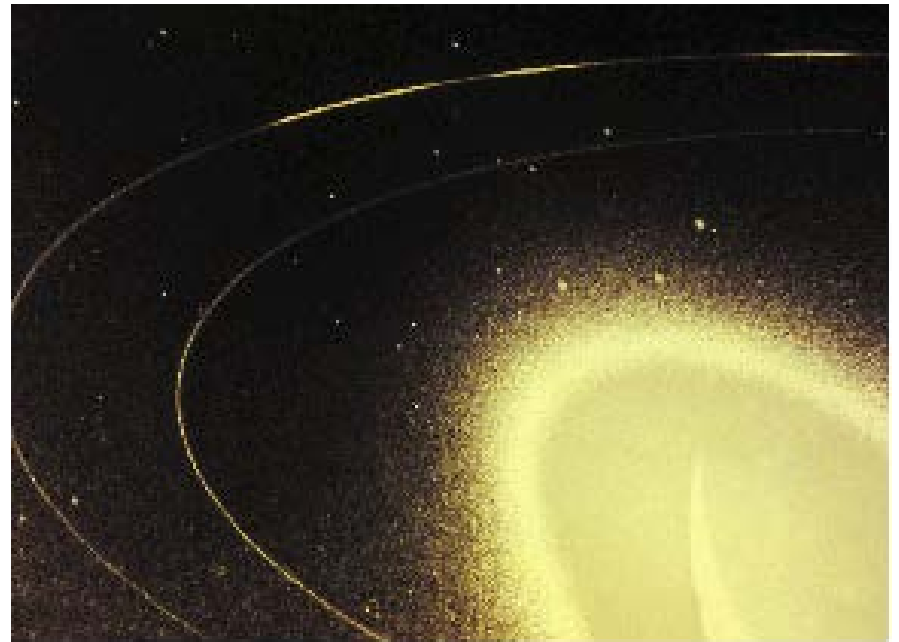
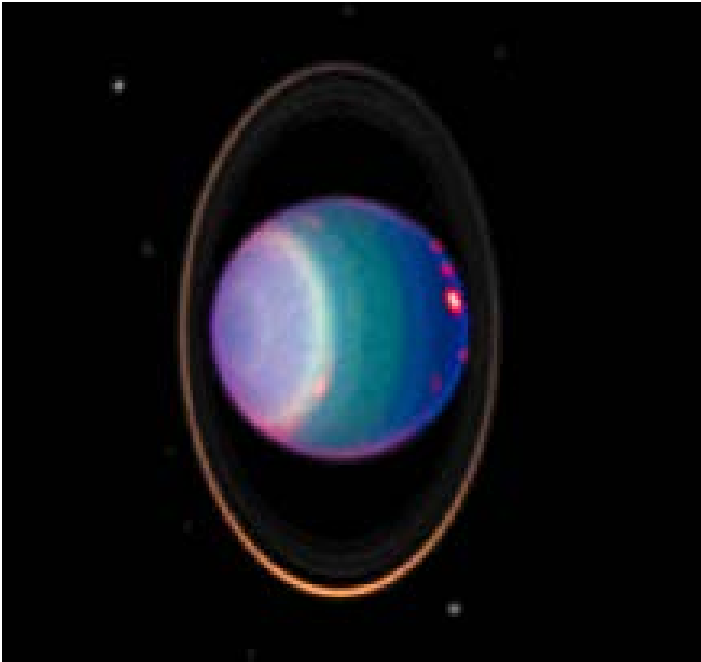


# Depuis 2005: détection de geysers de vapeur d'eau sur Encelade (Cassini)



Suggère la présence d'eau liquide sous la surface  
(avec d'autres molécules organiques)

