

Matière organique cométaire :

Expériences de laboratoire & futures observations spatiales

Nicolas FRAY



2^{ème} journée ESEP « ASTROCHIMIE : Simuler, Modéliser, Détecter »
7 novembre 2013

The tail of the comet McNaught over the Pacific seen from Paranal in January 2007. The Moon is seen on the right.

Credit: ESO/H.H.Heyer

Les comètes : Généralités



Noyau de 9P/Tempel 1

Queue d'ions
 $10^7 - 10^8$ km



Queue de poussières
 $10^6 - 10^7$ km



Coma
 $10^4 - 10^5$ km



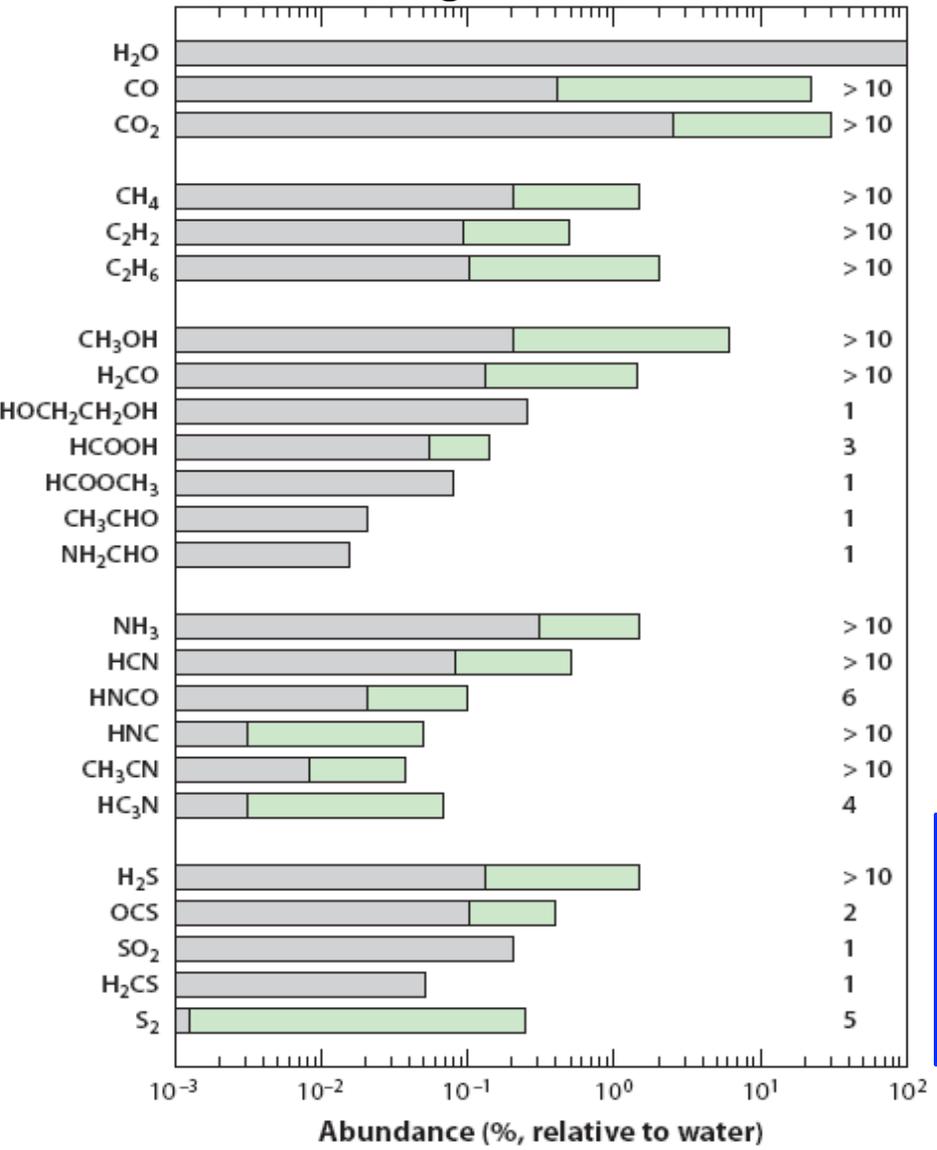
Noyau
 $\sim 1 - 10$ km



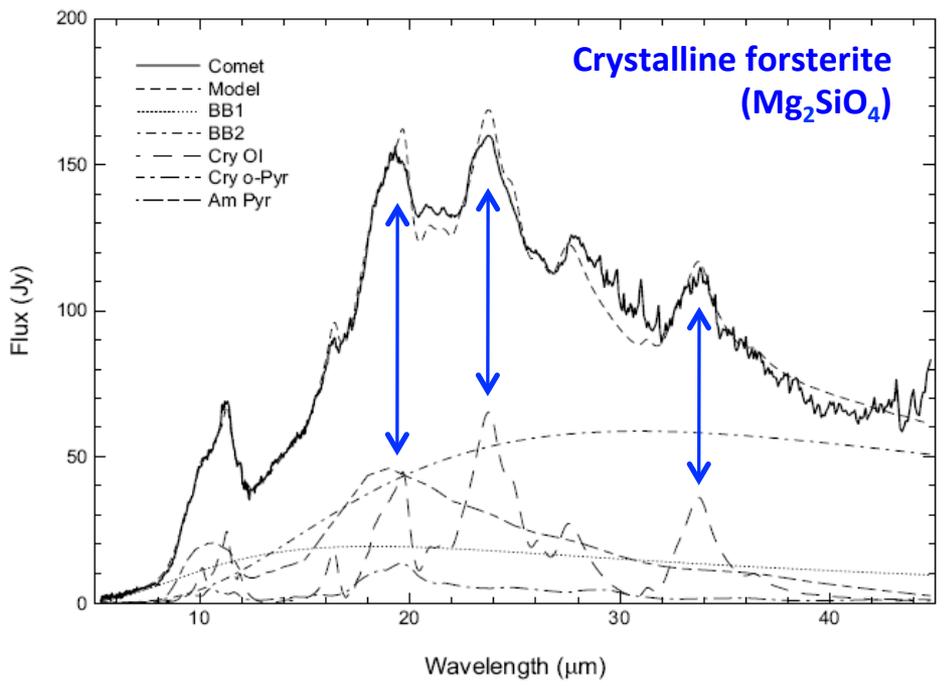
Comète C/1995 O1 (Hale-Bopp) en Mars 1997

