



Les molécules organiques dans le système solaire

Pierre Thomas

Fleurance, août 2007

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

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



Un granite



Une émeraude dans sa gangue



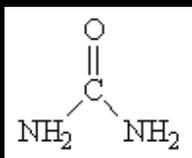
Coulée de fonte issue d'un haut fourneau

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, plus souvent de l'oxygène, de l'azote ... Cela allait des composés les plus simples, comme le gaz des marais (méthane, de formule 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 [$CO(NH_2)_2$].

Pour cela, il a fait en réagir du sulfate d'ammonium [$(NH_4)_2SO_4$] sur du cyanate de potassium [$KOCN$]



Stanley Miller, 1953



Des substance 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 » (= carboné) 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, 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 (bases azotées)



Du plus simple ...



Des légumes ...



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



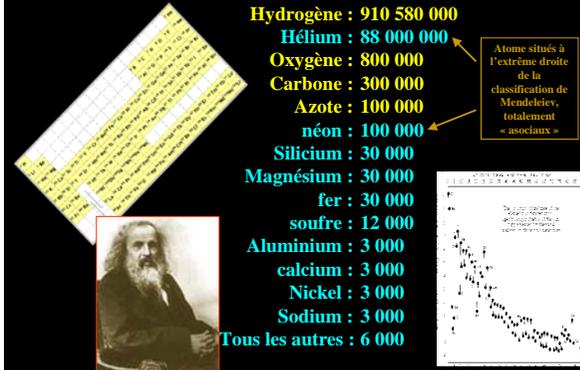
... aux présidents, tout n'est que C, H, O, N

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) :



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'H₂O et de CHON

H₂O (l'eau) est la 2ème molécule la plus abondante de l'univers, suivie, dans l'ordre, de CH₄ et autres molécules organiques, CO, NH₃, 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



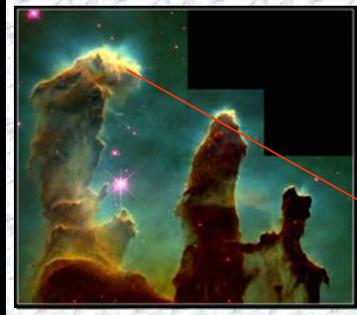
Quelles sont les molécules principales de ces nébuleuses ?



- 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)

Quelques détails sur cette matière organique des nuages moléculaires



Milieu interstellaire dense :

- basse température: 10 à 100K
- rayonnements intenses
- densité de 10^9 à 10^{12} H par cm^3 (10^{18} 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

Laurent REMUSAT Séminaire ENS Lyon 12 juin 2006

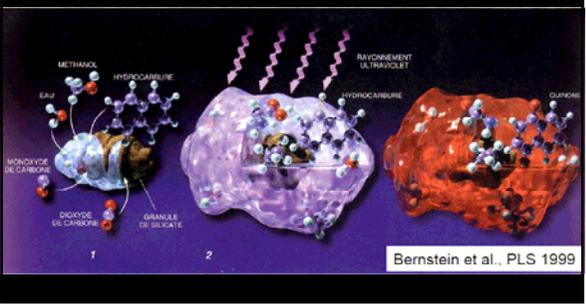
La liste des petites molécules (poly-atomiques) les plus abondantes dans ces nuages moléculaires

Nombre d'atomes par molécule	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	H ₂	H ₂ O	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO	H ₂ CO
	CH ⁺	CH ₃	CH ₄	CH ₃ NH ₂	CH ₃ CHO	CH ₃ OH	CH ₃ CO	CH ₃ COOH	CH ₃ COOH	CH ₃ COOH	CH ₃ COOH
	CN	CCN	CCN	CCN	CCN	CCN	CCN	CCN	CCN	CCN	CCN
	CO	HCN	HCN	HCN	HCN	HCN	HCN	HCN	HCN	HCN	HCN
	CS	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
	OH	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺	NH ₂ ⁺
	SO	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S	H ₂ S
	NS	OCS	OCS	OCS	OCS	OCS	OCS	OCS	OCS	OCS	OCS
	SS	SiS	SiS	SiS	SiS	SiS	SiS	SiS	SiS	SiS	SiS
	SIS	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?	NNO ?
	C ₂	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?	HCC ?
	CO ⁺ ?										
	NO										

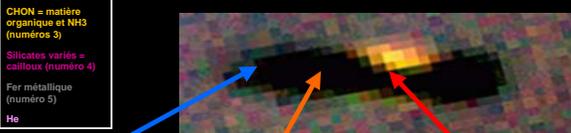
La glycine, le plus simple des acides aminés



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



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

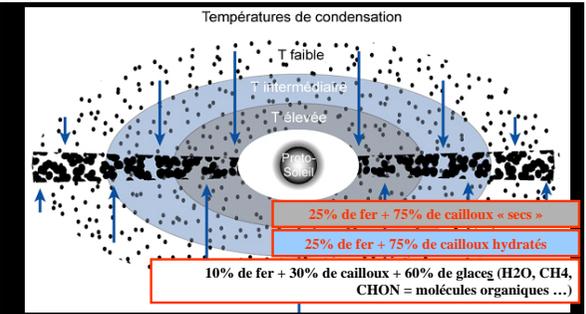


- H2 (numéro 1)
- H2O = eau (numéro 2)
- CHON = matière organique et NH3 (numéros 3)
- Silicates variés = cailloux (numéro 4)
- Fer métallique (numéro 5)
- He

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

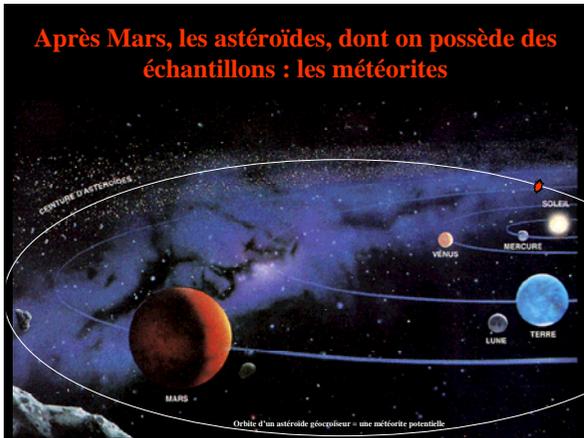


Il doit « théoriquement » y avoir beaucoup de matière organique dans le système solaire externe, beaucoup moins dans le système solaire interne. Visitez le système solaire en cherchant cette matière organique !



