



La recherche de la vie dans l'Univers: 50 ans d'exploration spatiale

Pierre Encrenaz
Observatoire de Paris
Académie des Sciences



De nombreuses questions...

- Comment les éléments chimiques se sont-ils formés?
- Comment le Système solaire s'est-il formé?
- Quelles sont les conditions nécessaires à la vie?
- Peut-on espérer trouver une vie extraterrestre dans le système solaire?
- ... et ailleurs autour d'autres étoiles?
- > La révolution des exoplanètes:
 - Comment peut-on les découvrir?
 - Comment connaître leur atmosphère?
 - Où et comment rechercher des traces possibles de vie?

L'origine des éléments: un peu d'histoire

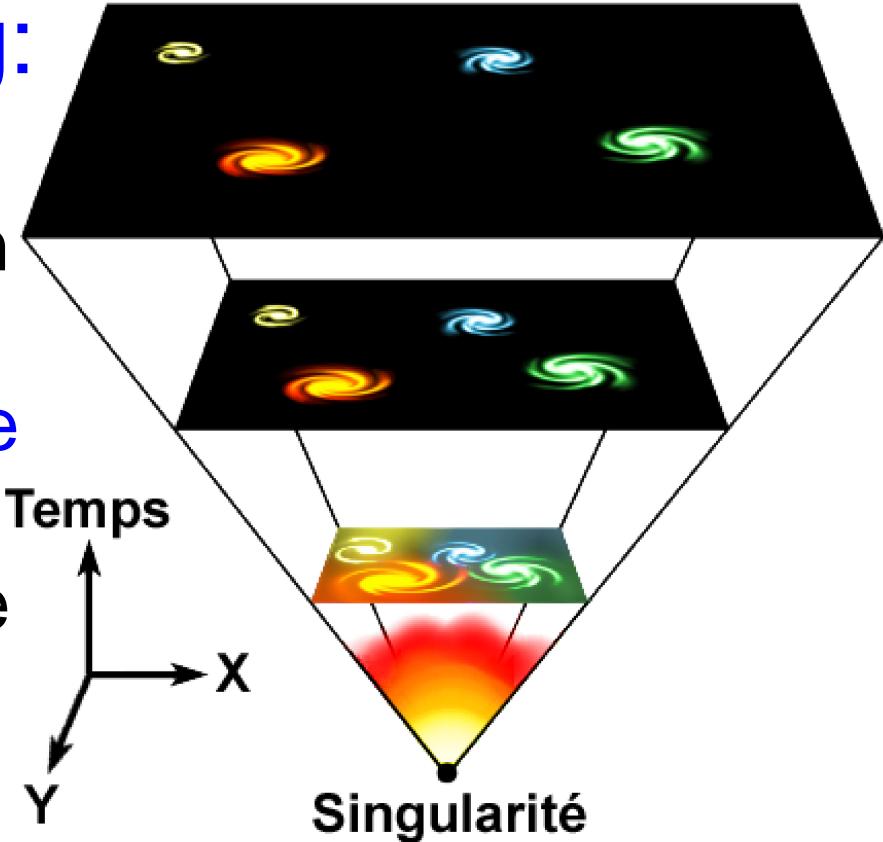
- Premiers éléments de réponse: l'étude du Soleil (début XXème siècle)
 - > L'hydrogène est l'élément prépondérant
 - > Plus un atome est lourd, moins il est abondant
- 1939 (H. Bethe): Analyse des réactions de fusion
 $H \rightarrow He$, puis fusion CNO
- 1957 (A. Cameron, Burbidge et al.):
Cette fusion se produit au centre des étoiles (**nucléosynthèse stellaire**)



Comment l'Univers est-il né?

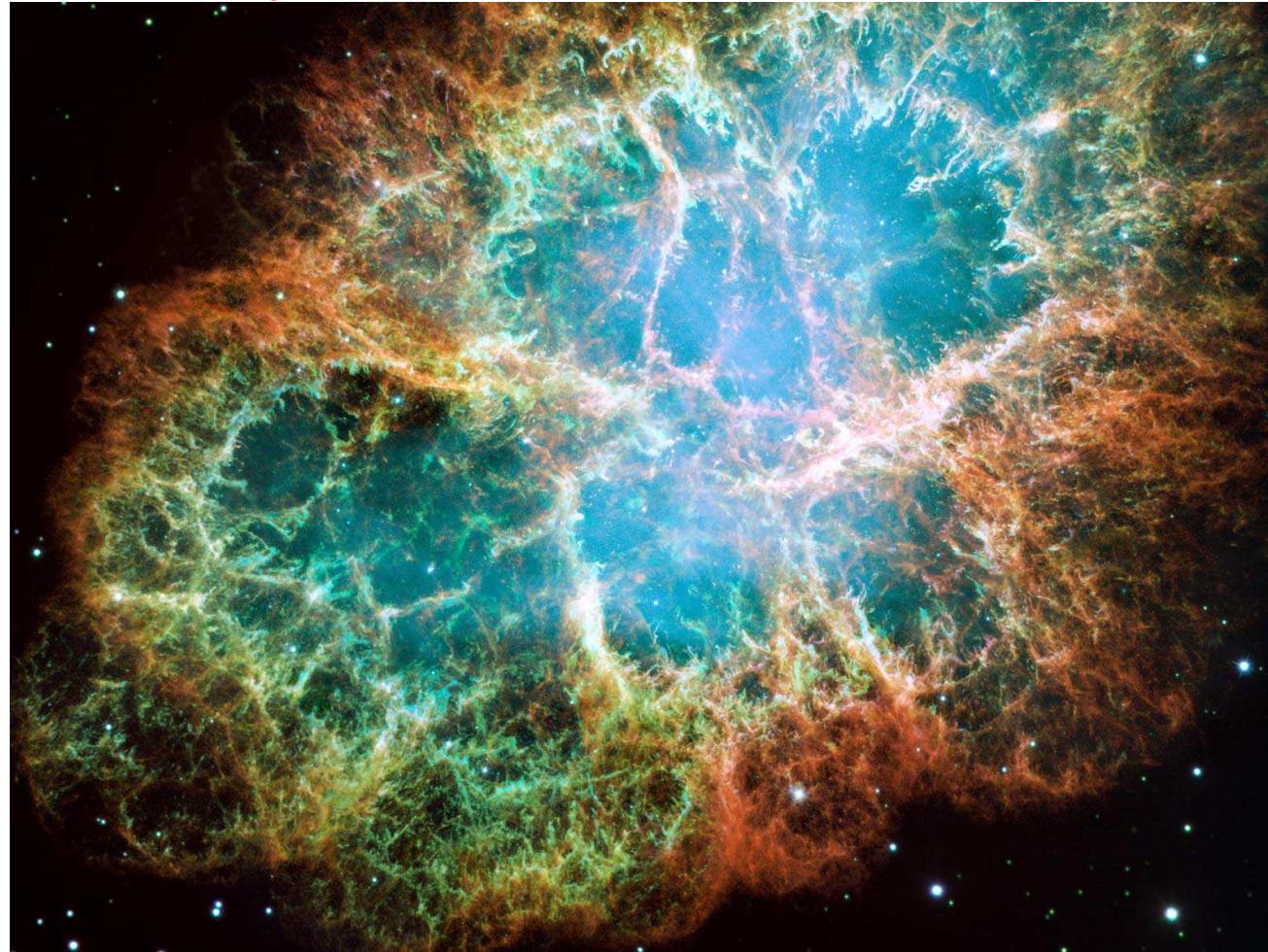
La théorie du Big Bang:

L'Univers est né il y a environ 13 milliards d'années, suite à une « explosion » primordiale ($T = 5$ milliards de degrés) suivie d'une expansion qui se poursuit encore de nos jours



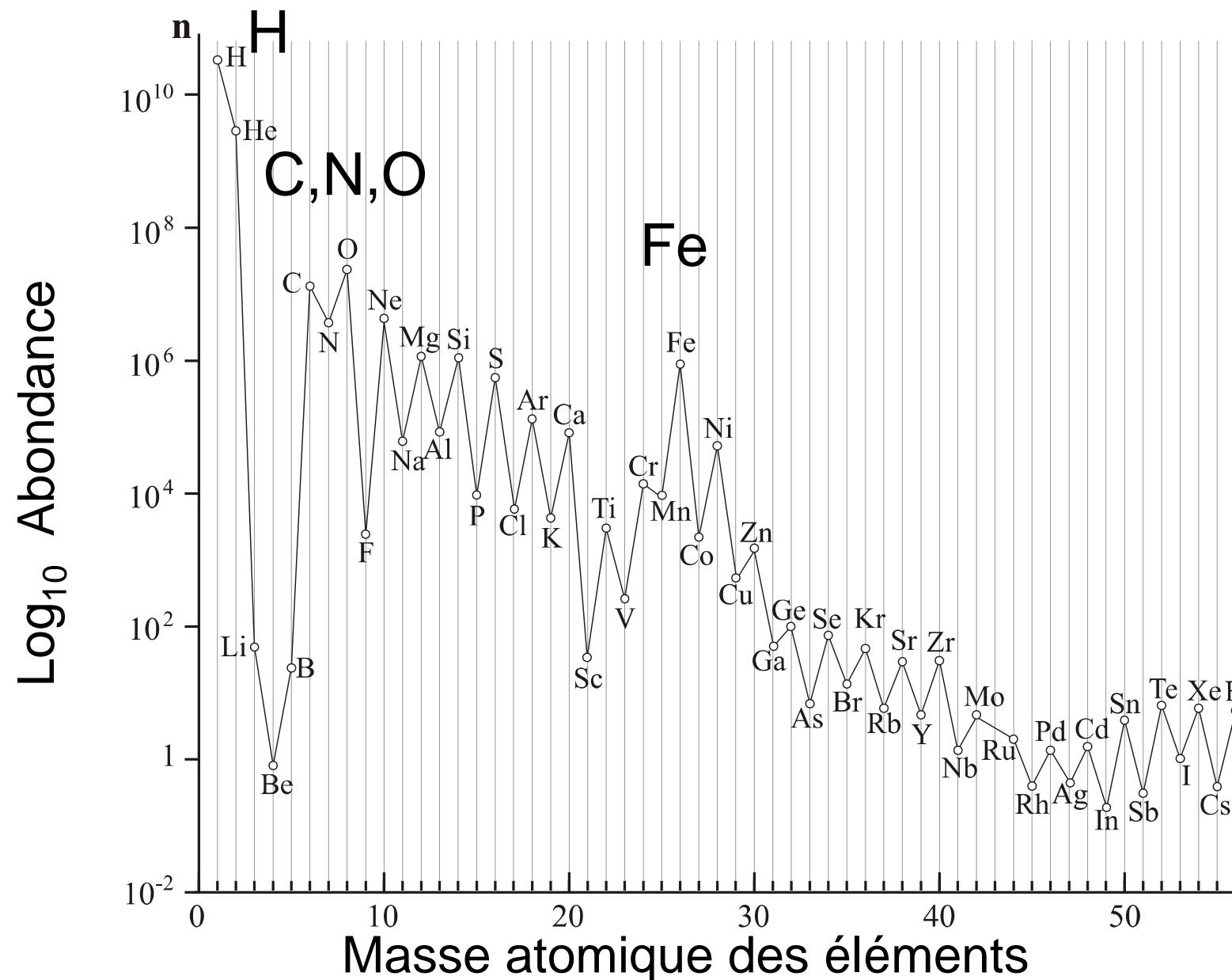
- > Les galaxies s'éloignent les unes des autres
- > Les éléments les plus légers (H, He) sont formés au moment du Big Bang (**nucléosynthèse primordiale**)