Les comètes : Phase gazeuse et phase minérale

Phase gazeuse



Phase minérale



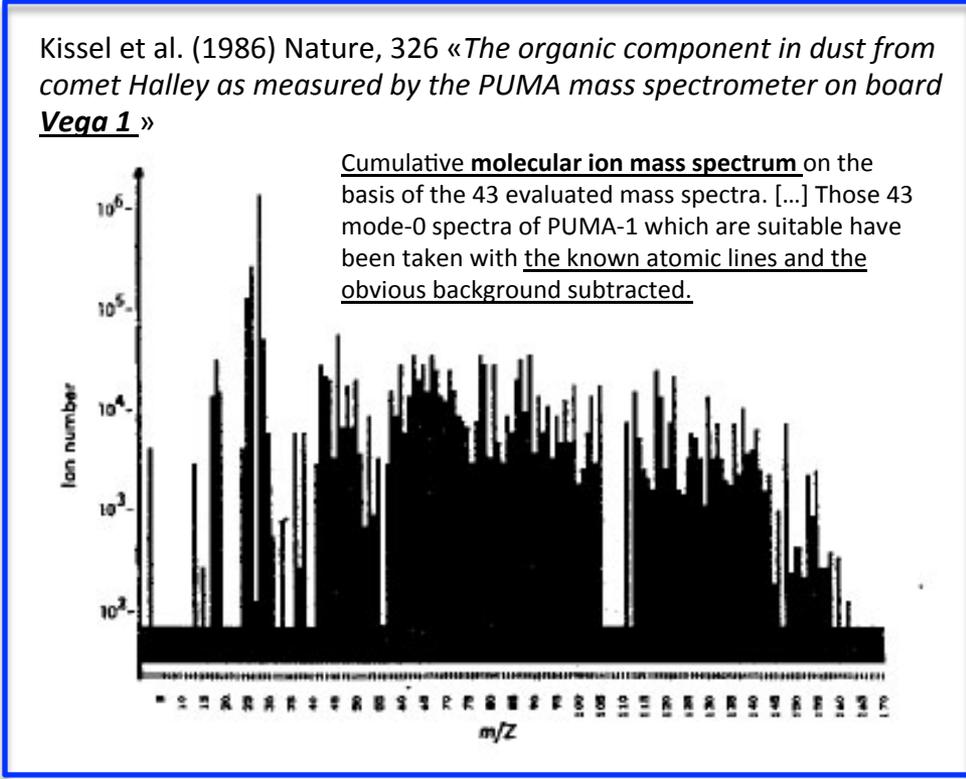
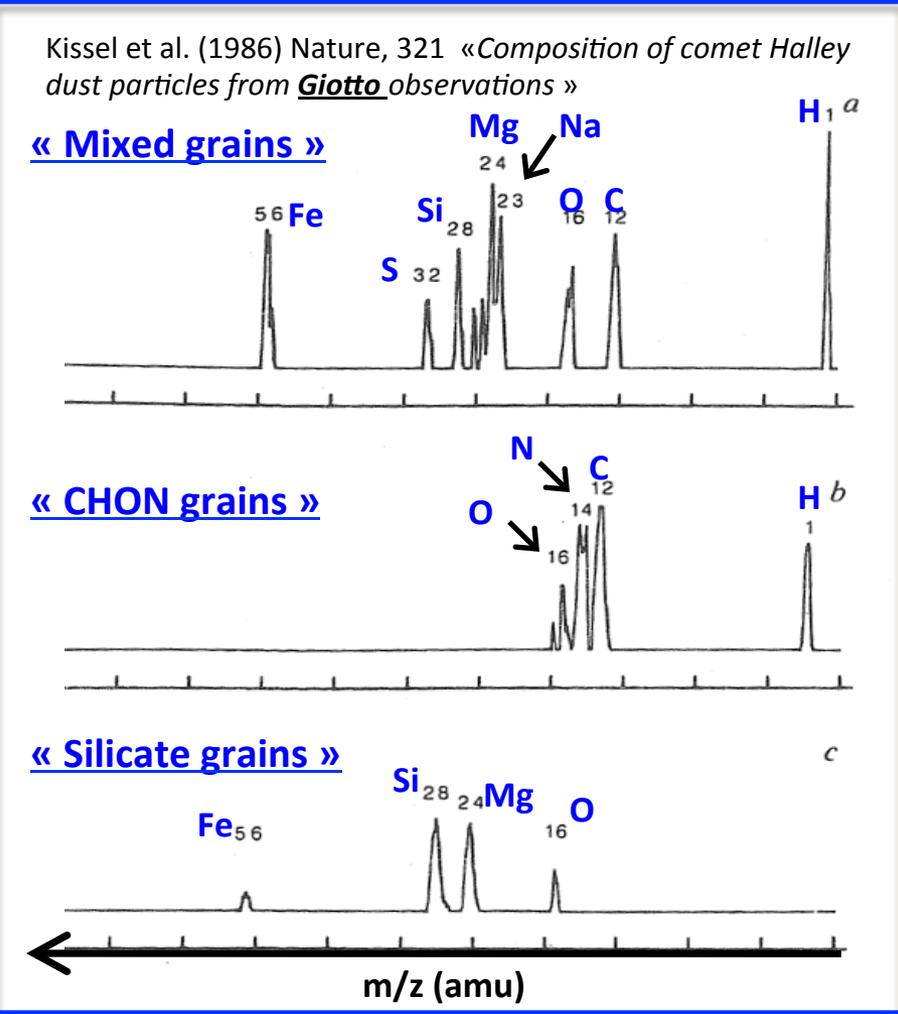
Crovisier (2000) ASP Conf. Series, 196

Les observations depuis le sol et l'orbite terrestre permettent d'obtenir de nombreuses informations sur les phases gazeuses et minérales

Adapted from Crovisier (2006) Proc. IAU 229
by Mumma & Charnley (2011) ARA&A, 49, 471-524

Les comètes : Phase organique réfractaire

Analyse des grains présents dans la coma de 1P/Halley par spectrométrie de masse in-situ



Existence d'une matière organique macromoléculaire et solide dans les grains cométaires

Cette matière organique réfractaire est très difficile à observer depuis le sol ou l'orbite terrestre
⇒ **Besoin d'analyses in-situ par spectrométrie de masse.**

Matière organique réfractaire dans les comètes :

Problématique

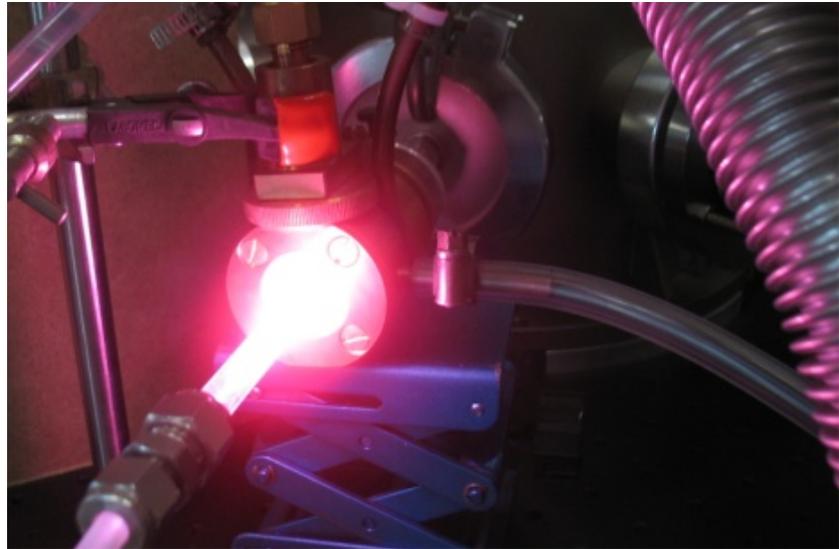
- Une matière organique est présente en phase solide dans les grains cométaires.
- La fraction massique de matière organique dans les grains cométaires semble être nettement plus élevée que dans les météorites carbonées.
- La nature physique et chimique de cette matière organique réfractaire contenue dans les comètes reste très largement méconnue.

⇒ Nature physico-chimique de la matière organique cométaire ?

