Stardust : mission vers une comète

Janet BORG

Institut d'Astrophysique Spatiale (Orsay)

et

Université Denis Diderot - Paris 7

fond d'écran : poussière de comète dans de l'aérogel

Les comètes

« Astres visibles dans le ciel, plusieurs soirs de suite, caractérisés alors par la présence d'une queue brillante. »

Leur caractère aléatoire en fait des objets de terreur ou de présage heureux.

La Tapisserie de la reine Mathilde ou "Tapisserie de Bayeux"

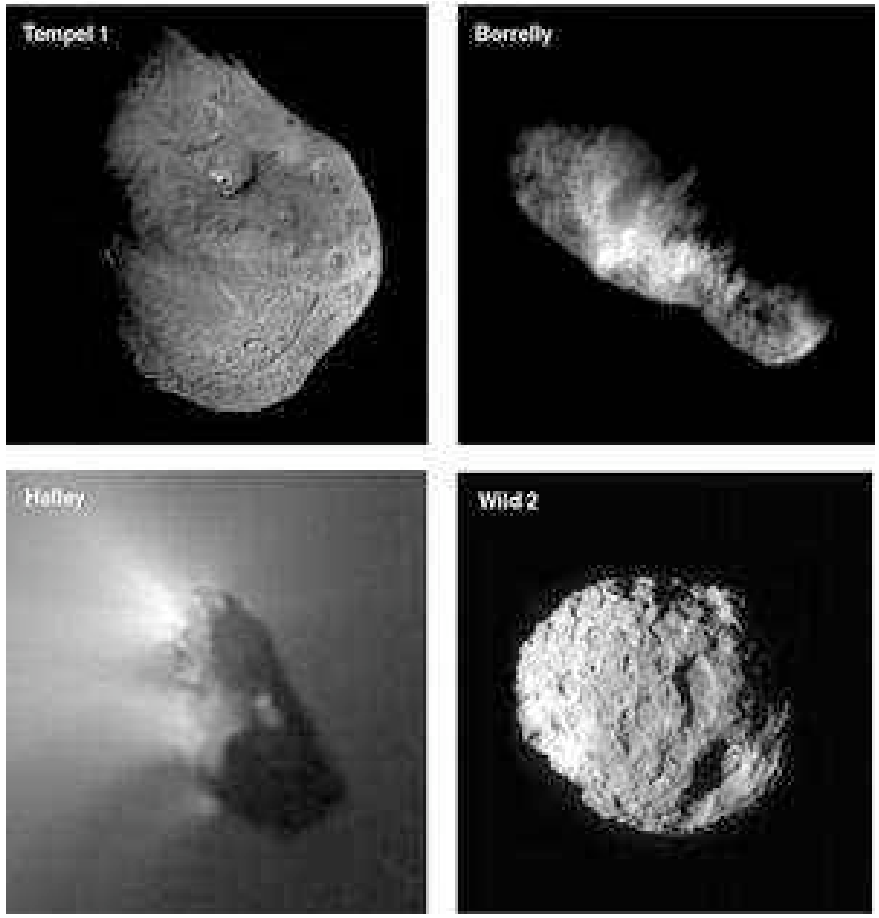
Ainsi la comète de Halley, apparue dans le ciel en 1066, est interprétée alors comme le présage de la victoire de Guillaume le Conquérant sur le roi Harold.

Elles sont aussi source d'inspiration pour de nombreux artistes.

Joan Miro, « La comète », tableau, 1929

Wassily Kandinsky, « Comètes », lithographie, 1938

Ou ... un peu plus scientifiquement



Loin du Soleil: un noyau solide plutôt sombre "une boule de neige sale"

Sublimation des glaces en approchant du Soleil (périhélie)

Les comètes sont des vestiges de la formation du Système Solaire.

Leur étude nous permet de mieux comprendre ce qui s'est passé, il y a 4,6 milliards d'années.

(noyau de la comète de Halley, Giotto, 1986)

Plan

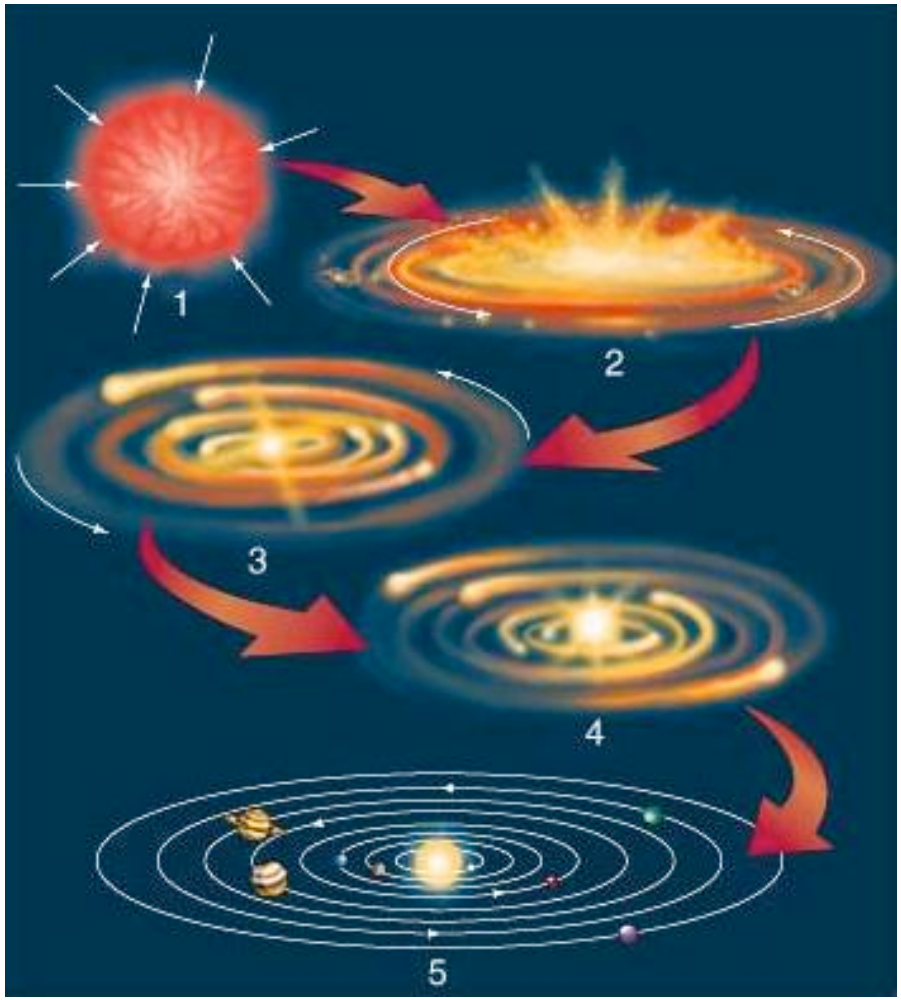
I - Les comètes
Ce que l'on sait, avant Stardust

II - La mission Stardust
Survol d'une comète et retour sur Terre d'échantillons cométaires

III - Les apports de Stardust

La formation du Système Solaire

Il y a 4,6 milliards d'années, en environ 200 millions d'années:



effondrement gravitationnel d'un nuage moléculaire (1)

formation d'un disque protoplanétaire (2)

accrétion : poussières, planétisimaux, et enfin formation de planètes (3,4,5)

« laissés pour compte » : astéroïdes et comètes

Les comètes sont des agrégats de poussière non incorporée aux planètes lors de leur formation

Les réservoirs de comètes

-**<u>La ceinture de Kuiper</u>:**

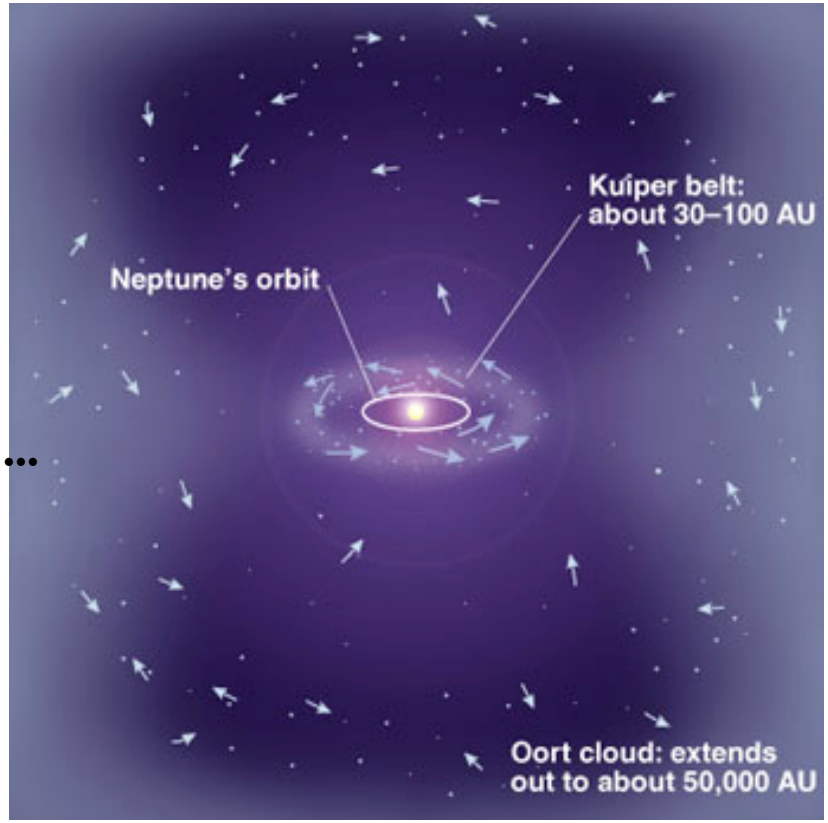
-**Située au-delà de Neptune de 30 à 100 UA.**

