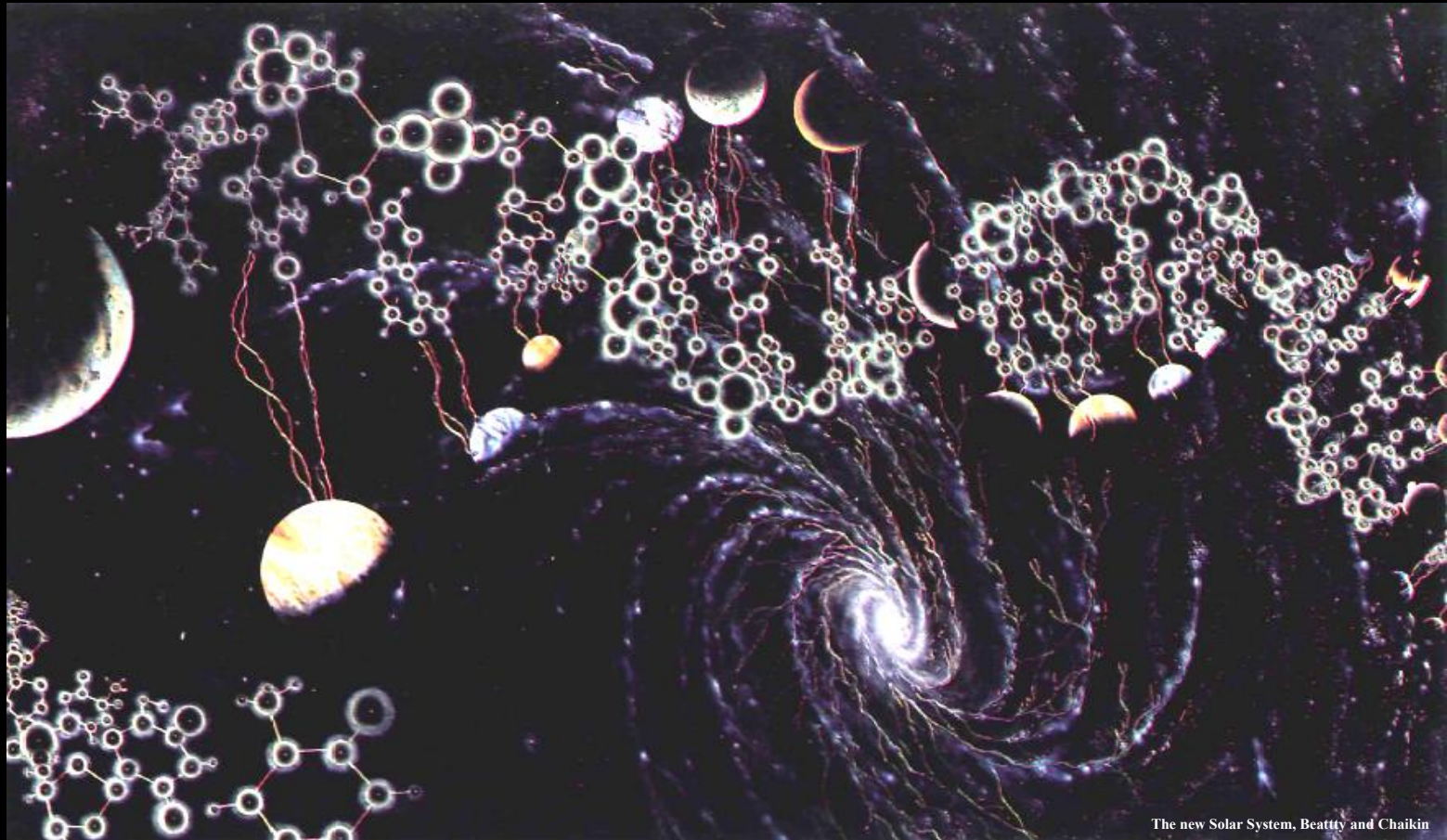


Les molécules organiques dans le système solaire



The new Solar System, Beatty and Chaikin

L3 Biologie / Biologie fondamentale
Module S5-UE6 : Biodiversité et
Origine des Espèces .

Septembre 2007

Pierre Thomas

Jusqu'en 1828, il y avait 2 sortes de chimie :

la chimie minérale



la chimie organique



Cristaux de quartz



Latex s'écoulant d'un hévéa

Avant 1828, la chimie minérale s'occupait de substances qui n'étaient pas trouvées dans (ni synthétisées par) les êtres vivants, mais extraites des roches, et autres minerais.



Un granite



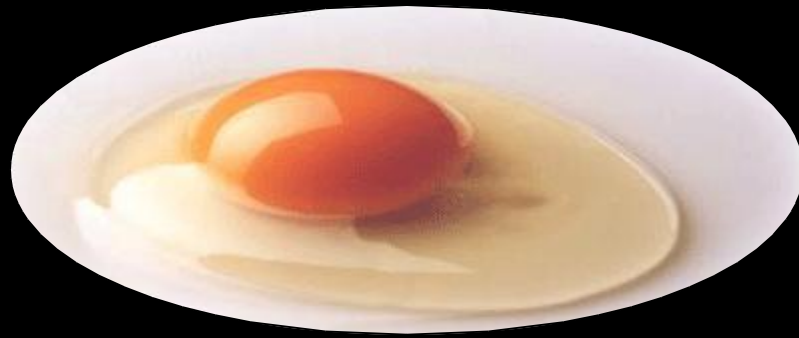
Une émeraude dans sa gangue



Coulée de fonte issue d'un haut fourneau

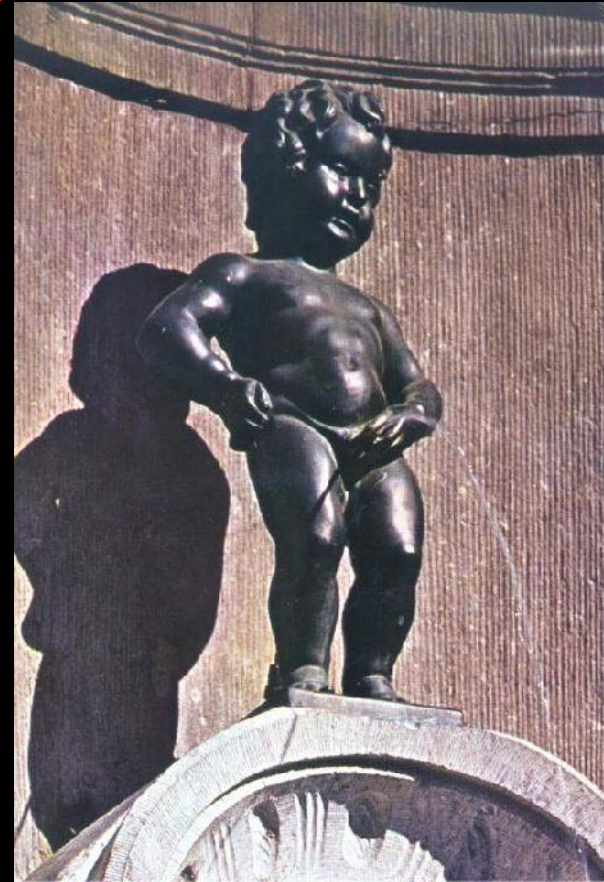
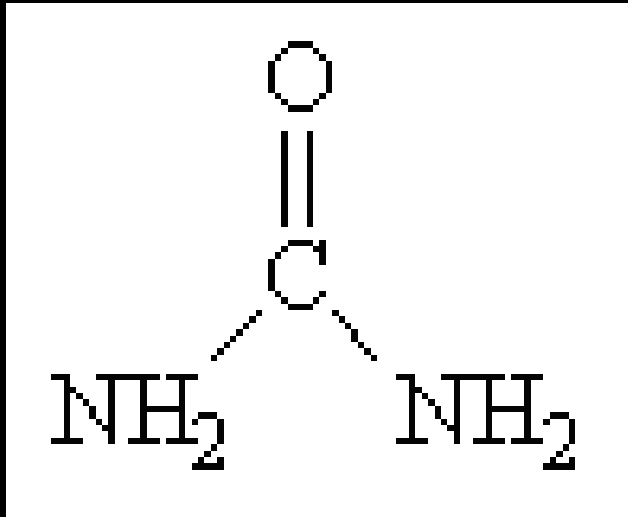
Avant 1828, la chimie organique s'occupait des substances toujours trouvées dans (et synthétisées par) les organismes vivants. Ces composés contenaient toujours du carbone et de l'hydrogène (carbone réduit), plus souvent de l'oxygène, de l'azote ...

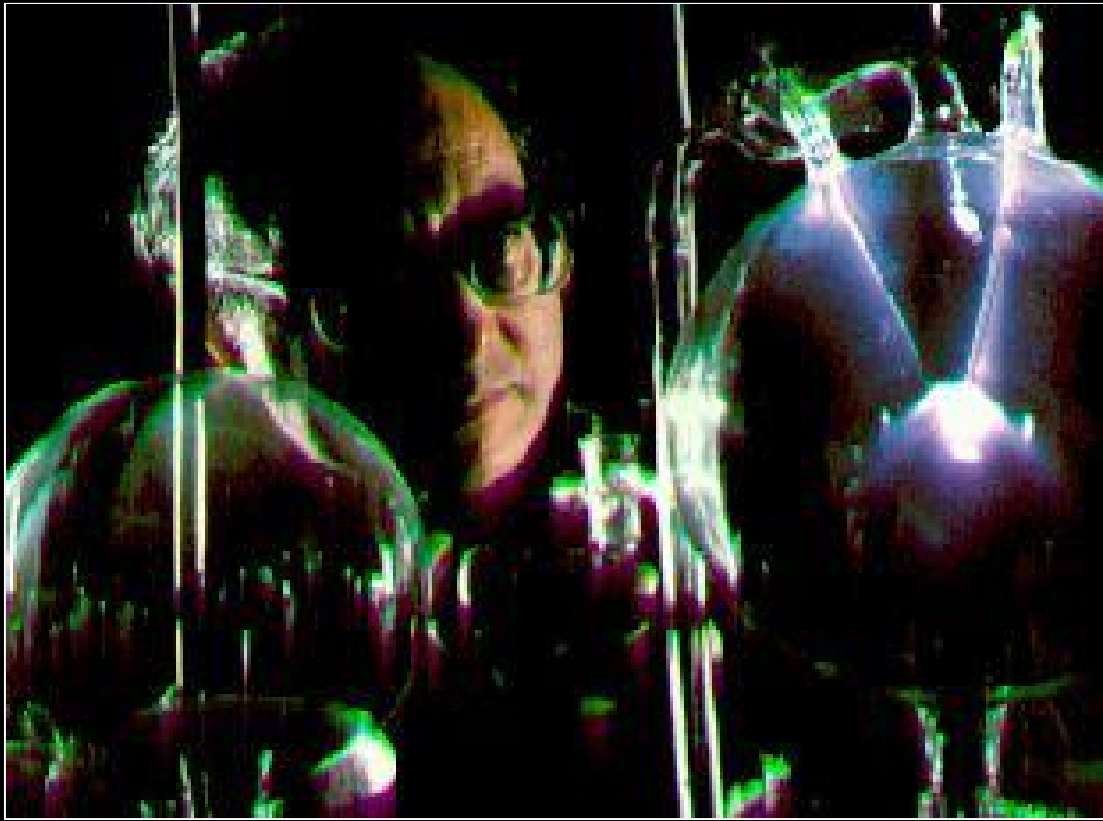
Cela allait des composés les plus simples, comme le gaz des marais (méthane = CH_4) au plus complexes comme l'albumine, l'hémoglobine ...



En 1828, le chimiste Friedrich Wöhler synthétisa en laboratoire une substance « organique » qui, à cette époque, était trouvée exclusivement dans les urines : l'urée [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$].

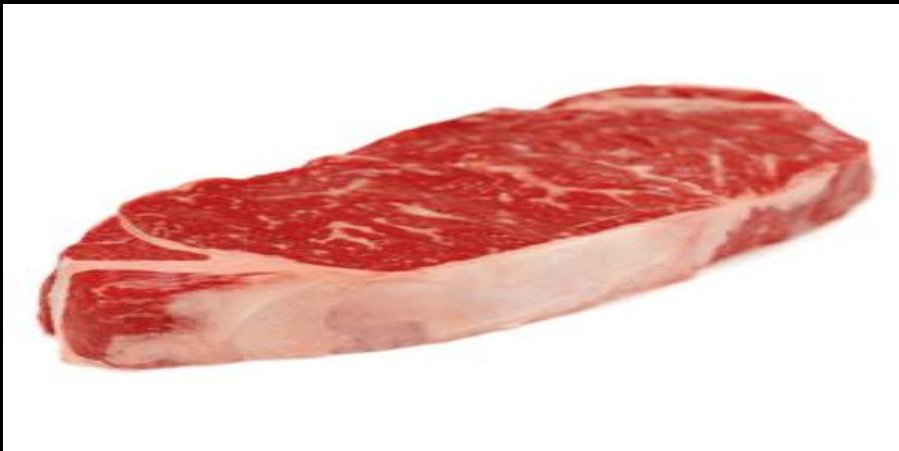
Pour cela, il a fait réagir du sulfate d'ammonium, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, sur du cyanate de potassium, KOCN .





Stanley Miller, 1953

Des substances beaucoup plus complexes furent synthétisées par la suite, comme par exemple les acides aminés (constituant des protéines) synthétisés en 1953 simplement à partir de composés de base (H_2 , CH_4 , NH_3 et H_2O)



La distinction molécule organique / molécule minérale perdait sa principale raison d'être.

Mais le terme « organique » (= molécule carbonée réduite) est resté dans l'usage.

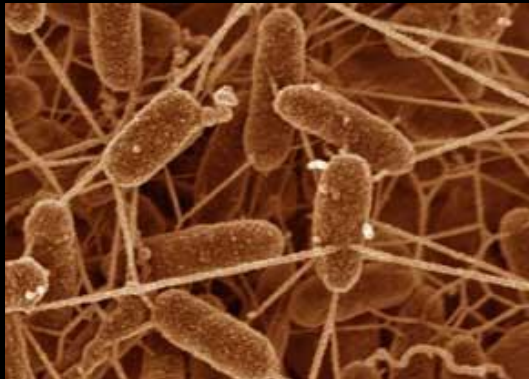
Mais il y a eu une révolution intellectuelle !

Avant, on pensait que les molécules organiques étaient créées par la vie. Maintenant, on a compris que la vie n'était qu'un assemblage, certes fort

complexe, de molécules carbonées réduites, d'où l'importance de leur étude.



Rappelons que la vie, des organismes les plus simples aux plus compliqués, est principalement faite de C_(carbone), H_(hydrogène), O_(oxygène) et N_(azote), arrangés entre autres sous forme de protéines (acides aminés) et d'ADN et d'ARN (ribose, bases azotées)



Du plus simple ...



**... au plus compliqué,
tout n'est que
C, H, O, N**



Des légumes ...



**... aux
présidents,
tout n'est que
C, H, O, N**

Les étapes théoriques de l'origine de la vie

Atomes :
C, H, O,
N
...

**Petites
molécules :**
H₂O, CH₄,
NH₃
...

Présents partout dans
l'univers, sur les planètes ...

« Moyennes »
molécules :
acides
aminés, bases
azotées,
sucres
...

**Macro-
molécules :**
protéines,
acides
nucléiques
...

**Première
cellule
(ou
premier
virus)**

Problème des chimistes, des biochimistes, des biologistes ...

**D'où viennent et où ont été faites ces
molécules « moyennes », dites
« briques élémentaires de la vie » ?**

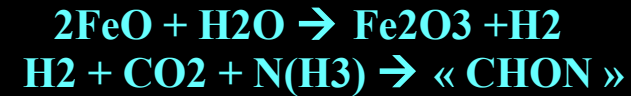
**Trois sites
possibles
quand à
l'origine
de ces
molécules
sur Terre**



**Fabriquées dans
l'atmosphère primitive.
Proposé en 1953,
abandonné depuis 20 ans.**



**Fabriquées dans l'océan
primitif par l'action
d'H₂O, CO₂ et N(H₃) sur
Fe⁺⁺ chaud (présent dans
des silicates):**



**Arrivent toutes
faites depuis
l'espace. C'est
cette proposition
que nous allons
étudier.**

**Autre petit rappel : avant de parler molécules organiques extra-terrestres, voici une galaxie, rassemblement de 100 à 1000 milliards d'étoiles.
De quoi est fait une galaxie ?**



**Dans notre galaxie, la
Voie Lactée, le
Système solaire est à
peu près là !**

Dans une galaxie, quelle est la proportion des différents éléments ? Sur 1 000 000 000 d'atomes, il y a (environ) :

Hydrogène : 910 580 000

Hélium : 88 000 000

Oxygène : 800 000

Carbone : 300 000

Azote : 100 000

Néon : 100 000

Silicium : 30 000

Magnésium : 30 000

Fer : 30 000

Soufre : 12 000

Aluminium : 3 000

calcium : 3 000

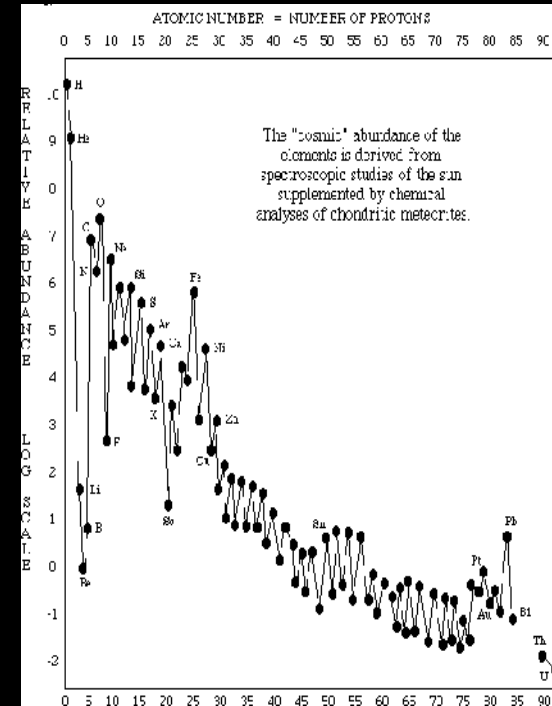
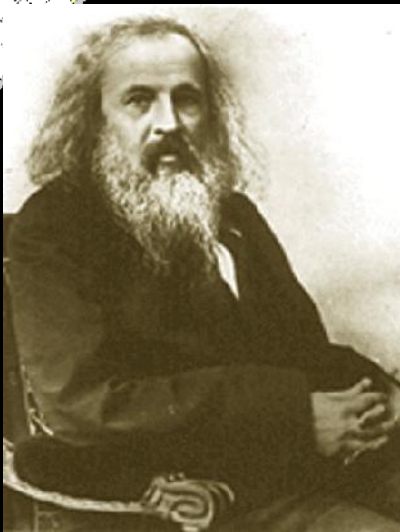
Nickel : 3 000

Sodium : 3 000

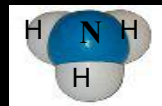
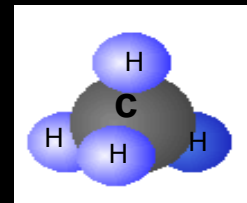
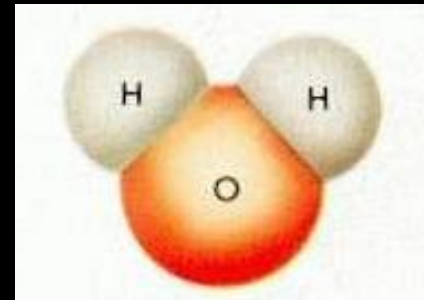
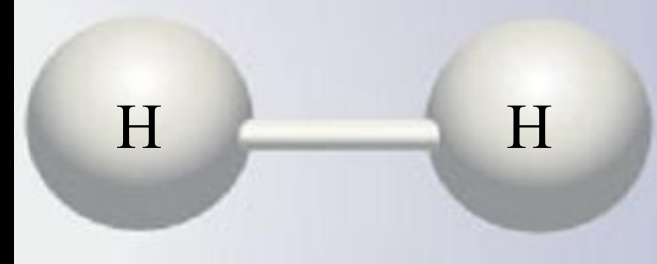
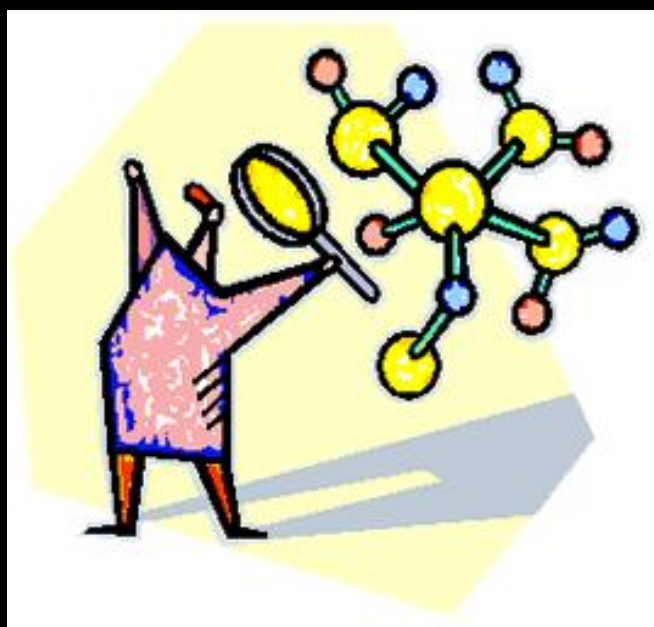
6 000

Tous les autres :

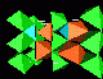
Atome situés à l'extrême droite de la classification de Mendeleiev, totalement « asociaux »



Avec tous ces atomes, que peut-on faire comme molécules ? Vu que l'hydrogène, l'oxygène, le carbone et l'azote sont les 4 éléments réactifs les plus abondants (hors gaz rares), rien d'étonnant que l'on puisse faire beaucoup d' H_2O et de « CHON »



H_2O (l'eau) est la 2ème molécule la plus abondante de l'univers, suivie, dans l'ordre, de CH_4 et autres molécules organiques, CO , NH_3 , silicates ...



**On retrouve ces molécules, dont H₂O, CH₄,
molécules organiques ..., avec des spectres
Infra-rouge ou « centimétriques » dans les
nébuleuses (= nuages moléculaires) , nuages de
gaz et de poussières internes à notre galaxie**



Quelles sont les molécules principales « théoriques » de ces nébuleuses ?



Hydrogène
Oxygène
Carbone
Azote
Silicium
Magnésium
Fer
Aluminium
Calcium
He reste solitaire

H₂ (hydrogène moléculaire)
(molécule n° 1)

H₂O = eau
(Molécule n° 2)

CH₄, NH₃, CO, CNH
et CHON = matière
organique (molécules n° 3)

Silicates variés = cailloux
(molécules n° 4)

Fer métallique
(« molécule » n° 5)

La liste des petites molécules (poly-atomiques) les plus abondantes effectivement identifiées dans ces nuages moléculaires

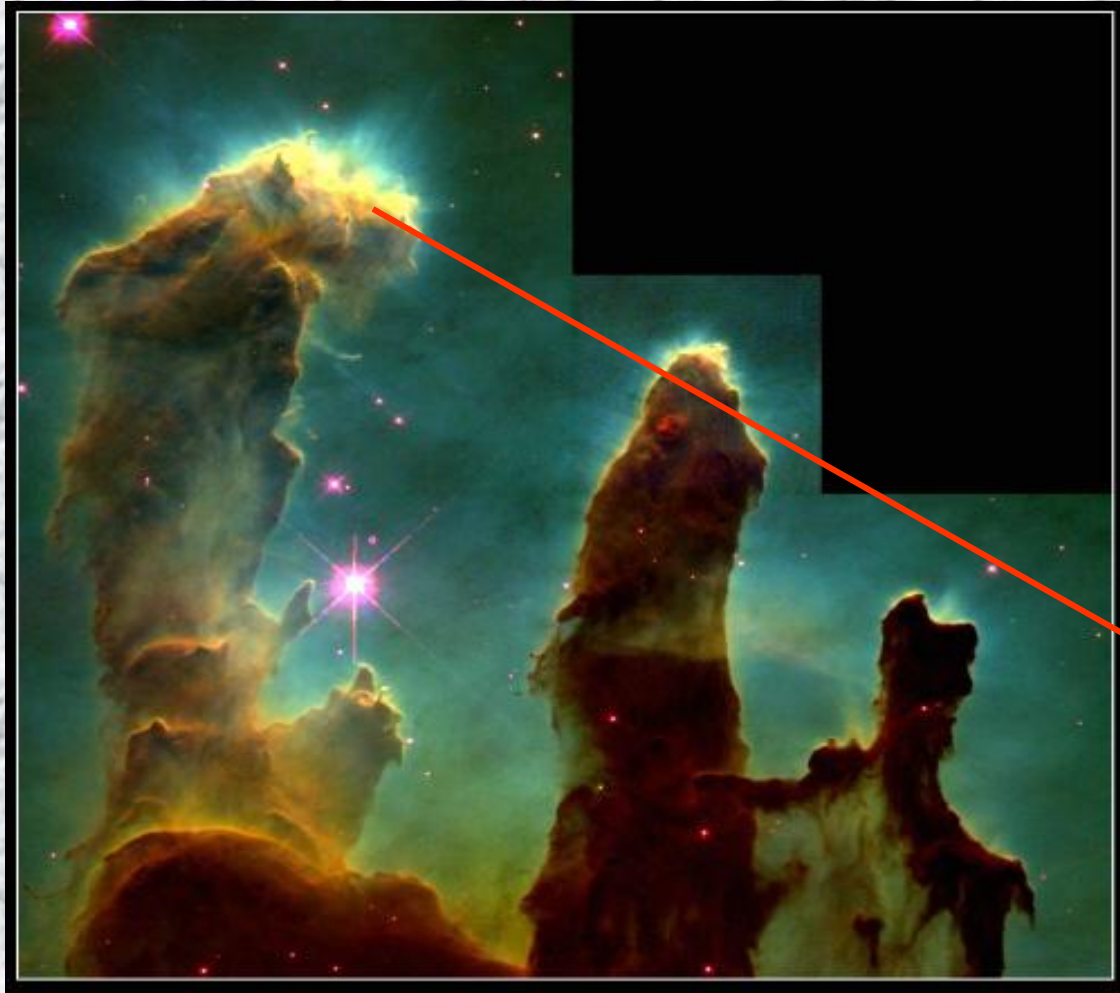
Nombre
d'atomes
par
molécules

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	13
H_2 CH CH^+ CN CO CS OH SO NS SiO SiS C_2 $\text{CO}^+ ?$ NO	H_2O HCO HCO^+ CCH HCN HNC N_2H^+ H_2S OCS SO_2 $\text{HNO} ?$ HCS^+ FeO	H_2CO NH_3 HNCO H_2CS C_3N C_2H_2 HNCS $\text{HCO}_2 ?$	HCOOH HC_3N CH_2N_2 NH_2CN H_2CCO $\text{CH}_4 ?$ C_4H MgSiO_3	HCH_2OH NH_2CHO CH_3CN CH_3SH	$\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$ CH_3CHO HC_3N CH_3NH_2 CH_2CHCN Mg_2SiO_4	CH_3COOH	$(\text{CH}_3)_2\text{O}$ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CN}$ HC_7N	$\text{CH}_2\text{NH}_2\text{COOH}$	HC_5N	HC_{11}N

La
glycine,
le plus
simple
des
acides
aminés



Quelques détails sur cette matière organique des nuages moléculaires



Milieu interstellaire dense :

- basse température: 10 à 100K
- rayonnements intenses
- densité de 10^6 à 10^{12} H par cm^{-3} (10^{19} molécules dans 1 bar d'air à 300 K)

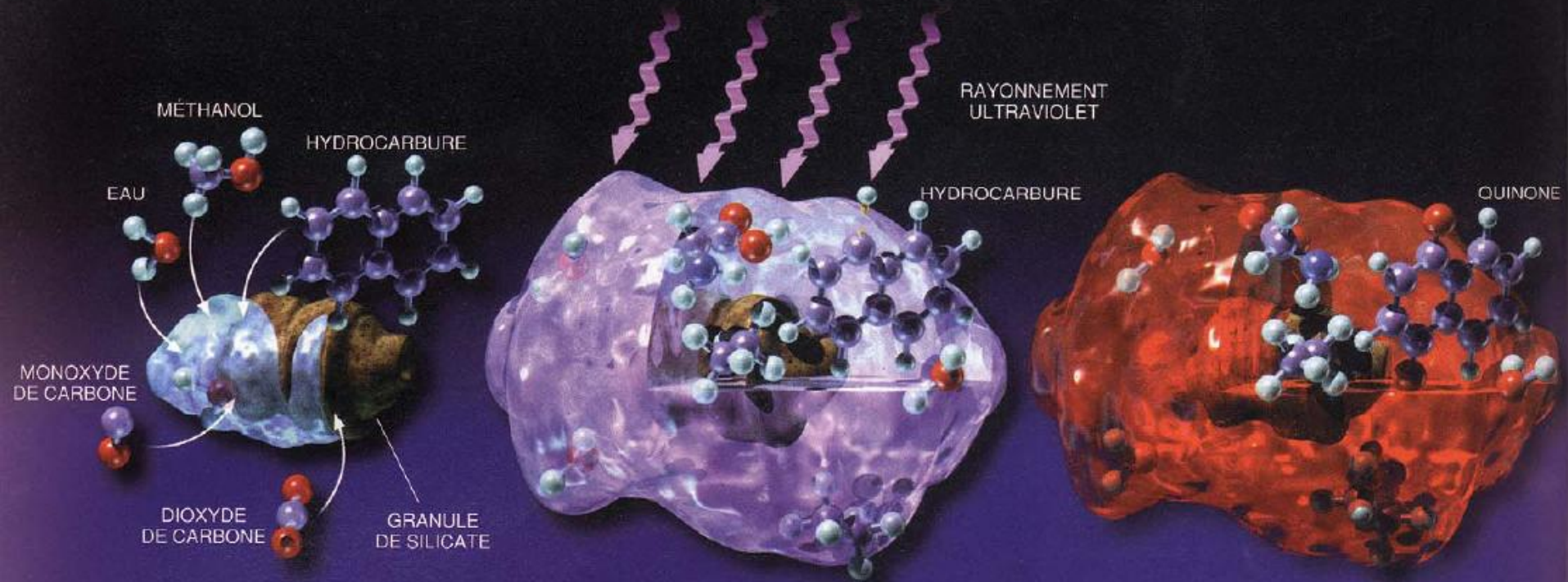
D/H très élevé :

**$0,5 \text{ à } 10 \cdot 10^{-2}$
(Terre = 10^{-4})**

**Nombreuses espèces
radicalaires**

**→ organosynthèse
très particulière**

Modélisation de ce qui « doit » se passer sur les grains interstellaires et dans les nébuleuses avant leur collapse : les petites molécules se polymérisent



Grains de silicates recouvert de « Givre », où se passent des réactions de complexification sous l'action des UV et du rayonnement cosmique

Bernstein et al., PLS 1999

H₂
(numéro 1)

H₂O = eau
(numéro 2)

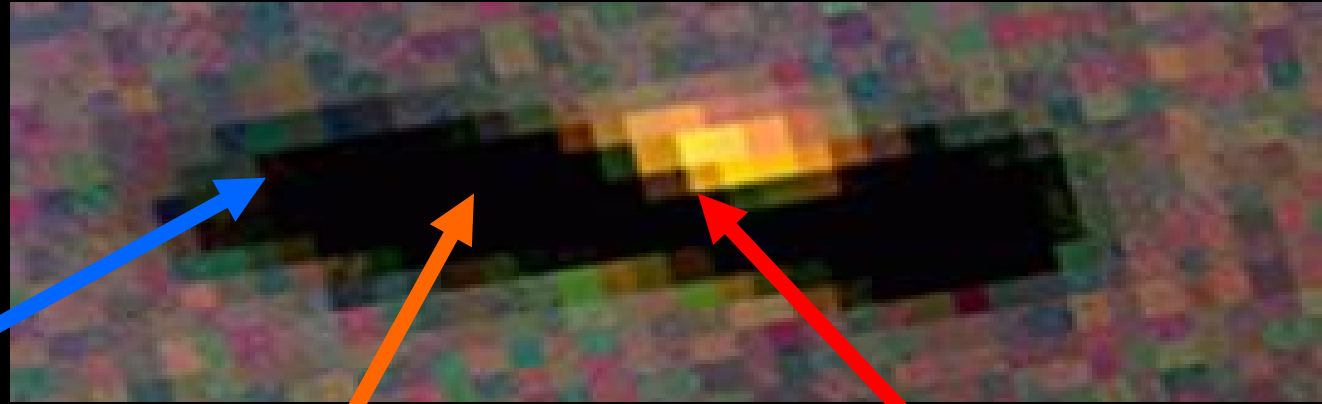
**CHON = matière
organique et NH₃**
(numéros 3)

**Silicates variés =
cailloux (numéro 4)**

Fer métallique
(numéro 5)

He

Regardons (dans Orion) un disque proto-planétaire, système stellaire en formation

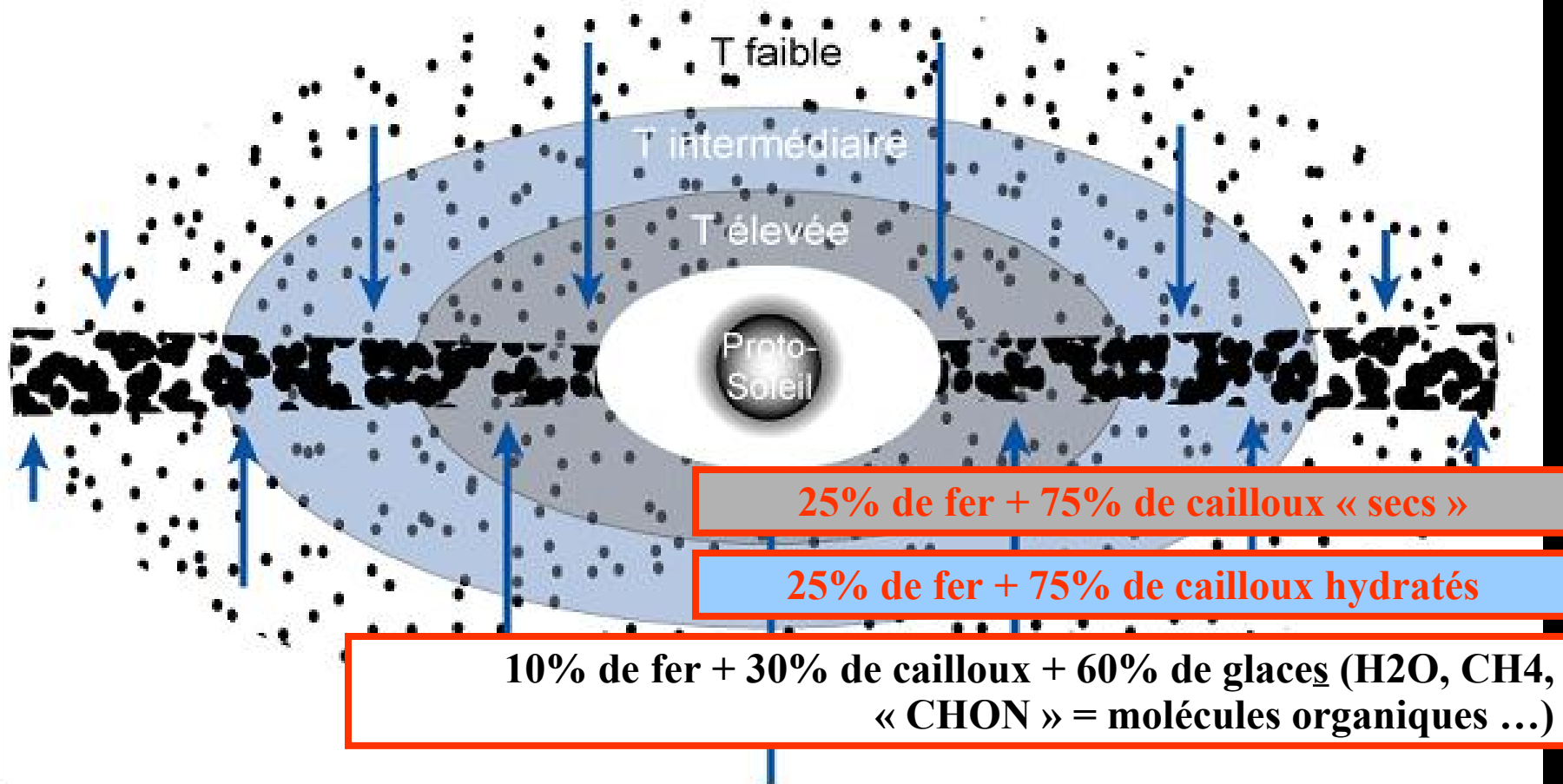


Il fait froid :
H₂O, CHON,
NH₃, Silicates et
Fer sont sous
forme de
poussières
solides, H₂ et He
sont encore
gazeux

Il fait tiède : les
poussières de
Silicates et Fer
s'hydratent
légèrement ; H₂,
He, H₂O,
CHON et NH₃
sont encore
gazeux

Il fait chaud :
Silicates et Fer
sont sous forme
de poussières
solides, H₂, He,
H₂O, CHON et
NH₃ sont encore
gazeux

Températures de condensation




Il doit « théoriquement » y avoir beaucoup de matière organique dans le système solaire externe, beaucoup moins dans le système solaire interne. Visitons le système solaire en cherchant cette matière organique !

Sur Mercure, Vénus, la Lune, Vénus et Mars, pas de molécules organiques détectées à ce jour, si ce n'est des micro-traces de méthane dans l'atmosphère de Mars, d'origine(s) très discutée(s).




