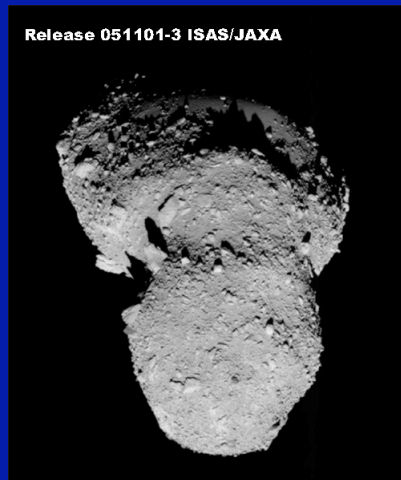


La composition des comètes et des astéroïdes

Dominique Bockelée-Morvan



Aussois 2006

Plan de l'exposé

1. Les comètes

1.1 Phase volatile : méthodes, mesures, implications

1.1 Phase réfractaire : spectrométrie de masse et spectroscopie

2. Taxonomie et minéralogie des astéroïdes

Les comètes

- ❑ Formées dans les régions externes de la nébuleuse

Accès à la composition des régions externes de la nébuleuse primitive
Contraintes sur les planétésimaux qui ont formé les planètes géantes
Contrainte sur l'évolution première du Système Solaire

- ❑ Deux populations :

- comètes à longue période provenant du nuage de Oort
- comètes à courte période (famille de Jupiter) provenant du « scattered disk »

Méthodes d'analyse



Retour d'échantillon : Stardust sur 81P/Wild 2

Noyau : difficile, spectroscopie en réflectance (in situ)

Atmosphère :

❑ Molécules mères, issues du noyau :

Spectrométrie de masse: Giotto

Spectroscopie UV, IR, millimétrique (au sol + spatiale)

❑ Molécules filles (ions, atomes, radicaux)

❑ Poussières : spectrométrie de masse (Giotto, Vega, Stardust)
spectroscopie IR

PhotoDissociation (UV)

Sublimation

PhotoIonisation

C

H

HCO

H₂CO

C

CO

O

CH

CH₂

CO⁺

N

CN

HCS

HCO⁺

CH₃CN

NH₂

N₂

jets poussières

O

OH

H₂O

H₃O⁺

CS

SO₂

H₂S

C₂H₂

H₂O⁺

poussière

H

S

C₃

CH₄

C₂H₆

atomes

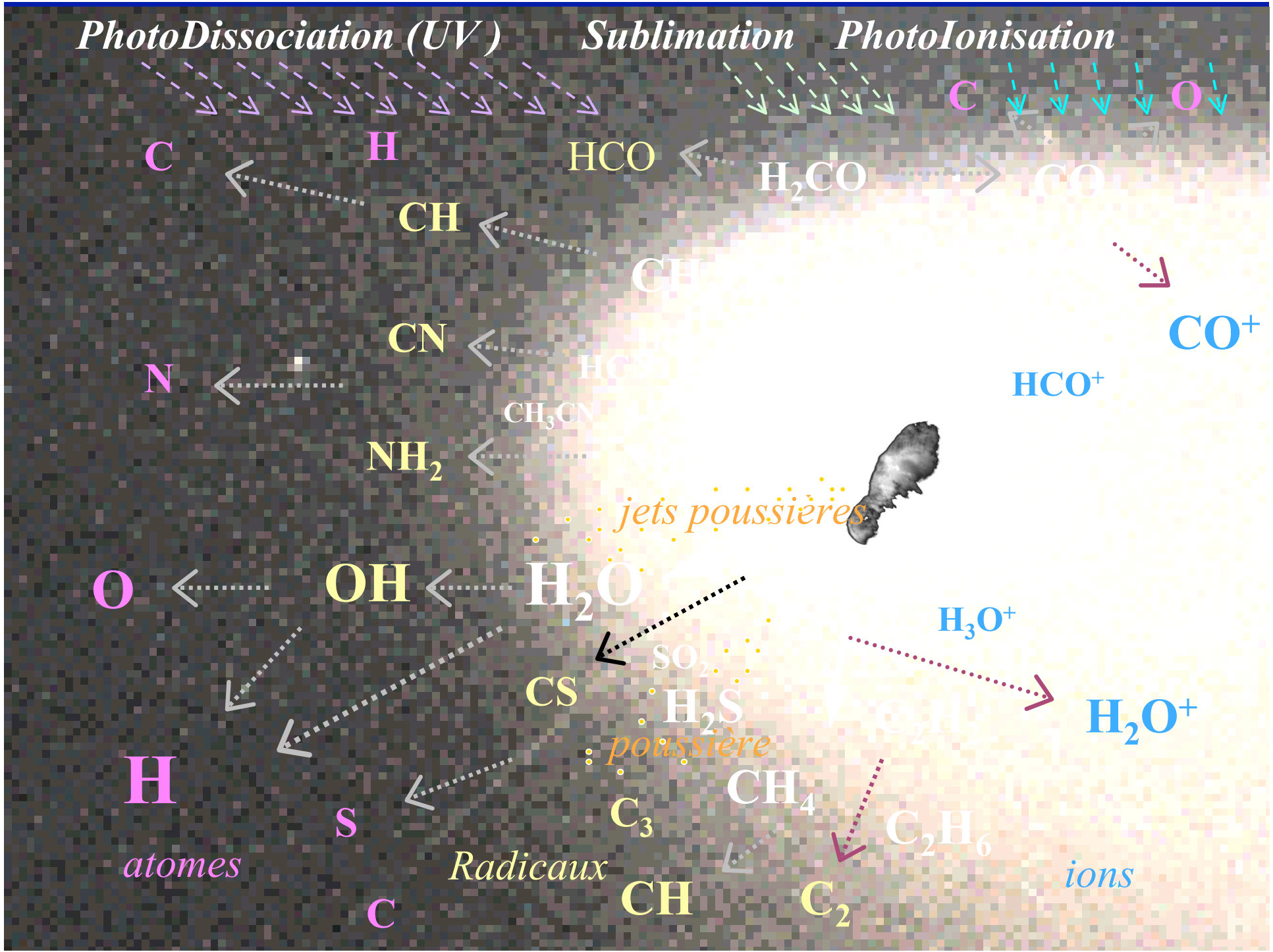
Radicaux

ions

C

CH

C₂



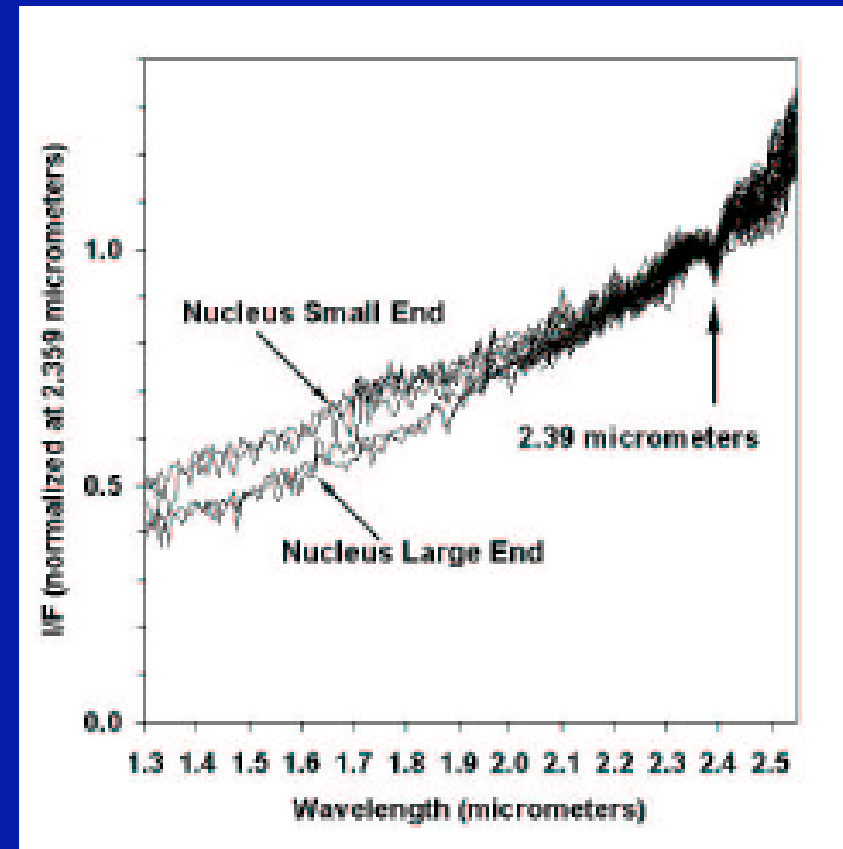
Spectroscopie de la surface du noyau

Comète 19P/Borrelly

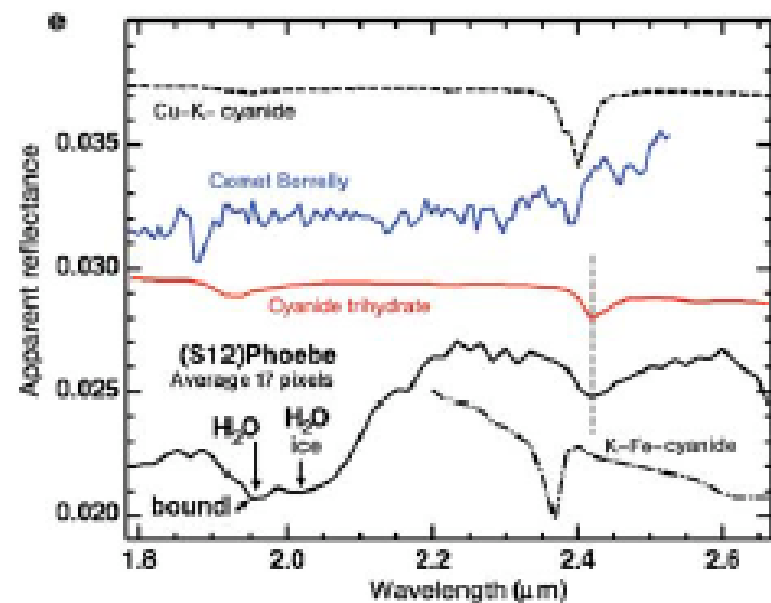
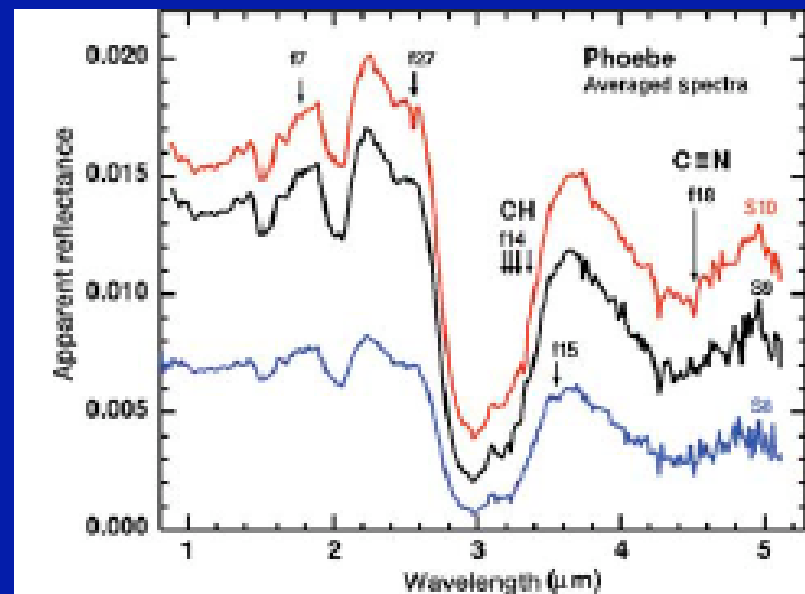
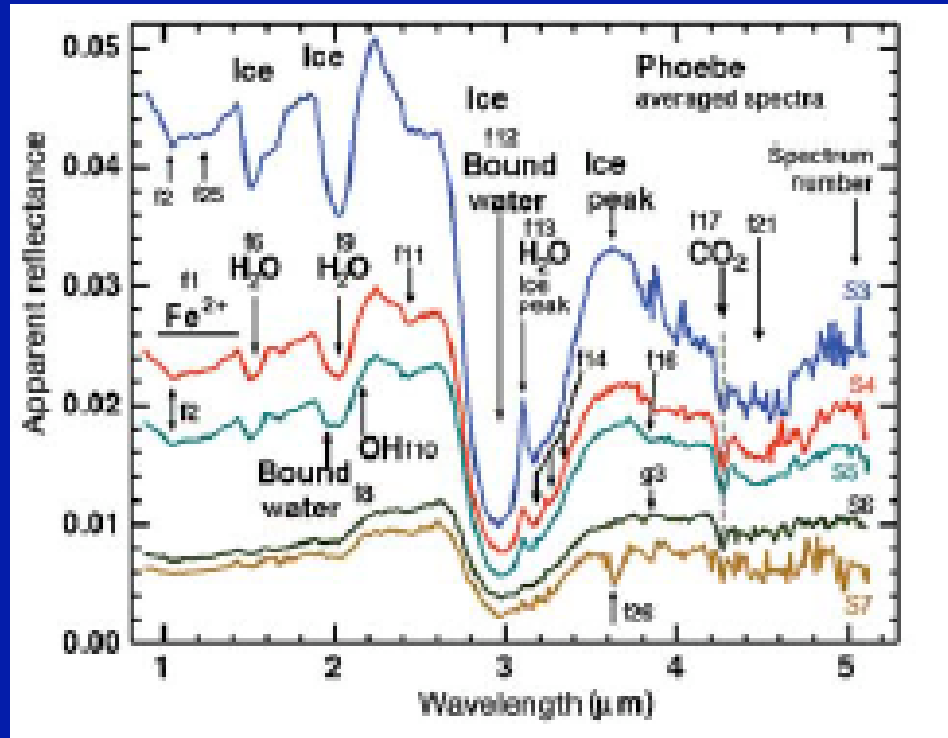
Mission Deep Space 1

Signature à 2.39 μm

Composé à liaison CN ?



