



**L'exobiologie - la vie dans l'univers :  
développements  
et approches intégratives**

**François RAULIN, LISA Univ. Paris 12 & 7**

**Colloque d'Alembert – Orsay – 10-11 mai 2006**

# EXOBILOGIE

**Etude de la vie dans l'Univers :**

- **de ses origines**
- **de son évolution**
- **de sa distribution**

**Et des processus et structures liées à la vie**

**Quasi synonymes : Astrobiologie,  
Bioastronomie,  
... Cosmobiologie**

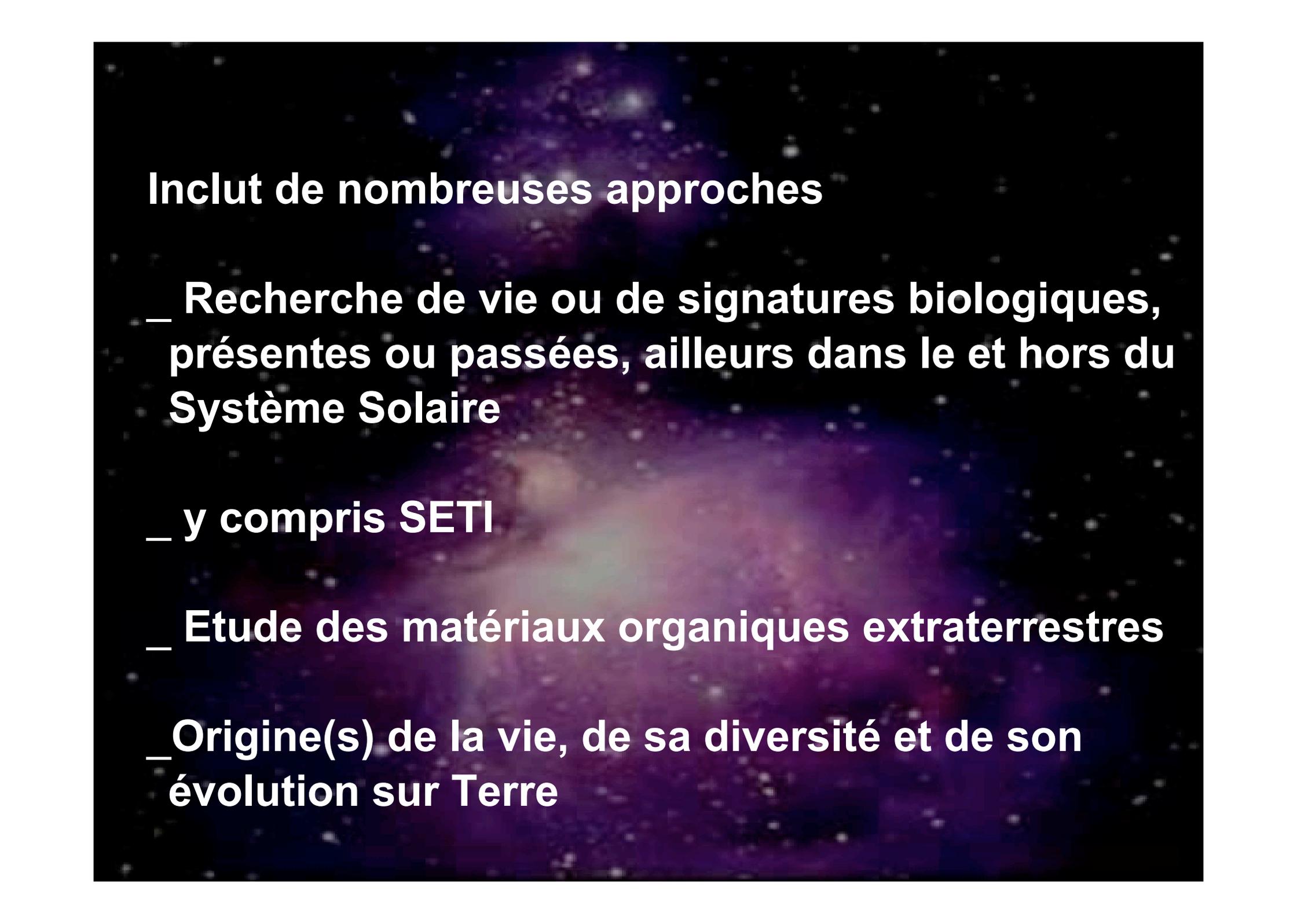
Et de

# EXO/ASTROBIOLOGIE

**Domaine né du développement de l'exploration spatiale, lié :**

- **à l'astronomie**
- **à l'astrophysique**
- **aux sciences chimiques**
- **aux sciences de la vie**
- **aux sciences de la Terre**
- **aux sciences de l'Homme et de la Société**

**→ Tributaire des développements technologiques**



**Inclut de nombreuses approches**

**\_ Recherche de vie ou de signatures biologiques, présentes ou passées, ailleurs dans le et hors du Système Solaire**

**\_ y compris SETI**

**\_ Etude des matériaux organiques extraterrestres**

**\_ Origine(s) de la vie, de sa diversité et de son évolution sur Terre**

# Observation

- In situ
- Télédétection

# Expériences

- Simulations en laborat.
- Expériences spécifiques

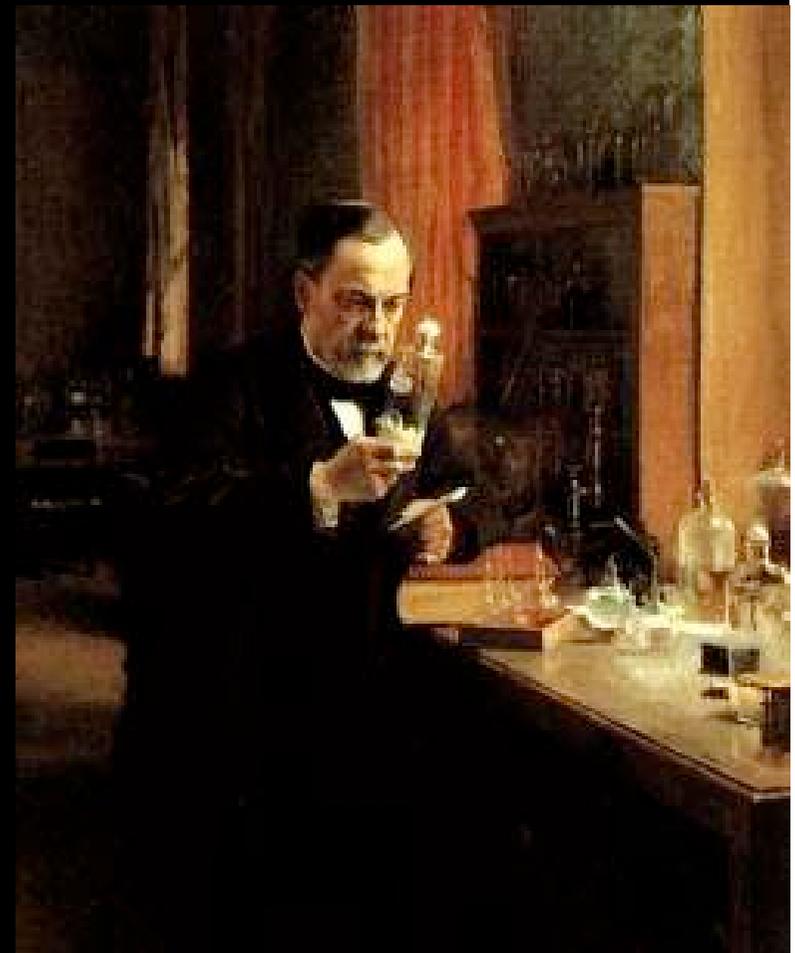
# Modèles théoriques

- photochimiques
- thermodynamiques
- microphysiques



# Recherches scientifiques dans ce domaine récentes: moins de 150 ans :

-étude des météorites et recherche de micro-organismes extraterrestres (Pasteur)





# L'Exo/astrobiologie en France

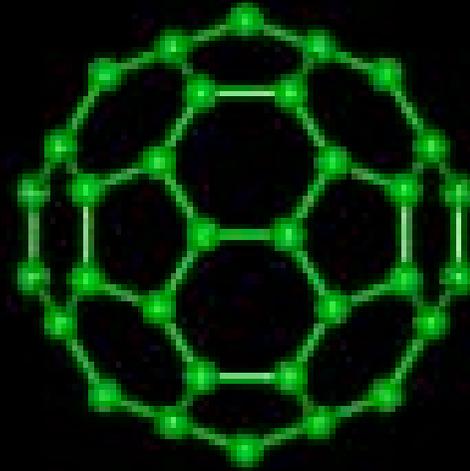
- **Une thématique reconnue par le CNES depuis ~ 1980**
- **Premier colloque National d'Exobiologie en 1997**
- **GDR Exobio depuis 1998 (appui du SDU et CNES)**
  - **Fédération d'équipes => promouvoir et coordonner le développement de programmes en Exo/Astrobiologie en France - Concerne environ 50 laboratoires**
  - **Soutenu par le CNRS et le CNES**
  - **Nombreux ateliers**
  - **Une école d'été tous les 2 ans (Propriano)**
  - **Un colloque National d'Exobiologie tous 4 ans (5/06)**
- **Un groupe thématique du CNES d'Exo/astrobiologie depuis 2004**

# EXO/ASTROBIOLOGIE- France

Fil conducteur:



L'EAU



LE CARBONE



**Recherche d'une deuxième genèse de la vie  
en prenant la vie terrestre comme référence**

# PROBLEMATIQUE SCIENTIFIQUE

## 1. Les ingrédients de la vie primitive

- Le contexte géologique et planétaire
- Origine des molécules organiques

## 2. La chimie des origines de la vie

- Chimie prébiotique
- Emergence du vivant

## 3. Recherche de la vie extraterrestre

- Biosignatures
- Applications à la recherche d'une vie au-delà de la Terre

# 1. Les ingrédients de la vie primitive

➤ Le contexte géologique et planétaire



# 1. Les ingrédients de la vie primitive

- **Le contexte géologique et planétaire**
  - **Formation de la terre**
  - **Atmosphère primitive : nature, origine**
  - **Etat géologique : croûte, tectonique, volcanisme, magnétisme**
  - **Hydrosphère : nature, origine**



# 1. Les ingrédients de la vie primitive

## ➤ Le contexte géologique et planétaire

### *Les directions*

**Etablissement de nouvelles contraintes sur la composition de l'atmosphère primitive**

**Développement des études (isotopes de O...) sur les matériaux terrestres les plus anciens (présence d'eau liquide ?)**

**Volume, température, pH, nature et abondance des sels de ces océans primitifs en fonction du temps ?**

**Existence de continents émergés sur la Terre hadéenne ?**

# 1. Les ingrédients de la vie primitive

## ➤ Le contexte géologique et planétaire

*Une frise des événements depuis la formation de la Terre jusqu'à l'apparition des premiers systèmes vivants en cours d'élaboration*

*Avec la participation de scientifiques de champs disciplinaires classiques très variés!!*

# 1. Les ingrédients de la vie primitive

## ➤ Le contexte géologique et planétaire

*L'exemple de la chimie prébiotique de Titan*

### *Les directions*

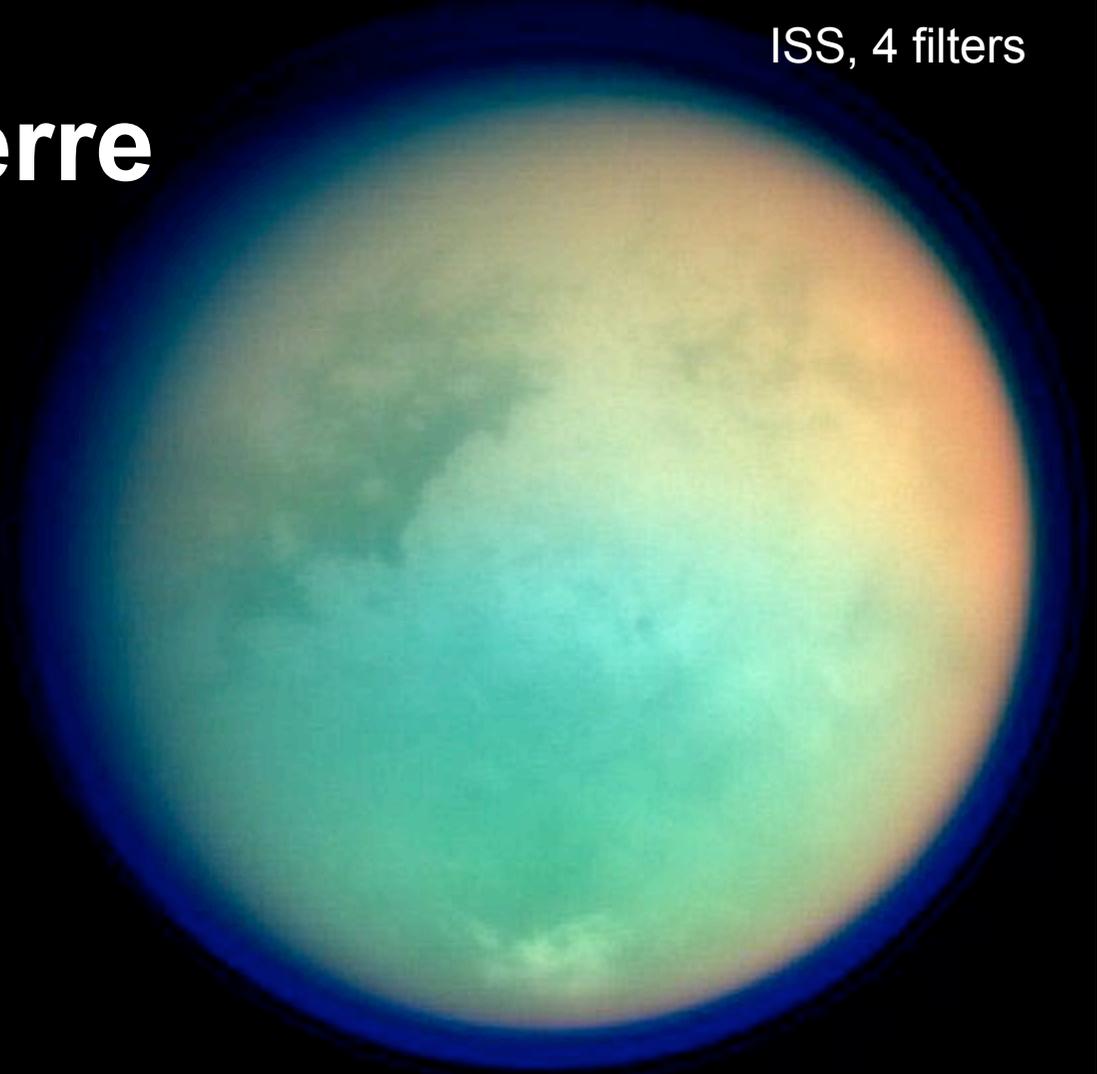
⇒ Participation active de la communauté planétologique et exobiologique française, au dépouillement des données de la mission Cassini-Huygens

⇒ En parallèle, des études au sol, modélisations théoriques et expérimentales

## 3 aspects exo/astrobiologiques majeurs

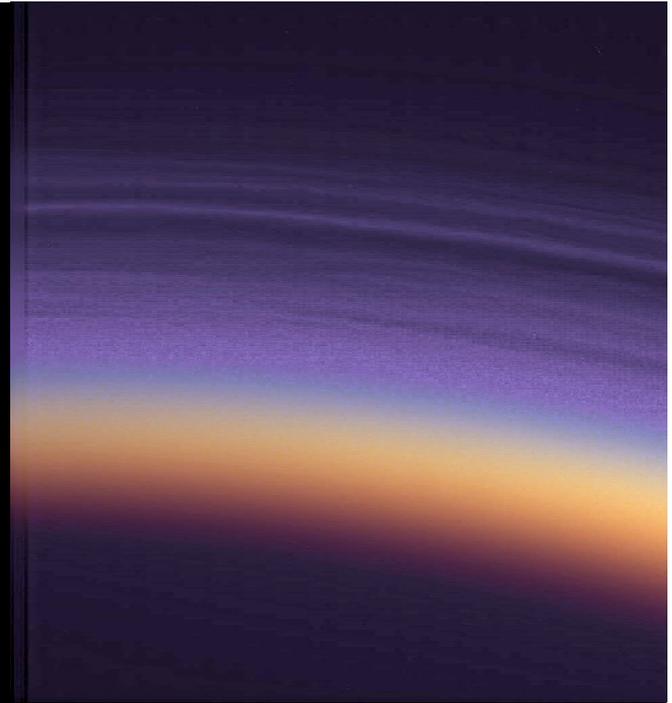
# 1. Titan ↔ Terre

ISS, 4 filters



**Une atmosphère dense principalement composée d'azote, N<sub>2</sub>, avec une structure verticale analogue à celle de la Terre**

