



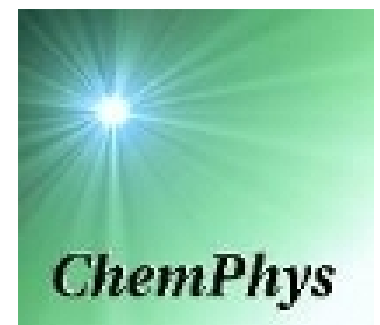
La recherche de vie dans l'univers

Marie-Paule BASSEZ

<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb>

Université de Strasbourg

31 janvier 2013



to cite this conference : <http://audiovideocours.unistra.fr>
<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/originevie.html>

Une définition de la vie

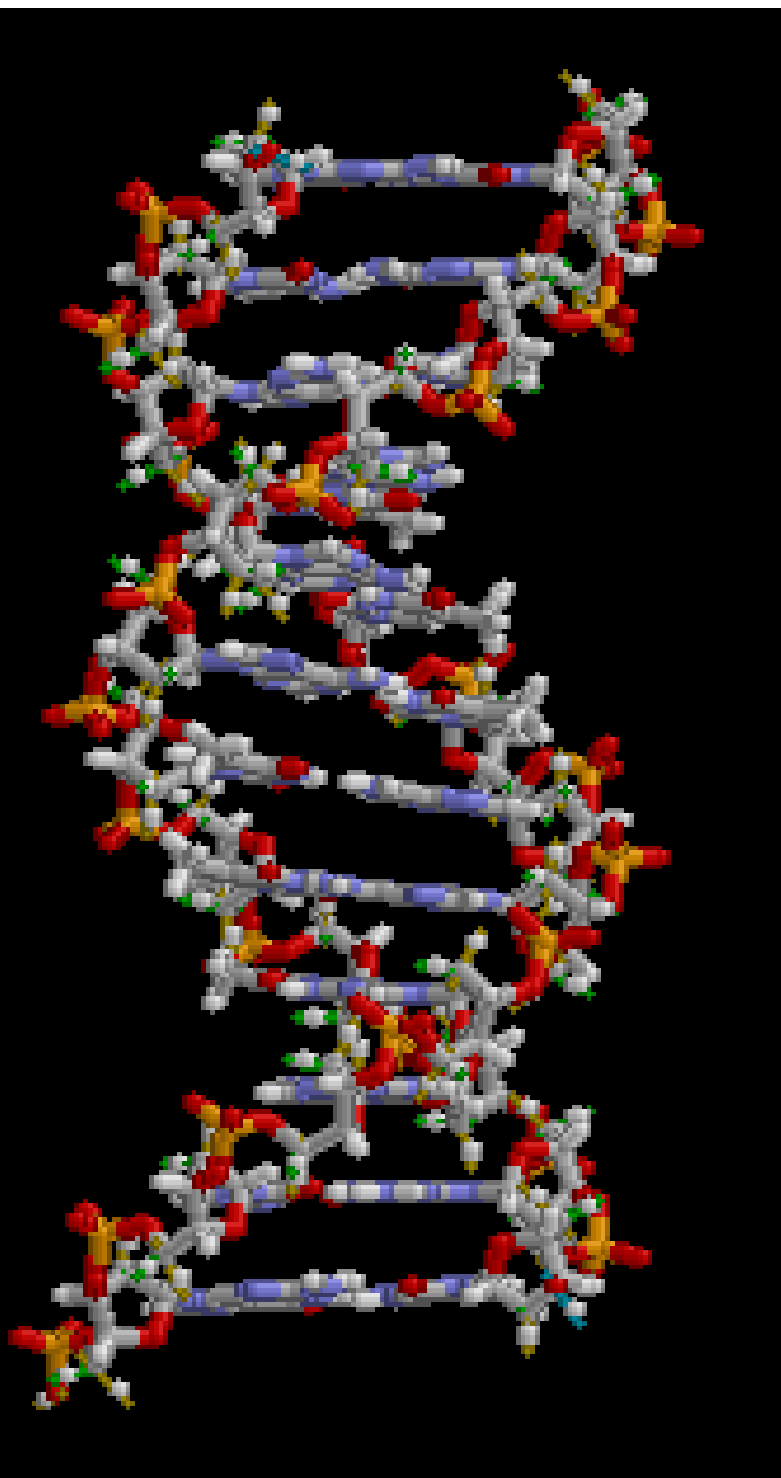
« Homme : Etre intelligent, qui communique à ses semblables sa pensée par la parole »

Jean-Baptiste LAMARCK (1817)

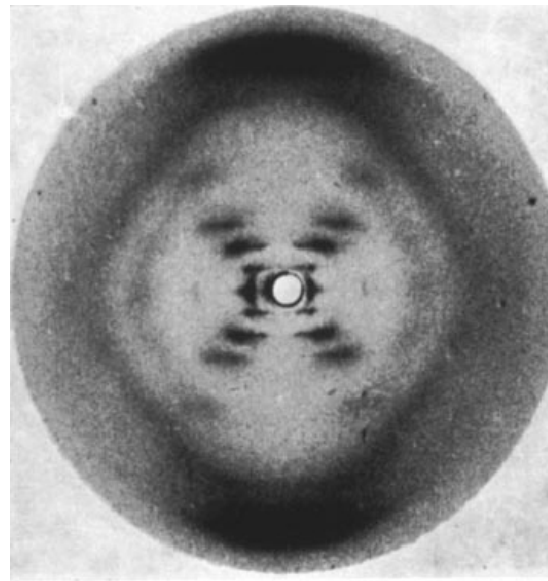
Une autre définition de la vie

La transmission d'une molécule d'une génération à la suivante

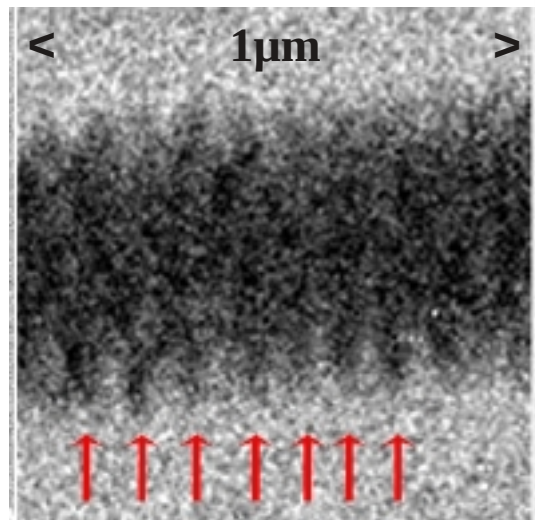
La molécule d'ADN



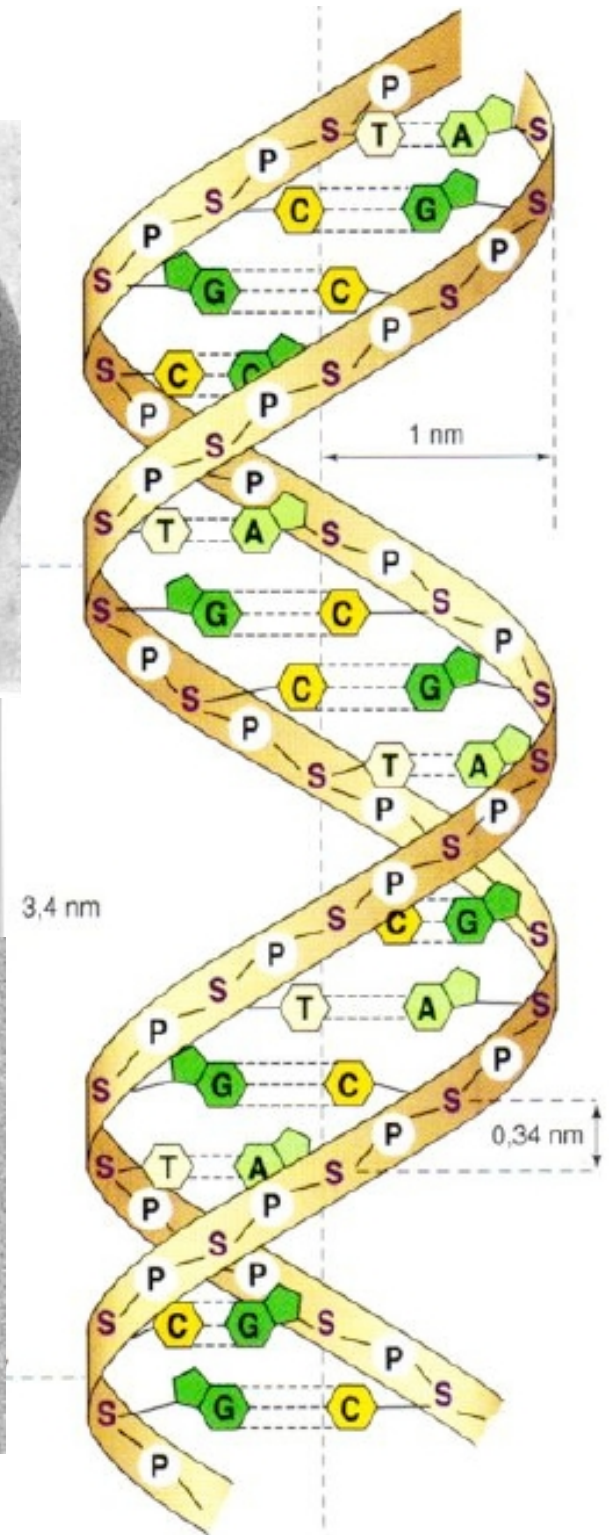
wikimedia commons



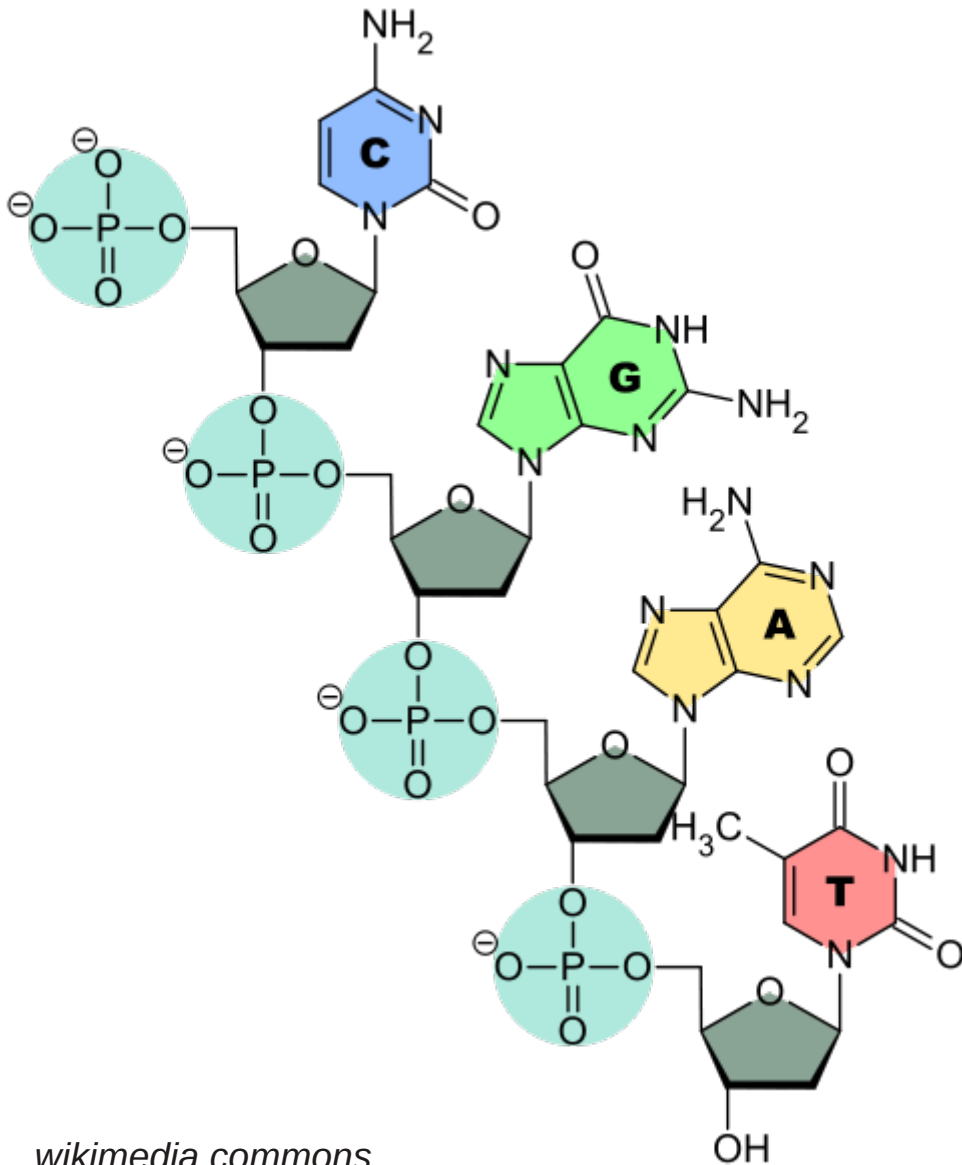
Rosalind FRANKLIN
X-rays 1953



GENTILE...di FABRIZIO
MET 2012



Structure de l'ADN



4 bases : cytosine
guanine
adénine
thymine

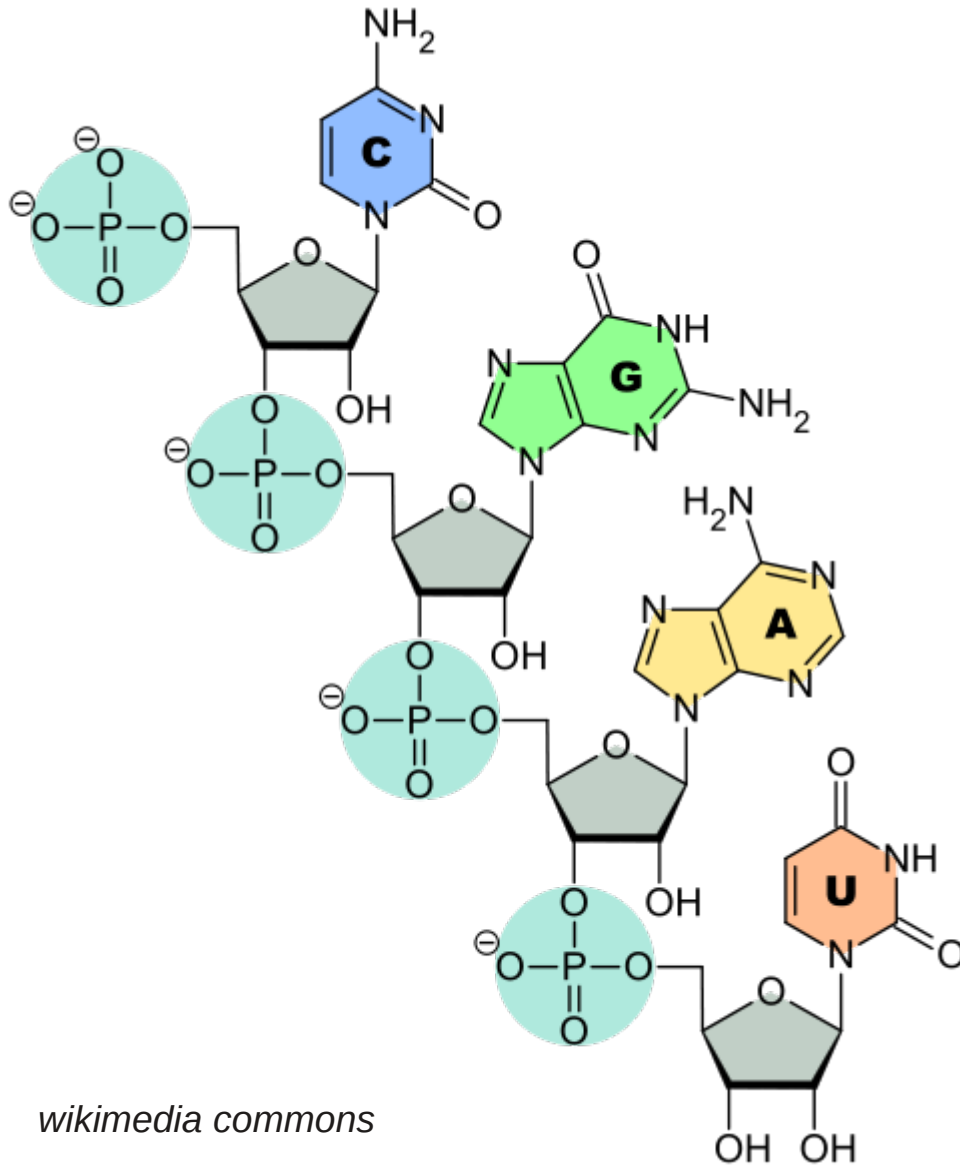
1 sucre : désoxyribose
1 phosphate

A-T C-G

Qd sur un brin : ATGC

Sur l'autre brin : TACG

Structure de l'ARN

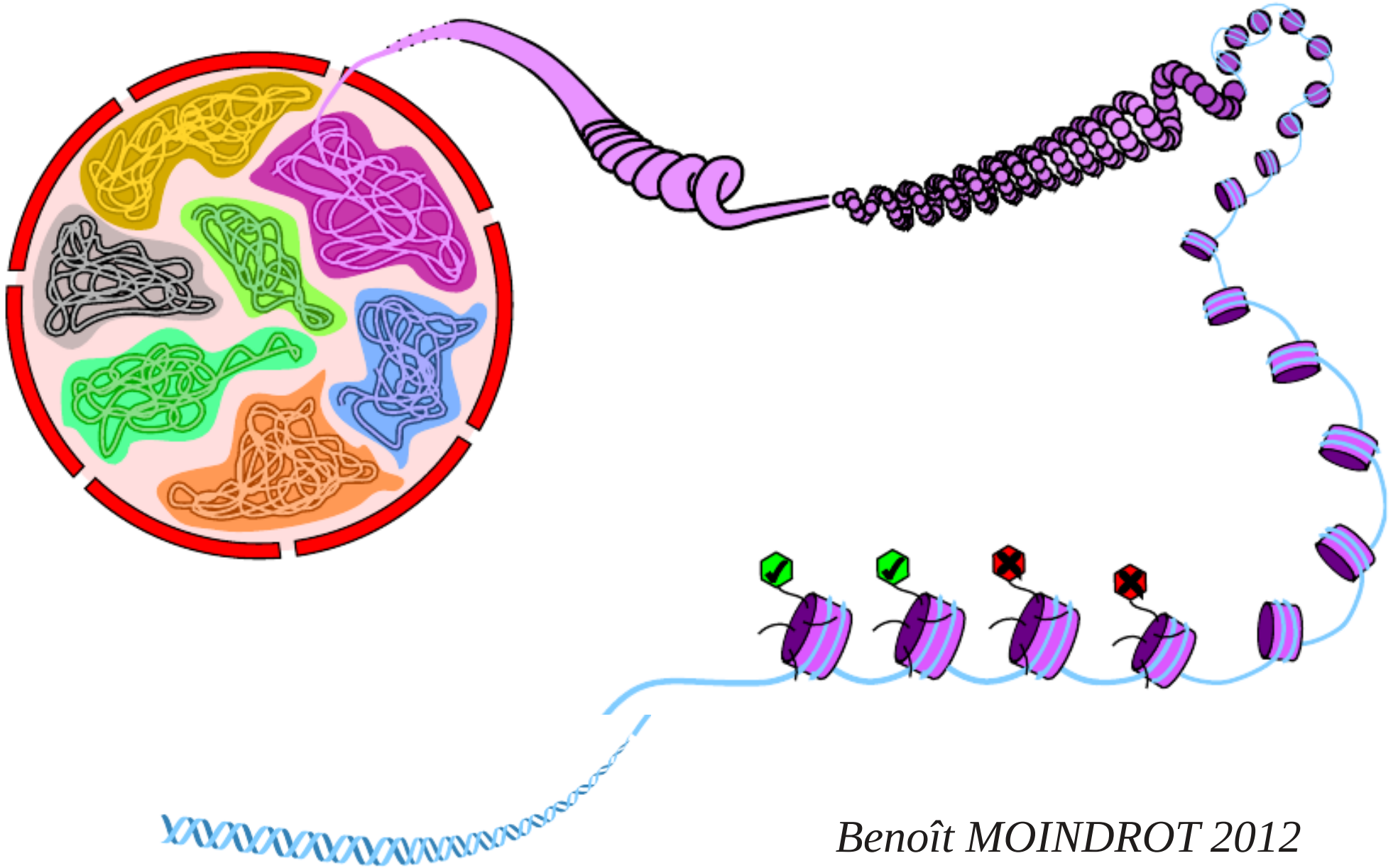


4 bases : cytosine
guanine
adénine
uracile

1 sucre : ribose
1 phosphate

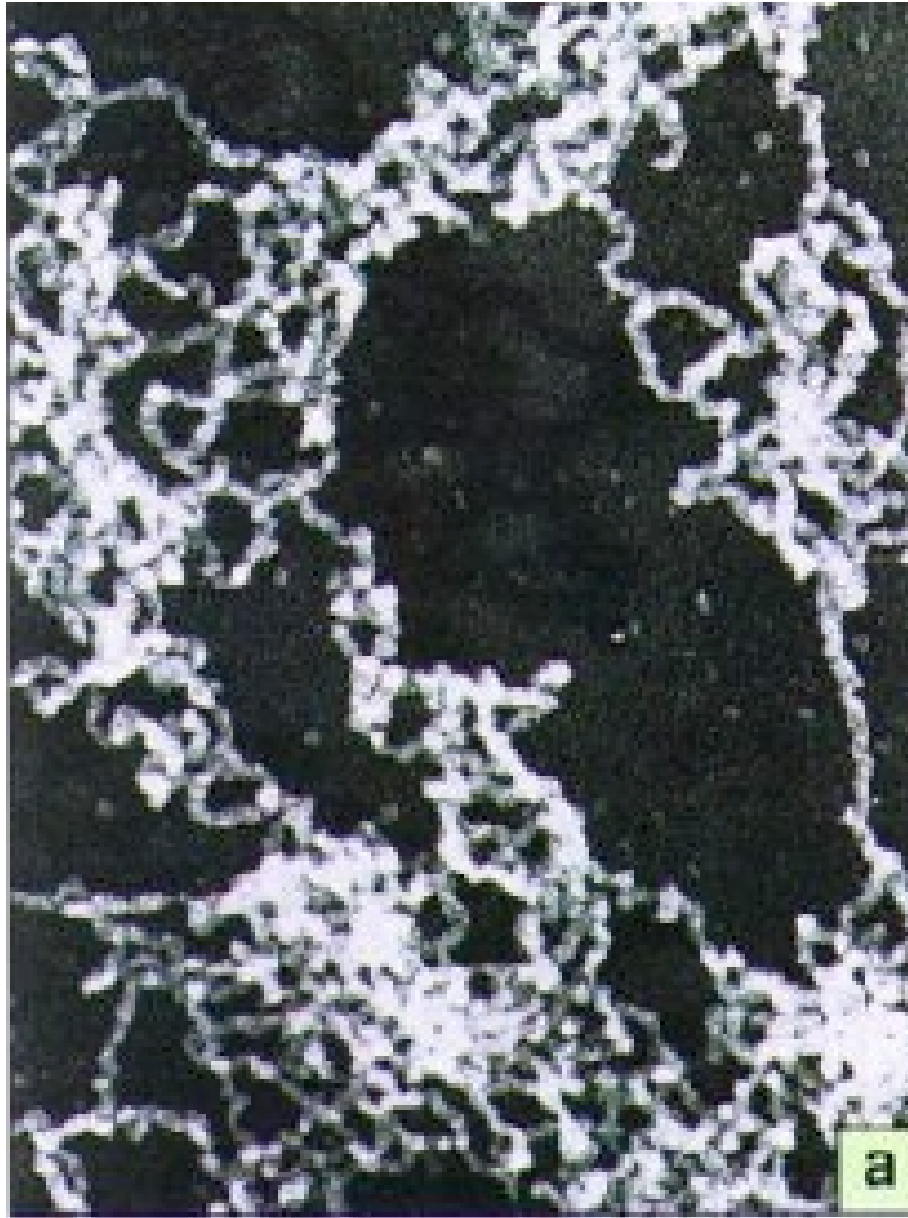
wikimedia commons

Le repliement de la chromatine

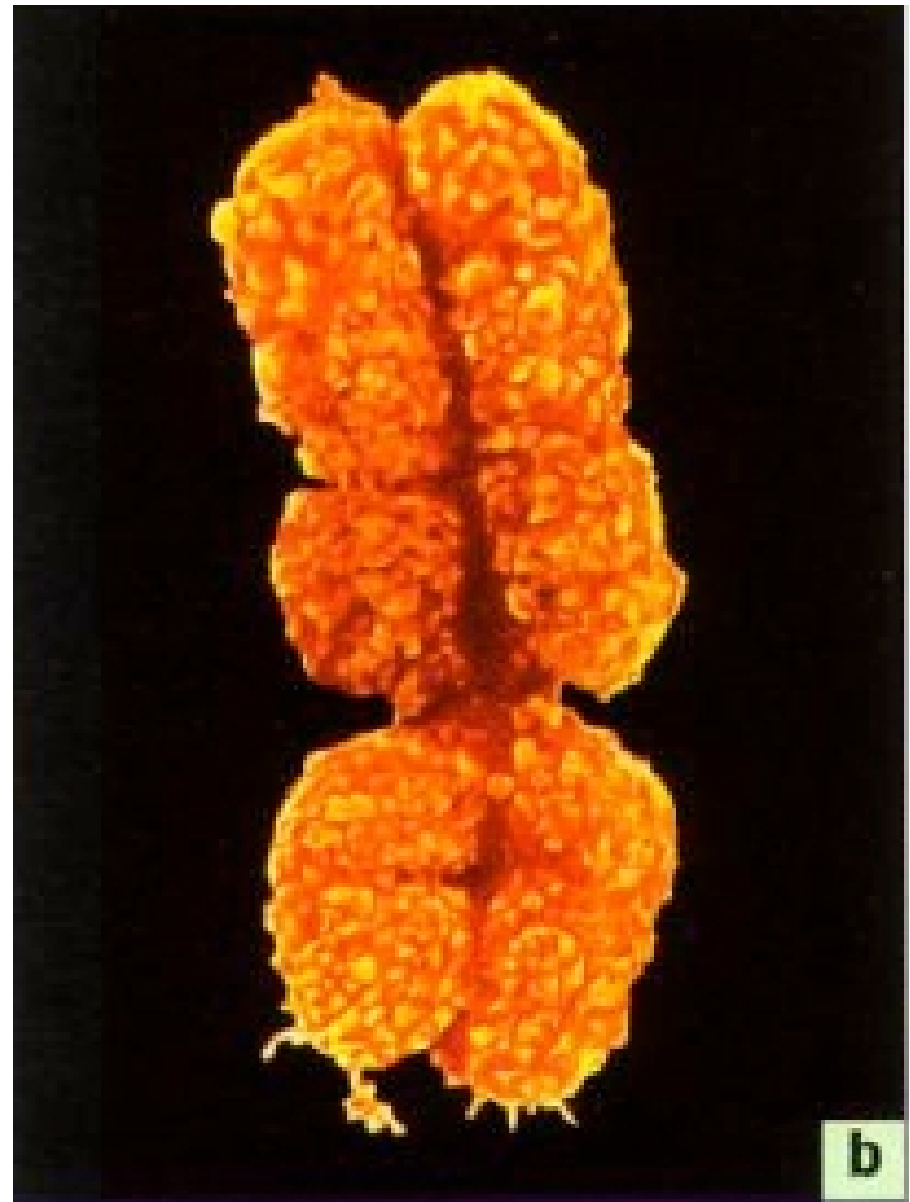


*Benoît MOINDROT 2012
avec autorisation*

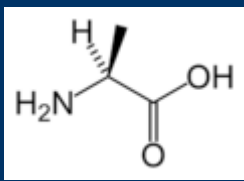
la chromatine MET x37500



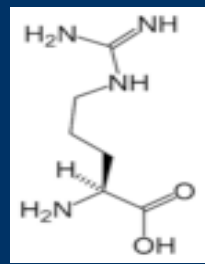
le chromosome MET x8200



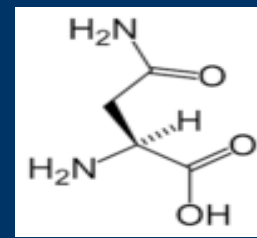
*Julien BORTOLUZZI, Benjamin MALATRAIT, Ludovic RIBSTEIN (2012)
Microscopes électroniques; J. BORTOLUZZI (2011) Microscope à force atomique
<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/originevie.html>*



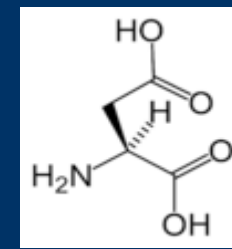
(Ala/A)



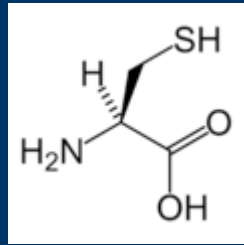
(Arg/R)



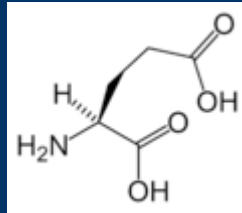
(Asn/N)



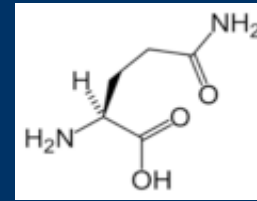
(Asp/D)



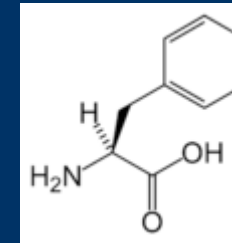
(Cys/C)



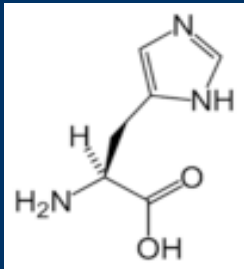
(Glu/E)



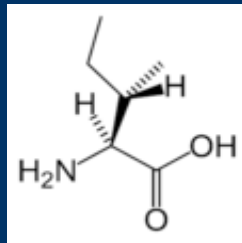
(Gln/Q)



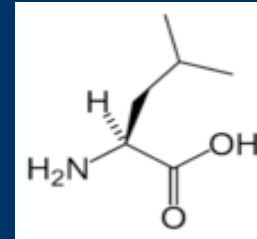
(Phe/F)



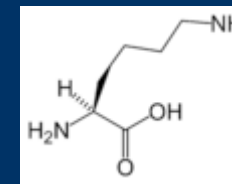
(His/H)



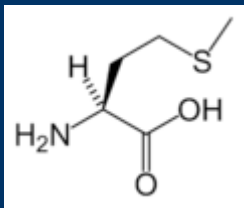
(Ile/I)



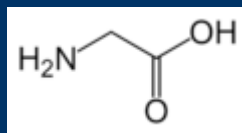
(Leu/L)