Chercher des molécules organiques dans les terrains péri-polaires martiens sera l'une des tâches principales de la mission Phoenix, dont le lancement est prévu ce mois d'août 2007

La page web de l'atterrisseur «Phoenix»



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°C

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

Laurent REMUSAT Séminaire ENS Lyon 12 juin 2006 6

La matière organique dans les météorites : 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 : quels sont ces molécules ? 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 » :

- $C_{100}H_{72}O_{18}N_{3,5}S_2$ pour Orgueil
- $C_{100}H_{70}O_{22}N_3S_{6,5}$ pour Murchison

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

Laurent REMUSAT Séminaire ENS Lyon 12 juin 2006 14

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

Le spectre infrarouge de la MOI

Gardner et al. EPSL 2000 Watanabe et al. AAS 2001

RMN ¹³N à l'état solide

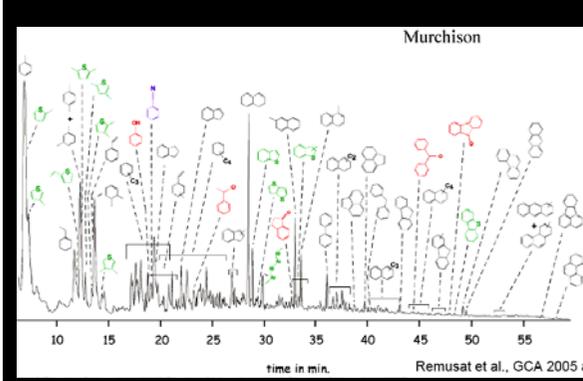
- Permet de caractériser l'environnement chimique de l'azote dans la MOI et donc les fonctions azotées

- Prépondérance de motifs cycliques. La présence de liaisons azotées 1-200 ppm ne peut être exclue

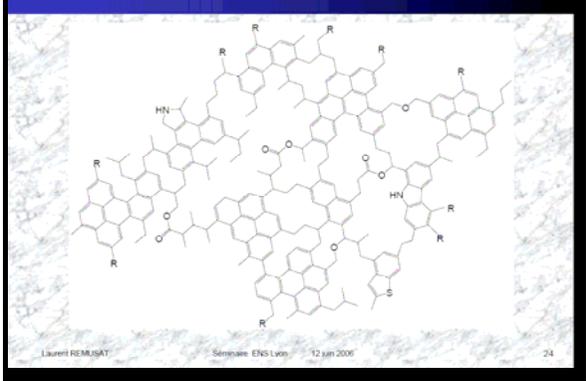
Azote dans les hétérocycles ou liaisons avec hétéroatomes supposés dans milieu interstellaire

F. Pajhol, CRPG Nancy

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

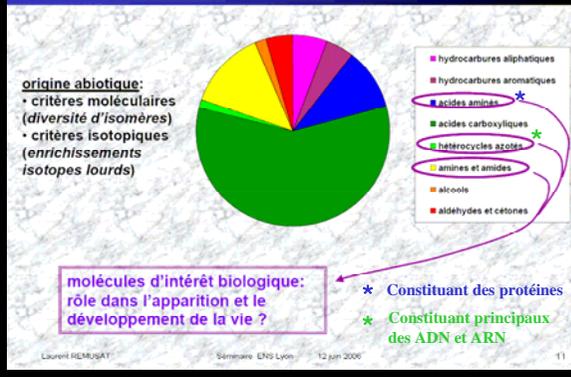
Concentrations and Molecular Characteristics of Soluble Organic Compounds of Meteorites*

Class	1 Concentration (ppm)	2 Compounds Identified	3 Chain Length	4 Homologous Decline	5 Branched- or Straight-Chain Predominance	6 Structural Diversity	7 Chirality
Amino acids	60	74	C ₁ -C ₇	yes	Br	yes	R
Aliphatic hydrocarbons	> 35	140	C ₁ -C ₂₅	?	{ < C ₁₀ Br } { > C ₁₀ St }	yes yes	?
Aromatic hydrocarbons	15-28	87	C ₆ -C ₂₀	NA	(Br)	yes	?
Carboxylic acids	> 300	20	C ₁ -C ₁₂	yes	Br	yes	?
Dicarboxylic acids	> 30	17	C ₂ -C ₈	yes	Br	yes	R
Hydroxycarboxylic acids	15	7	C ₂ -C ₄	yes	St	yes	R
Purines & Pyrimidines	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 ₃	yes	?	yes	?
Total	≥ 560	411					

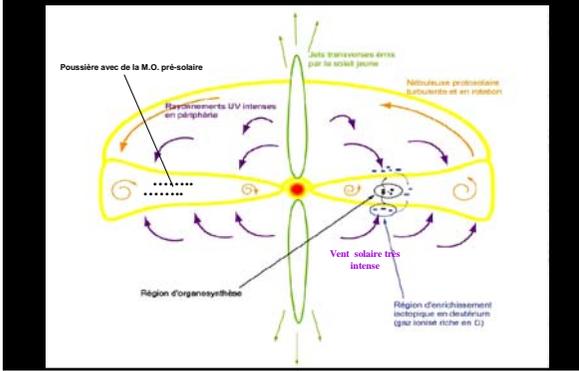
*NA: not applicable; Br: branched; St: straight; R: racemic; ? : unknown.

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

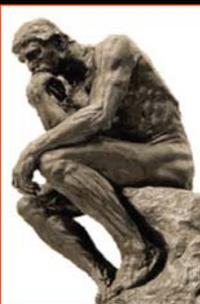


La matière organique des météorites : conclusion en image



Conclusions :

- Les météorites contiennent des molécules organiques.
- Il y a des molécules simples et beaucoup d'autres 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.



Au delà des astéroïdes, les planètes géantes

Caractéristiques de l'atmosphère	
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 %
Hydure 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.

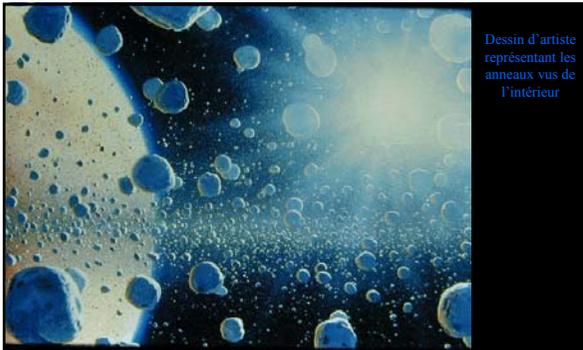
Jupiter

Saturne

Uranus

Neptune

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



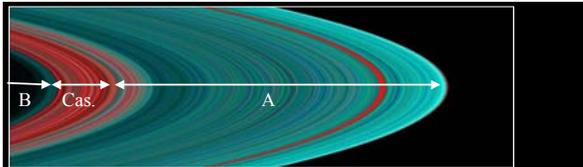
Dessin d'artiste représentant les anneaux vus de l'intérieur

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



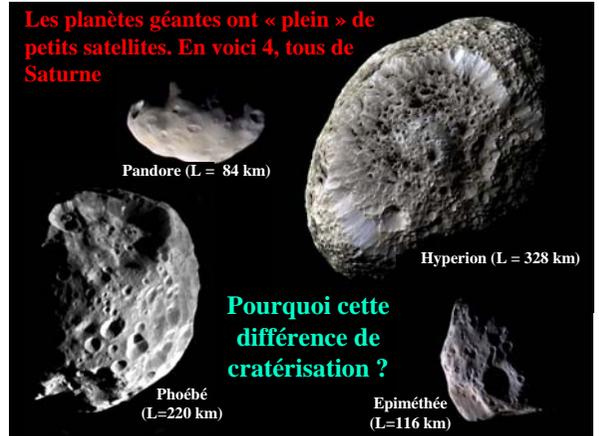
Les anneaux de Saturne vus par Cassini : une multitude d'anneaux individuels très nets.