Soderblom et al, 2000, Science 296, 1087



Phoebe
KBO capturé

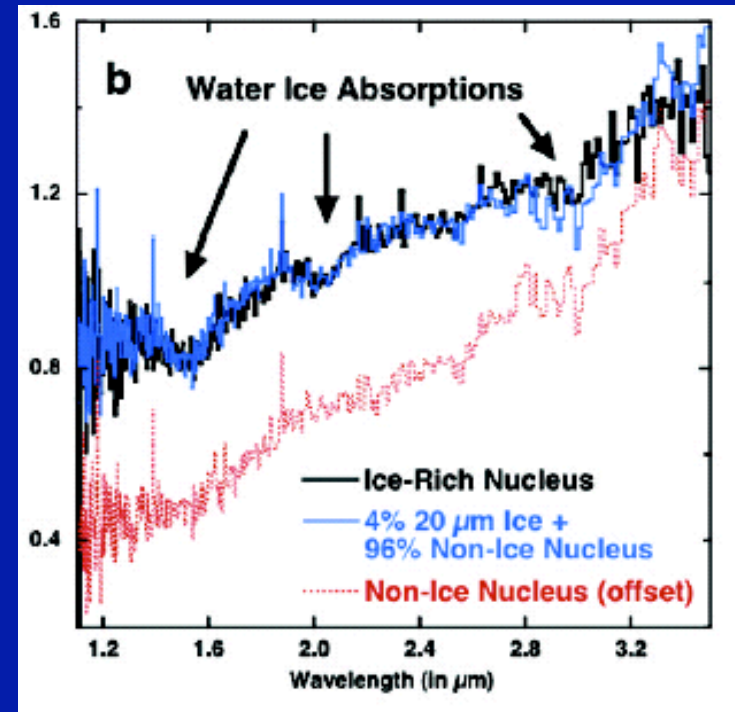
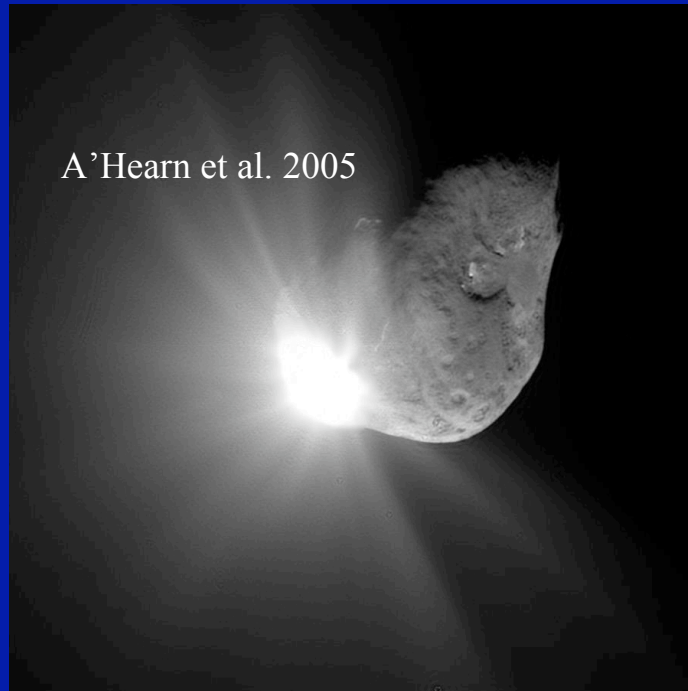
Cassini/VIMS

H₂O, CO₂

Organiques, nitriles, composés CN

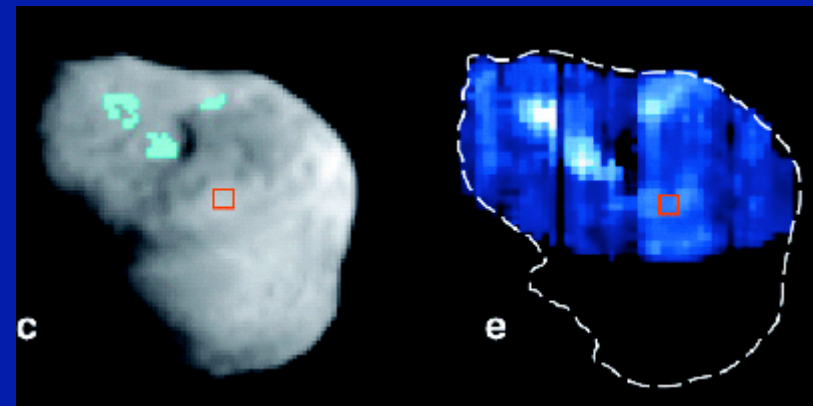
Clark et al., Nature 435,66, 2005

Détection de la glace d'eau par Deep Impact



9P/Tempel 1, 4 July 4 2005

A'Hearn et al. 2005
Sunshine et al. 2006

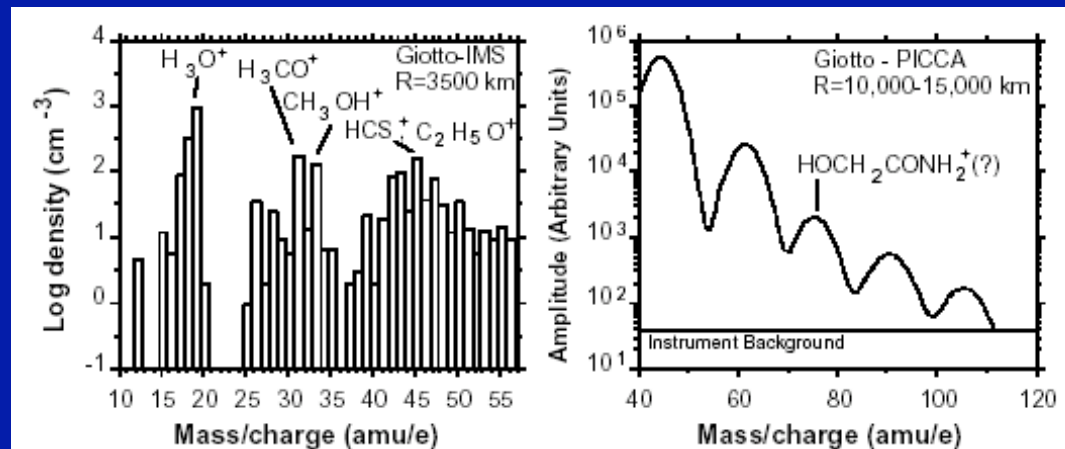


Spectrométrie de masse



Résultats de Giotto/Vega dans 1P/Halley

- Limités par la résolution en masse (1 amu)
- Espèces simples et ions, isotopes
 H_2O , H_2CO , H_2S , NH_3 , CH_3OH



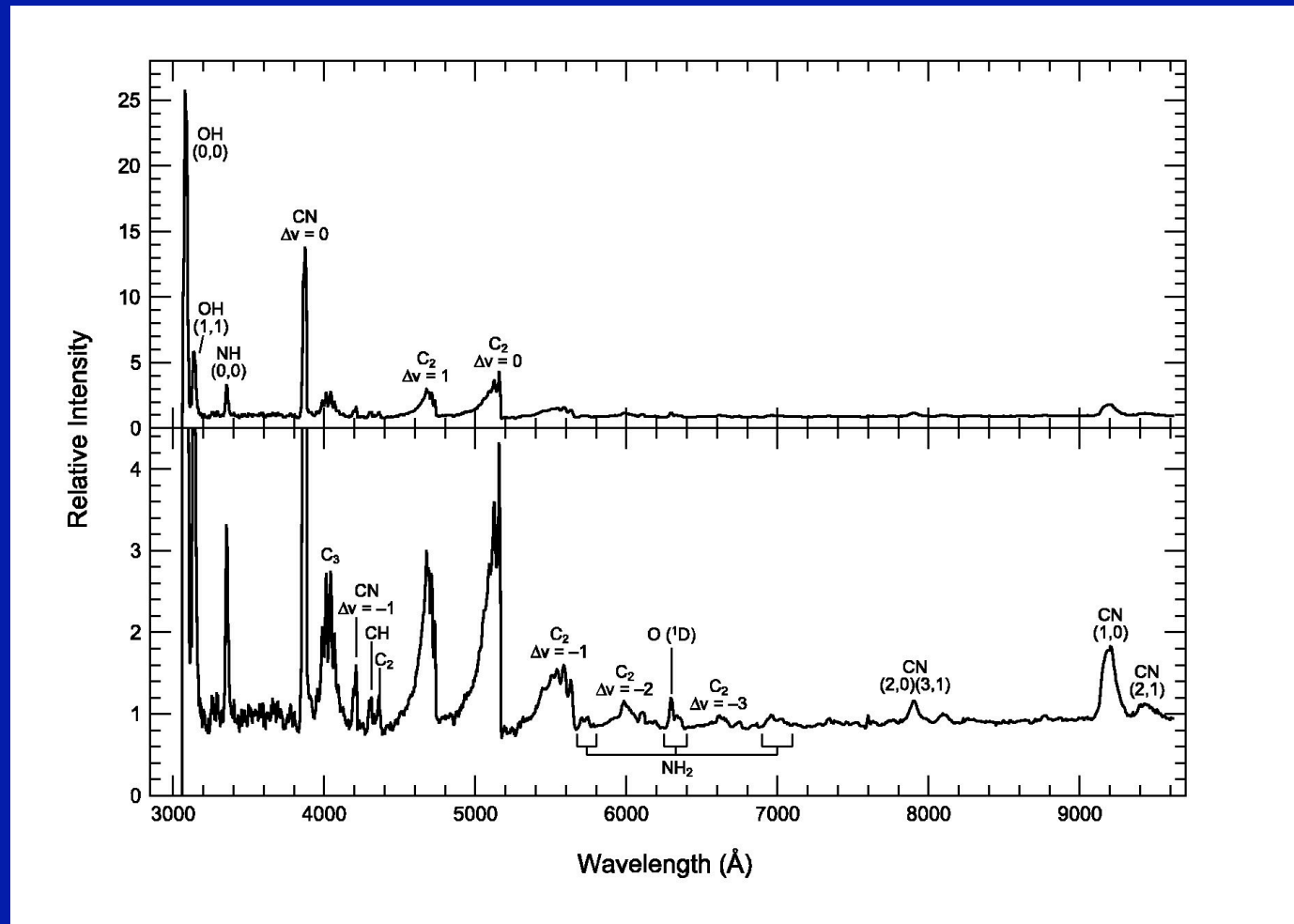
Altwegg et al. 1999
Sp.Sci. Rev, 90,3

- Détection de composés lourds
présences de l'acide acétique, iminoethane, pyridine ... proposés
- Résultats de Stardust sur Wild 2 : composés riches en azote
(Kissel et al. 2004)

Spectroscopie moléculaire dans les comètes

- **Visible et UV**: essentiellement radicaux et ions
exceptions : CO and S₂
détection possible du phénanthrène et du pyrène in 1P/Halley
- **IR 2-5 μm** : bandes fondamentales of vibration
bandes chaudes de l'eau (e.g., $\nu_3-\nu_2$)
processus d'émission : fluorescence
- **radio** (cm à submm): outil privilégié car atmosphères froides
(50 à 100 K)

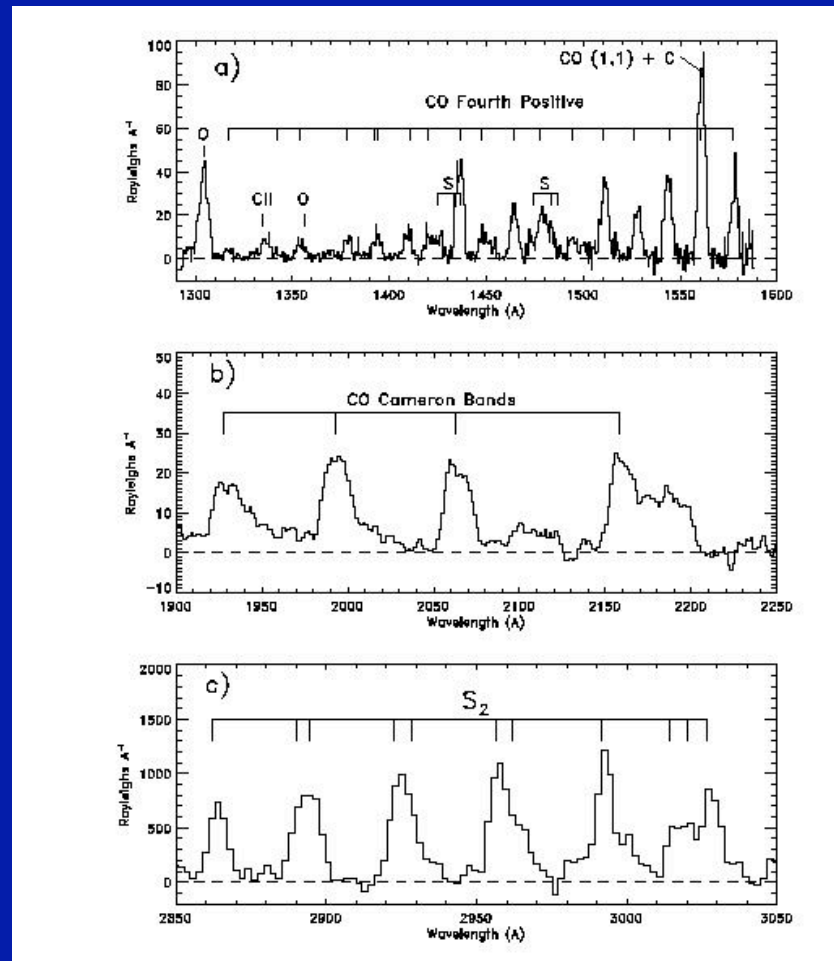
Un spectre typique dans le visible/IR proche



Feldman et al. (2005)

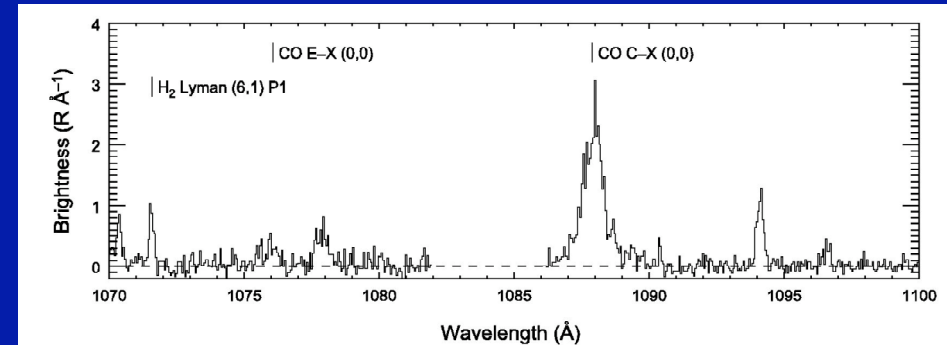
Spectres UV cométaires

Spectres HST de C/1996 B2 (Hyakutake)



Weaver et al. (1998)

Spectre FUSE de C/2001 A2 (LINEAR)



Feldman et al. (2002)

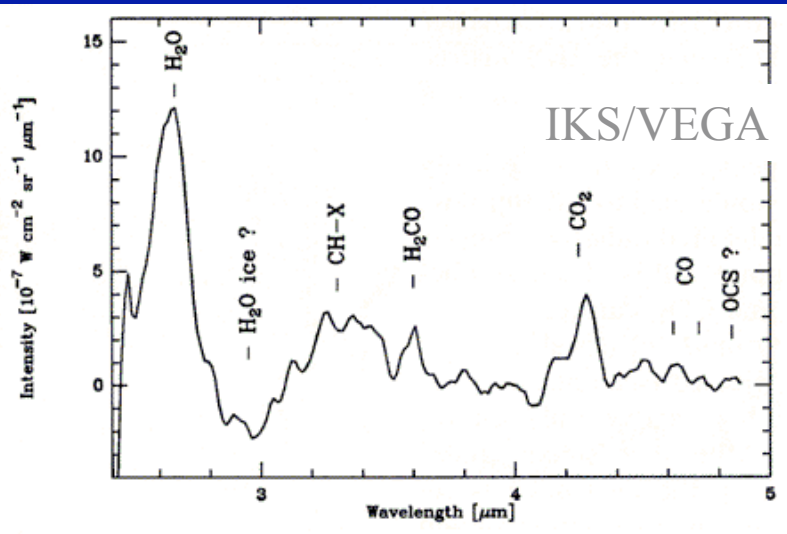
radicaux	OH, CH, NH, NH ₂ CN, C ₂ , C ₃ , CS, NS, SO CN, C ¹³ C, C ¹⁵ N, C ³⁴ S
atomes	H, O, C, S Na, K*, Cr*, Ca*, Mn* Fe*, Ni*, Cu*, Co*, V*
ions	O ⁺ , C ⁺ , Ca ⁺ * H ₂ O ⁺ , H ₃ O ⁺ , OH ⁺ CO ₂ ⁺ , CO ⁺ , HCO ⁺ CH ⁺ , N ₂ ⁺

