

Formation stellaire et conditions d'apparition de la vie

Jean-Pierre Bibring

IAS

Institut d'Astrophysique Spatiale

bibring@ias.u-psud.fr

Inauguration P2IO, Orsay, 11/01/2012

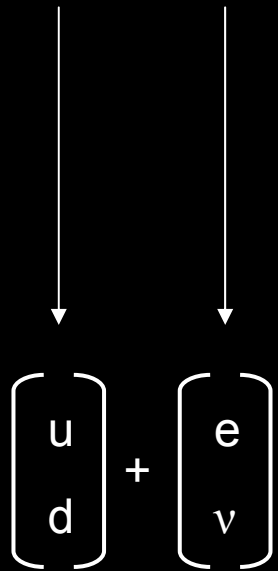
Formation stellaire et conditions d'apparition de la vie

Dans la lente évolution de la complexification de la matière, qui prend naissance dans le Big Bang lui-même, l'apparition des étoiles, puis des systèmes stellaires, tient un rôle central : celui de synthétiser des noyaux de plus en plus lourds, puis des molécules (en des milieux protégés), éventuellement jusqu'à des formes vivantes, d'une immense diversité.

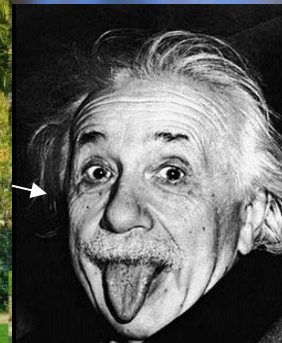
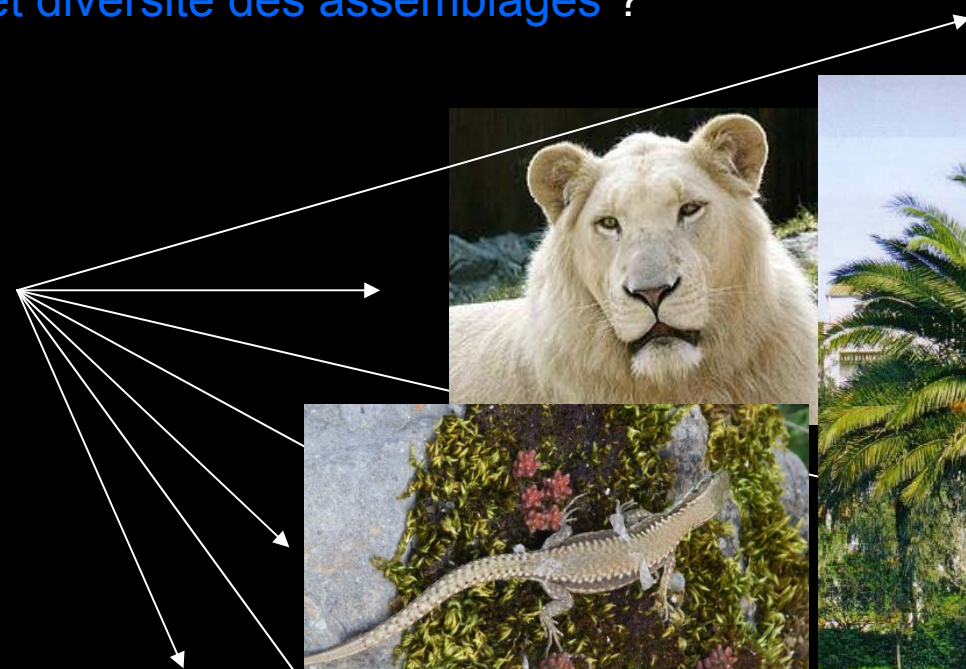
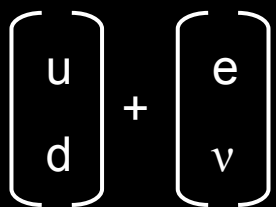
Pour autant, notre compréhension des processus à l'œuvre dans ces deux étapes critiques - formation stellaire et apparition de la vie – demeure embryonnaire : elle constitue un enjeu de recherches majeur.

C'est une marque forte de P2IO d'inscrire ces recherches comme thématique prioritaire, par des contributions très multiformes, synthèses de l'activité de plusieurs de ses composantes.

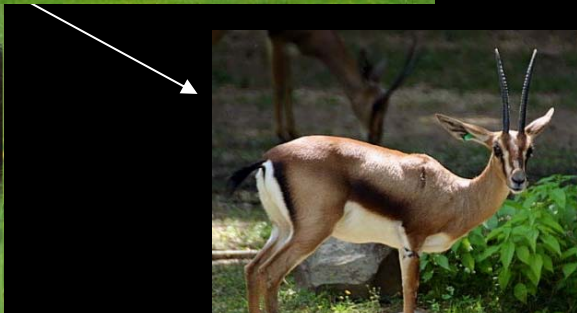
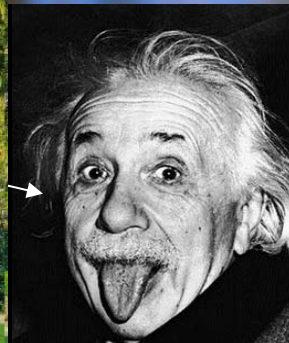
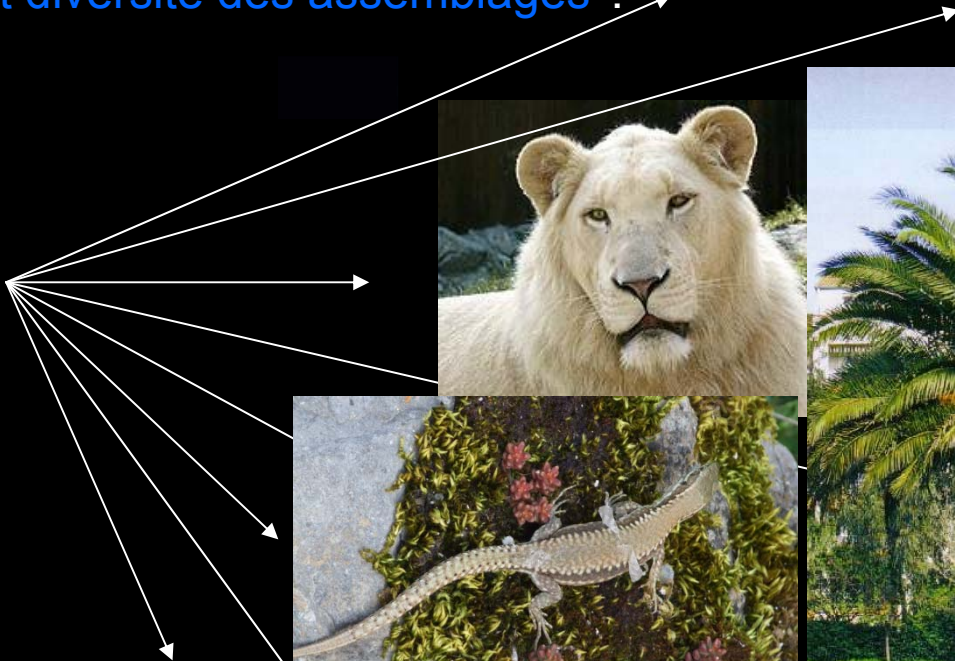
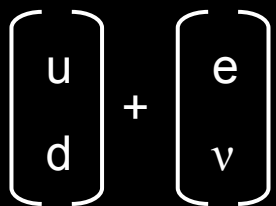
Comment, à partir de quatre particules
élémentaires essentiellement



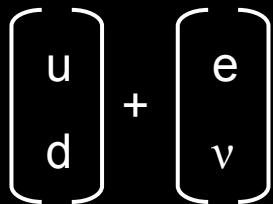
Comment, à partir de quatre particules élémentaires essentiellement, est-on parvenu, en moins de 14 milliards d'années, par le seul jeu d'arrangements gérés par quatre types d'interaction, à une telle richesse et diversité des assemblages ?



Comment, à partir de quatre particules élémentaires essentiellement, est-on parvenu, en moins de 14 milliards d'années, par le seul jeu d'arrangements gérés par quatre types d'interaction, à une telle richesse et diversité des assemblages ?

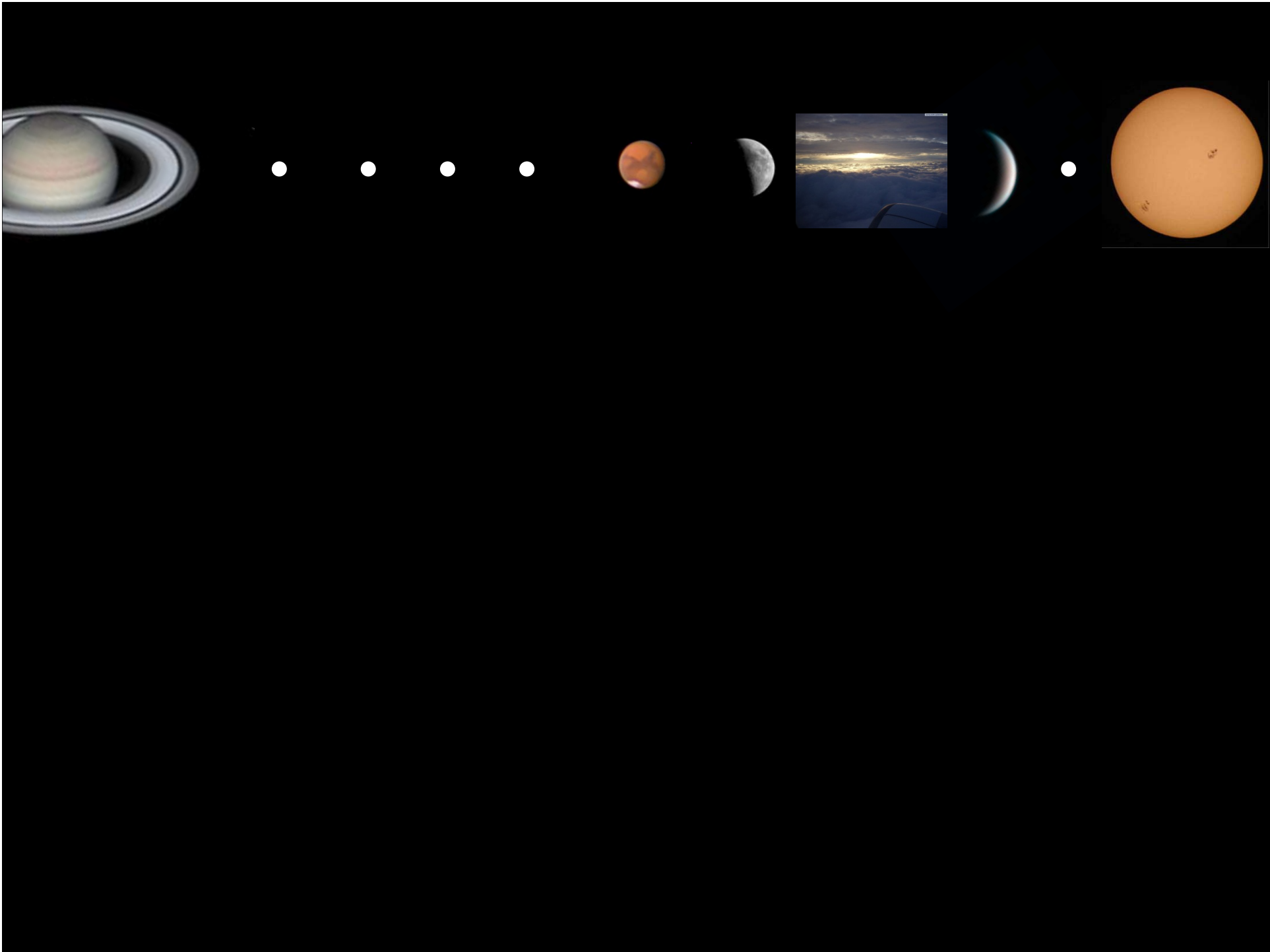


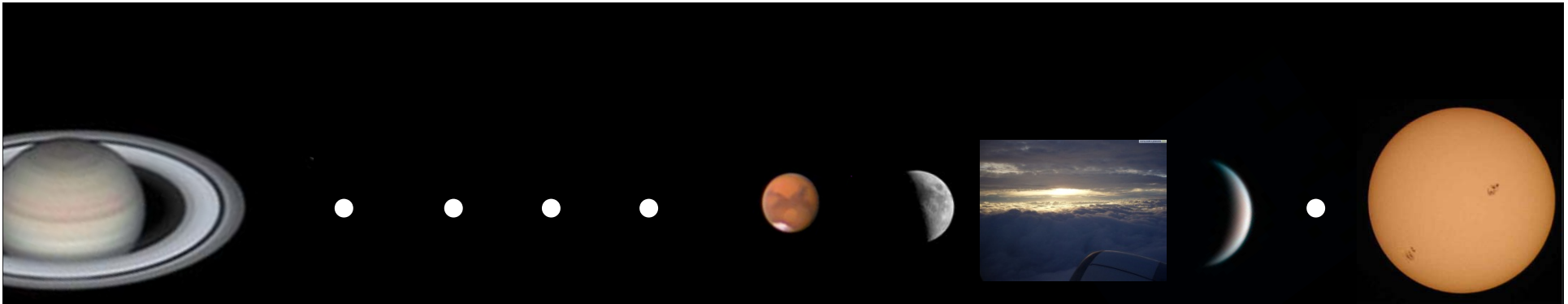
Comment, à partir de quatre particules
élémentaires essentiellement,
est-on parvenu, en moins de 14 milliards
d'années, par le seul jeu d'arrangements
gérés par quatre types d'interaction, à une
telle **richesse et diversité des assemblages** ?



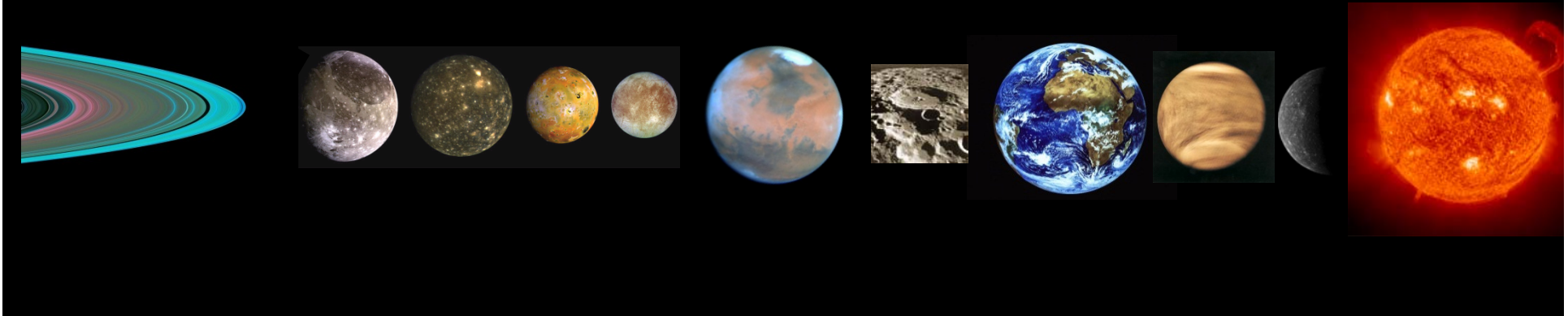
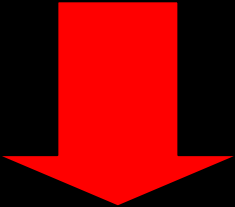
Nous sommes au coeur d'une profonde révolution,
dans la prise en compte de ce qui a conduit
à l'Univers tel que nous l'observons désormais,
à la place dans l'espace et le temps de la Terre et
de l'homme.

Cette révolution, rendue possible essentiellement
par l'accès aux moyens spatiaux, irrigue tous les
champs de l'activité sociale.

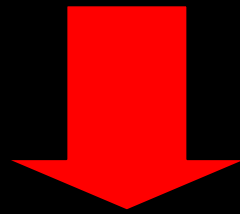




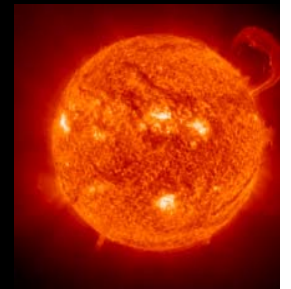
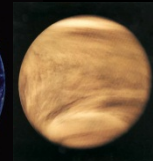
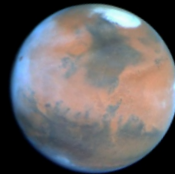
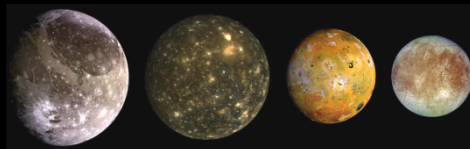
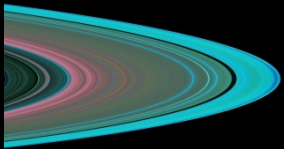
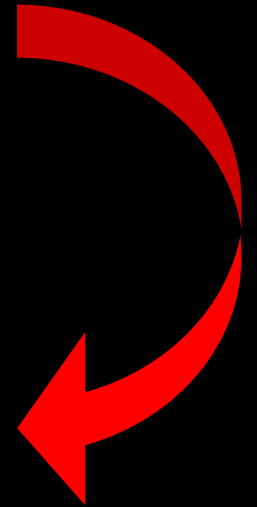
30 années d'exploration spatiale

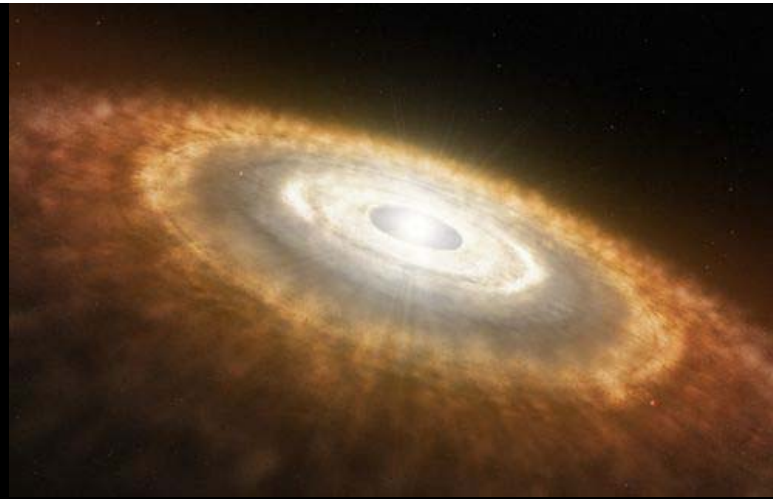


30 années d'exploration spatiale



diversité / spécificités

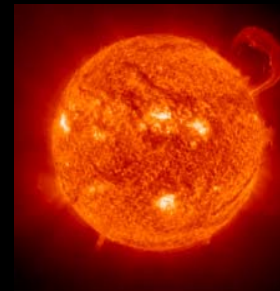
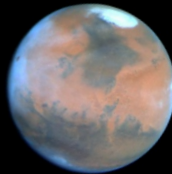
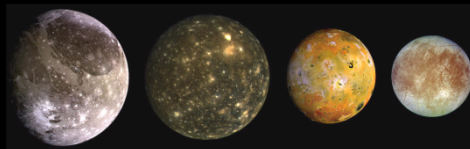
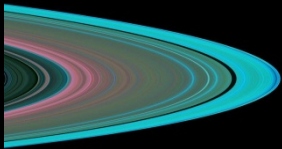
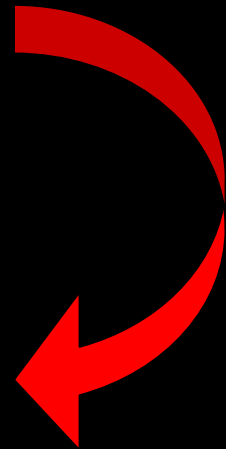
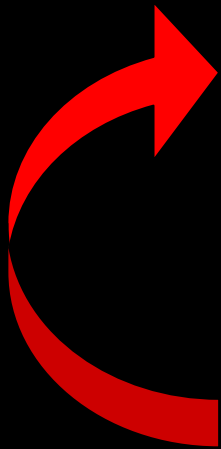


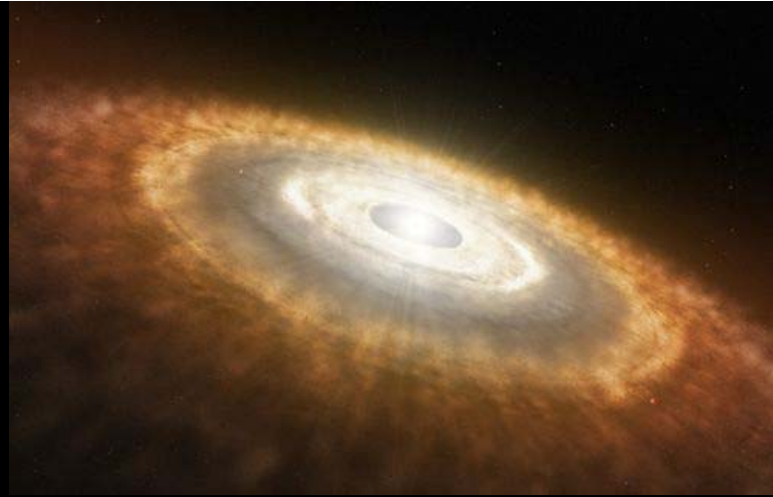


origine commune

contraste dialectique entre

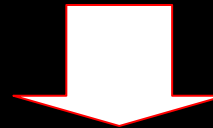
diversité / spécificités



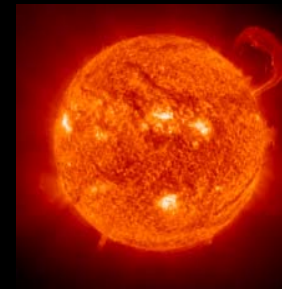
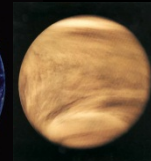
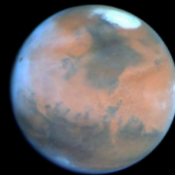
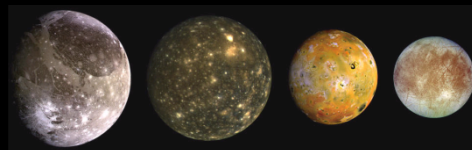
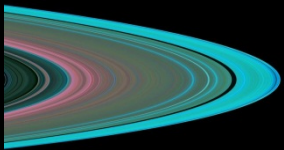


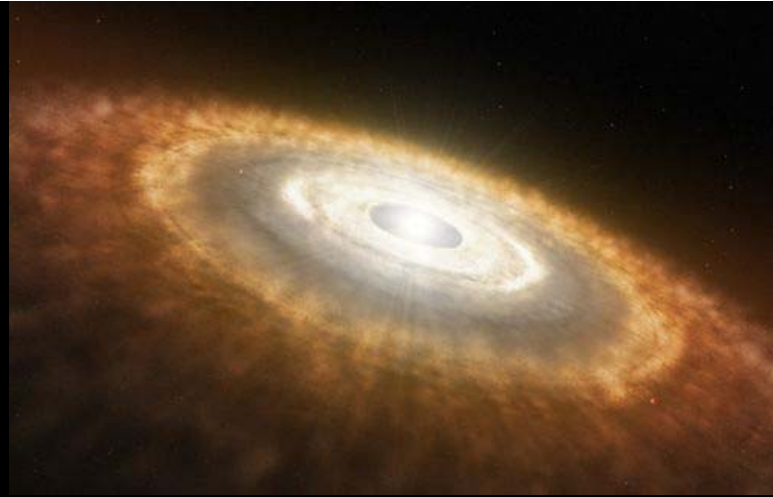
origine commune

quels sont les moteurs de l'évolution ?