# Effet de serre et dynamique atmosphérique



*Terre*

*Titan*

**Gaz à effet de serre**

**Condensable**

**H<sub>2</sub>O**

**CH<sub>4</sub>**

**Non-condensable**

**CO<sub>2</sub>**

**H<sub>2</sub>**

**Anti-effet de serre**

**Aérosols  
& nuages**

**Aérosol, brûmes  
& nuages**

**Vortex Polaire**

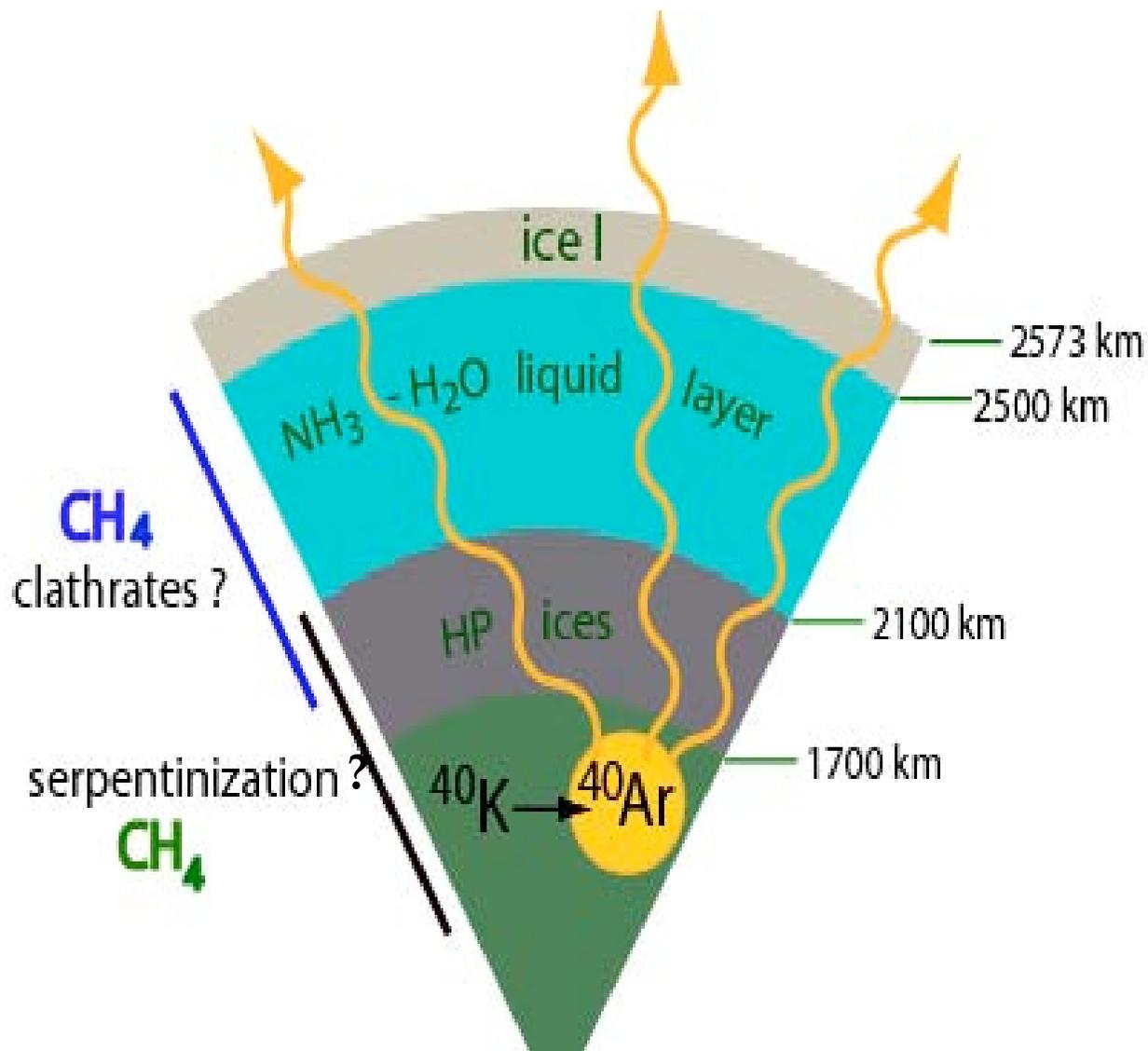
**Couche  
d'ozone**

**Chimie atmosphérique  
au pôle sud**

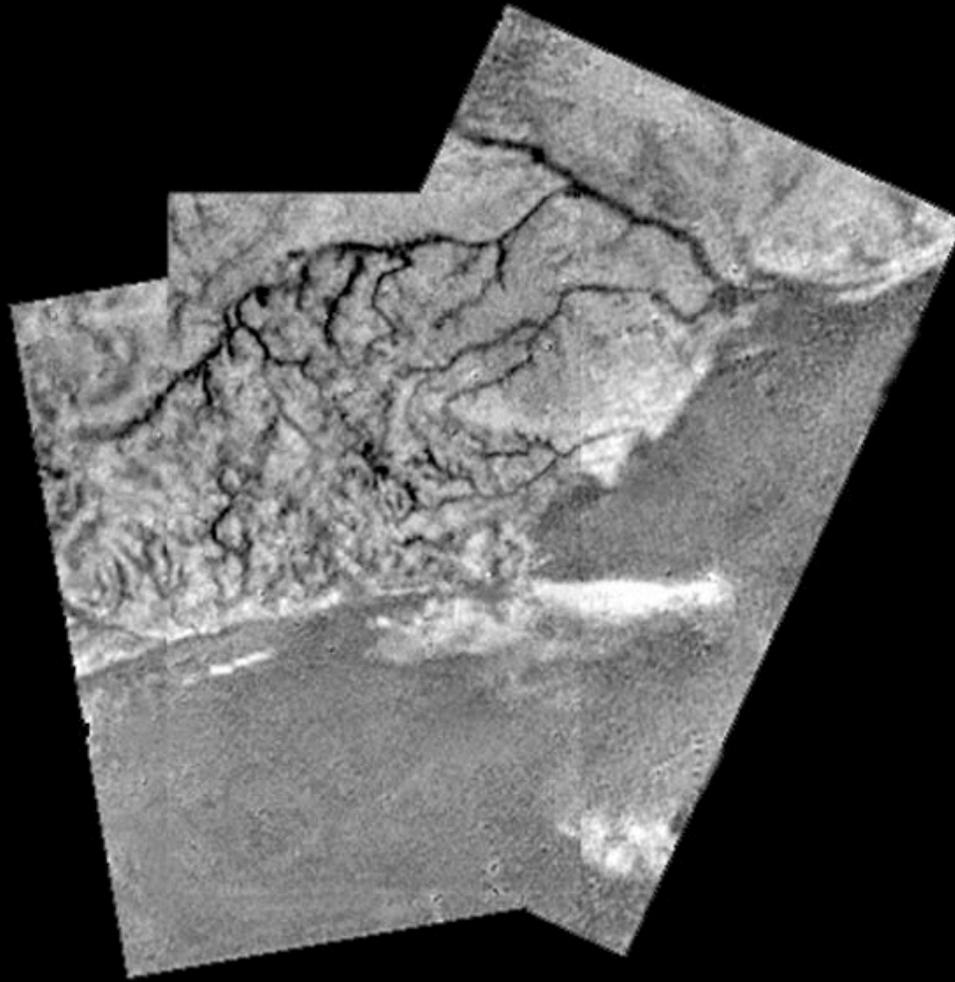
Présence de  $^{40}\text{Ar}$  (Cassini-INMS & Huygens-GC-MS)

$\sim 4,3 \times 10^{-5}$  (GC-MS)

$\Rightarrow$  atmosphère secondaire par dégazage ( $^{40}\text{K} \Rightarrow ^{40}\text{Ar}$ )



**Structures de surface => volcanisme, tectonique,  
sédiments & météorologie**



**=> Une ~planète géologiquement active !!**

## 2. Une chimie quasi-Prébiotique

### Minoritaires organiques

#### *Hydrocarbures*

Ethane C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>

Acétylène C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

Propane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>

Ethylène C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>

Propyne C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>

Diacétylène C<sub>4</sub>H<sub>2</sub>

Benzène C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>

#### *Nitriles*

Acide cyanhydrique HCN

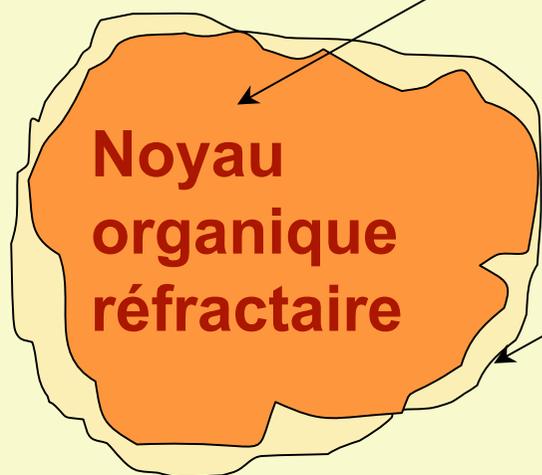
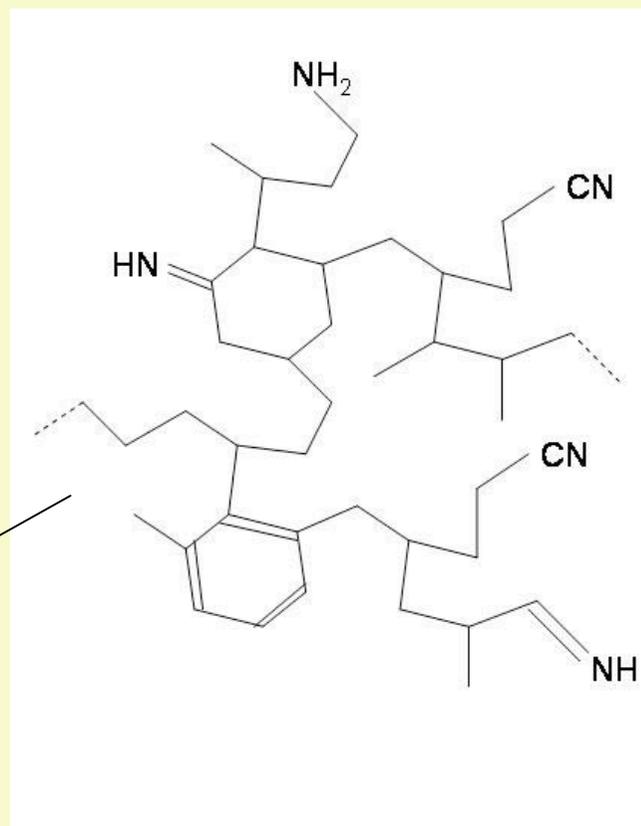
Cyanoacétylène HC<sub>3</sub>N

Cyanogène C<sub>2</sub>N<sub>2</sub>

Acétonitrile CH<sub>3</sub>CN

Dicyanoacétylène C<sub>4</sub>N<sub>2</sub>

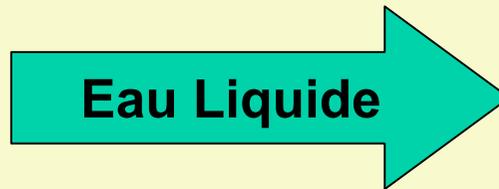
# ACP : première analyse chimique des aérosols



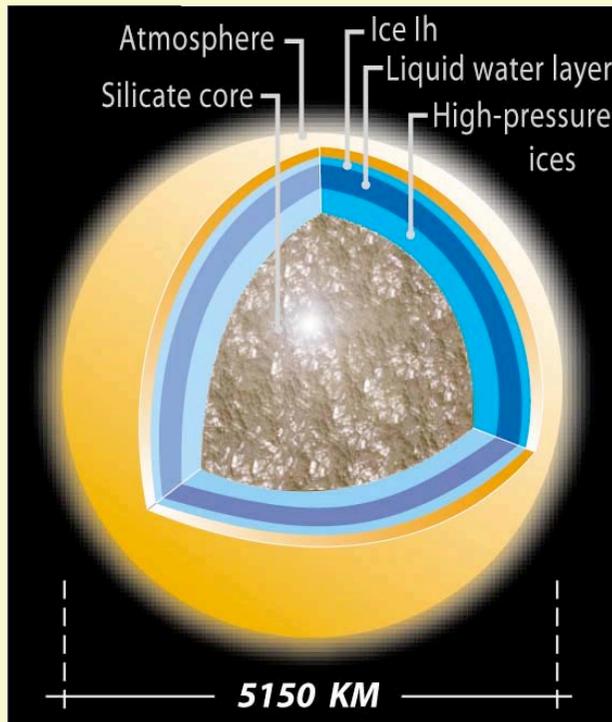
Petite fraction de gaz condensés

- Une chimie organique complexe dans l'atmosphère – principalement dans les aérosols
- Présence de composés organiques jouant un rôle essentiel dans la chimie prébiotique terrestre (HCN, HC<sub>3</sub>N, ....)

