

**FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES
COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE**



Hervé COTTIN
Maître de conférences
Université Paris 12
LISA
9 Décembre 2008

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de leur composition chimique

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

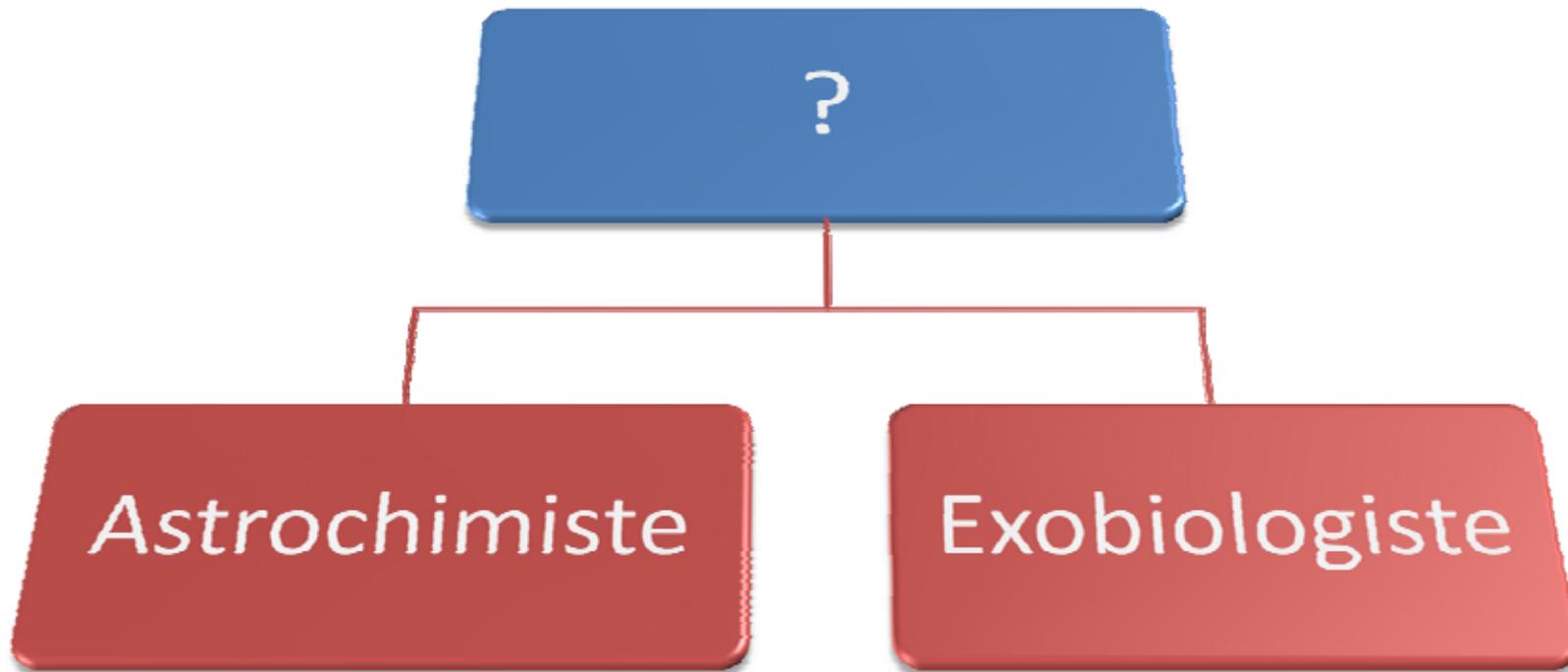
COSIMA

ILMA

Conclusions



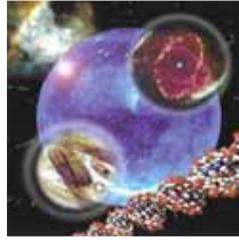
INTRODUCTION





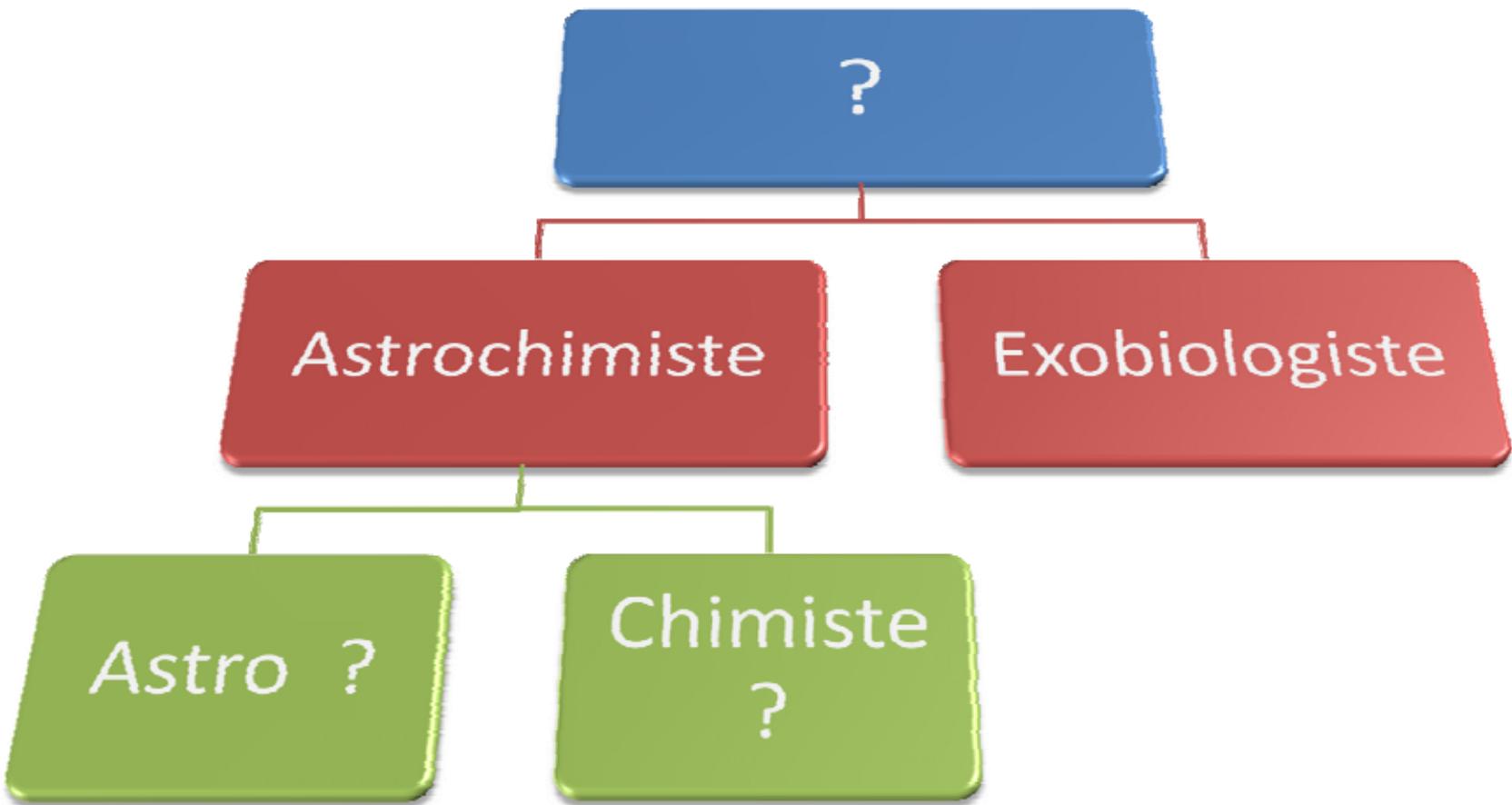
Astrochimie

Etude de la **formation et de l'évolution des composés chimiques observés dans les environnements extraterrestres**, tels que les différents objets du système solaire (planètes, petits corps, etc.), ou encore le milieu interstellaire (nuages moléculaires, milieu interstellaire diffus, etc.). Il s'agit d'un recouvrement entre la chimie et l'astronomie.

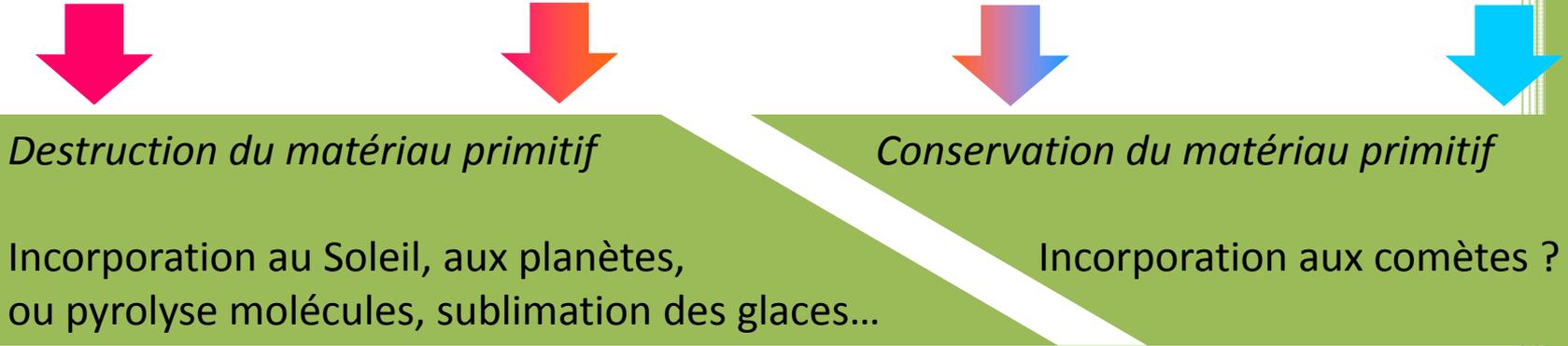


Exobiologie

Etude de la vie dans l'univers. Plus précisément, elle inclut l'étude des conditions et des processus qui ont permis l'émergence du vivant sur notre planète, et ont pu ou pourraient le permettre ailleurs, **l'étude de l'évolution de la matière organique vers des structures complexes dans l'univers**, et les recherches qui concernent la distribution de la vie sous toutes les formes qu'elle pourrait revêtir, et son évolution.



Matière du nuage moléculaire originel



Région convective / mélange par turbulence

Planétésimaux rocheux

Planétésimaux glacés ...

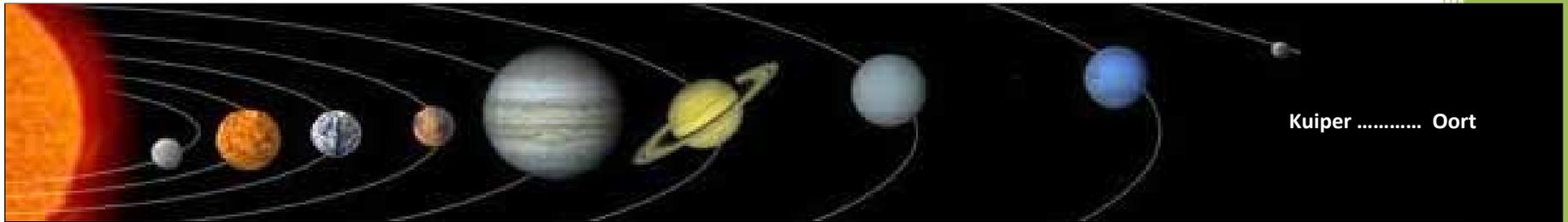


Région de
formation des astéroïdes

Région de
formation des comètes

Primitifs ou différenciés

Gradient de composition



Région de formation des astéroïdes

Région de formation des comètes



Gradient de composition

Glace

Source d'énergie

Principaux produits

Temperature
Schutte et al., 1993

→

Polyoxymethylene
POM : $-(CH_2-O)_n-$

UV
Bernstein et al., 1995

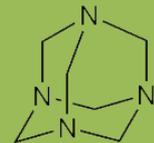
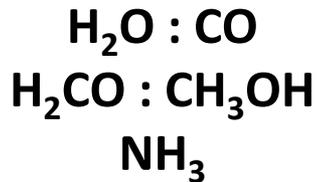
→

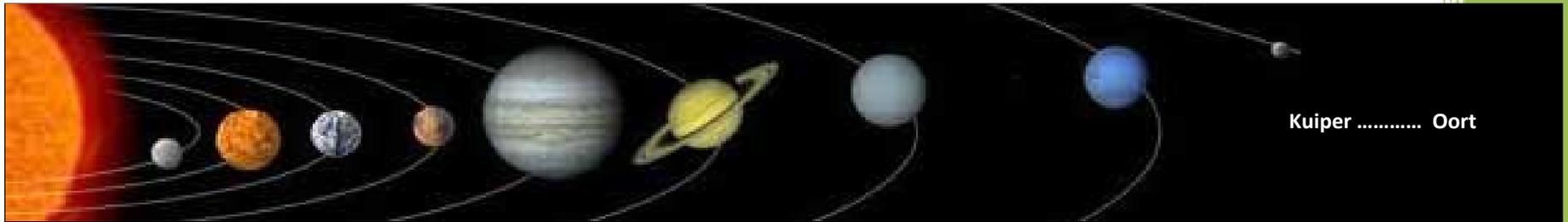
Hexamethylenetetramine
HMT

Protons
Cottin et al., 2001

→

HMT





Région de formation des astéroïdes



Région de formation des comètes

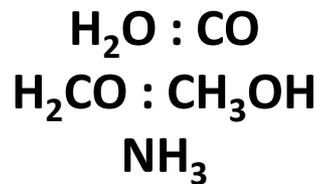


Gradient de composition

Glace

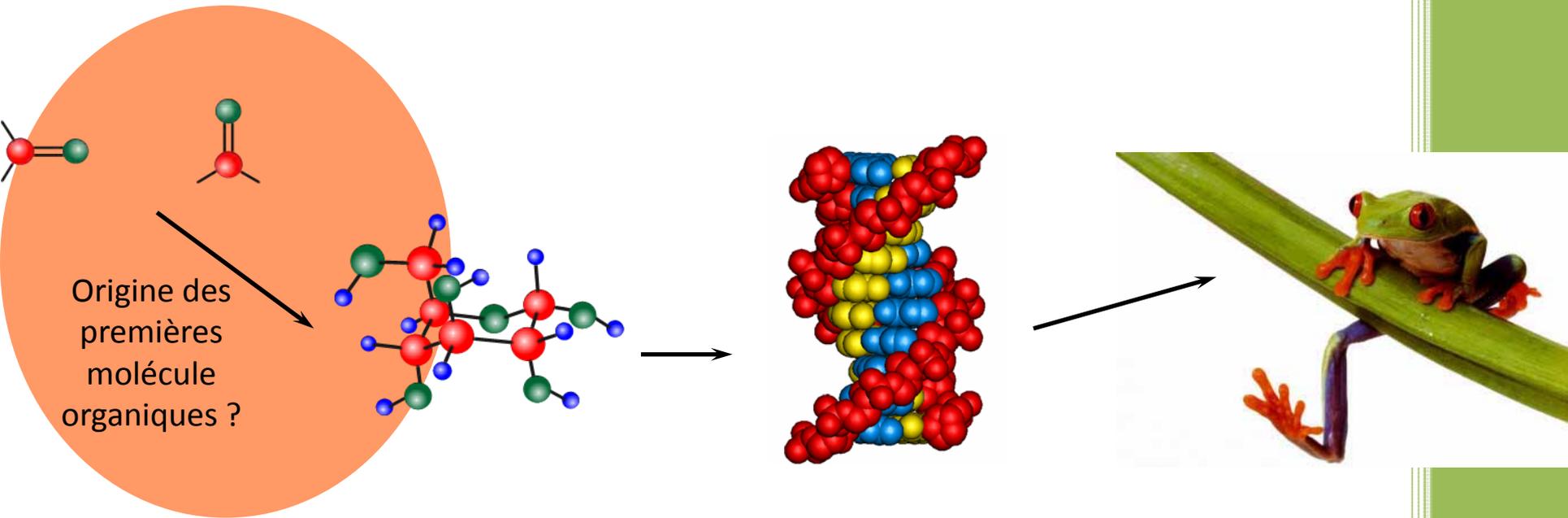
Source d'énergie

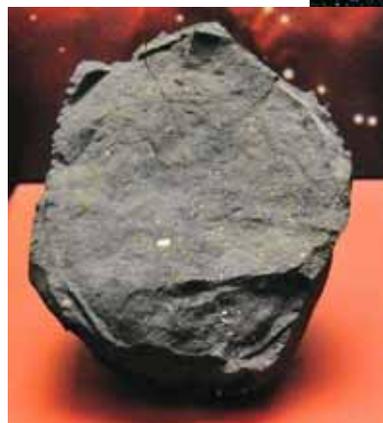
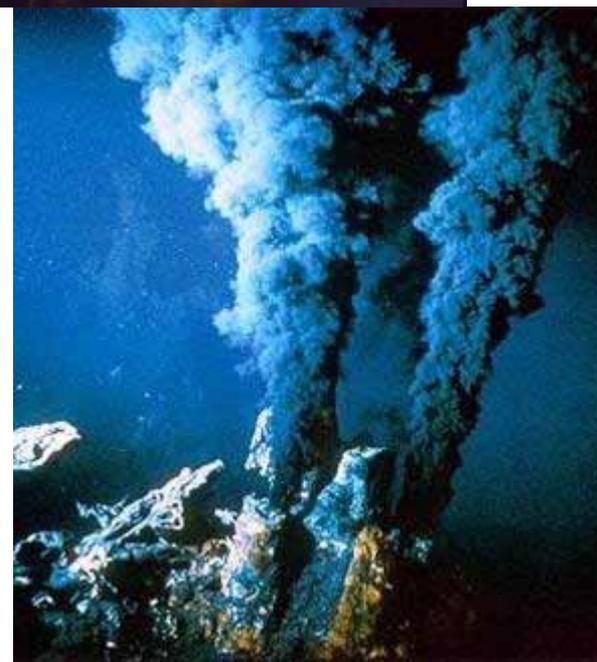
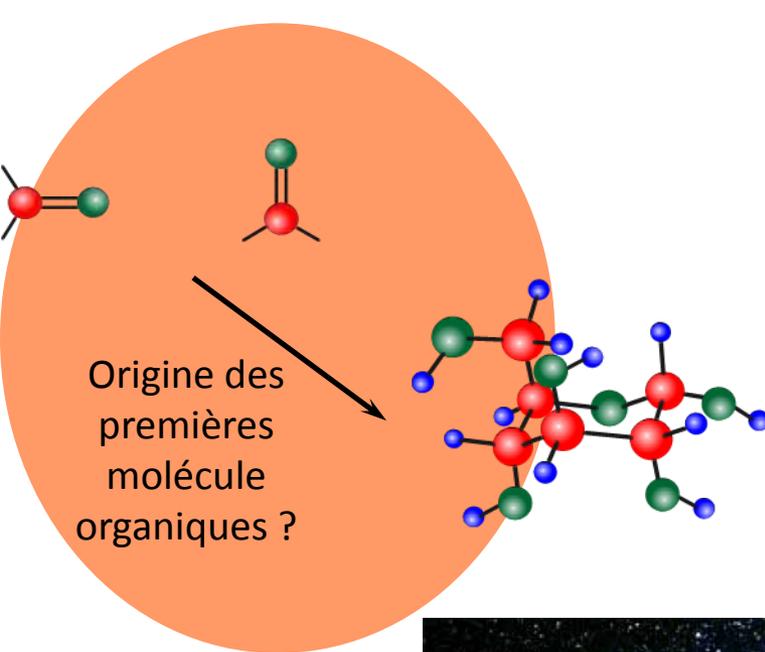
Principaux produits



