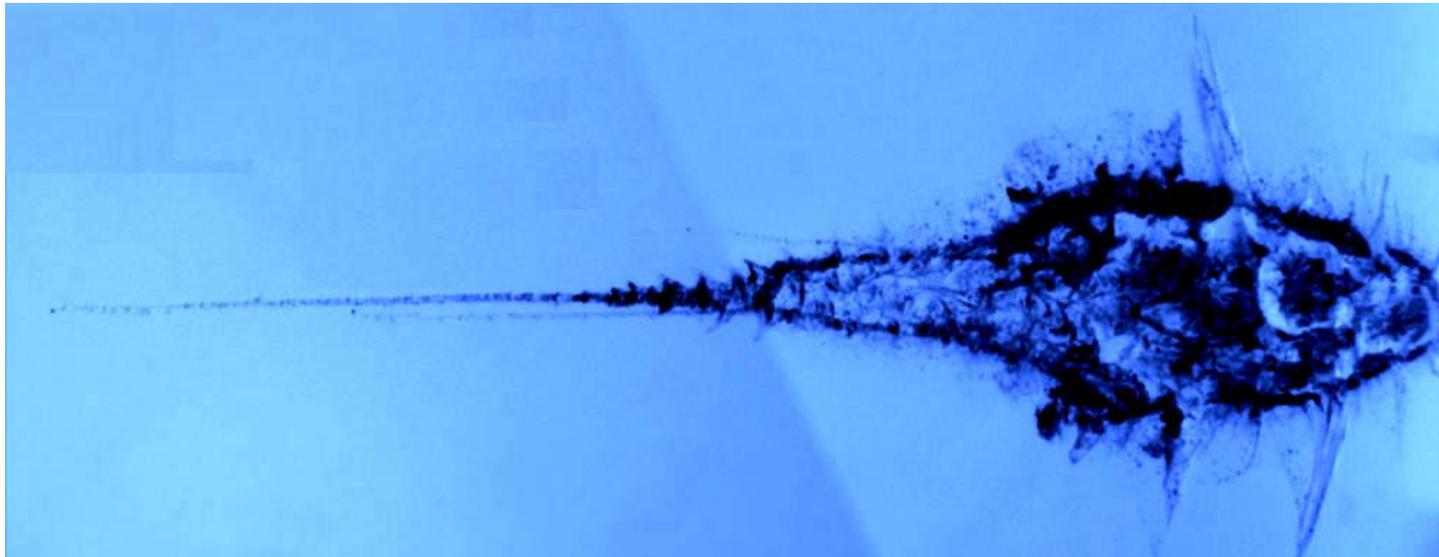


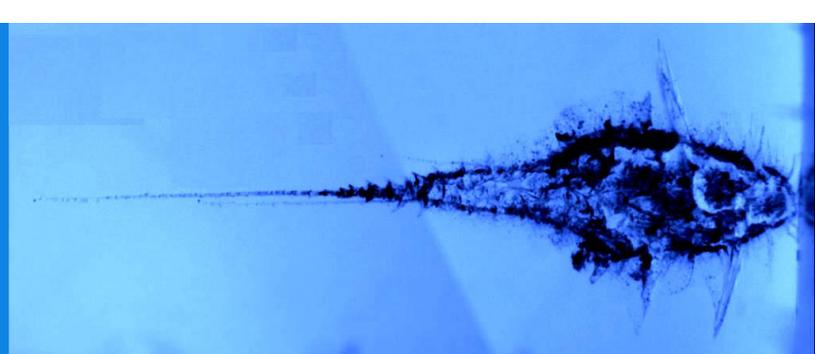
Soutenance de thèse de Faustine Grossemy

Sous la direction de Janet Borg et Zahia Djouadi

Des grains cométaires en laboratoire: premiers résultats de la mission Stardust



Grain de la comète Wild 2 piégé dans l'aérogel © NASA

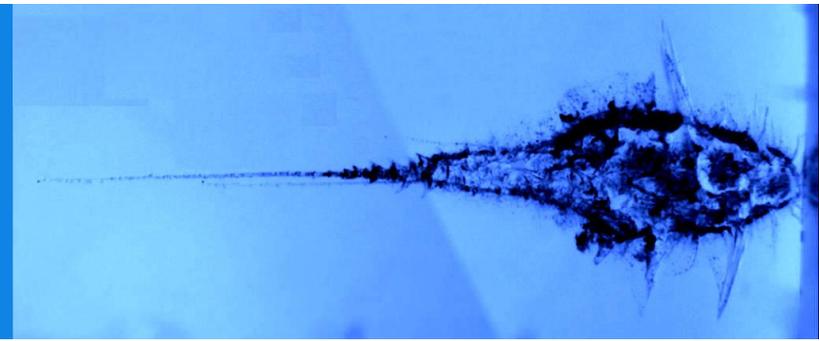


Plan de la présentation

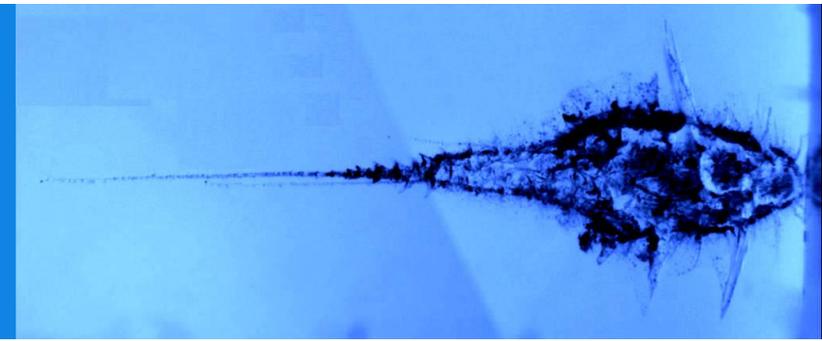
- **Introduction**
- **Intégrité des grains collectés**
- **Composition élémentaire de la comète Wild 2**
- **Matière organique de la comète Wild 2 et d'IDPs**
- **Conclusions et perspectives**

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Les comètes
Collectes
La mission Stardust
Problématique



- **Introduction**
- Intégrité des grains collectés
- Composition élémentaire de la comète Wild 2
- Matière organique de la comète Wild 2 et d'IDPs
- Conclusions et perspectives

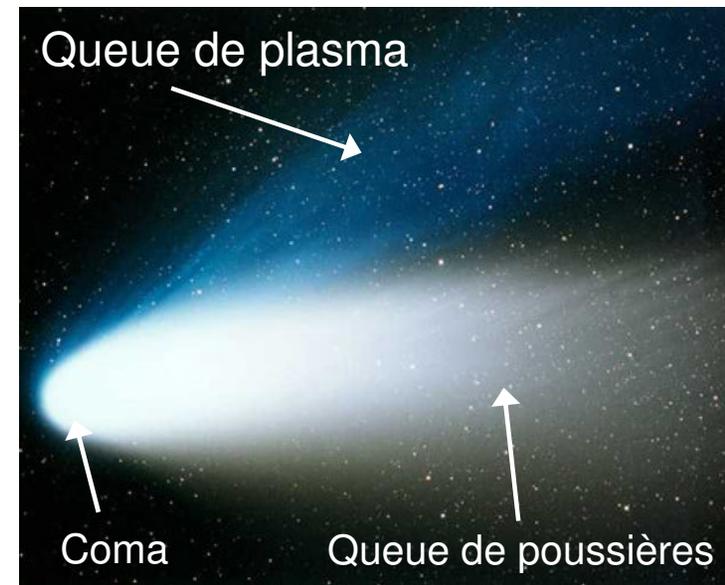


Les comètes

- Petits corps irréguliers de quelques km de diamètre
- Renferme de la matière qui n'a pas ou peu évolué depuis la formation du Système Solaire
- Loin du Soleil: noyau glacé
- Proche du Soleil: la **chevelure** + **queue de plasma** + **queue de poussières**



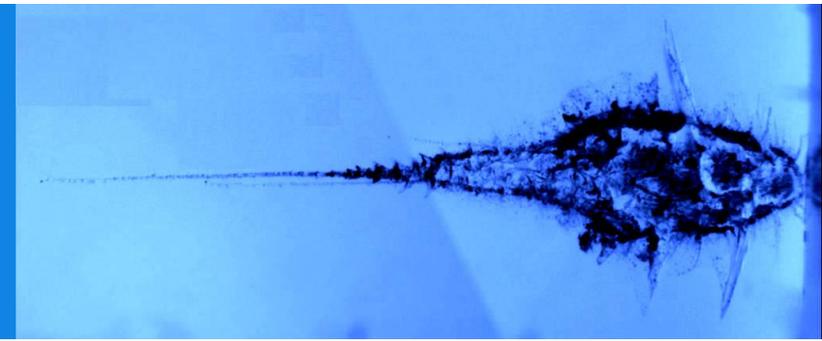
Comète Borrelly vue par Deep Space 1



Comète Hale-Bopp © Laborde

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Les comètes
Collectes
La mission Stardust
Problématique



Moyens de collecte

- **Vois stratosphériques de la NASA:** IDPs (Interplanetary Dust Particles)
- **Expéditions en Antarctique:** Micrométéorites Antarctiques (MMAs)
- **Collectes en Orbite Basse Terrestre:** grains piégés dans collecteurs de haute (métaux ultra purs) et basse densité (mousse, aérogel)
- **Mission spatiale:** Stardust



Avion stratosphérique



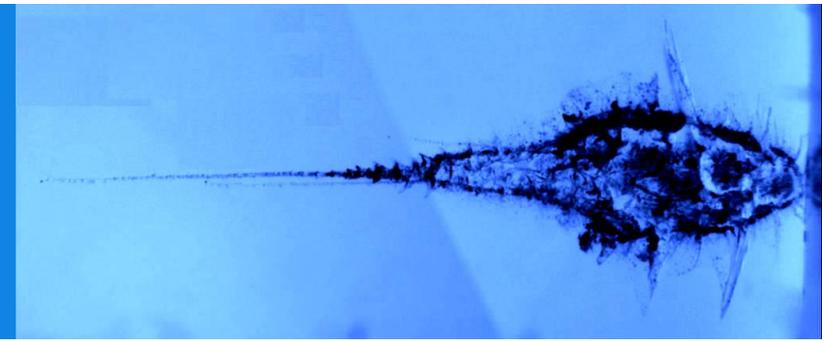
Collecteur déployé à l'extérieur de MIR (ODCExperiment)



La sonde Stardust

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Les comètes
Collectes
La mission Stardust
Problématique

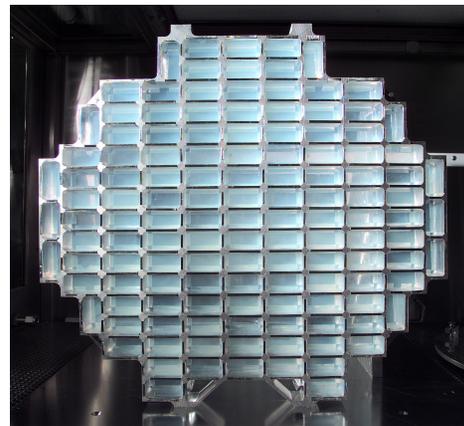


Stardust

- Survol de la comète 81P/Wild 2 le 2 janvier 2004
Collecte des grains à une vitesse relative de 6.1 km/s
- Grains de la comète rapportés sur Terre le 15 Janvier 2006, piégés dans de l'aérogel.



La sonde Stardust



Collecteur en aérogel

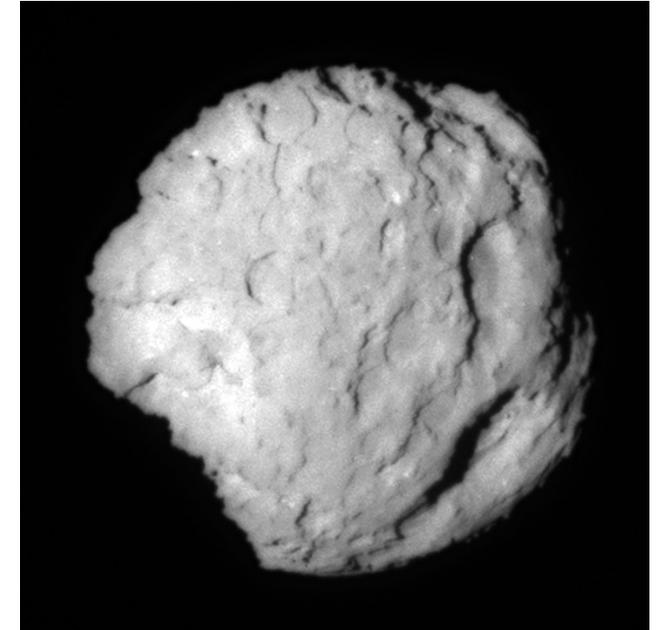
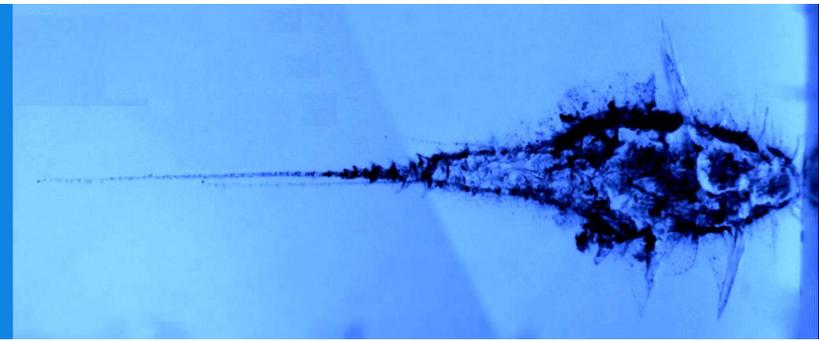