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



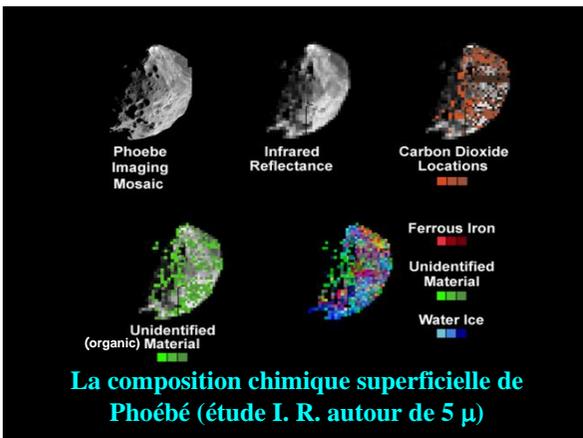
Quelque part dans l'anneau B

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

Pourquoi cette différence de cratérisation ?



La composition chimique superficielle de Phobos (étude I. R. autour de 5 μ)



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

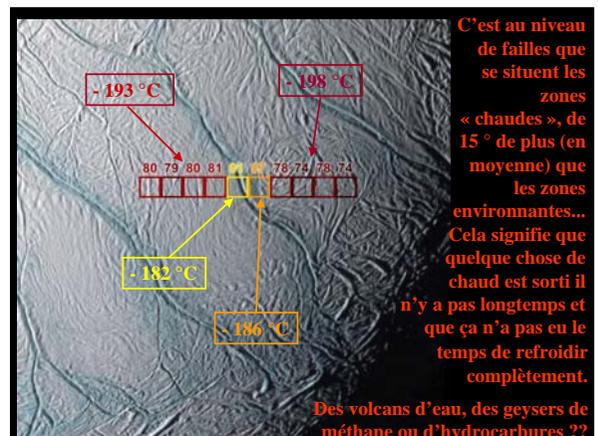
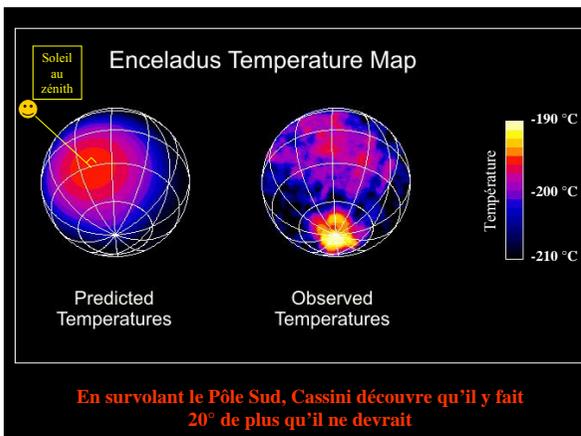
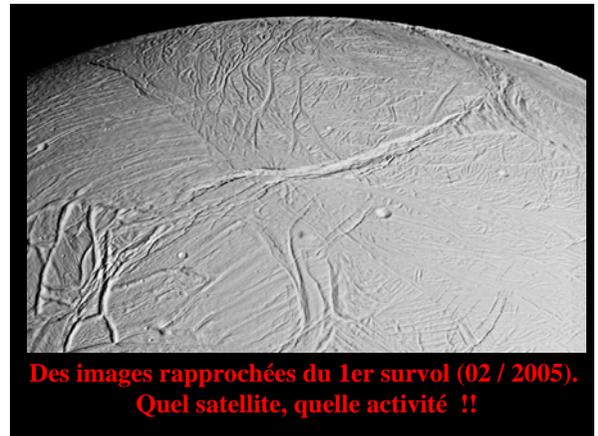
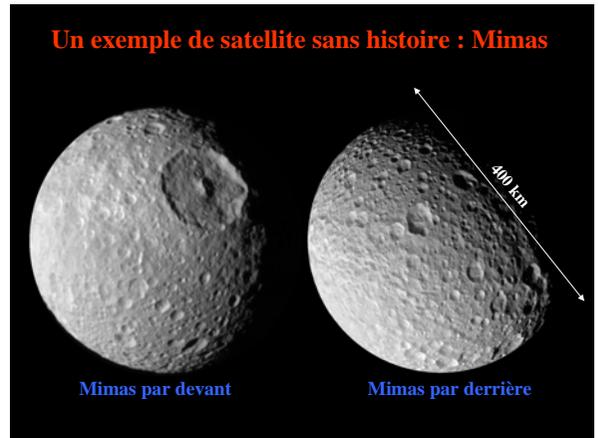
Des boules de glaces avec une histoire géologique complexe

Japet, une boule de glaces fendue et sale

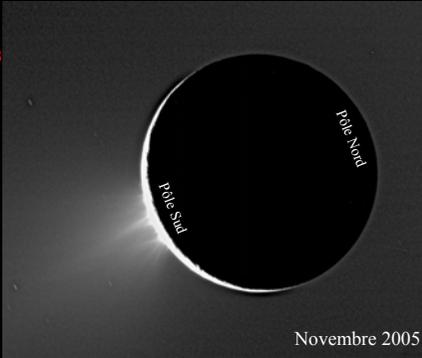
Titan, une boule de glaces avec atmosphère

Avec des intermédiaires

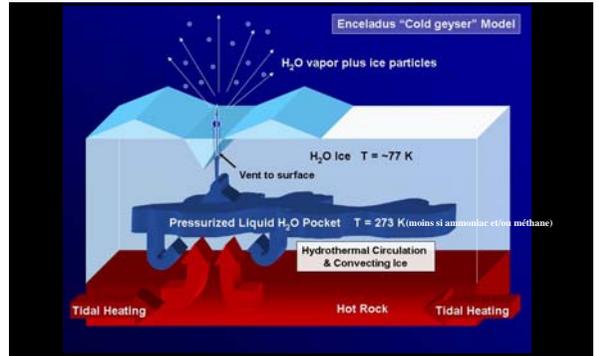
Terre	Satellite de glaces
Température externe : 15°	Température externe : ~ -200°
Température interne : > 1000°	Température interne : + faible
En surface : cailloux	En surface : glaces
Intérieur = cailloux, roche ...	Intérieur = glaces
Volcan → lave = roche fondue	Volcan → lave = glace fondue = eau liquide
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



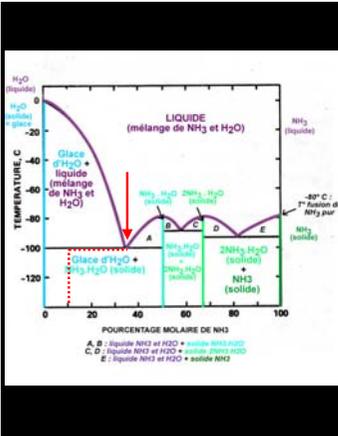
La réponse est venue en novembre 2005. Au dessus du Pôle Sud, il y a des jets de micro-particules (de givre d'H₂O) qui diffusent la lumière solaire. Il s'agit de volcans (d'H₂O) ou geysers actifs.