**Chercher des
molécules
organiques
dans les
terrains péri-
polaires
martiens sera
l'une des tâches
principales de
la mission
Phoenix, dont le
lancement a eu
lieu le 4 août
2007**

**Jet Propulsion Laboratory**
California Institute of Technology

+ View the NASA Portal

Search JPL

JPL HOMEEARTHSOLAR SYSTEMSTARS & GALAXIESTECHNOLOGY

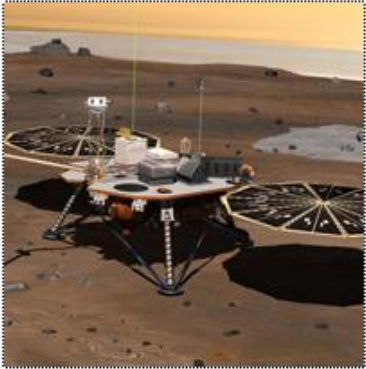


Solar System

IMAGESMULTIMEDIA**NEWS**MISSIONSPUBLIC SERVICESKIDSEDUCATIONABOUT JPL

TOP STORIES
NEWS RELEASES
FEATURE STORIES
SPOTLIGHTS
PROFILES
MISSION FACT SHEETS
MISSION PRESS KITS
MEDIA VISITS
MEDIA CONTACTS
NEWSLETTERS
ANNUAL REPORTS

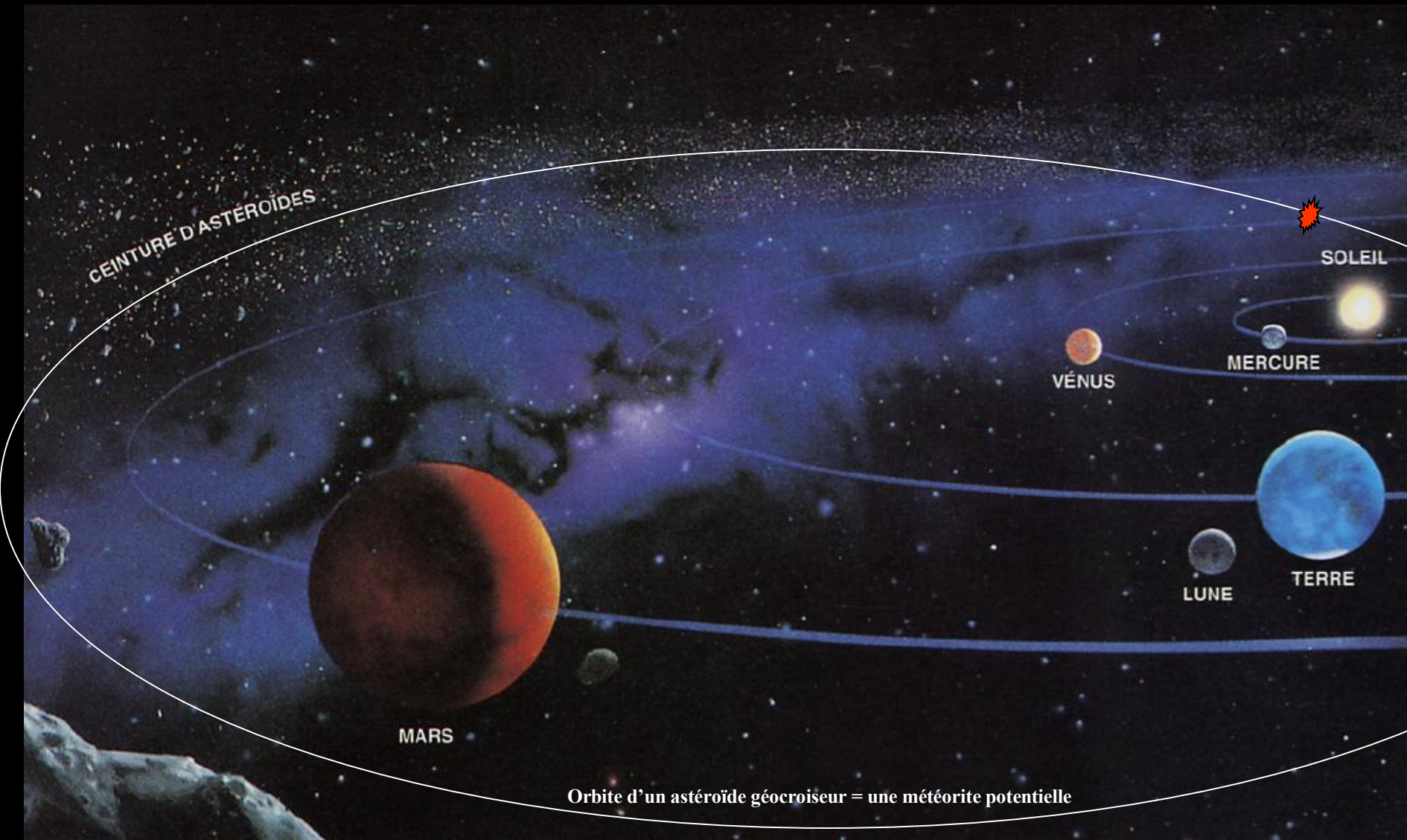
News Releases
NASA Readies Mars Lander for August Launch to Icy Site
July 09, 2007
PASADENA - NASA's next Mars mission will look beneath a frigid arctic landscape for conditions favorable to past or present life.
Instead of roving to hills or craters, NASA's Phoenix Mars Lander will claw down into the icy soil of the Red Planet's northern plains. The robot will investigate whether frozen water near the Martian surface might periodically melt enough to sustain a livable environment for microbes. To accomplish that and other key goals, Phoenix will carry a set of advanced research tools never before used on Mars.
First, however, it must launch from Florida during a three-week period beginning Aug. 3, then survive a risky descent and landing on Mars next spring.


[+ Larger image](#)
Artist concept of Phoenix lander on Mars. Image credit: NASA/JPL/UA/Lockheed Martin
[+ Full image and caption](#)
Related Links:
[+ Video: Phoenix, Hunting for Habitats](#)

Receive JPL news
[+ Free Public E-mail](#)
[+ RSS feed](#)
[+ Media E-mail List](#)

**Les News Releases de la NASA
du 9 juillet 2007**

Après Mars, les astéroïdes, dont on possède des échantillons : les météorites





33 km

**Voici un
astéroïde,
Eros
(survol Nasa 2000)**

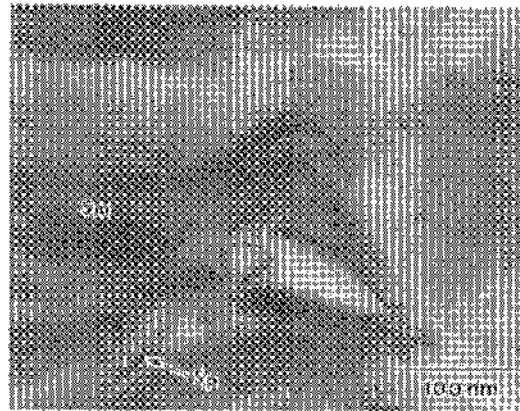
**En voici un autre, Itokawa
(2005, mission japonaise Hayabusa)**



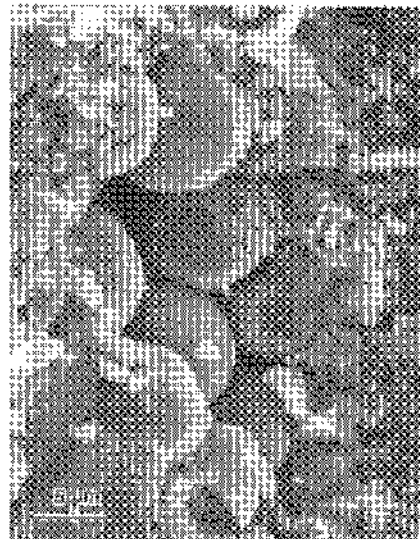
540 m

L'eau dans les météorites . Il y en a jusqu'à 10%, inclus dans des minéraux hydroxylés. Ces météorites se sont formées (ou ont été altérées) en présence d'H₂O, à $T < 300^{\circ}\text{C}$

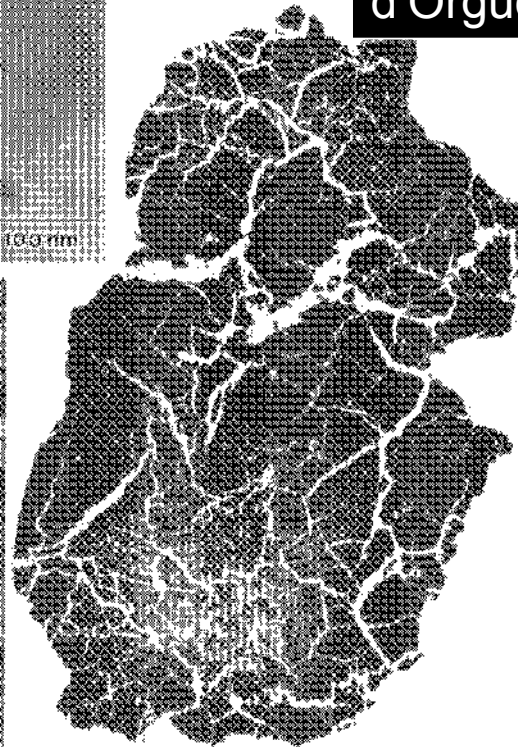
Image TEM:
Smectite (argile) et
serpentine



Veines de phosphates
dans la chondrite
d'Orgueil



Spherules de
magnetite,
oxyde de fer



Le carbone dans les météorites. Il y en a dans une classe de météorite, les chondrites carbonées

altération hydrothermale

métamorphisme haute température



CI: Ivuna



CM: Murchison



CO, CV: Allende

- CI: de 3 à 5 % de C
- CM: de 0,6 à 3 % de C
- CV-CO: de 0,2 à 1 % de C



Matière organique

Graphite

SiC

Diamants

Carbonates

La matière organique dans les chondrites carbonées : jusqu'à 5 % en poids



Majoritairement sous forme de macromolécules insolubles (MOI)

Une faible proportion est constituée de molécules solubles (dans l'eau ou d'autres solvants)

**Questions : (1) quelles sont ces molécules ?
(2) Sont-elles d'origine extra-solaire ou d'origine interne au système solaire ?**

Composition élémentaire de la MOI

Attaque HF/HCl

 résidu minéral : 8,9% Orgueil et 21,8% Murchison (en masse)

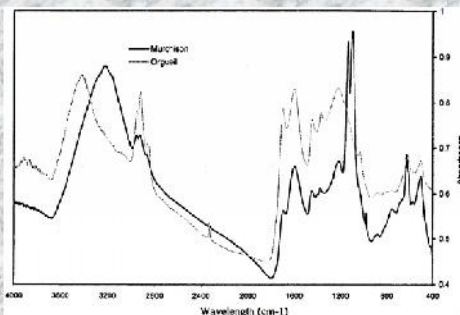
Formules structurales « type » :

- $\text{C}_{100}\text{H}_{72}\text{O}_{18}\text{N}_{3,5}\text{S}_2$ pour Orgueil
- $\text{C}_{100}\text{H}_{70}\text{O}_{22}\text{N}_3\text{S}_{6,5}$ pour Murchison

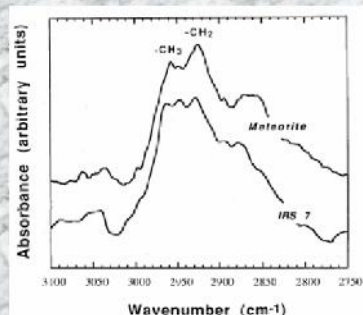


Comment se répartissent ces éléments dans la structure moléculaire de la MOI ?

Le spectre infrarouge de la MOI

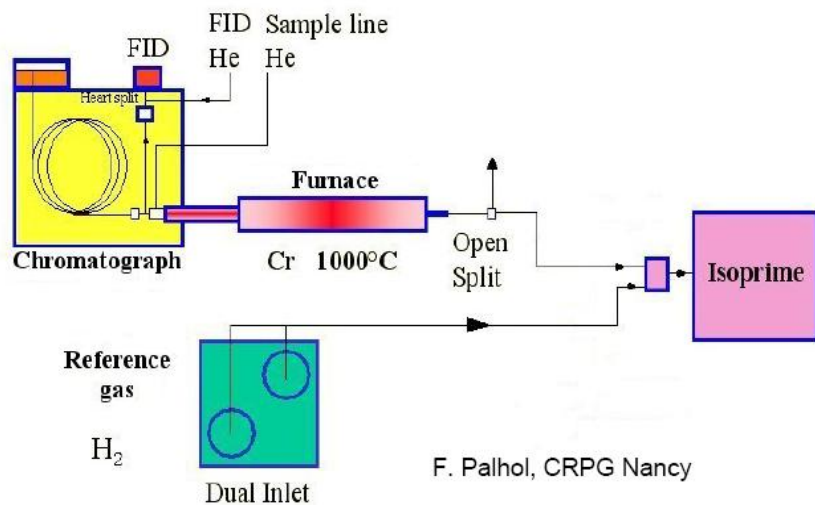


Gardinier et al, EPSL 2000



Ehrenfreund et al. A&A, 2001

**Il est
extraordinairement
difficile d'analyser des
macro-molécules
insolubles, surtout
quand on en dispose
que de petites quantités**

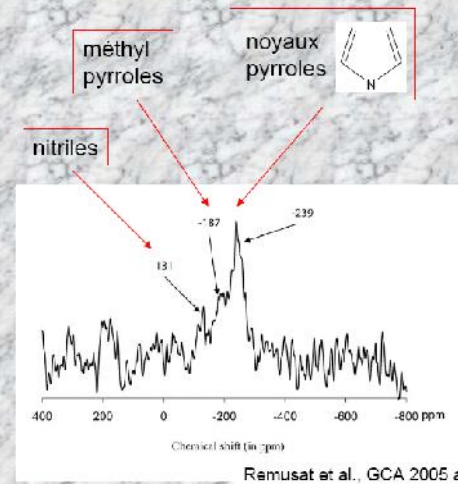


F. Palhol, CRPG Nancy

RMN ^{15}N à l'état solide

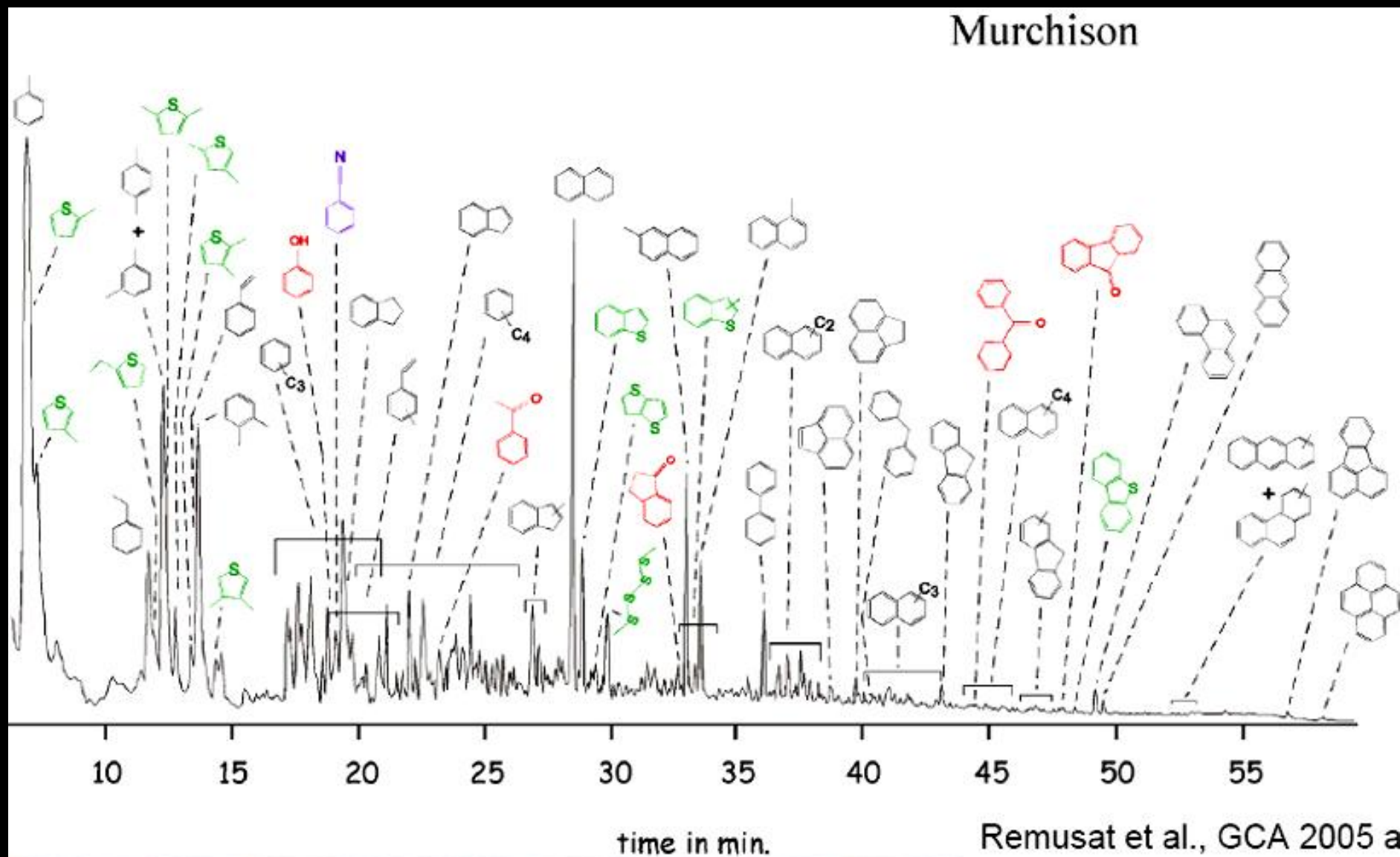
- Permet de caractériser l'environnement chimique de l'azote dans la MOI et donc les fonctions azotées
- Prépondérance de noyaux pyrroles. La présence de fonctions amides (~260 ppm) ne peut être exclue

Azote dans hétérocycles
or PAHs avec hétérocycles
supposés dans milieu
interstellaire

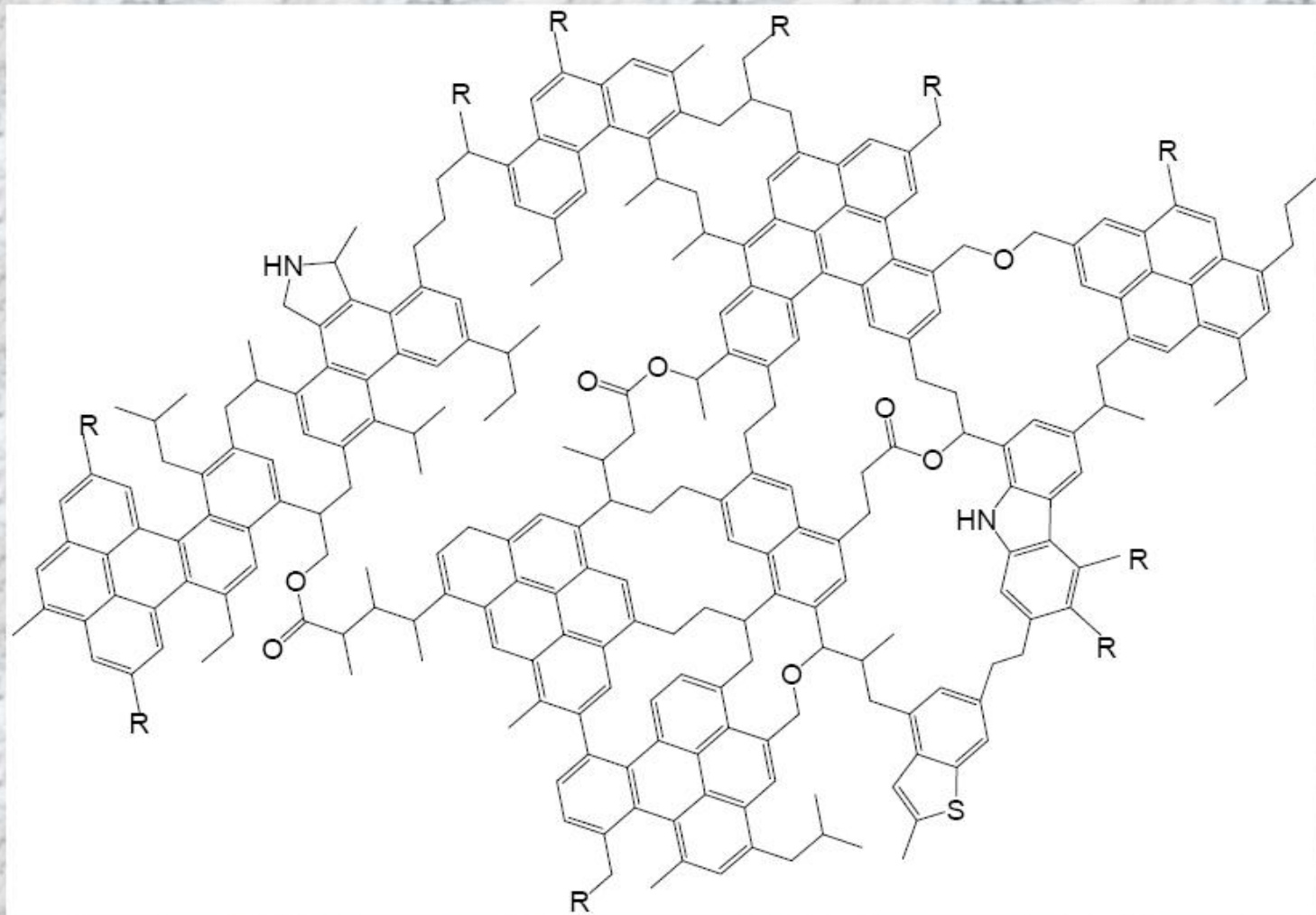


Remusat et al., GCA 2005 a

Exemple de résultat obtenu par pyrolyse, CPG et SM



Modèle moléculaire: cela pourrait ressembler à ça



Les composés organiques solubles, donc facilement analysables. Connus depuis longtemps, mais on soupçonnait la contamination terrestre

Concentrations and Molecular Characteristics of Soluble Organic Compounds of Meteorites^a

Class	1 Concentration (ppm)	2 Compounds Identified	3 Chain Length	4 Homologous Decline	5 Branched- or Straight-Chain Predominance	6 Structural Diversity	7 Chirality
<u>Amino acids</u>	60	74	C ₂ -C ₇	yes	Br	yes	R
Aliphatic hydrocarbons	> 35	140	C ₁ -C _{≈23}	?	$\left\{ \begin{array}{l} < C_{10} \text{ Br} \\ > C_{10} \text{ St} \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} \text{yes} \\ \text{no} \end{array} \right.$?
Aromatic hydrocarbons	15-28	87	C ₆ -C ₂₀	NA	(Br)	yes	?
Carboxylic acids	> 300	20	C ₂ -C ₁₂	yes	Br	yes	?
Dicarboxylic acids	> 30	17	C ₂ -C ₉	yes	Br	yes	R
Hydroxycarboxylic acids	15	7	C ₂ -C ₆	yes	St	yes	R
<u>Purines & Pyrimidines</u>	1.3	5	NA	NA	NA	no	NA
Basic N-heterocycles	7	32	NA	NA	NA	yes	?
Amines	8	10	C ₁ -C ₄	yes	Br	yes	?
Amides	55-70	> 2	NA	NA	NA	yes	?
Alcohols	11	8	C ₁ -C ₄	yes	?	yes	?
Aldehydes & Ketones	27	9	C ₁ -C ₅	yes	?	yes	?
Total	≥560	411					

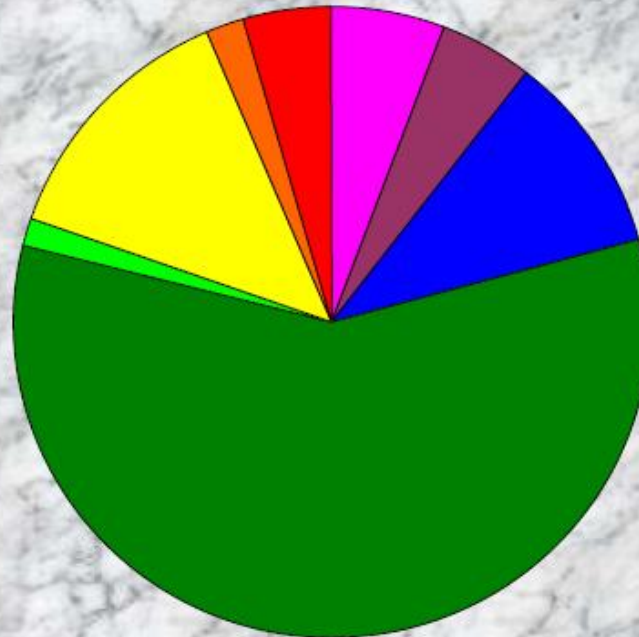
^aNA: not applicable; Br: branched; St: straight; R: racemic; ?: unknown.

Le nombre de composés (74 acides aminés !) et les propriétés optiques (mélange D et G) montrent l'origine extra-terrestre de ces composés

Les composés solubles , minoritaires, mais présents

origine abiotique:

- critères moléculaires (*diversité d'isomères*)
- critères isotopiques (*enrichissements isotopes lourds*)

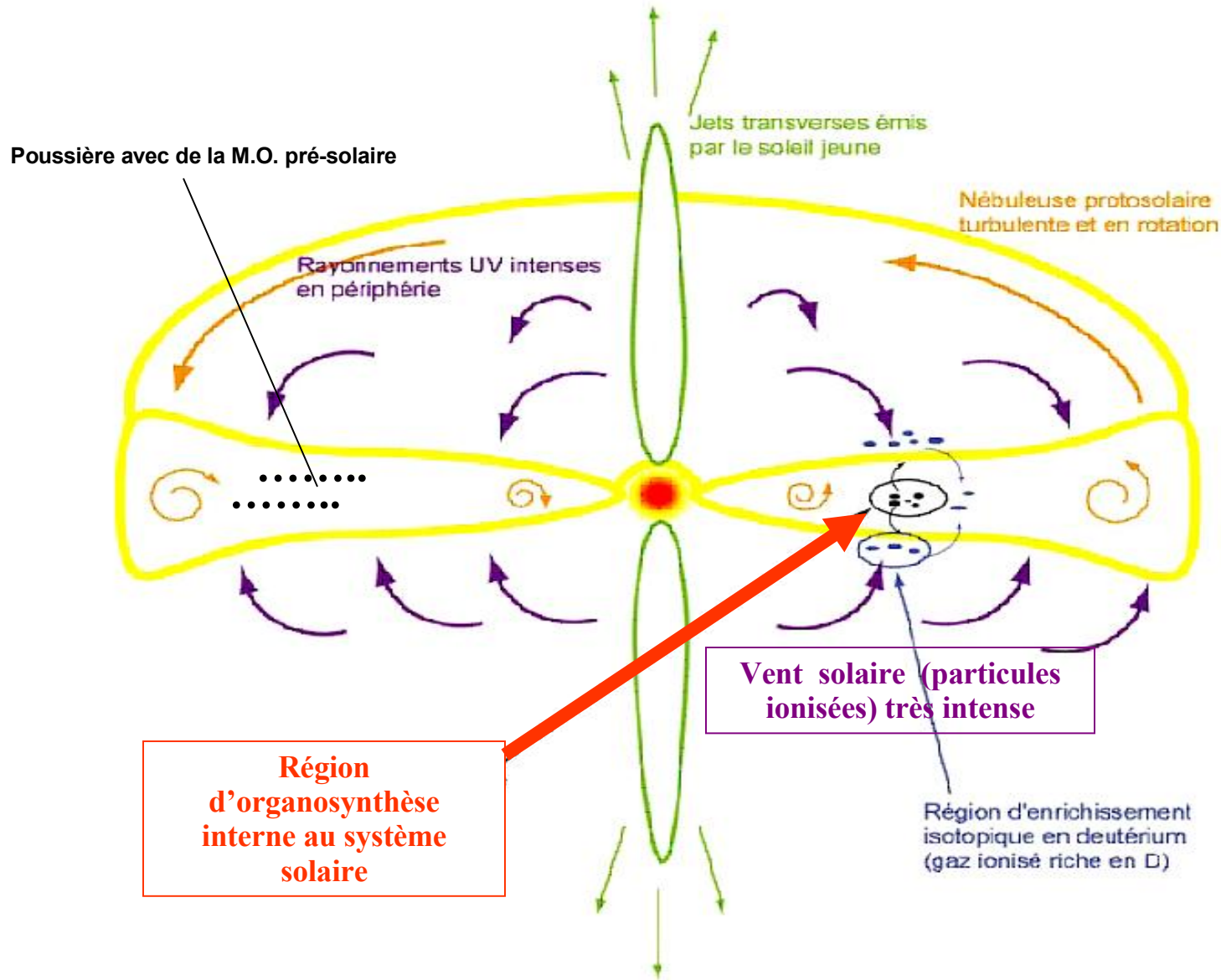


- hydrocarbures aliphatiques
- hydrocarbures aromatiques
- acides aminés *
- acides carboxyliques
- hétérocycles azotés *
- amines et amides
- alcools
- aldéhydes et cétones

molécules d'intérêt biologique:
rôle dans l'apparition et le développement de la vie ?

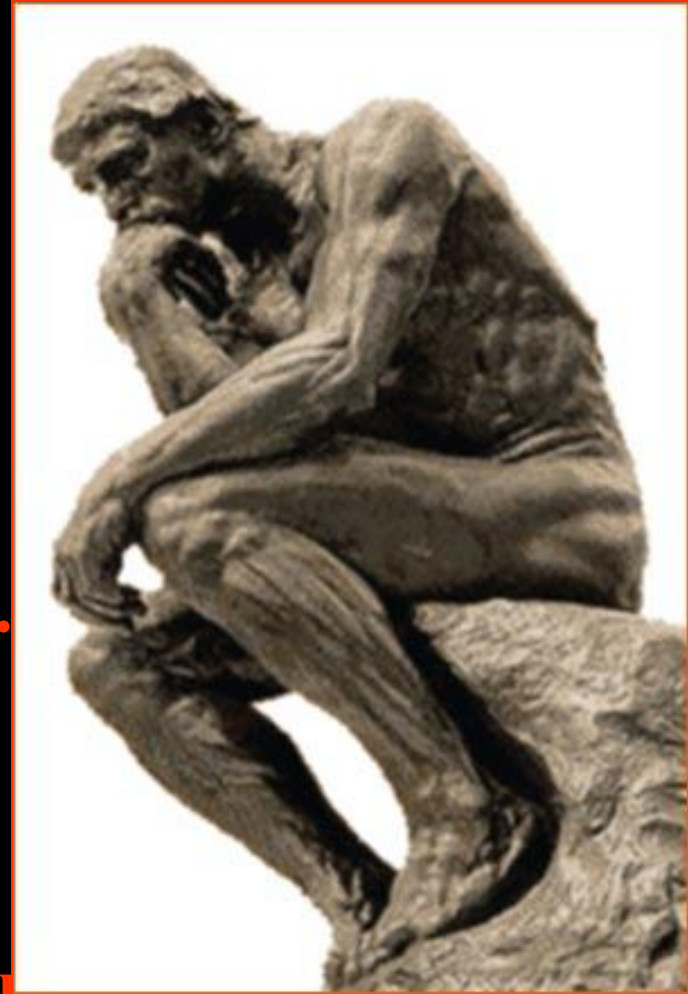
- * Constituant des protéines
- * Constituant principaux des ADN et ARN

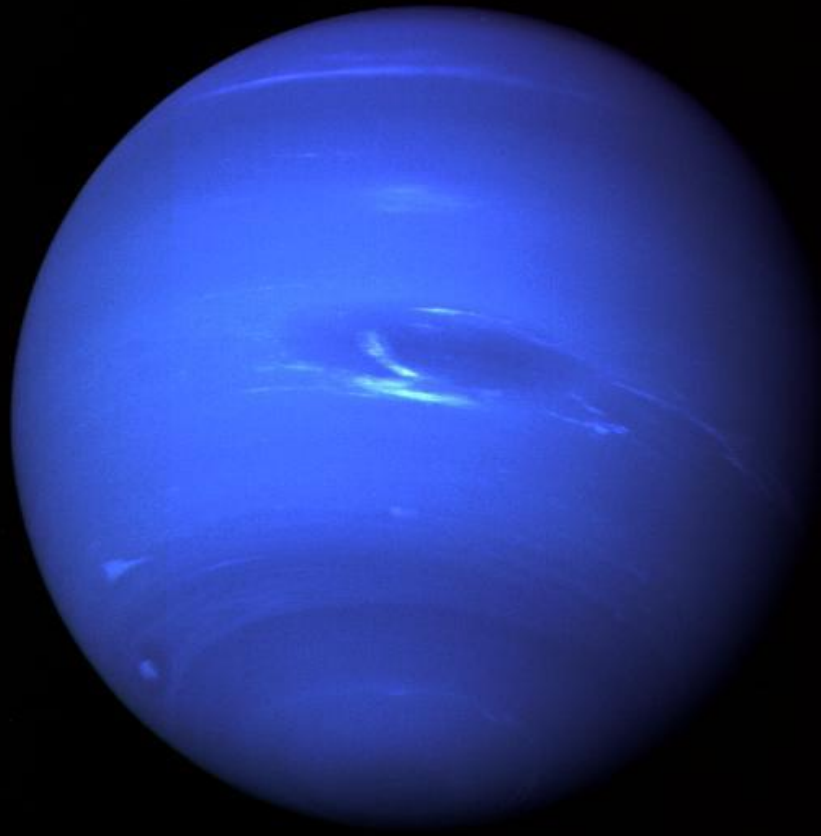
La matière organique des météorites : conclusion en image



Conclusions :

- Les météorites contiennent des molécules organiques.
- Il y a des molécules simples et beaucoup d'autres très complexes.
- Les isotopes de l'H, les spectres IR ... montrent qu'il ne s'agit pas que de MO extra solaire ; il y a eu organo-synthèse in situ.
- Il y a eu des réactions complexes entre molécules organiques et glace d'H₂O.
- Certaines de ces molécules ont un intérêt pré-biotique évident (mais il manque le ribose) .





Au delà des astéroïdes, les planètes géantes

Caractéristiques de la surface supérieure des nuages

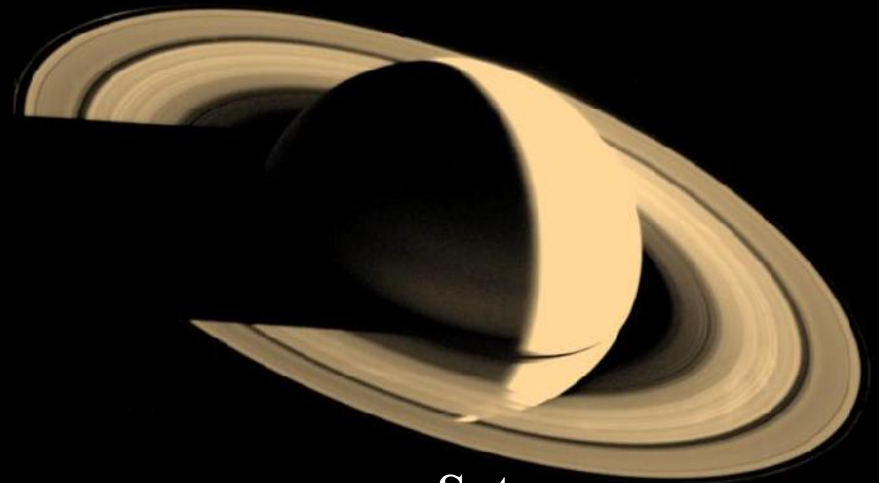
»	
Pression atmosphérique	70 kPa
Hydrogène H ₂	>81 %
Hélium He	>17 %
Méthane CH ₄	0,1 %
Eau H ₂ O (vapeur)	0,1 %
Ammoniac NH ₃	0,02 %
Éthane C ₂ H ₆	0,0002 %
Hydruure de phosphore PH ₃	0,0001 %
Sulfure d'hydrogène SH ₂	<0,0001 %

**Et en leur cœur, un noyau gros comme plusieurs
Terres, fait de fer + silicates + glaces.**

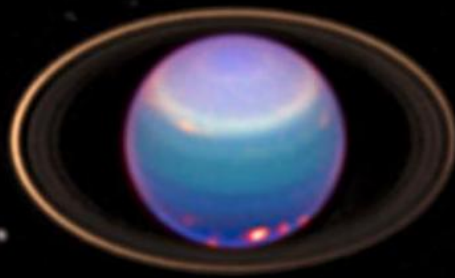
Je n'en parlerai pas plus que cela.



Jupiter



Saturne

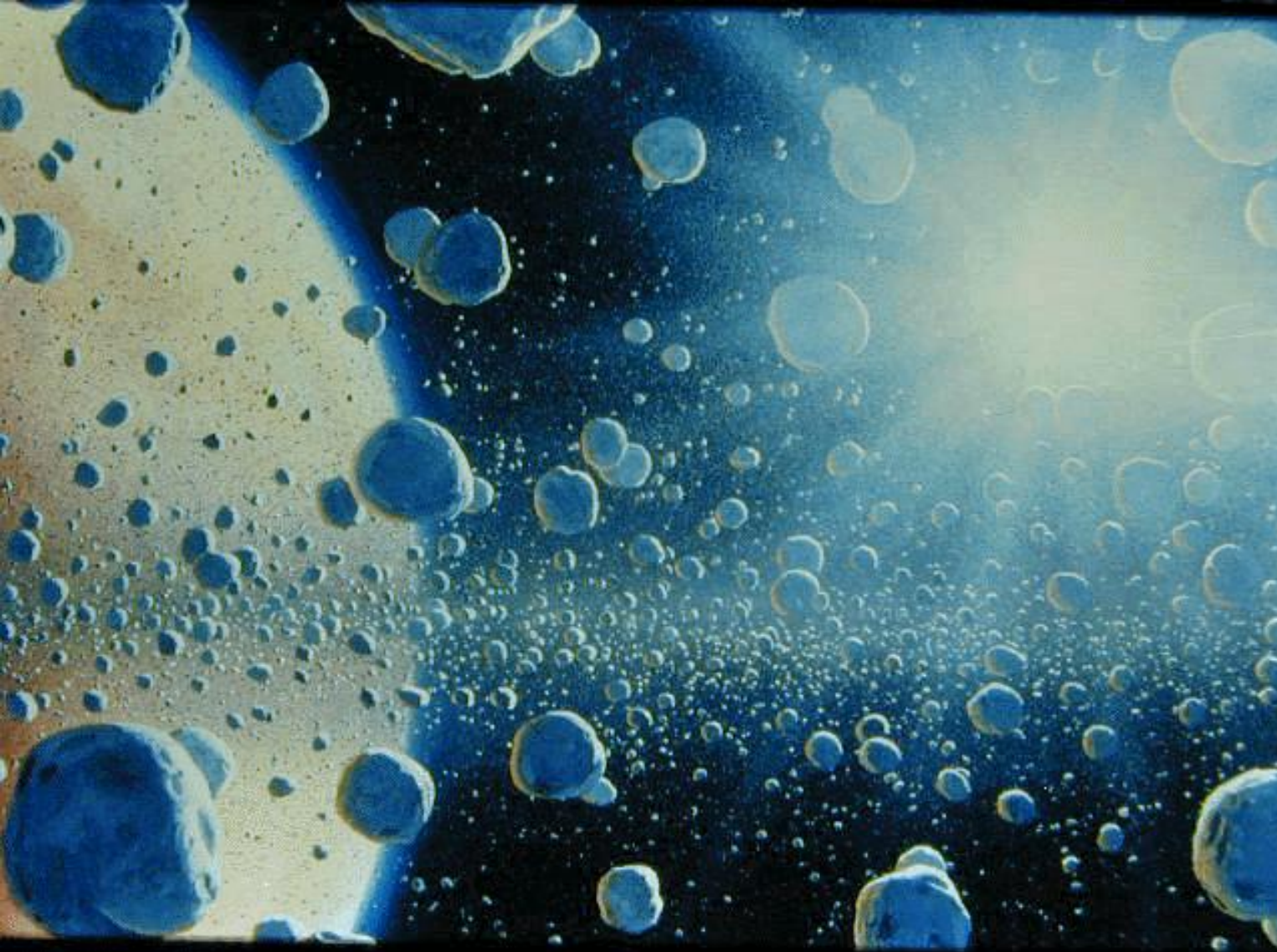


Uranus



Neptune

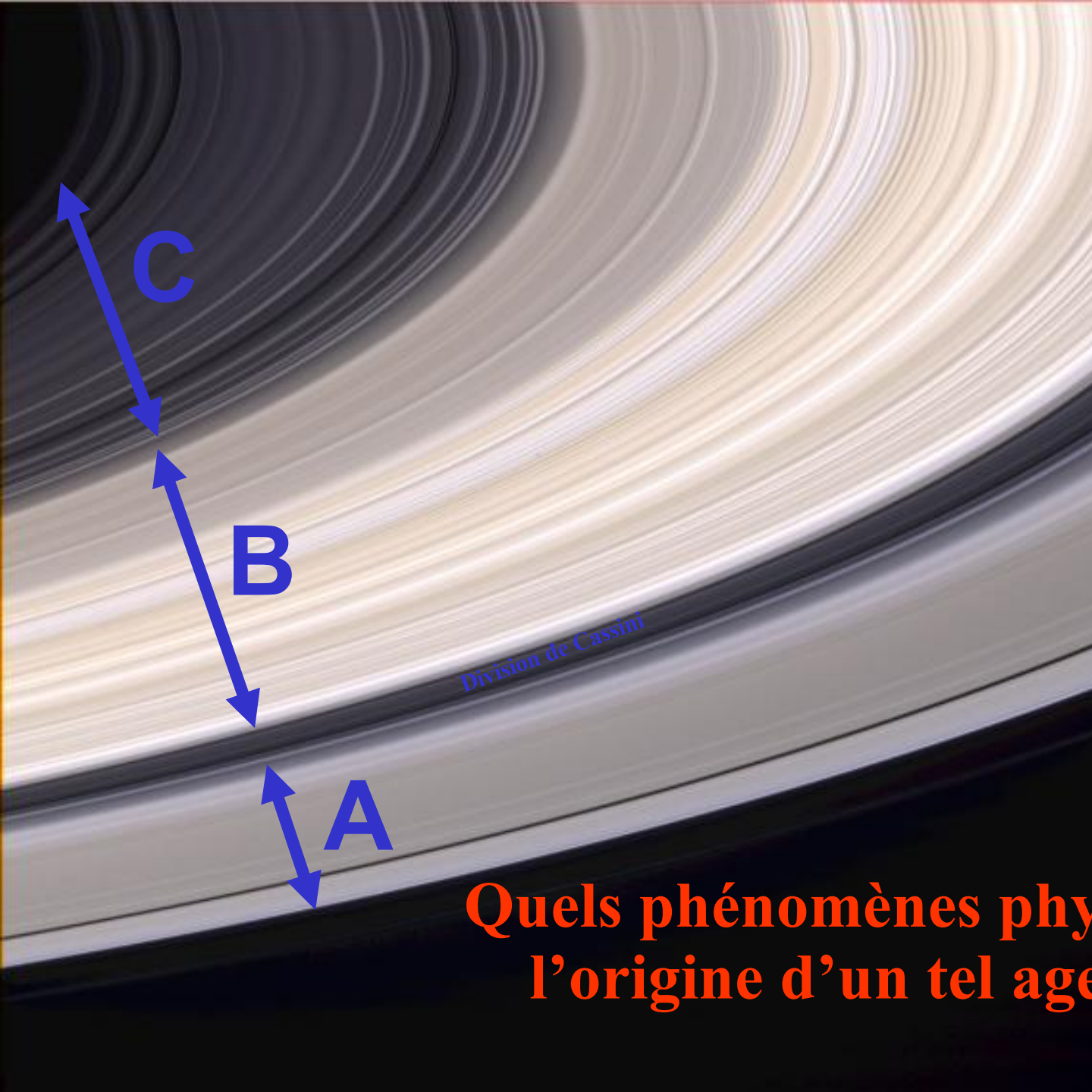
**Les planètes géantes ont toutes des anneaux.
Regardons rapidement les plus beaux,
ceux de Saturne.**