Image du noyau de Wild 2

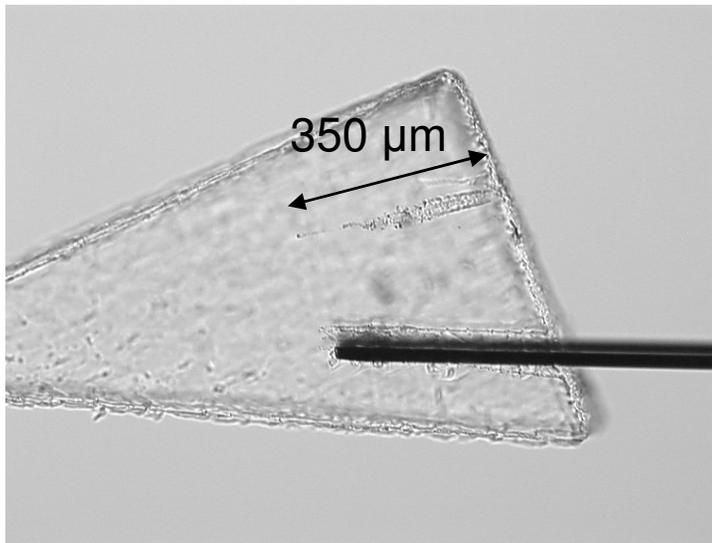
Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Les comètes
Collectes
La mission Stardust
Problématique

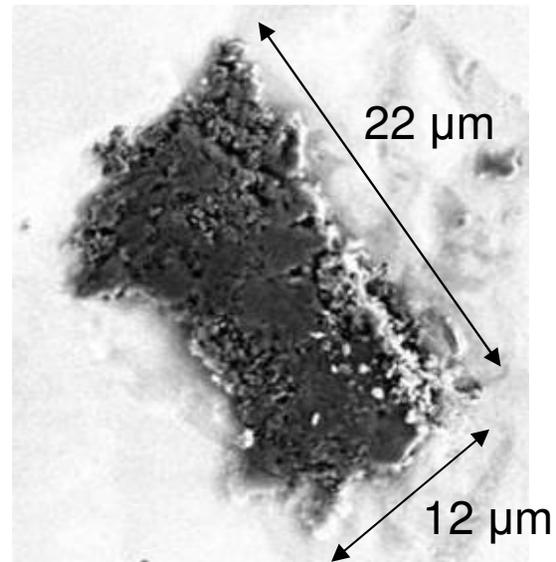


Différents types d'échantillons

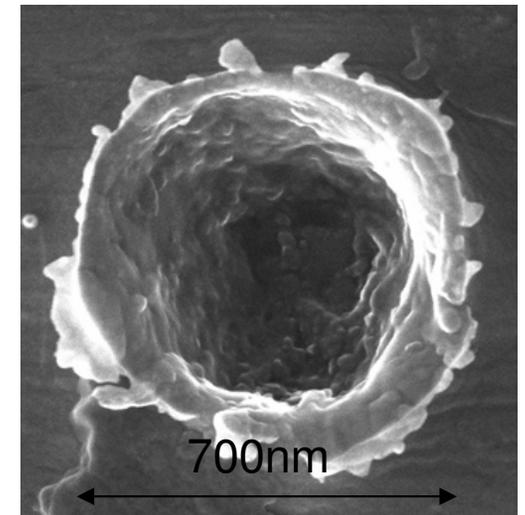
« Keystone »

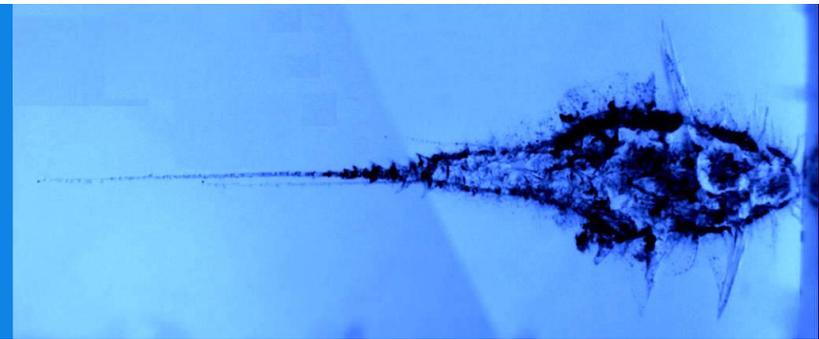


Grains extraits



Feuilles d'aluminium





Matière interstellaire

Comment ?

Observations (VLT, ISO, Spitzer)
Synthèse en laboratoire
Simulation de processus interstellaires ...



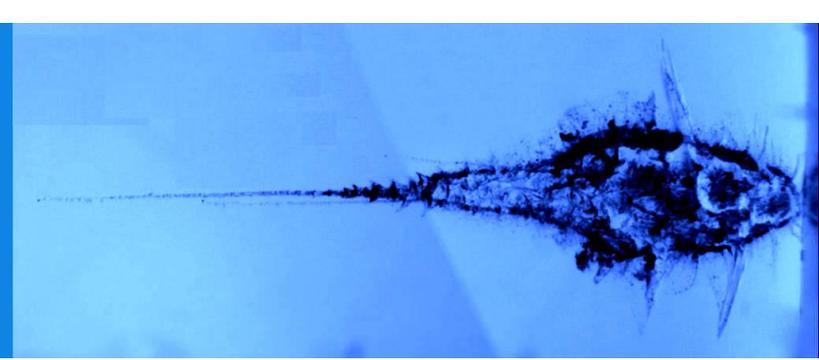
Matière primitive

*Grains de poussière interplanétaire
Micrométéorites Antarctiques, Échantillons Stardust...*

Comment ?

Analyses en laboratoire
Techniques : microspectroscopies IR et Raman,
microscopie X synchrotron...

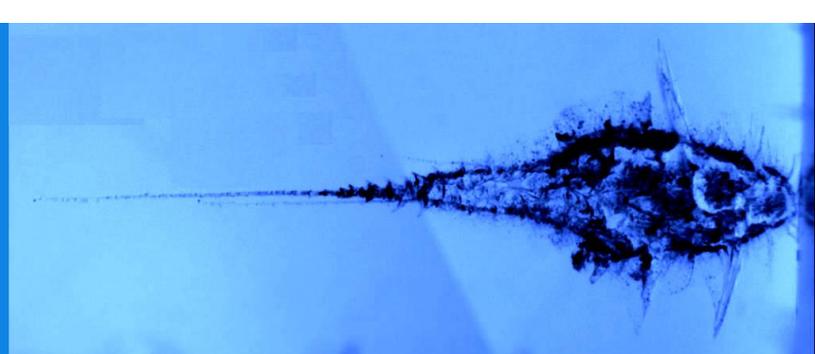
- **Transition de la matière du milieu interstellaire à la nébuleuse solaire**
- **Évolution de la matière interstellaire dans la nébuleuse primitive**
- **Témoin de la composition chimique et des conditions physiques de la nébuleuse solaire et de son évolution**



- Introduction
- **Intégrité des grains collectés**
- Composition élémentaire de la comète Wild 2
- Matière organique de la comète Wild 2 et d'IDPs
- Conclusions et perspectives

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Introduction
Analyses Fe-XANES
Résultats
Modèle empirique



- Analyses sur les lignes ID21 et ID22 de l'**ESRF** (European Synchrotron Radiation Facility) de Grenoble.

- En collaboration avec

LGIT, Grenoble, France: **A. Simionovici**

LST, ENS-Lyon, France: **L. Lemelle, T. Ferroir**

ESRF, beamline ID21 and ID22, Grenoble, France: **D. Eichert, P. Bleuét, J. Susini**

SSL, UC Berkeley, USA: **A.J. Westphal, C.J. Snead**



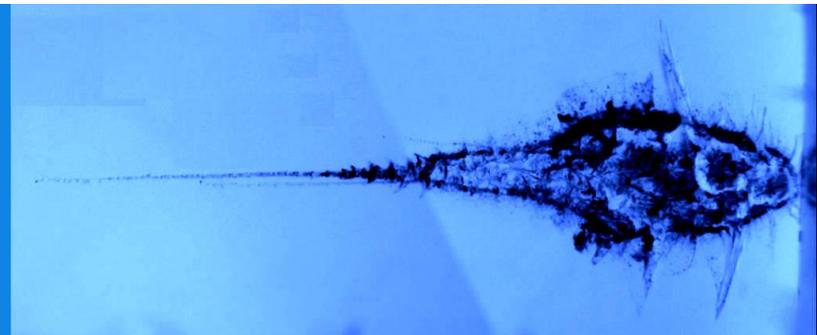
Vue aérienne de l'ESRF

- Détermination des **abondances élémentaires** : **fluorescence X**

- Étude du **ralentissement** dans l'aérogel : **étude XANES au seuil K du fer**

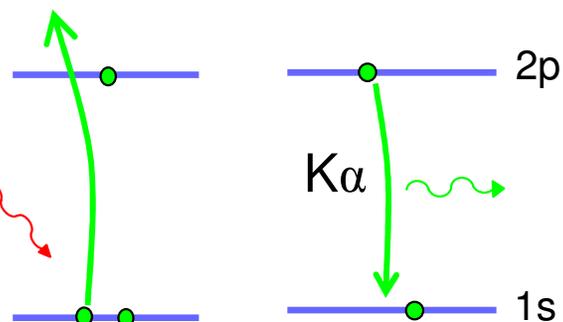
Introduction
 Intégrité des grains
 Composition élémentaire
 Matière organique
 Conclusions & Perspectives

Introduction
 Analyses Fe-XANES
 Résultats
 Modèle empirique

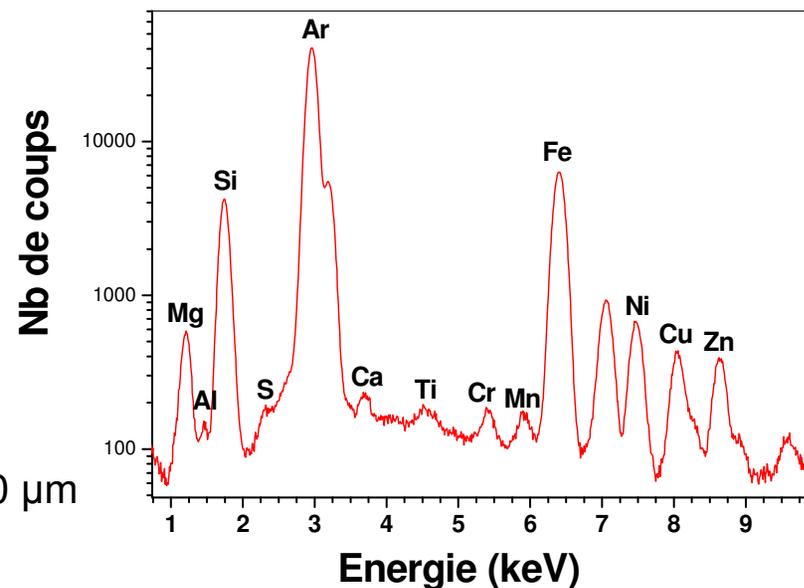
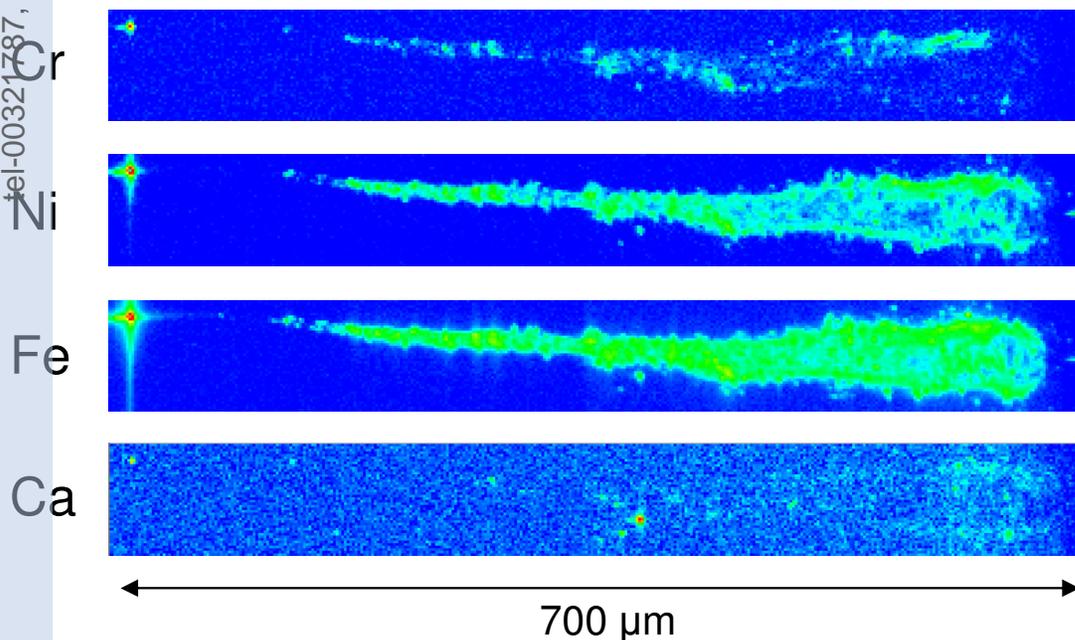
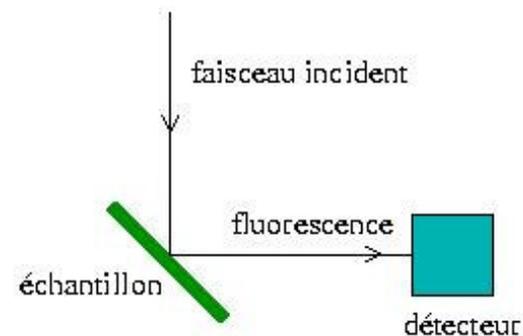