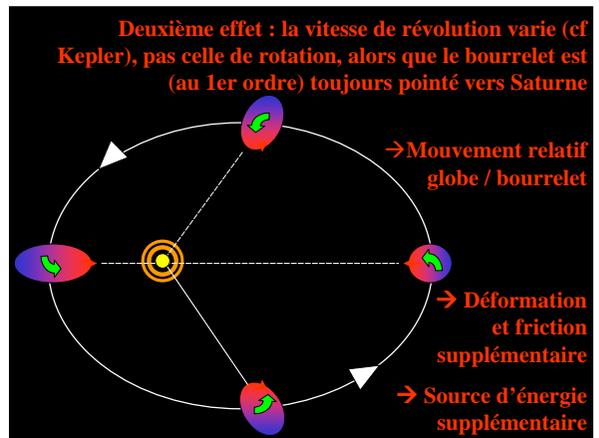
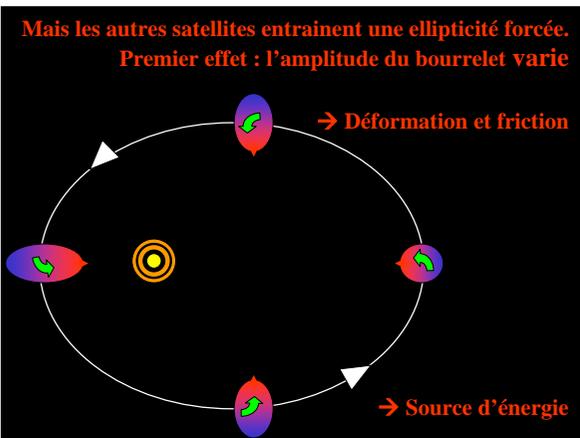
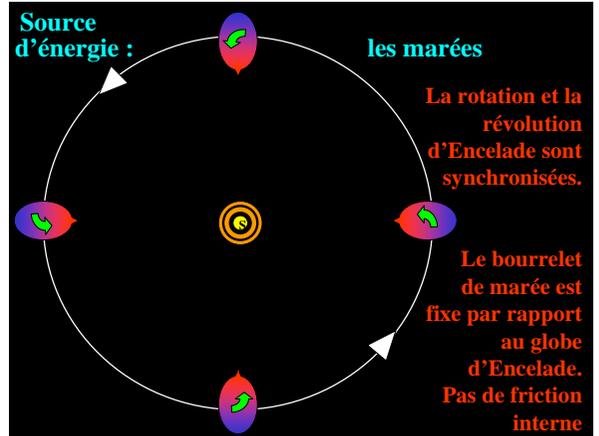
Novembre 2005



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 !

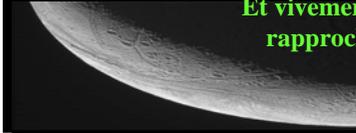


Pour abaisser considérablement la température de fusion de la glace, c'est facile ! Y a qu'à mettre un peu d'ammoniac, et il y a un eutectique dont la température de fusion est de -103°C (170 K). Y a t'il de l'ammoniac sur Encelade ?

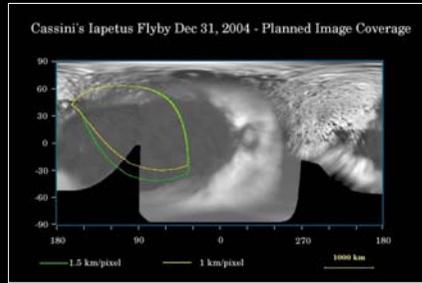


Dernières nouvelles (12 mars 2007, NASA news)
 « ... as measured by Cassini's ion and neutral mass spectrometer. Matson is lead author of a new study of the plume's composition, which appears in the April issue of the journal Icarus. Although the plume is predominantly made up of water vapor, the spectrometer 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 !

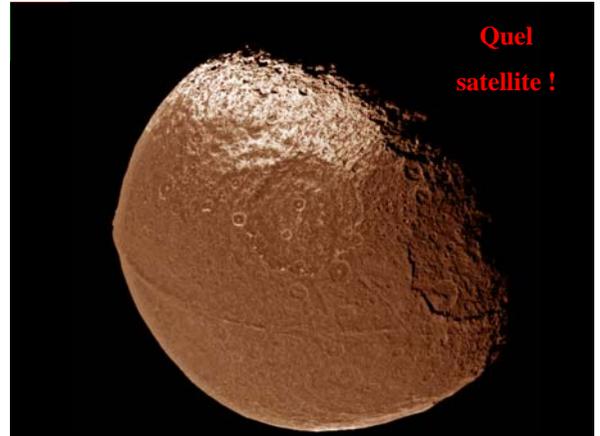
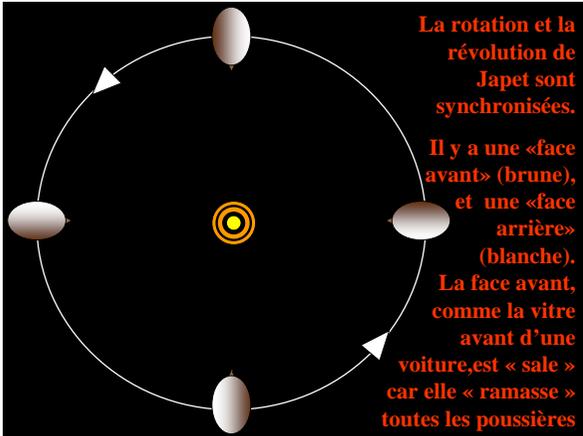


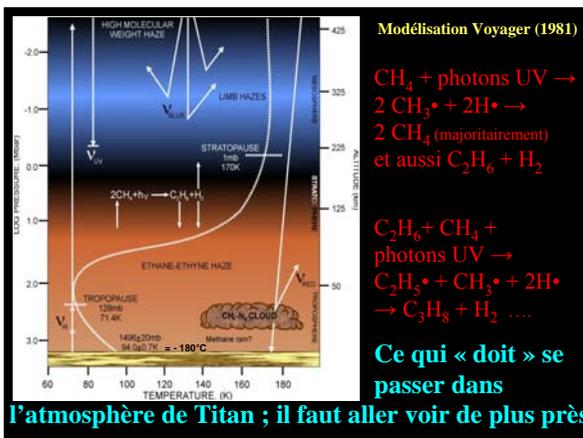
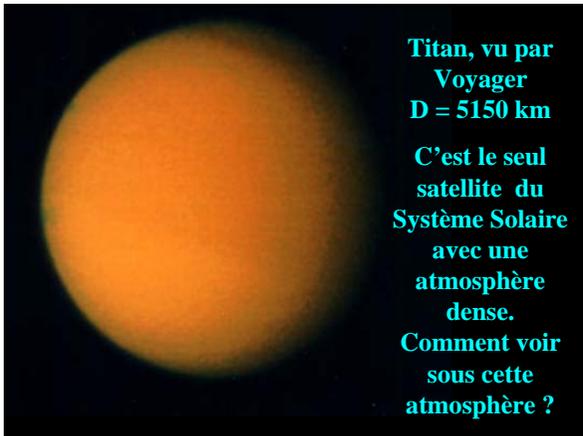
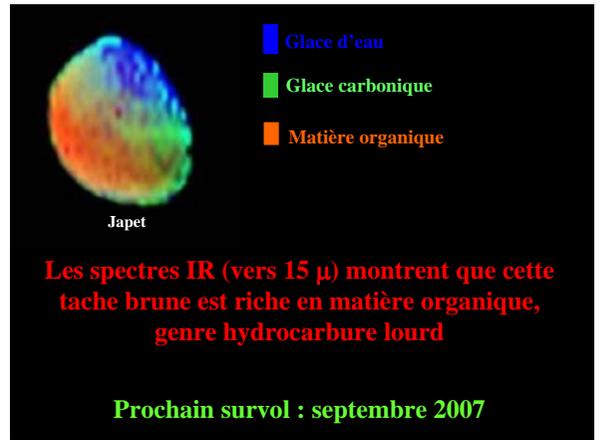
Un satellite unique en son genre : Japet

