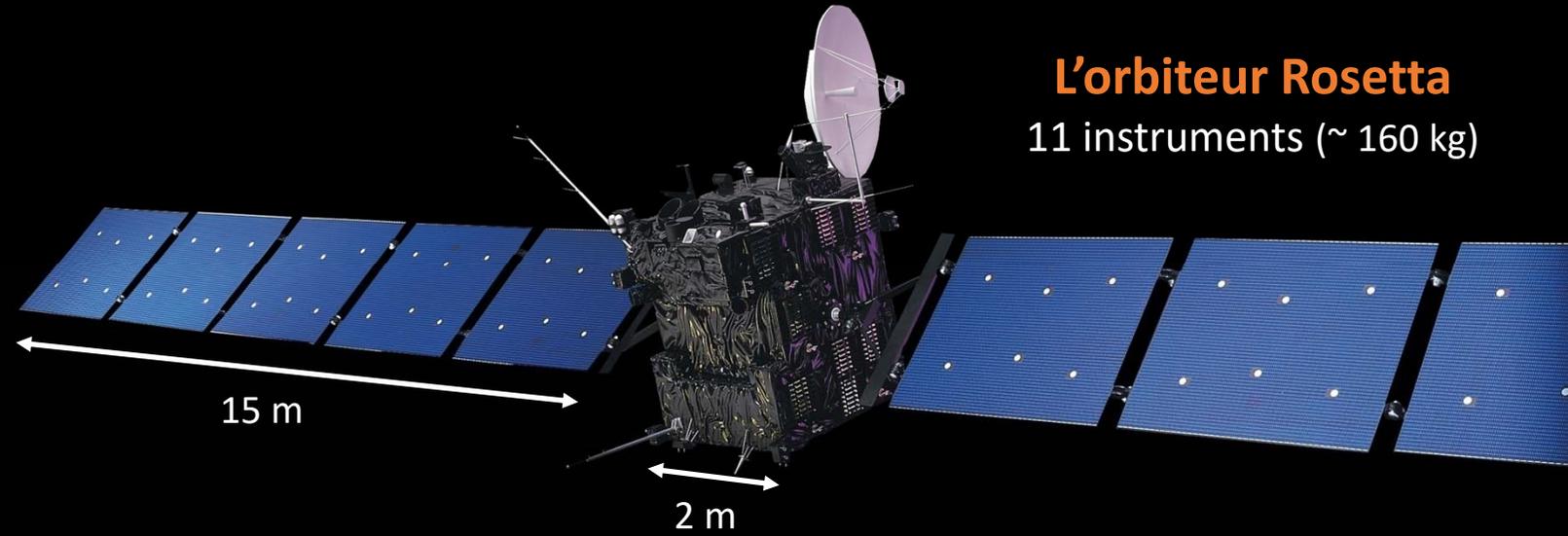
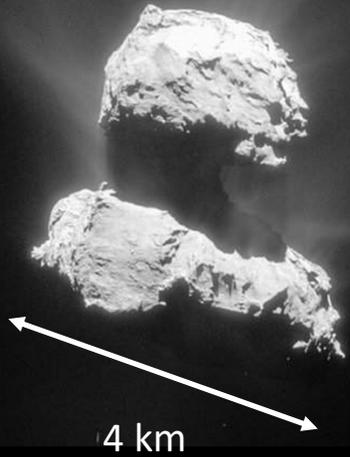




# Comète 67P : Mission Rosetta

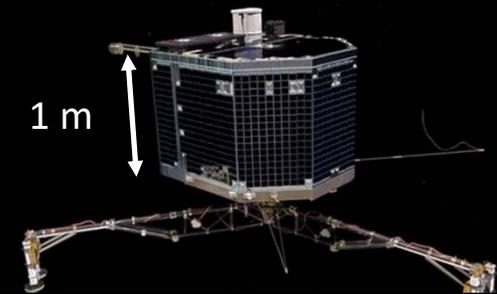


**L'orbiteur Rosetta**  
11 instruments (~ 160 kg)



**10 années de voyage  
et 2 années de mission**

**L'atterrisseur Philae**  
10 instruments (~ 20 kg)

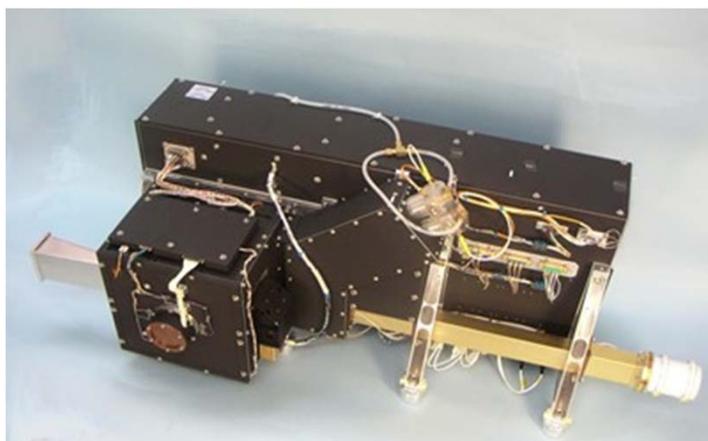


# COSIMA : COMetary Secondary Ion Mass Analyzer

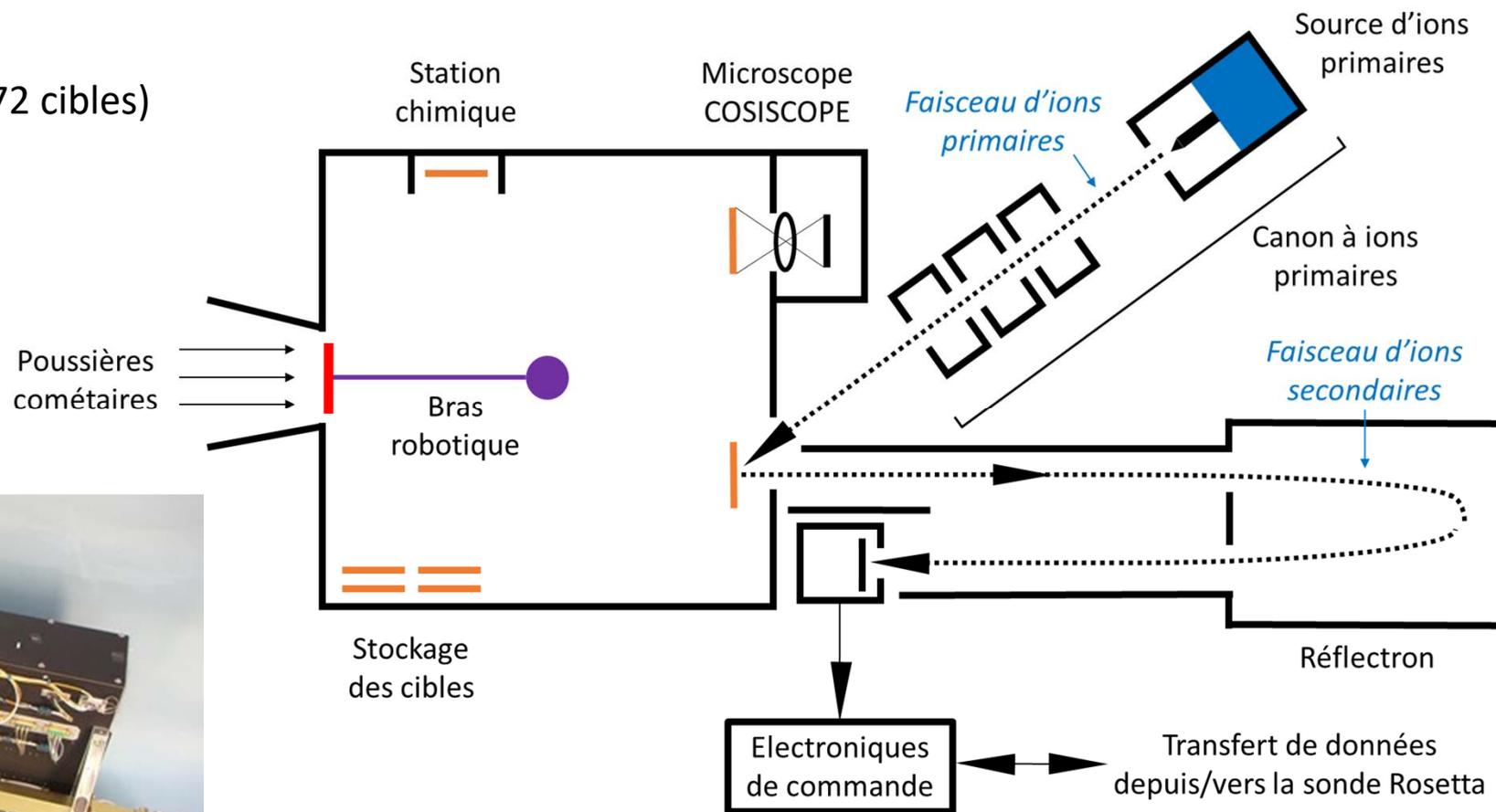
Le mode **COLLECTE** (72 cibles)

Le mode **IMAGE**

Le mode **ANALYSE**



(99 x 36 x 36 cm<sup>3</sup> et 20 kg)