**Chimie prébiotique**



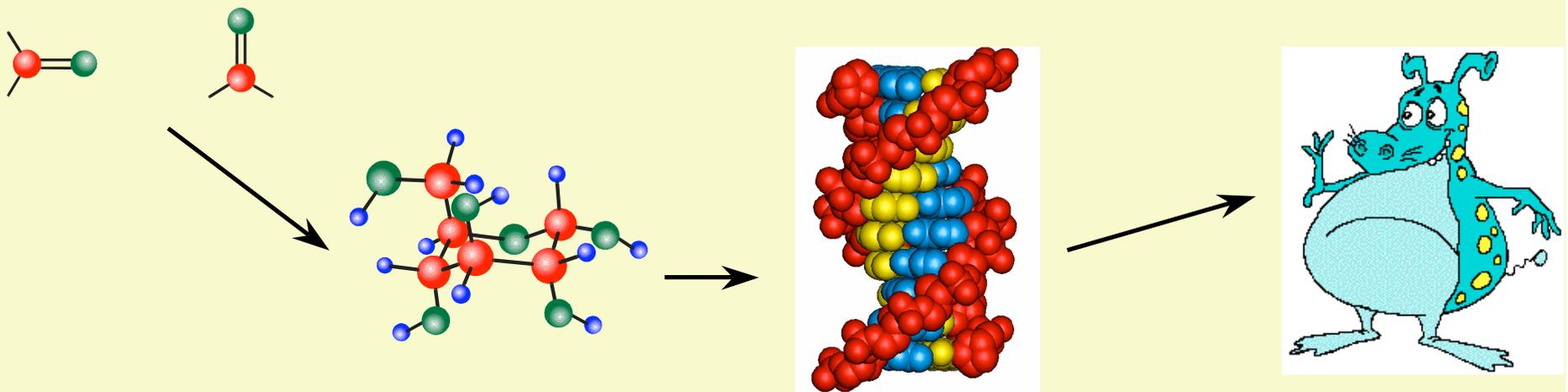
**Vie**



**Océan interne**

**Eau-ammoniaque**

### 3. La vie sur Titan ?



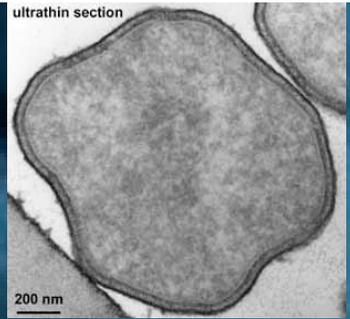
# 1. Les ingrédients de la vie primitive

## ➤ Origine des molécules organiques

*Origine endogène ? Sources hydrothermales*

*Les directions :*

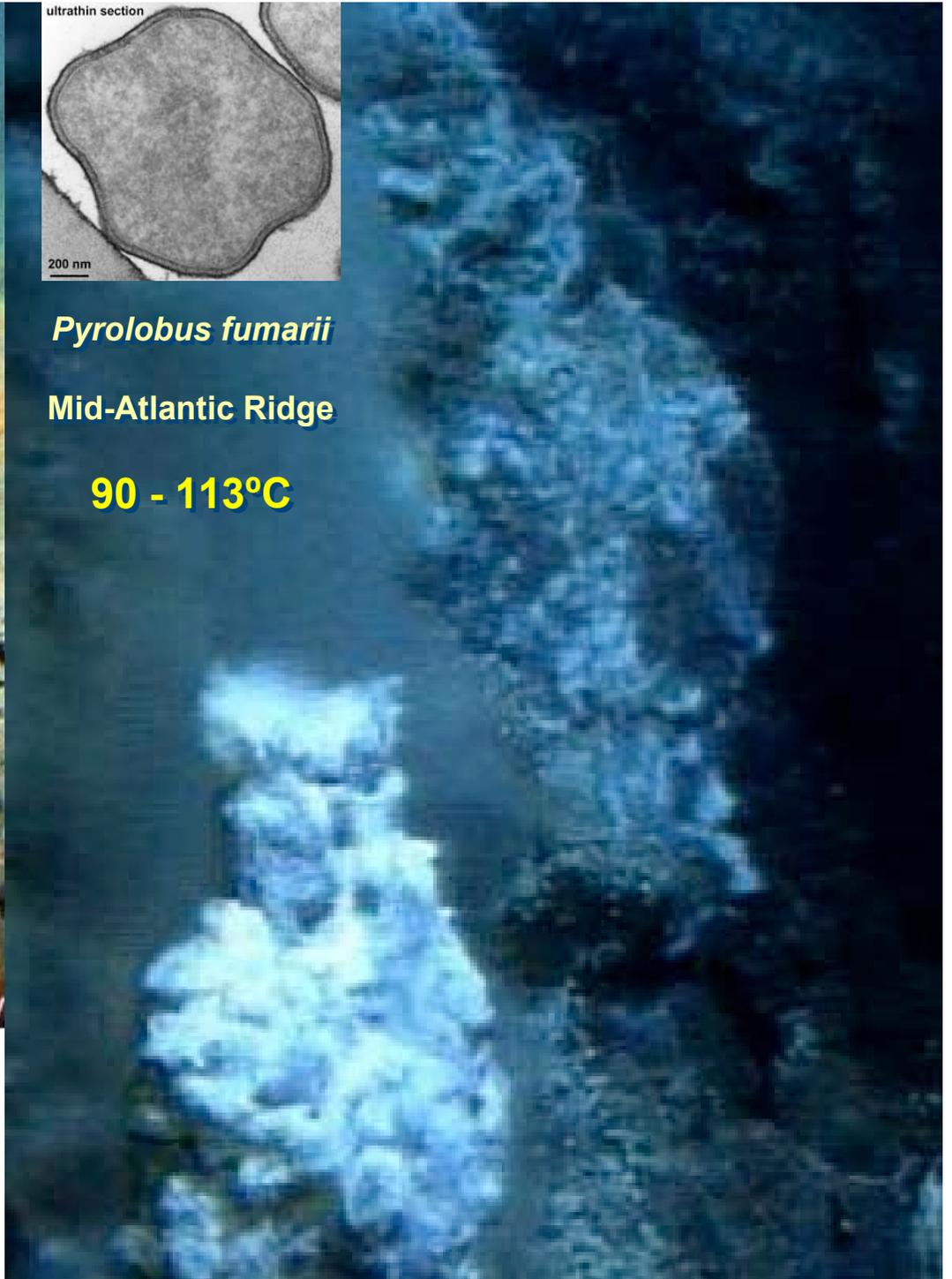
- sources hydrothermales => très large communauté, (microbiologistes, géologues, géochimistes, chimistes...)
- peuvent aussi fournir des informations précieuses sur des environnements extraterrestres (Mars, Europe) et des analogues de ces environnements



*Pyrolobus fumarii*

Mid-Atlantic Ridge

90 - 113°C



# 1. Les ingrédients de la vie primitive

## ➤ Origine des molécules organiques

*Origine exogène ?*

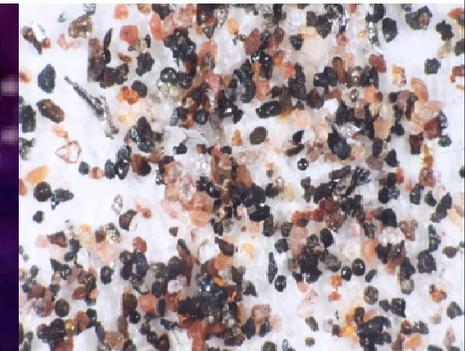
Chimie du milieu  
interstellaire



Comètes,



météorites



# La mission ROSETTA (ESA)

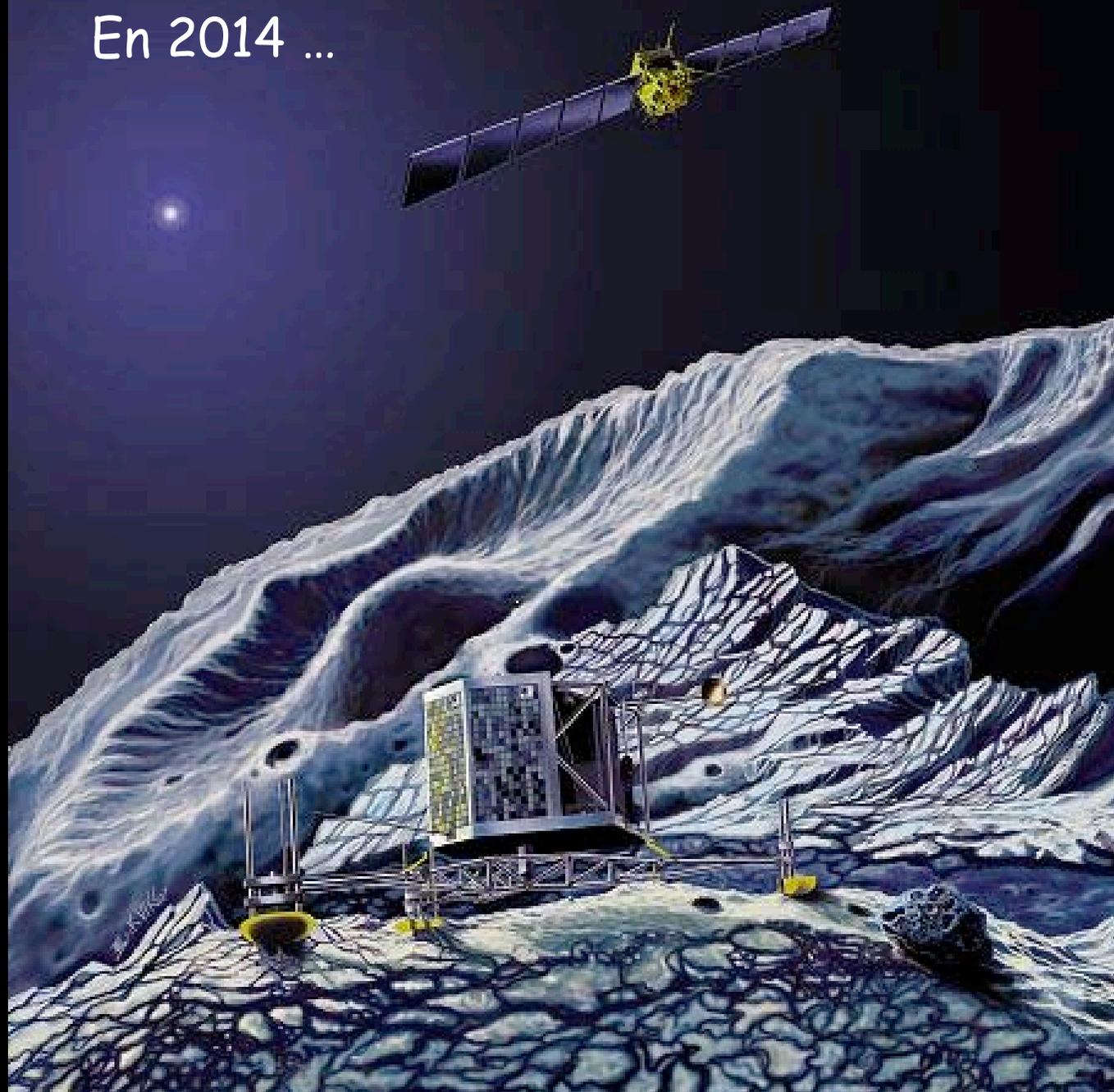


Lancée 2/ 2004

=> Churyumov-Gerasimenko

Arrivée ~ Novembre 2014

En 2014 ...



**Comète Wild2 2/1/04 - Stardust NASA mission =>  
15/1/06**

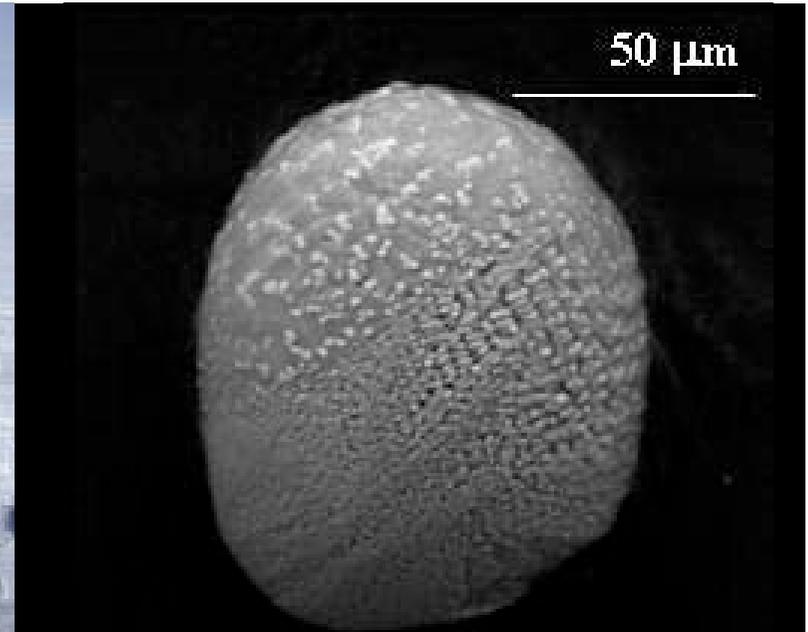


Noyau ~ 4,5 km



**Micrométéorites :**  
**~ 20 000 t/an**

**Détection d'acides aminés**

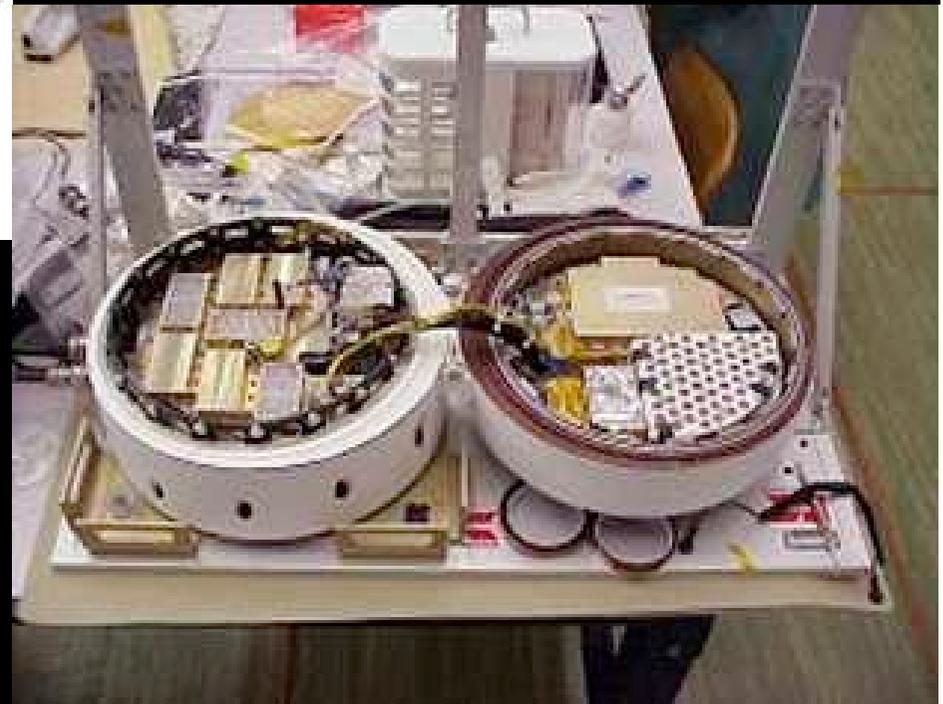
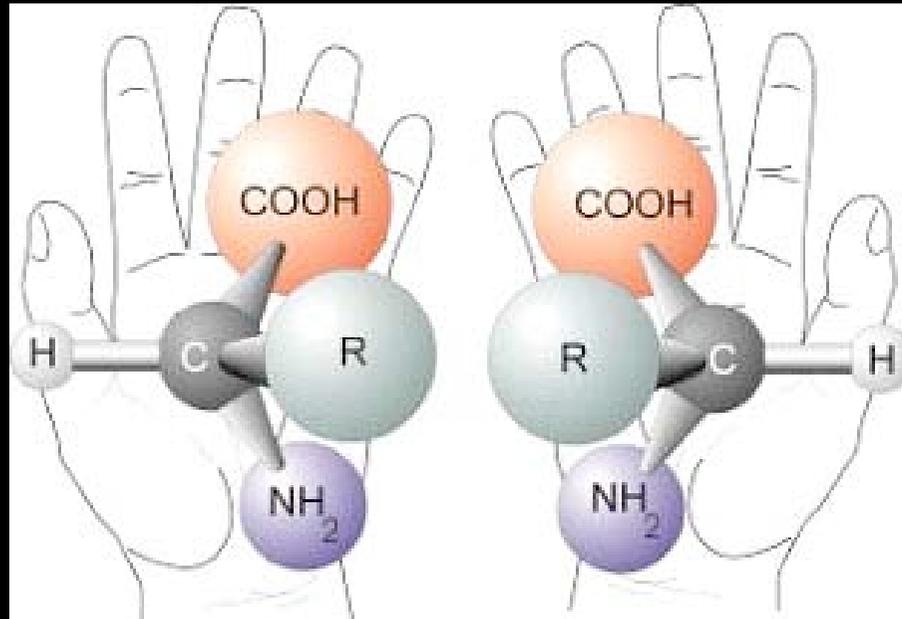