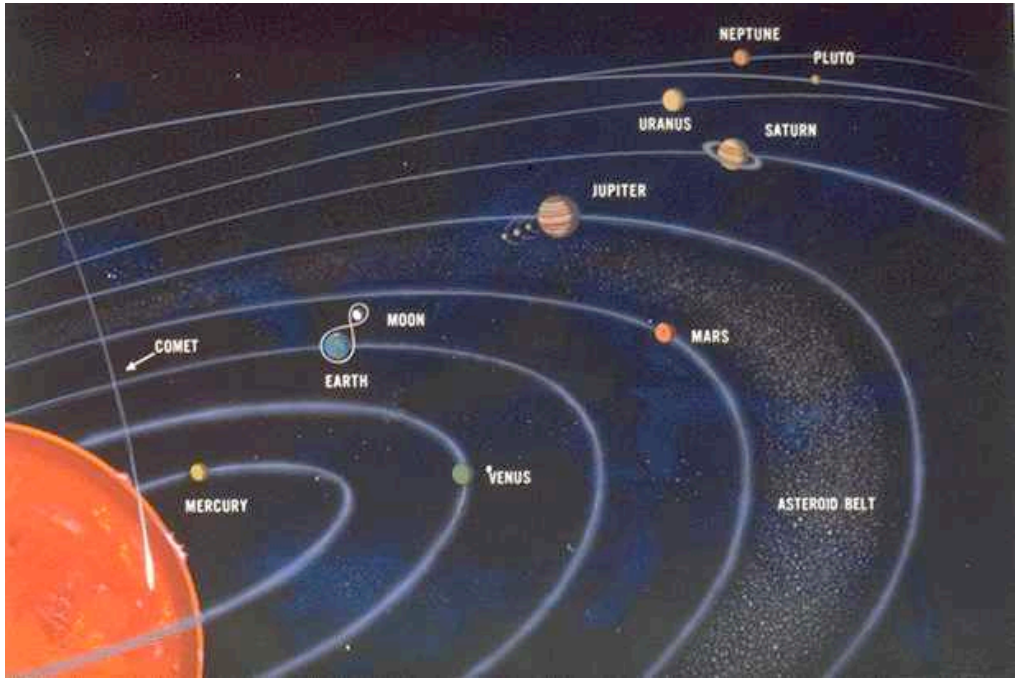
-**Comètes à courtes périodes.**

-**Formées dans le SS externe - orbites relativement stables.**

- **Trajectoires dans le plan de l'écliptique.**

- **Tempel-1, Wild-2, Churyomov-Gerasimenko, ...**





-**<u>Le nuage d'Oort:</u>**

- **Situé au-delà de ~ 50000 UA.**

-**Comètes de périodes longues.**

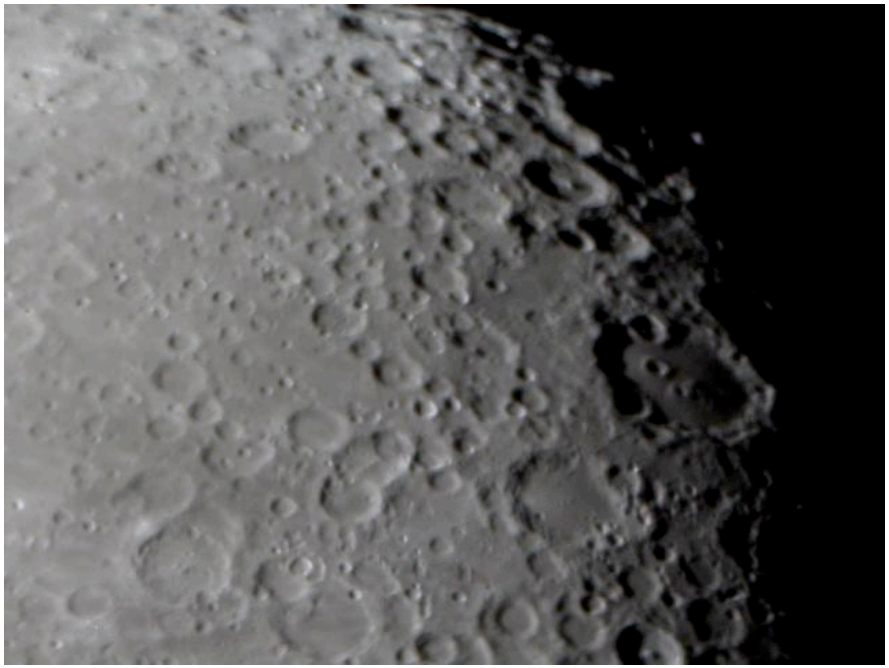
-**Formées dans le SS interne**

-**Trajectoires hors écliptique**

- **Halley, Hale Bopp, ...**

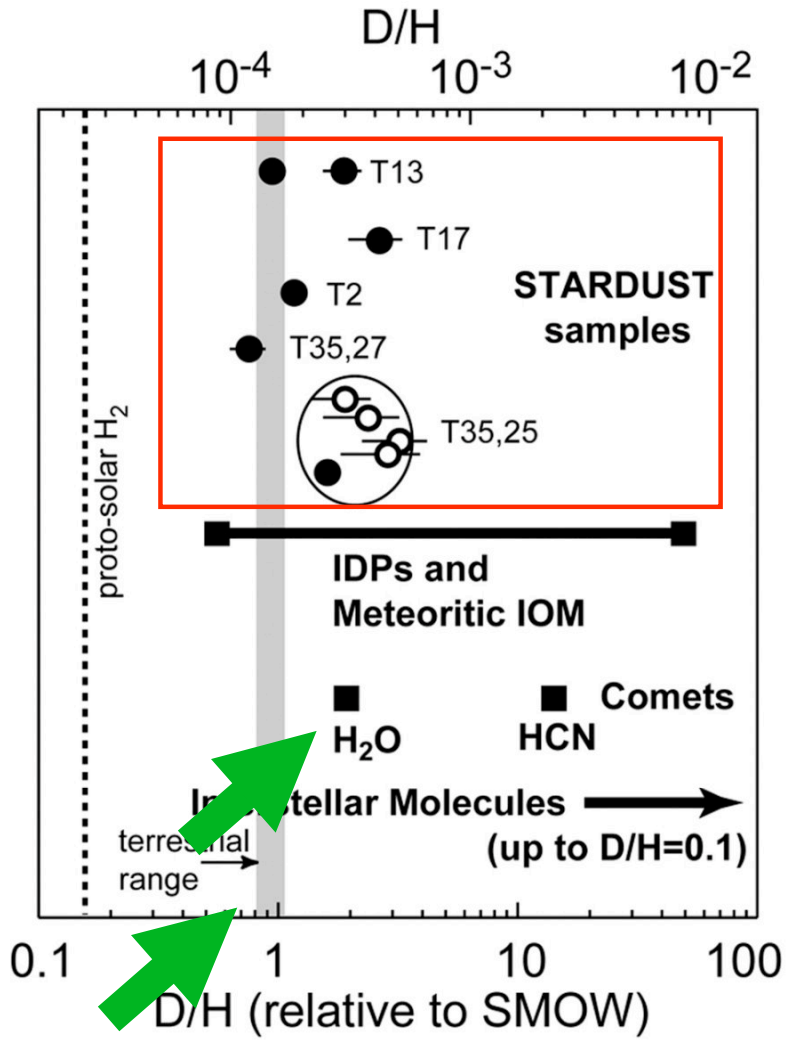
Quelques questions

1) Les comètes sont-elles à l'origine de l'eau des Océans ?



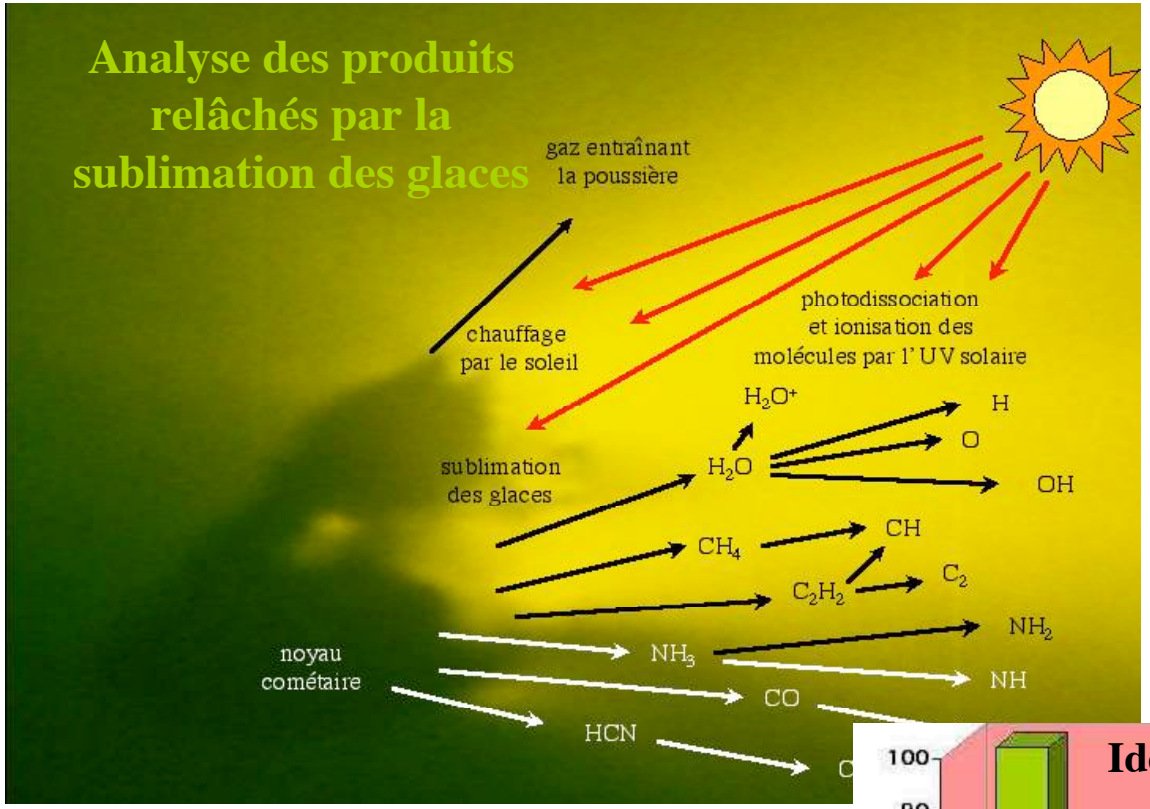
La présence de cratères d'impact sur la Lune ou d'autres corps planétaires est la preuve de leur bombardement continuel par astéroïdes et comètes.

Un test puissant : mesure de D/H



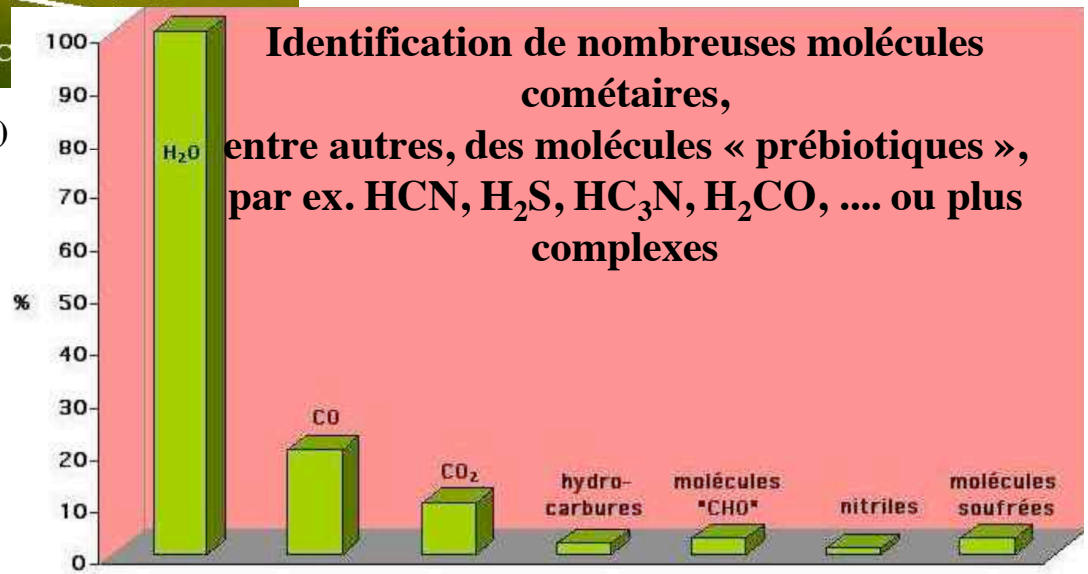
La glace des comètes aurait pu apporter une partie de l'eau des Océans.

2) Les comètes ont-elles apporté la vie sur Terre ?



(Schémas tirés de « les comètes pour les nuls » - J. Crovisier)

Briques à partir desquelles la vie aura pu se construire ...



Identification de nombreuses molécules cométaires, entre autres, des molécules « prébiotiques », par ex. HCN, H_2S, HC_3N, H_2CO, ... ou plus complexes

3) Formation et évolution du Système Solaire ?

Les réservoirs de comètes sont comme des congélateurs, permettant de conserver intactes leurs propriétés d'origine

Ces corps ont probablement retenu sous une forme quasi intacte la matière présente dans la Nébuleuse Solaire primitive.

D'où l'intérêt de l'étude des comètes pour comprendre l'histoire de notre Système Solaire.

Moyens d'étude des comètes

1) Observations

L'éclatement de la comète SW-3 observé par le télescope spatial Spitzer (Avril 2006)

Lumière visible, à l'œil nu puis au télescope depuis très longtemps.

IR (ISO, Hubble, Spitzer, ...), plus récemment.

2) Survols (Giotto, Vega, Stardust, Deep Impact, Rosetta, ...)

Noyau de la comète de Halley, Giotto , 1986

Lancée par l'Agence Spatiale Européenne (ESA), la sonde Giotto est le premier engin spatial à avoir fourni les images d'un noyau cométaire.
En mars 1986, elle s'est approchée de la comète de Halley à près de 600 km de distance.

3) Collectes de grains extraterrestres (COMET, IDPs, STARDUST, ...)

Ces grains sont rapportés au laboratoire pour analyse avec les instruments « haute résolution » disponibles

Pourquoi étudier des grains cométaires ?

Meilleure connaissance de la physico-chimie au début du Système Solaire.
Comparaison avec ce que l'on connaît sur les grains du Milieu InterStellaire.

Stardust :
1er retour d'échantillons cométaires
<u>d'origine certaine</u>,
pour les analyser en laboratoire.