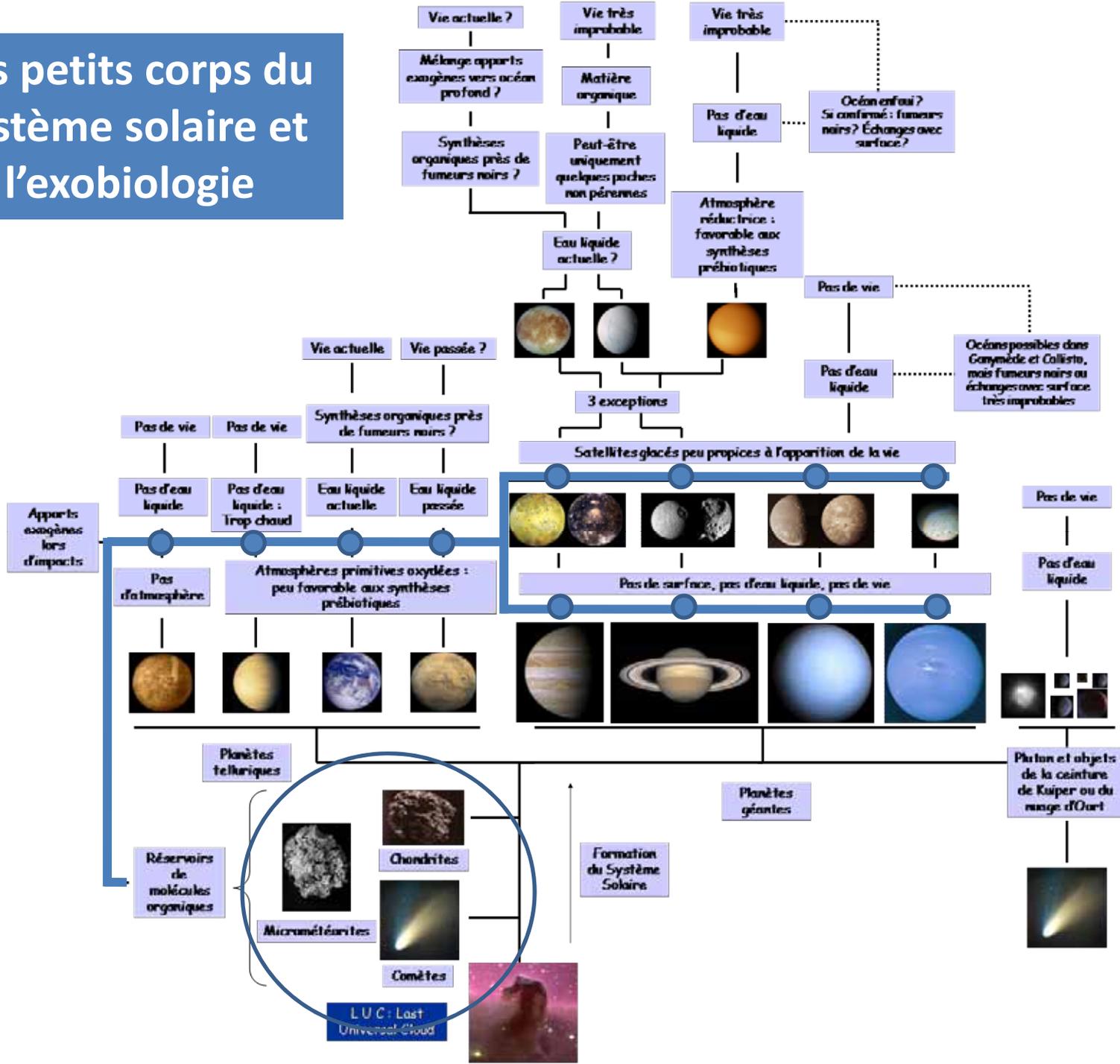
Que nous apprend la composition des petits corps concernant l'histoire (voire la préhistoire) de la formation du système solaire ?

Les petits corps du système solaire et l'exobiologie

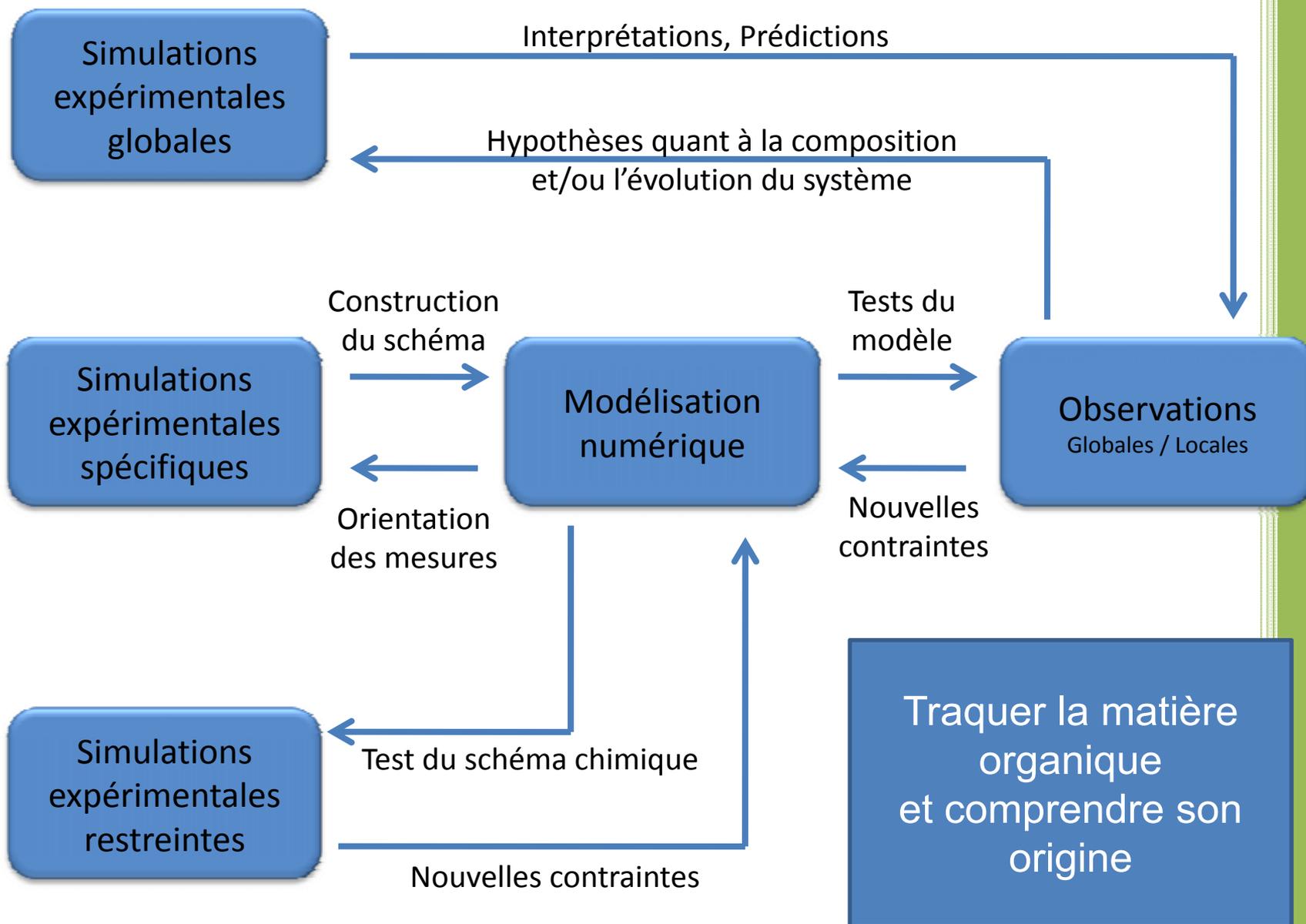




Les petits corps du système solaire et l'exobiologie



Quelques éléments de méthodologie



Quelques éléments de méthodologie

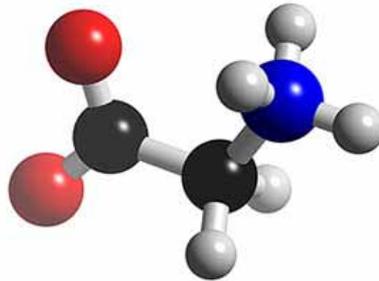
Simulations
expérimentales

Bernstein, M. P., et al., 2002. **Racemic amino acids from the ultraviolet photolysis of interstellar ice analogues.** Nature. 416, 401-403.

Muñoz Caro, G. M., et al., 2002. **Amino acids from ultraviolet irradiation of interstellar ice analogues.** Nature. 416, 403-406.

Ehrenfreund, P., et al., 2001. **The Photostability of Amino Acids in Space.** The Astrophysical Journal. 550, L95-L99.

Sources



Puits

Observations



Kuan, Y.-J., et al., 2003. **Interstellar Glycine.** Astrophysical Journal. 593, 848-867.

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de leur composition chimique

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

ILMA

Conclusions



La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées



Que savons-nous de leur composition chimique ?

- Télédétection
- Analyses in-situ
- Retour d'échantillons
- Simulations expérimentales

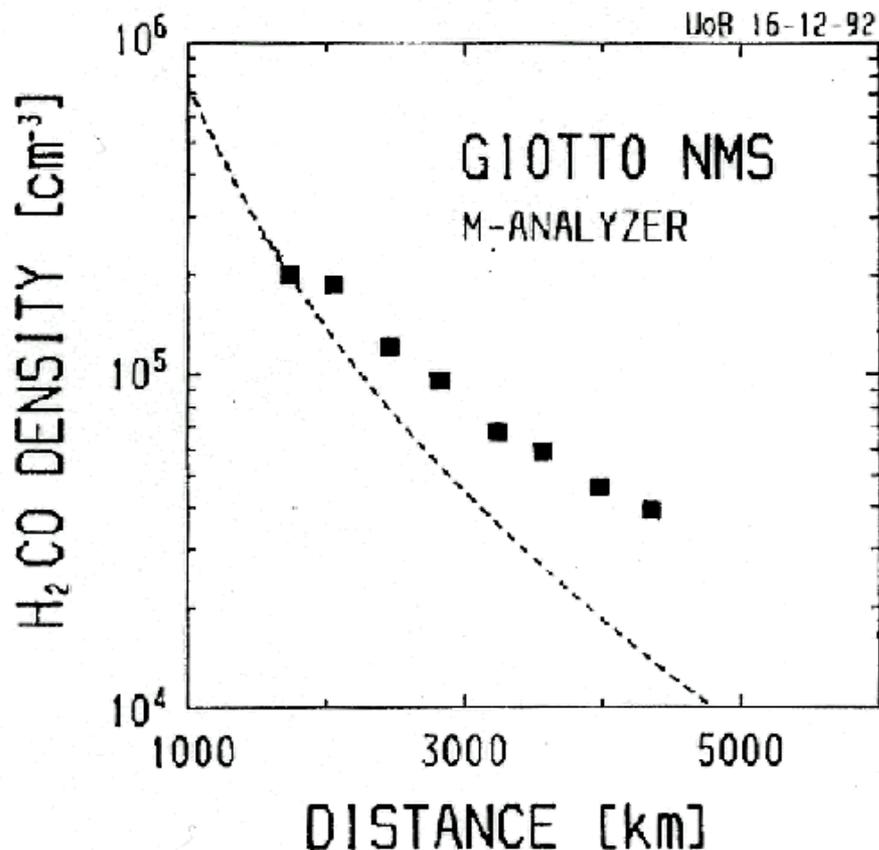


| Molécule | 1P/Halley | C/1995 O1 (Hale-Bopp) | C/1996 B2 (Hyakutake) | C/1999 H1 (Lee) |
|----------------------------------|--------------------------------------|--|---|--------------------------------------|
| H ₂ O | 100 | 100 | 100 | 100 |
| CO | 3.5 ^(a) , 11 ¹ | 12 ^{(a),13} , 23 ^{13,14} | 14 ^{(a),25,26} , 19–30 ^{25,27,28} | 1.8 ³⁶ –4 ³⁷ |
| CO ₂ | 3–4 ^{2,3} | 6 ^{(b),15} | | |
| CH ₄ | < 0.8 ⁴ | 1.5 ¹⁶ | 0.8 ^{16,29} | 0.8 ³⁸ |
| C ₂ H ₂ | 0.3 ¹ | 0.1 ¹⁶ –0.3 ¹⁷ | 0.2 ³⁰ –0.5 ³¹ | 0.27 ³⁸ |
| C ₂ H ₆ | 0.4 ¹ | 0.6 ¹⁷ | 0.6 ²⁹ | 0.67 ³⁸ |
| CH ₃ OH | 1.8 ^{5,6} | 2.4 ¹⁴ | 2 ^{27,28} | 2.1 ³⁸ –4 ³⁹ |
| H ₂ CO ^(c) | 4 ^{2,7,8} | 1.1 ¹⁴ | 1 ^{27,28} | 1.3 ³⁹ |
| HCOOH | | 0.09 ¹⁴ | | |
| HCOOCH ₃ | | 0.08 ¹⁴ | | |
| CH ₃ CHO | | 0.02 ¹⁸ | | |
| NH ₂ CHO | | 0.015 ¹⁴ | | |
| NH ₃ | 1.5 ⁹ | 0.7 ¹⁹ | 0.5 ^{32,33} | |
| HCN | 0.1 ^{10,11} | 0.25 ^{14,20} | 0.1 ^{27,28} –0.2 ³⁴ | 0.1 ³⁸ –0.3 ³⁹ |
| HNCO | | 0.10 ¹⁴ | 0.07 ²⁸ | |
| HNC | | 0.04 ^{14,21} | 0.01 ^{28,35} | 0.01 ³⁹ |
| CH ₃ CN | | 0.02 ¹⁴ | 0.01 ³³ | |
| HC ₃ N | | 0.02 ¹⁴ | | |
| H ₂ S | 0.4 ⁶ | 1.5 ¹⁴ | 0.8 ²⁷ | < 0.9 ³⁹ |
| OCS | | 0.4 ^{14,22} | 0.1 ³⁶ | |
| SO ₂ | | 0.2 ¹⁴ | | |
| CS ₂ | 0.2 ¹² | 0.2 ¹⁴ | 0.1 ²⁷ | 0.08 ³⁹ |
| H ₂ CS | | 0.05 ²³ | | |
| NS | | ≥ 0.02 ²⁴ | | |
| S ₂ | | | 0.005 ³⁷ | 0.002 ⁴⁰ |

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de leur composition chimique ?