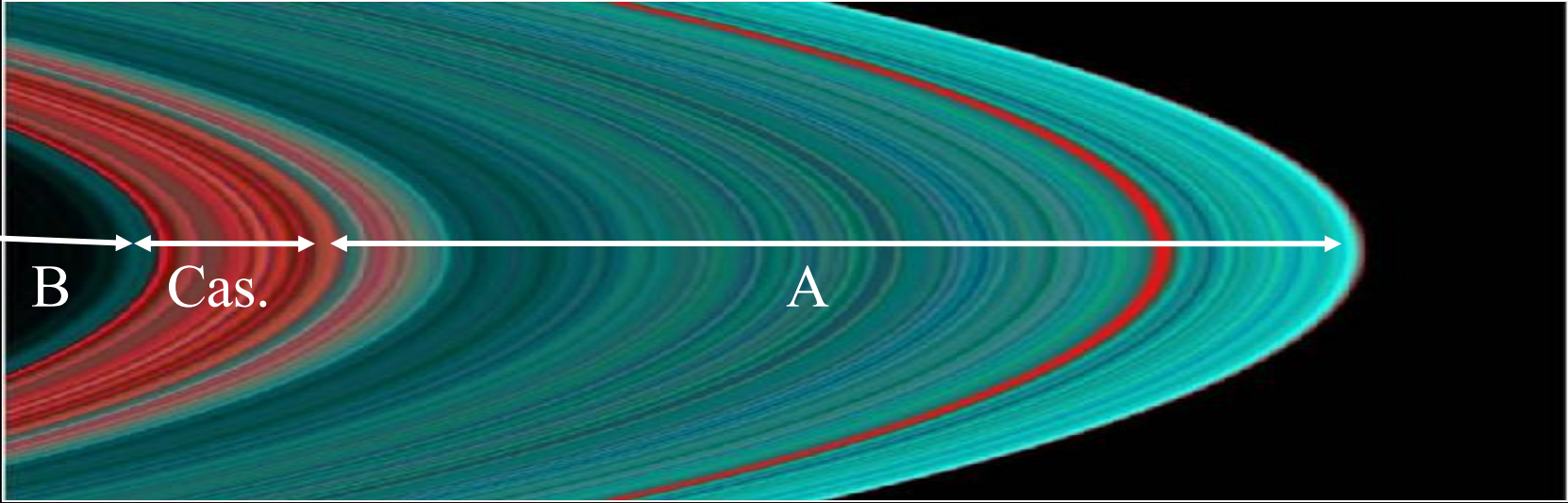
Dessin d'artiste
représentant les
anneaux vus de
l'intérieur

Les anneaux, vus de l'intérieur : une multitude de blocs et
poussières, chaque bloc et chaque poussière se
comportant comme un satellite

**Les
anneaux
de Saturne
vus par
Cassini :
une
multitude
d'anneaux
individuels
très nets.**



**Quels phénomènes physiques sont à
l'origine d'un tel agencement ?**



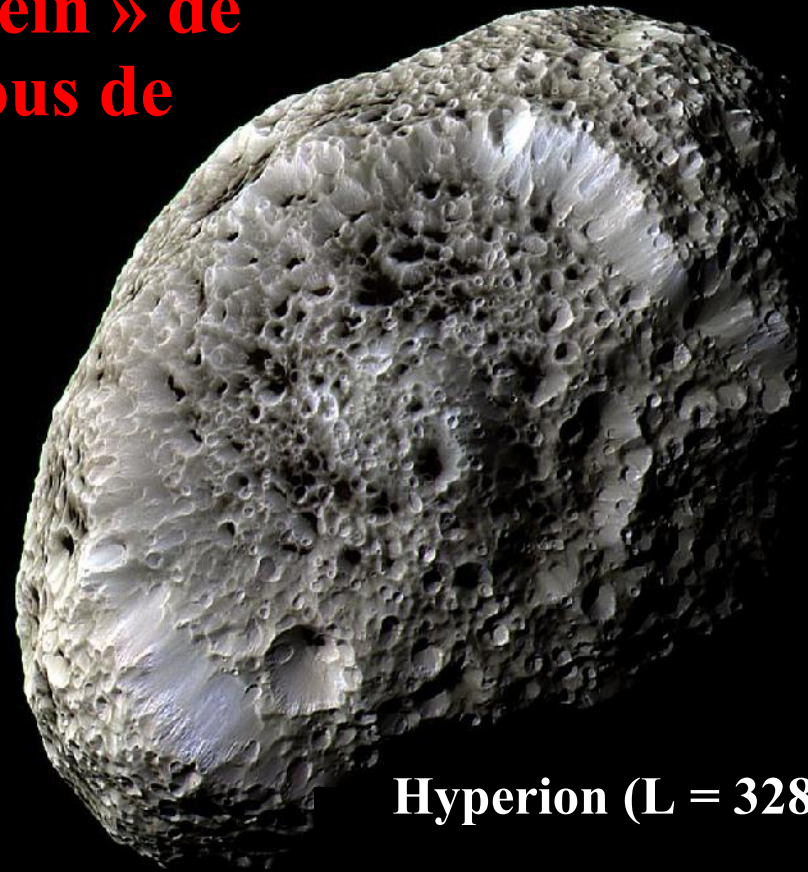
-  Glace d'eau « pure »
-  Glace « sale » (matière organique)

Cassini a pu analyser spectralement la composition chimique des anneaux vis à vis de la glace d'H₂O et de la matière organique. Quelle est l'origine de ce « non mélange » extraordinaire ??

**Les planètes géantes ont « plein » de
petits satellites. En voici 4, tous de
Saturne**



Pandore (L = 84 km)



Hyperion (L = 328 km)



**Phoébé
(L=220 km)**

**Pourquoi cette
différence de
cratérisation ?**



**Epiméthée
(L=116 km)**



Phoebe
Imaging
Mosaic



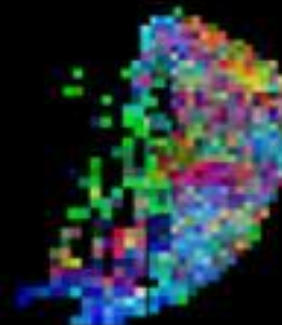
Infrared
Reflectance



Carbon Dioxide
Locations



Unidentified
(organic) Material



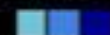
Ferrous Iron



Unidentified
Material



Water Ice



**La composition chimique superficielle de
Phoébé (étude I. R. autour de $5\ \mu$)**



JPL HOME

EARTH

SOLAR SYSTEM

STARS & GALAXIES

TECHNOLOGY

Jet Propulsion Laboratory

California Institute of Technology

Victoria Crater, Mars

IMAGES

MULTIMEDIA

NEWS

MISSIONS

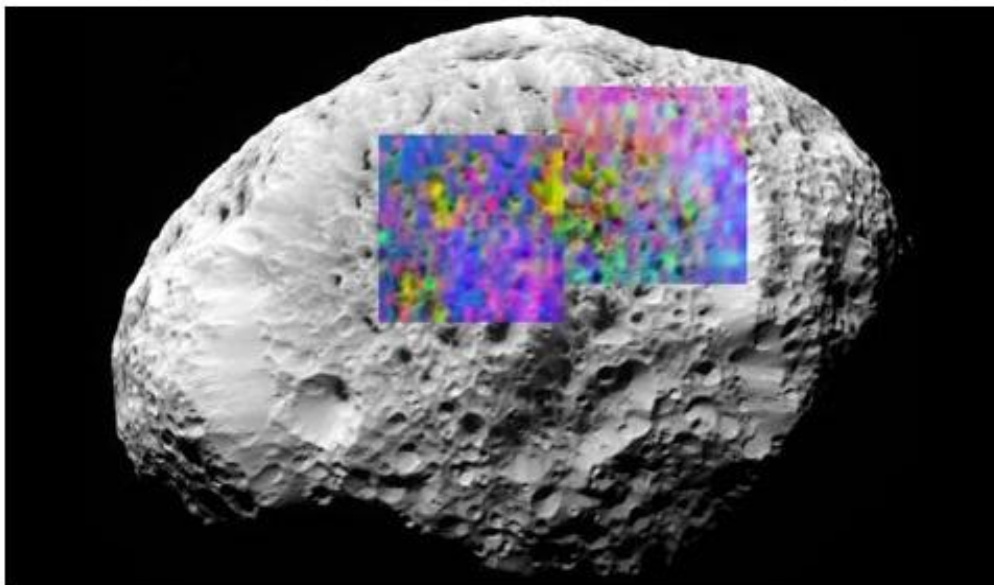
PUBLIC SERVICES

KIDS

EDUCATION

SCIENCE & RESEARCH

ABOUT JPL



Hydrocarbons Found on Saturn's Moon Hyperion

NASA's Cassini spacecraft has revealed surface details of Saturn's moon Hyperion, including craters filled with **hydrocarbons** that may indicate more widespread presence in our solar system of basic chemicals necessary for life.

New Multimedia



Video: Phoenix Mars Lander: Hunting for Habitats

Literally going where no spacecraft has gone before, NASA's Phoenix Mars Lander will visit the north polar region of Mars.

[+ Play video](#)

[+ Phoenix press kit \(6.5Mb - PDF\)](#)



Video: Pathfinder Marks 10-Year Anniversary

July 4, 1997, marked America's first successful trip back to the surface of Mars since the Viking missions of the 1970s.

[Sojourner rover on Mars](#)



News Releases NASA du 4 juillet 2007

Il y a quatre types de « gros » satellites de glaces (potentiellement riche en MO) autour de Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune :



**Des boules
de glaces
sans
histoire
géologique**



**Des boules
de glaces
avec une
histoire
géologique
complexe**



**Japet, une
boule de
glaces
fendue et
sale**



**Titan, une
boule de
glaces avec
atmosphère**

**Avec des
intermédiaires**

Terre

Satellite de glaces



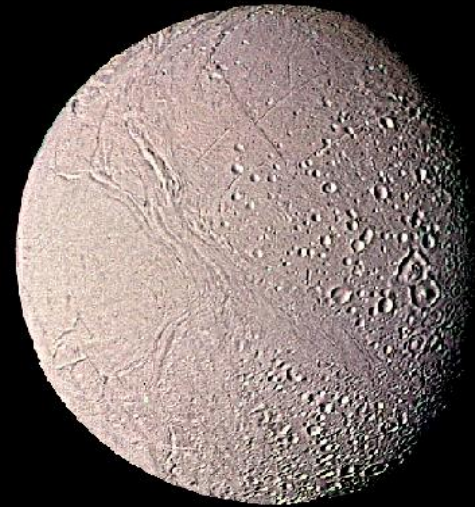
Terre

Température externe : 15°



Satellite de glaces

Température externe : ~ -200°



Terre

Température externe : 15°

Température interne : $> 1000^{\circ}$



Satellite de glaces

Température externe : $\sim -200^{\circ}$

Température interne : + faible

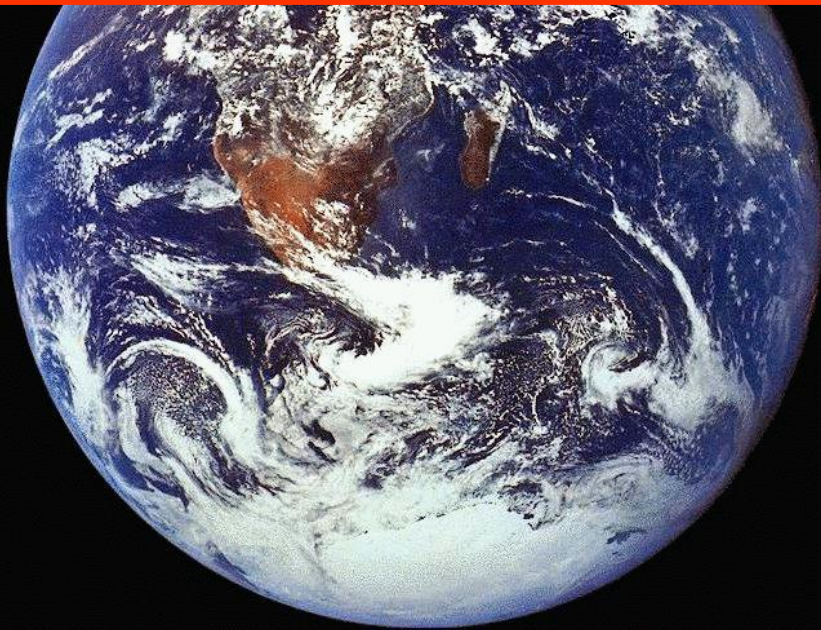


Terre

Température externe : 15°

Température interne : $> 1000^{\circ}$

En surface : cailloux

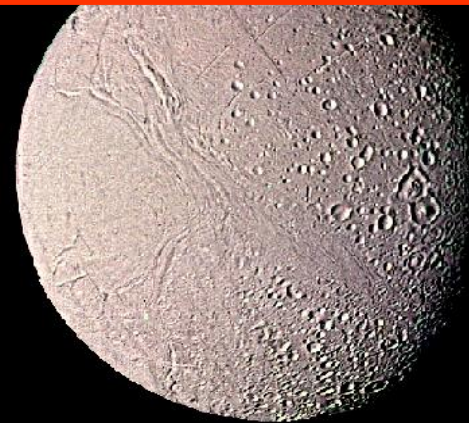


Satellite de glaces

Température externe : $\sim -200^{\circ}$

Température interne : + faible

En surface : glaces



Terre

Température externe : 15°

Température interne : $> 1000^{\circ}$

En surface : cailloux

Intérieur = cailloux, roche ...



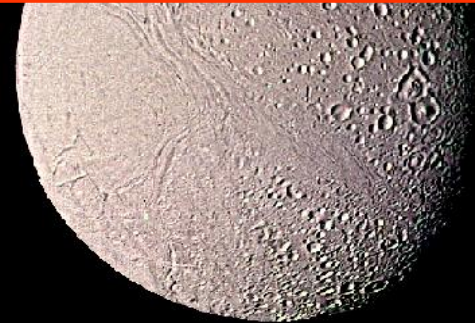
Satellite de glaces

Température externe : $\sim -200^{\circ}$

Température interne : + faible

En surface : glaces

Intérieur = glaces



Terre

Température externe : 15°

Température interne : > 1000°

En surface : cailloux

Intérieur = cailloux, roche ...

Volcan → lave = roche fondue

Satellite de glaces

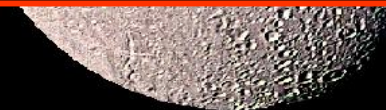
Température externe : ~ -200°

Température interne : + faible

En surface : glaces

Intérieur = glaces

Volcan → lave = glace fondue
= eau liquide



Terre

Température externe : 15°

Température interne : > 1000°

En surface : cailloux

Intérieur = cailloux, roche ...

Volcan → lave = roche fondue

Gaz volcaniques : vapeur d'eau, gaz carbonique ...

Satellite de glaces

Température externe : ~ -200°

Température interne : + faible

En surface : glaces

Intérieur = glaces

Volcan → lave = glace fondue
= eau liquide

Gaz volcaniques :
méthane, hydrocarbures ...

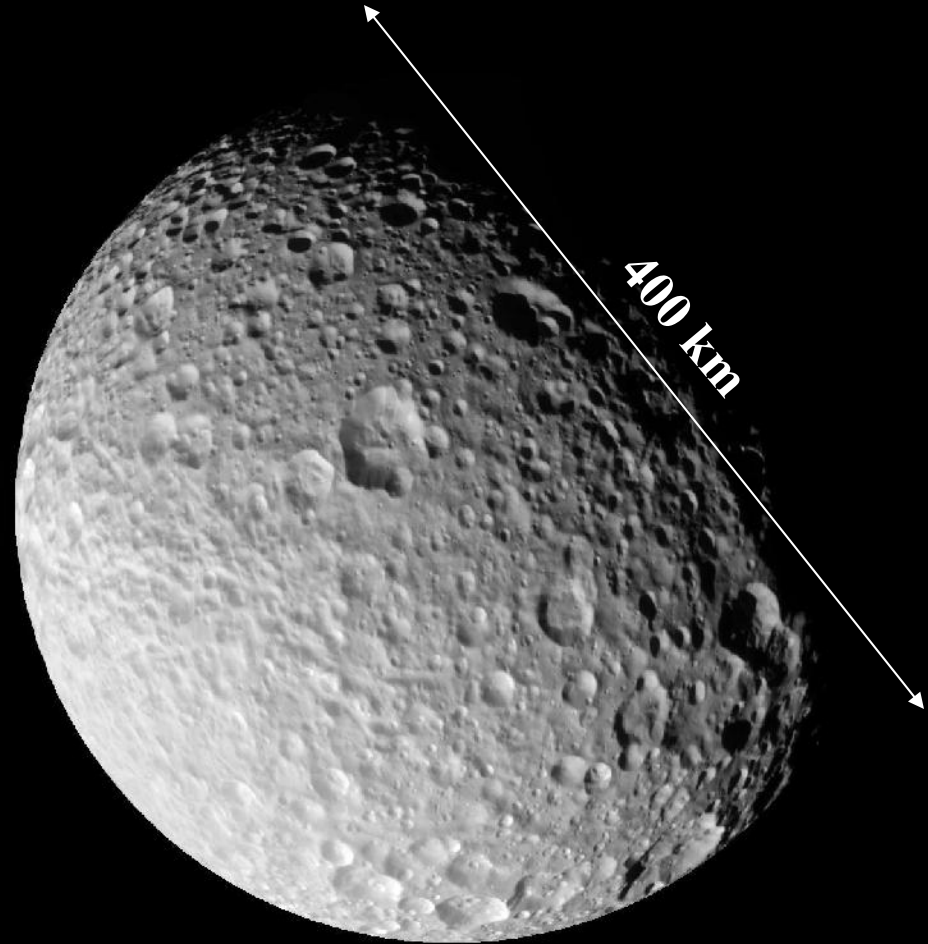


Terre	Satellite de glaces
Température externe : 15°	Température externe : ~ -200°
Température interne : > 1000°	Température interne : + faible
En surface : cailloux	En surface : glaces
Intérieur = cailloux, roche ...	Intérieur = glaces
Volcan → lave = roche fondue	Volcan → lave = glace fondue = eau liquide
Gaz volcaniques : vapeur d'eau, gaz carbonique ...	Gaz volcaniques : méthane, hydrocarbures ...
Liquide de surface (pluie, rivières, lacs, mers) : eau liquide	Liquide de surface (pluie, rivières, lacs, mers) : méthane (et hydrocarbures) liquides

Un exemple de satellite sans histoire : Mimas

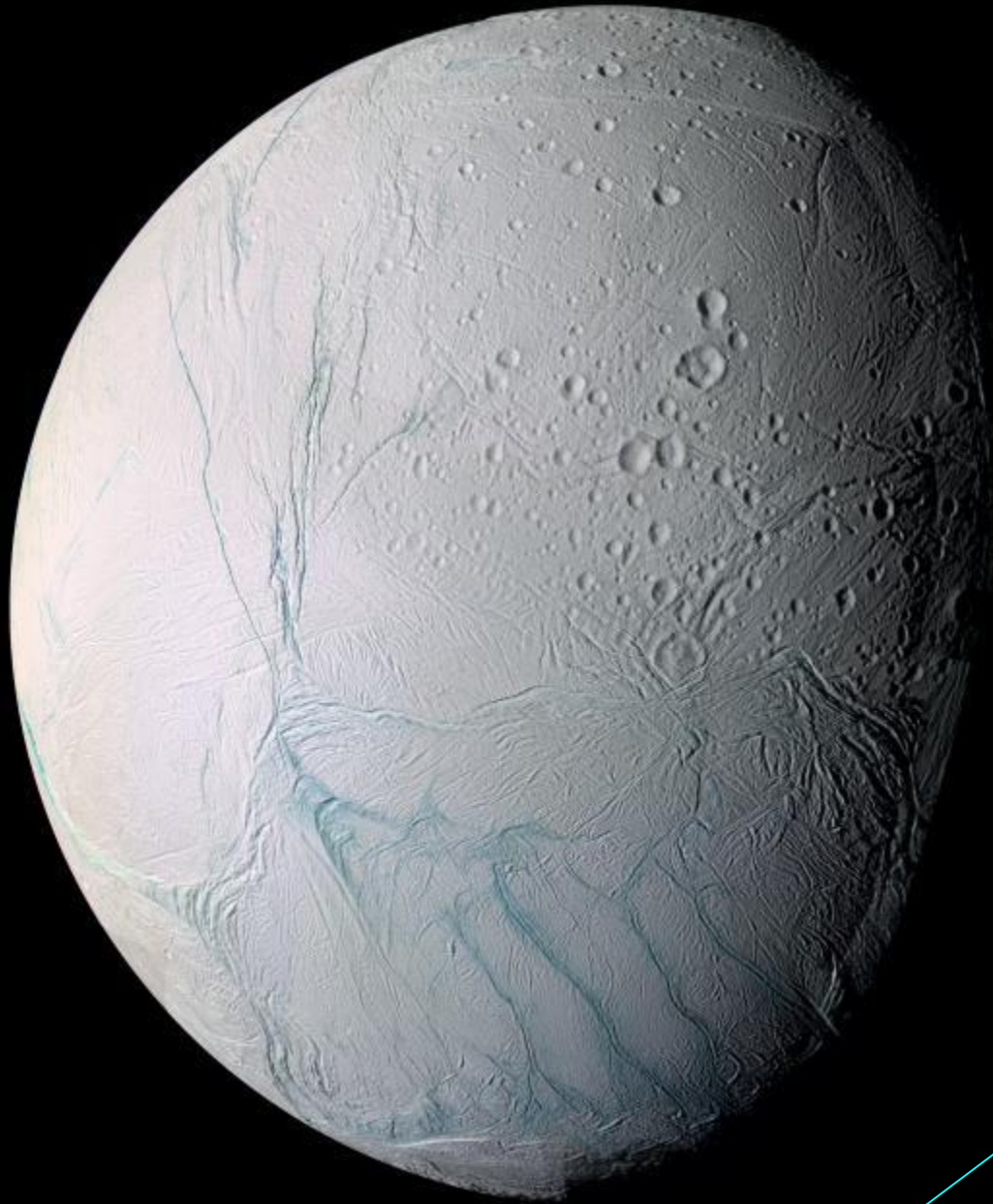


Mimas par devant



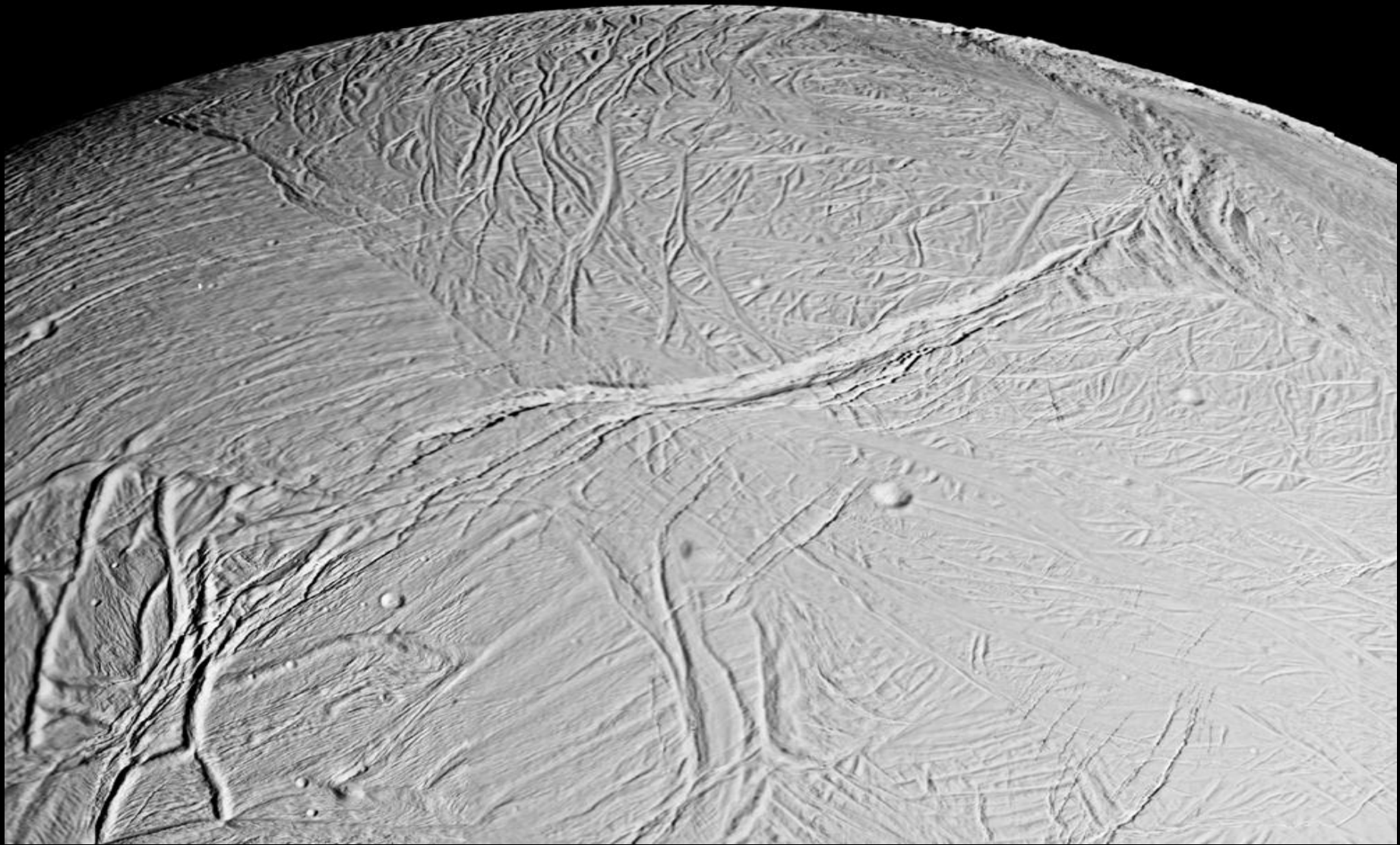
Mimas par derrière

**Le prototype des
satellites actifs,
Encelade, quasiment
de la même taille que
Mimas**



Pour vous rappeler la petite taille d'Encelade

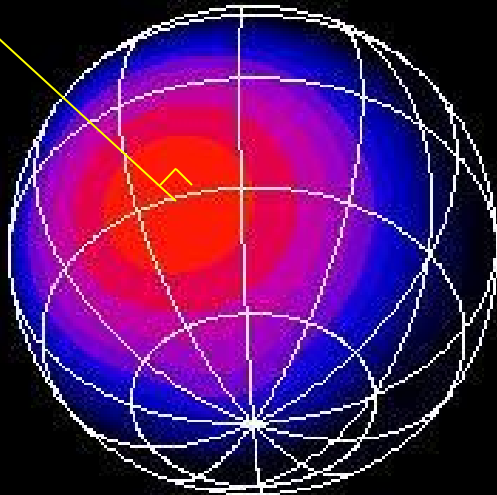




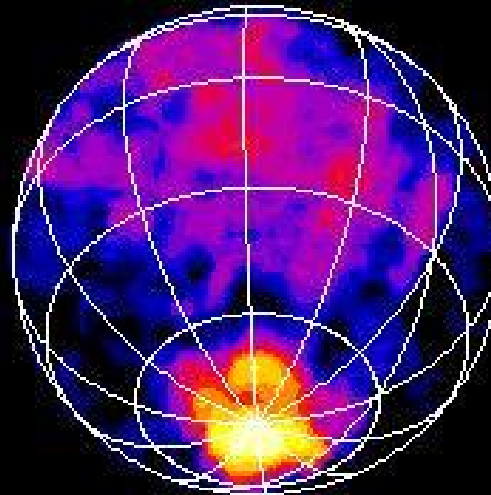
**Des images rapprochées du 1er survol (02 / 2005).
Quel satellite, quelle activité !!**

Enceladus Temperature Map

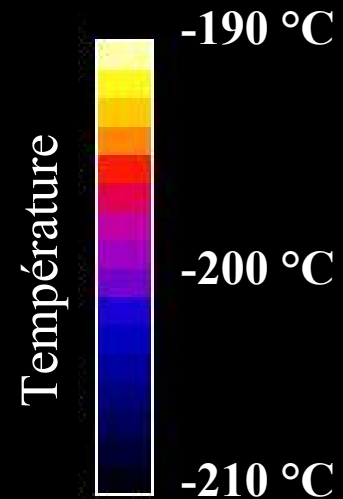
Soleil
au
zénith



Predicted
Temperatures



Observed
Temperatures



**En survolant le Pôle Sud, Cassini découvre qu'il y fait
20° de plus qu'il ne devrait !**

- 193 °C

- 198 °C



- 182 °C

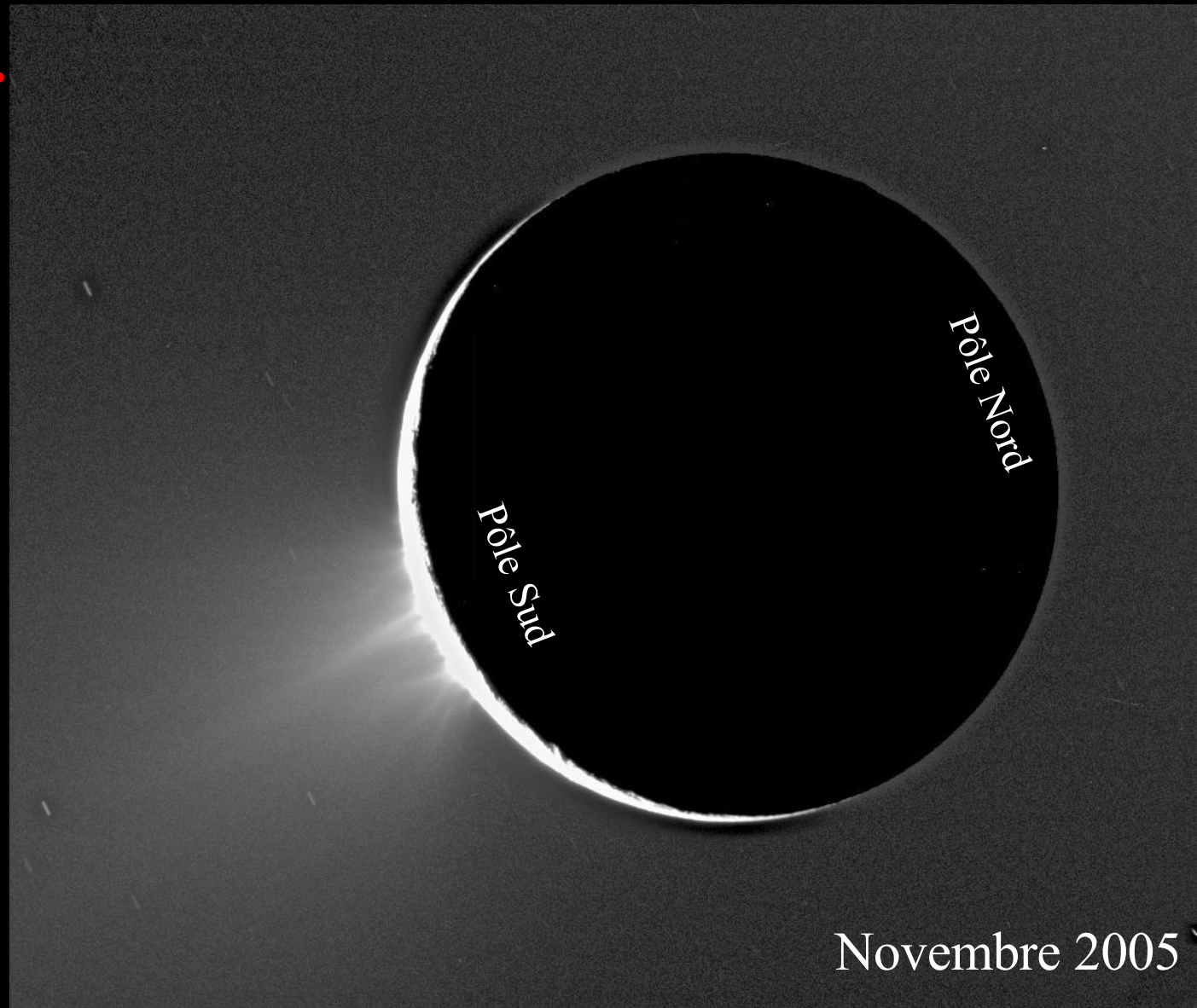
- 186 °C

C'est au niveau de failles que se situent les zones « chaudes », de 15 ° de plus (en moyenne) que les zones environnantes ...

Cela signifie que quelque chose de chaud est sorti il n'y a pas longtemps et que ça n'a pas eu le temps de refroidir complètement.

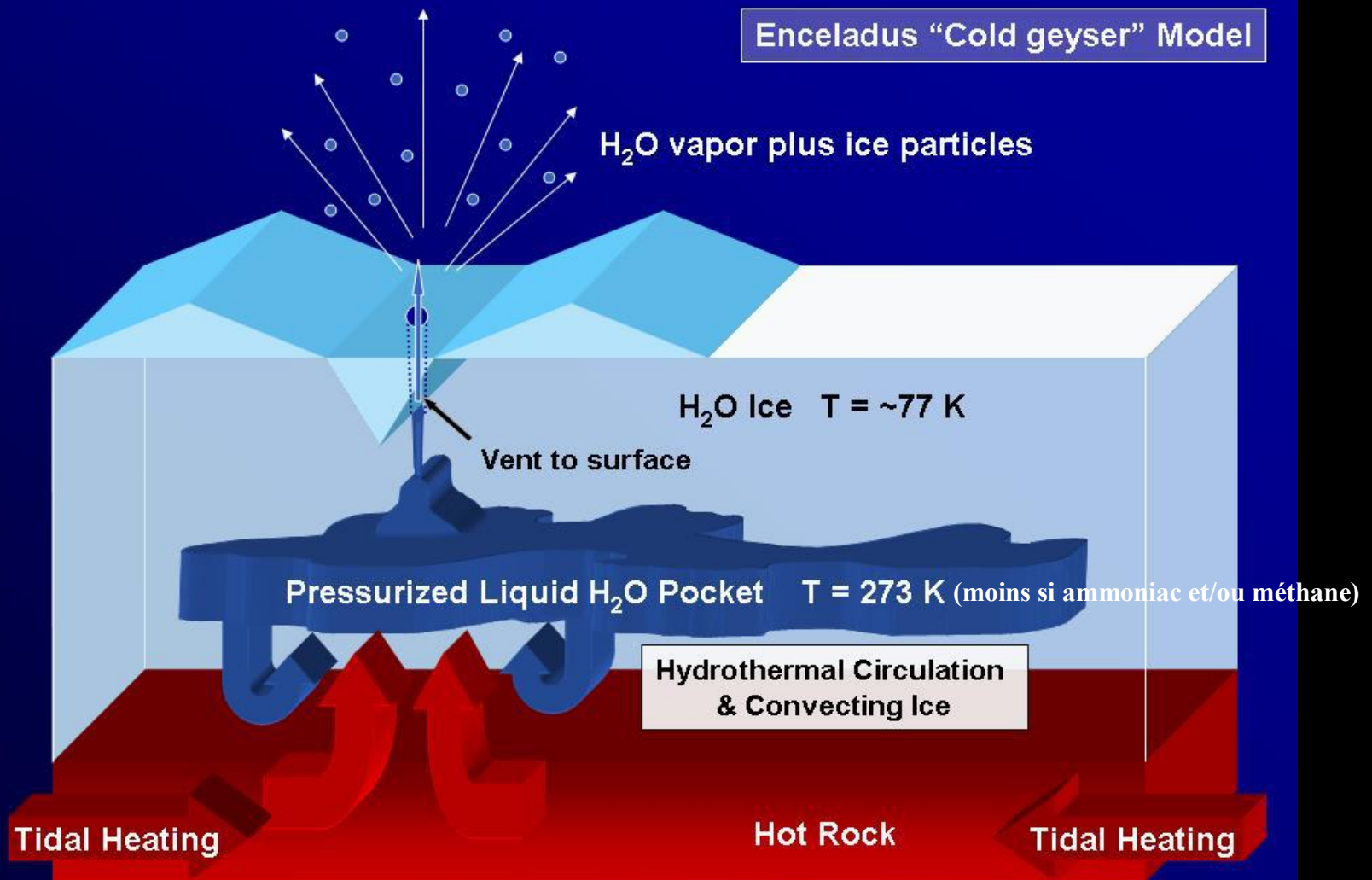
Des volcans d'eau, des geysers de méthane ou d'hydrocarbures ??

**La réponse est
venue en
novembre 2005.
Au dessus du
Pôle Sud, il y a
des jets de
micro-
particules (de
givre d'H₂O)
qui diffusent la
lumière solaire.
Il s'agit de
volcans
(d'H₂O) ou
geysers actifs.**

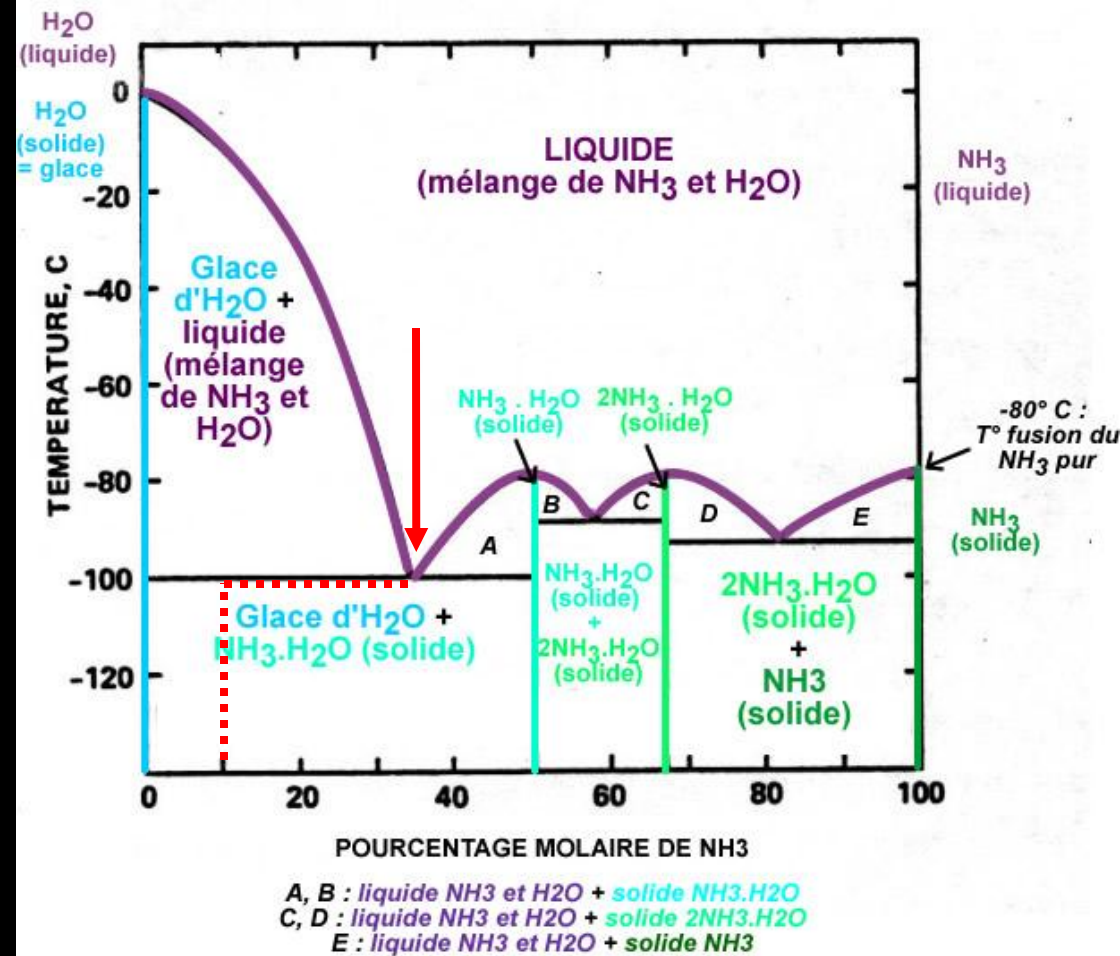


Novembre 2005

Enceladus "Cold geyser" Model



Pour faire sortir de la vapeur d'eau « chaude », il faut :
(1) une source d'énergie efficace , et/ou
(2) abaisser le point de fusion de la glace !