Plan

I - Les comètes

Ce que l'on sait avant Stardust

II - La mission Stardust

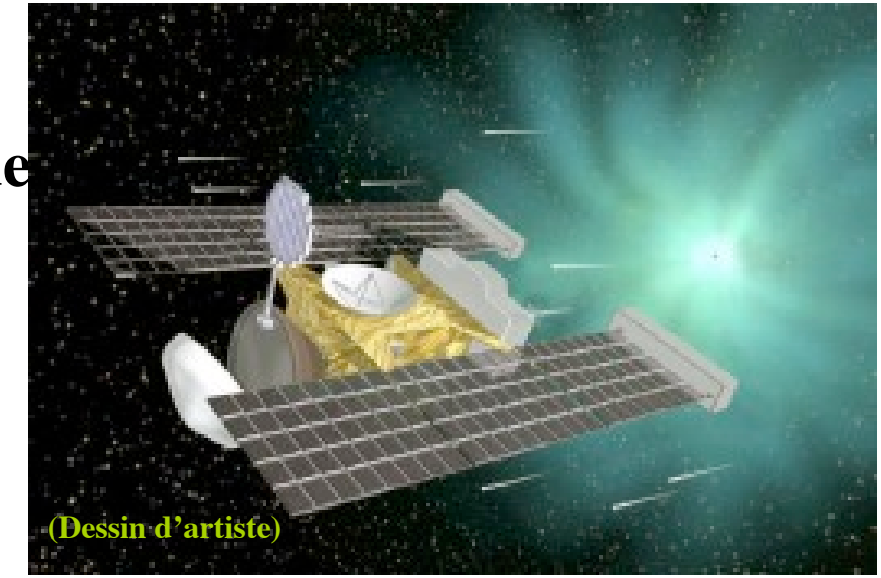
Survol d'une comète et retour sur Terre d'échantillons cométaires

III - Bilan au retour de Stardust

Stardust, mission vers une comète

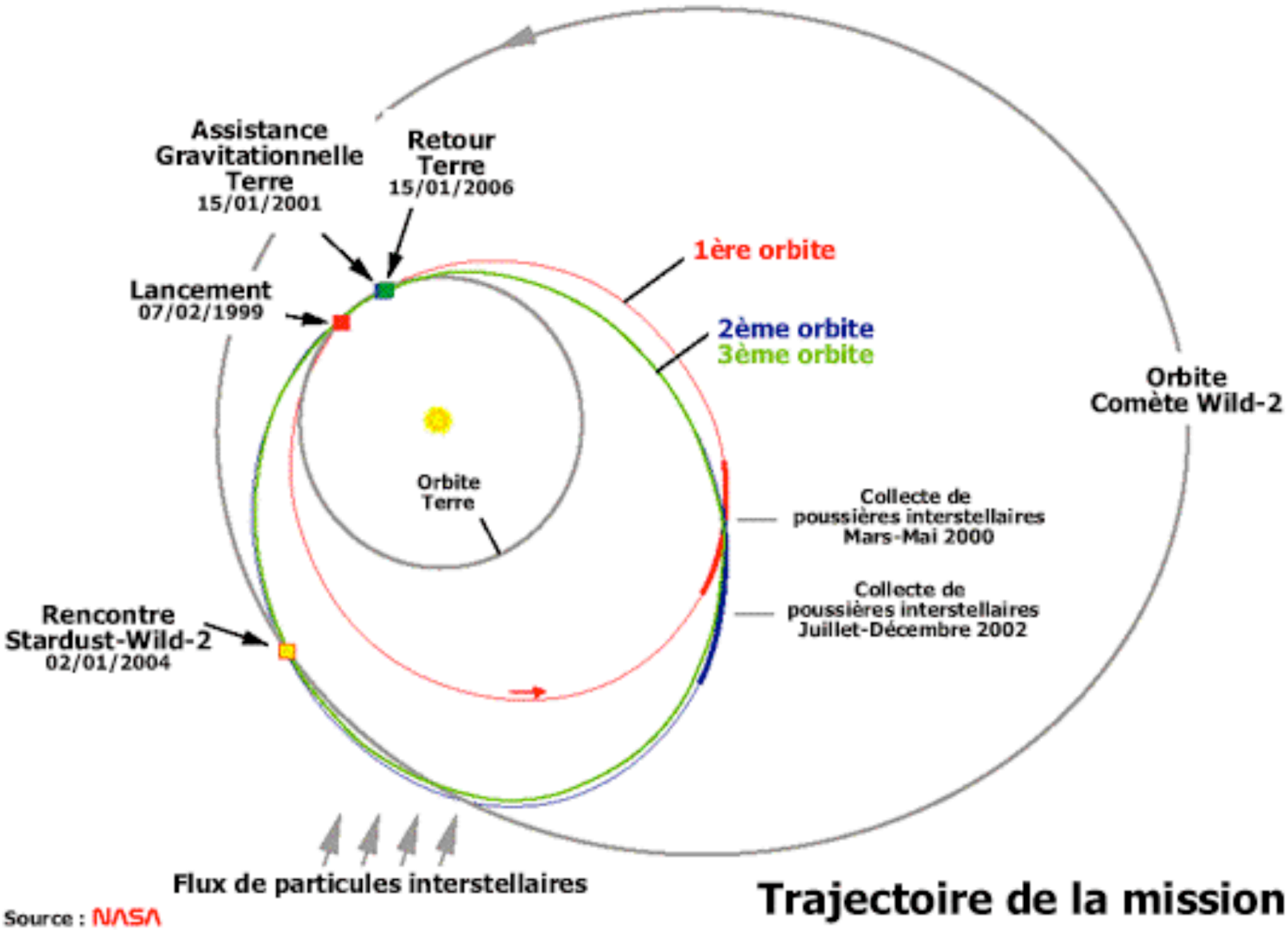
- 1ère mission NASA entièrement dédiée à l'étude d'une comète
- 1er retour d'échantillons extraterrestres, depuis les échantillons lunaires (missions Apollo, entre 1969 et 1972)

1995 : Définition du projet
7 Février1999 : Lancement de la sonde
2 Janvier 2004 : Survol de la comète Wild-2
15 Janvier 2006 : Retour sur Terre



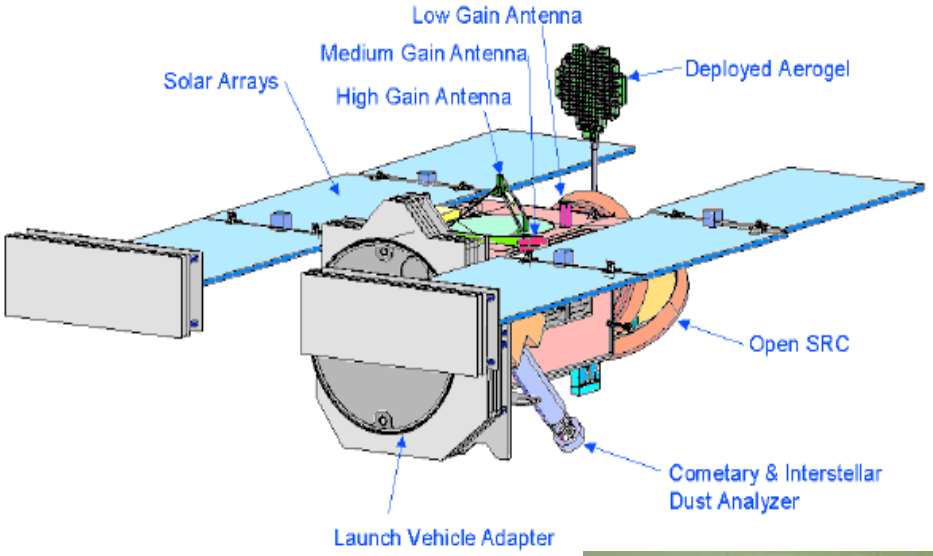
Environ 5 milliards de km parcourus
Vitesse relative au moment de la rencontre: 6,1 km/s
Vitesse d'entrée dans l'atmosphère : 12,8 km/s

Trajectoire de la mission Stardust

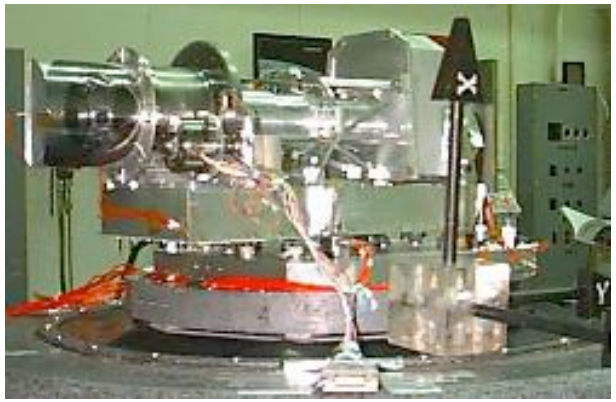


La collecte

Les instruments embarqués

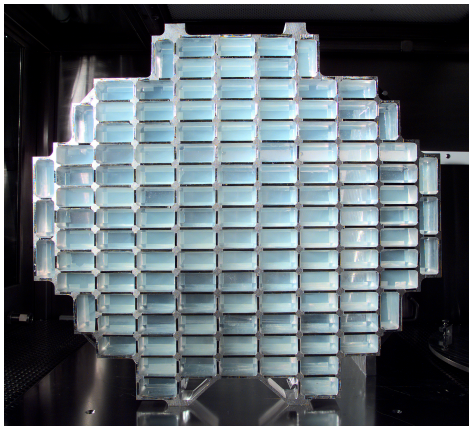


Cometary and Interstellar Dust Analyzer (CIDA)



caméra de navigation

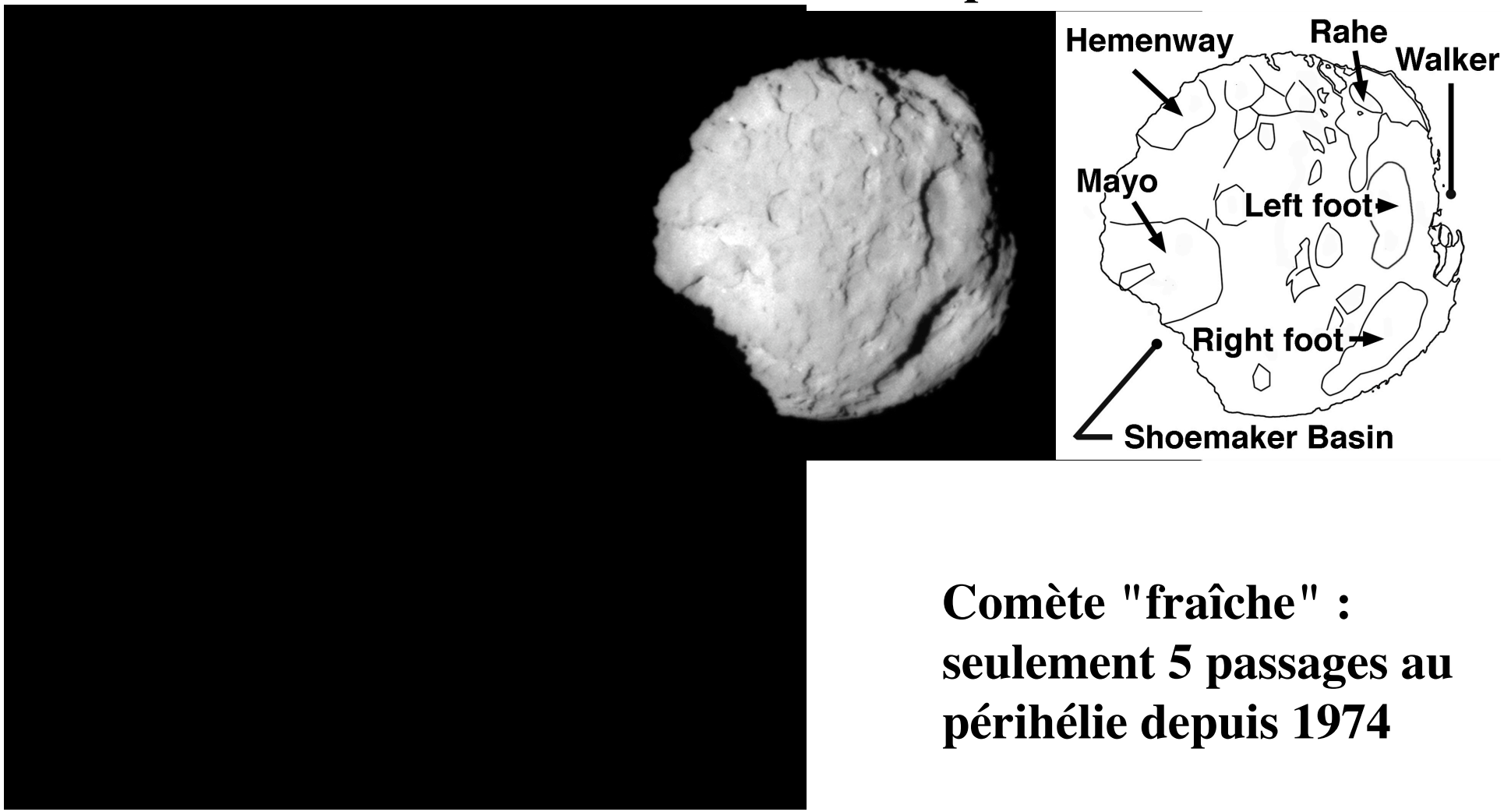
Dust Flux Monitor instrument (DFMI)