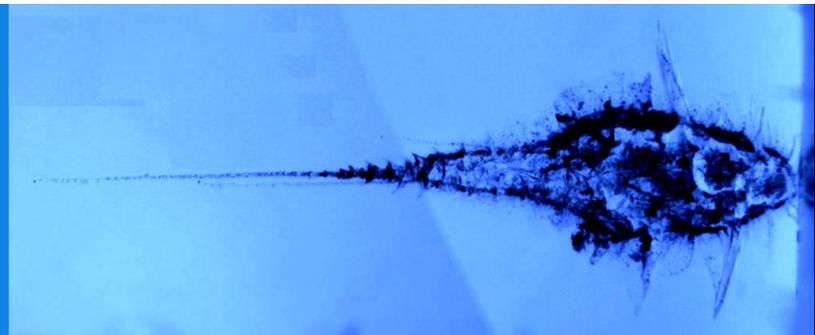
La fluorescence X

tel-00321787, version 1 - 15 Sep 2008



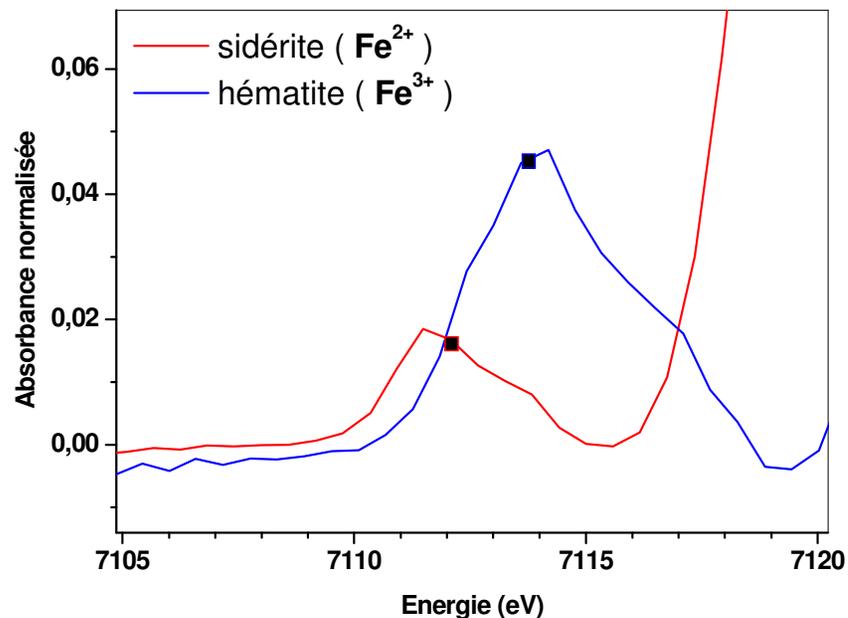
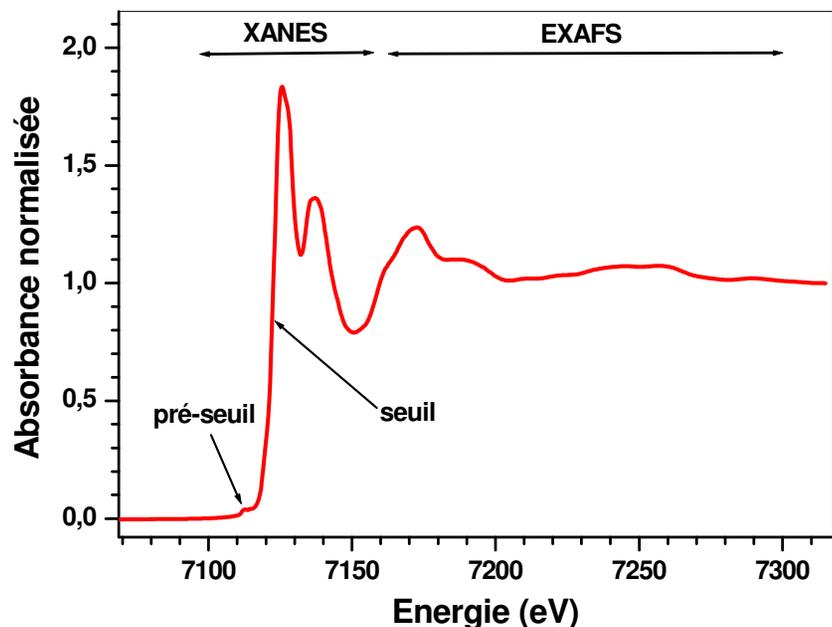
Rayons X caractéristiques de l'atome





Spectroscopie d'absorption X: XANES (X-ray Absorption Near Edge Structure)

Spectre obtenu en faisant varier l'énergie du faisceau incident autour de l'énergie d'ionisation d'un atome donné: **7125 eV** pour le **Fer**

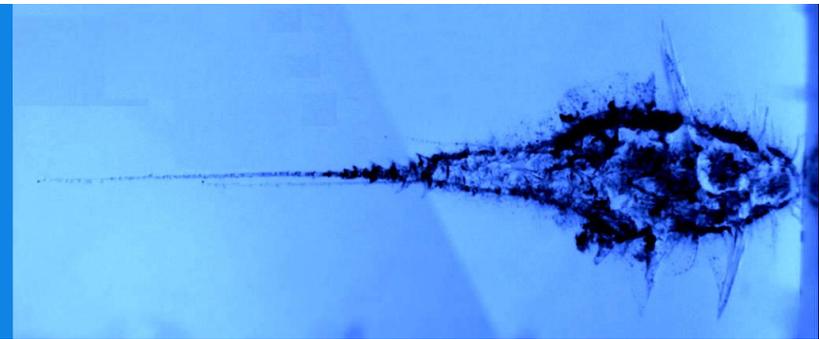


Position du pré-pic est à comparer à deux positions de référence (*Wilke et al., 2001*)

7112.1 eV → Fe²⁺
7113.5 eV → Fe³⁺

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

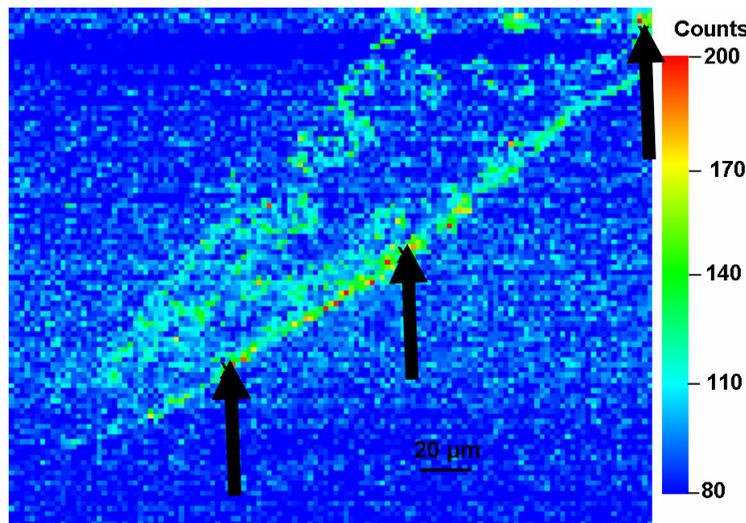
Introduction
Analyses Fe-XANES
Résultats
Modèle empirique



Analogues des échantillons Stardust

- **LC01B2, 2D0401, 2D0403**: échantillons ODCE (Orbital Debris Collection Experiment).
- **8JUN05B**: contenant un grain de la météorite Allende bombardé à l'aide d'un canon à poussières dans de l'aérogel Stardust à ~ 6 km/s.

Échantillons cartographiés à 7.2keV



Distribution de Fe, 2D0401, trace

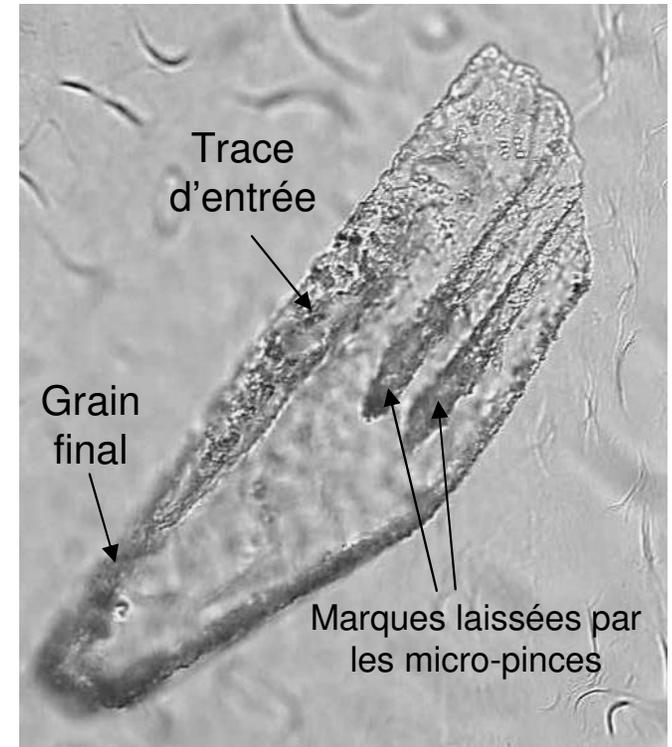
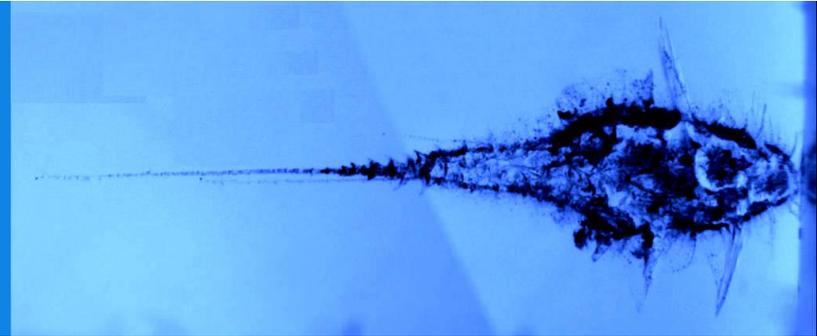
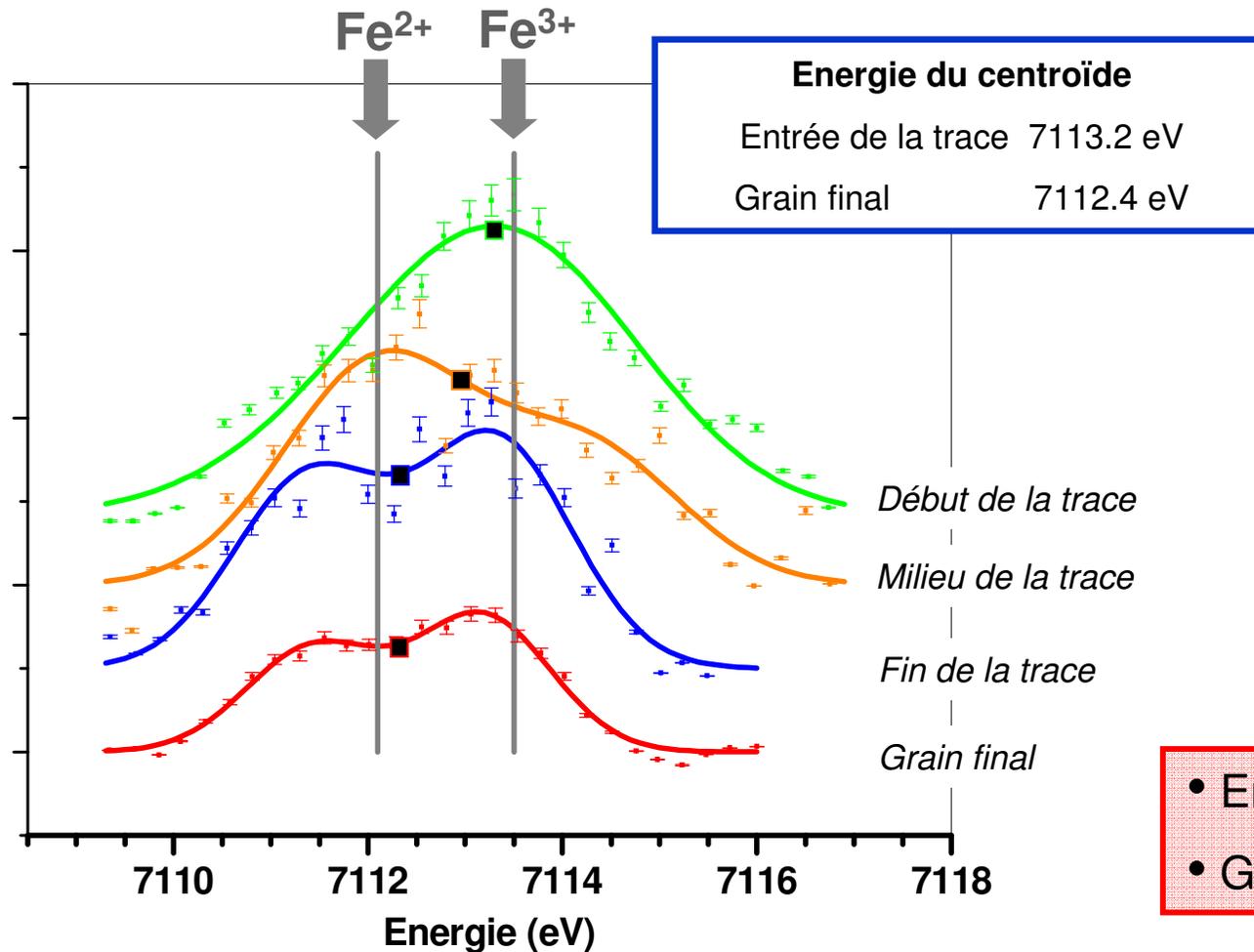