**Pour abaisser
considérablement la
température de fusion
de la glace, c'est facile !**

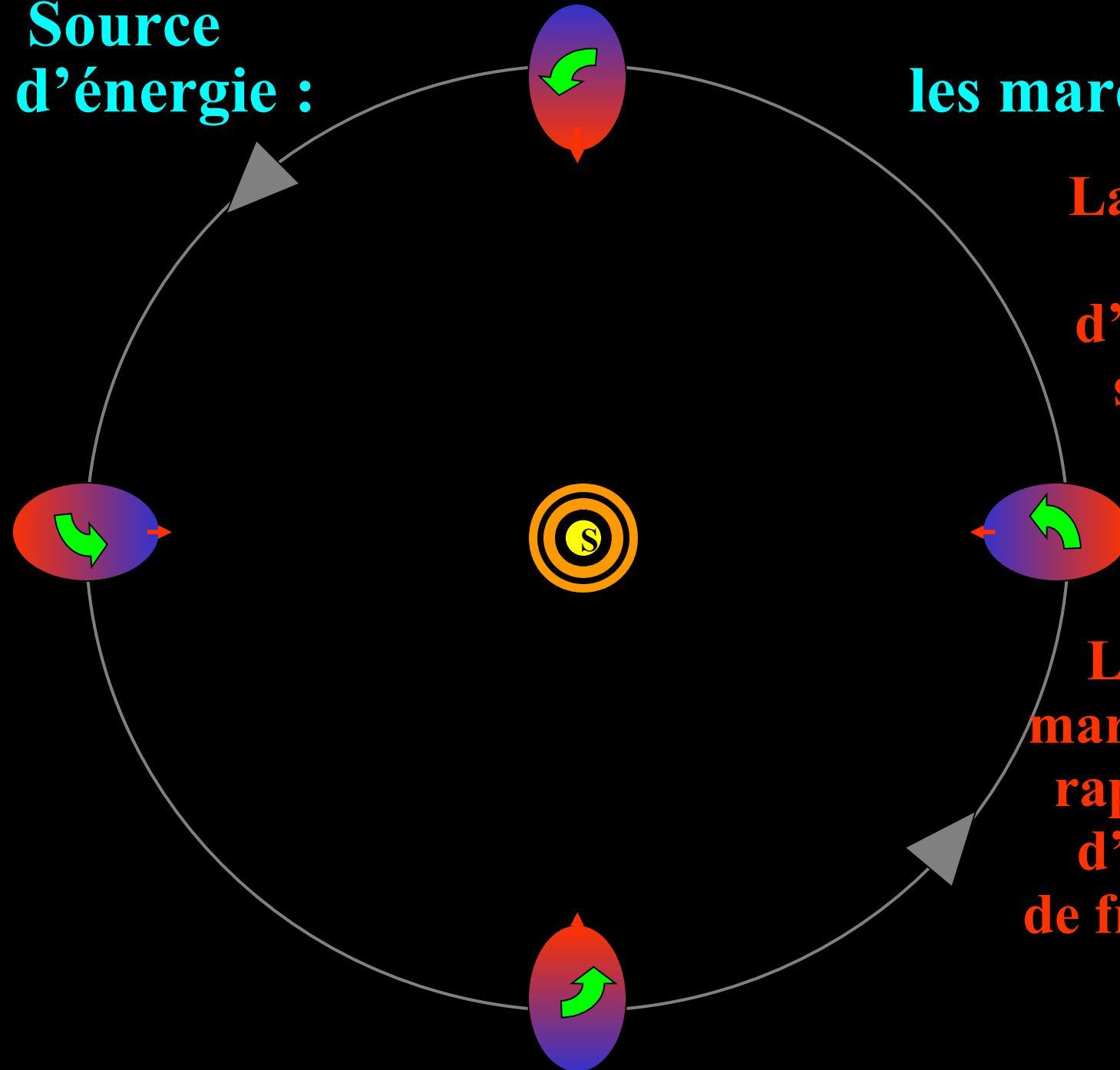
**“Y'a qu'à” mettre un
peu d'ammoniac, et il y
a un eutectique dont la
température de fusion
est de -103°C (170 K).
Y a t'il de l'ammoniac
sur Encelade ?**

**Source
d'énergie :**

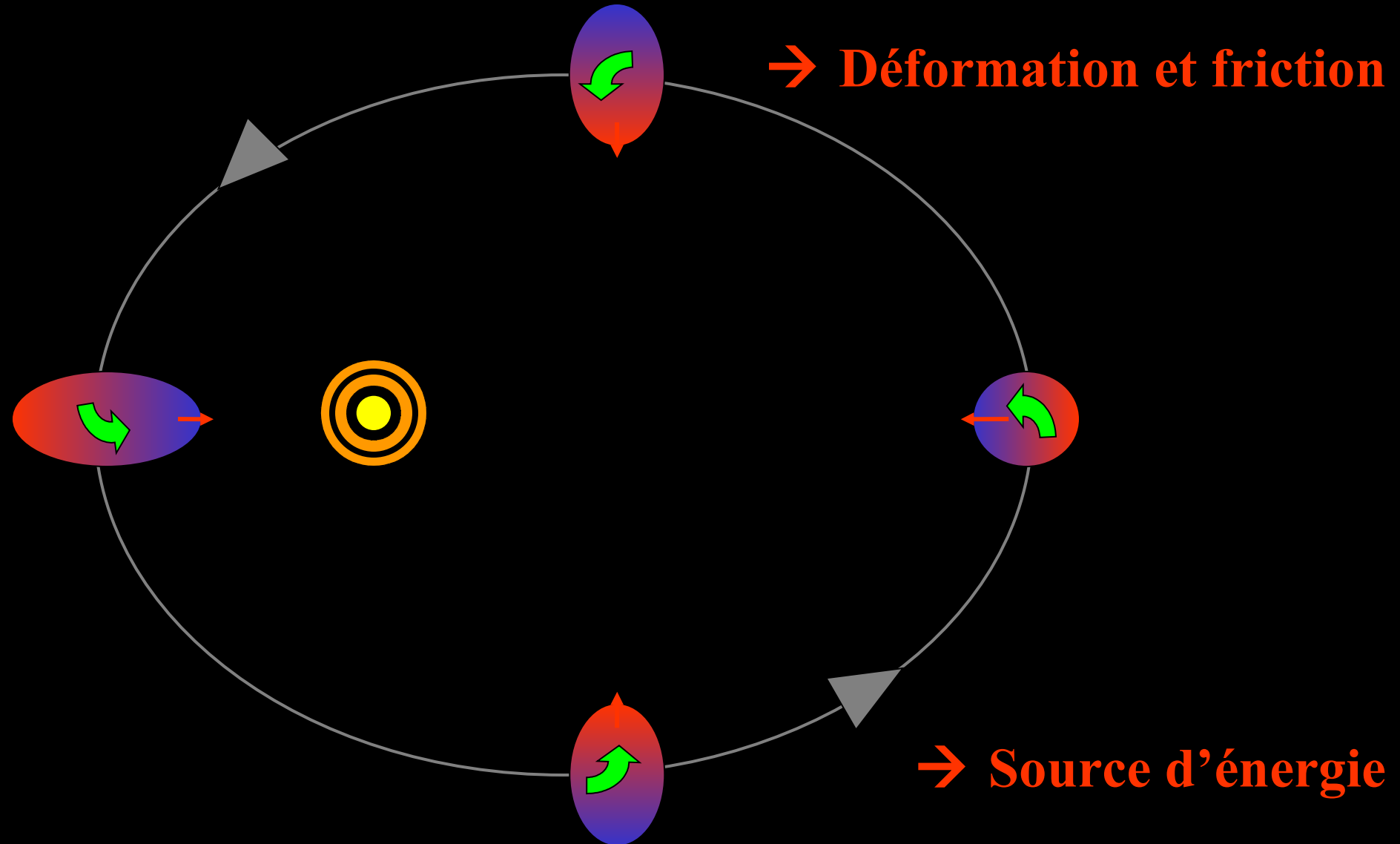
les marées

**La rotation et la
révolution
d'Encelade sont
synchronisées.**

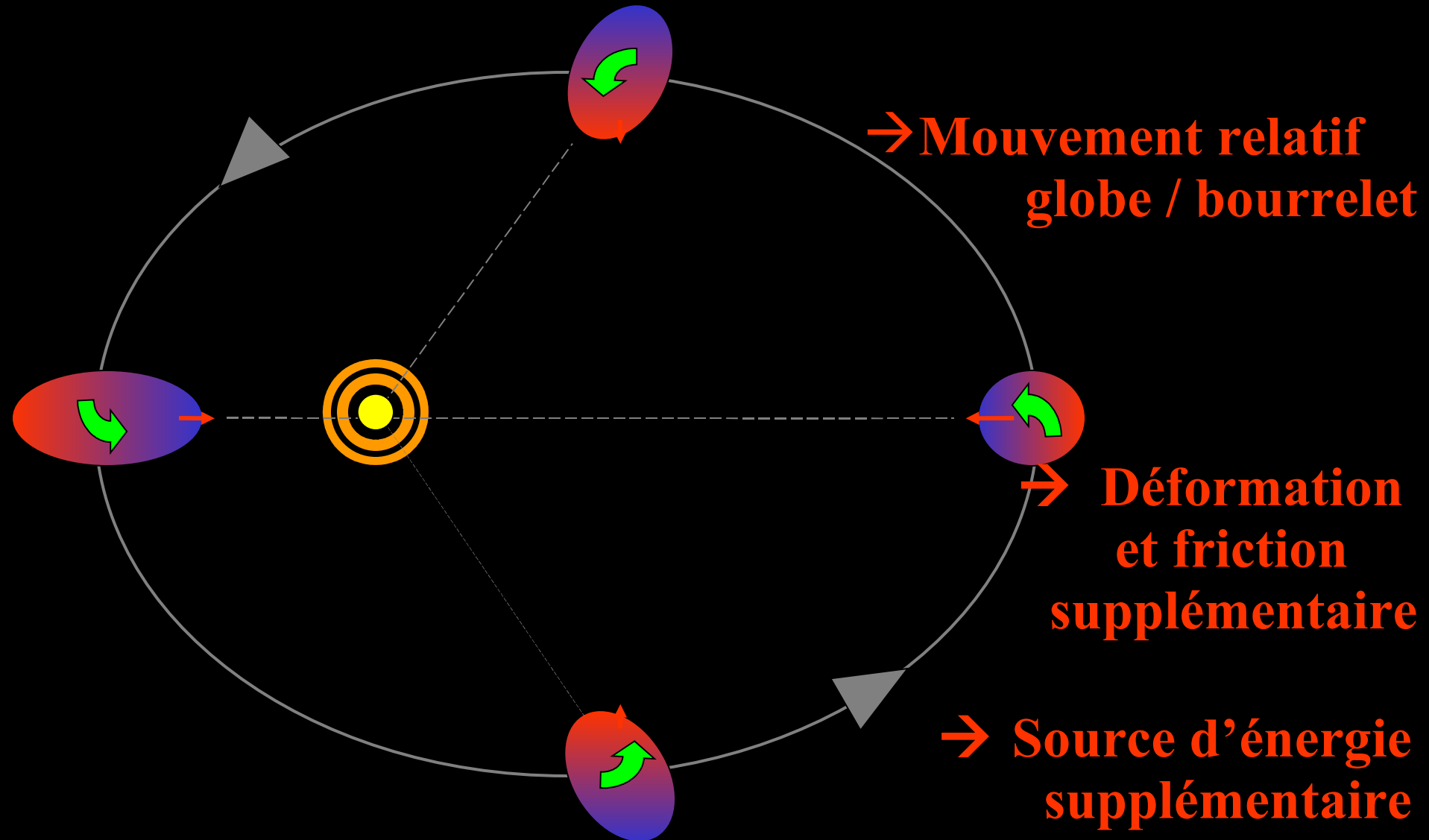
**Le bourrelet de
marée est fixe par
rapport au globe
d'Encelade. Pas
de friction interne**



**Mais les autres satellites entraînent une ellipticité forcée.
Premier effet : l'amplitude du bourrelet varie**



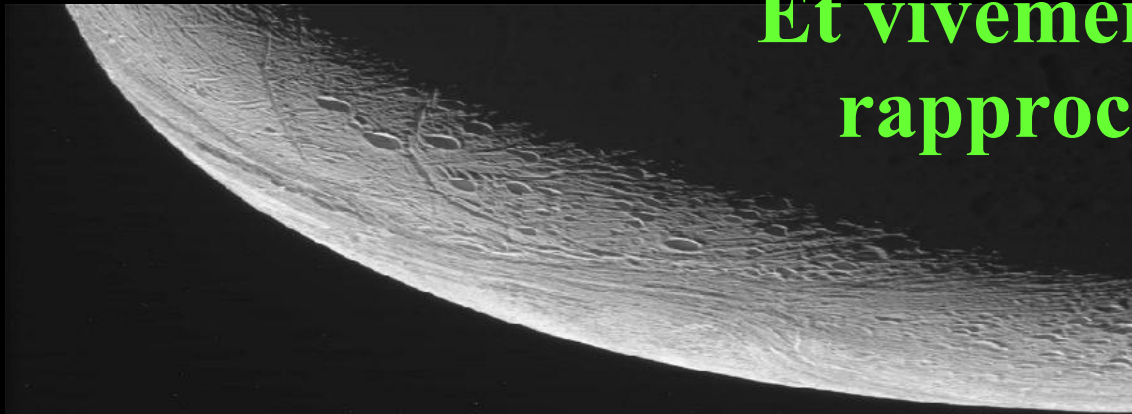
Deuxième effet : la vitesse de révolution varie (cf Kepler), pas celle de rotation, alors que le bourrelet est (au 1er ordre) toujours pointé vers Saturne



Dernières nouvelles (12 mars 2007, NASA news)

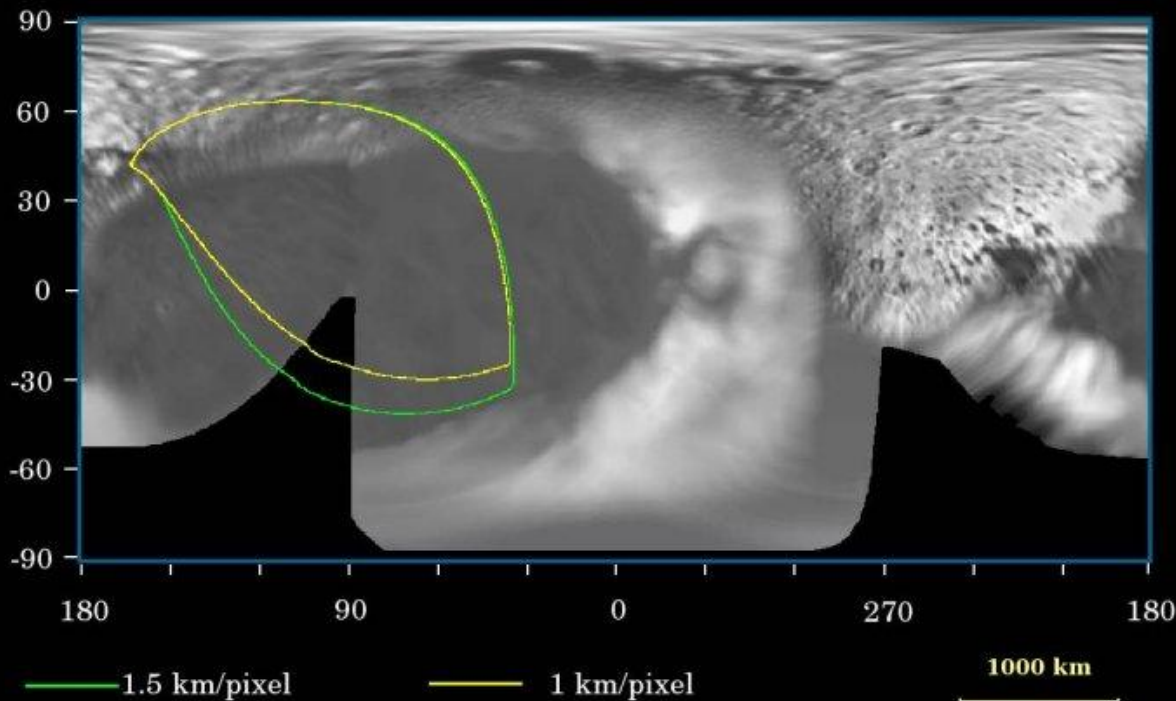
« ... as measured by Cassini's ion and neutral mass spectrometer. Matson is lead author of a new study of the plume's composition, which appears in the April issue of the journal Icarus. Although the plume is predominantly made up of water vapor, the spectrometer also detected within the plume minor amounts of gaseous nitrogen, methane, carbon dioxide, propane and acetylene. »

Et vivement le prochain survol rapproché, le 12 mars 2008 !



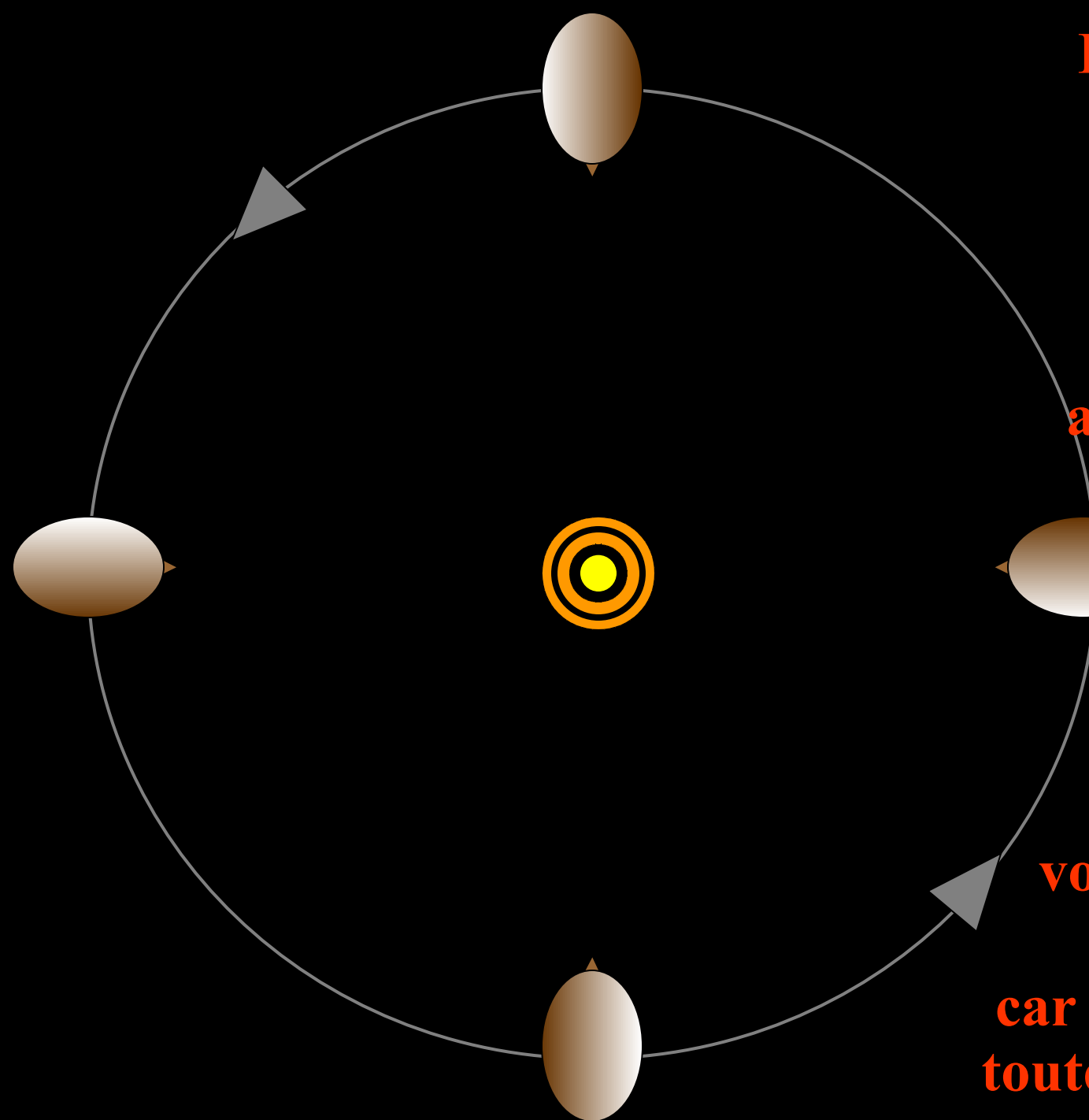
Un satellite unique en son genre : Japet

Cassini's Iapetus Flyby Dec 31, 2004 - Planned Image Coverage



Carte d'après les
données
Voyager, 1981

Centrée sur 0° latitude et 90° longitude (centre de la face avant), il y a une énorme tache noire



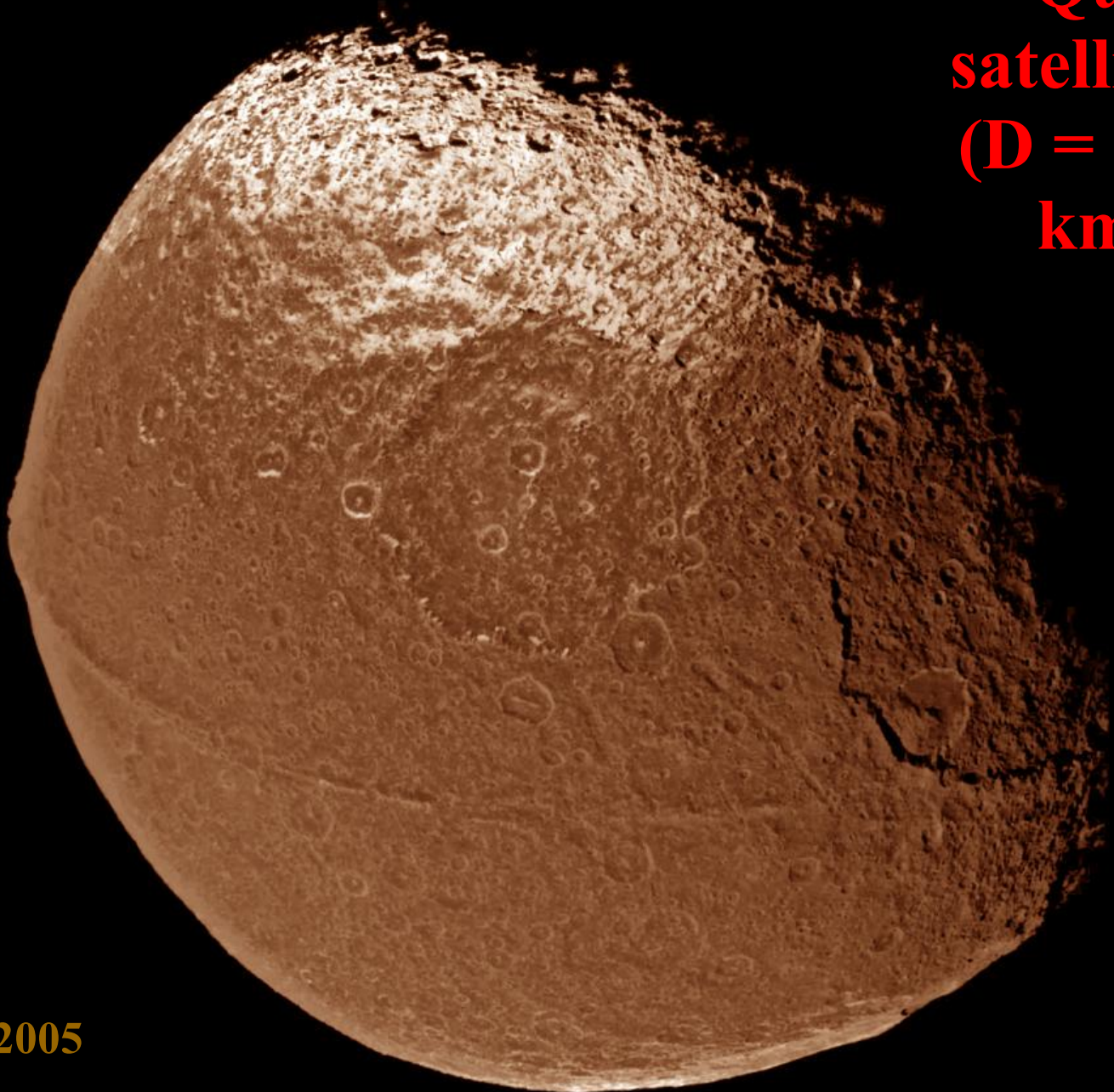
**La rotation et la
révolution de
Japet sont
synchronisées.**

**Il y a une «face
avant» (brune),
et une «face
arrière»
(blanche).**

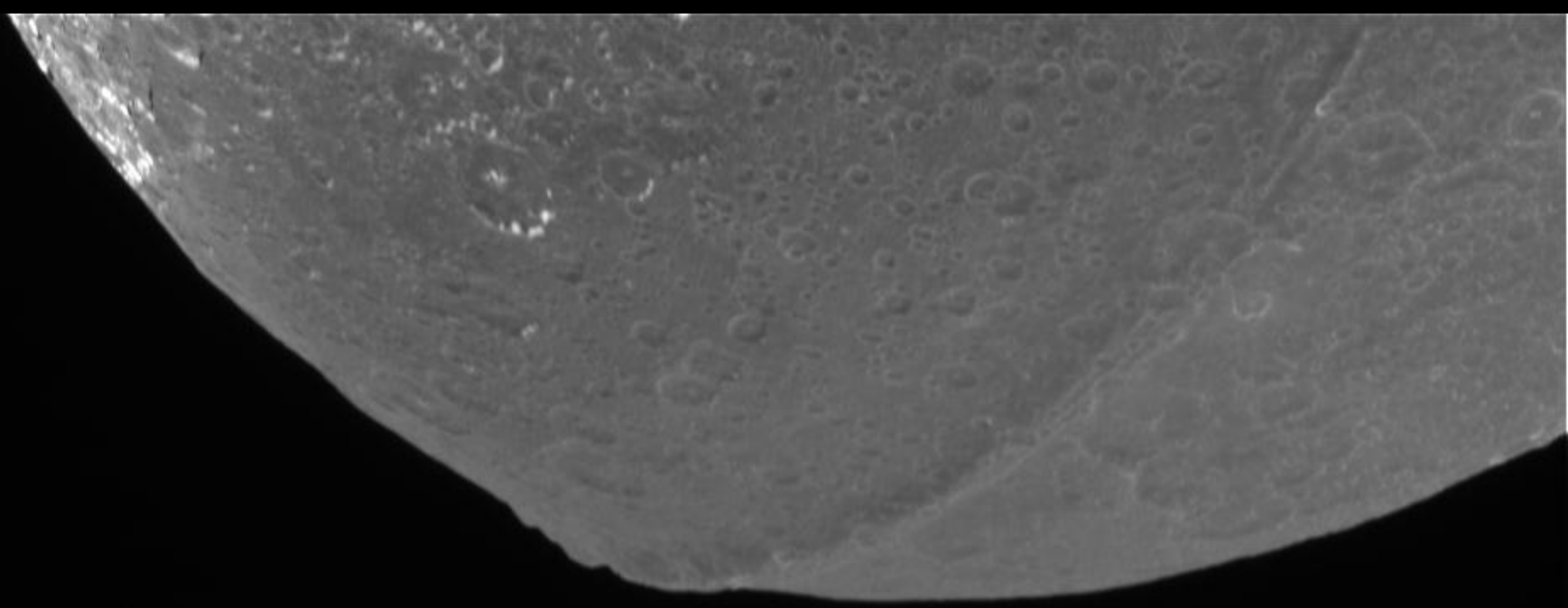
**La face avant,
comme la vitre
avant d'une
voiture, est «sale»**

**car elle « ramasse »
toutes les poussières**

**Quel
satellite !
(D = 1436
km)**



Janvier 2005



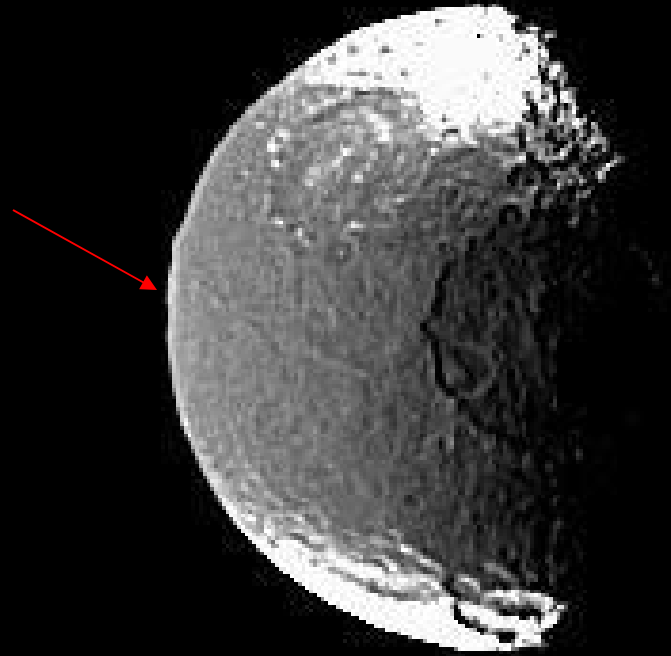
Quelle « ride » (10 à 20 km de haut) !

Mise à l'échelle terrestre, cette ride aurait 11000 km de long, 160 km de large et 100 km de haut !

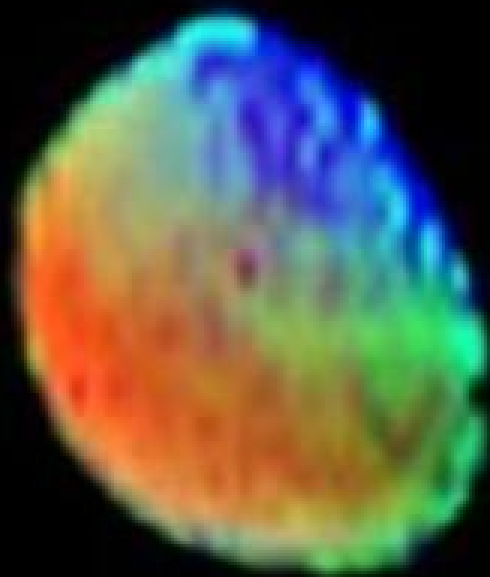
Les rides océaniques sont battues à plates coutures

**La limite
clair/sombre**





Et sur cette image prise de loin en mars 2005, on voit que cette ride est parfaitement au milieu de la « tache noire ». Poussières ramassées sur la face avant (mais pourquoi une ride au milieu), ou recouvrement « volcanique » (mais pourquoi sur la face avant) ?



Japet



Glace d'eau



Glace carbonique



Matière organique

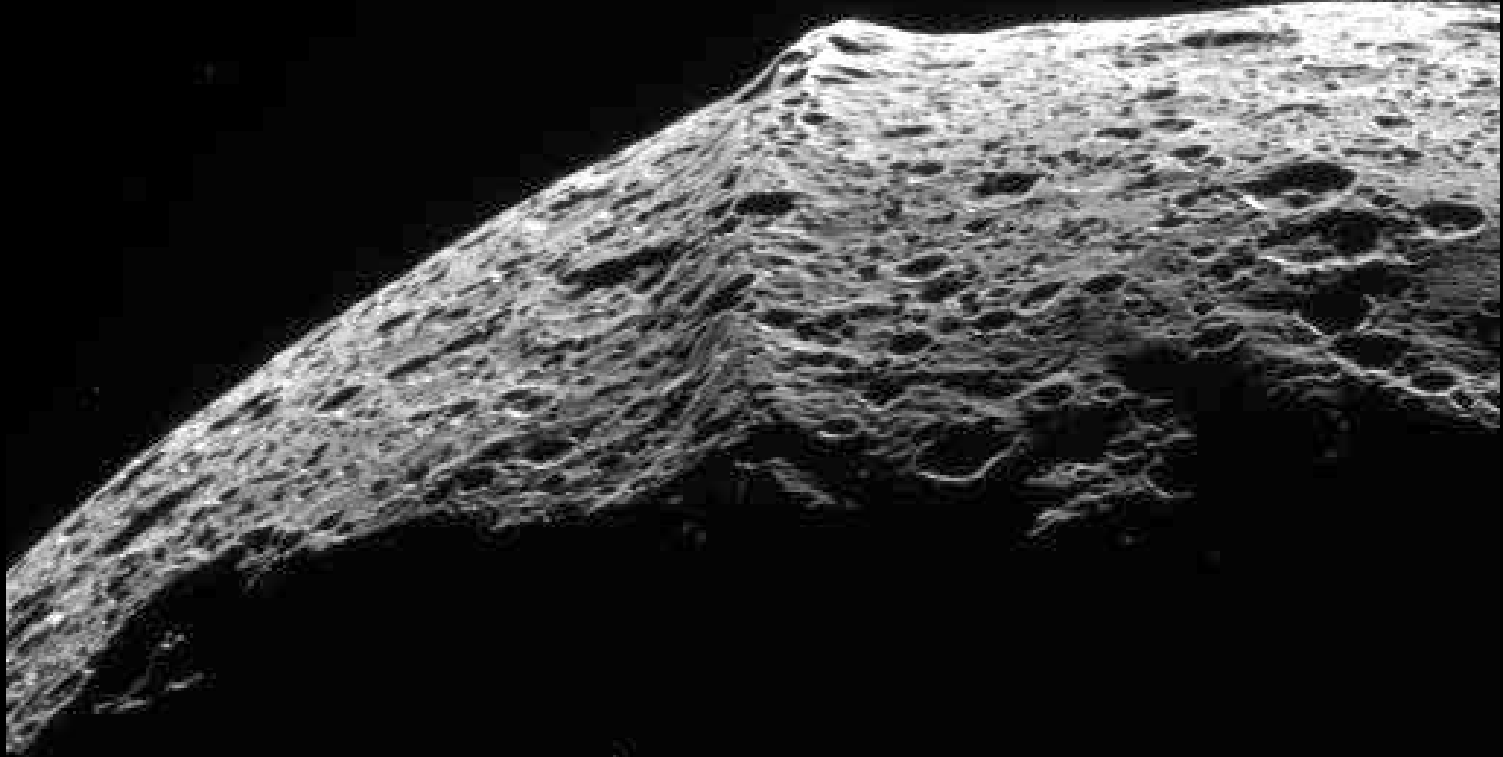
**Les spectres IR (vers $15\ \mu$) montrent que cette
tache brune est riche en matière organique,
genre hydrocarbure lourd**

Nouveau survol le 10 septembre 2007

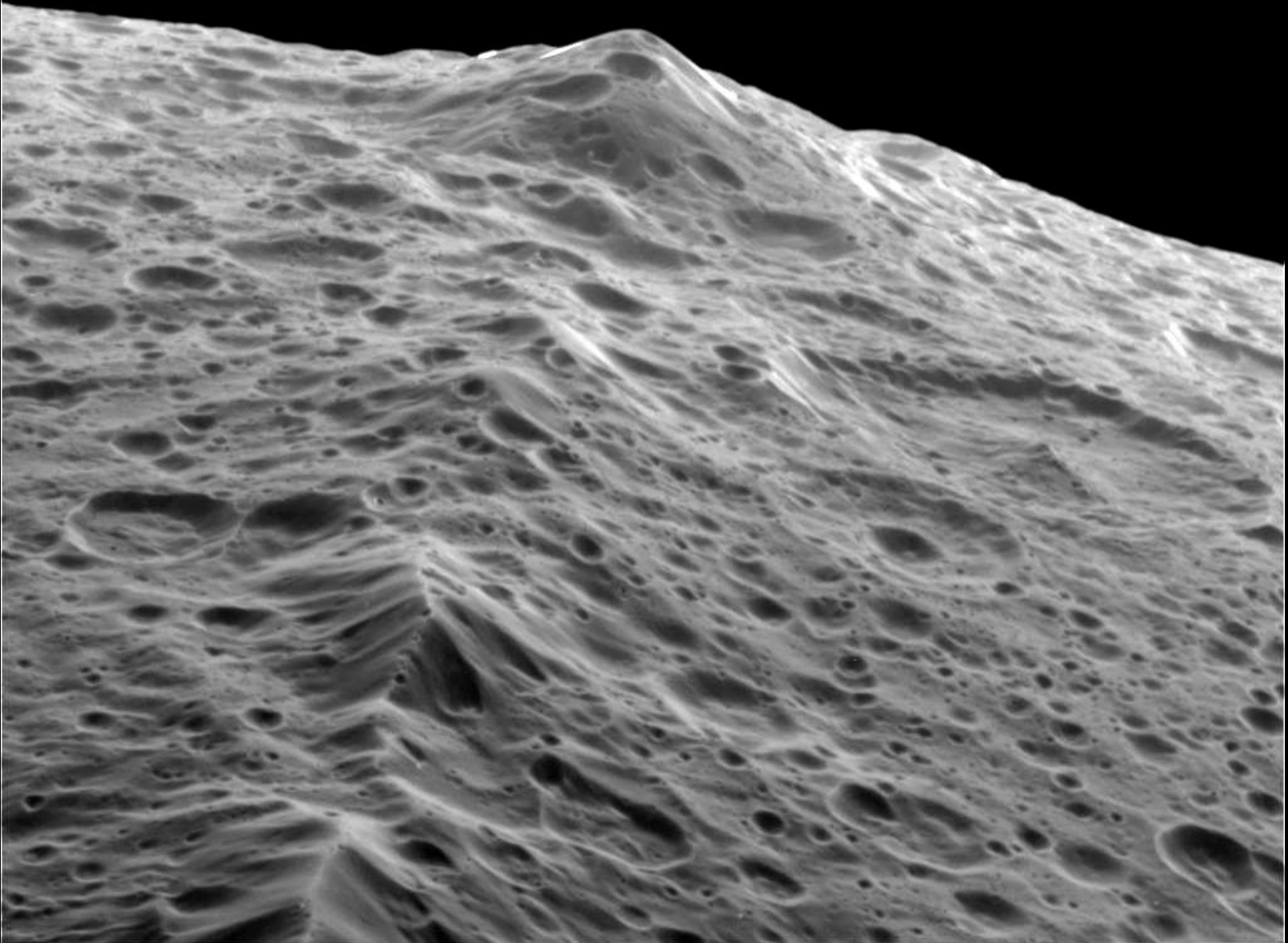
Attendons les 1ers résultats

Quelques images « brutes » mises en ligne avec très peu de commentaires par la NASA les 12 et 13 septembre 2007

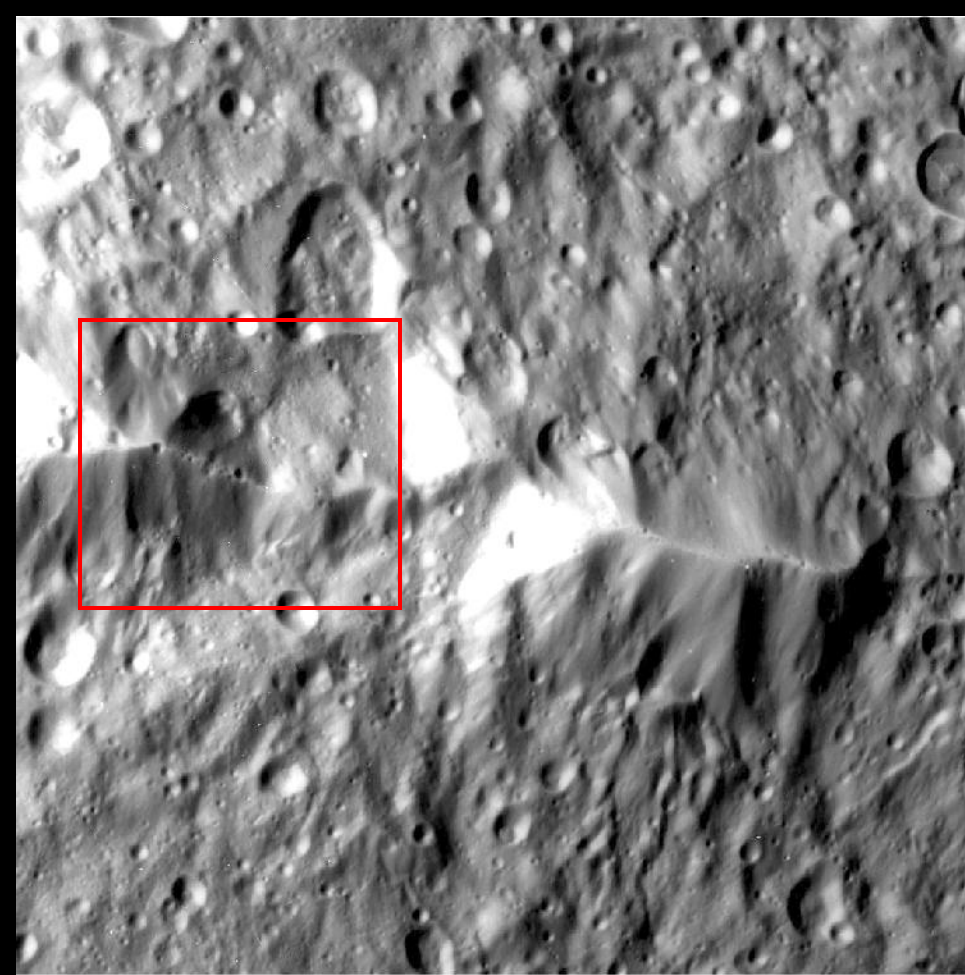
Gros plan sur la ride !