Explosion d'une supernova (étoile en fin de vie):



Expulsion des atomes lourds dans le milieu interstellaire,
puis incorporation dans de nouvelles étoiles

Les abundances cosmiques des éléments chimiques



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



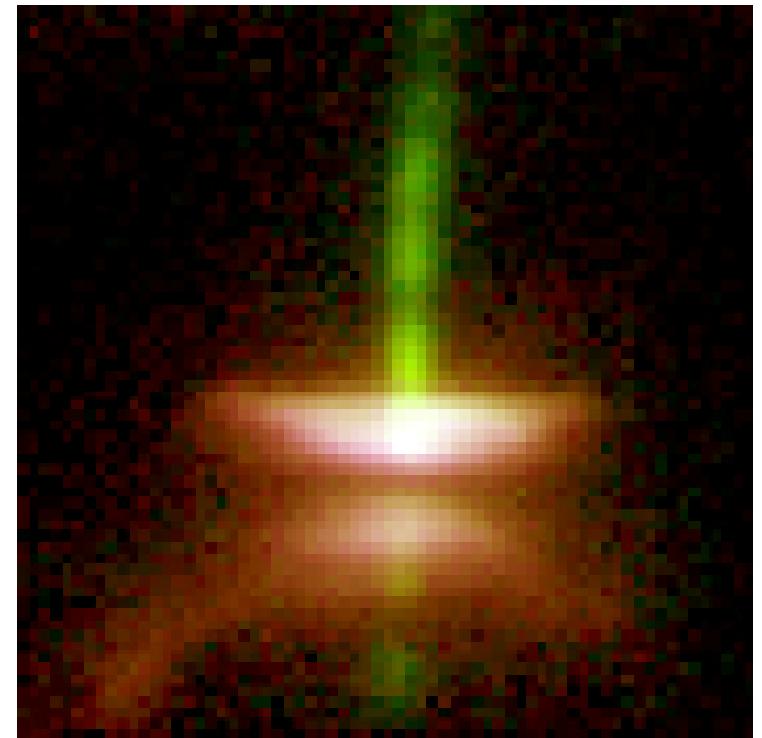
Le système solaire: Notre système solaire est un laboratoire naturel, sur une grande échelle, dans lequel nous cherchons à percer les mystères de l'univers.
Selectionnez un astre pour en apprendre plus.

- 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

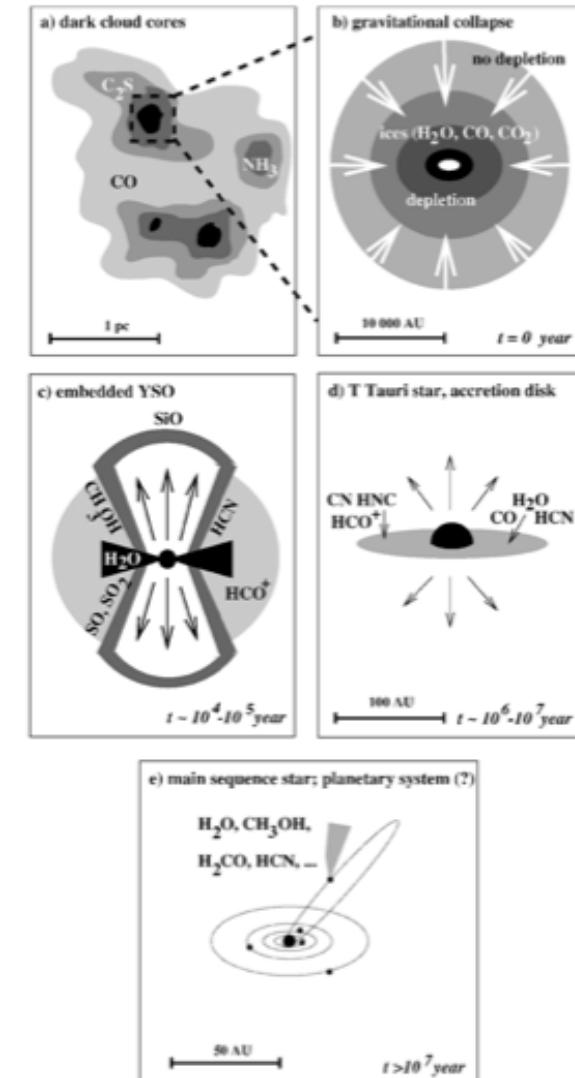
- Observation au sol et dans l'espace d'étoiles jeunes ou en formation
- Mise en évidence de disques et d'émission de jets bipolaires
- Observation de phases d'activité intense (phase T-Tauri) chez les étoiles jeunes



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

Les grandes lignes du modèle d'effondrement

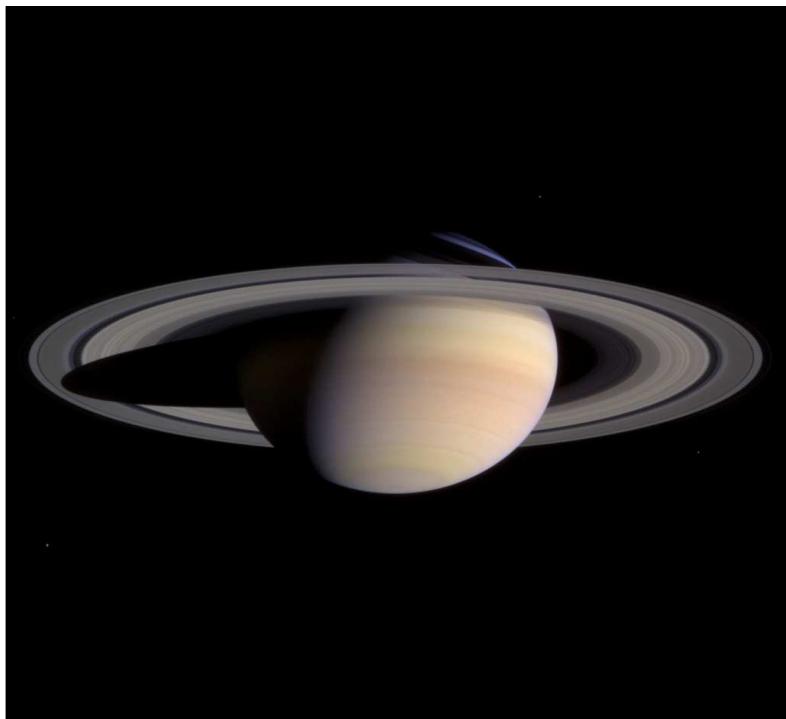
- **Contraction** d'un nuage protosolaire en rotation rapide
- **Effondrement** en un disque perpendiculaire à l'axe de rotation
- Apparition d'**inhomogénéités** au sein du disque turbulent
- **Agrégation** de particules **solides**
- Croissance des agrégats par le jeu des **collisions**
- Croissance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



Planètes telluriques et planètes géantes

- Planètes telluriques

- Forte densité: $3\text{-}5 \text{ g/cm}^3$
- Atmosphère peu massive
- Peu ou pas de satellites



- Planètes géantes

- Grand diamètre, faible densité ($0.7\text{-}1.7 \text{ g/cm}^3$)
- Atmosphère massive, dominée par H_2 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 (>200 K environ) seuls les silicates et les métaux sont sous forme solide -> faible masse solide disponible -> **planètes telluriques**
- Loin du Soleil, les éléments H_2O , CH_4 , NH_3 ... 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**

Pourquoi deux classes de planètes géantes?

- **Jupiter et Saturne:** (5 - 10 UA)

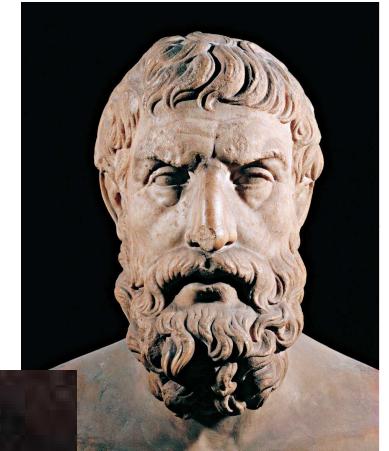
- Grande masse disponible (juste au-delà de la ligne des glaces) -> $100-300 M_{\odot}$
- Croissance rapide (quelques Ma)
- Effondrement d'une grande masse de gaz -> géantes gazeuses



- **Uranus et Neptune:** (> 10 UA)

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

La recherche de la vie dans l'Univers: Une quête aussi vieille que l'humanité



Antiquité: Epicure (341-270 av. JC) croyait en une infinité de mondes

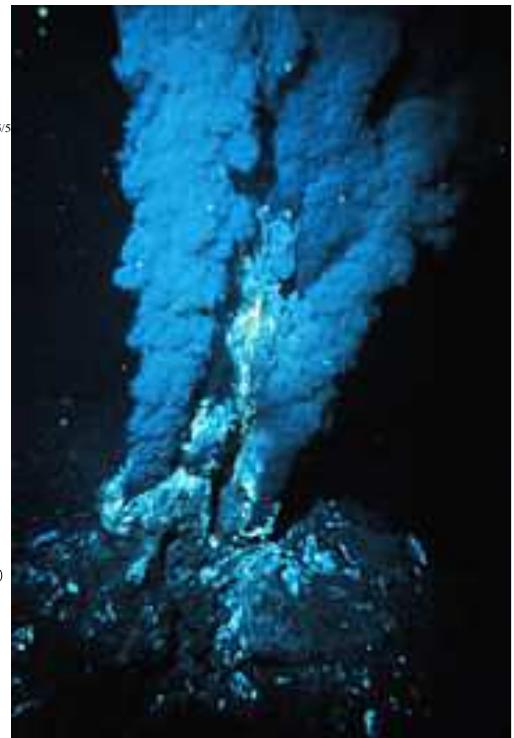
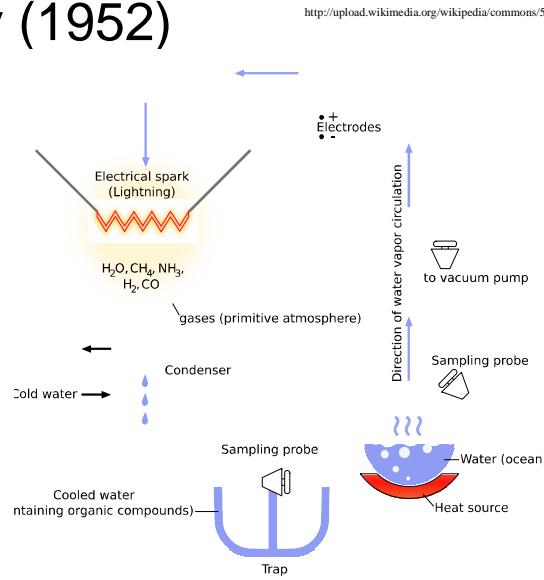
L'ère de Copernic: G. Bruno, Galilée, Huygens évoquent l'existence possible de systèmes stellaires



... et plus récemment :
Fontenelle, Kant, Laplace,
Flammarion soutiennent le concept de la pluralité des mondes