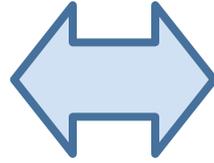
Méthodologie

- Couplage des approches expérimentale & observationnelle

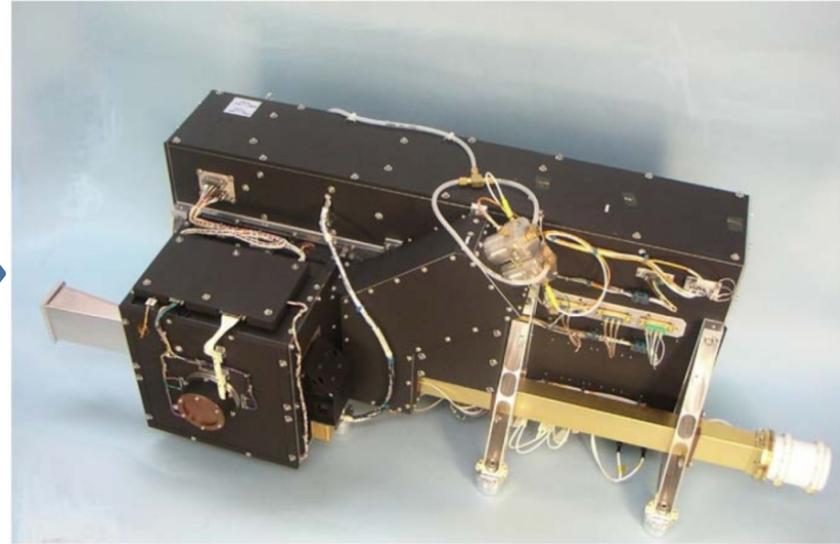
EXPERIENCE : OREGOC



Production d'une matière organique solide par photolyse et réchauffement de mélanges de glaces.



OBSERVATION : COSIMA



Analyses directes des grains cométaires par spectrométrie de masse in-situ

⇒ **Nature physico-chimique de la matière organique cométaire ?**

Approche expérimentale : OREGOC

OREGOC : ORigine et Évolution des Glaces et des composés Organiques Cométaires.

Objectifs :

- ⇒ Synthèse d'analogues potentiels à la matière organique cométaire
- ⇒ Production d'échantillon pour la calibration d'instruments spatiaux
- ⇒ Evolution thermique sur une large gamme de T
- ⇒ Processus solide -> gaz

Approche expérimentale : OREGOC

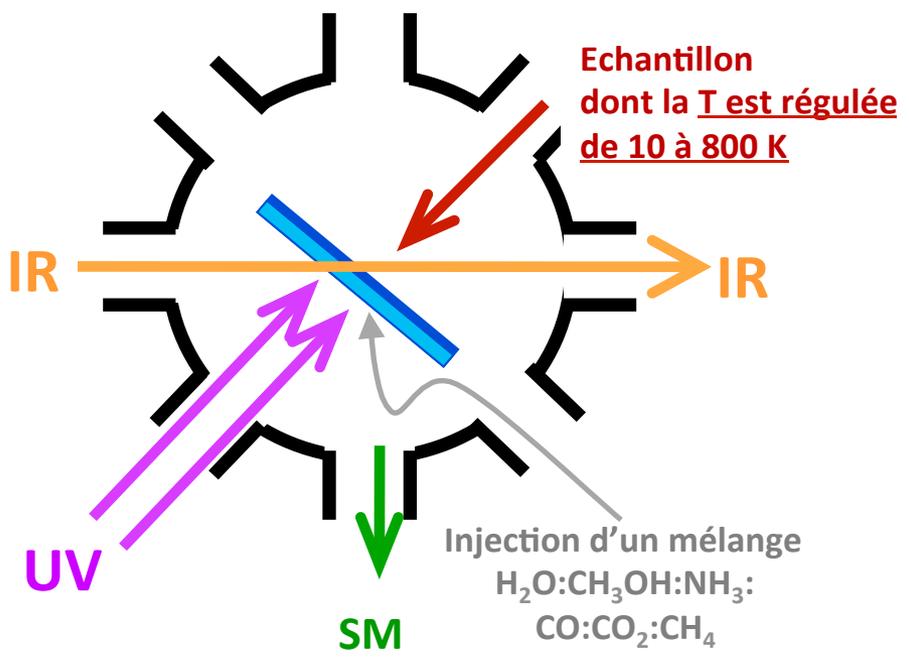
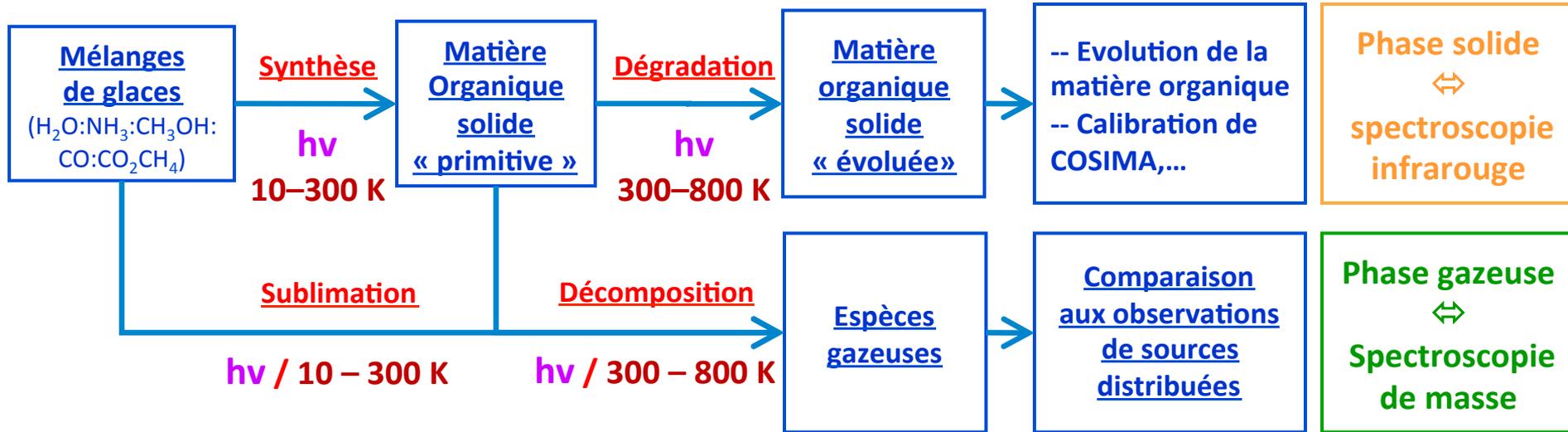


Schéma de principe du dispositif expérimental

- 2 sources d'énergie :
 Photolyse VUV
 Chauffage
- 2 techniques d'analyses :
 Spectroscopie infrarouge (solide)
 Spectroscopie de masse (gaz)

- Approche « globale » :
 ⇒ Protocole expérimentaux contraints par les observations astrophysiques
 - Nature du mélange initial de glaces
 - Spectre VUV pour la photolyse
 - Réchauffement lent

Dispositif expérimental « OREGOC » - Sept. 2013



- 2 sources d'énergie ($h\nu$ VUV & T)
- 2 techniques d'analyses (IR et SM)