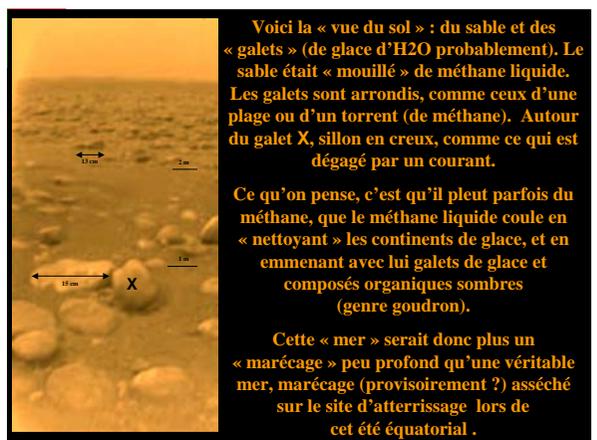
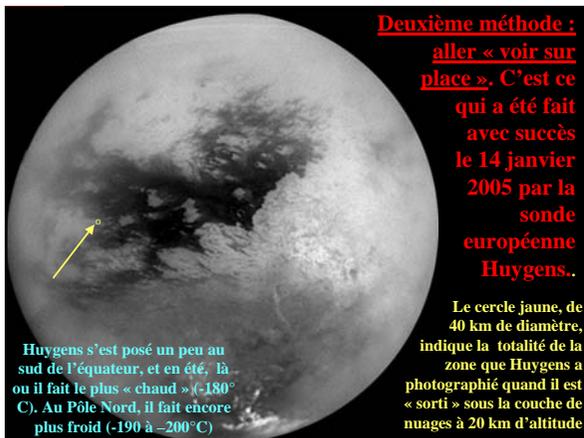
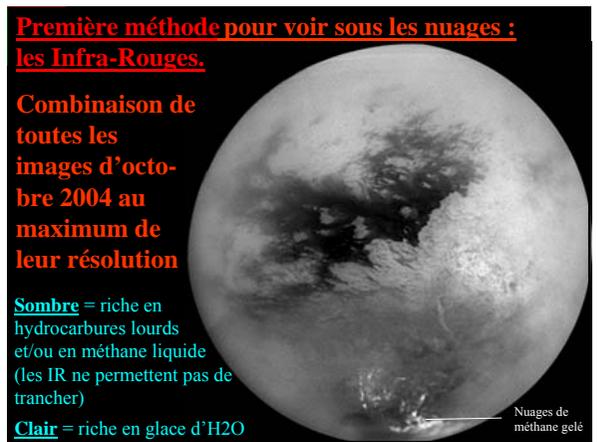
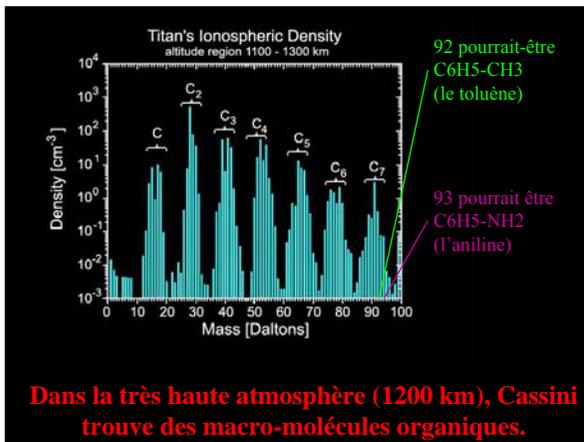


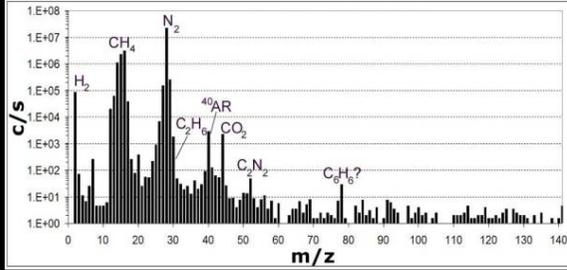
Carte d'après les données Voyager

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



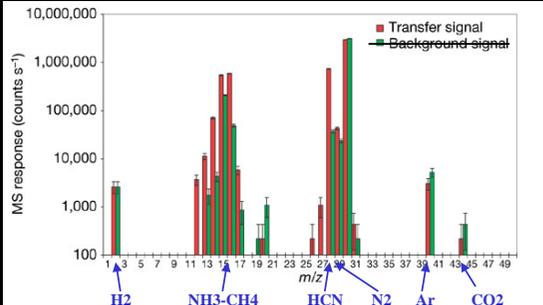




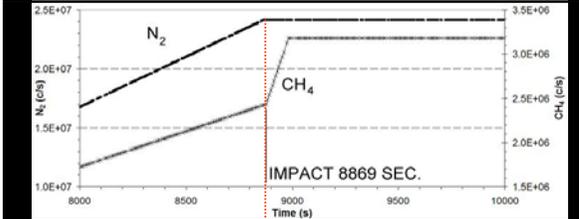


Au cours de sa descente, et au sol, Huygens a fait des analyses dans l'atmosphère.
Voici l'analyse des gaz de l'atmosphère (au sol)

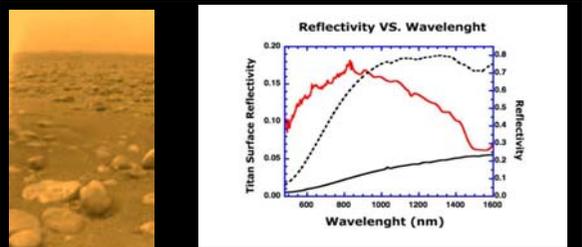
Analyse par pyrolyse des aérosols de l'atmosphère



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)

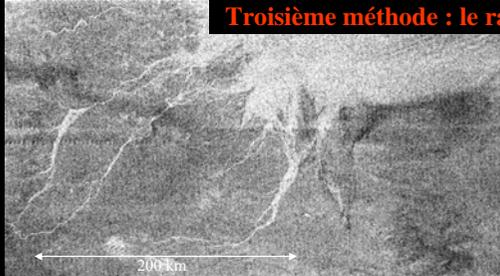


Courbe montrant l'évolution du nombre de molécules captées pendant la descente et après l'atterrissage.
Pendant la descente, ce nombre augmente, normal. Une fois l'atterrissage fait, le nombre de molécules d'azote est stable ; normal. Il y a par contre une bouffée de méthane juste après l'impact : la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

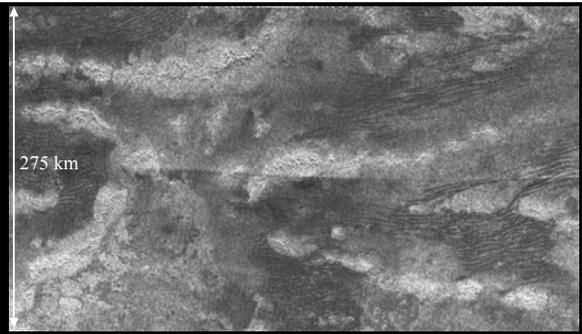


Spectre de réflexion (IR) de la surface de Titan. En rouge, le spectre observé ; en noir, les spectres de composés « candidats ». Aucun composé (ou mélange de composés) ne reproduit les spectres réels. On ne sait pas quelle est la composition de cette substance brunâtre !