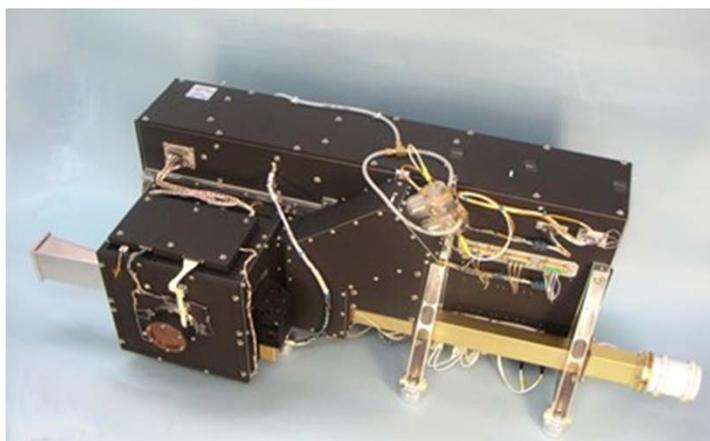


# COSIMA : COMetary Secondary Ion Mass Analyzer

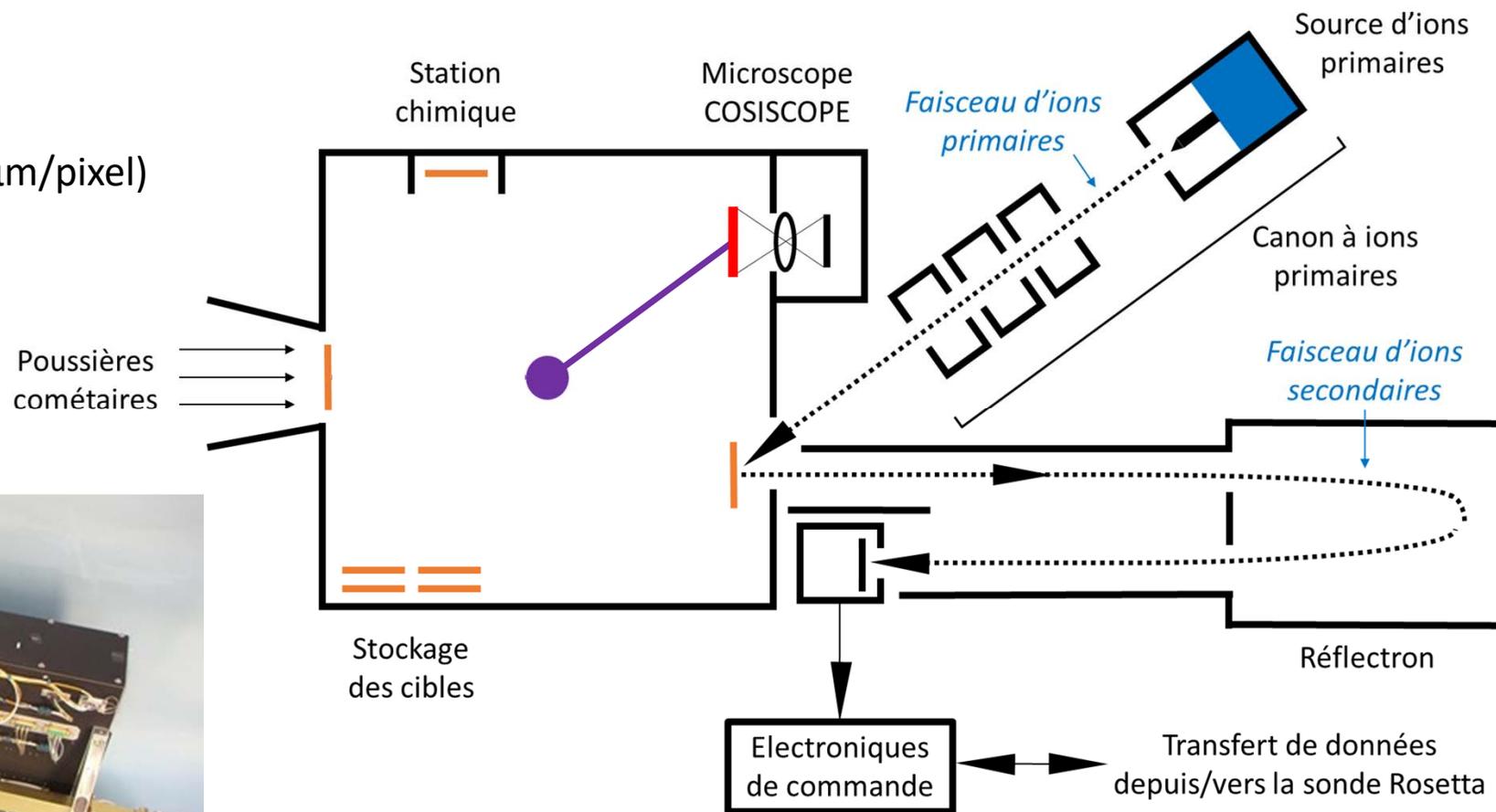
Le mode **COLLECTE**

Le mode **IMAGE** (14  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ )

Le mode **ANALYSE**



(99 x 36 x 36 cm<sup>3</sup> et 20 kg)