# Uranus et Neptune: des anneaux très ténus



...composés de glace d'eau et de matériau réfractaire

# Les planètes telluriques

Vénus

Terre

Mars



93 bars,  $457^{\circ}$  C

1 bar,  $15^{\circ}$  C  
 $-50^{\circ}$  C

6 mbar,

Des atmosphères primitives comparables  
mais des destins très différents

# L'atmosphère de Vénus

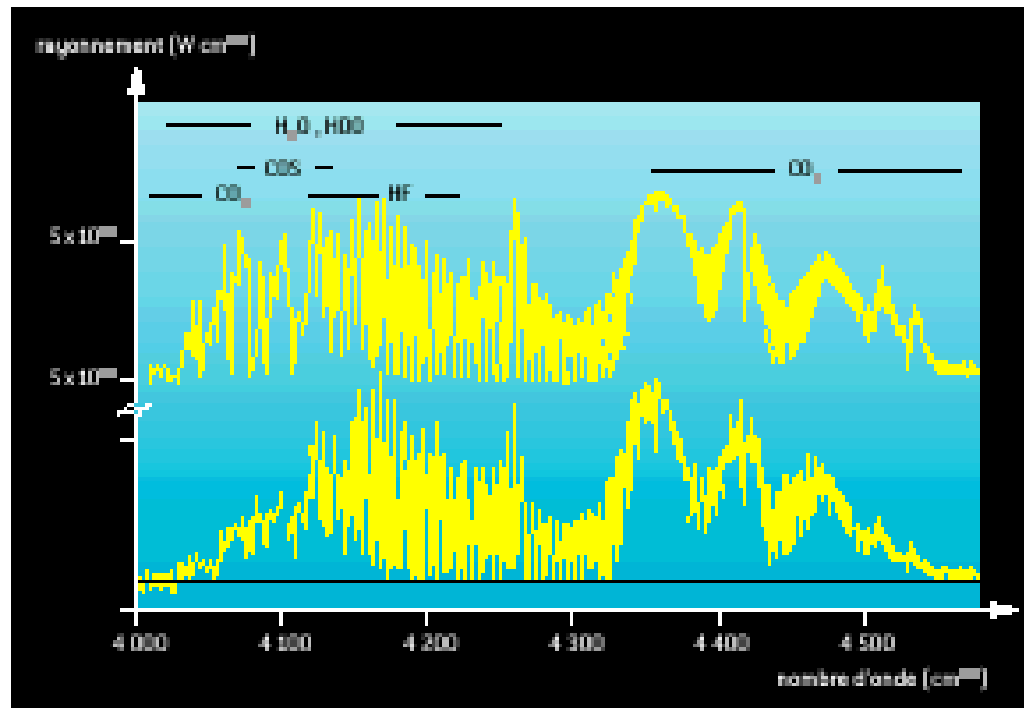
- Atmosphère très dense et très chaude:  $T_s = 730 \text{ K}$ ,  $P_s = 93 \text{ bars}$
- Composition dominée par  $\text{CO}_2$  (97%) et  $\text{N}_2$  (3%) + traces de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{OCS}$
- Epais couches nuageuses de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  entre 40 et 60 km d'altitude, opaques au rayonnement visible

# 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  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$

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

Le spectre infrarouge de Vénus (côté nuit)



HDO (eau lourde) très abondante sur Vénus:  $[D/H]_V = 120 [D/H]_T$ !  
-> signe d'un échappement atmosphérique massif  
(H<sub>2</sub>O dissociée en H et O)

