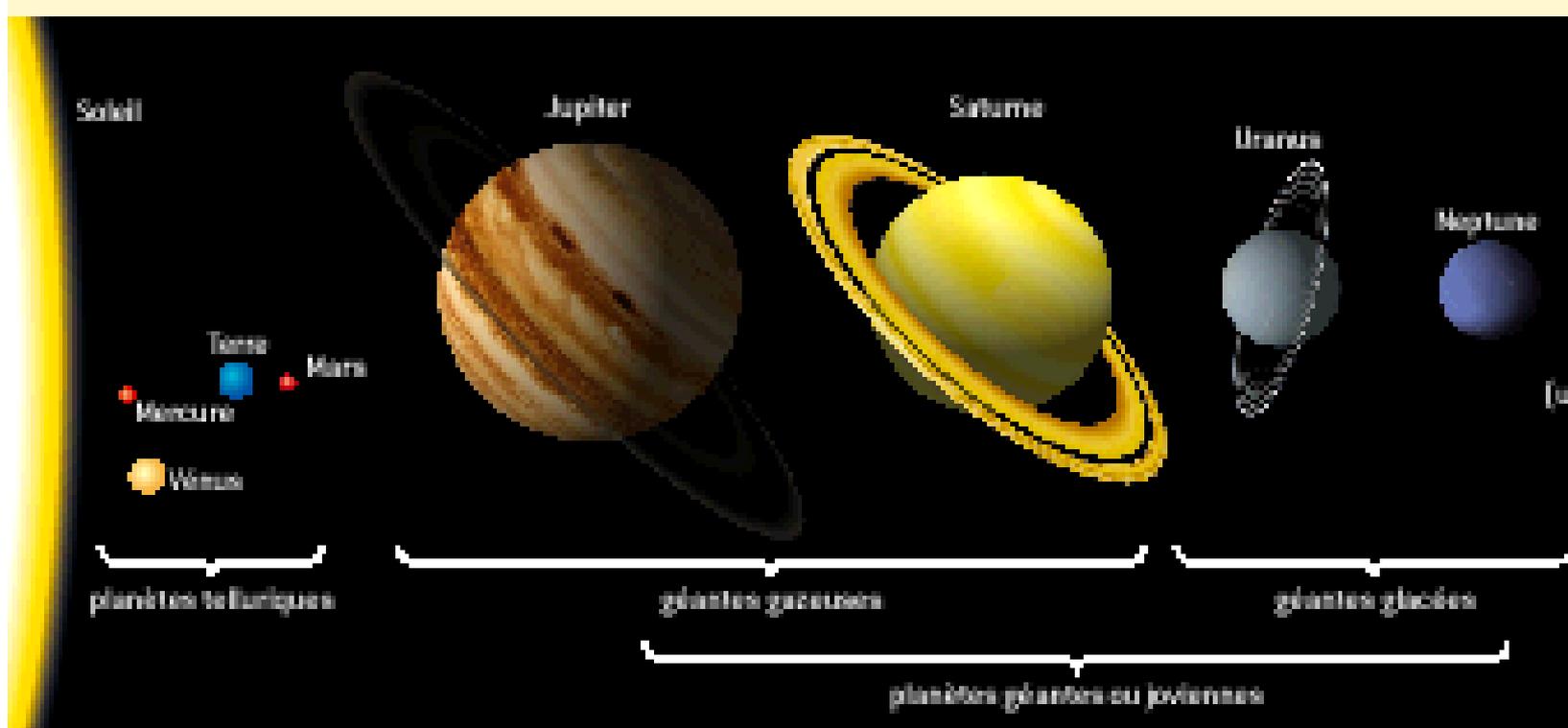


Les planètes géantes et leur système



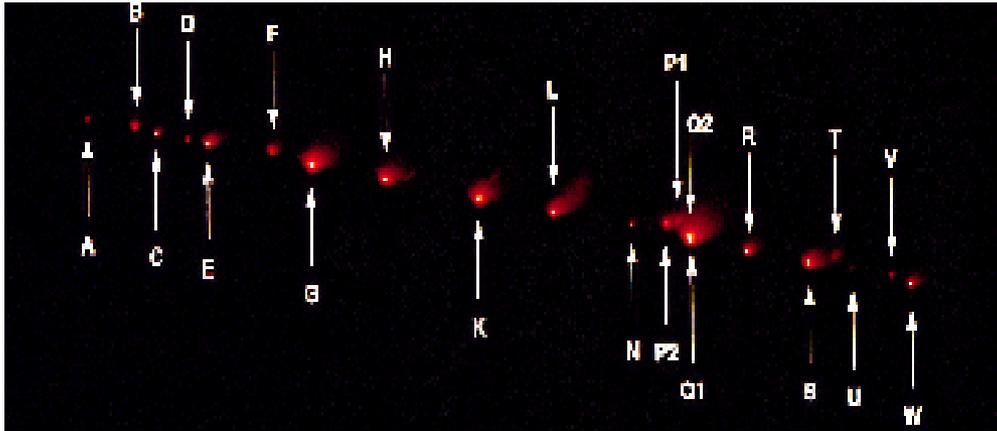
Jupiter et Saturne: géantes gazeuses ($318-95 M_T$)
Uranus et Neptune: géantes glacées ($14-17 M_T$)