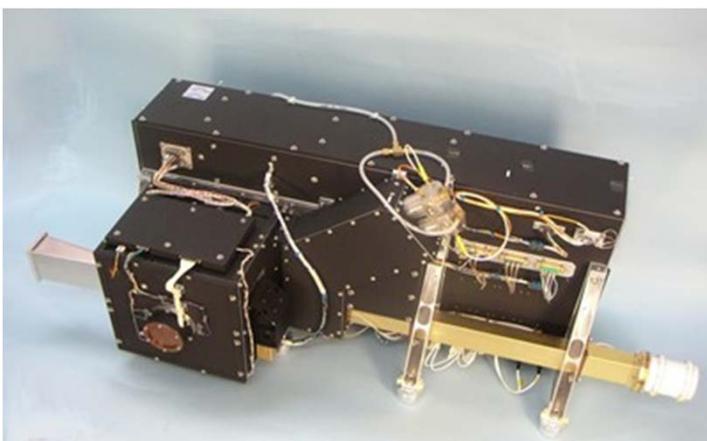


# COSIMA : COMetary Secondary Ion Mass Analyzer

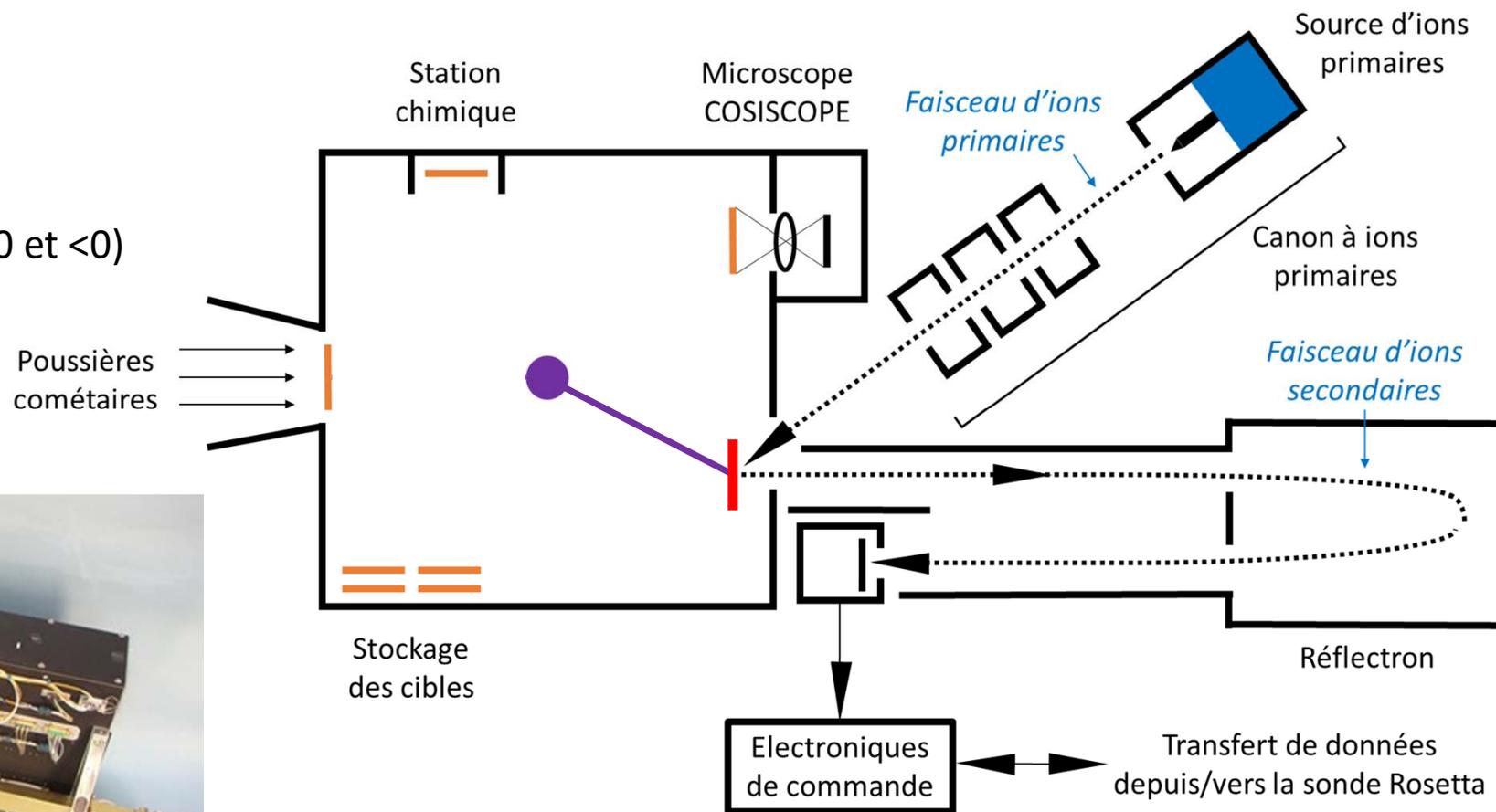
Le mode **COLLECTE**

Le mode **IMAGE**

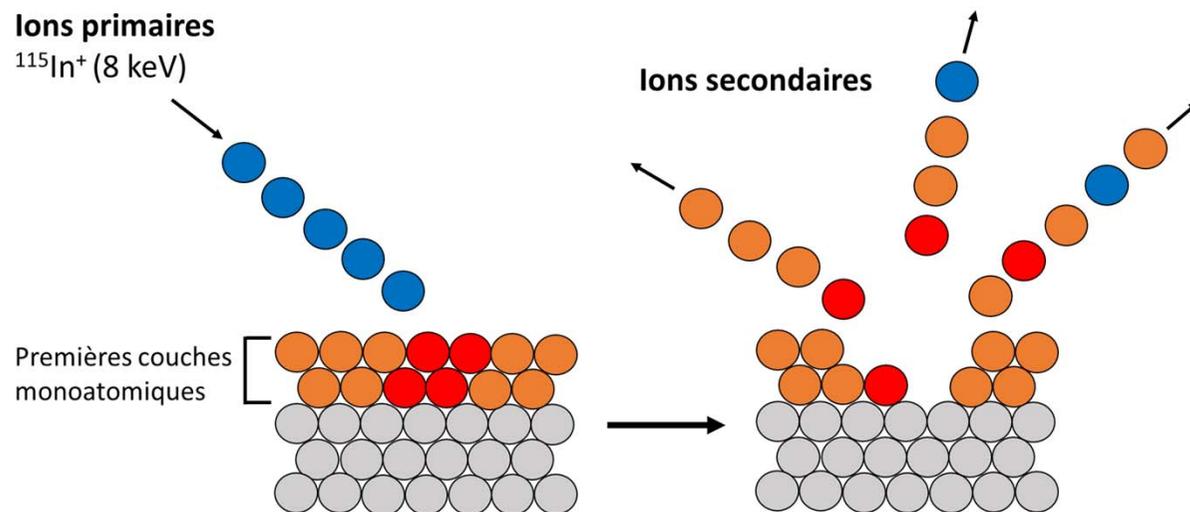
Le mode **ANALYSE** (>0 et <0)



(99 x 36 x 36 cm<sup>3</sup> et 20 kg)



# COSIMA : COmetary Secondary Ion Mass Analyzer



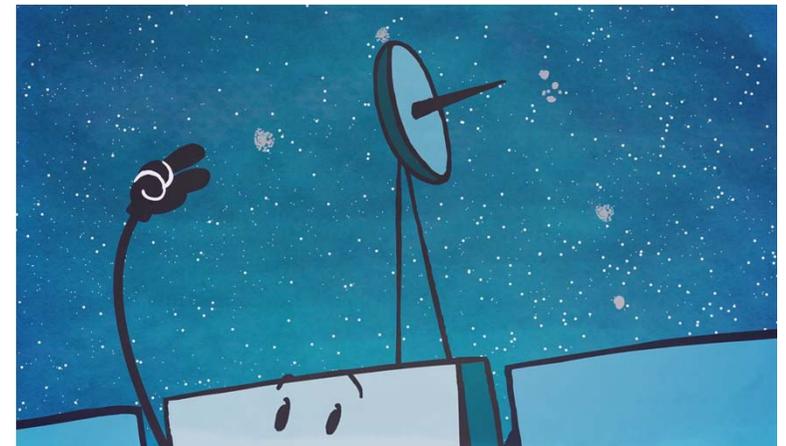
Une analyse de surface

- Taille du faisceau d'ions primaires :  **$35 \times 50 \mu\text{m}^2$**
- Résolution en masse :  **$m/\Delta m_{50\%} \approx 1400$**  à  $m/z = 100$