Cryo-générateur
10 – 800 K

8.7-9 mBAR

Capteurs P

Enceinte
cryogénique

Détecteur IR

Rampe d'injection

Spectro IRTF

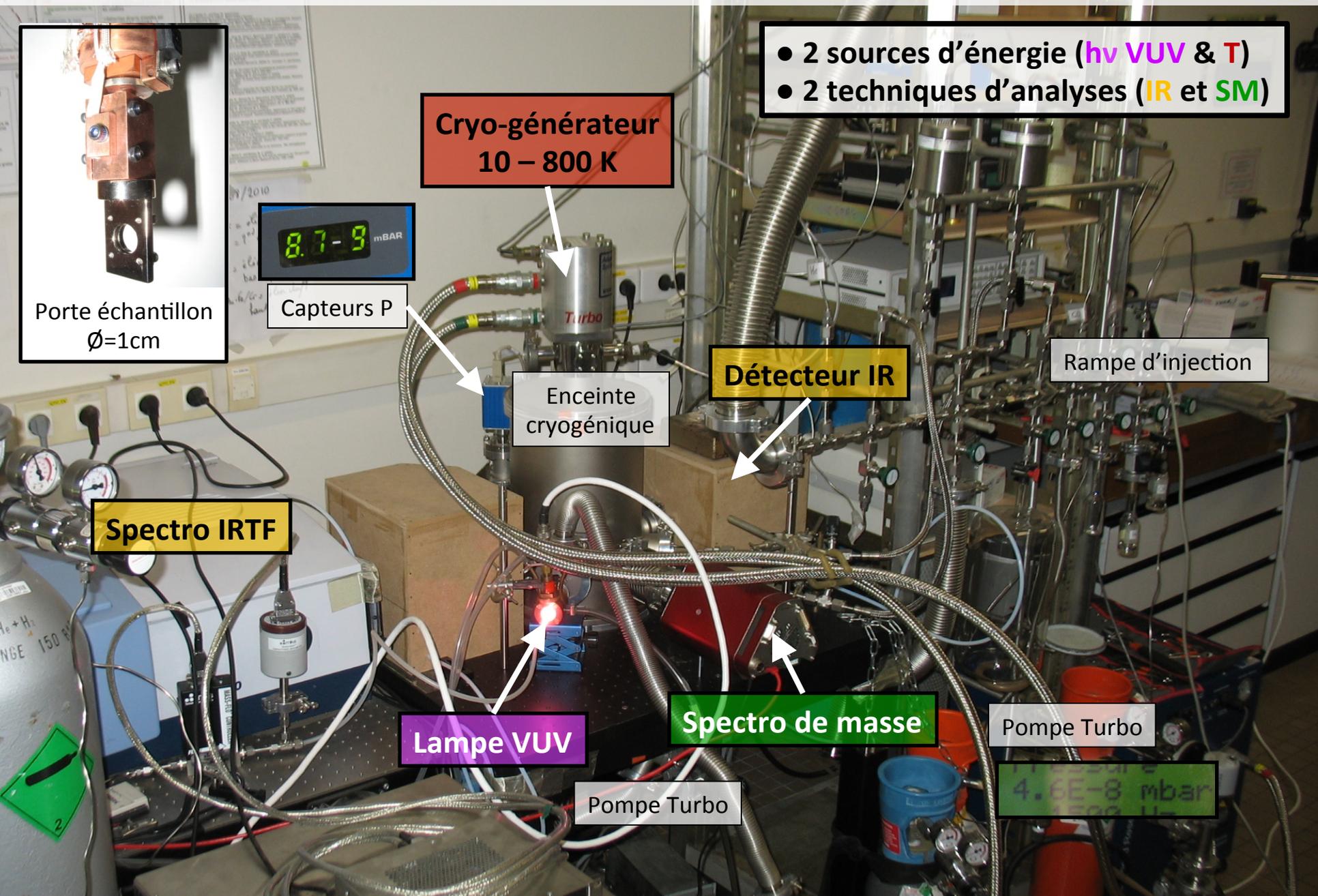
Lampe VUV

Spectro de masse

Pompe Turbo

Pompe Turbo

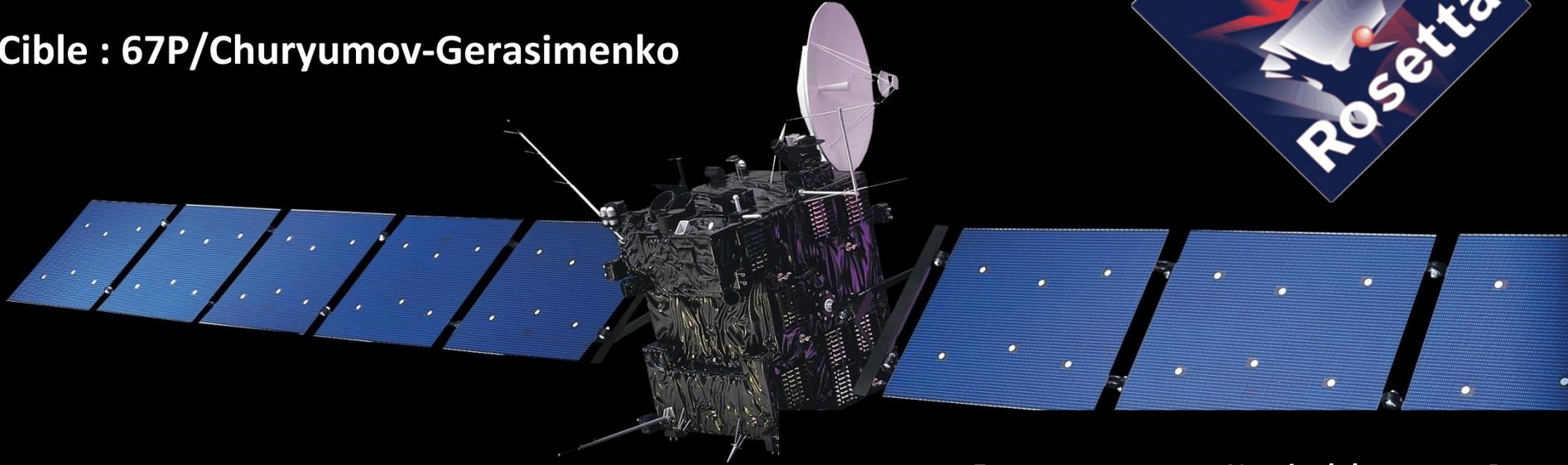
4.6E-8 mbar



Rosetta : Généralités

Lancement : 2 Mars 2004

Cible : 67P/Churyumov-Gerasimenko



1^{ère} mise en orbite autour d'un noyau cométaire

1^{er} atterrissage sur un noyau cométaire

1 orbiteur : 11 instruments (165 kg)

1 lander : 10 instruments (21 kg)

Event	Nominal date	R _H (AU)
Launch	2 March 2004	
...	...	
Exit deep space hibernation	20 January 2014	~ 4.5
Rendezvous manoeuvre	21 May 2014	~ 4.0
Arrive at comet	6 August 2014	~ 3.6
Start global mapping	27 August 2014	~ 3.5
Lander delivery	11 November 2014	~ 3.0
Perihelion passage	13 August 2015	~ 1.25
End of mission	31 December 2015	~ 2.0