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

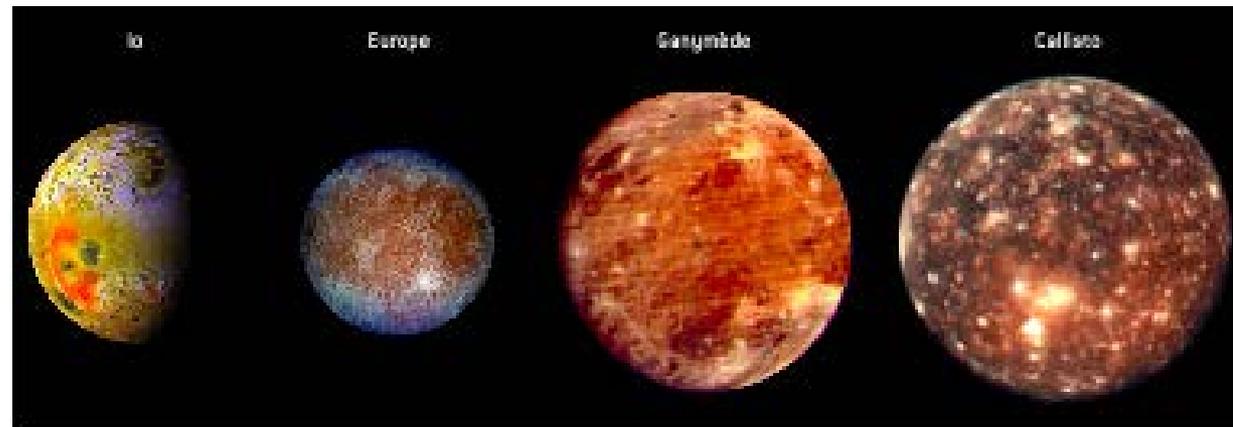
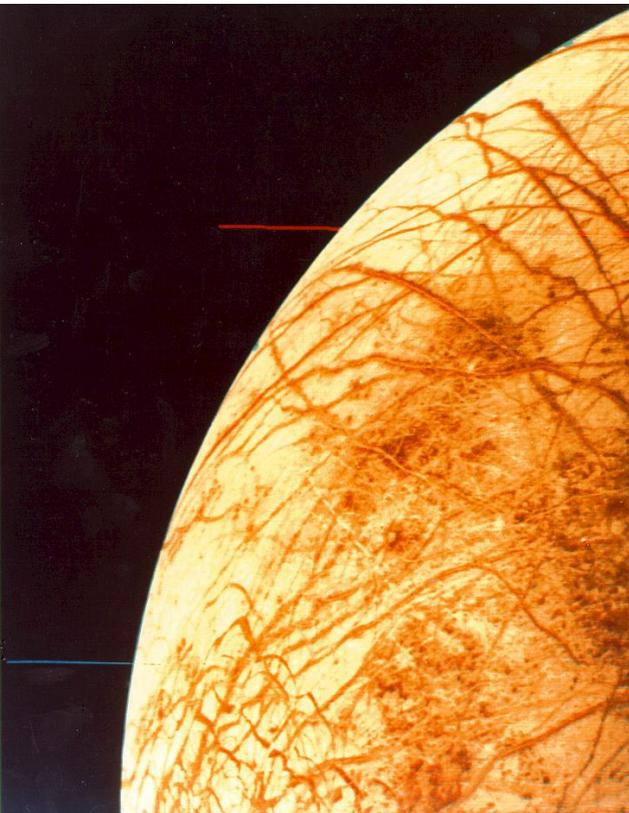
1994: Collision de la comète Shoemaker-Levy 9 avec Jupiter



-> Injection de l'eau dans la haute atmosphère

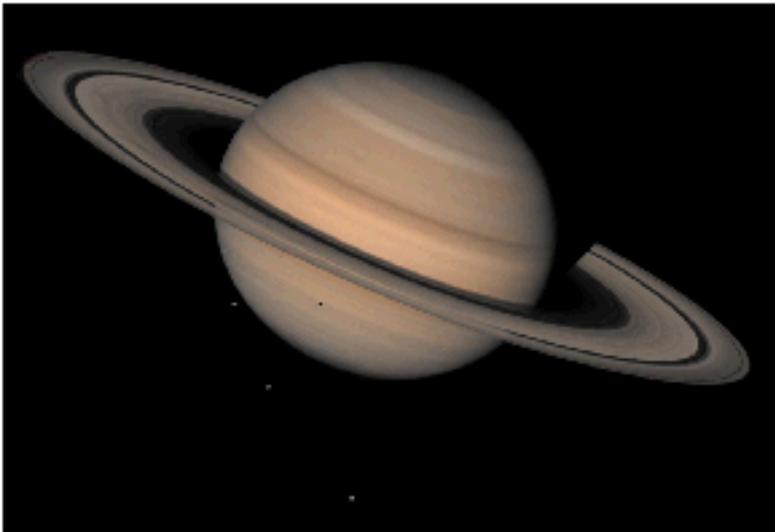
Les satellites galiléens:

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



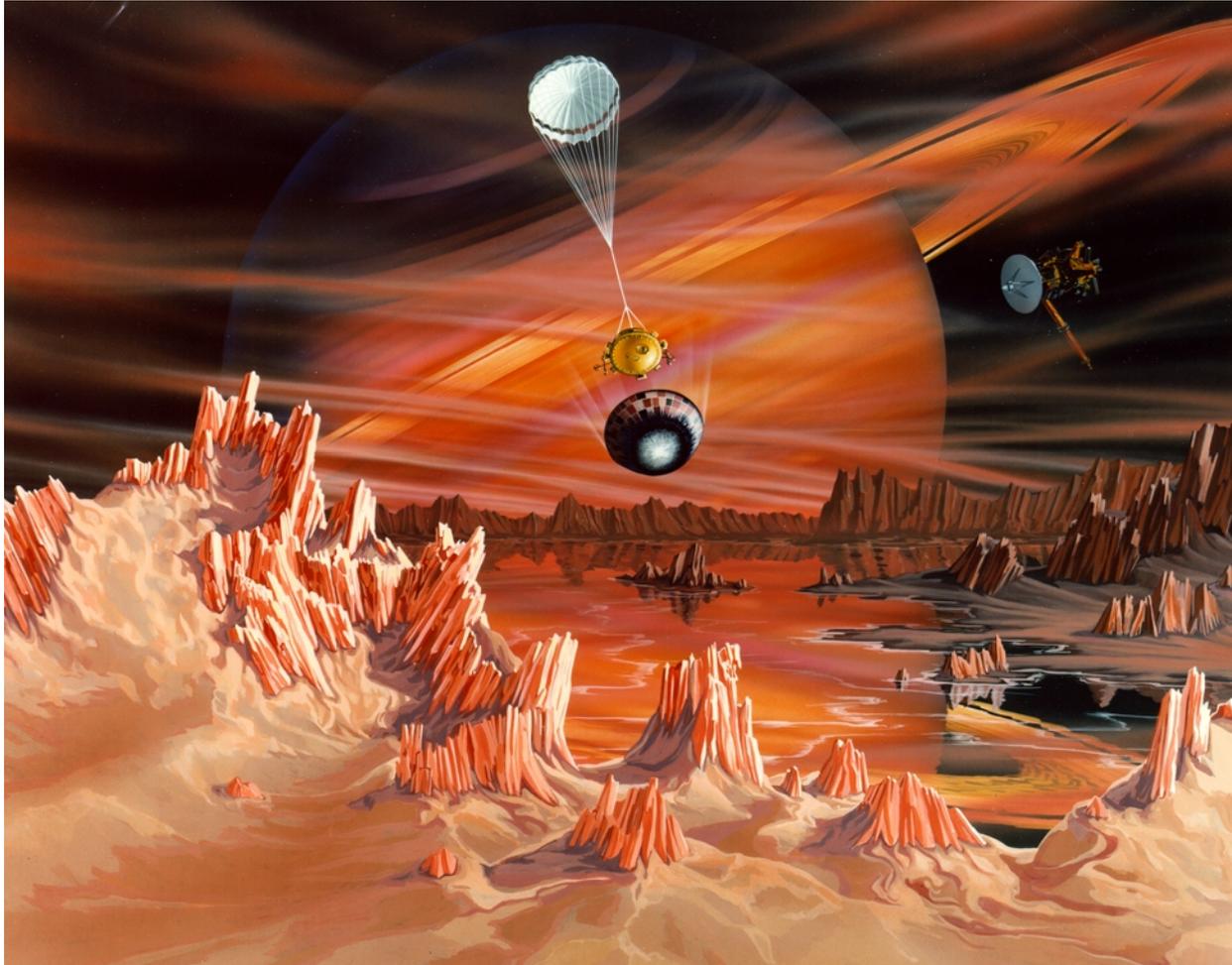
Europe : une cible de choix pour l'exobiologie
(l'océan liquide pourrait être en contact avec le sol silicaté)

Saturne, le seigneur des anneaux



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

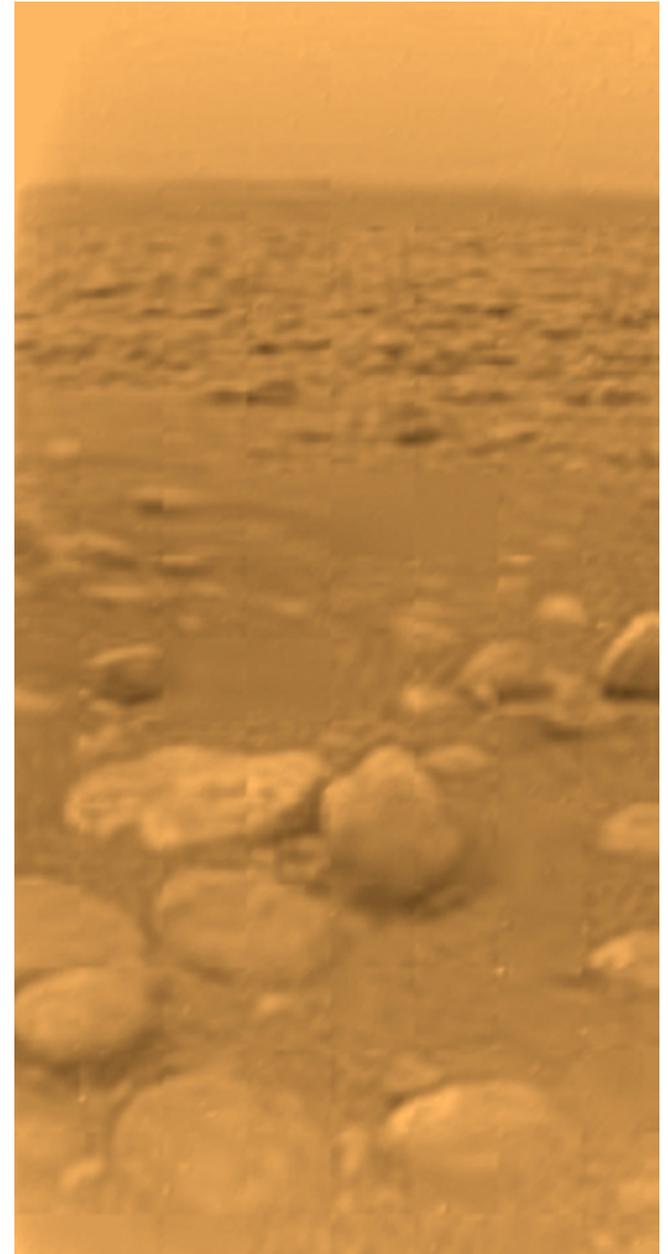
L'exploration de Titan par la mission Cassini-Huygens: Ce que l'on attendait....



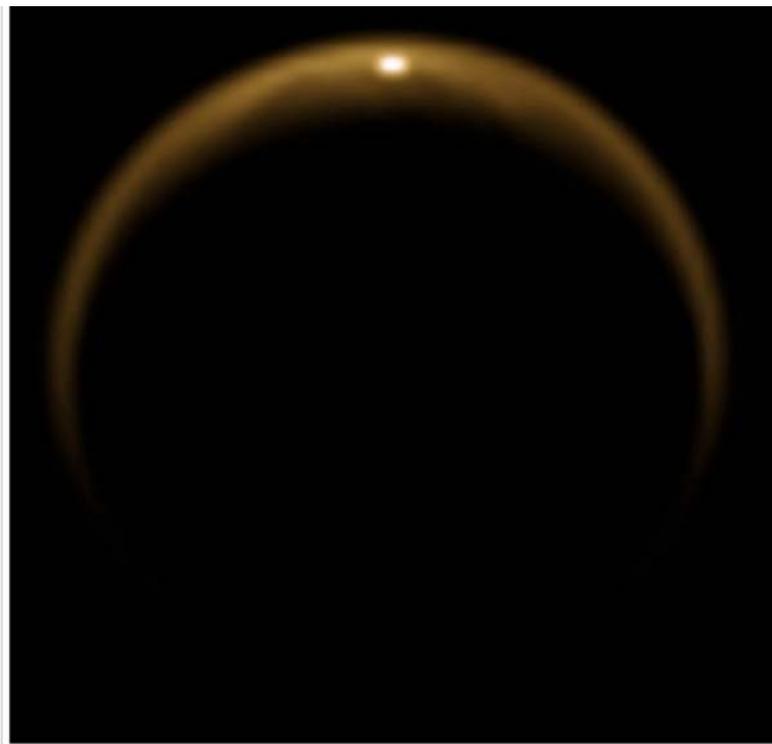
... et ce que l'on a vu
(descente de la sonde
Huygens le 14 janvier 2005):

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!