Troisième méthode : le radar

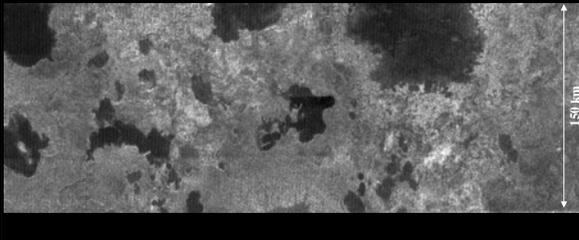


Loin du pôle, sur les « terres », un réseau hydrographique ou plutôt « méthanographique », à priori à sec. Le site d'atterrissage d'Huygens n'était pas une exception ! Et les réseaux peuvent faire jusqu'à 200 km de long !

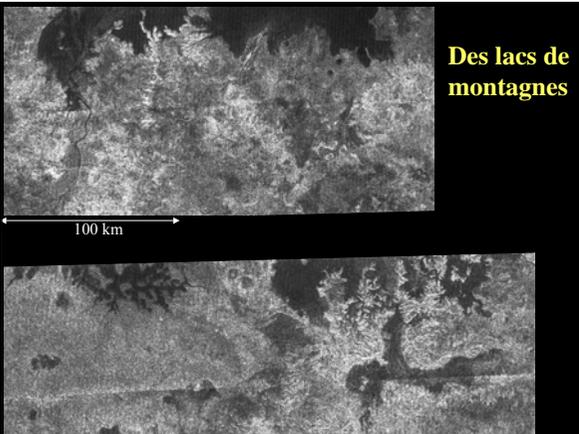
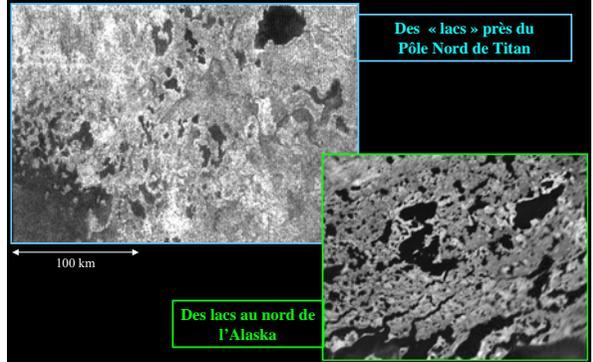


Des champs de dunes (de sable de glace d'H2O), des montagnes (de glace d'H2O)

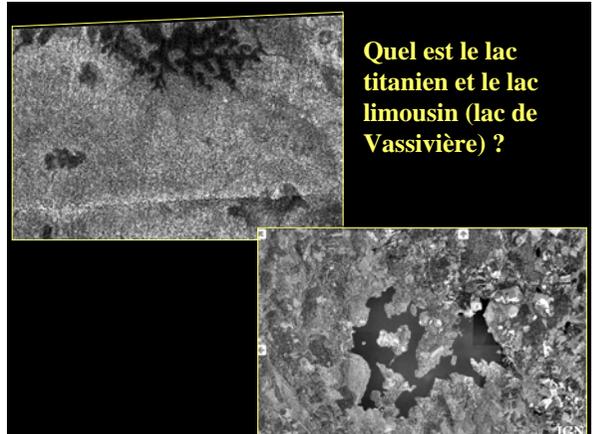
Et les survols radar de juillet et septembre 2006, au dessus du Pôle Nord plongé dans la nuit polaire, montrent de très probables lacs, lacs de méthane liquide (ou plutôt d'un mélange méthane-éthane) à -190°C , dont les vagues déferlent sur la côte rocheuse faite de glace d'eau



Une comparaison avec des lacs terrestres



Des lacs de montagnes



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

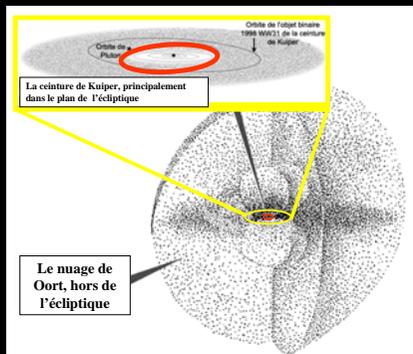
Voilà la synthèse de ce qu'on pense aujourd'hui de Titan quand à sa géologie (hors chimie de l'atmosphère)



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, 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

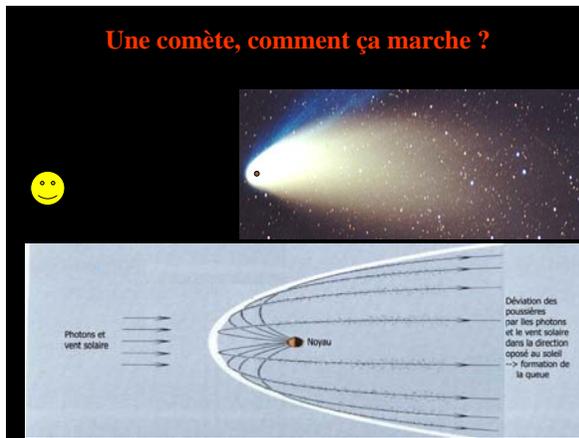
Des perturbations orbitales font que, parfois, certains de ces objets s'approchent du soleil et deviennent des comètes



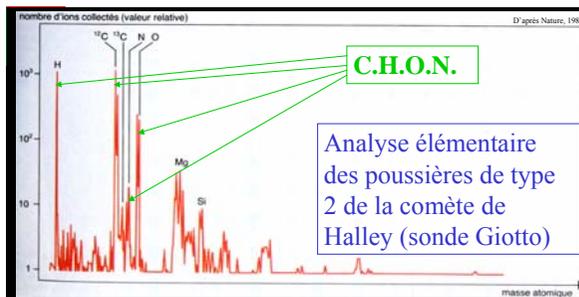
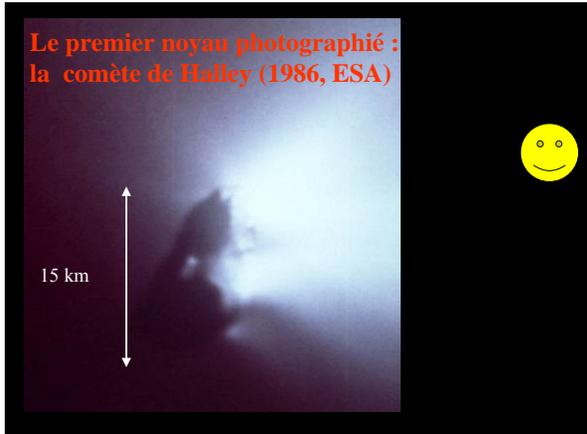
Les molécules et ions (gaz et poussières) cométaires identifiées depuis la Terre