Les sources distribuées



Formaldehyde dans la comète 1P/Halley

Il existe une source additionnelle de H_2CO

SOURCE DISTRIBUEE

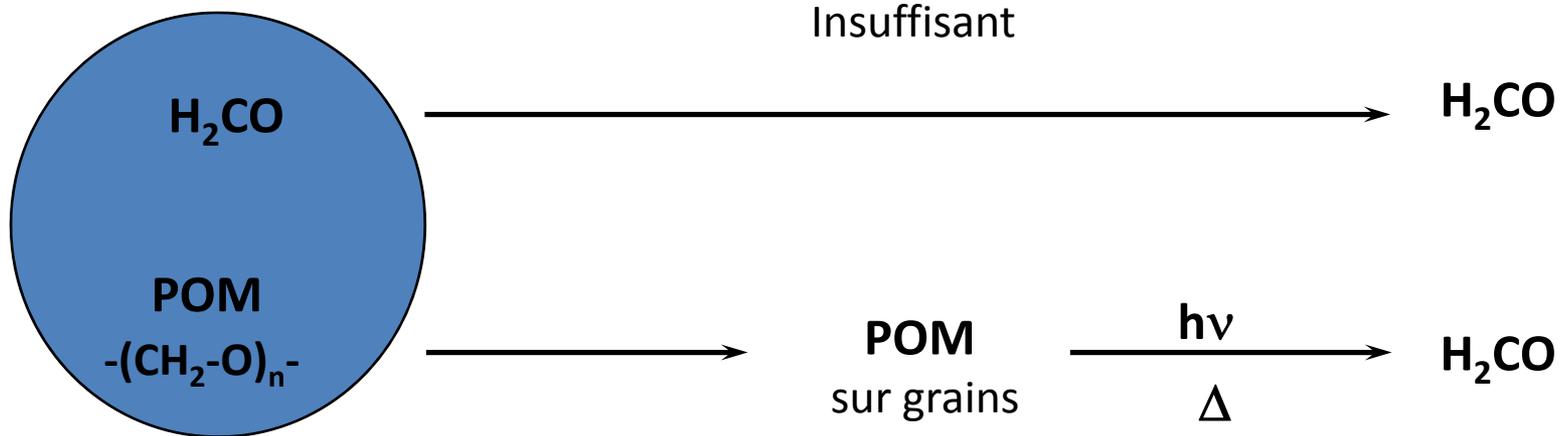
Approche LISA :
Détections indirectes au travers de ces observations

Meier et al. (1993) : Profil de densité de H_2CO dans la comète Halley

Carrés: Mesures / Pointillés : profil modélisé sans source distribuée

Origine des sources distribuées

Production de H₂CO



S.E.M.A.P.H.O.R.E
COMETAIRE

Simulation
Expérimentale et
Modélisation
Appliquées aux
PHénomènes
ORGaniques dans
l'Environnement
COMETAIRE

1997 – (2008) - ????

14 publications

> 30 présentations en congrès

2 thèses soutenues

4 stages de DEA ou M2 / 2 stages de maîtrise

Mesurer des grandeurs physico-chimiques
concernant la dégradation de composés
organiques et les appliquer aux observations
de sources distribuées

- Cottin, H., Fray, N., (2008). Distributed Sources in Comets. *Space Science Reviews*. 138 179-197
- Lasue, J., Levasseur-Regourd, A. C., Fray, N., and Cottin, H., (2007). Inferring the interplanetary dust properties from remote observations and simulations. *Astronomy & Astrophysics* 473, 641–649.
- Fray N., Bénilan Y., Biver N., Bockelée-Morvan D., Cottin H., Crovisier J., and Gazeau M.-C. (2006), Heliocentric evolution of the degradation of POM. Application to the origin of the formaldehyde (H₂CO) in comet C/1995 O1 (Hale-Bopp). *Icarus* 184(1), 239-254.
- Fray N., Bénilan Y., Cottin H., Gazeau M.-C., and Crovisier J. (2005) The origin of the CN radical in comets : A review from observations and models. *Planetary and Space Science* 53(12), 1243-1262.
- Fray, N., Bénilan, Y., Cottin, H., Gazeau, M.-C., Minard, R. D., and Raulin, F. (2004). Experimental study of the degradation of polymers. Application to the origin of extended sources in cometary atmospheres. *Meteoritics and planetary science* 39(4), 581-587.
- Fray, N., Bénilan, Y., Cottin, H., and Gazeau, M.-C. (2004). New experimental results on the degradation of polyoxymethylene. Application to the origin of the formaldehyde extended source in comets. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 109, E07S12
- Cottin, H., Y. Bénilan, M.-C. Gazeau, and F. Raulin (2004) Origin of cometary extended sources from degradation of refractory organics on grains: polyoxymethylene as formaldehyde parent molecule. *Icarus* 167, 397–416.
- Cottin H., Bachir S., Raulin F., and Gazeau M. C. (2002) Photodegradation of Hexamethylenetetramine by VUV and its relevance for CN and HCN extended sources in comets. *Advances in Space Research* 30 (6), 1481-1488
- Cottin H., Gazeau M. C., Chaquin P., Bénilan Y., and Raulin F. (2001) Experimental and theoretical studies on the gas/solid/gas transformation cycle in extraterrestrial environments. *Journal of Geophysical Research (Planets)* 106 (E12), 33,325-33,332.
- Cottin H., M.C. Gazeau, Y. Bénilan, and F. Raulin (2001) Polyoxymethylene as parent molecule for the formaldehyde extended source in comet Halley, *The Astrophysical Journal* 556 (1), 417-420.
- Cottin H., Gazeau M. C., Doussin J. F., and Raulin F. (2000) An experimental study of the photodegradation of polyoxymethylene at 122, 147 and 193 nm. *Journal of photochemistry and photobiology (A : Chemistry)* 135, 53-64.
- Gazeau M. C., Cottin H., Vuitton V., Smith N., and Raulin F. (2000) Experimental and theoretical photochemistry : application to the cometary environment and Titan's atmosphere. *Planetary and Space Science* 48, 437-445.
- Cottin H., M.C. Gazeau, and F. Raulin, (1999) Cometary organic chemistry : a review from observations, numerical and experimental simulations, *Planetary and Space Science* 47 , 1141-1162.
- Cottin H., M.C. Gazeau, J.F. Doussin, and F. Raulin (1999) S.E.M.A.Ph.Or.E COMETAIRE, a tool for the study of the photochemical decomposition of probable cometary large organic molecules. First application : Polyoxymethylene, *Physic and Chemistry of the Earth* 24 (5), 597-602.

LISA

Y. Bénilan

N. Fray

M.C. Gazeau

A. Jolly

F. Raulin

LESIA

N. Biver

D. Bockelée-Morvan

J. Crovisier

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

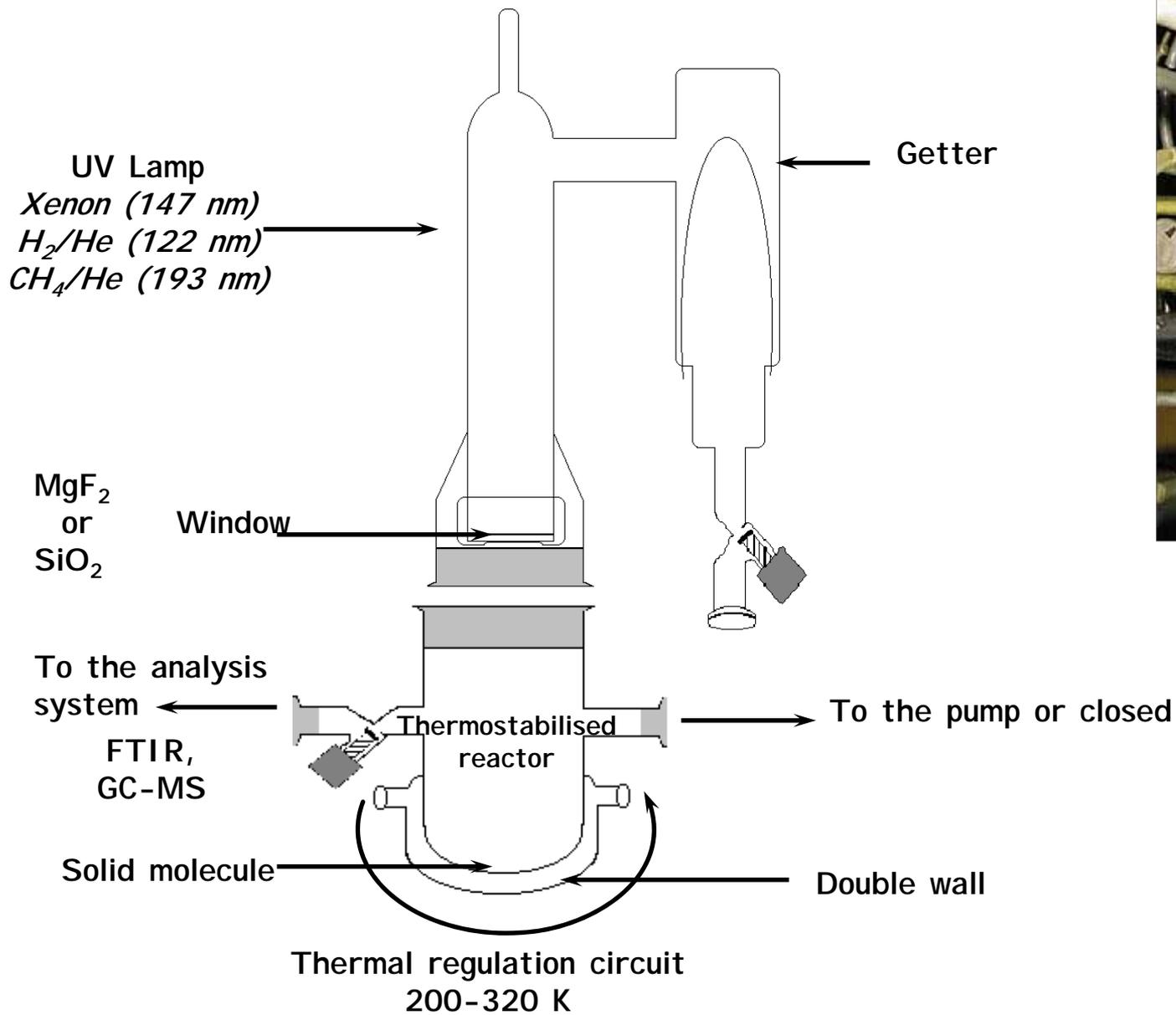
Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

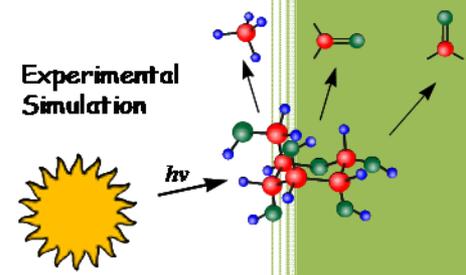
ILMA

Conclusions





**IL NE S'AGIT PAS DE SIMULER
 UNE COMETE EN LABORATOIRE**



Mesure de grandeurs physico chimiques quantitatives

| | Photodegradation | | | Thermal degradation | | | |
|---------------------------------------|---|-------------|-------------|--|---------------------------|--|--------------------------------------|
| POM | Products and production quantum yields for various wavelength from Cottin et al. (2000) | | | H ₂ CO is the only product. Kinetic parameters for its production as a parameters for its production as a function of T (Arrhenius law) for two different POM polymers are given below. From Fray et al. (2004a). | | | |
| | λ (nm) | 122 | 147 | 193 | Ea (J mol ⁻¹) | A (molec g ⁻¹ s ⁻¹) | |
| | H ₂ CO | 0.75 ± 0.21 | 0.96 ± 0.19 | <0.16 | POM 1 | 81 × 10 ³ ±0.76% | 1.2 × 10 ³⁰ +28%/-22% |
| | HCOOH | 0.13 ± 0.05 | 0.26 ± 0.10 | ϵ | POM 2 | 99 × 10 ³ ±2.3% | 7.2 × 10 ³² +140%/-60% |
| | CO | NE | ~ 1 | ϵ | | | |
| | CO ₂ | NE | ~ 0.3 | ϵ | | | |
| | CH ₃ OH | ~ 0.05 | ~ 0.05 | ϵ | | | |
| | <i>NE : Present but not estimated</i> | | | | | | |
| HMT | Some HCN detected at 147 nm but at level too low to be quantified (Cottin et al. 2002) | | | No thermal degradation. HMT sublimates when heated under vacuum (Fray 2004) | | | |
| HCN polymer | Some HCN, CH ₄ and C ₂ H ₂ are produced with quantum yields lower than 0.03 at 122 and 147 nm (Fray 2004; Fray et al. 2004b) | | | NH ₃ and HCN are the major products of the thermal degradation (Fray et al. 2004b). The production kinetics have been measured for $T > 420$ K (Fray 2004). Nevertheless, for lower T , the production declines to very low value (unpublished results) | | | |
| C ₃ O ₂ polymer | No data available | | | For $T > 400$ K: release of CO ₂ For $T > 500$ K: increased efficiency in the degradation, with release of CO ₂ and CO. CO/CO ₂ ratio increases with T . From Blake and Hyde (1964) and Smith et al. (1963) | | | |

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

ILMA

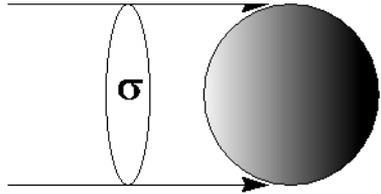
Conclusions



PRODUCTION DE H₂CO PAR PHOTODEGRADATION DU POLYOXYMETHYLENE

Quelques archives...

Modèle du grain de POM



$$\sigma = \pi R^2$$

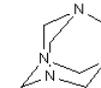
Grain
 $V = \frac{4}{3} \pi R^3$

$$\frac{dn_{H_2CO}}{dt} = \sigma \int_{\lambda} f_{\lambda} \Phi_{\lambda} d\lambda$$

PERSPECTIVES

Amélioration des barres d'erreur par un meilleur contrôle du flux des lampes UV (utilisation de lampes à flux continu)

Travail sur d'autres types de matériaux :
Polymères de HCN
Hexaméthylènetétramine



Etude des interactions entre la photodégradation et les produits de photolyse de l'eau

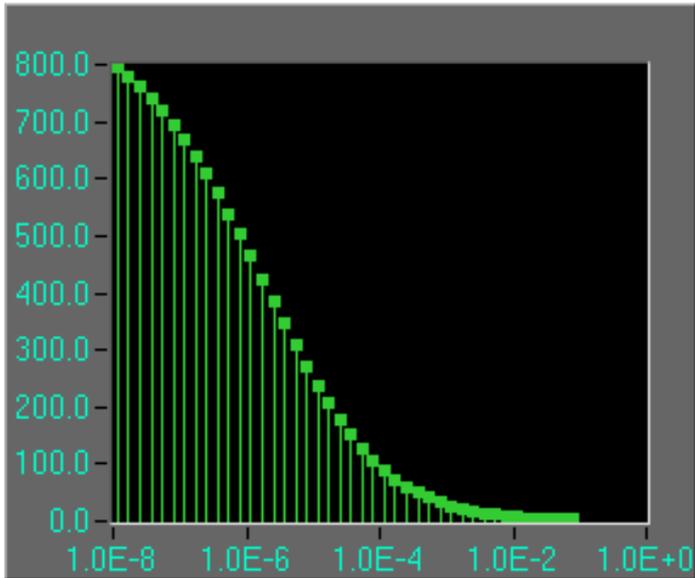
Amélioration du modèle :
vitesse des grains
température
distribution en taille

Recherche du diméthoxyméthane et du trioxane

Application aux observations concernant les autres produits de photodégradation du POM

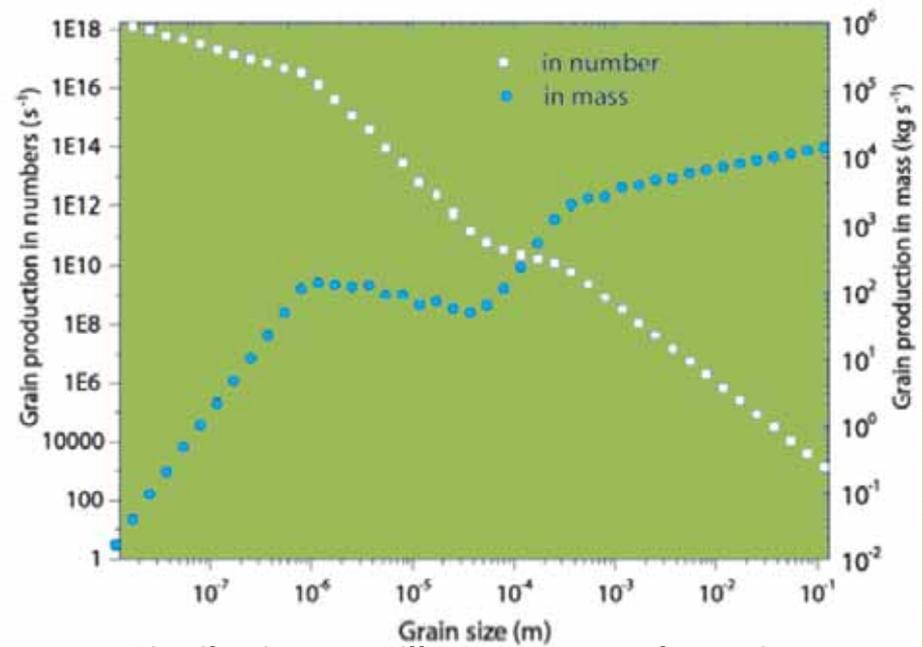
Recherche de sources étendues pour d'autres produits