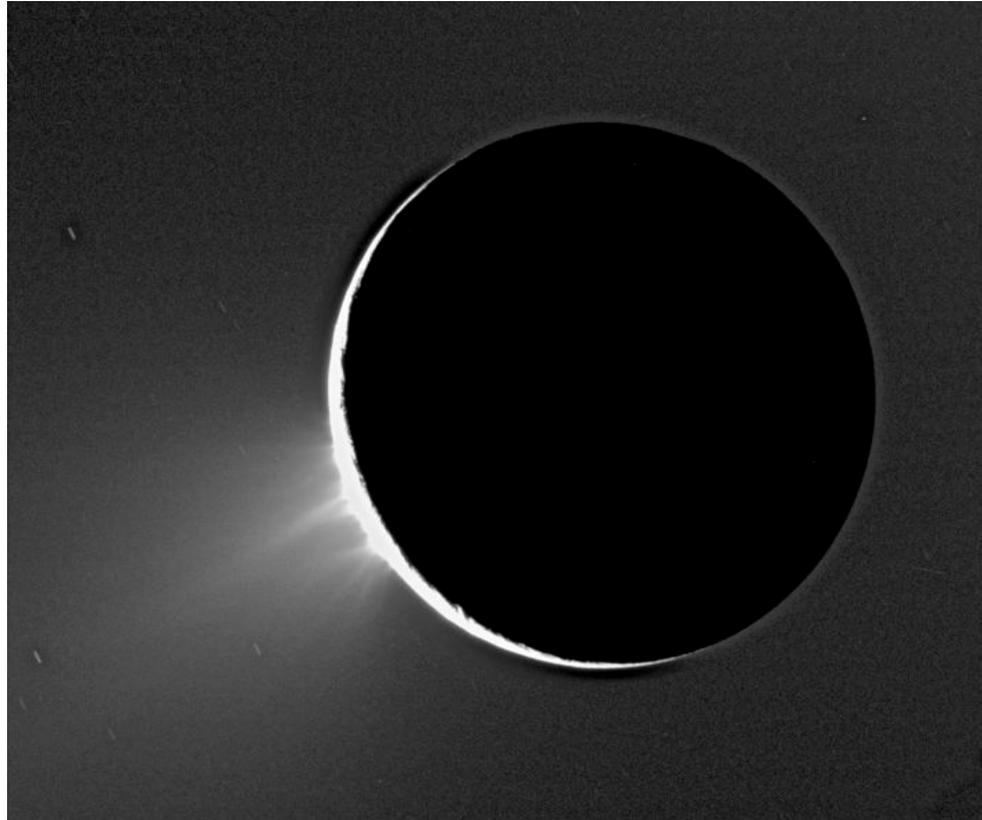


VIMS: Image de réflexion spéculaire près du pôle Nord (© NASA/Cassini)



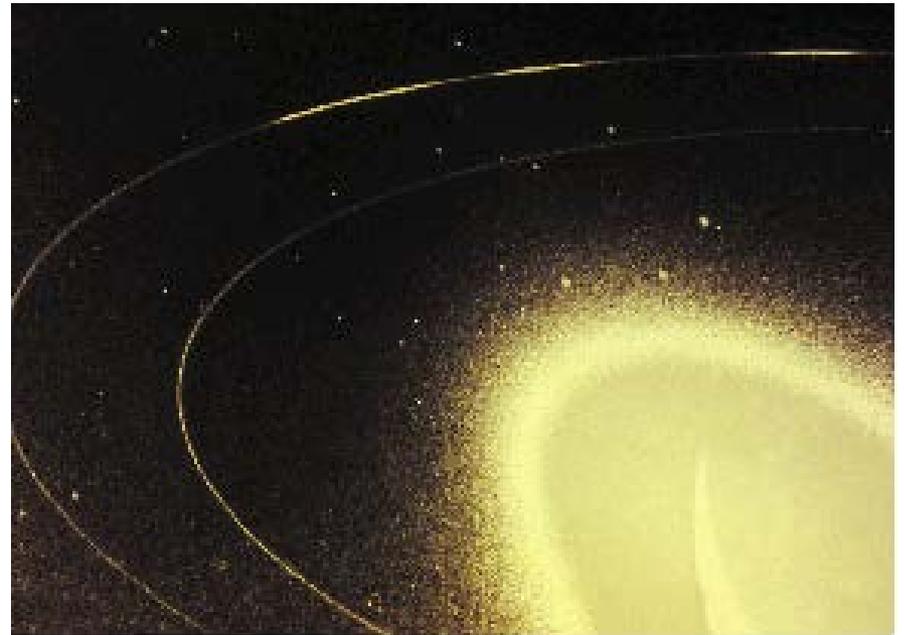
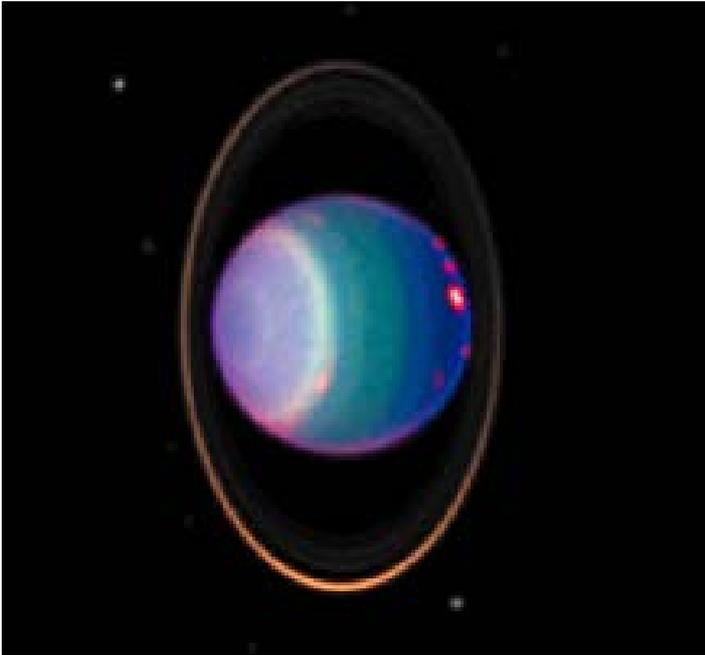
Radar: Détection d'un lac (Kraken Mare, région polaire Nord comparée au lac Ontario)(©Cassini)