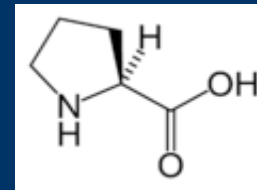
(Lys/K)



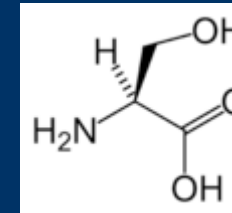
(Met/M)



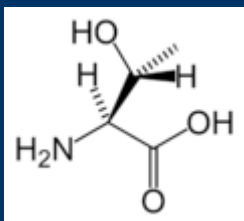
(Gly/G)



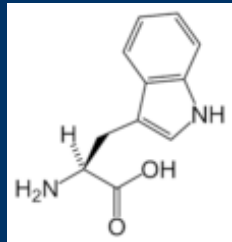
(Pro/P)



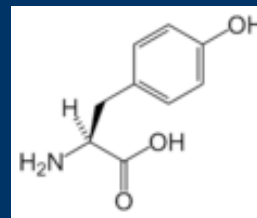
(Ser/S)



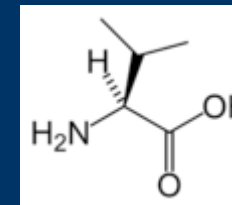
(Thr/T)



(Trp/W)



(Tyr/Y)

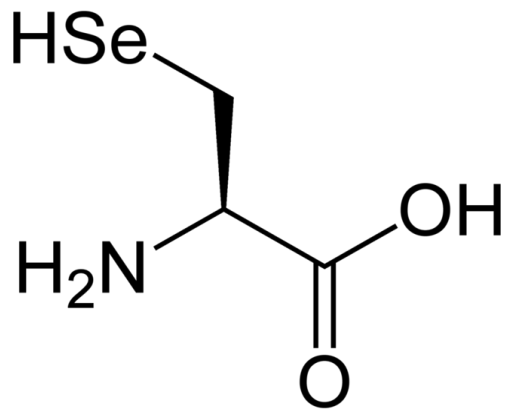


(Val/V)

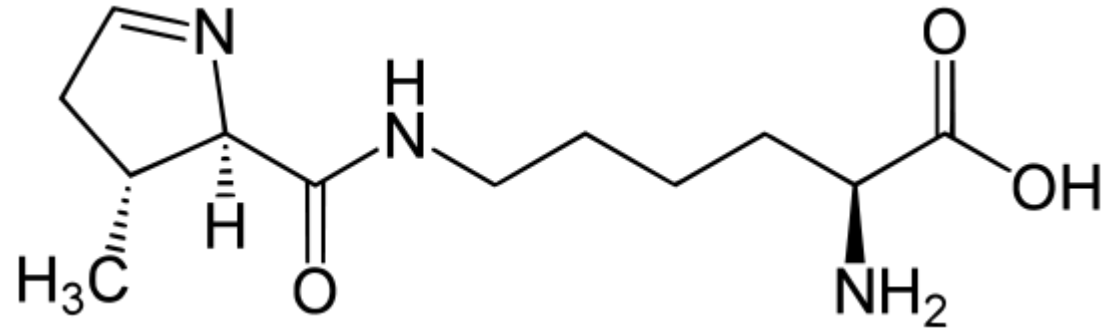
Sophie BENNHAR 2010, L'origine de la vie sur Terre

dans Marie-Paule BASSEZ, La vie, ses origines, sa biodiversité

<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/originevie.html>



sélénocystéine Sec / U

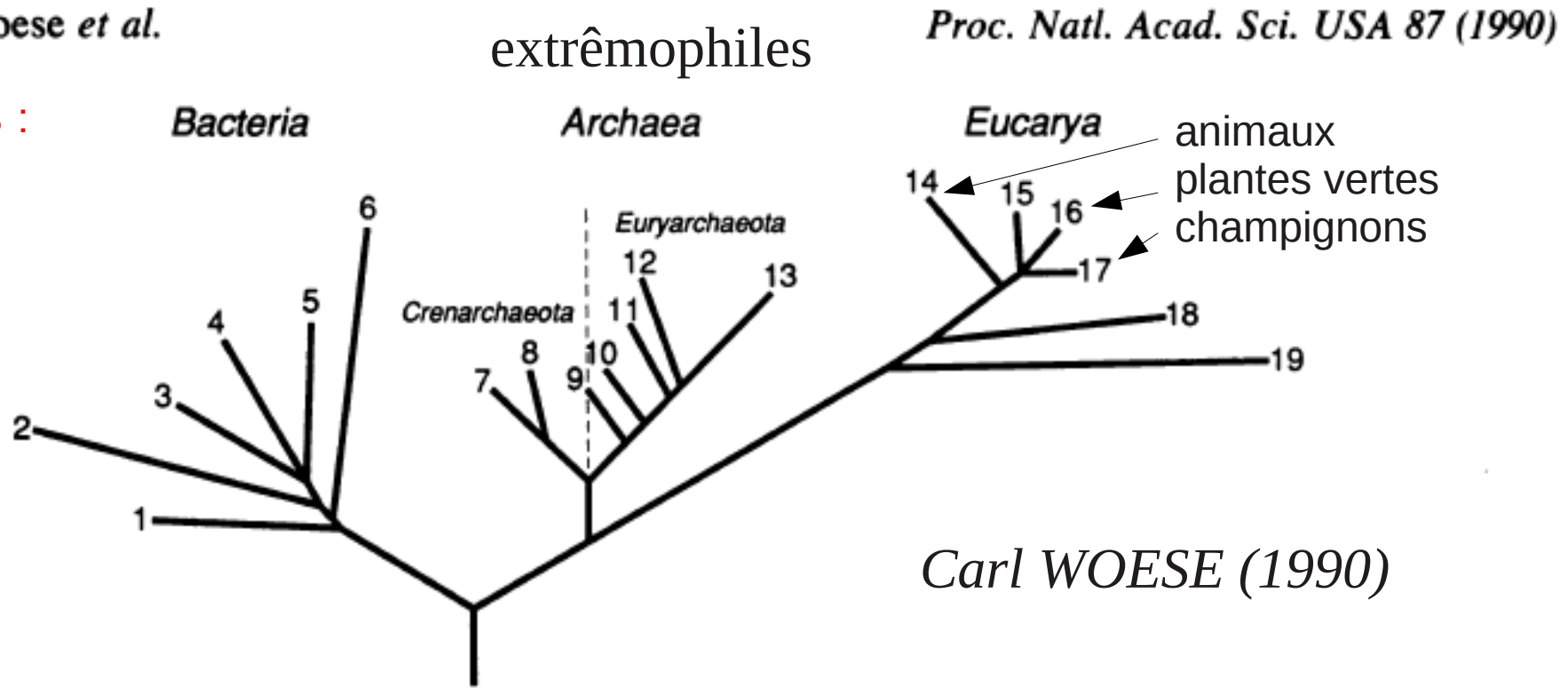


Pyrrolysine Pyl / O
chez une archée méthanogène

Arbre phylogénétique

Evolution: Woese *et al.*

3 domaines :



Cet arbre est basé sur la **comparaison des séquences nucléotidiques de la molécule ARNr** (ribosomique) dans les organismes actuels.

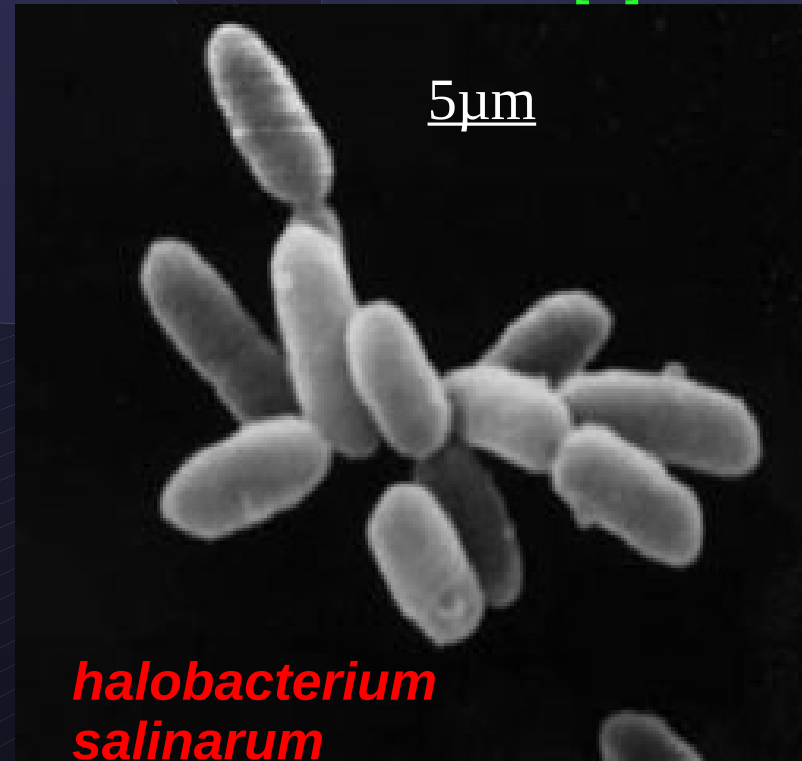
L'ARN 16S est rencontré chez les procaryotes (bactérie et archée, organismes qui ne sont pas des eucaryotes) et l'ARN 18S chez les eucaryotes.

Les archées (1 à ~5 μm)

1977 : Carl Woese les distingue des bactéries et des eucaryotes.

La plupart vivent dans des milieux extrêmes.

Leur morphologie est la même que celle des bactéries avec en plus les formes polygonales des archées halophiles.



halobacterium salinarum

Caractéristiques :

[5]

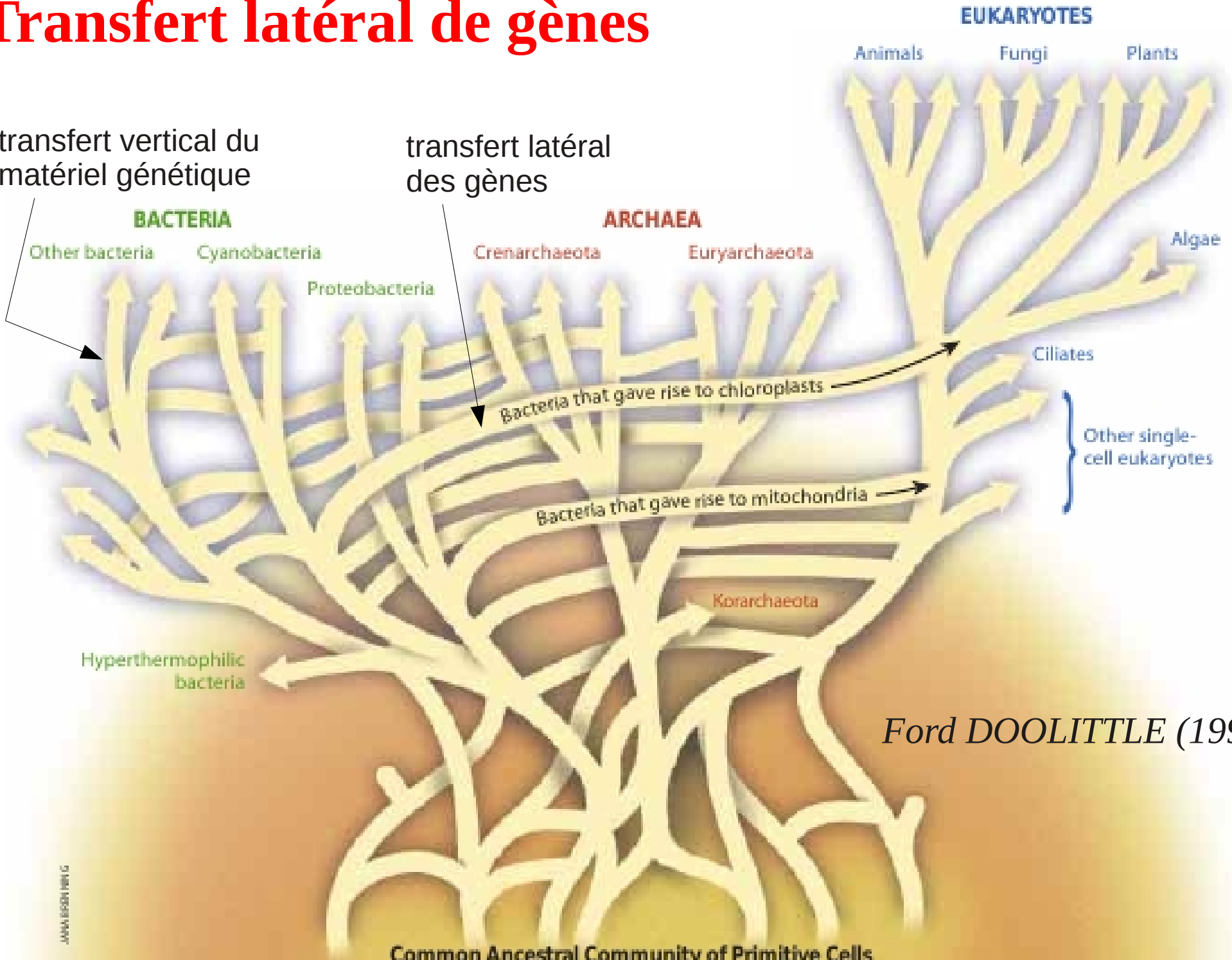
- membrane plasmique plus épaisse que chez les bactéries (→ supporter conditions extrêmes),
- lipides constitués de longue chaînes d'alcool isoprénique (au lieu de chaînes d'acides gras),
- ARN-polymérases ressemblent à celles des eucaryotes.

(Denis FUGER, David LEFEVRE 2011) *La biodiversité dans les milieux extrêmes*
<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/originevie.html>

Transfert latéral de gènes

transfert vertical du matériel génétique

transfert latéral des gènes

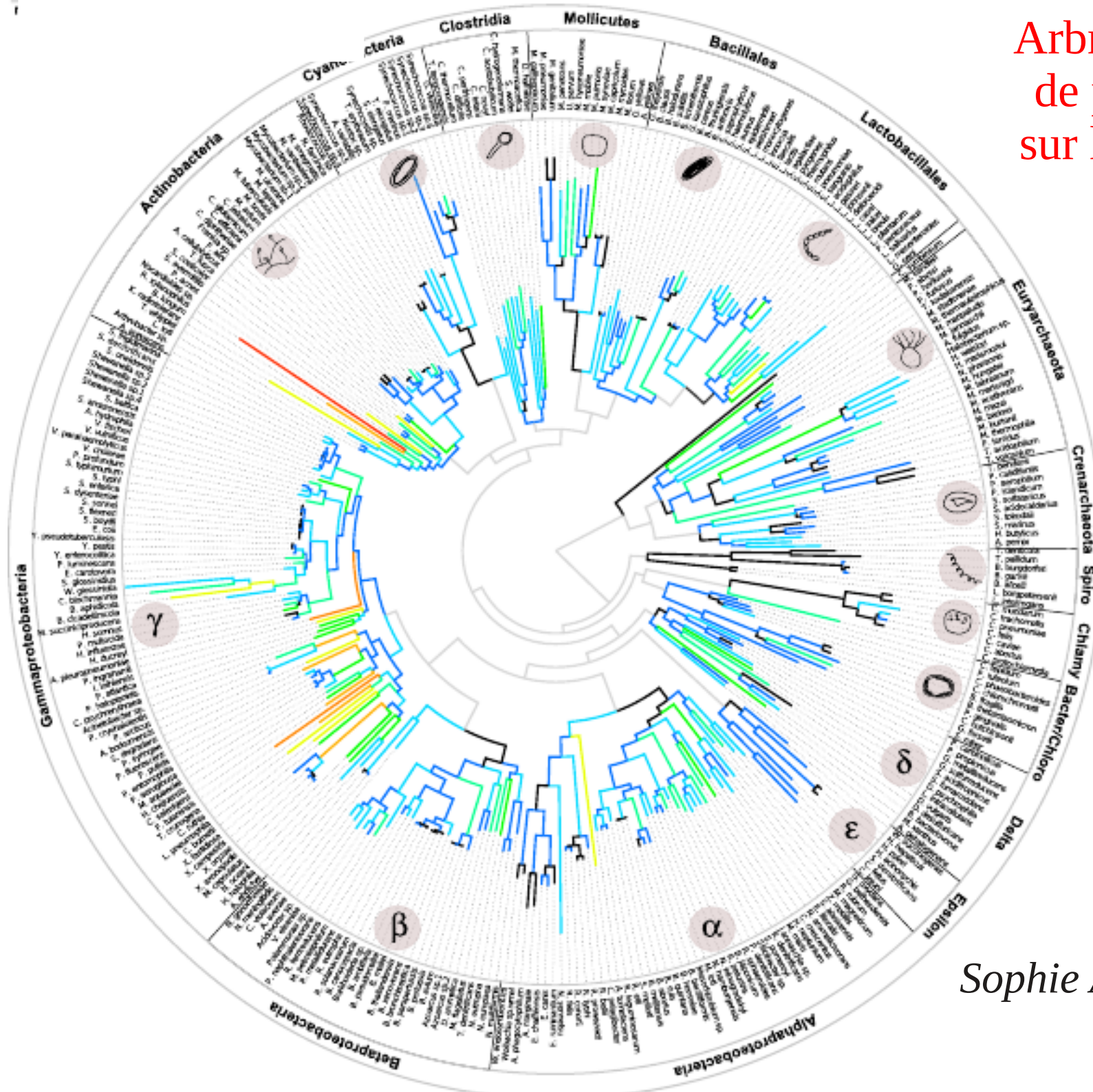


Ford DOOLITTLE (1999)

JANIS BRONKHORST

Common Ancestral Community of Primitive Cells

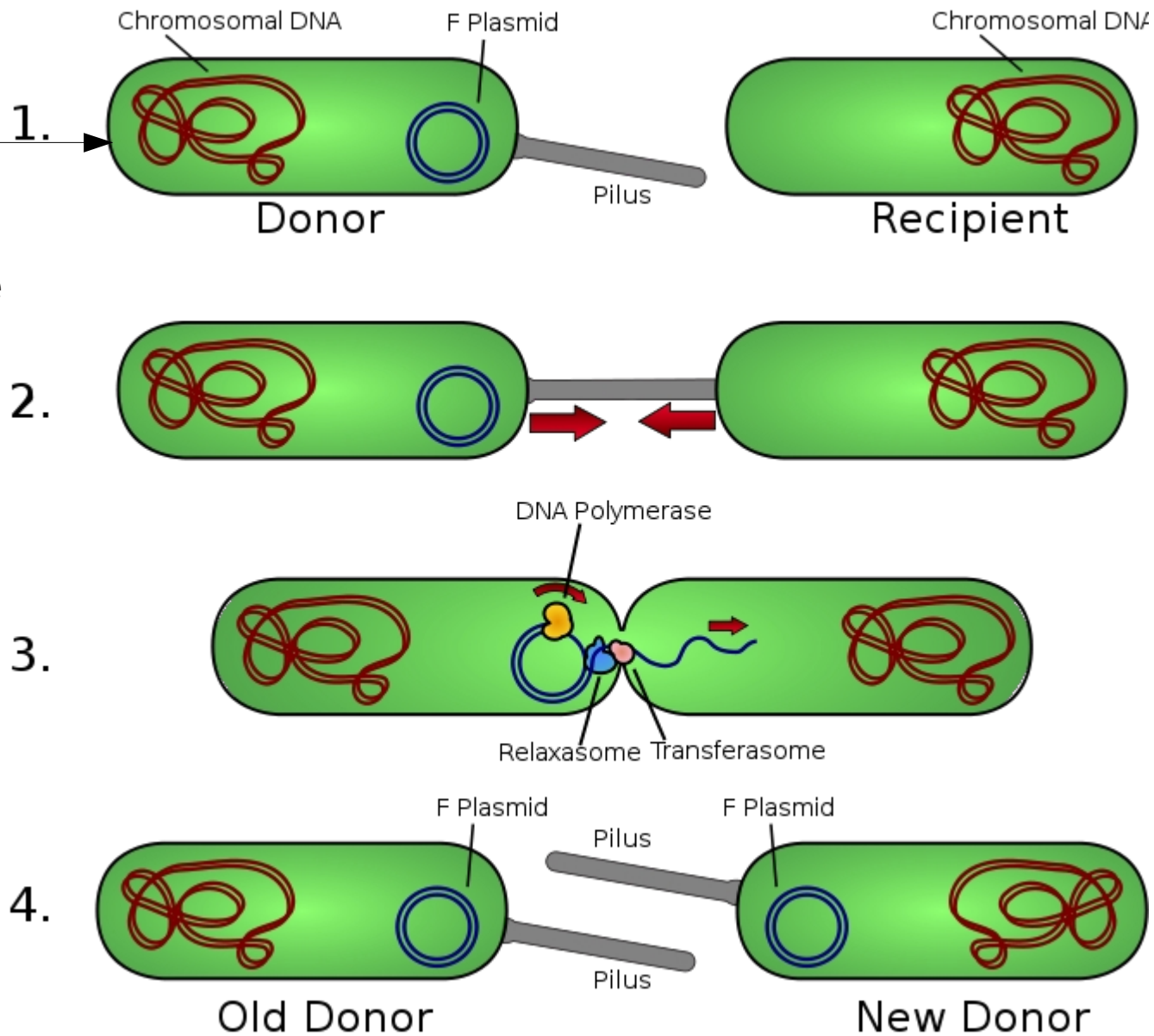
Arbre phylogénétique de procaryotes basé sur le transfert latéral des gènes



Sophie ABBY et al. (2012)

bactérie
donneuse

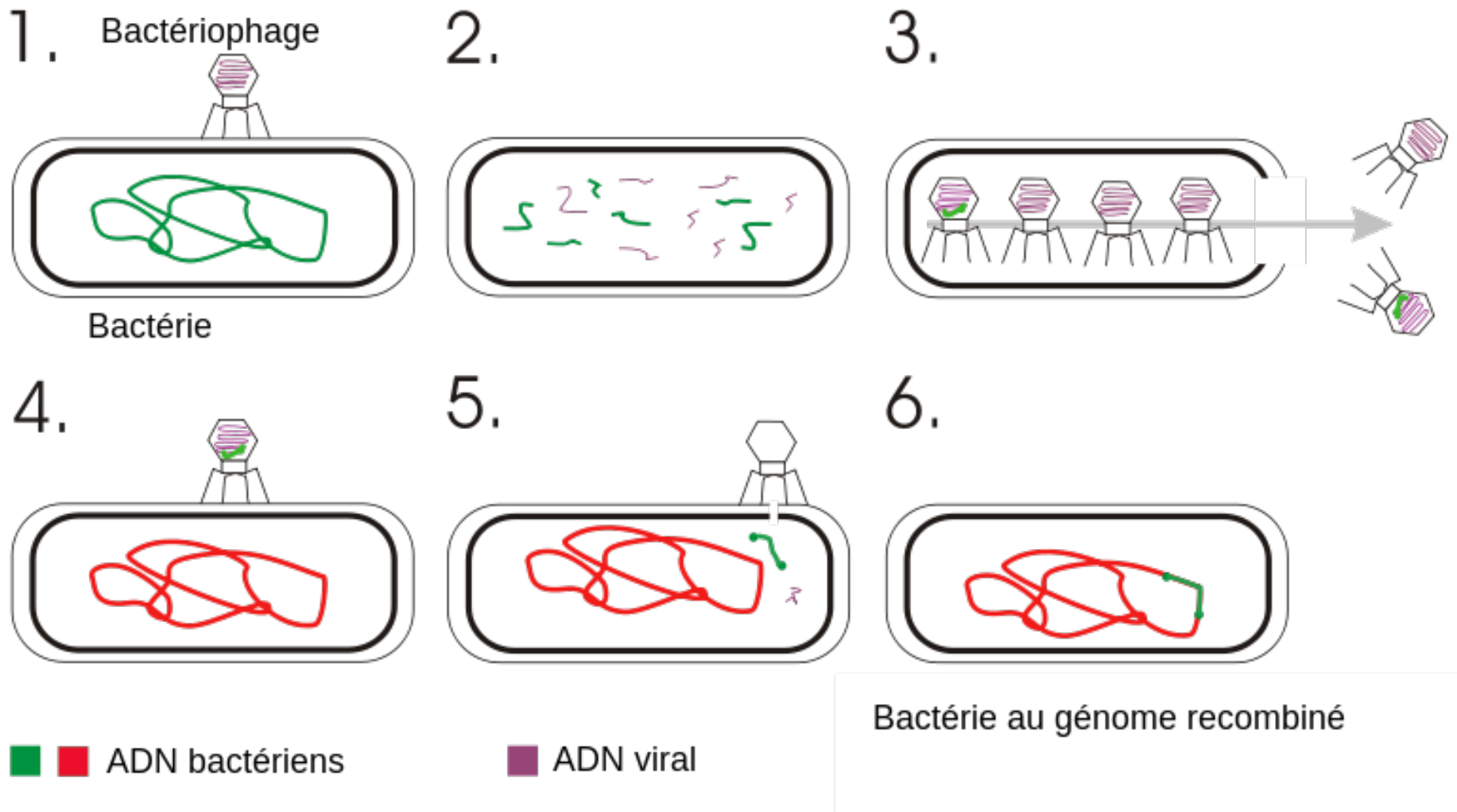
plasmide =
petite molécule
d'ADN



wikimedia commons

Transfert de matériel génétique par association bactérienne

Méthode non sexuée utilisée par les bactéries pour échanger des informations génétiques.



Transfert de matériel génétique par un virus ou un bactériophage

La recherche des produits

de la vie

**biosignatures
ou signatures de la vie**

SETI The Search for ExtraTerrestrial Intelligence

lancé en 1999

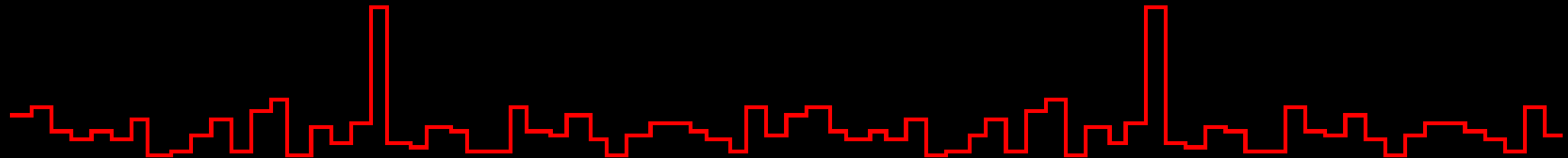
objectif : trouver

* un **signal étroit**

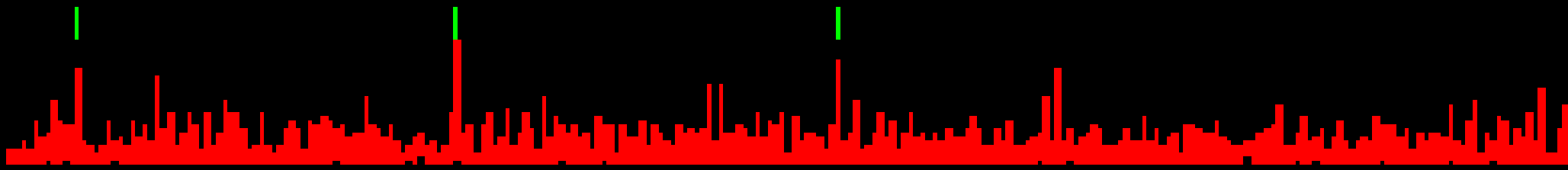
* une augmentation d'intensité d'un signal pendant une courte période

* un **signal à intervalles réguliers**: un pulse, un triplet

Best Pulse: power 1.78, period 0.0654, score 0.93



Best Triplet: power 10.11, period 26.0047



avec autorisation de Andrew Siemion

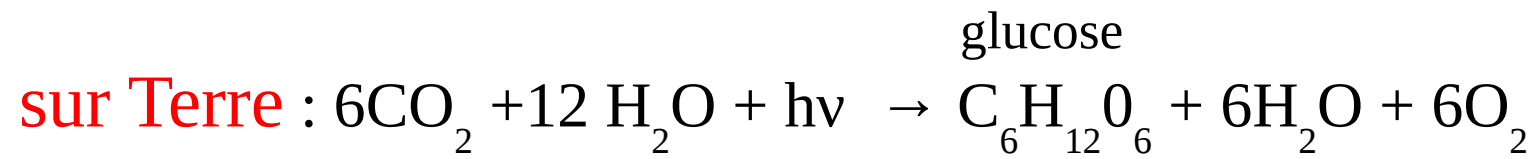
<http://seti.berkeley.edu/siemion>

Radiotélescope d'Arecibo à Porto Rico → Univ. Berkeley. Un logiciel installé sur chaque ordinateur va chercher les données, les analyse et les renvoie.