# Objectifs

## **COSIMA**

Etudier la composition chimique – organique et inorganique – des particules



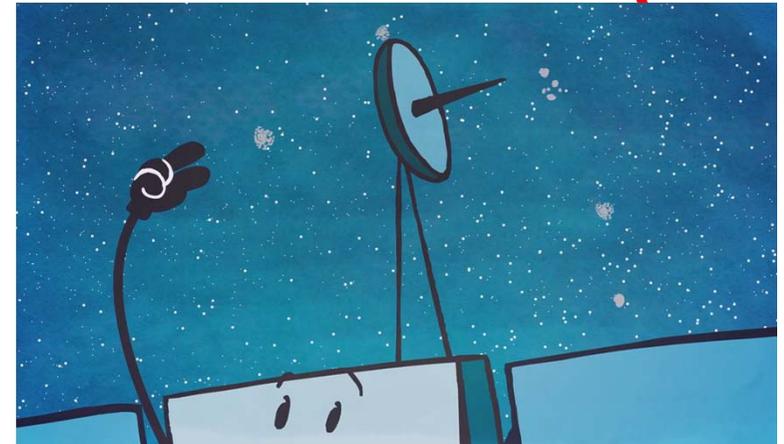
## COSIMA

Etudier la composition chimique – organique et inorganique – des particules

## Thèse

Etudier la **composante organique** des particules

- Calibration
- Détection
- Caractérisation
- Quantification



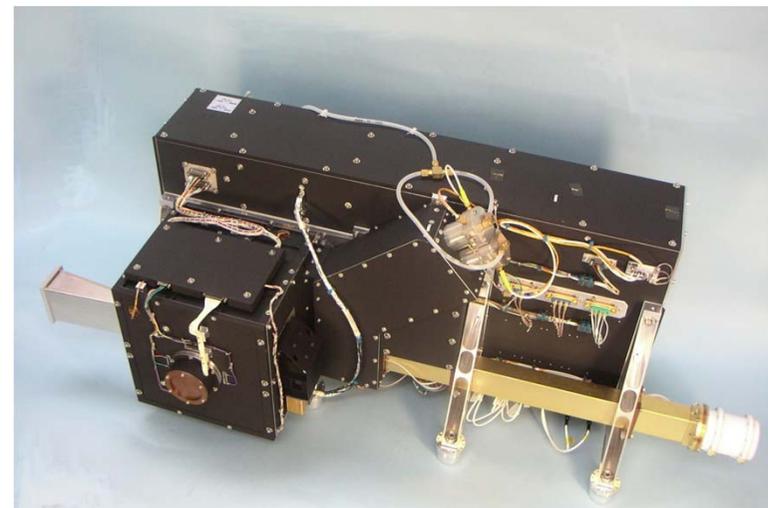
## Thèse

Etudier la **composante organique** des particules

- **Calibration**
- Détection
- Caractérisation
- Quantification

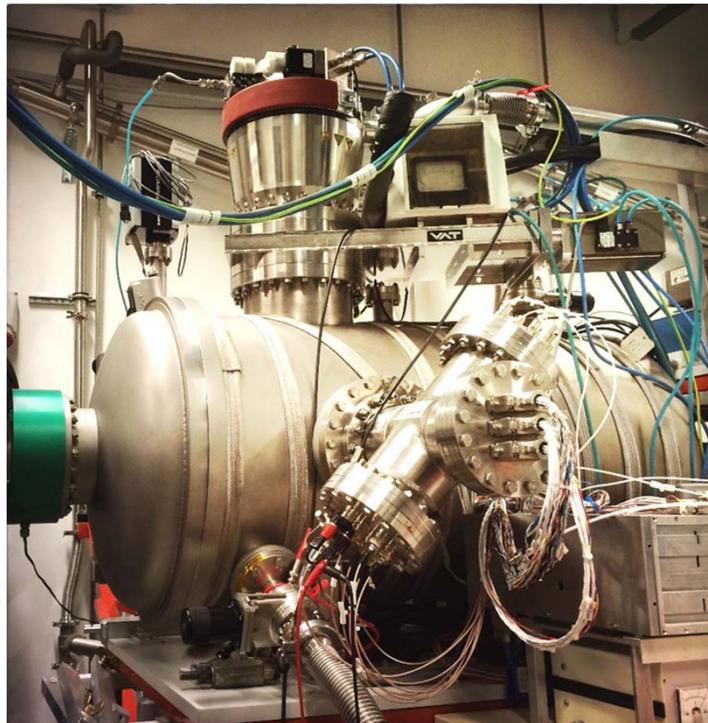


# Calibration



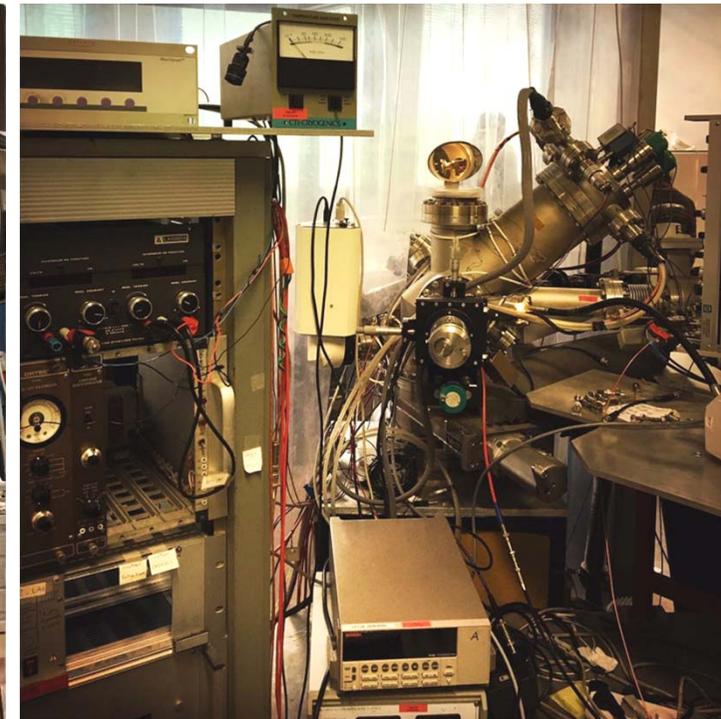
**Modèle de vol**  
**COSIMA XM**

À bord de l'orbiteur Rosetta  
Coma de la comète 67P



**Modèle de référence**  
**COSIMA RM**

Au MPS  
Göttingen, Allemagne



**Modèle de laboratoire**  
**COSIMA OM**

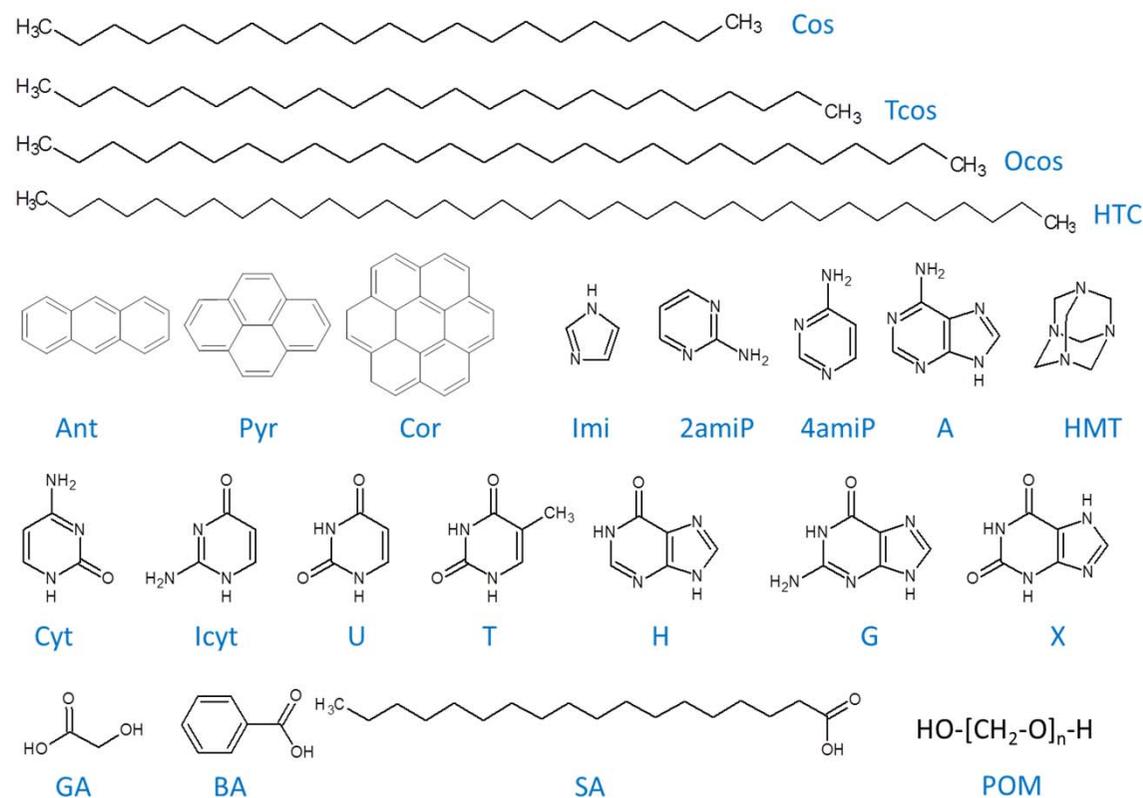
Au LPC2E  
Orléans, France

# Calibration de la composante organique

**Objectif** : Etablir une **bibliothèque de spectres de masse de référence pour COSIMA** (non exhaustif)

## Sélection des molécules :

- Etude de la **comète 1P/Halley**
- Échantillon **naturels** (météorites)
- Échantillons **synthétisés** en laboratoire



(Le Roy *et al.*, 2015)

## Diapositive 11

---

**a6**      Choix des molécules organiques :

Identifications passées (comète 1P/Halley)

Analogues naturels (météorites)

Analogues synthétisés en laboratoire

Structure/fonction chimique particulière

abardyn; 05/12/2016

# Calibration de la composante organique

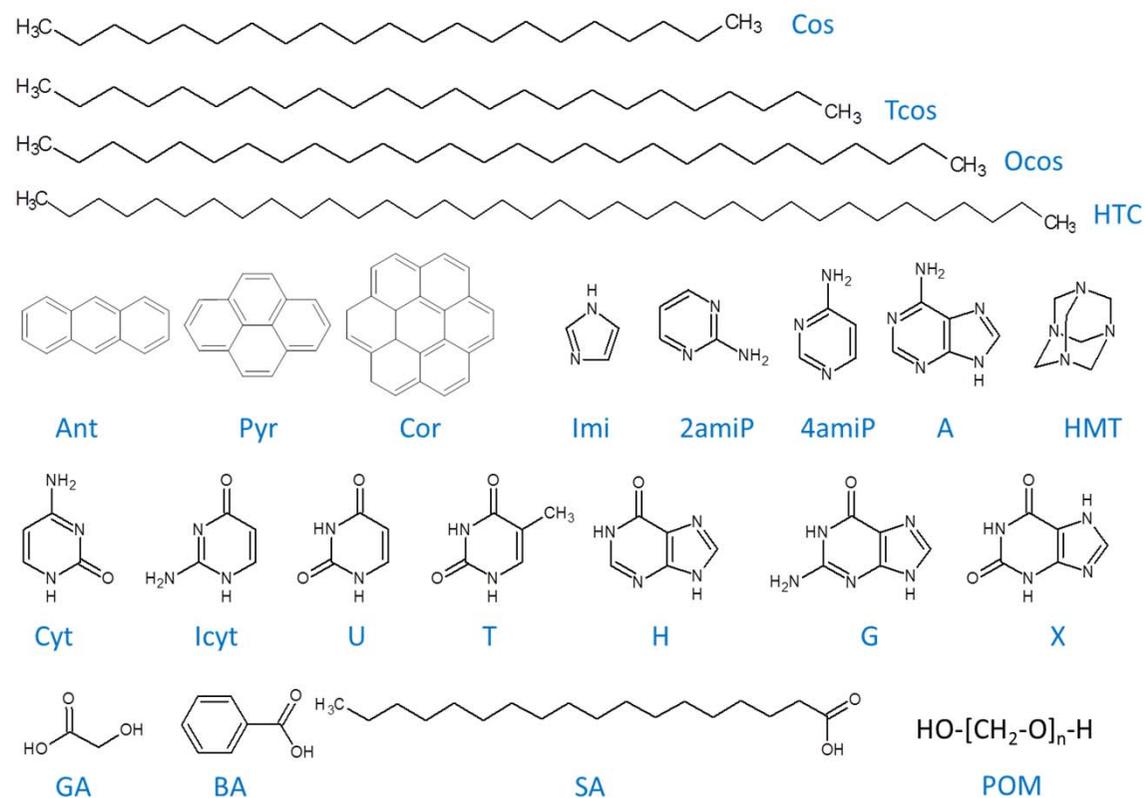
**Objectif** : Etablir une **bibliothèque de spectres de masse de référence pour COSIMA** (non exhaustif)

## Sélection des molécules :

- Etude de la **comète 1P/Halley**
- Échantillon **naturels** (météorites)
- Échantillons **synthétisés** en laboratoire

## Calibration :

- Différents mode de **fragmentation**
- **Beaucoup de signatures spectrales sur toute la gamme de masse**



(Le Roy *et al.*, 2015)

## Diapositive 12

---

**a6**      Choix des molécules organiques :

Identifications passées (comète 1P/Halley)

Analogues naturels (météorites)

Analogues synthétisés en laboratoire

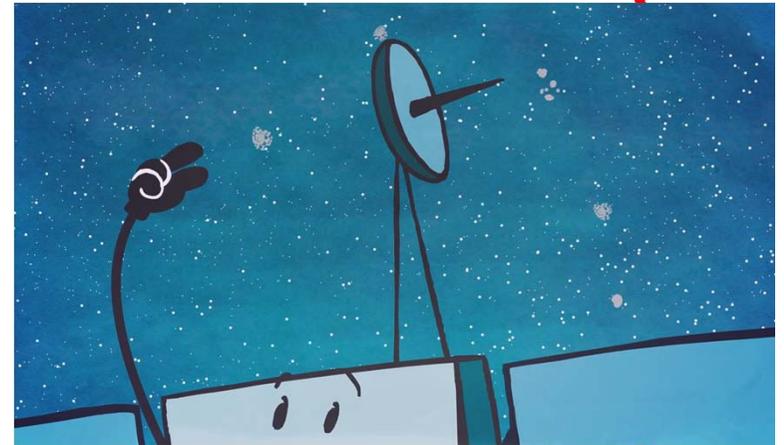
Structure/fonction chimique particulière