Paramètres du modèle

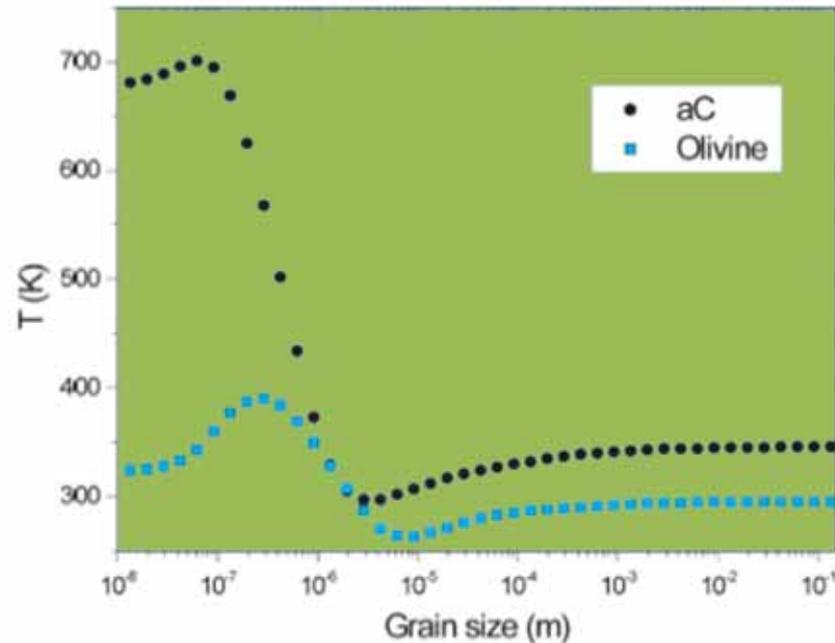


Vitesse des grains [$m \cdot s^{-1}$] = $f(\text{taille [m]})$

Calculated from Crifo et al., 1995

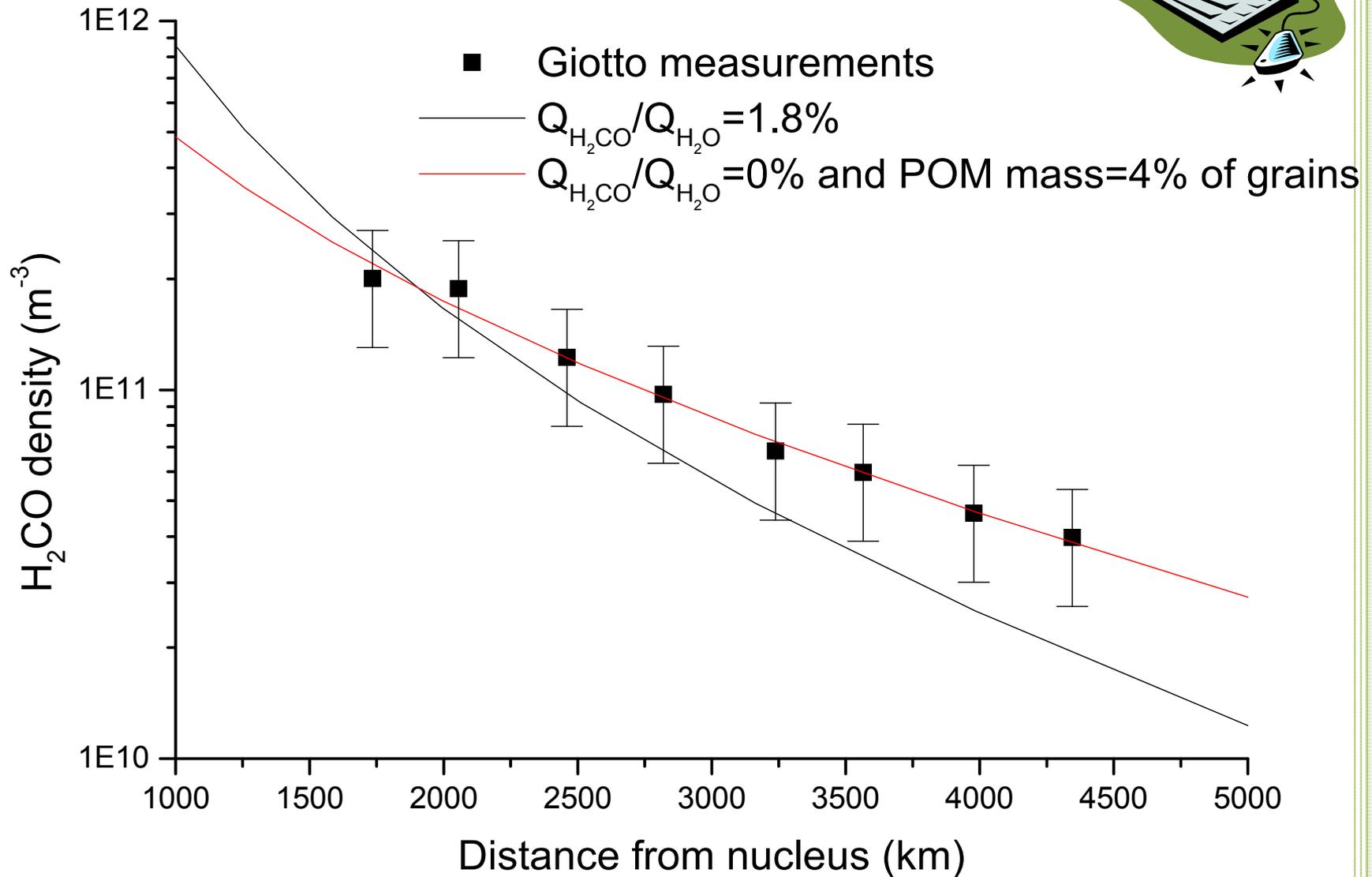


Distribution en taille et en masse des grains



Température des grains en fonction de leur taille

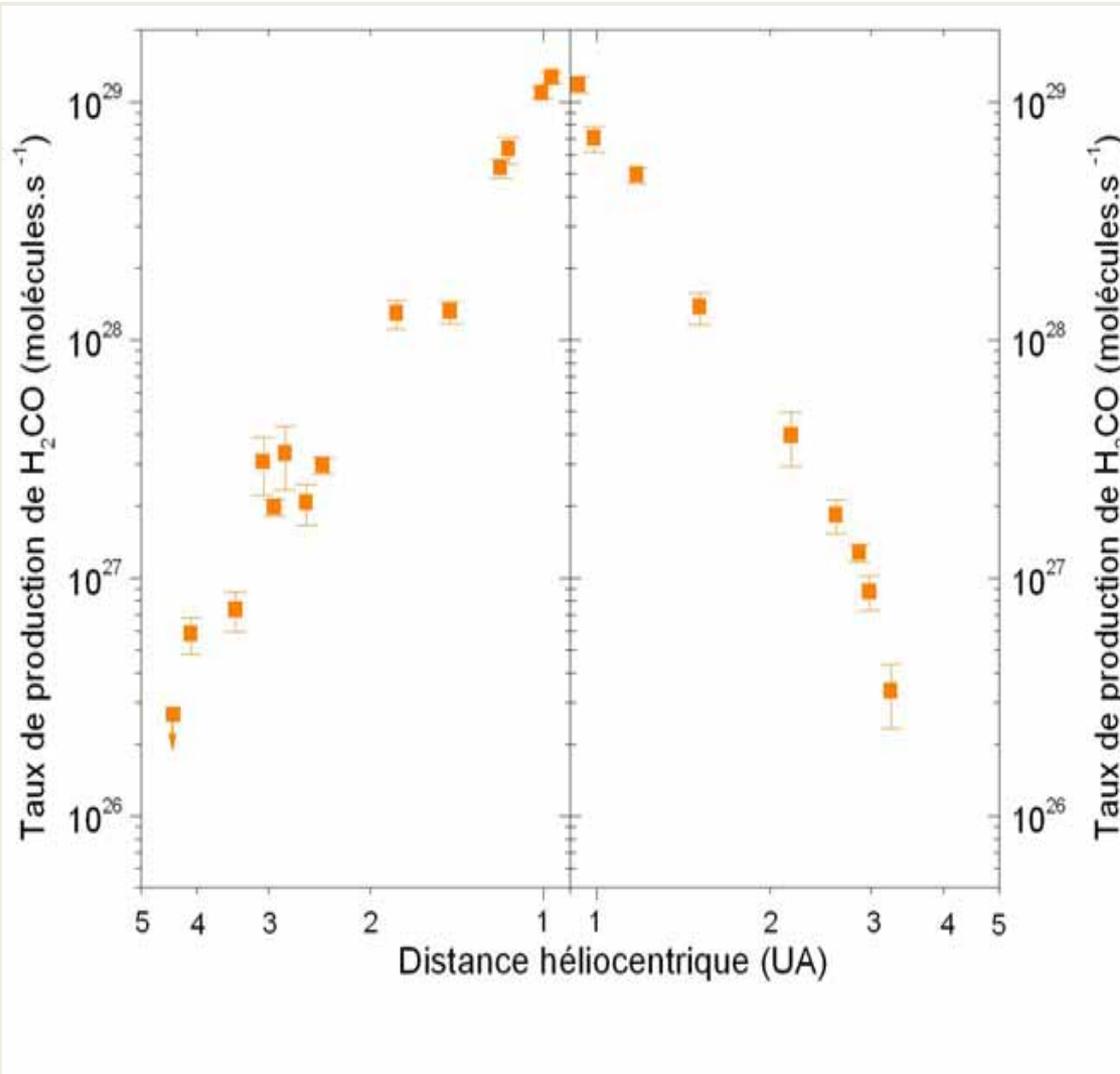
Comète 1P/Halley



Cottin et al., Icarus, 2004

Fray et al., JGR, 2004

Comète C/1995 O1 (Hale-Bopp)



Meilleur ajustement:

- % POM ~ 3% (en masse)
- $Q_{\text{H}_2\text{CO}}(\text{Sublimation})/Q_{\text{HCN}}=3\%$

• Mesures (Biver et al. 2002)

• Modèle

• Dégradation thermique

• Photodégradation

• H₂CO parent

- Composé (s) parent (s)
 - de CN ?
 - de CO ?
- Détection du POM

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

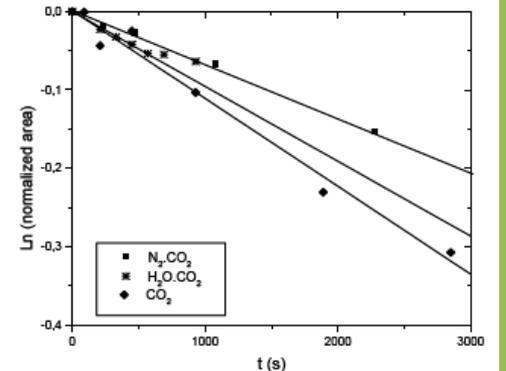
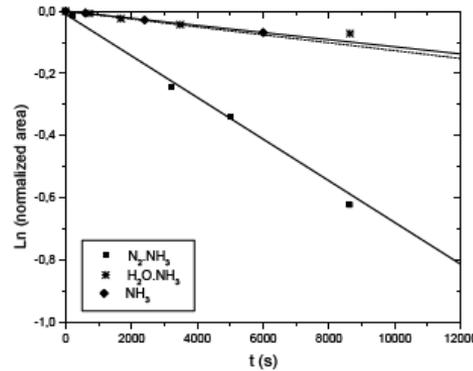
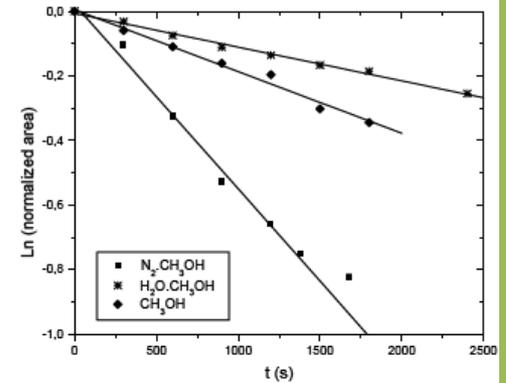
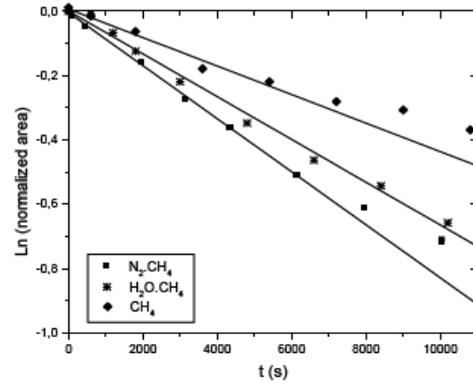
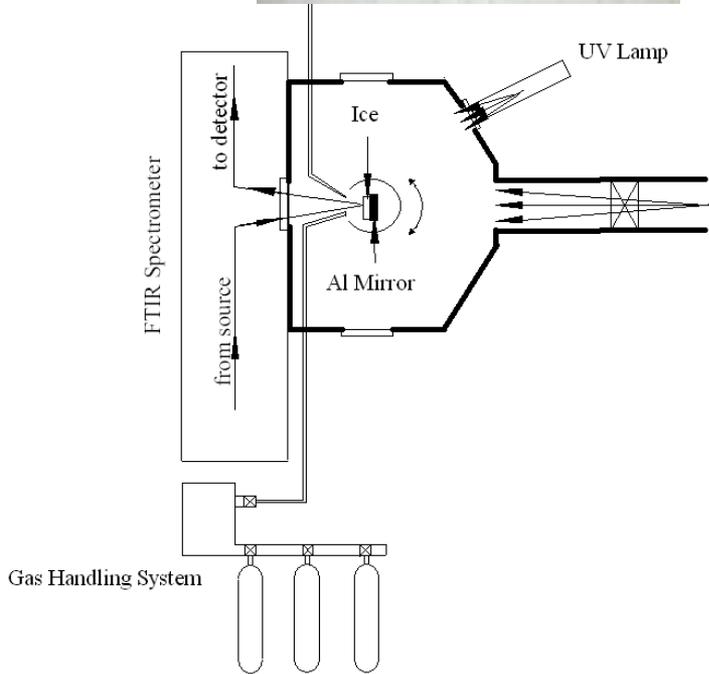
ILMA

Conclusions





Mesure de temps de vie de CO, CO₂, NH₃, CH₄, CH₃OH et HNCO Cottin et al., ApJ, 2003



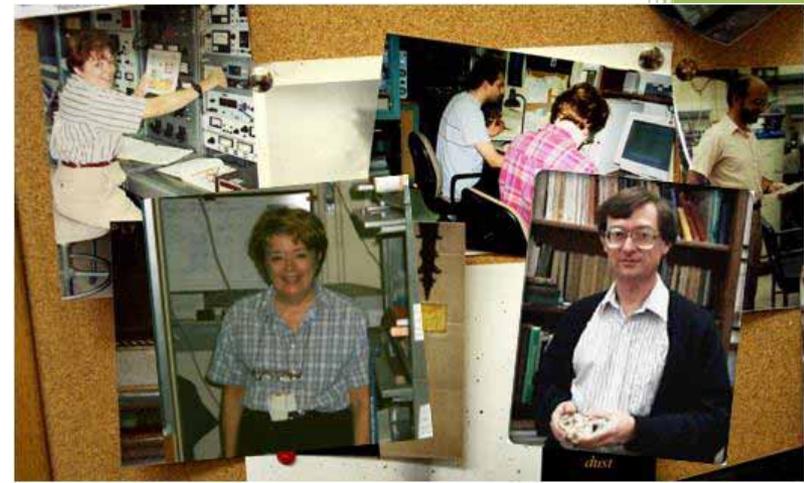
Etude de mécanismes réactionnels dans des analogues de glaces interstellaires

$\text{H}_2\text{O} : \text{CO}$
 $\text{H}_2\text{CO} : \text{CH}_3\text{OH}$
 NH_3

0.8 MeV Protons
HMT
 Cottin et al., ApJ, 2001

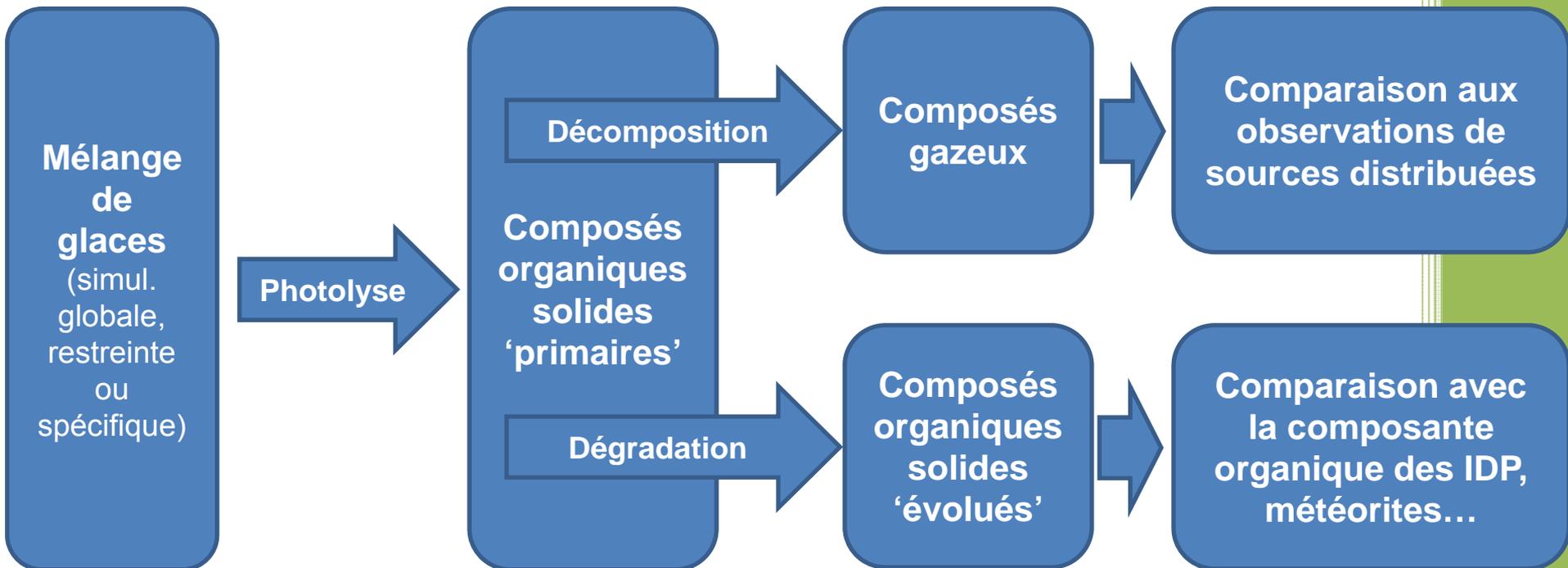
$\text{NH}_4^+, \text{OCN}^-$

0.8 MeV Protons
Urea
 Cottin et al., in prep.





Originalité: suivi de l'évolution de la matière organique
entre 10 et 600 K dans un même réacteur