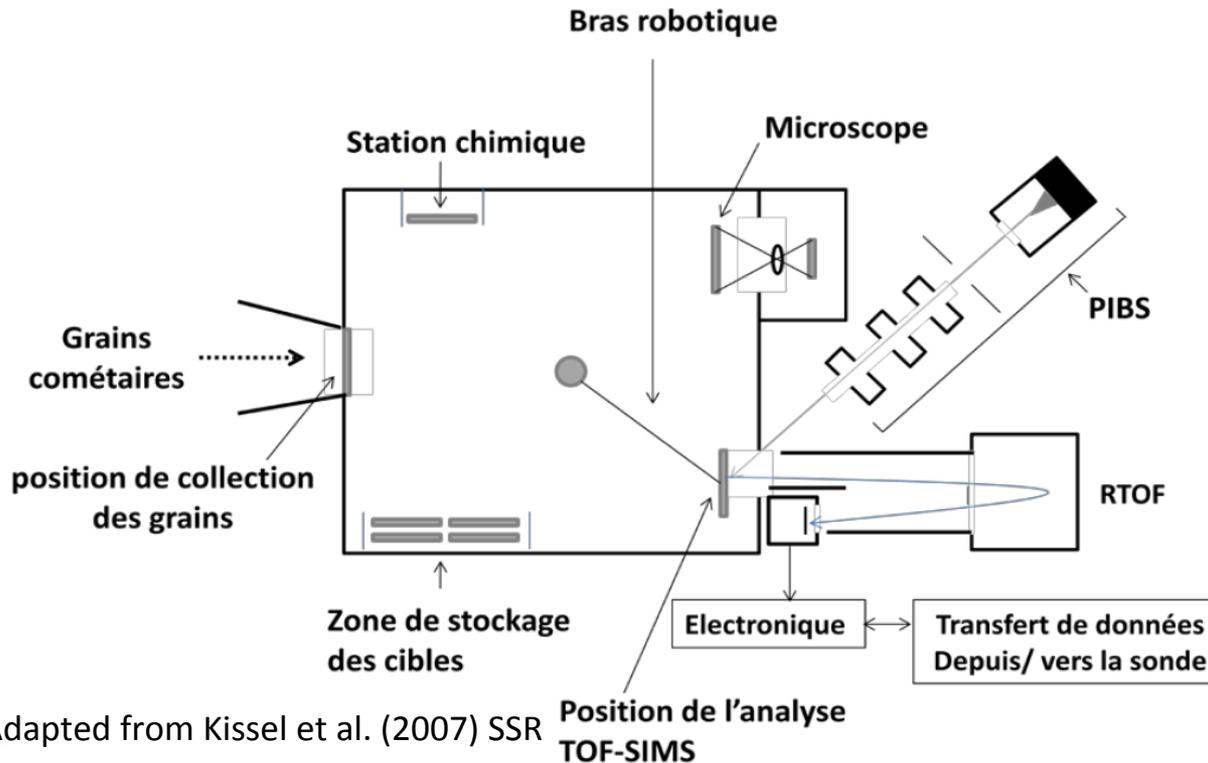
COSIMA : un spectromètre de masse dédié à l'étude des grains cométaires.

- **COSIMA** : **CO**metary **S**econdary **I**on **M**ass **A**nalyzer -- 19.8 kg & 20.4 W
- **Technique analytique** : TOF – SIMS Time of Flight – Secondary Ions Mass Spectrometry
- **Caractéristiques principales** :

- Gamme de masse : de 1 à 3500 amu
- Résolution ($m/\Delta m$) > à 1500 à $m = 100$ amu (FWHM)
- Résolution microscope : 14 μm /pixels
- Taille du faisceau d'ions primaire sur l'échantillon : environ 50 μm .



« Associated Scientist »
depuis Septembre 2012



Principaux objectifs :

- **Analyse élémentaire et isotopique des grains.**
- **Identifications moléculaires et minérales.**

Adapted from Kissel et al. (2007) SSR

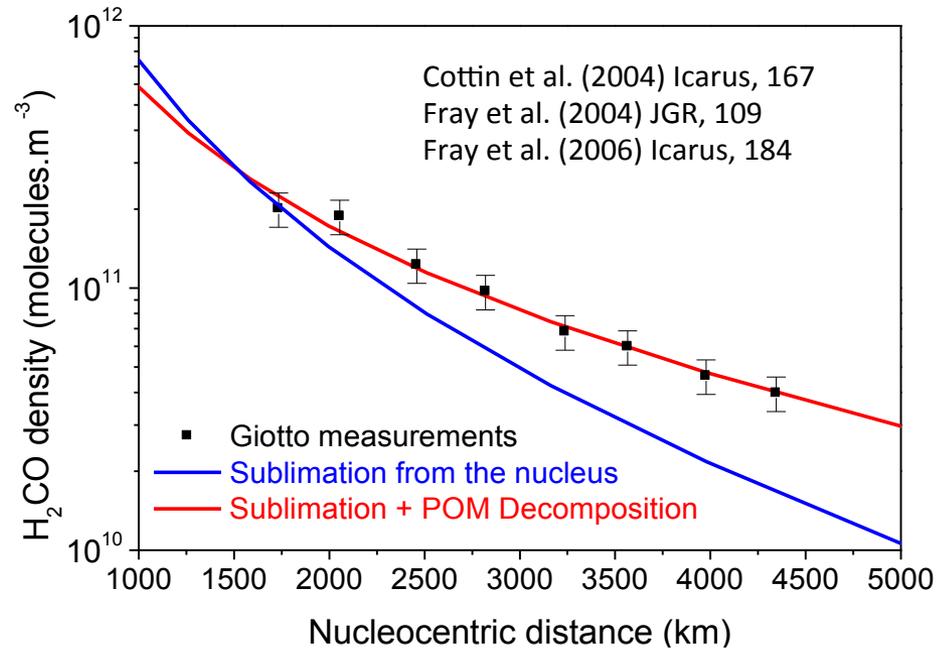
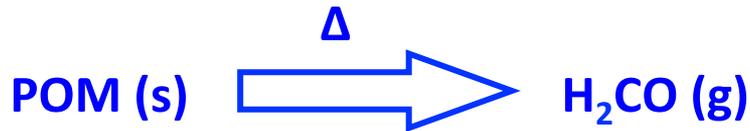


Contexte : Le POM et la source distribuée de H₂CO

POM :

- PolyOxyMéthylène
- Polymère du formaldéhyde (H₂CO)
- $-(\text{CH}_2\text{-O})_n-$

Travaux « Pré-OREGOC » réalisés au LISA entre 1996 et 2004



A ce jour, la décomposition thermique du POM est la meilleure explication à la source distribuée de H₂CO gazeux observée dans les environnements cométaires.

Néanmoins, la présence de POM dans les noyaux et les grains cométaires n'est pas prouvée...