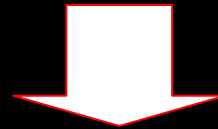
diversité / spécificités



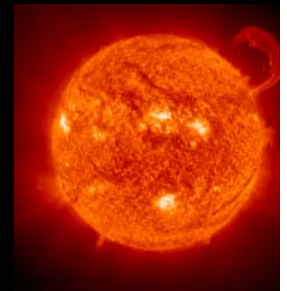
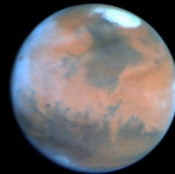
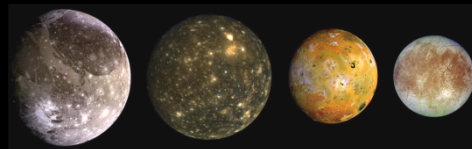
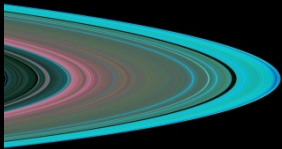


origine commune

quels sont les moteurs de l'évolution ?



diversité / spécificités



Terre générique, banale ?

pluralité des mondes ?



Terre générique, banale ?

pluralité des mondes ?



ou

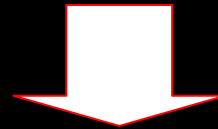
Terre, unique ?

à quelle échelle ?

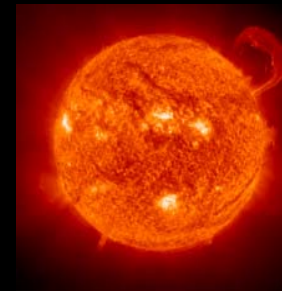
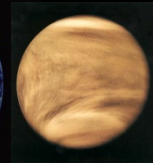
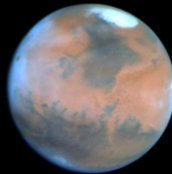
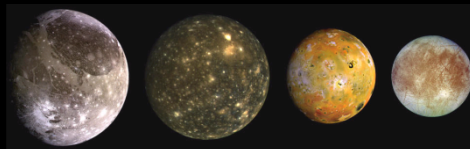
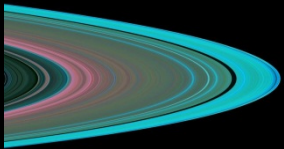


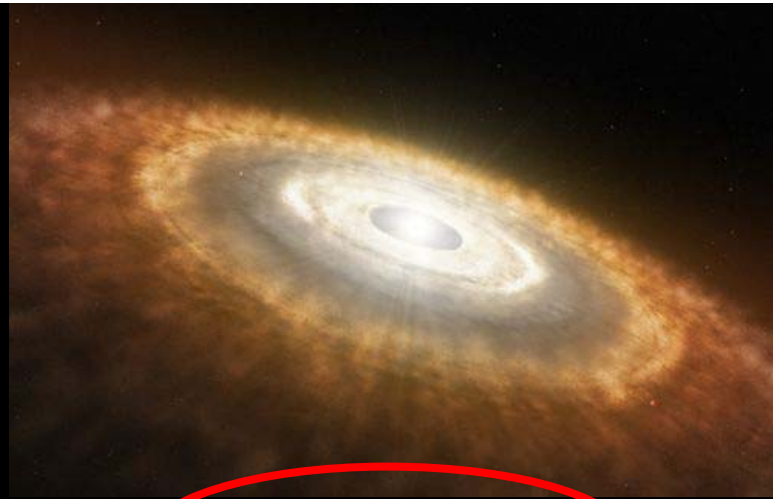
origine commune

quels sont les moteurs de l'évolution ?

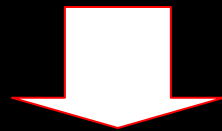


diversité / spécificités

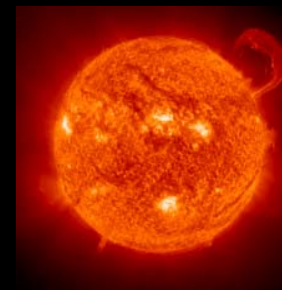
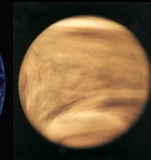
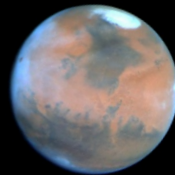
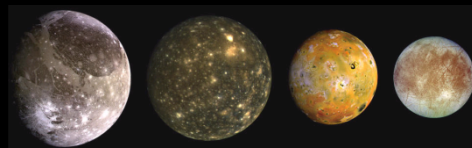
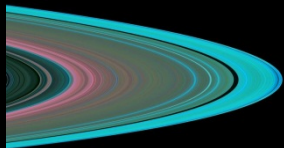


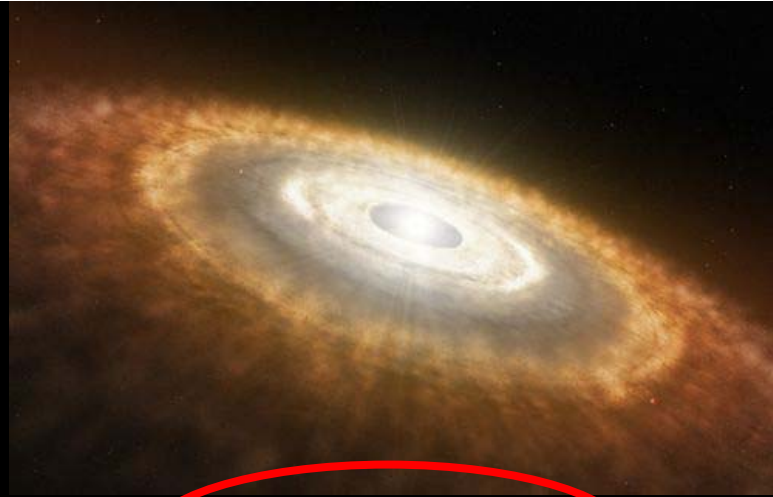


origine commune



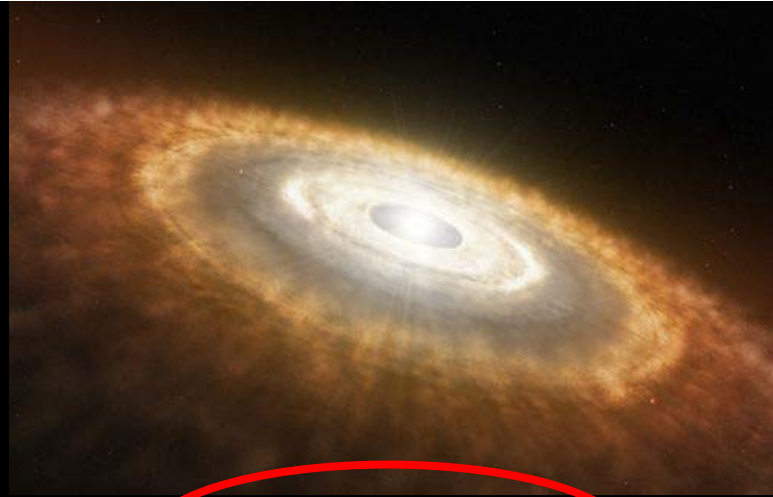
diversité / spécificités



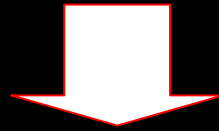


origine commune

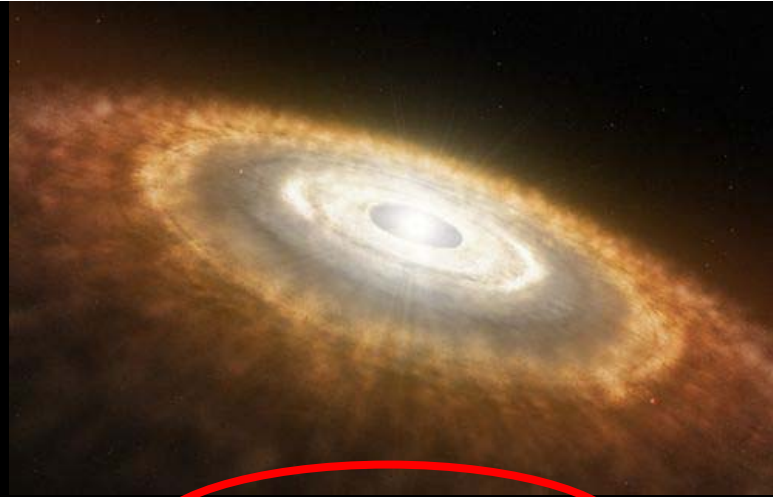
séquence de processus, où la
diversité des chemins
d'évolution prend naissance



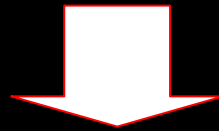
origine commune



L'astrophysique contemporaine tente de reconstruire la séquence des processus qui mène de l'effondrement turbulent d'un nuage interstellaire à la formation de systèmes stellaires et à l'émergence de la vie, sur des planètes "terrestres"



origine commune

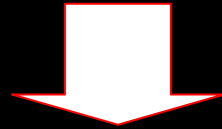


L'astrophysique contemporaine tente de reconstruire la séquence des processus qui mène de l'effondrement turbulent d'un nuage interstellaire à la formation de systèmes stellaires et à l'émergence de la vie, sur des planètes "terrestres"

P2IO y prend toute sa place

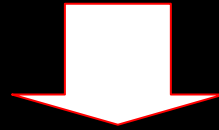
1. Comment l'évolution dynamique de la matière interstellaire conduit-elle à la formation d'étoiles et de systèmes stellaires ?

1. Comment l'évolution dynamique de la matière interstellaire conduit-elle à la formation d'étoiles et de systèmes stellaires ?



Observatoires spatiaux, dans le visible et l'infrarouge
essentiellement : [Herschel](#) aujourd'hui

1. Comment l'évolution dynamique de la matière interstellaire conduit-elle à la formation d'étoiles et de systèmes stellaires ?



Observatoires spatiaux, dans le visible et l'infrarouge
essentiellement : [Herschel](#) aujourd'hui



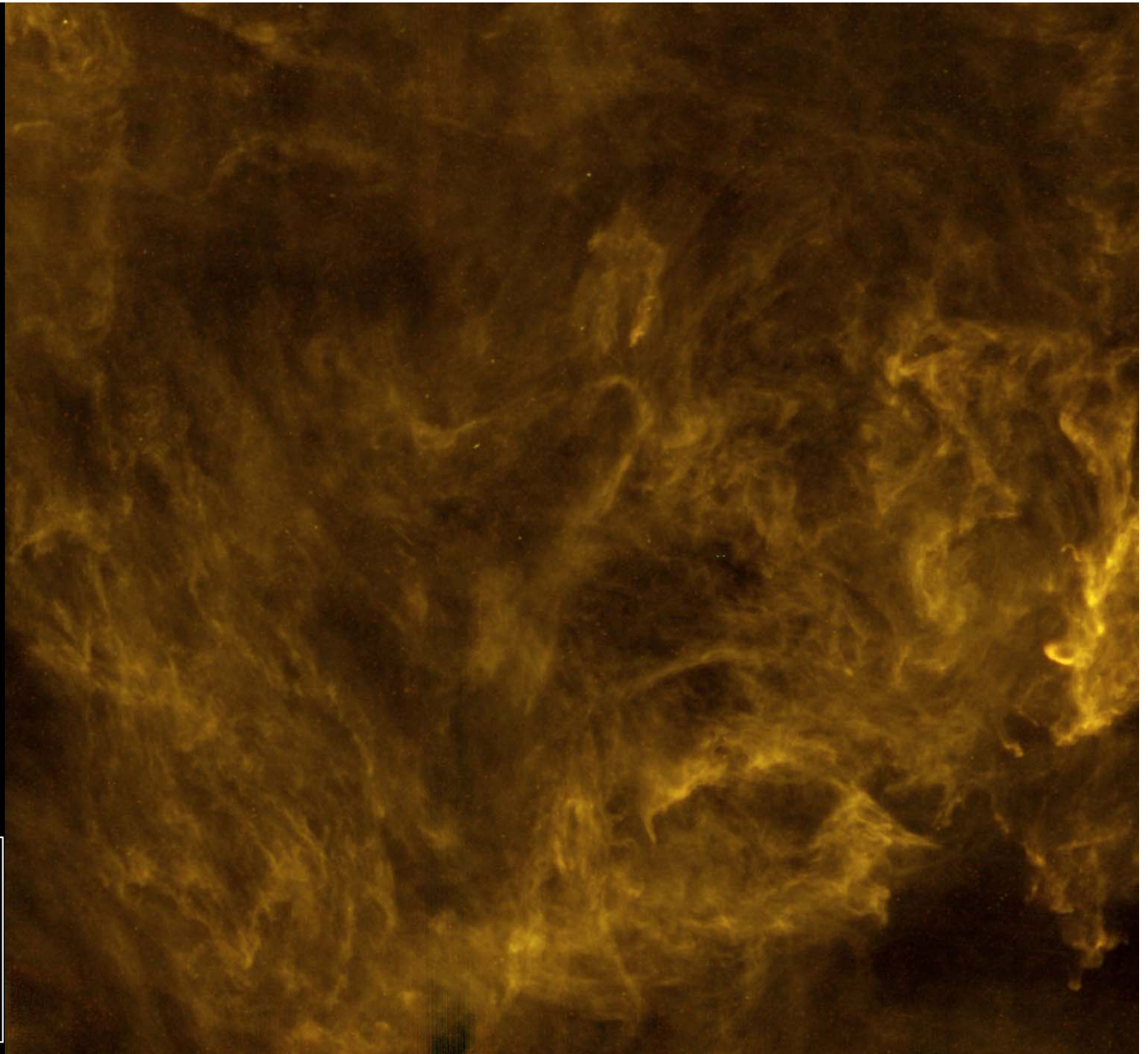
IAS, Orsay



IRFU, Saclay

image composite à
250, 350 et 500 μm

La turbulence
interstellaire
supersonique crée
des filaments



POLARIS

image composite à
70, 250 et 700 μm

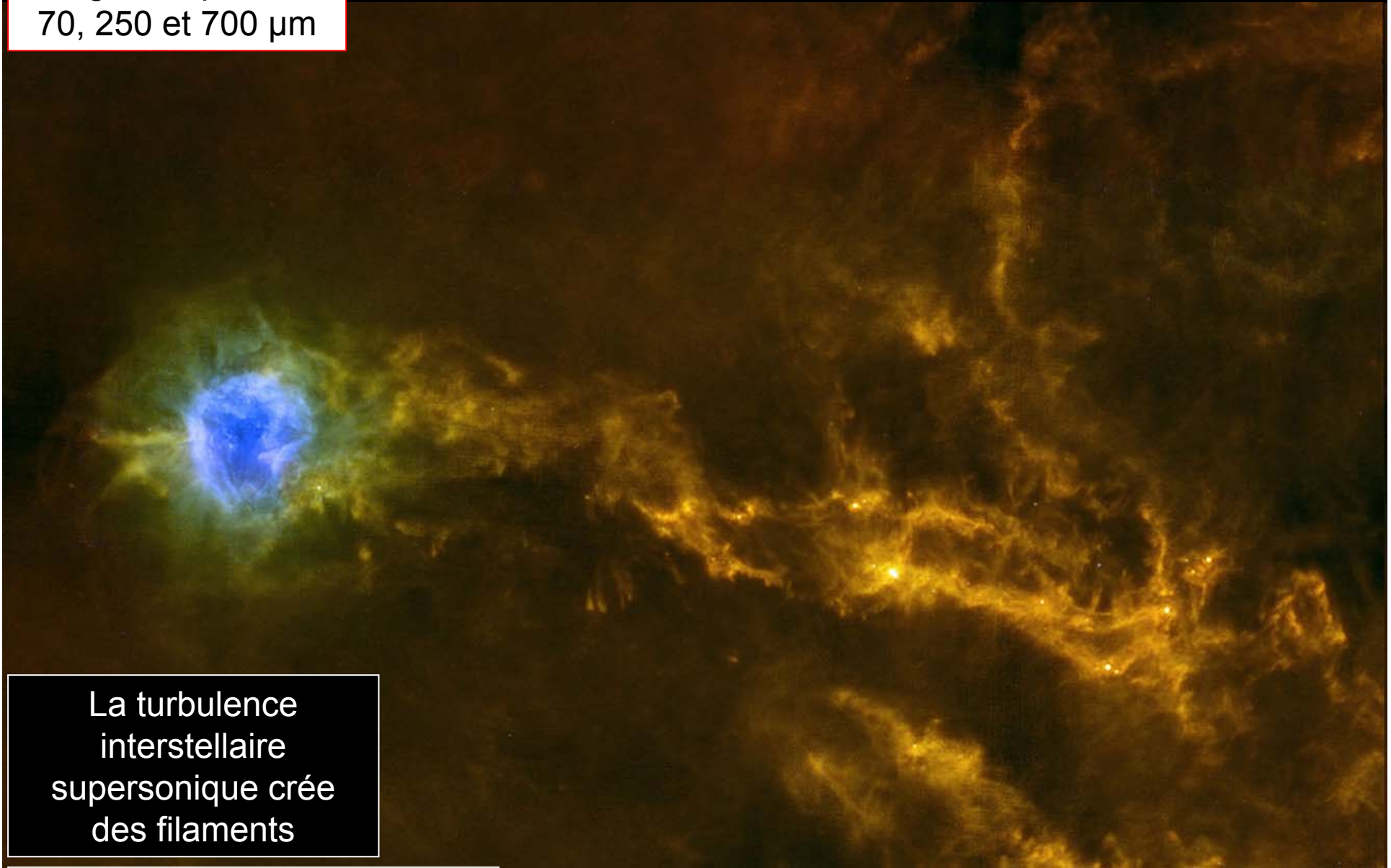


La turbulence
interstellaire
supersonique crée
des filaments

puis la gravité engendre
des systèmes proto-stellaires

AQUILA

image composite à
70, 250 et 700 μm



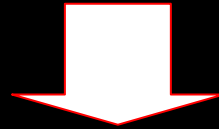
La turbulence
interstellaire
supersonique crée
des filaments

puis la gravité engendre
des systèmes proto-stellaires

IC5146

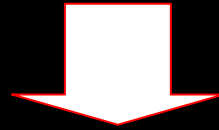
2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