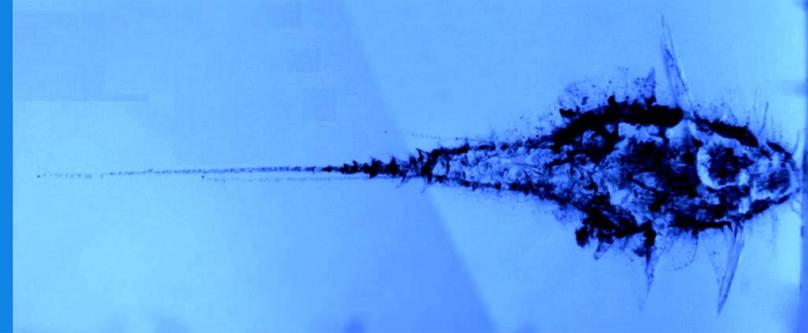
Image optique de 2D0401



Pré-seuils normalisés de différentes régions de 2D0401



- Entrée de la trace: riche en **Fe³⁺**
- Grain final et fin de trace: **Fe²⁺**



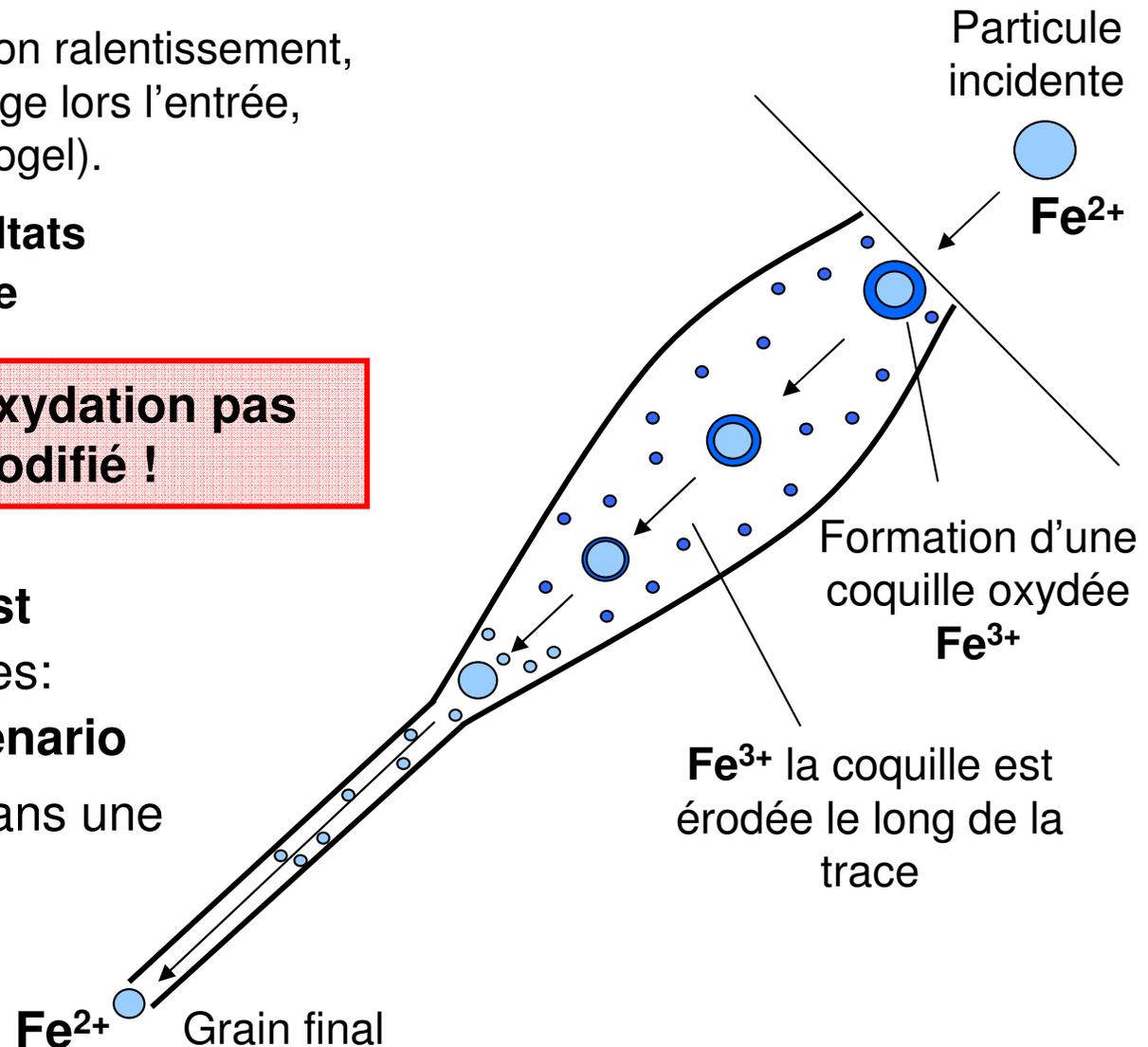
- Le grain **semble** être **réduit** lors de son ralentissement, réduction **difficile à expliquer** (chauffage lors l'entrée, présence d'oxygène provenant de l'aérogel).

• **Scénario proposé à partir des résultats obtenus pour l'échantillon de Allende**

État d'oxydation pas modifié !

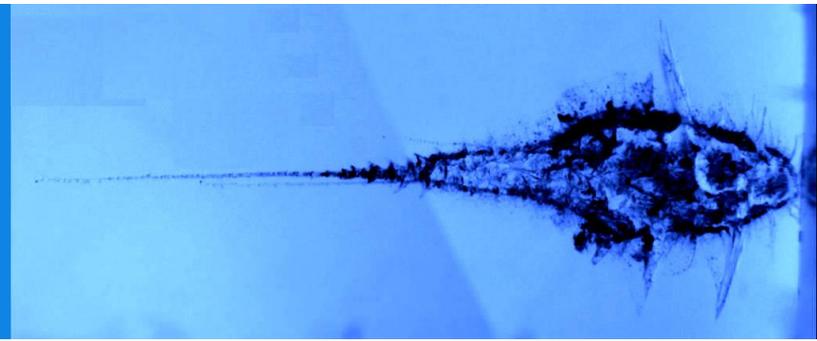
Étude de 5 échantillons Stardust

- Fe^{2+} dans les particules finales:
en accord avec notre scénario
- présence de fer métallique dans une des particules finales:
réduction par du carbone ?
grain incident Fe^0 ?

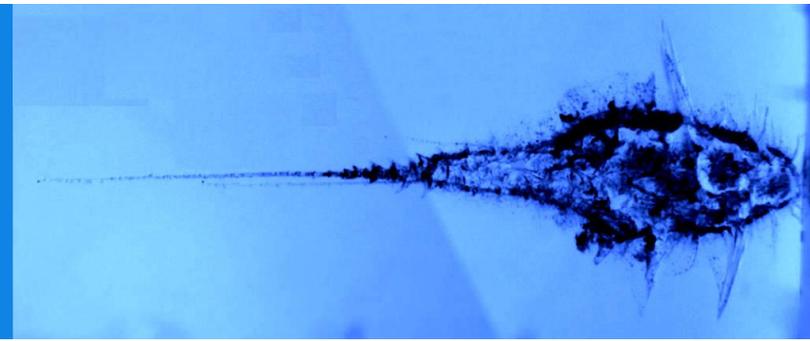


Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Introduction
Composition élémentaire
Interprétation des résultats
Conclusion



- Introduction
- Intégrité des grains collectés
- **Composition élémentaire de la comète Wild 2**
- Matière organique de la comète Wild 2 et d'IDPs
- Conclusions et perspectives



Échantillons 6 keystones

- C2009 04apr06
- C2009 03apr06
- C009 track2 24mar06
- C2009 27mar06
- C2009 29mar06
- C027

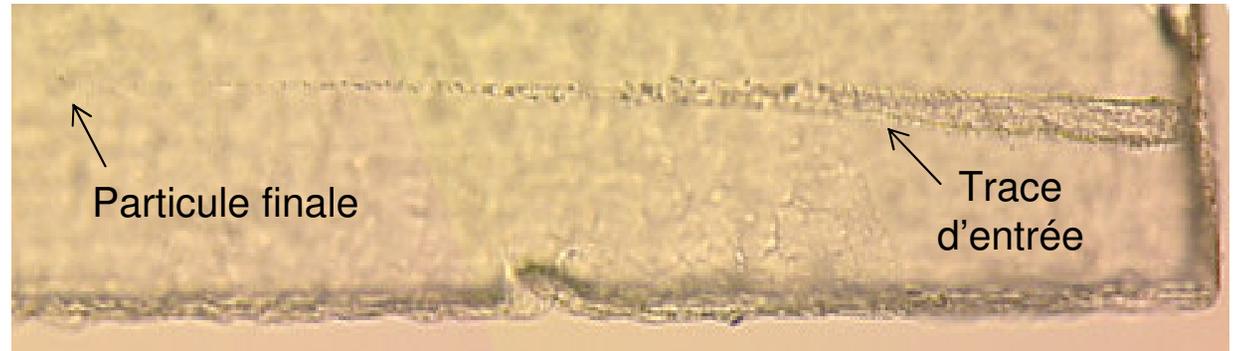


Image optique de C2009 29mar06

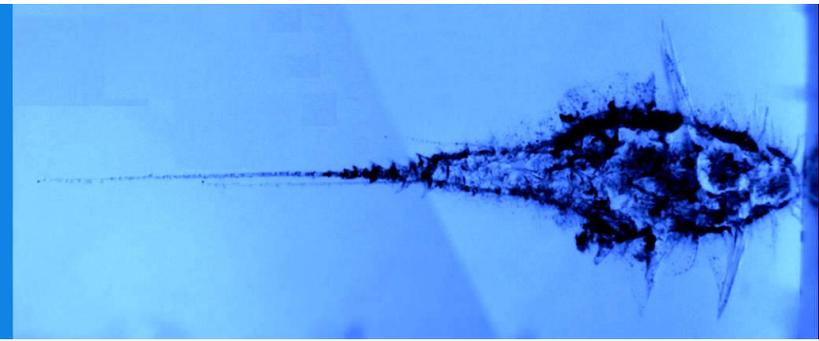
Conditions expérimentales

Expériences menées sur les lignes ID22 et ID21 à l'ESRF:

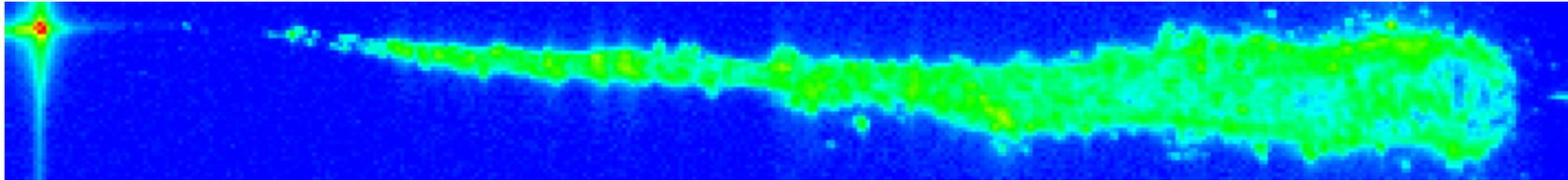
| | ID22 | ID21 |
|---------------------|-----------------|-------------------------|
| Flux | 10^{11} ph/s | 10^9 ph/s |
| Résolution spatiale | 2 μm | Jusqu'à 1 μm |
| Énergie du faisceau | 13 keV | 2.5 et 7.2 keV |

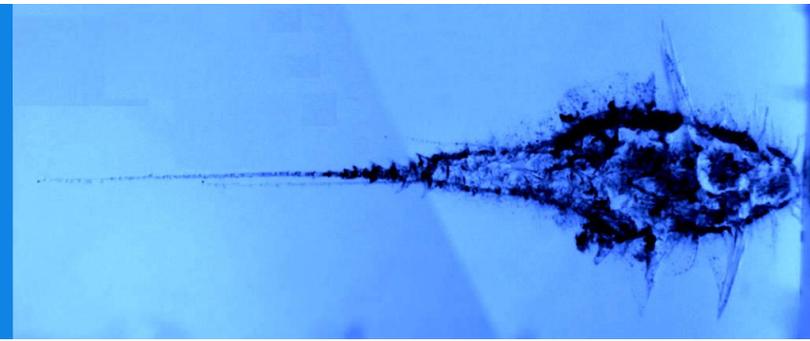
Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

Introduction
Composition élémentaire
Interprétation des résultats
Conclusion

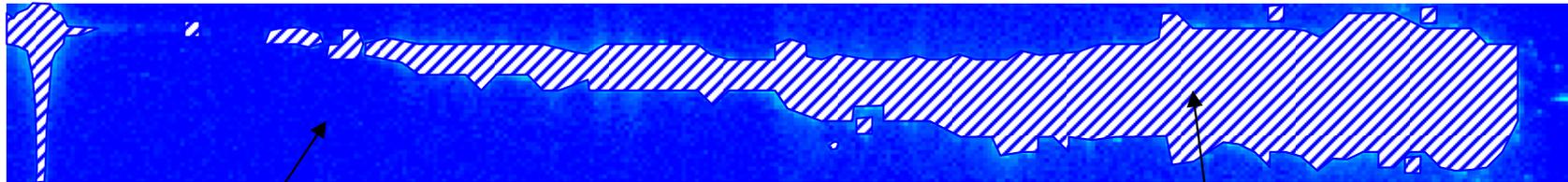


Calcul de la composition élémentaire de la particule incidente:



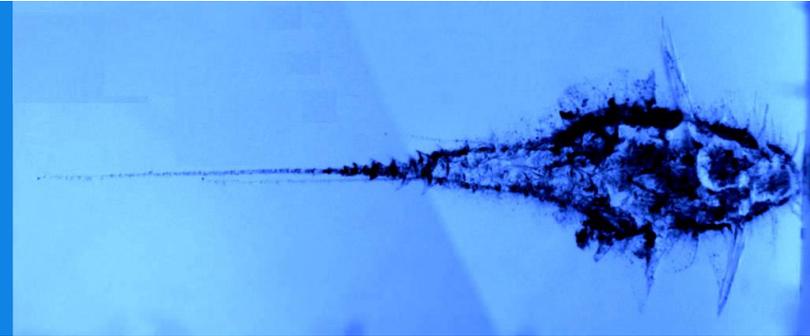


Calcul de la composition élémentaire de la particule incidente:

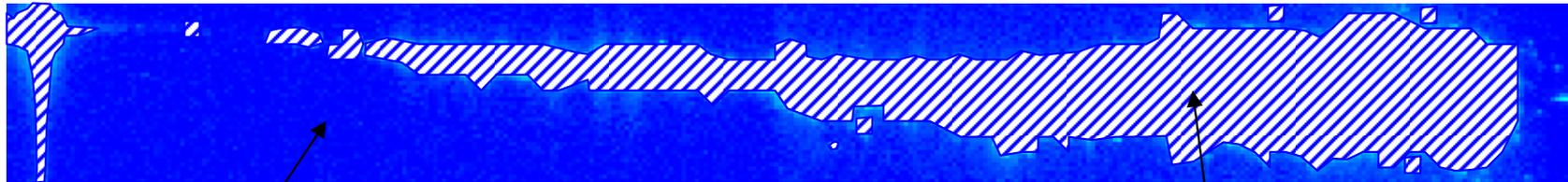


Somme des pixels de l'aérogel
spectre somme $S_{aér}$

Somme des pixels où il y a de la matière
spectre somme S



Calcul de la composition élémentaire de la particule incidente:

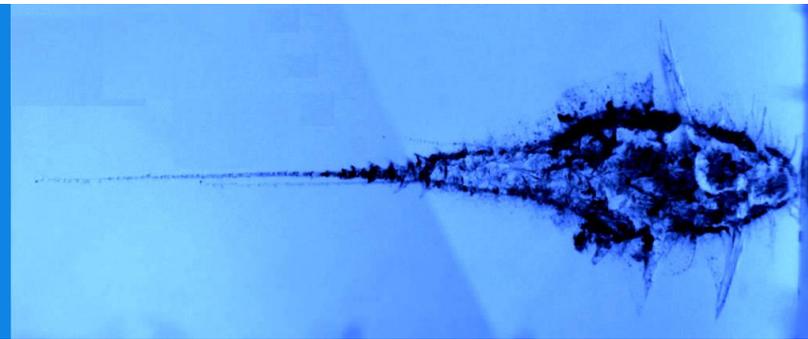


Somme des pixels de l'aérogel
 spectre somme $S_{aér}$

Somme des pixels où il y a de la matière
 spectre somme S

Ajustement des 2 spectres $\rightarrow A_i, A_{i(aér)}$ aire de la bande $K\alpha$ de l'élément i

- Nb de coups pour l'élément i dans l'éch : $n_i = A_i - A_{i(aér)} \cdot \frac{npix_{éch}}{npix_{aér}}$
- Nb de coups corrigé : $N_i = n_i \cdot \frac{r}{t}$
- Masse de chaque élément m_i ?



Calcul de la composition élémentaire de la particule incidente:



Somme des pixels de l'aérogel
 spectre somme $S_{aér}$

Somme des pixels où il y a de la matière
 spectre somme S

Ajustement des 2 spectres $\rightarrow A_i, A_{i(aér)}$ aire de la bande $K\alpha$ de l'élément i

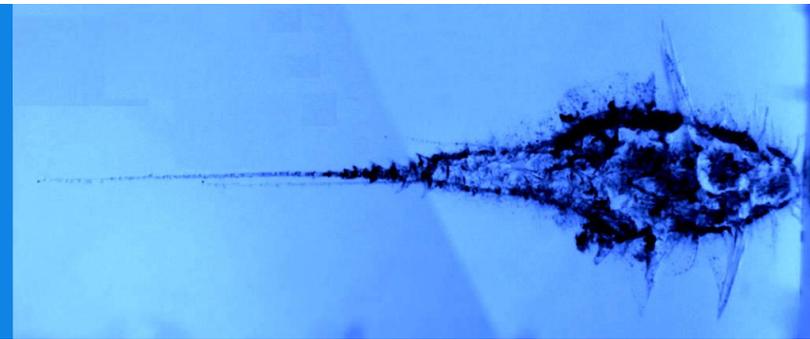
- Nb de coups pour l'élément i dans l'éch : $n_i = A_i - A_{i(aér)} \cdot \frac{npix_{éch}}{npix_{aér}}$
- Nb de coups corrigé : $N_i = n_i \cdot \frac{r}{t}$
- Masse de chaque élément m_i ?

Standard dont $m_{i Std}$ ($m_i / \mu m^2$) connue très précisément pour: K, Ti, Fe, Zn

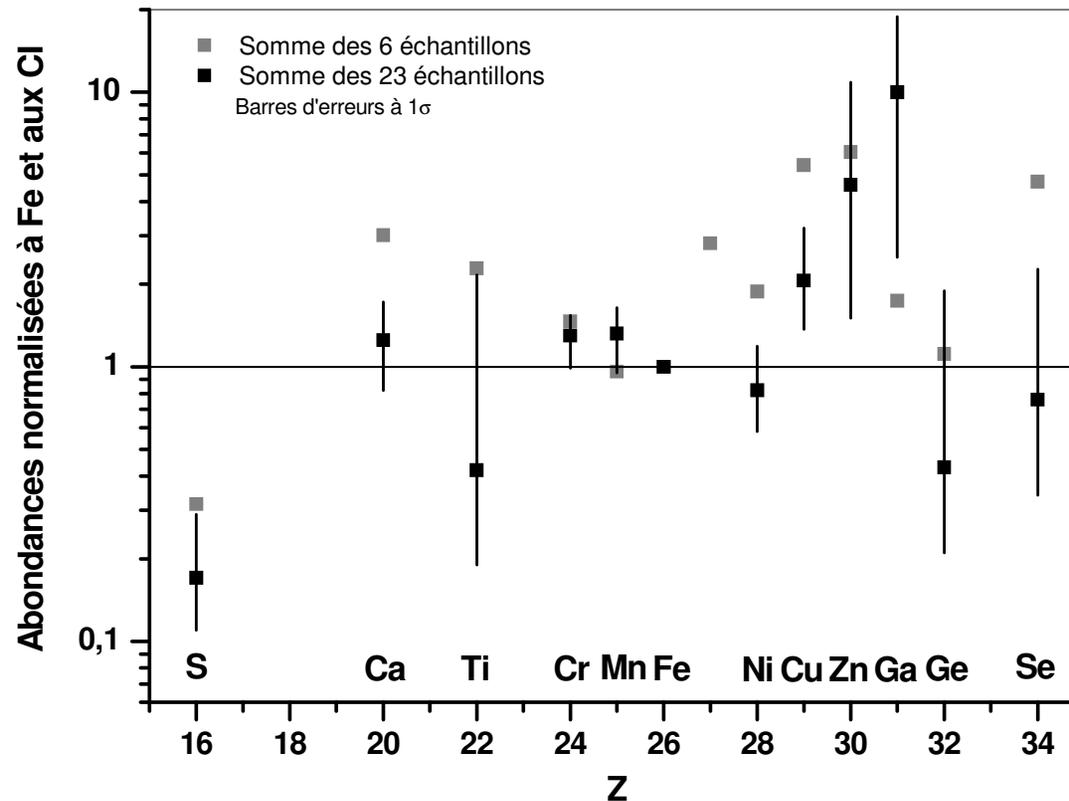
$$m_{Fe} = \frac{N_{Fe}}{N_{FeStd}} \cdot m_{FeStd} \cdot S_{spot}$$

$$m_s = \frac{N_s}{N_{KStd}} \cdot m_{KStd} \cdot S_{spot} \cdot \frac{\sigma_K}{\sigma_s}$$

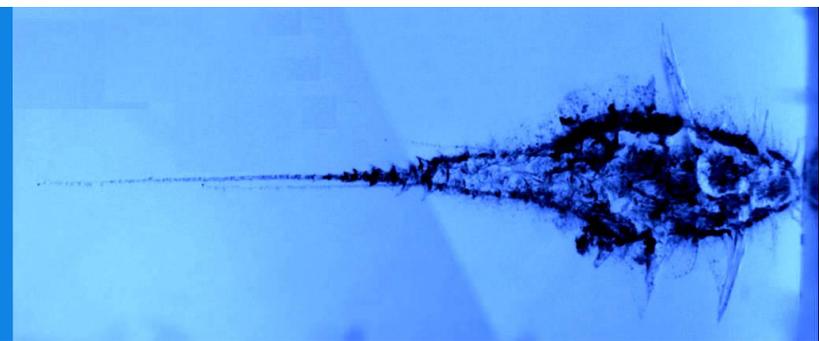
où S_{spot} = taille du faisceau sur le standard



Résultats: comparaison aux abondances chondritiques (Flynn et al., Science, 2006)



- Ca, Ti, Cr, Mn, Ni, Ge, Se en accord avec valeurs des CI
- **sous-abondance** en S
- **enrichissements** en Cu, Zn et Ga



Comparaison aux abondances élémentaires des objets primitifs

Déplétion en soufre

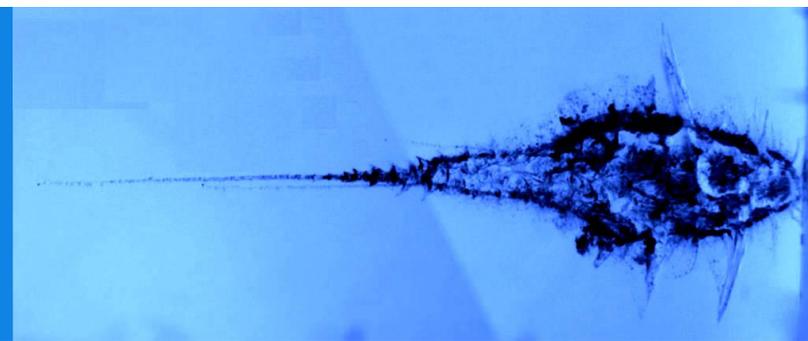
| Échantillons | S/Si |
|----------------------------------|-------------------|
| IDPS chond.⁽¹⁾ | |
| Tous | 0,691 |
| CP-IDPs | 0,810 |
| CS-IDPs | 0,662 |
| Météorites | |
| CI ⁽²⁾ | 1 |
| CM ⁽³⁾ | 0,39 |
| Matrice des CI ⁽⁴⁾ | 0,25 |
| Comètes | |
| Wild 2 ⁽⁵⁾ | 0,13 – 0,5 |
| Halley ⁽⁶⁾ | 0,915 |

Enrichissements en Cu, Zn et Ga

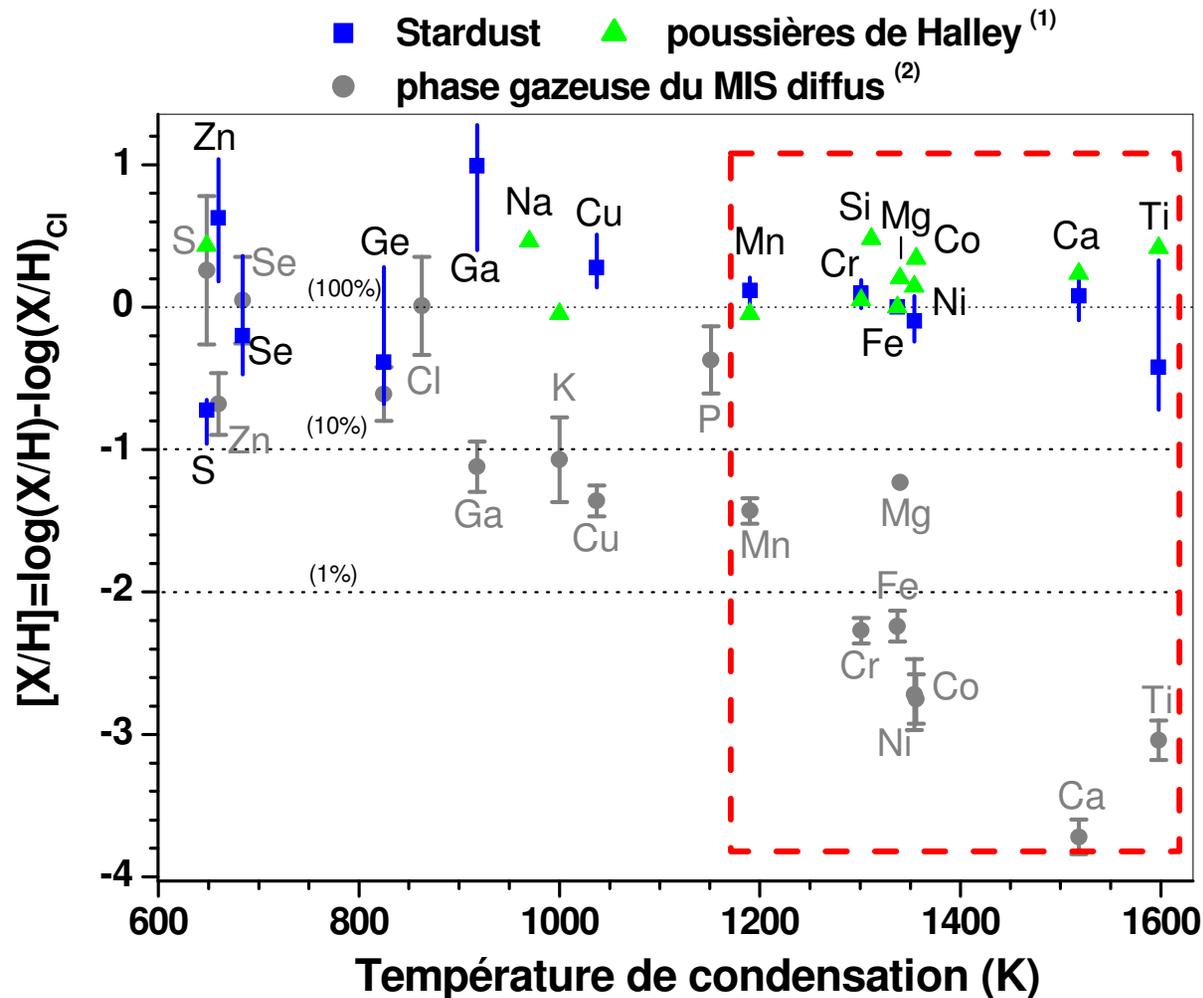
Etude de Flynn et al. (1996):

Tous les éléments ayant une température de condensation inférieure à **1190 K** (Mn), à part le soufre, sont **enrichis par rapport** aux CI dans les IDPs.