* uniquement dans comètes rasantes (sungrazing)

Chronology of identification of parent molecules in Comets

Year	Comet	Technique
1976	<i>C/1975 VI (West)</i> CO	UV
1983	<i>C/1983 H1 (IRAS-Araki-Alcock)</i> S ₂ NH ₃ ?	UV radio
1985-1986	<i>1P/Halley</i> H ₂ O HCN H ₂ CO? C ₁₄ H ₁₀ ?	IR radio radio, IR UV
1990	<i>C/1989 X1 (Austin), C/1990 K1 (Levy)</i> H ₂ CO, H ₂ S CH ₃ OH	radio radio, IR
1996	<i>C/1996 B2 (Hyakutake)</i> NH ₃ , HNC, CH ₃ CN, OCS?, HNCO? CH ₄ , C ₂ H ₂ , C ₂ H ₆ HDO, H ¹³ CN	radio IR radio
1997	<i>C/1995 O1 (Hale-Bopp)</i> HNCO, HC ₃ N, OCS, SO ₂ , H ₂ CS NH ₂ CHO, HCOOH, HCOOCH ₃ , CH ₃ CHO HOCH ₂ CH ₂ OH (<i>identified in 2003</i>) HC ¹⁵ N, DCN, H ₂ ³⁴ S	radio radio radio radio

Spectroscopie infrarouge (1)



Combes et al. (1986)

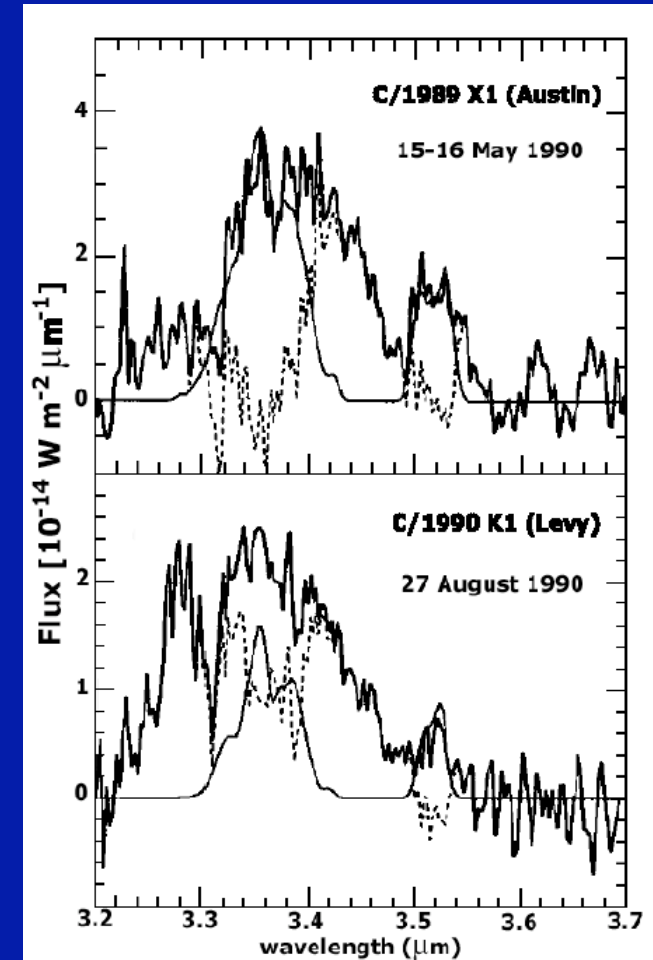
H₂O, CO, CO₂, H₂CO, CH₃OH

3.3-3.5 μm band : organiques, hydrocarbures -CH-
en phase gazeuse
composés non identifiés at

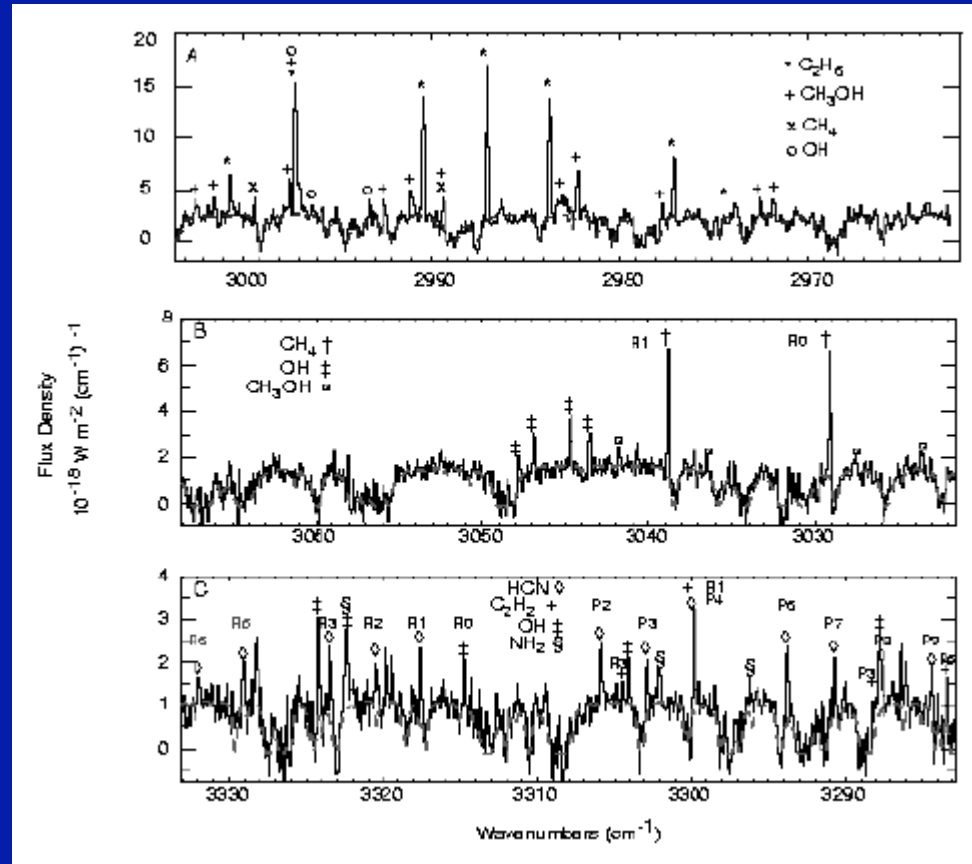
3.42 μm

3.28 μm band: PAHs ?

bandes des PAHs dans l'IR thermique non



Spectroscopie infrarouge (2)



Haute résolution spectrale
Raies ro-vibrationnelles de
CH₄, C₂H₂, C₂H₆
CH₃OH, HCN
OH, NH

Raies non identifiées

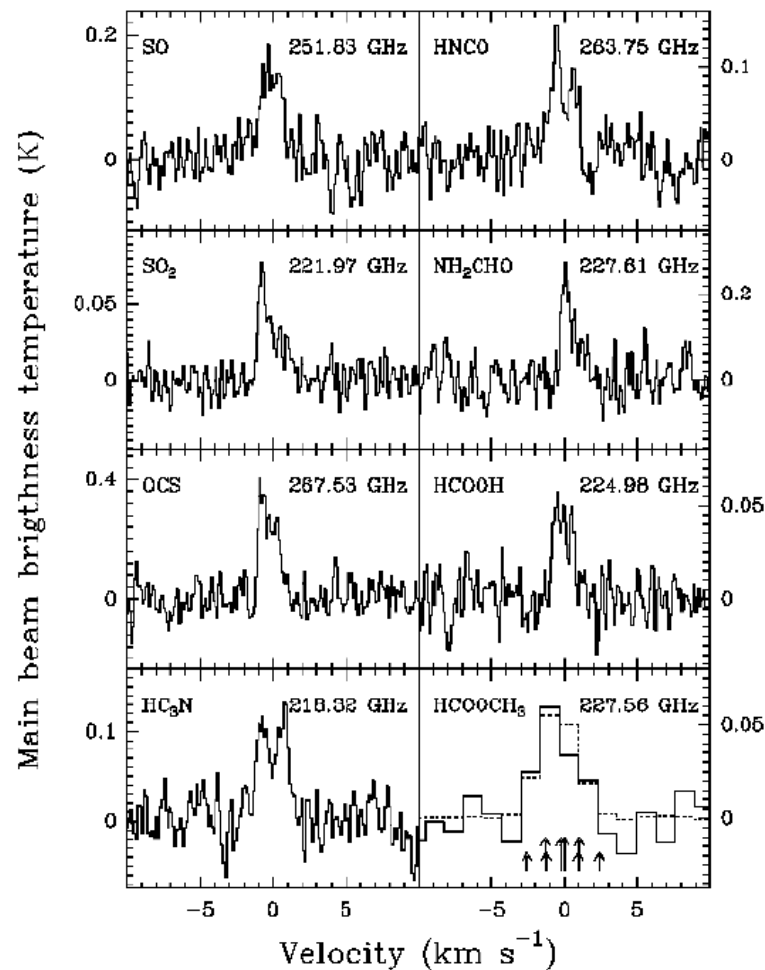
Spectres IR des organiques
mal connus (structure ro-
vibrationnelle, intensités)

Spectroscopie millimétrique

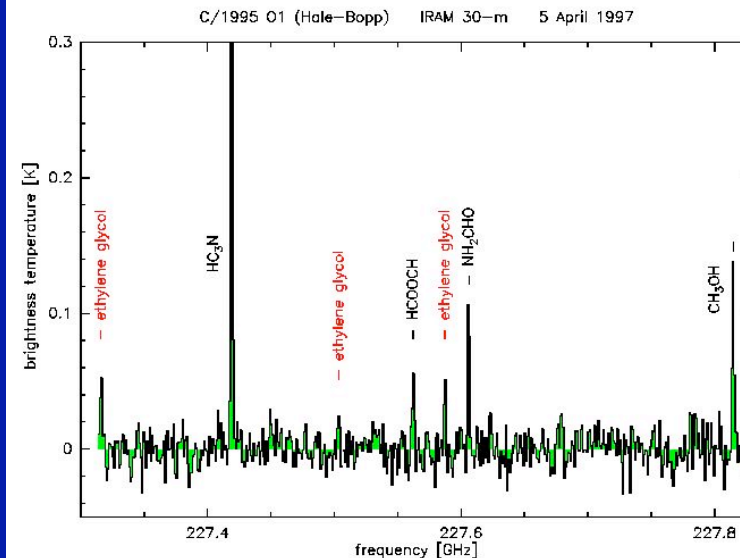


- HCN 89 GHz (1985, comet Halley, IRAM 30-m)
- 19 molécules détectées (isotopes, radicaux, ions non inclus)
- beaucoup d'identifications dans les comètes Hyakutake and Hale-Bopp
- Isotopes: HDO, DCN, H¹³CN, HC¹⁵N, C³⁴S, H₂³⁴S
- Radicaux et ions: NS, CS, SO, CN, H₃O⁺, CO⁺

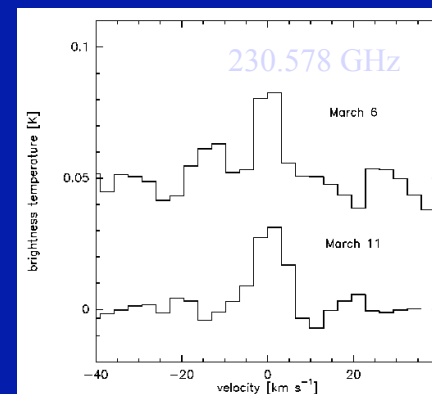
Nouvelles molécules dans Hale-Bopp



Bockelée-Morvan et al.
A&A 353, 1101, 2000



Crovisier et al. 2004
A&A 418, L35, 2004



Ethylene glycol $\text{HOCH}_2\text{CH}_2\text{OH}$
11 raies identifiées en 2003

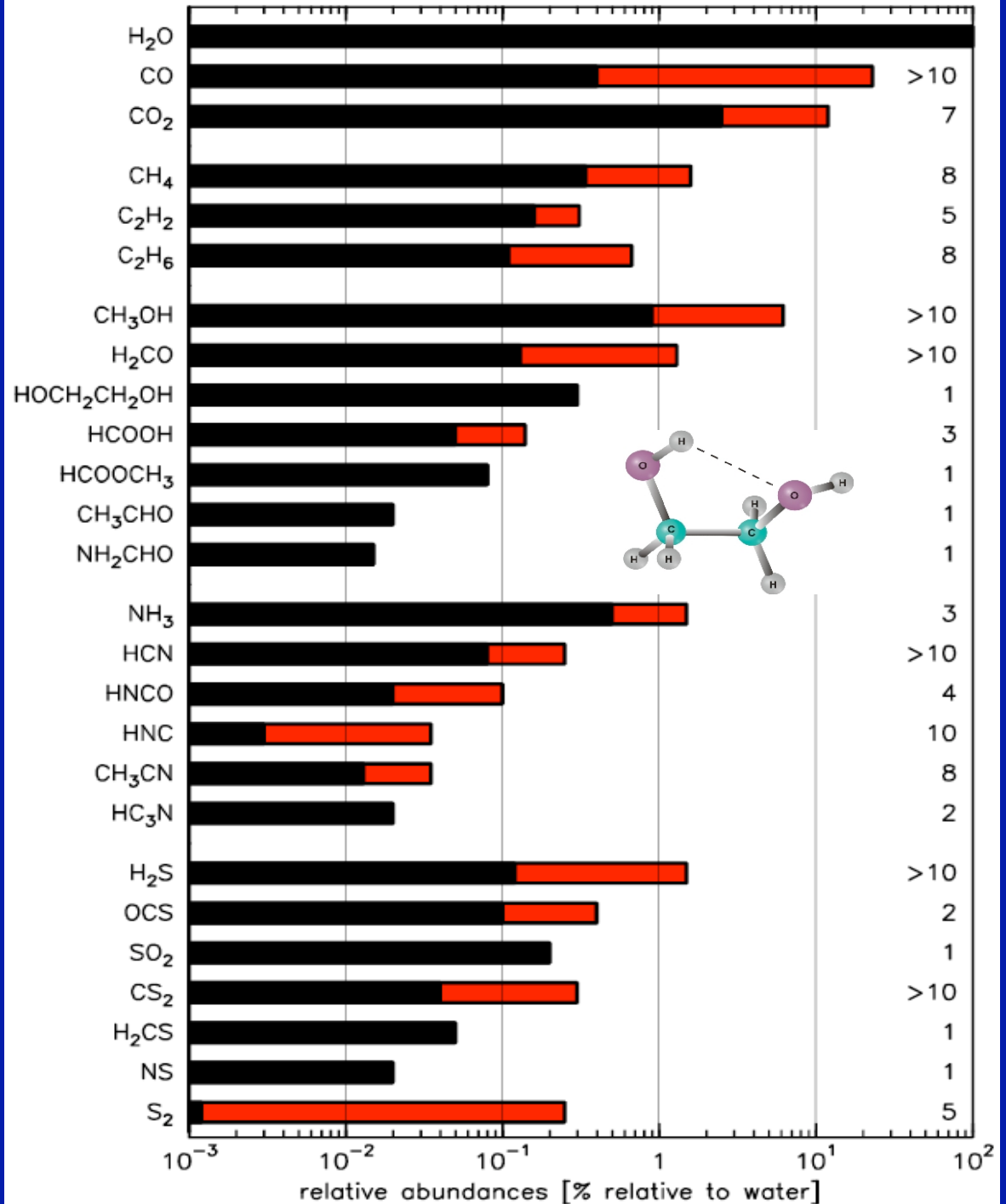
Abondances moléculaires

Diversité chimique

Diversité parmi les comètes provenant du nuage de Oort

Comètes de la famille de Jupiter (provenant de la ceinture de Kuiper): pas de différences notables (sauf CO, sous-abondant) avec la composition des comètes du nuage de Oort (mais faible échantillon)