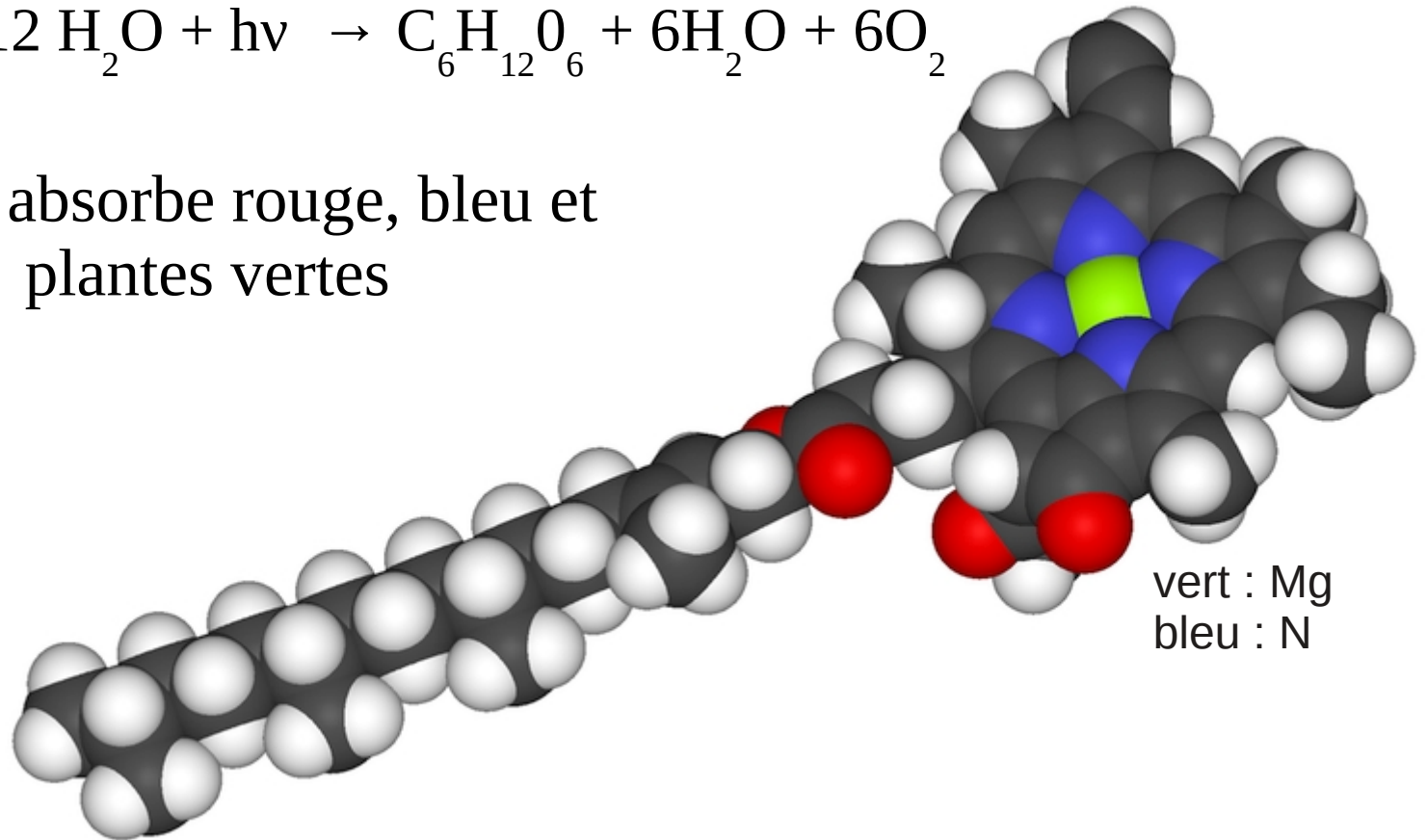
SETI@home/BOINC

Berkeley Open Infrastructure for Network Computing

Signature spectrale des plantes



La chlorophylle absorbe rouge, bleu et réfléchit vert → plantes vertes



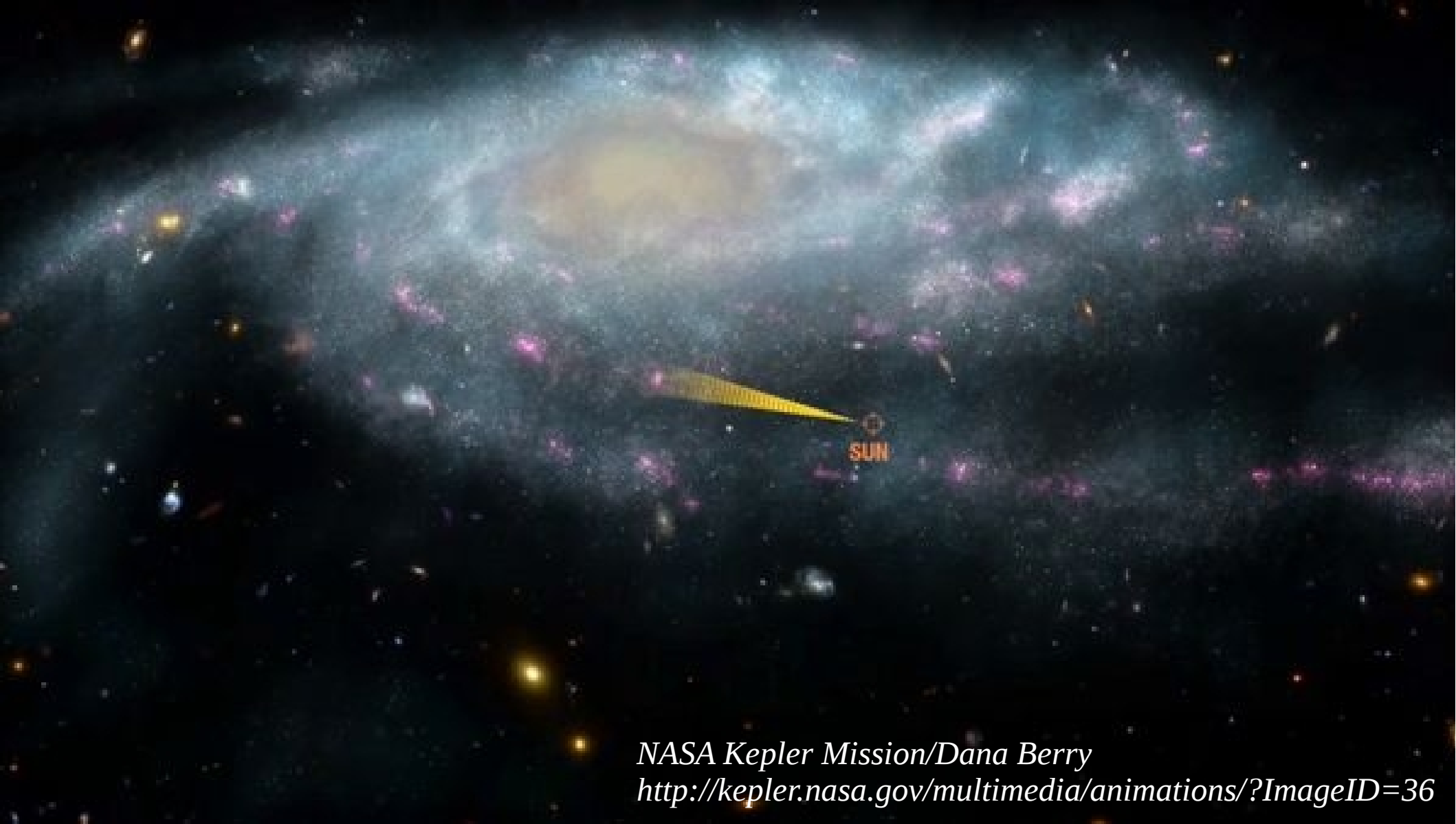
wikimedia commons

sur d'autres planètes : rayonnement de l'étoile : différent
atmosphère qui absorbe le rayt : différente
molécules des plantes : différentes
→ les plantes apparaissent d'une autre couleur

Nancy KIANG et al. (2007)

site de la NASA : image credit : Caltech illustration by Doug Cummings





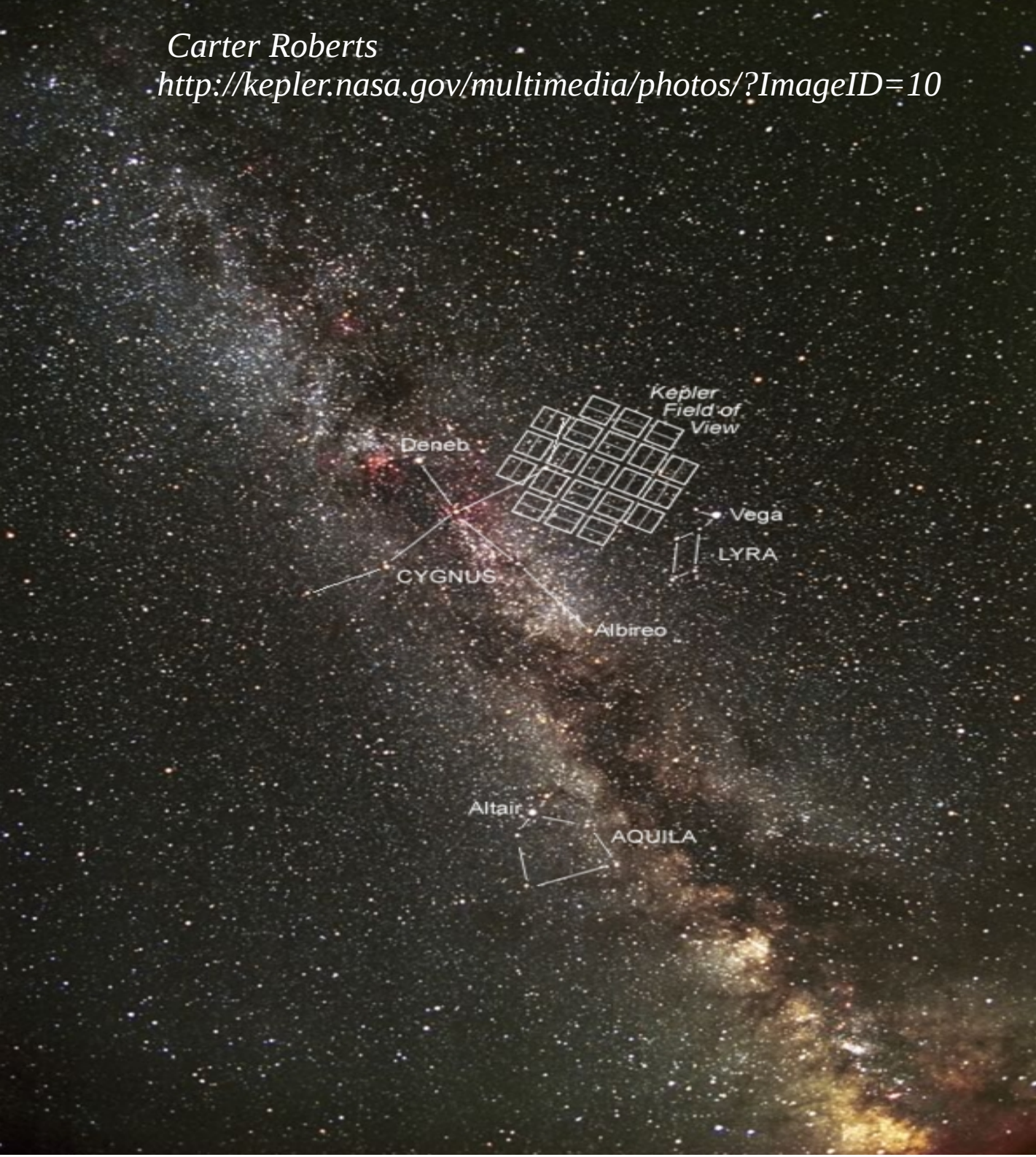
NASA Kepler Mission/Dana Berry
<http://kepler.nasa.gov/multimedia/animations/?ImageID=36>

- * Kepler observera $\sim 100\,000$ étoiles situées entre ~ 500 et 3000 années lumière de notre soleil, dans les constellations du Cygne et de la Lyre.
 - * 2×10^{11} (200 milliards) étoiles dans notre galaxie, La Voie Lactée
 - * Soleil : dans le bras d'Orion à $25\,000$ années lumière du centre de la Galaxie
- Extension de la galaxie : $\sim 100\,000$ al 1al = 10 000 milliards de km.

Carter Roberts

<http://kepler.nasa.gov/multimedia/photos/?ImageID=10>

Observations dans les constellations du Cygne et de la Lyre



Kepler-22 System

NASA/Ames/JPL-Caltech vue d'artiste

à 620 al

Solar System

Etoile, $M \sim M_{\text{soleil}}$
 $R \sim R_{\text{soleil}}$

Habitable Zone
eau liq



Mercury

Venus

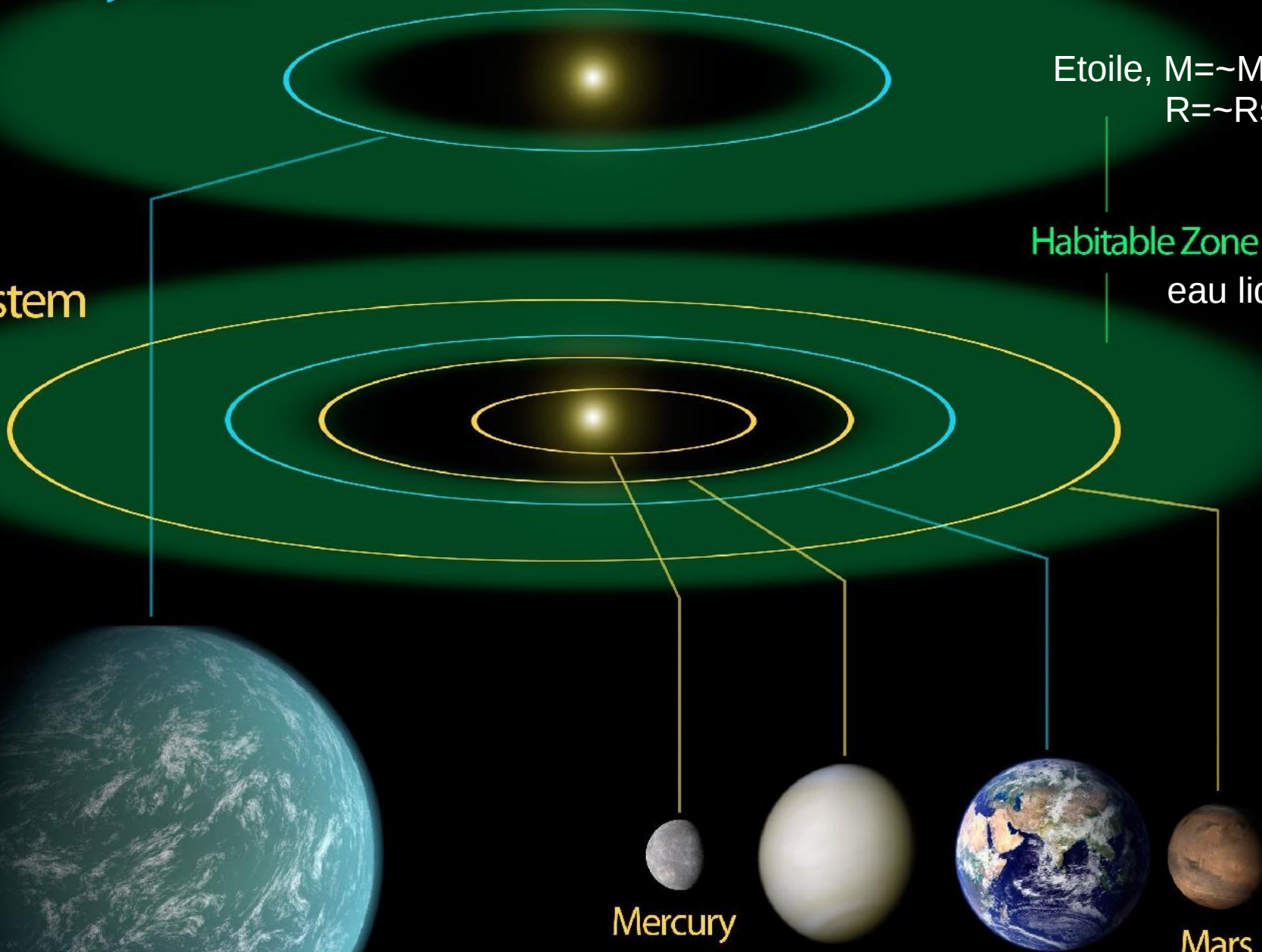
Earth

Mars

Kepler-22b $R = 2,4 R_T$

William BORUCKI et al. (2012)

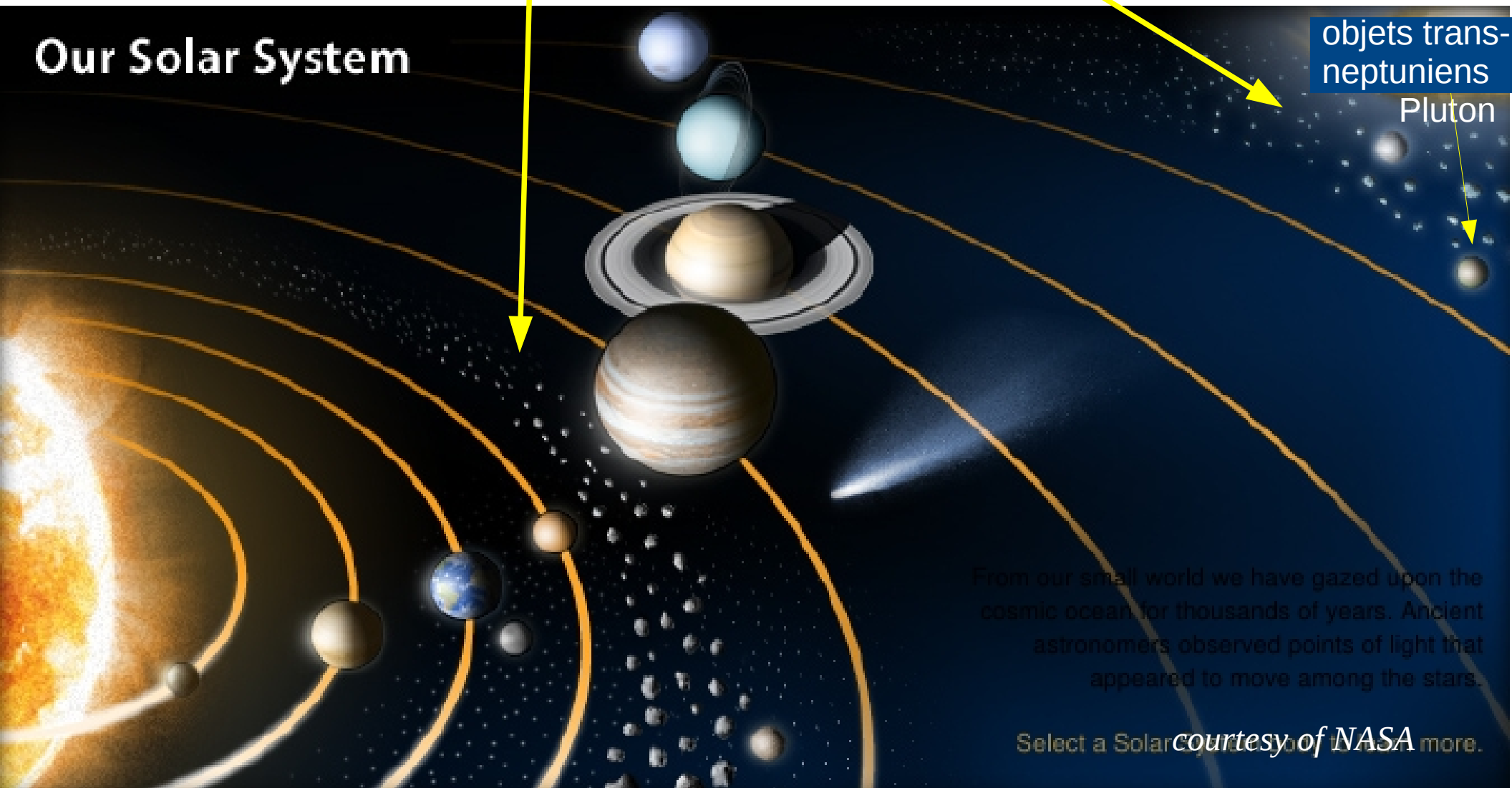
Planets and orbits to scale



ceinture d'astéroïdes 2-4 ua
source de météorites carbonées

Recherche de Vie

nuage de Oort (OC) 5k à 100kua
ceinture de Kuiper (KB) 30-50 ua
sources de comètes et micrométéorites



Our Solar System

objets trans-neptuniens

Pluton

From our small world we have gazed upon the cosmic ocean for thousands of years. Ancient astronomers observed points of light that appeared to move among the stars.

Select a Solar System to explore more. *courtesy of NASA*

<http://solarsystem.nasa.gov/planets/index.cfm>

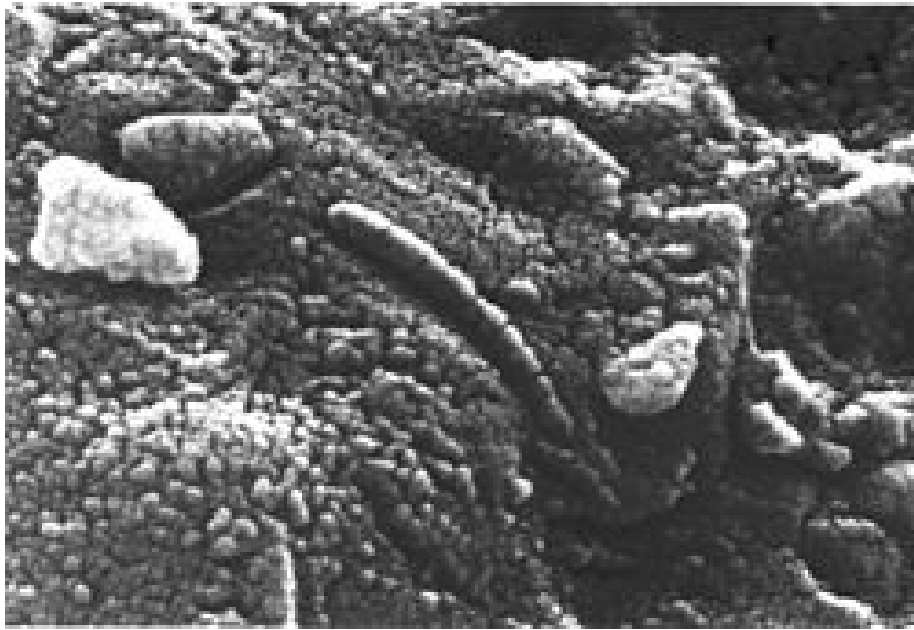
1ua= D Soleil-Terre=150Mkm

<http://www.cnes.fr/web/CNES-fr/7626-le-systeme-solaire-en-version-interactive.php>

<http://www.cea.fr/jeunes/mediatheque/animations-flash/l-univers/la-naissance-du-systeme-solaire>

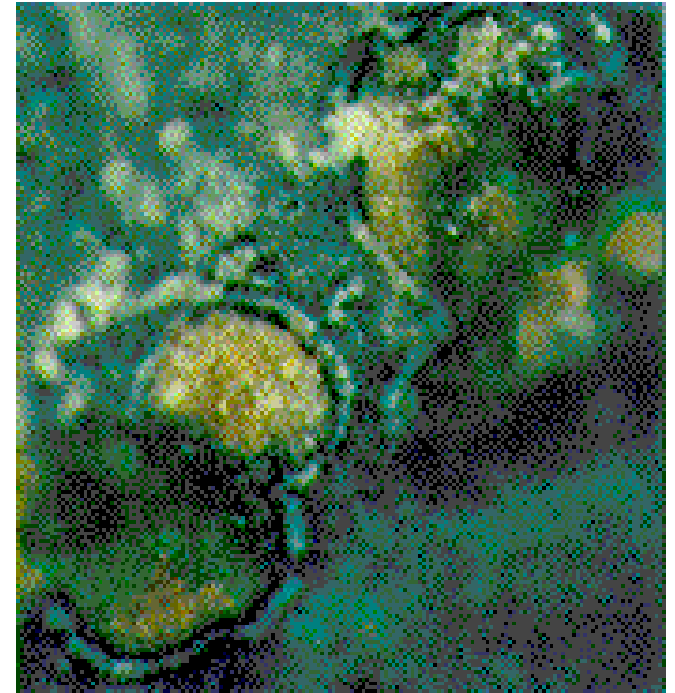
Météorite ALH 84001, Allan Hills, Antartique 1984

wikimedia commons



20-100nm
MEB

1-250µm



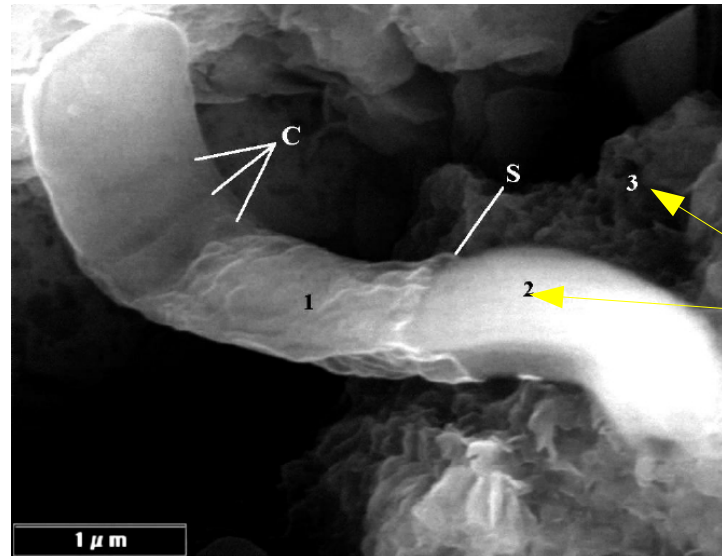
courtesy Johnson Space Center

- * essentiellement pyroxene $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$; olivine $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$; FeS_2 ...
- * globules de carbonates et de magnétite (qui peuvent se former en présence d'eau) avec PAH associés. formés à $\sim 700^\circ\text{C}$
 $\delta^{13}\text{C} = +42\text{ ‰}$ (organ. vivants sur Terre : -40 -6 ‰)
- * $\delta^{13}\text{C}$ (ds météorites **martiennes**) ≈ -17 à $+42\text{ ‰}$
- * **structures allongées** associées aux globules :
produit d'une activité microbienne ?

David McKAY et al. (1996)

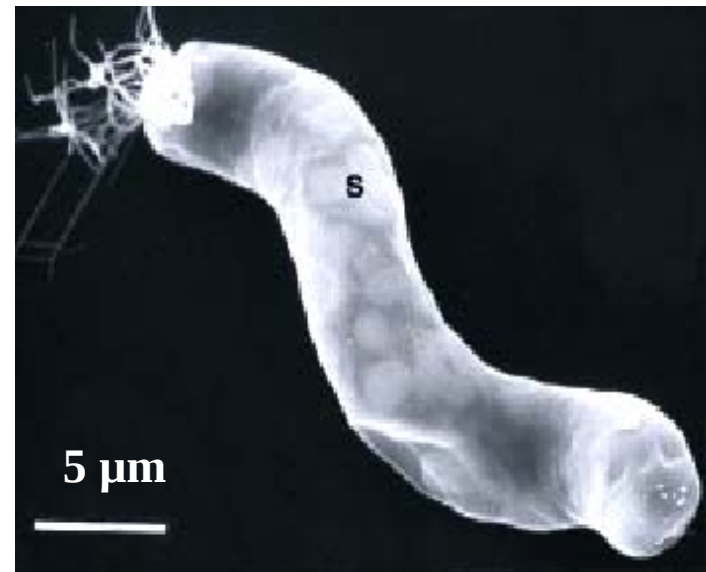
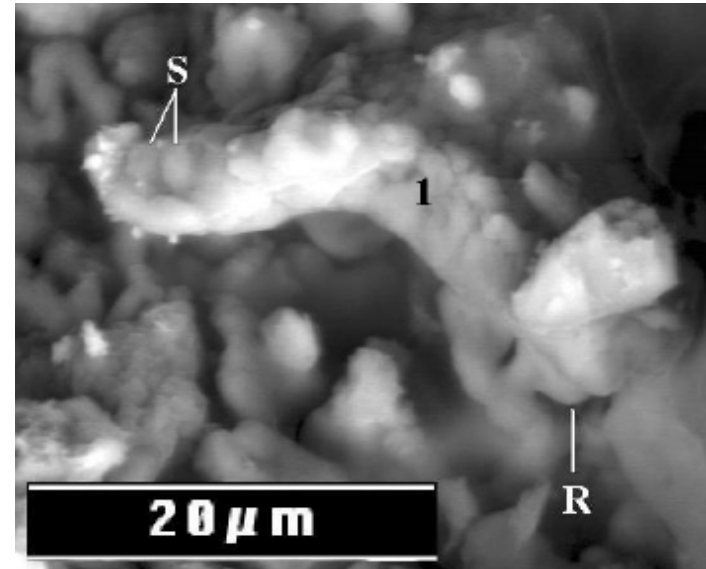
Très controversé

Fossiles de cyanobactéries dans les météorites ?

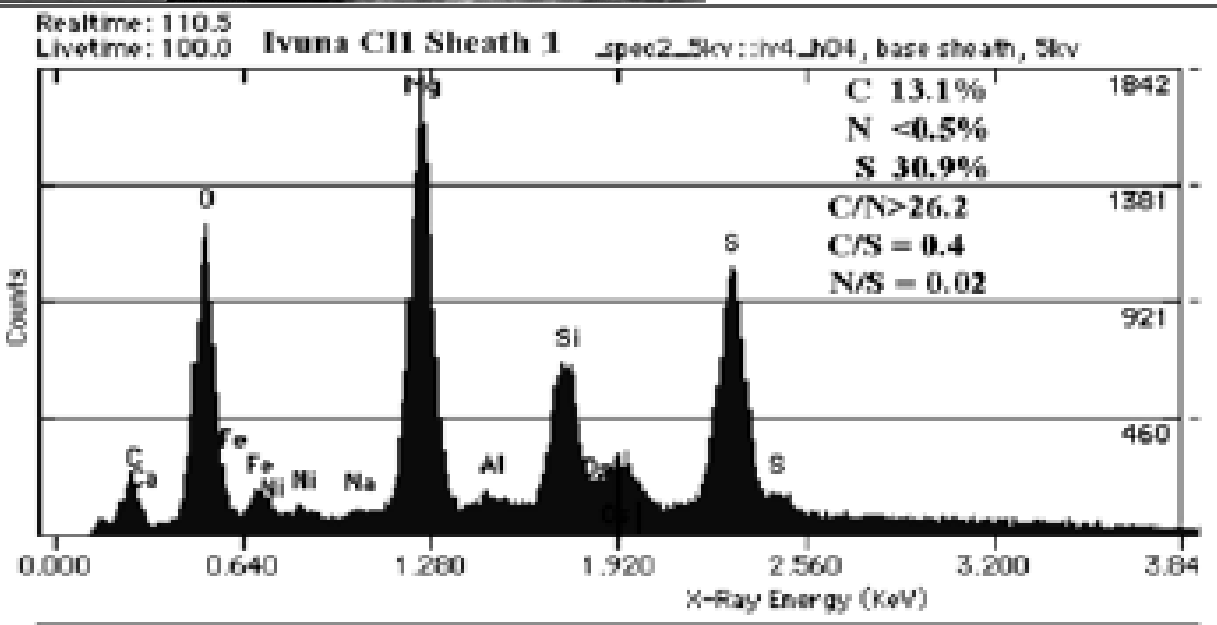


La météorite Ivuna CI1
Tanzanie 1938, MEB

position 3 : C: 7,2 %
position 2 : C : 13,1 %



haut : Ivuna filament
bas : bactérie actuelle



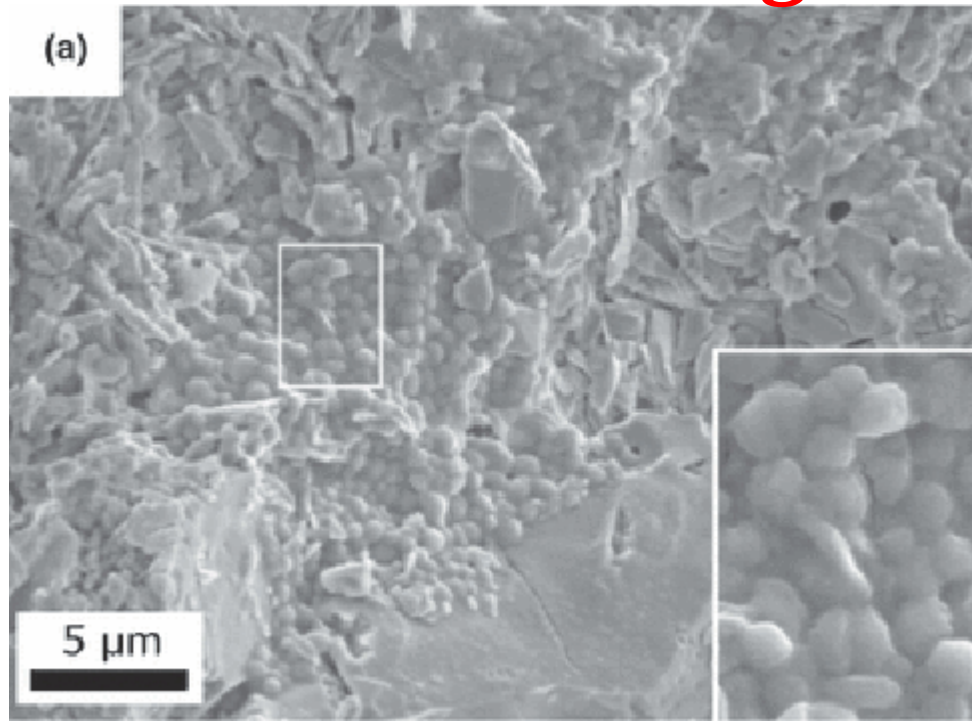
analyse par EDS, Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

Très controversé

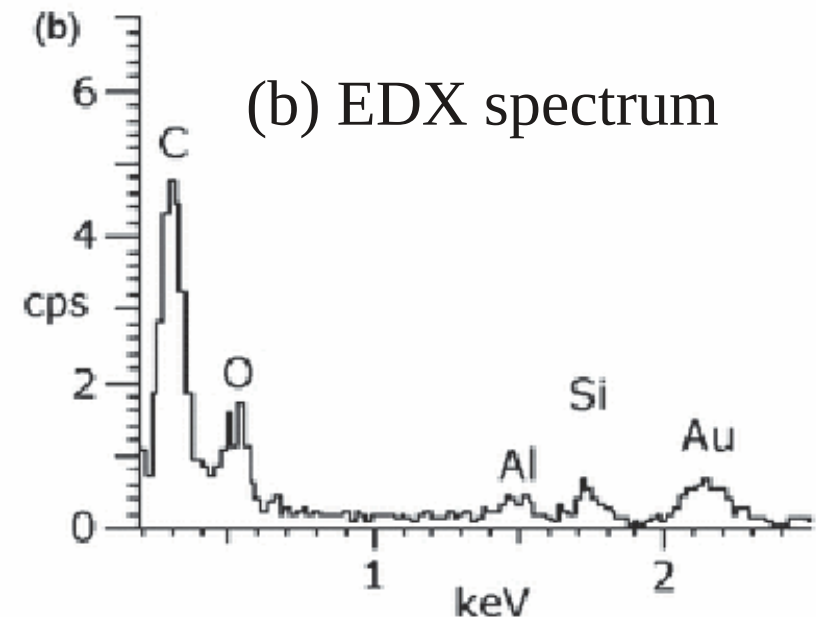
Richard HOOVER (2011)

Fossiles de microorganismes, Pilbara Craton ?