- (1) Schramm et al., 1989
- (2) Anders et Grevesse, 1989
- (3) Jarosewich, 1990
- (4) McSween et Richardson, 1977
- (5) Flynn et al., 2006
- (6) Schulze et al., 1997

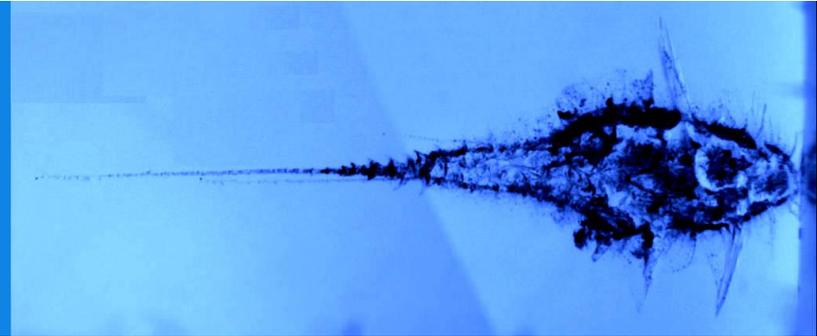


Comparaison aux abondances élémentaires du MIS diffus



(1) Jessberger & Kissel, 1991

(2) Palme & Jones, 2005



Contraintes sur la formation de la matière cométaire ?

- Enrichissements en éléments modérément volatils (Cu, Zn, Ga) observés dans les échantillons Stardust et dans les IDPs:

➔ **échantillonnage d'une zone de la nébuleuse enrichie en éléments volatils ?**

- Déplétion en soufre:

➔ **liée à l'absence de soufre dans les grains du MIS diffus ?**

➔ **processus de condensation incomplet ?**

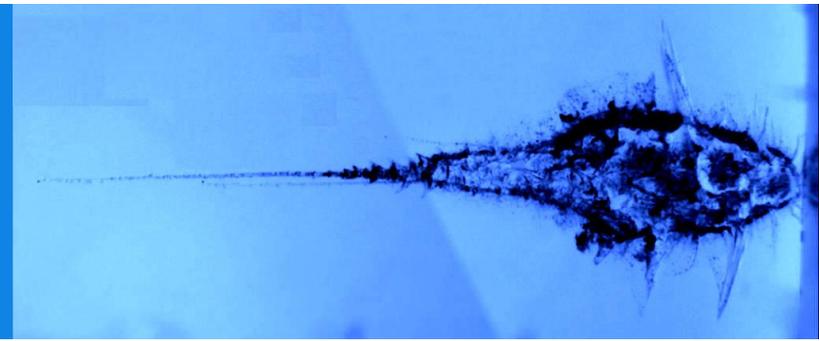
Dans régions internes de la nébuleuse



à $\sim 700 \text{ K}$ (10^{-3} bar)

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

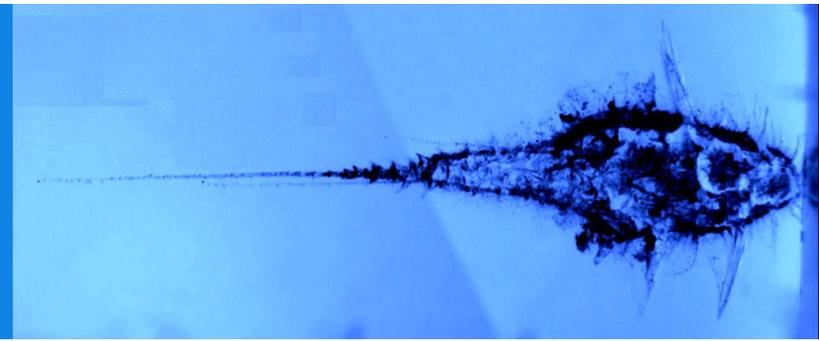
La microspectroscopie IR
Spectres IR
Aérogel
Bande à $3.4\mu\text{m}$
Du MIS à la nébuleuse



- Introduction
- Intégrité des grains collectés
- Composition élémentaire de la comète Wild 2
- **Matière organique de la comète Wild 2 et d'IDPs**
- Conclusions et perspectives

Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

La microspectroscopie IR
Spectres IR
Aérogel
Bande à $3.4\mu\text{m}$
Du MIS à la nébuleuse



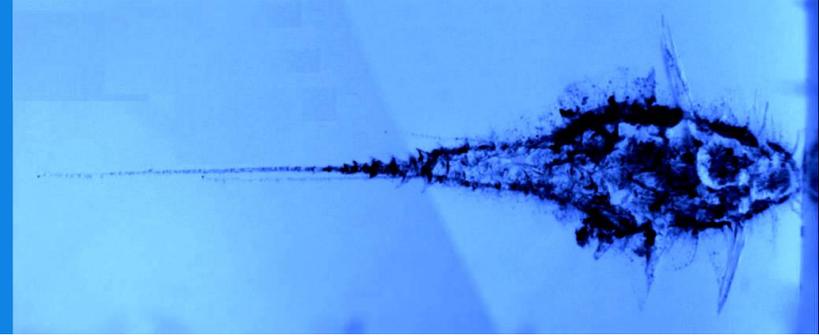
La microspectroscopie IR

- Spectromètre couplé à un microscope IR
- Gamme spectrale: $650\text{-}4000\text{ cm}^{-1}$ ($15.4 - 2.5\ \mu\text{m}$)
- Utilisé en mode réflexion ou transmission
- Résolution de 4 cm^{-1}



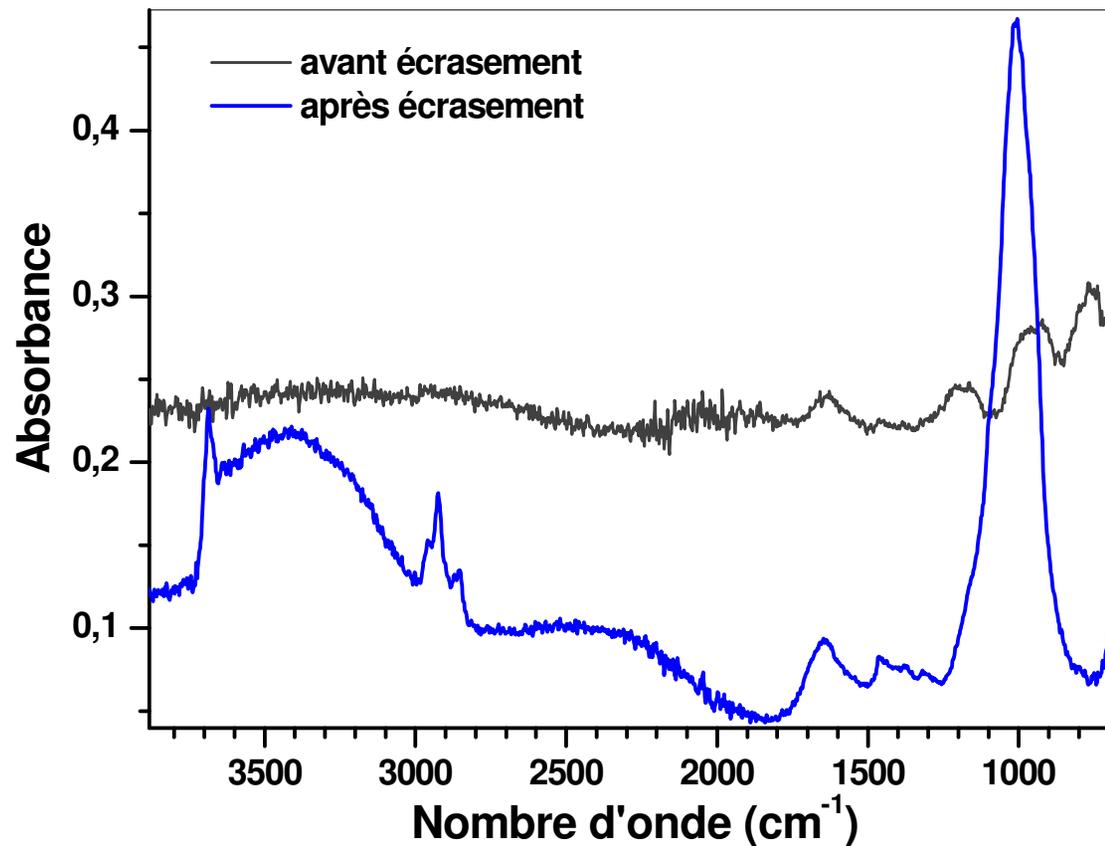
Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

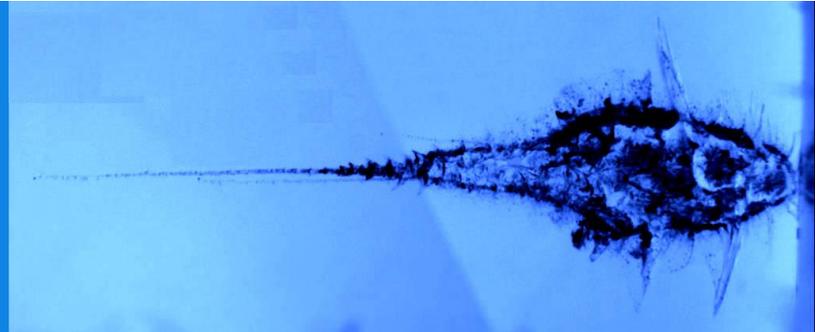
La microspectroscopie IR
Spectres IR
Aérogel
Bande à $3.4\mu\text{m}$
Du MIS à la nébuleuse



Préparation des échantillons

Spectre IR d'un grain de la météorite Orgueil





IDPs L2021C5

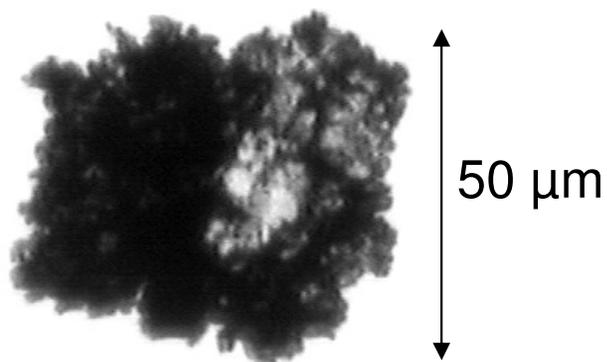
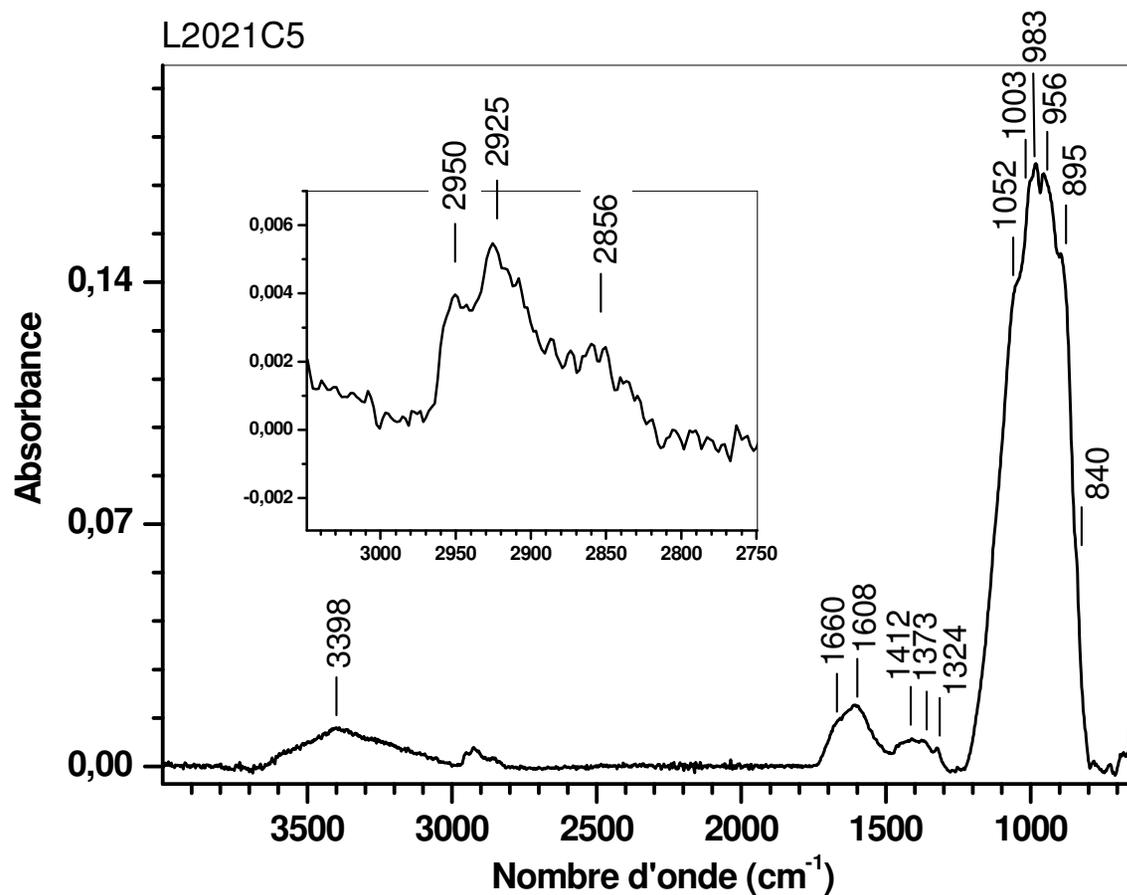
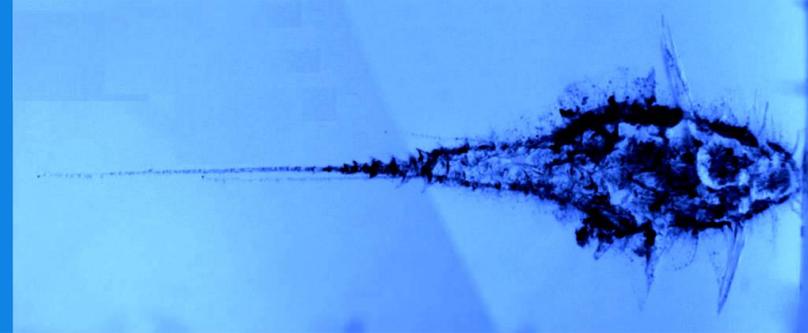