La vie dans l'Univers: L'approche scientifique

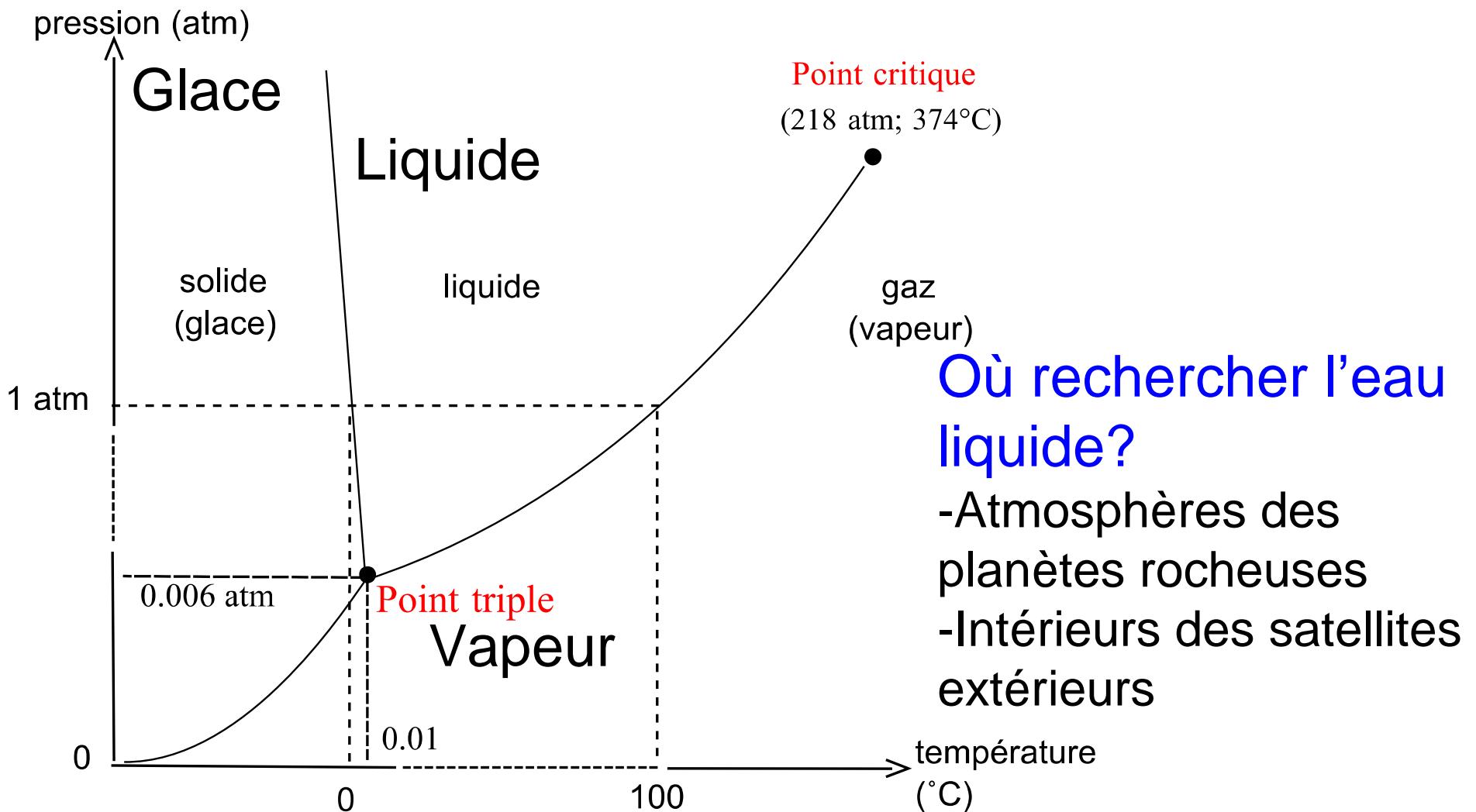
- Le concept d'une chimie prébiotique:
 - Oparine (1920), Miller & Urey (1952)
 - > synthèse en laboratoire d'acides aminés
- Une définition du vivant:
 - autoreproduction,
 - autorégulation,
 - évolution par mutation



L'apparition de la vie sur Terre:
une question ouverte
- apport externe de molécules prébiotiques?
- apparition au fond des océans?

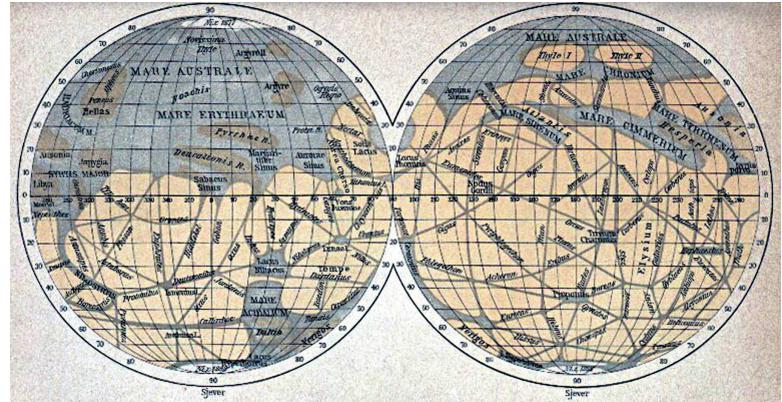
Eléments nécessaires:
eau liquide, carbone, source d'énergie

Dans quels environnements rechercher une vie extraterrestre?

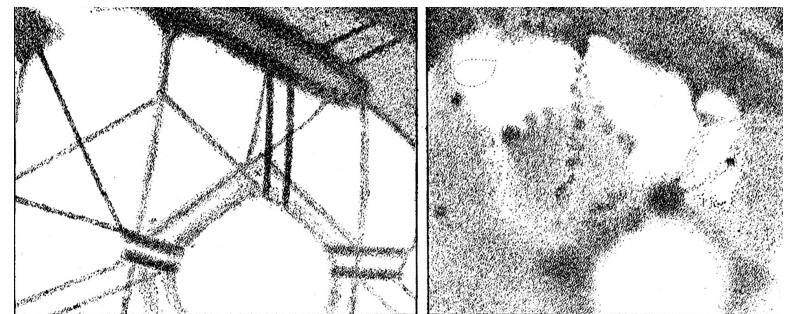


La vie dans le système solaire ? Le cas de Mars

- Une question ancienne...
 - En 1879, Schiaparelli croit détecter sur Mars des « canaux », signes d'une vie intelligente (hypothèse démentie par les observations d'Antoniadi en 1930)
- Une exploration spatiale soutenue depuis les années 1970: Mariner 9, Viking... (NASA)



Les canaux de Schiaparelli...
... et les images d'Antoniadi

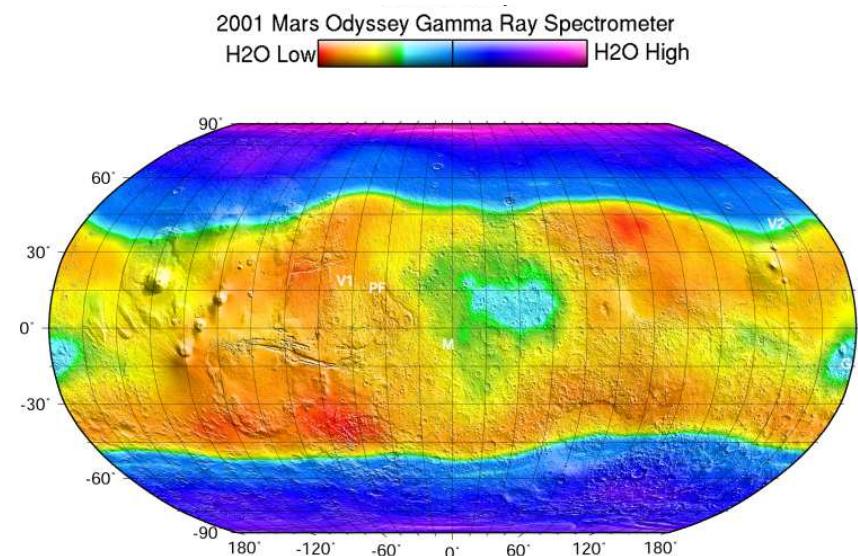


Dès les années 1970, des indices de la présence passée d'eau liquide sur Mars...



Viking (1976): réseaux de vallées ramifiés

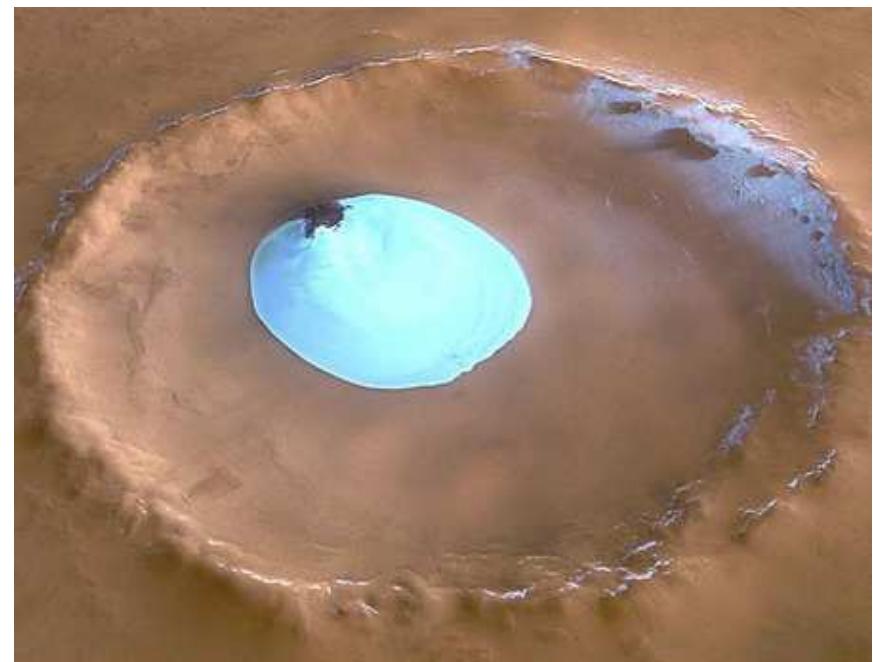
Mars Odyssey (2000): Présence d'atomes d'hydrogène sous les calottes polaires
-> Présence de glace H₂O/pergélisol



Comment rechercher la vie sur Mars?