# La planète Mars

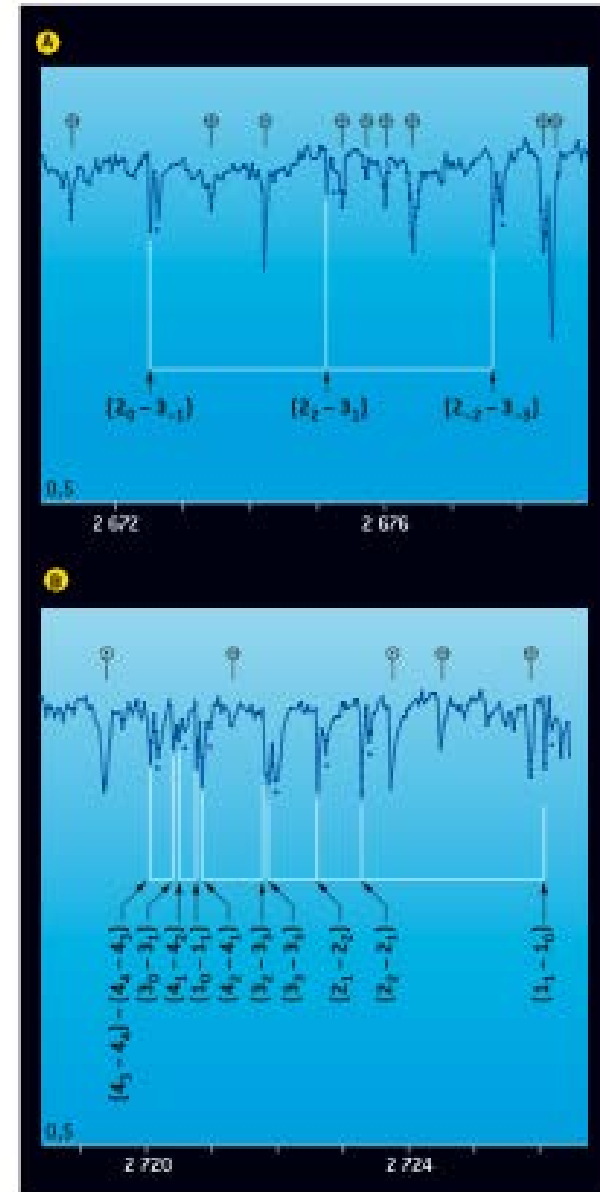
- Une autre voisine de la Terre:
- $R_h = 1.5 \text{ UA}$ ,  $R = 0.6 R_T$ ,
- $d = 3.9 \text{ g/cm}^3$ ,  $M = 0.1 M_T$
- Forte obliquité ( $24^\circ$ )  $\rightarrow$  effets saisonniers comparable à ceux de la Terre
- Atmosphère froide et ténue de  $\text{CO}_2$  (95%) +  $\text{N}_2$  (3%) + traces de  $\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{CO}$
- $P_s = 0.006 \text{ bars}$ ,  $T_s$  (moyen) = 220 K avec de fortes variations saisonnières
- Calottes polaires de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$

# L'eau lourde dans l'atmosphère de Mars

-Observation de raies  
HDO à 3.7  $\mu\text{m}$   
(Hawaii, 1989)  
-> mesure de HDO

-Comparaison à H<sub>2</sub>O  
(estimé indépendamment)  
->  $[\text{D}/\text{H}]_{\text{M}} = 5 [\text{D}/\text{H}]_{\text{T}}$

-Interprétation: dégazage  
de H<sub>2</sub>O au début de l'histoire  
de la planète  
-> atmosphère primitive  
plus dense





# Qu'est devenue l'eau de Mars?



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



# Une nouvelle histoire de l'eau sur Mars

(J.-P. Bibring et al., OMEGA/Mex)

- Dans les terrains anciens : indices de présence d'eau liquide passée (argiles) (avant environ 4.0 Ga)
- Présence localisée de sulfates : épisodes (brefs?) d'écoulements violents, sans doute liés au volcanisme (entre 4 et 3 Ga environ)
- Dans le passé récent : Oxydation de surface (sans doute par le peroxyde d'hydrogène  $H_2O_2$ ) -> présence d'oxydes ferriques (depuis 3 Ga environ)
- Conclusion: si la vie a existé sur Mars, il faut la chercher dans le premier milliard d'années

# Mars: les questions ouvertes

- Quel volume d'eau dans le sous-sol de Mars?
- Mars a-t-elle connu un climat plus chaud et humide dans le passé?
- Combien de temps l'eau liquide a-t-elle pu séjourner?
- Si oui, la vie a-t-elle pu apparaître?
- Si oui, pouvons-nous y trouver des traces de vie fossile?
- Le méthane est-il présent sur Mars? Si oui, quelle est son origine (biogénique ou abiotique)?