Australie



avec autorisation de Frances WESTALL



(b) EDX spectrum

a) Silicified colony of coccoidal microfossils from the 3.466 Ga-old Kitty's Gap Chert in the Pilbara Craton, Australia.

« In most cases we were not able to distinguish between the contamination and sample carbon »
Frances WESTALL et al. p.127 (2006)

Carbone d'origine biologique ancienne ou en provenance de contamination ou de synthèse abiotique ?

Composition isotopique du carbone

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{(\text{}^{13}\text{C}/\text{}^{12}\text{C})_{\text{éch}} - (\text{}^{13}\text{C}/\text{}^{12}\text{C})_{\text{réf}}}{(\text{}^{13}\text{C}/\text{}^{12}\text{C})_{\text{réf}}} \times 1000\text{‰}$$

Référence = Pee Dee Belemnite : PDB : $(\text{}^{13}\text{C}/\text{}^{12}\text{C})_{\text{réf}}$ élevé.

* Organismes vivants absorbent préférentiellement le ^{12}C
donc $\delta^{13}\text{C} < 0 \sim -40 \text{ à } -25 \text{ ‰}$ (même -6‰)

par rapport aux carbonates environnants

$\delta^{13}\text{C}$ (plantes) dépend de la quantité d'eau *Pablo PERI (2012)*

* Des expériences ont montré qu'une synthèse abiotique (250°C et 325 bar) produit des composés organiques (hydrocarbures) dont le contenu en ^{13}C est réduit de manière identique à celui des composés d'origine biologique.

Thomas McCOLLUM (2006)

Pour l'instant, la distinction carbone biologique/abiotique pas concluante

La recherche des molécules prébiotiques

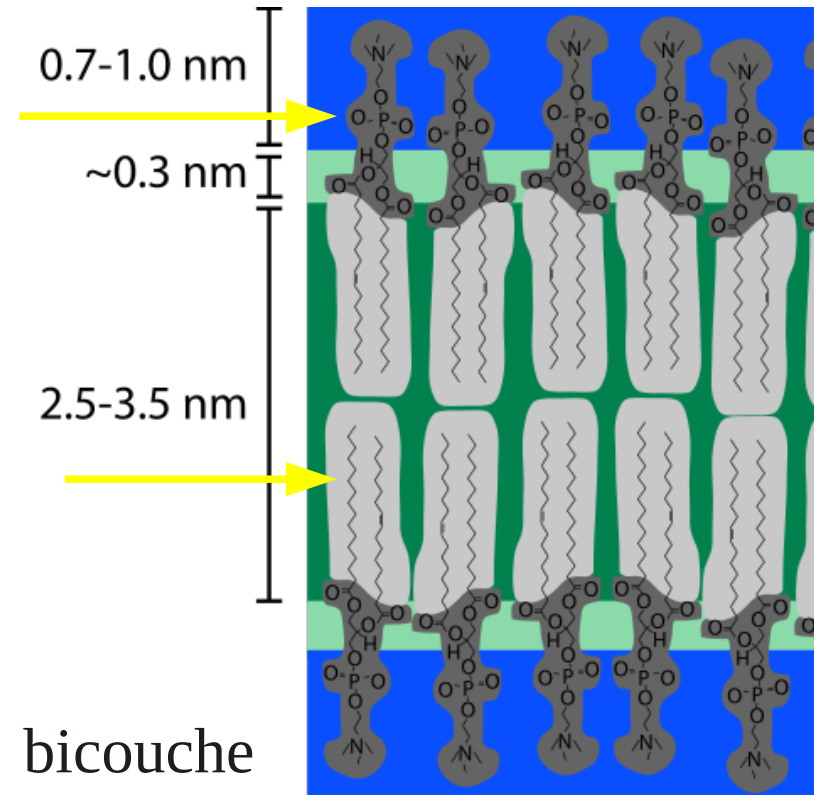
L'eau et les molécules des membranes

séparation du système chimique
du milieu extérieur

molécules amphiphiles :

* groupmt phosphate **polaire** hydrophile
liaisons hydrogène avec eau

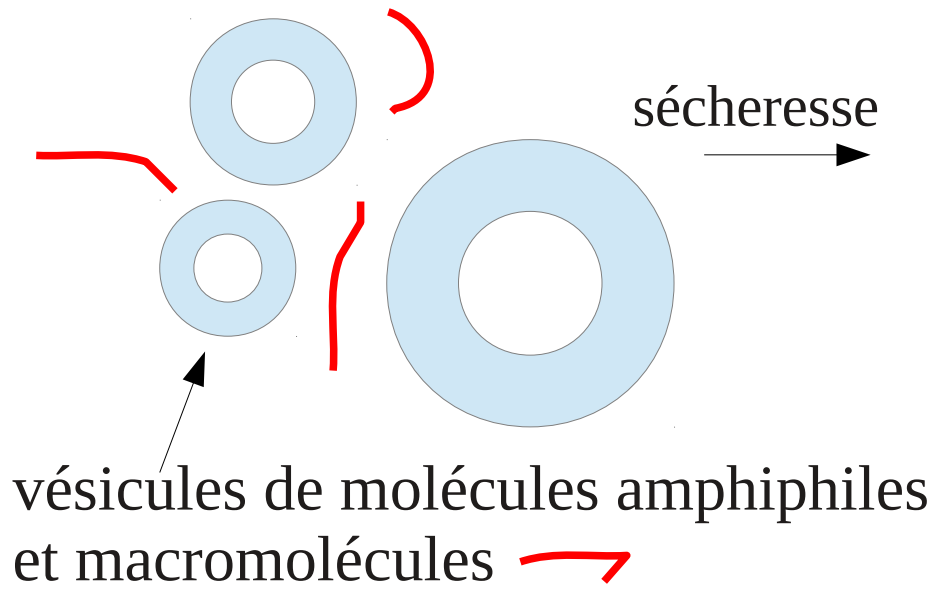
* groupmt **non polaire** hydrophobe :
chaîne aliphatique de 2 **acides gras**



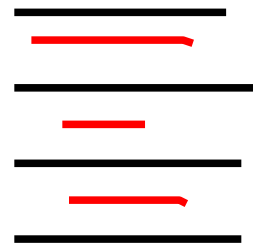
wikimedia commons

Acide gras : C_2-C_{10} : $CH_3(-CH_2)_x-COOH$ $x=2$ à 10

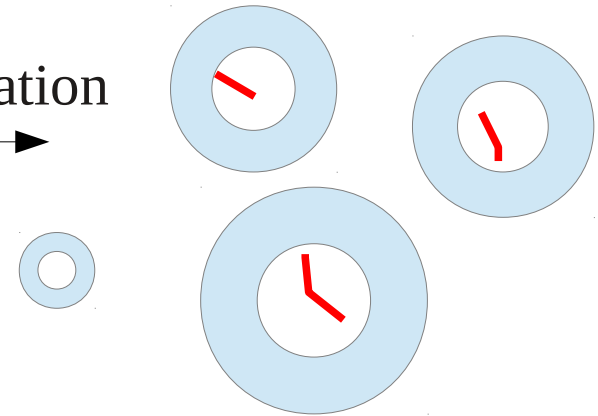
acide carboxylique à longue chaîne aliphatique : (R-COOH)



sécheresse

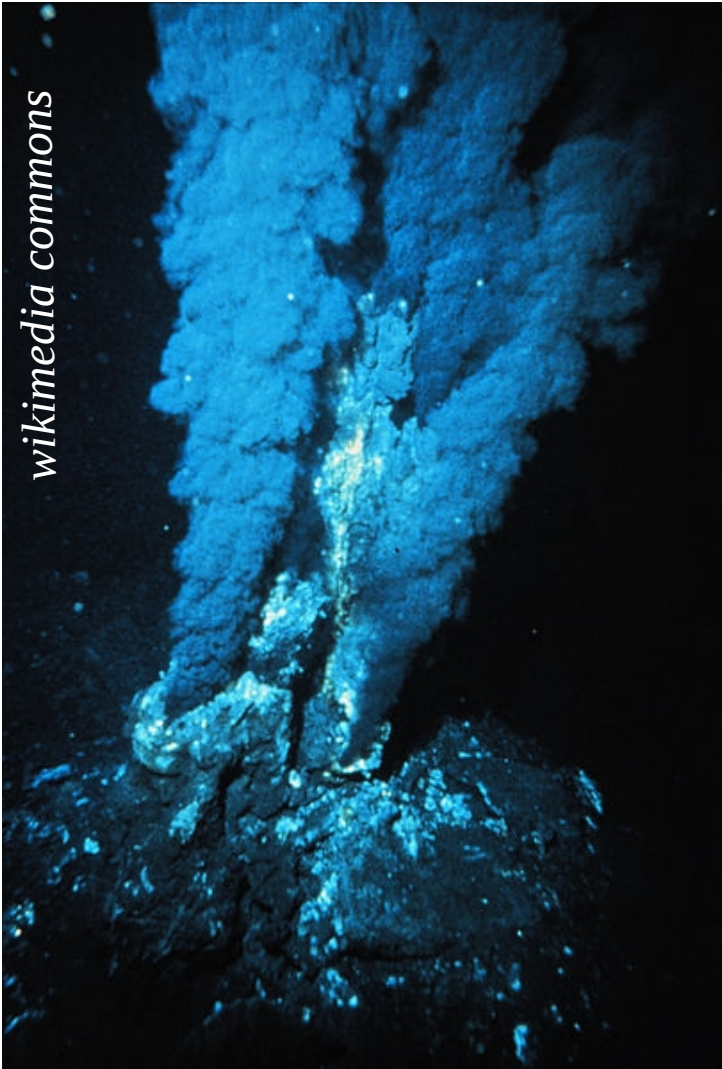


réhydratation



David DEAMER (1998)

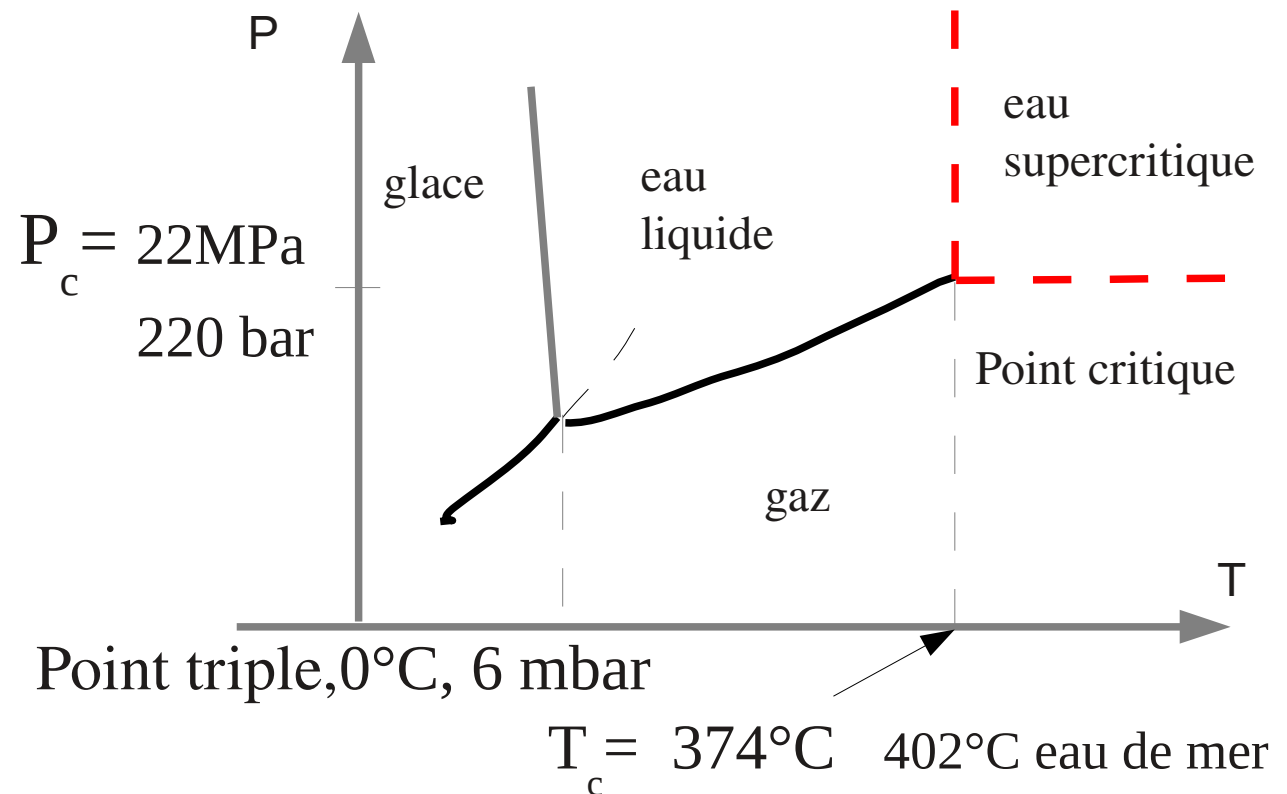
L'eau supercritique ou sous pression



Dorsale médio-atlantique :

Logatchev 2970 m

Ashadze 4080 m



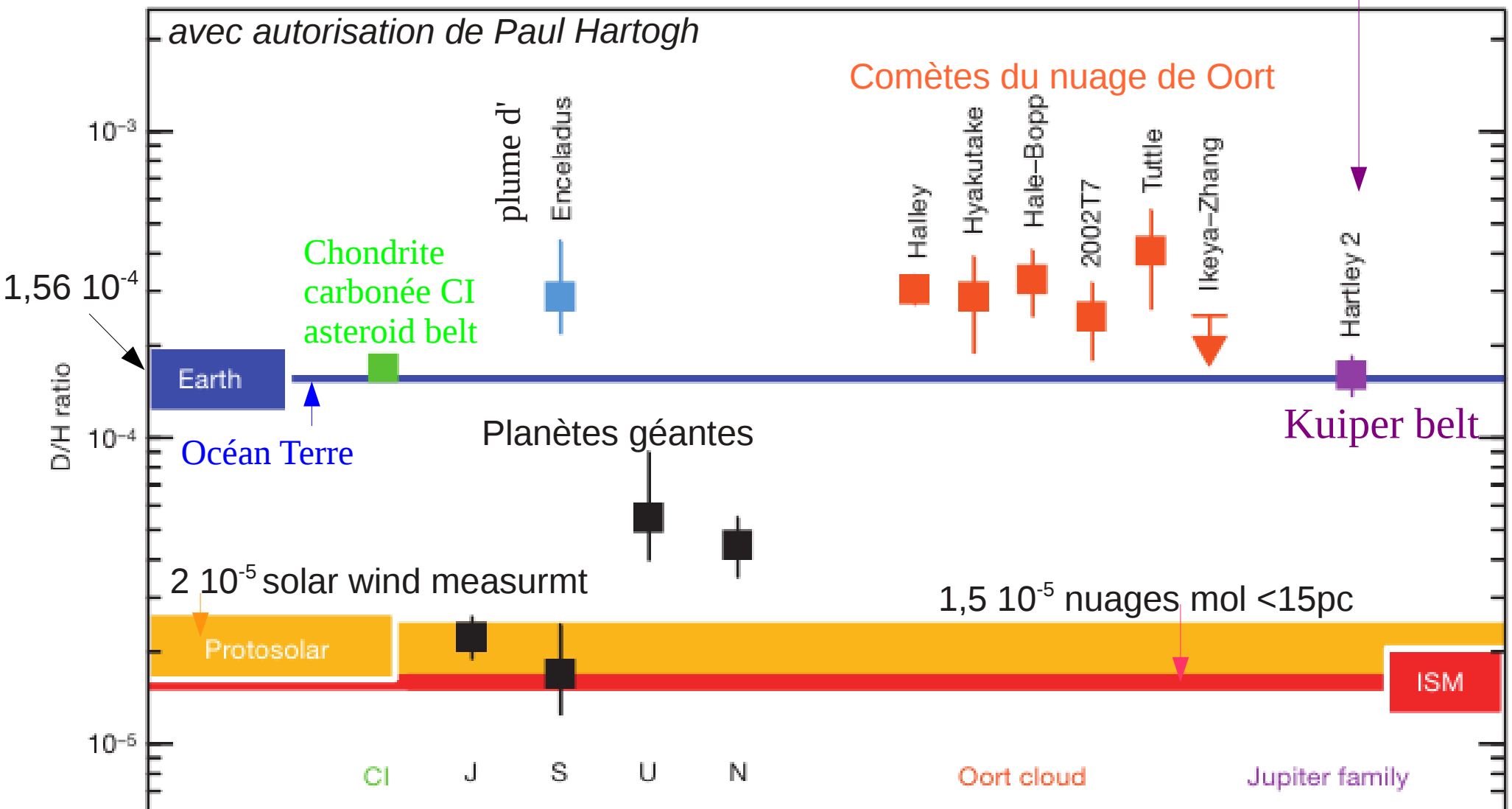
eau supercritique : apolaire, dimères de l'eau

- * concentration de molécules apolaires : H_2O , H_2 , N_2 , CO_2 , H_2S , CH_4 ...
- * processus d'auto-organisation avec formation de cellules séparant un système intérieur d'un milieu extérieur

Marie-Paule BASSEZ (2003 et 2006)

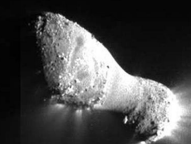
L'eau dans le système solaire: Rapport D/H

à partir des raies de transition rotationnelle de l'eau HDO (509 GHz) et H₂¹⁸O (548 GHz)



Paul HARTOGH Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley2, (2011).

1,5 km



Thérèse ENCRENAZ (2008)

EPOXI mission Nov.2010
courtesy of NASA/JPL-Caltech/UMD

Structure moléculaire dans les conditions extrêmes

* **bactérie hyperthermophile**, *thermus thermophilus*,

température de croissance optimale : 65°C

L'adaptation à la température se fait par des **substitutions d'acides aminés** dans la protéine. Ce qui change les interactions, la conformation de la molécule et donc l'entropie moléculaire.

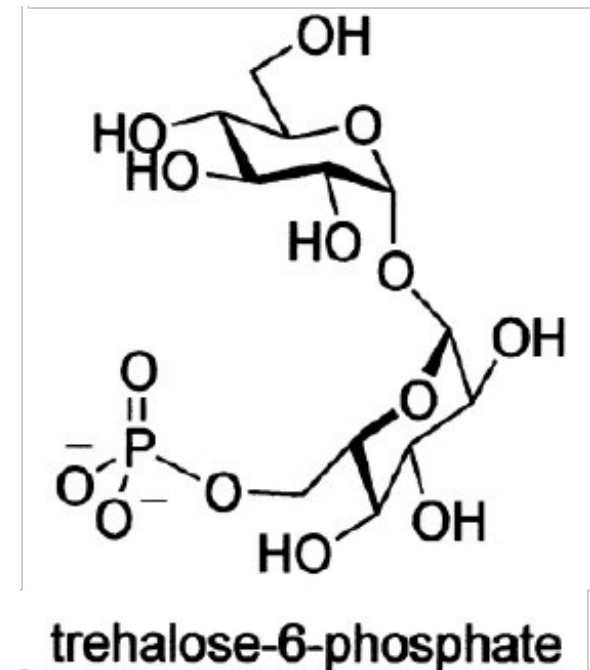
Nicola COQUELLE et al. (2007)

* Protection contre la **déshydratation**

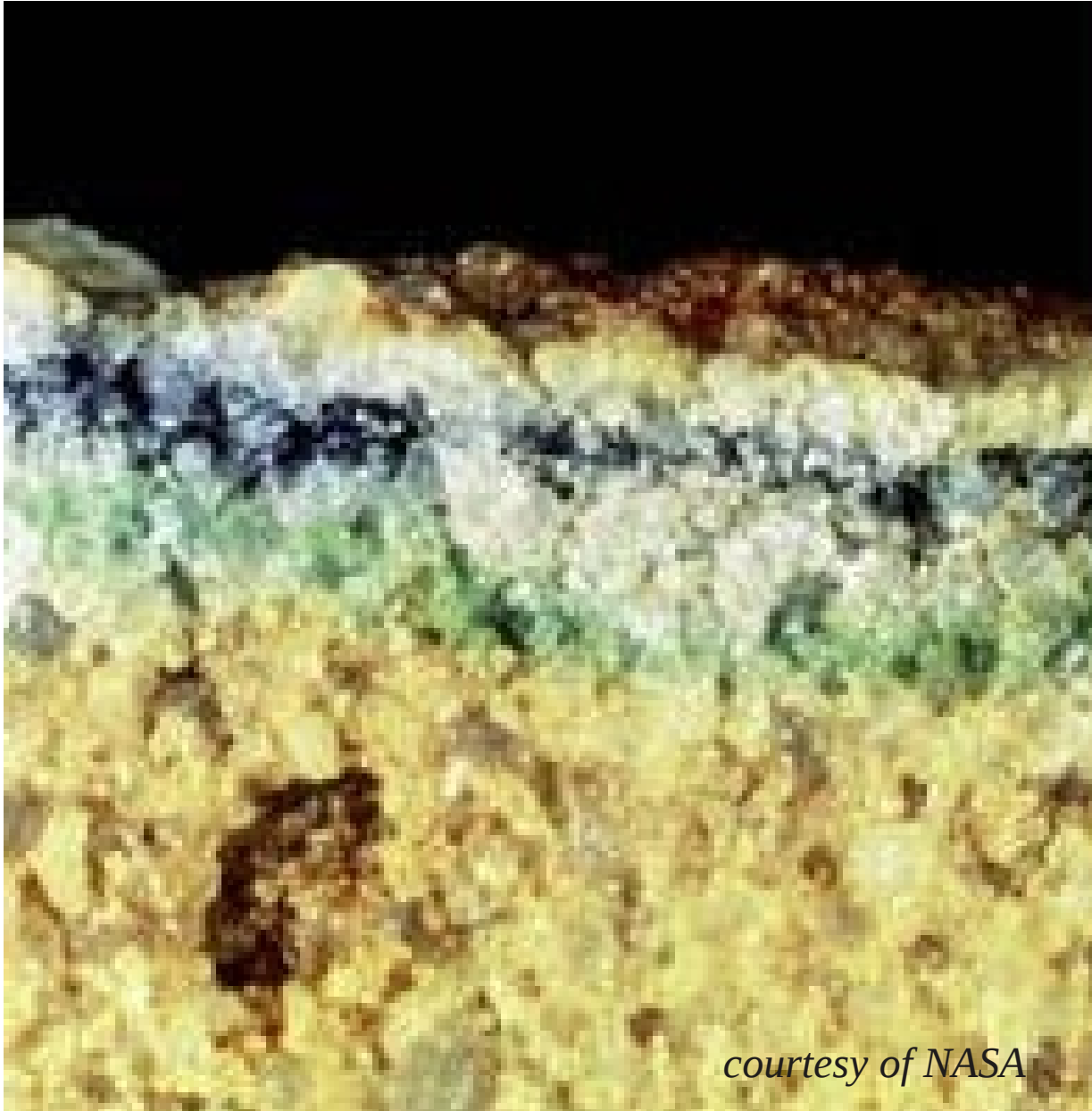
Le **sucré** tréhalose se fixe sur les groupmts polaires de la bicouche lipidique par liaison hydrogène, permettant à la membrane de garder sa forme.

De l'eau est capturée à l'intérieur du tréhalose.

M. SAKURAI (2012)



Les endolithes : des microorganismes qui vivent à l'intérieur des roches en Antartique



Dans le désert Atacama, Chili, des endolithes ont colonisé les roches pour se protéger de la sécheresse.

La spectroscopie Raman indique les molécules : caroténoïdes, chlorophylle scytonémine...

Petr VITEK et al. (2010)

courtesy of NASA

Chimie du carbone

Synthèse de molécules prébiotiques

$\text{CO}/\text{CO}_2/\text{CH}_4/\text{CH}_3\text{OH} + \text{N}_2/\text{NH}_3$ au dessus d' $\text{H}_2\text{O}_{\text{liq}}$
ou le tout en phase solide (glace)

protons, noyaux He, e^- , rayt-X, γ et UV \rightarrow produits en solution

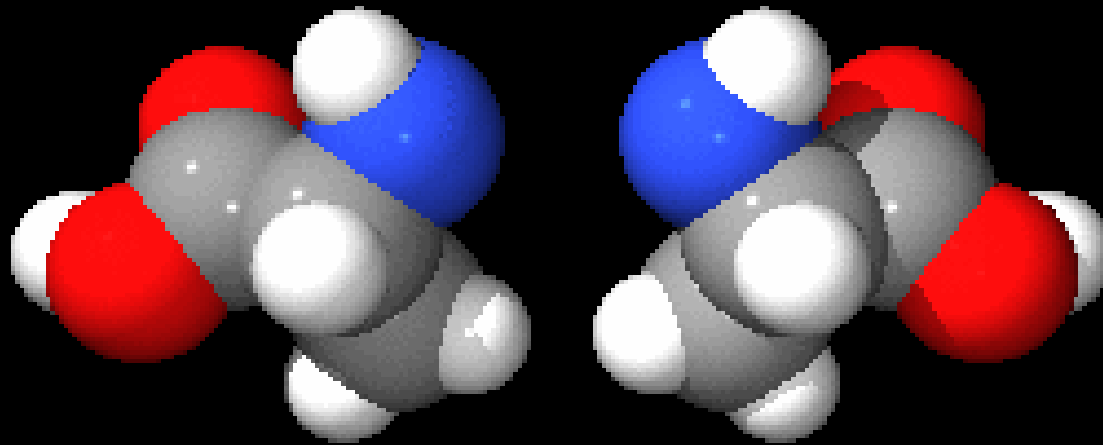
Solution asséchée, puis hydrolyse acide du produit \rightarrow acides aminés

Meilleur rendement obtenu avec CO et protons (particules cosmiques)

Kensei KOBAYASHI (1990..1995...2008...2012)

Chiralité

Les énantiomères L- et D- de l'acide α -aminé alanine
 $\text{NH}_2\text{CH}(\text{CH}_3)\text{COOH}$



wikimedia commons

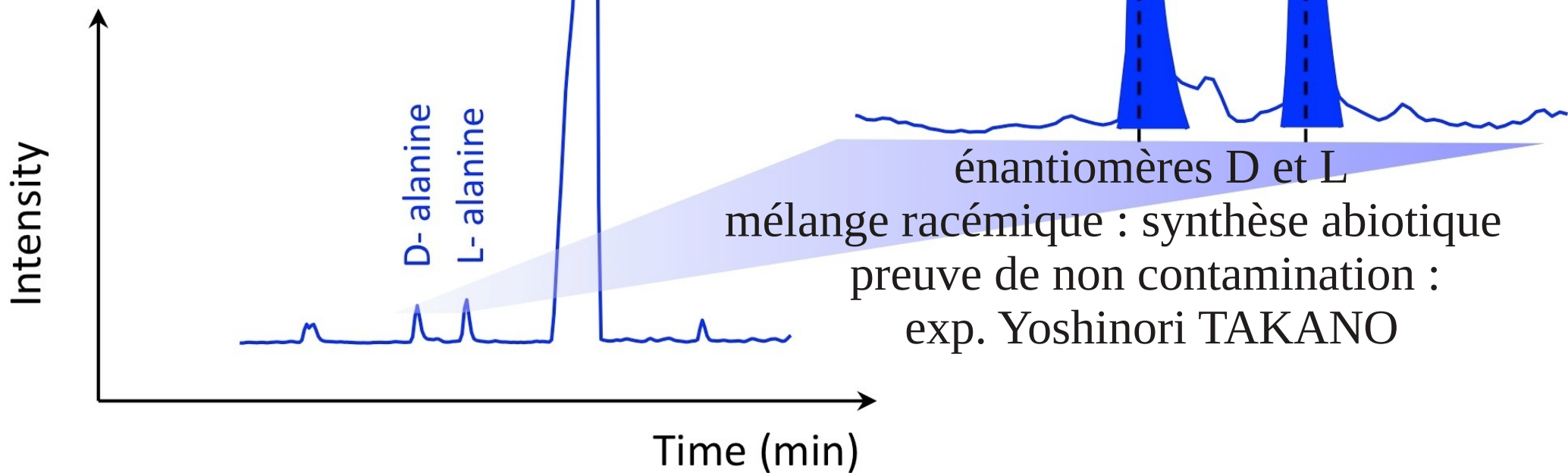
Sophie BENNHAR L'homochiralité, à l'origine de la vie sur Terre (2009)
<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/originevie.html>