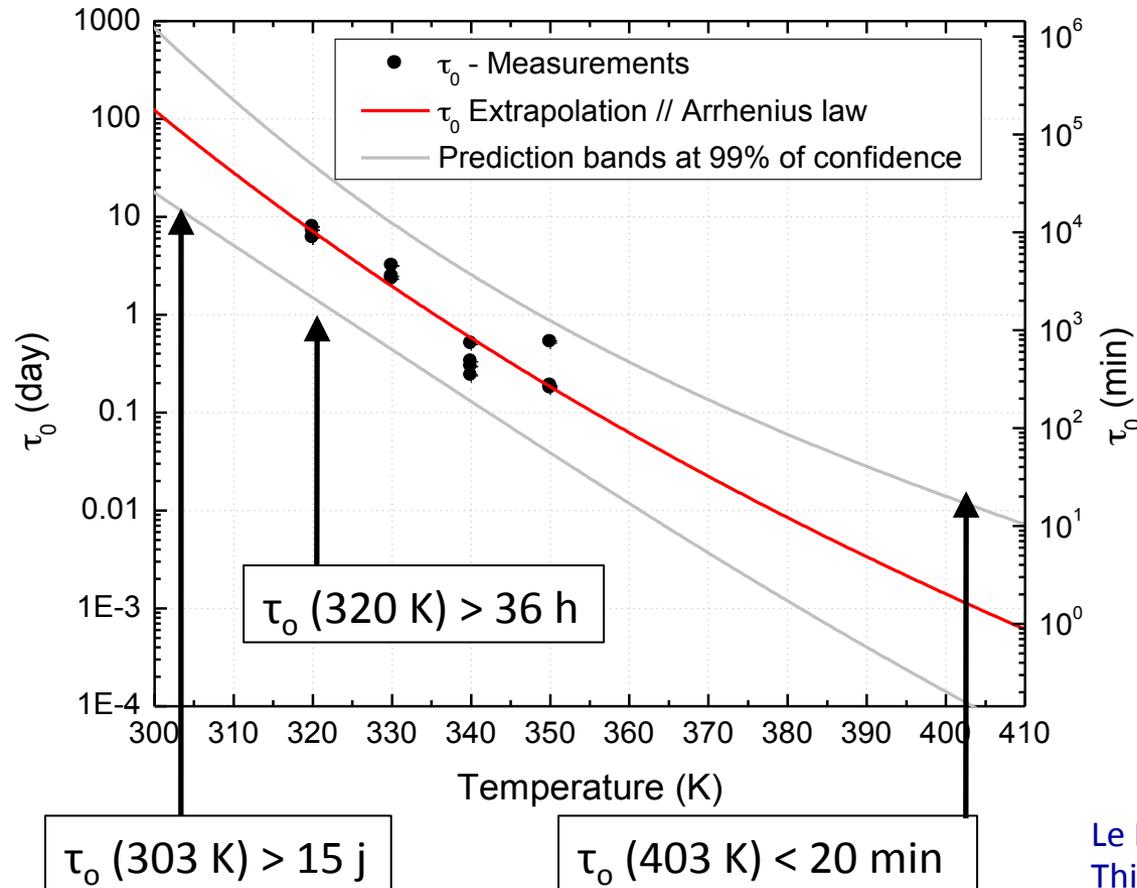
Comment détecter le POM avec COSIMA ?

Cinétique de décomposition du POM

- (i) Synthèse à basses températures d'échantillon de POM grâce à « OREGOC »
- (ii) Long suivi à Température constante ($T \sim 320$ K)

τ_0 : Temps caractéristique de décomposition

à $t = \tau_0$, diminution d'un facteur e de la quantité initiale



- Température nominale à l'intérieur de COSIMA ~ 303 K

— $\tau_0 (303 \text{ K}) > 15$ jours

— $\tau_0 (320 \text{ K}) > 36$ heures

● Cinétique de décomposition du POM

⇒ Les analyses doivent être effectuées très rapidement

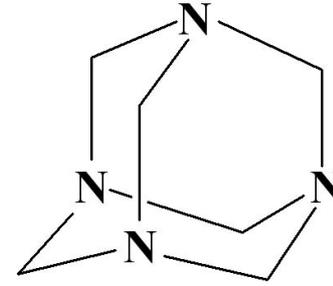
⇒ Définition des opérations spatiales permettant de maximiser les chances de détection du POM

⇒ + détermination de la signature spectrale du POM avec les instruments sol de COSIMA

Le Roy L., Briani G., Briois C., Cottin H., [Fray N.](#), Thirkell L., Poulet, G. and Hilchenbach, M. (2012) *Planetary and Space Science*, 65(1), 83-92.

Contexte : Le HMT.

HMT : $C_6H_{12}N_4$
Hexa-Méthylène-Tétramine



Photolyse
À basses température
De mélanges de glaces
 $H_2O : CH_3OH : NH_3 : \dots : \dots$

Réchauffement lent
jusqu'à 300 K

La matière organique restante
solide à 300 K contient du HMT

Bernstein et al. (1995); Muñoz-Caro et al. (2004);...

⇒ Quel est son mécanisme de formation précis en phase solide ?

⇒ Quelle est l'évolution physico-chimique du HMT lorsque le mélange organique dans lequel il est contenu est chauffé ?

⇒ Comment le détecter avec Rosetta ?

Le HMT : Mécanisme de formation.

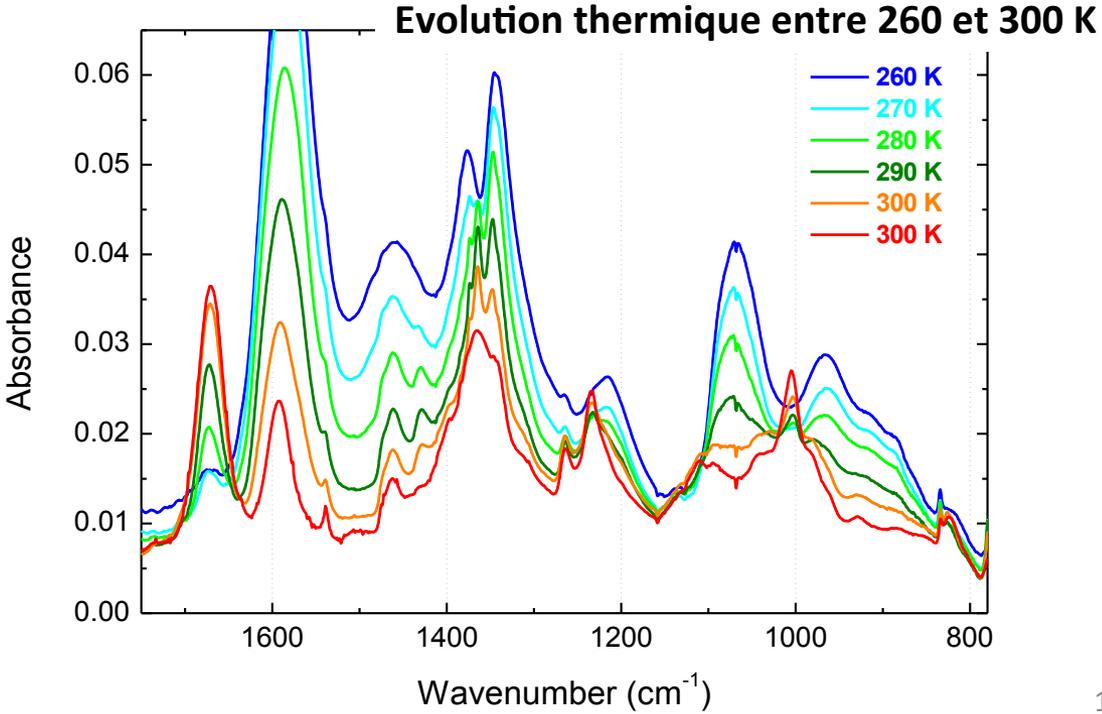


EXP 1 (LISA) : Photolyse à 25 K puis chauffage de $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_3\text{OH} : \text{NH}_3$ (exp. « globale »)

● Photolyse à 25 K
Production de H_2CO , HCOO^- (et NH_4^+)

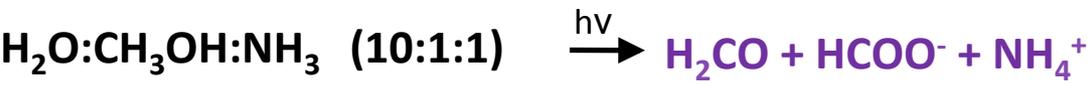


● Evolution thermique de 25 à 300 K
⇒ **Collaboration avec le PIIM (Marseille)**
⇒ Comparaison avec des expériences « spécifiques »



Vinogradoff V., [Fray N.](#),
Duvernay F., [Briani G.](#), Danger G.,
Cottin H., Theulé P. and Chiavassa T. (2013)
Astronomy and Astrophysics, 551, A128
(Post-doc de Giacomo Briani)

Le HMT : Mécanisme de formation.