irradiation par

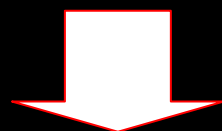


IAS, Orsay

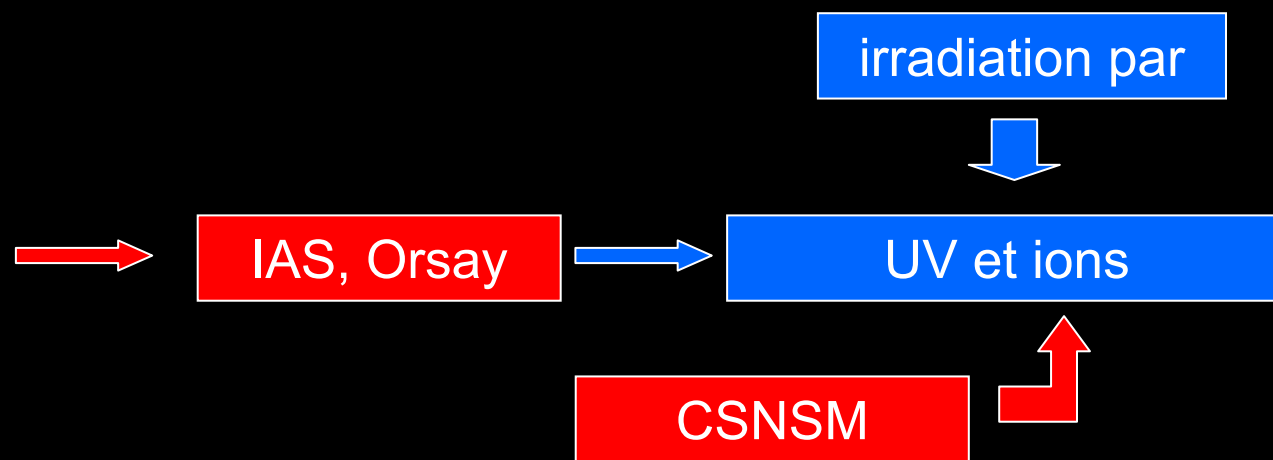


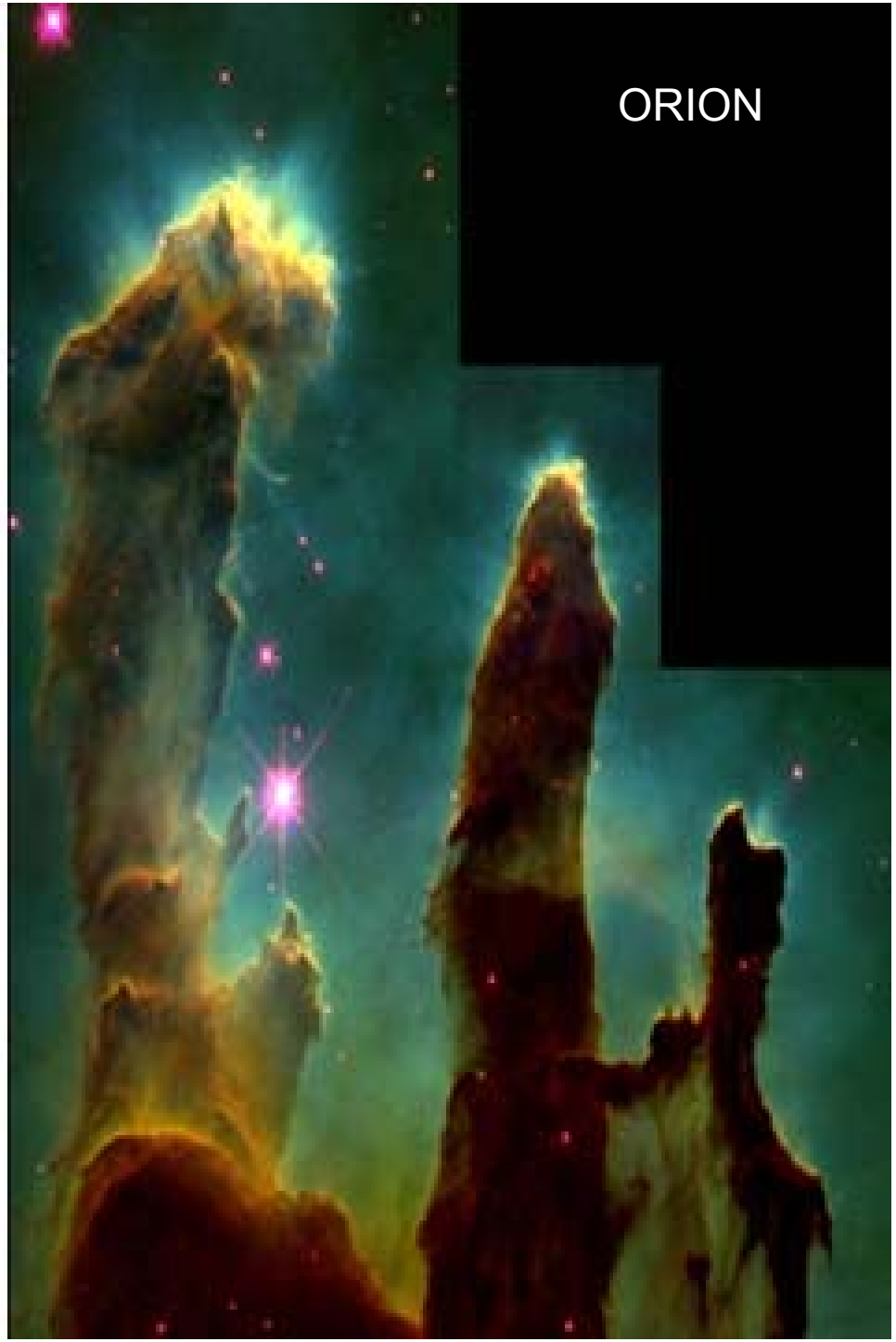
UV et ions

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



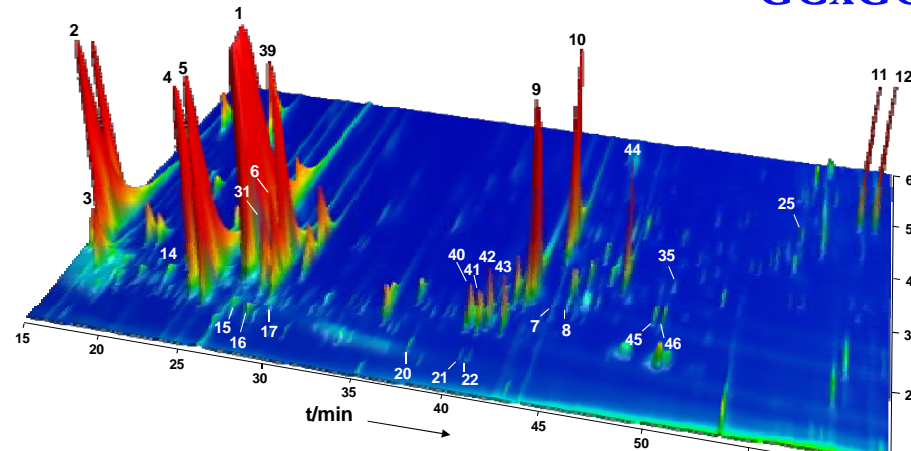
Simulations en laboratoire





L'irradiation de glaces contenant du carbone, par un flux de lumière UV, synthétise une riche variété de composés complexes, dont des acides aminés

GCxGC-MS du résidu organique



20 amino acids

(up to 6 C atoms)

+

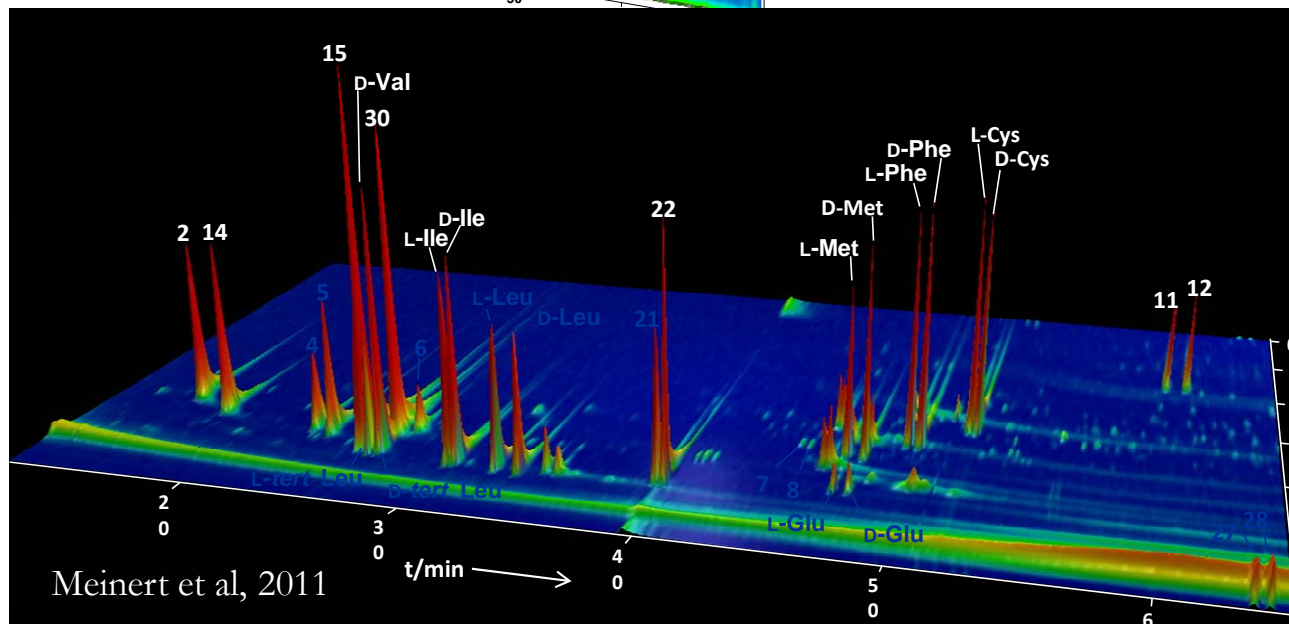
6 di-amino acids

+

~ 10 unknown species

Incluant du N-2-aminoethylglycine et

u 2,4-diaminobutyric acid, précurseur de PNA

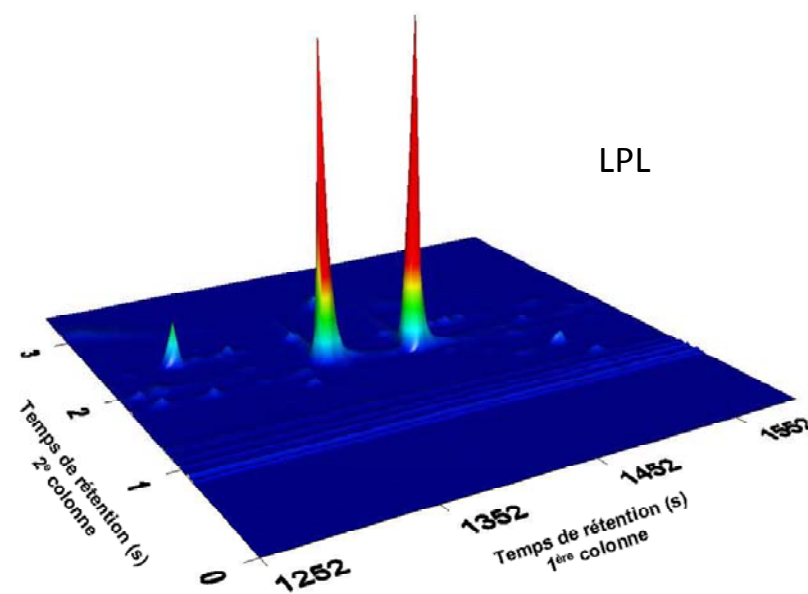
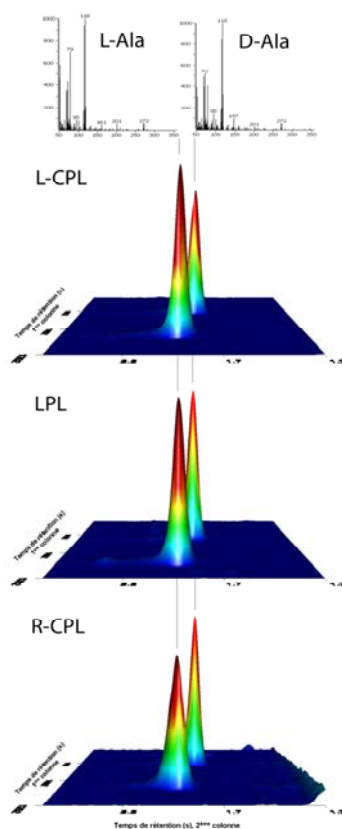


Meinert et al, 2011

Si l'irradiation est faite par un flux de lumière UV polarisée circulairement, elle favorise une chiralité (expérience réalisée sur Soleil)

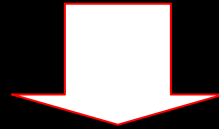
Excès énantiomériques mesurés sur l'alanine (^{13}C)

(photochimie de glaces simples en lumière UV-CPL)



Polarisation UV	$N_{phot} \cdot molec^{-1}$	e.e. _L (%)	Barres d'erreur à 3σ (%)
R-CPL	~ 5	- 1.34	0.40
LPL	~ 2.5	- 0.04	0.42
L-CPL	~ 2.5	+ 0.71	0.30

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

irradiation par



IAS, Orsay



UV et ions (CSNSM)



IPNO, Orsay



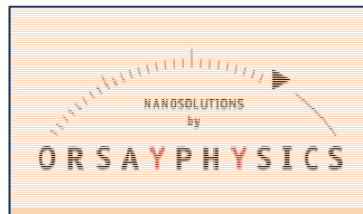
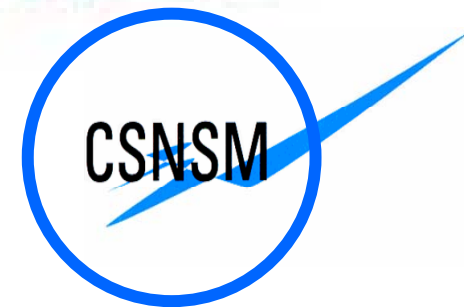
ions et agrégats

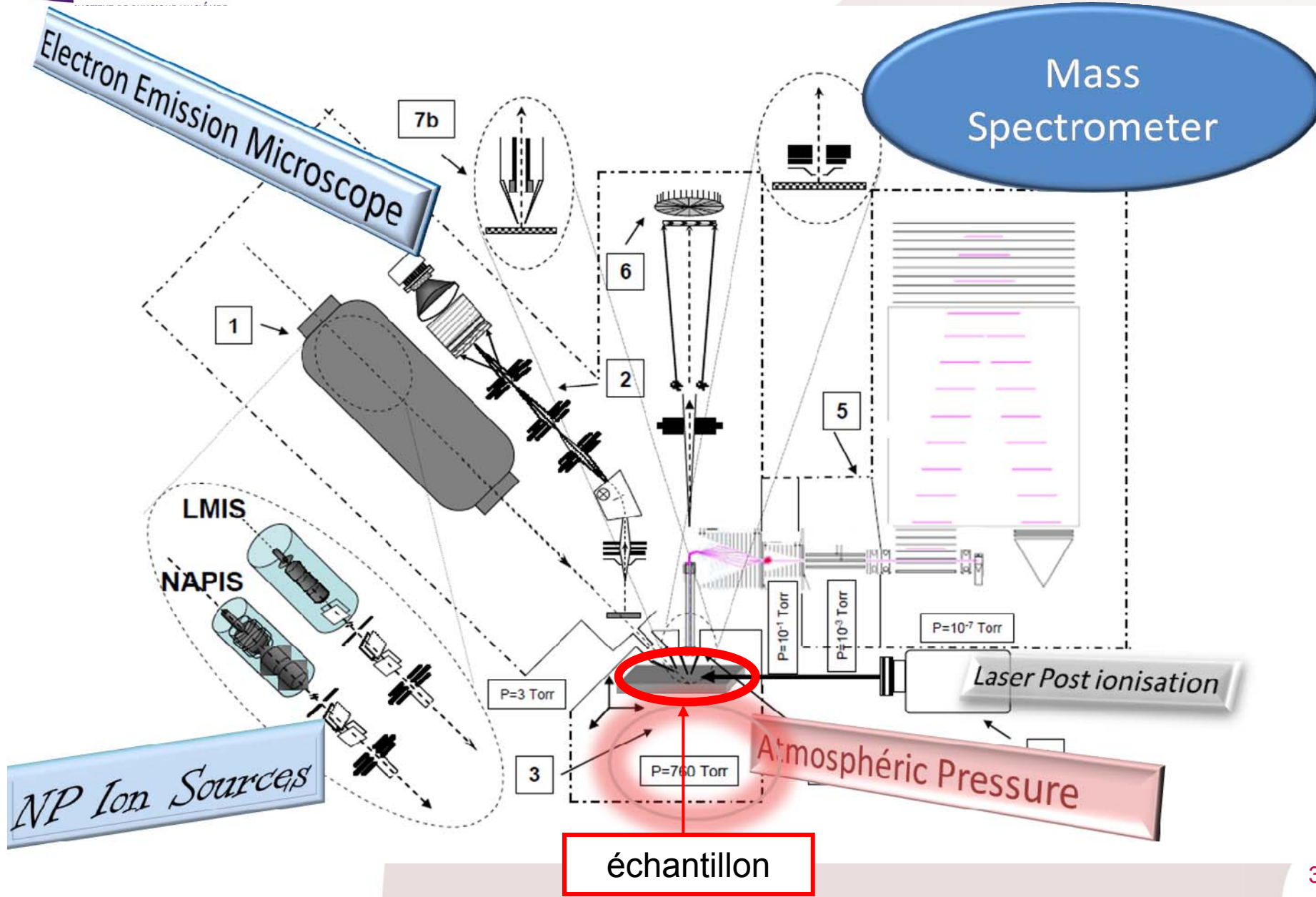


IN2P3
Les deux infinis

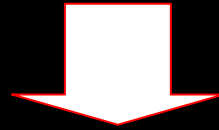


ANDROMÈDE





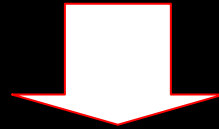
2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

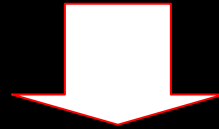
Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"



Grains d'origine astéroïdale et cométaire, principalement

Les comètes pourraient avoir échantillonné un nuage proto-stellaire en fin de sa phase d'effondrement, et stocké des composés moléculaires complexes très spécifiques, synthétisés alors.

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

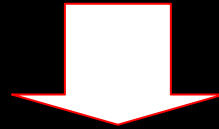
Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"



Grains d'origine astéroïdale et cométaire, principalement

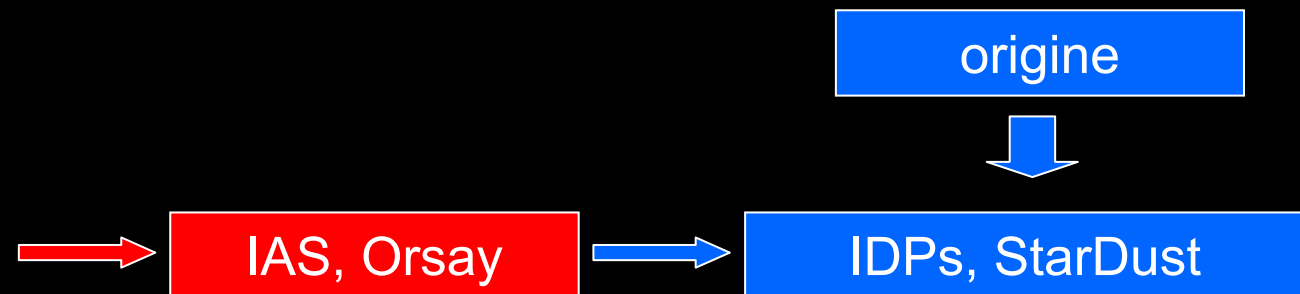
Analyse, à l'échelle des grains individuels, parfois sub-micronique, de la composition élémentaire, isotopique, moléculaire et minéralogique, d'échantillons naturels ou irradiés (par des ions et/ou des photons), par des méthodes combinées (microscopies optiques, IR et électroniques, spectrométries de l'X à l'IR, utilisant parfois le rayonnement synchrotron), et la micro-manipulation de ces échantillons.