**CONCORDIA # 03-26-15**

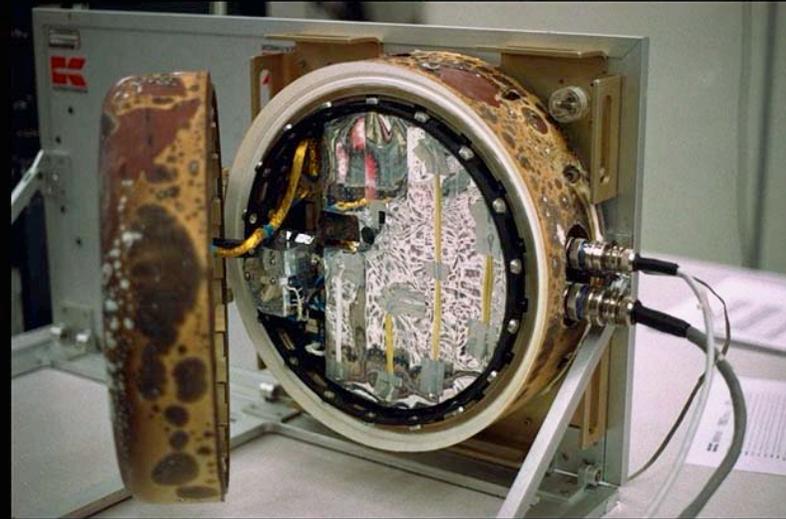


**CONCORDIA # 03-26-49**

# *Evolution et transport de la matière organique dans l'espace - origine de l'homochiralité*



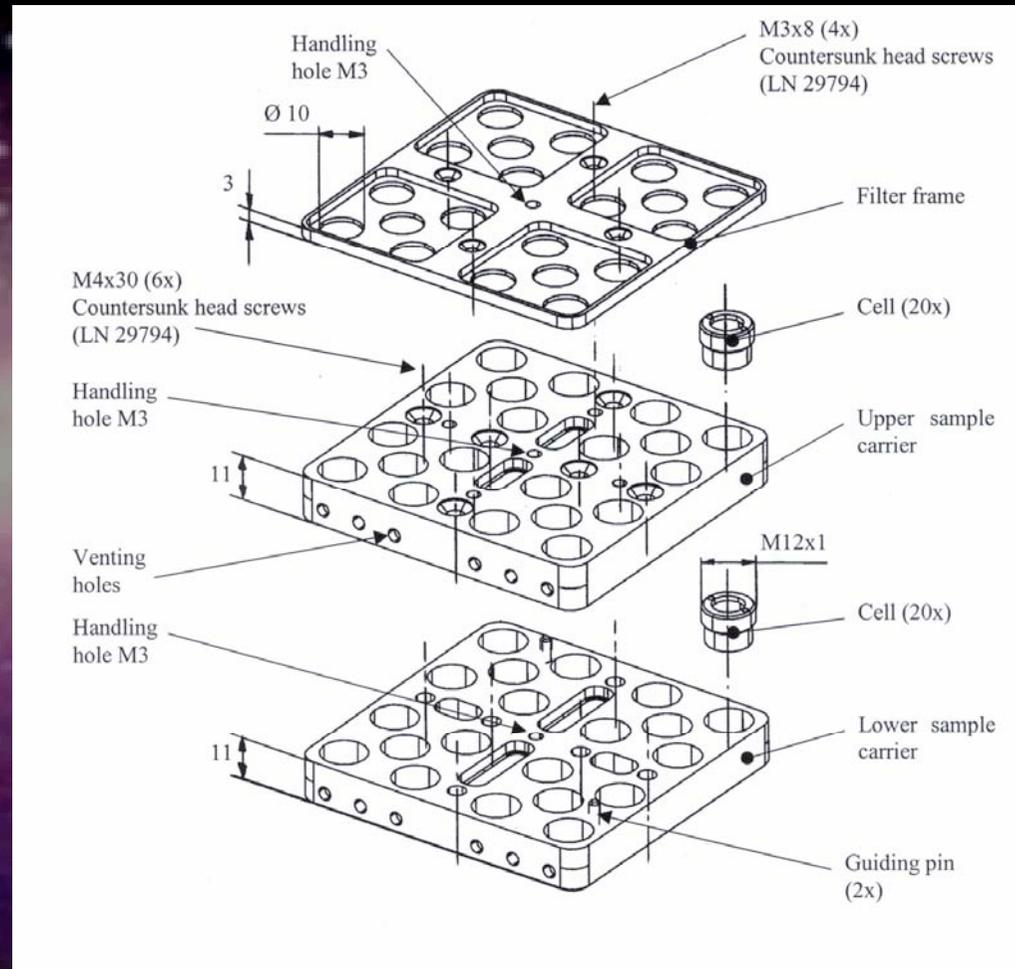
# Expérience BIOPAN (Capsule russe Photon & Instrument ESA)



## ***Directions :***

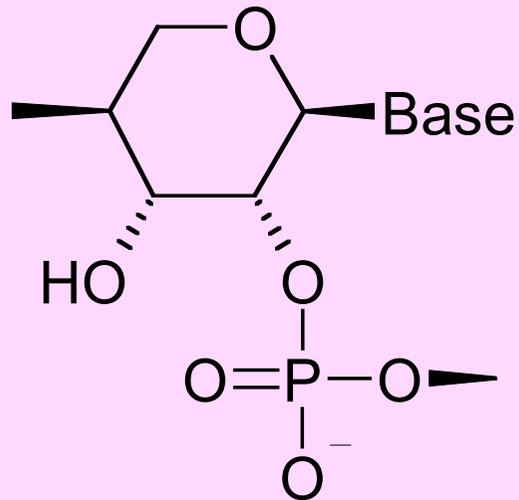
**Etude systématique de l'évolution de la matière organique dans des environnements extraterrestres (milieu interstellaire, Mars, Titan, comètes)**

**⇒ Suite du programme BIOPAN,**  
**⇒ Programme Expose sur ISS**



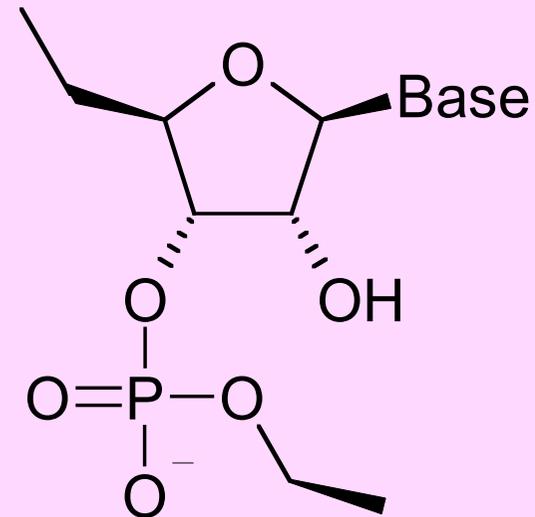
## 2. La chimie des origines de la vie

- Chimie prébiotique
- Emergence du vivant



p-ARN

***Un monde pré-ARN***



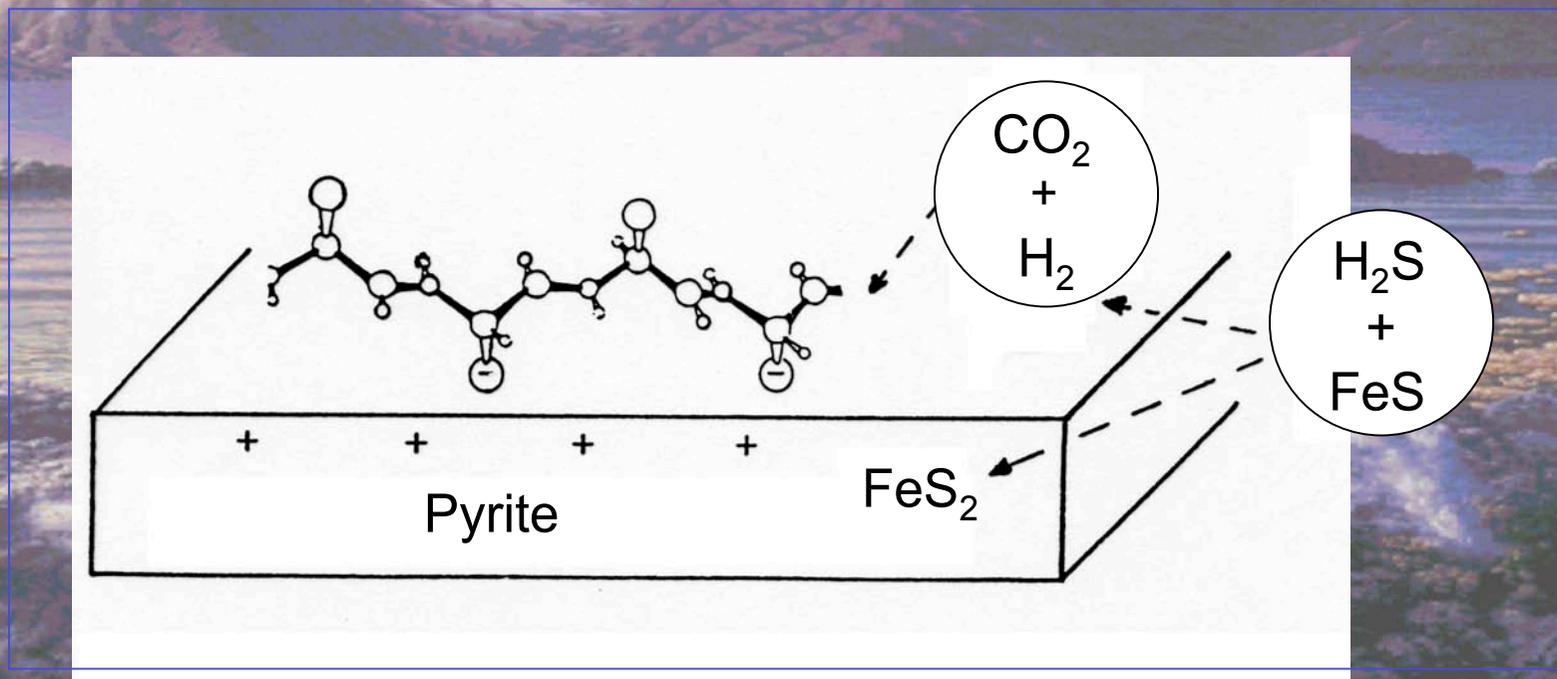
ARN

***Le monde ARN***

*La piste cellulaire*

## 2. La chimie des origines de la vie

- Chimie prébiotique
- Emergence du vivant



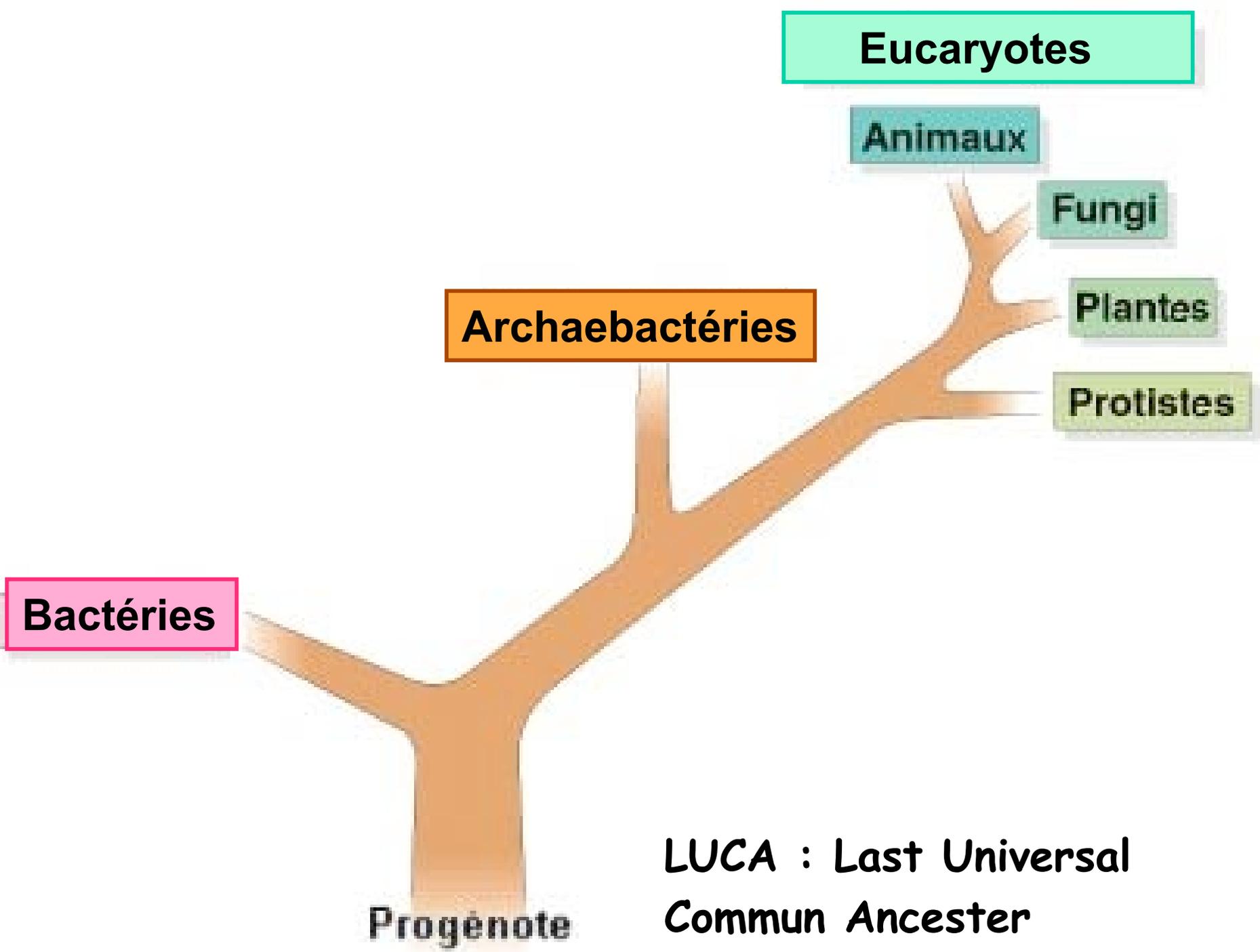
*Le monde des thioesters*

## 2. La chimie des origines de la vie

- Chimie prébiotique
- Emergence du vivant

### *Directions:*

- Recherche de systèmes autocatalytiques actifs sur des surfaces minérales dans l'eau
- Compréhension des premières brisures de symétrie conduisant à l'homochiralité du vivant
- Sélection d'ARN capables d'exercer les actes catalytiques indispensables aux premières voies métaboliques.