# La vie sur Mars?

## Le futur de l'exploration spatiale

- En orbite aujourd'hui:  
Mars Global Surveyor,  
Mars Odyssey (NASA);  
Mars Express (ESA);  
Mars Reconnaissance  
Orbiter (NASA)
- Stations au sol: Spirit,  
Opportunity (NASA)
- Projets futurs (NASA,  
ESA): orbiteurs, landers  
et rovers (MSL11,  
ExoMars)
- Premier objectif:  
« follow the water! »



# La planète Terre

- Un cas intermédiaire entre Vénus et Mars
- Une atmosphère primitive proche de celle de Vénus ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ )
- Une température permettant la présence d'eau liquide ->  $\text{CO}_2$  piégé dans les océans sous forme de  $\text{CaCO}_3$  (calcaire)
- Apparition de la vie -> accumulation de  $\text{O}_2$  et formation de la couche d'ozone

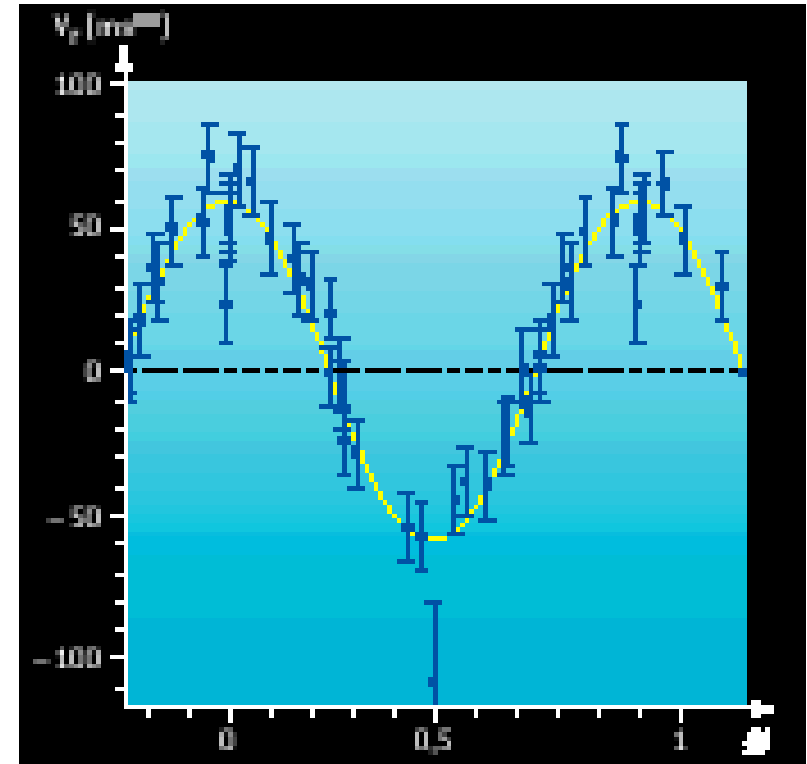
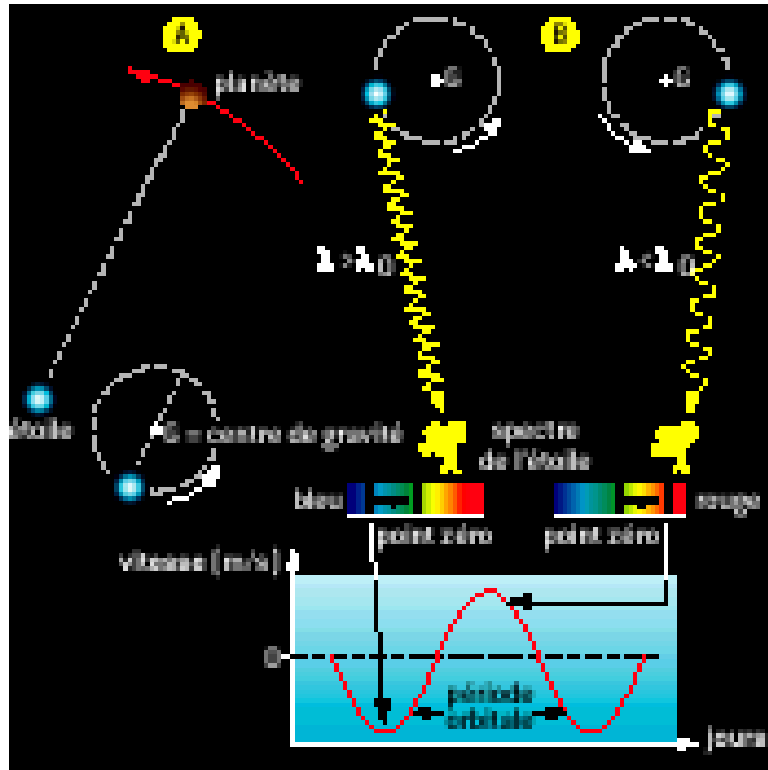
# Vénus, la Terre, Mars: pourquoi des destins divergents?