Crovisier 2005



Complexité moléculaire

- abundances \searrow quand complexité \nearrow



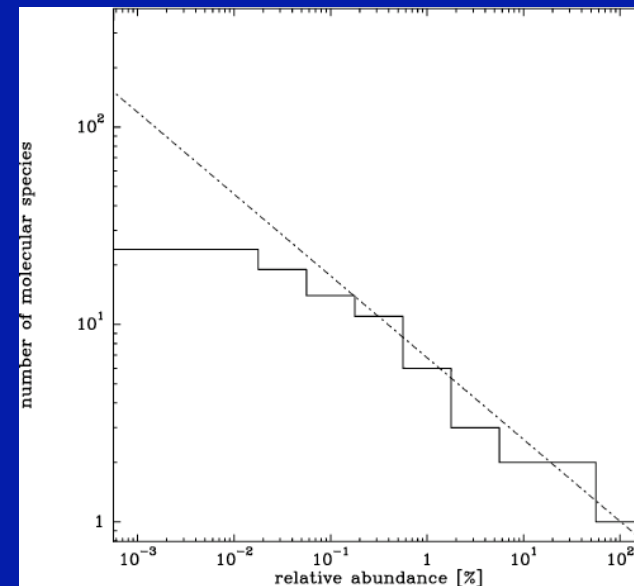
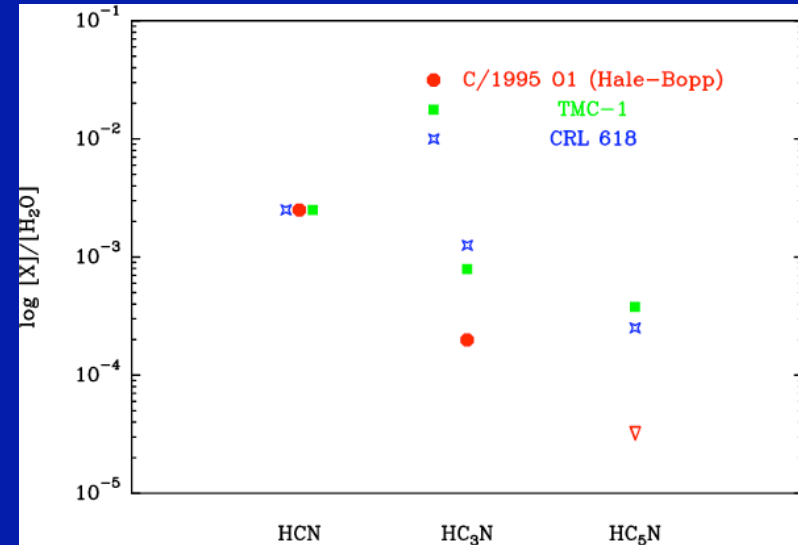
cyanopolyynes

- mais $\text{CH}_4 \sim \text{C}_2\text{H}_2 \sim \text{C}_2\text{H}_6$

- alcools versus aldéhydes



Réactions grain-surface ?



Crovisier et al. A&A 418, 1141, 2004

Autres évidences de molécules complexes

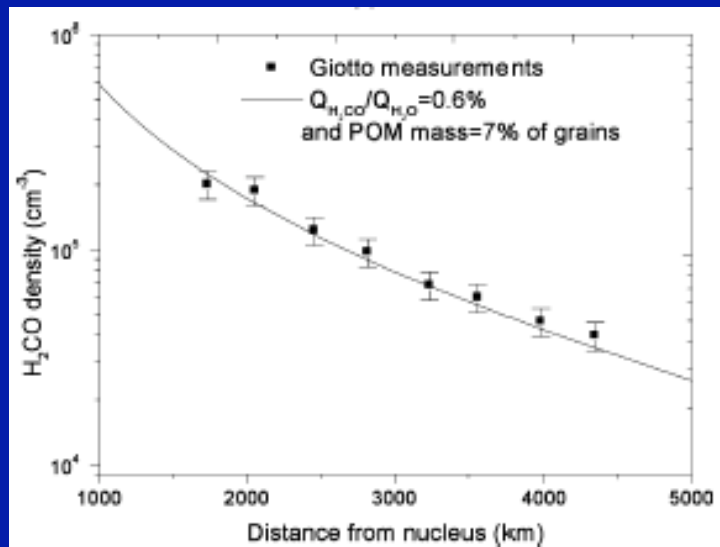
sources étendues de H_2CO , CO , HNC

Grains organiques ?

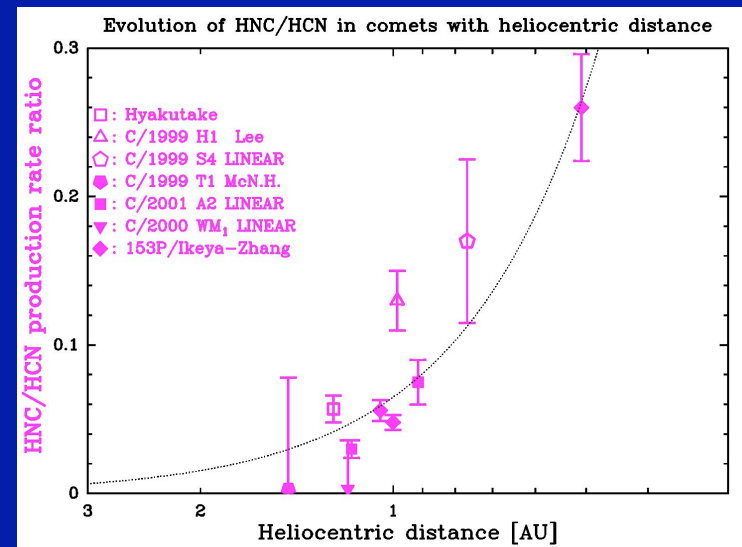
H_2CO : thermodegradation du polyoxyméthylène (polymère de H_2CO)

CO : source étendue non identifiée

HNC : sa production augmente quand la distance au soleil décroît



Cottin et al. 2004, Icarus 167, 397



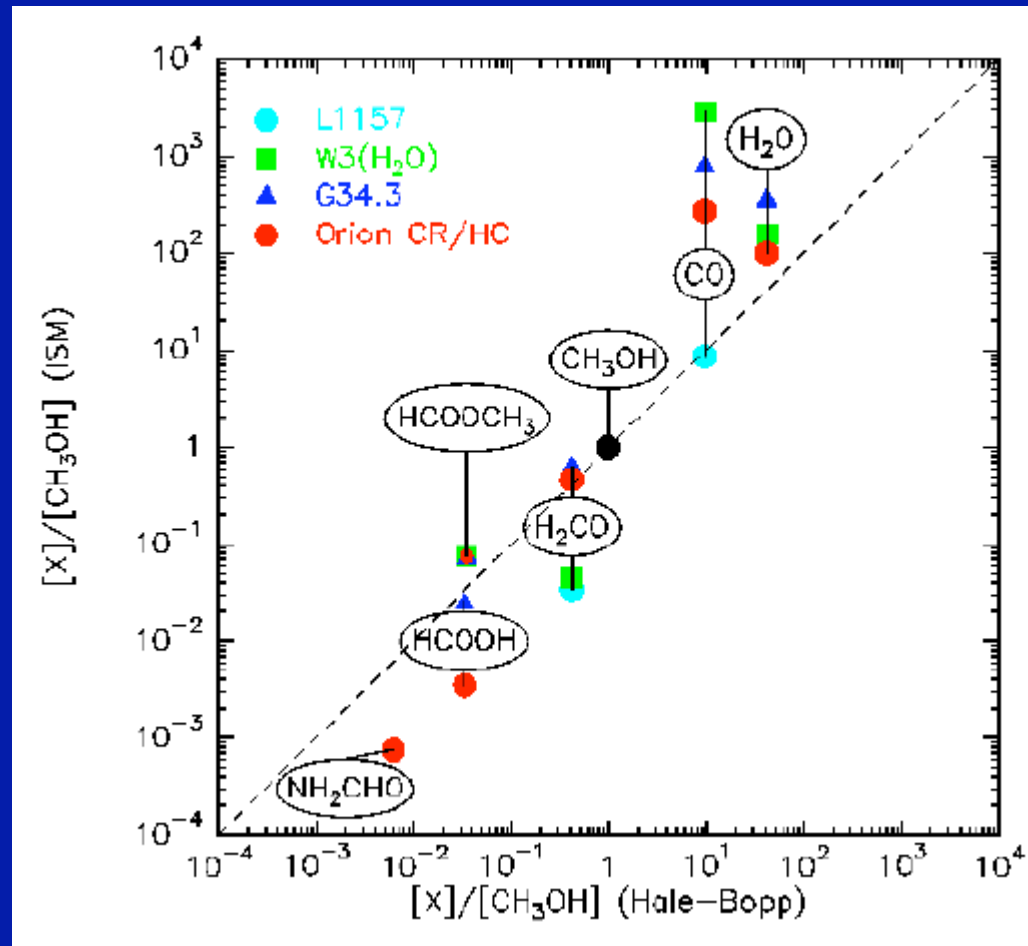
Biver et al. 2005

Comparaison glaces interstellaires, glaces cométaires

	High-mass Stars	Solar-type Stars	Comet Average
H ₂ O	100	100	100
CO	9–20	5–50	1.8–30
CO ₂	12–20	12–37	3–6
CH ₃ OH	0–22	0–25	1.8–2.5
CH ₄	1–2	<1	0.14–1.5
H ₂ CO	1.5–7	—	0.4–4
OCS	0–0.3	<0.08	0.1–0.4
NH ₃	0–5	—	0.5–1.5
HCOOH	0.4–3	—	0.09
C ₂ H ₆	<0.4	—	0.11–0.67
HCN	<3	—	0.1–0.3
C ₂ H ₂	—	—	0.1–0.5

Ehrenfreund et al. 2004

Analogies avec milieu interstellaire : hot cores et flots bipolaires



Sgr B2(N) : glycol/CH₃OH = 5 10⁻⁴

Hale-Bopp : glycol/CH₃OH = 0.1

Origine des glaces cométaires

- ❑ Molécules cométaires: en grande partie formées dans le nuage pré-solaire ou pendant sa phase d'effondrement (réactions ion-molécule ou à la surface des grains)
- ❑ Certaines produites dans la nébuleuse solaire : peut-être
 - thermochimie dans les régions internes : ne peut expliquer CH_4 et NH_3 (Mousis et al. 2002)
 - production d'hydrocarbures par catalyse Fisher-Tropsch (Kress & Tielens 2001)
production de CH_4
 - combustion du carbone (Gail, 2004): produit CH_4 et C_2H_2 , mais pas C_2H_6
 - chimie type ISM dans les régions externes ?
- ❑ Les glaces cométaires se sont condensées dans la nébuleuse solaire
 - piégeage sous forme de clathrates hydrates ?
 - proposé pour expliquer la déficience en N_2 et gaz rares (Iro et al. 2003)
 - $\text{Ne/O} < 700$, $\text{Ar/O} < 10 \times$ rapports solaires

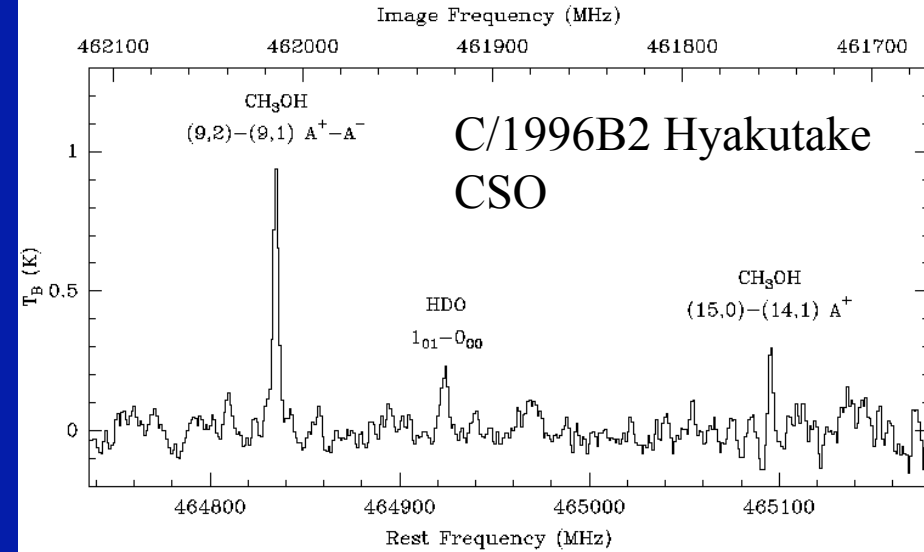
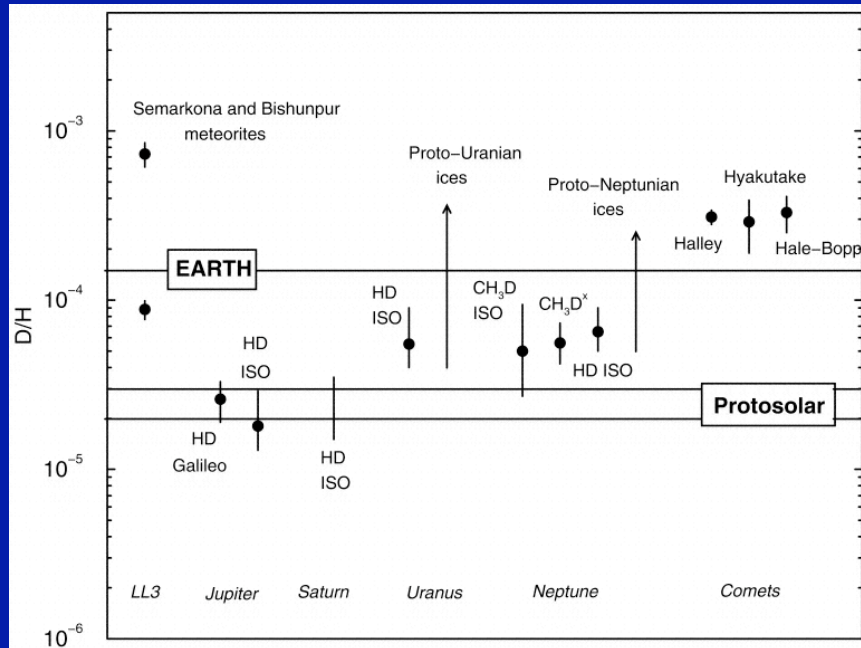
Espèces deutérées