abardyn; 05/12/2016

## Thèse

Etudier la **composante organique** des particules

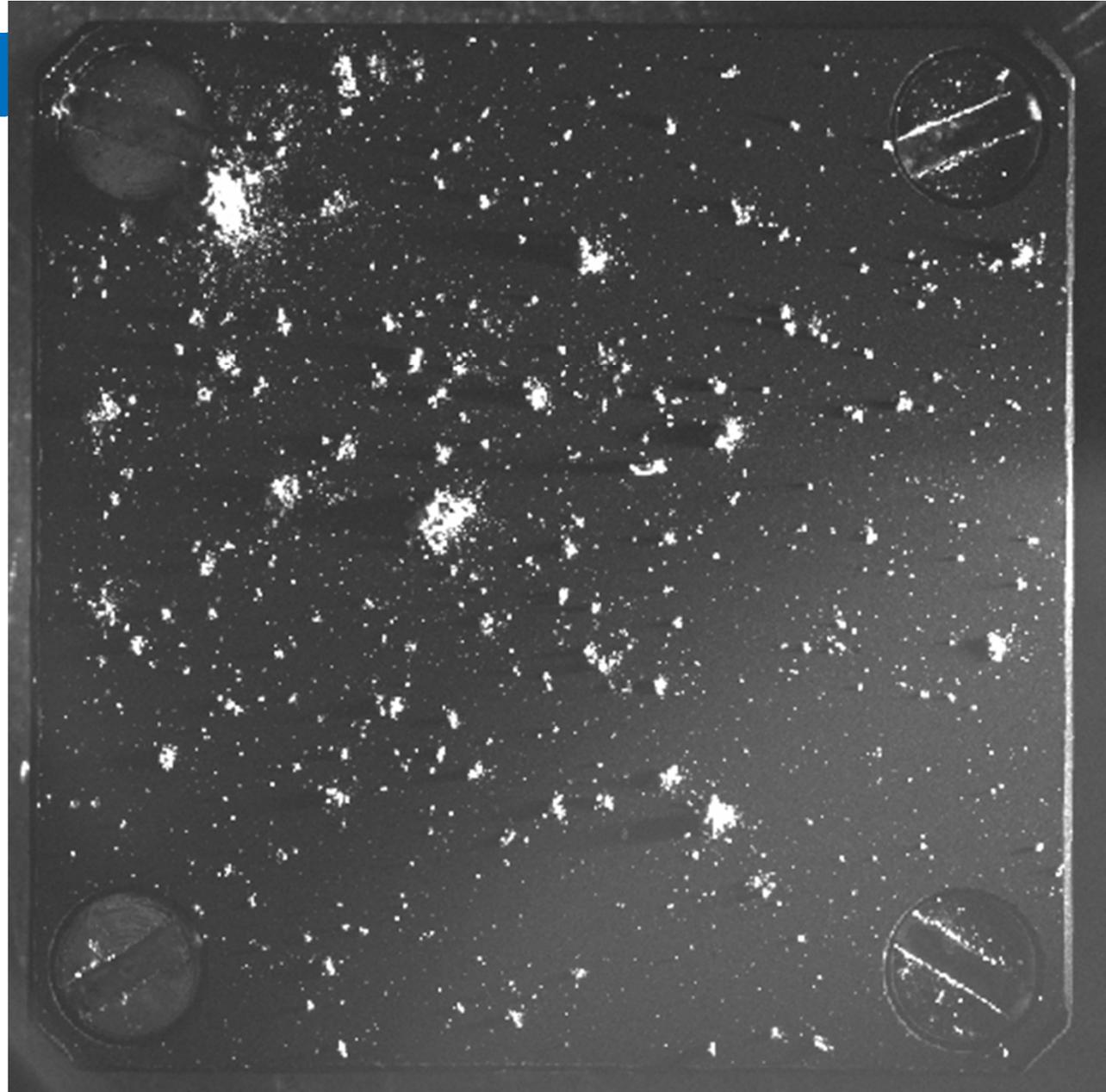
- Calibration
- **Détection**
- Caractérisation
- Quantification



## Cible COSIMA

- **35 000 particules** collectées  
(Merouane *et al.*, 2017)
- Taille : **10 – 1000  $\mu\text{m}$**
- Différentes morphologies  
(Langevin *et al.*, 2016)

**1 x 1 cm<sup>2</sup>**

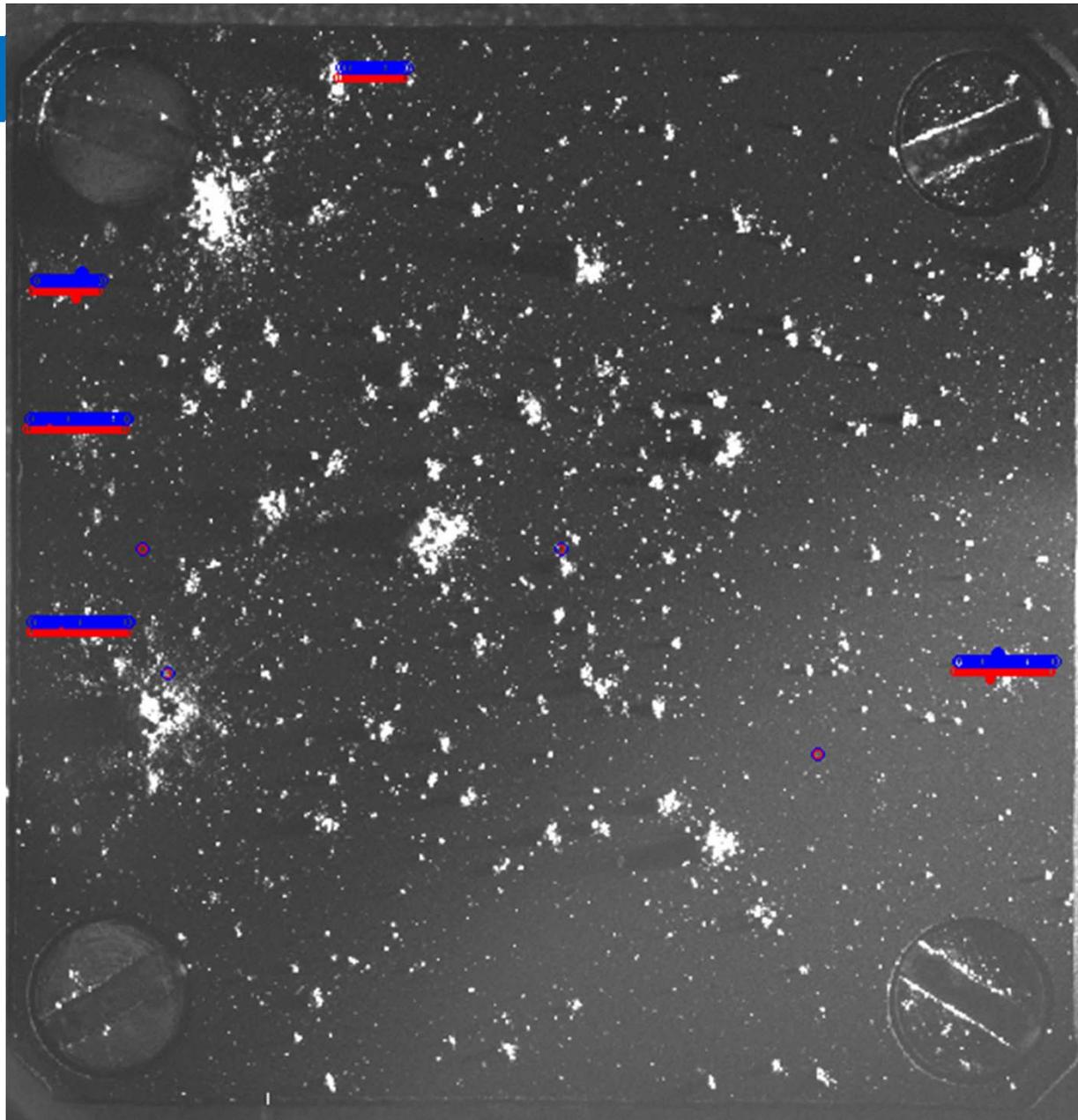


## Analyses SIMS

Analyses en mode positif

Analyses en mode négatif

10 x 10 mm<sup>2</sup>

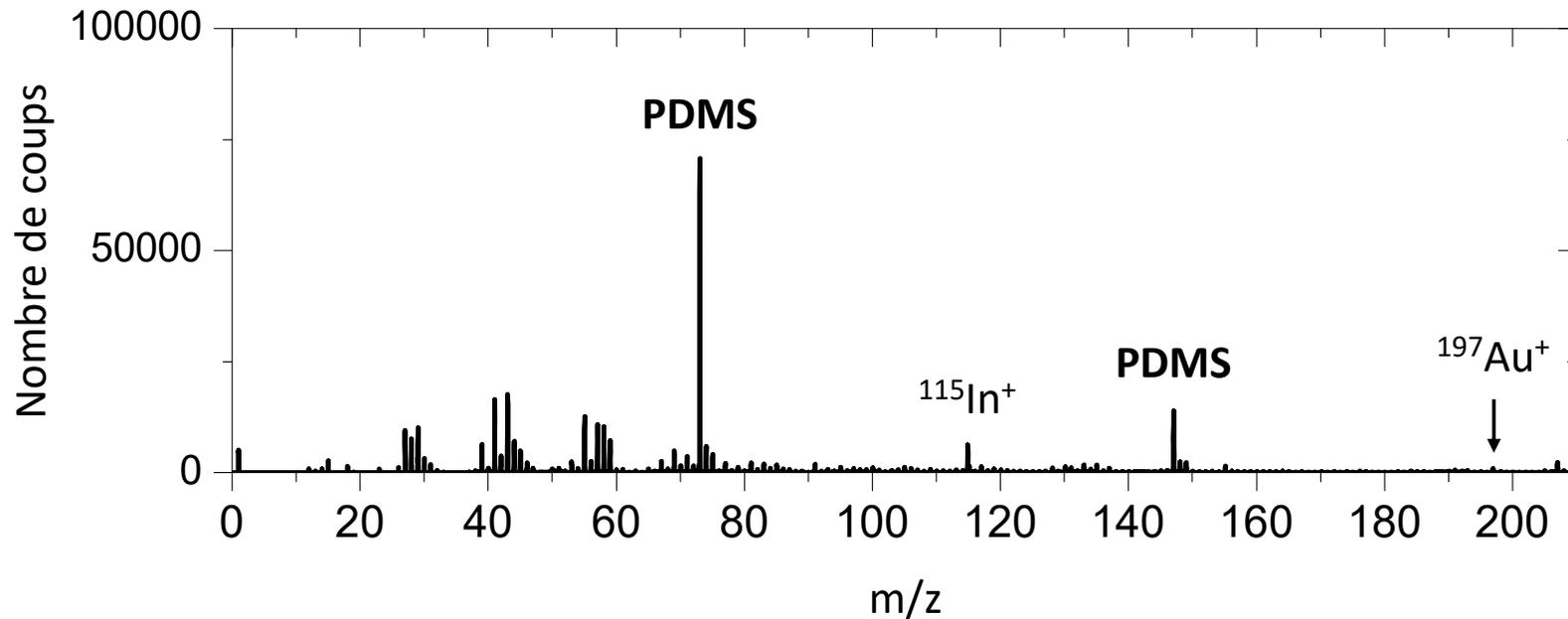


~ 200 spectres de masse/semaine

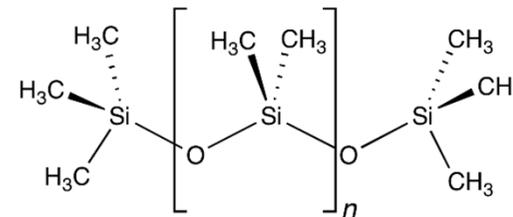
Mise au point d'une méthodologie pour analyser les spectres