- Des atmosphères primitives de composition comparable:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  mais....
- **Sur Vénus:**  $\text{H}_2\text{O}$  d'abord liquide puis vapeur: atmosphère massive de  $\text{CO}_2$  et  $\text{H}_2\text{O}$  -> effet de serre galopant-> élévation de température et disparition de l'eau
- **Sur la Terre:** l'eau est sous forme liquide ->  $\text{CO}_2$  est piégé sous forme de calcaire dans les océans -> effet de serre modéré
- **Sur Mars:** faible masse -> atmosphère ténue,
  - activité interne réduite au bout d'1 Ga
  - arrêt de la dynamo interne
  - échappement de l'atmosphère
  - diminution de l'effet de serre et refroidissement
  - $\text{H}_2\text{O}$  sous forme de glace ou de pergélisol

# La recherche de l'eau dans les planètes extrasolaires

- Depuis 1995: près de 500 planètes extrasolaires (« exoplanètes ») découvertes autour d'étoiles proches
- Méthode utilisée: **vélocimétrie** (mesure du déplacement de l'étoile autour du centre de gravité du système)
- Pour l'instant: les exoplanètes détectées par vélocimétrie sont surtout des géantes
- Autre méthode complémentaire: **mesure des transits** (mesure du flux stellaire lors du passage de la planète devant son étoile): environ 100 détections