H₂O: D/H = 3 · 10⁻⁴

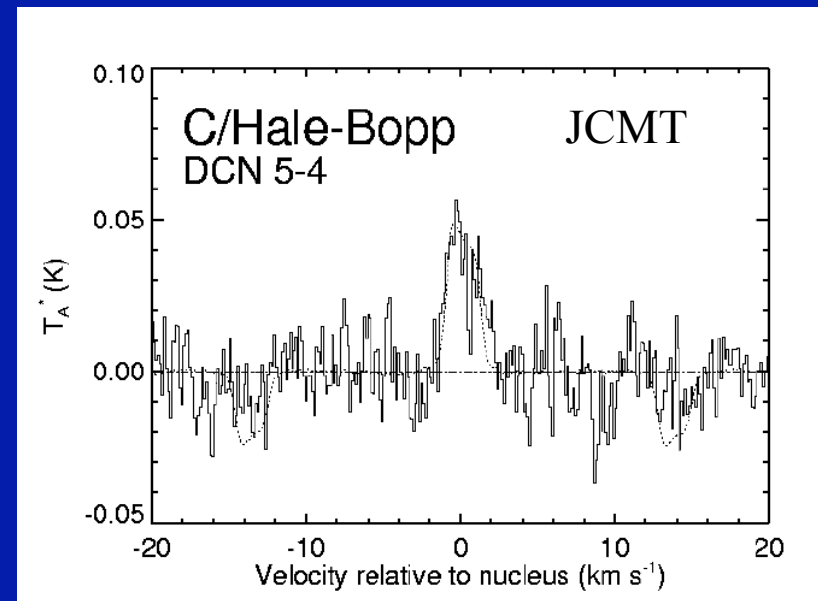
HCN: D/H = 2.3 · 10⁻³

D atomic détecté (HST)

Dans CH₃OH, H₂CO, NH₃, CH₄:
Limites supérieures de 10⁻² ou
quelques 10⁻²



Bockelée-Morvan et al. (1998)



Meier et al. (1998)

Interprétation du D/H dans les comètes

enrichissement $f = 12$ par rapport à la valeur protosolaire

Fractionnement dans la nébuleuse solaire (H₂O/HD): au plus $f = 1.5$

Le D/H cométaire reflète au moins partiellement un fractionnement isotopique de type MIS (réactions ion-molécule / grain-gaz)

- **Meier et al. (1998):**

D/H acquis dans le nuage présolaire à $T = 30-50$ K

- **Aikawa et al. (1999)**

D/H acquis dans les régions extérieures de la nébuleuse solaire par réactions ion-molécule

- **Hersant et al. (2001)**

D/H acquis dans le nuage présolaire et reprocessé dans la nébuleuse solaire interne

D/H in water in a turbulent evolving solar nebula

Solar nebula starts with $f = 30$ in water

Isotopic exchanges in the Solar Nebula:



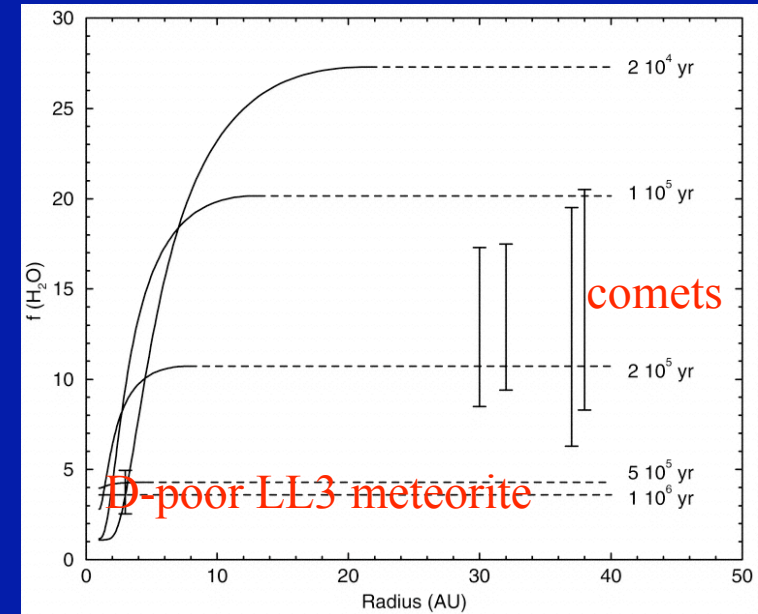
efficient at $T > 200$ K

occurs in vapor phase

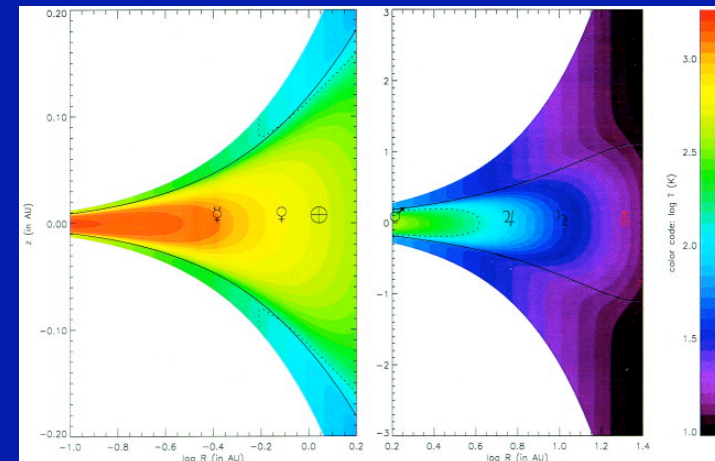
inner parts : $f \rightarrow f=1$

Large scale radial mixing by turbulence
outer regions mixed unprocessed and
processed water

D/H in cometary water: constraints on
solar nebula model (turbulent viscosity
coefficient, initial inner radius)



Hersant et al. (2001)



Rapports isotopiques

$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	[C ₂]	93 ± 10	4 comets	Wyckoff et al. (2000)
	[CN]	95 ± 12	1P/Halley	Kleine et al. (1995)
	[HCN]	111 ± 12	Hale-Bopp	Jewitt et al. (1997)
$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	[HCN]	323 ± 46	Hale-Bopp	Jewitt et al. (1997)
	[CN]	140 ± 35	Hale-Bopp	Arpigny et al. (2003)
$^{16}\text{O}/^{18}\text{O}$	[H ₂ O]	518 ± 45	1P/Halley	Balsiger et al. (1995)
	[H ₂ O]	470 ± 40	1P/Halley	Eberhardt et al. (1995)
	[H ₂ O]	450 ± 50	153P	Lecacheux et al. (2003)
$^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$	[CS]	27 ± 3	1P/Halley	Jewitt et al. (1997)
	[S]	23 ± 6	1P/Halley	Altwegg (1996)
	[H ₂ S]	16 ± 3	Hale-Bopp	Crovisier et al. (2004)

Valeurs terrestres:

$$^{12}\text{C}/^{13}\text{C} = 89$$

$$^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 500$$

$$^{14}\text{N}/^{15}\text{N} = 270$$

$$^{32}\text{S}/^{34}\text{S} = 24$$

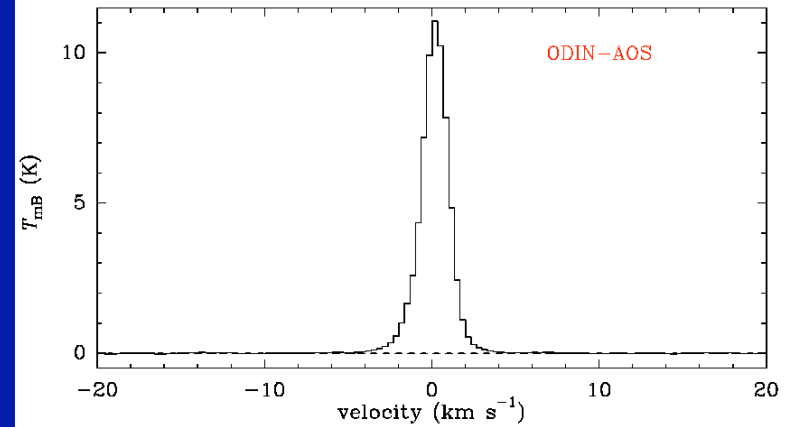
Observations Odin

H_2O , H_2^{18}O

C/2001 Q4 (NEAT)

H_2O

C/2001 Q4 (NEAT): $\text{H}_2\text{O}(110-101)$ 557GHz: 26.7-32.9 Apr. 2004



H_2^{18}O

C/2001 Q4 (NEAT): H_2^{18}O at 548 GHz: 26.7-32.9 Apr. 2004

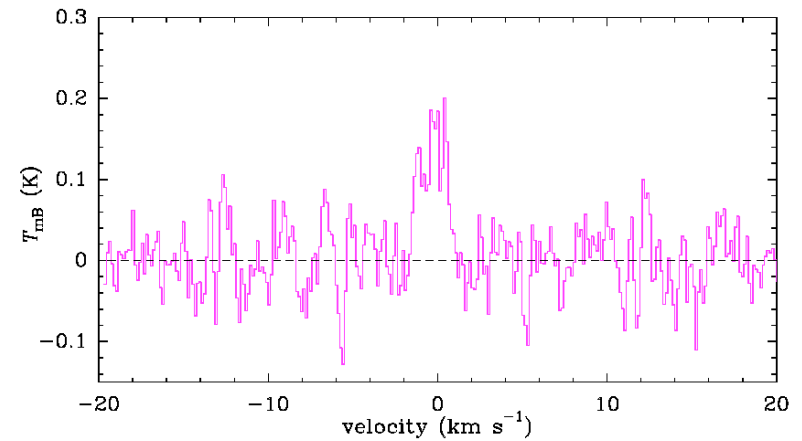
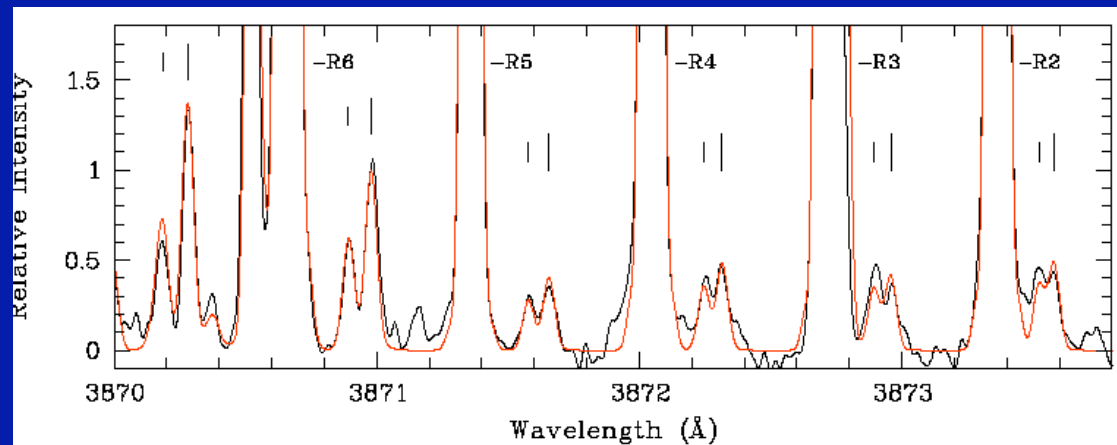


Table 1. Carbon and nitrogen isotopic ratios in comets.

Comet	Type	r (AU)	Method (carrier)	$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$	$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$	References
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	OC	0.92	Millimeter (HCN)	109 ± 22	330 ± 98	Ziurys et al. (1999)
		1.20	Millimeter (HCN)	111 ± 12	323 ± 46	Jewitt et al. (1997)
C/1995 O1 (Hale-Bopp)	OC	0.92	Optical (CN)	90 ± 30	160 ± 40	Manfroid et al. (2005)
		0.93	Optical (CN)	95 ± 40	140 ± 45	Manfroid et al. (2005)
		2.73	Optical (CN)	80 ± 20	140 ± 30	Manfroid et al. (2005)
C/2000 WM1 (LINEAR)	OC	1.21	Optical (CN)	115 ± 20	140 ± 30	Arpigny et al. (2003)
C/2001 Q4 (NEAT)	OC	0.98	Optical (CN)	90 ± 15	135 ± 20	Manfroid et al. (2005)
		3.70	Optical (CN)	70 ± 30	130 ± 40	Manfroid et al. (2005)
C/2003 K4 (LINEAR)	OC	1.20	Optical (CN)	90 ± 15	135 ± 20	Manfroid et al. (2005)
		2.61	Optical (CN)	85 ± 20	150 ± 35	Manfroid et al. (2005)
122P/1995 S1 (de Vico)	HT	0.66	Optical (CN)	90 ± 10	140 ± 20	Jehin et al. (2004)
153P/2002 C1 (Ikeya-Zhang)	OC	0.92	Optical (CN)	90 ± 25	170 ± 50	Jehin et al. (2004)
C/1999 S4 (LINEAR)	OC	0.88	Optical (CN)	100 ± 30	150 ± 40	This work
88P/1981 Q1 (Howell)	JF	1.41	Optical (CN)	90 ± 10	140 ± 15	This work

Comet types: OC: Oort Cloud; HT: Halley-type; JF: Jupiter-family.



Hutsemékers et al. 2005

$^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$

IDP = 200

MOM : = 250

Terrestre = 270

Protosolaire = 420

CN, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, $^{13}\text{C}/^{14}\text{N}$ dans 88P/Howell

Composition de la poussière cométaire

- ❑ spectrométrie de masse : PUMA/Vega, PIA/Giotto (Halley)
CIDA/Stardust (Wild 2)
- ❑ émission thermique : température de couleur, signatures spectrales
- ❑ propriétés de diffusion : couleur, albedo, polarisation

Données de spectrométrie de masse (1)

Halley : Quelques nanogrammes étudiés (5000 grains)

□ Composition élémentaire :

- éléments réfractaires : composition solaire (à un facteur 2)
- H, C, N : enrichis /chondrites CI
- gaz+poussières : tous les éléments en proportion solaire sauf H et N
rapport G:P = 2:1 (H,O); = 1: 2 (C, N)

□ grains organiques et réfractaires

- 25 % CHON essentiellement, densité 1g/cm³
- 25% réfractaires (silicates et autres), densité 2-3 g/cm³
- 50% de composition intermédiaire : cœur réfractaire+gangue organique
- réfractaires/CHON : rapport 1-2 en masse
- moins de CHON dans la coma externe : dégradation/volatilisation

Données de spectrométrie de masse (2)

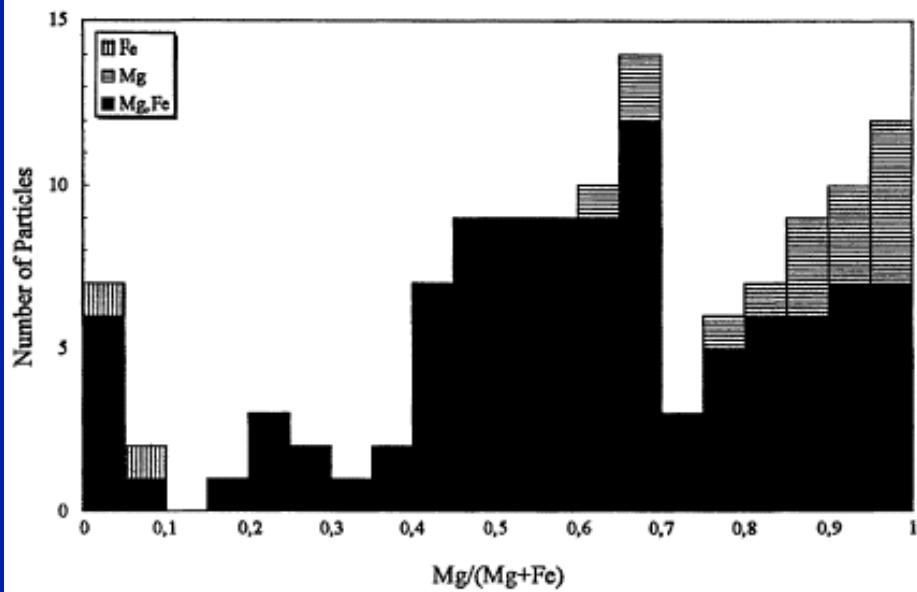
□ Minéralogie des grains

- existence de grains de carbone presque purs (8-10% du C total)
carbone amorphe plutôt que graphite
- CHON : hydrocarbures, PAHS ?
- réfractaires : distribution Mg/(Fe+Mg) large, 40% riches en Mg
Mg/Si ~1, pyroxènes plutôt que olivine (Mg/Si=2)
grains riches en Fe: sulfures de Fe (10%), Fe (1-2%),
FeO (<1%)