Le collecteur en aérogel

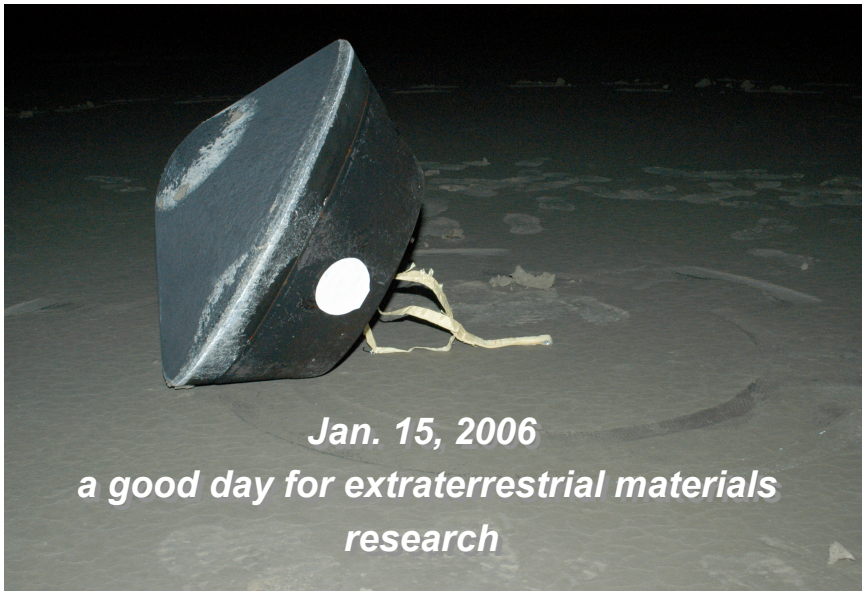
Survol de la comète Wild-2: 2 janvier 2004

comète d'environ 4.5 km de diamètre ; supposée s'être formée dans la ceinture de Kuiper



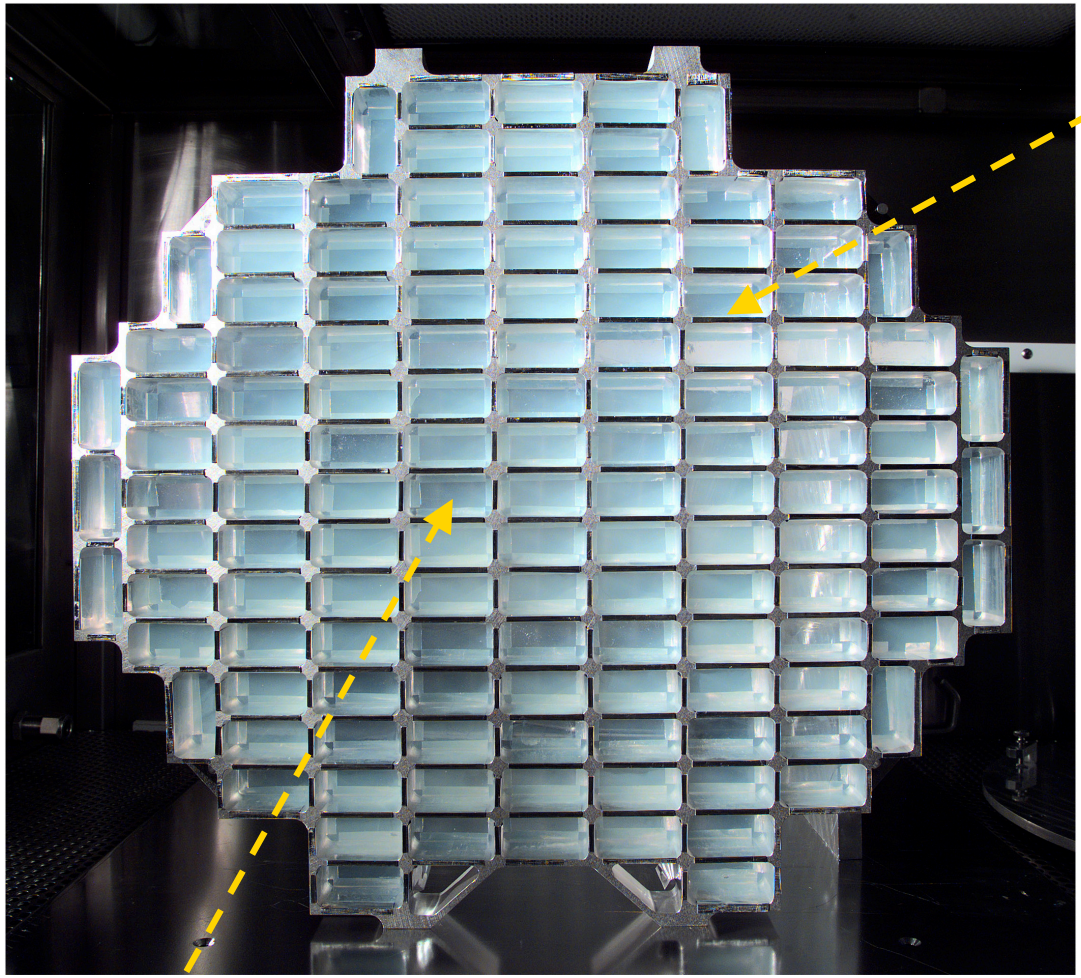
Comète "fraîche" : seulement 5 passages au périhélie depuis 1974

15 janvier 2006: le retour sur Terre.

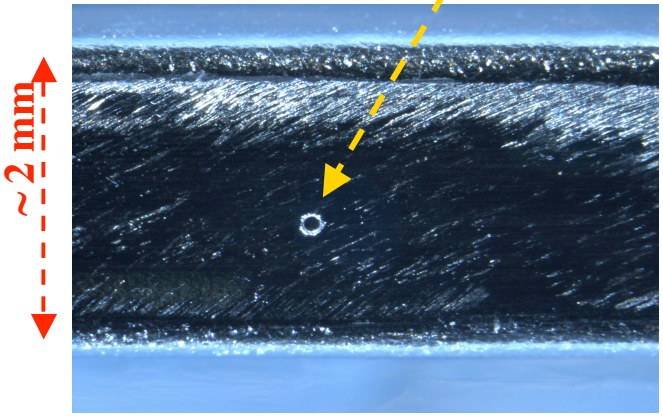


Photos Don Brownlee (responsable scientifique de Stardust)

Les collecteurs



les armatures en aluminium
dans lesquelles les grains incidents impactent en donnant naissance à des cratères



l'aérogel, matériau transparent, de très faible densité, dans lequel le grain incident est ralenti puis arrêté après un trajet plus ou moins long

132 cellules de 4*2 cm^2,
soit environ 1000 cm^2 d'aérogel
3 cm d'épaisseur, côté « grains cométaires »
1 cm d'épaisseur, côté « grains interstellaires »
gradient de densité pour faciliter le ralentissement sans dégats

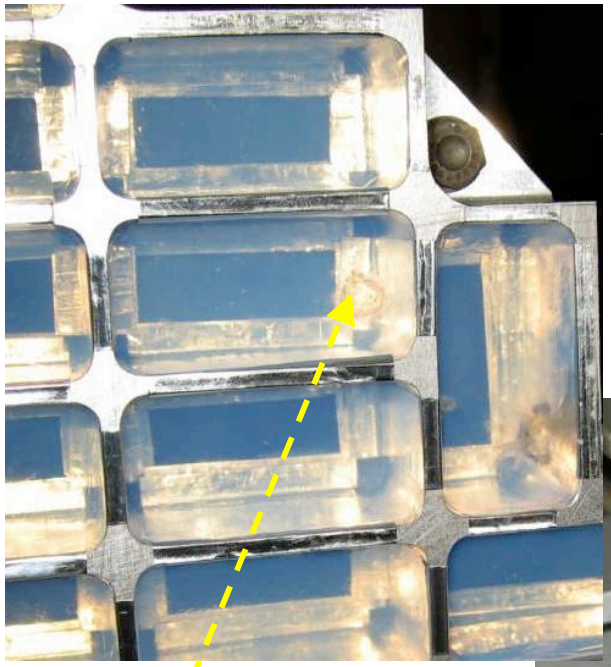
Le défi

Caractérisation de la matière cométaire à partir de l'analyse des quelques grains collectés

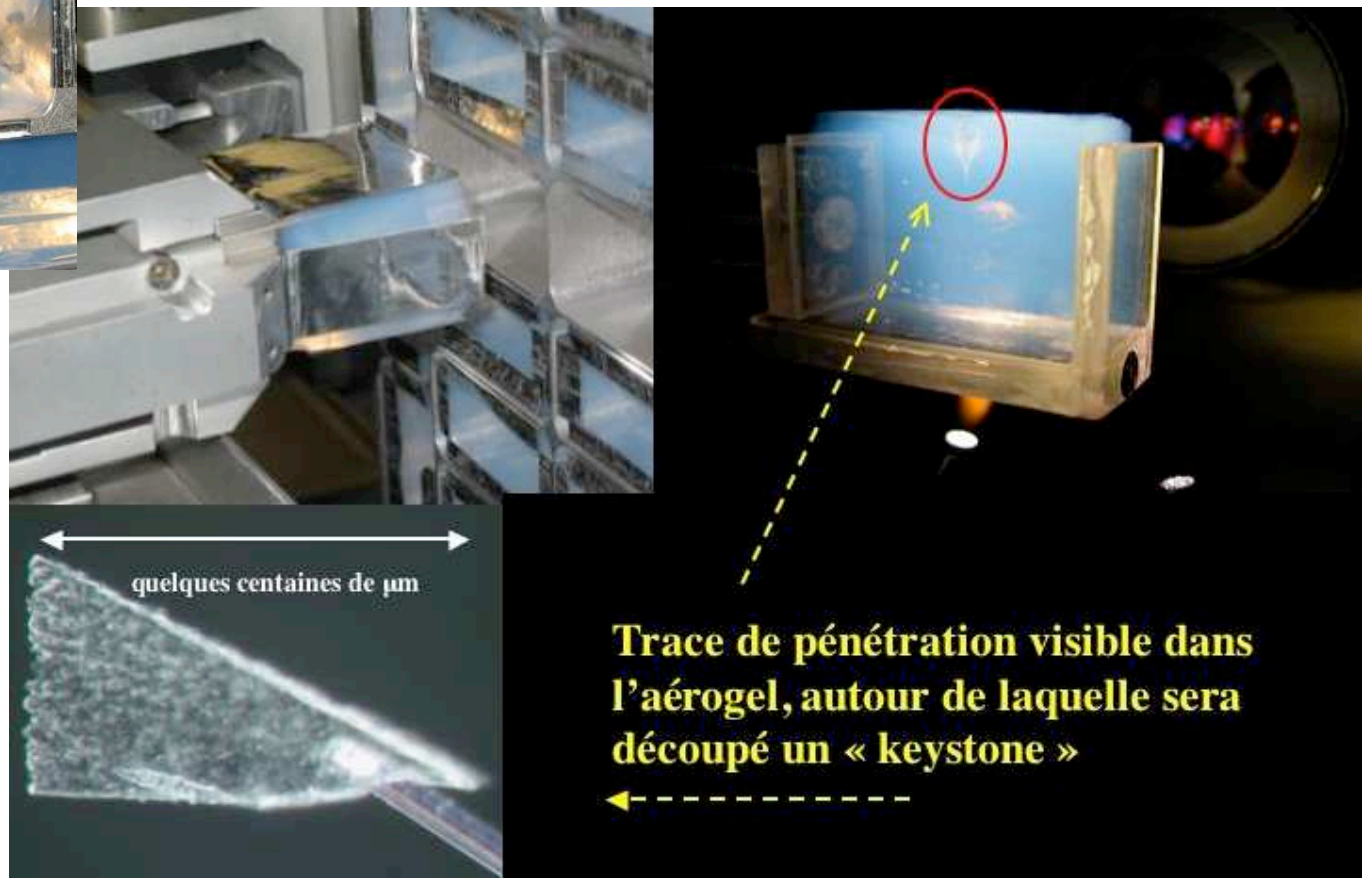
~ 10 000 grains de taille comprise entre 1 et 300 microns, soit l'équivalent d'une dizaine de microgrammes.
(une centaine analysée)

1ère étape : l'examen optique ...