Image optique de la particule après écrasement dans une cellule à compression

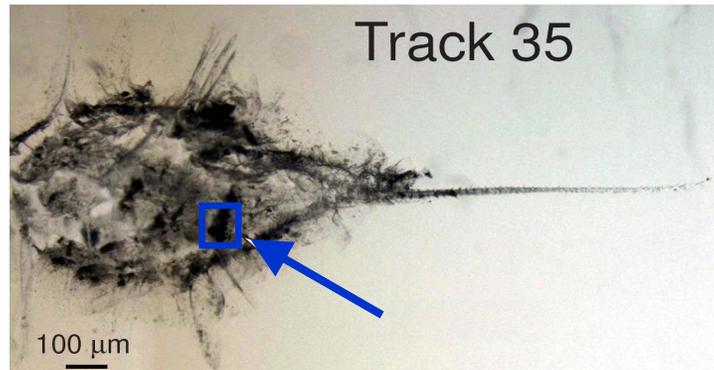


Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

La microspectroscopie IR
Spectres IR
Aérogel
Bande à 3.4 μm
Du MIS à la nébuleuse

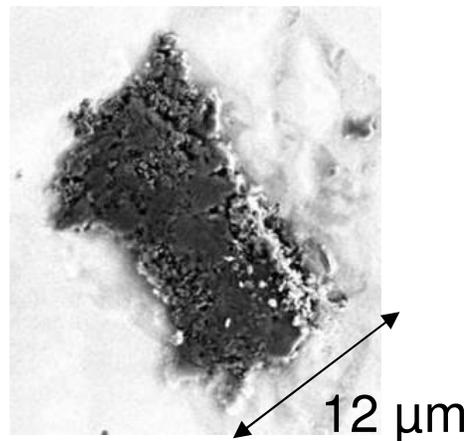
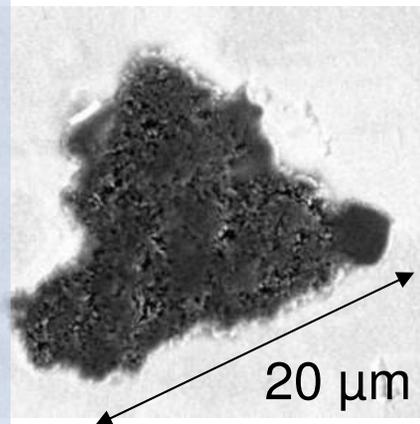


Échantillons Stardust

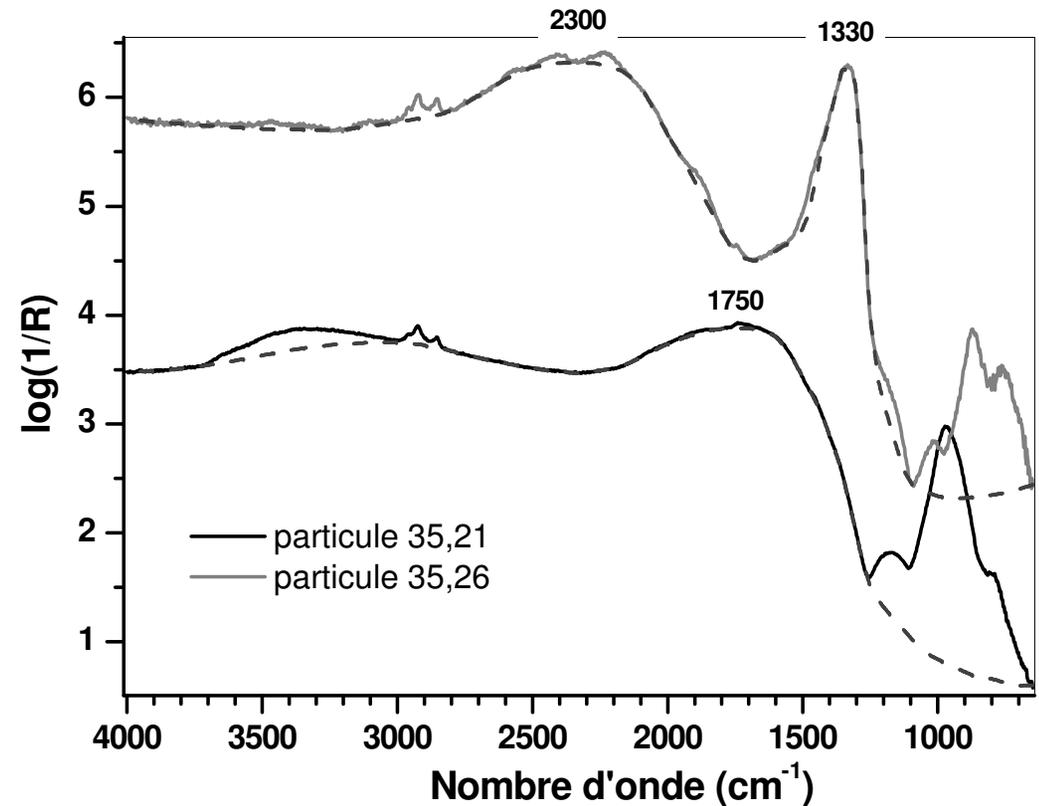


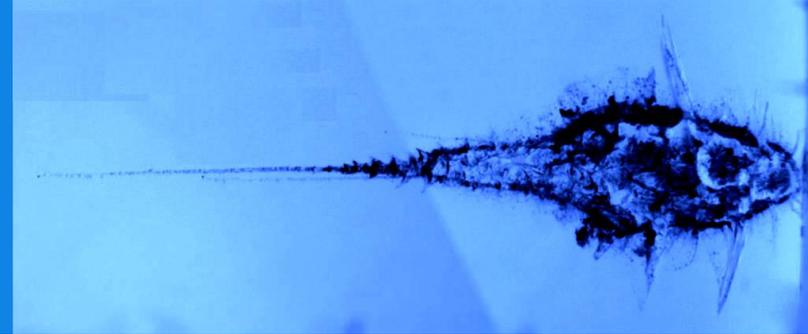
C2054,0,35,21,0

C2054,0,35,26,0

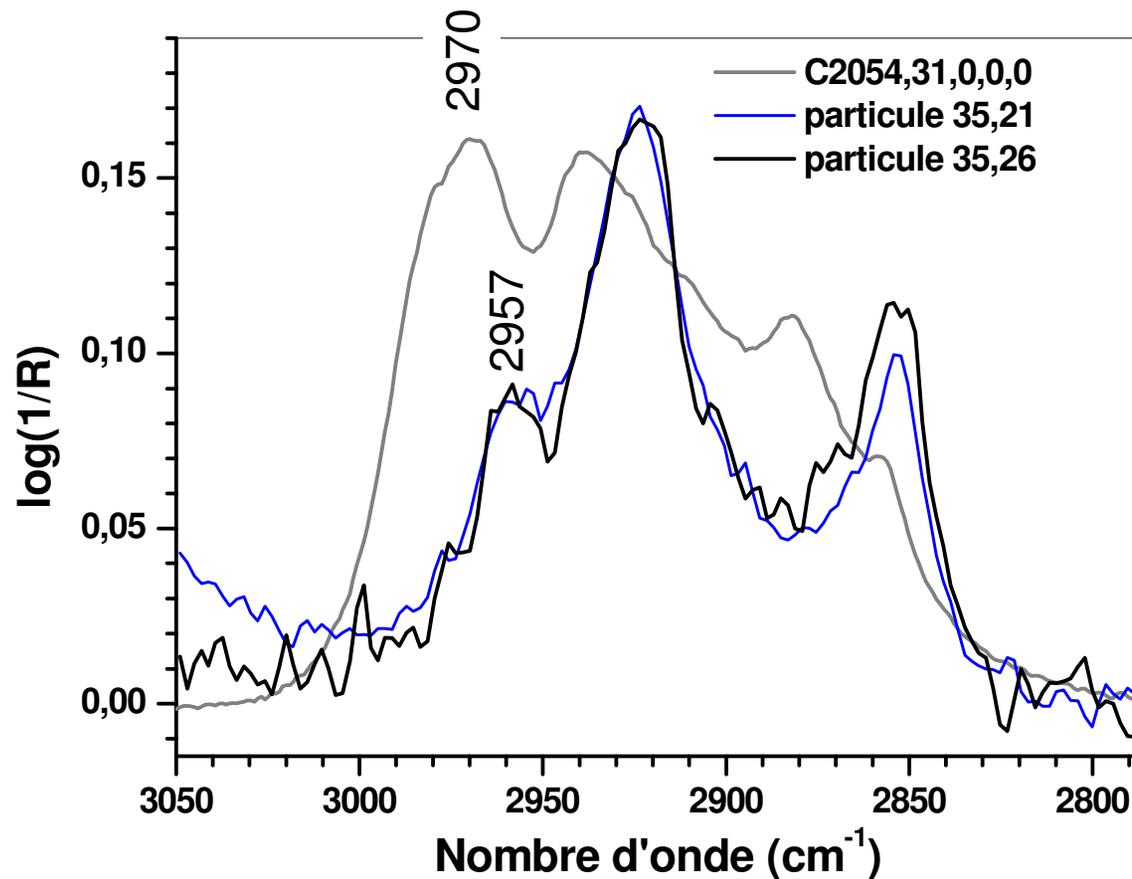


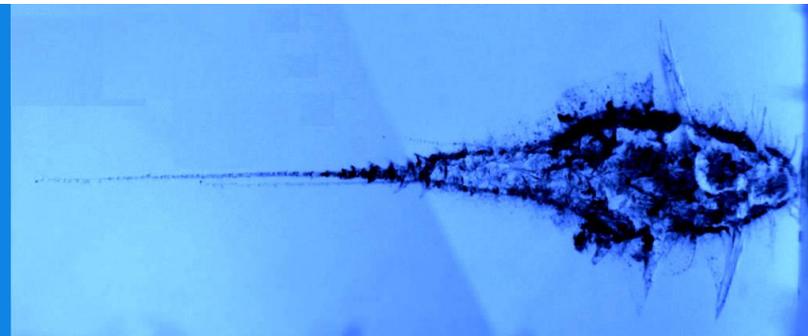
Images MEB ©LSPES/IAS





Bande à $3.4\mu\text{m}$ ($\sim 2941\text{cm}^{-1}$) des particules 35,21 et 35,26 et de l'aérogel





Rapport CH₂/CH₃

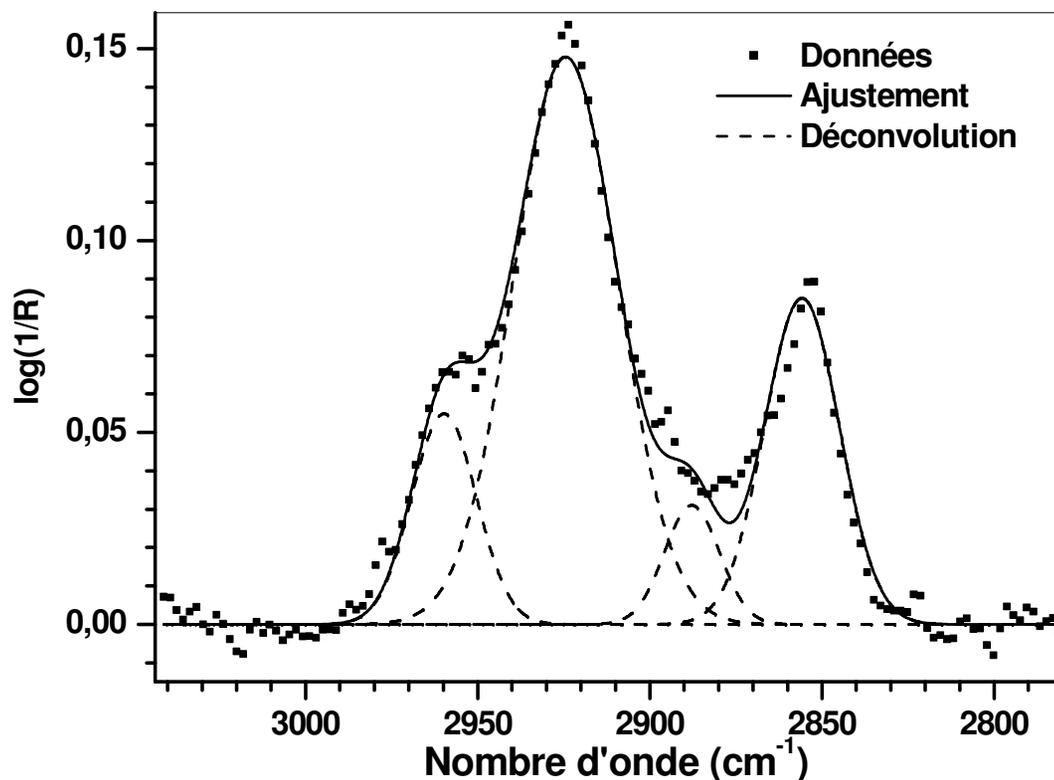
$$\frac{\text{CH}_2}{\text{CH}_3} = \frac{N(\text{aCH}_2)}{N(\text{aCH}_3)}$$

$$\text{avec } N(\text{aCH}_x) = \frac{(\int \tau_\nu d\nu)_{\text{CH}_x}}{A(\text{a} - \text{CH}_x)}$$