Synthèse prébiotique d'acides aminés



irradiation
par proton

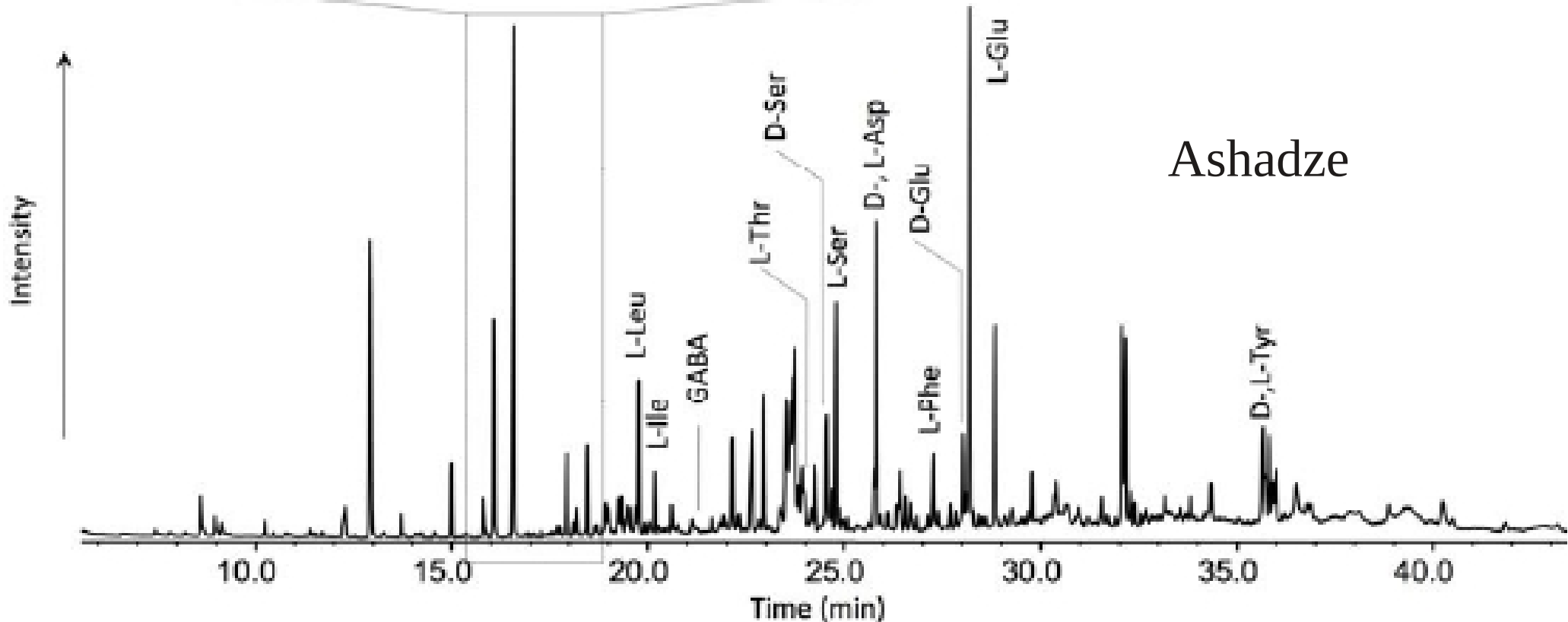
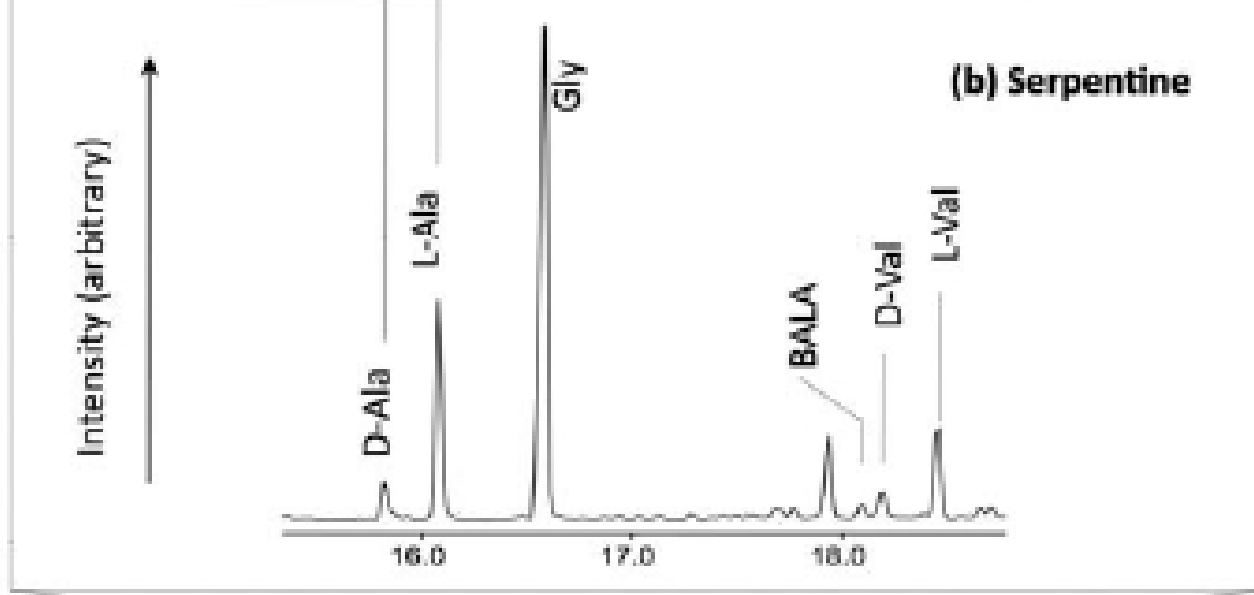
Chromatogramme
d'esters de l'alanine



Marie-Paule BASSEZ, Yoshinori TAKANO, Kensei KOBAYASHI (2012)

Prebiotic organic globules, Origin of Life and Evolution Biospheres, 42, 307.

*Organic analysis of
peridotite rocks
from the Ashadze
and Logatchev
hydrothermal sites*

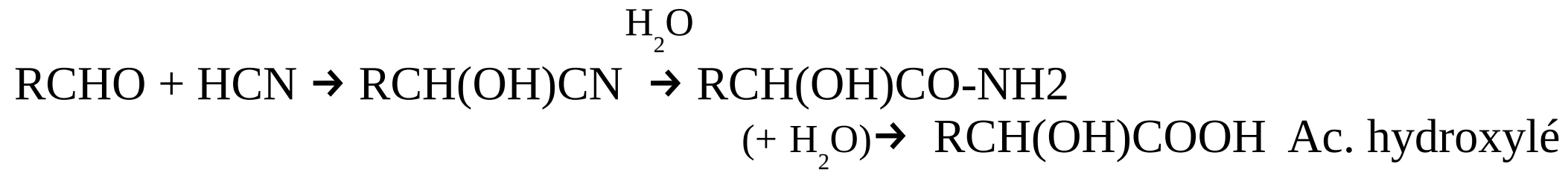
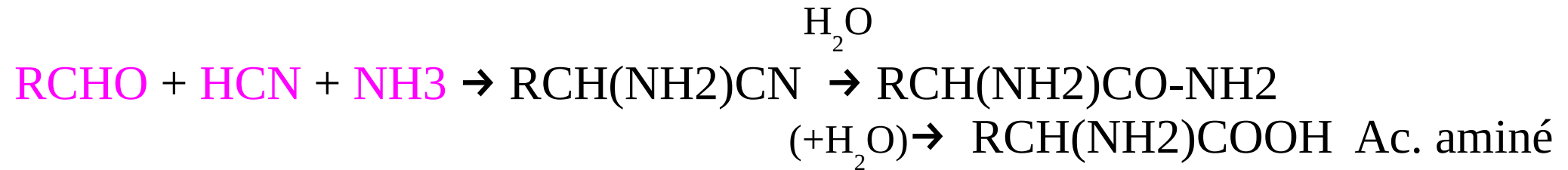


*Marie-Paule BASSEZ, Yoshinori TAKANO, Naohiko OHKOUCHI (2009)
International Journal Molecular Science 10, 2986.*

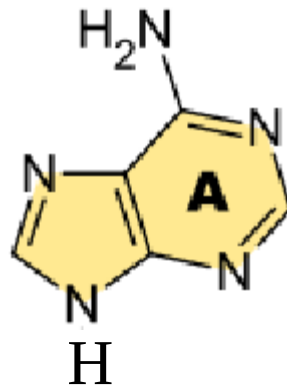
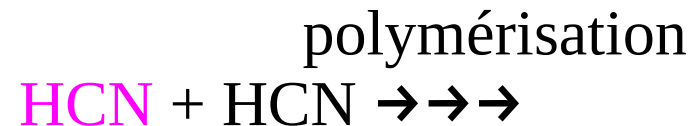
Synthèse de molécules prébiotiques

Stanley MILLER (1998)

Acides aminés et hydroxylés

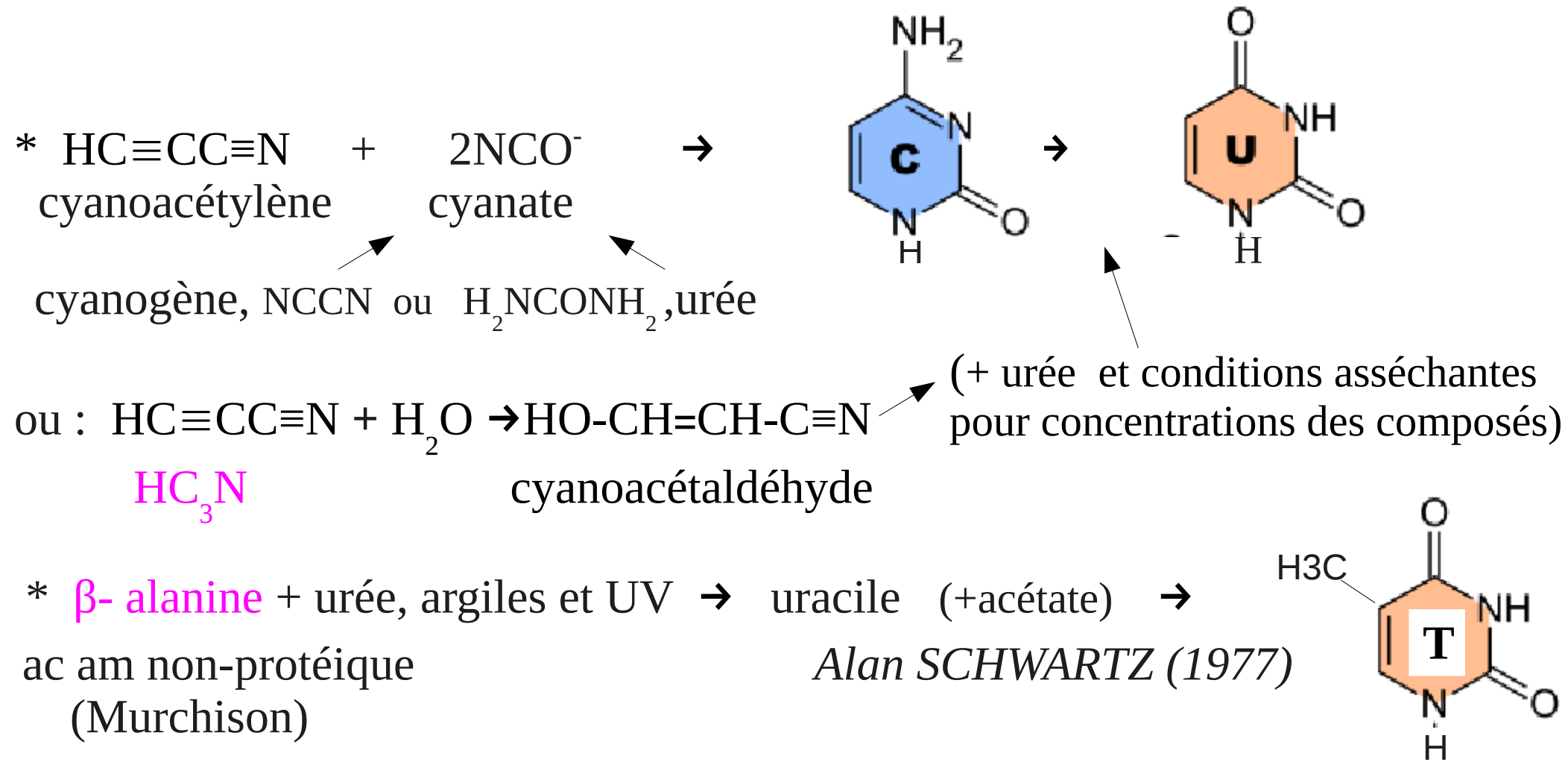


Bases de l'ADN et ARN : adénine et guanine (purines)



ORO (1960), SANCHEZ, FERRIS et ORGEL (1968)

Bases de l'ADN : Cytosine, thymine et uracile (ARN) (pyrimidines)

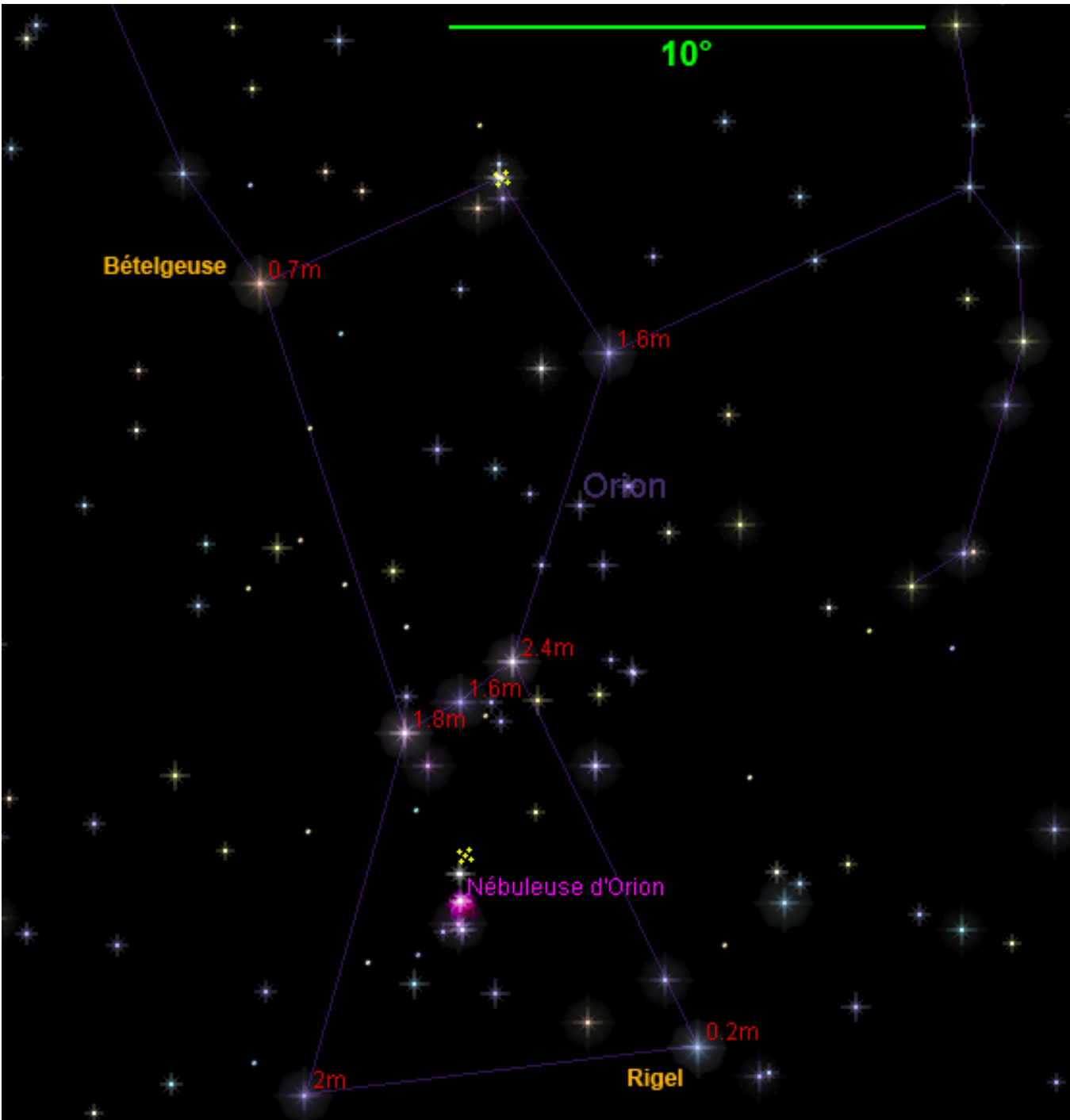


Sucres Réaction de formose

polymérisation



Les molécules dans les nuages moléculaires



à 1400 années lumière
ou 418 parsec

1 pc = 3,26 al

Nébuleuse de la flamme NGC 2024

Les photons de l'étoile Alnitak font éjecter les électrons de l'H. Lors de la recombinaison $e^- - H^+$, la lumière est émise.

Sous Alnitak, **Nébuleuse de la tête de cheval** obscure.

Nuage moléculaire Orion A et B

Alpes du Sud, France, 2800m
lunette astronomique

Nébuleuses par réflexion NGC 1977

lumière bleue des jeunes étoiles chaudes, réfléchiée par la poussière interstellaire.

(petit) **M43**
M42



image : Emmanuel MALLART (2001)

Télescope spatial Hubble et Europ. Southern Observ. ESO La Silla Chili
Nébuleuse d'Orion M42 et M43 (2006)
l = 13 al 3000 étoiles



courtesy NASA, ESA, M. Robberto (STScI/ESA) et al.

Les molécules des nuages moléculaires (ISM) et des enveloppes circumstellaires

gaz et poussières

détectées en novembre 2012

tableau construit à partir de :

www.astro.uni-koeln.de/print/cdms/molecules Physikalisches Inst. Köln (2012)

Molécules ne contenant pas C 46 molécules

H_2	HD	H_3^+	H_2D^+	HD_2^+	H_2O	H_2O^+
H_3O^+	OH	OH^+	O_2	HO_2	H_2O_2	NH
NH_2	NH_3	N_2H^+	NO	N_2O	HNO	NS
PH_3	PN	PO	SH^+	SH	H_2S	SO
SO^+	SO_2	HCl	HCl^+	H_2Cl^+	KCl	NaCl
HF	SiH	SiH_4^+	SiN	SiO	SiS	AlO
AlOH	AlF	AlCl	FeO ?			

Molécules organiques contenant C, H 35 molécules

CH	CH^+	CH_2	CH_3	CH_4	C_2	C_2H
C_2H_2	C_2H_4	C_3	c- C_3H	l- C_3H	C_3H^+	c- C_3H_2
l- C_3H_2	C_3H_6	CH_3C_2H	C_4H	C_4H^-	l- H_2C_4	l- HC_4H
C_5	C_5H	CH_3C_4H	C_6H	C_6H^-	C_6H_2	c- C_6H_6
l- HC_6H	C_7H	CH_3C_6H	C_8H	C_8H^-	C_{60}	C_{70}

c- = cyclique l- = linéaire

Les molécules du milieu interstellaire et des enveloppes circumstellaires

Molécules organiques contenant C, H, O 32 molécules

CO	CO ⁺	HCO	HCO ⁺	H ₂ CO
HOC ⁺	HOCO ⁺	H ₂ COH ⁺	CH ₃ O	CH ₃ OH
CO ₂	HCOOH	C ₂ O	H ₂ C ₂ O	CH ₃ CHO
c-C ₂ H ₄ O	H ₂ CCHOH	CH ₃ CH ₂ OH	HC ₂ CHO	(CH ₂ OH) ₂
CH ₂ OHCHO	CH ₃ COOH	(CH ₃) ₂ O	(CH ₃) ₂ CO	HC(O)OCH ₃
C ₃ O	c-H ₂ C ₃ O	CH ₂ CHCHO	CH ₃ CH ₂ CHO	C ₂ H ₅ OCH ₃
C ₂ H ₅ OCHO	CH ₃ C ₆ H			

Molécules organiques contenant C, H, O, N 49 molécules

CN	CN ⁻	HCN	HCNO	HNC
HNCO	H ₂ CN	HCNH ⁺	H ₂ CNH	HNCNH
HOCN	H ₂ NCN	CH ₃ NH ₂	CH ₃ CN	NH ₂ CH ₂ CN
NH ₂ CHO	HCCN	H ₂ CCN	H ₂ CCNH	CH ₃ NC
HC ₂ NC	HC(O)CN	CH ₃ C(O)NH ₂	C ₃ N	C ₃ N ⁻
HC ₃ N	HC ₃ NH ⁺	HNC ₃	CH ₂ CHCN	CH ₃ CH ₂ CN
I-HC ₄ N	CH ₂ CCHCN	CH ₃ C ₃ N	<i>n</i> -C ₃ H ₇ CN	C ₅ N
C ₅ N ⁻	HC ₅ N	CH ₃ C ₅ N	HC ₇ N	HC ₉ N
HC ₁₁ N	MgCN	MgNC	NaCN	SiCN
AINC	SiNC	KCN	FeCN	

Les molécules du milieu interstellaire et des enveloppes circumstellaires

Molécules organiques contenant C, H, O, N, S, P, F et Si 17 molécules

CS	HCS ⁺	H ₂ CS	HNCS	OCS		
CF ⁺	CP	HCP	CH ₃ SH	CCP		
C ₂ S	C ₃ S	HSCN	SiC	c-SiC ₂	c-SiC ₃	C ₄ Si

Environ 180 molécules. Les détections de la glycine NH₂CH₂COOH et du dihydroxyacetone (CH₂OH)₂CO : controversées → pas mentionnées.

Les molécules des disques protoplanétaires HC₃N cyanoacétylène

dans 3 disques, dans la formation stellaire du Taureau (300 al) Interféromètre du plateau de Bure, Alpes, et 30m Pico Veleta, ~Grenade, (IRAM, Institut de RadioAstronomie Millimétrique, 1979) *Edwige CHAPILLON et al. (2012)*

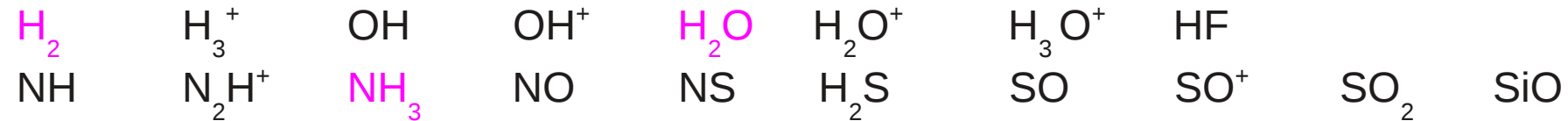
Les molécules des exoplanètes à 63 al HD 189733b IR 1,4-2,5μm
H₂O, CO, CH₄, CH₃OH *Mark SWAIN et al. (2008)*

Les molécules dans les autres galaxies

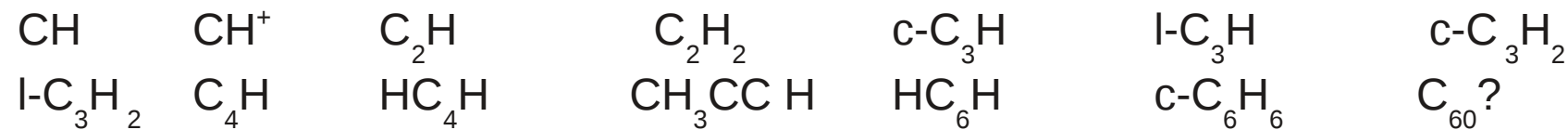
Spectroscopie moléculaire extragalactique ~70 mol. détectées en mai 2012

Alain OMONT (2007) Sergio MARTIN (2011) Köln (2012)

Molécules ne contenant pas C



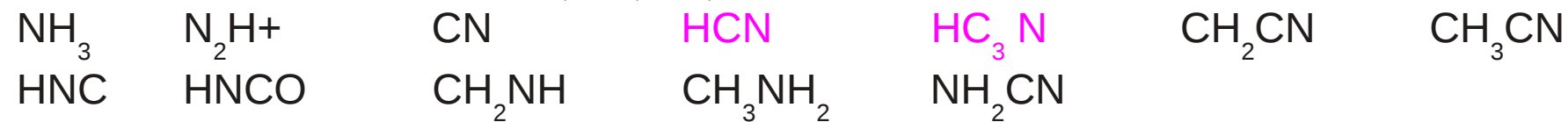
Molécules contenant C, H



Molécules contenant C, H, O

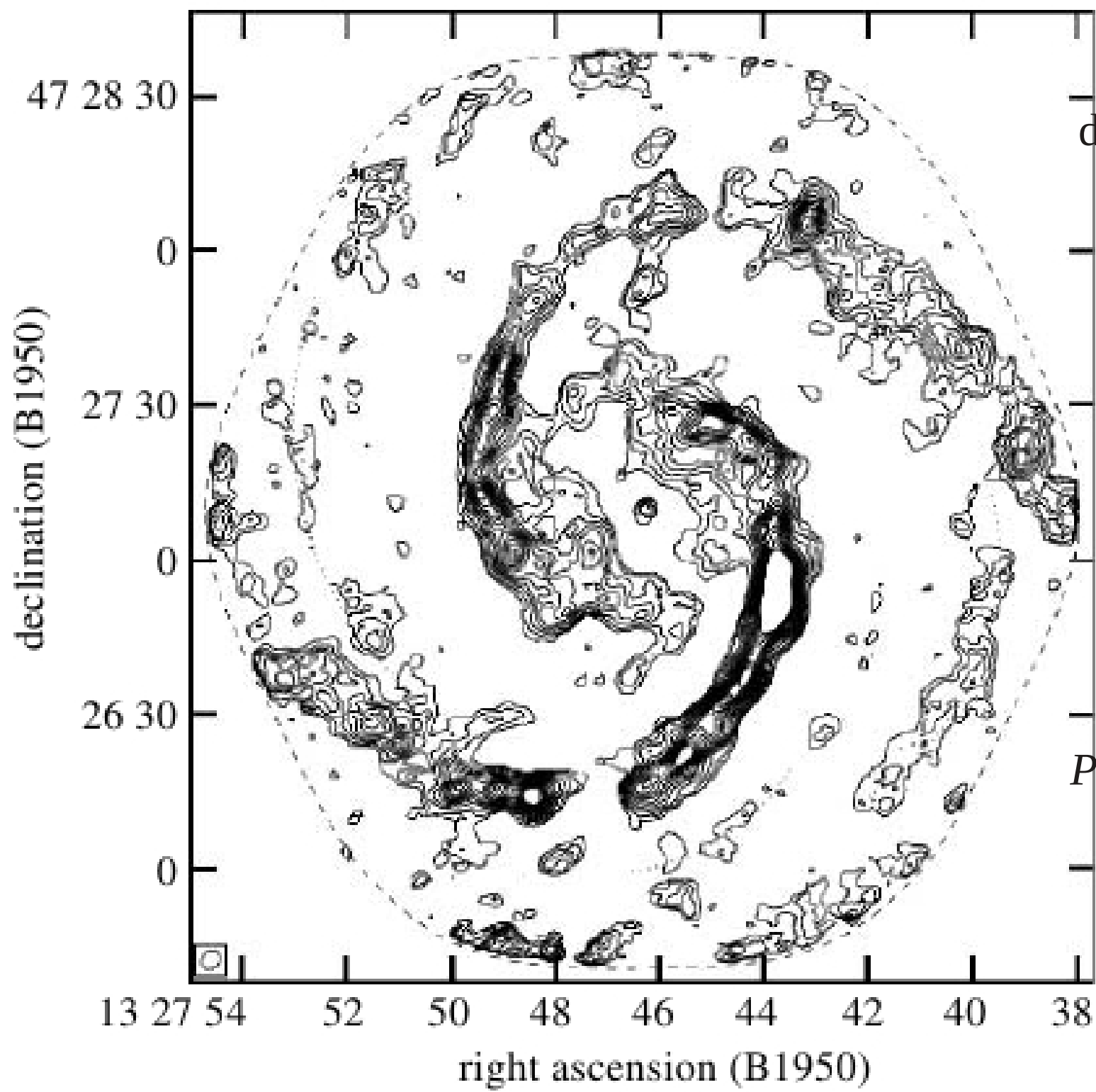


Molécules contenant C, H, O, N



Molécules contenant C, H, O, N, S, Si, Li





Emission du CO
de la galaxie spirale
M51
à 30 Mai
(1999)

Les nuages
moléculaires
dessinent les bras
Patrick THADDEUS
(2006)



NGC 5195

ensemble
galactique
M51
(2007)

NGC 5194

courtesy of :

X-ray:

*NASA/CXC/Wesleyan
Univ./R.Kilgard et al;*

UV: *NASA/JPL-Caltech;*

Optical: *NASA/ESA/S.
Beckwith & Hubble*

*Heritage Team
(STScI/AURA);*

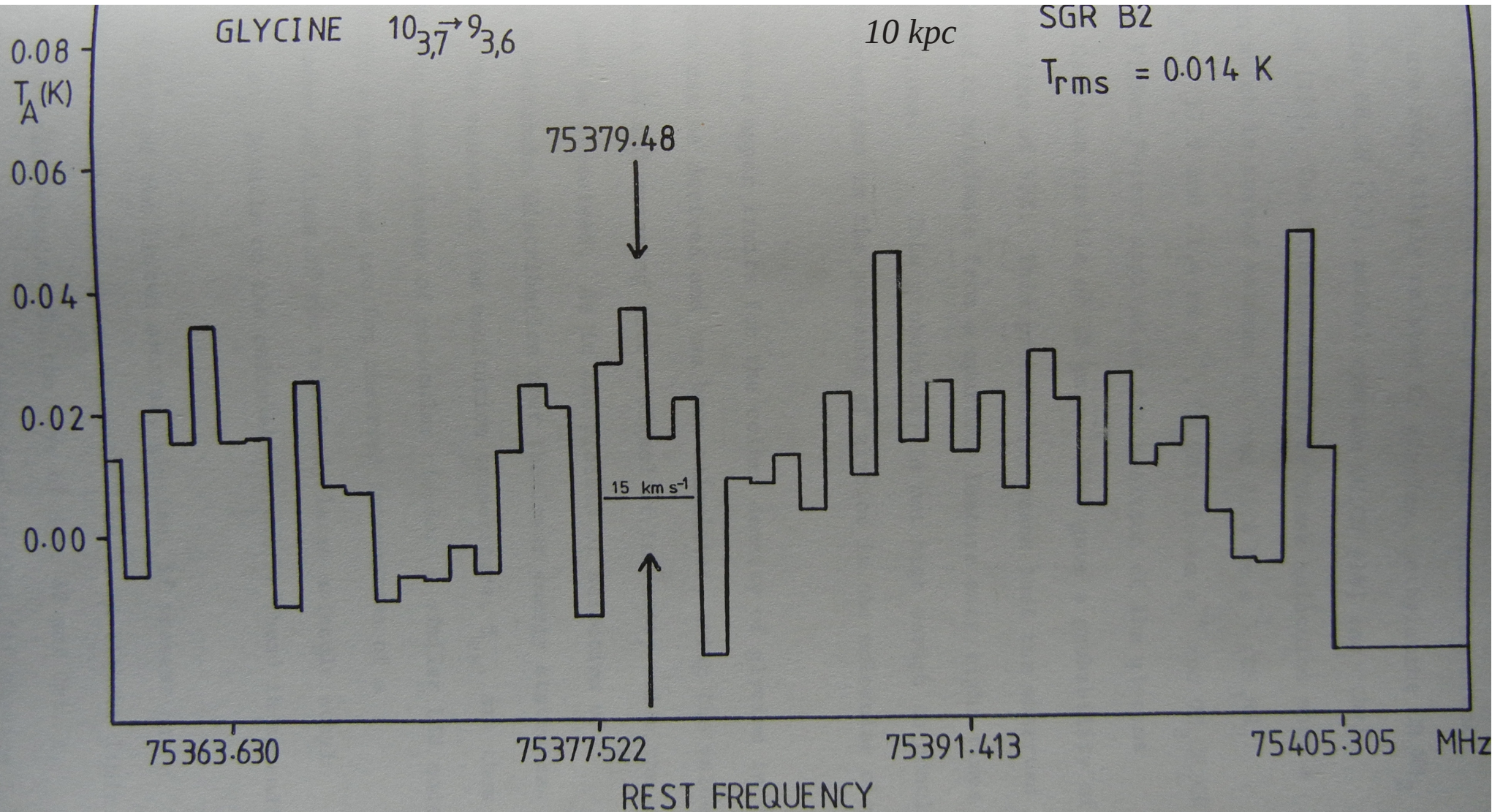
IR: *NASA/JPL-Caltech/
Univ. of AZ/R. Kennicutt*

La glycine dans les nuages moléculaires de notre Galaxie

- * Ron BROWN...M.P. BASSEZ *Microwave spectrum (1978)*
- * Ron BROWN...M.P. BASSEZ...*A search for interstellar glycine (1979)*
très nombreuses observations ont été effectuées
Yi-Jehng KUAN et al. (2003) détection très controversée
- * Les nuages moléculaires sont froids (20-50K). Pour former la molécule à l'état isolé il faudrait donc des réactions exothermiques.
La molécule glycine n'est pas facile à synthétiser.
Régions où localement une synthèse pourrait se produire?
Nombreux conformères
Nombreux niveaux rotationnels
- * $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{glycine}$
détectée dans Sgr B2 (100K), IRAM *A. BELLOCHE et al.(2008)*
- * ds les météorites : hydrolyse acide des précurseurs casse les liaisons.