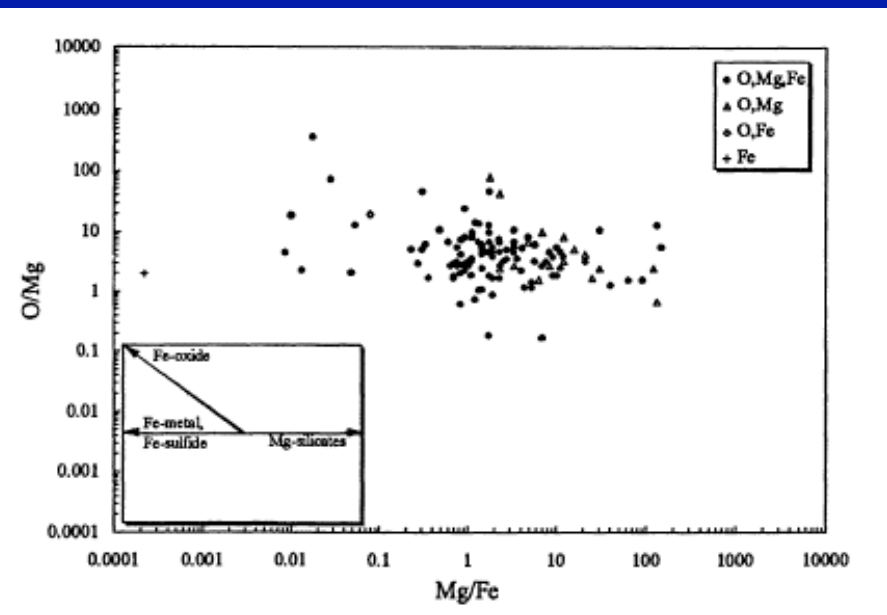
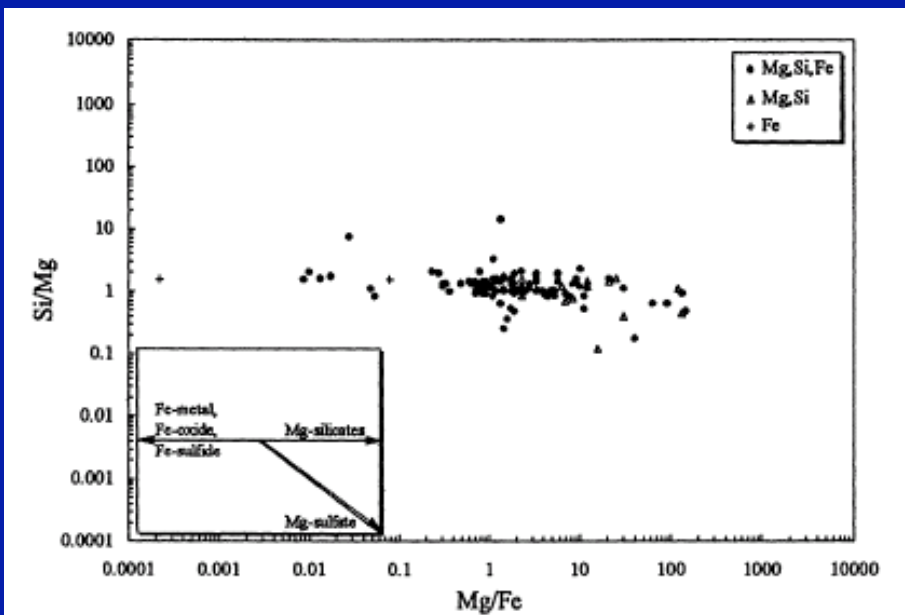
□ Composition isotopique :

Mg, Si, S, Fe : rapports terrestres (à un facteur 2)

$^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$: 89 -5000



Schulze et al. 1997



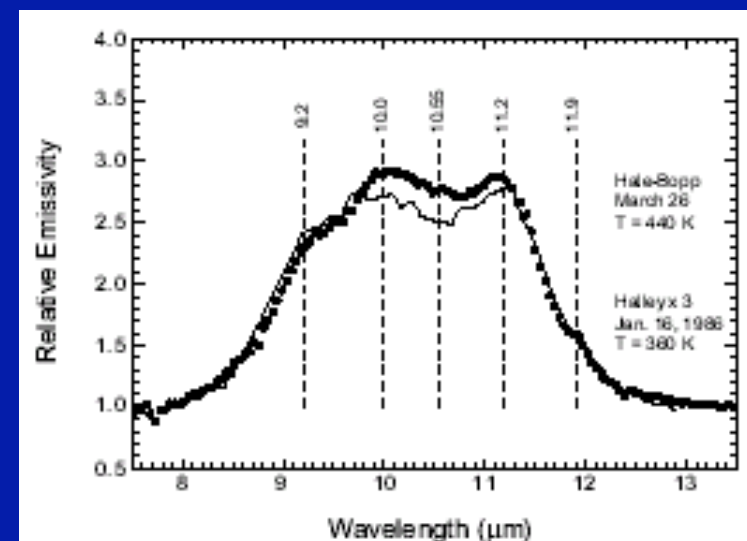
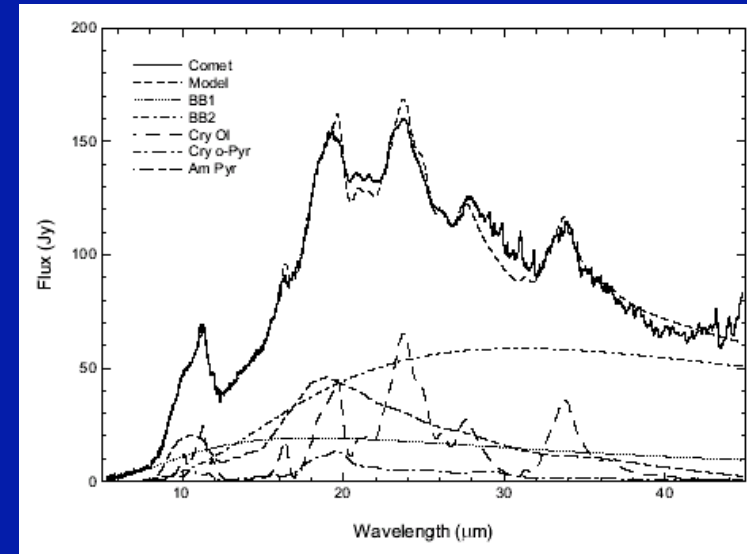
Données de spectroscopie infrarouge

☐ Signatures spectrales des silicates

- 8-12, 18-20, 23, 27, 33 microns
- olivine et pyroxène riches en Mg (forsterite Mg_2SiO_4 , enstatite $MgSiO_3$)
- silicates cristallins et amorphes
- rapport oli./pyr : 0.3 à 1.5 (selon auteur)
- pourcentage cristallins: 8 à 70 % selon auteur

☐ Emission large IR lointain, température

- Émission large : $T(\text{couleur}) > T(\text{corps noir})$
petits grains carbonés chauds
- bien expliquée par carbone amorphe (kérogène très peu absorbant)
- proportion carbone/silicates $\sim 25\%$



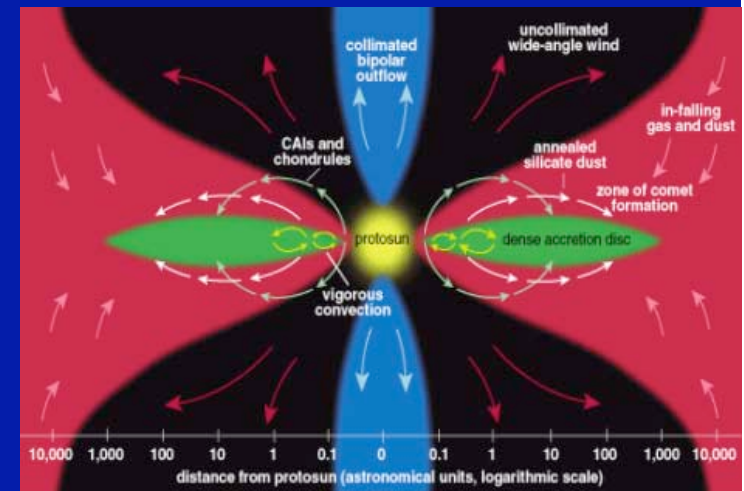
Origine des silicates cristallins

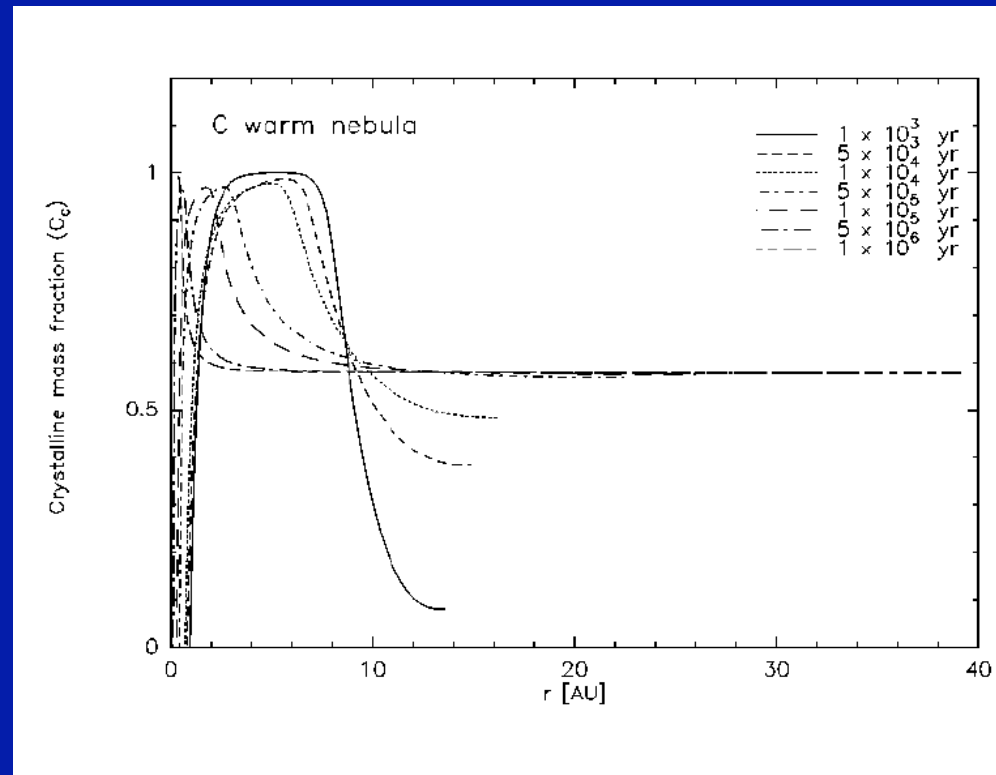
- ❑ Silicates cristallins absents dans le MIS (<1%)
- ❑ Silicates cristallins observés autour des étoiles évoluées, disques, IDP, météorites
- ❑ Origine dans la nébuleuse : condensats ou amorphes processés ($T > 1000$ K)
- ❑ Plusieurs mécanismes proposés pour interpréter leur présence dans les comètes:
 - modèle vent-X de Shu
 - cristallisation résultant d'ondes de choc (Harker and Desch 2002)
 - cristallisation dans les régions internes et transport dans les régions externes

diffusion turbulente :

Bockelée-Morvan et al. 2002

Wehrsted et Gail 2002





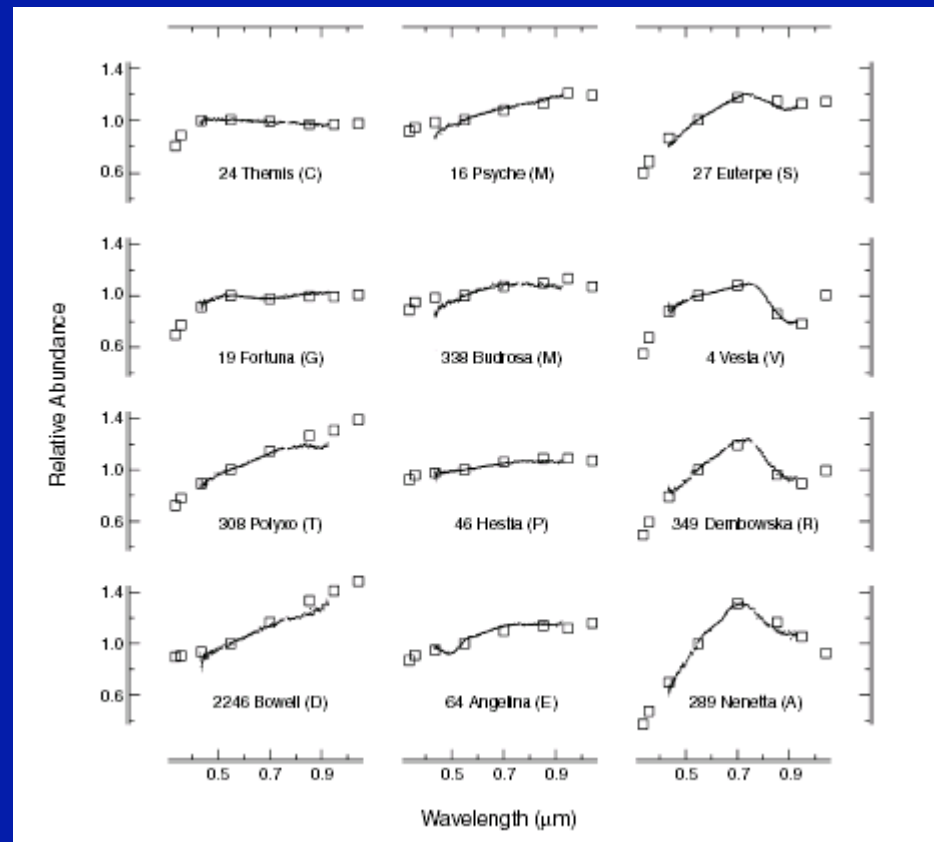
Bockelée-Morvan et al. 2002

- Modèle α évolutif avec diffusion turbulente : $\alpha = 0.008$, $\dot{M}(t=0) = 10^{-5}$ Msol/an
- Mécanisme efficace si grains couplés avec le gaz (< qqes dizaines de cm)
- Echelle de temps de diffusion $\sim 5-50 \cdot 10^3$ ans