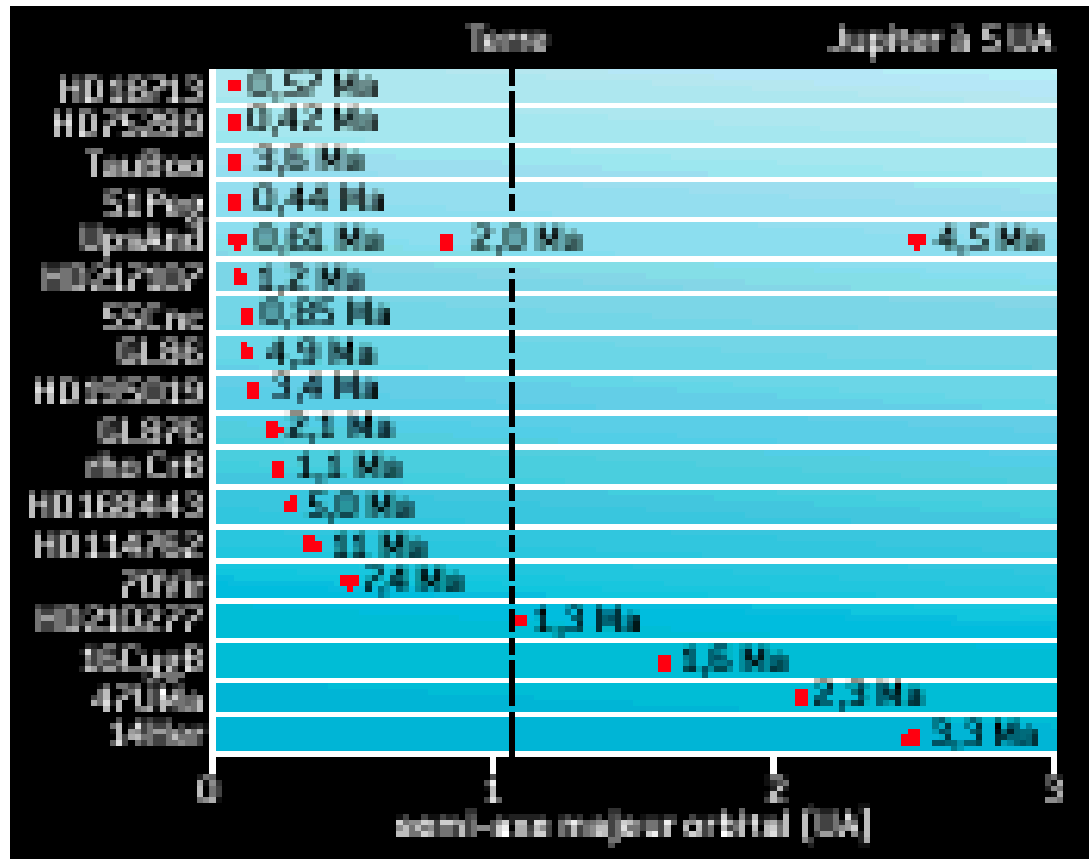
# La méthode de vélocimétrie



Première détection: 51 Peg B (Mayor et Queloz, 1995)  
Méthode limitée à la détection des exoplanètes géantes



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



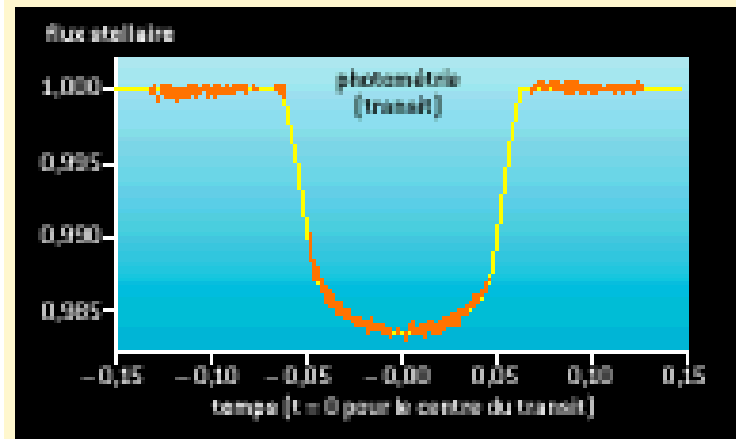
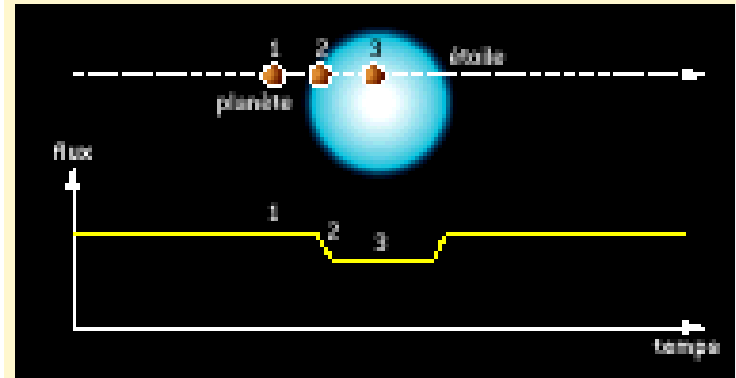
Le modèle de formation des exoplanètes est différent de celui du système solaire!