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes

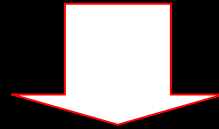


Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

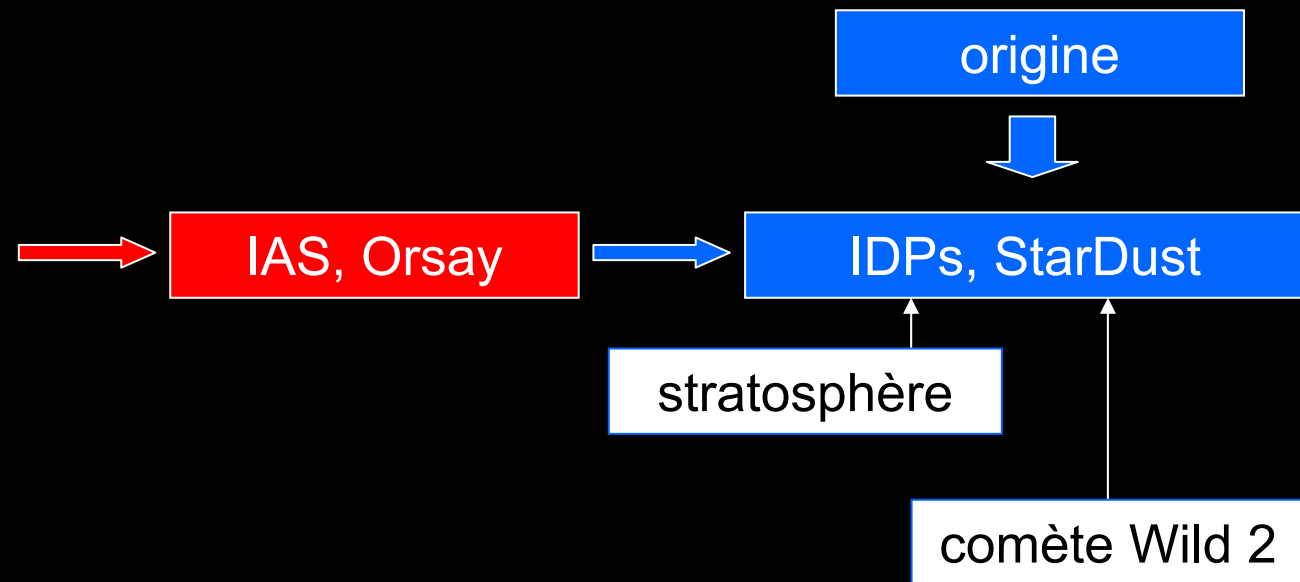


2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes

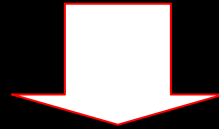


Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

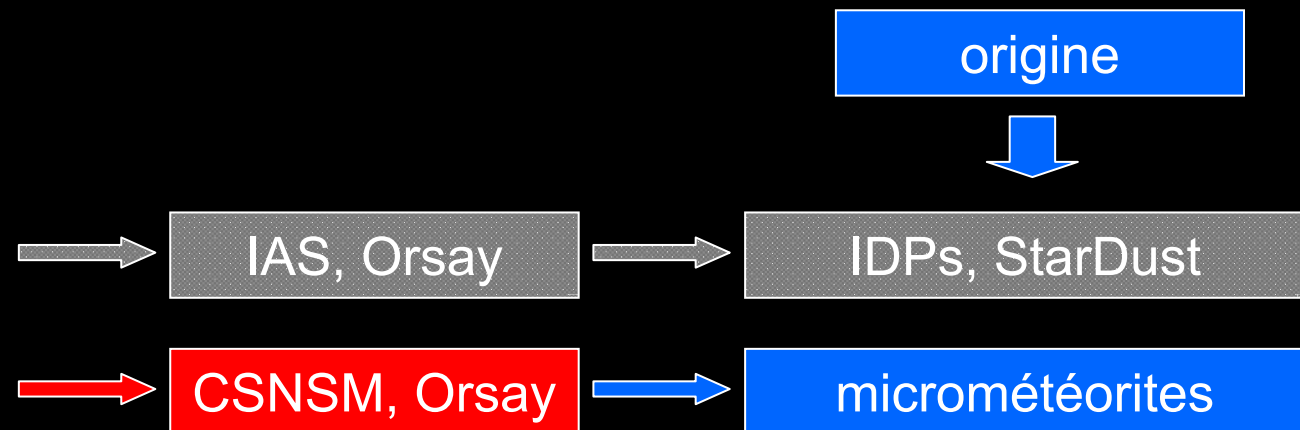


2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes

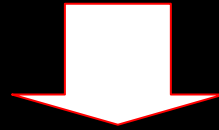


Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

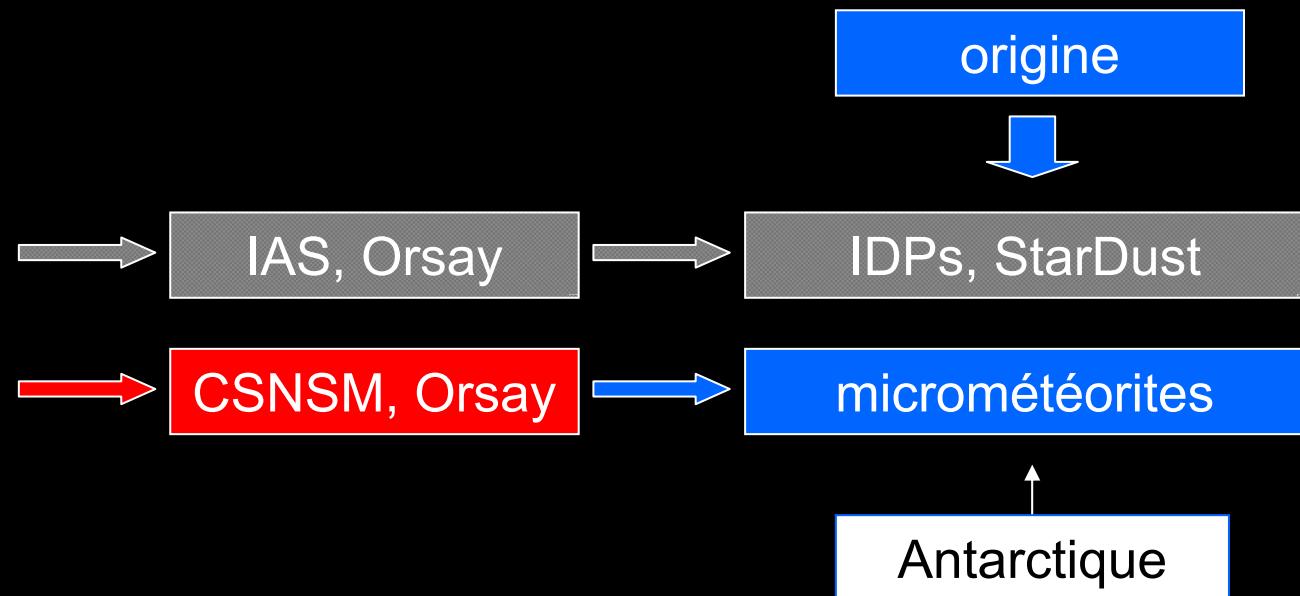


2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



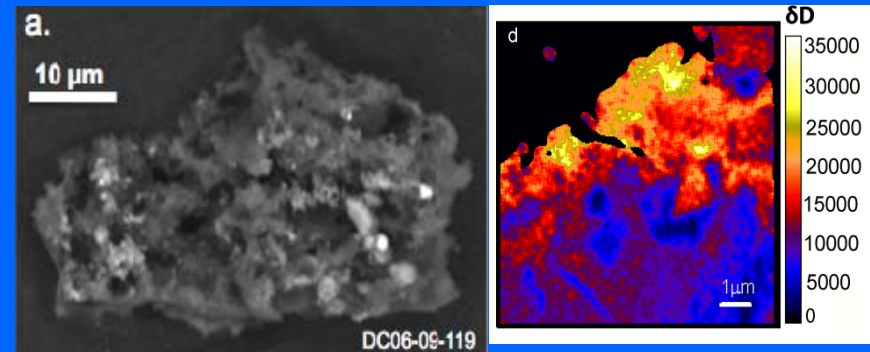
Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"



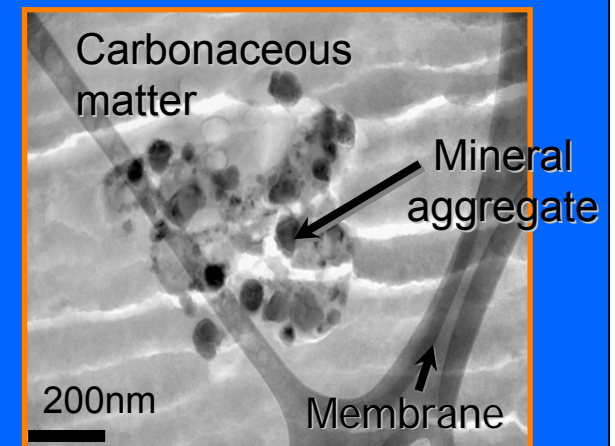
CSNSM – Astrophysique du Solide Micrométéorites et Exobiologie

Micrométéorites ultracarbonées : une fenêtre sur
les régions froides du disque protoplanétaire



Duprat et al., *Science* 2010

- Collection de micrométéorites CONCORDIA
- **Ultracarbonaceous Antarctic Micrometeorites (UCAMMs) = grains cométaires géants**
 - Matière des régions externes du disque protoplanétaire analysable en laboratoire
 - Echantillons complémentaires des grains STARDUST (comète Wild2)

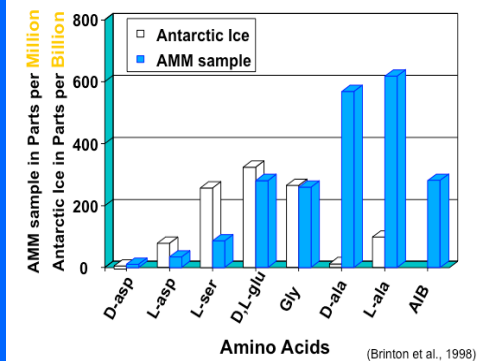
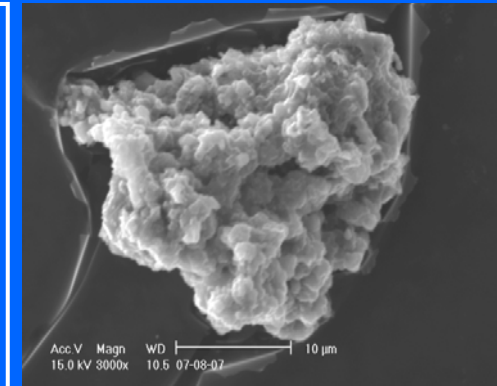


Dobrica et al., 2012

CSNSM – Astrophysique du Solide Micrométéorites et Exobiologie

Micrométéorites ultracarbonées : ont-elles ensemencé les océans primitifs, favorisant l'émergence de la vie ?

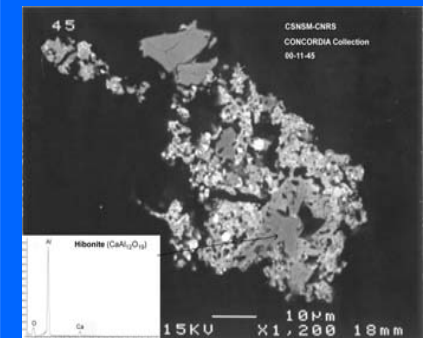
- Il faut une source de carbone et de composés organiques sur la Terre primitive...
- Les MMs contiennent :
 - du carbone (de qqs wt% à ~ 60 wt%)
 - des produits organiques (acides aminés, PAHs)
 - des minéraux catalyseurs
 - de l'eau...
- ➔ Elles auraient pu apporter suffisamment de **carbone** pour rendre compte de la biomasse terrestre
- ➔ Apport de composés prébiotiques ?



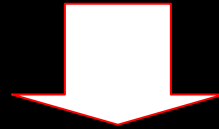
CSNSM / IPNO – Astrophysique Nucléaire

Radiocativité à « courtes » constantes de temps : une source d'énergie primordiale ?

- Origine des radionucléides de constantes de temps $< 10^6$ ans présents dans le disque protoplanétaire (^{10}Be , ^{36}Cl , ^{26}Al , ^{53}Mn , ^{60}Fe ...)?
 - L'irradiation du disque d'accrétion ne peut produire suffisamment de noyaux radioactifs pour expliquer leur présence dans toutes les planètes (Duprat & Tatischeff ApJ 2007)
 - Le nuage moléculaire parent du système solaire a pu être contaminé par une étoile massive (Wolf-Rayet) (Tatischeff et al ApJ 2010)
- Distribution spatiale des radionucléides dans le disque ?
 - Étaient-ils présents dans le réservoir cométaire ?
 - Est-il possible de bâtir une chronologie isotopique des premiers millions d'années du système solaire ?



2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes

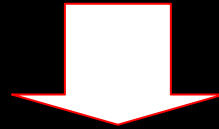


Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

Exploration spatiale de "petits corps"

2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

Exploration spatiale de "petits corps"

mission

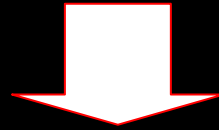


IAS, Orsay



Dawn, Rosetta

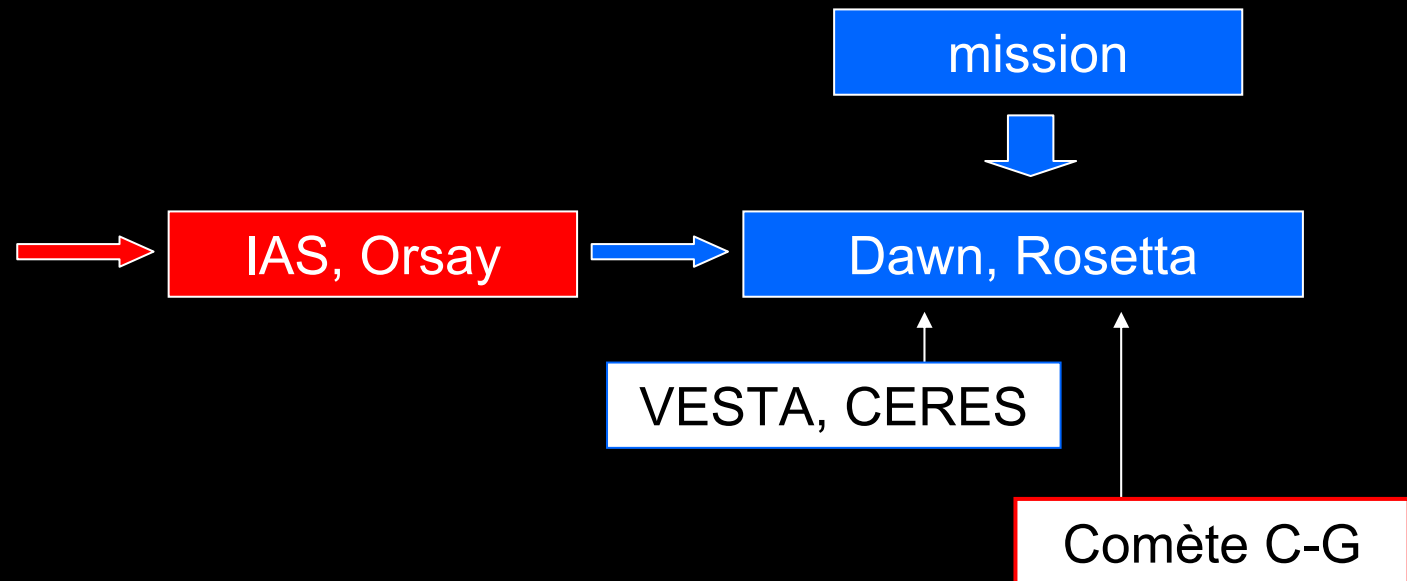
2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



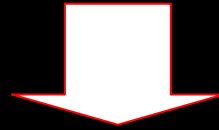
Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

Exploration spatiale de "petits corps"



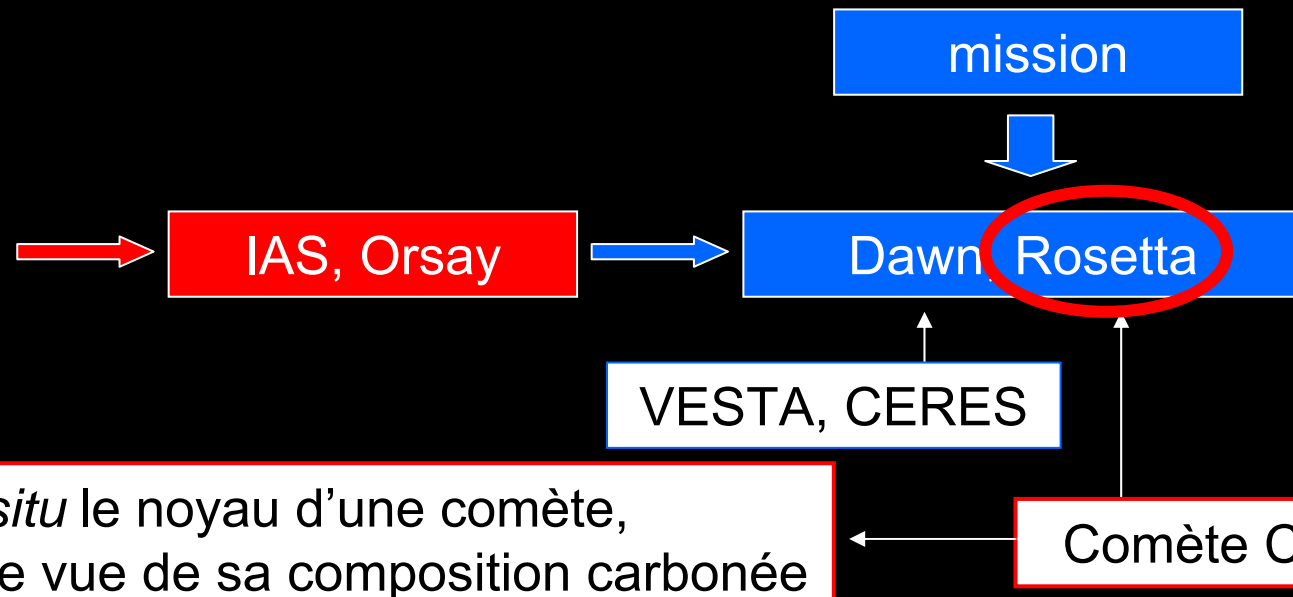
2. Comment l'évolution chimique des nuages protostellaires conduit-elle à la synthèse de grains et molécules complexes



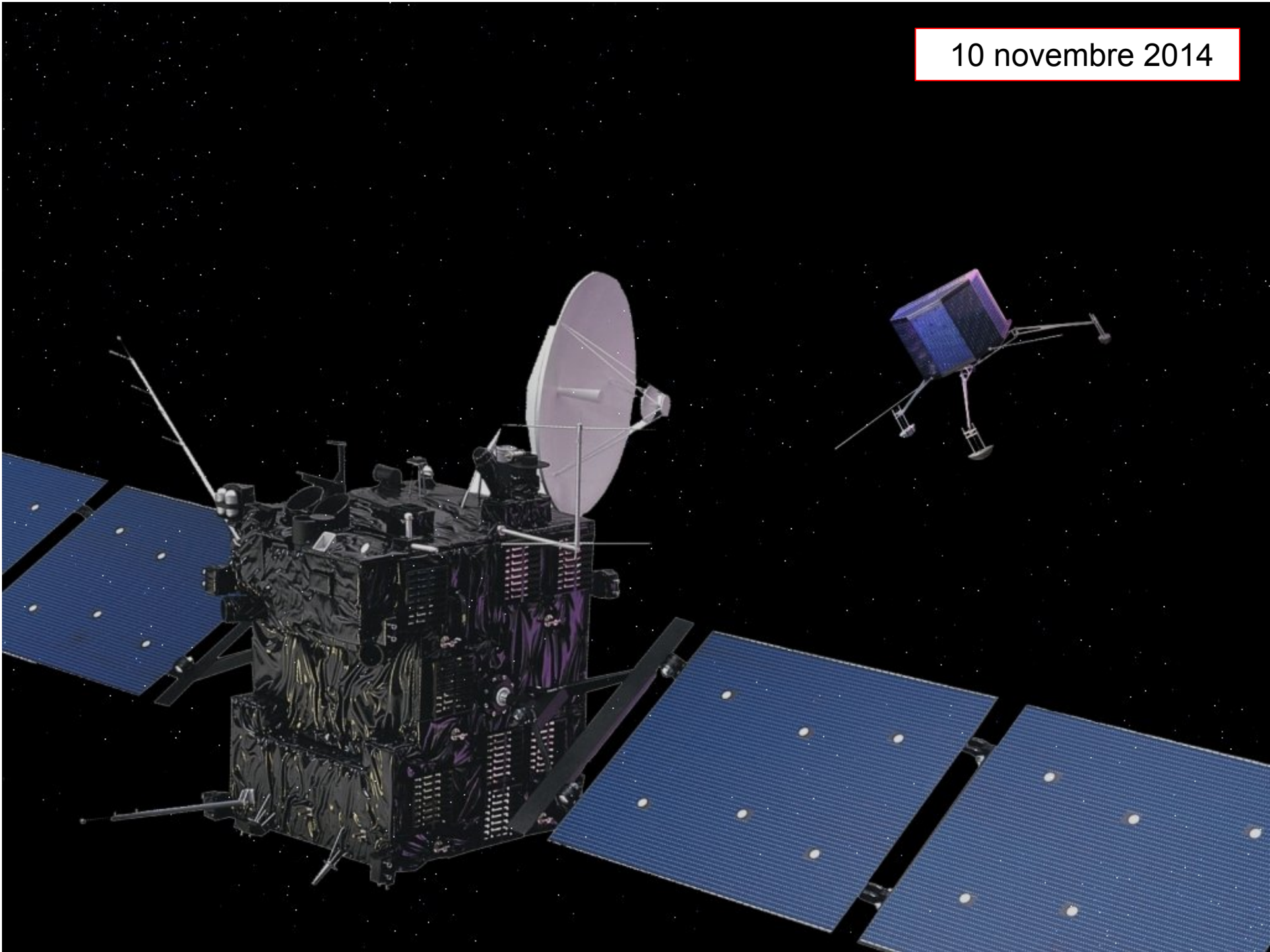
Simulations en laboratoire

Analyses d'échantillons extraterrestres "primitifs"

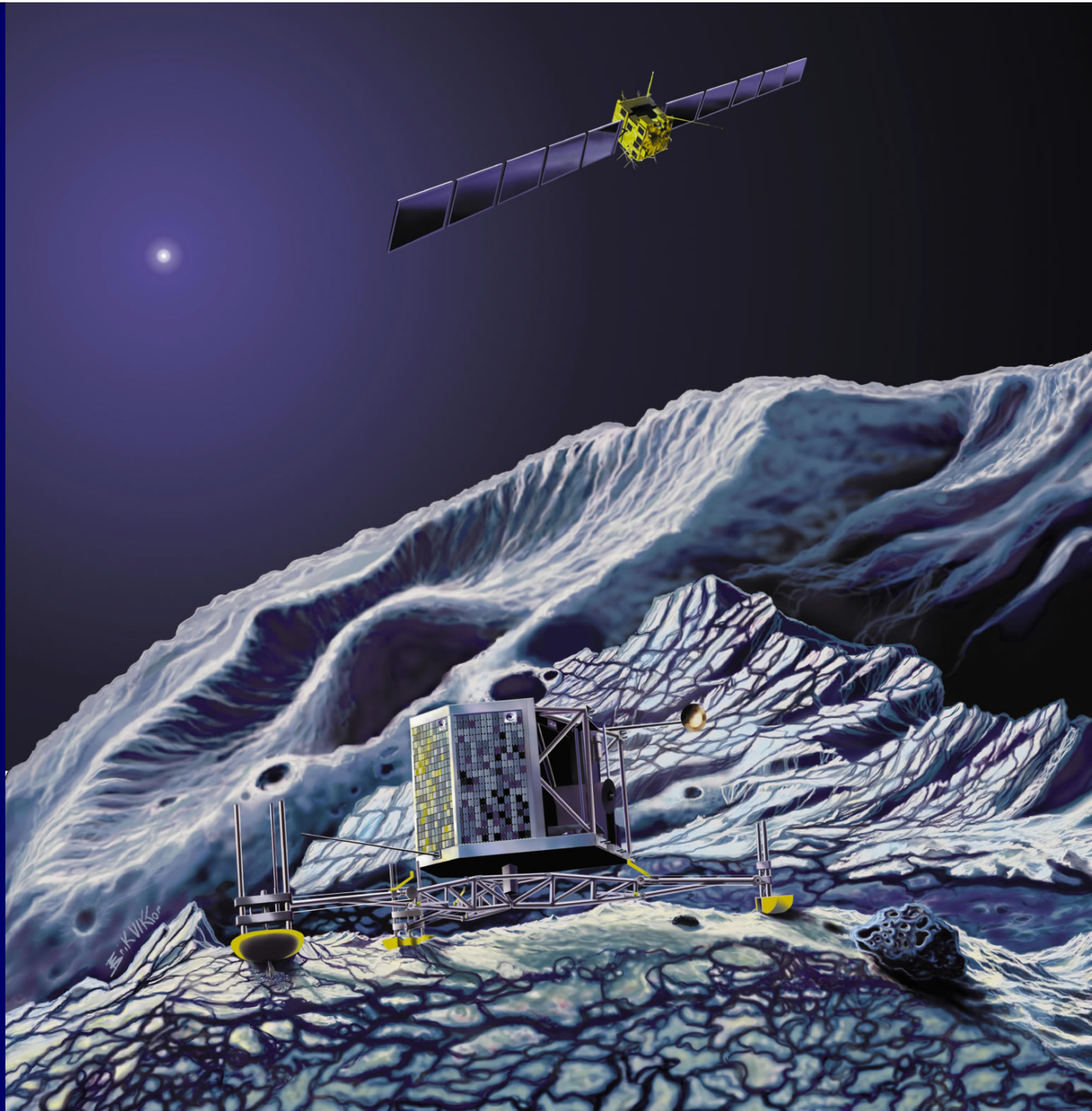
Exploration spatiale de "petits corps"