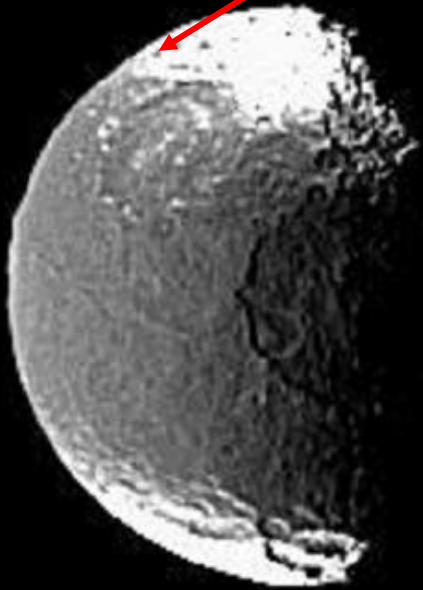
**Très gros plan sur la
ride, en vue oblique !**



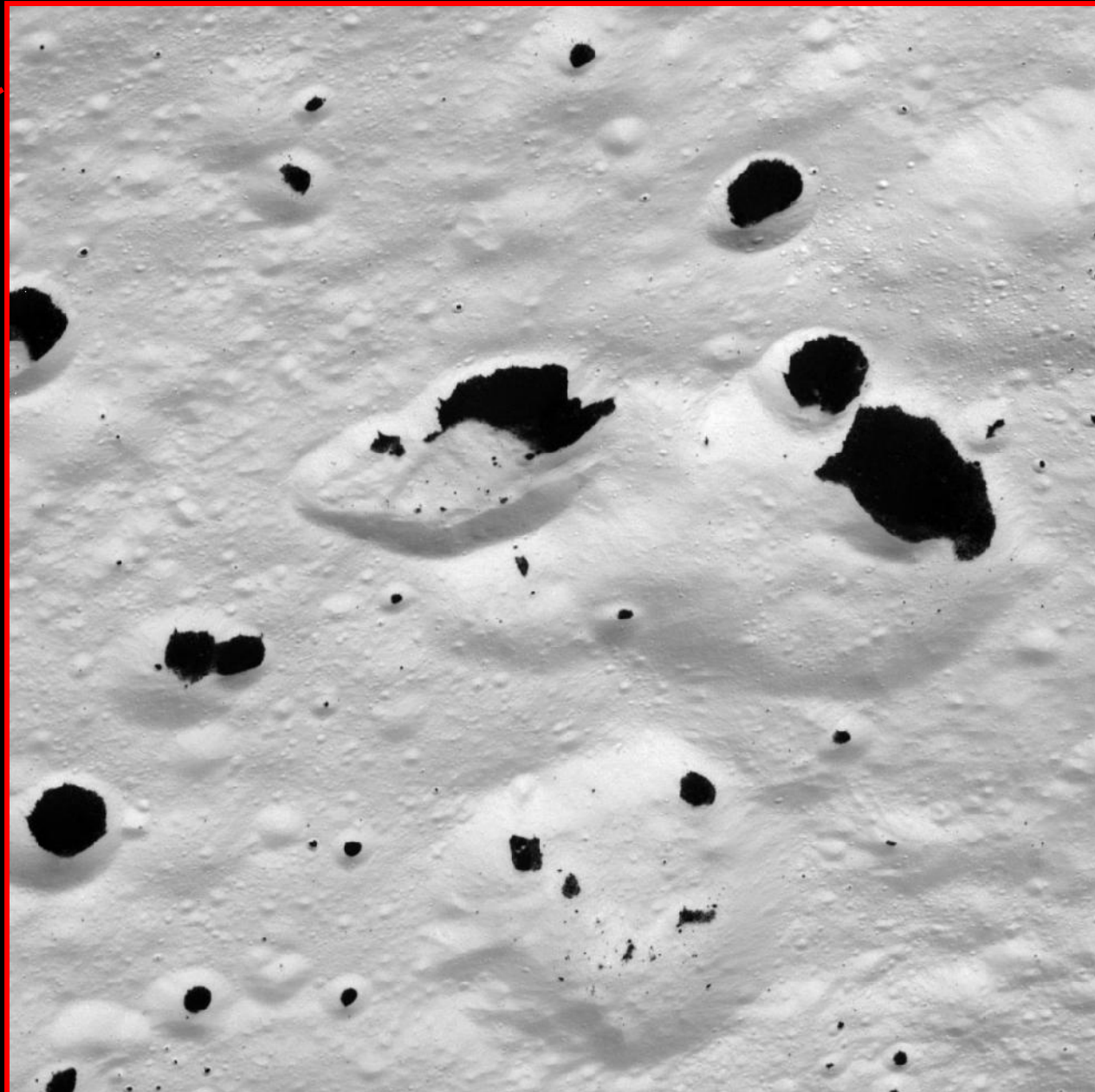
**Très gros plan sur la
ride, en vue
verticale !**

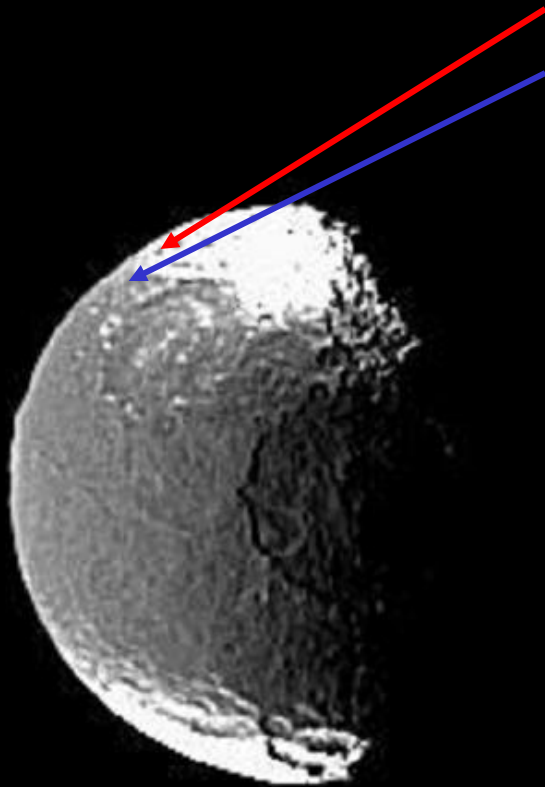


Et la tache sombre, qu'est ce que c'est ?

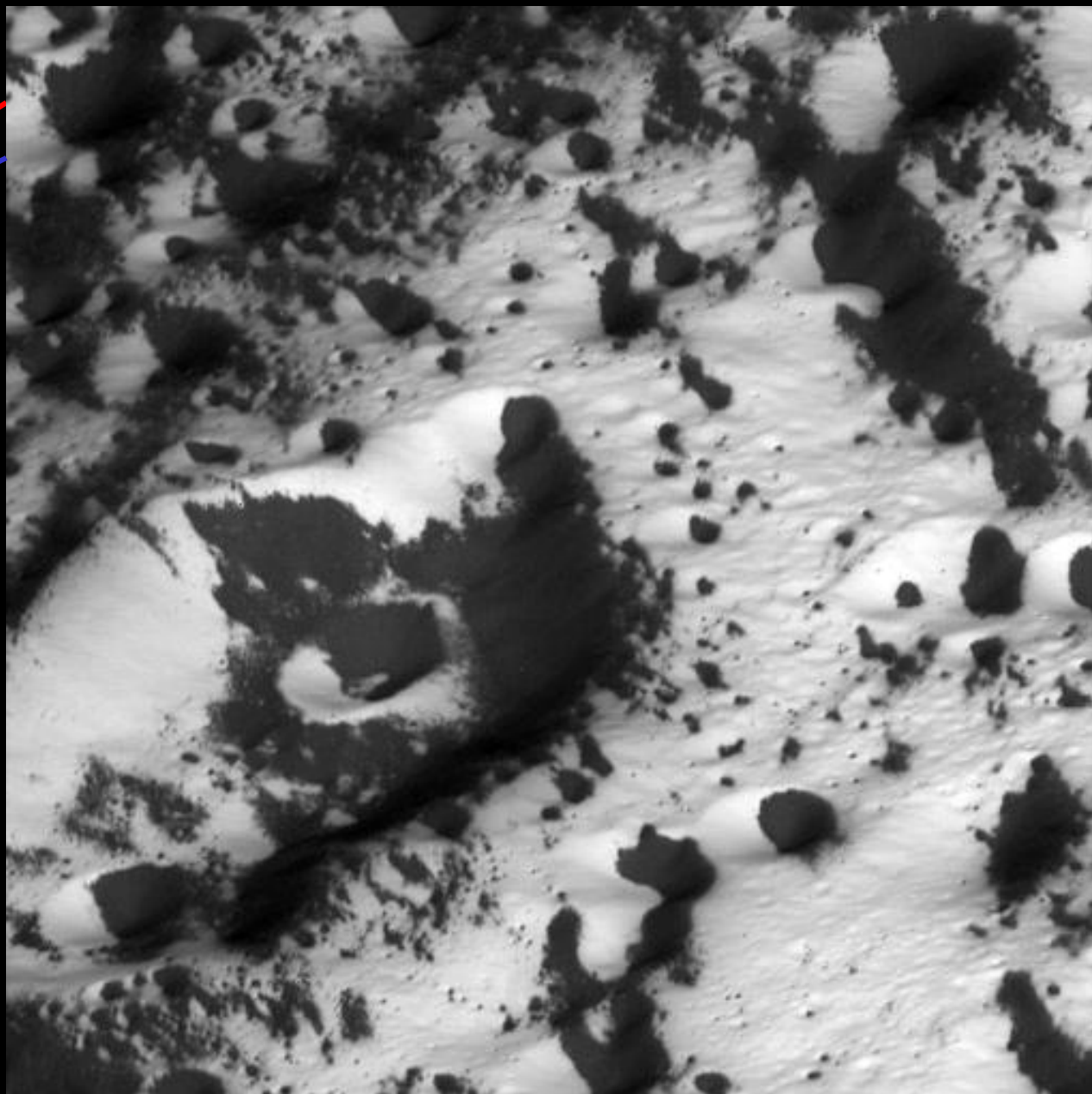


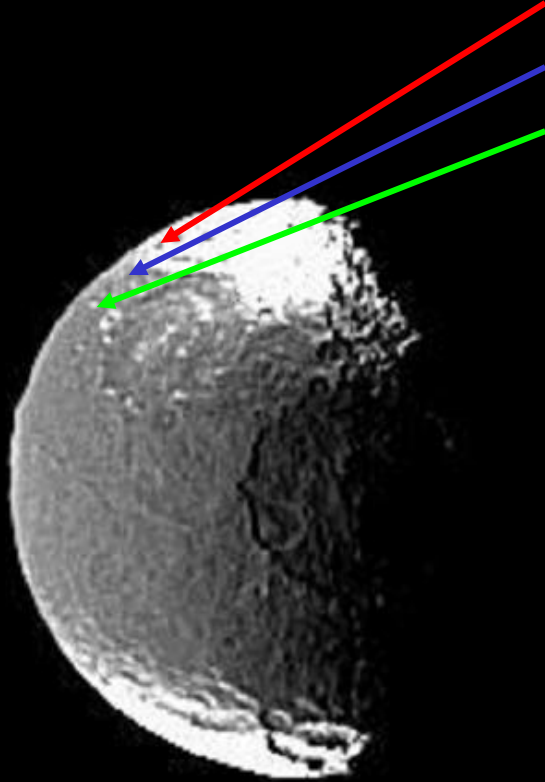
**A quelque
distance de la
frontière, coté
clair !**



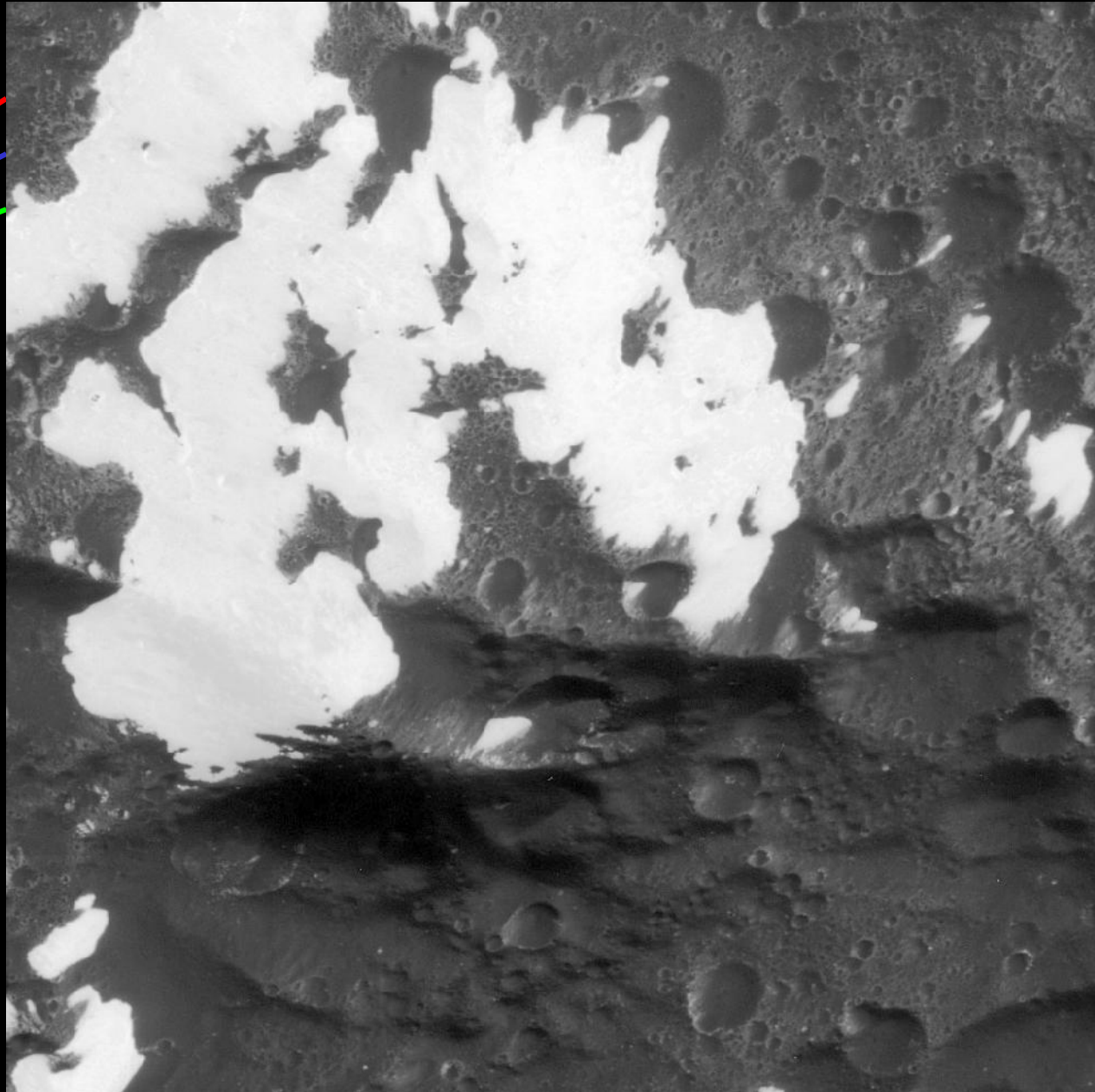


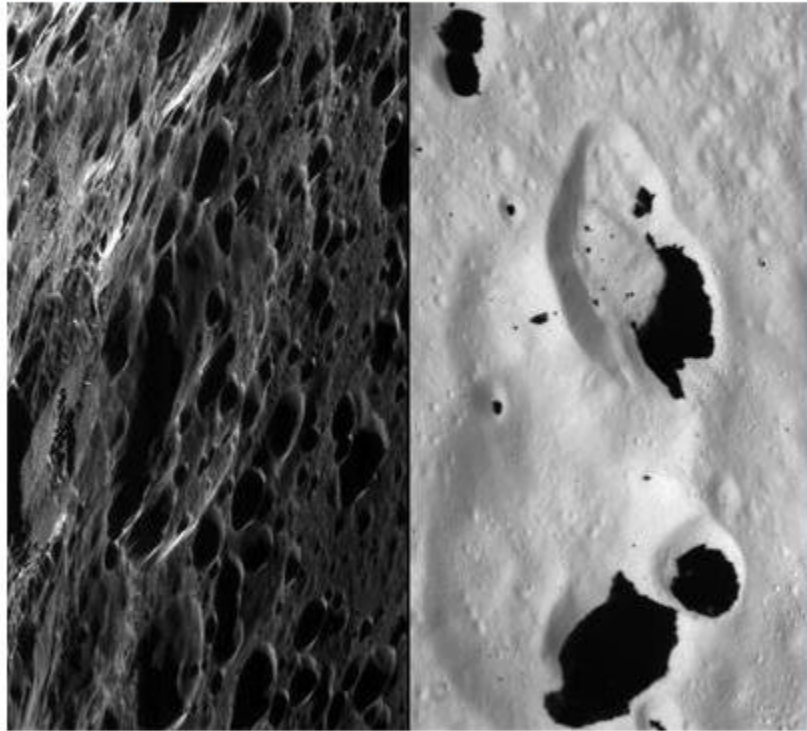
Sur la
frontière !





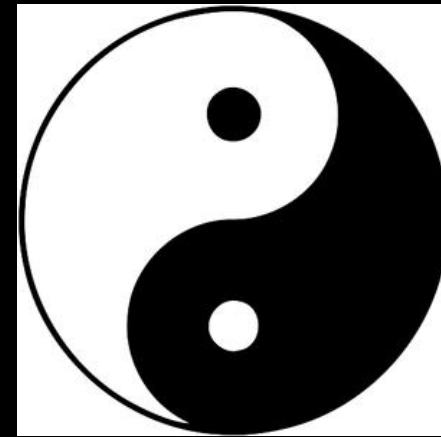
**A quelque
distance de la
frontière, coté
sombre !**





Saturn's Moon Iapetus is the Yin-and-Yang of the Solar System

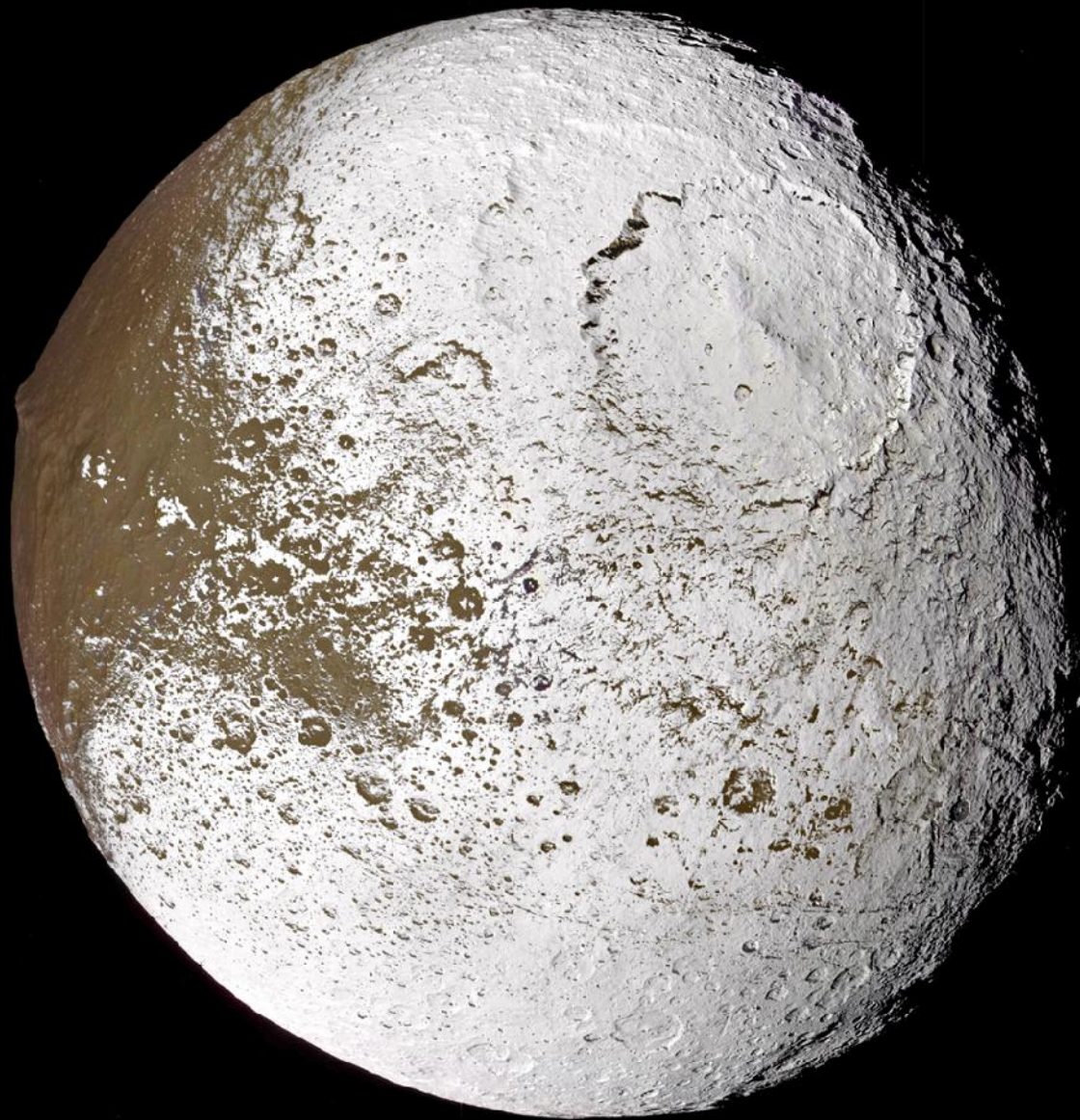
Scientists on the Cassini mission to Saturn are poring through hundreds of images returned from the Sept. 10 flyby of Saturn's two-toned moon Iapetus. Pictures returned late Tuesday and early Wednesday show the moon's yin and yang -- a white hemisphere resembling snow, and the other as black as tar.



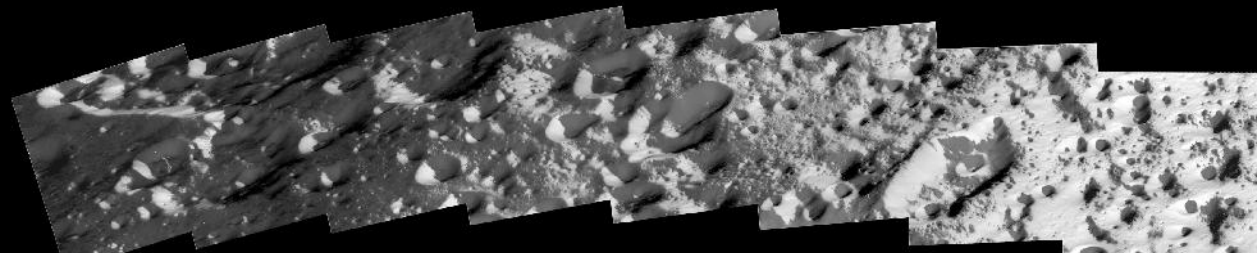
Yang = blanc = glace d'H₂O


Yin = Noir = matière organique

Quelle est cette matière organique ? Attendons les spectres ...



**Dernière minute :
images arrivées
vendredi 14
septembre, 18h**





**Titan, vu par
Voyager**

D = 5150 km

**C'est le seul
satellite du
Système Solaire
avec une
atmosphère
dense.**

**Comment voir
sous cette
atmosphère ?**



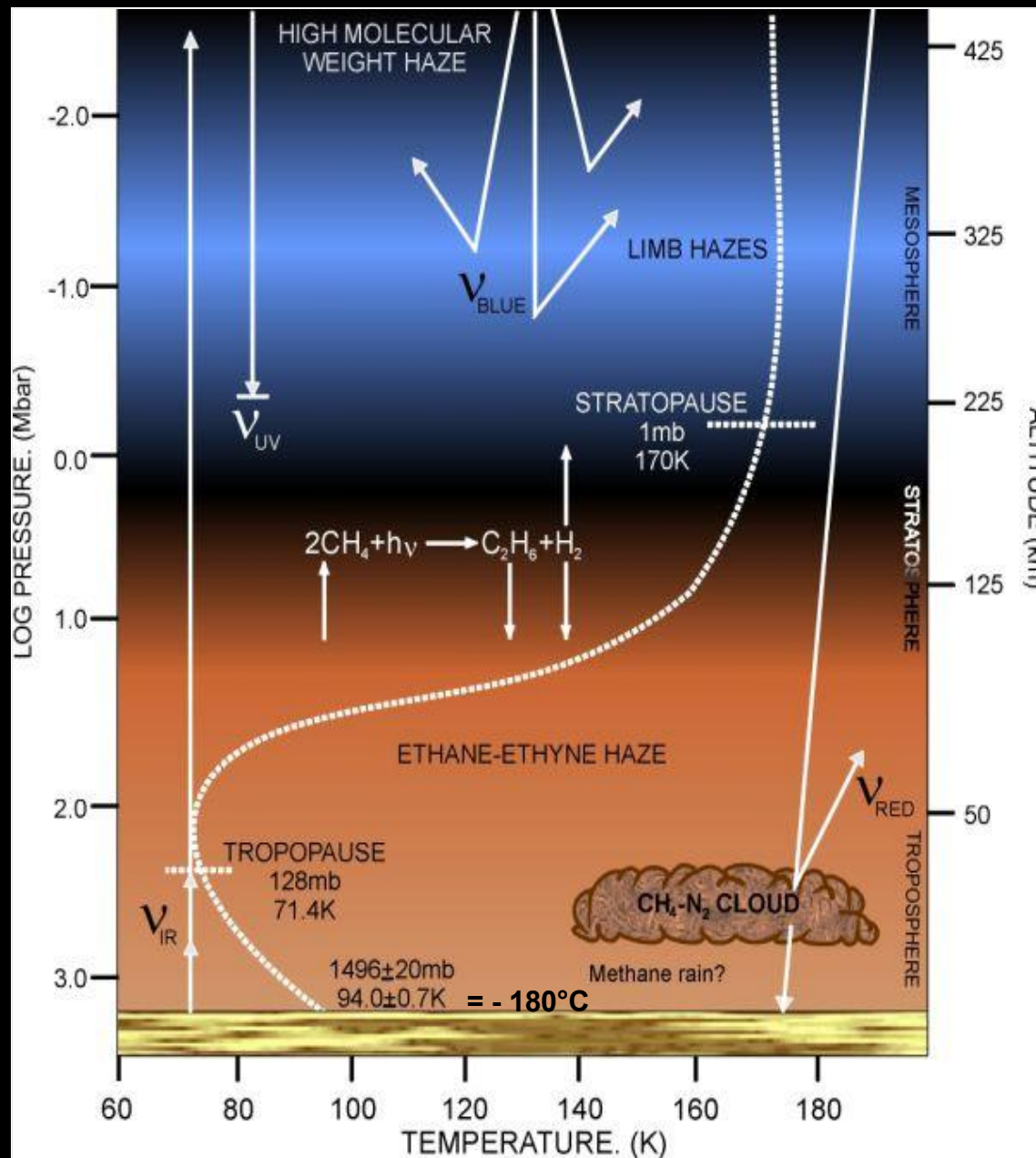
**Coucher de
soleil
derrière
l'atmosphère
de Titan
(Voyager).
Cette
atmosphère
est composée
de $> 95 \%$
d'azote et
d'au moins
3% de
méthane**

Modélisation Voyager (1981)

$\text{CH}_4 + \text{photons UV} \rightarrow$
 $2 \text{CH}_3\cdot + 2\text{H}\cdot \rightarrow$
 2CH_4 (majoritairement) et
aussi $\text{C}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$

$\text{C}_2\text{H}_6 + \text{CH}_4 +$
 $\text{photons UV} \rightarrow$
 $\text{C}_2\text{H}_5\cdot + \text{CH}_3\cdot + 2\text{H}\cdot$
 $\rightarrow \text{C}_3\text{H}_8 + \text{H}_2 \dots$

Ce qui « doit » se
passer dans

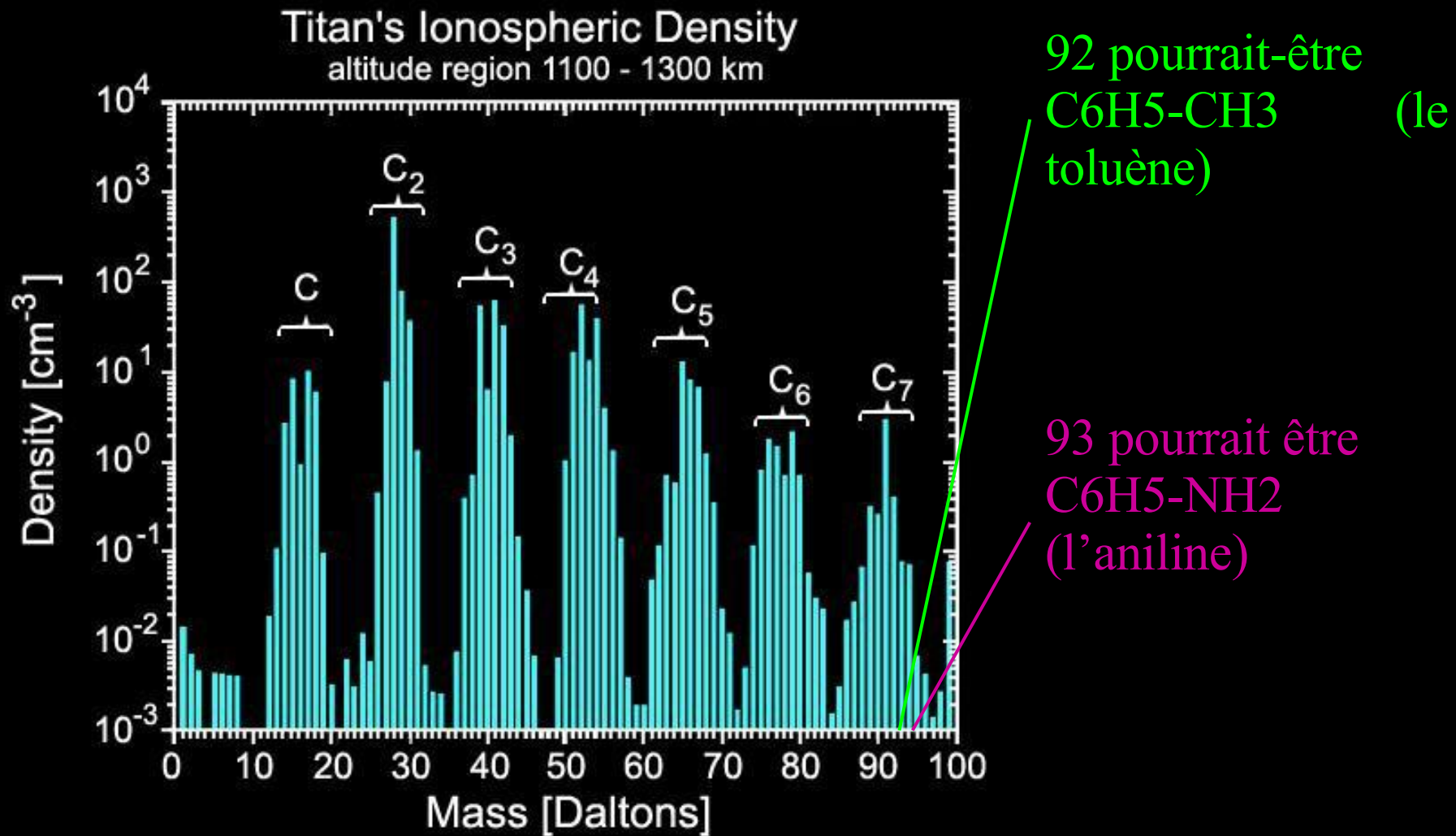


l'atmosphère de Titan ; il faut aller voir de plus près



Résultats Cassini

La haute atmosphère est « stratifiée »



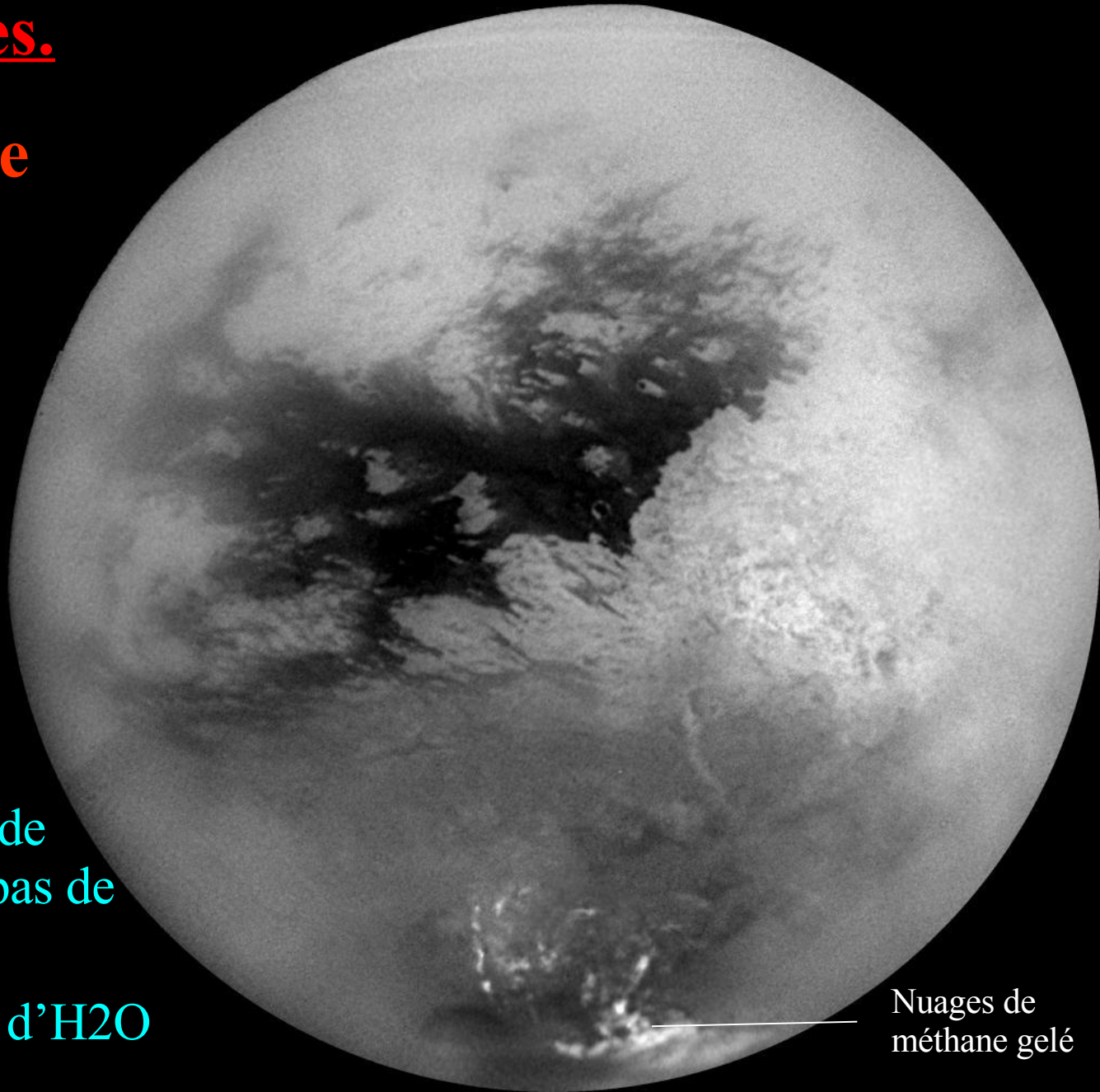
Dans la très haute atmosphère (1200 km), Cassini trouve des macro-molécules organiques.

Première méthode pour voir sous les nuages : les Infra-Rouges.