Comptes rendus hebdomadaires à l'équipe COSIMA

# Signatures de la cible (non cométaires)



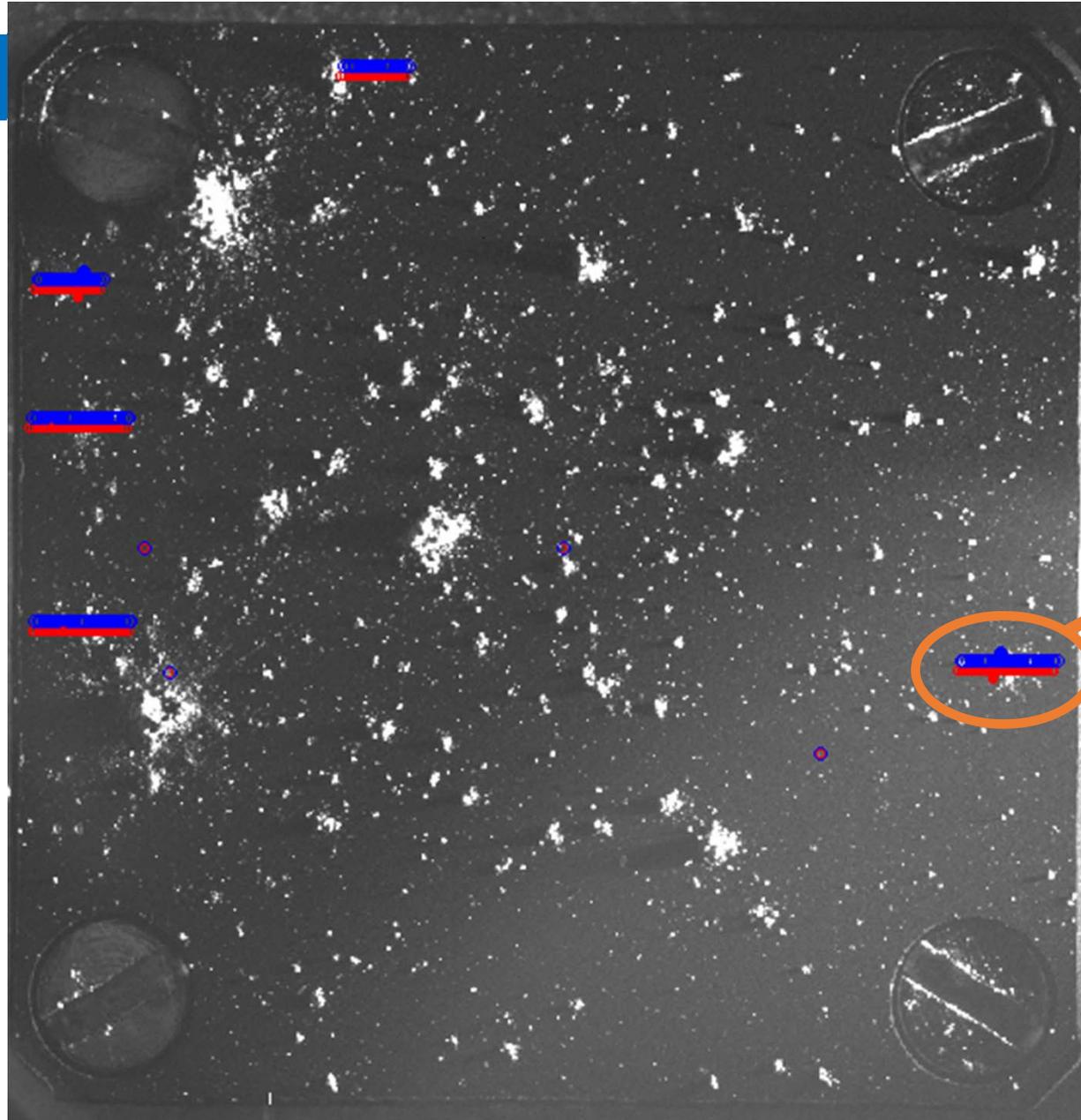
- $^{115}\text{In}^+$  => **Ions primaires d'indium**
- $^{197}\text{Au}^+$  => **Cible en or**
- PolyDiMethylSiloxane (PDMS) => **Contamination**



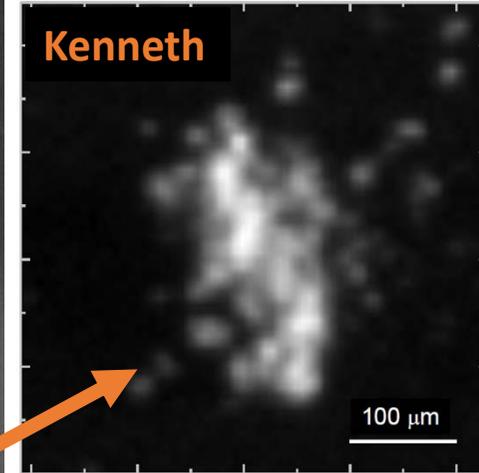
$n = 0$      $\text{Si}(\text{CH}_3)_3^+$                        $m/z = 73,05$

$n = 1$      $\text{Si}(\text{CH}_3)_3\text{-OSi}(\text{CH}_3)_2^+$      $m/z = 147,07$