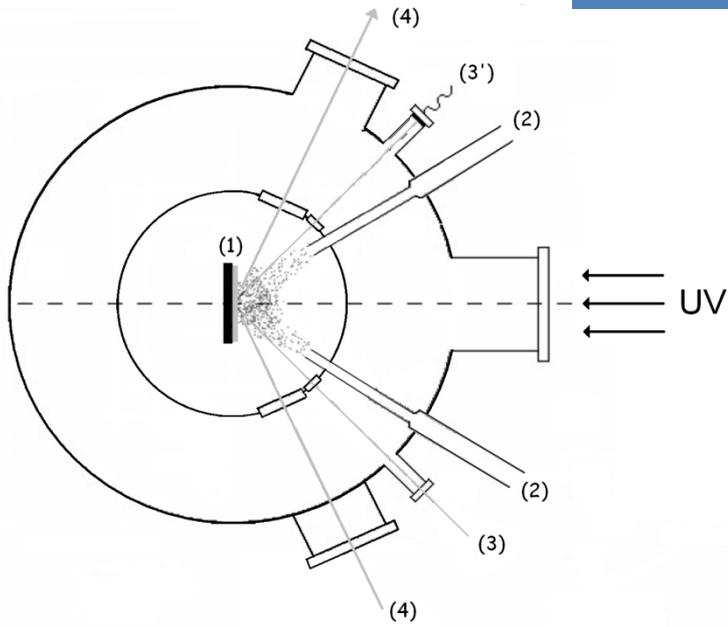
Sources



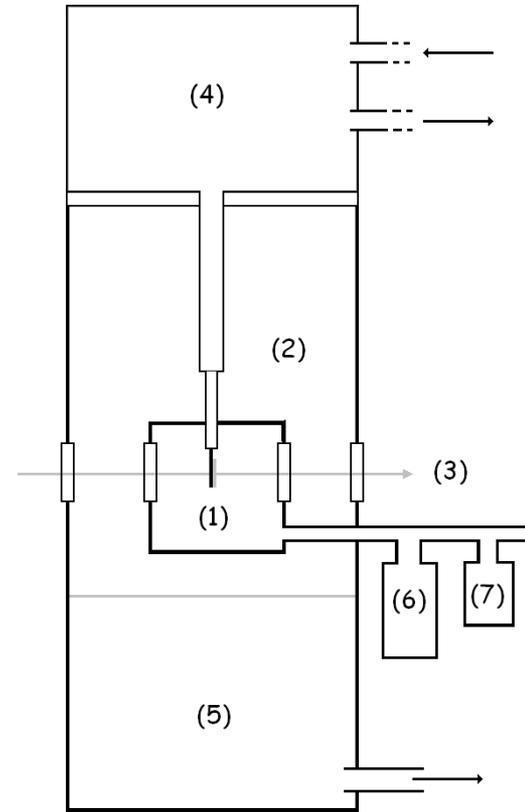
Puits

OREGOC

ORigine et Évolution des Glaces et des composés Organiques Cométaires



- (1) Échantillon de glaces et/ou de composés organiques complexes
- (2) Système d'injection de gaz
- (3) Laser He/Ne (mesure de l'épaisseur du dépôt)
- (4) Analyse IRTF



- (1) Cellule réactionnelle / Échantillon
- (2) Double paroi (étanchéité thermique du cryostat)
- (3) Analyse IRTF / Irradiation VUV
- (4) Cryostat
- (5) Pompe de la double paroi
- (6) Spectromètre de Masse
- (7) Capteurs de P

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

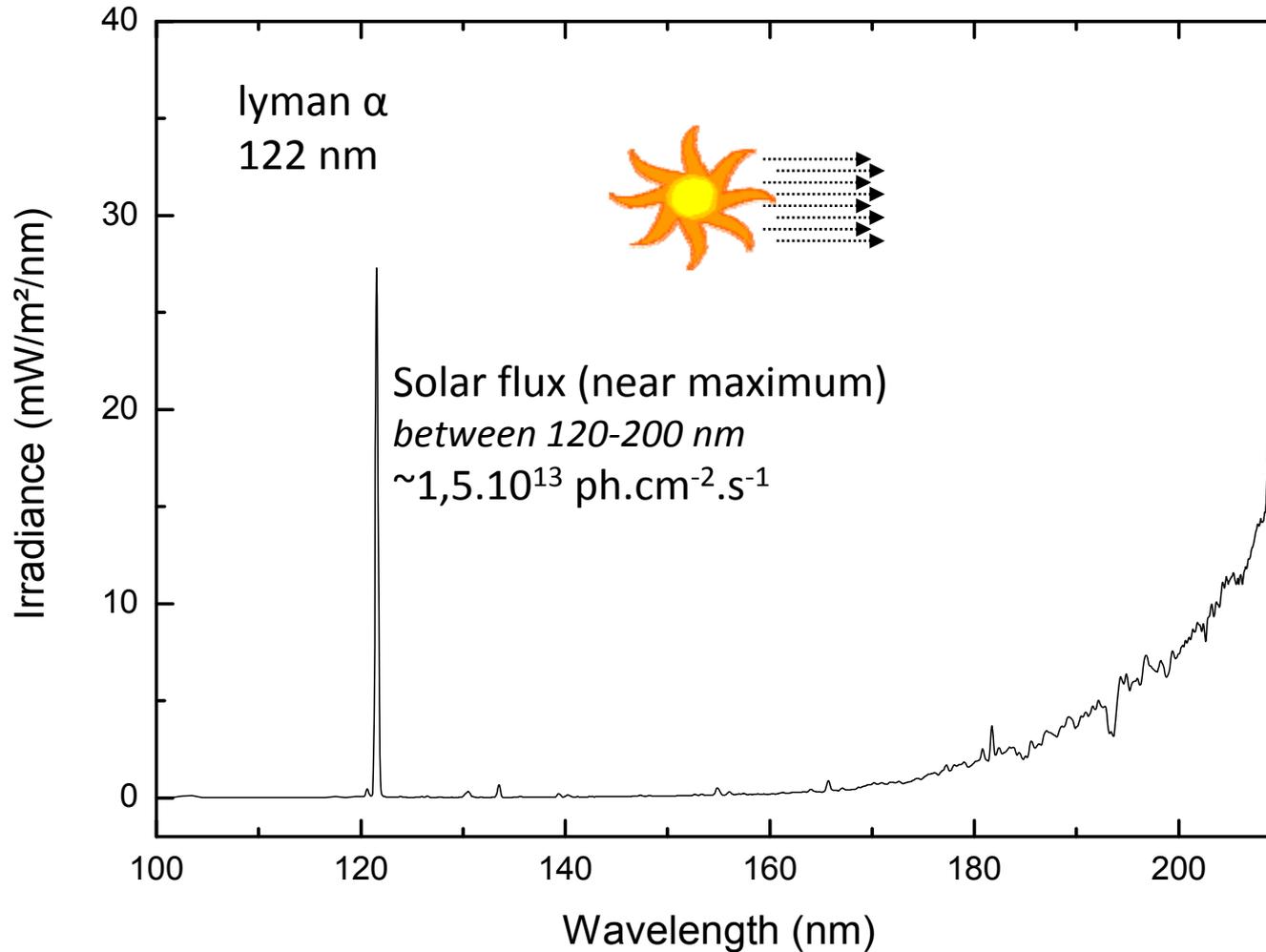
ILMA

Conclusions



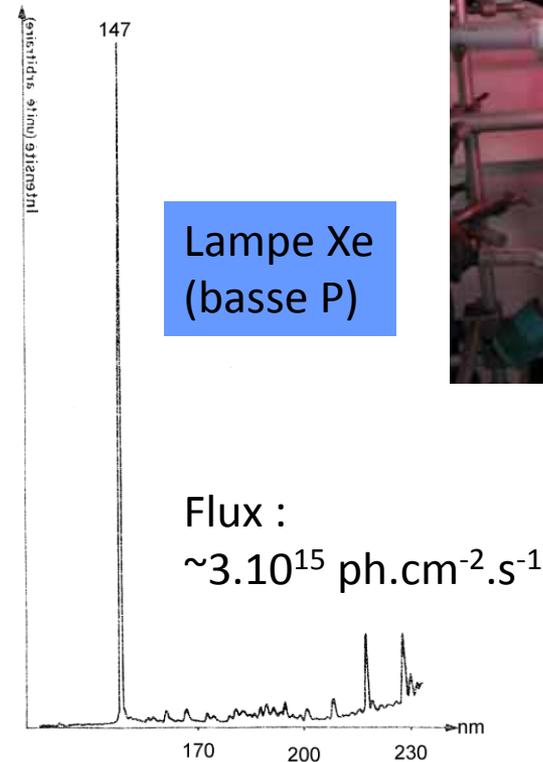
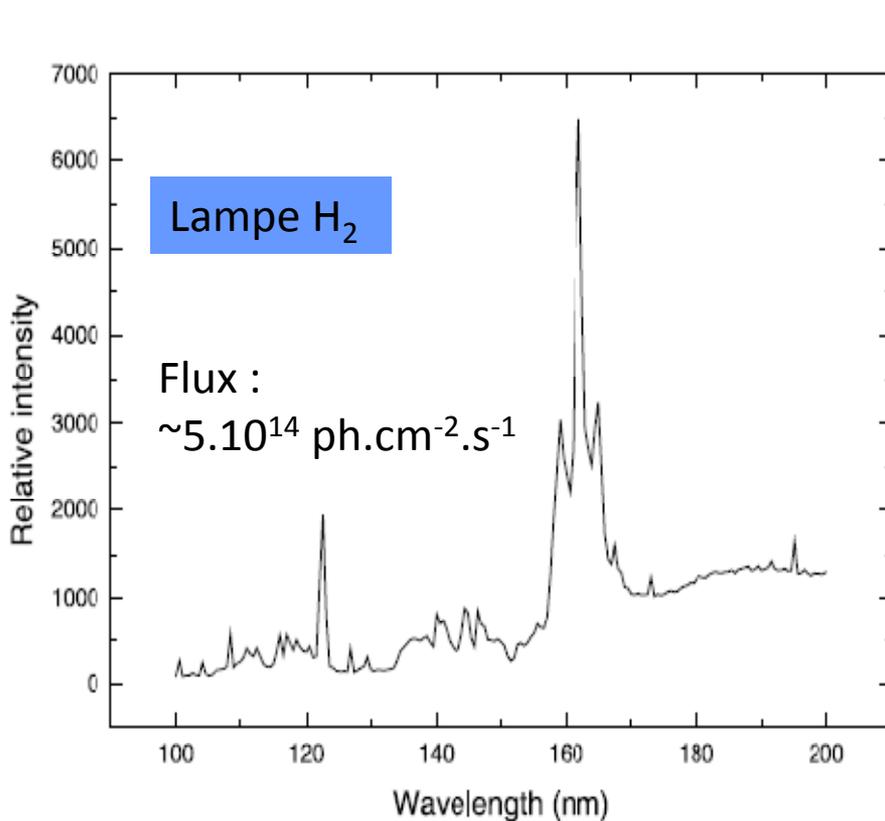
Photochimie dans le système solaire

La plupart des réactions se produisent pour des longueurs d'ondes < 200 nm



Photochimie au laboratoire

This domain is not easily simulated in the laboratory...



- soit des simulations incomplètes sur Terre
- soit de rares expériences en orbite terrestre



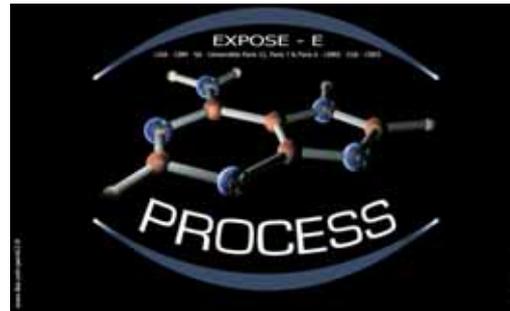
**Y'A-T-IL UNE DIFFERENCE ENTRE LES EXPERIENCES AU SOL
ET LES EXPERIENCES EN ORBITE**

Trois expériences en orbite pour des études de photochimie de solides et de gaz (LISA, SA, CBM, IJM) [2000- ...]



UV-olution :

[2005] FOTON-3M / BIOPAN 6
14-26 Septembre 2007



PROCESS, AMINO : Station Spatiale Internationale

- PROCESS [2005] – *Expose-E (colombus)* :
Fev. 2008 – Mai 2009
- AMINO [2000] - *Expose-R* : Dec. 2008 – xxx. 2010



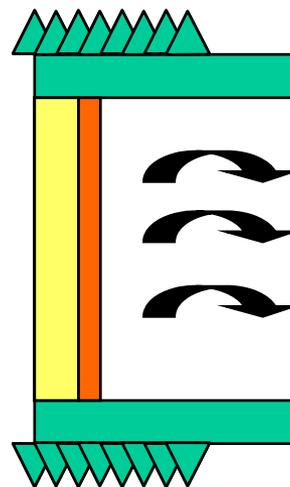
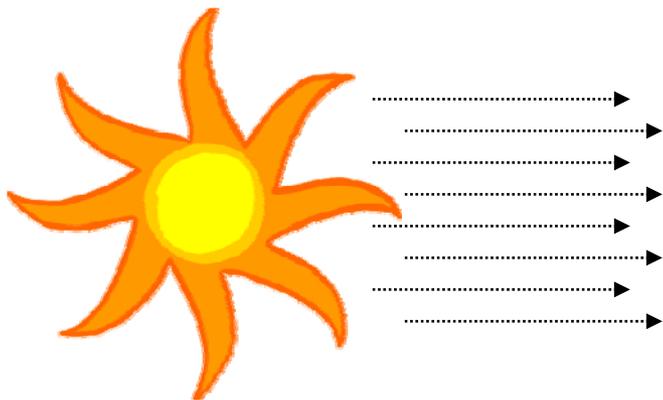
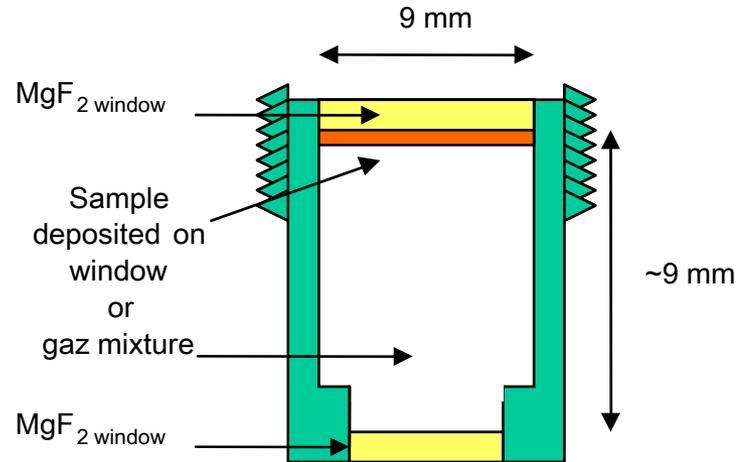
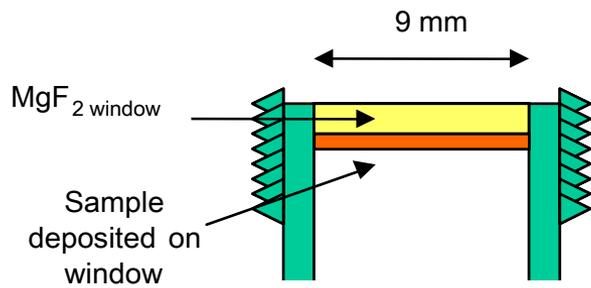
BIOPAN (FOTON)



EXPOSE (ISS)

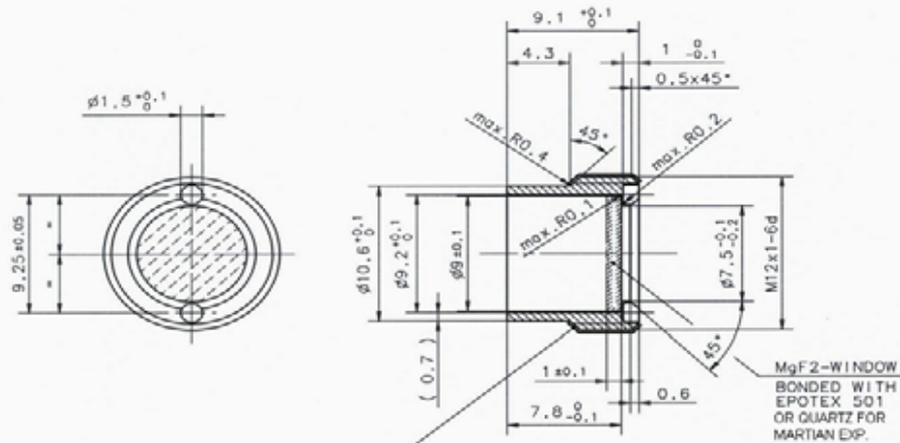
Cottin et al., ASR, 2008

Cellules d'exposition



- dégradation du film solide
- production de produits gazeux
(perdus dans l'espace ?)