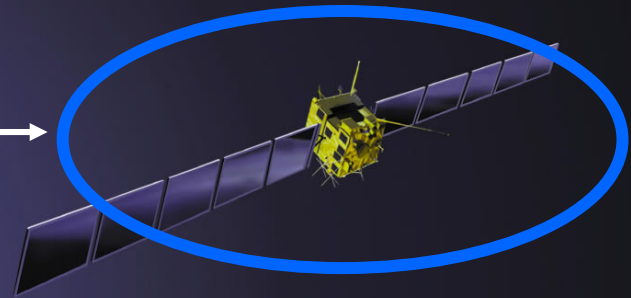
10 novembre 2014



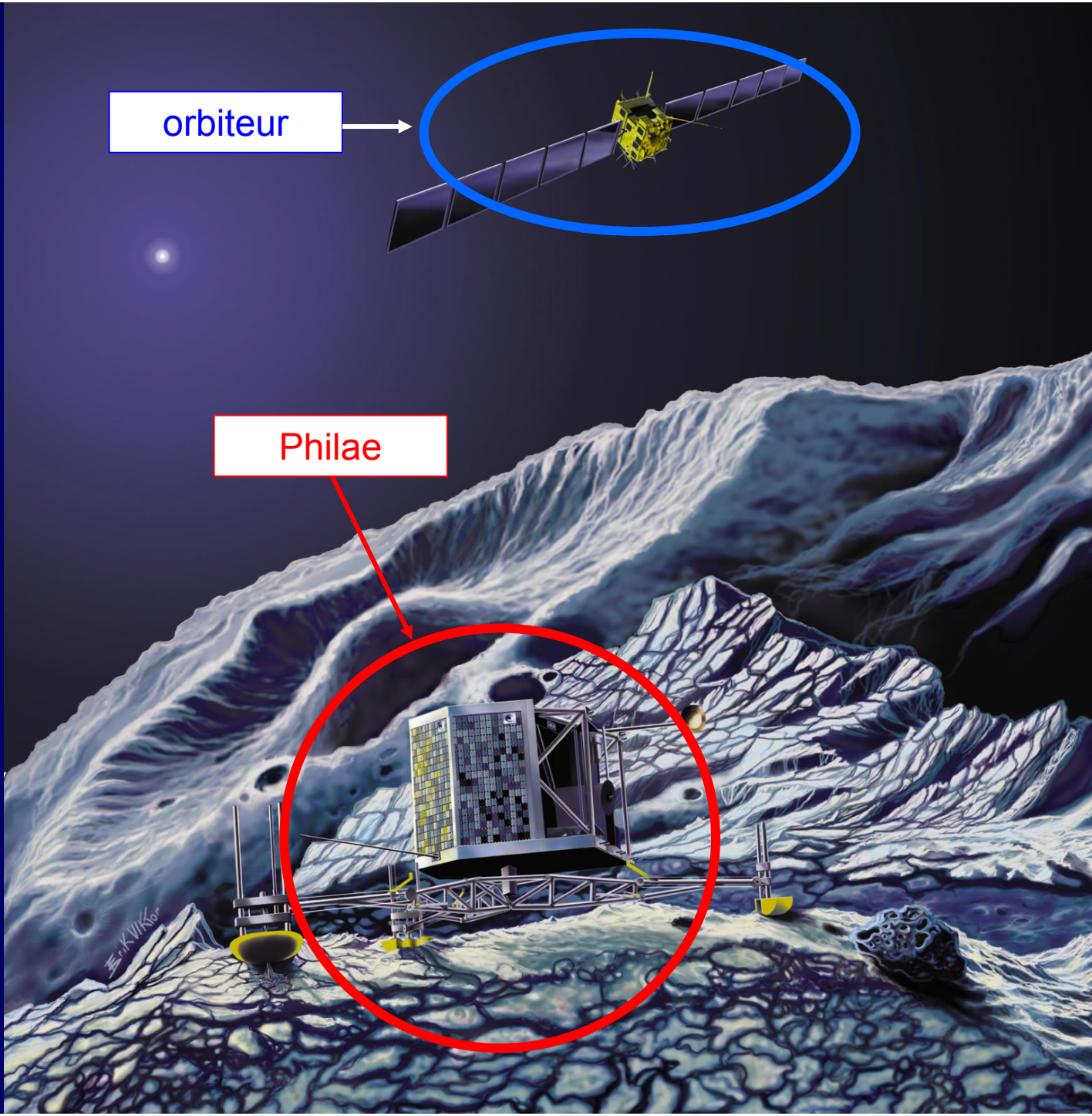
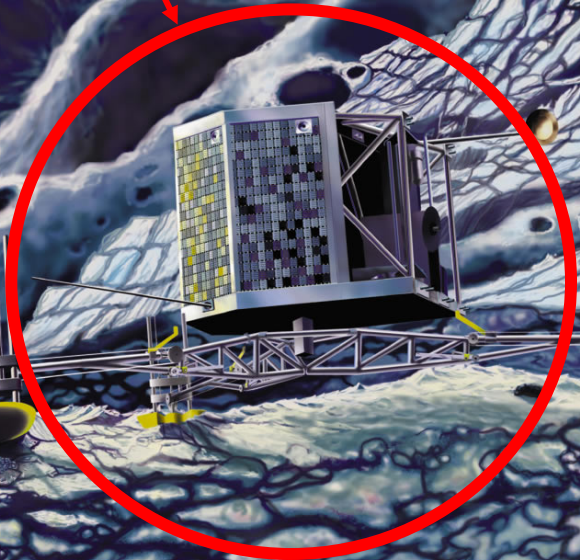


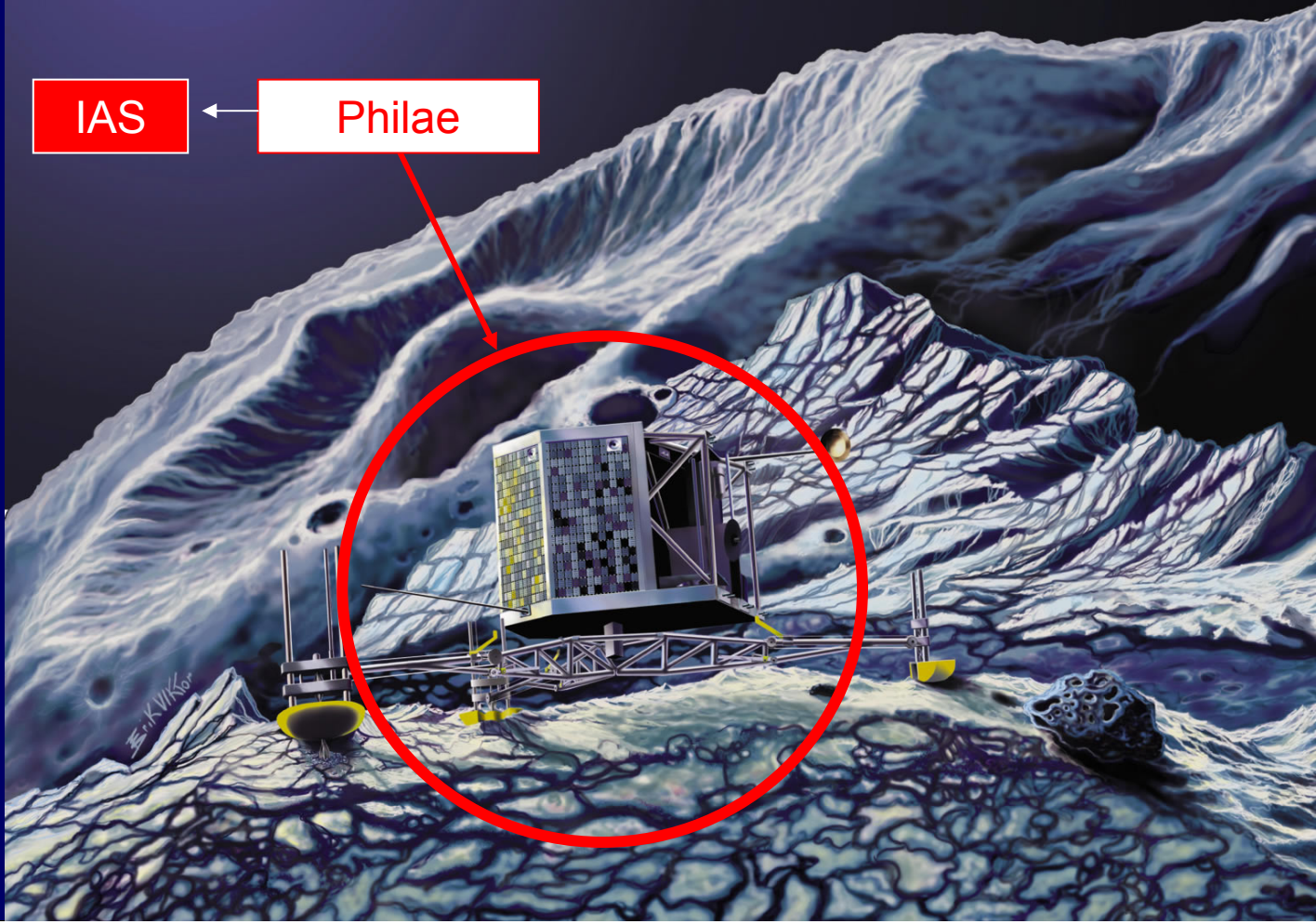
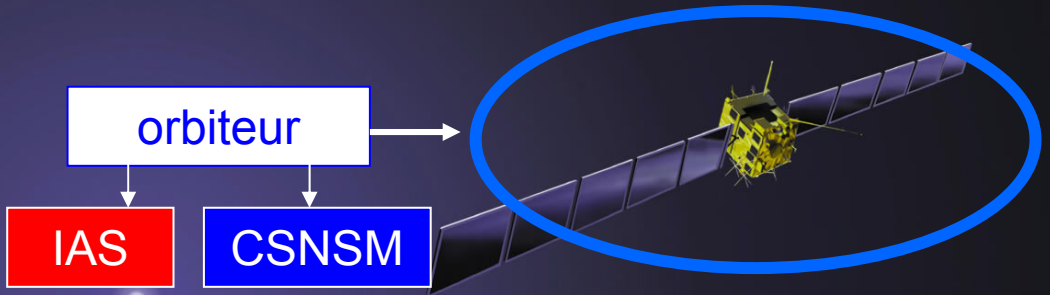


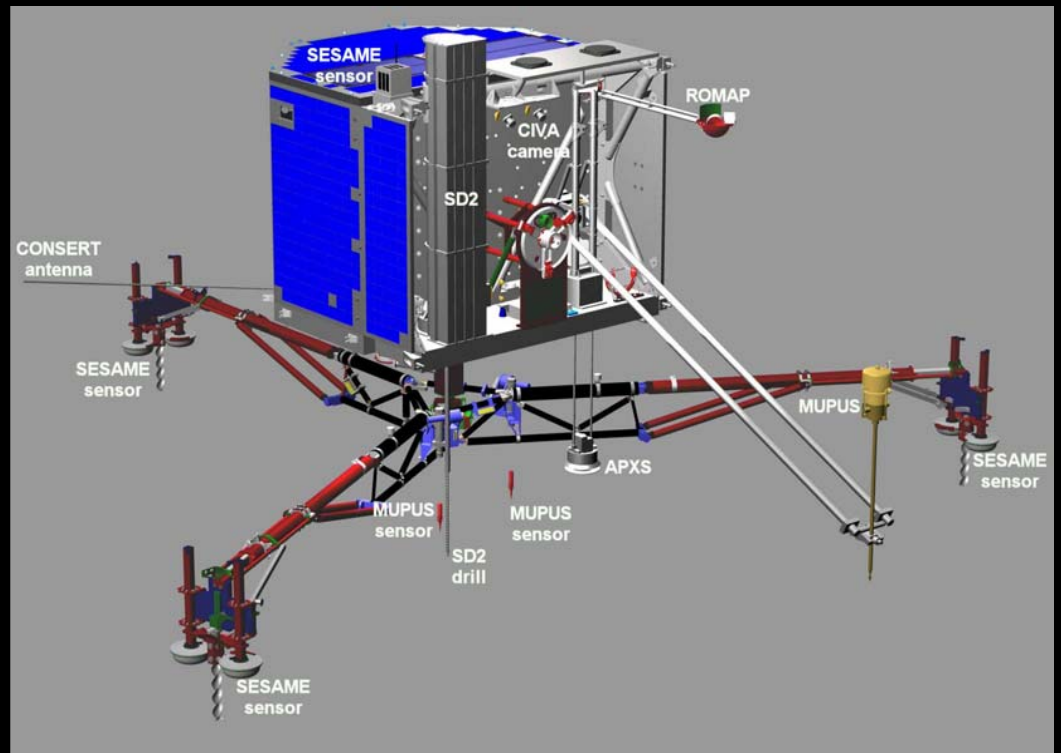
orbiteur



Philae





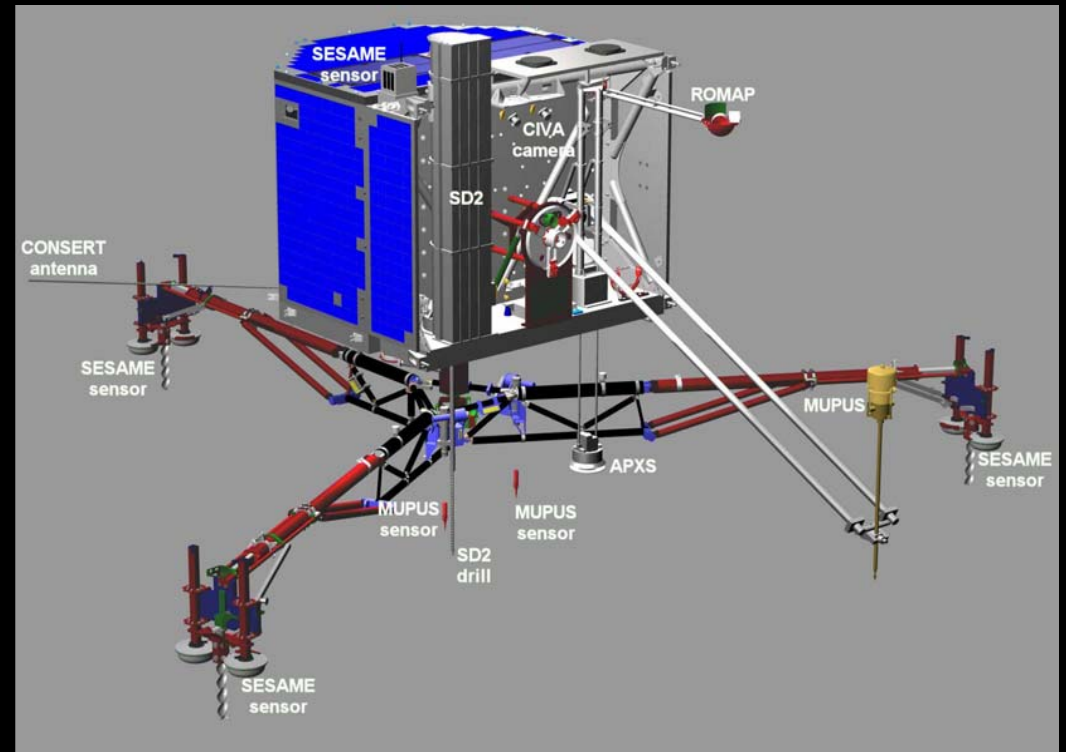


10 ensemble d'instruments,
dont

7 caméras,
1 microscopes VIS
1 microscope hyperspectral IR
2 spectromètres de masse
(dont un TOF),
1 analyseur XRF,
1 foreuse (30 cm),
...

une température extérieure de
< 140 K,
et l'intérieur à chauffer à
> 240 K

puissance disponible : < 10 W !

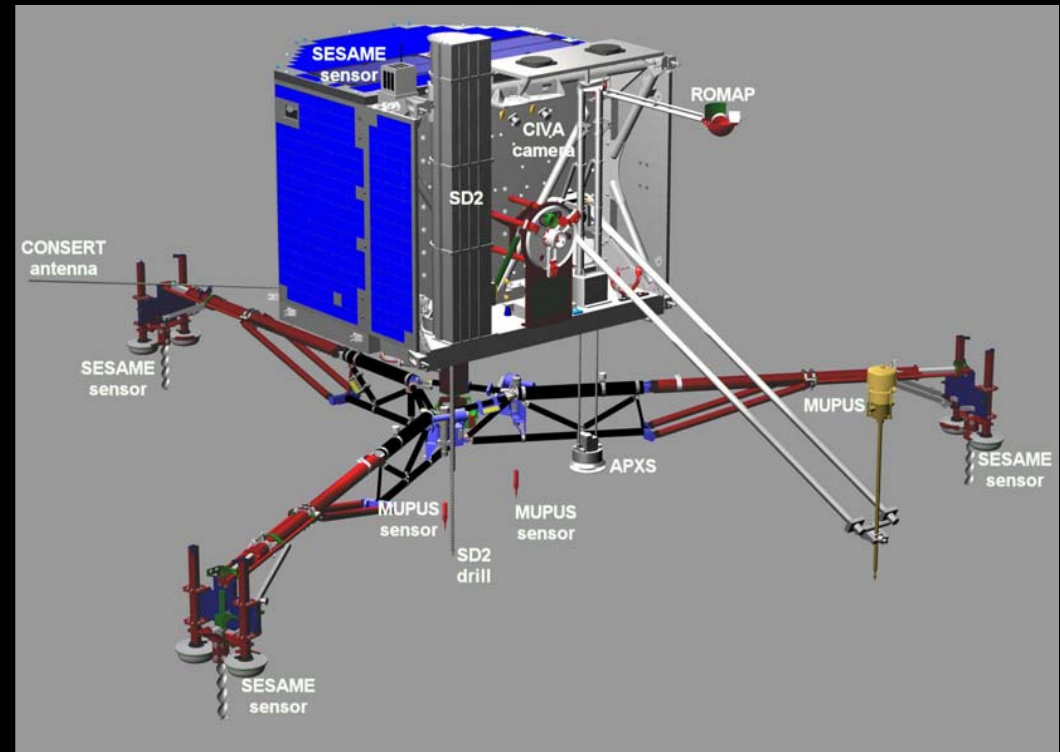


10 ensemble d'instruments,
dont

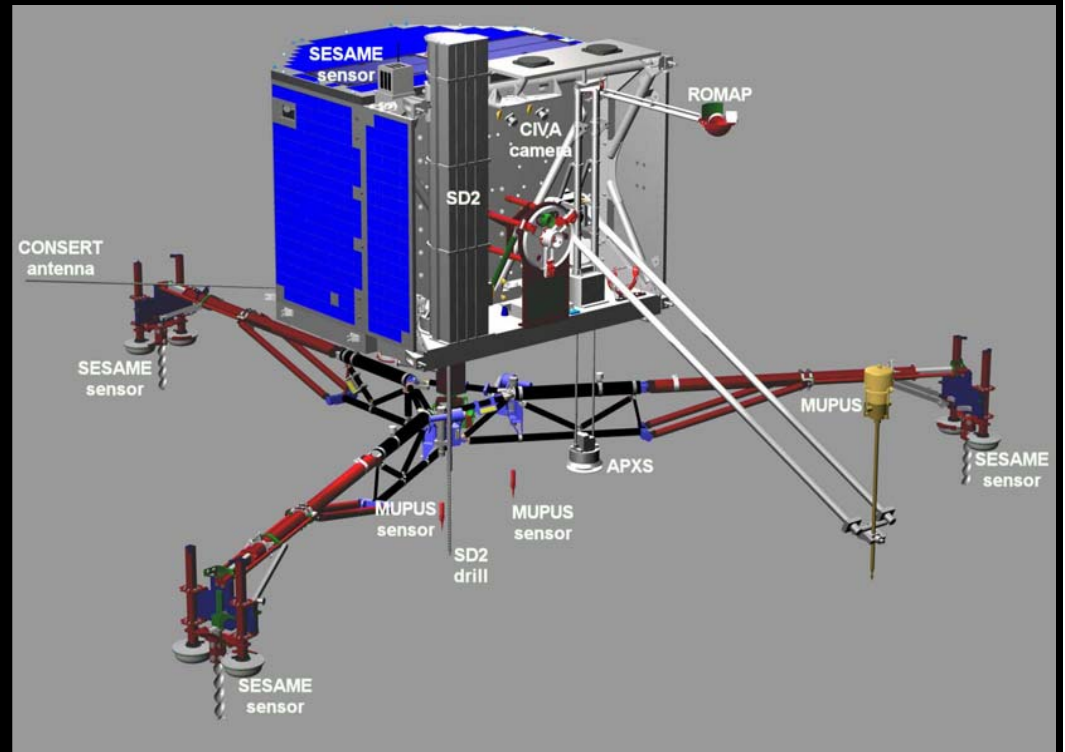
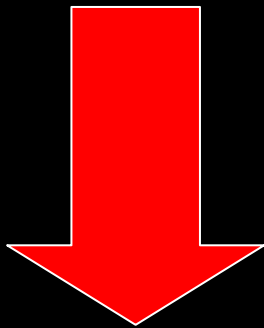
7 caméras,
1 microscopes VIS
1 microscope hyperspectral IR
2 spectromètres de masse
(dont un TOF),
1 analyseur XRF,
1 foreuse (30 cm),
...

une température extérieure de
< 140 K,
et l'intérieur à chauffer à
> 240 K

puissance disponible : < 10 W !