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° C

1 bar, 15° C
 -50° C

6 mbar,

Des atmosphères primitives comparables
mais des destins très différents

L'atmosphère de Vénus

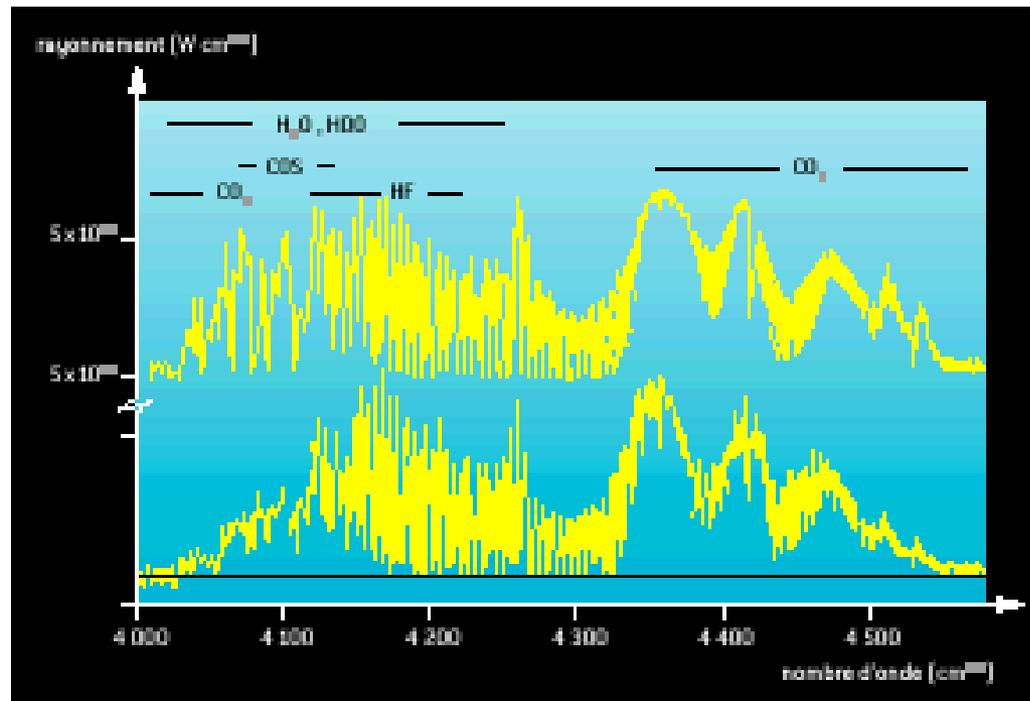
- Atmosphère très dense et très chaude: $T_s = 730 \text{ K}$, $P_s = 93 \text{ bars}$
- Composition dominée par CO_2 (97%) et N_2 (3%) + traces de SO_2 , H_2S , CO , H_2O , OCS
- Epais couches nuageuses de H_2SO_4 entre 40 et 60 km d'altitude, opaques au rayonnement visible

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 CO_2 et H_2O

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
(H₂O dissociée en H et O)

La planète Mars

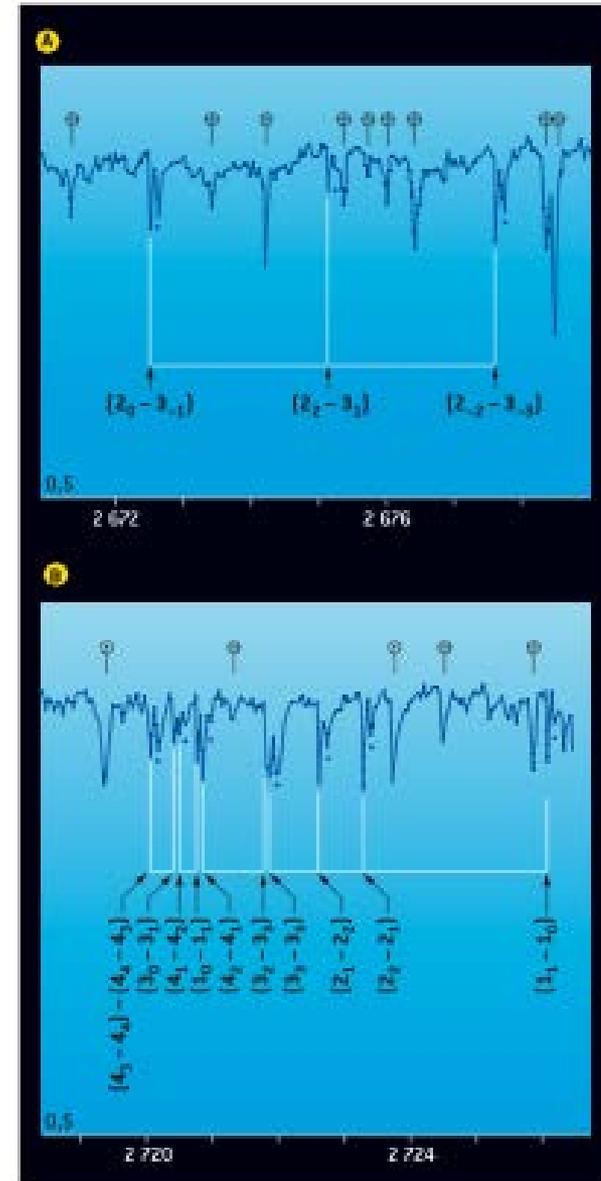
- Une autre voisine de la Terre:
- $R_h = 1.5 \text{ UA}$, $R = 0.6 R_T$,
- $d = 3.9 \text{ g/cm}^3$, $M = 0.1 M_T$
- Forte obliquité (24°) \rightarrow effets saisonniers comparable à ceux de la Terre
- Atmosphère froide et ténue de CO_2 (95%) + N_2 (3%) + traces de H_2O et CO
- $P_s = 0.006 \text{ bars}$, T_s (moyen) = 220 K avec de fortes variations saisonnières
- Calottes polaires de CO_2 et H_2O