Marie-Paule BASSEZ *Etude spectrochimique de la glycine et de quelques molécules connexes. Analyse rotationnelle et observations du milieu interstellaire, Thèse d'état, Paris-Orsay (1981).*

1ère observation de la glycine (Parkes ~10heures) (1978)

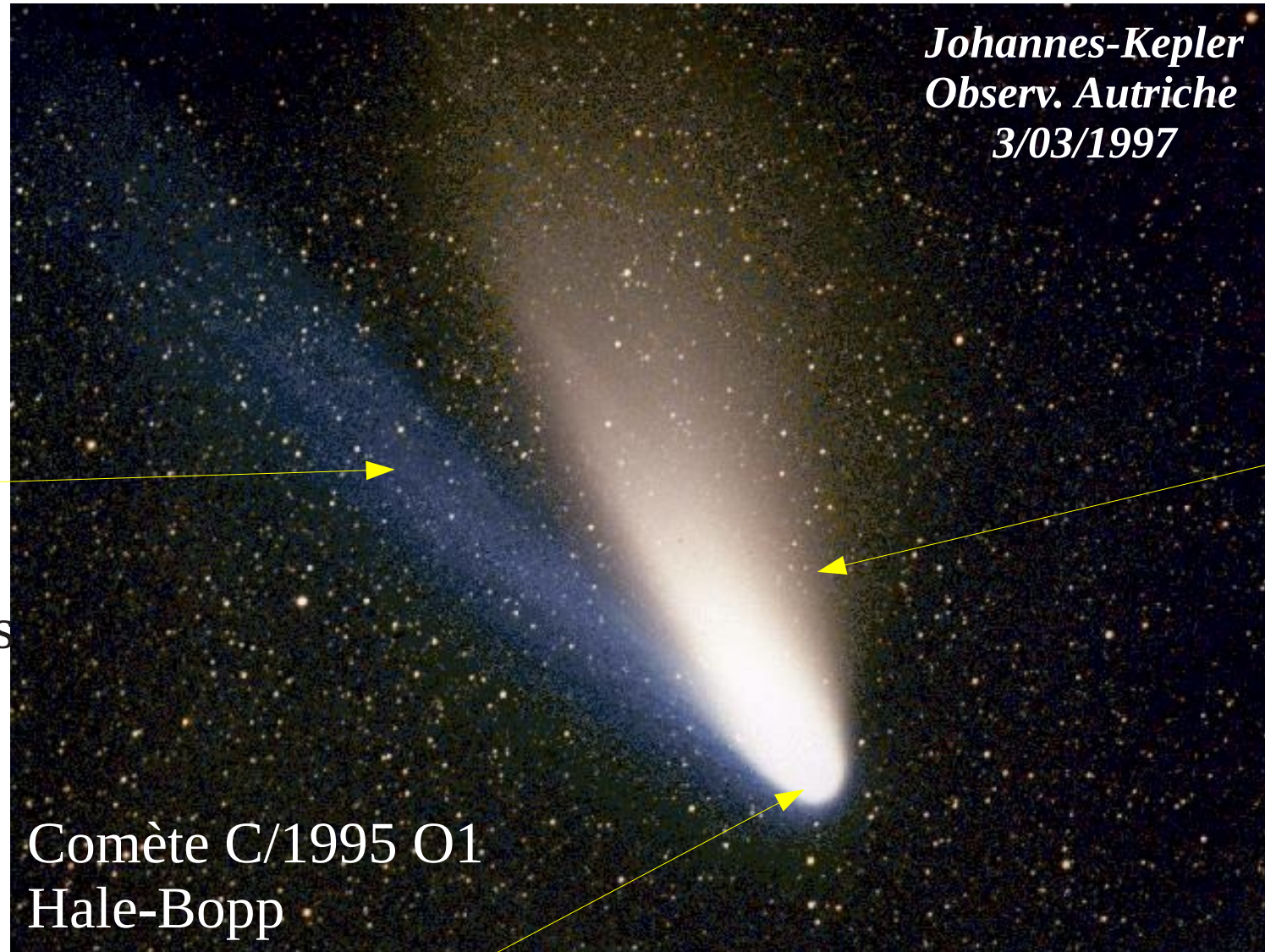


limite supérieure pour la densité (column density) : 10^{12} cm^{-2}



Les molécules dans les comètes

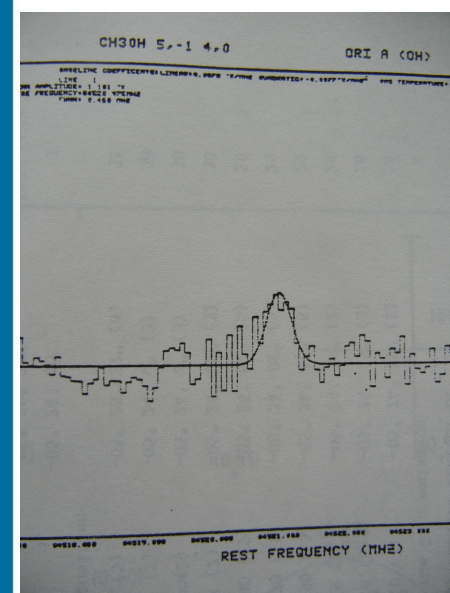
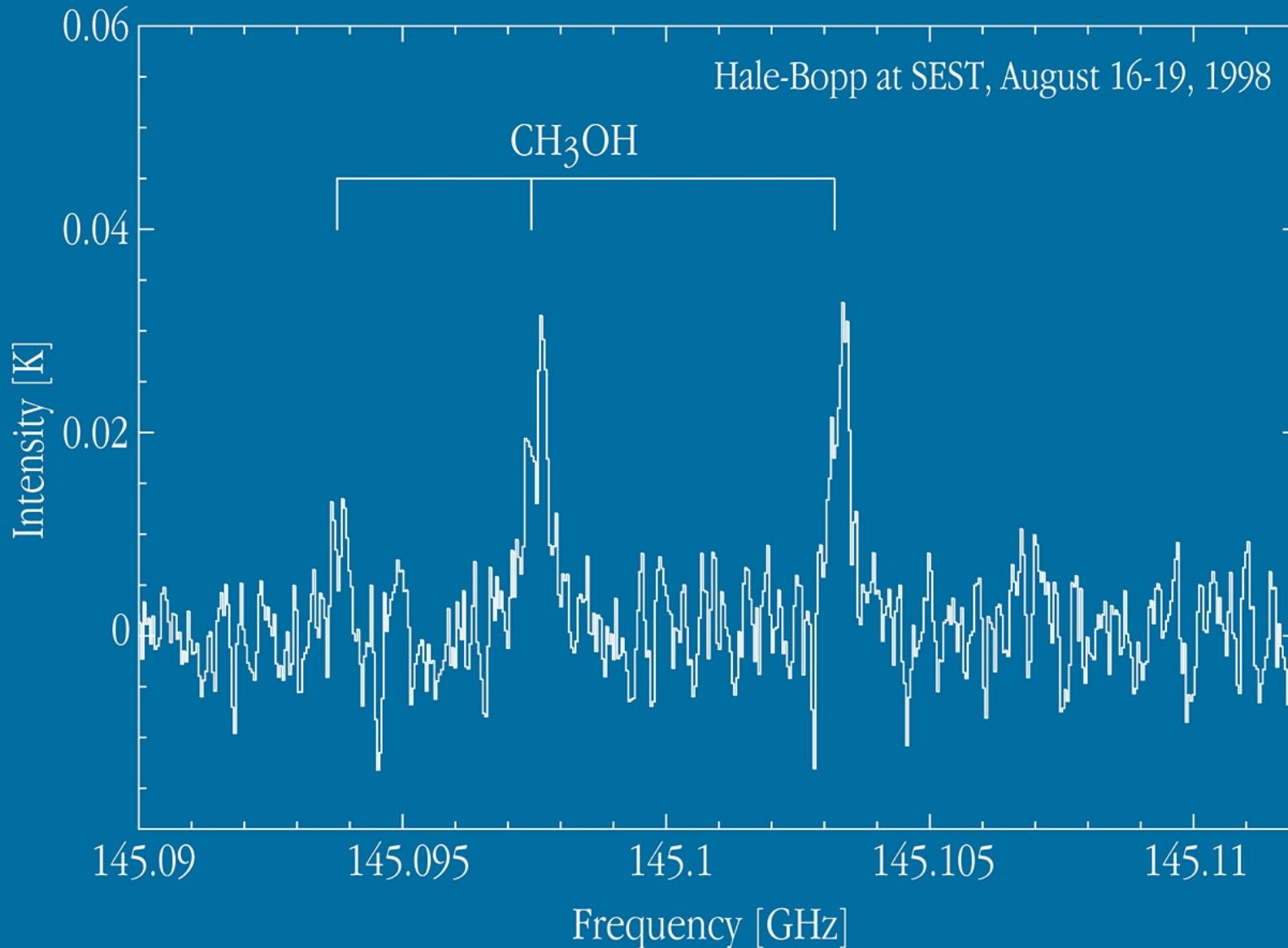
du nuage de Oort



nuage (la chevelure) de **gaz** (eau sublimée à l'approche du soleil, 4-5 ua, et molécules premières ou produits) et de particules **solides**, autour du noyau (glace et roches)

Phase gaz

3 fréquences de rotation du méthanol
~2mm **radio**



84,5GHz Orion A
Parkes
M.P. BASSEZ
(1977)

La Silla Paranal,
désert
d'Atacama, Chili

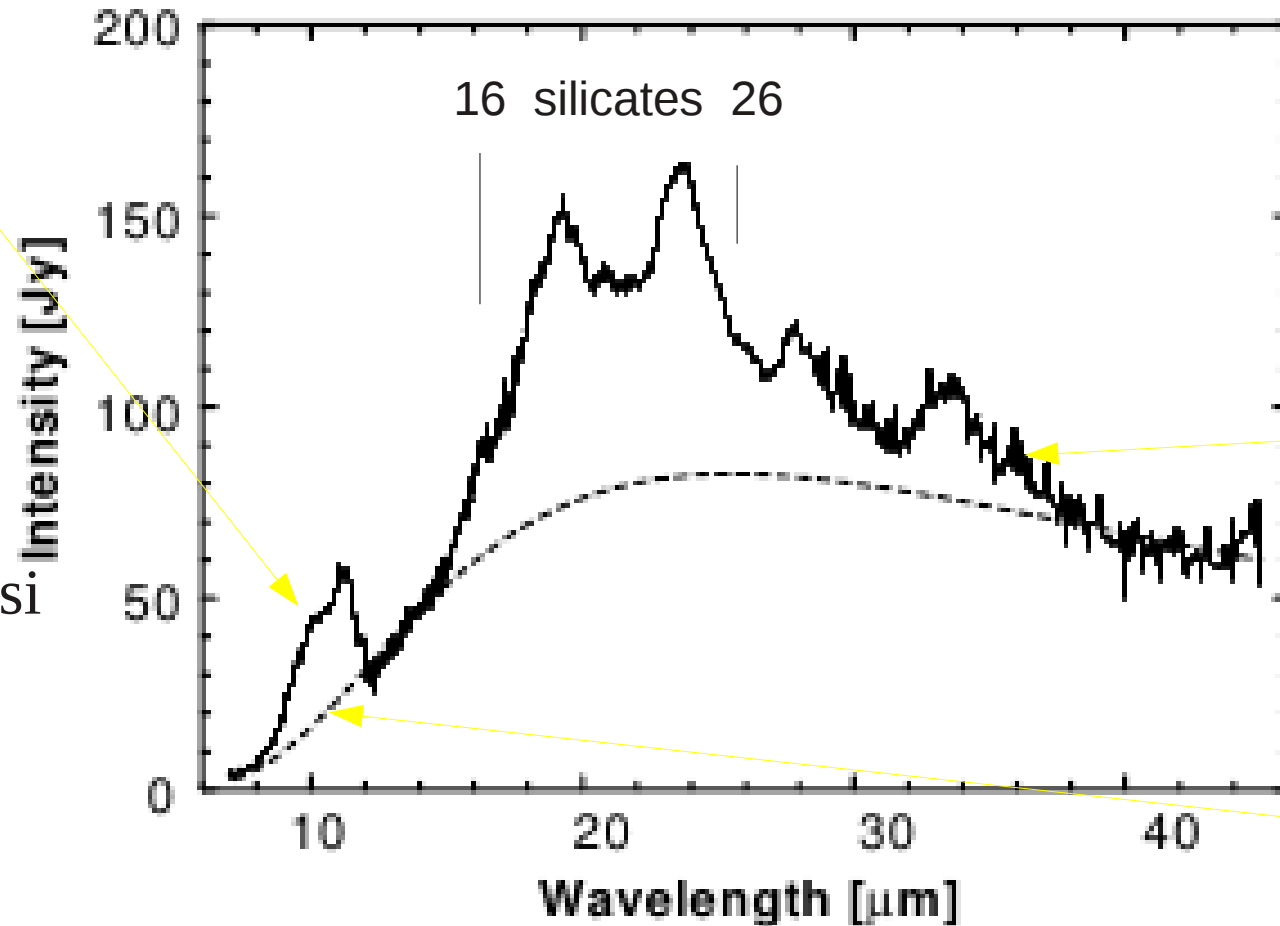
Swedish ESO
Submillimetre
Telescope
(ouvert en 1987)

courtesy of ESO European Southern Observatory
www.eso.org/public/news/eso9849/

Phase solide

Mg-olivine et pyroxène cristallins et silicates amorphes

* 9-12 μm :
bande de vibration
de la liaison **SiO**
dans les silicates
* 11,3 μm :
cristal d'**olivine**
bande observée aussi
ds disque
circumstellaire de
l'étoile HD 100546



Continuum
d'émission
thermique
des
poussières
solides

courbe du
corps noir
T=200K

Spectre **IR** entre 7 et 45 μm de la **comète Hale-Bopp**, 6/10/1996,
Earth Orbiting Infrared Space Observatory, ISO : lancé en 1995 par l'ESA

La forstérite, Mg_2SiO_4 , est un constituant de la poussière de la comète

Jacques CROVISIER et al. (1997, 2000)

La comète Wild2

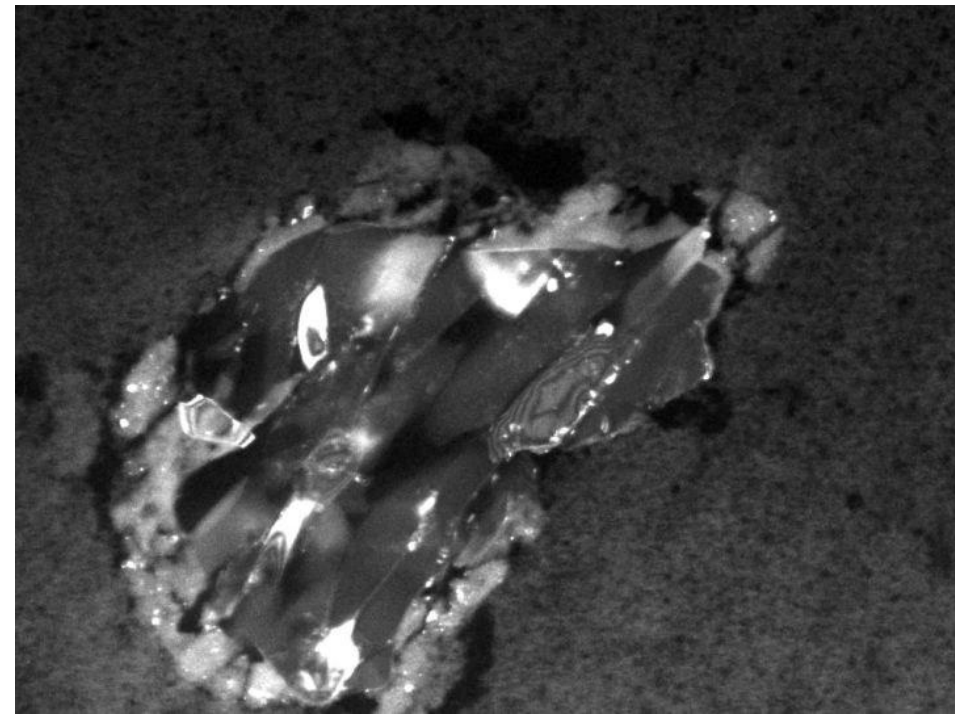
de la ceinture de Kuiper

Le véhicule spatial **Stardust**

- * lancé : février 1999
- * a traversé le nuage de gaz et de poussières à 235 km du noyau de la comète Wild2 : 01/2004. Rencontre : au delà de l'orbite de Mars
- * une capsule avec du gel contenant des poussières de la comète et du milieu interplanétaire est revenu sur Terre en 01/2006.



jets de
gaz et de
particules



Une particule de comète composée
de forstérite, **Mg-olivine**, Mg_2SiO_4

D= 2 μ m NASA *wikimedia commons*

Comète 81P/Wild2

D=5km v=5,4km 02 Janv 2004

"Courtesy NASA/JPL-Caltech."

Molécules observées dans les comètes :

Silicates cristallins riches en Mg : **olivine** et **pyroxène**, dans les comètes de la ceinture de Kuiper et du nuage de Oort.

Silicates amorphes.

Molécules riches en C, O et N :

H₂O, **CO**, CO₂, CH₄, C₂H₂, C₂H₆, **CH₃OH**, **H₂CO**, HCOOH,
HOCH₂CH₂OH (HB), HCOOCH₃ (HB), CH₂CHO (HB),
NH₃, **H₂CN**, HNCO, HNC, CH₃CN, **HC₃N**, NH₂CHO (HB),
H₂S, OCS, SO₂ (HB), H₂CS (HB), S₂,

Dans Wild2 (W) : NH₂CH₃, NH₂C₂H₅ éthylamine,

NH₂CH₂COOH glycine qq picomoles/cm² extraites ds 100µL d'eau,

puis hydrolyse acide. $\delta^{13}\text{C} = +29\text{‰}$

Jamie ELSILA et al. (2009)

Michael MUMMA et al. (2011)

Molécules observées dans les météorites

* de la ceinture d'astéroïdes : formation du système solaire

* **chondrites carbonées** :

* matière **organique soluble** dans eau ou solvants
après hydrolyse acide → **acides aminés** des protéines, ac am des
plantes et ac am extraterrestres ; faible excès énantiomérique L-
(Guillaume BENTZINGER 2009, 2010 ; Sophie BENNHAR 2009, 2010)
<http://chemphys.u-strasbg.fr/mpb/teach/originevie.html>

* matière **organique macromoléculaire**
semble **associée à des silicates hydratés** (serpentine)
(V. PEARSON et al. 2007)

traitement hydrothermal (300°C, 100 MPa) → acide dicarboxyliques
(H. YABUTA et al. 2007)

Les molécules dans la météorite de Murchison 1969

hydrocarbures aliphatiques ; propane : $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$

acides aminés ; alanine : $\text{CH}_3\text{CH}(\text{NH}_2)\text{COOH}$

acides carboxyliques ; acide acétique : CH_3COOH

acides hydroxylés ; acide lactique : $\text{CH}_3\text{CH}(\text{OH})\text{COOH}$

cétoacides ; acide pyruvique : CH_3COCOOH

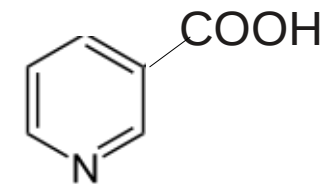
acides dicarboxyliques ; acide succinique : $\text{COOH}(\text{CH}_2)_2\text{COOH}$

oses ; acide glycérique : $\text{CH}_2\text{OHCH}(\text{OH})\text{COOH}$

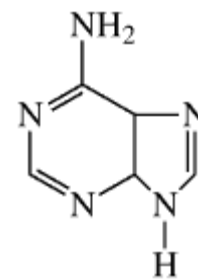
aldéhydes et cétones ; acétaldéhyde : $\text{CH}_3\text{C}(\text{O})\text{H}$

amines et amides ; éthylamine : $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{NH}_2$

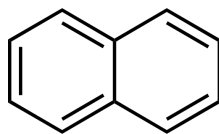
acides carboxyliques de la pyridine ; acide nicotinique :



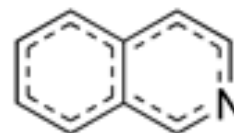
purines et pyrimidines ; adénine :



aromatiques ; naphthalène :



aromatiques polaires ; isoquinoline :



Sandra PIZZARELLO
(2011)

Europa (Jupiter)

34x42 km véhicule spatial Galileo
20/02/1997 à 5340 km

$T \approx 113\text{K} = -160^\circ\text{C}$
glace : qq km
océan liquide
 $\sim 100\text{km}$
avec activité
hydrothermale
et bactérienne ?
 O_2 ds atm
Jason GOODMAN
(2012)

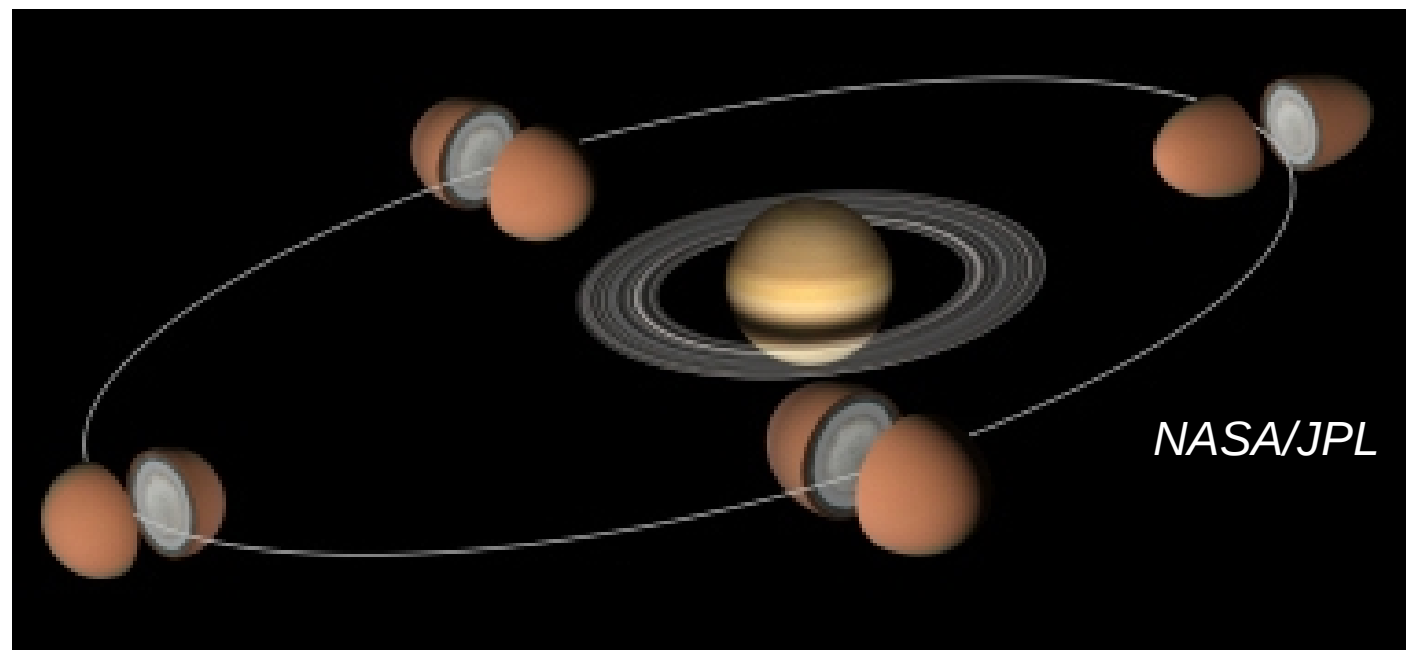
Titan (Saturne) * Orbiteur Cassini: lancé le 15/10/1997 → 2017

* Sonde Huygens : ESA, 6 instruments,
dont 2 fournis par la France, CNES. <http://smc.cnes.fr/CASSINI/Fr/>
posée le 14/01/2005

* T_{surface} ~93K Patm ~1,46 bar

* Reçoit Rayt UV solaire, Rayt cosmique ; ds magnétosphère de Saturne

Intérieur de Titan : océan liquide et cœur de silicates



- * orbite elliptique de 16j
- * redistribution de la masse
- * variat. du champ gravitat.
- * variation de l'accélération de Cassini observée sur Terre.

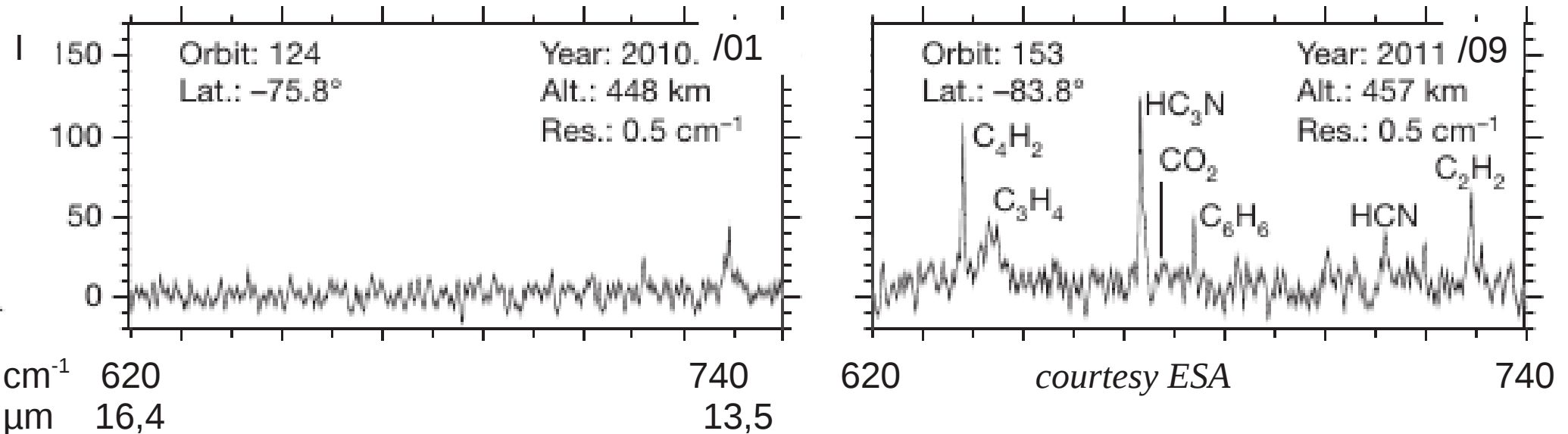
Déformation du globe de ~10m → océan liquide en profondeur

Luciano LESS (2012)

Atmosphère de Titan: N_2 , CH_4

C_2H_6 , H_2 , CO , ^{40}Ar , hydrocarbures, HCN , HC_3N , CO_2

ions (heavy negative ions at 950km)



Emission **IR** du **Pôle sud** de Titan

avec le CIRS, Composite IR Spectrometer

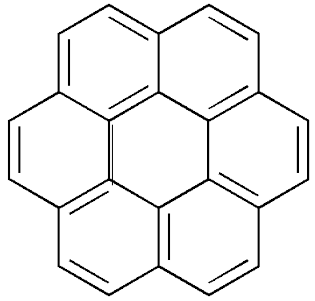
diacétylène ($HC\equiv CC\equiv CH$), méthylacétylène ($CH_3C\equiv CH$), cyanoacétylène

($HC\equiv CCN$), dioxyde de carbone (CO_2), benzène (C_6H_6),

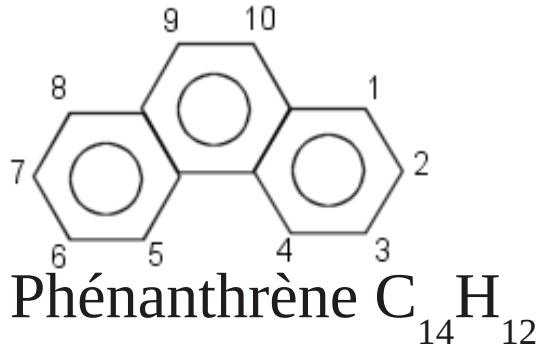
cyanure d'hydrogène (HCN) et acétylène (C_2H_2).