2006: Le spectromètre OMEGA/Mars Express détecte des argiles dans les terrains anciens -> l'eau a coulé en abondance dans le passé

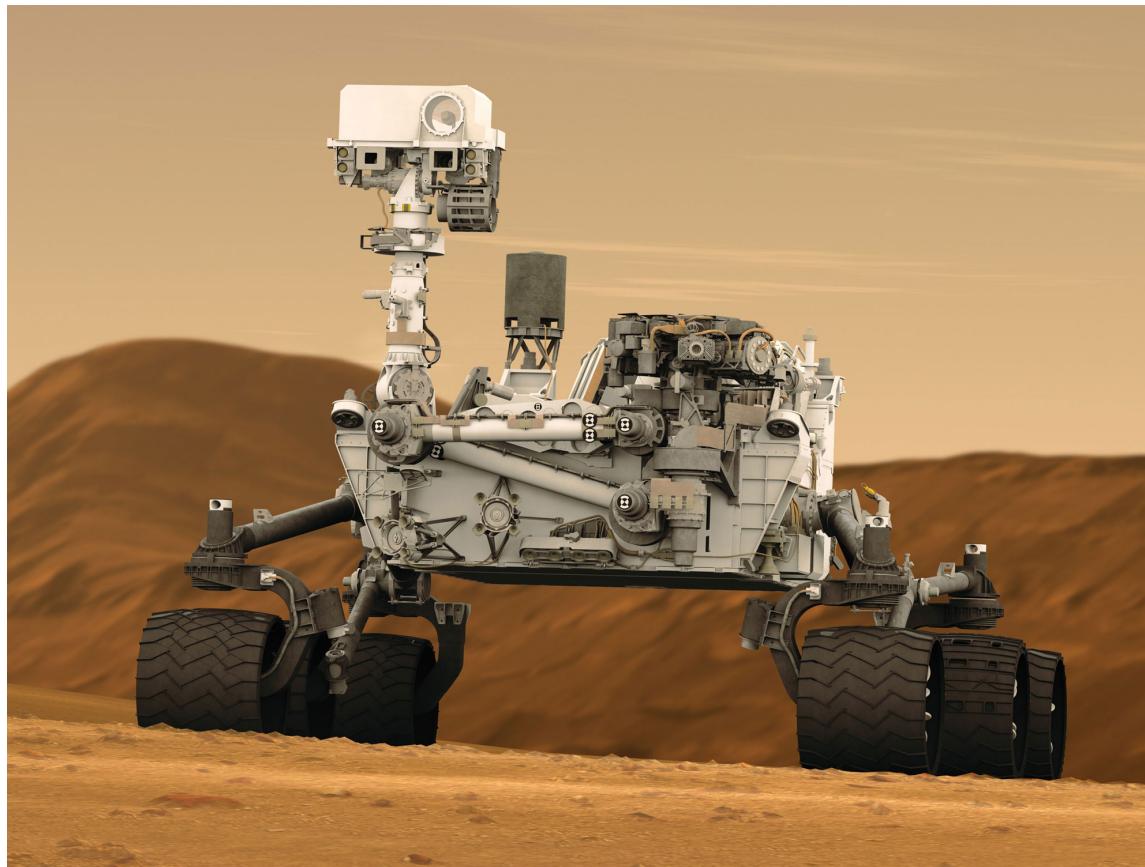


- La vie a-t-elle pu apparaître et se développer?
- Si oui, avons-nous une chance de trouver des traces fossiles?

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 en cours et à venir:
MSL/Curiosity, MAVEN, ExoMars, Retour d'échantillons)

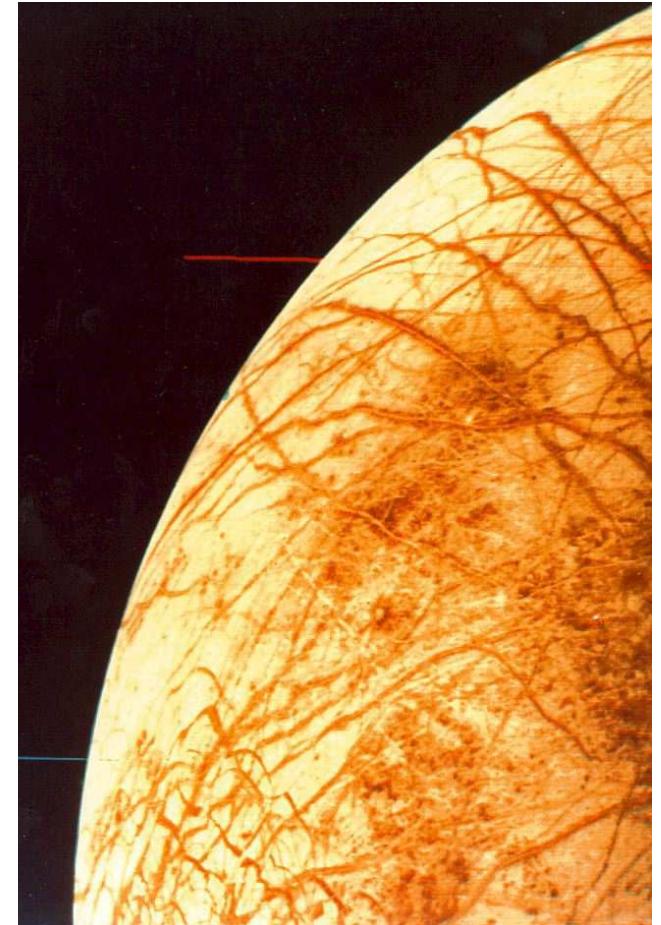
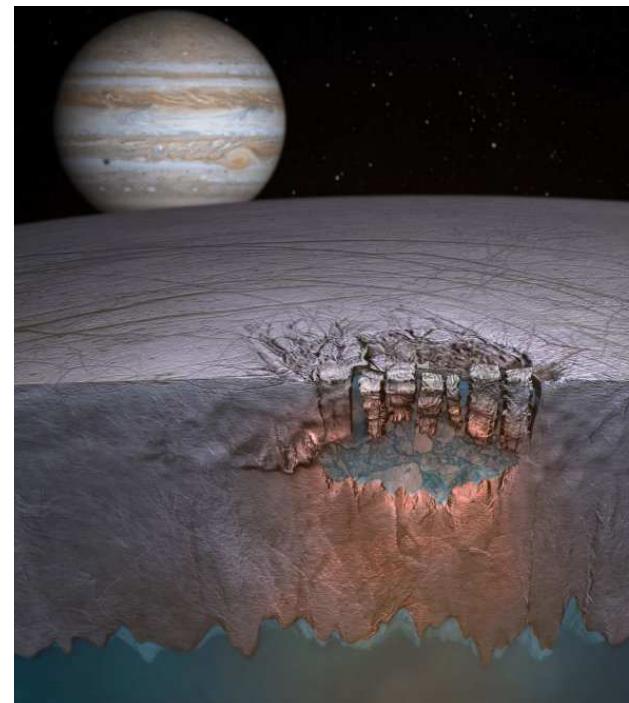
Le Rover MSL/Curiosity sur Mars (Août 2012 ->)



Recherche de molécules organiques
et de conditions favorables à une vie passée

La vie dans le système solaire ? Le cas des satellites extérieurs

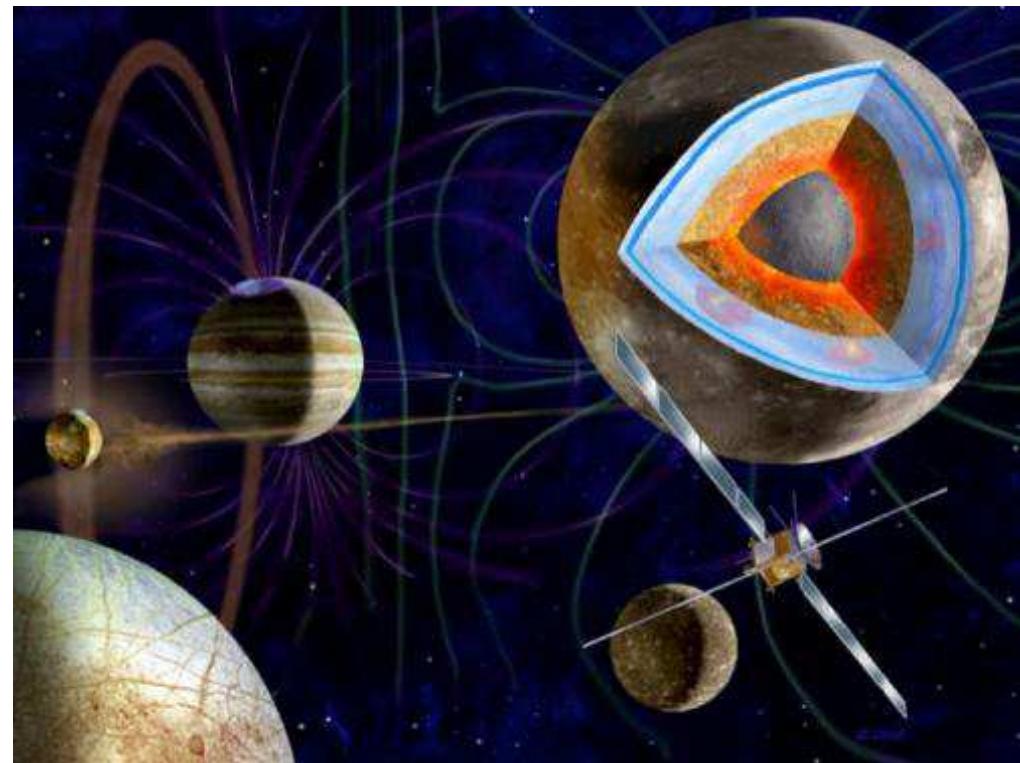
Europe (satellite de Jupiter),
recouvert de glace d'eau:
un océan probable sous la
surface (sondes NASA **Voyager**,
Galileo) + peut-être un lac en
subsurface



La prochaine étape: la mission européenne JUICE (Jupiter and Icy Moons Explorer)

Objectif: Exploration de l'environnement de Jupiter et des satellites galiléens (Jupiter, Europa, Ganymède, Callisto)