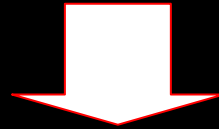
maquette à l'échelle 1 (unique !) à l'IAS



Objectif premier : identifier la composition des molécules complexes
(qui peuvent être à l'origine des structures vivantes).

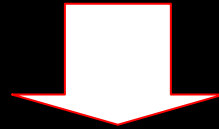
3. Comment est-on passé de molécules complexes à l'émergence de la vie ?

3. Comment est-on passé de molécules complexes à l'émergence de la vie ?



Exploration spatiale du système solaire (Mars, Europe ? ...)

3. Comment est-on passé de molécules complexes à l'émergence de la vie ?



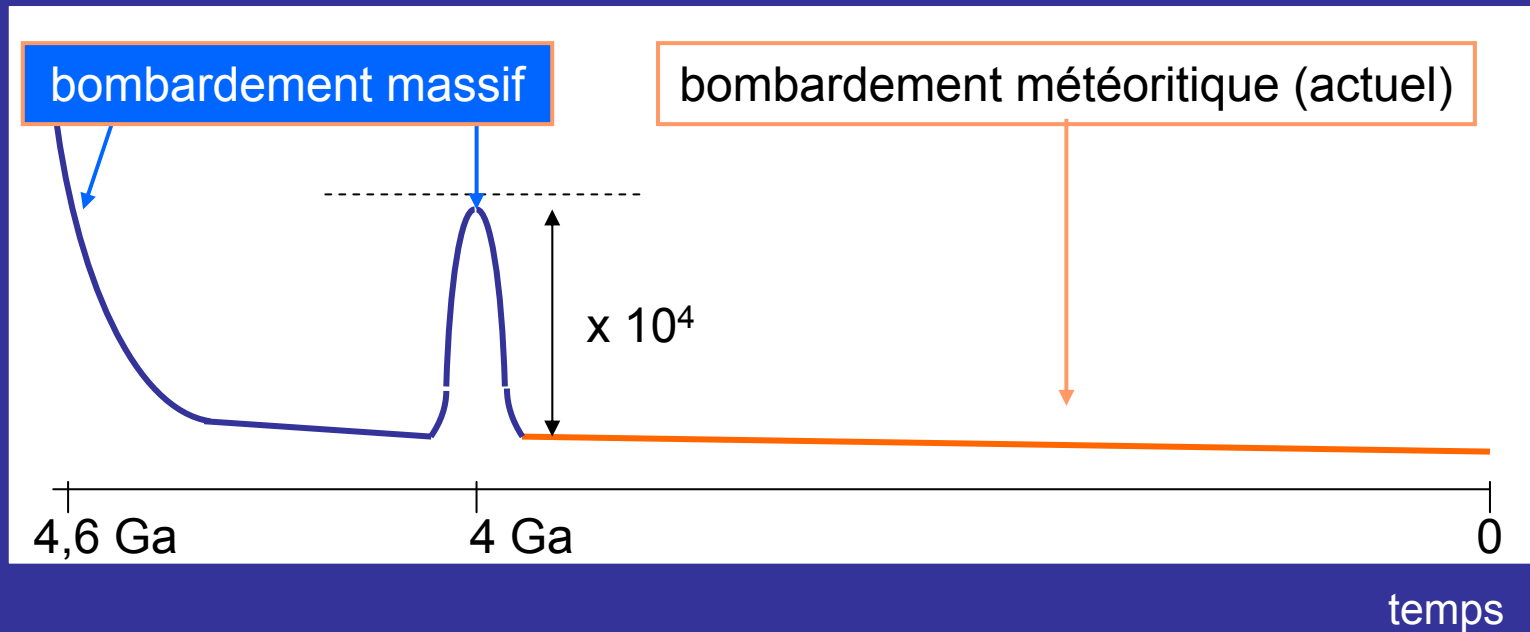
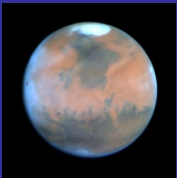
Exploration spatiale du système solaire (Mars, Europe ? ...)



IAS, Orsay

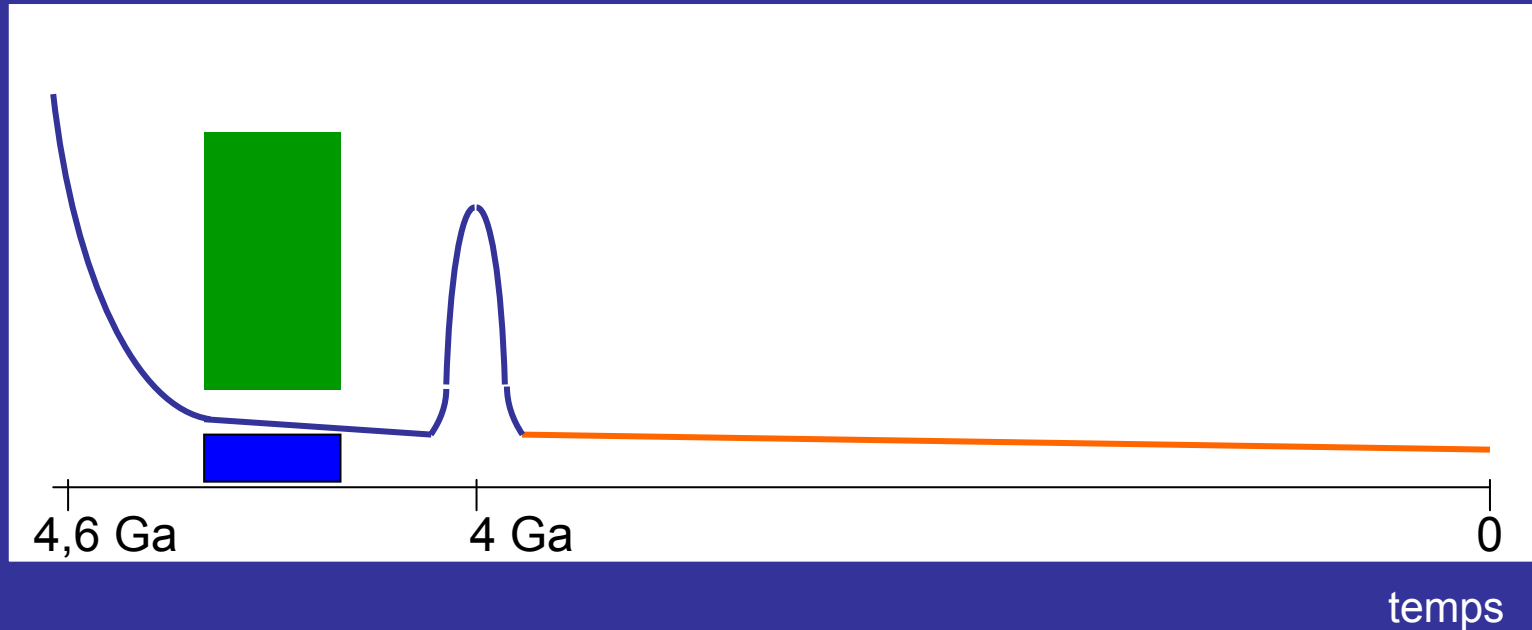
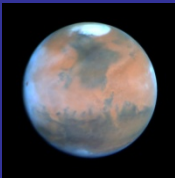
Nous avons montré (par la découverte de minéraux spécifiques) que Mars a connu, avant la fin du bombardement massif qui a affecté tous le système solaire pendant plus de 600 millions d'années, une ère d' « habitabilité potentielle », avec de l'eau liquide stable à sa surface. Nous avons identifié et localisé ces terrains, qui ont préservé les conditions environnementales d'alors : c'est là que les missions futures pourront détecter d'éventuelles « bio-reliques ». L'exobiologie entre réellement dans son ère scientifique.

taux d'impacts



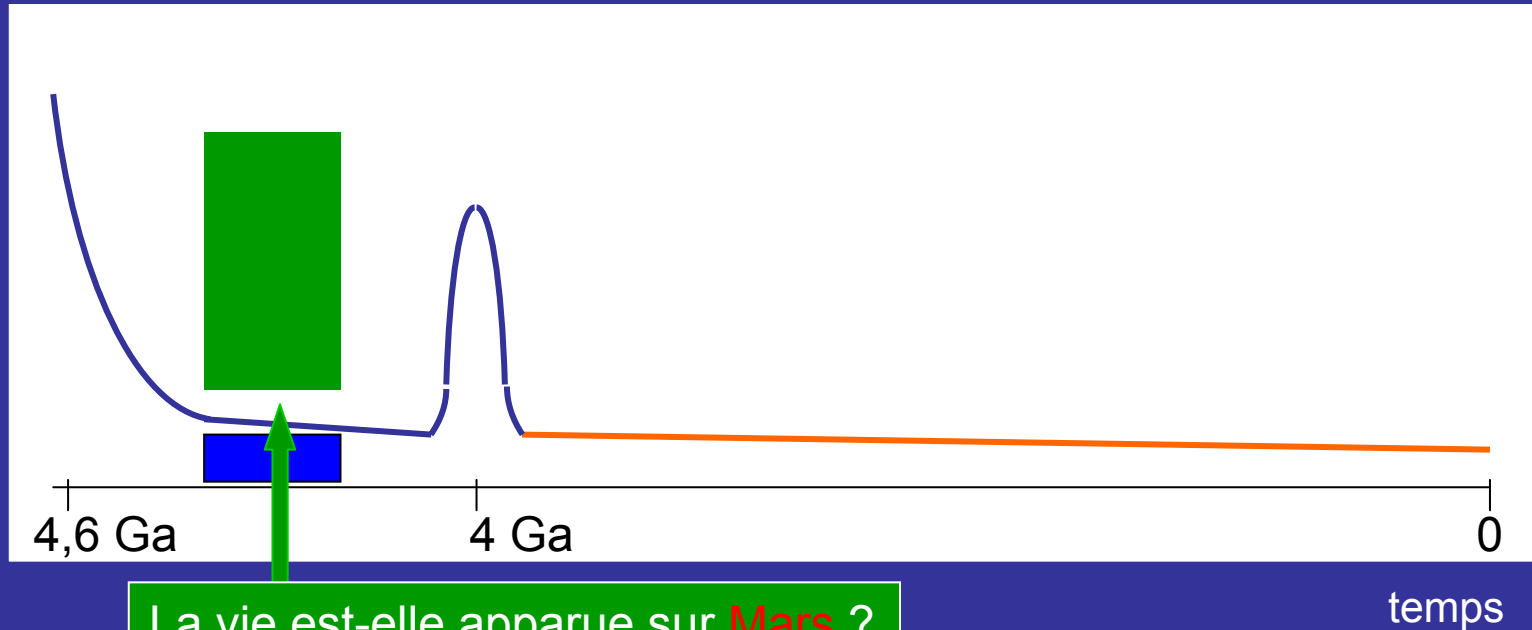
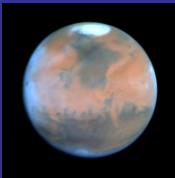
Nous avons montré (par la découverte de minéraux spécifiques) que Mars a connu, avant la fin du bombardement massif qui a affecté tous le système solaire pendant plus de 600 millions d'années, une ère d' « habitabilité potentielle », avec de l'eau liquide stable à sa surface. Nous avons identifié et localisé ces terrains, qui ont préservé les conditions environnementales d'alors : c'est là que les missions futures pourront détecter d'éventuelles « bio-reliques ». L'exobiologie entre réellement dans son ère scientifique.

taux d'impacts



Nous avons montré (par la découverte de minéraux spécifiques) que Mars a connu, avant la fin du bombardement massif qui a affecté tous le système solaire pendant plus de 600 millions d'années, une ère d' « habitabilité potentielle », avec de l'eau liquide stable à sa surface. Nous avons identifié et localisé ces terrains, qui ont préservé les conditions environnementales d'alors : c'est là que les missions futures pourront détecter d'éventuelles « bio-reliques ». L'exobiologie entre réellement dans son ère scientifique.

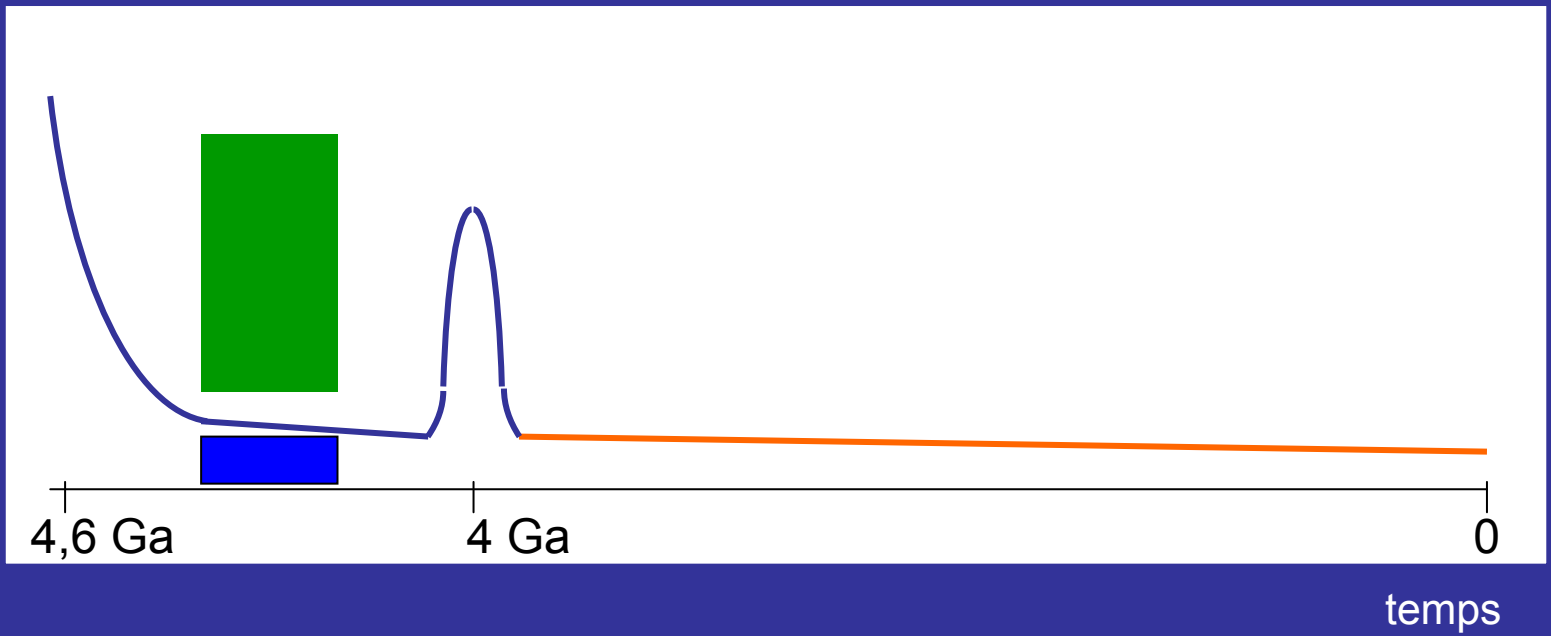
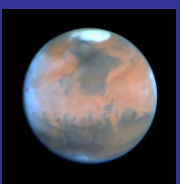
taux d'impacts



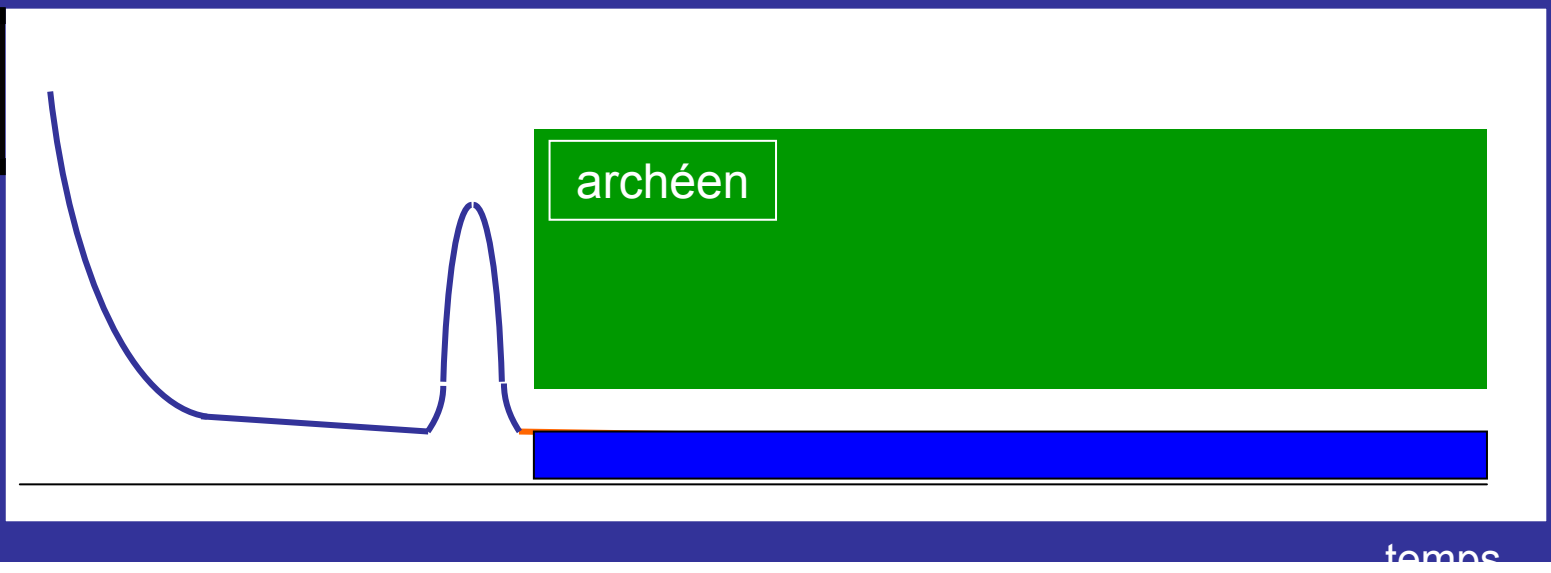
La vie est-elle apparue sur Mars ?

Nous avons montré (par la découverte de minéraux spécifiques) que Mars a connu, avant la fin du bombardement massif qui a affecté tous le système solaire pendant plus de 600 millions d'années, une ère d' « habitabilité potentielle », avec de l'eau liquide stable à sa surface. Nous avons identifié et localisé ces terrains, qui ont préservé les conditions environnementales d'alors : c'est là que les missions futures pourront détecter d'éventuelles « bio-reliques ». L'exobiologie entre réellement dans son ère scientifique.