Nicholas TEANBY et al. (Nov. 2012)

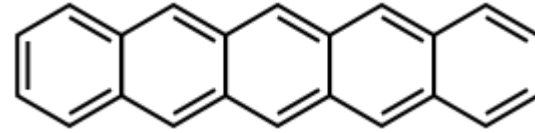
Surface de Titan : *observ. en IR : spectromètre **VIMS** à bord de Cassini



coronène C₂₄H₁₂

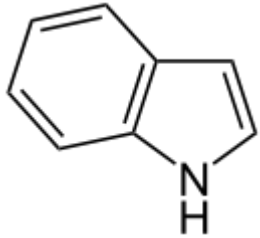


Phénanthrène C₁₄H₁₂

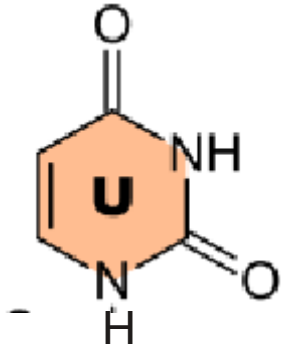


Pentacène C₂₂H₁₄

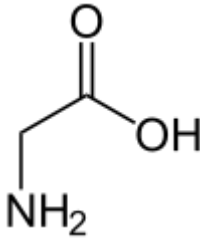
: PAH



Indole C₈H₇N



uracile



glycine



Roger CLARK et al. (10/2012)

* observ. IR : Descent/Imager Spectral Radiometer **DISR** à bord de Huygens

> spectre d'absorption du méthanol (0,8-1,6 μm)

→ 25m au dessus de la surface : 5 % de méthanol gaz.

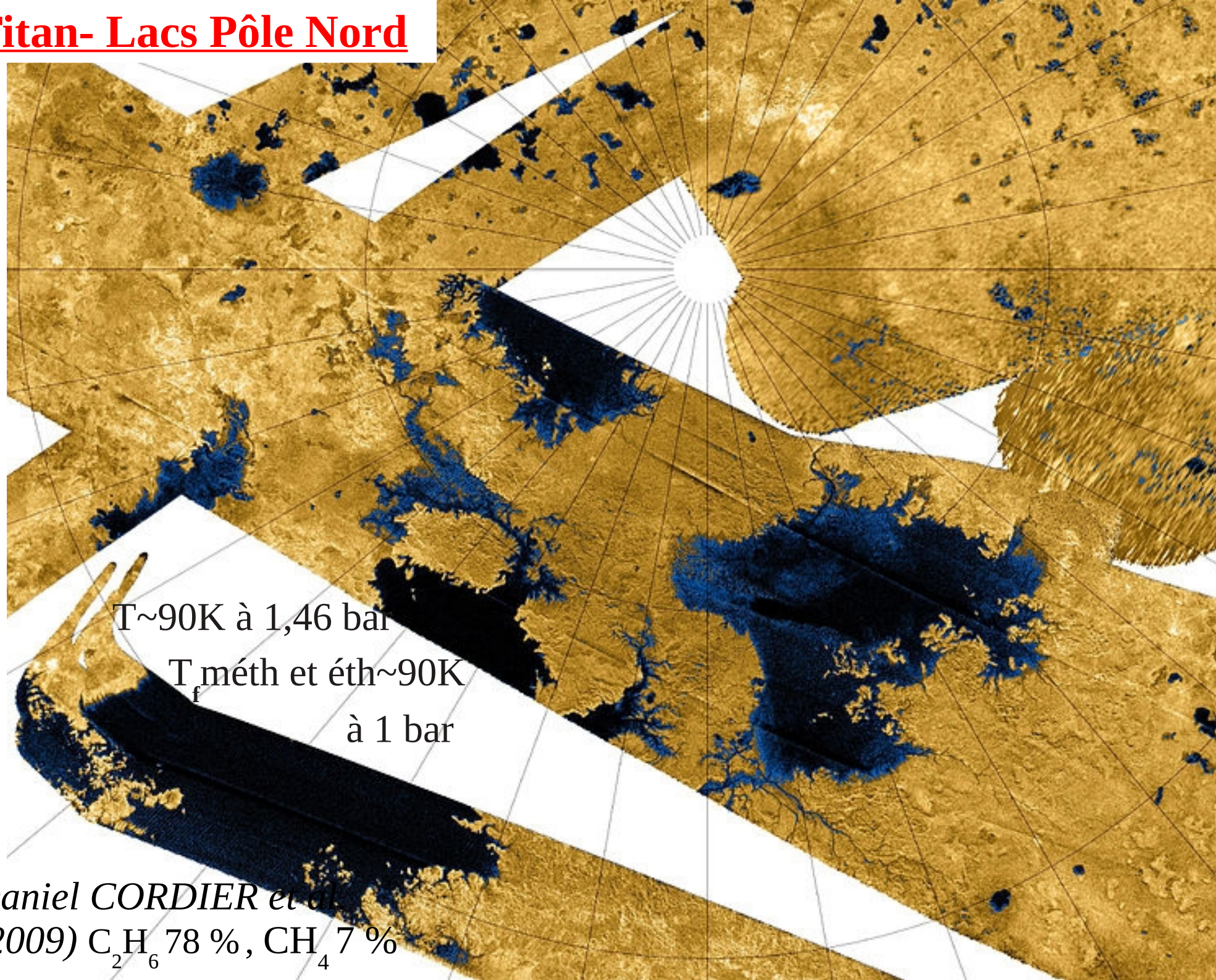
> bande à 1,5μm : glace ?

D. JACQUEMART et al. (2008)

> spectre de réflectivité (0,8-1,6 μm) : pas expliqué

D. NNA-MVONDO al. (09/2012)

Titan- Lacs Pôle Nord



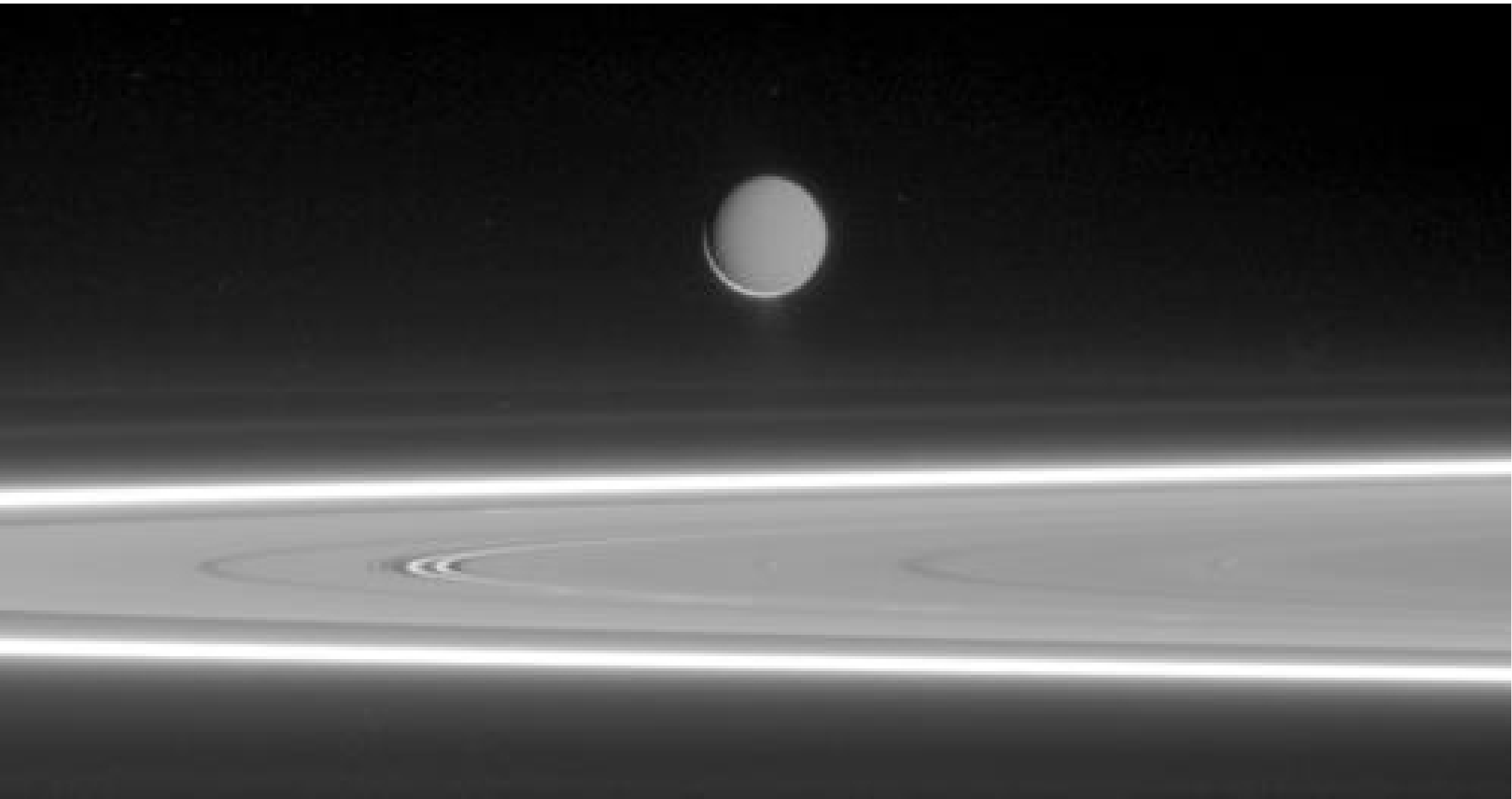
$T \sim 90\text{K}$ à 1,46 bar

T_f méth et éth $\sim 90\text{K}$
à 1 bar

Daniel CORDIER et al.
(2009) C_2H_6 78 %, CH_4 7 %

Enceladus (Saturne)

courtesy of NASA

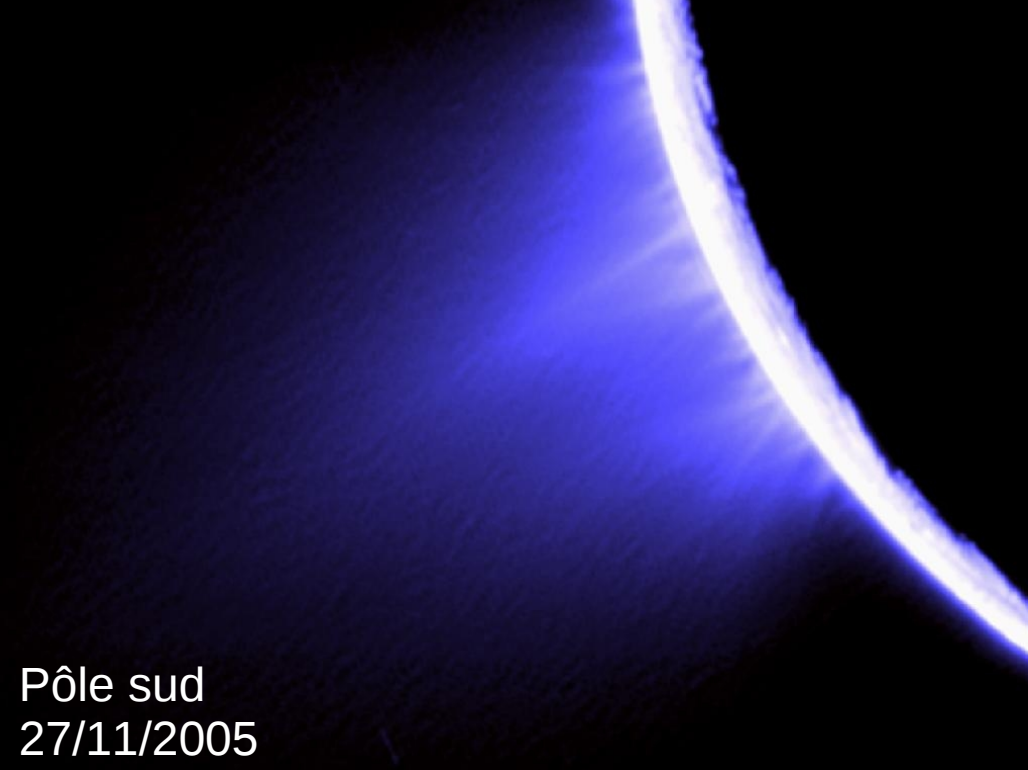


Une plume est orientée vers l'anneau E de Saturne.

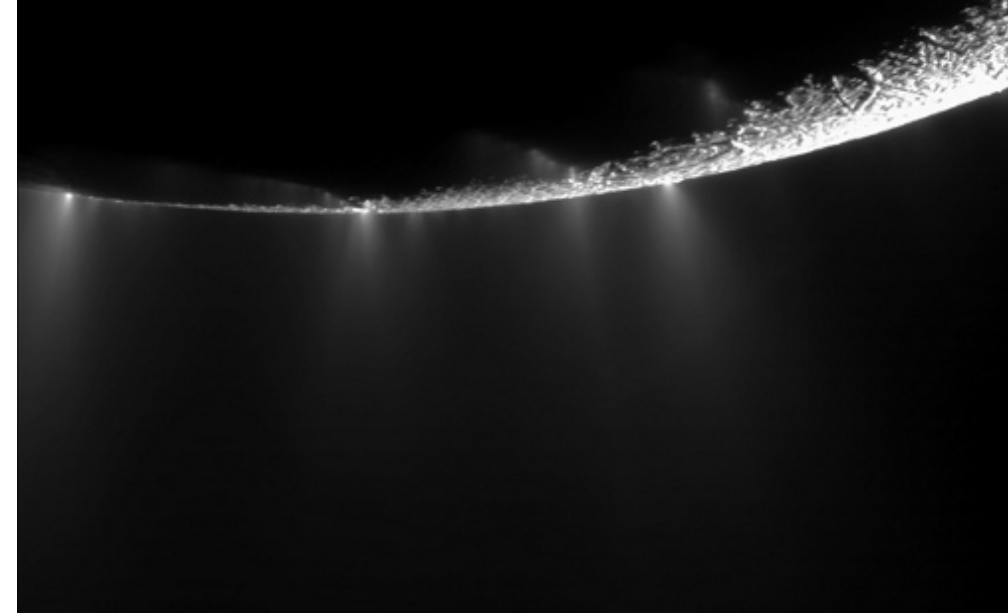
$d_E = 504 \text{ km}$; $d(S-E) = 240\,000 \text{ km}$; $d_{\min}(\text{Cassini-Enc}) = 25 \text{ km}$

Surface : glace ; $T_s = 72 \text{ K} = -201^\circ \text{C}$;

[//saturn.jpl.nasa.gov/multimedia/flash/Enceladus/enceladus.html](http://saturn.jpl.nasa.gov/multimedia/flash/Enceladus/enceladus.html)



Pôle sud
27/11/2005



8 événements (jets) indépendants éjectant
 H_2Og à $10^{28} \text{ mol.s}^{-1}$ Y. DONG et al. 2011

Ejection :

- * H_2Og , groupes H_2Og chargés-, 'dust nanograins' nanoparticule chargées : H_2Os
- *Mass 28 : C_2H_4 , CO or N_2 ? *Gaz de type cométaire : NH_3 , HCN , CH_4 ,
 HCHO , CH_3OH , CO_2 , CH_3CHO , hydrocarbures, C_6H_6 ; *aussi ^{40}Ar radioactif
- * NaCl , NaHCO_3 , Na_2CO_3 dans les grains de glace et SiO_4 ; H_2 ?

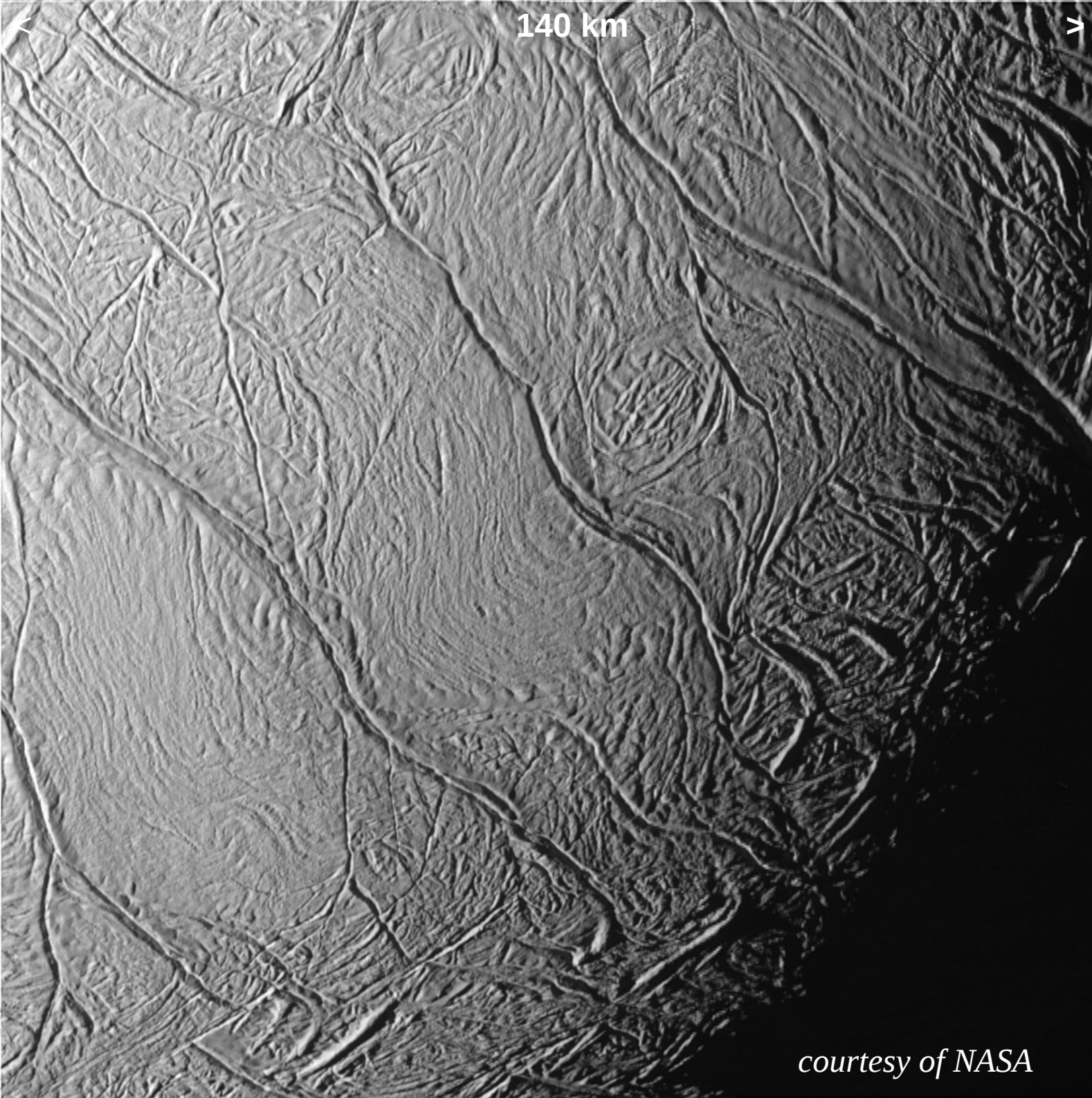
→ altération de roches par l'eau ?

Réservoir d'eau liquide au dessus d'un cœur de silicates ?

T. HILL et al. (2012); F. POSTBERG et al. (2011); M. ZOLOTOV et al. (2011)

Système hydrothermal et cœur de silicates ferromagnésiens (olivine) ?

Y. SEKINE et al. 2011.

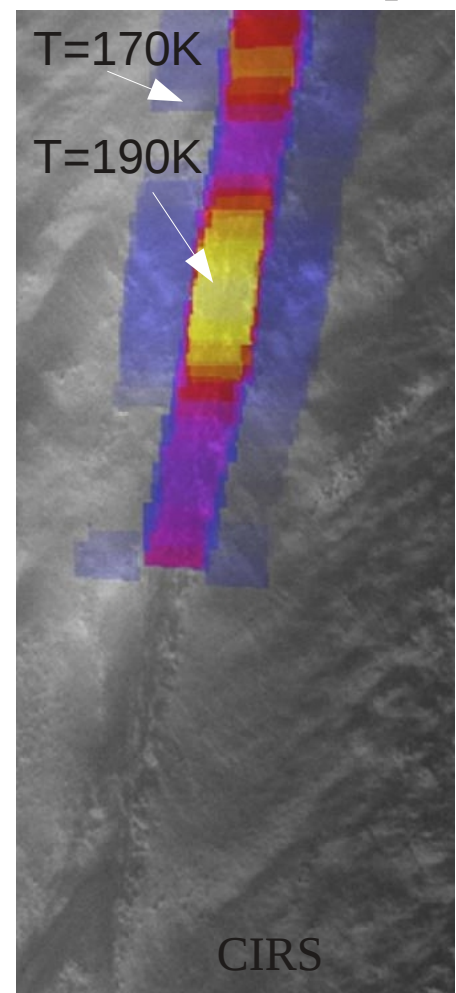


140 km

Failles

« Tiger stripes » :
source des 8 jets
de gaz et de
poussières.

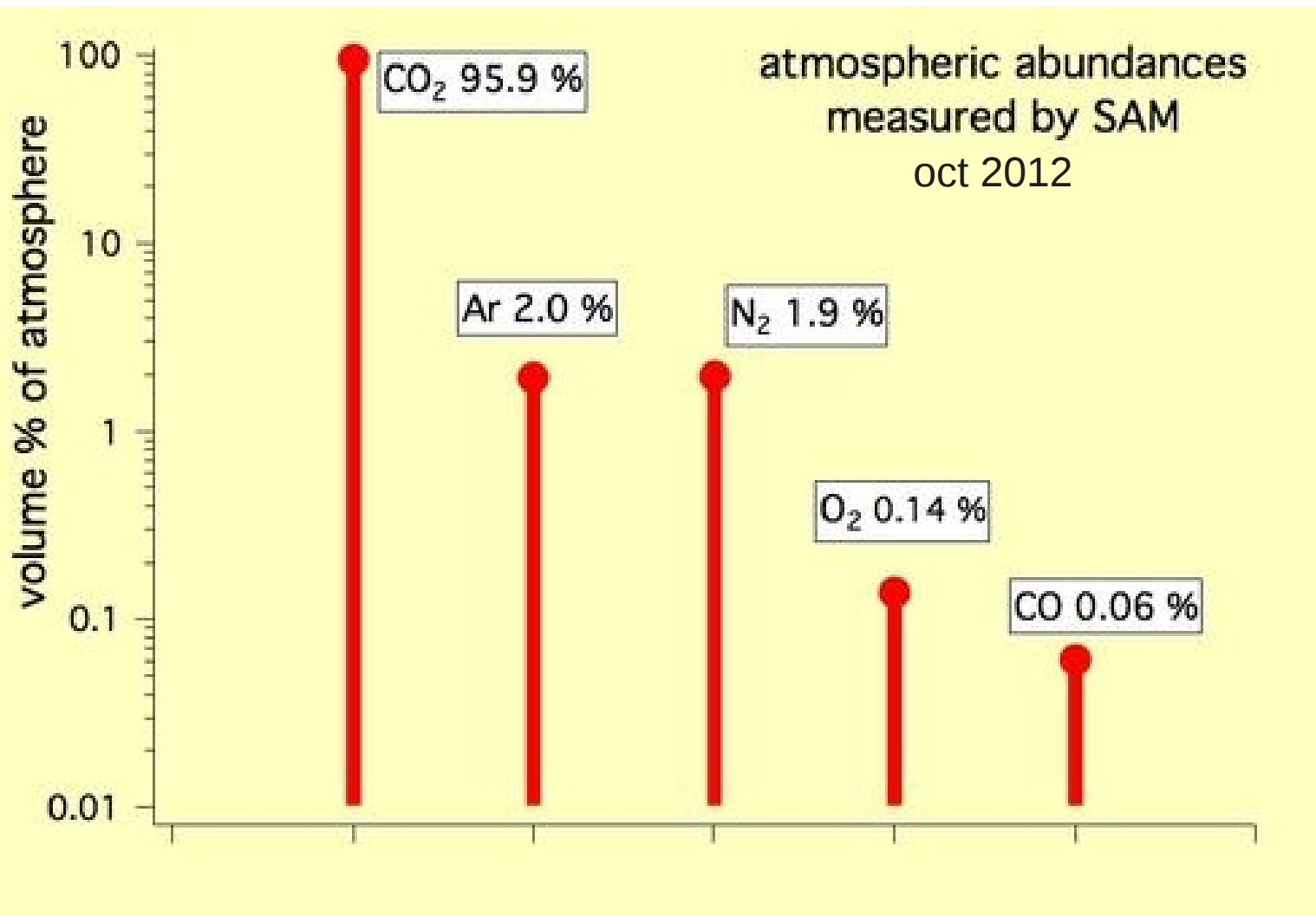
Emission thermique



courtesy of NASA

Mars

Véhicule d'exploration Curiosity, posé le 06/08/2012

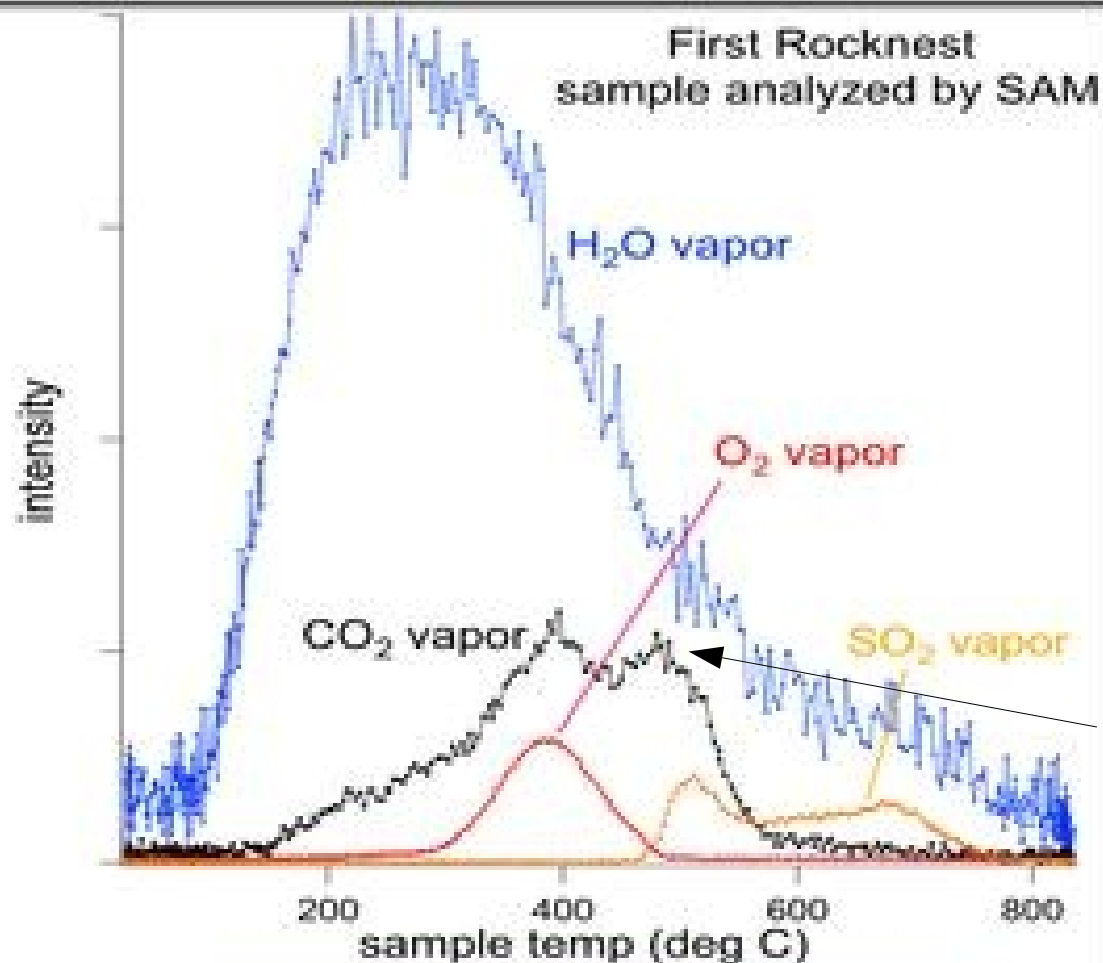


Sample Analysis at Mars

*courtesy of
NASA/JPL-Caltech,
SAM/GSFC*

Variety of gases released from Rocknest samples

Major gases released on heating



Gases detected by SAM include water (a few percent), and lesser amounts of carbon dioxide, oxygen, and sulfur dioxide

SAM experiment types

- Gas composition
- Isotopes in light elements
- Specific search for organics

pic de CO₂ de Fe ou MgCO₃ ?