Lancement: 2022
Opération: 2030 ->



Le système de Saturne

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

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



Titan:
Atmosphère
de N₂
Ps = 1.5 bar

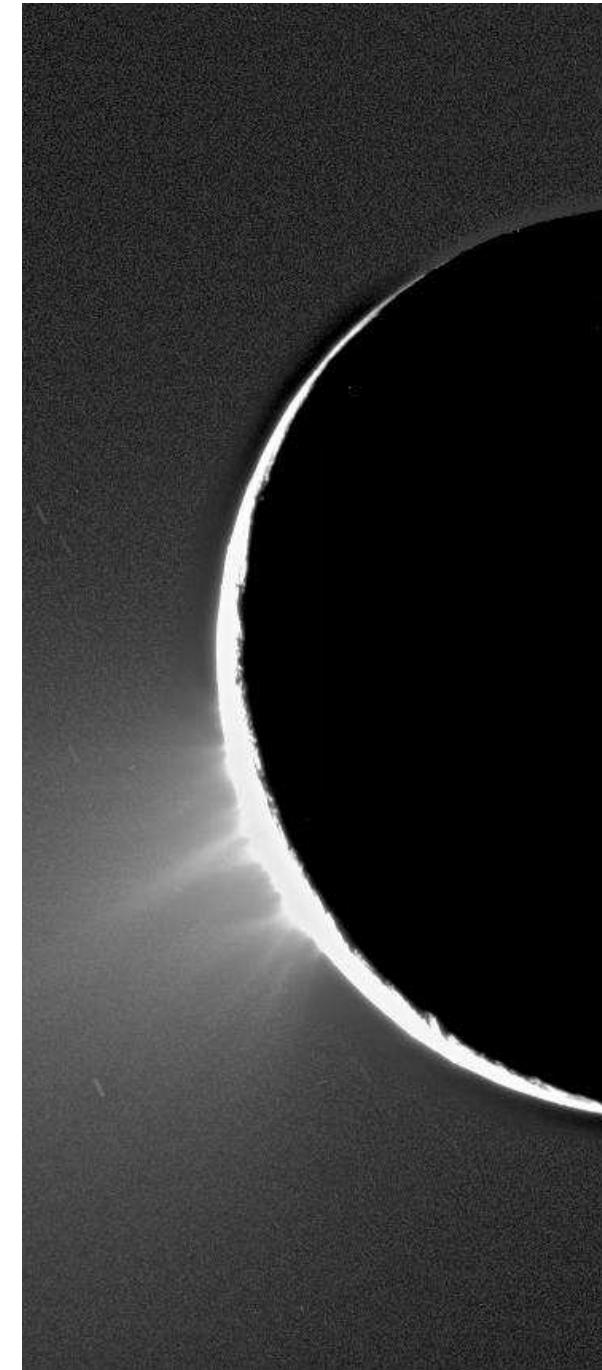
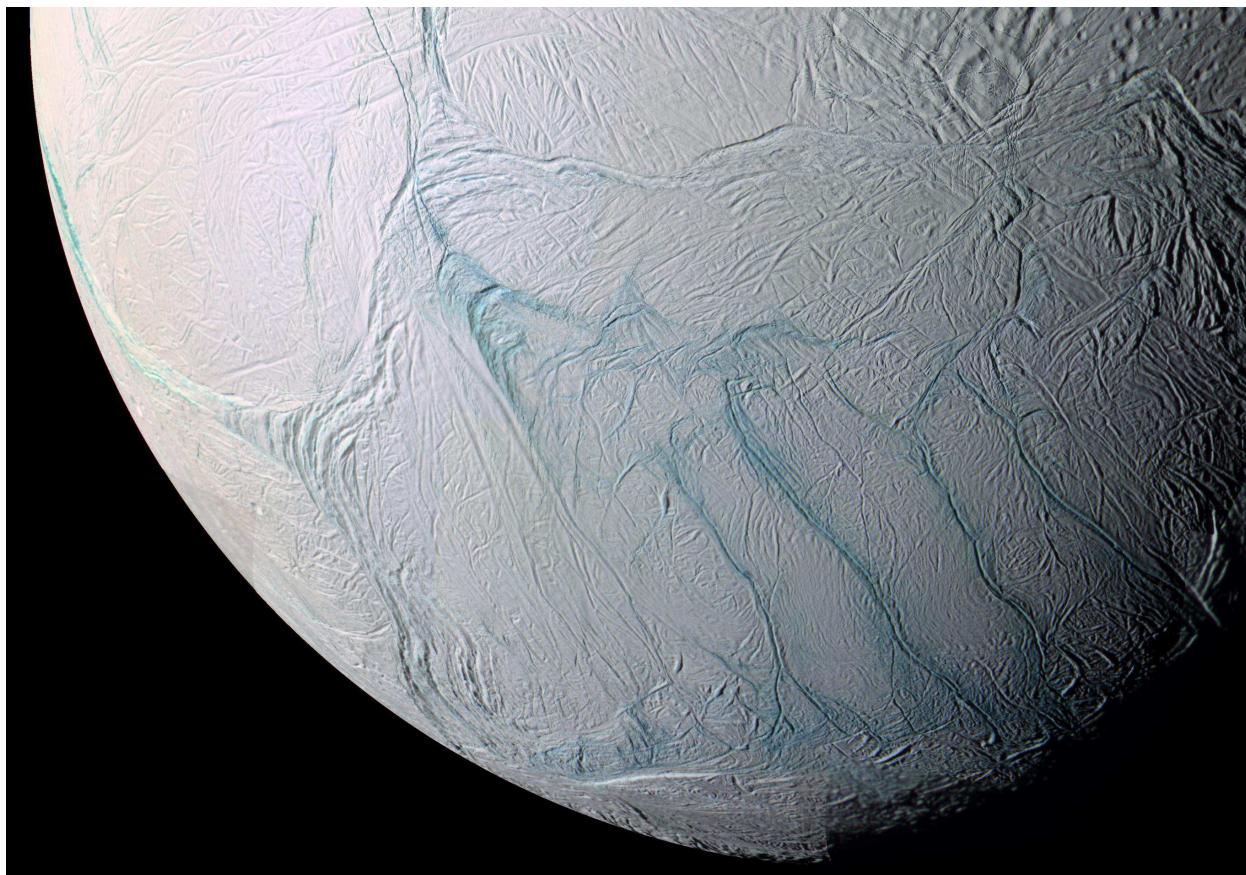


...Mais des lacs d'hydrocarbures ont aussi été détectés par le radar de Cassini (2007)

Encelade (satellite de Saturne):

petit satellite glacé dénué d'atmosphère
un cryo-volcanisme actif ($\text{H}_2\text{O}, \dots$)

-> peut-être de l'eau liquide
sous la surface



Les comètes:

Les témoins des premiers âges du système solaire

- Des fragments de glace (< 10 km) qui voyagent du plus loin au plus près
- Des vestiges des premiers âges du système solaire
- Sources possibles de l'eau terrestre



P/Halley, 1986
(sonde Giotto)

Hale-Bopp, 1997

La mission Rosetta (ESA)

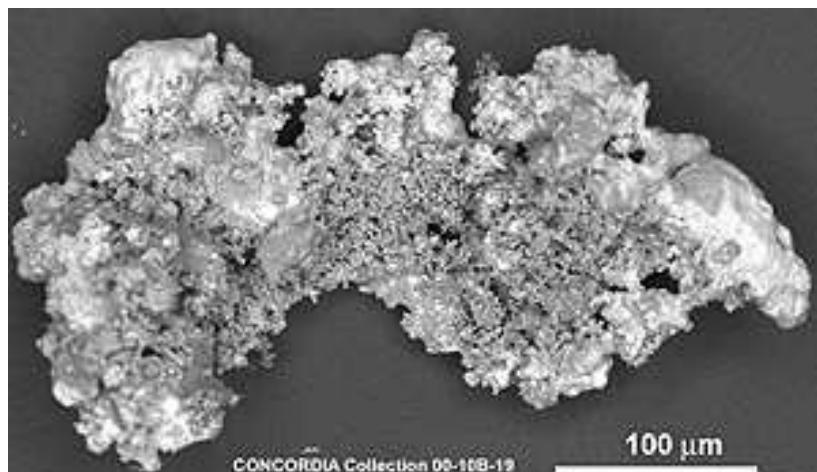
- Lancement 2003
- Survol de deux astéroïdes (2008, 2010)
- Survol d'une comète en novembre 2014
- Pose d'un module en surface
 - > analyse *in situ* de la composition du noyau
- Recherche de molécules prébiotiques (acides aminés?)



La matière extraterrestre

Les météorites

- Origine: astéroïdes (+Mars, Lune)
- Murchison: chondrite carbonée
(plus de 70 acides aminés, dont ceux présents dans les organismes vivants)
- Les météorites martiennes: silicates hydratés
- > datation



Les micro-météorites

- Origine: comètes
- Composition: primitive (carbonées)
- A l'origine de l'atmosphère et de l'eau terrestre ?

Les échantillons cométaires

- Mission Stardust (NASA)
- survol P/Wild2 (2002), retour 2006
- découverte d'un acide aminé

Où rechercher la vie hors du système solaire?

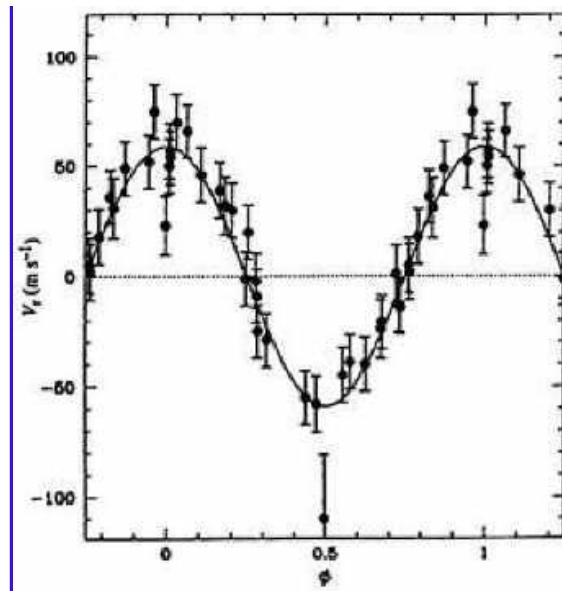
La révolution des exoplanètes

Pourquoi est-ce si difficile de les découvrir?

- En lumière visible, une planète comme Jupiter est 10^{-7} fois plus faible que son étoile hôte
 - Une bougie à côté d'un phare...
- Même dans le cas des étoiles proches, la lumière de la planète est noyée dans la lumière stellaire
- > Les astronomes ont utilisé des méthodes indirectes
 - Astrométrie -> échec (précision insuffisante des instruments)
 - Vélocimétrie -> succès (détexion de 51 Peg b suivie de nombreuses autres exoplanètes géantes)

Années 1990: Premières découvertes

- XXème siècle: recherches vaines par astrométrie
- 1992: première détection autour d'un pulsar
- 1995: première détection d'une planète autour d'une étoile de type solaire
- 2013: env. 900 détections

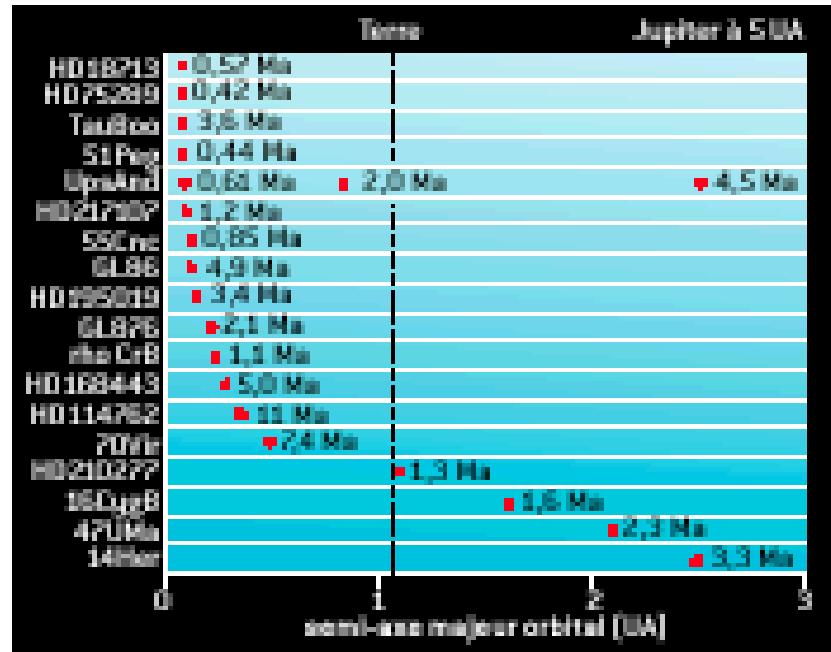


La méthode de vélocimétrie:

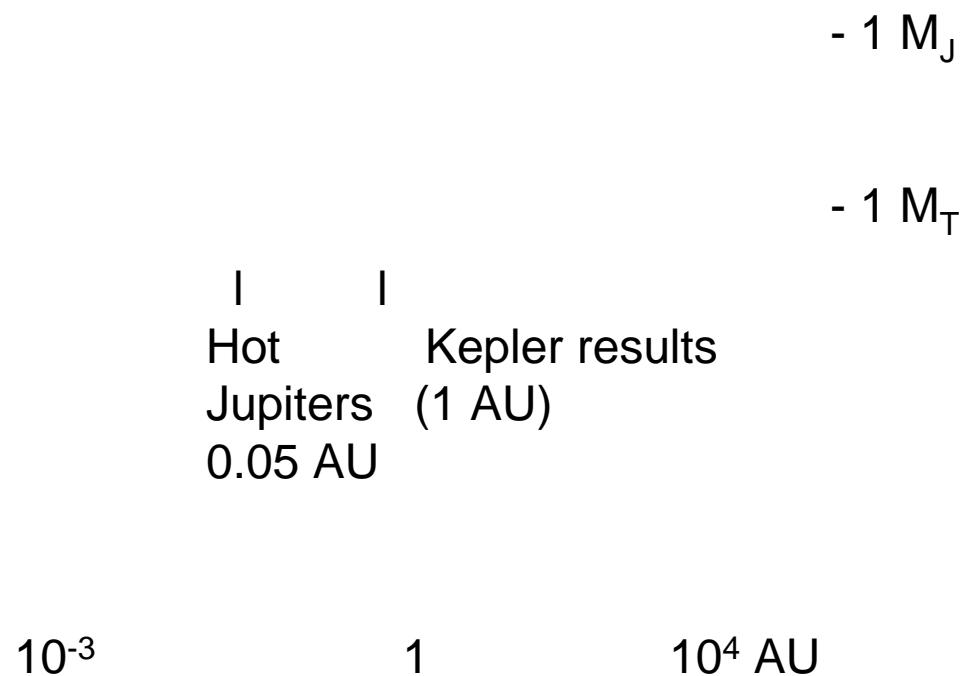
La vitesse relative de l'étoile est mesurée par rapport au centre de gravité du système étoile-planète