**Bactéries**

**Archaeobactéries**

**Eucaryotes**

**Animaux**

**Fungi**

**Plantes**

**Protistes**

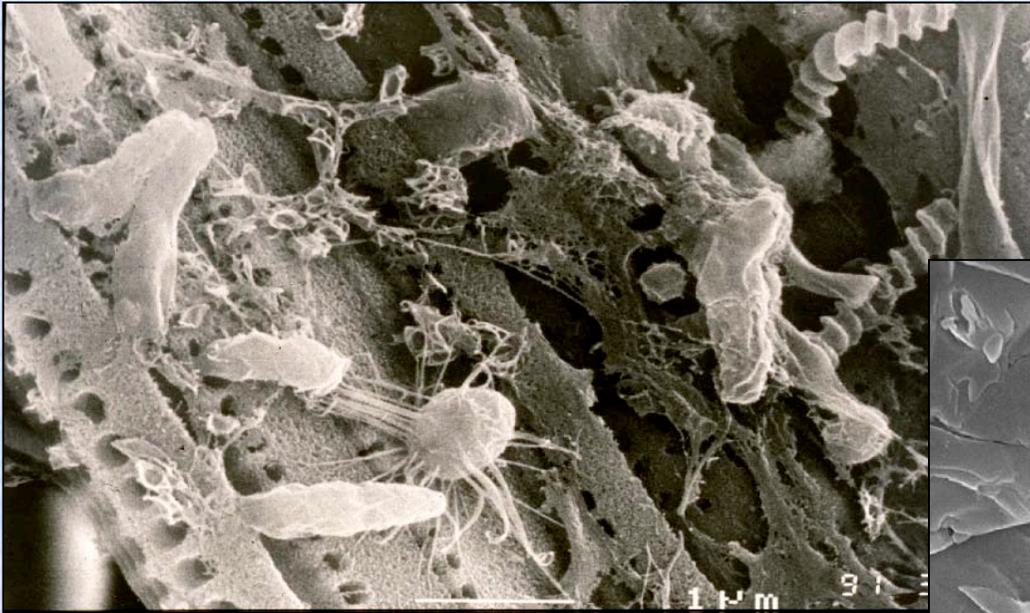
Progénote

**LUCA : Last Universal  
Commun Ancestor**

### 3. Recherche de la vie extraterrestre

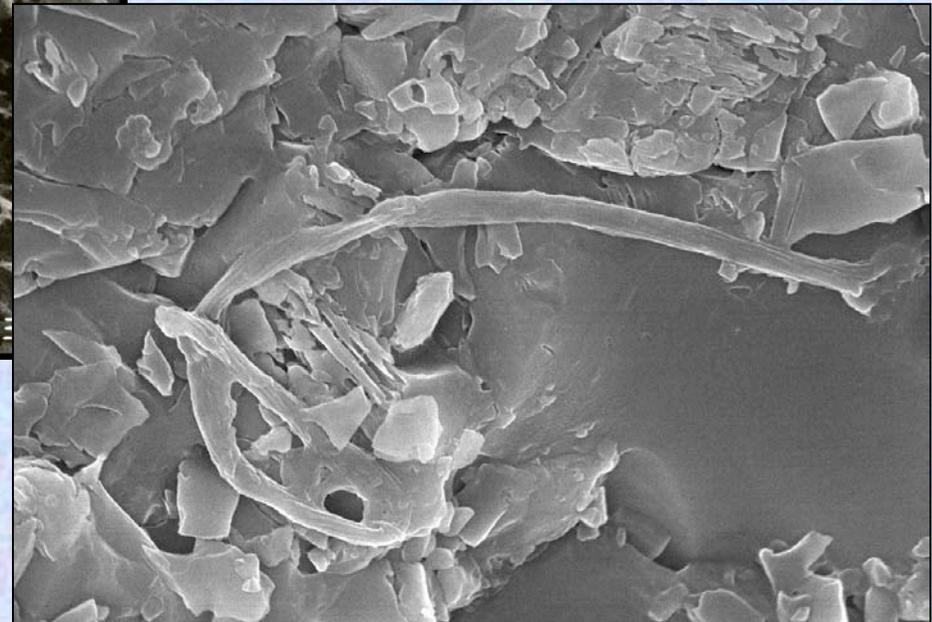
➤ **Biosignatures**

=> *structurales*



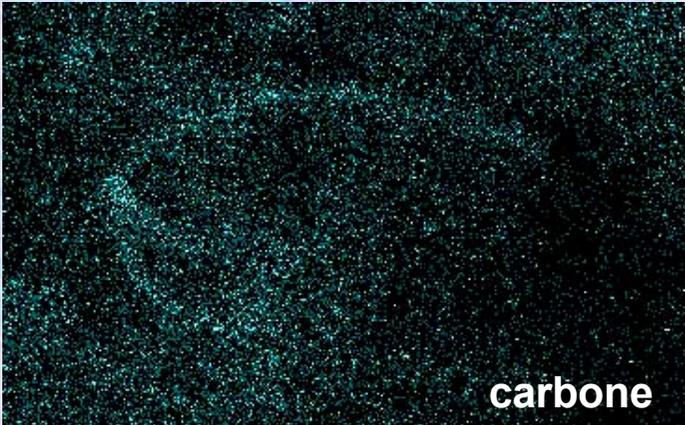
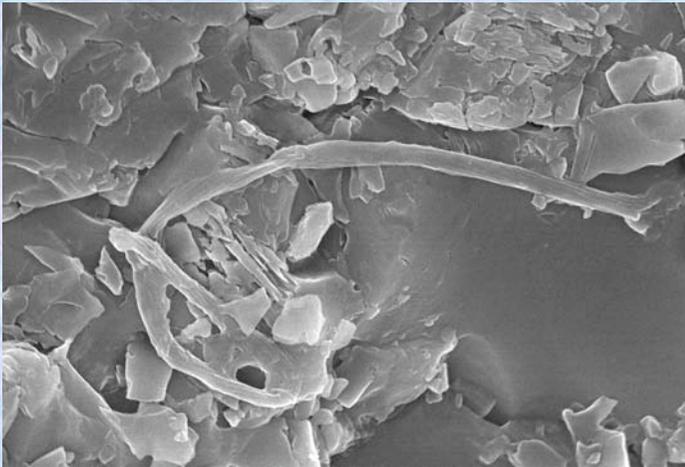
**Bactéries récentes**

**Bactérie fossile (3,5 Ga)**



# 3. Recherche de la vie extraterrestre

## ➤ Biosignatures

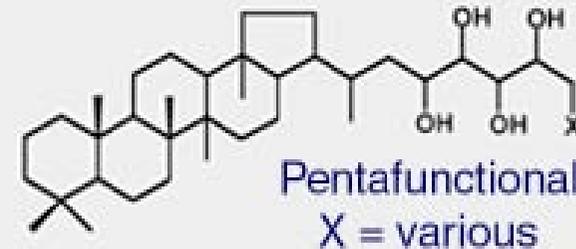
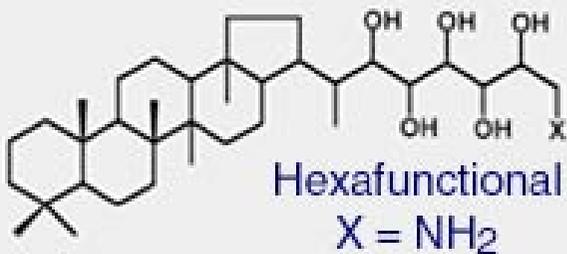
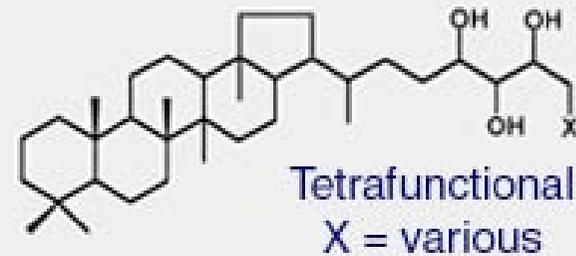


=> *chimiques*

# 3. Recherche de la vie extraterrestre

## ➤ Biosignatures

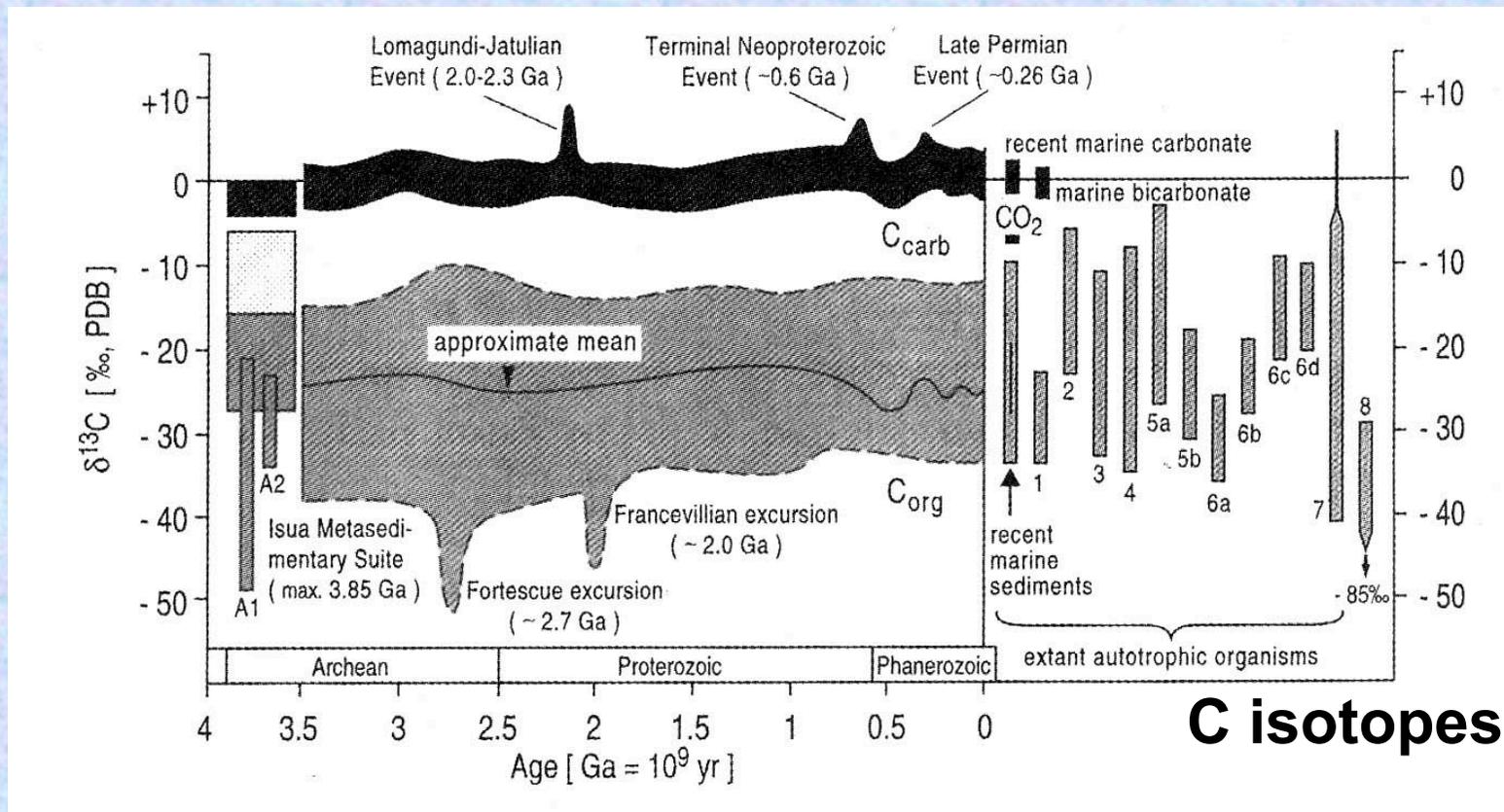
⇒ *Biochimiques - biomarqueurs*



# 3. Recherche de la vie extraterrestre

## ➤ Biosignatures

=> *Isotopiques*



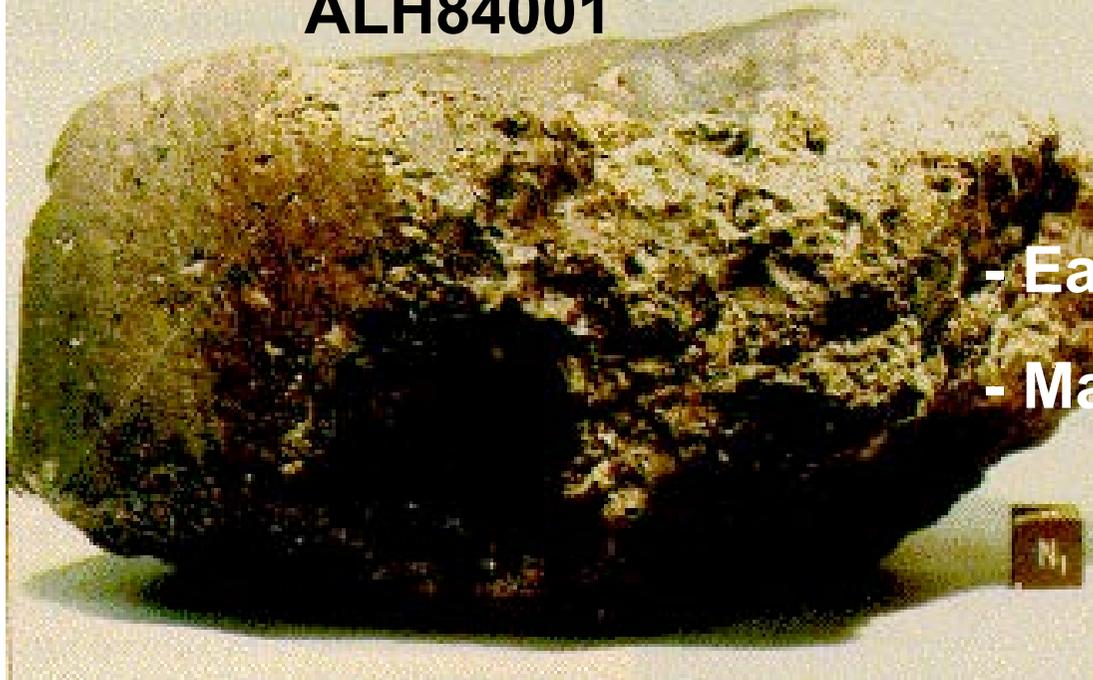
## ➤ Signatures du métabolisme

### 3. Recherche de la vie extraterrestre

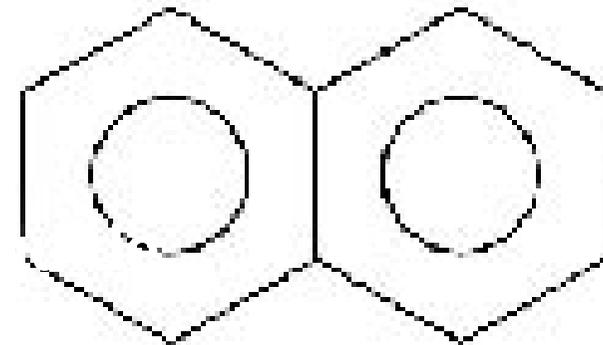
- Applications à la recherche d'une vie au-delà de la Terre : *Dans le système solaire*