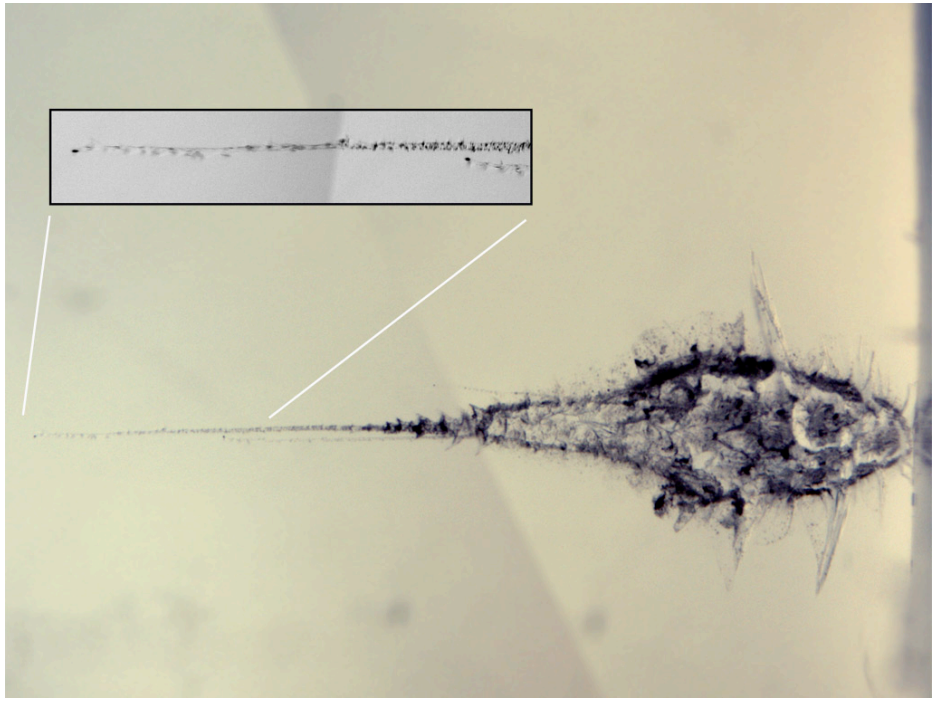
... suivi de l'extraction du bloc d'aérogel et du découpage du « keystone »



trace vue d'en haut



Traces dans l'aérogel



Capture de la poussière à 6,1 km/s

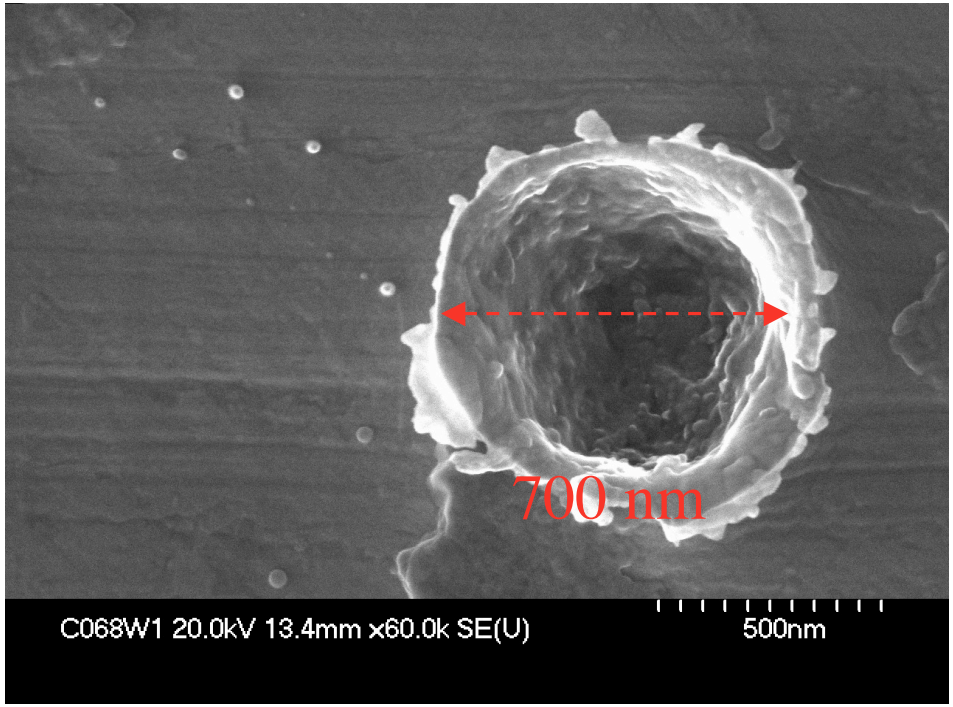
Grains présents dans toutes les traces

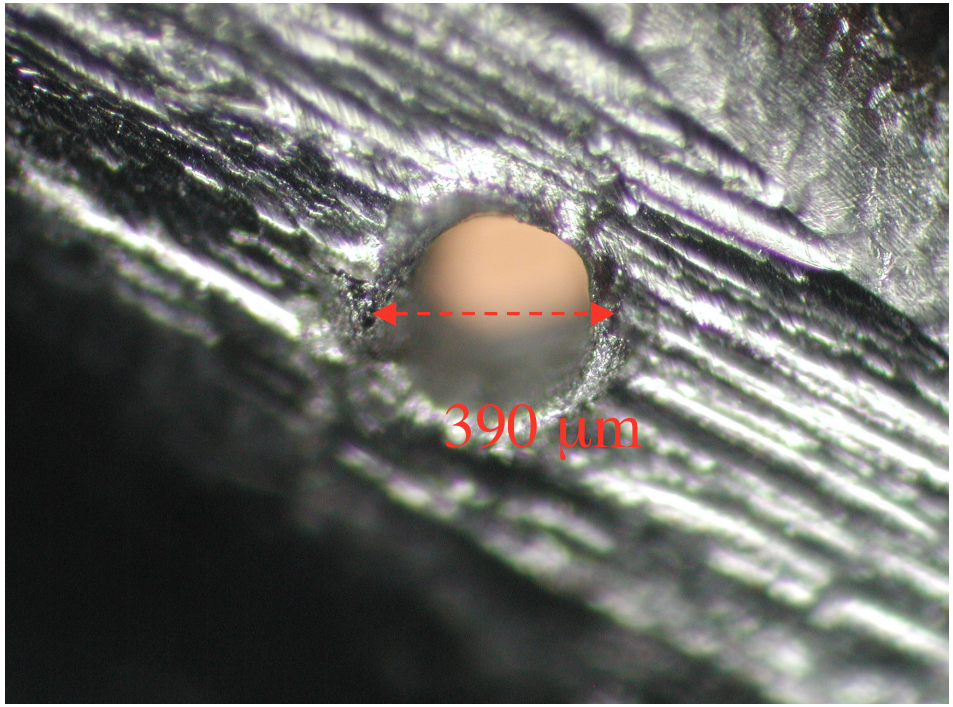
Traces plus ou moins longues, en fonction de la masse du grain incident

Possibilité d'analyser:
- grains in-situ dans le keystone
- grains extraits et déposés sur différents supports
- sections ultra-minces déposées sur des grilles de MET

Cratères dans les armatures d'aluminium

Taille du cratère directement reliée à la taille du grain incident





grain incident de moins de 200 nm

grain incident de ~ 100 µm

Décompte, répartition en taille ⇒ statistique de la collecte des poussières
Analyse chimique des résidus fondus ⇒ liens avec la chimie des poussières

Les analyses

Analyser, pour répondre à quelles questions ?

Au premier ordre

A-t-on déjà rencontré ce type de matériau?
Est-ce du matériau du SS et/ou présolaire ?
Quelle est la nature des organiques ?
Et des minéraux ?

Et plus fondamentalement

Jusqu'à quel point y a-t-il eu mélange dans la nébuleuse solaire entre du matériau provenant de l'intérieur et de l'extérieur du SS?
Quel lien entre la matière cométaire et la poussière interstellaire?
Quelle est l'origine de la matière carbonée?

Besoin de techniques analytiques complémentaires

Quels outils, pour quelles réponses ?

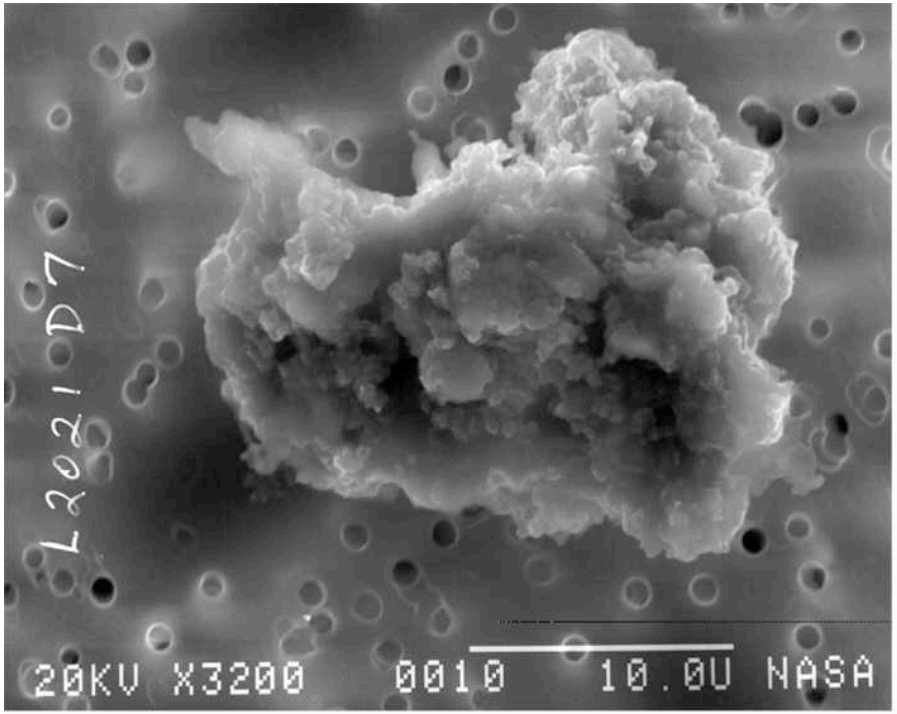
Caractérisation des poussières cométaires	**minéralogie /pétrologie** **composition élémentaire** **distribution en taille**	**MET** **SXRF, TOFSIMS ...** **étude des cibles d'Al**
Origine solaire ou présolaire **Rapport D/H**	**mesures isotopiques**	**sondes ioniques**
Nature des organiques	**spectroscopies optiques** **C-XANES**	**FTIR, Raman,** **autres ....**

Nécessité d'analyses complémentaires et donc, préparation d'échantillons permettant des chaînes d'analyse

Attention : à partir des analyses de cette comète, on n'aura pas une information globale sur LES comètes et les débuts du Système Solaire, mais UNE « brique » pour une meilleure compréhension.

Avec quels matériaux comparer ?

1) les météorites appelées <u>chondrites</u>, qui servent de référence pour la composition élémentaire solaire
2) les grains collectés : <u>IDPs</u> ou « Interplanetary Dust Particles »

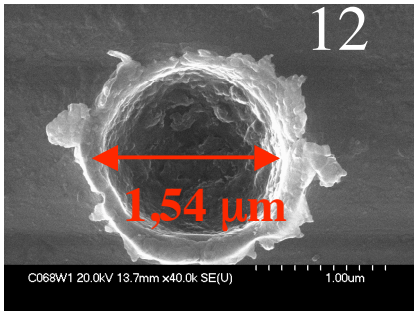


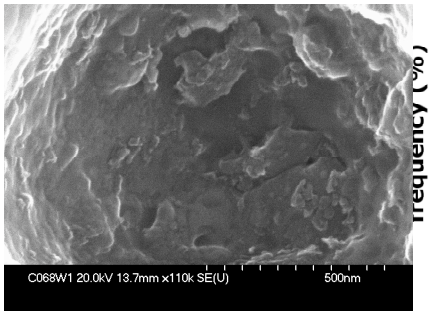
Grains extraterrestres, collectés dans la stratosphère par la NASA depuis le début des années 80 et provenant essentiellement de la ceinture d'astéroïdes et de la ceinture de Kuiper.

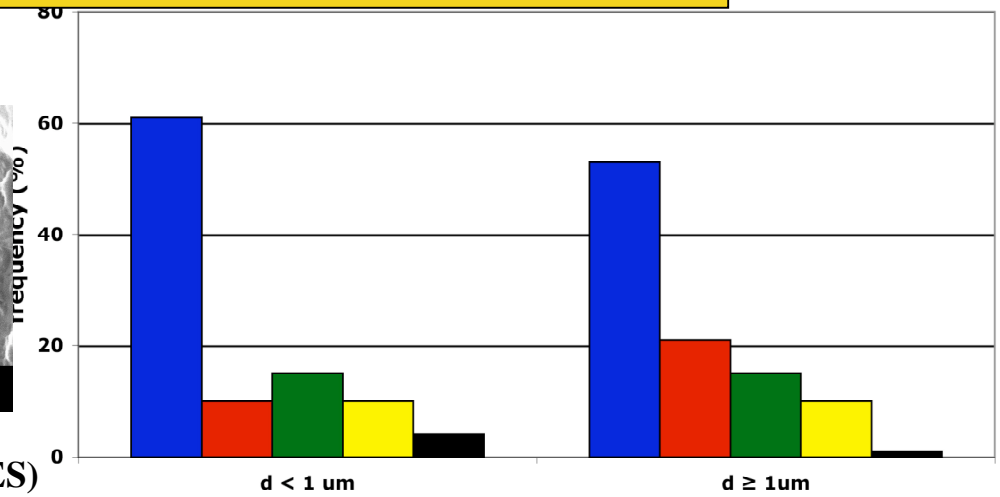
Ce sont ces échantillons qui constituent nos modèles de grains cométaires.