Détection d'une planète autour de l'étoile 51 Peg
À l'Observatoire de Haute-Provence
(Mayor et Queloz, 1995)

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



Early results



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

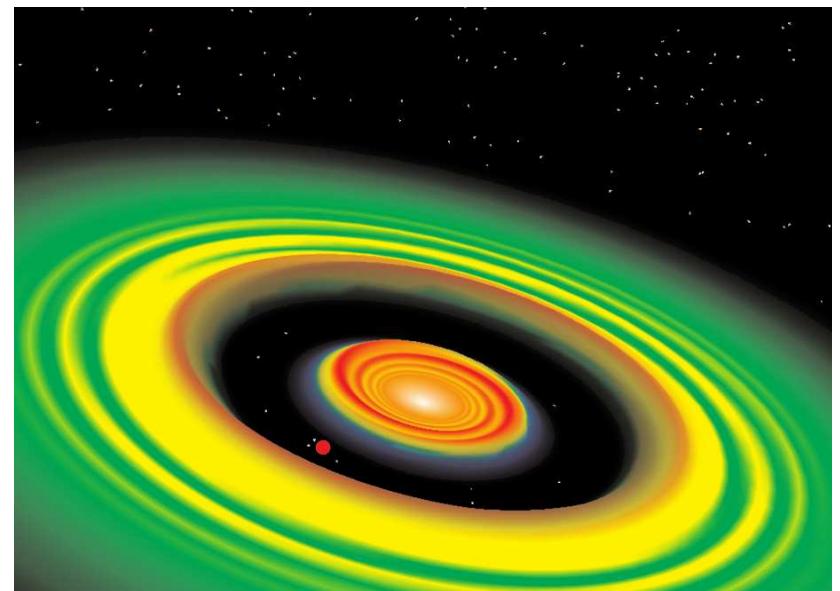
Une découverte pour les astronomes...
Le scénario de formation du système solaire n'est pas universel!



Dans le système solaire,
les planètes géantes se
forment à l'extérieur (plus de
masse solide disponible ->
noyaux de glace de $> 10 M_{\oplus}$
-> Capture du gaz

Une explication possible: la migration

Dans les systèmes planétaires, les planètes géantes peuvent se former à l'extérieur et migrer à l'intérieur par interaction avec le disque

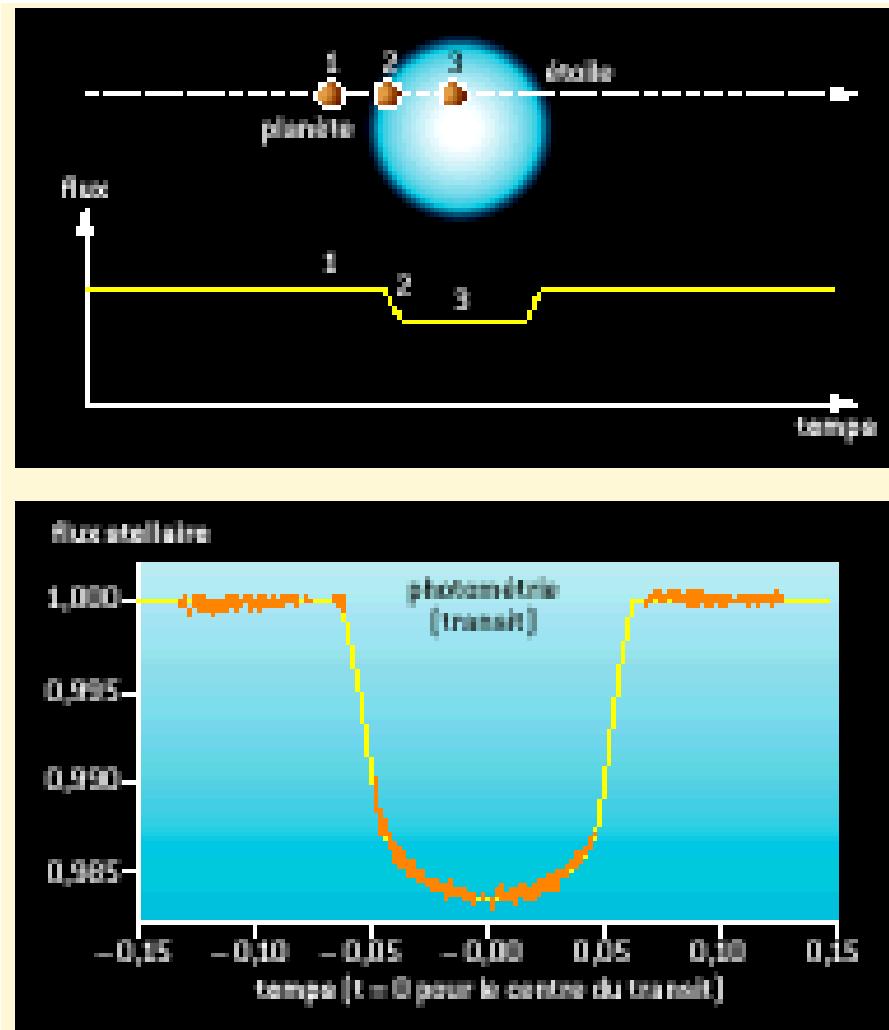


Une autre méthode de détection: les transits planétaires

Quand une planète passe devant son étoile, le flux stellaire décroît (Jupiter: 1%; Earth: 0.01%)

->

Les exoplanètes géantes peuvent être détectées depuis le sol, mais la détection des exoplanètes terrestres nécessite des observations spatiales



Detection of exoplanet HD209458B

Les missions spatiales CoRoT et Kepler

Principe: Observation de champs stellaires par photométrie de longue durée

Objectif: Recherche des exoplanètes par transit + oscillations stellaires

CoRoT: Lancement 2006 (CNES)

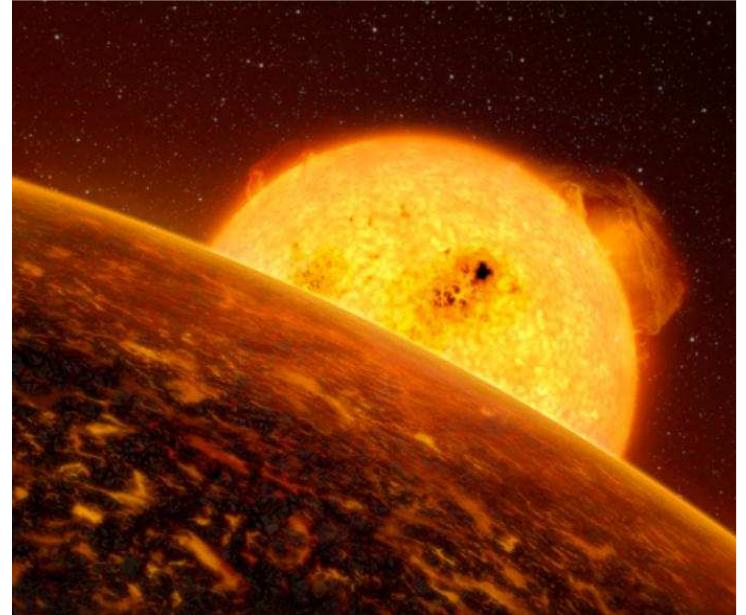
Kepler: Lancement 2009 (NASA)

Premiers résultats: découverte de près d'une centaine d'exoplanètes confirmées + des milliers de candidats (Kepler), à confirmer par vélocimétrie



Quelques objets exotiques...

CoRoT-7b ->
HD209458b (first transit) $R = 1.7 R_E$
 $M = 0.7 M_J$ $P < 1$ day
 $R = 1.3 R_J \rightarrow d = 0.4 \text{ g/cm}^3$



2M 1207 (1ère détection directe)

Naine brune, $0.025 M_S$
 $M = 5 M_J$, $D = 55 \text{ AU}$

Spectroscopie d'une exoplanète par transit

->Etude de leur atmosphère

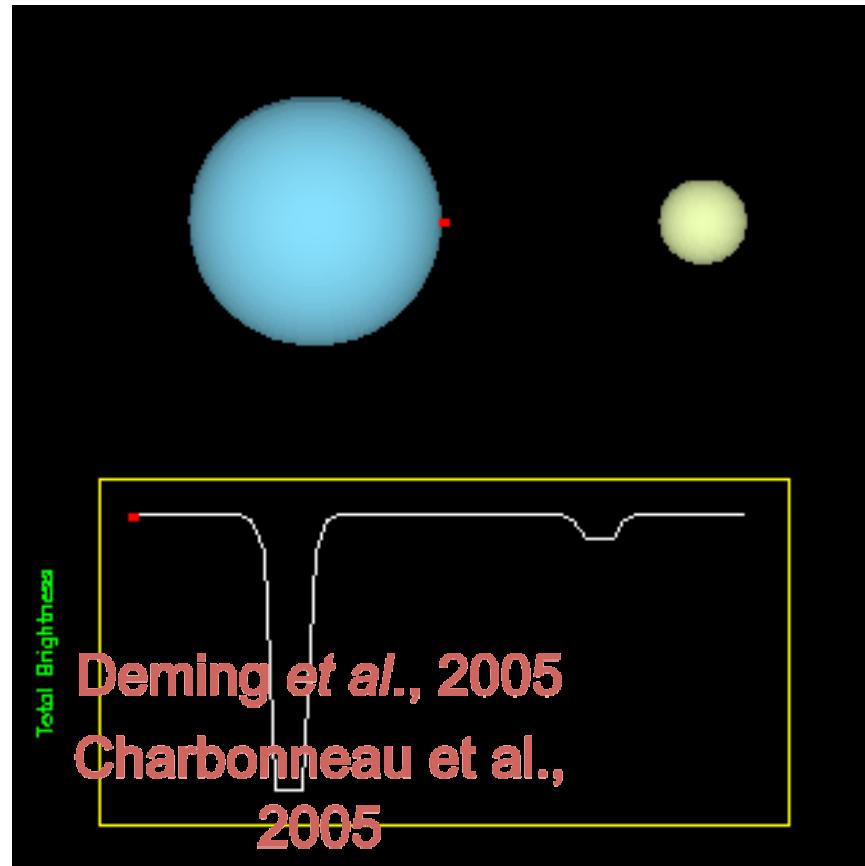
Transit primaire

-> Spectre en transmission
(terminateur)

Transit secondaire

-> Spectre d' émission
(côté jour)