# 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)

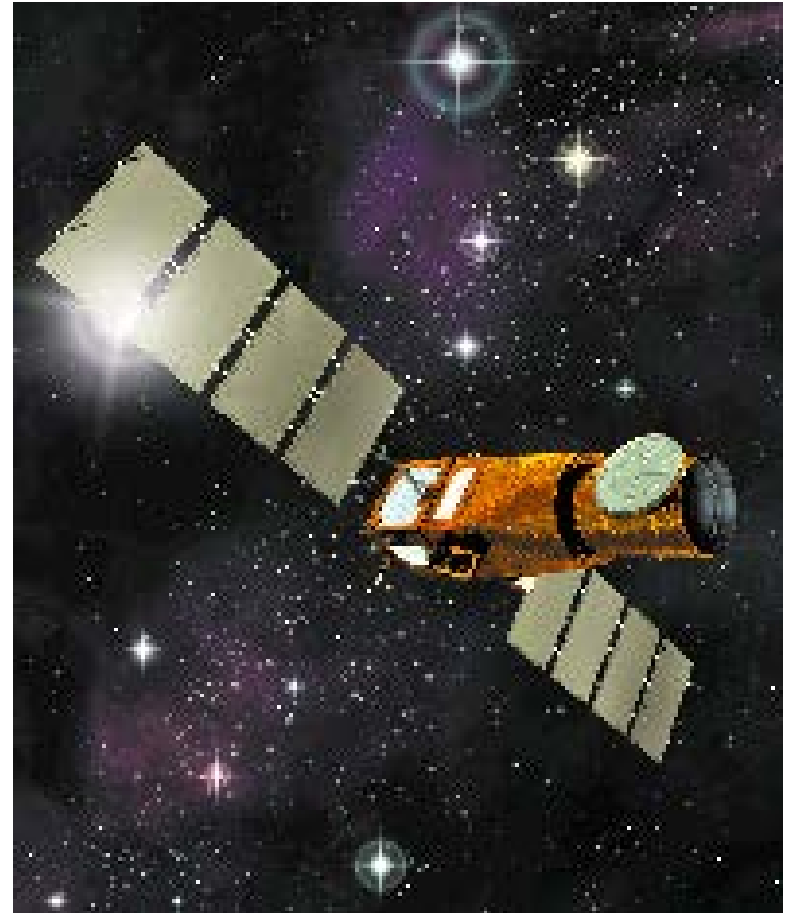
**Objectif:** recherche des exoterres par observation photométrique de champs stellaires