Taxonomie des astéroïdes

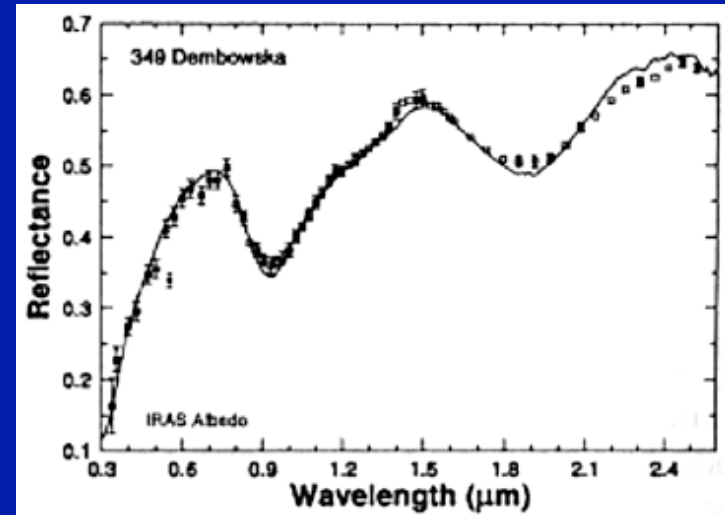
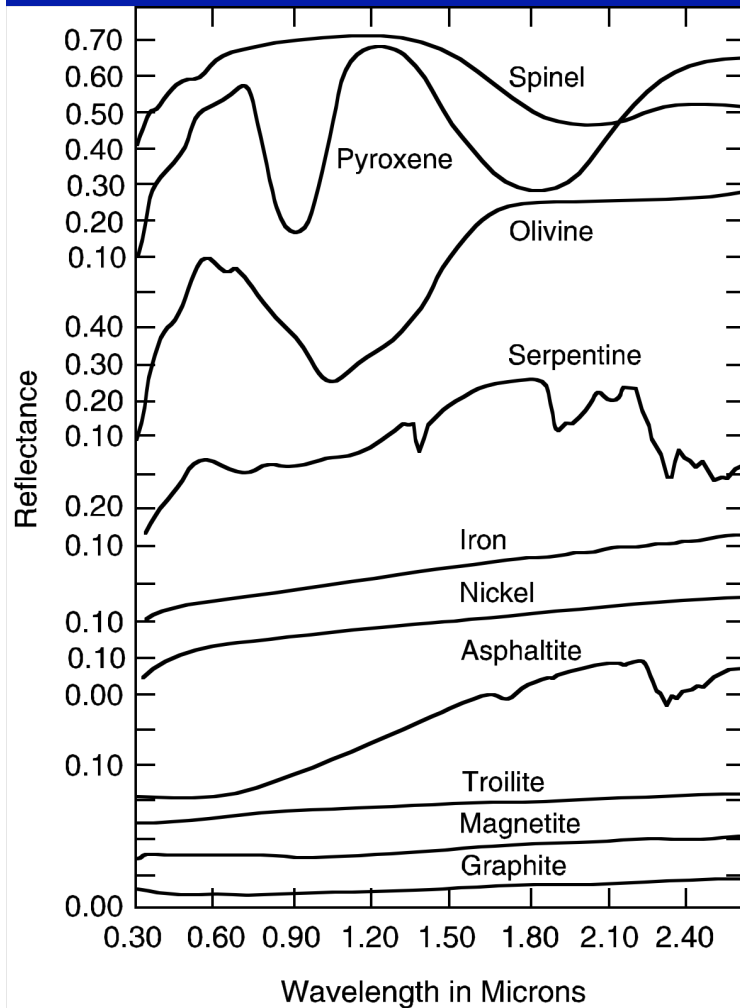
basée sur spectres en réflectance et albedo de la surface de 0.3 à 1.1 μm

Tholen (1984), Barucci & Tholen (1987), Tedesco et al. (1989), Howell et al. (1994)



Classification
de Tholen
(14 classes)

Signatures de minéraux



3 classes de signatures spectrales de minéraux:

-opaques (magnétite, graphite, carbone)

Assombrit le spectre entier, mais très peu de bandes

-métal pur (kamacite)

Augmentation régulière de la réflectivité avec la longueur d'onde

-minéraux silicatés (olivine, pyroxène,...)

Des bandes spectrales fortes et caractéristiques

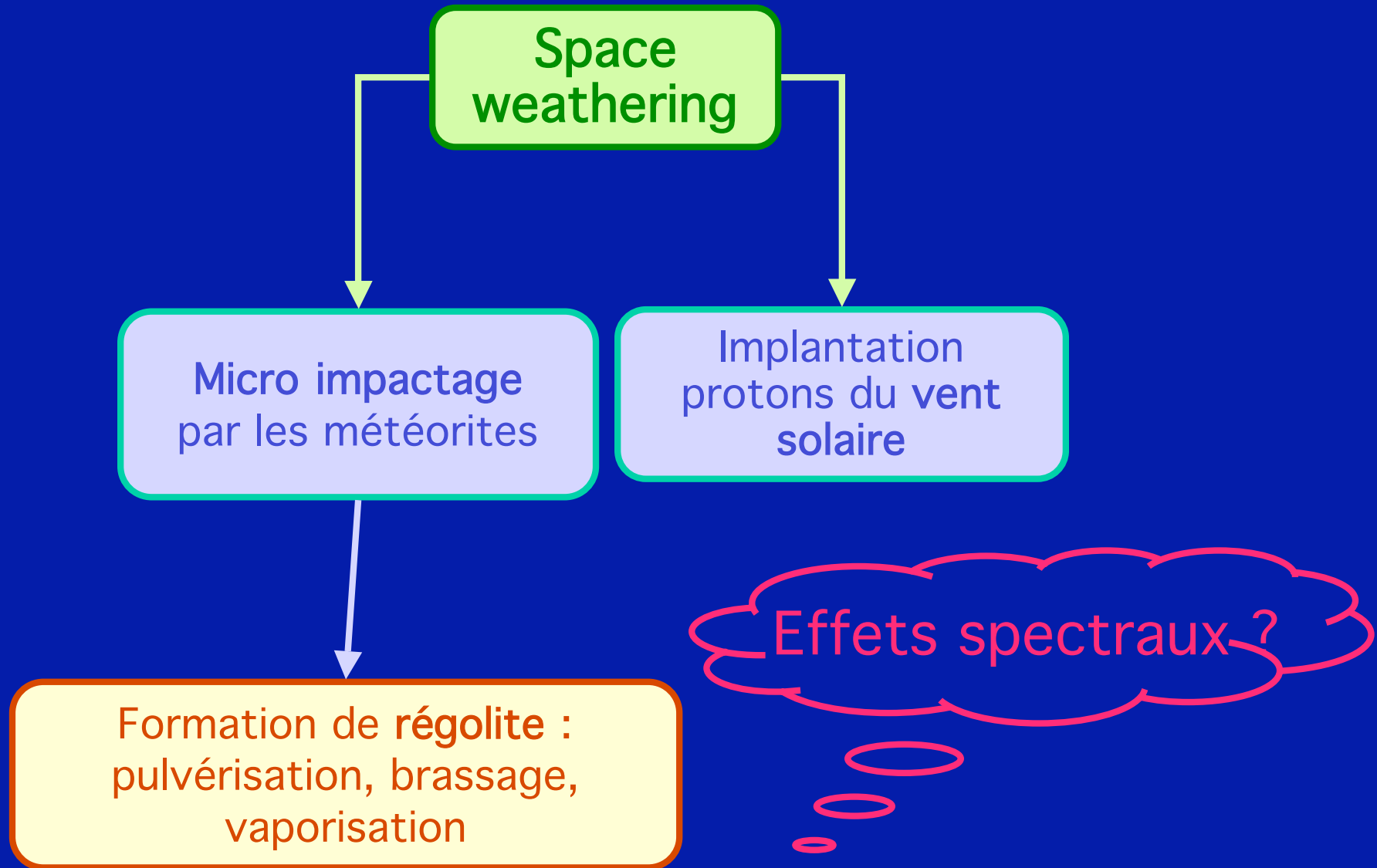
Les limites de la taxonomie

- Pas obligatoirement diagnostique de la minéralogie
- Une même classe : minéralogies différentes
- Tous les minéraux n'ont pas de signatures spectrales
ex : matériaux opaques (organiques, magnétite ...)
- Mélange matériaux opaques/silicates : signatures supprimées
- Signatures spectrales : ambiguïtés

Space weathering :

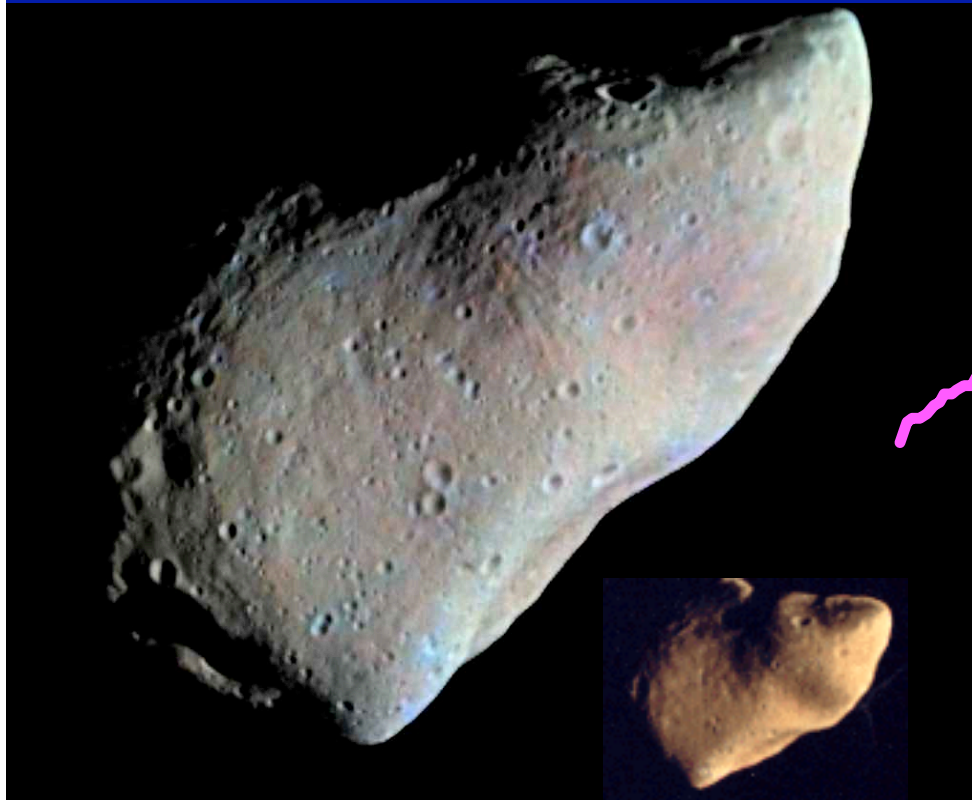
diminue l'albedo, les signatures spectrales, rougit les spectres

Le « space weathering »



Effets du « space weathering »

Temps



Gaspra par galileo

maximum
pente
profondeur

pente

profondeur de bande

albédo



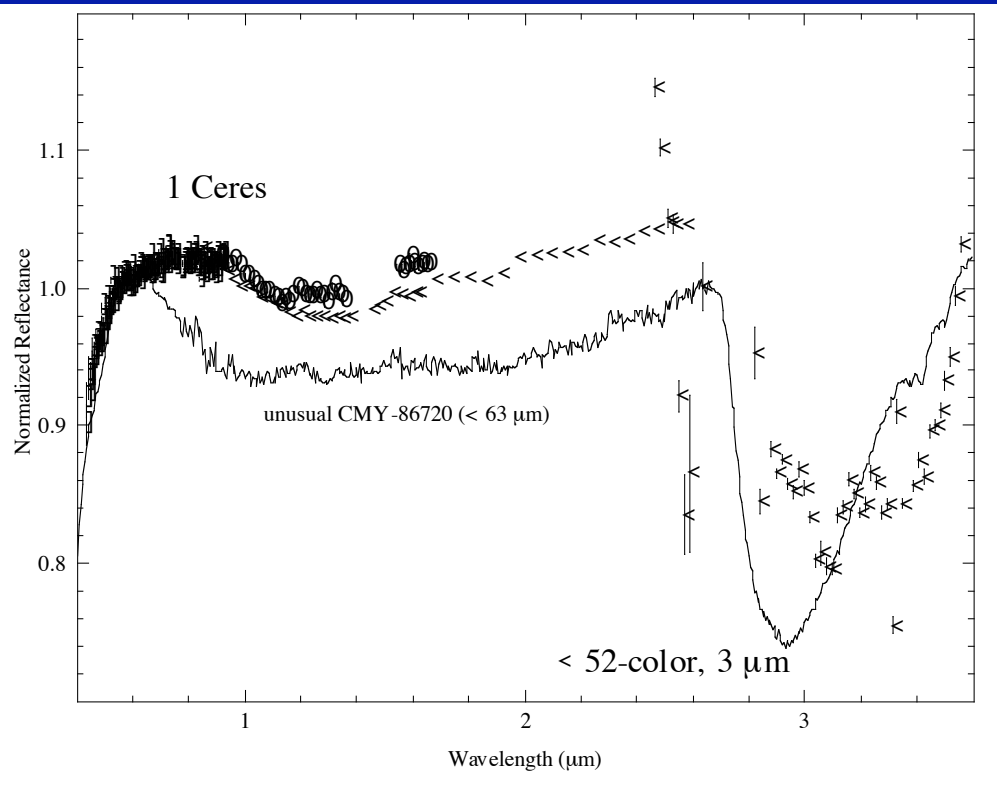
Astéroïdes : principales signatures spectrales

0.506 μm	Augite (pyr. riche en Ca)	V
0.6/0.67 μm	Fe-Ni oxydé	S
0,65 μm	Olivine riche en Fe	A
0.7 μm	Fe ²⁺ \rightarrow Fe ³⁺ phyllosilicates	C
0.9 μm	Olivine et pyroxène	S, V, A, R
1.9 μm	Pyroxène	S, R
3.0/3.1 μm	OH, H ₂ O (ou FeS)	C, M
10 μm	silicates	V

Principales classes

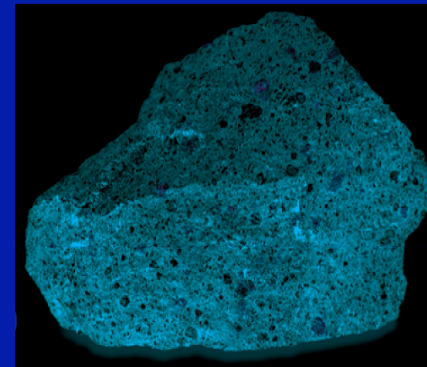
- type C (40 %) : sombres (albedo ~ 0.04), peu de signatures spectrales sinon celles des silicates hydratés spectres similaires aux chondrites carbonées CI, CM
- type S (30%) : albedo ~ 0.15 , bandes d'absorption des pyroxènes et olivines, analogue aux chondrites ordinaires ? (implique space weathering)
- type D et P (5-10%) : sombres, rouges, pas de signatures spectrales primitifs, pas d'analogues météoritiques
- type M : albedo ~ 0.15 , pas de signatures des silicates
contreverse: analogues aux météorites ferreuses ou chondrites à enstatite ?