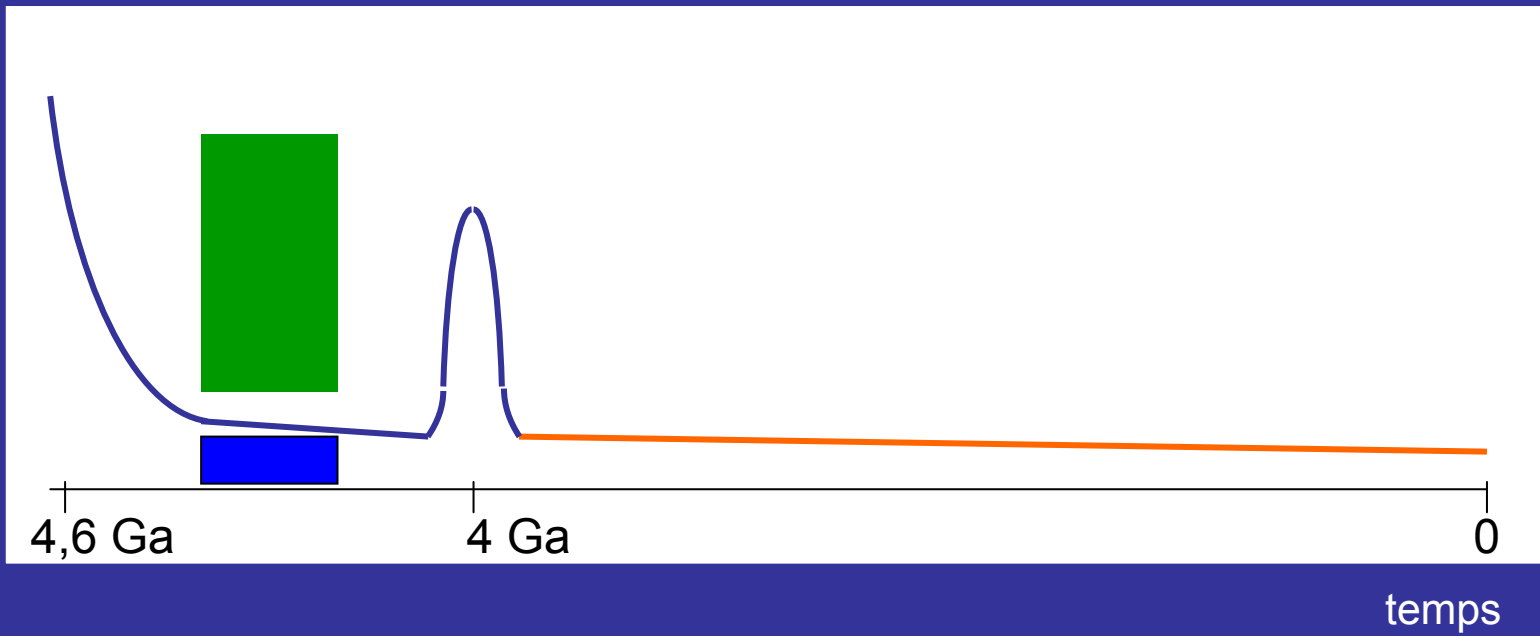
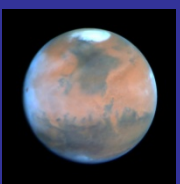
taux d'impacts



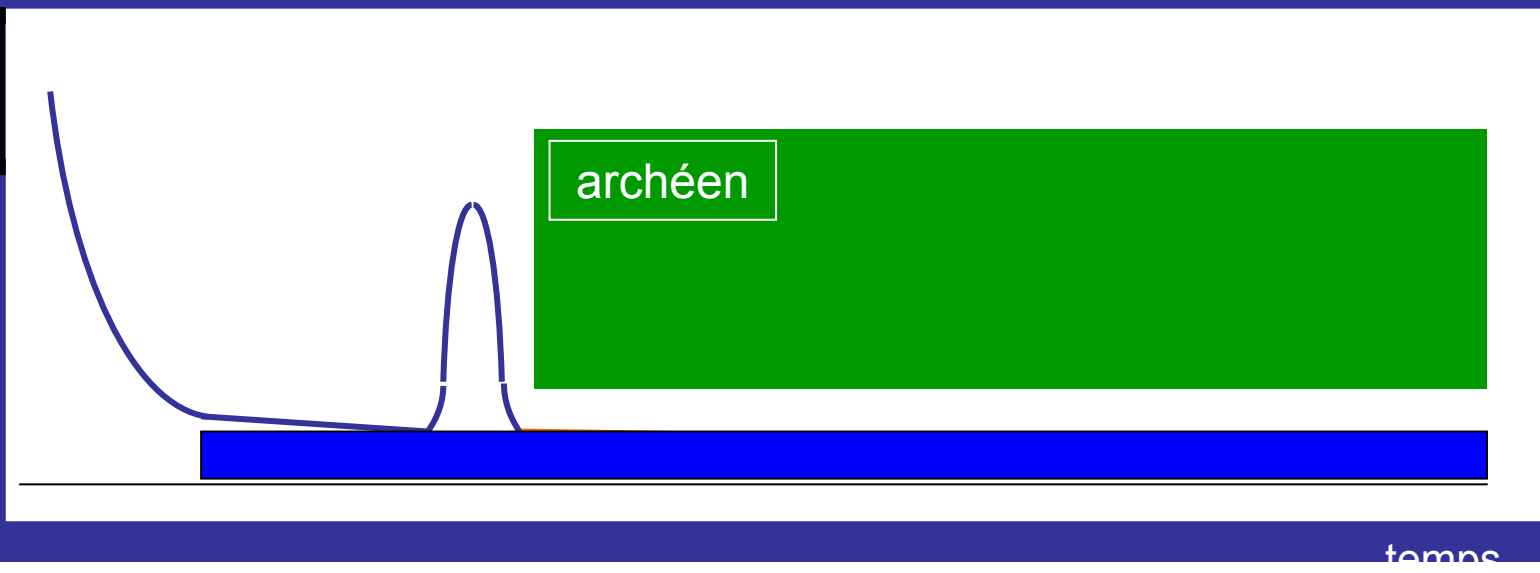
taux d'impacts



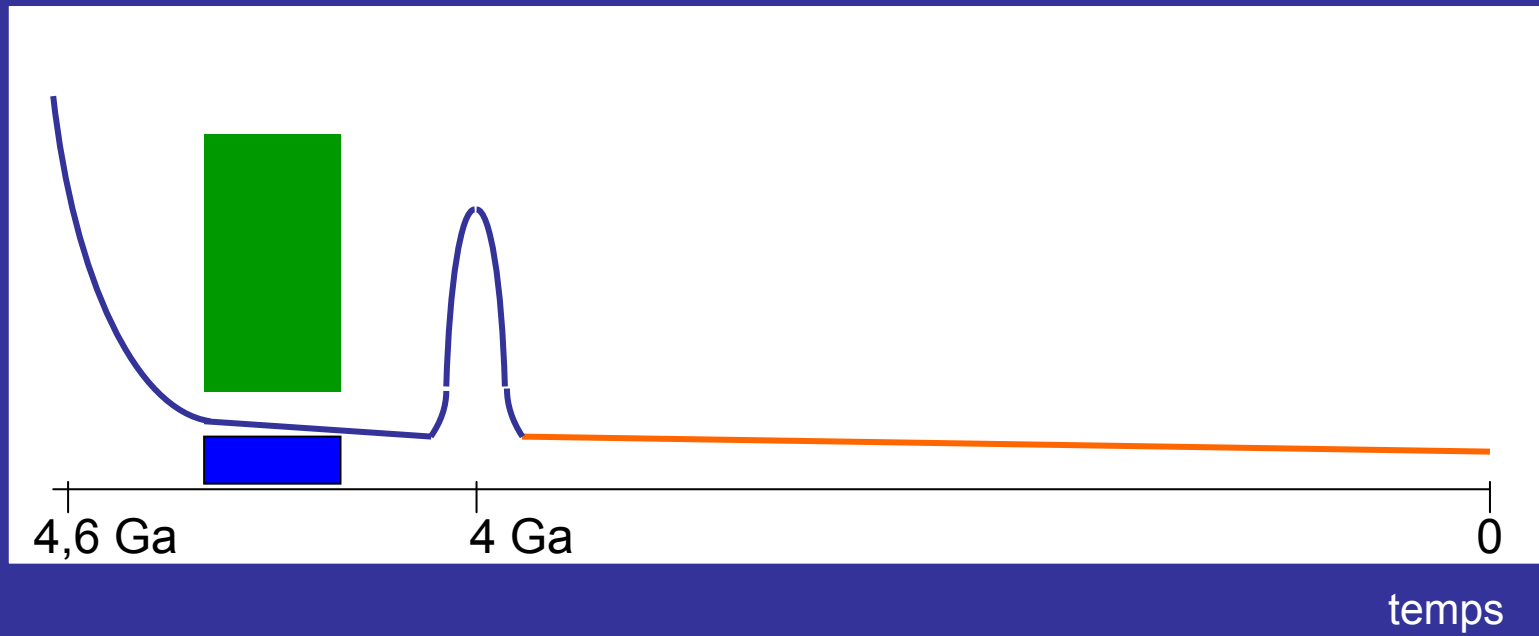
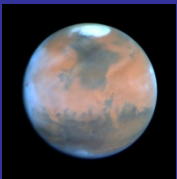
taux d'impacts



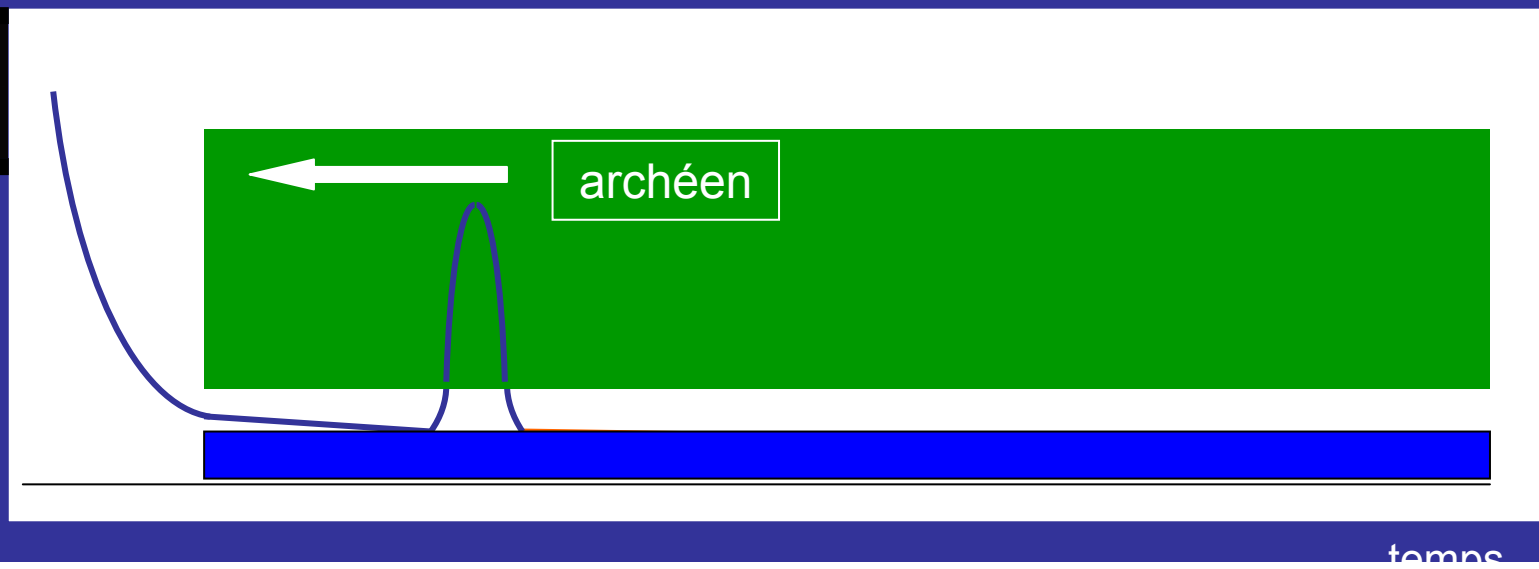
taux d'impacts



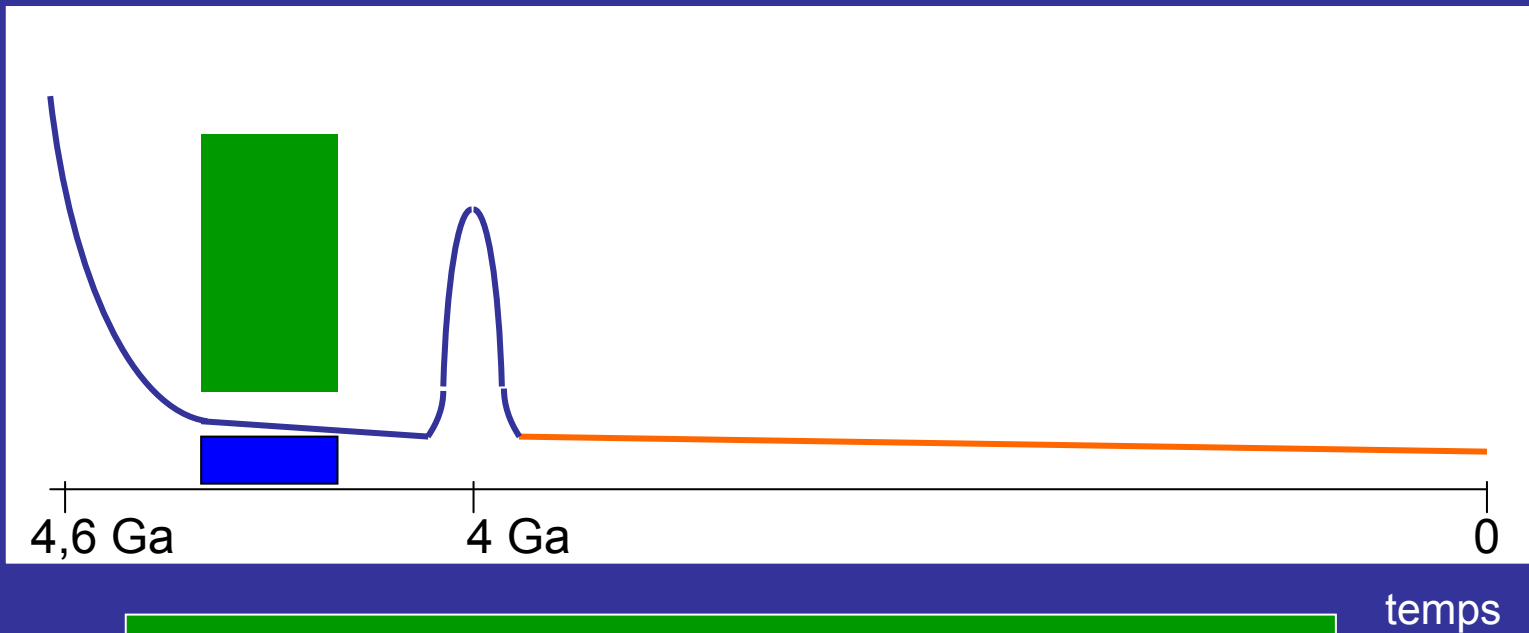
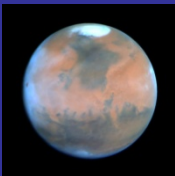
taux d'impacts



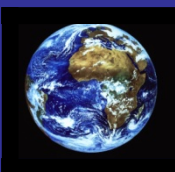
taux d'impacts



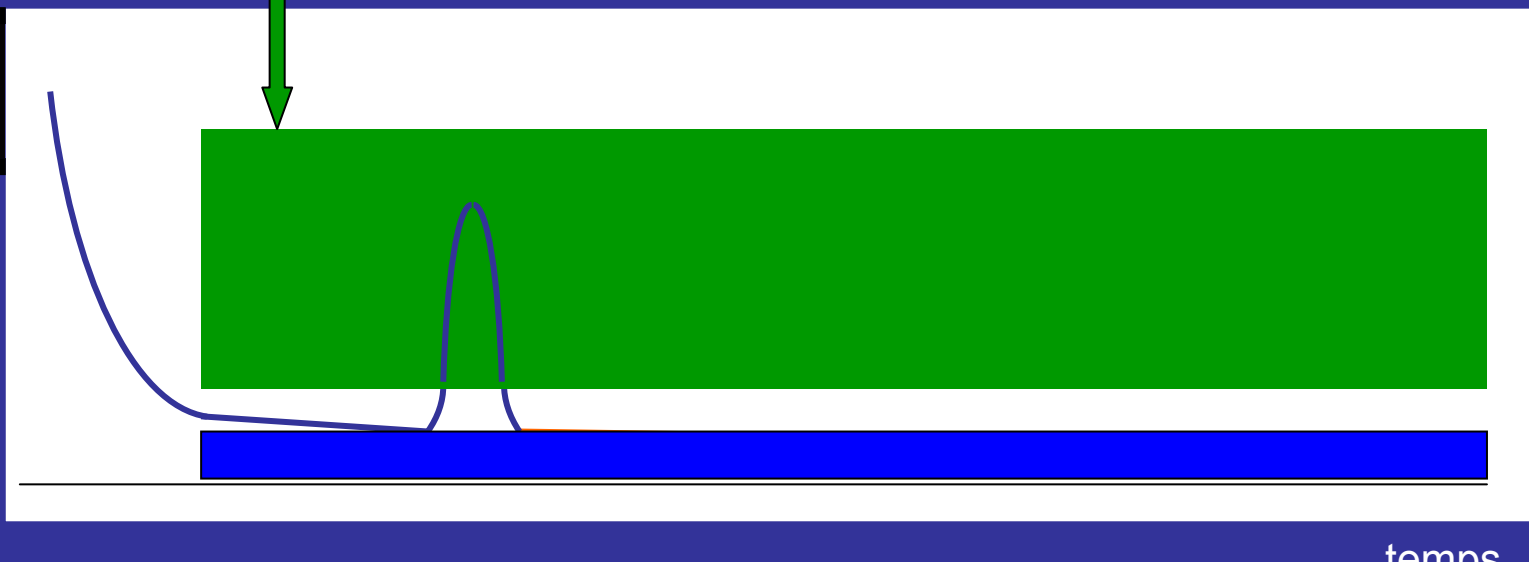
taux d'impacts



La vie sur Terre est-elle apparue plus tôt ? Comment ?

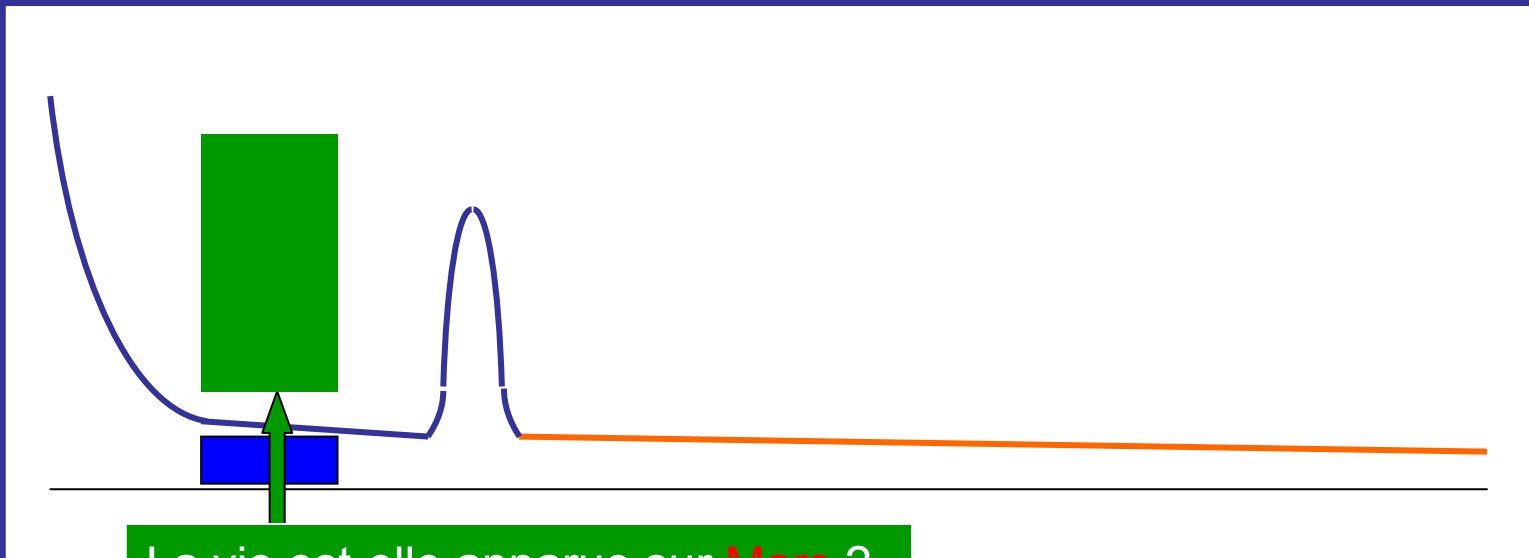
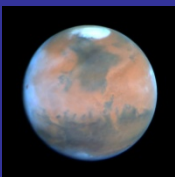


taux d'impacts



temps

taux d'impacts

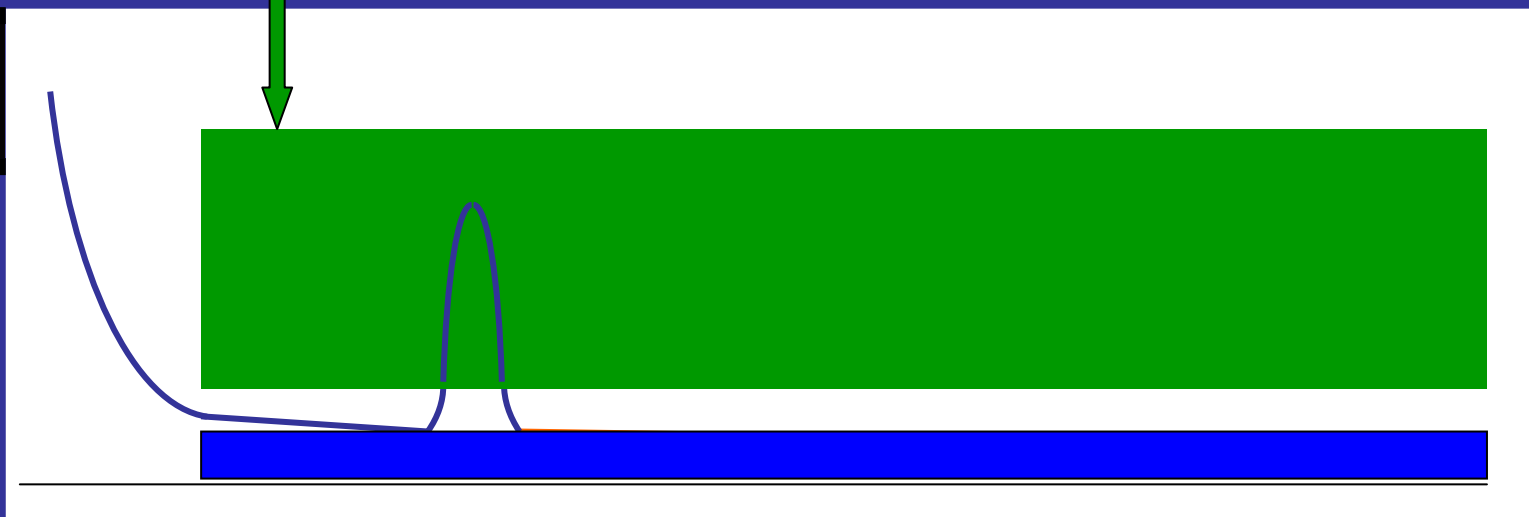


La vie est-elle apparue sur Mars ?