-> Détection de H_2O , CH_4 ,
 CO_2 , CO , NH_3 , H_2

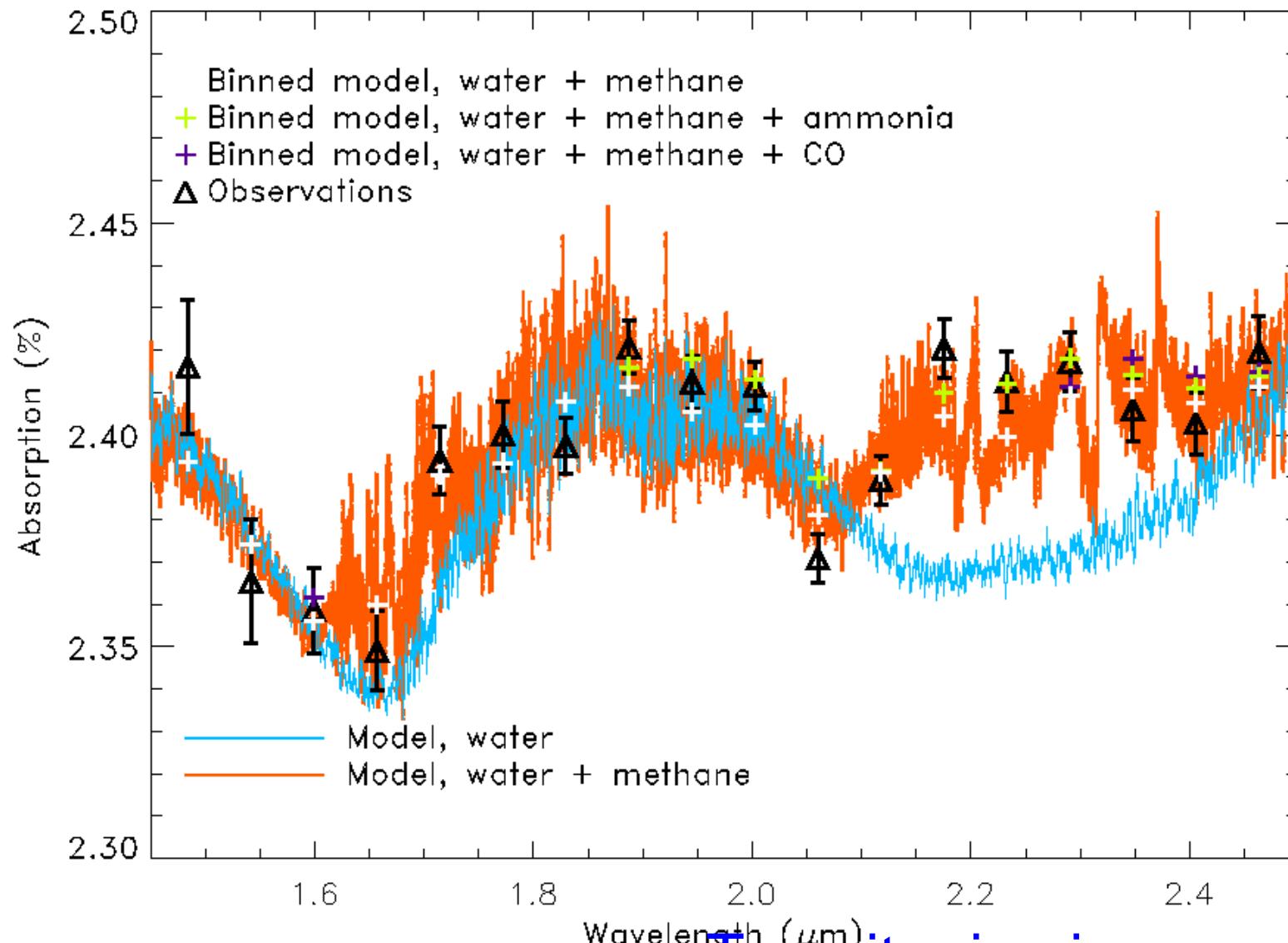


|
Transit primaire
(P devant *)

|
Transit secondaire
(P derrière *)



NICMOS: transmission spectroscopy HD189733b, terminator

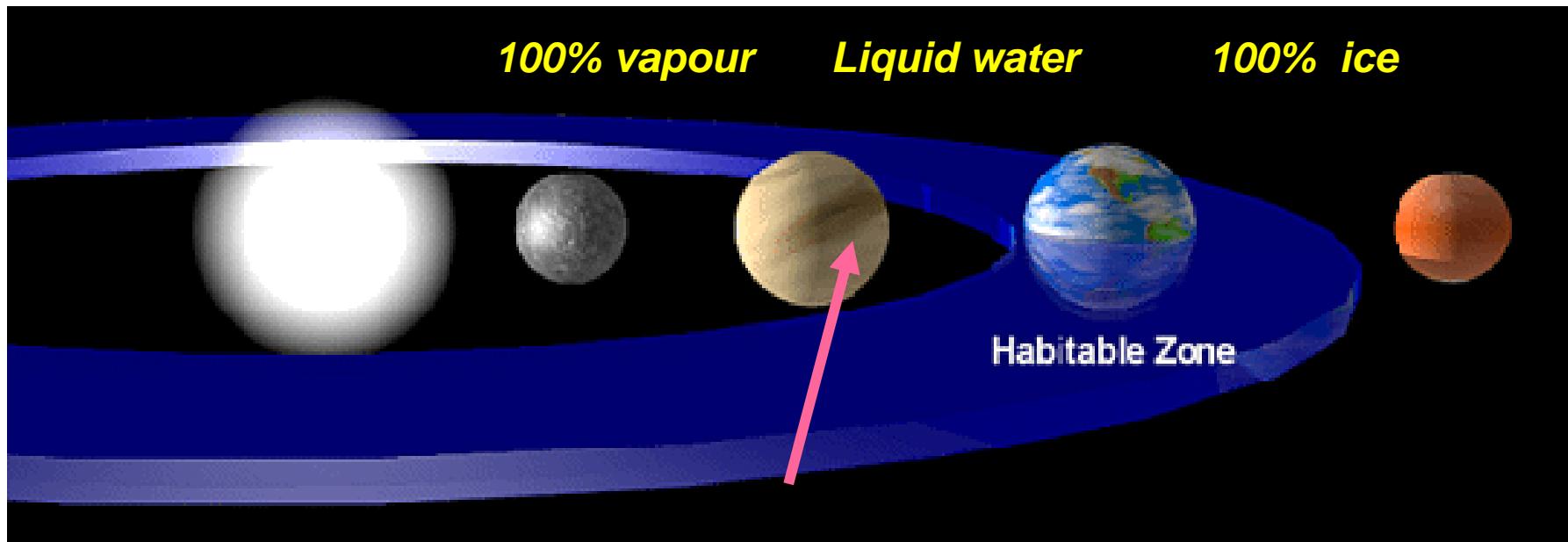


Swain, Vasisht, Tinetti, *Nature*, 2008

Transit primaire

Où rechercher la vie dans les exoplanètes?

La zone habitable:
celle où l'eau peut être liquide

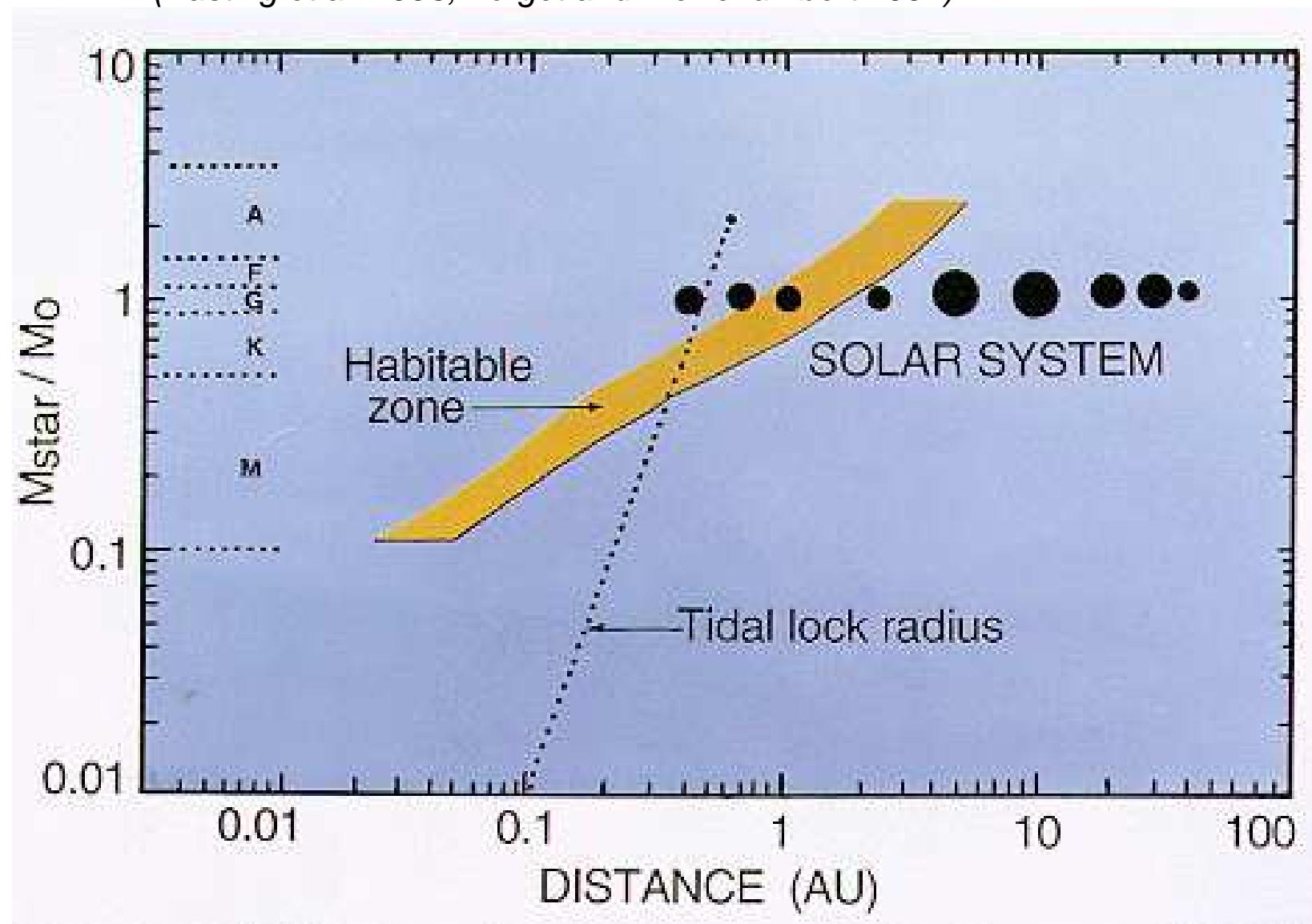


La **zone habitable** est la région où la température est comprise entre environ 0° C et 100° C

- Pour le Soleil, la ZH est à environ 1 UA
- Pour une étoile plus massive, elle est plus loin
- Pour une étoile moins massive (la plupart), elle est plus près