- τ épaisseur optique
- $A(\text{a} - \text{CH}_x)$ Dartois et al. (2004)
 - $A(\text{a} - \text{CH}_2) = 8.4 \pm 0.1 \cdot 10^{-18} \text{ cm.group}^{-1}$
 - $A(\text{a} - \text{CH}_3) = 1.25 \pm 0.1 \cdot 10^{-17} \text{ cm.group}^{-1}$

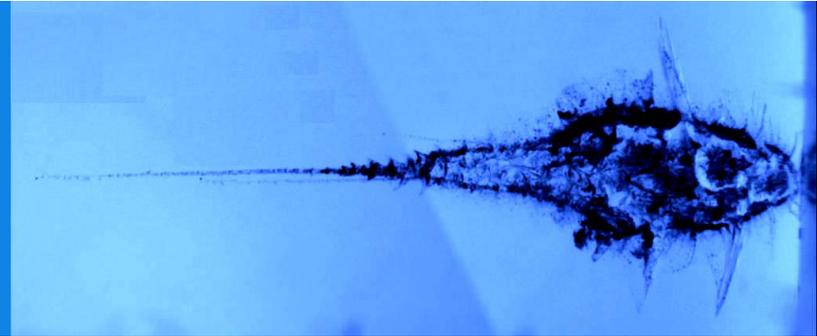
| Échantillons | CH ₂ /CH ₃ |
|--------------|----------------------------------|
| 35,21 | 6.5 ± 1.4 |
| 35,26 | 6.3 ± 1.8 |
| L2021C5 | 3.5 ± 0.9 |

Particule 35,21

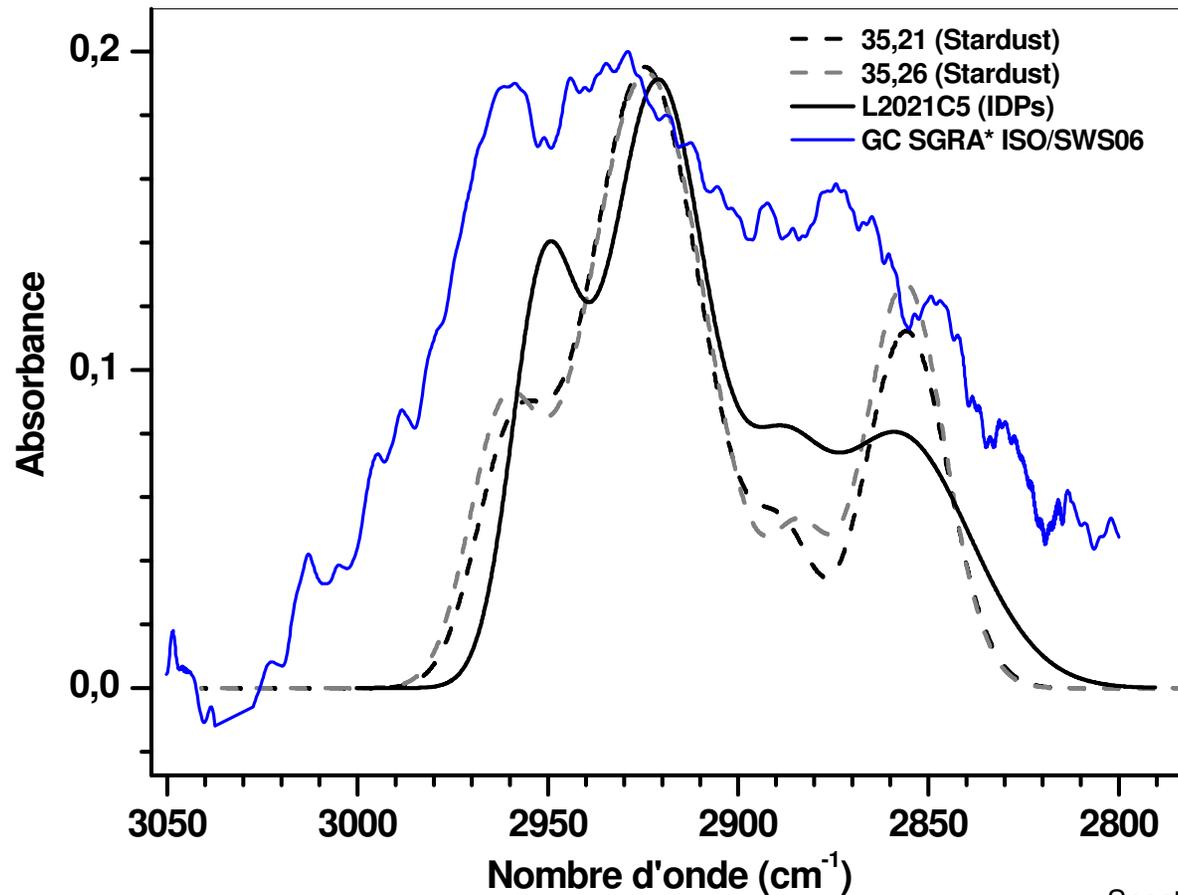


Introduction
Intégrité des grains
Composition élémentaire
Matière organique
Conclusions & Perspectives

La microspectroscopie IR
Spectres IR
Aérogel
Bande à 3.4 μm
Du MIS à la nébuleuse ?



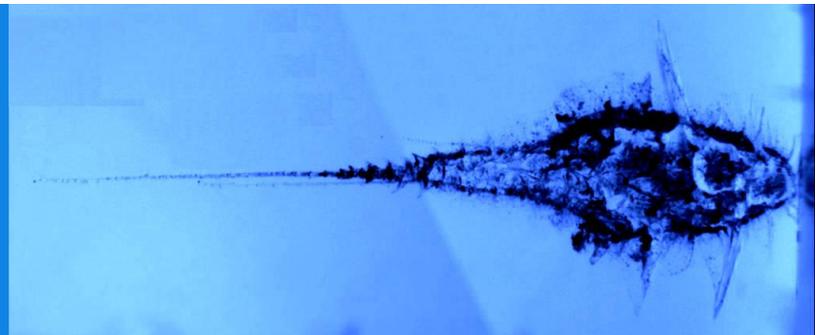
Comparaison au MIS diffus vers le Centre Galactique



Spectre de la source du centre galactique fourni par E. Dartois

Introduction
 Intégrité des grains
 Composition élémentaire
 Matière organique
 Conclusions & Perspectives

La microspectroscopie IR
 Spectres IR
 Aérogel
 Bande à 3.4 μ m
 Du MIS à la nébuleuse ?

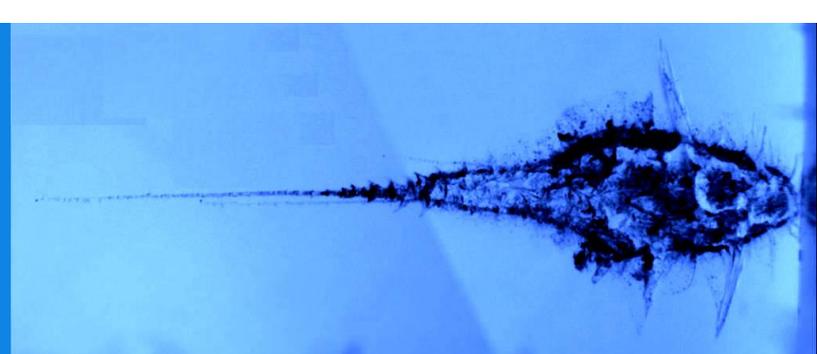


| Objets | | CH ₂ /CH ₃ |
|--------------------------|----------|----------------------------------|
| Tagish Lake (CI2) | (1) | 7.3 |
| Wild 2 | 35,21 | 6.5 ± 1.4 |
| | 35,26 | 6.3 ± 1.8 |
| | 35,17 | 6.1 ± 1.0 |
| | 35,18 | 9.6 ± 2.5 |
| IDPs | L2021C5 | 3.5 ± 0.9 |
| | 6 IDPs | (3) 2.8 à 5.5 |
| | Hydratés | (4) 2.31 ± 1.74 |
| | Anhydres | 2.46 ± 1.32 |
| Murchison (CM) | (5) | ~2 |
| Orgueil (CI) | (6) | ~2 |
| Centre Galactique | (7) | ~2 |

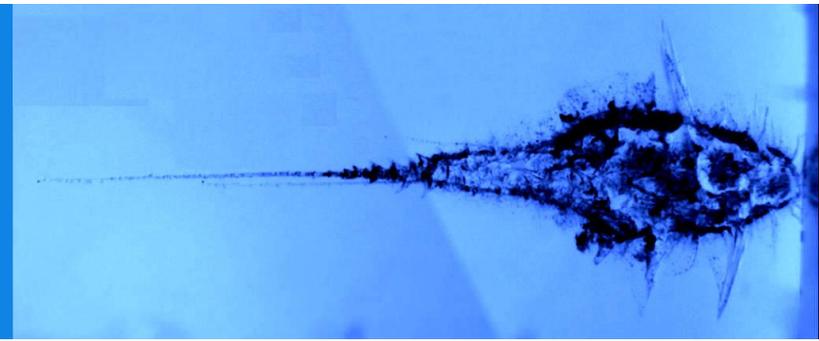
Longueur des chaînes
 aliphatiques

- Matière organique de Wild 2 pas interstellaire
- Histoires différentes pour la matière organique présente dans les différents objets primitifs
- Matière organique de Wild 2 s'apparente à celle présente dans Tagish Lake

- (1) Matrajt et al., 2004
- (2) Rotundi et al., 2008
- (3) Matrajt et al., 2005
- (4) Flynn et al., 2003
- (5) Pendleton et al., 1994
- (6) Ehrenfreund et al., 1991
- (7) Dartois et al., 2004

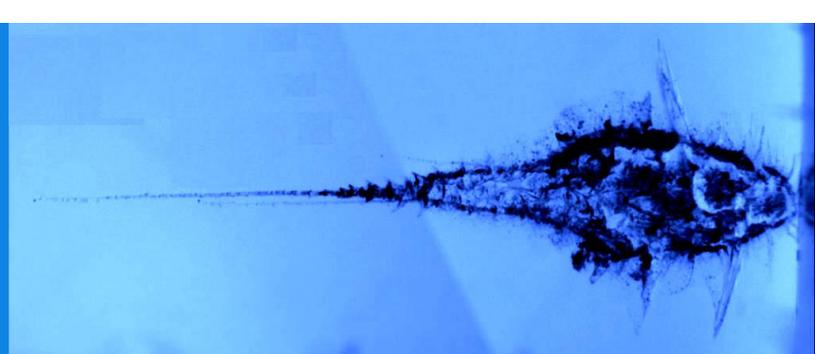


- Introduction
- Intégrité des grains collectés
- Composition élémentaire de la comète Wild 2
- Composition moléculaire de la comète Wild 2 et d'IDPs
- **Conclusions et perspectives**



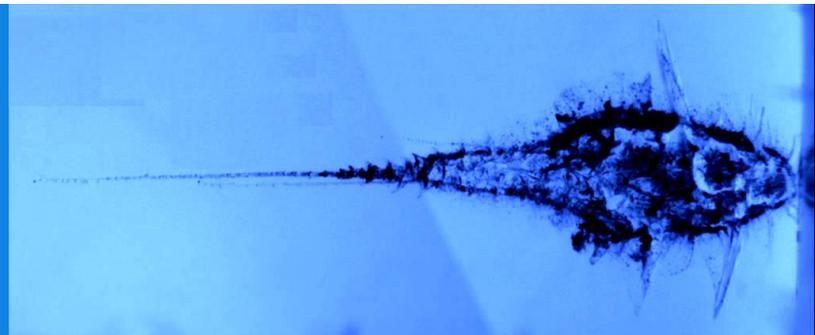
Conclusions

- **Intégrité des grains collectés:** modèle empirique de ralentissement des grains.
(Grossemy et al., *PSS*, 2007)
- **Composition élémentaire de Wild 2:**
 - abondances chondritiques pour Ca, Ti, Cr, Mn, Ni, Ge, Se
 - enrichissements en Cu, Zn et Ga
 - déplétion en soufre
(Flynn et al., *Science*, 2006)
- **Matière organique de Wild 2:**
chaînes aliphatiques plus longues que dans les grains du MIS.
(Rotundi et al., *MAPS*, 2008)



Autres résultats importants

- **Minéraux hautes températures: forstérite, CAIs (Ca-Al-rich Inclusions)**
(Zolensky et al., *Science*, 2006)
- **Analyse des gaz rares: rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$ élevé**
(Marty et al., *Science*, 2008)
- **Anomalies isotopiques plus rares que dans les météorites ou les IDPs**
(McKeegan et al., *Science*, 2006)
- **Le lien entre les comètes et les CP-IDPs n'est plus aussi clair**
Phases spécifiques aux CP-IDPs: enstatite ayant une morphologie très particulière
GEMS (Glass with Embedded Metal and Sulfides)
(Ishii et al., *Science*, 2008)



Perspectives

- **Poursuivre l'analyse de la composition élémentaire de la comète**
 - Confirmation ou non des déplétions et enrichissements observés
 - Évaluation de l'absorption de la fluorescence de S par l'aérogel
 - Caractérisation de l'aérogel
- **Calculs de thermodynamique des processus de condensation**
- **Poursuivre l'analyse des IDPs et des MMAs**
- **Prochaine grande étape:** mise en orbite de la mission **ROSETTA** autour de la comète 67P/Churyumov-Gerasimenko en 2014 et atterrissage de **Philae** sur son noyau.
 - **CIVA:** microscopie et spectrométrie IR
 - **COSIMA:** spectrométrie de masse à temps de vol