# Analyses SIMS

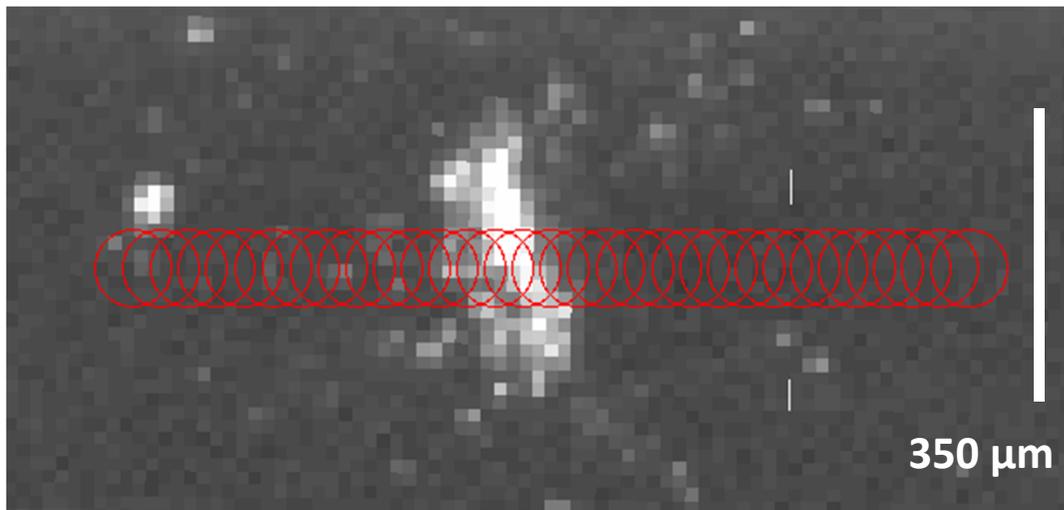


10 x 10 mm<sup>2</sup>



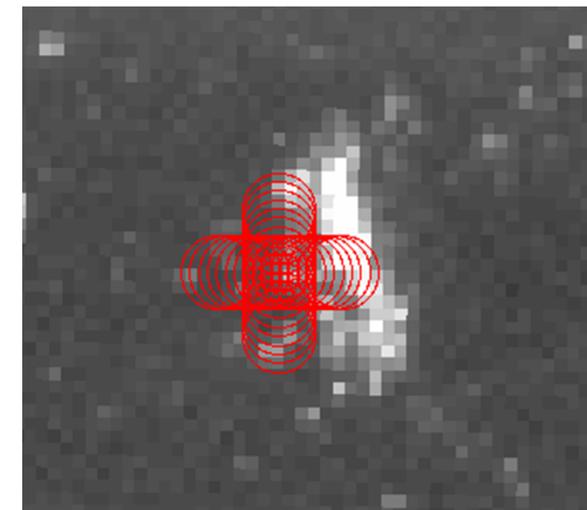
# Particule Kenneth

- Collectée par COSIMA entre le 11 et le 12 mai 2015



**1<sup>ère</sup> analyse** : 18 Juin 2015

**Ligne de 31 positions**



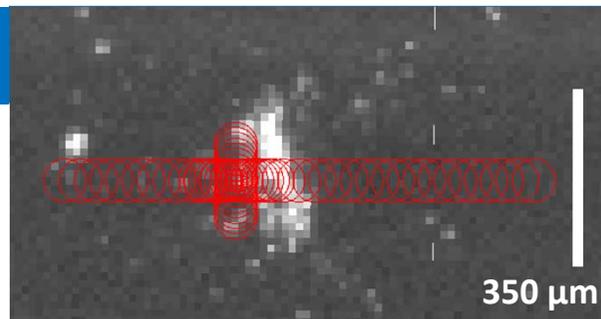
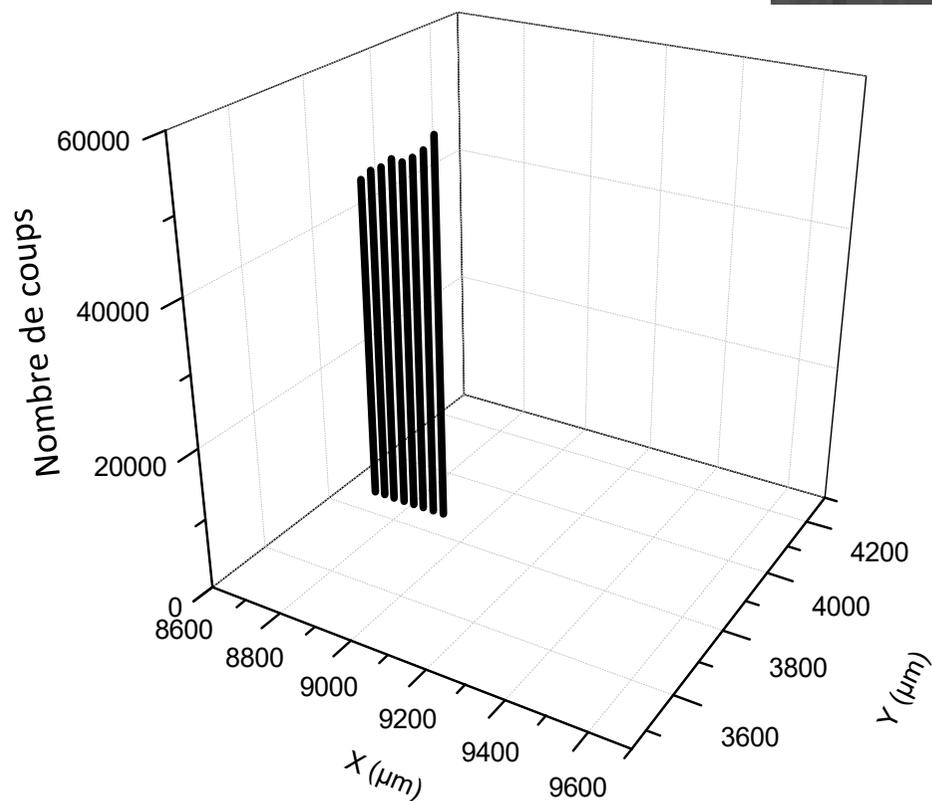
**2<sup>nd</sup> analyse** : 2 juillet 2015

**Croix de 29 positions**

# Particule Kenneth

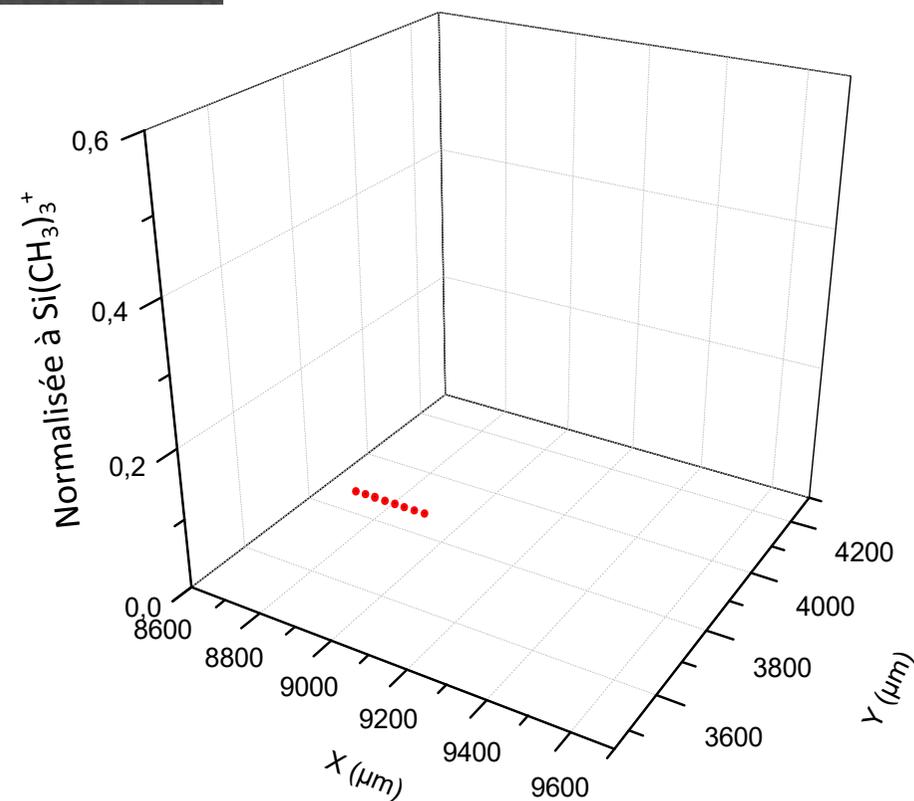
Intensité de  $\text{Si}(\text{CH}_3)_3^+$  ( $m/z = 73,05$ )

Origine : **Cible**



Intensité de  $\text{Fe}^+$  ( $m/z = 55,94$ )

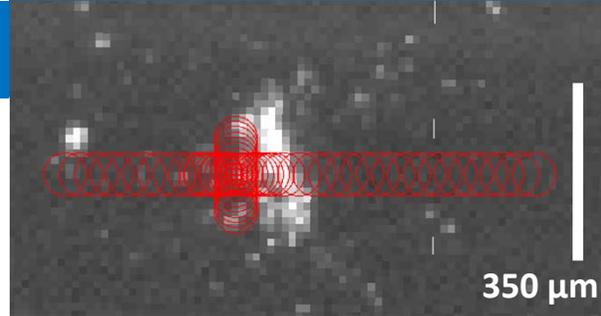
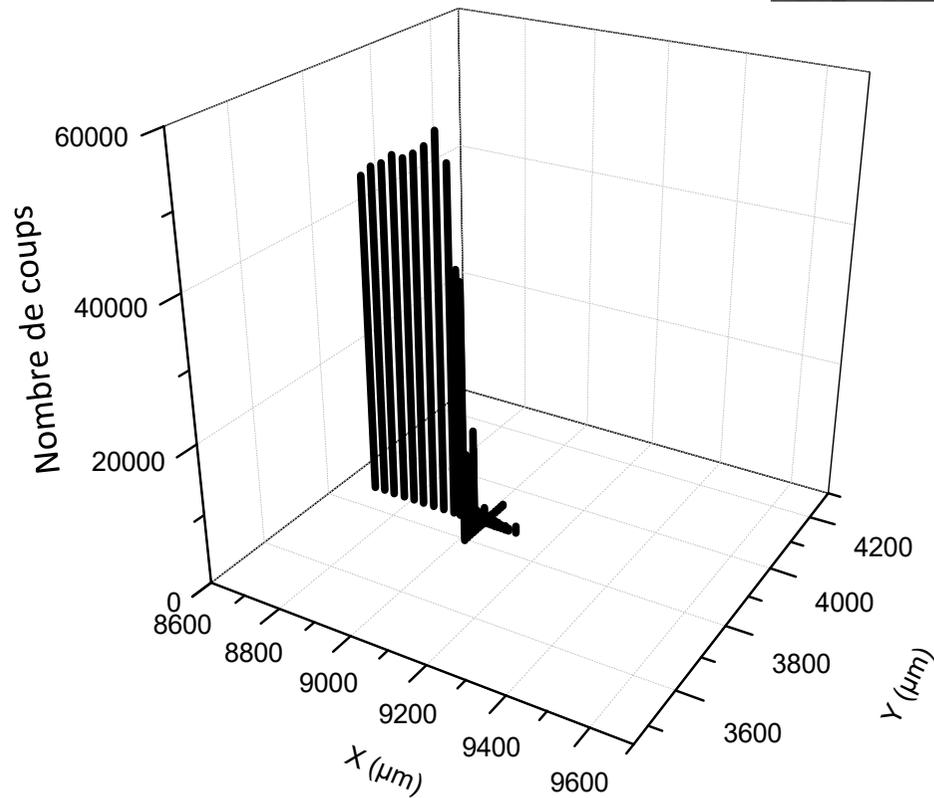
Origine : **Particule cométaire**



# Particule Kenneth

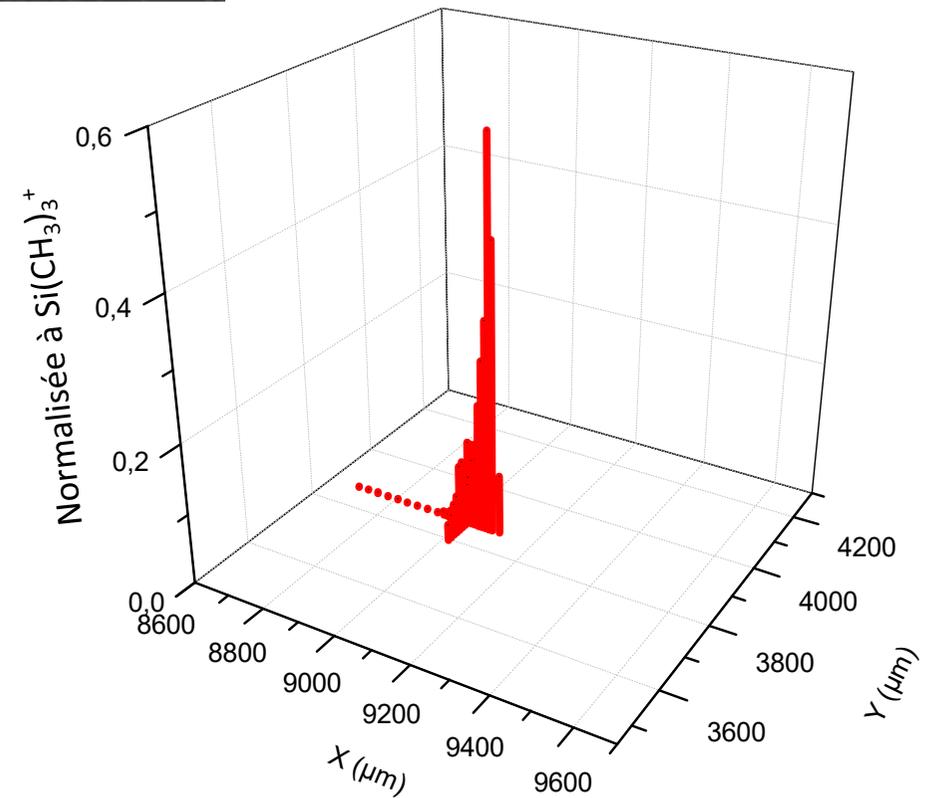
Intensité de  $\text{Si}(\text{CH}_3)_3^+$  ( $m/z = 73,05$ )