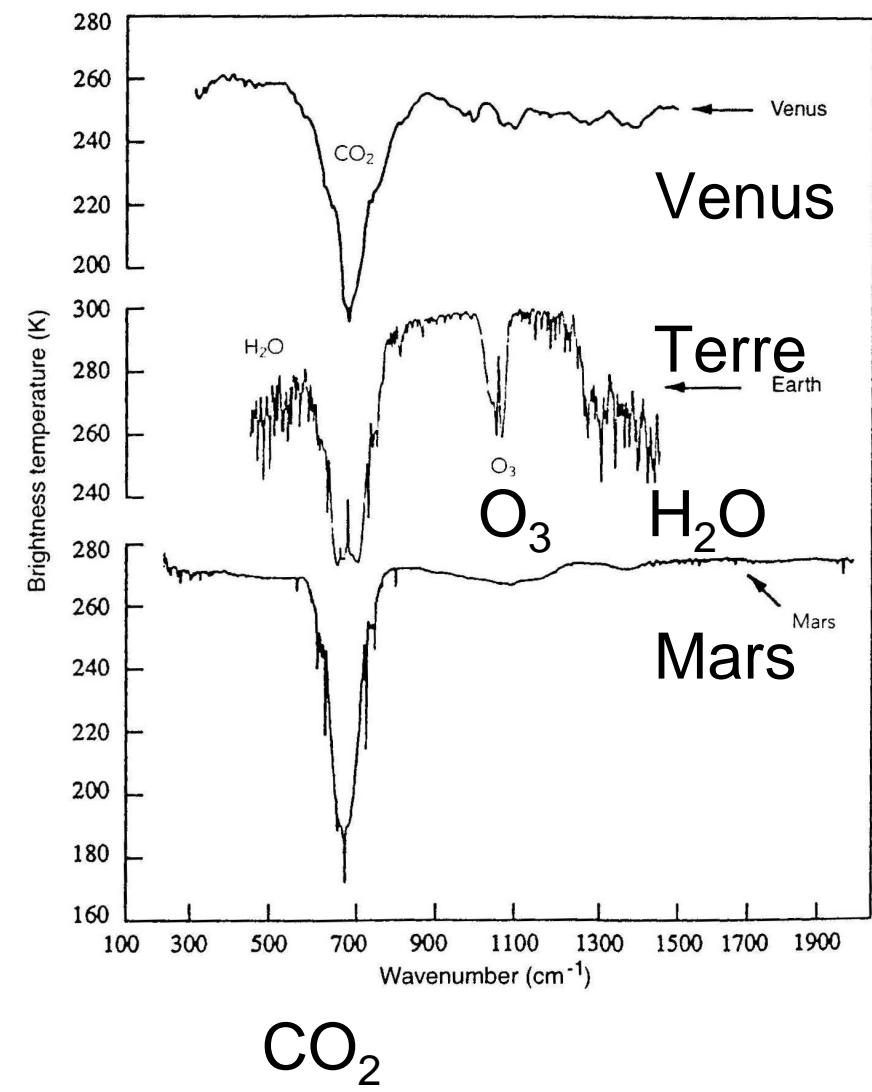
La zone habitable

(Kasting et al. 1993, Forget and Pierrehumbert 1997)



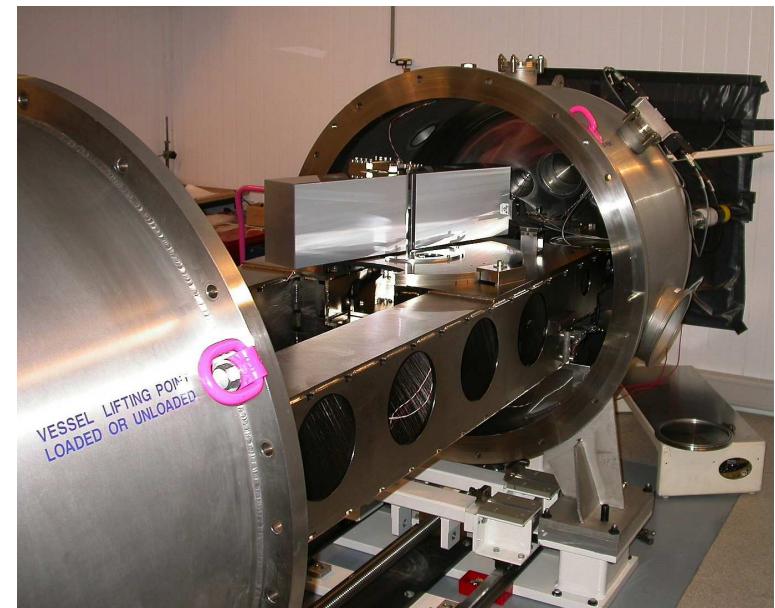
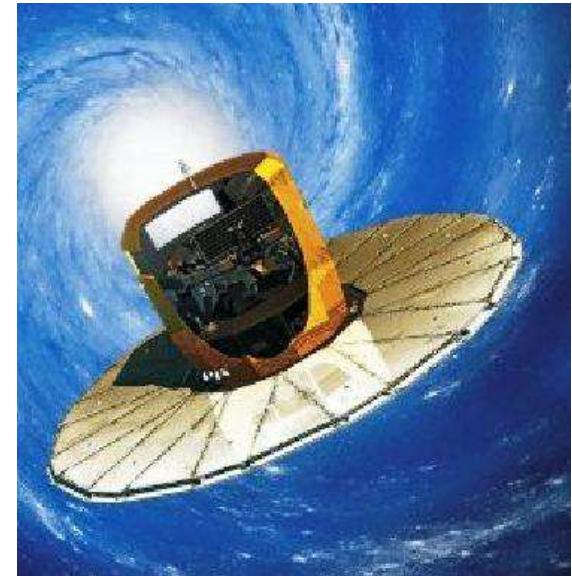
Comment rechercher la vie dans les exoplanètes?

- Recherche des atmosphères à oxygène
- Biomarqueurs moléculaires (spectroscopie visible et IR)
 - O₃ (plus facile à identifier que O₂)
 - CO₂ + CH₄
 - Signature de la chlorophylle
- Etape ultérieure: imagerie directe
 - Continents, structure nuageuse...



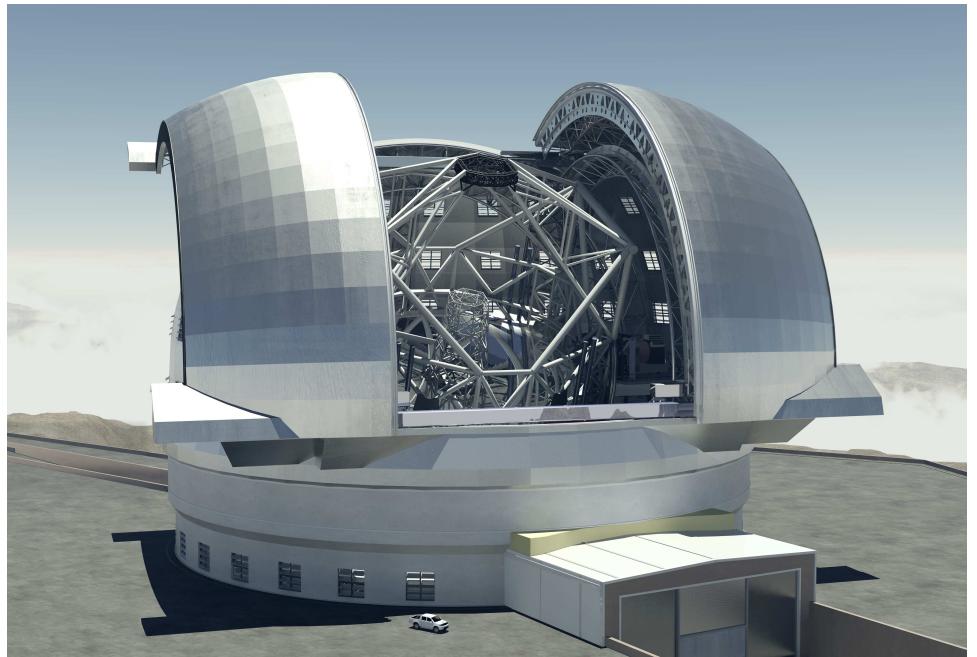
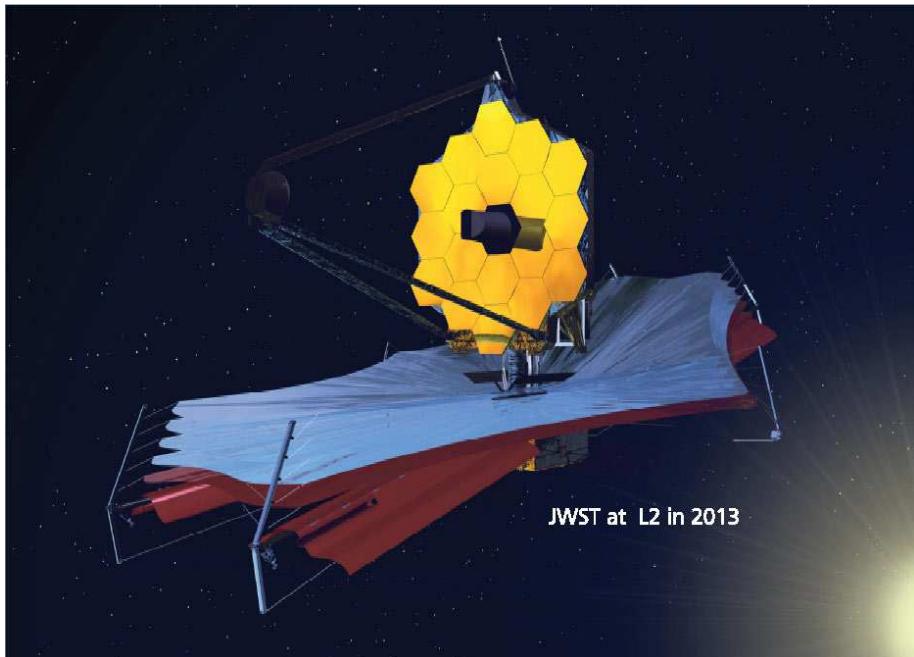
Le futur de l'exploration des exoplanètes: les méthodes de détection

- Objectif: détecter des exoplanètes « terrestres » dans la zone habitable
- Vélocimétrie: vers la limite de $1 M_E$ ($v < 1 \text{m/s}$)
 - Télescopes sol: HARPS (3.6m La Silla) -> VLT -> ELT
- Astrométrie: GAIA (2013)
- Imagerie directe: VLT, ELT
- Détection par transit:
 - CoRoT, Kepler, Plato



Le futur de l'exploration des exoplanètes: l'étude des atmosphères

- Spectroscopie directe: VLT, ELT
- Spectroscopie par transit:
 - Télescopes sol: VLT, ELT
 - HST -> JWST -> Missions spatiales dédiées (ESA, NASA)



Bilan: Avancées et Perspectives

- **De nombreuses questions ouvertes**
 - Comment la vie est-elle apparue sur la Terre?
- **Une recherche soutenue au sein du système solaire**
 - Mars (missions ExoMars, MSL-20, retour d'échantillon)
 - Satellites extérieurs: Europe, Encelade (mission JUICE)
- **De nouvelles perspectives liées aux exoplanètes**
 - Recherche des exoplanètes rocheuses tempérées
 - Analyse de l'atmosphère par spectroscopie des transits
- **Une recherche en pleine explosion!**

En conclusion...
Une scène courante dans l'Univers?



Eau liquide + Roches + Rayonnement stellaire...

Un essai de communication avec les extraterrestres

CTA 102

SETI(Search for Extraterrestrial
Intelligence)

Quelques videos de Titan, Steins (astéroïde), Itokawa

Références:

Le système solaire, T. Encrenaz et al, EdP Sciences

Les molécules interstellaires , P. Encrenaz, Delachaux et Niestlé

Les Nouveaux Mondes , F. Casoli et T. Encrenaz , Springer

Sittler, Tucson Conference on Titan , 2013

ESA Conference on Herschel, 2013

Remerciements:

*Le Comité Scientifique du colloque, Eric Postaire et toute l'équipe de l'Académie

*Thérèse Encrenaz , Athéna Cousténis

- Les Comités Scientifiques des satellites Odin, Herschel , Cassini, Rosetta
- Lennart Nordth, Goran Pilbratt, Steve Wall ,Samuel Gulkis et leurs équipes scientifiques
- Le CNES, l'ESA, le JPL (NASA) ,le CNRS et l'Observatoire de Paris pour un soutien sans faille pendant 40 ans!