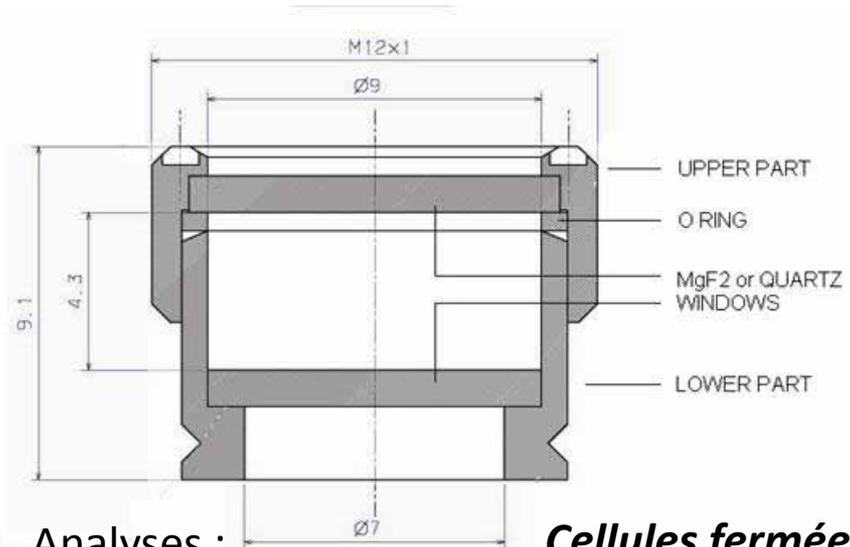
Cellules d'exposition



Analyses :

- Spectroscopie infrarouge

Cellules ouvertes



Analyses :

- Spectroscopie infrarouge
- Chromatographie en phase gazeuse

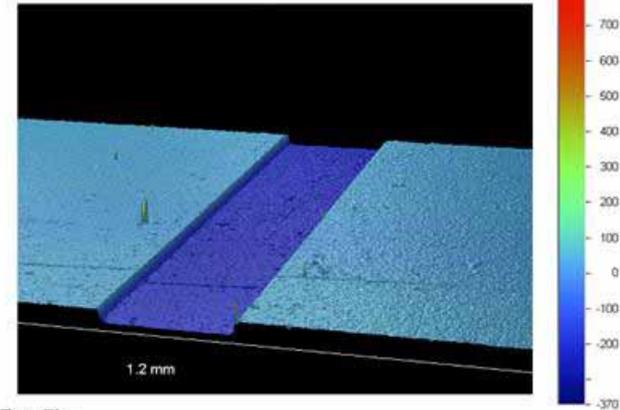
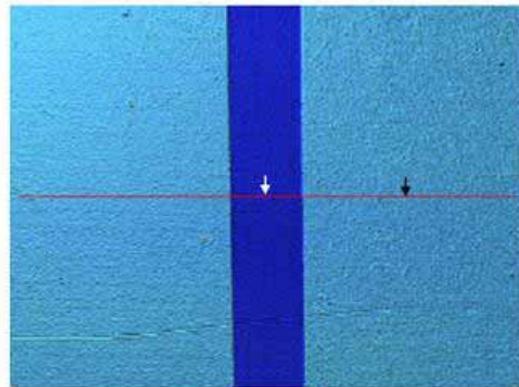
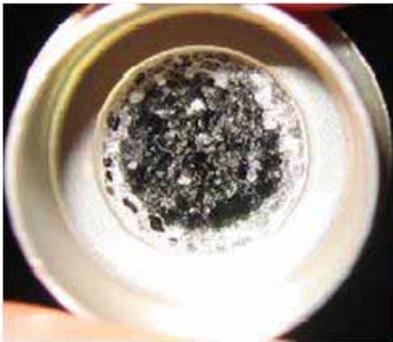
Cellules fermées

Préparation des échantillons solides

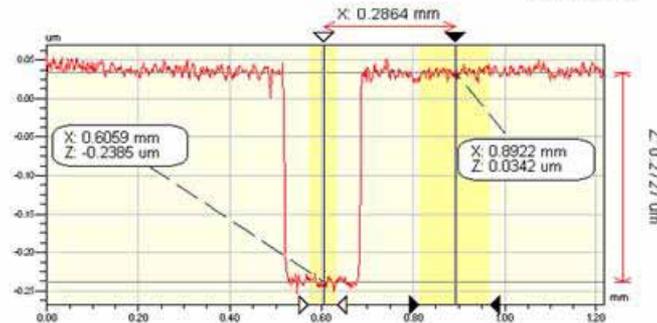
Réaliser des dépôt homogènes,
dont l'épaisseur est contrôlée

Stage Maitrise : Europe Mortier &
Jonathan Danjean (2005)

Stage M2 (2005-2006)
& Thèse : Yuan Guan (2006-2009)



X Profile



Mesures par
microscopie
interférométrique
(P. Ausset)

Etanchéité des cellules fermées

Première génération de cellules incompatible avec des expériences de longue durée

Cellules fermées nouvelle génération

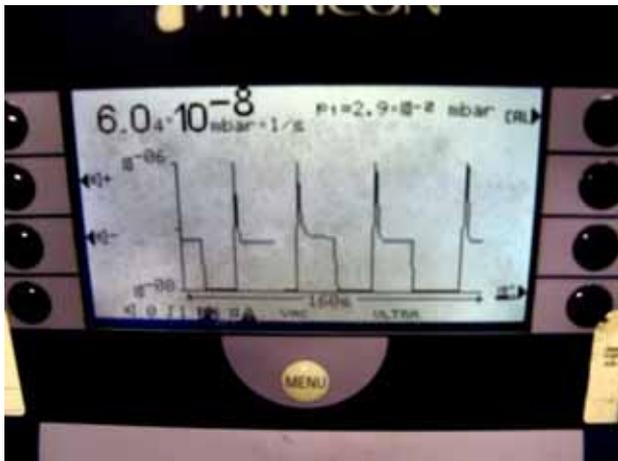
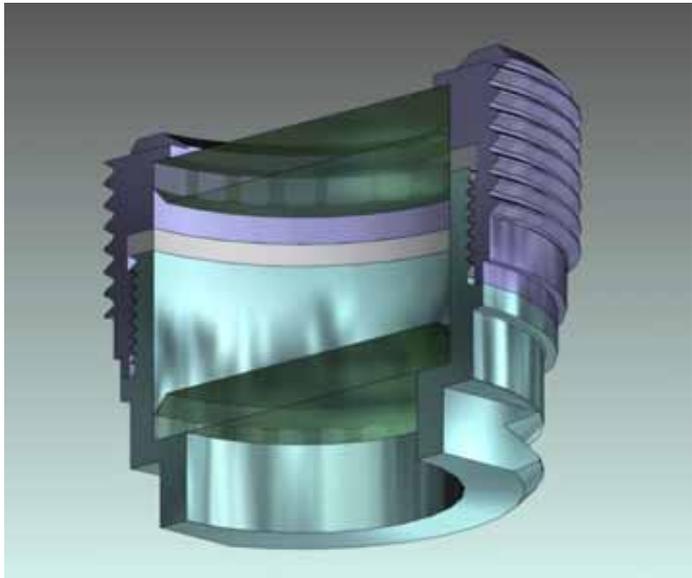
Développement DTA Air Liquide, Grenoble

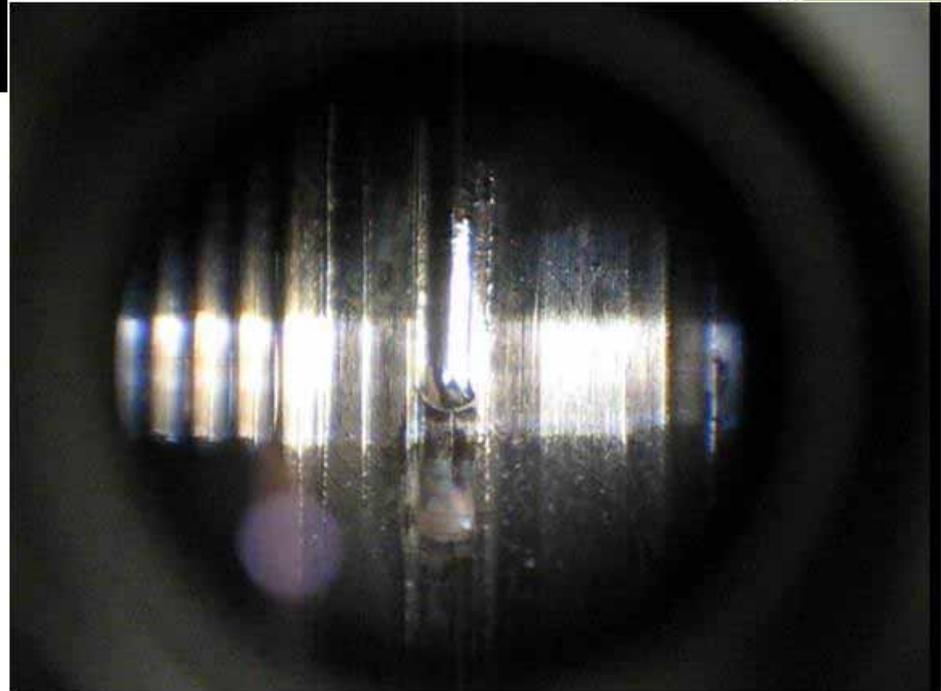
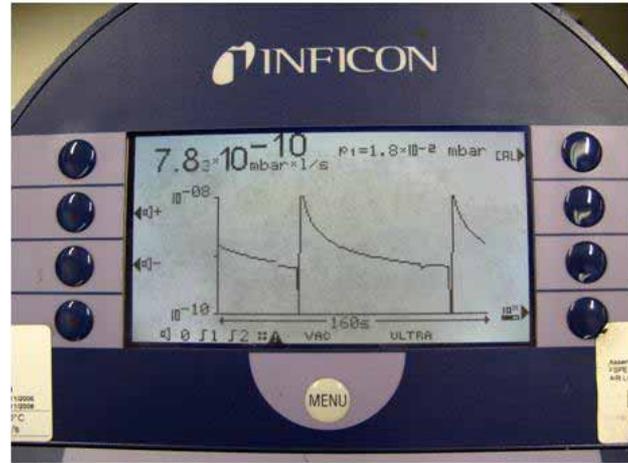
Utilisées pour AMINO

Cellules fermées extra étanches

Taux de fuite $< 10^{-9}$ mb.l/s,

Compatible avec des expositions de longue durée
(perte $< 10\%$ en 2 ans)

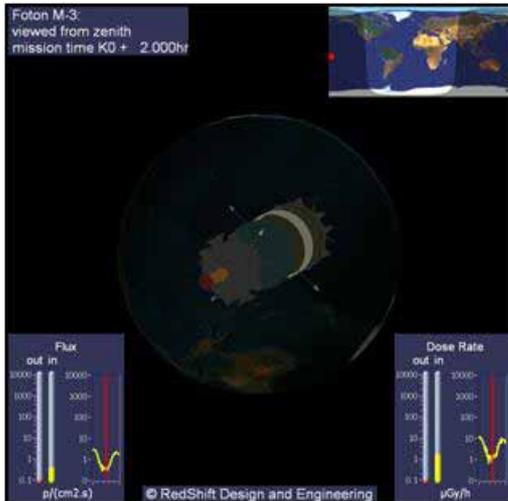
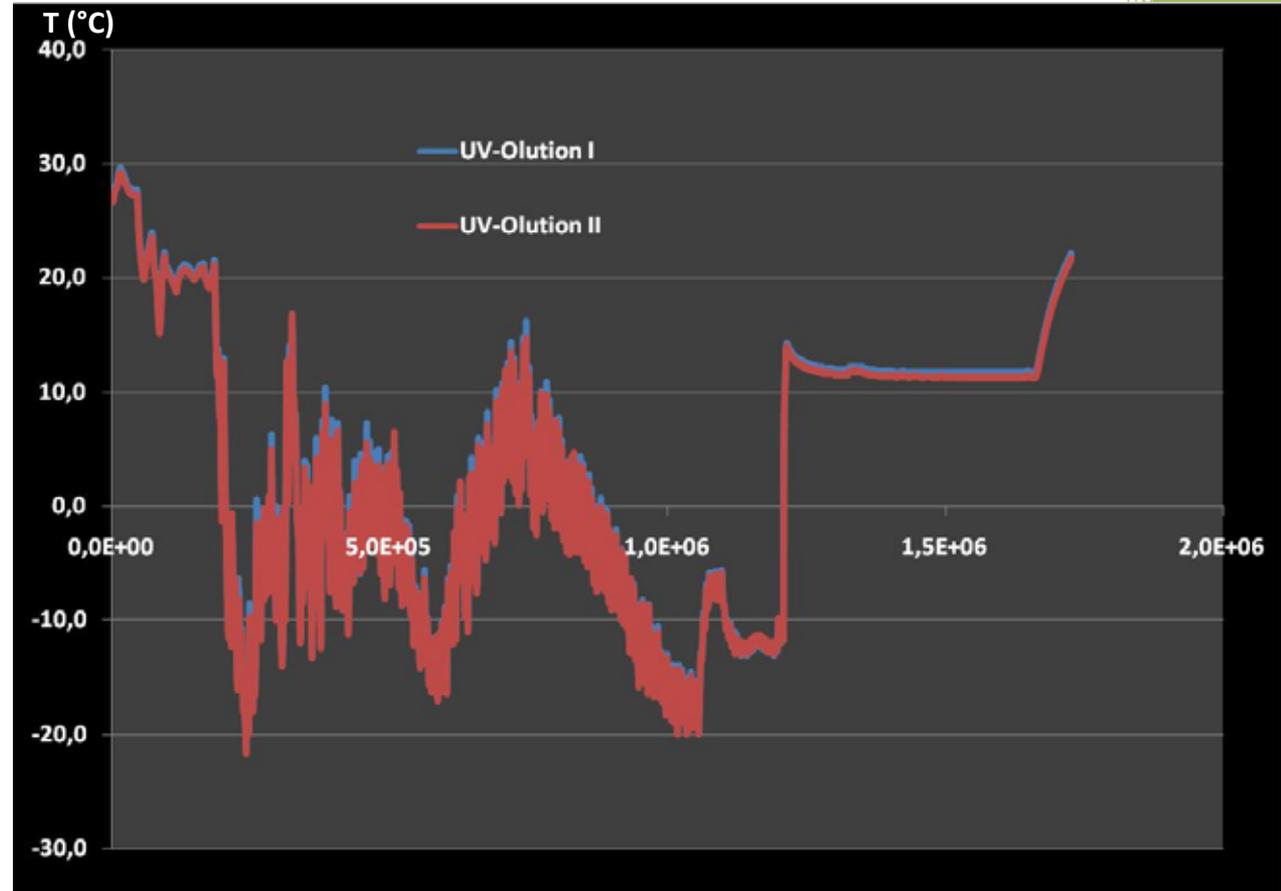




DTA Air Liquide, Grenoble : S. Triqueneaux, D. Chazot

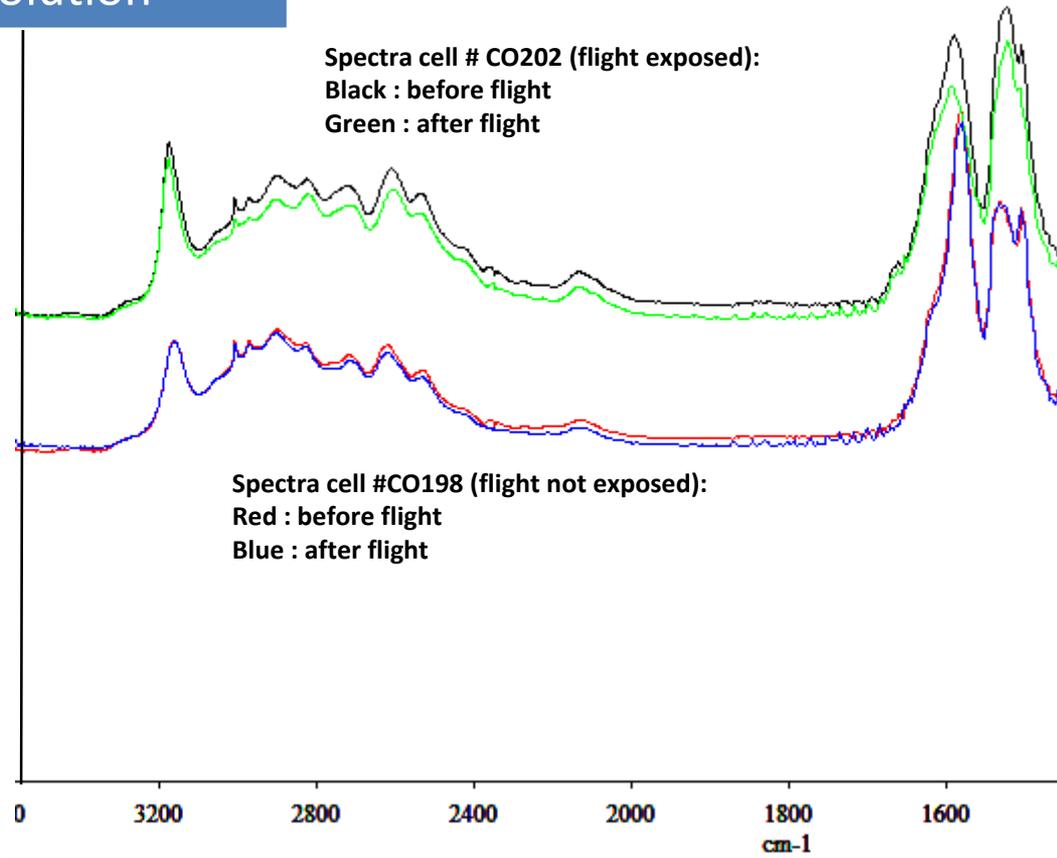
Résultats partiels Uvolution

Conditions de vol

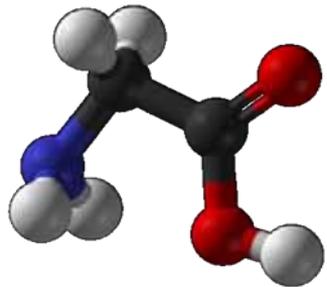


Durée d'exposition aux UV : 29 heures

Résultats partiels UEvolution

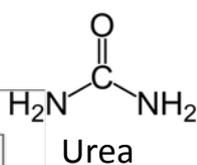
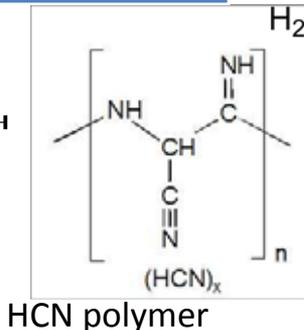
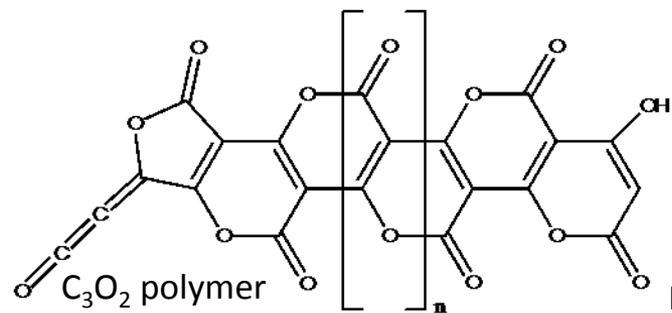