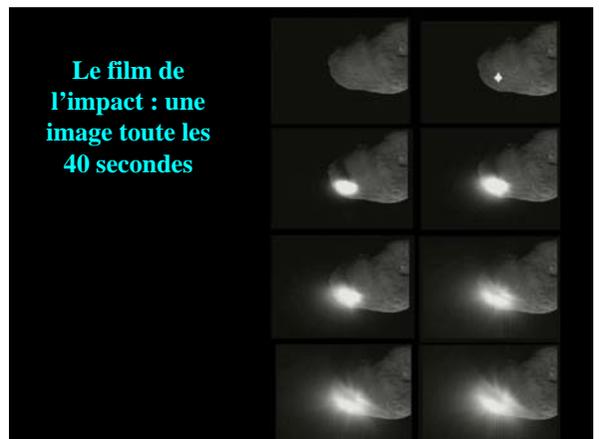
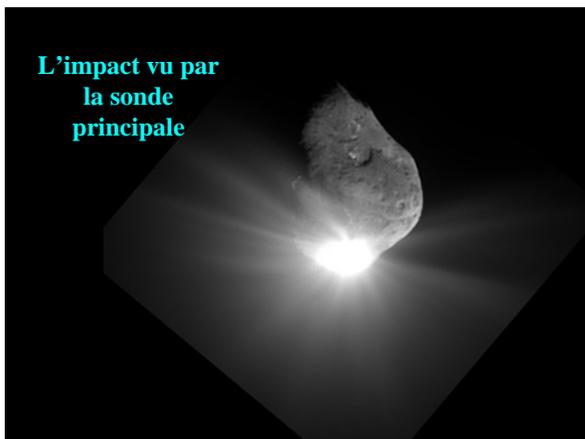
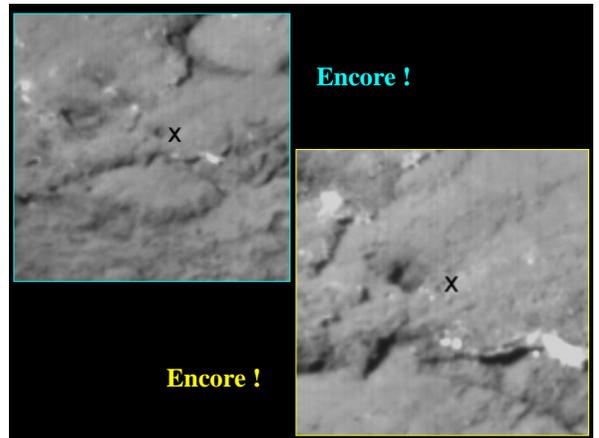
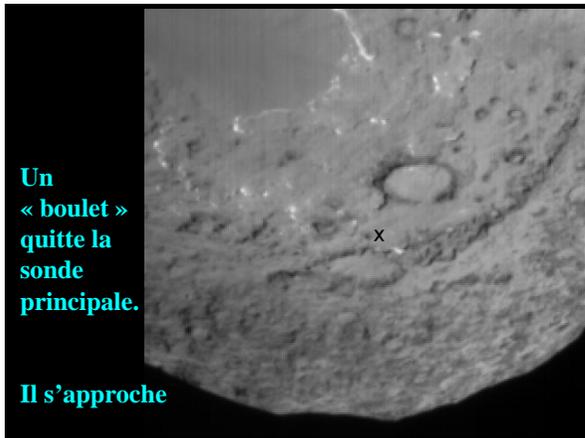
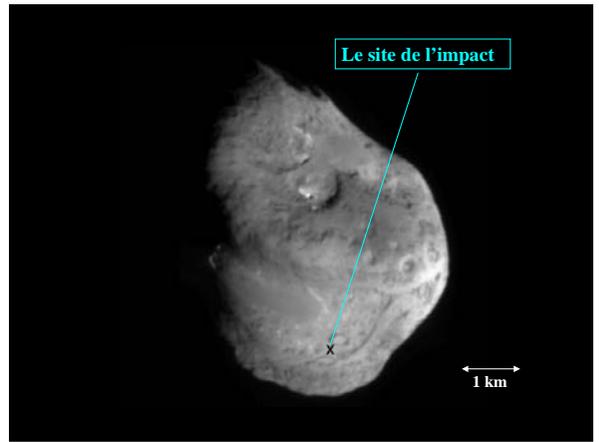
- H_2O , OH, H_2O^+ , H_3O^+ ,
- CO, CO_2 , CO^+ , HCO^+ ,
- H_2S , SO, SO_2 , H_2CS , OCS, CS,
- CH_3OH , H_2CO , HCOOH , CH_3OCHO ,
- HCN, CH_3CN , HNC, HC_3N , HNCO, CN, NH_3 , NH_2 , NH_2CHO , NH,
- CH_4 , C_2H_2 , C_2H_6 , CH^+ , C_3 , C_2 ,
- He, Na, K, O^+ ,
- Mg_2SiO_3 (olivine magnésienne)
- ainsi que les variétés isotopiques suivantes : HDO, DCN, H^{13}CN , HC^{13}N , C^{34}S



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

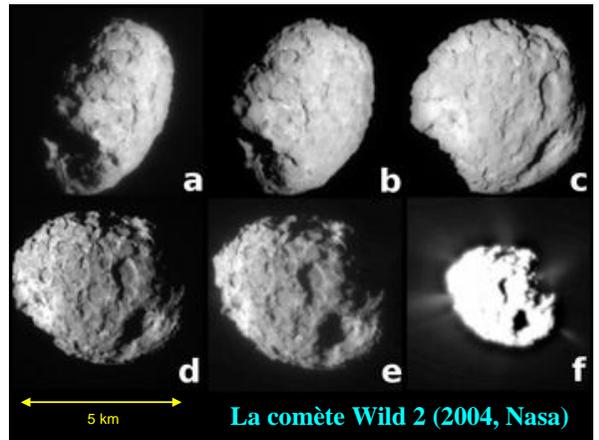
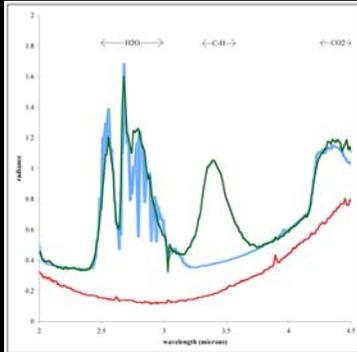


Et voilà pourquoi c'est important d'analyser ces poussières cométaires, de chimie C.H.O.N., initiales qui ravissent n'importe quels biologistes ! Il y a donc eu d'autres missions

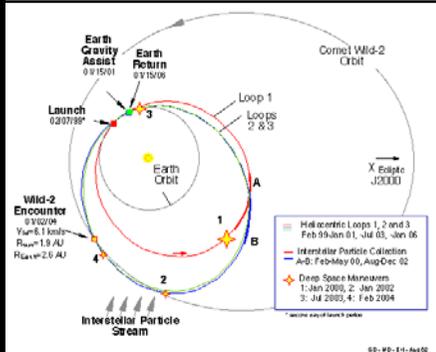


**Le spectre IR des
« gaz
d'échappement » :**
H₂O, CO₂ et
hydrocarbures.

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



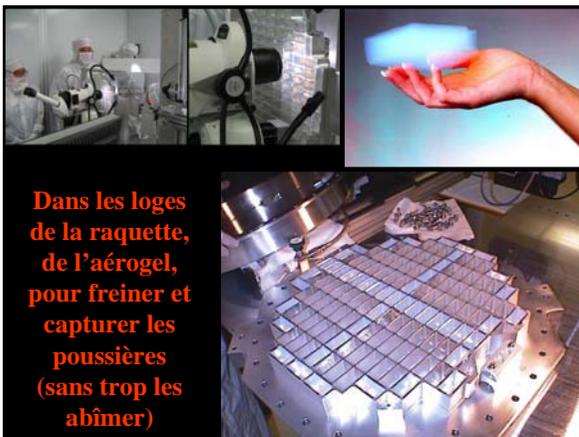
La comète Wild 2 (2004, Nasa)