La classe C



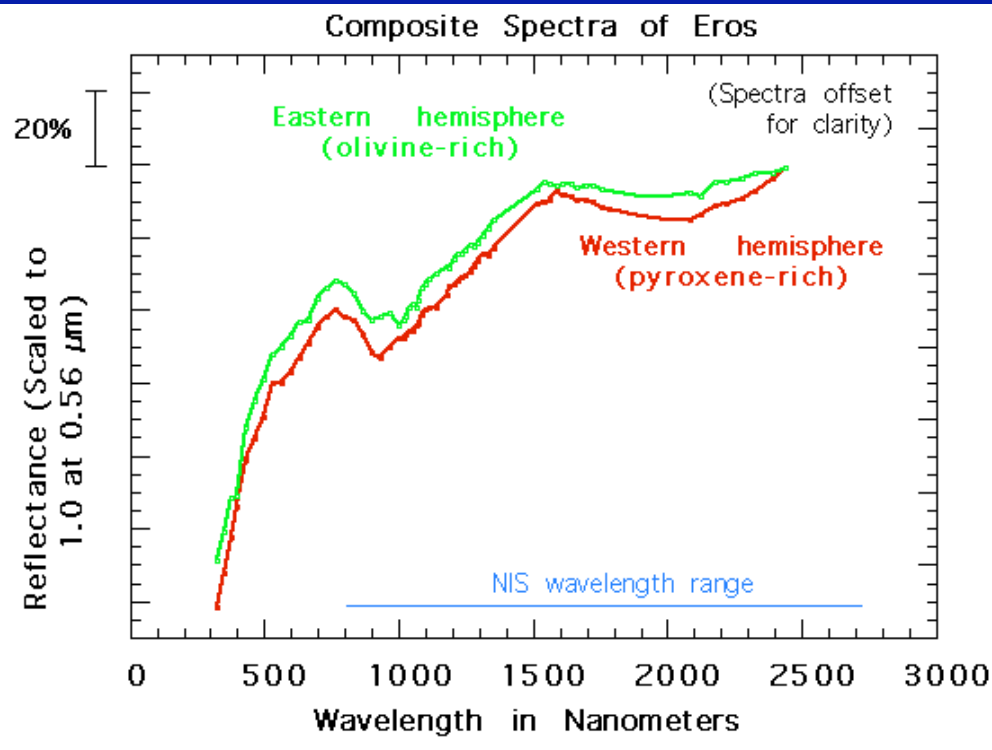
- Astéroïdes carbonés
- Similaires aux météorites CI et CM
- Albédo= **0,03 - 0,07**
- Absorption UV avant $0,4\mu\text{m}$
- Spectre plat, légèrement rouge après $0.4\mu\text{m}$
- Sous-classes: B, F, G

Murchison
(Australia,
1969)



Silicates hydratés, carbone, organiques

La classe S

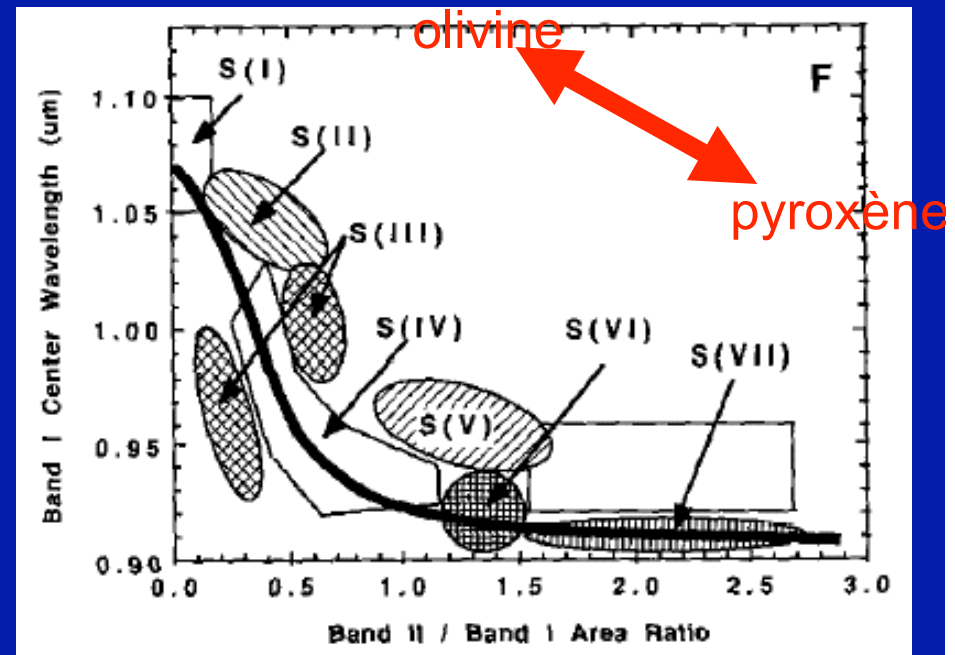


- Astéroïdes pierreux
- Similaires aux pallasites
- Albédo= 0,1 - 0,22
- Forte absorption UV avant $0,7\mu\text{m}$ (oxyde de fer)
- bandes d'absorption autour de 1 et $2\mu\text{m}$

Olivine, pyroxène, métaux

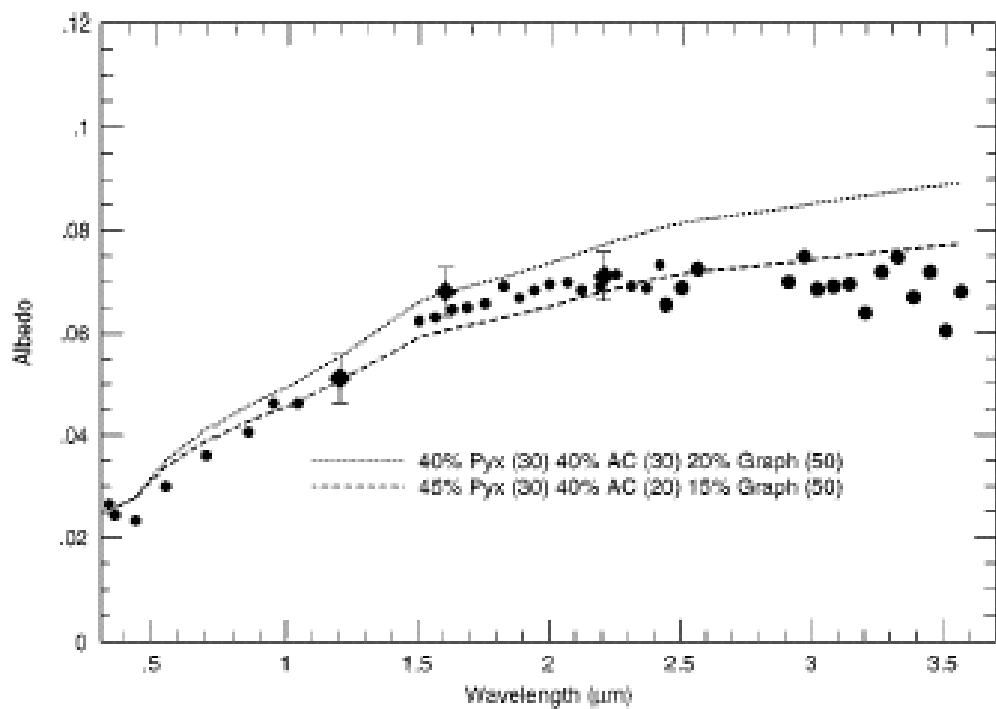
Le complexe S

- Les sous-type sont des mixtures d'olivine et de pyroxène
- Chacun représente une histoire minéralogique et géologique propre
- Seule la classe S(IV) ressemble spectralement aux chondrites ordinaires



- Olivine: $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$
- Pyroxène: $(\text{Mg,Fe,Ca})\text{SiO}_3$

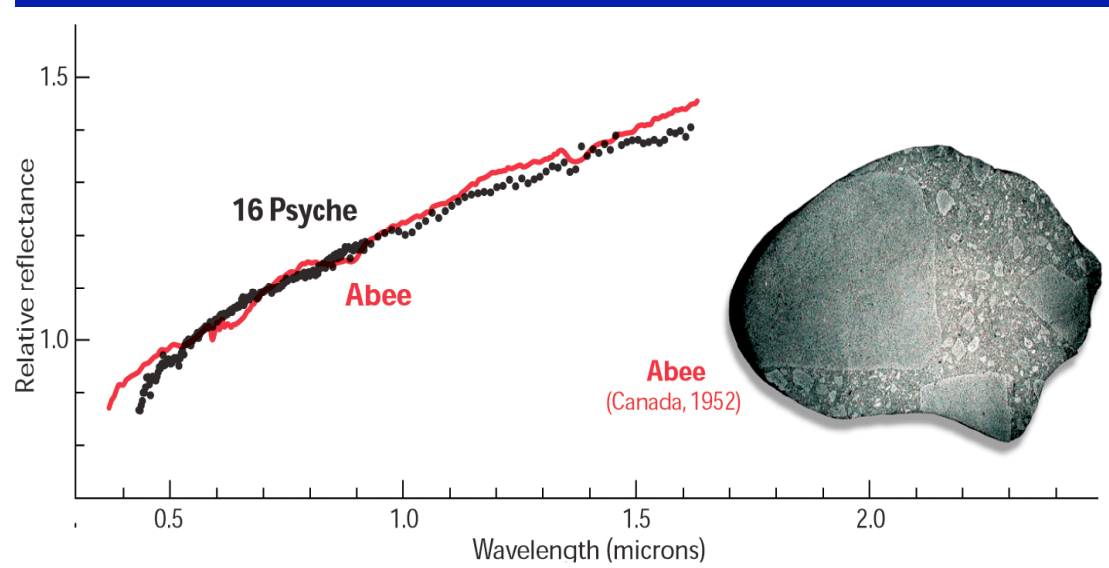
Les classes D et P



- Astéroïdes riches en organiques
- Pas d'analogue météorite
- Albédo= 0,02 - 0,05
- Sans absorptions
- Spectre rouge

Carbone, organiques + silicates anhydres

La classe M



- Astéroïdes Métallo pierreux
- Similaires aux météorites de fer ou aux chondrites à enstatite
- **Albédo= 0,1 - 0,18**
- Sans absorptions
- Spectre plat à rouge

Métal ou métal+enstatite

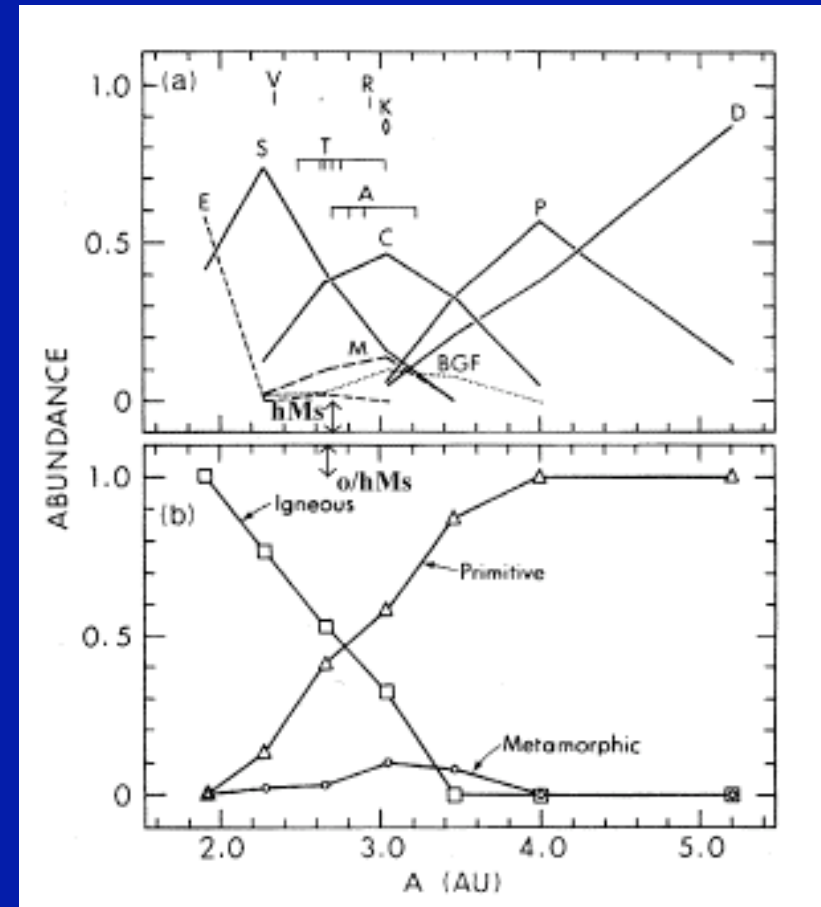
Distribution dans le Système Solaire

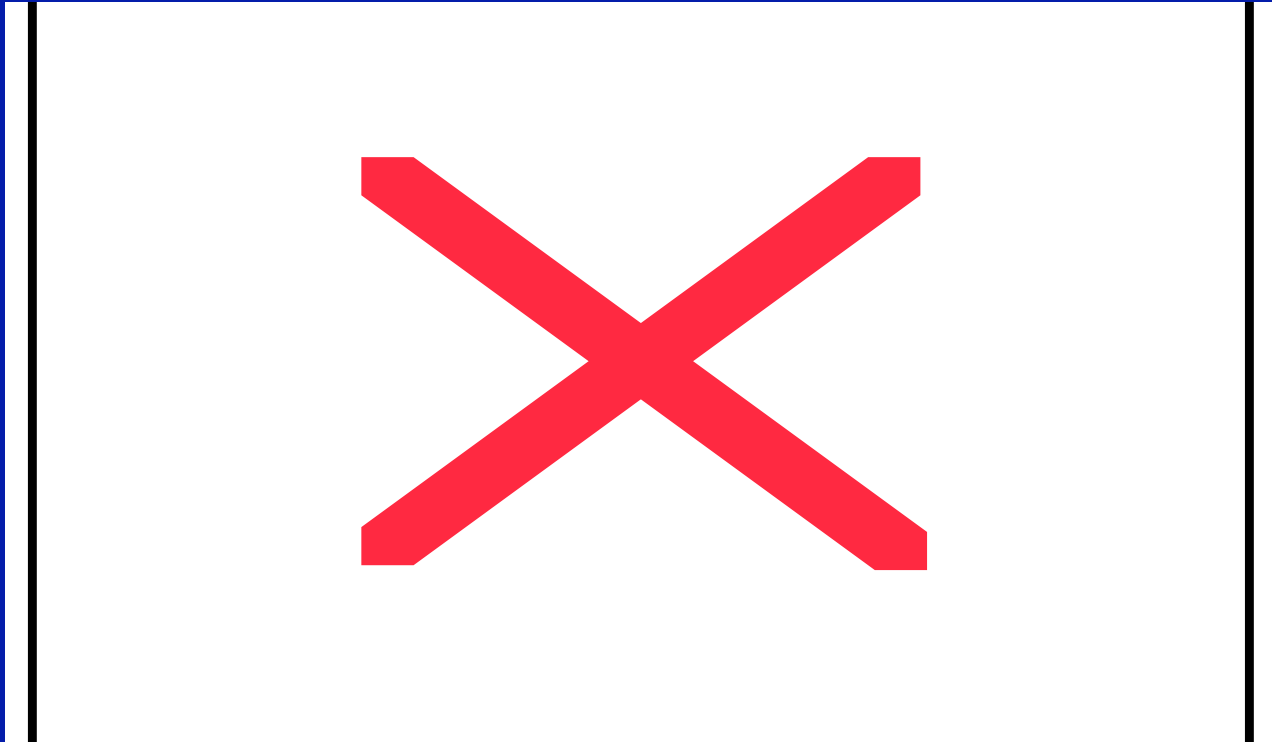
- Gradient de composition dans la nébuleuse primitive ?
- Différenciation plus importante dans les régions internes
- Source: Eléments radioactifs à courte période ^{26}Al , ^{60}Fe ?

Chauffage par induction électromagnétique durant phase T-Tauri ?

Gradient de composition : source de chauffage plus intense dans les régions internes

- Astéroïdes internes: évolués
- Astéroïdes externes : globalement primitifs : altération aqueuse (phyllosilicates) pour type C (signatures $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ ($0,7 \mu\text{m}$) et $\text{OH}/\text{H}_2\text{O}$ ($3 \mu\text{m}$))





Métamorphisme à degrés divers :

différenciation magmatique

perte des volatiles

graphitisation des organiques

circulation hydrothermale

hydratation des silicates

Perspectives

Comètes :

Stardust, Rosetta

nouvelles instrumentations

(par exemple ALMA)

Astéroïdes :

Rosetta

Retour d'échantillon (Cosmic Vision ?)