Les mesures sur l'Al

Caractérisation des cratères
répartition géographique et taille
composition chimique du résidu
***Outils de base* : microscopie optique / MEB et EDS**







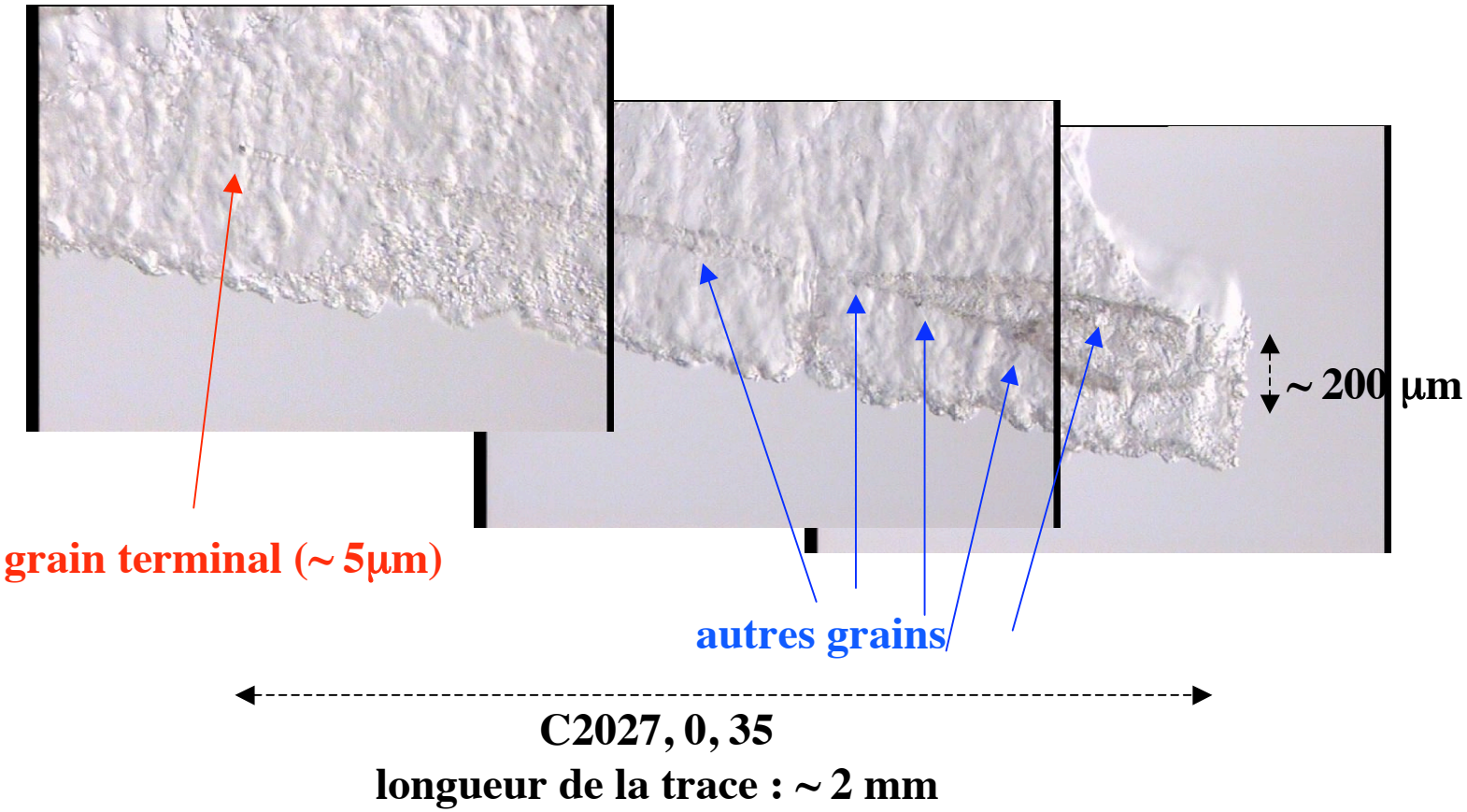
ex du cratère 12 de C2068W (collaboration IAS/LSPES)

Résultats généraux
- Peu de gros grains
- Plusieurs distributions en amas
- Compositions variées toutes potentiellement extraterrestres
- Agrégats de « mini roches »

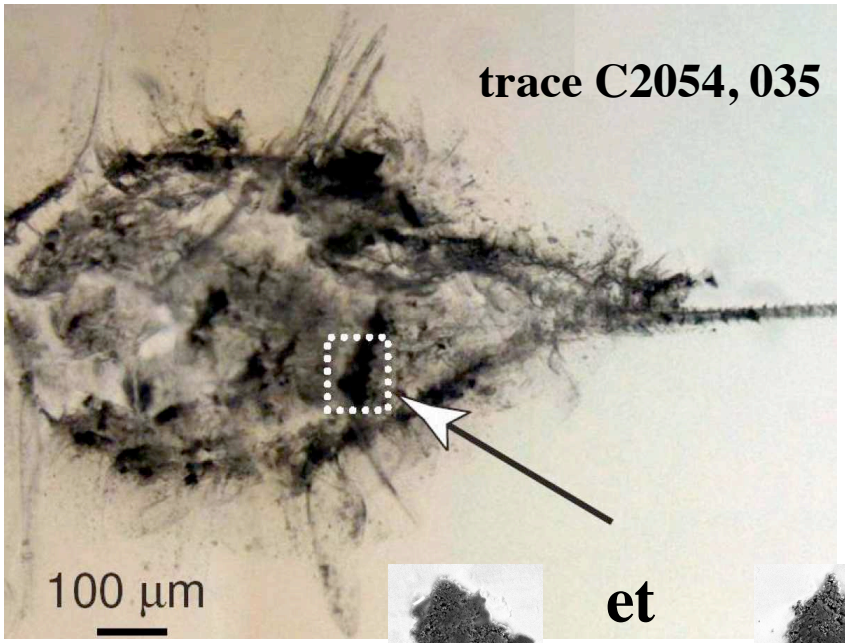
Mg Si S Fe (silicates + FeS)	**> 50%**
Mini roches silicatées	**~ 25%**
sulfures de Fe et Ni	**~ 20%**
autres	**~ 5%**

Les mesures dans l'aérogel

Principe	***But***
Analyses *in situ* des grains dans le keystone d'aérogel **SXRF (par ex. l'ESRF de Grenoble)**	**Calculer pour chaque grain incident:** **la masse totale, la composition élémentaire,** **les éléments en traces, afin de remonter** **à la composition globale de la comète**

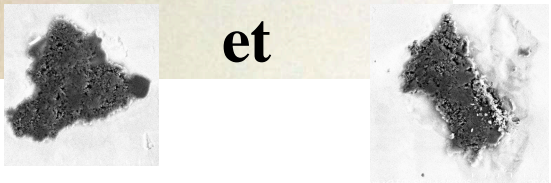


Les mesures sur des grains extraits



ou

et



PRINCIPAUX RÉSULTATS

Présence importante d'aérogel fondu ou compressé lié aux grains.

Caractérisation des silicates présents.

Rapport $CH_2/CH_3 \sim 6$ (cf IDPs, ≠ MIS)

Pour caractériser complètement le grain incident

il faut regrouper les informations sur tous les grains de la trace, obtenues dans différents laboratoires.

Plan

I - Les comètes

Ce que l'on sait avant Stardust

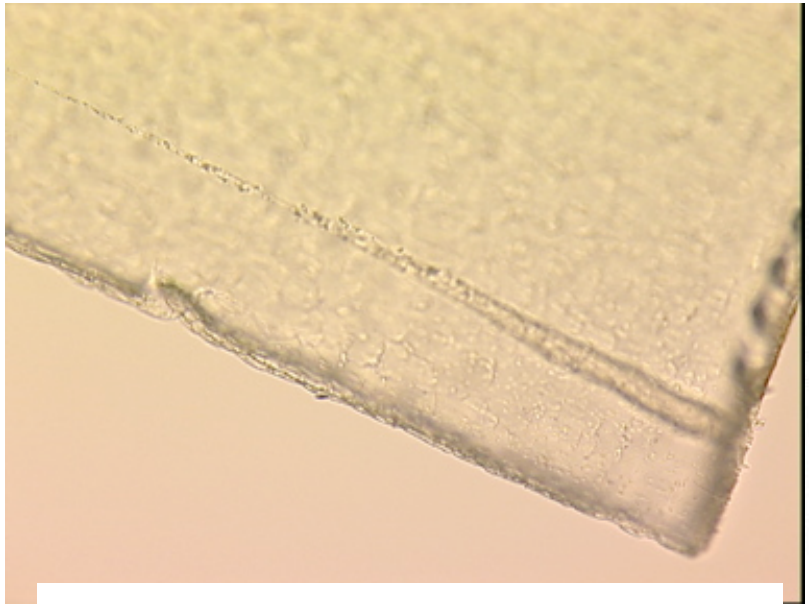
II - La mission Stardust

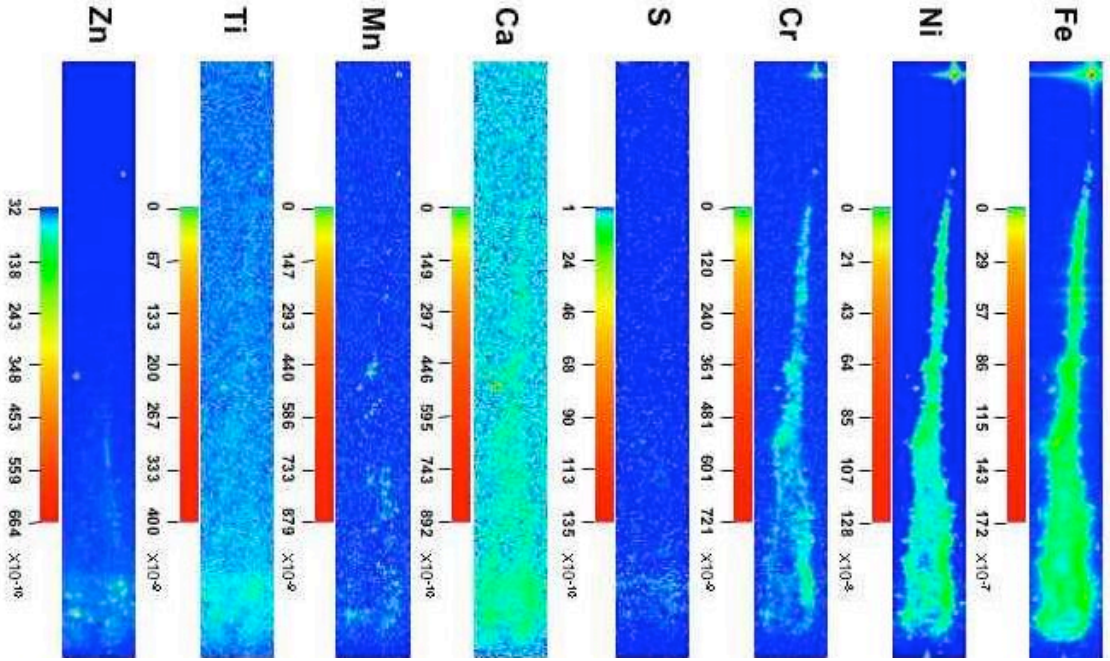
Survol d'une comète et retour sur Terre d'échantillons cométaires

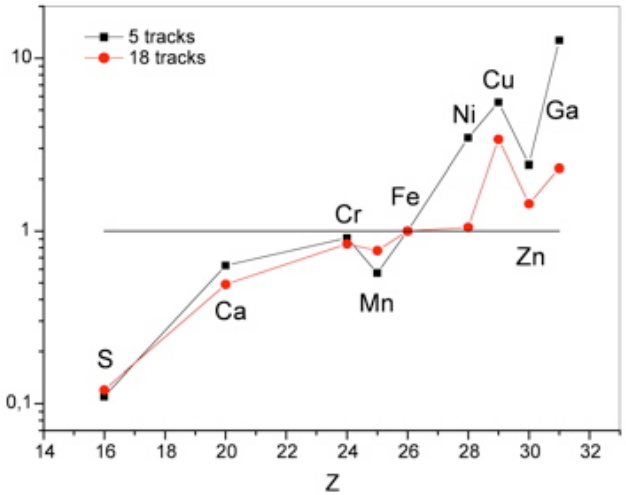
III - Bilan au retour de Stardust

La composition élémentaire

A partir de la composition mesurée de quelques grains, on remonte à la composition de la comète.