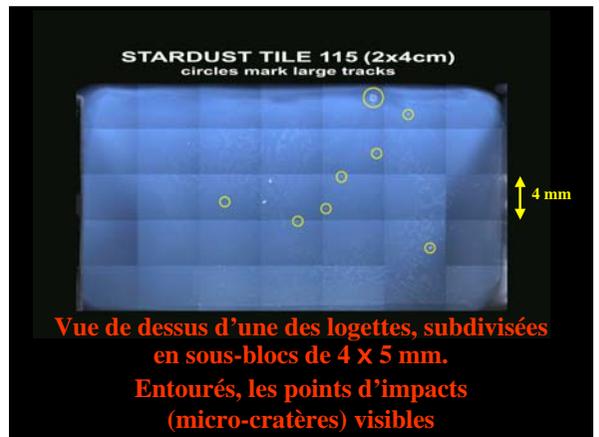
**L'orbite de la mission Stardust qui a survolé la
comète Wild 2 en 2004, et qui est revenue sur Terre
en janvier 2006**



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)**

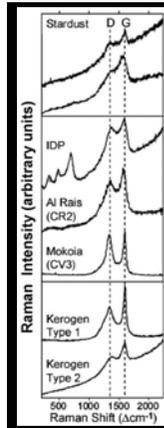


**Vue de dessus d'une des logettes, subdivisées
en sous-blocs de 4 x 5 mm.
Entourés, les points d'impacts
(micro-cratères) visibles**

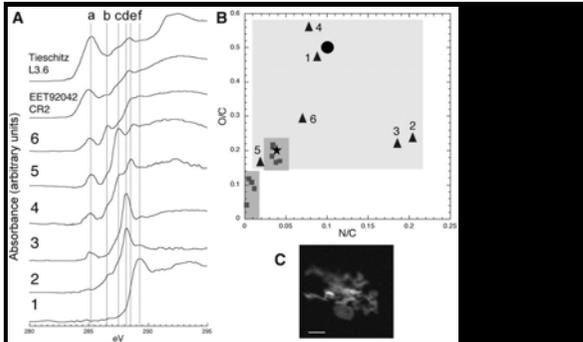
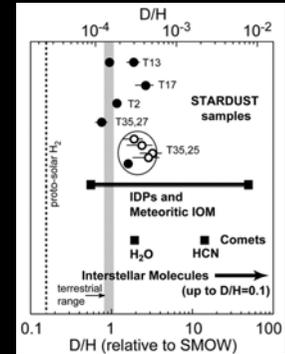
Gros plan (en coupe) sur un de ces cratères.



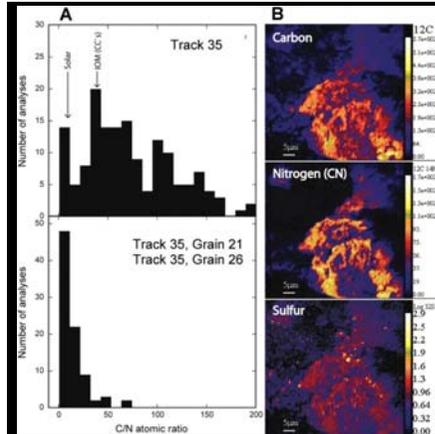
Les grains noirs, au bout des traces, sont des micro-grains cométaires, dont la taille « standard » est celle d'un globule rouge unique (7 μ). Ce sont ces micro-grains qu'il s'agit d'analyser, dans un premier temps sans les détruire.



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

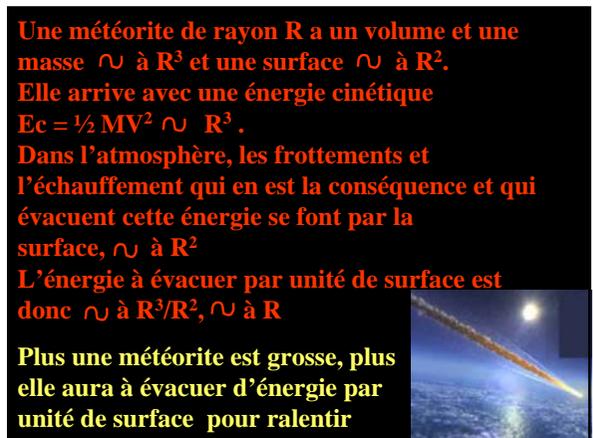
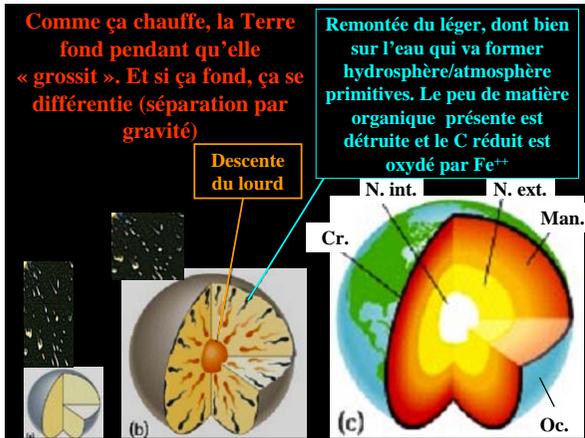
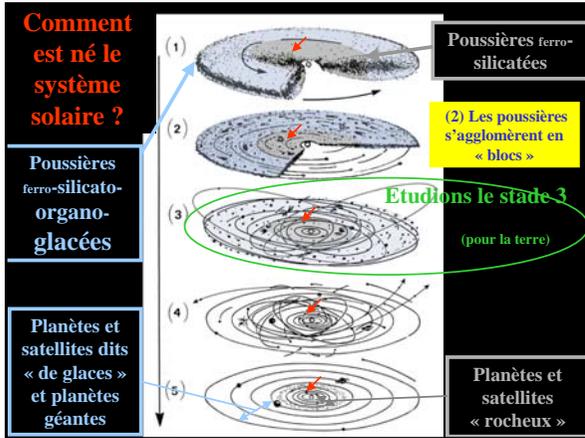


On peut « carter » la teneur en C, S... des différents grains

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 heteroatoms 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.

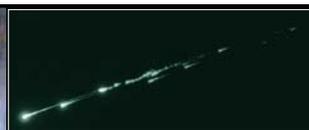
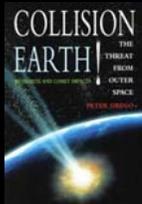


Les molécules organiques extra-terrestres et l'origine de la vie sur Terre



Une grosse météorite ($D > 100 \text{ m}$) 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 $\geq 11 \text{ km/s}$. 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.

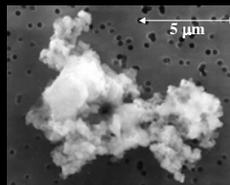


Si la météorite est moyenne, elle chauffe en surface (\rightarrow bolide). La surface se vaporise sur quelque cm d'épaisseur maximum. Cela ralentit suffisamment la météorite, qui arrive au sol avec la vitesse d'équilibre d'un corps dans l'air (environ 200 km/h). Son cœur reste froid. Si le cœur contenait 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 ($\leq 5\%$)



Si on extrapole (avec les données lunaires) ce qu'il a du 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

Pendant le premier milliard d'années de la Terre, les 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) ou seraient arrivés graines et spores tous faits.

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

Rendez-vous dans quelques années !