Glycine ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CO}_2\text{H}$)

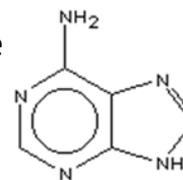


| Glycine Cell # | exp/not exp | Area before (3250-2470) | Area after (3250-2470) | Variation |
|----------------|--------------|-------------------------|------------------------|-----------|
| CO202 | EXPOSED | 32,3 | 28,7 | -11% |
| CO208 | EXPOSED | 25,5 | 22,7 | -11% |
| CO198 | NOT EXPOSED | 46,1 | 47,2 | 0% |
| CO199 | NOT EXPOSED | 28,1 | 28,2 | 0% |
| CO027 | GROUND CONT. | 28,2 | 28,3 | 0% |
| CO026 | GROUND CONT. | 31,4 | 30,8 | -2% |

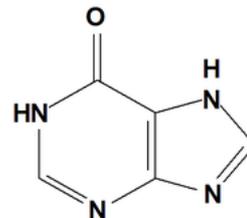
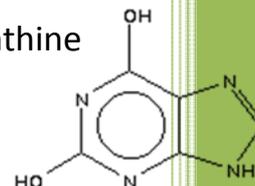
Résultats partiels UEvolution



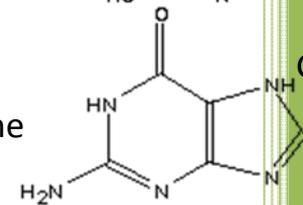
Adenine



Xanthine



Hypoxanthine



Guanine

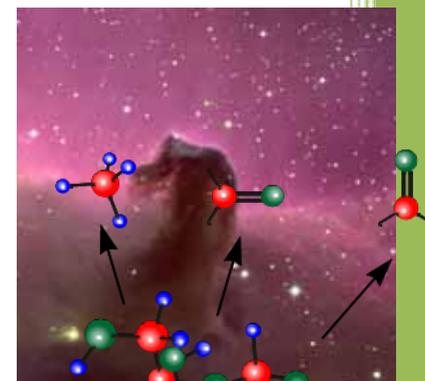
| Molecule | J(s-1) | Rel uncert. | Half Life at 1 AU (d) | Half Life in ISM* (yr) | Half Life in DC* (yr) |
|-----------------|---------|-------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| glycine | 1,1E-06 | 10% | 7 | 3,1E+03 | 3,1E+08 |
| adenine | 5,8E-07 | 21% | 14 | 5,8E+03 | 5,8E+08 |
| guanine | 7,2E-08 | 114% | 112 | 3,1E+03 | 3,1E+08 |
| xanthine | 7,1E-07 | 17% | 11 | 4,7E+03 | 4,7E+08 |
| hypoxanthine | 6,3E-07 | 53% | 13 | 5,3E+03 | 5,3E+08 |
| urea | 1,7E-07 | 131% | 46 | 1,9E+04 | 1,9E+09 |
| polyHCN | 2,3E-06 | 381% | 3 | 1,4E+03 | 1,4E+08 |
| C3O2 polymer(*) | 1,5E-06 | 39% | 5 | 2,2E+03 | 2,2E+08 |

extrapolation
→

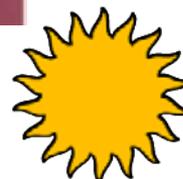
(*) CN band

*Interstellar Medium

*Dark Clouds



$I = 1,53 \cdot 10^{13} \text{ ph.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ at 1 AU (Mount & al. 1980) $\lambda < 200 \text{ nm}$
 $I = 10^8 \text{ ph.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ISM (Mathis, Mezger & Panagia 1983) $\lambda < 200 \text{ nm}$
 $I = 10^3 \text{ ph.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ IS Cloud (Prasad & Tarafdar 1983) $\lambda < 200 \text{ nm}$



$h\nu$



Résultats partiels UVolutions : orbite Vs. laboratoire



| Molécule | σ (orbit) cm^{-2} | σ (lab's simulation) cm^{-2} | Ratio ($\sigma_{\text{orbit}}/\sigma_{\text{lab}}$) |
|-----------------|--------------------------------------|---|--|
| glycine | $1,62\pm 0,41 \cdot 10^{-19}$ | $3,01\pm 1,62 \cdot 10^{-20}$ | 5 |
| adenine | $8,11\pm 3,02 \cdot 10^{-20}$ | $5,37\pm 5,90 \cdot 10^{-22}$ | 142 |
| guanine | $1,06\pm 1,37 \cdot 10^{-20}$ | $< 7,70 \cdot 10^{-22}$ | > 14 |
| xanthine | $1,05\pm 0,33 \cdot 10^{-19}$ | $7,70\pm 8,79 \cdot 10^{-22}$ | 136 |
| hypoxanthine | $9,33\pm 6,36 \cdot 10^{-20}$ | $7,31\pm 6,62 \cdot 10^{-22}$ | 128 |
| urea | $2,57\pm 3,75 \cdot 10^{-20}$ | $< 7,70 \cdot 10^{-22}$ | > 33 |
| polyHCN | $3,44\pm 1,36 \cdot 10^{-19}$ | $1,34\pm 2,05 \cdot 10^{-21}$ | 257 |
| C3O2 polymer(*) | $2,27\pm 1,22 \cdot 10^{-19}$ | $1,08\pm 1,27 \cdot 10^{-20}$ | 210 |



- Mauvaise estimation du flux de la lampe UV ?
- Mauvaise représentativité de la lampe ?

En 2007 et 2008 :
plus de 500 échantillons
préparés pour les expériences
en vol et contrôles sols





- **Acquisition d'un spectromètre VUV**
 - Caractérisation du flux des lampes VUV de laboratoire
 - Mesure des spectres VUV des molécules étudiées
 - Contrôle qualité des propriétés de transmission des fenêtres d'exposition

- **Projet VITRINE (analyse fonctionnelle et R&T CNES)**

- Optimisation du temps d'exposition des échantillons au cours de leur séjour en orbite.
- Extension du champ d'investigation à la photolyse de glaces.
- Suivi cinétique in-situ de l'évolution des échantillons.



PARTENAIRES :

Les chercheurs et enseignants-chercheurs du LISA-GPCOS :

Yves BÉNILAN, Patrice COLL, Nicolas FRAY, Marie-Claire GAZEAU, Antoine JOLLY, François RAULIN, Robert STERNBERG

Centre de Biophysique Moléculaire : Frances WESTALL, André BRACK, Marylène BERTRAND et Annie CHABIN

Institut d'Astrophysique Spatiale : Louis d'HENDECOURT et Emmanuel DARTOIS

Laboratoire de Physique des Interactions Ioniques et Moléculaires : Nathalie PIETRI et al.

Service d'Aéronomie : Cyril SZOPA

Observatoire de Paris : Sydney LEACH

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

ILMA

Conclusions

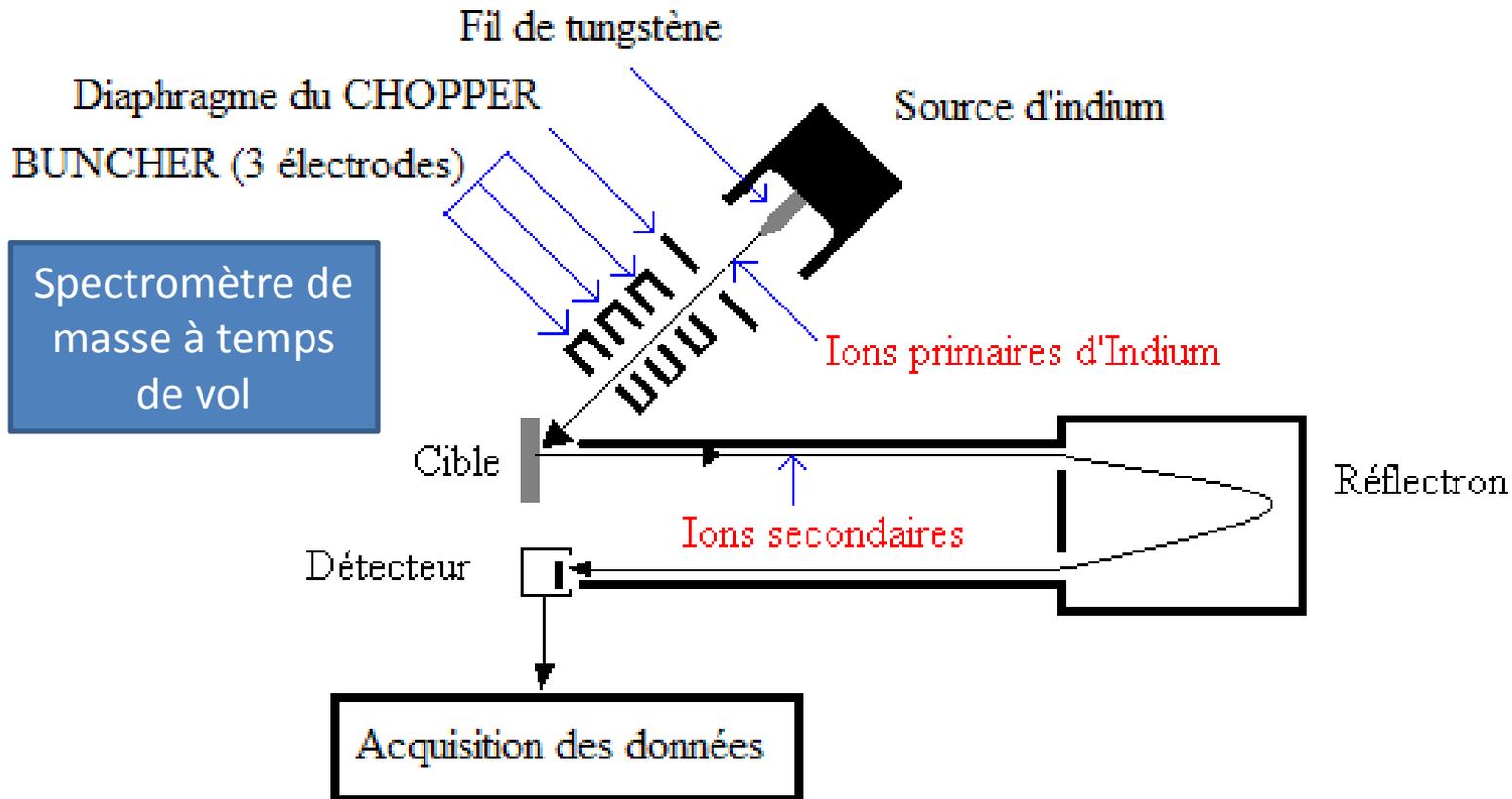


COSIMA

Analyse de la composition minérale,
moléculaire, isotopique des grains de
poussière.

Résolution ~ 2000 (à 100 μm)

Col depuis Janvier 2005





Depuis 2005, collaboration avec le LPCE d'Orléans pour la caractérisation de la matière organique :

- Bibliothèque de spectres de références
- Interprétation de spectres complexes

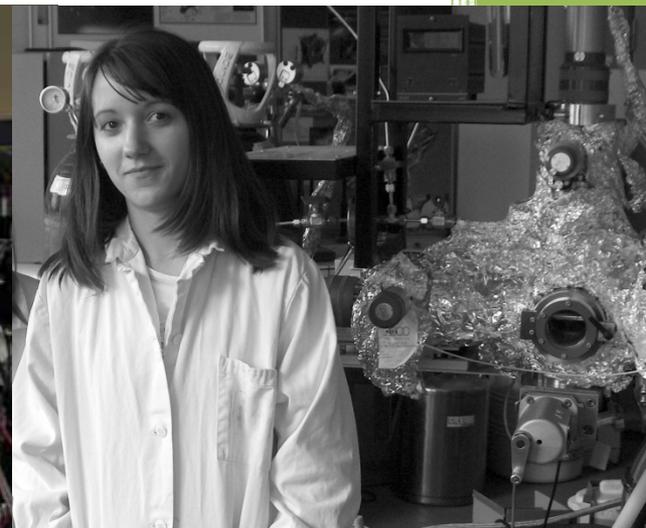
L. Thirkell, C. Briois



Léna Le Roy, Audrey Noblet
Stage de L3 (2006)



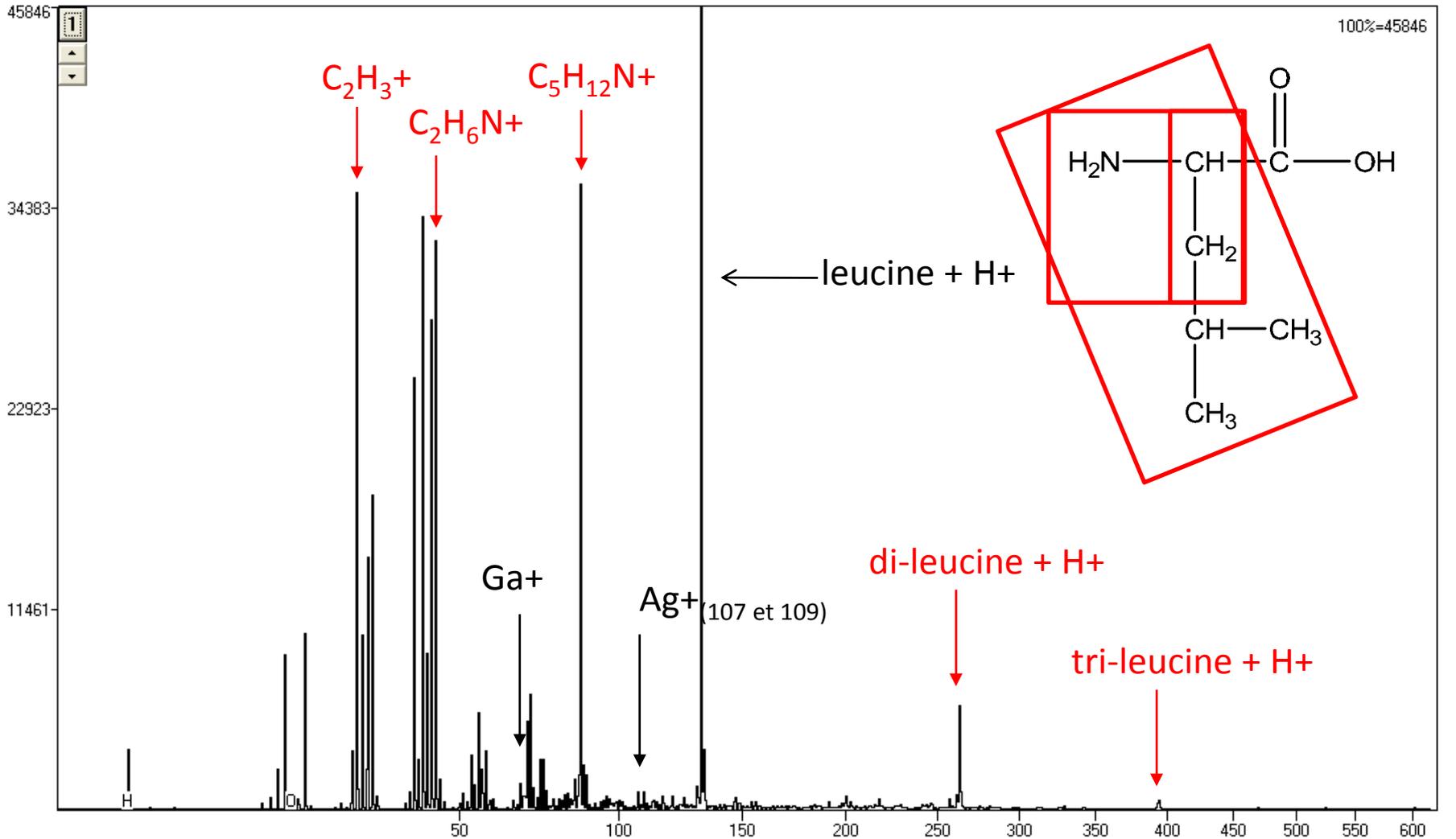
Karen Habib, Guillaume Valette
Stage de L3 (2007)



Léna Le Roy
Thèse LISA/LPCE 2008-...
Cofinancement CNES/Région centre

Exemple de la leucine (PM = 131)