3rd instrument : Mass . Spectro
 TLS=Tunable Laser Spectrometer

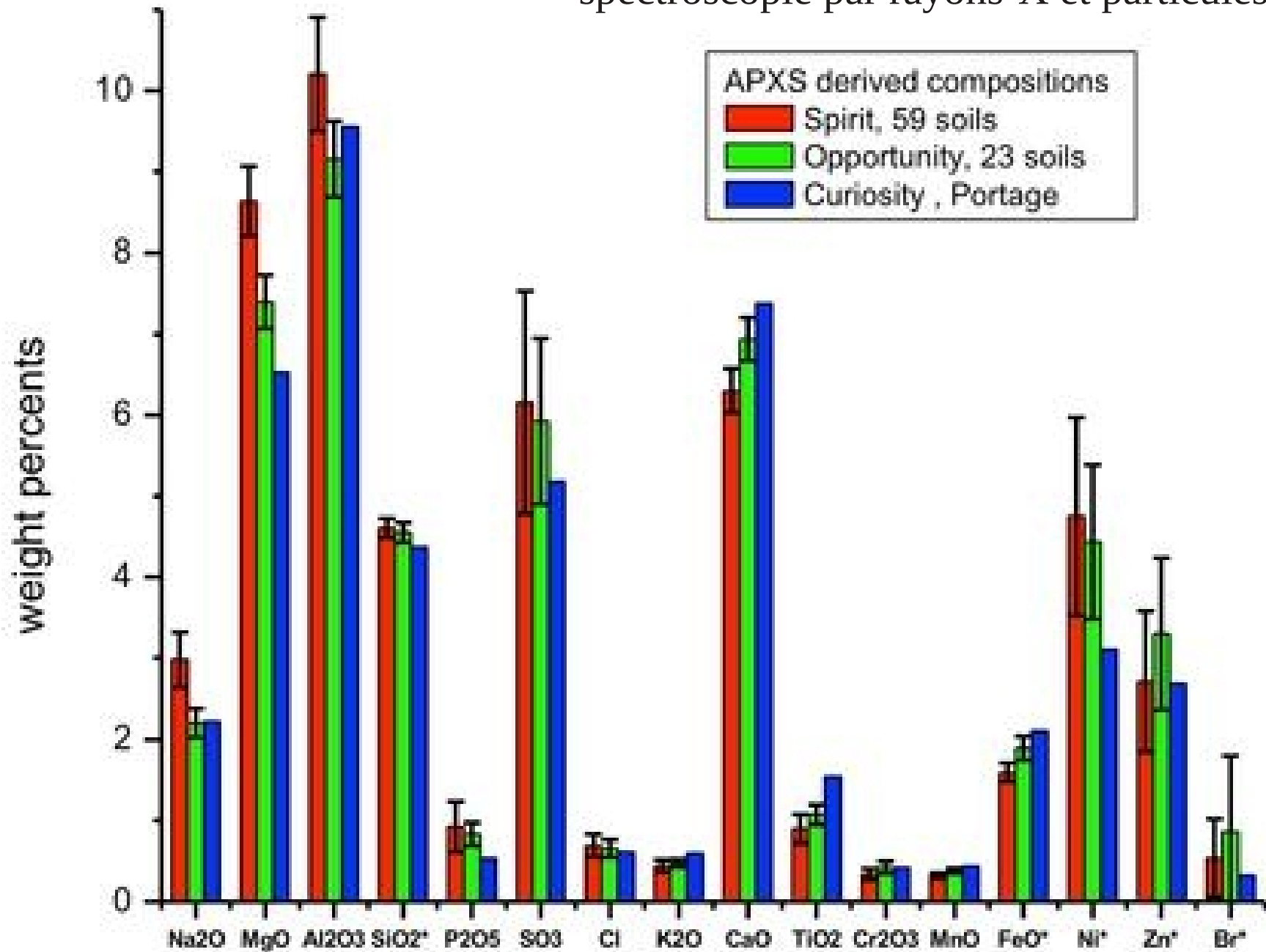
For three separate experiments
 Red bar - sample temperature
 for gas sent to TLS
 Blue bar – sample temperature
 for gas sent to GC

LATMOS
 Versailles

courtesy of NASA

Soil analysé avec le Alpha Particle X-ray Spectrometer

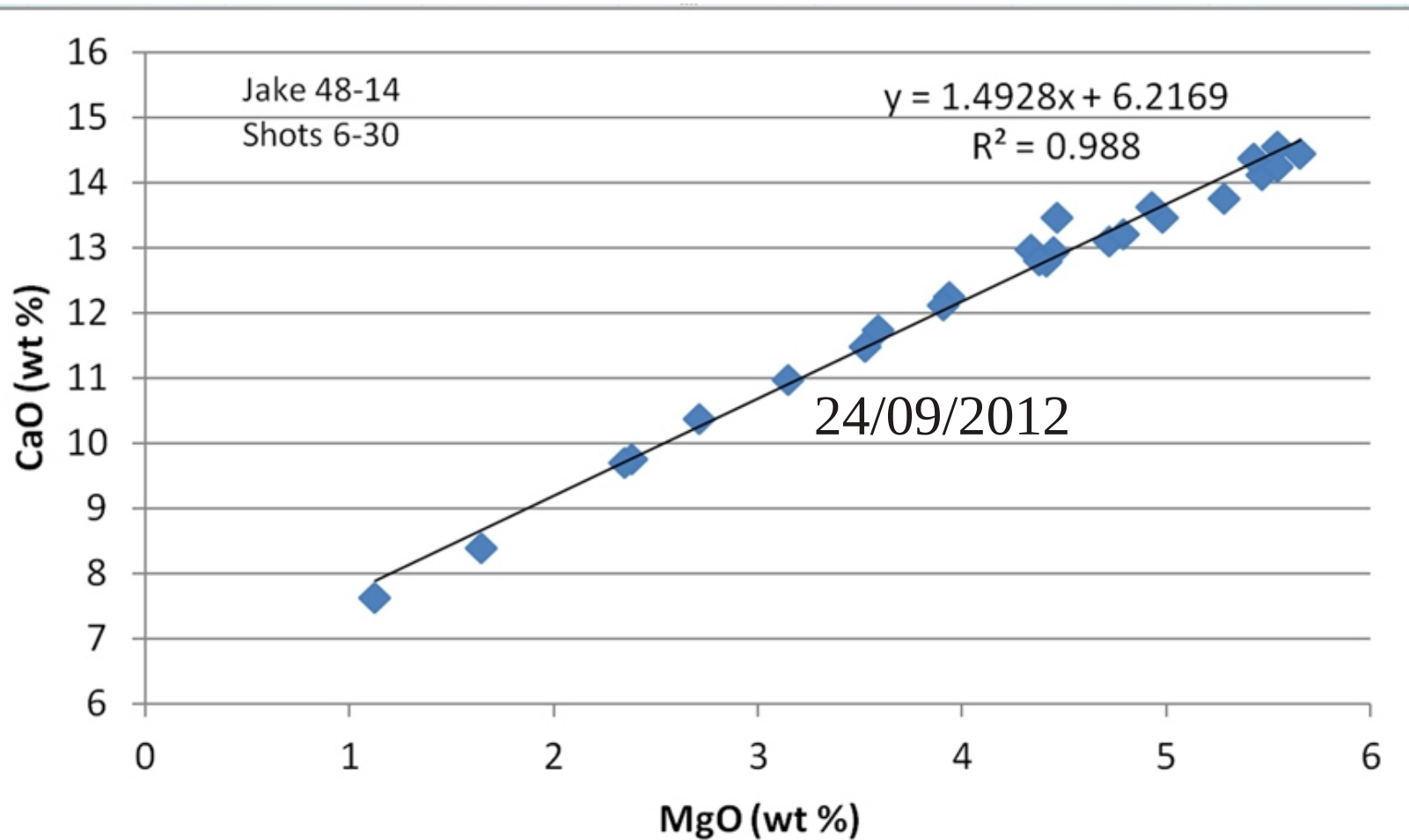
spectroscopie par rayons-X et particules alpha



NASA, Ralf GELLERT, AGU (Dec.2012)

Minéraux

* **Pierre Jake Matijevic** : contenu en Ca et Mg → **pyroxène**

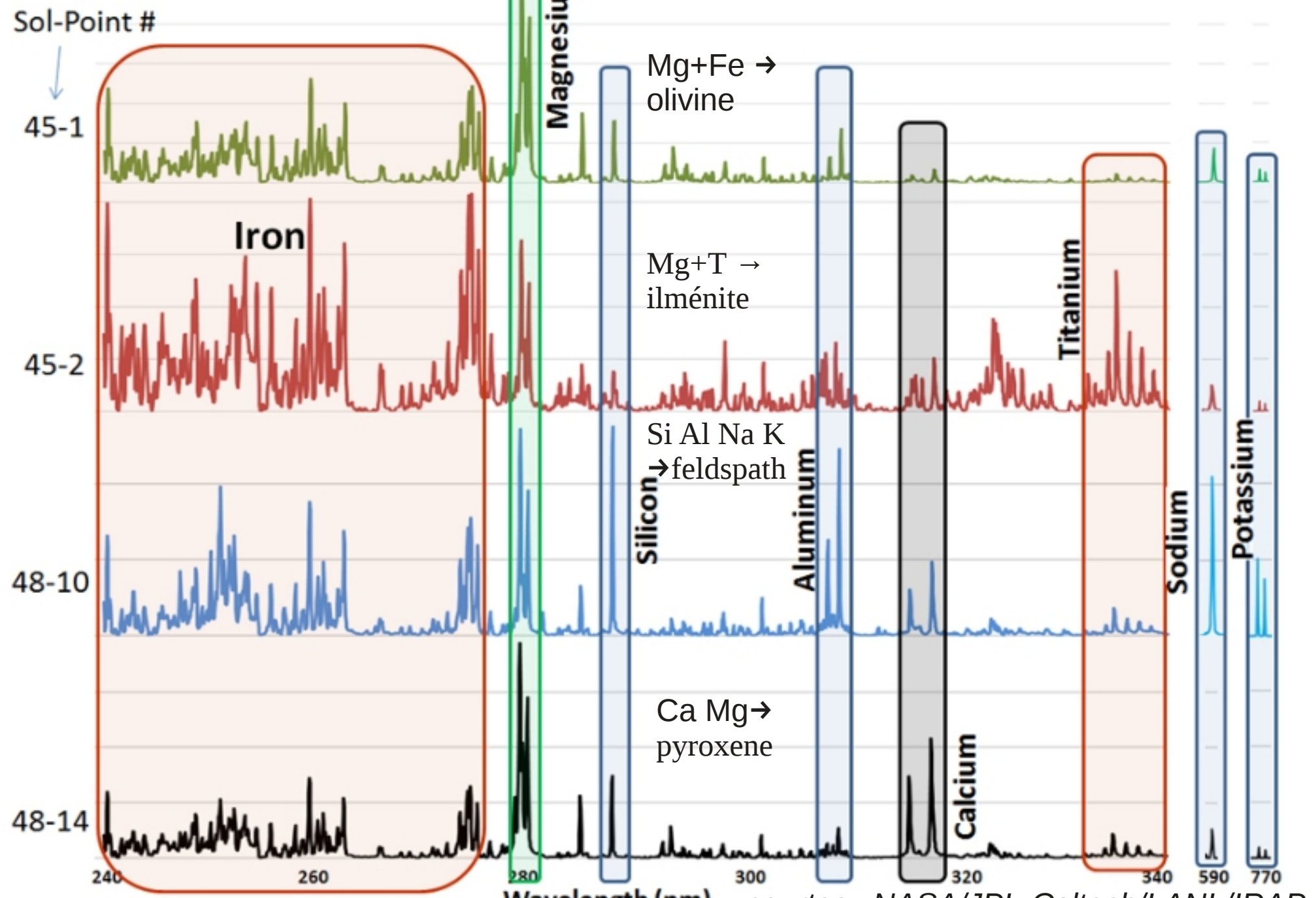


courtesy of NASA/JPL-Caltech/LANL/IRAP/SSI

* **Grains fins** :
minéraux amorphes

*Roger C. WIENS Los Alamos Nat. Lab.
personal communication, AGU (Dec.2012)*

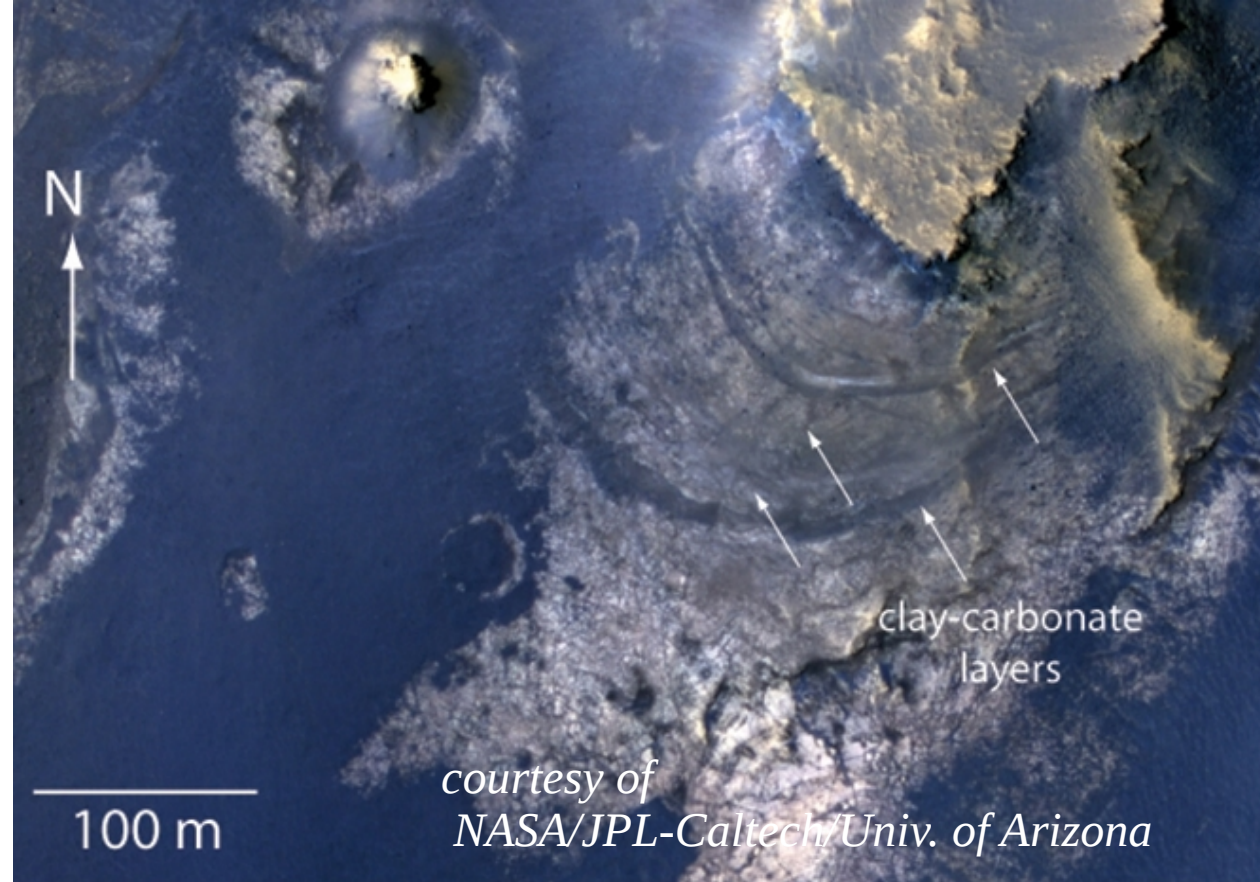
ChemCam ← développé à Toulouse, IRAP, : dir. Sylvestre MAURICE
 pierre Matijevic
 Laser → fusion de la roche → plasma analysé en UV-Vis



courtesy NASA/JPL-Caltech/LANL/IRAP

* (15/01/2013) Veines de sulfates de Ca hydratés

* (20/01/2013)
cratère McLaughlin
CRISM
argiles et carbonates



* Compact Reconnaissance Imaging (IR, Vis) Spectrometer for Mars, CRISM, situé dans le Mars Reconnaissance Orbiter, **MRO**.

Région de **Nili Fossae** : **Silicates ferromagnésiens** observés à 300 km de Mars.

J.F. MUSTARD et al. (2009)

* programme **ExoMars** conjoint ESA-Roscomos (agence spatiale russe)
mission lancée en 2016 : satellite en orbite
mission lancée en 2018 : véhicule d'exploration sur Mars

**Un modèle d'évolution
de la roche vers les
molécules du vivant**

La roche en présence d'H₂O et de CO₂ se transforme :

olivine (Mg_xFe_y)₂SiO₄, et pyroxène (Mg_xFe_y)SiO₃ →

serpentine, magnétite, quartz, **H₂**, brucite, carbonate de Fe et Mg, talc

réactions **exothermiques**

donc : CO₂ + H₂ → CO + H₂O (conditions hydrothermales)

olivine et/ou pyroxènes, eau → ^{CO₂}H₂ → CO → mol. organiques

(Marie-Paule BASSEZ 2008 ; conférences, articles...OLEB 2012)



" ...mélanger eau de mer, péridotite, azote...le rayonnement gamma induirait la radiolyse de l'eau... " M.P. Bassez (2008)

" Polymers of amino acids might form as a product of the exothermic hydrolysis of the rocks and of their mineral content during the process of serpentinization." M.P. BASSEZ (2012)



Newton par *William Blake* (1795-1805) Tate Britain [wikimedia commons](#)

Références bibliographiques

- * ABBY S. Sophie, TANNIER Eric, GOUY Manolo, DAUBIN Vincent *Lateral gene transfer as a support for the tree of life*, PNAS 109 (13) 4962 (mars 2012).
- * BASSEZ Marie-Paule *Is high-pressure water the cradle of life* J. Phys. Cond. Matter 15, L353 (2003).
- * BASSEZ Marie-Paule *L'eau polaire et apolaire, un solvant pour la vie*, communic. affichée P12, colloque national d'exobiologie, Orléans (2006).
- * BASSEZ Marie-Paule *Synthèse prébiotique dans les conditions hydrothermales*, communic. orale CNRIUT'08, Lyon (29-30/mai/2008).
<http://liris.cnrs.fr/~cnriut08/actes/29/may/période-1/salle C>.
- * BASSEZ Marie-Paule *Prebiotic synthesis under hydrothermal conditions*, C. R. Chimie, Académie des Sciences, Paris-France, 12 (6-7), 801 (2009).
- * BASSEZ Marie-Paule, TAKANO Yoshinori, KOBAYASHI Kensei *Prebiotic organic globules*, Origin of Life and Evolution of Biospheres, 42, 307 (2012).
- * BELLOCHE A., MENTEN K.M., C. COMITOL C., H. S. P. MÜLLER H.S.P., SCHILKEL P., OTT J., THORWIRTH S., HIERET C., *Detection of amino acetonitrile in Sgr B2(N)* Astronomy & Astrophysics 482, 179 (2008).
- * BORUCKI J. William... ~83 auteurs, *Kepler-22b: a 2.4 Earth-radius planet in the habitable zone of a sun-like star* The Astrophysical Journal, 745:120 (2012).
- * BROWN R. D., GODFREY P. D., STOREY J. W. V., BASSEZ M.-P. *Microwave spectrum and conformation of glycine* J. Chem. Soc. Chem. Commun., 547 (1978).
- * BROWN R.D., GODFREY P.D., STOREY J.W., M.P. BASSEZ M.P., ROBINSON B.J., BATCHELOR R.A., Mc.CULLOCH M.G., RYDBECK O.E., HJALMARSON A.J., *A search for interstellar glycine* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 186, 5, (1979).

- * CHAPILLON E., DUTREY A., GUILLOTEAU S., PIETU V., WAKELAM V., HERSANT F., GUETH F., HENNING T., LAUNHARDT R., SCHREYER K., SEMENOV D., *Chemistry in disks. VII. first detection of HC3N in protoplanetary disks*, *Astrophysical Journal* 756 (2012).
- * CLARK N. Roger, PEARSON N., BROWN R.H., CRUIKSHANK D.P, BARNES J., JAUMANN R., SODERBLOM L., GRIFFITH C., RANNOU P., RODRIGUEZ S., Le MOUELIC S., LUNINE J., SOTIN C., BAINES K. H., BURATTI B. J., NICHOLSON P.D., NELSON R. M., STEPHAN K., *The Surface Composition of Titan*, Abstr. 201-02, 44th Am. Astron. Soc. Meeting, Reno, USA (14-19/10/2012).
- * COQUELLE Nicolas, FIORAVANTI Emanuela, WEIK Martin, VELLIEUX Frédéric, MADERN Dominique, *Activity, Stability and Structural Studies of Lactate Dehydrogenases Adapted to Extreme Thermal Environments* *J. Molecular Biology* 374, 547 (2007).
- * CORDIER Daniel, MOUSIS Olivier, LUNINE I. Jonathan, LAVVAS Panayotis , VUITTON Véronique, *An estimate of chem composition of Titan's lakes* *ApJ* 707 L128 (2009).
- * CROVISIER Jacques, LEECH Kieron, BOCKELEEE-MORVAN Dominique, BROOKE Y. Timothy, HANNER S. Martha, ALTIERI Bruno, KELLER H. Uwe, LELLOUCH Emmanuel *The Spectrum of Comet Hale-Bopp (C/1995 O1) Observed with the Infrared Space Observatory at 2.9 Astronomical Units from the Sun*, *Science* 275, 1904 (1997).
- * CROVISIER *et al.* ASP conf. series 196, ed.Sitko, Sprague, Lynch (2000).

* CROVISIER Jacques In *Astrochemistry: From Molecular Clouds to Planetary Systems*, IAU Symposium 197, ed. YC Minh, EF van Dishoeck, pp. 461–470. Sogwipo: Astron. Soc. Pac. (2000).

* DOOLITTLE W. Ford *Uprooting the tree of Life* Scientific American p.90 (feb2000)

et *Phylogenetic classification and the tree of Life*, Science, 284, p.2124 (1999).

* DEAMER W. David *Membrane compartments in prebiotic evolution*, dans : *The Molecular Origins of Life, Assembling pieces of the puzzle*, ed. André BRACK, Cambridge Univ. Press p.189 (1998).

* DONG Y., HILL T.W., B. D. TEOLIS B.D., B. A. MAGEE B.A., WAITE J.H., *The water vapor plumes of Enceladus*, Journal of Geophysical Research 116, A10204 (2011).

* ELSILA E. Jamie, GLAVIN P. Daniel, DWORKIN P. Jason, *Cometary glycine detected in samples returned by Stardust*, Meteoritics & Planetary Science 44 (9) 1323 (2009).

* ENCRENAZ Thérèse, *Water in the solar system*, Annual Review Astronomy Astrophysics 46, 57 (2008).

* FRANKLIN Rosalind, GOSLING R., *Molecular Configuration in Sodium Thymonucleate*, Nature 171, 740-741 (1953).

* GENTILE Francesco, MORETTI Manola, LIMONGI Tania, FALQUI Andrea, BERTONI Giovanni, SCARPELLINI Alice, SANTORIELLO Stefania, MARAGLIANO Luca, PROIETTI ZACCARIA Remo, di FABRIZIO Enzo* *Direct images of DNA fibers : the visage of double helix*, Nano letters 12 (12) 6453-6458, (2012).

- *GOODMAN C. Jason, LENFERINK Erik, *Numerical simulations of marine hydrothermal plumes for Europa and other icy worlds*, Icarus 221, 970 (2012).
- * HARTOGH Paul, LIS C. Dariusz , BOCKELEEE-MORVAN Dominique, de VALBORRO Miguel, BIVER Nicolas, KUPPERS Michael, EMPRECHTINGER Martin, Edwin A. BERGIN A. Edwin, CROVISIER Jacques, Miriam RENGELL Miriam, MORENO Raphael, SZUTOWICZ Slawomira, BLAKE A. Geoffrey, *Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley2*, Nature 478, 218 (2011).
- * HILL T.W., THOMSEN M.F., TOKAE R.L., COATES A.J., LEWIS G.R., YOUNG D.T., CRARY F.J., BARAGIOLA R.A., JOHNSON R.E., Y. DONG Y., WILSON R.J., JONES G.H., WAHLUND J.-E., MITCHELL D.G., HORANYI M., *Charged nanograins in the Enceladus plume* Journal of Geophysical Research 117, A05209 (2012).
- * HOOVER Richard, *Fossils of Cyanobacteria in CI1 Carbonaceous Meteorites: Implications to Life on Comets, Europa and Enceladus*, Journal of Cosmology (march 2011).
- * JACQUEMART D., LELLOUCH E., BEZARD B., de BERGH C., COUSTENIS A., LACOME N., SCHMITT B., TOMASKOD M., *New laboratory measurements of CH₄ in Titan's conditions and a reanalysis of the DISR near-surface spectra at the Huygens landing site* Planet.Space Sci. 56, 613 (2008).
- * Kiang Y. Nancy, SEGURA Antigona, TINETTI Giovanna, GOVINDJEE, BLANKENSHIP E. Robert, COHEN Martin, SIEFERT Janet, CRISP David, MEADOWS S. Victoria *Spectral Signatures of Photosynthesis. II. Coevolution with Other Stars and the Atmosphere on Extrasolar Worlds* Astrobiology 7 (1) (2007).

* KOBAYASHI Kensei, TSUCHIYA Masahiko, OSHIMA Tairo, YANAGAWA Hiroshi, *Abiotic synthesis of amino acids and imidazole by proton irradiation of simulated primitive Earth atmospheres*, *Origin of Life and Evolution of the Biospheres* 20, 99 (1990).

* KUAN Yi-Jehng, CHARNLEY B. Steven, HUANG Hui-Chun, TSENG Wei-Ling, KISIEL Zbigniew, *Interstellar glycine*, *The Astrophysical Journal* 593, 848 (2003).

* LAMARCK Jean-Baptiste, dictionnaire 1817, vol.15 p.270-276 ed. Déterville-Paris <http://www.lamarck.cnrs.fr/>

* LESS Luciano , JACOBSON A. Robert, DUCCI Marco, STEVENSON J. David, LUNINE I. Jonathan, ARMSTRONG W. John, ASMAR W. Sami, RACIOPPA Paolo, RAPPAPORT J. Nicole, TORTORA Paolo ,*The Tides of Titan*, *Science* 337, 6093, 457 (2012).

* McCOLLOM Thomas, SEEWALD Jeffrey *Carbon isotope composition of organic compounds produced by abiotic synthesis under hydrothermal conditions*, *Earth Planet. Sci. Lett.* 243,74 (2006).

* McKAY S. David, GIBSON K. Everett Jr., THOMAS-KEPRTA L. Kathie, VALI Hojatollah , ROMANEK S. Christopher , CLEMETT J. Simon, CHILLIER D.F. Xavier, MAECHLING R. Claude, ZARE N. Richard *Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite ALH84001*, *Science* 273, 924 (1996).

- * MARTIN Sergio *Extragalactic line surveys*, The Molecular Universe, Proceedings IAU Symposium No. 280 (2011).
- * MILLER L. Stanley *The endogenous synthesis of organic compounds dans : The Molecular Origins of Life, Assembling pieces of the puzzle*, ed. André BRACK, Cambridge Univ. Press p.59 (1998).
- * MOINDROT Benoit *Organisation de la chromatine et son lien avec la réplication de l'ADN*, Thèse Sciences de la Vie, 2012ENSL0728, ENS-Lyon, p.36 (2012).
- * MUMMA Michael, CHARLEY Steven *The chemical composition of comets*, Annu.Rev.Astron.Astrophysics 49, 471 (2011).
- * MUSTARD J.F., EHLMANN B.L., MURCHIE S.L., POULET F., MANGOLD N., HEAD J.W., BIBRING J.-P., ROACH L.H. *Composition, Morphology, and Stratigraphy of Noachian Crust around the Isidis basin* Journal of Geophysical Research 114, E00D12 (2009).
- * NASA, Paul MAHAFFY, Ralf GELLERT, John GROTZINGER, Ken EDGETT, Michael MEYER, *Mars Curiosity Rover*, American Geophysical Union Fall Meeting, San Francisco, (03/12/2012) <http://www.ustream.tv/recorded/27478475>
<http://mars.jpl.nasa.gov/msl/multimedia/images/?s=1>
- * Nébuleuse d'OrionM42 (2006
<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2006/01/fastfacts/>

- * NELSON Roger, Clark, PEARSON N., R. H. BROWN R.H., D. P. CRUIKSHANK D.P., BARNES J., JAUMANN R., L. SODERBLOM L., C. GRIFFITH C., RANNOU , S. RODRIGUEZ S., Le MOUELIC S., LUNINE J., SOTIN C., BAINES K.H., BURATTI B.J., NICHOLSON P.D., R. M. NELSON R.M., STEPHAN K. *The Surface Composition of Titan*, Abstr. 201-02, 44th Am. Astron. Soc. Meeting, Reno, (14-19/10/2012).
- * NNA-MVONDO D., KHARE B.N., McKAY C.P., *Possible contribution in DISR spectrum of amino acids derived from Titan's tholins and tholins in organic solvents* Europ.Planet. Sci. Congress, Madrid (23-28/09/2012).
- * OMONT Alain *Molecules in Galaxies* Reports on Progress in Phys. 70, 1099 (2007).
- * PEARSON V.K., KEARSLEY A.T., SEPHTON M.A., GILMOUR I., *The labelling of meteoritic organic material using osmium tetroxide vapour impregnation*, Planetary and Space Science 55 1310–1318, (2007).
- * * PERI L. Pablo, LADD Brenton, PEPPER A. David, BONSER P. Stephen, LAFFAN W. Shawn, AMELUNG Wulf, *Carbon ($\delta^{13}\text{C}$) and nitrogen ($\delta^{15}\text{N}$) stable isotope composition in plant and soil in Southern Patagonia's native forests*, Global Change Biology 18, 311 (2012).
- * PIZZARELLO Sandra *Cosmochemical evolution and the origin of life : insights from meteorites*, dans : *Origins and evolution of life* ed. Muriel Gargaud, Purificacion Lopez-Garcia, Hervé Martin, Cambridge Univ. Press p98, (2011).

- * POSTBERG F., SCHMIDT J., HILLIER J., KEMPF S., R. SRAMA R., *A salt-water reservoir as the source of a compositionally stratified plume on Enceladus* Nature, 474, 620 (2011).
- * SAKURAI M., *Biological Functions of Trehalose as a Substitute for Water* dans : *Water and Biomolecules, Physical chemistry of Life phenomena*, eds Kunihiro Kuwajima, Yuji Goto, Fumio Hirata, Mikio Kataoka, Masahide Terazima, Springer (2009).
- * SCHWARTZ W. Alan, CHITTENDEN GL. *Synthesis of uracil and thymine under simulated prebiotic conditions*, Biosystems 9 (2-3) 87 (1977).
- * Y. SEKINE Y., SHIBUYA T., KUWATANI T., SUZUKI K., *Hydrothermal systems in Enceladus: constraints from experiments and observations*. O-16, 2011 PERC Planetary Geology Field Symposium, (05-06/11/2011).
- * SETI <http://seticlassic.ssl.berkeley.edu/reference/> <http://seti.berkeley.edu/>
- * SWAIN R. Mark, VASISHT Gautam, TINETTI Giovanna, *The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet* Nature, 452, 329 (2008).
- * TEANBY Nicholas, Patrick G. J. IRWIN G.J. Patrick, Conor A. NIXON A. Conor, de KOK Remco, VINATIER Sandrine, COUSTENIS Athena, SEFTON-NASH Elliot, CALCUTT B. Simon, FLASAR F. Michael, *Active upper-atmosphere chemistry and dynamics from polar circulation reversal on Titan*, Nature 491, 7426, 732 (2012).

- * THADDEUS Patrick *The prebiotic molecules observed in the interstellar gas* Phil. Trans. R. Soc. B 361, 1681 (2006).
- * VÍTEK P., EDWARDS H.G.M., J. JEHLICKA J., ASCASO C., de LOS RÍOS A., VALEA S., JORGE-VILLAR S.E., DAVILA A.F., WIERZCHOS J., *Microbial colonization of halite from the hyper-arid Atacama Desert studied by Raman spectroscopy* Phil. Trans. R. Soc. A 368, 3205 (2010).
- * WESTALL Frances, de VRIES T. Soukje, NIJMAN Wouter, ROUCHON Virgile, ORBERGER Béate, PEARSON Victoria, WATSON Jon, VERCHOVSKY Alexander, WRIGHT Ian, ROUZAUD Jean-Noël, MARCHESINI Danièle, SEVERINE Anne, *The 3.466 Ga "Kitty's Gap Chert" an early Archean microbial ecosystem*, dans *Processes on the Early Earth*, eds Reimold, W.U. and Gibson, R.L., Geological Society of America, p.105-131 (2006).
- * WOESE R. Carl, KANDLER Otto, WHEELIS L. Mark, *Towards a natural system of organisms: Proposal for the domains of Archea, Bacteria and Eucarya*, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 87, 4576-4579 (1990).
- * YABUTA H.Y., WILLIAMS L.B., CODY G.D., C.M.O.D. ALEXANDER C.M.O.D., PIZZARELLO S., *The insoluble carbonaceous material of CM chondrites : a possible source of discrete organic compounds under hydrothermal conditions*, Meteoritic and Planetary Science, 42, 37 (2007).
- * ZOLOTOV M.Y., TOBIE G., POSTBERG F., MAGEE B., WAITE J.H., ESPOSITO L., *Chemical and phase composition of Enceladus: Insights from Cassini data*, Abstracts Vol. 6, EPSC-DPS2011-1330 EPSC-DPS Joint Meeting-Nantes (02-07/10/2011).