Flynn et al, Science 2006

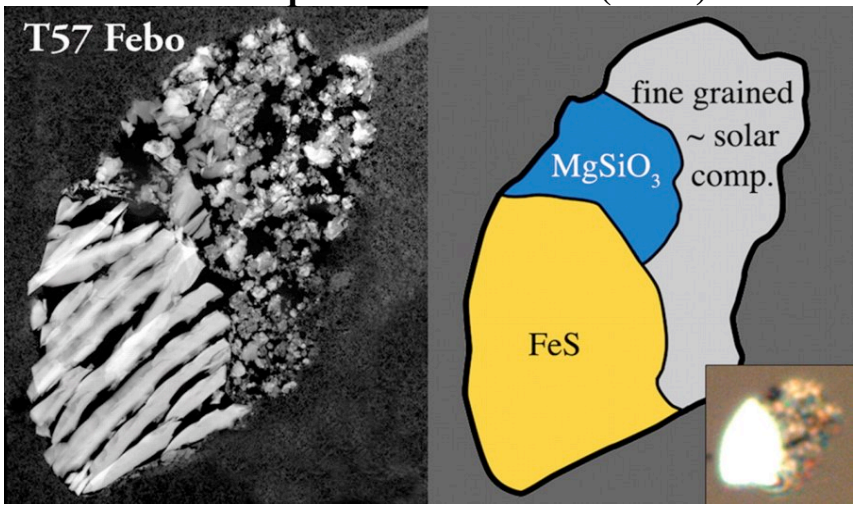
Résultats

Variation de la composition trace par trace, mais aussi à l'intérieur d'une trace.
Le grain terminal n'est pas représentatif du grain incident.
Globalement, composition à peu près chondritique

La minéralogie

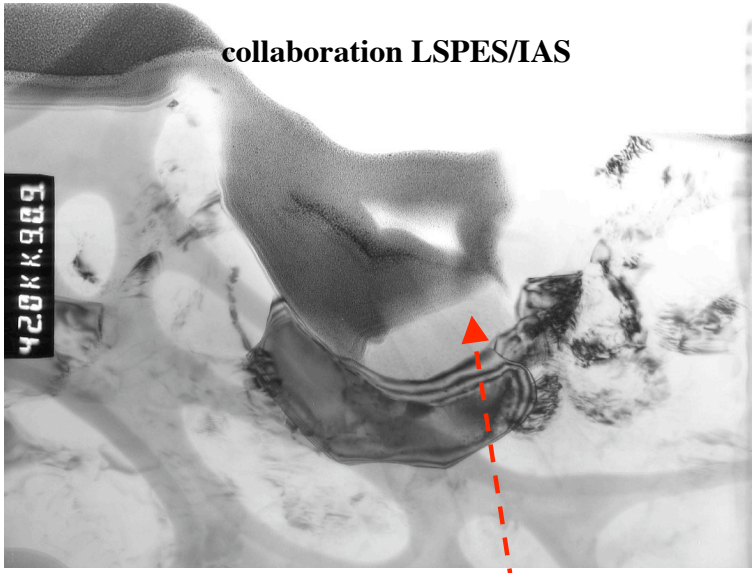
Une des clefs pour comprendre la formation de la comète

Un grain terminal, observé en Microscopie Electronique à Transmission (MET)



Zolensky et al, Science 2006

Une section de cratère, observée en MET

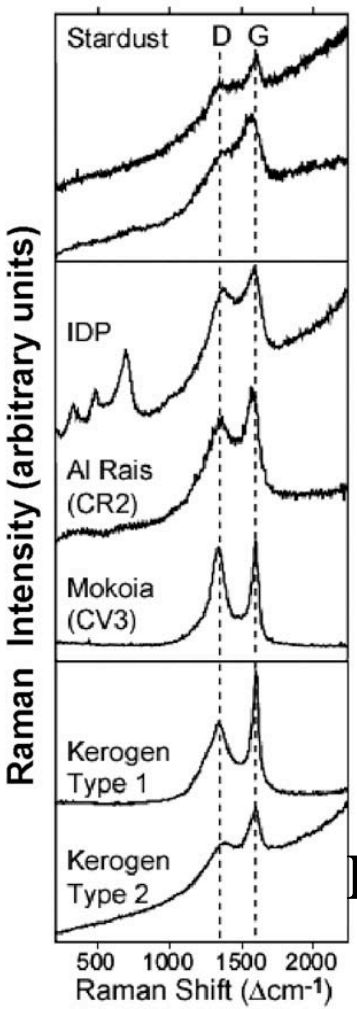


particule O-Mg-Si (enstatite)

Abondance de silicates (Fe+Mg), formés à haute température, cristallins et amorphes
Abondance de sulfures Fe/Ni, pauvres en Ni
Existence de minéraux réfractaires type CAI
Peu d'évidences de minéraux hydratés

La matière organique

La matière organique est présente dans les poussières de Wild-2.
Il ne s'agit pas de contamination terrestre (rapports isotopiques).



Sandford et al, Science 2006

Analyse difficile
Faibles quantités présentes
Chauffage et dégradation des grains lors du ralentissement dans l'aérogel

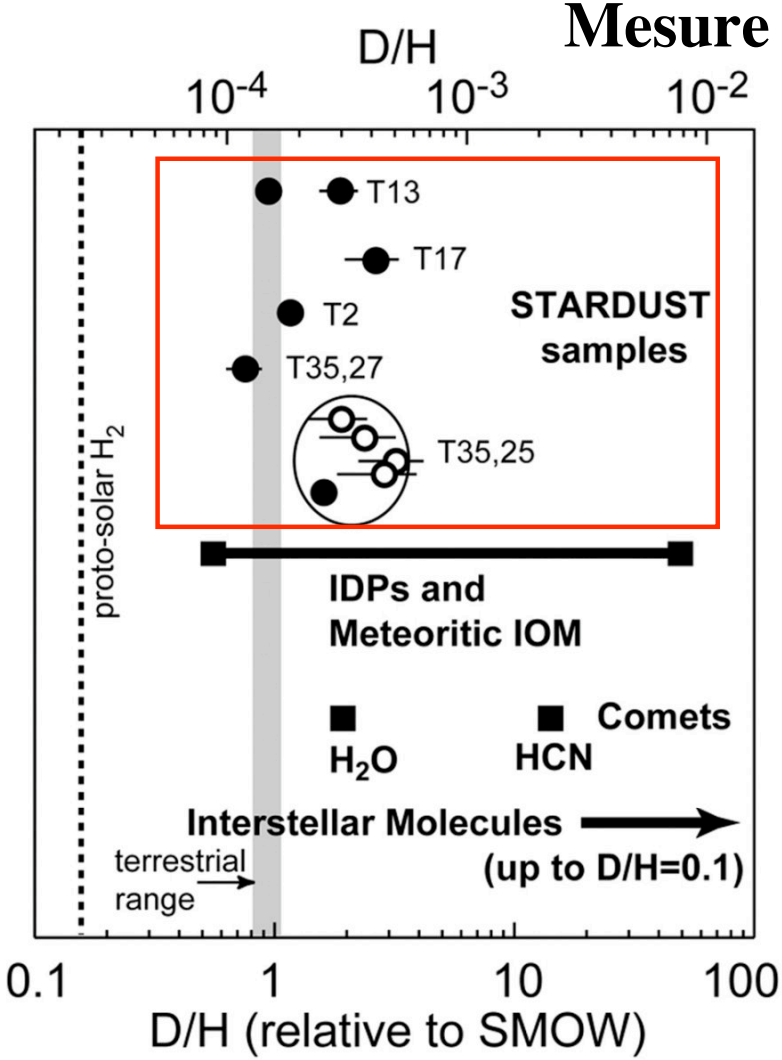
Distribution hétérogène de matière, voisine mais non identique de ce qui est observé dans les chondrites et les IDPs.
Composés aromatiques plutôt rares.
Longues chaînes aliphatiques peu ramifiées.

La présence de "bandes D et G" dans un spectre Raman est la signature de la présence de matière organique

Les rapports isotopiques, 1

Hydrogène

Mesure du rapport D/H



> 10^{-3} nuages moléculaires
1.5 10^{-4} eau sur Terre
~ 3 10^{-4} Halley ; 3 10^{-4} Hale-Bopp
~ 10^{-4} à ~ qques 10^{-3} certains IDPs

Composition relativement homogène dans les échantillons Stardust, compatible avec une origine dans la nébuleuse solaire.

McKeegan et al, Science 2006

Les rapports isotopiques, 2

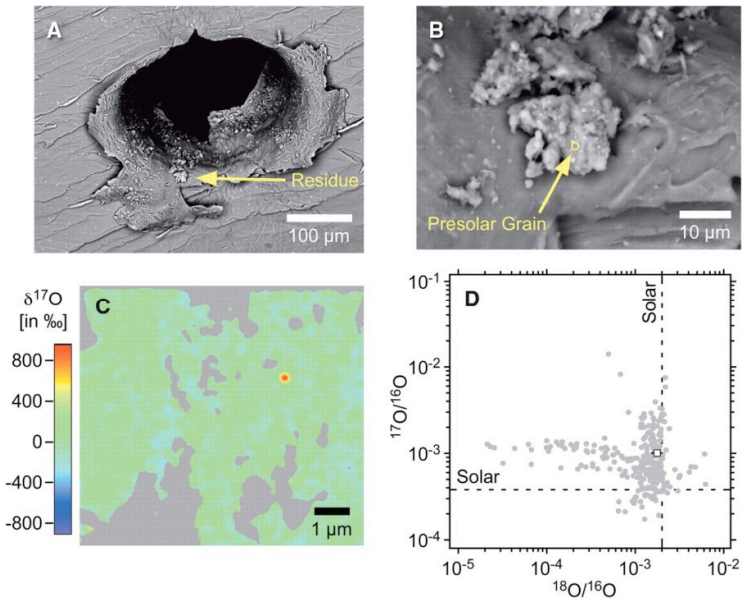
Oxygène

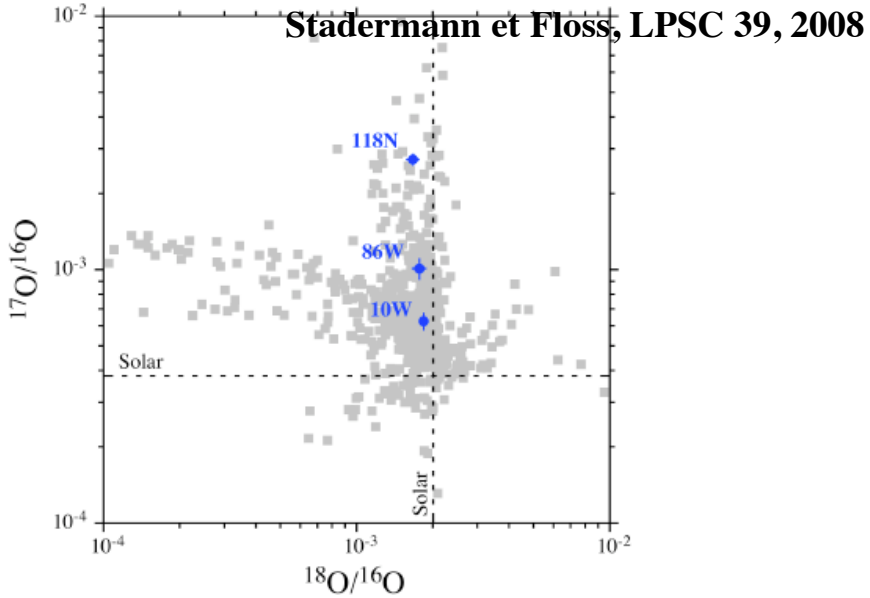
Elément le plus abondant dans la matière solide

Composition isotopique directement liée à la provenance du matériau

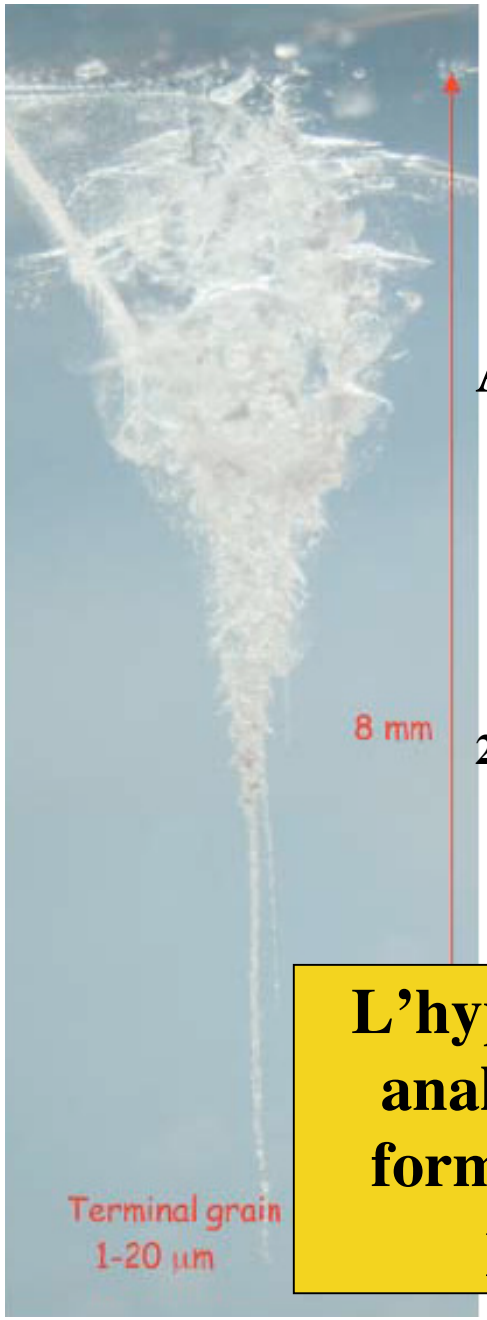
(1) Recherche de grains présolaires:

enrichissement en ^{17}O, observé dans 3 résidus de cratères





(2) Présence de minéraux condensés à haute température, dans la nébuleuse primitive, avec un enrichissement en ^{16}O identique à ce qui est mesuré dans les CAIs et les oxydes réfractaires des chondrites