Echantillon préparé par sublimation sur cible d'argent



FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

ILMA

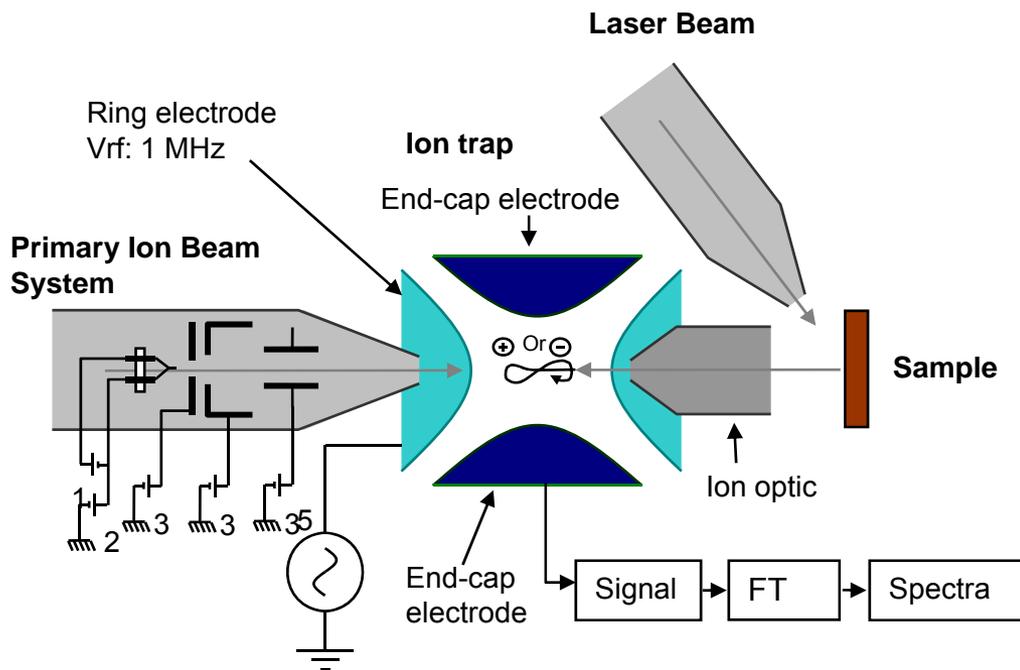
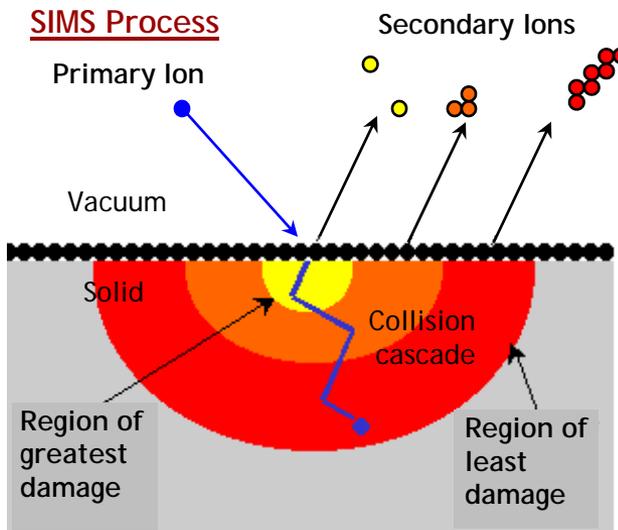
Conclusion



Marco Polo : Mission ESA/JAXA

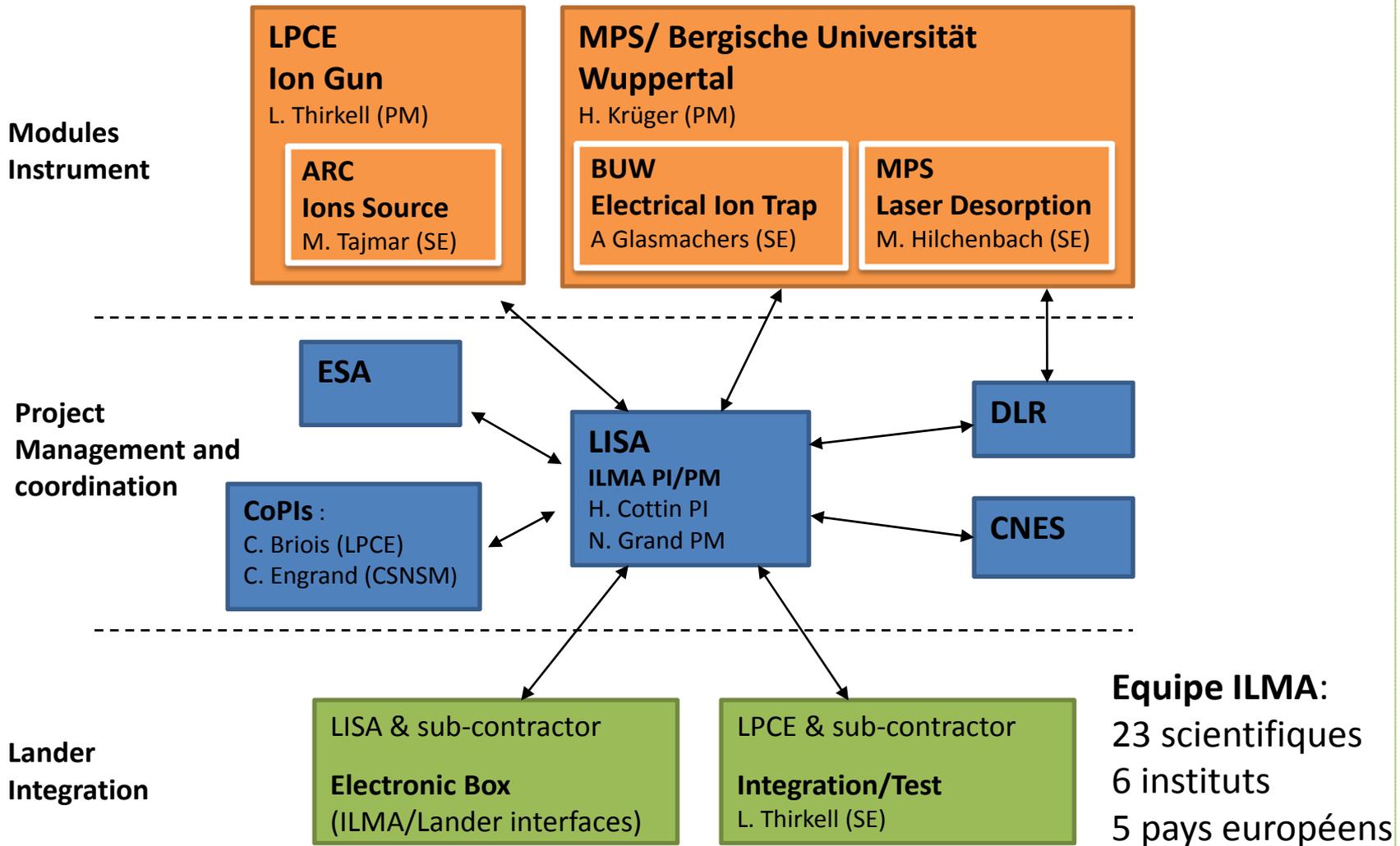
Retour d'échantillon d'un astéroïde géocroiseur carboné

ILMA
 Ion Laser Mass Spectrometer
 (analyse in-situ)



TECHNICAL REQUIREMENTS (with electronics)

| | |
|------------------|---|
| Mass: | 2.5 kg |
| Volume: | 15x17x5 cm ³ |
| Ion trap volume: | 6x6x4.5 cm ³ |
| Mean power: | 1.5 W |
| Peak power: | 3 W |
| Detector: | end-cap electrodes |
| Mass range: | 1-300 amu |
| Dynamic range: | 10,000 |
| Mass resolution: | >10,000 at 50% height for masses <130 amu |
| Analyzed area: | 1 mm ² |



Co-Investigators -

M. Aliman (Zeiss GmbH.), D. Bockelée-Morvan (Obs. Paris), J.R. Brucato (Florence Obs.), M. Chaussidon (CRPG), S. Derenne (Paris), S. Erard (Obs. Paris), M. Fulchignoni (Obs. Paris), M. Hilchenbach (MPS Katlenburg-Lindau), H. Krueger (MPS Katlenburg-Lindau), P. Michel (Obs. Côte d'Azur), E. Quirico (LPG), S. Russell (NHM London), G. Strazzulla (Catania Obs.), C. Szopa (S.A.), W. Steiger (ARC), R. Thissen (LPG).

FORMATION ET EVOLUTION DE LA MATIERE ORGANIQUE DES COMETES ET DES PETITS CORPS DU SYSTEME SOLAIRE

PLAN

Introduction

Astrochimiste ou/et exobiologiste ?

Les petits corps du système solaire : astrochimie et exobiologie

Quelques éléments de méthodologie

La chimie organique des comètes et l'étude des sources distribuées

Que savons-nous de la chimie organique des comètes ?

Sémaphore Cométaire – Expérimentation

Sémaphore Cométaire – Modélisation

Formation et évolution de la matière organique dans le système solaire

Glaces interstellaires et cométaires : vers le projet OREGOC

Photochimie dans le système solaire : le programme EXPOSE

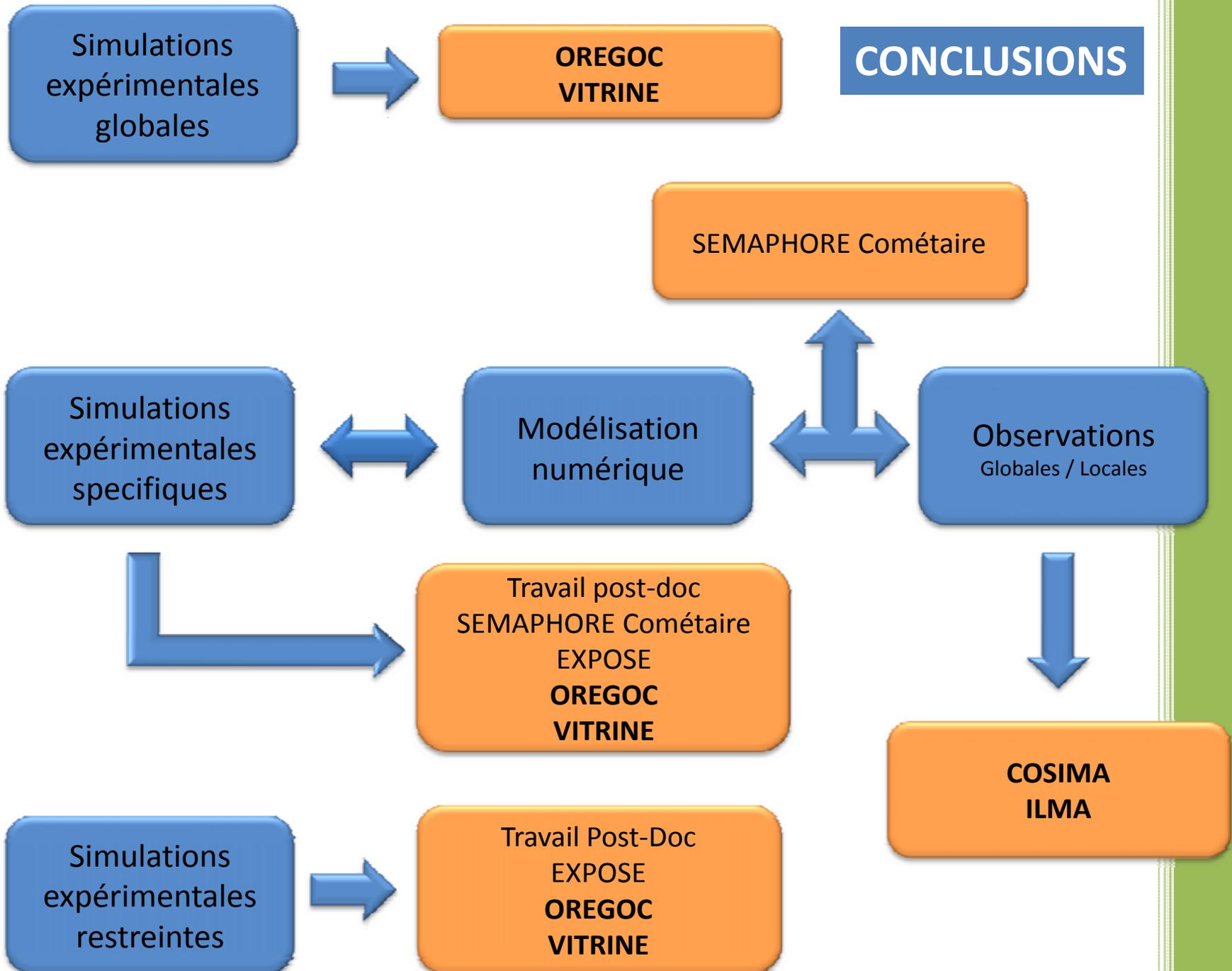
Missions d'exploration in-situ et analyse de la matière organique

COSIMA

ILMA

Conclusions





CONCLUSIONS

Schutte, W. A., et al., 1993. **Formaldehyde and organic molecule production in astrophysical ices at cryogenic temperatures.** *Science*. 259, 1143-1145.

Etudes à approfondir : projets **OREGOC, VITRINE**

Simulations
expérimentales

Cottin, H., et al., 2000. **An experimental study of the photodegradation of polyoxymethylene at 122, 147 and 193 nm.** *J. photochem. & photobiol.* 135, 53-64.

Etudes à approfondir : projets **OREGOC, EXPOSE, VITRINE**

Sources



POM



Puits

Modélisation &
Observations



Cottin, H., et al., 2004. **Origin of cometary extended sources from degradation of refractory organics on grains: polyoxymethylene as formaldehyde parent molecule.** *Icarus*. 167, 397–416.

*Le Roy L., et al., 2015, Detection of **polyoxymethylene** in comet 67P/C-G with the COSIMA instrument, ????*

CONCLUSIONS

Simulations
expérimentales

Cottin, H., et al., 2001. Production of hexamethylenetetramine in photolyzed and irradiated interstellar cometary ice analogs. *ApJL*. 561, L139-L142.

Etudes à approfondir : projets **OREGOC**, **VITRINE**

Cottin, H., et al., 2002. Photodegradation of Hexamethylenetetramine by VUV and its relevance for CN and HCN extended sources in comets. *ASR*. 30, 1481-1488.

Sources



HMT



Puits

Modélisation &
Observations

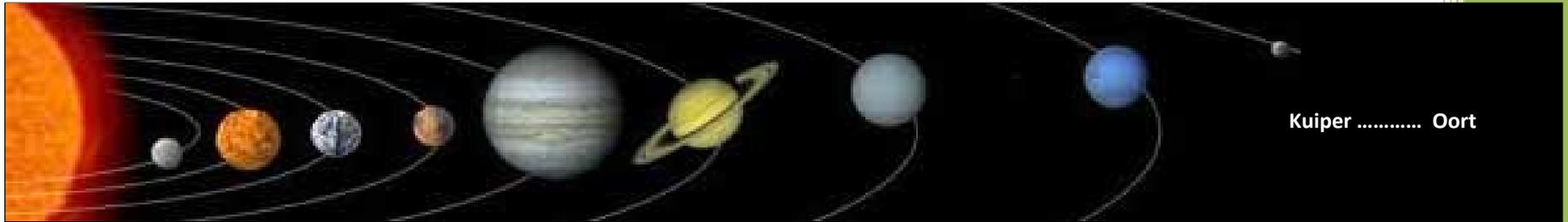


????

CONCLUSIONS

Planétésimaux rocheux

Planétésimaux glacés ...



Comprendre le « langage » de la chimie organique dans les environnements extraterrestres et plus particulièrement les petits corps

Vers des expériences plus réalistes : **OREGOC, VITRINE**

Synthèses (sources), mesure de temps de vie (puits), origine des sources distribuées...

Instrumentation in-situ : **COSIMA, ILMA**

spectrométrie de masse, vers la haute résolution

REMERCIEMENTS

Jury : Pascale Ehrenfreund, Louis D'Hendecourt, Jacques Crovisier, Michel Cabane, Marcello Fulchignoni, François Raulin, Michel Viso

Tous les membres du GPCOS, passés et présents : Yves Bénilan, Paul Bruston, Patrice Coll, Marc David, Nicolas Fray, Marie-Claire Gazeau, Murielle Jérôme, Antoine Jolly, Frédérique Macari, Franck Mettetal, Pierre Paillous, Charles Rivron, Robert Sternberg

Les membres du LISA et particulièrement : Patrick Ausset, Noel Grand, Sandrine David, Annie Fortin, Mireille Paul, Fazia Radi, Isabelle Rosetzky, Jean-Marie Flaud

Mes (ex) étudiants : Souleyman Bachir, Rodolphe Mulette, Nelson Martin, Frédéric Moindrot, Nacima Siad, Sébastien Desrutin, Cécilia Reis, Alexandra Fursy, Cyril Duval, Fabien Stalport, Europe Mortier, Jonathan Danjean, Yuan Yong Guan, Audrey Noblet, Léna Le Roy, Karen Habib, Guillaume Valette

LPCE : Christelle Briois, Gilles Poulet, Laurent Thirkell / **CSNSM** : Cécile Engrand

CBM : André Brack, Marylène Bertrand, Annie Chabin, Frances Westall

SA : Cyril Szopa / **IJM** : Marie-Christine Maurel, Jacques Vergne

LESIA : Nicolas Biver, Dominique Bockelée-Morvan, Jacques Crovisier

Observatoire de Bordeaux : Didier Despois, Muriel Gargaud

GSFC : Reggie Huddson, Marla Moore

L'équipe COSIMA, ILMA, VITRINE, les collègues du GDR exobio et de l'école de Propriano

CNES : Didier Chaput, Sylvie Léon, Michel Viso / **ESA** : René Demets, Pietro Baglioni, ...

DLR : Elke Rabbow, Corinna Panitz / **Air Liquide** : Sébastien Triqueneau, Dominique Chazot

Comat, Kayser Threde