Mars : un objet privilégié

ALH84001

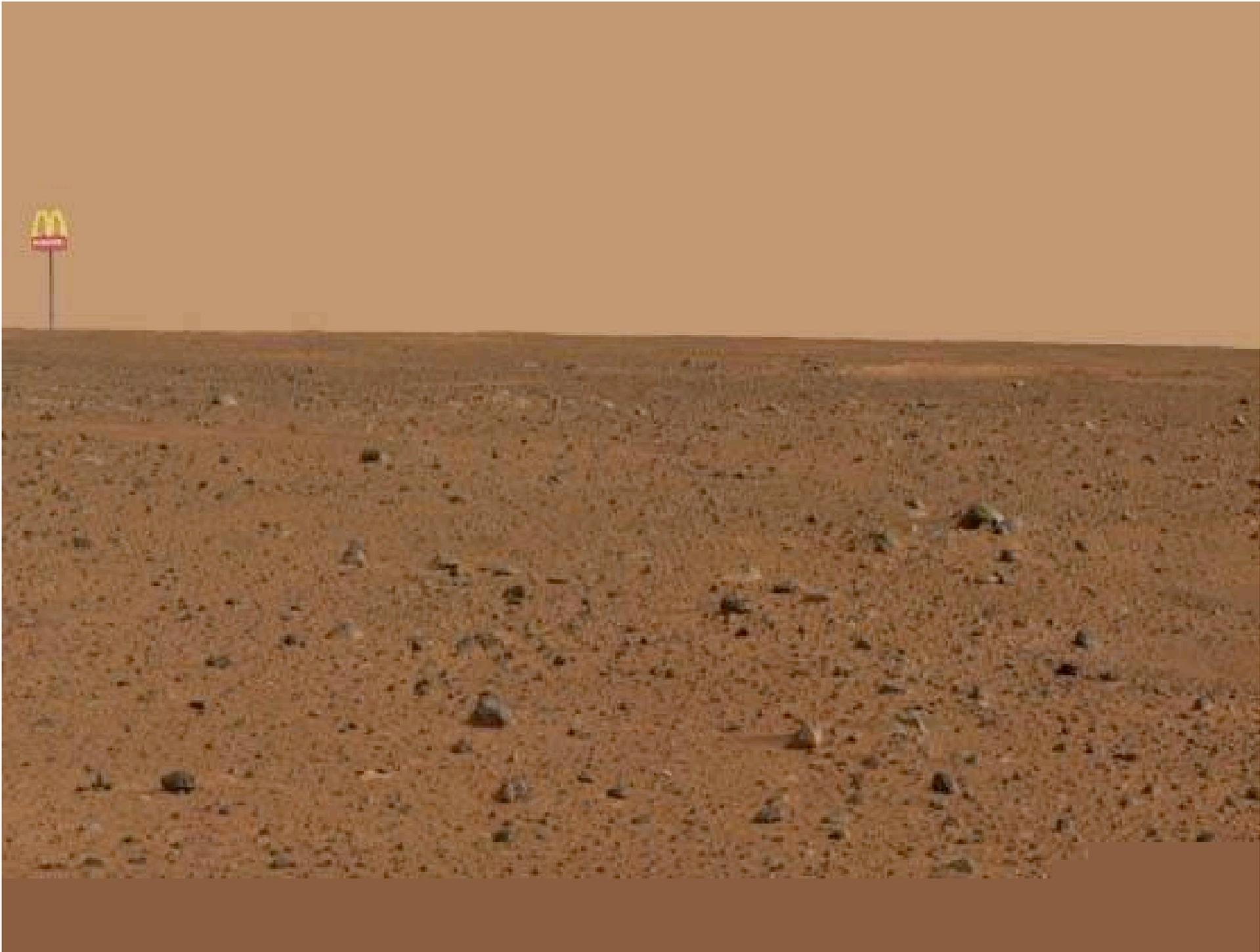


PAH



Naphthalene





# Exploration exobiologique de Mars:

## LA 1ère PRIORITE

Problème de protection  
planétaire



ANCIENT LIFE  
ON MARS



1996



Mars Global Surveyor

2001



Mars Odyssey

2003



European Mars Express

2005



Mars Reconnaissance Orbiter

2007



Mars Telecom Orbiter

2009

Mars Pathfinder



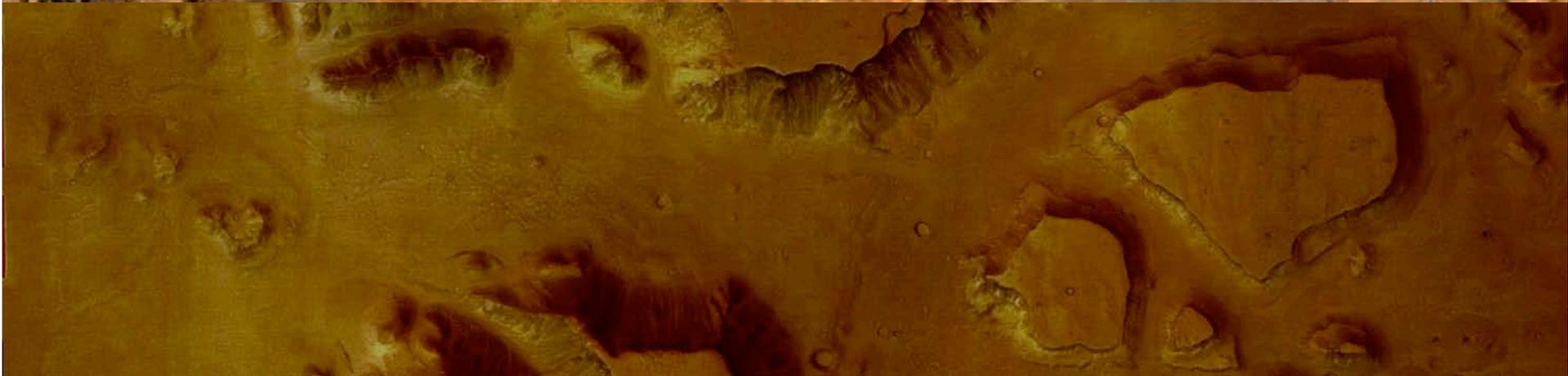
Mars Exploration Rovers

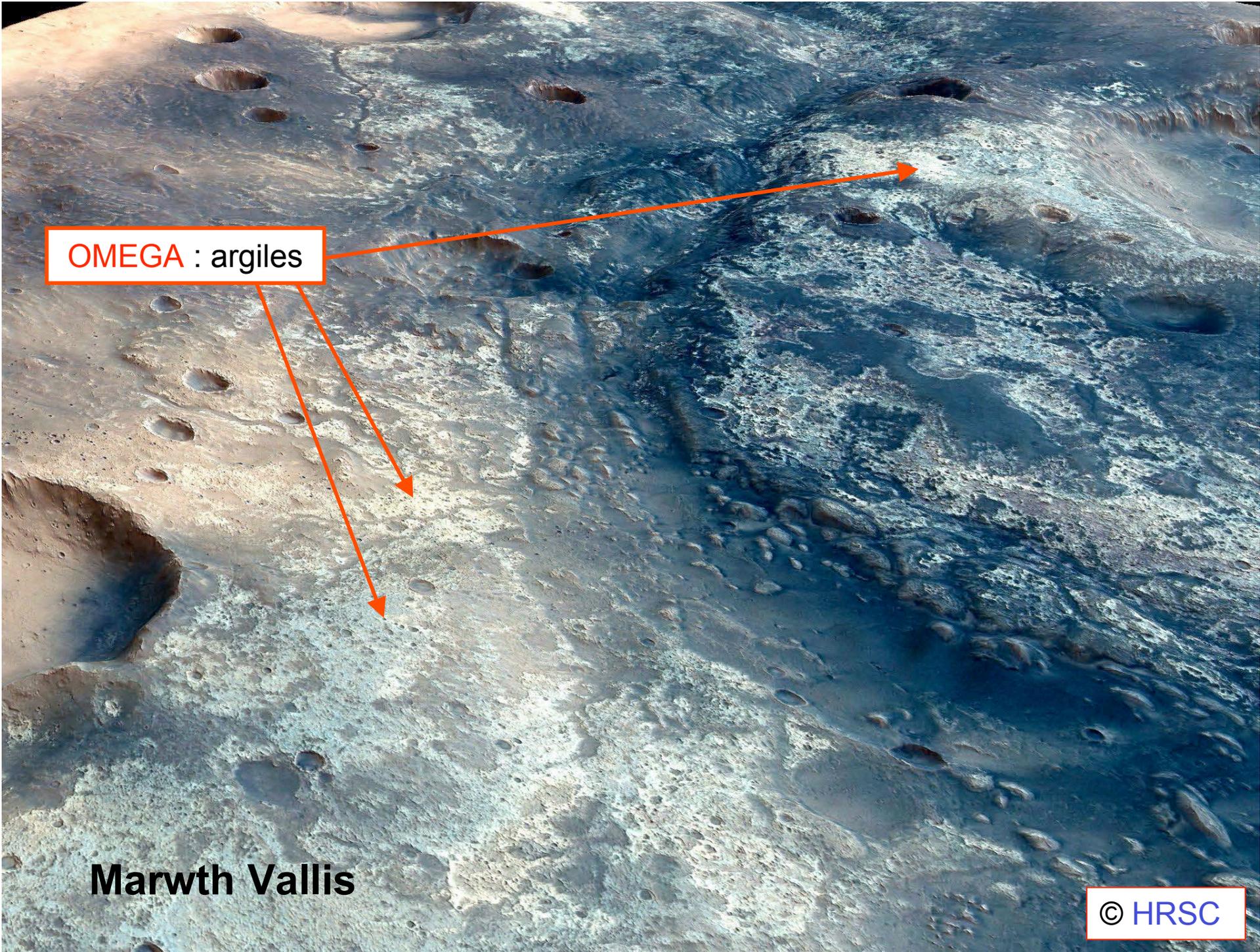


Phoenix Scout



Mars Science Laboratory

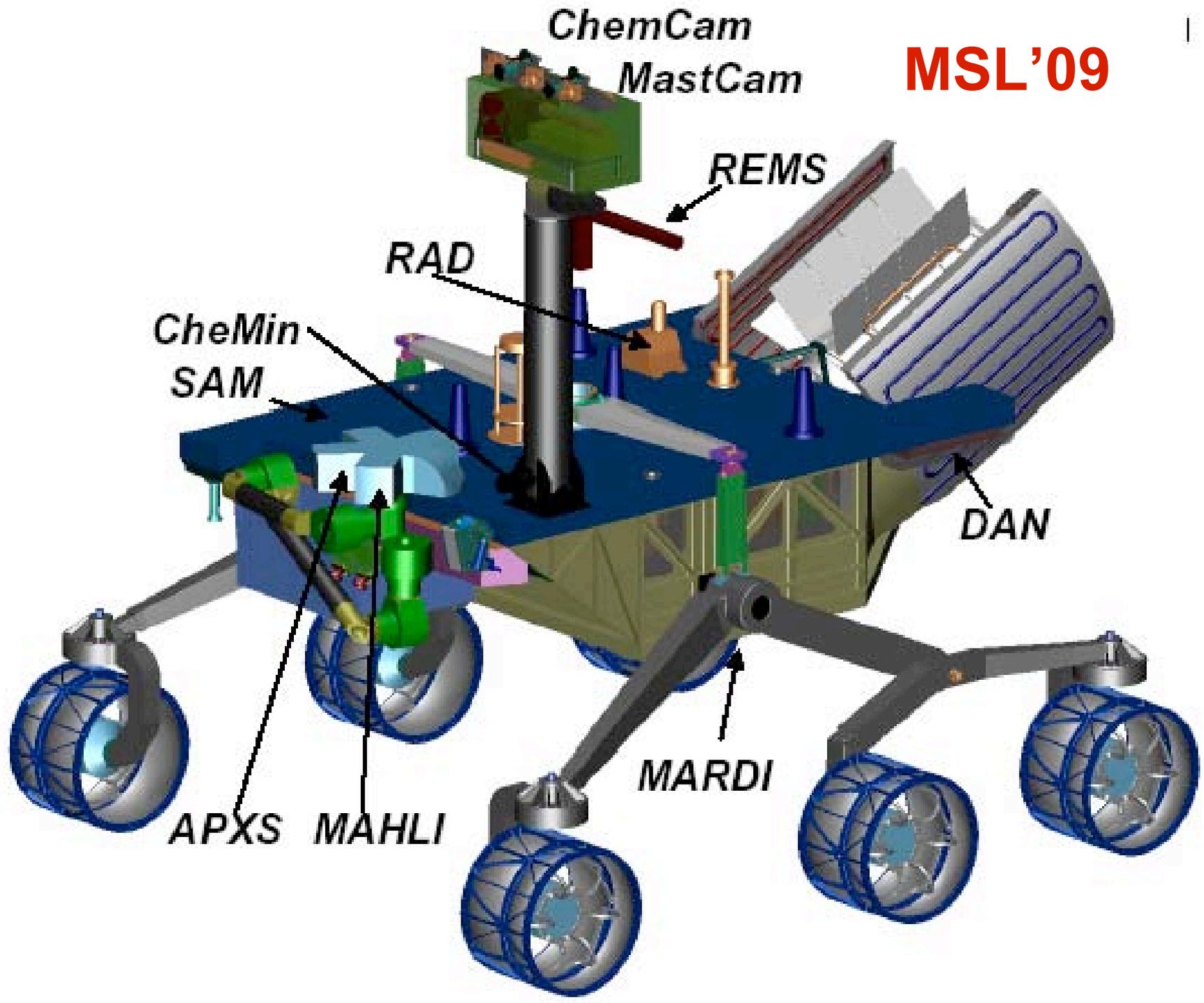




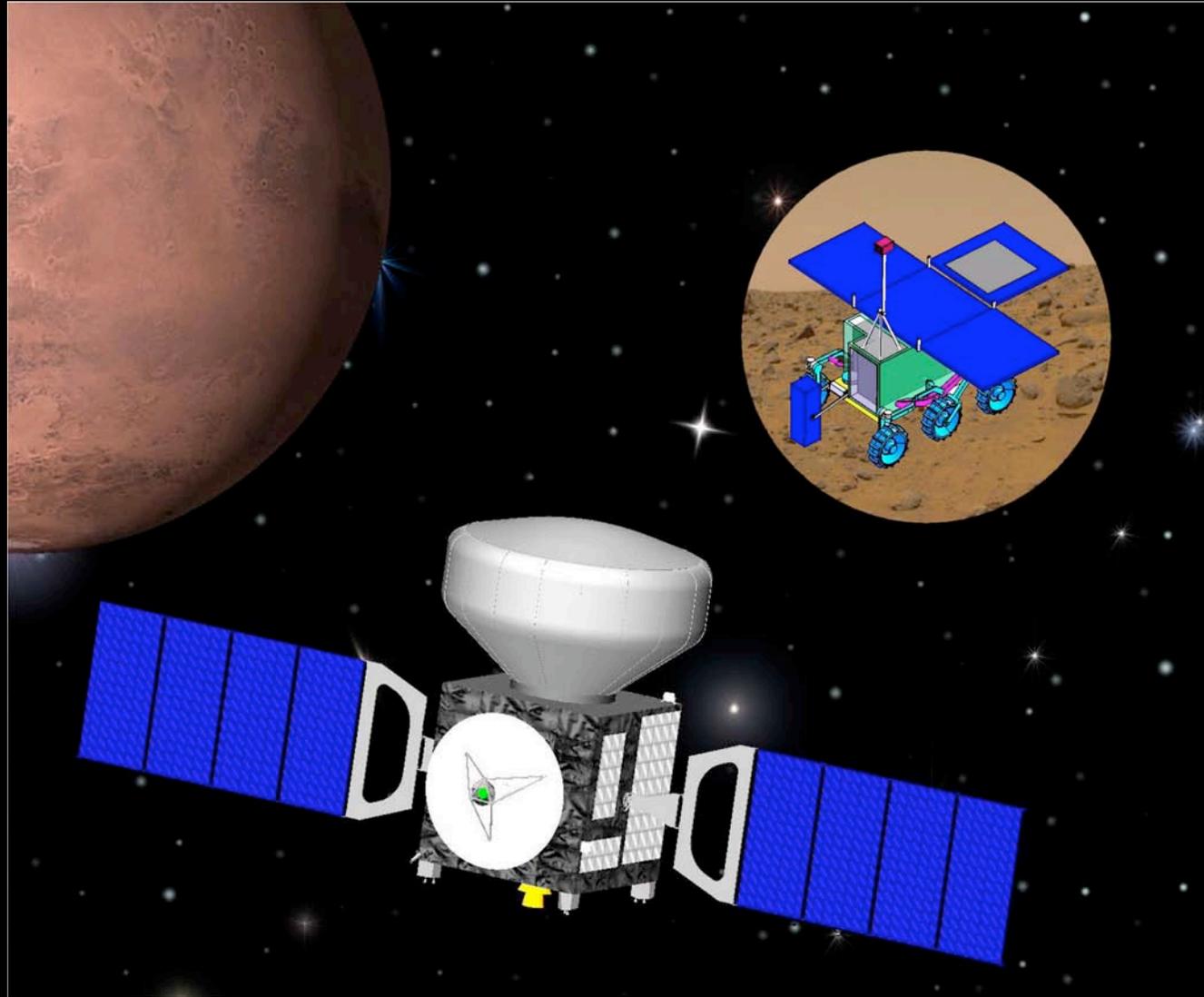
OMEGA : argiles

Marwth Vallis

**MSL'09**



# Projet dans le cadre du programme Aurora ExoMars (ESA) : ROVER PASTEUR



# Mission ExoMars

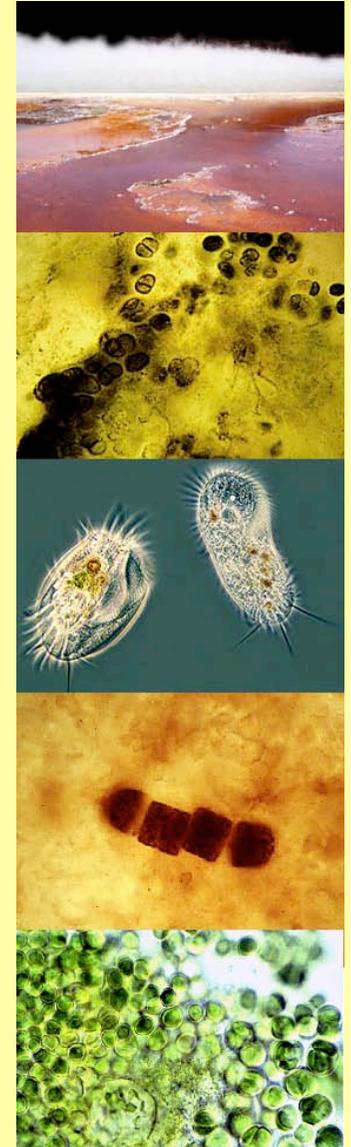
Lancement en 2011 (Soyuz)