**Lancement:** 27 décembre 2006

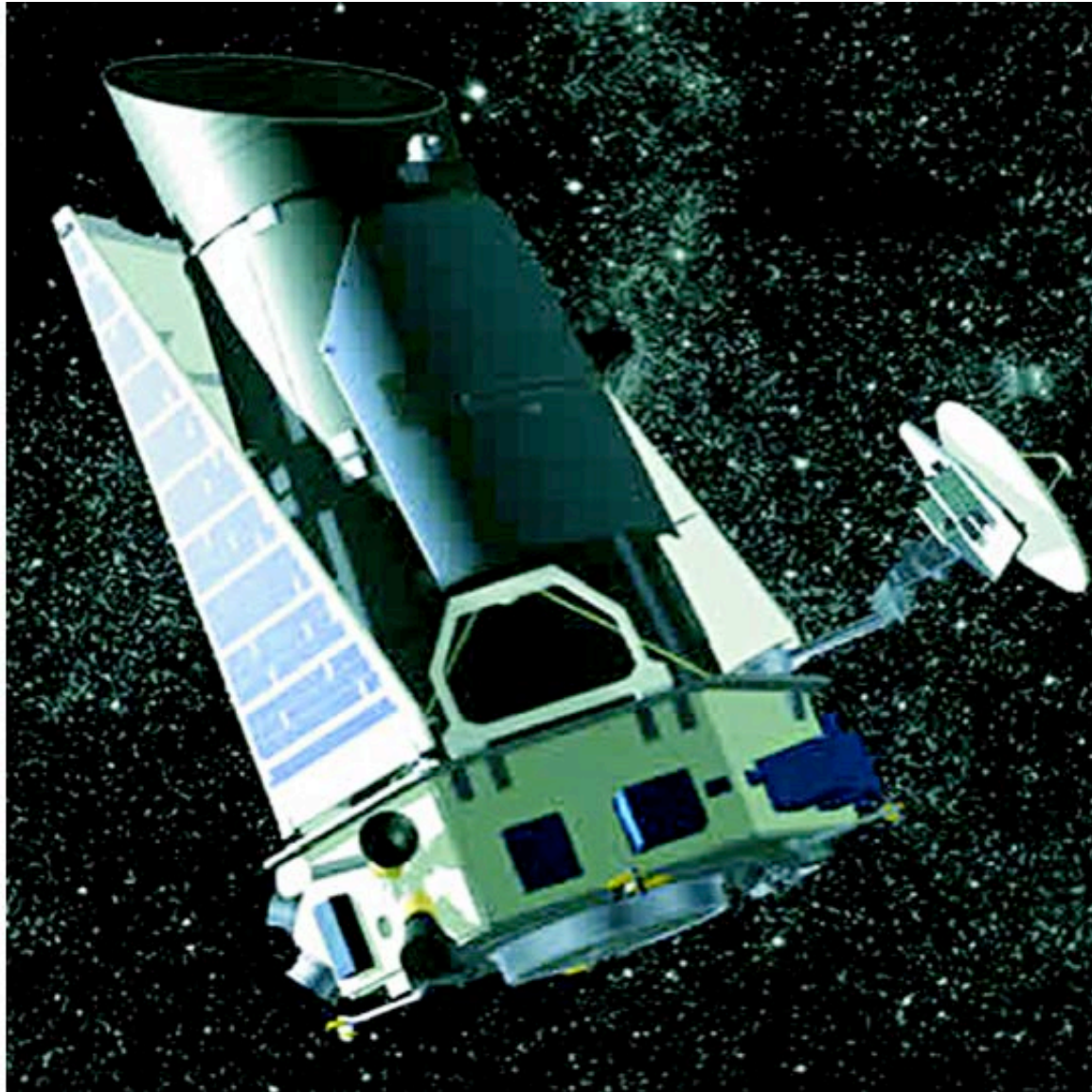
**Durée de vie:** 6 ans

**Premiers résultats:**

20 exoplanètes très différentes,  
dont l'une très proche de son étoile  
+ des dizaines de candidats...



# L'après COROT: Kepler, Plato



# Comment rechercher la vie sur les exoterres?

- Un facteur favorable (sinon déterminant): la présence d'eau liquide
- Définition d'une « zone d'habitabilité » autour de chaque étoile, où l'eau peut être sous forme liquide (T de l'ordre de 0-100° C)
- Exploration des exoterres « habitables »
- Recherche de signatures spectrales: H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, O<sub>3</sub>, CH<sub>4</sub>
- Intérêt du domaine infrarouge: meilleur contraste planète/étoile, signatures spectrales plus intenses

# Le futur: la caractérisation spectrale de l'atmosphère des exoplanètes

La méthode: détection des transits secondaires  
-> spectroscopie IR des atmosphères (NWST, EChO)

-Recherche des traceurs possibles de vie:

$O_3$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$