La vie sur Terre est-elle apparue plus tôt ? Comment ?

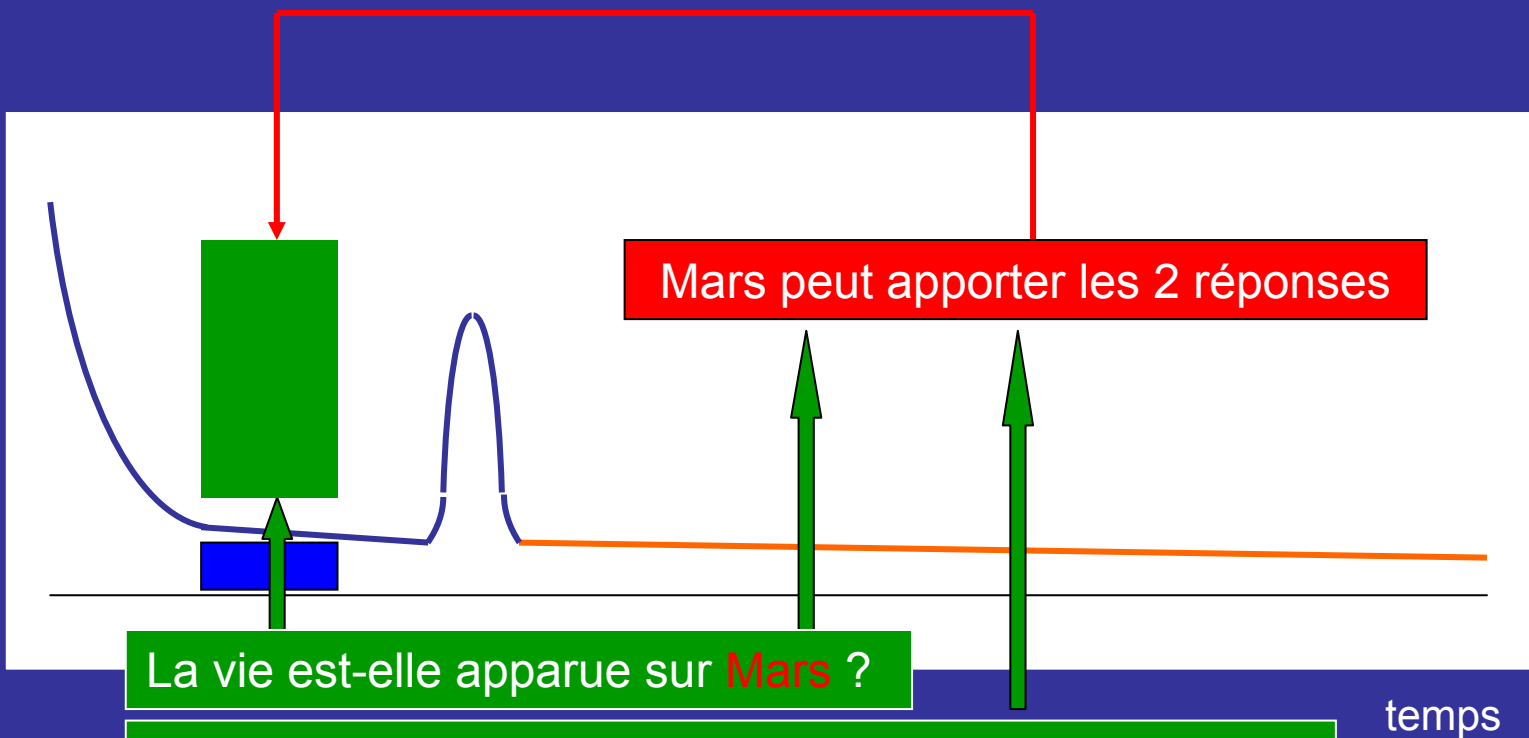
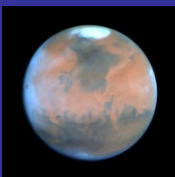
temps

taux d'impacts



temps

taux d'impacts

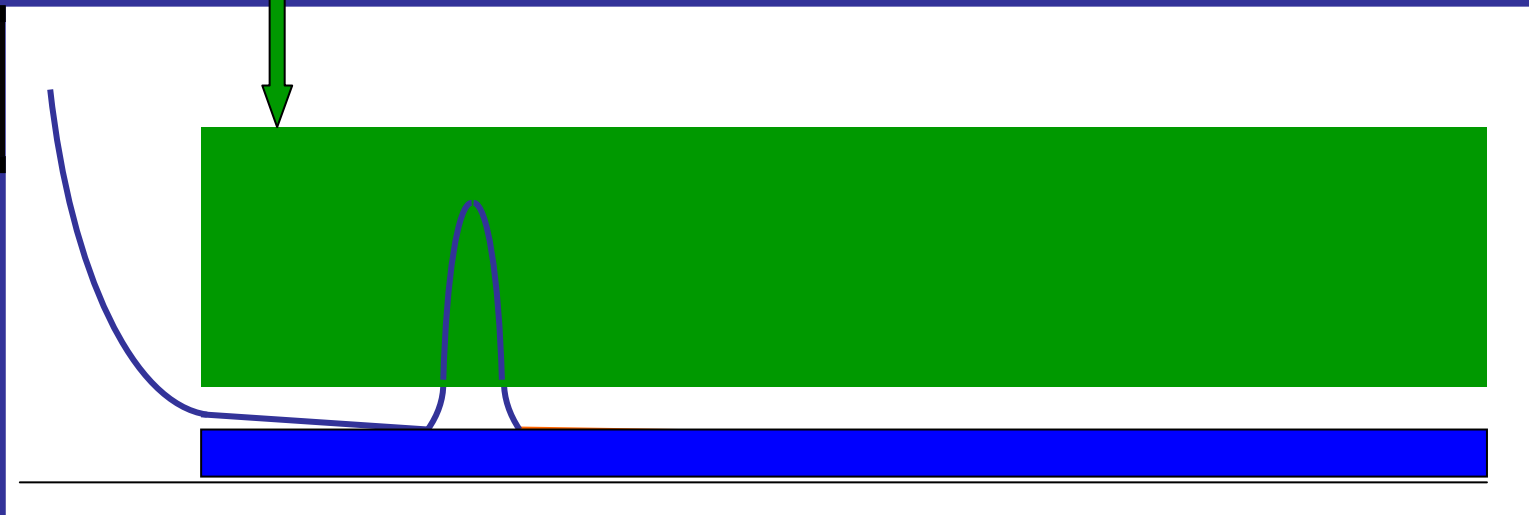


La vie est-elle apparue sur Mars ?

La vie sur Terre est-elle apparue plus tôt ? Comment ?

temps

taux d'impacts



temps

Terre générique, banale ?

pluralité des mondes ?



ou

Terre, unique ?

Terre générique, banale ?

pluralité des mondes ?



ou

Terre, unique ?



→ dans le système solaire

Terre générique, banale ?

pluralité des mondes ?



ou

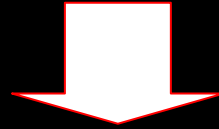
Terre, unique ?

dans le système solaire,



dans la Galaxie ?

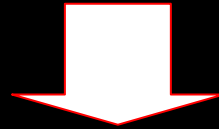
3. Comment est-on passé de molécules complexes à l'émergence de la vie ?



Exploration spatiale du système solaire (Mars ...)

Détection et caractérisation d'exoplanètes

3. Comment est-on passé de molécules complexes à l'émergence de la vie ?



Exploration spatiale du système solaire (Mars ...)

Détection et caractérisation d'exoplanètes

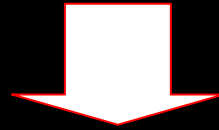


IAS, Orsay



COROT, EChO

3. Comment est-on passé de molécules complexes à l'émergence de la vie ?



Exploration spatiale du système solaire (Mars ...)

Détection et caractérisation d'exoplanètes



IAS, Orsay



COROT, EChO

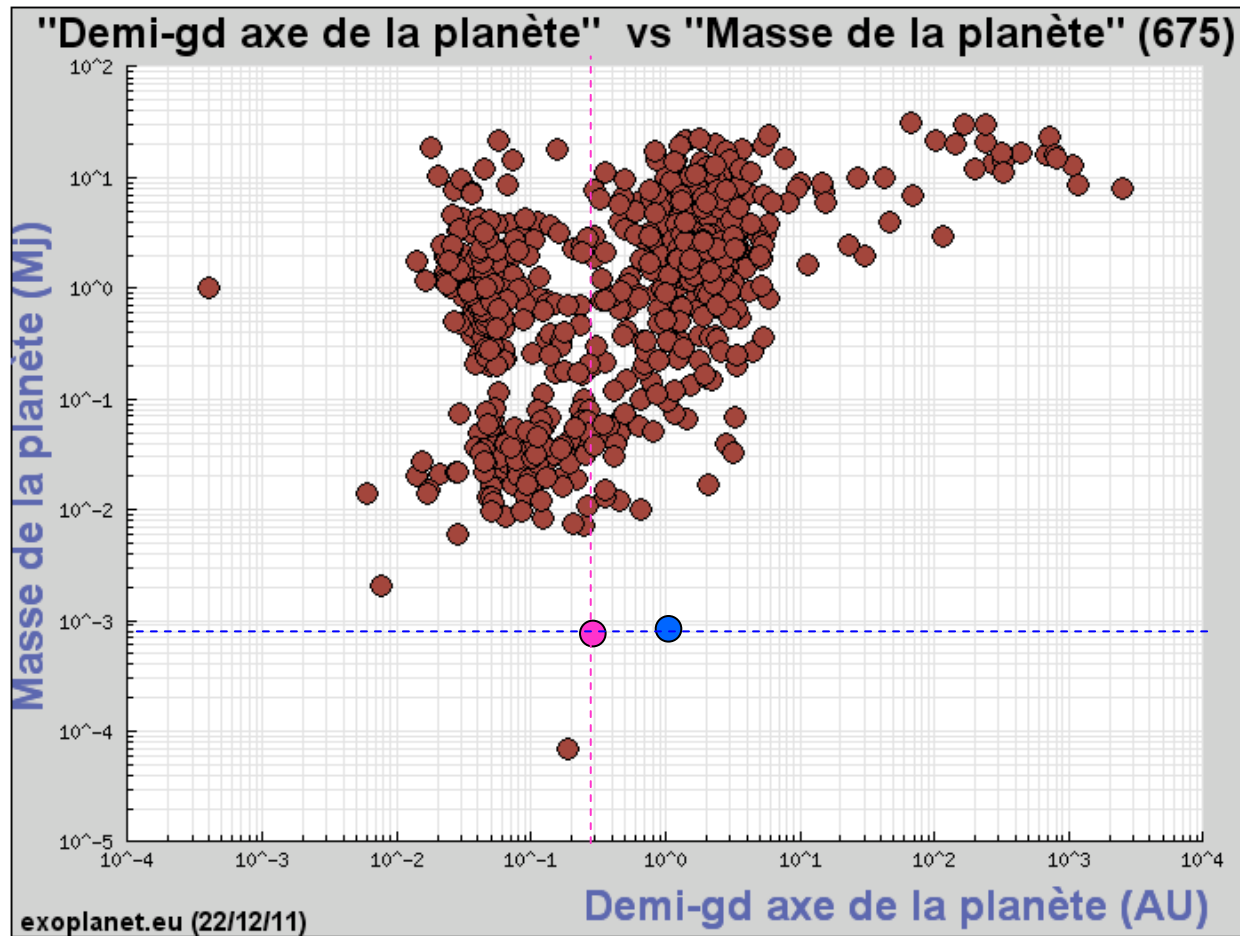


IRFU, Saclay



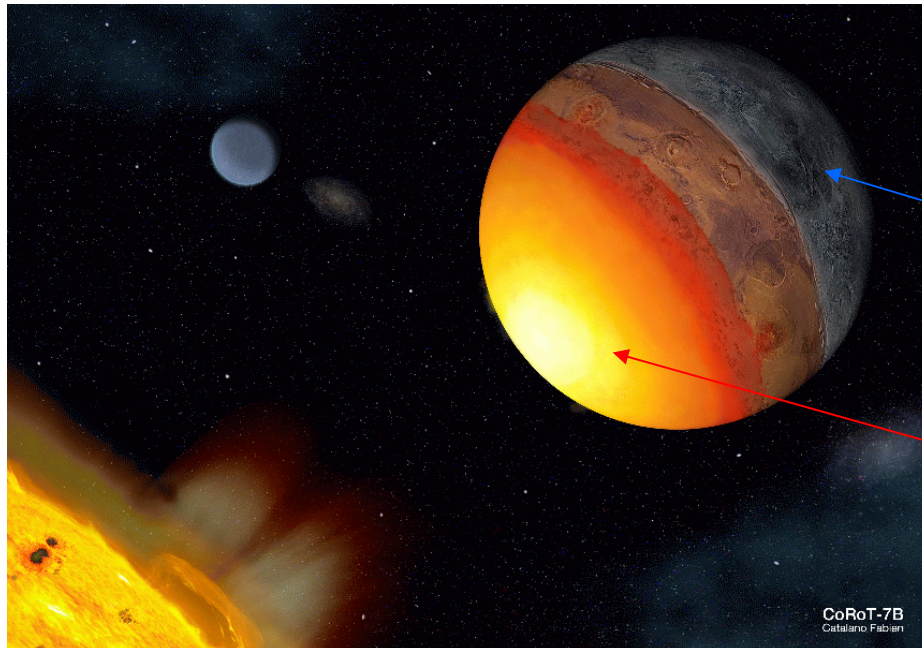
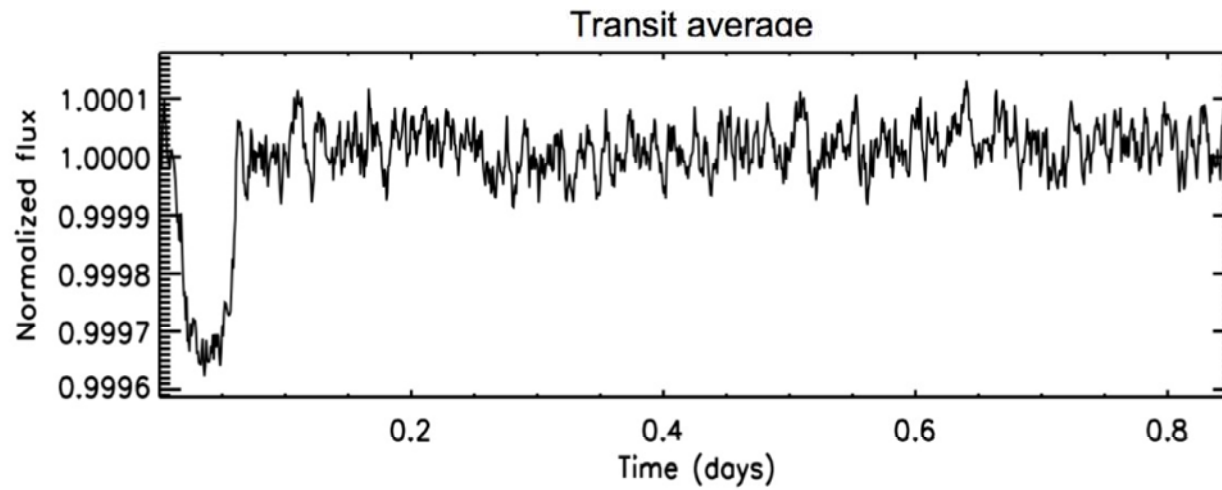
EChO

Exoplanètes



L'essentiel des planètes détectées à ce jour (indirectement) sont de grande masse (géantes), et/ou proche de leur étoile. La plupart ont donc migré depuis leur formation. Cette migration permet-elle la survie de planètes « telluriques » ? Notre système a-t-il migré ? Est-il spécifique, ou banal ?

CoRoT 7b



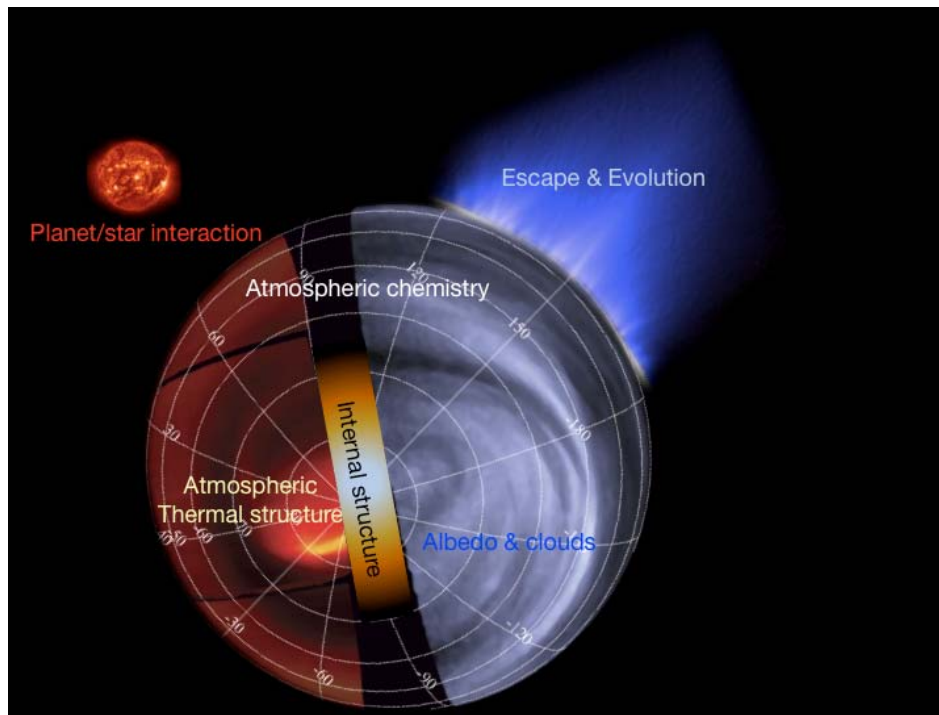
Période : 0,85 jours
Rayon : 1,68 R_{terre}
Masse : 4,8 M_{Terre}

$T < -50^{\circ}\text{C} ?$

$T > 1500^{\circ}\text{C} ?$



EChO : Exoplanet Characterization Observatory



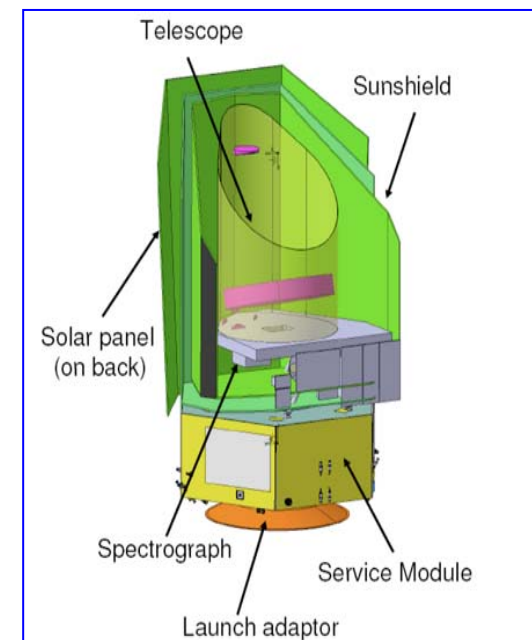
- Caractérisation des atmosphères des planètes géantes chaudes aux super Terres tempérées
- Mise en évidence de CO , CO_2 , H_2O , CH_4 , O_3 , NH_3 ...
- Spectroscopie simultanée 0.4 à 16 μm
- Candidat mission M3 de l'ESA

contribution française

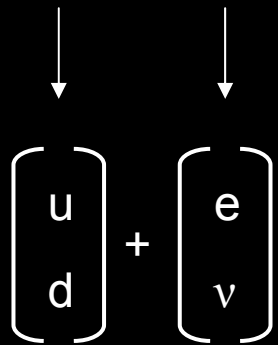
- canal 5-11 μm
- modélisation de l'instrument
- synergie IRFU/IAS sur le développement et test de nouveaux détecteurs



irfu
cea
saclay

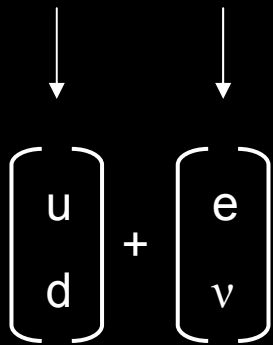


Comment, à partir de quatre particules
élémentaires essentiellement...



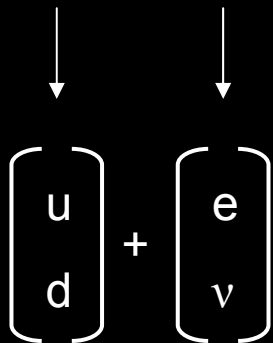
Formation stellaire et conditions d'apparition de la vie

Comment, à partir de quatre particules
élémentaires essentiellement...



Formation stellaire et conditions d'apparition de la vie

Comment, à partir de quatre particules
élémentaires essentiellement...



Par ses programmes prioritaires, par l'expérience des équipes engagées, par les synergies qu'il permet, **P2IO** est bien armé pour contribuer d'une manière majeure aux recherches des conditions de **formation des étoiles, des systèmes stellaires, d'émergence de la vie**.

Cette recherche va au-delà de la seule curiosité scientifique ; elle participe à cette révolution conceptuelle de notre vision de l'homme dans l'Univers, dont il tire son histoire.