L'eau lourde dans l'atmosphère de Mars

-Observation de raies
HDO à 3.7 μm
(Hawaii, 1989)
-> mesure de HDO

-Comparaison à H₂O
(estimé indépendamment)
-> $[\text{D}/\text{H}]_{\text{M}} = 5 [\text{D}/\text{H}]_{\text{T}}$

-Interprétation: dégazage
de H₂O 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 (CO_2 , N_2 , H_2O)
- Une température permettant la présence d'eau liquide -> CO_2 piégé dans les océans sous forme de CaCO_3 (calcaire)
- Apparition de la vie -> accumulation de O_2 et formation de la couche d'ozone

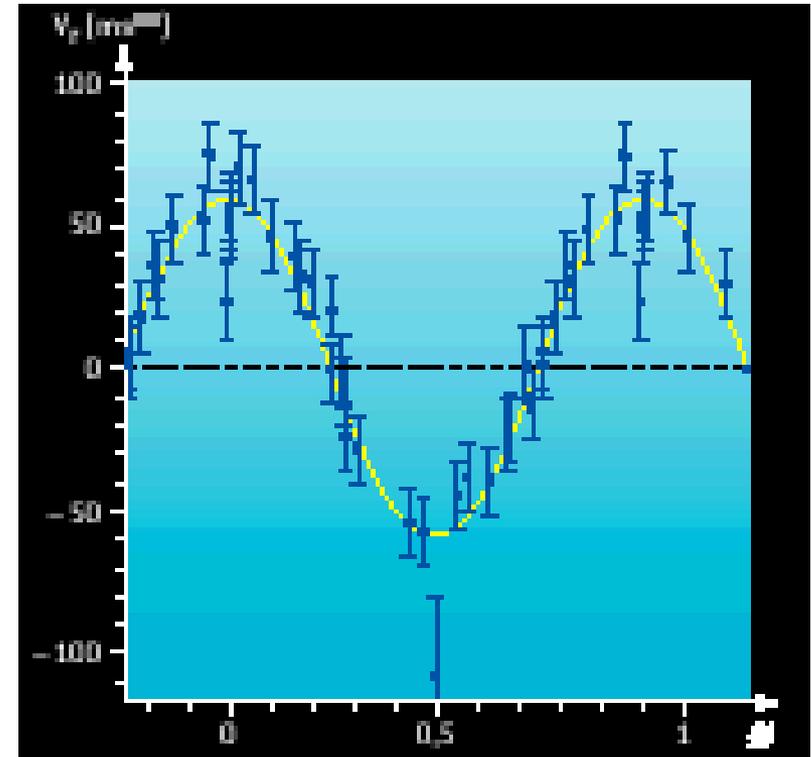
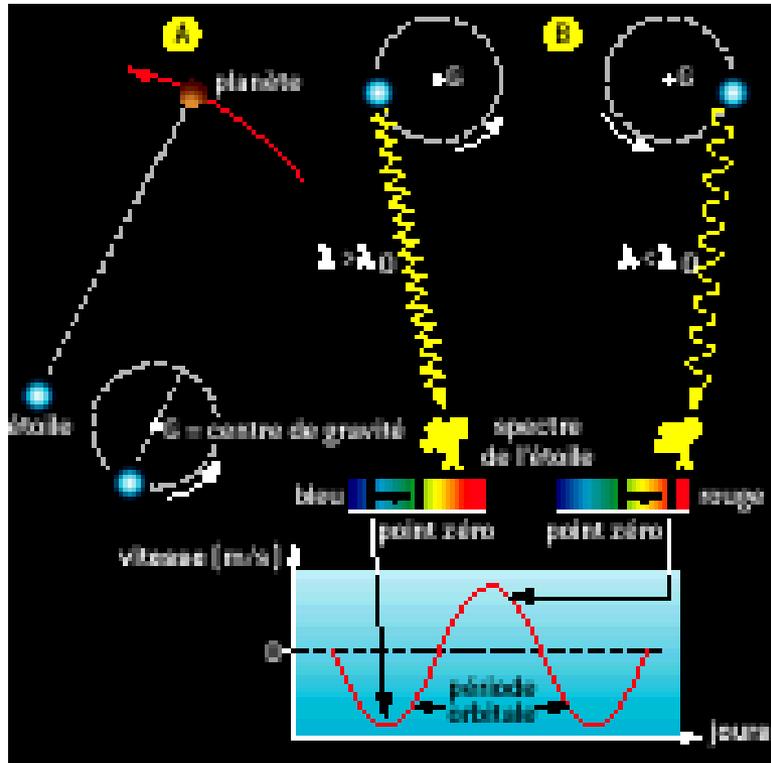
Vénus, la Terre, Mars: pourquoi des destins divergents?