**Combinaison de
toutes les
images d'octo-
bre 2004 au
maximum de
leur résolution**

Sombre = riche en
hydrocarbures lourds
et/ou en méthane liquide
(les IR ne permettent pas de
trancher)

Clair = riche en glace d'H₂O

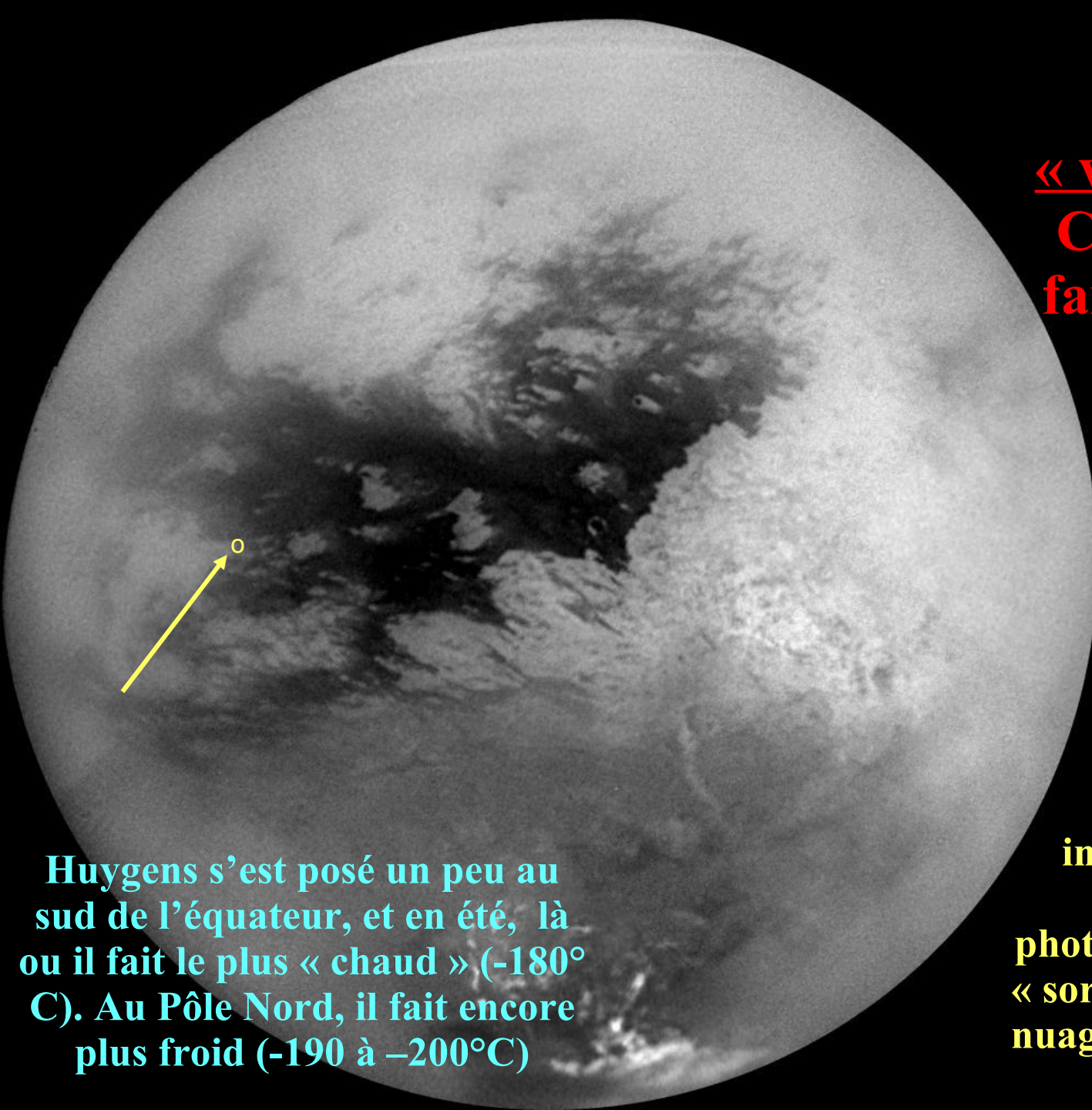


Nuages de
méthane gelé

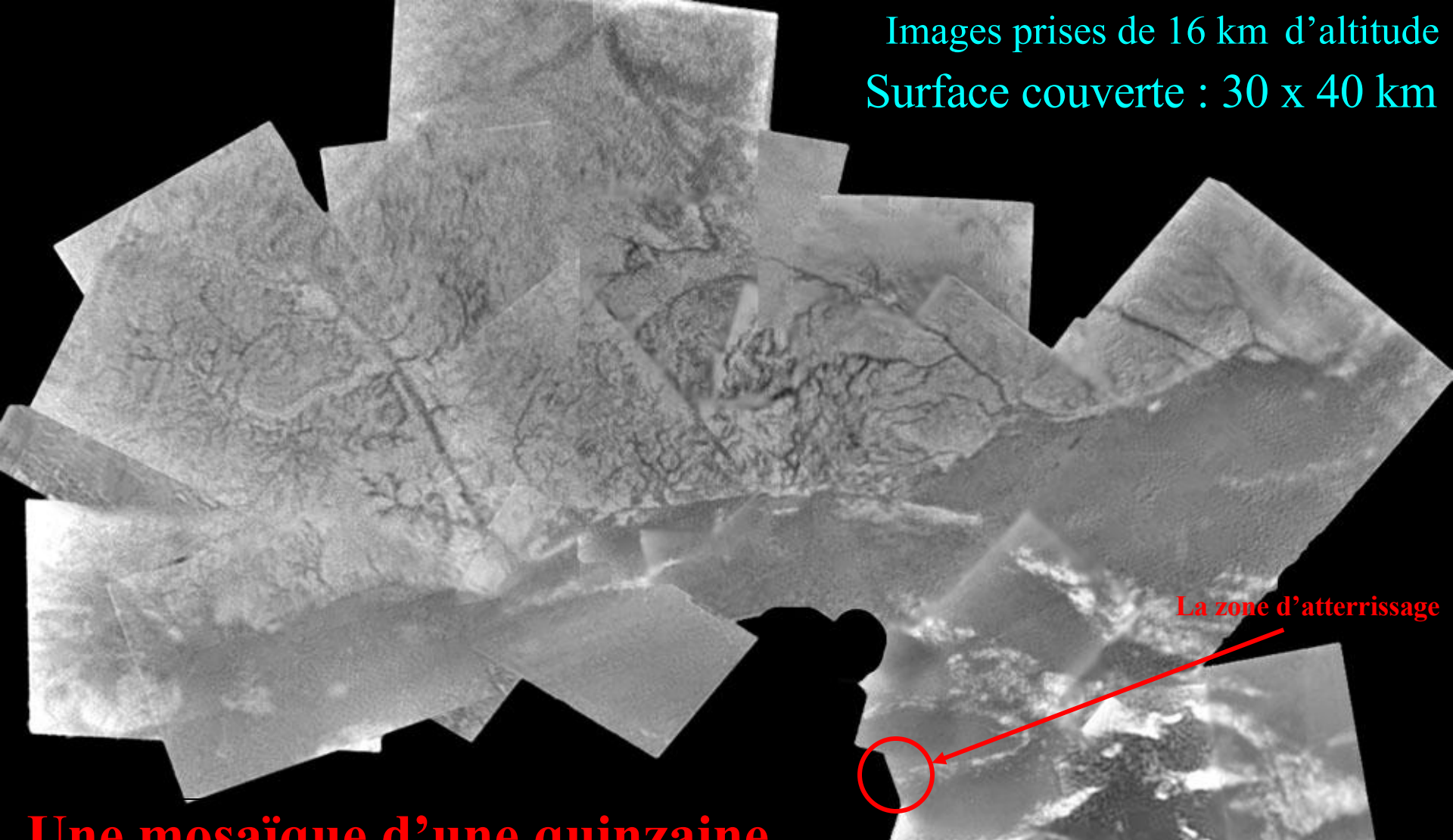
**Deuxième
méthode : aller
« voir sur place ».
C'est ce qui a été
fait avec succès le
14 janvier 2005
par la sonde
européenne
Huygens..**

**Le cercle jaune, de
40 km de diamètre,
indique la totalité de la
zone que Huygens a
photographié quand il est
« sorti » sous la couche de
nuages à 20 km d'altitude**

**Huygens s'est posé un peu au
sud de l'équateur, et en été, là
ou il fait le plus « chaud » (-180°
C). Au Pôle Nord, il fait encore
plus froid (-190 à -200° C)**

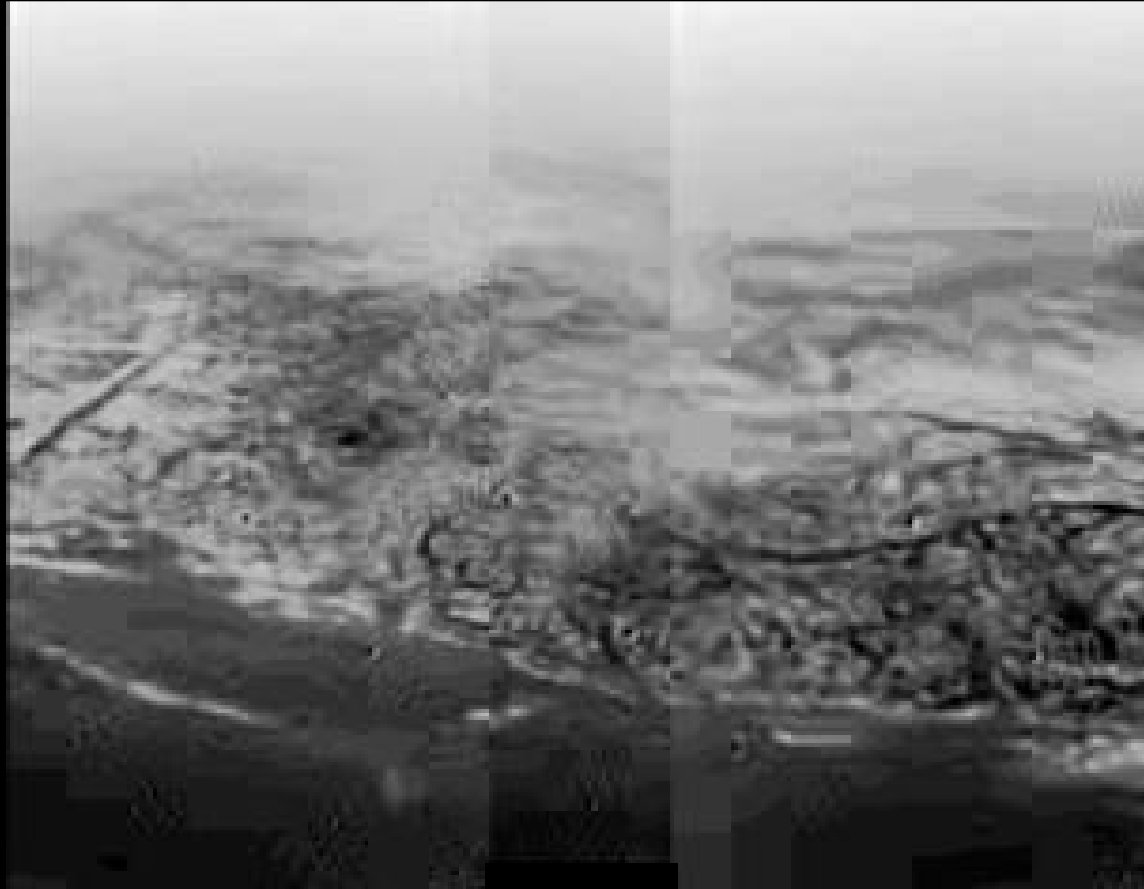


Images prises de 16 km d'altitude
Surface couverte : 30 x 40 km



La zone d'atterrissage

Une mosaïque d'une quinzaine d'images. Ça ressemble à une « terre » et une « mer », avec des « rivières », une « côte », des « estuaires », un « delta », des « îles » avec bancs de brumes...



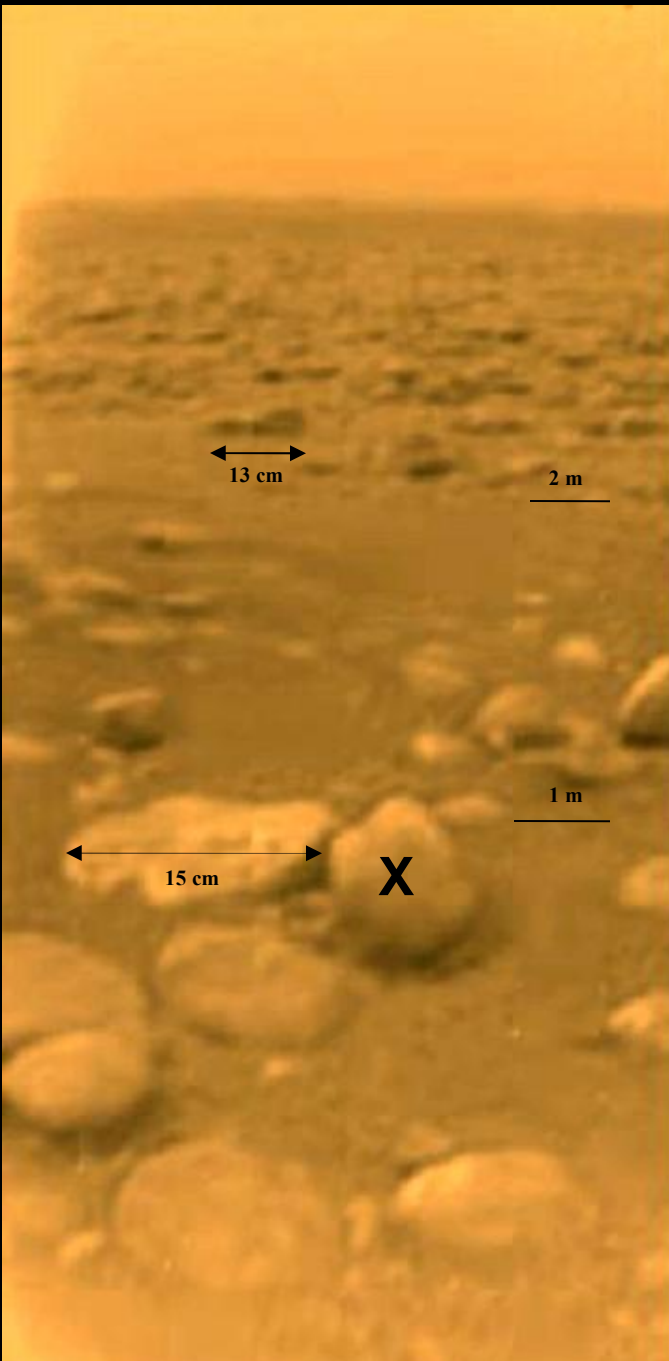
**Une vue oblique prise de 8 km d'altitude,
avec « terre », « mer », « côtes » ...**

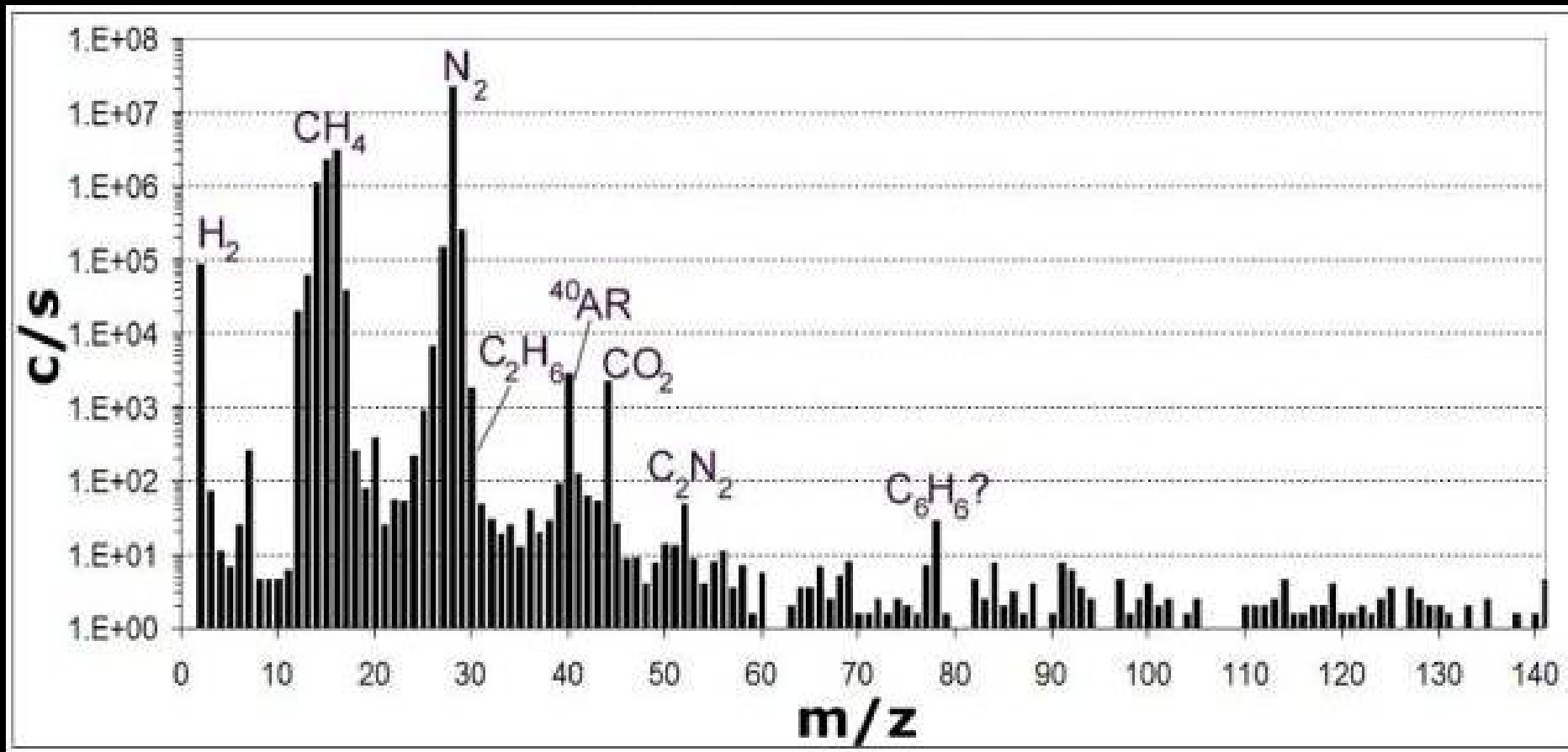
Longueur de la cote : environ 3 km

Voici la « vue du sol » : du sable et des « galets » (de glace d'H₂O probablement). Le sable était « mouillé » de méthane liquide. Les galets sont arrondis, comme ceux d'une plage ou d'un torrent (de méthane). Autour du galet X, sillon en creux, comme ce qui est dégagé par un courant.

Ce qu'on pense, c'est qu'il pleut parfois du méthane, que le méthane liquide coule en « nettoyant » les continents de glace, et en emmenant avec lui galets de glace et composés organiques sombres (genre goudron).

Cette « mer » serait donc plus un « marécage » peu profond qu'une véritable mer, marécage (provisoirement ?) asséché sur le site d'atterrissage lors de cet été équatorial .

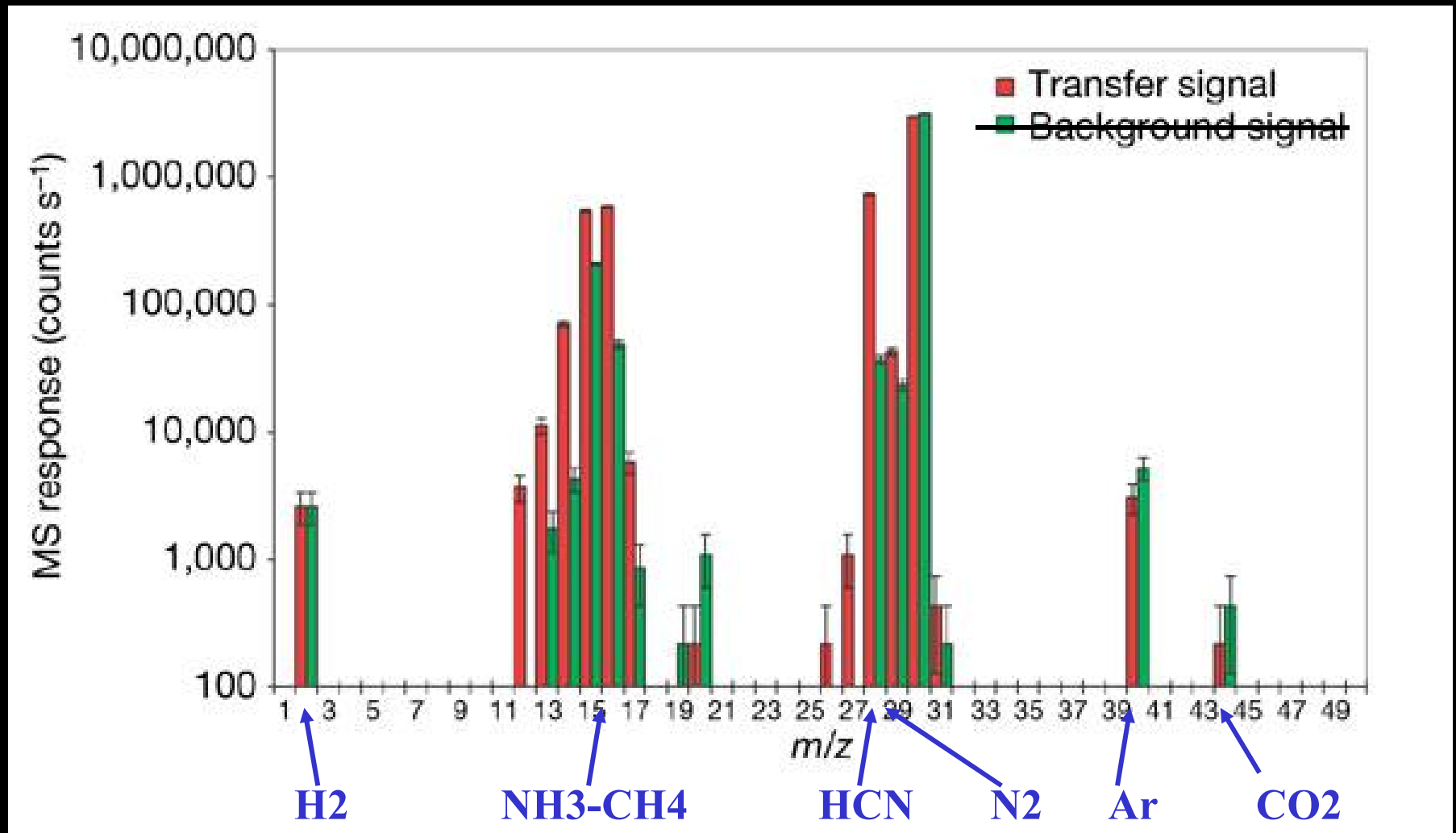




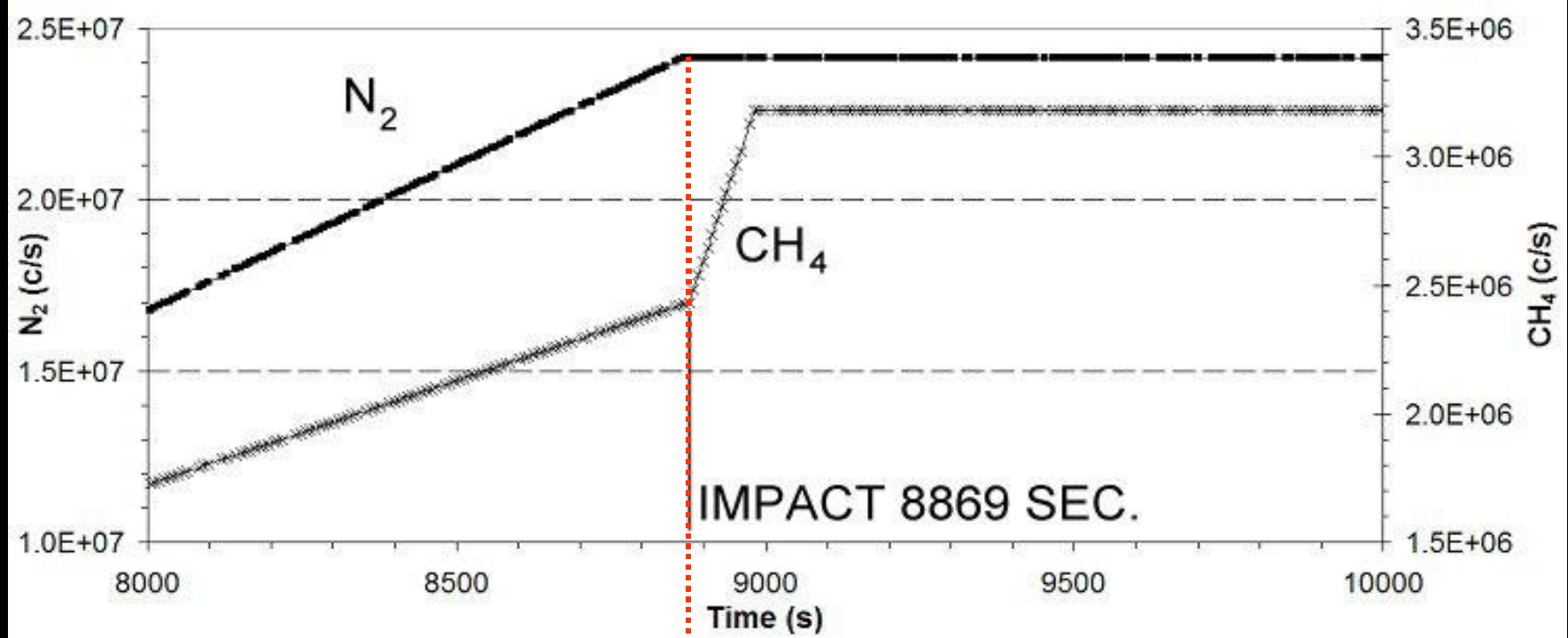
Au cours de sa descente, et au sol, Huygens a fait des analyses dans l'atmosphère.

Voici l'analyse des gaz de l'atmosphère (au sol)

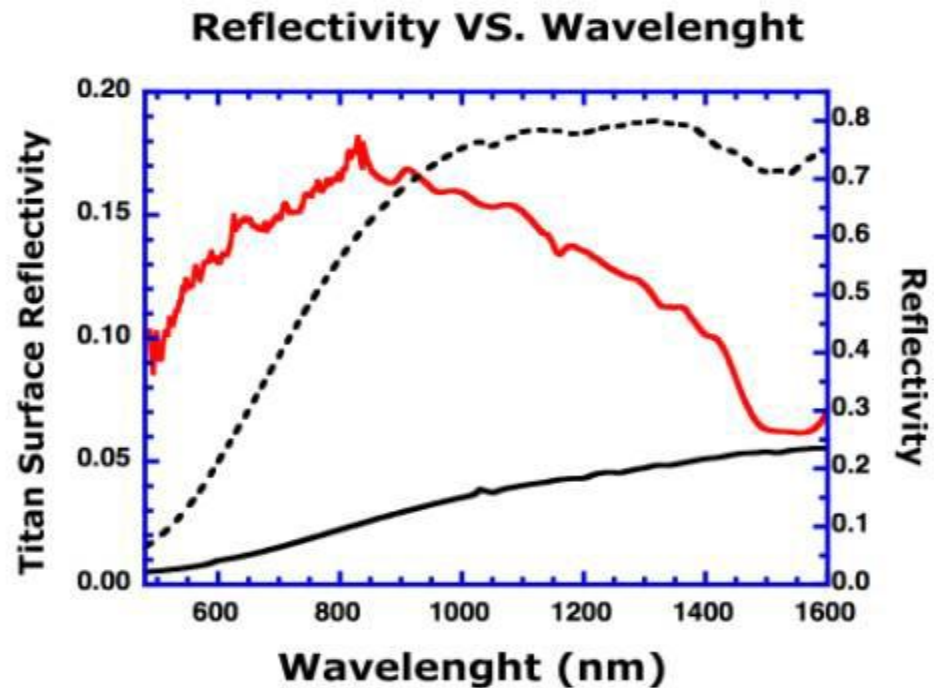
Analyse par pyrolyse des aérosols de l'atmosphère



La pyrolyse libère des radicaux H₂, NH₃, N₂, HCN, CO₂... Les particules des aérosols sont des macromolécules (solides ou liquides) CHON (avec de l'argon adsorbé)

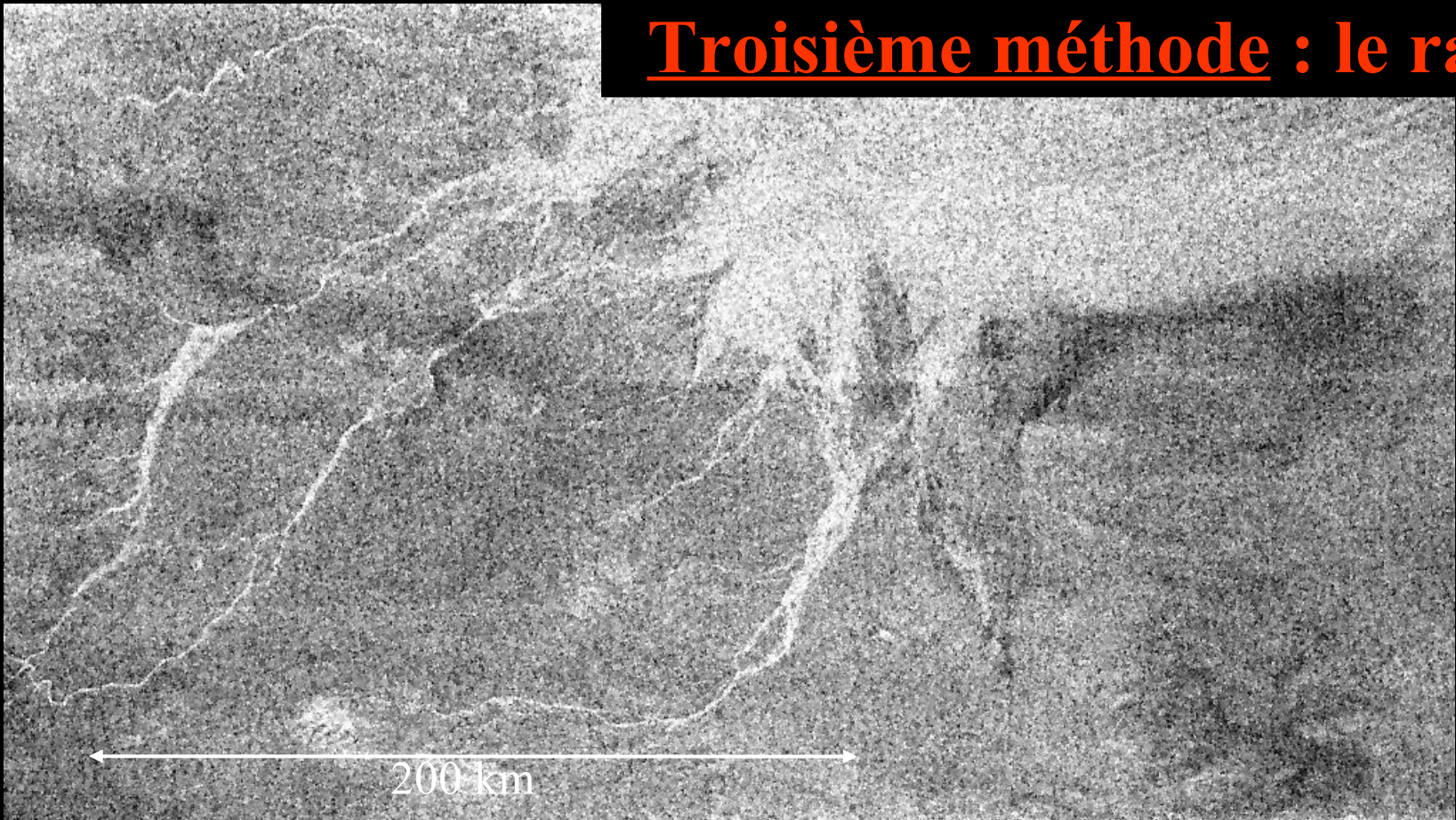


Courbe montrant l'évolution du nombre de molécules captées pendant la descente et après l'atterrissage. Pendant la descente, ce nombre augmente, normal. Une fois l'atterrissage fait, le nombre de molécules d'azote est stable ; normal. Il y a par contre une bouffée de méthane juste après l'impact : la chaleur et/ou la pression dues à l'atterrissage a occasionné un dégagement de méthane. Huygens s'est posé sur du « sable mouillé » (de méthane)



Spectre de réflexion (IR) de la surface de Titan. En rouge, le spectre observé ; en noir, les spectres de composés « candidats ». Aucun composé (ou mélange de composés) ne reproduit les spectres réels. On ne sait pas quelle est la composition de cette substance brunâtre !

Troisième méthode : le radar

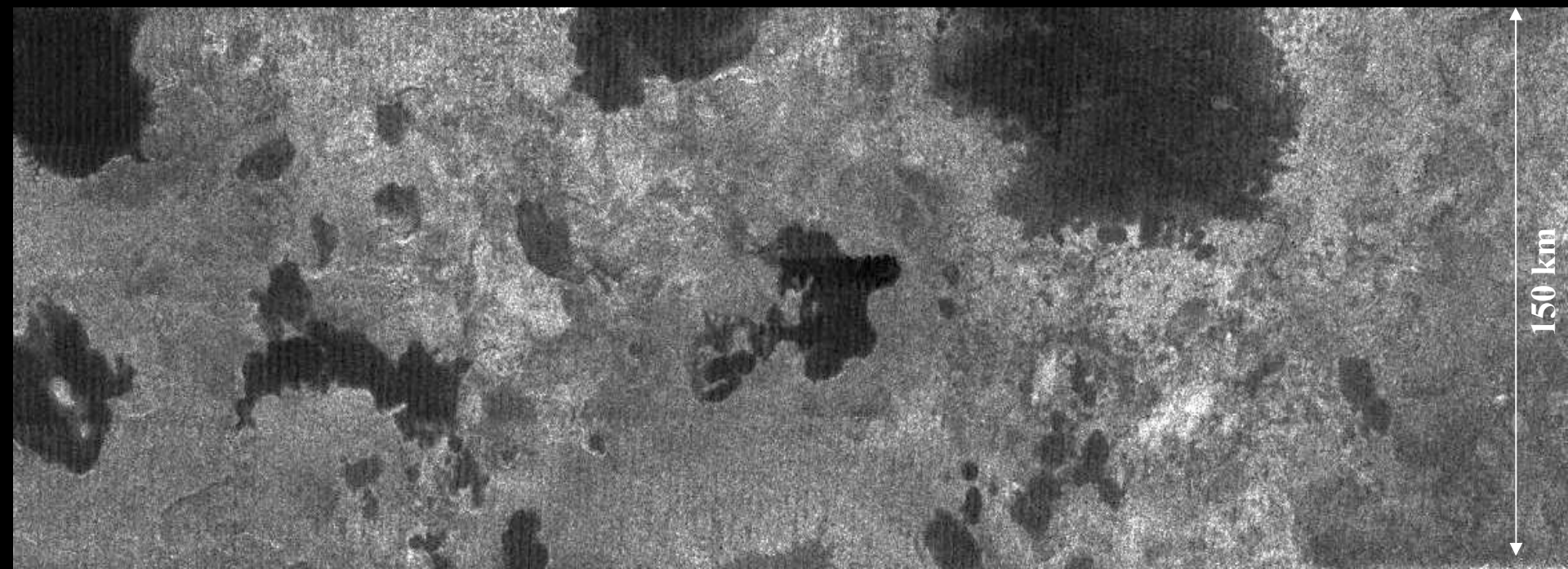


Loin du pôle, sur les « terres », un réseau hydrographique ou plutôt « méthanographique », à priori à sec. Le site d'atterrissage d'Huygens n'était pas une exception ! Et les réseaux peuvent faire jusqu'à 200 km de long !



**Des champs de dunes (de sable de glace
d'H₂O), des montagnes (de glace d'H₂O)**

Et les survols radar de juillet et septembre 2006, au dessus du Pôle Nord plongé dans la nuit polaire, montrent de très probables lacs, lacs de méthane liquide (ou plutôt d'un mélange méthane-éthane) à -190°C , dont les vagues déferlent sur la côte rocheuse faite de glace d'eau

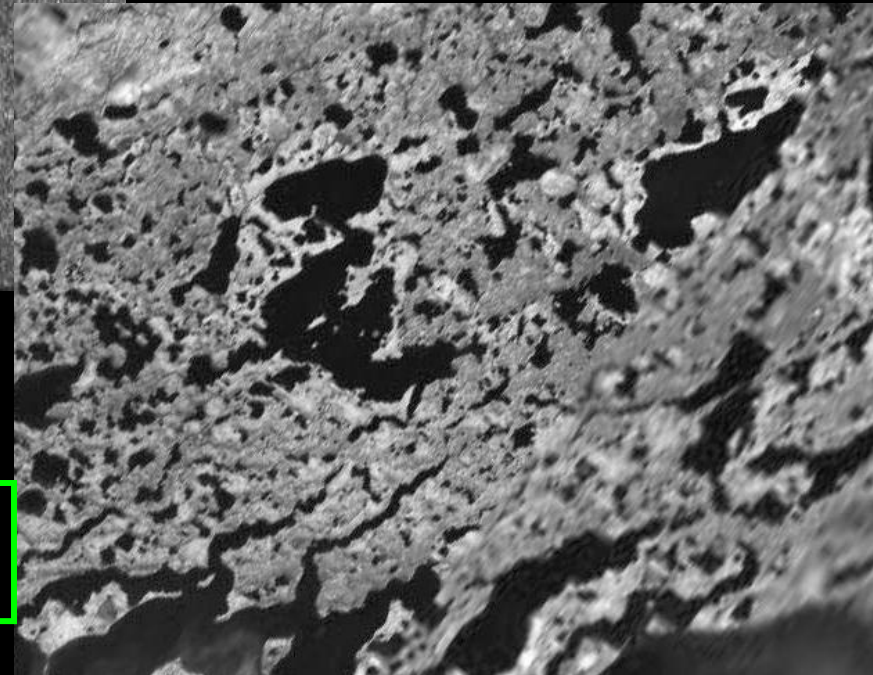


Une comparaison avec des lacs terrestres

**Des « lacs » près du
Pôle Nord de Titan**

100 km

**Des lacs au nord de
l'Alaska**



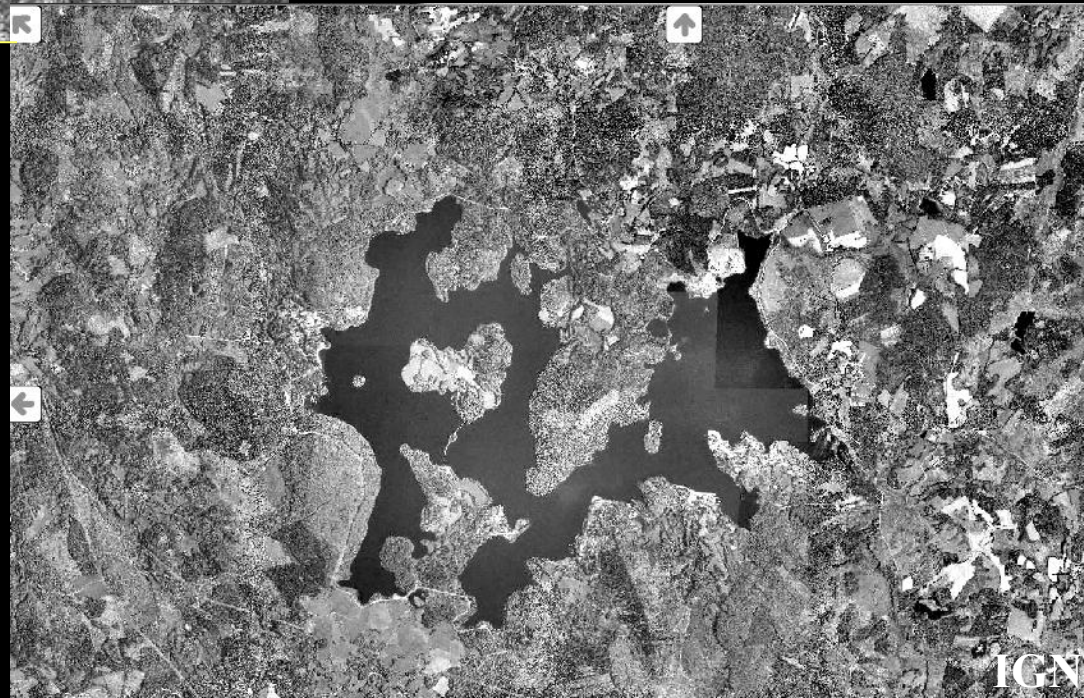
**Des lacs de
montagnes**



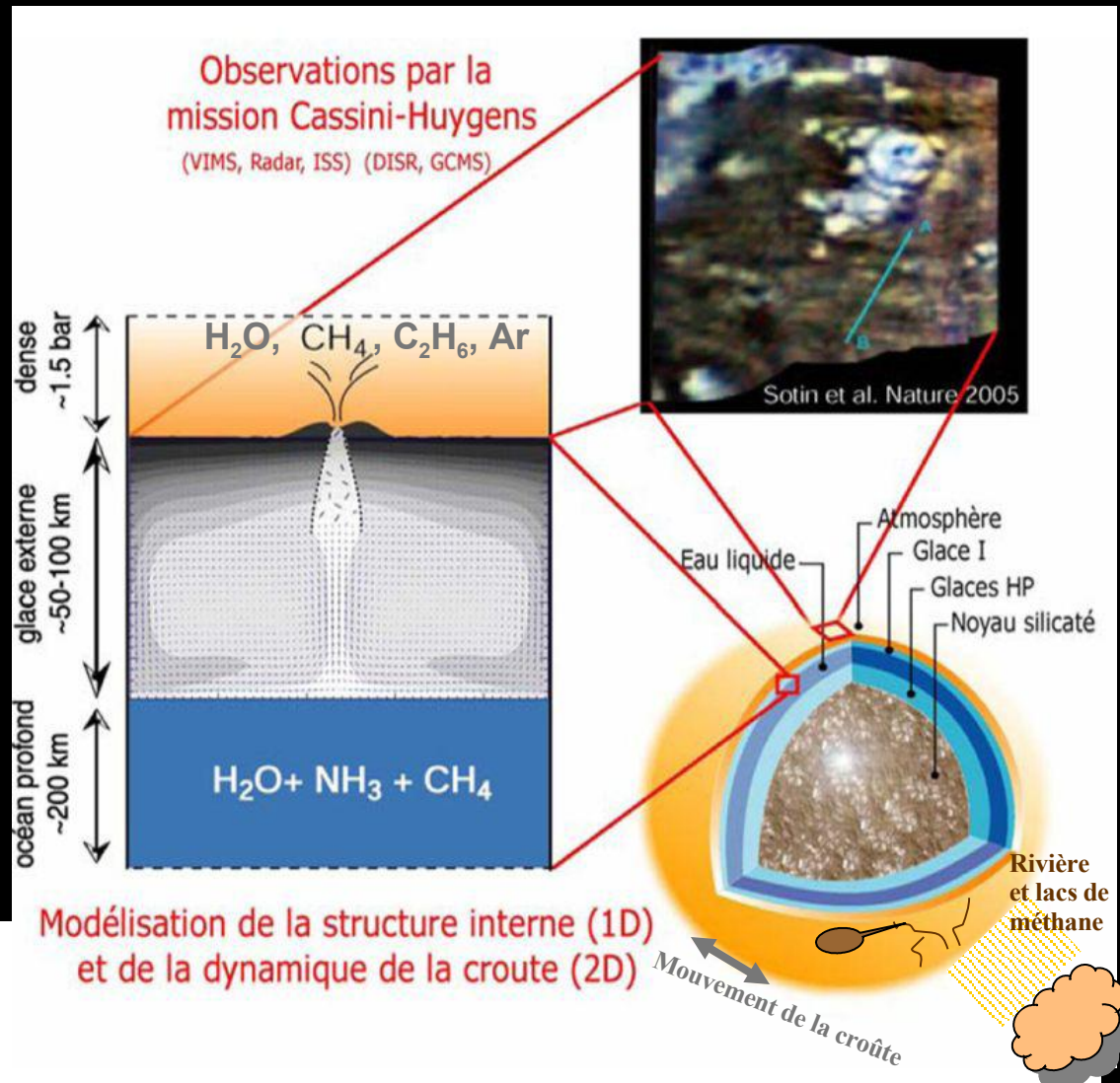
100 km



**Quel est le lac
titanien et le lac
limousin (lac de
Vassivière) ?**



Voilà la synthèse de ce qu'on pense aujourd'hui de Titan quand à sa géologie (hors chimie de l'atmosphère)