## ❑ Principaux objectifs technologiques

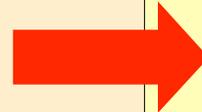
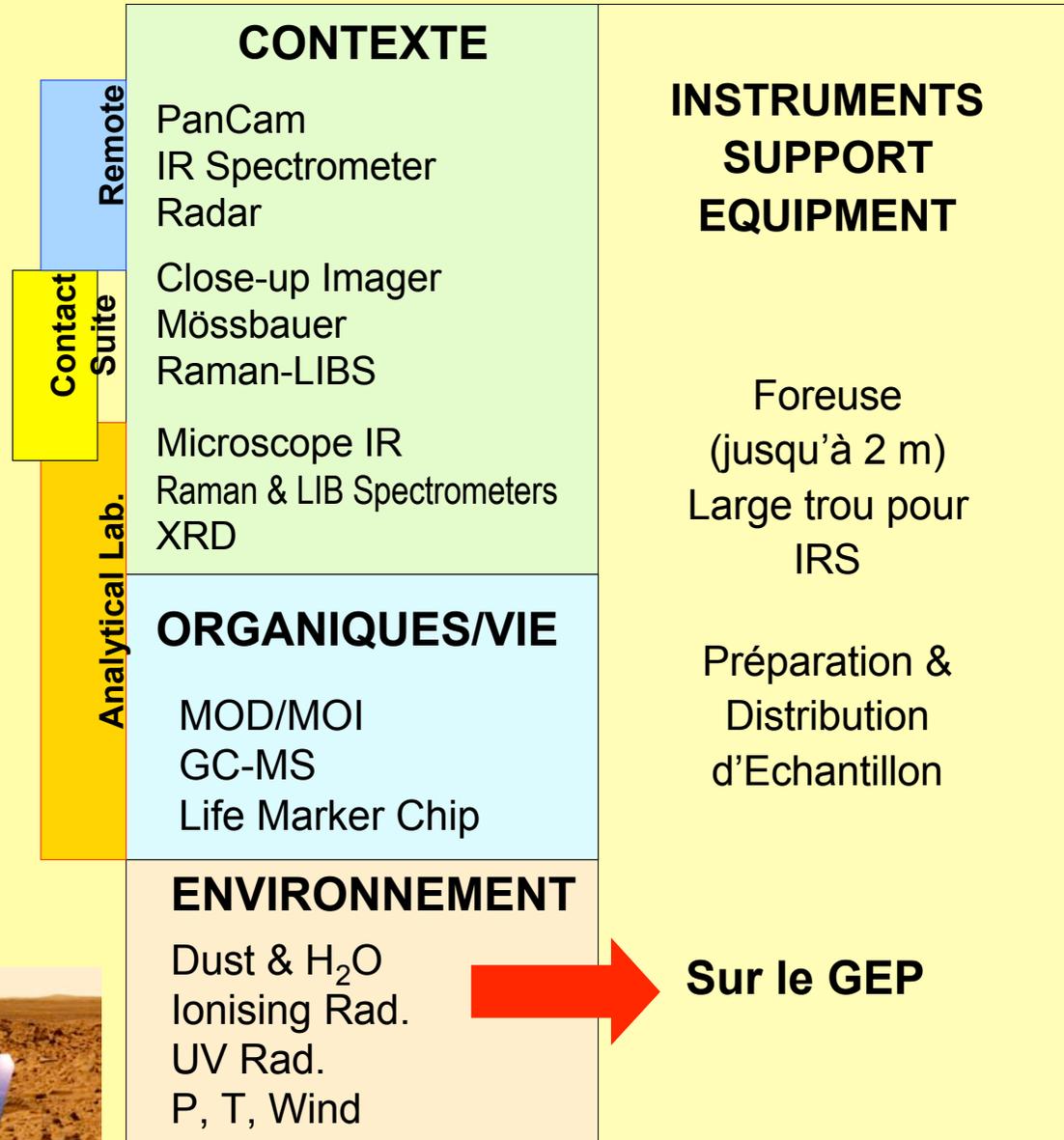
- Entrée sans risque – pose à la surface d'une lourde charge
- Mobilité de surface (Rover) et accès à la sous-surface (Foreuse)
- Protection planétaire

## ❑ Principaux objectifs scientifiques

- Recherche de traces de vie passée et présente
- Caractérisation de la géochimie martienne et distribution de l'eau
- Etude détaillée de l'environnement et la géophysique martienne
- Identification des risques de surface pour de futures missions habitées

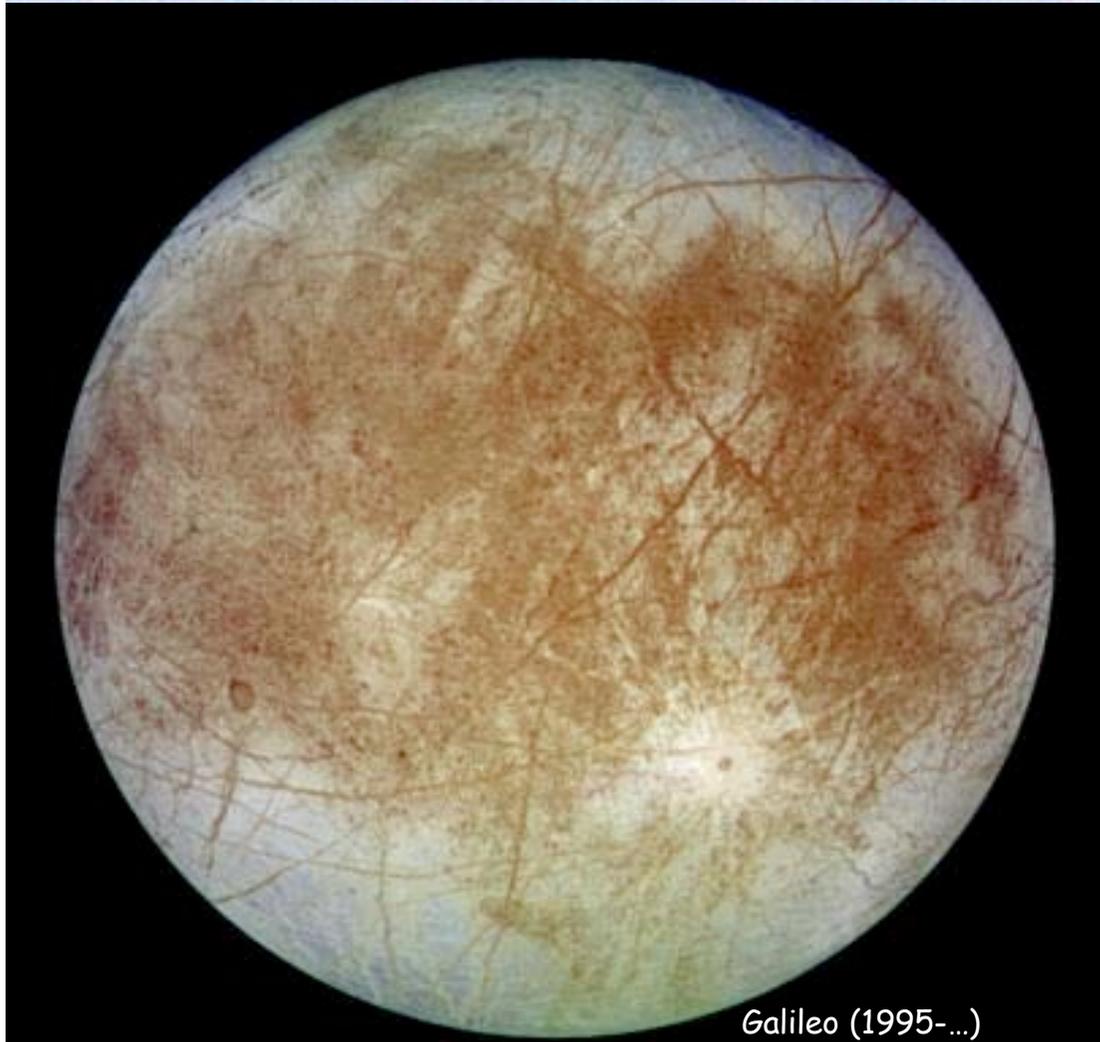


# Charge Utile de Pasteur



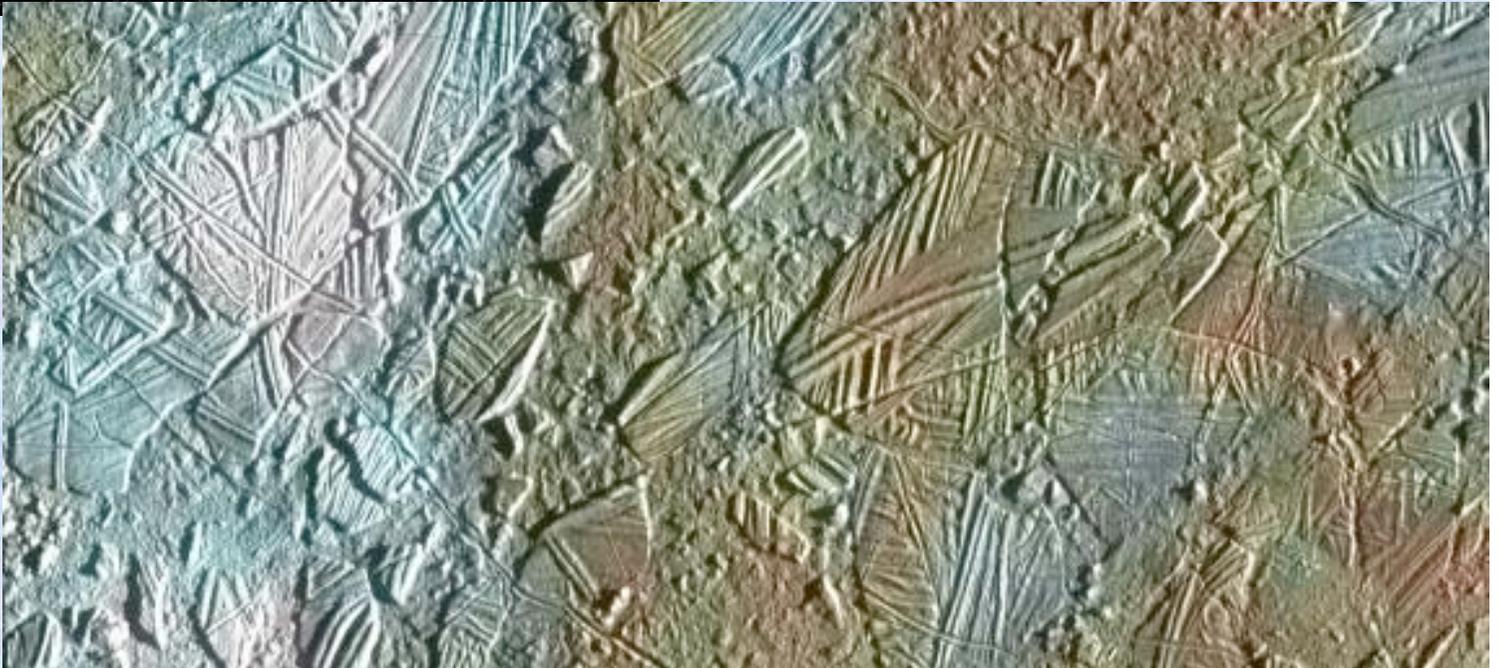
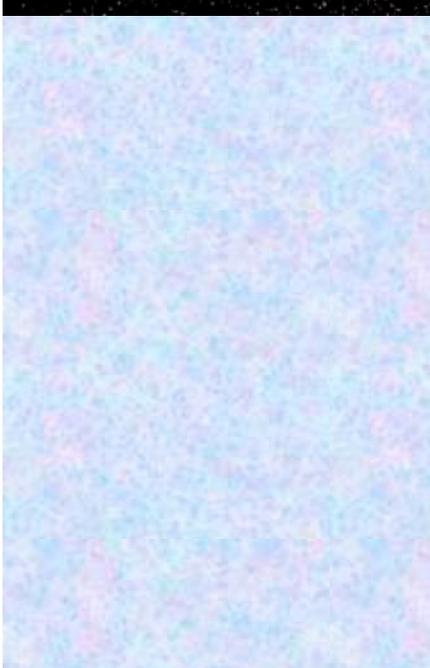
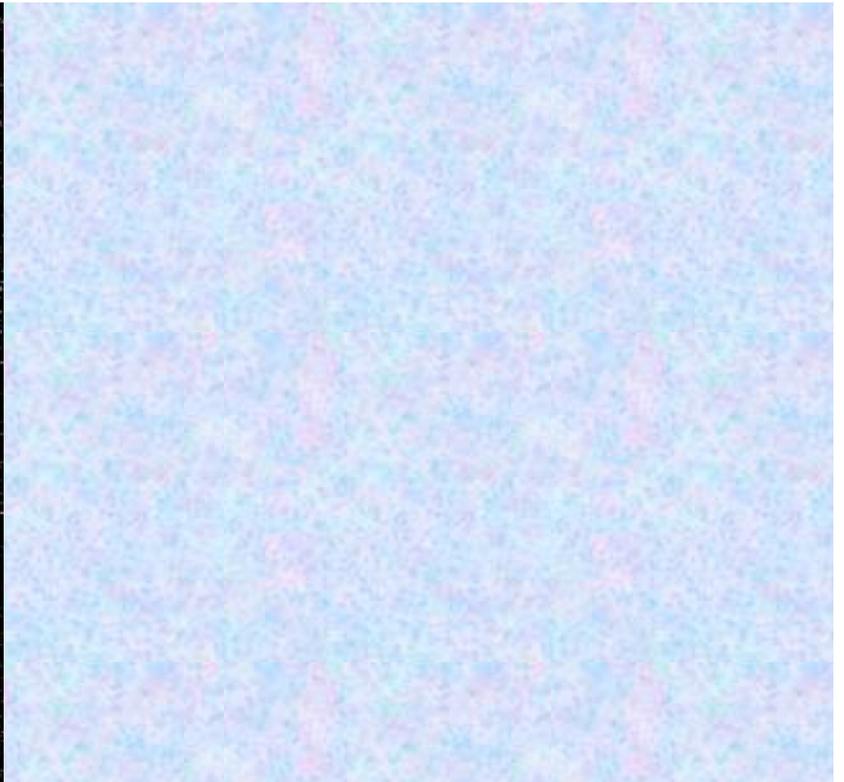
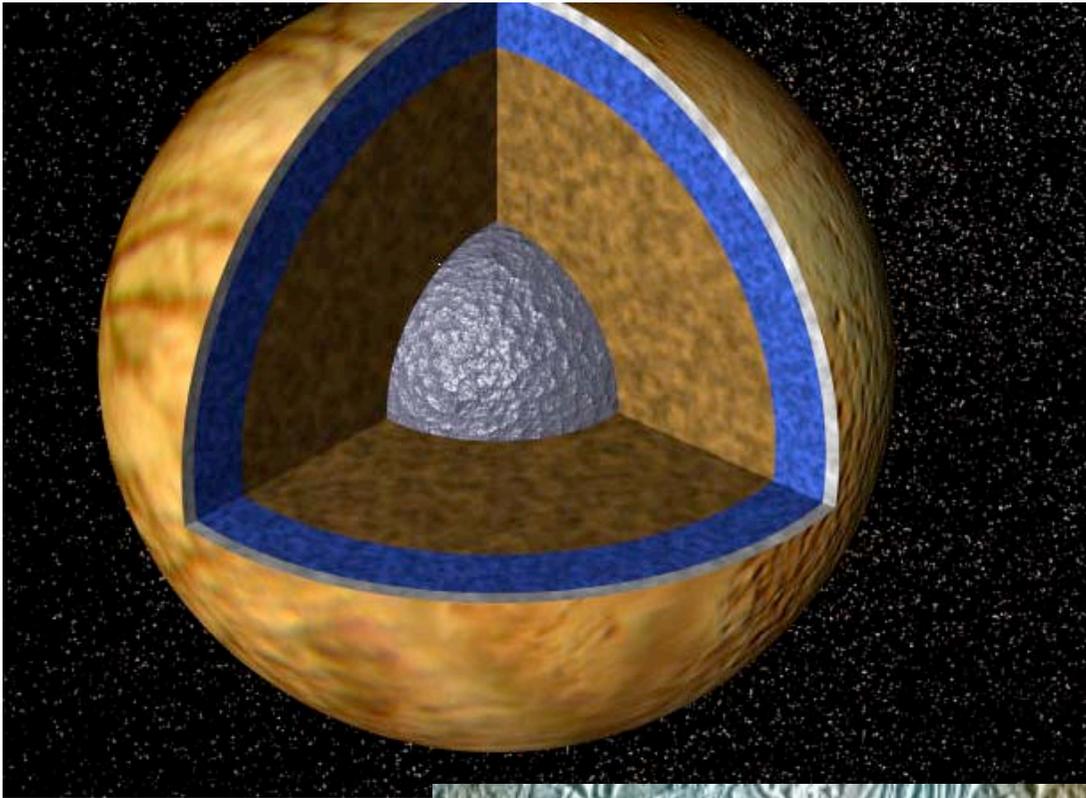
### 3. Recherche de la vie extraterrestre

- Applications à la recherche d'une vie au-delà de la Terre : *Dans le système solaire*



Galileo (1995-...)