- Des atmosphères primitives de composition comparable: CO_2 , N_2 , H_2O mais....
- **Sur Vénus:** H_2O d'abord liquide puis vapeur: atmosphère massive de CO_2 et H_2O -> effet de serre galopant-> élévation de température et disparition de l'eau
- **Sur la Terre:** l'eau est sous forme liquide -> 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
 - H_2O sous forme de glace ou de pergélisol

La recherche de l'eau dans les planètes extrasolaires

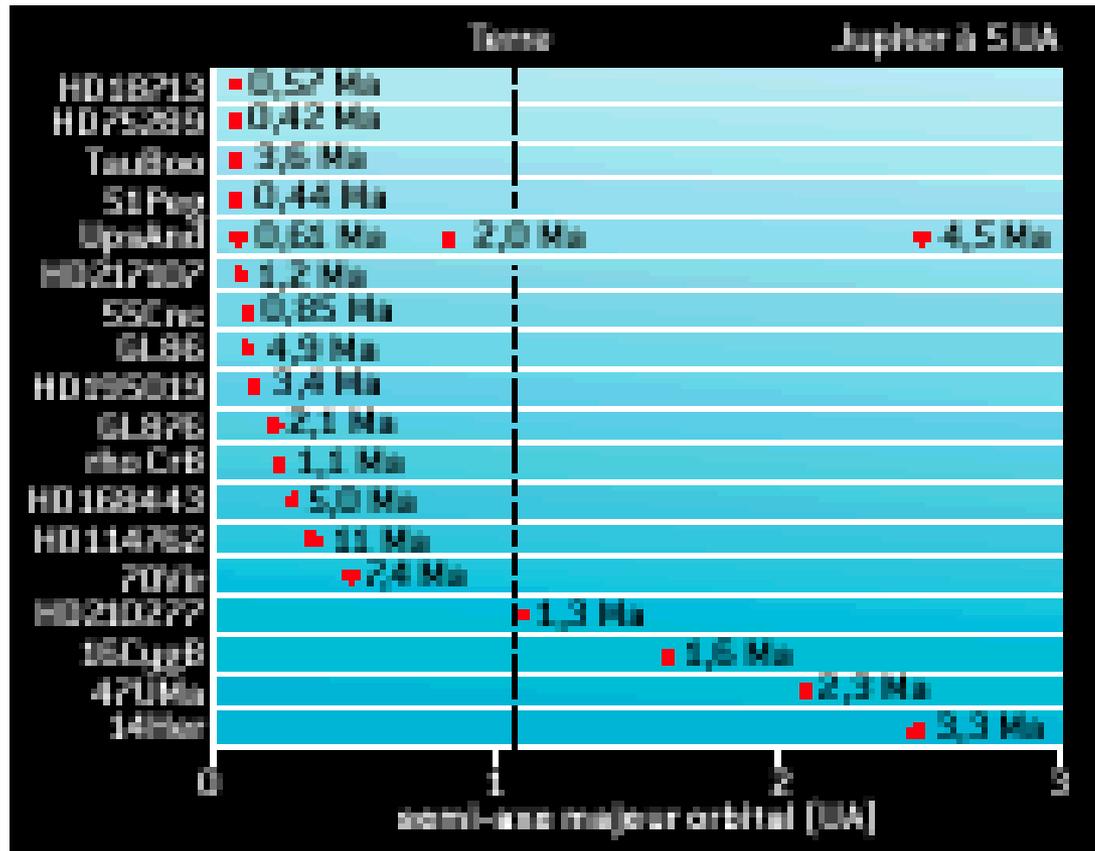
- Depuis 1995: près de 500 planètes extrasolaires (« exoplanètes ») découvertes autour d'étoiles proches
- Méthode utilisée: **vélocimétrie** (mesure du déplacement de l'étoile autour du centre de gravité du système)
- Pour l'instant: les exoplanètes détectées par vélocimétrie sont surtout des géantes
- 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!



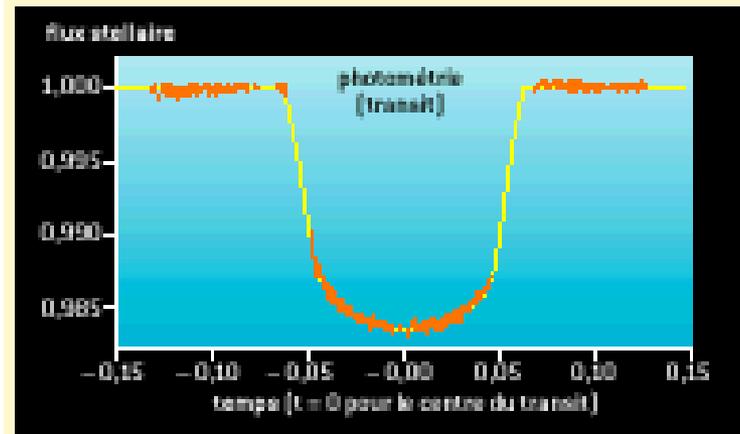
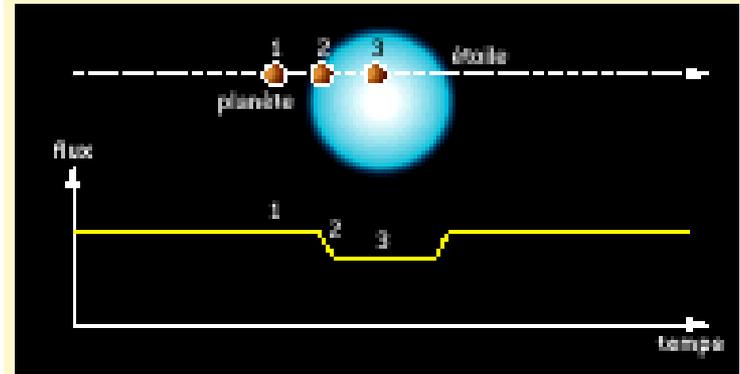
Le modèle de formation des exoplanètes est différent de celui du système solaire!