\Rightarrow Collaboration avec le PIIM

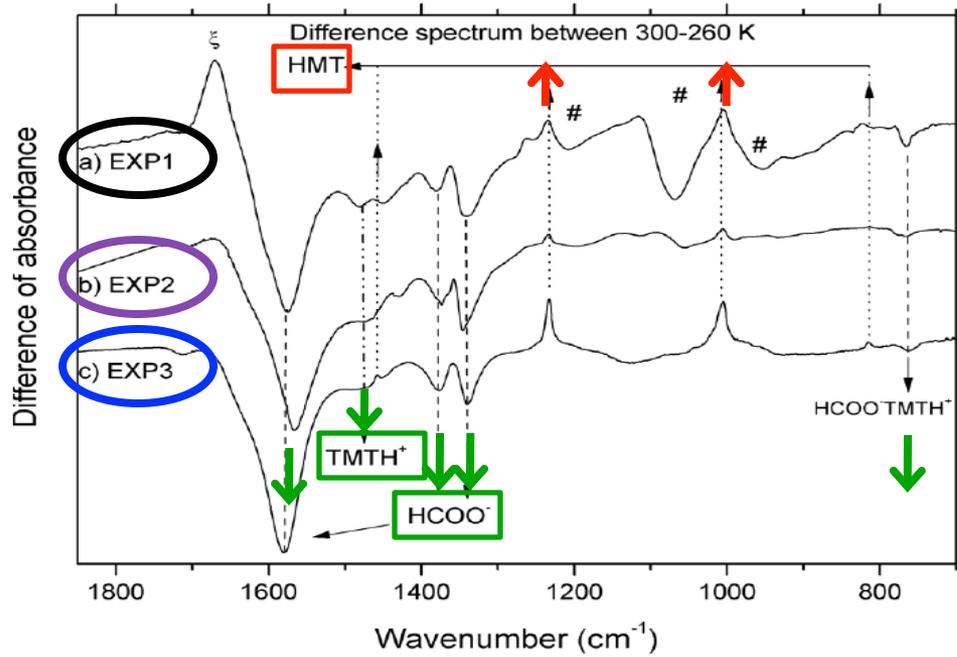


EXP 1 (LISA) : Photolyse à 25 K puis chauffage de $\text{H}_2\text{O} : \text{CH}_3\text{OH} : \text{NH}_3$ (exp. « globale »)

EXP 2 (PIIM) : Chauffage de $\text{H}_2\text{CO} : \text{NH}_3 : \text{HCOOH}$ (exp. « spécifique »)

EXP 3 (PIIM) : Chauffage de $\text{CH}_2\text{NH} : \text{HCOOH}$ (exp. « spécifique »)

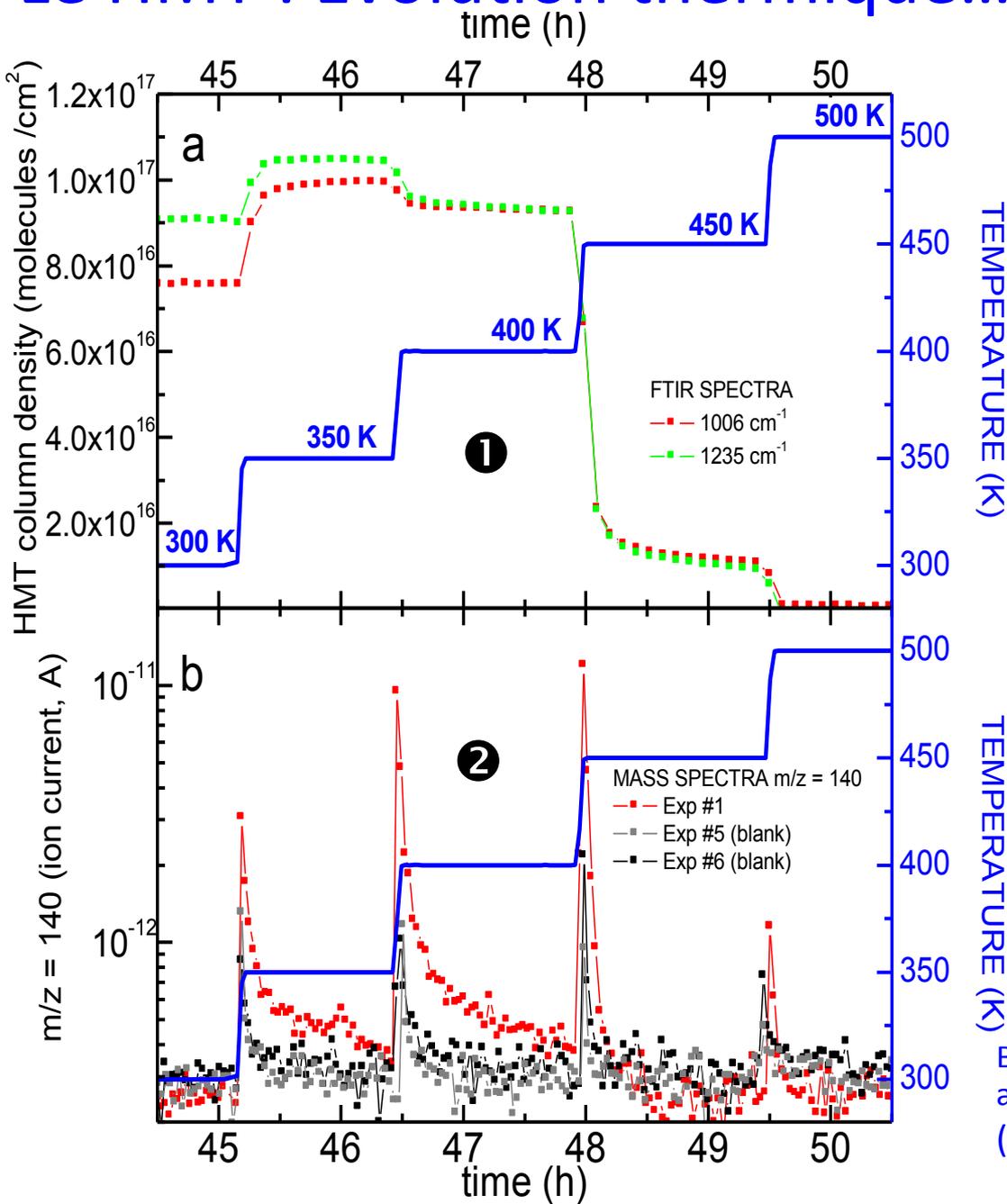
Evolution thermique entre 260 et 300 K



- Tous les intermédiaires réactionnels peuvent être recherchés dans les comètes.
- Le HMT n'est pas produit durant la photolyse, un chauffage est nécessaire à la synthèse de HMT.

Vinogradoff V., [Fray N.](#), Duvernay F., [Briani G.](#), Danger G., Cottin H., Theulé P. and Chiavassa T. (2013) *Astronomy and Astrophysics*, 551, A128 (Post-doc de Giacomo Briani)

Le HMT : Evolution thermique...