Les rapports isotopiques, 3

Gaz rares

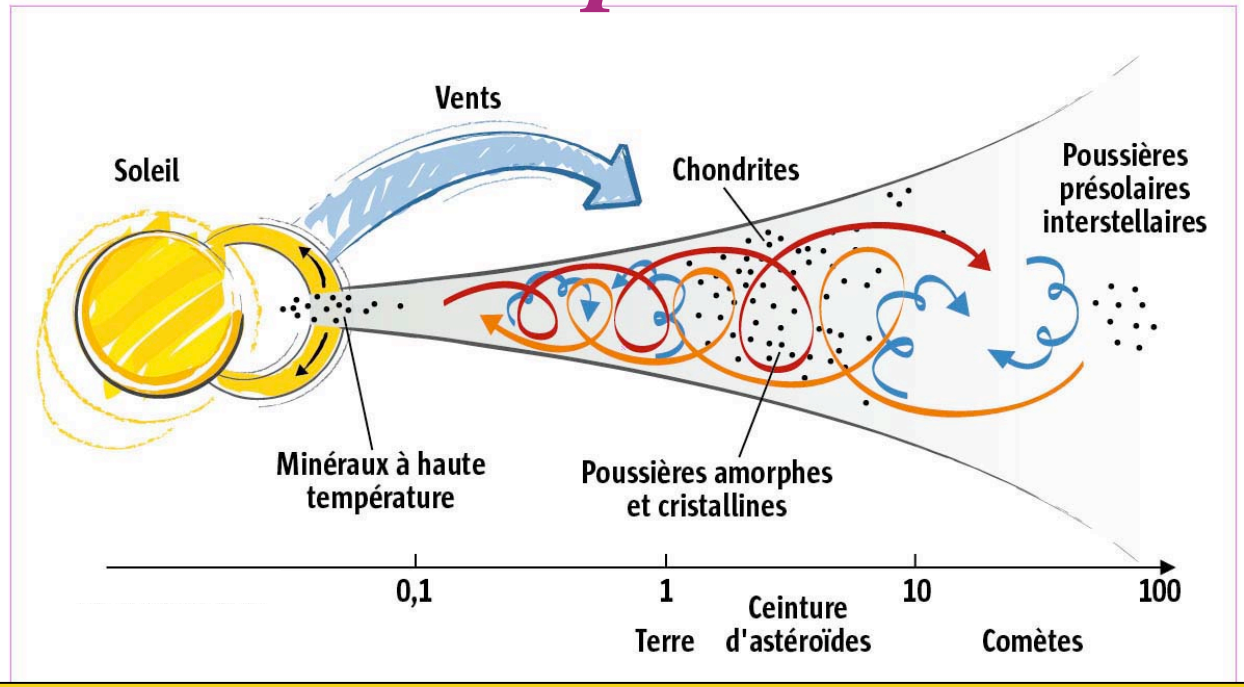
Analyse par spectrométrie de masse en 5 positions le long de la trace due à une "mini-roche".

Matériau suffisamment abondant pour calculer les rapports des isotopes du Ne et de l'He ($^{20}Ne/^{22}/Ne$, $^{21}Ne/^{22}Ne$, $^{3}He/^{4}He$, $^{4}He/^{20}Ne$) et les comparer à ceux mesurés dans d'autres régions du Système Solaire.

L'hypothèse qui correspond le mieux aux résultats des analyses implique une implantation de ces gaz dès la formation des grains au voisinage du Soleil, dans une phase précoce de l'évolution de la nébuleuse.

Mesures au CRPG de Nancy et à l'Université du Minnesota
Marty, B. et al (Science, vol 319, Janvier 2008)

Que peut-on conclure ...
... provisoirement ?

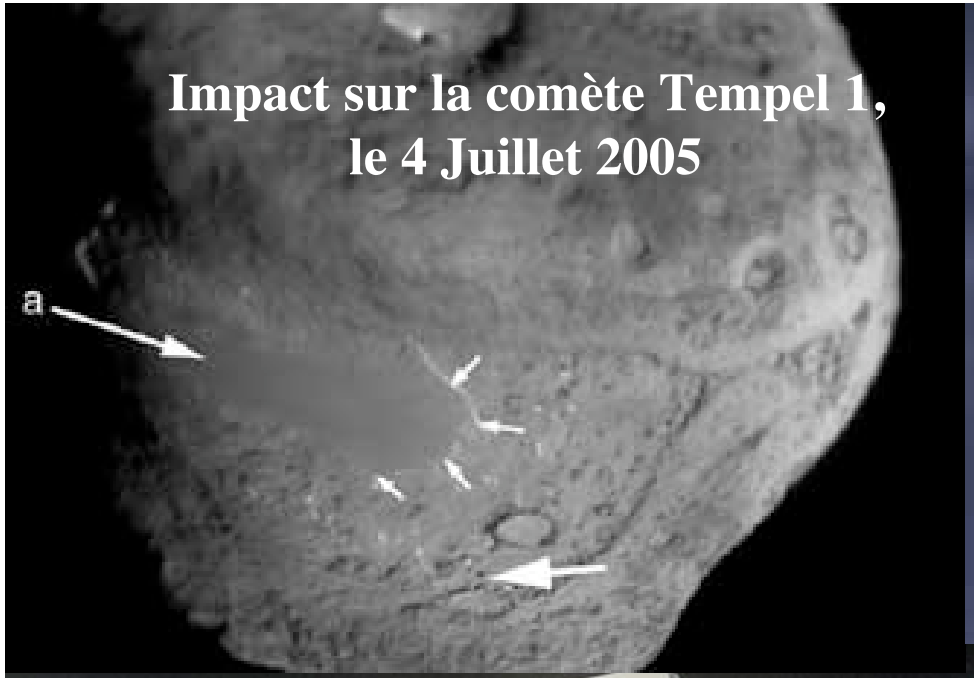


Mélange de particules condensées loin du soleil (glaces organiques) et près du soleil (olivines, CAIs,...)

Il semble qu'il y a eu des processus de transport et de mélange entre les régions internes du disque protoplanétaire et les régions externes, avant ou pendant la formation des comètes, plus efficaces qu'on ne le pensait auparavant.
Peu de grains « présolaires ».

Et les autres objets de la ceinture de Kuiper ?

Deep Impact: mission vers une comète



Impact sur la comète Tempel 1, le 4 Juillet 2005

Image d'artiste de l'impact d'un projectile de 360 kg sur la comète

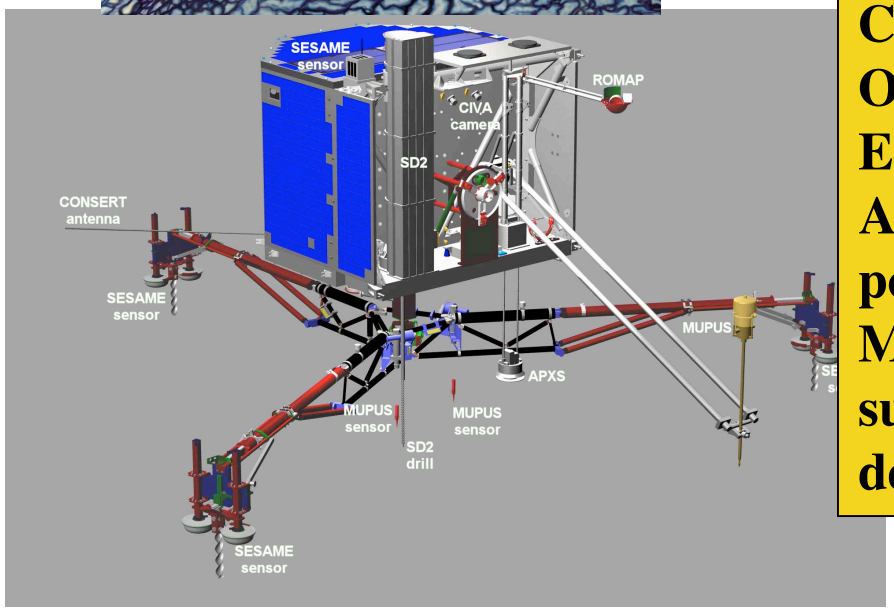
Ingrédients pour la « soupe cométaire »

Ejection d'environ 10^6 kg de poussière analysée par le satellite Spitzer: identification de nombreux ingrédients, dont plusieurs très différents de ceux qui ont été identifiés dans Wild-2

La mission Rosetta de l'ESA

Mission vers la comète Churyomov-Gerasimenko, une autre comète originaire de la ceinture de Kuiper

2 Mars 2004 : départ
Sept. 2008 et Juil. 2010: survol de deux astéroïdes
22 Mai 2014 : rencontre programmée avec la comète à 4 UA
19 Octobre 2014 : éjection de l'atterrisseur Philae, à 3 AU
Août 2015 : la comète est au périhelie
31 Décembre 2015 : fin programmée de la mission (à 2 AU post périhélie)



Cartographie du noyau
Observation de l'environnement cométaire
Etude de l'évolution de l'activité cométaire
Analyse des gaz environnants et de grains de poussière interceptés
Mesures physiques et chimiques de la surface et à une profondeur d'une trentaine de cm

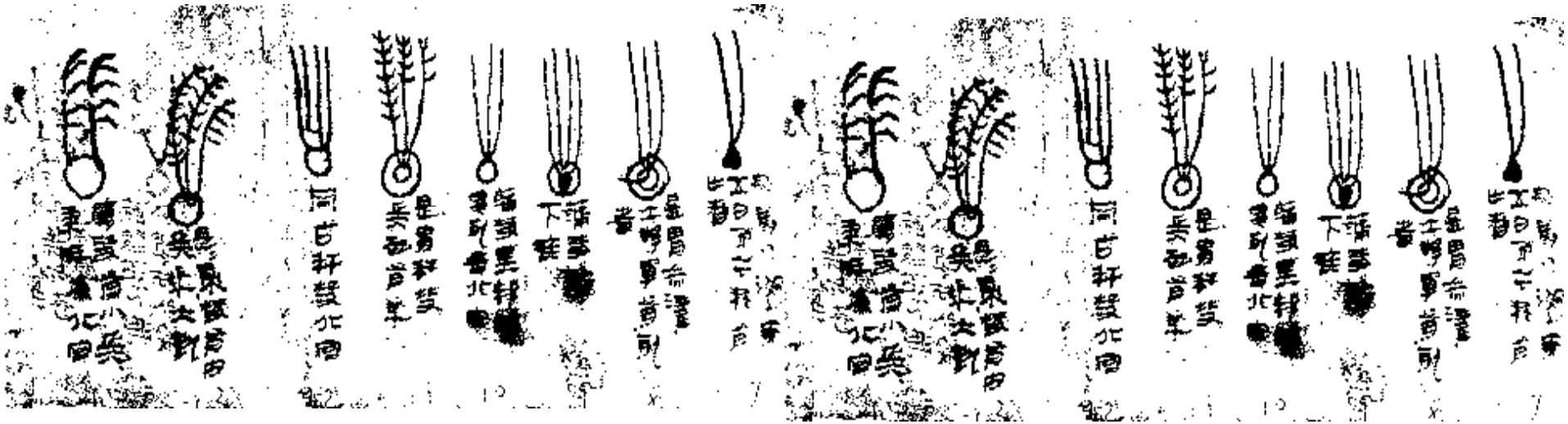
Conclusions générales, mais provisoires

1 - Les poussières cométaires de Wild 2 sont principalement originaires de notre nébuleuse.
La contribution de grains pré-solaires et de molécules organiques interstellaires est faible, mais non nulle.

2 - Les comètes semblent constituées de matériels provenant de diverses régions de notre nébuleuse.
Des mécanismes de transferts radiaux vont devoir être trouvés.

3 - La matière organique des grains cométaires est variée, et différente de celle des météorites. Les processus d'organo-synthèse dans le Système Solaire primitif sont donc très complexes.

Tous ces résultats devront être intégrés dans nos scénarios sur l'origine du Système Solaire, son histoire primitive, son évolution …



Le "Livre de soie" (IVe siècle avant JC), retrouvé dans une tombe Han près de Mawangdui (Chine).
Premier "Atlas des formes cométaires" connu. (Xi Ze-Zong, 1984, Chin. Astron. Astrophys., 8, 1)

Merci de votre attention

Quelques sites sur les comètes

http://www.lesia.obspm.fr/~crovisier/promenade/pro_comete_nuls.html

http://stardust.jpl.nasa.gov/home/index.html

http://solarsystem.nasa.gov/deepimpact/index.cfm

http://smsc.cnes.fr/ROSETTA/Fr/