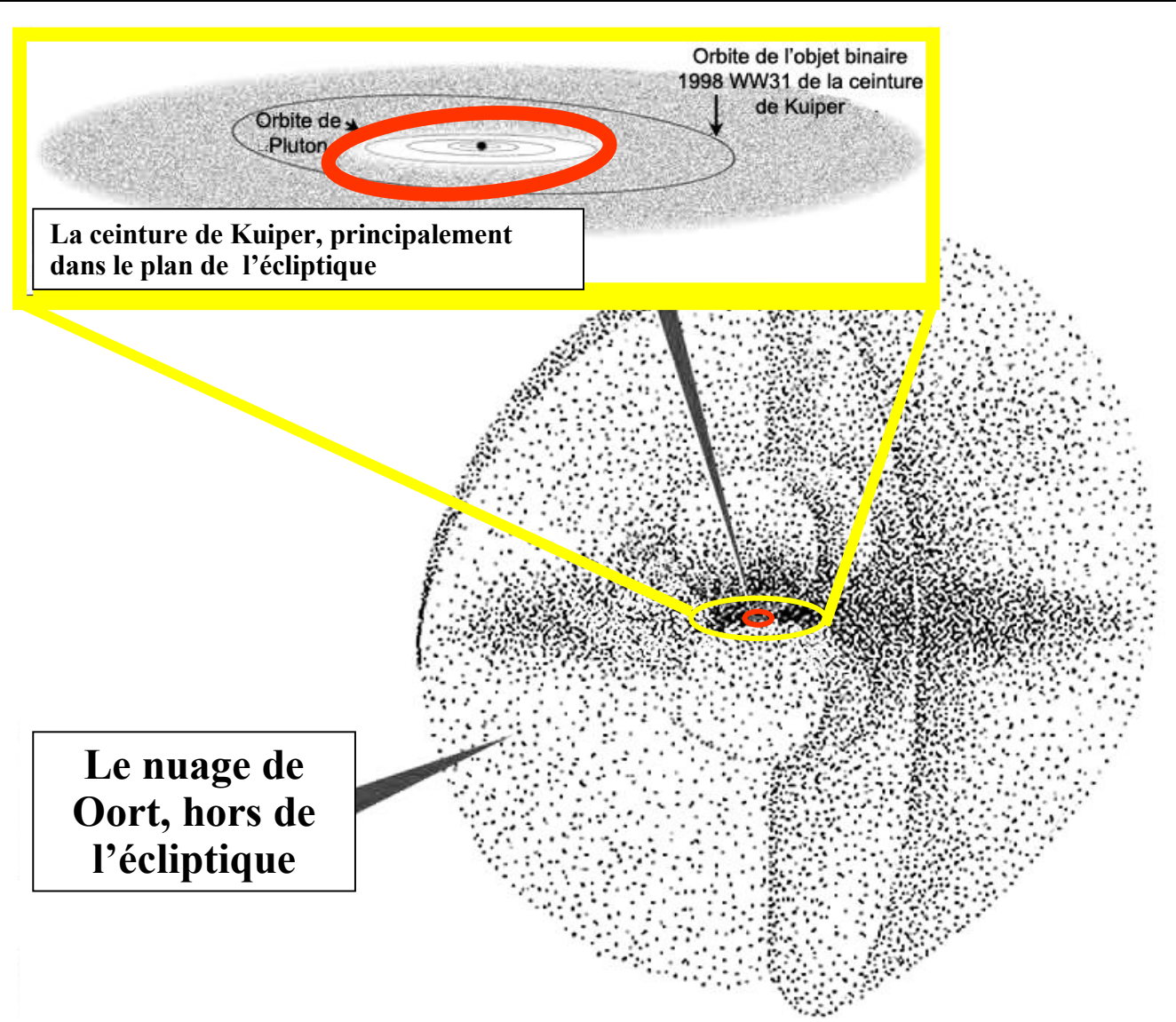


**Voici à quoi pourrait
ressembler un
paysage polaire de
Titan : montagne de
glaces salées par des
macro-molécules
organiques, rivières**

**et lacs d'hydrocarbures légers (méthane et
éthane à -190°C). Méthane et éthane liquides
étant de bons solvants organiques (non polaires il
est vrai) , on peut y supposer une chimie
organique fort complexe, et pourquoi pas plus ?**

Et au delà des planètes géantes ? Pluton, un des objets de la ceinture de Kuiper, et le nuage de Oort

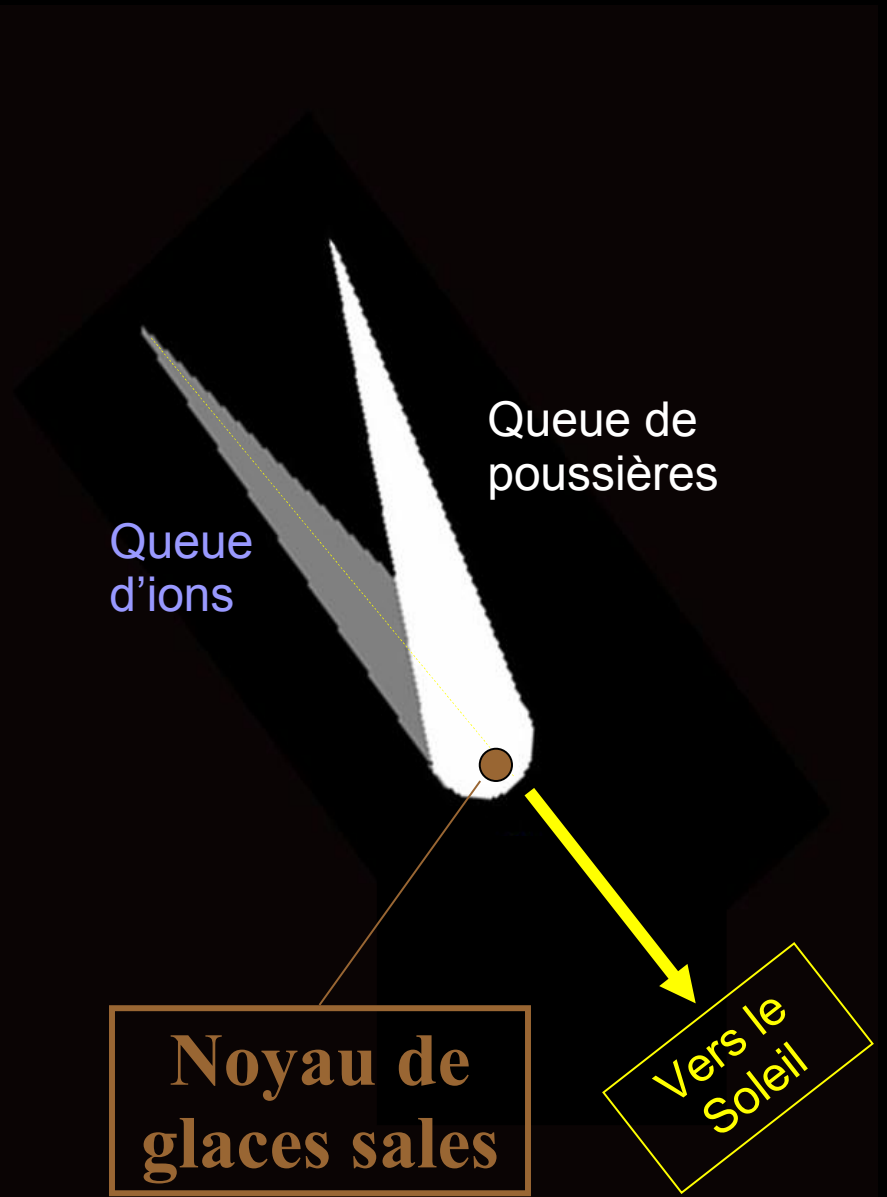
Des perturbations orbitales font que, parfois, certains de ces objets s'approchent du soleil et deviennent des comètes



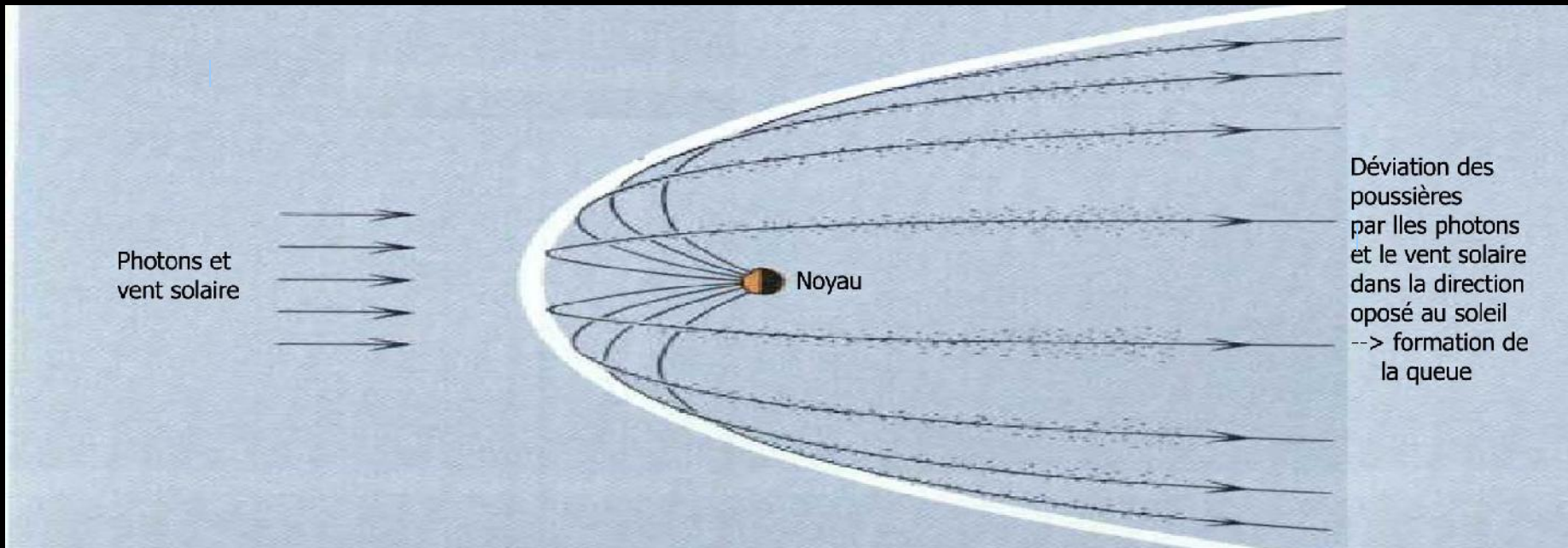
Les molécules et ions (gaz et poussières) cométaires identifiées depuis la Terre



- H_2O , OH , H_2O^+ , H_3O^+ ,
- CO , CO_2 , CO^+ , HCO^+ ,
- H_2S , SO , SO_2 , H_2CS , OCS , CS ,
- CH_3OH , H_2CO , HCOOH ,
 CH_3OCHO ,
- HCN , CH_3CN , HC_3N , HNCO ,
 CN , NH_3 , NH_2 , NH_2CHO , NH ,
- CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , CH^+ , C_3 , C_2 ,
- He , Na , K , O^+ ,
- Mg_2SiO_4 (olivine magnésienne)
- ainsi que les variétés isotopiques suivantes : HDO ,
 DCN , H^{13}CN , HC^{15}N , C^{34}S



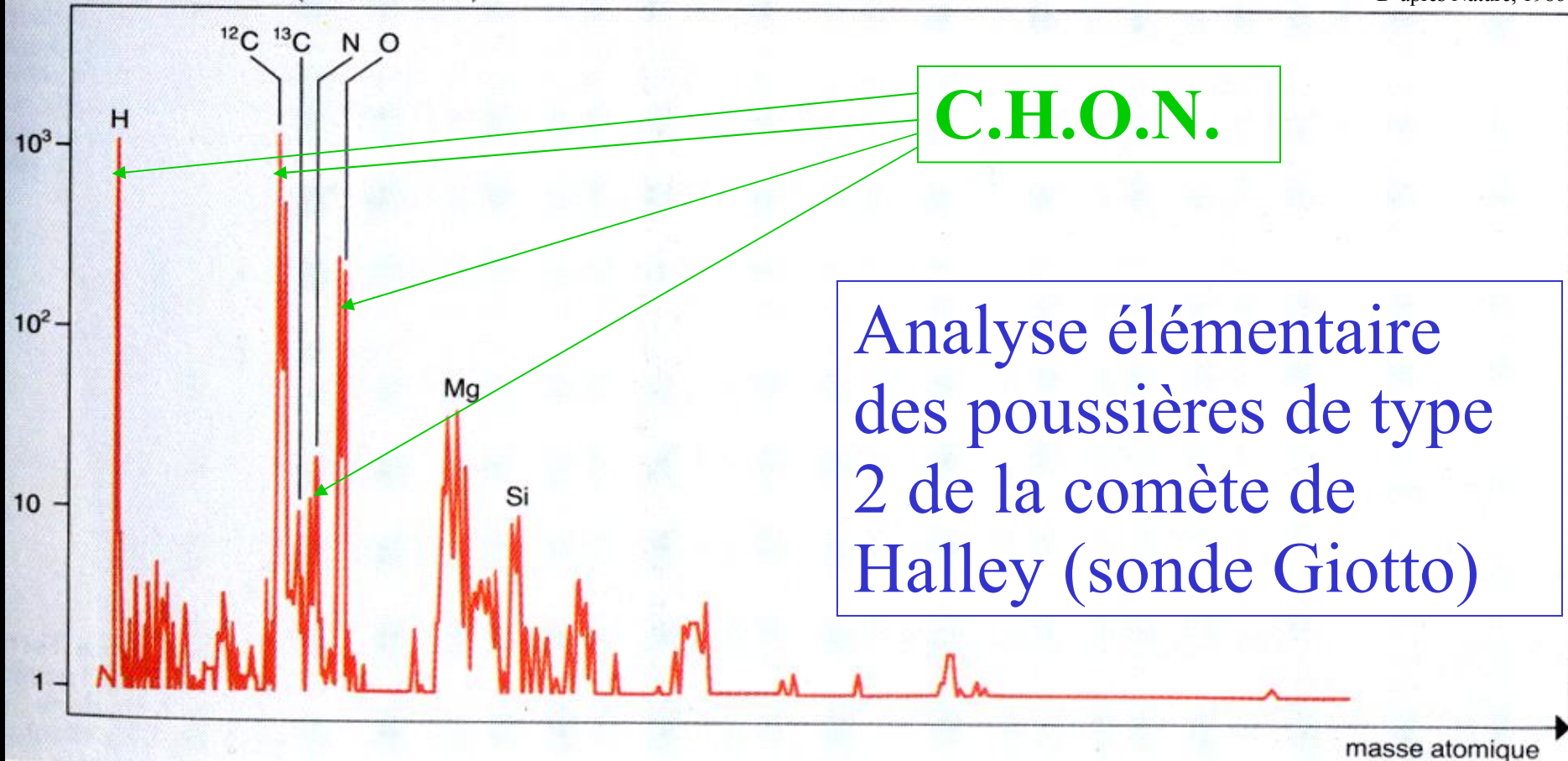
Une comète, comment ça marche ?



Le premier noyau photographié : la comète de Halley (1986, ESA)

15 km





Résultats 1986

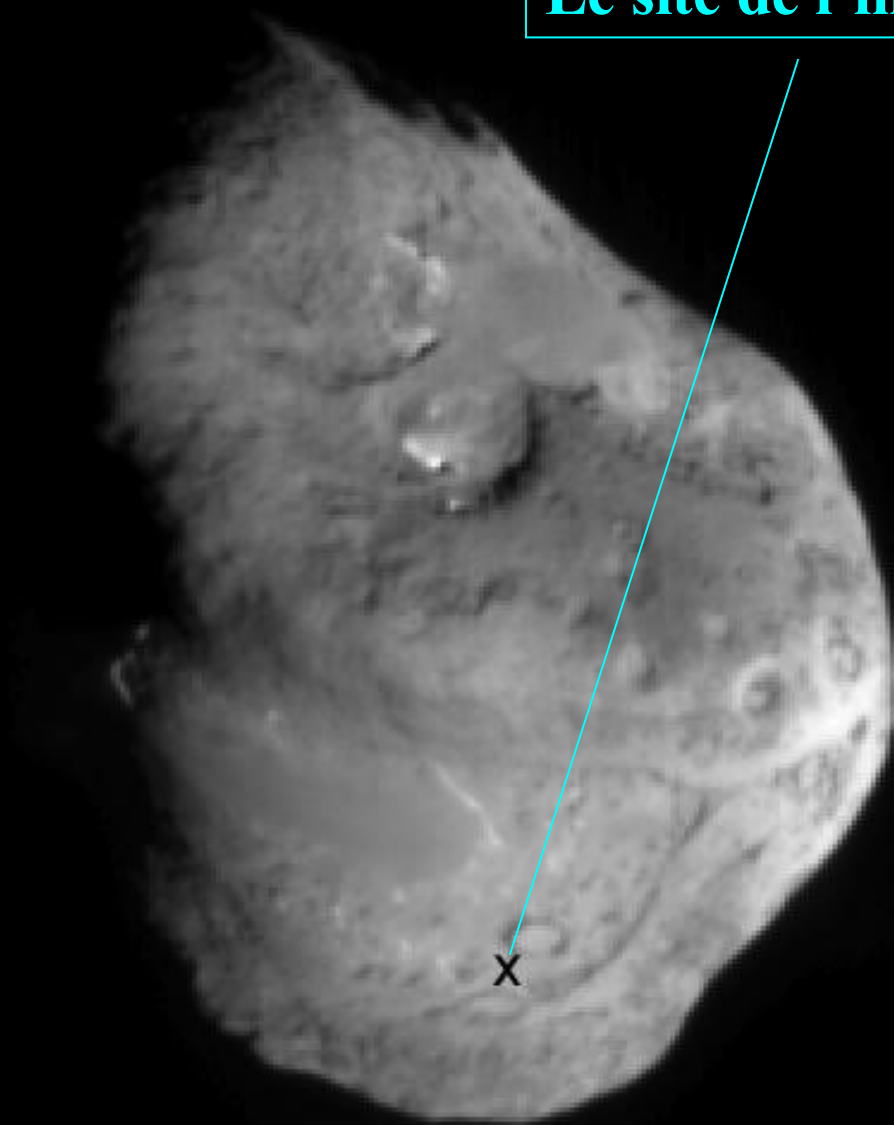
**Et voilà pourquoi c'est important d'analyser ces
poussières cométaires, de chimie C.H.O.N., initiales
qui ravissent n'importe quels biologistes !
Il y a donc eu d'autres missions**



5 km

**La comète Temple 1 (2005, Nasa), héroïne
malgré elle du vrai Deep Impact**

Le site de l'impact



1 km

**Un
« boulet »
quitte la
sonde
principale.**

Il s'approche



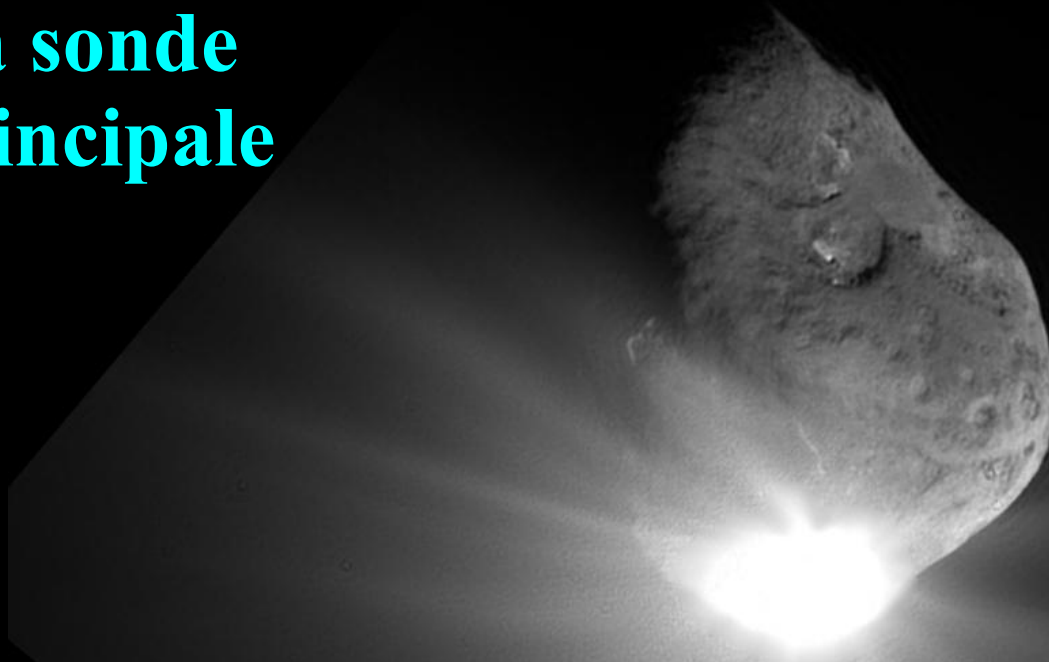
Encore !

X

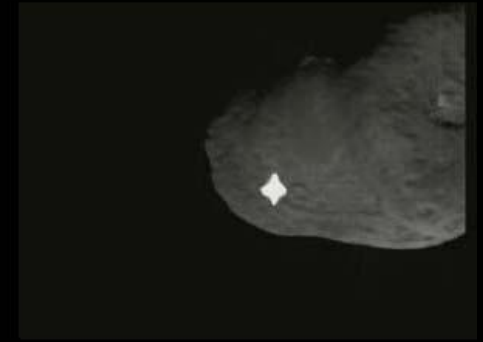
Encore !

X

**L'impact vu par
la sonde
principale**

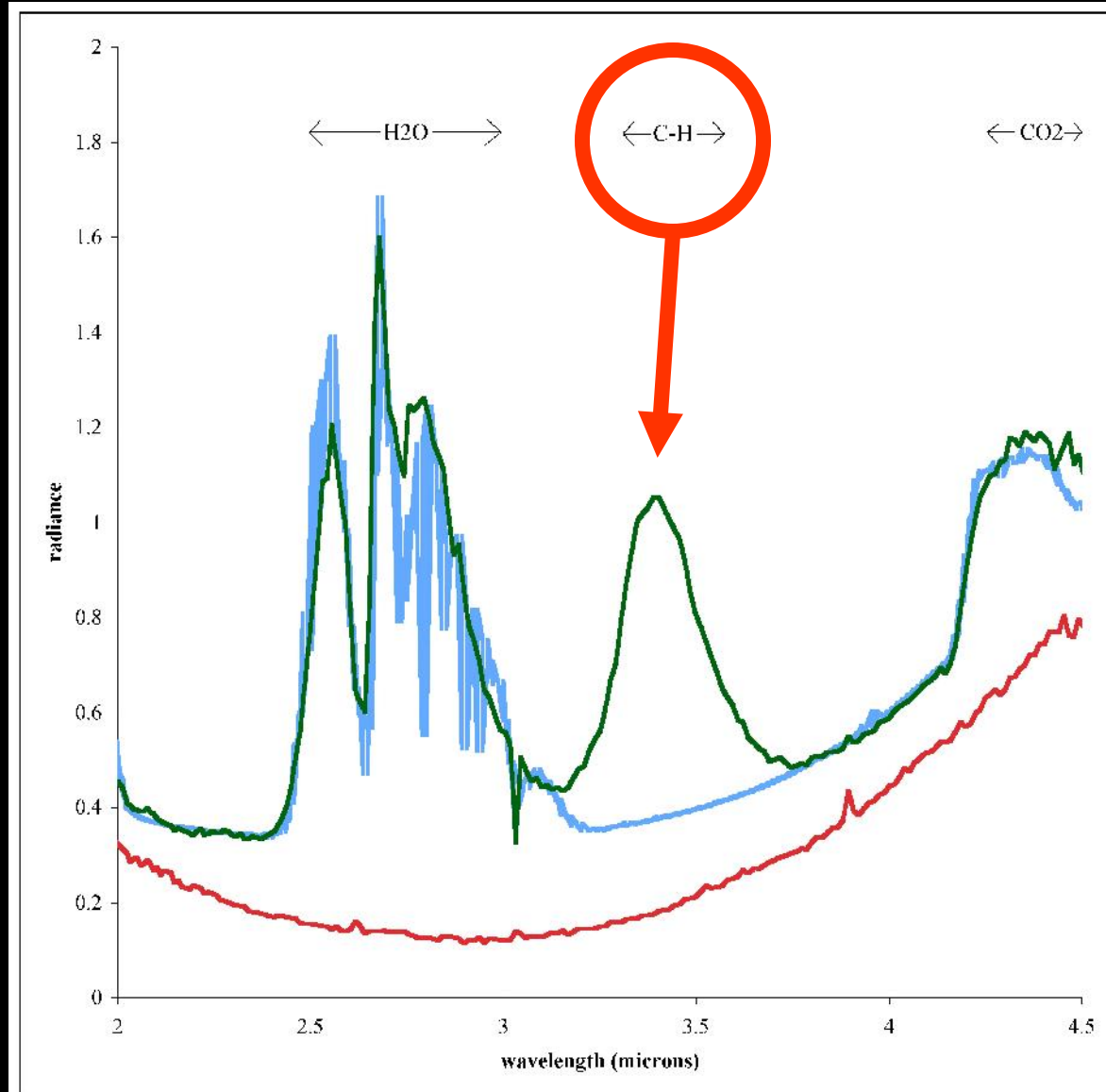


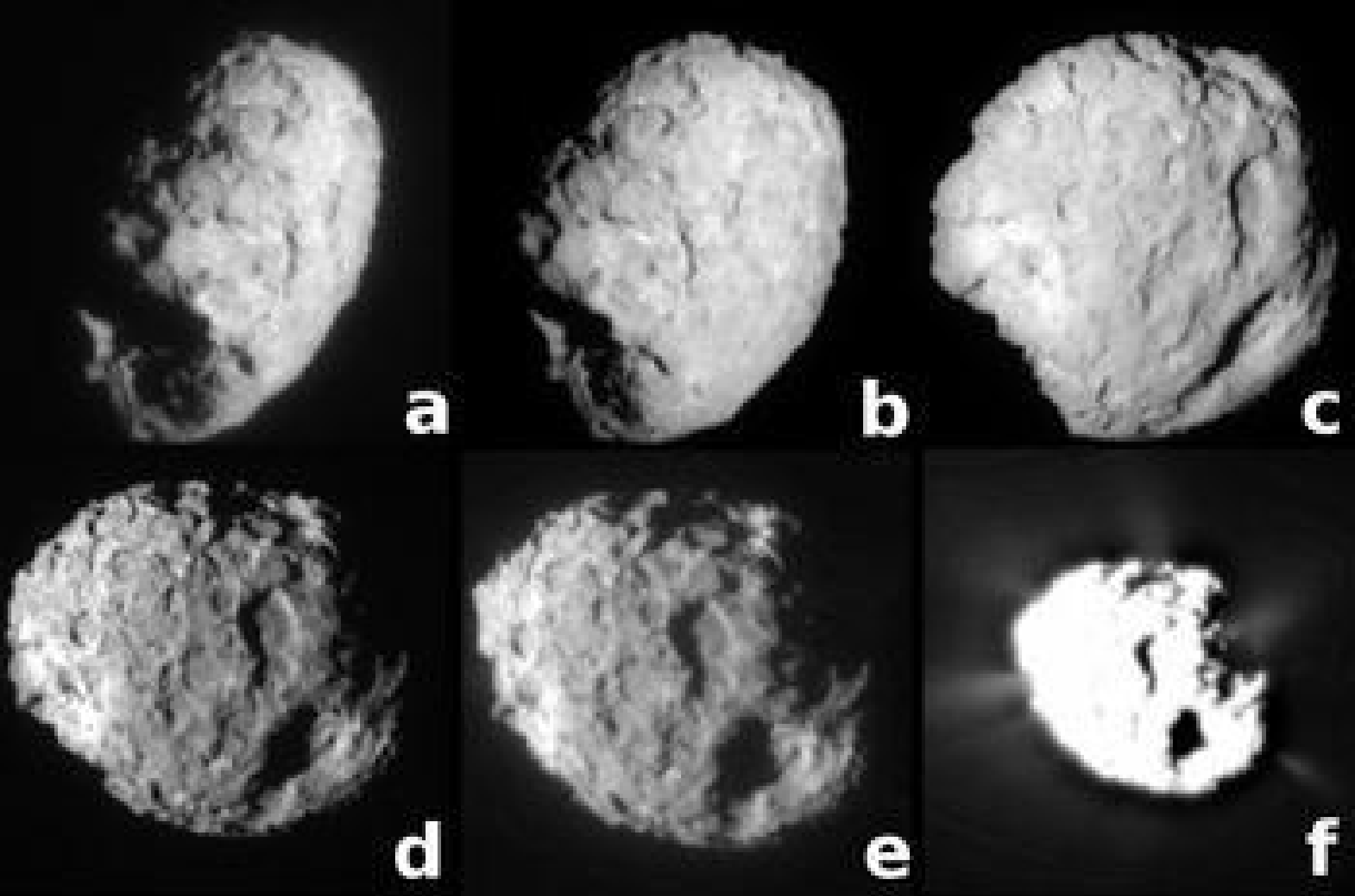
**Le film de
l'impact : une
image toute les
40 secondes**



**Le spectre IR des
« gaz
d'échappement » :
H₂O, CO₂ et
hydrocarbures.**

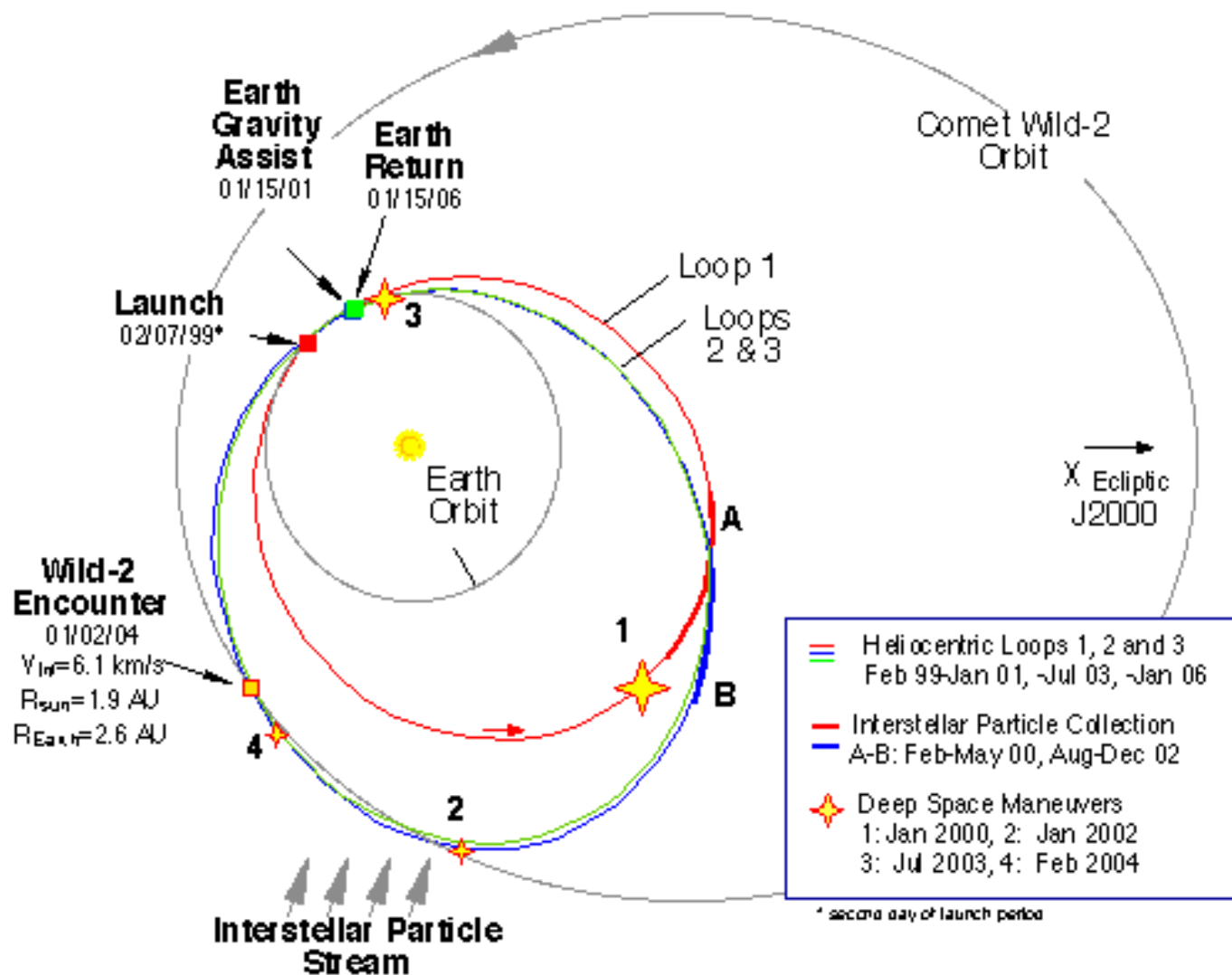
**Il y a bien des
molécules
organiques sur
cette comète !**





5 km

La comète Wild 2 (2004, Nasa)

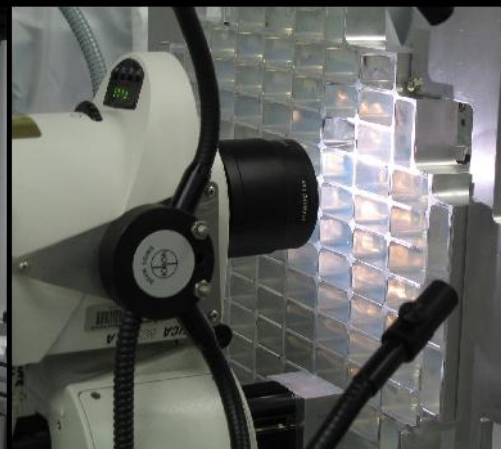


SD - WD - EH - Aug 02

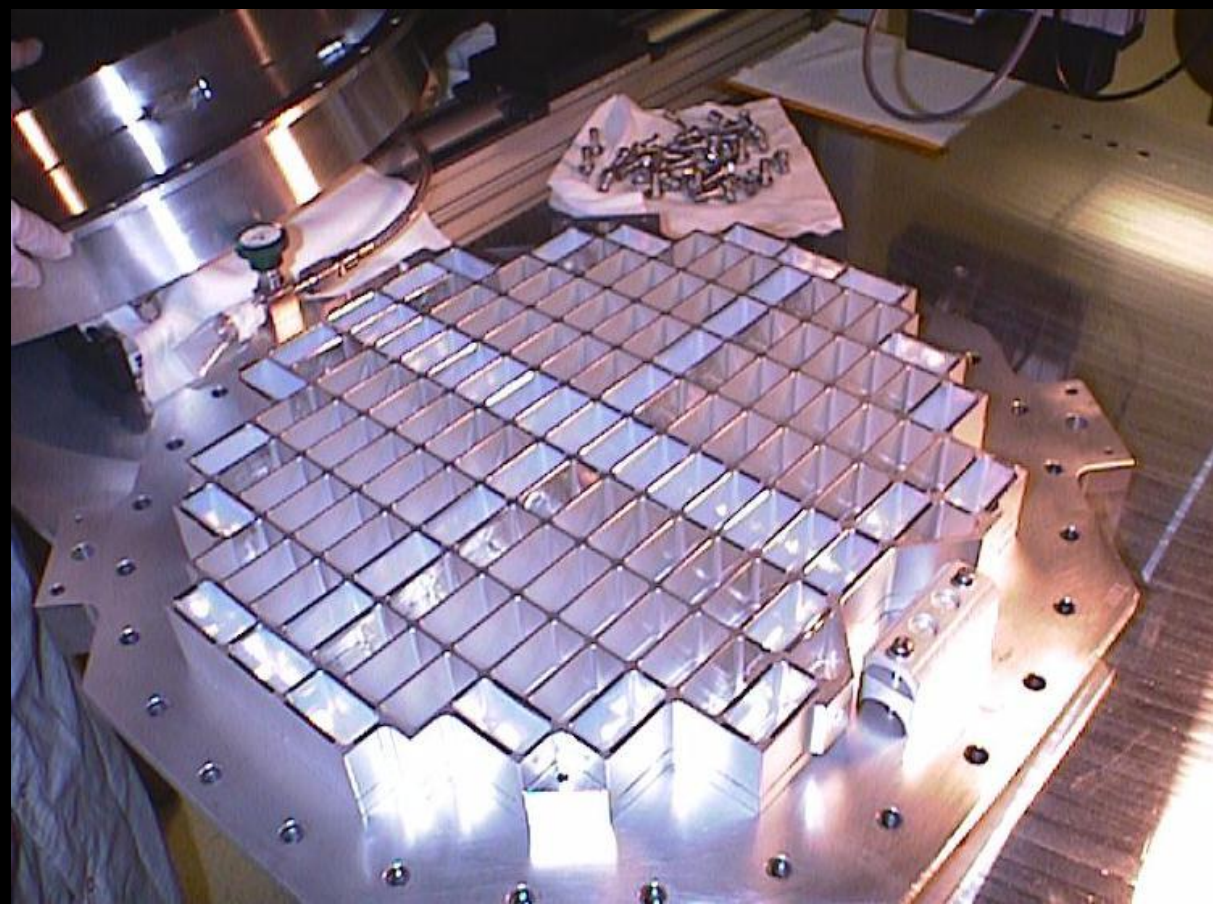
L'orbite de la mission Stardust qui a survolé la comète Wild 2 en 2004, et qui est revenue sur Terre en janvier 2006