- Longues expérimentations
- Suivi simultanée du HMT en phase solide et en phase gazeuse

❶ Quantification du HMT présent en phase solide (IR) en fonction de T

❷ Suivi du HMT en phase gazeuse (SM)

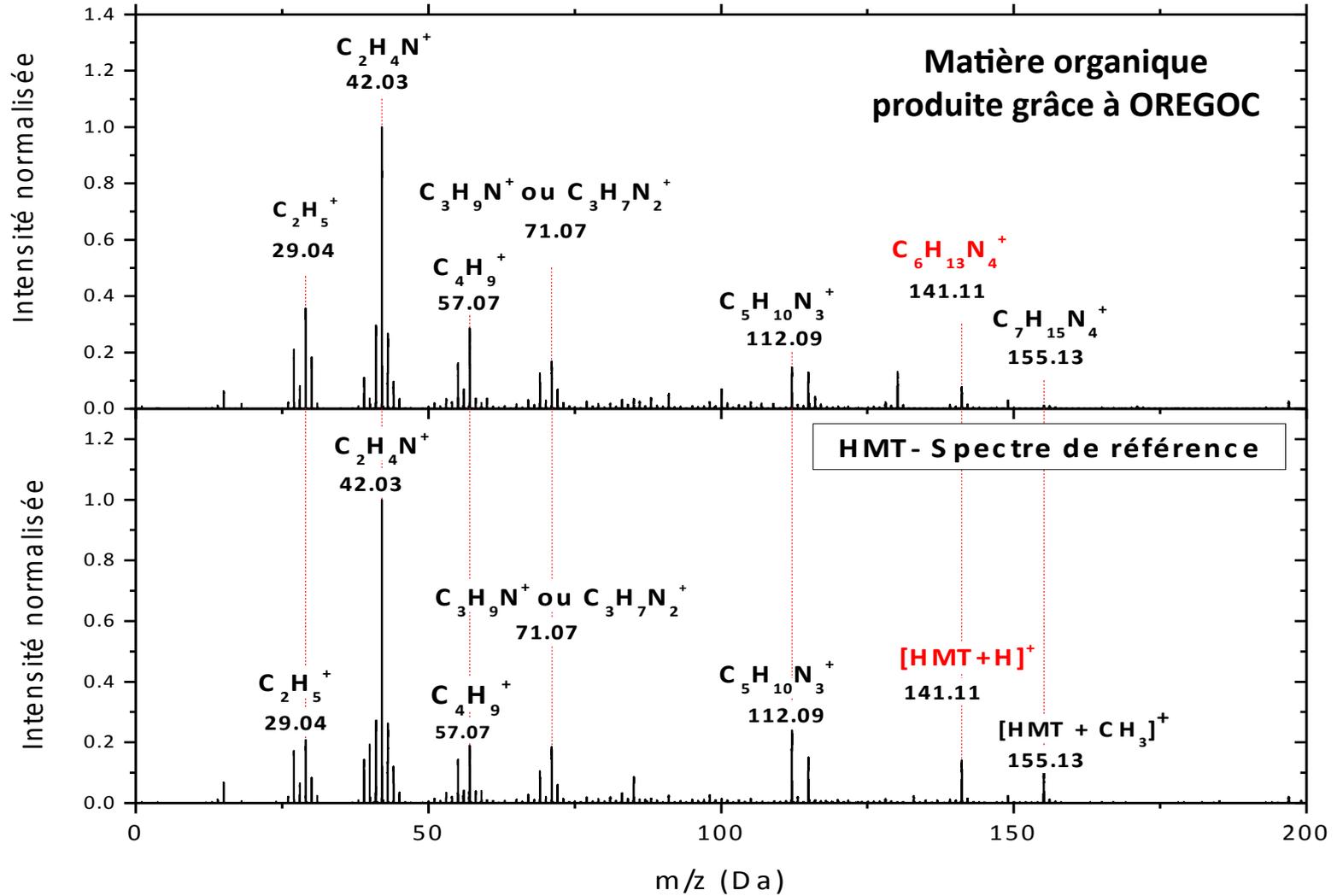
⇒ Lorsque le HMT est synthétisé en phase solide, la majeure partie sublime immédiatement...

⇒ Le HMT doit être recherché dans les environnements cométaires à la fois en phase solide (COSIMA) et en phase gazeuse (ROSINA)

Briani G., [Fray N.](#), Cottin H., Benilan Y., Gazeau M.-C. and Perrier S. (2013) *Icarus*, 226, 541-551.

(Post-doc de Giacomo Briani)

Le HMT : Peut-on le détecter avec COSIMA ?

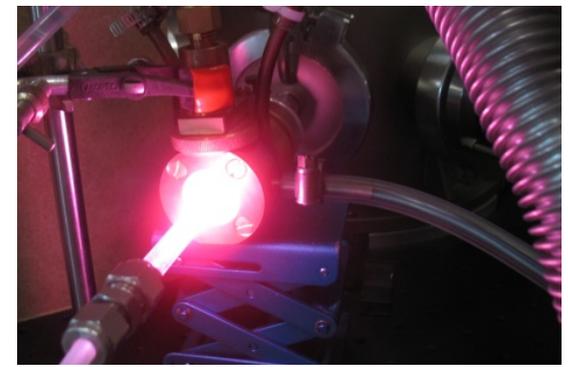


- Le HMT est détecté de manière claire et reproductible par TOF-SIMS (modèle sol de COSIMA) dans les analogues synthétisés grâce à OREGOC.
- Travail en cours sur la détection d'autres composés.

Travail de Léna Le Roy durant son année d'ATER.

Perspectives : OREGOC.

Production d'une matière organique macromoléculaire, « très » réfractaire et insoluble



- Effet de l'ajout de CH_4 dans le mélange initial de glaces
 - CH_4 détecté dans les glaces présentes sur les grains entourant les étoiles jeunes
 - ↳ « augmentation de représentativité »
 - Une petite quantité de CH_4 influe-t-elle sur la chimie résultant de la photolyse et/ou du chauffage ?
- Effet d'une photolyse simultanée au chauffage
 - dans les disques protoplanétaires ces deux sources d'énergies sont simultanées
 - ↳ « augmentation de représentativité »
 - Impact sur la matière restante solide à $T > 200 \text{ K}$?
- Augmentation de la quantité de matière organique produite
 - Meilleure caractérisation de l'évolution thermique à haute température de la matière organique solide.
 - Rapports élémentaires (H/C, O/C et N/C) par pyrolyse
- Comparaison entre la matière organique « synthétique » et celle présente dans des cosmo-matériaux d'origine cométaire (IDPs, micrométéorites & UCAMMs)
Spectroscopie Raman.

Quelques perspectives concernant COSIMA.



- Détection directe et convaincante du POM...
- Mesure du rapport élémentaire N/C.
 - Comparaison avec les résultats obtenus en 1986 dans l'environnement de 1P/Halley
 - Comparaison avec les météorites, les micro-météorites, les IDPs et en particulier les UCAMMs.
- Evolution avec la distance héliocentrique la matière organique solide
 - Evolution thermique de la matière organique
 - Détection d'une matière organique « semi » réfractaire pour $R_H \sim 3$ AU
- « Post-Calibration » (Après les 1ères observations et interprétations)
 - Redéfinition des expérimentations « OREGOC »
 - ⇒ Interprétations plus précises des observations COSIMA

Merci de votre attention.