**EUROPE**



## **Comment détecter la vie sur Europe ?**



**Une mission avec un Hydrobot/cryobot pour:**

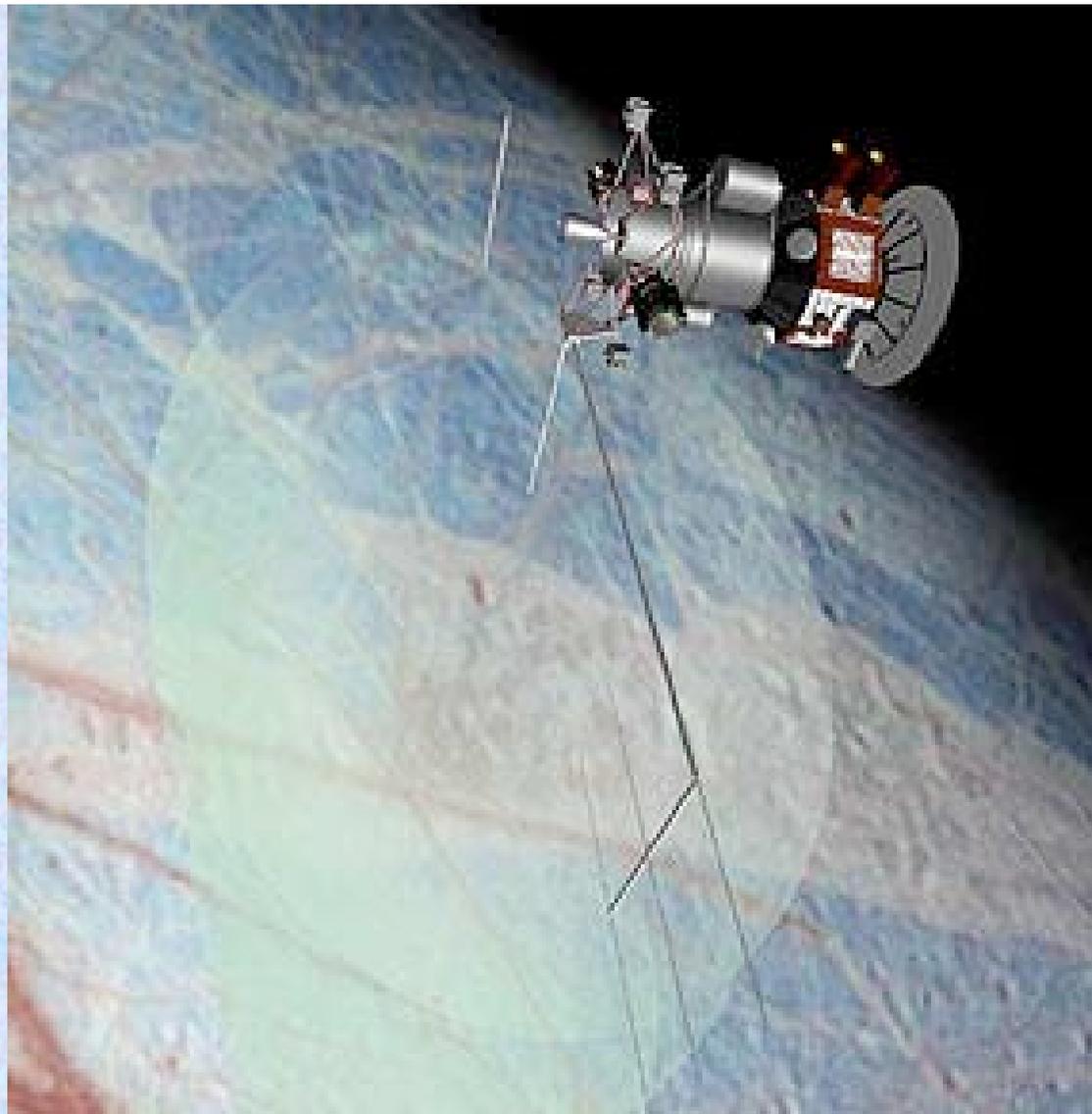
- **traverser les km d'épaisse (fine ?...) croûte de glace**
- **pénétrer dans l'hypothétique océan de Europe**
- **chercher d'éventuelles sources hydrothermales**
- **chercher d'hypothétiques micro- (macro?-) organismes**

## De nombreux problèmes :

Exemple: exploration du lac de Vostok

- *Transposition des technologies de Vostok* à l'espace peu évidente
- *Densité de biomasse* peut être très faible (10 ordres de grandeur inférieure à la valeur sur Terre)
- *Contamination biologique!!!* Vostok le bon exemple

## **Une mission avec un orbiter**

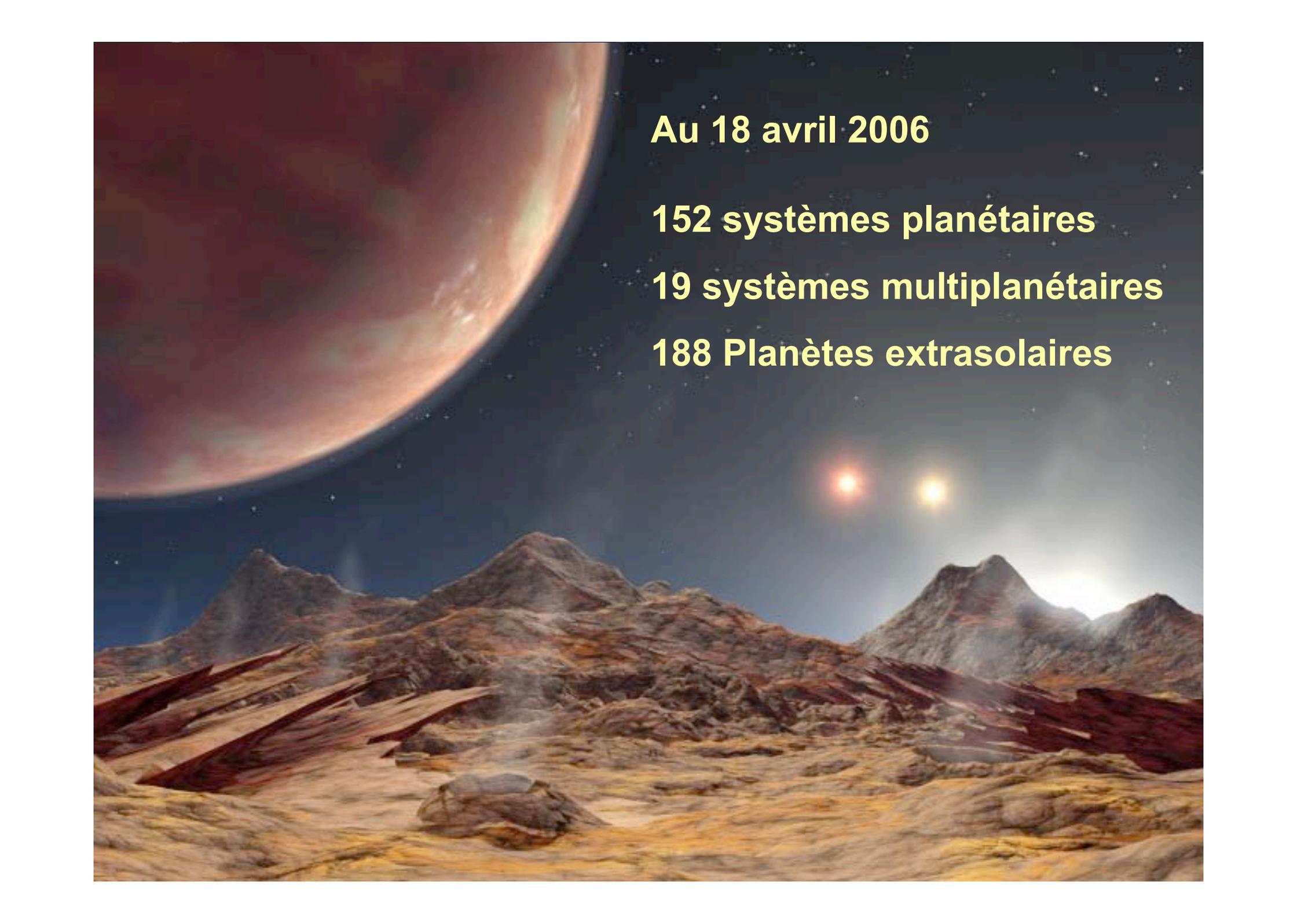


- **cartographie détaillée du satellite et acquisition de données pour confirmer la présence d'un océan**

## 3. Recherche de la vie extraterrestre

- Applications à la recherche d'une vie au-delà de la Terre : *Hors du système solaire*

### EXOPLANETES

A digital illustration of an alien landscape. In the foreground, there are rocky, reddish-brown hills and mountains. The sky is dark blue with two bright, glowing stars or planets. A large, reddish-brown planet is visible in the upper left corner. The overall scene is a futuristic, extraterrestrial environment.

**Au 18 avril 2006**

**152 systèmes planétaires**

**19 systèmes multiplanétaires**

**188 Planètes extrasolaires**

# Quels biomarqueurs?

- **Biomarqueurs atmosphériques**

gaz biogéniques :  $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2O$  ou leurs dérivées :  
 $O_3$ ,  $CH_3$ ,  $NO$ ...

- **Biomarqueurs spectroscopiques**

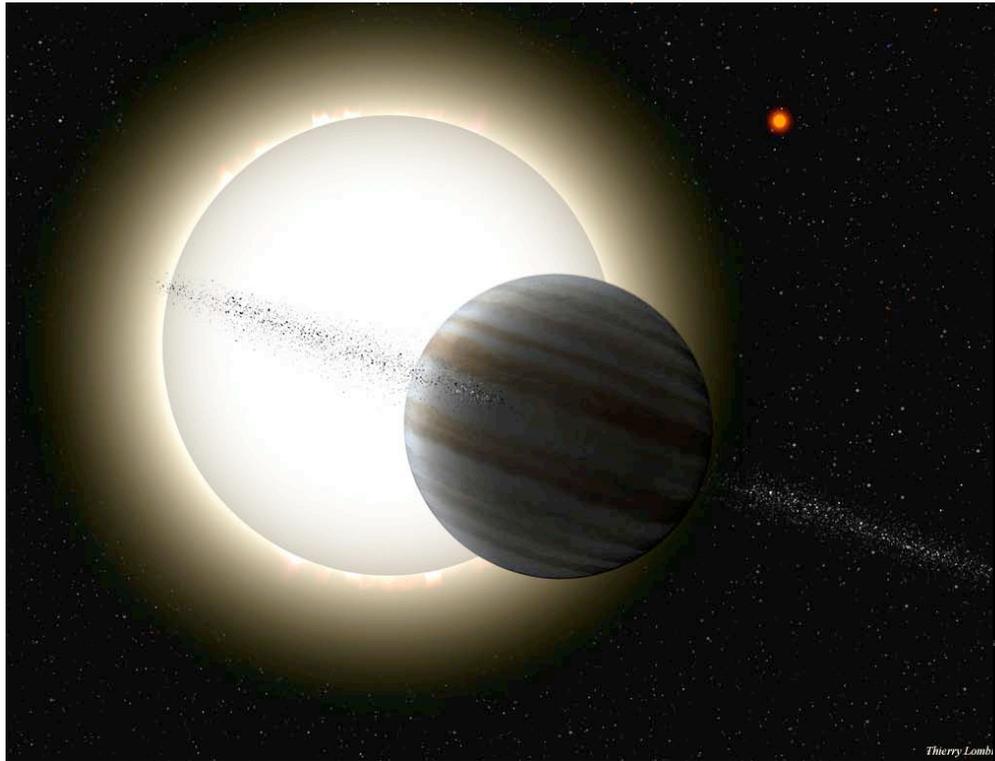
$O_2$  (760 nm, 5 mm) -  $O_3$  (9,6 mm) -  $CH_4$  (7,4 mm) - ...

- **Risque de “faux positifs”**

Ex:  $O_2$ ,  $O_3$  : Mars, Ganymède, Europe, Dioné, Rhéa  
 $CH_4$  : Titan

- **Risque de “faux négatifs”**

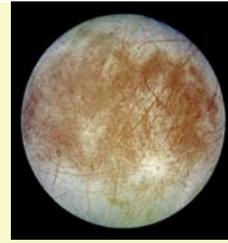
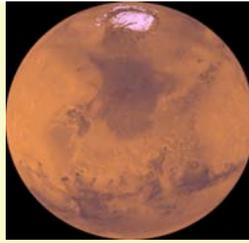
$O_3$  : Terre primitive (avant -2 Ga)



## ***Directions***

**- Etude des planètes –océans**

**- Participations aux missions de type Darwin avec mesures spectroscopiques permettant d'identifier parmi les exoplanètes telluriques détectées, *celles qui sont habitables ou habitées.***



**SOURCES**  
météorites &  
poussières  
(collecte,  
analyse,  
façonnage)

**CONDITIONS**  
**CHIMIQUES,**  
**ENVIRONNEMENT**

**RESISTANCE** aux  
Conditionsextrêmes  
(T,P,pH,radiations...  
océans,  
antarctique,  
espace)

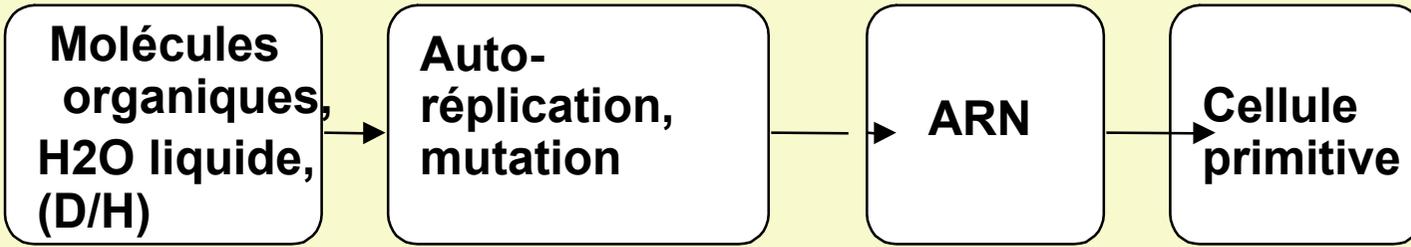


**exoplanètes**

**Signal**  
**O<sub>2</sub>-O<sub>3</sub>**



**Molécules**  
**Inter-**  
**stellaires**



**bombardement**

**Isua**

**Stromatolithes ?**

**-4,55 Ga**

**-3,8 Ga**

**Terre primitive**



**-3,5 Ga**

***Les programmes incluent aussi les aspects épistémologiques***

**Bien évidemment =**

**De telles recherches ne peuvent être menées uniquement à un niveau national!!**

**=> programmes en coopération largement internationale!!**

**=> Et très largement interdisciplinaires, seule voie d'intégration des aspects complémentaires et indispensables de chacun des champs disciplinaires**



**Avec mes  
remerciements  
exobiologiques pour  
votre attention**