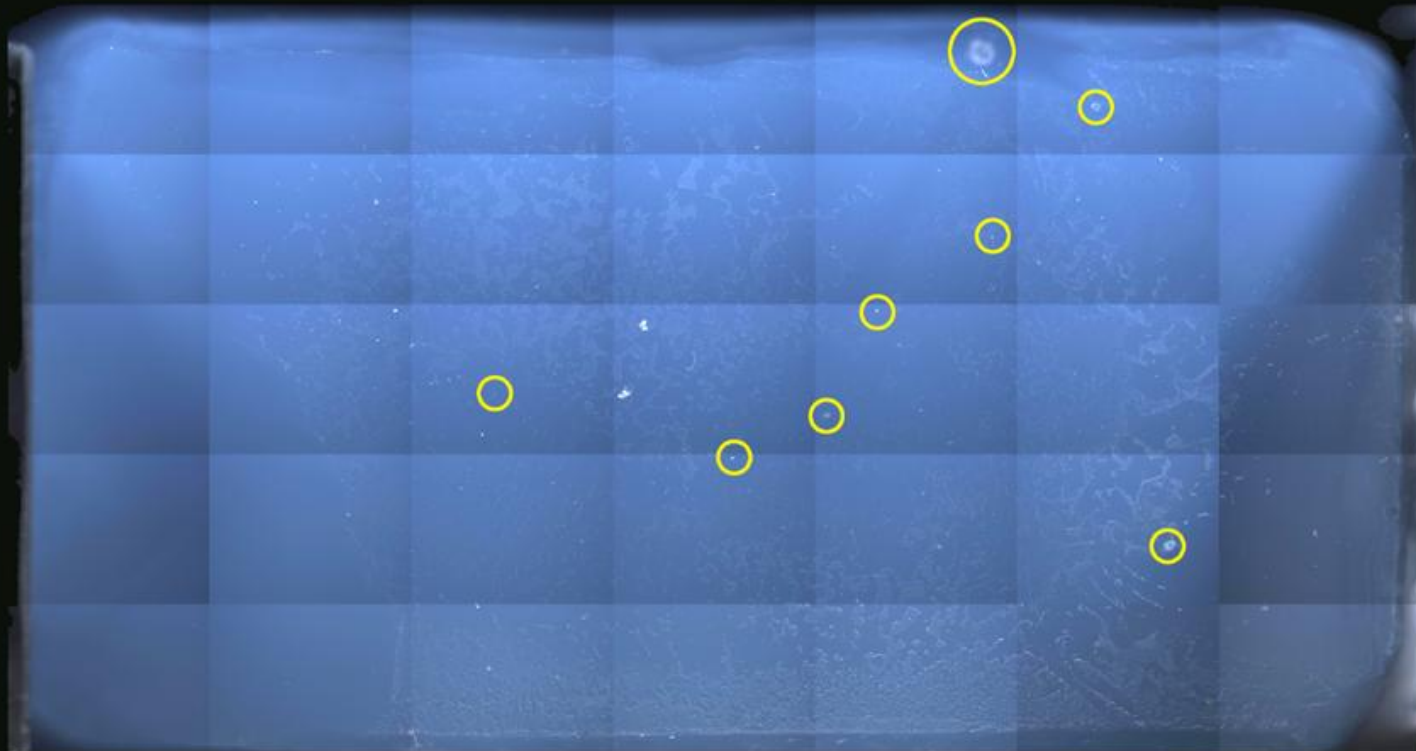
Elle a sorti une « raquette » attrape poussière



**Dans les loges
de la raquette,
de l'aérogel,
pour freiner et
capturer les
poussières
(sans trop les
abîmer)**



STARDUST TILE 115 (2x4cm)
circles mark large tracks



4 mm

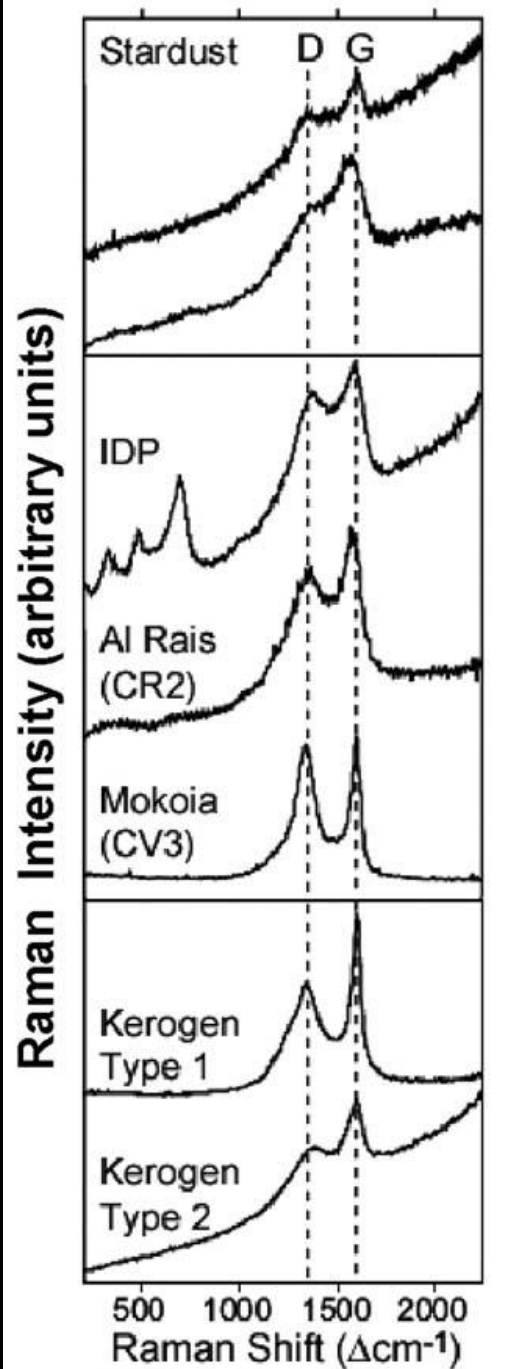
**Vue de dessus d'une des logettes, subdivisées
en sous-blocs de 4 x 5 mm.**

**Entourés, les points d'impacts
(micro-cratères) visibles**

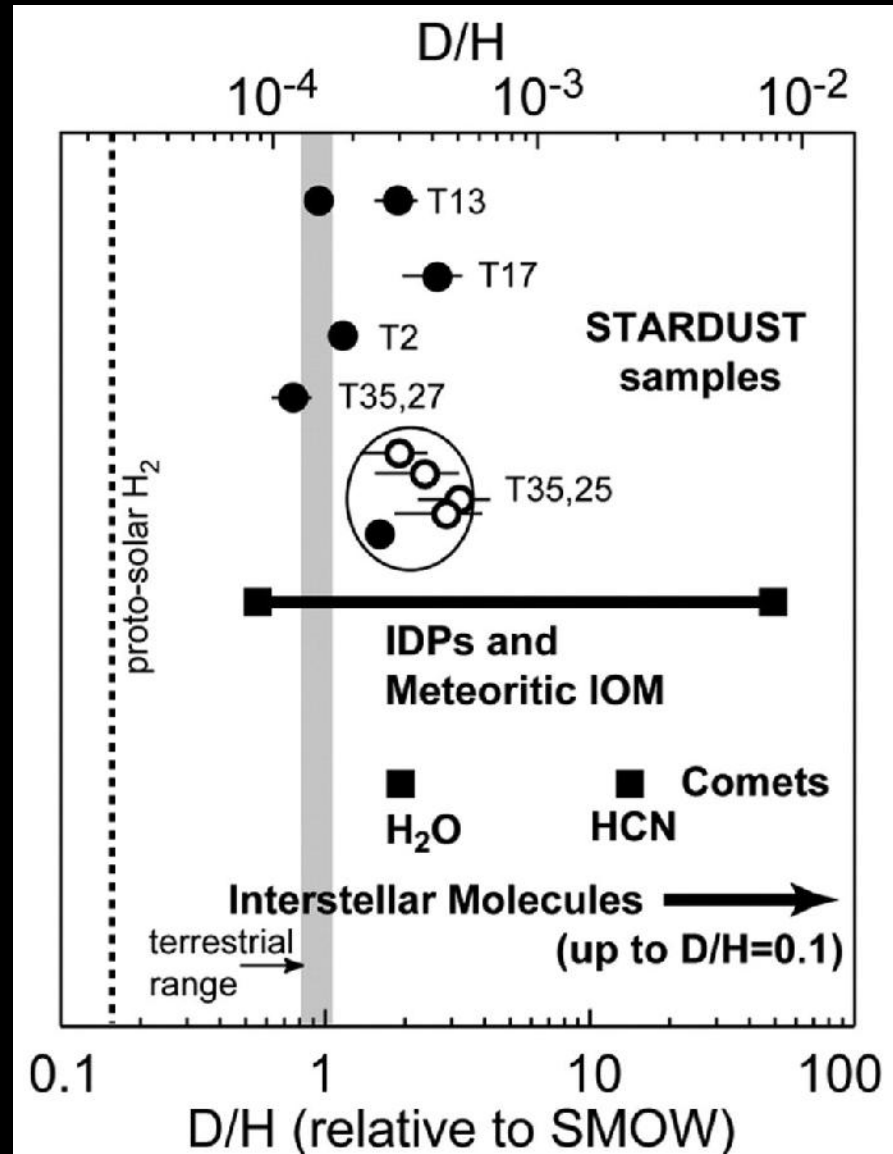
**Gros plan (en coupe)
sur un de ces cratères.**

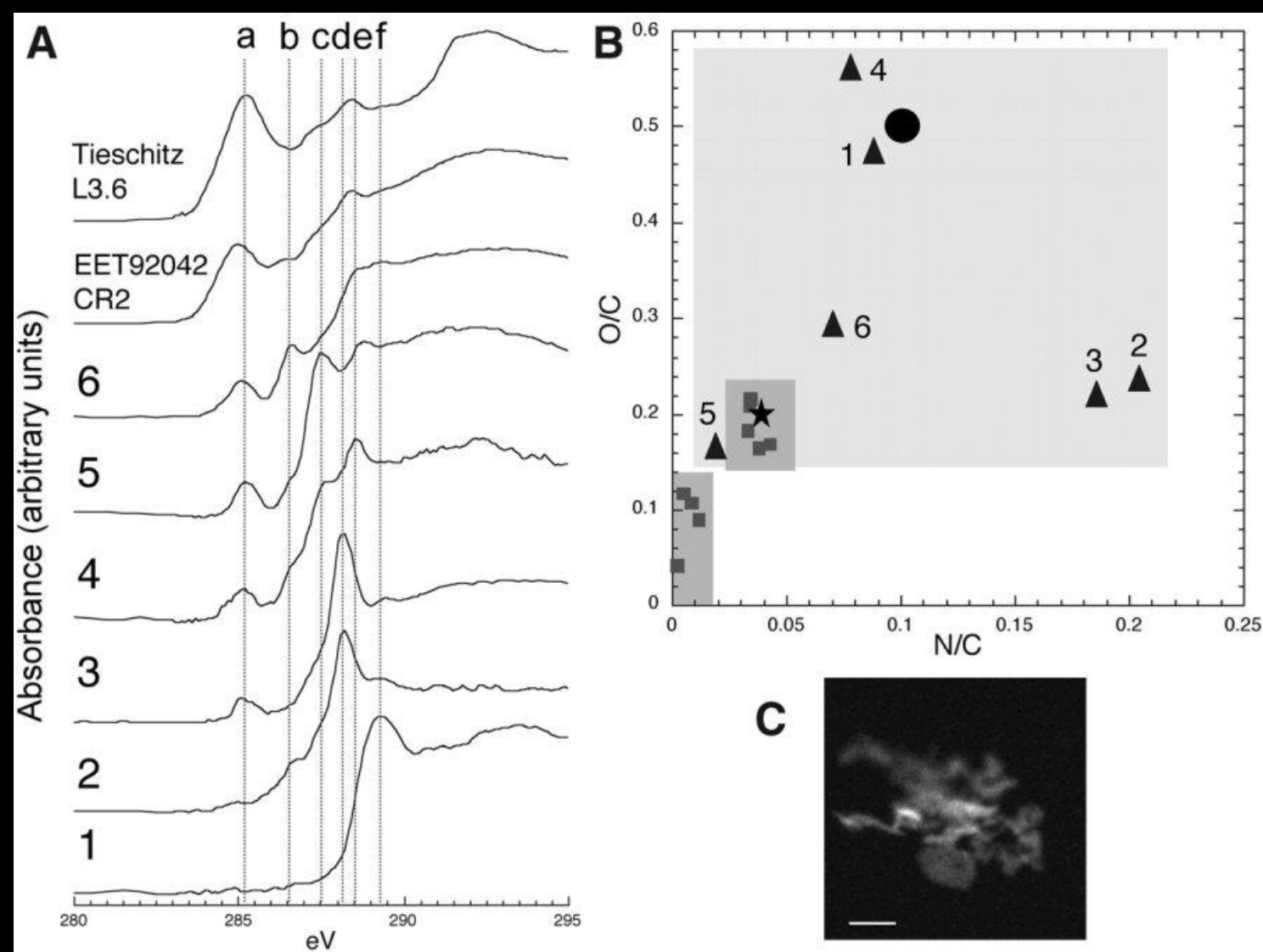
**Les grains noirs, au
bout des traces, sont des
micro-grains
cométaires, dont la
taille « standard » est
celle d'un globule rouge
unique ($7\ \mu$). Ce sont
ces micro-grains qu'il
s'agit d'analyser, dans
un premier temps sans
les détruire.**



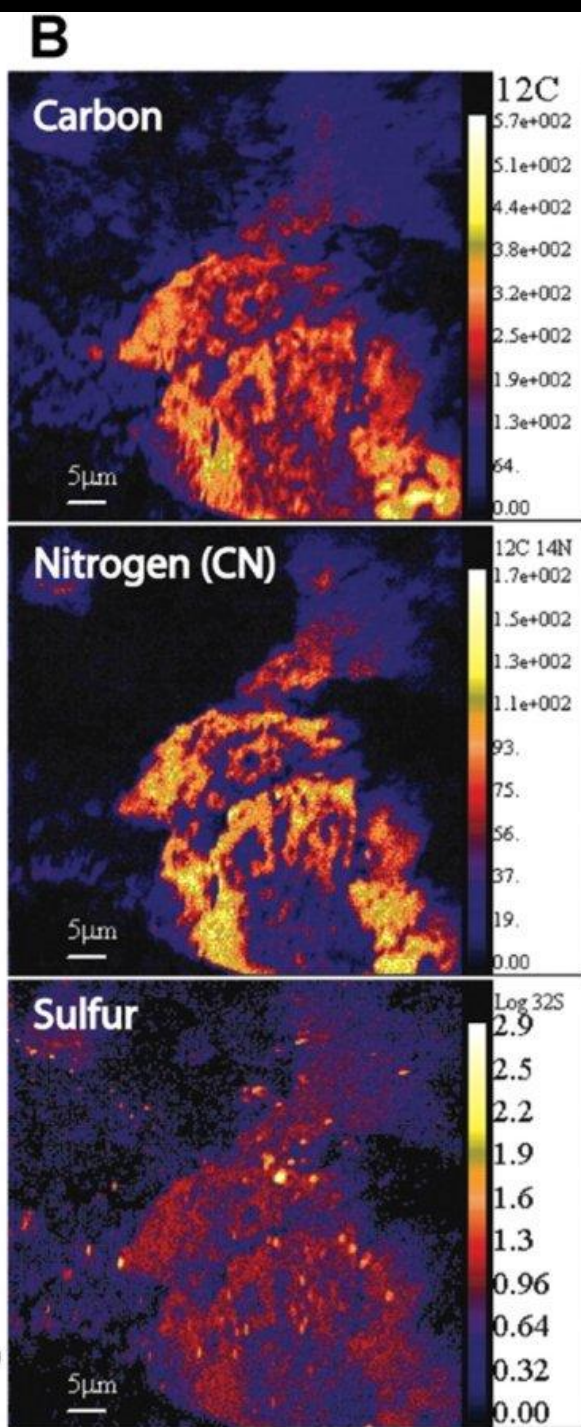
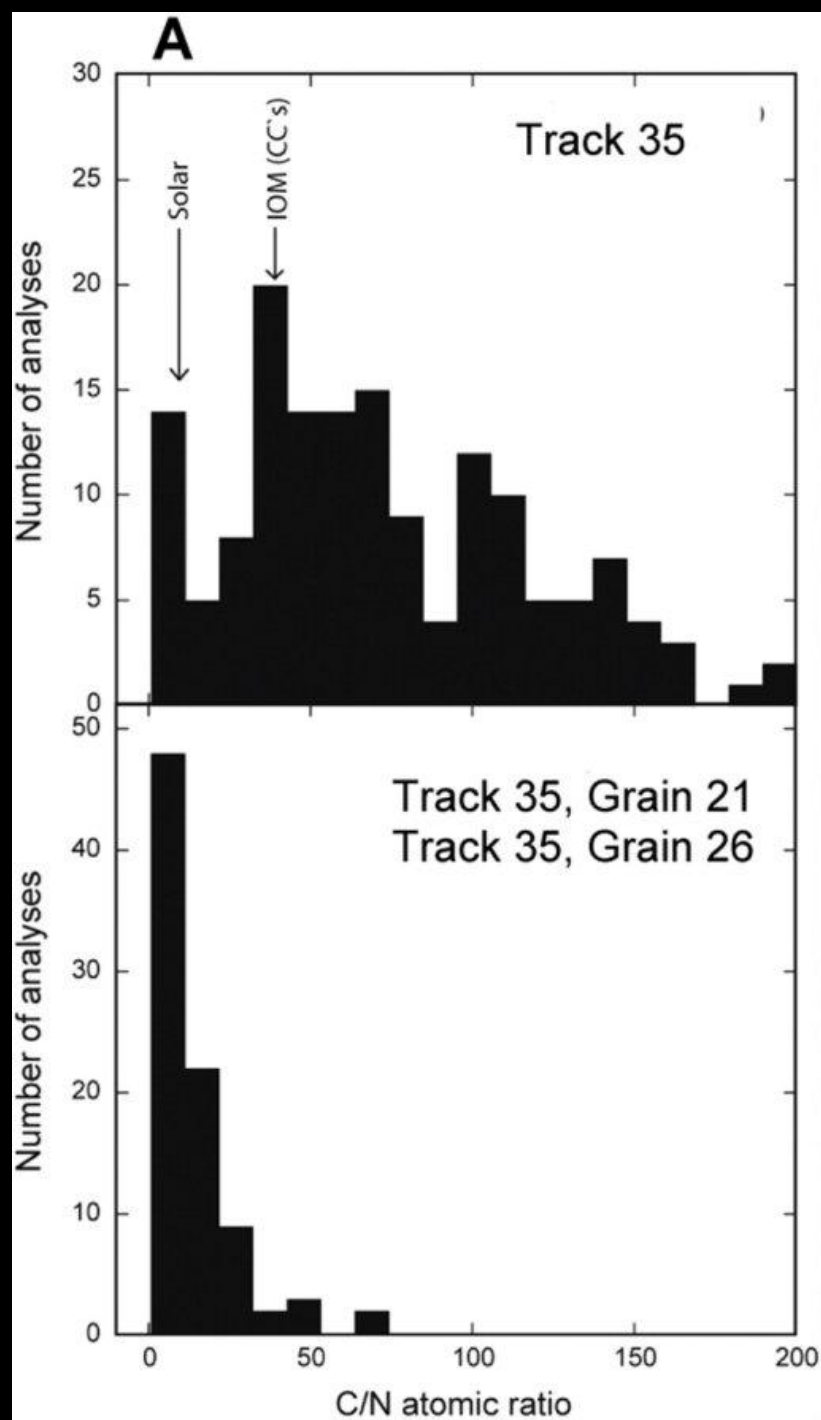


Il y en a (cf spectro raman). Son rapport D/H montre une origine « système solaire » dominante





Des pics au niveaux d'énergies correspondant aux lignes verticales (a) à (f) correspondent à la présence de groupements : a : $C=C$; b : $C=C-O$; c : $C=O$; d : $N-C=O$; e : $O-C=O$; f : $C-O$ / B – Rapport O/C et N/C des échantillons 1 à 6 (triangles), obtenus par analyse C,N,O-XANES



On peut
« carter » la
teneur en C, S ...
des différents
grains

C,N,O-XANES analyses of thin sections of individual grains confirm the presence of 1s- * transitions consistent with variable abundances of aromatic, keto/aldehydic, and carboxyl moieties, as well as amides and nitriles (Fig. 3A). XANES data suggest that considerably less H- and C-substituted sp²-bonded C (olefinic and aromatic) is present than in highly primitive chondritic organic matter. Aliphatic C likely contributes to spectral intensity around 288 eV in most of the particles. One particle (particle 1 in Fig. 3A) has remarkably simple C chemistry, consistent with a predominance of alcohol and/or ether moieties. However, the XANES data generally indicate complex molecular structures variably rich in hetero atoms O and N and, compared with the macromolecular material in primitive meteorites, containing additional materials that are relatively poor in aromatic and olefinic C. The high abundances of heteroatoms and the low concentration of aromatic C in these organics differ greatly from the acid insoluble organic matter in meteorites and, in terms of thermal processing, appear to be more primitive.

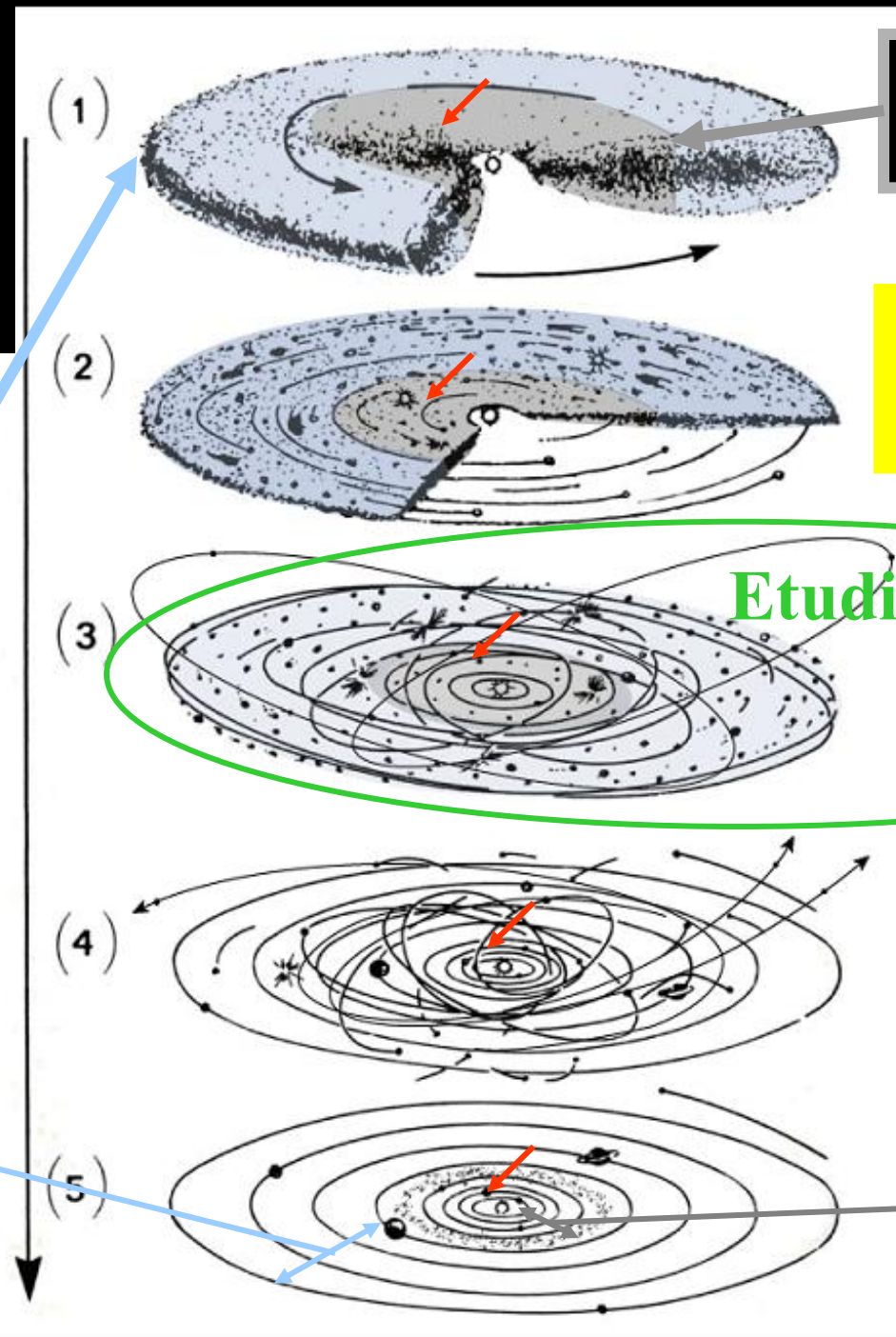


**Les molécules organiques extra-terrestres et
l'origine de la vie sur Terre**

Comment est né le système solaire ?

Poussières ferro-silicato-organo-glacées

Planètes et satellites dits « de glaces » et planètes géantes



Poussières ferro-silicatées

(2) Les poussières s'agglomèrent en « blocs »

Etudions le stade 3
(pour la terre)

Planètes et satellites « rocheux »

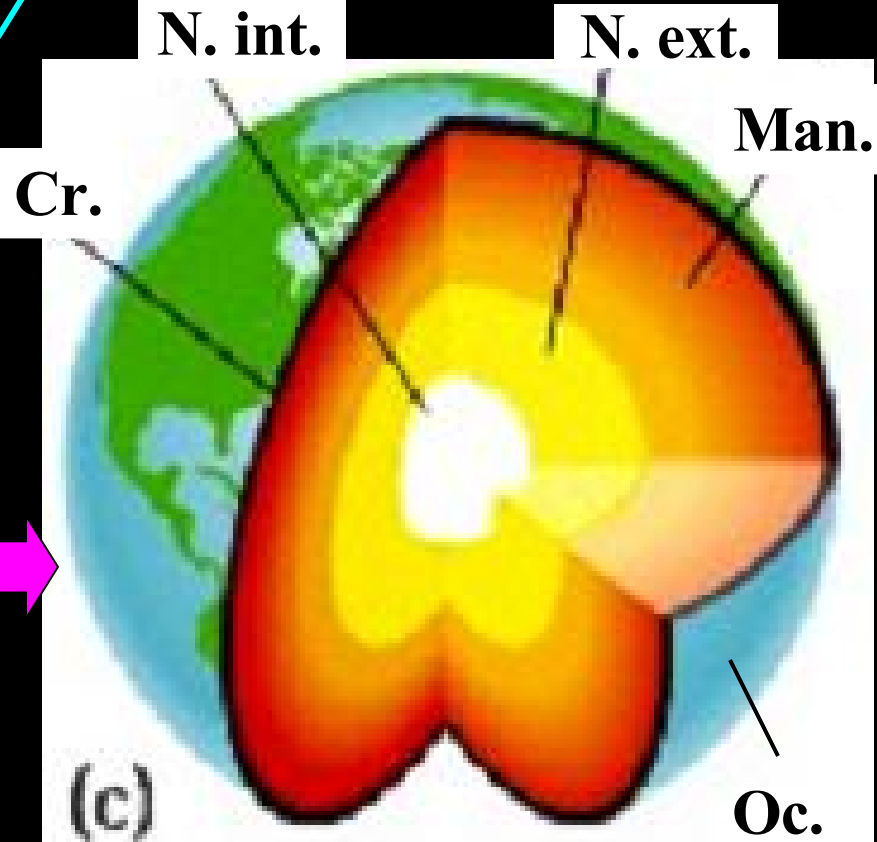
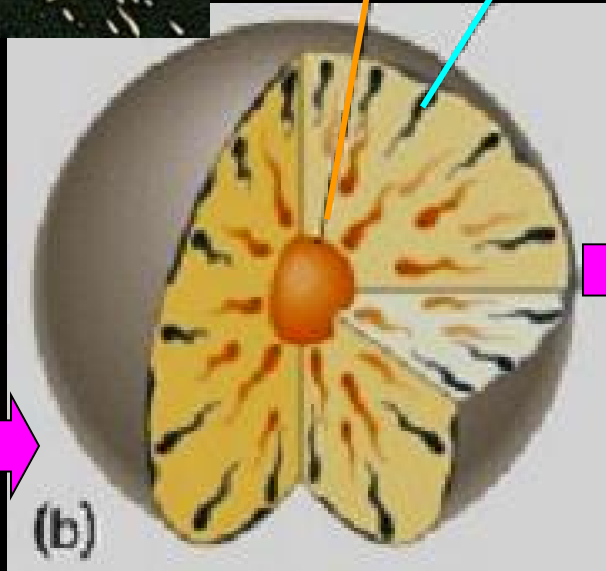
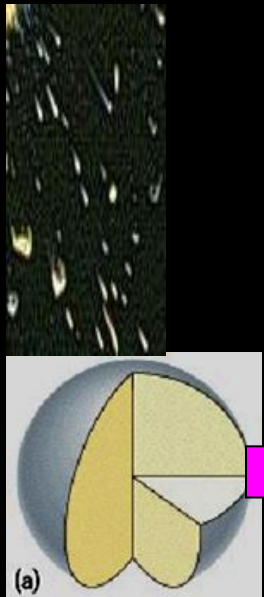


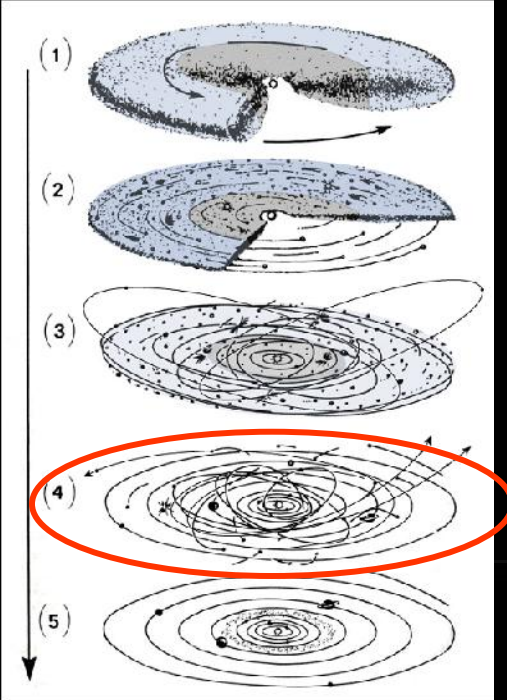
Planètes internes (et satellites) naissent pas accrétiens des poussières et blocs. Cette chute dégage de la chaleur qui fond blocs, poussières et planètes en formation

**Comme ça chauffe, la Terre
fond pendant qu'elle
« grossit ». Et si ça fond, ça se
différencie (séparation par
gravité)**

**Remontée du léger, dont bien
sûr l'eau qui va former
hydrosphère/atmosphère
primitives. Le peu de matière
organique présente ($\leq 5\%$) est
détruite et le C réduit est
oxydé en CO_2 par Fe^{++}**

**Descente
du lourd**





Au stade 4, à l'eau et au CO₂ dégazés au stade 3, s'ajoute ce qui est apportée par de multiples chutes « tardives » (avec beaucoup de corps externes, donc riche en H₂O et matière organique). Il doit donc arriver de la matière organique. Sera-t-elle détruite, « that is the question » ?



Les molécules organiques complexes (cométaires ou météoritiques), du genre acides aminés ou bases azotées, sont-elles arrivées toutes faites sur Terre il y a 4 Ga, et sans être détruites ?



Une météorite de rayon R a un volume et une masse $\propto R^3$ et une surface $\propto R^2$.

Elle arrive avec une énergie cinétique $E_c = \frac{1}{2} MV^2 \propto R^3$.

Dans l'atmosphère, les frottements et l'échauffement qui en est la conséquence et qui évacuent cette énergie se font par la surface, $\propto R^2$

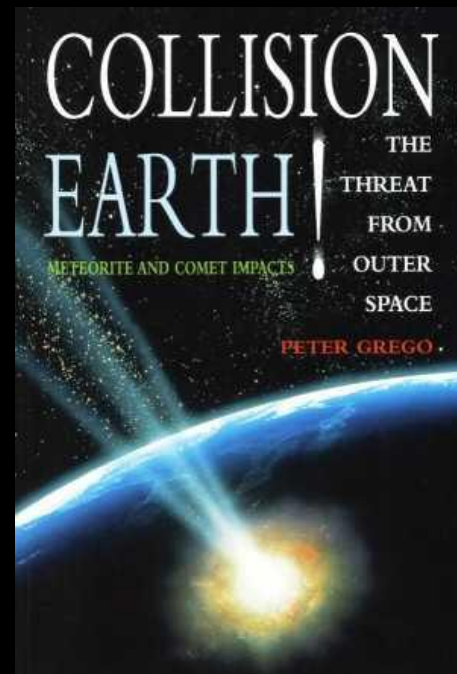
L'énergie \propto à évacuer par unité de surface est donc $\propto R^3/R^2$, $\propto R$

Plus une météorite est grosse, plus elle aura à évacuer d'énergie par unité de surface pour ralentir



Une grosse météorite ($D > 100$ m) a tellement d'énergie à évacuer par unité de surface que, malgré l'échauffement superficiel, elle n'y arrive pas. La traversée de l'atmosphère ne ralentit quasiment pas la météorite qui arrive au sol à une vitesse ≥ 11 km/s. Au sol, cette énergie est transformée en chaleur (et en onde de pression). La météorite est vaporisée, et on obtient un cratère de météorite.

Si la météorite contenait nos molécules organiques, elles sont détruites.



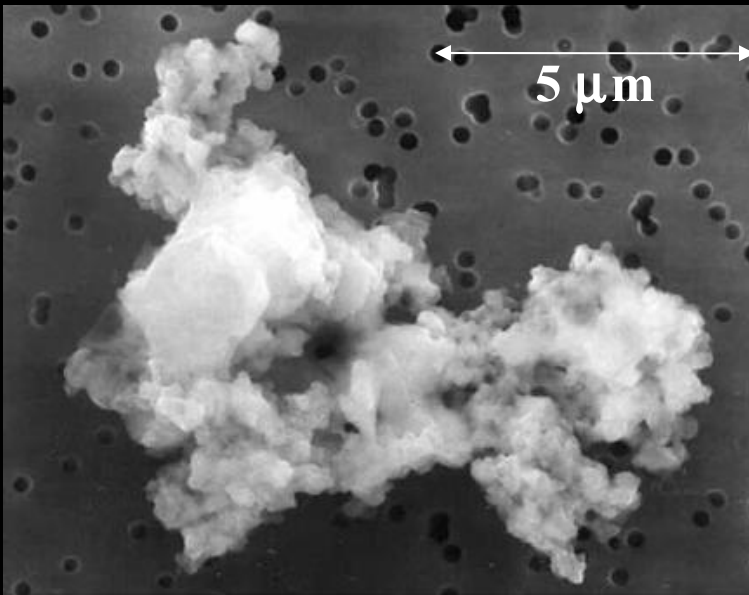


Si la météorite est moyenne, elle chauffe en surface (→ bolide). La surface se vaporise sur quelque cm d'épaisseur maximum. Cela ralentit suffisamment la météorite, qui arrive au sol avec la vitesse d'équilibre d'un corps dans l'air (environ 200 km/h). Son cœur reste froid. Si le cœur contenait nos molécules, elles arrivent intactes à la surface.



Si la météorite (ou la poussière) est petite (du cm au 1/10 de mm), le frottement chauffe la surface, vaporise la météorite sur quelques cm d'épaisseur, c'est à dire intégralement. On a une étoile filante banale. Si la météorite contenait nos molécules, elles sont détruites !

Si la poussière est très petite ($\leq 10 \mu\text{m}$), alors l'énergie à évacuer par unité de surface est tellement faible que la micro-météorite ralentit sans chauffer. Elle tombe alors très doucement dans l'atmosphère. On en recueille avec des « filets à papillons stratosphériques », ou en fondant des m^3 de glace antarctique ultra-pure.



Et les analyses montrent que ces poussières sont très riches en matière organique ($\geq 5\%$)

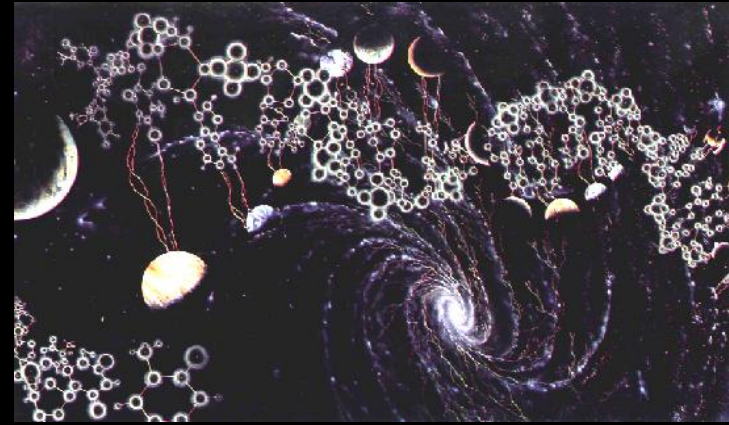


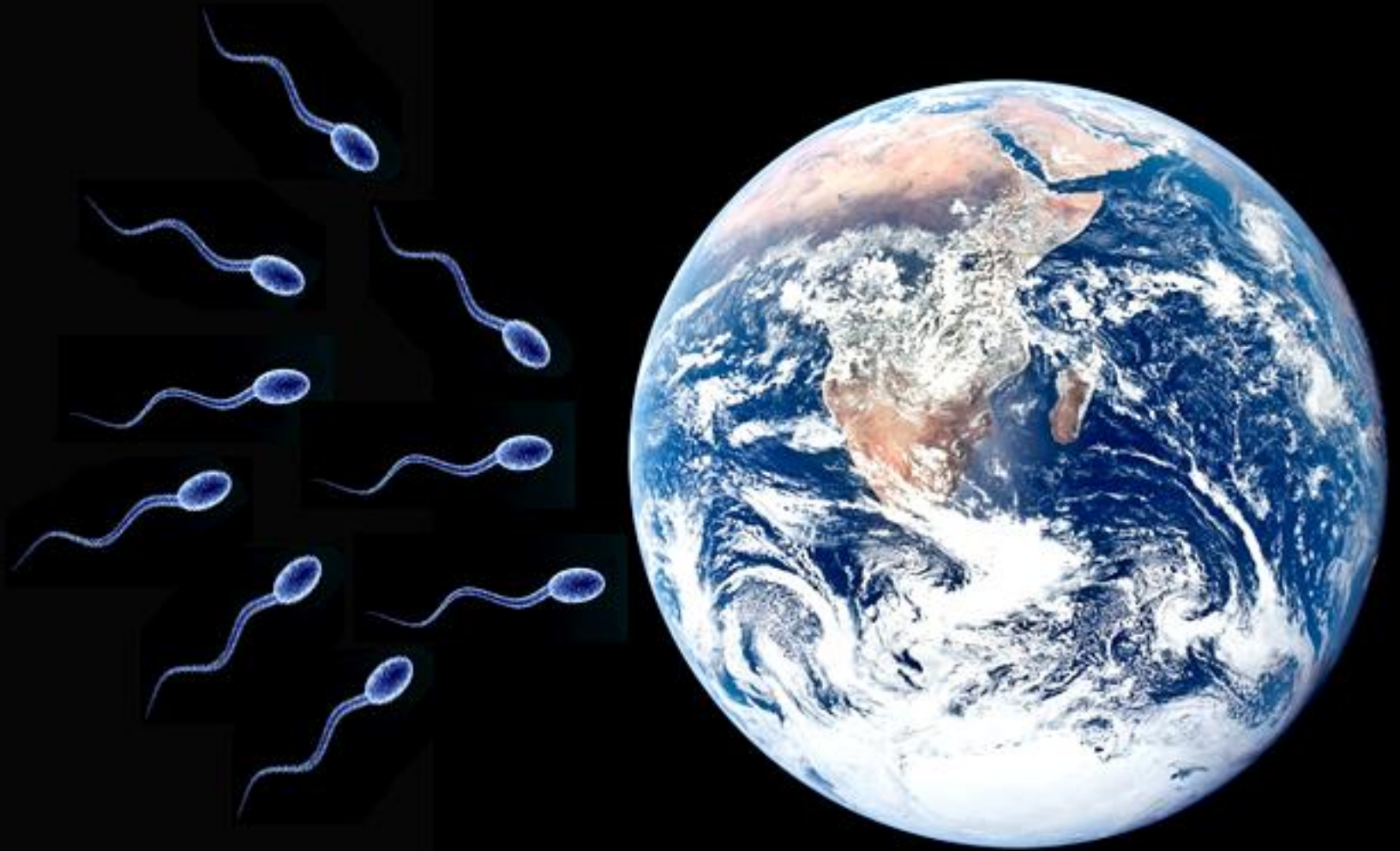
Si on extrapole (avec les données lunaires) ce qu'il a dû tomber sur Terre comme poussières, micro-météorites et météorites moyennes (celles qui apportent de la matière organique sans la détruire) entre $-4,5$ et -4 Ga, on calcule une masse d'apport de carbone organique voisine de 10^{15} à 10^{16} kg, chiffre voisin du carbone de la biomasse actuelle

Comment est née la vie ??

Pendant le premier milliard d'années de la Terre, des molécules organiques dites « pré-biotiques » existaient en abondance, venues de l'espace (et peut être aussi fabriquées au fond des océans).

Attention, ne pas confondre cette arrivée de molécules avec ce que d'aucun appellent la panspermie (du grec *pan*, tout et *spermie*, germe) où seraient arrivés graines et spores tous faits.





Ce que n'est pas la panspermie !!

**On attend que les
biologistes-
biochimistes nous
disent comment on est
passé de ces molécules
organiques moyennes
(voire complexes) à la
plus simple des
cellules.**

**Rendez-vous dans
quelques années, si
vous travaillez bien !**