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)

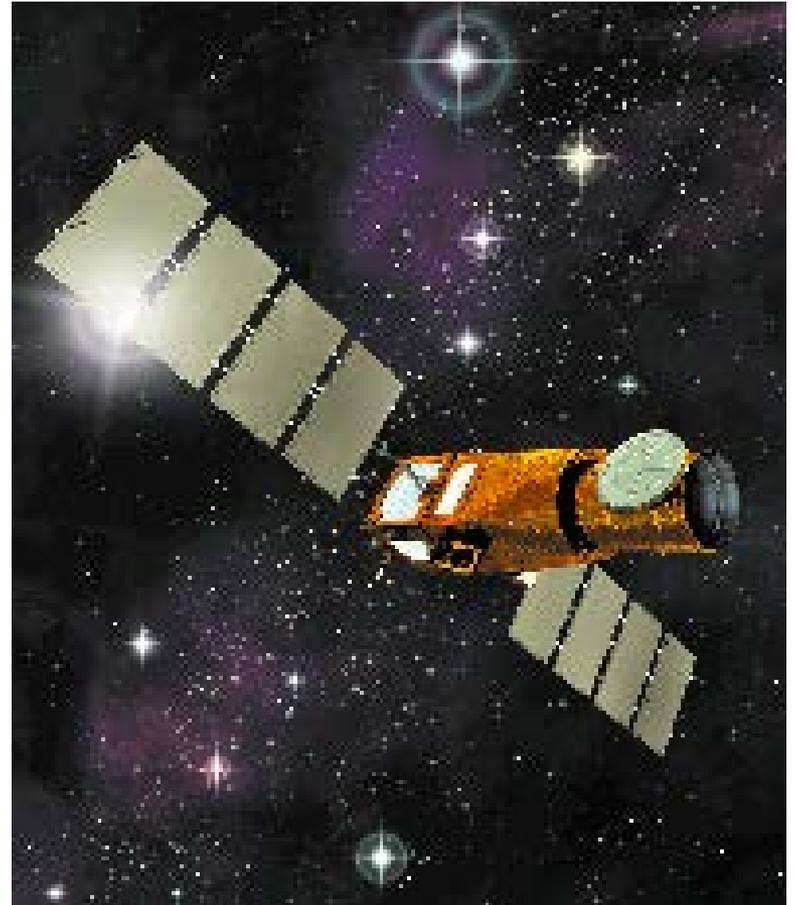
Objectif: recherche des exoterres par observation photométrique de champs stellaires

Lancement: 27 décembre 2006

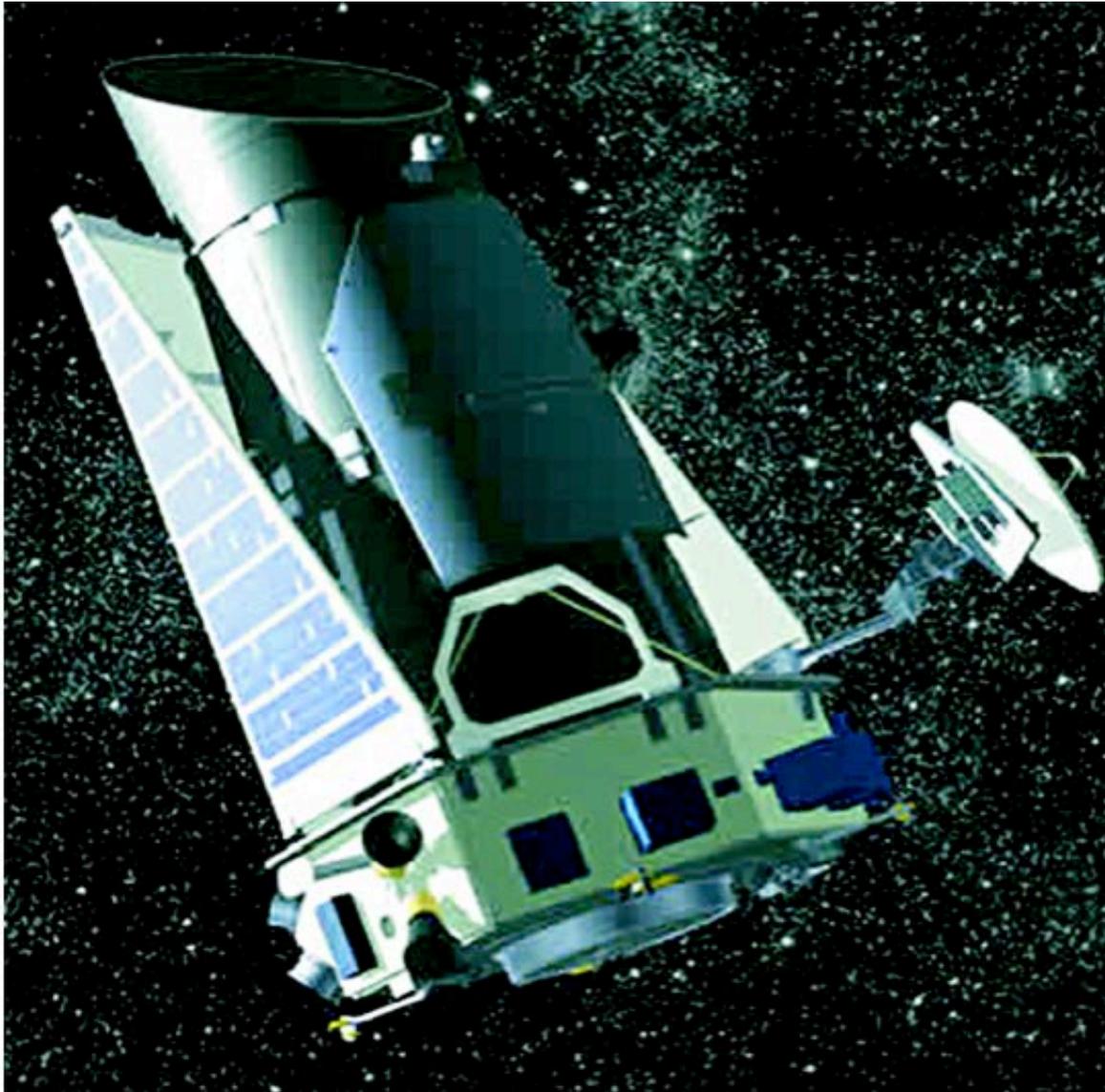
Durée de vie: 6 ans

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: H₂O, O₂, O₃, CH₄
- 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