Origine : **Cible**



Intensité de  $\text{Fe}^+$  ( $m/z = 55,94$ )

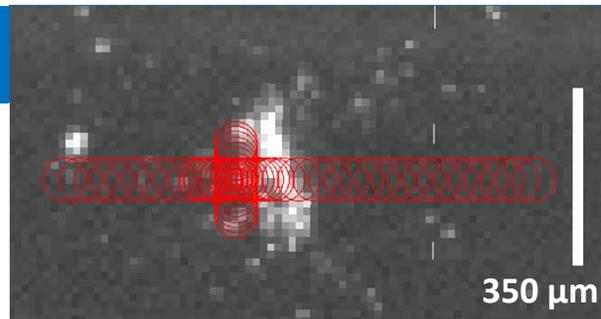
Origine : **Particule cométaire**



# Particule Kenneth

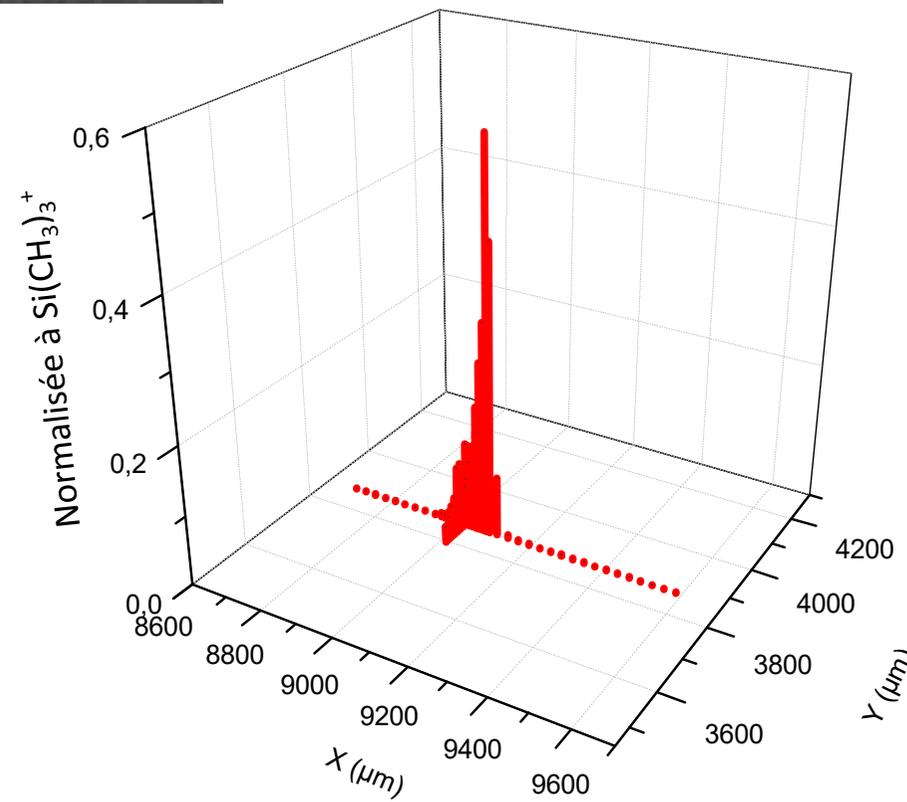
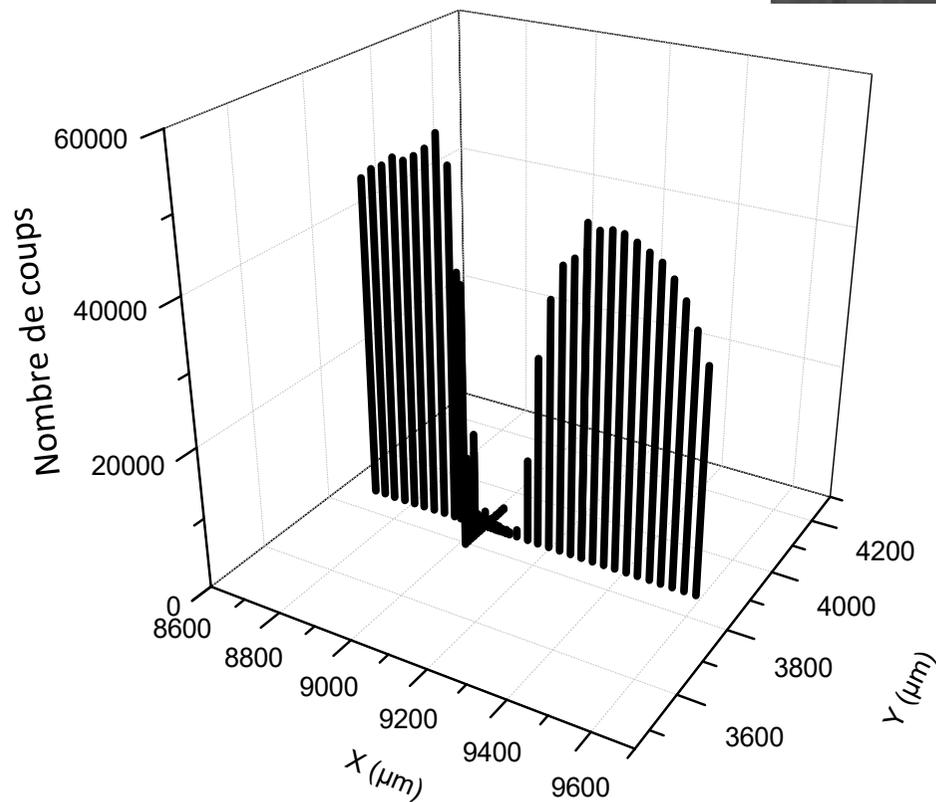
Intensité de  $\text{Si}(\text{CH}_3)_3^+$  ( $m/z = 73,05$ )

Origine : **Cible**

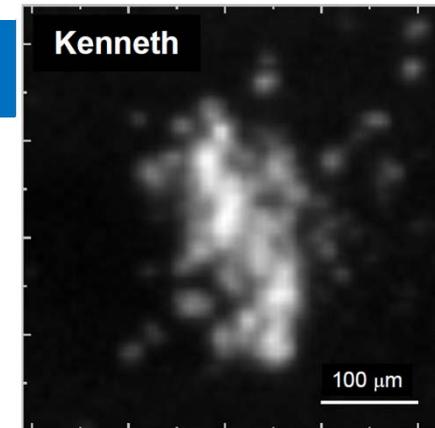


Intensité de  $\text{Fe}^+$  ( $m/z = 55,94$ )

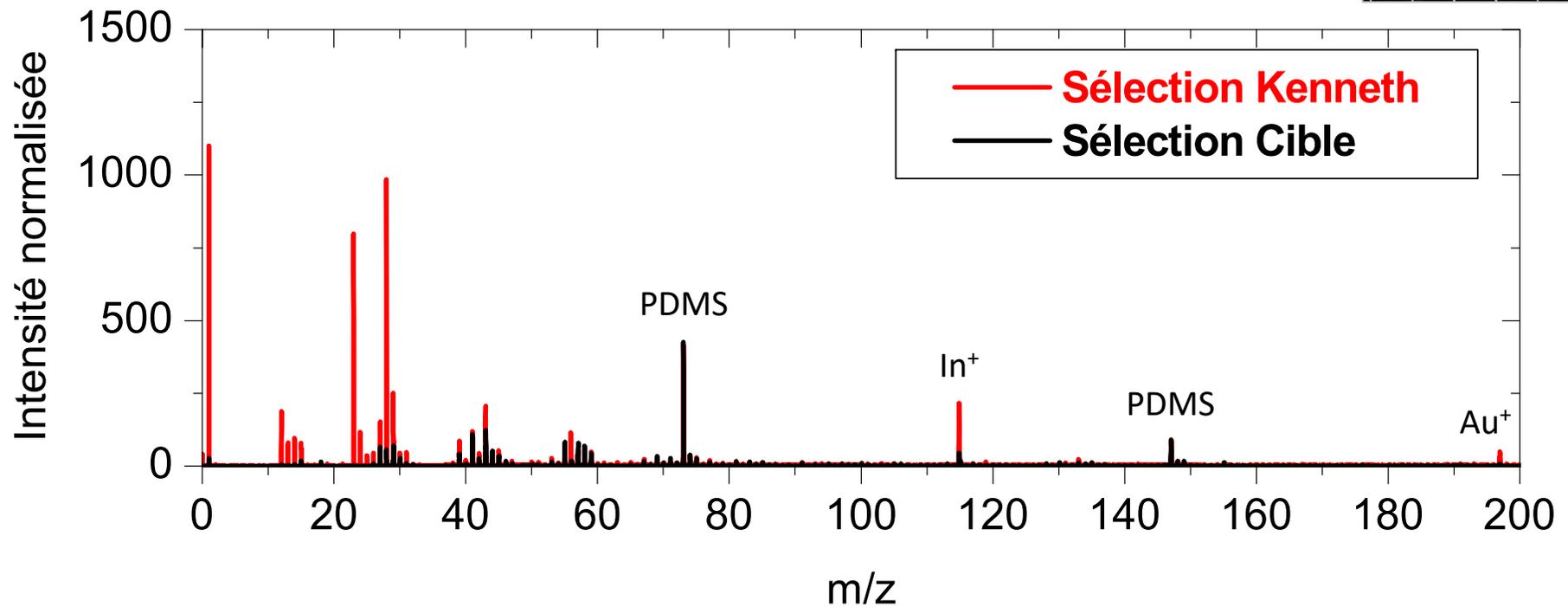
Origine : **Particule cométaire**



# Particule Kenneth

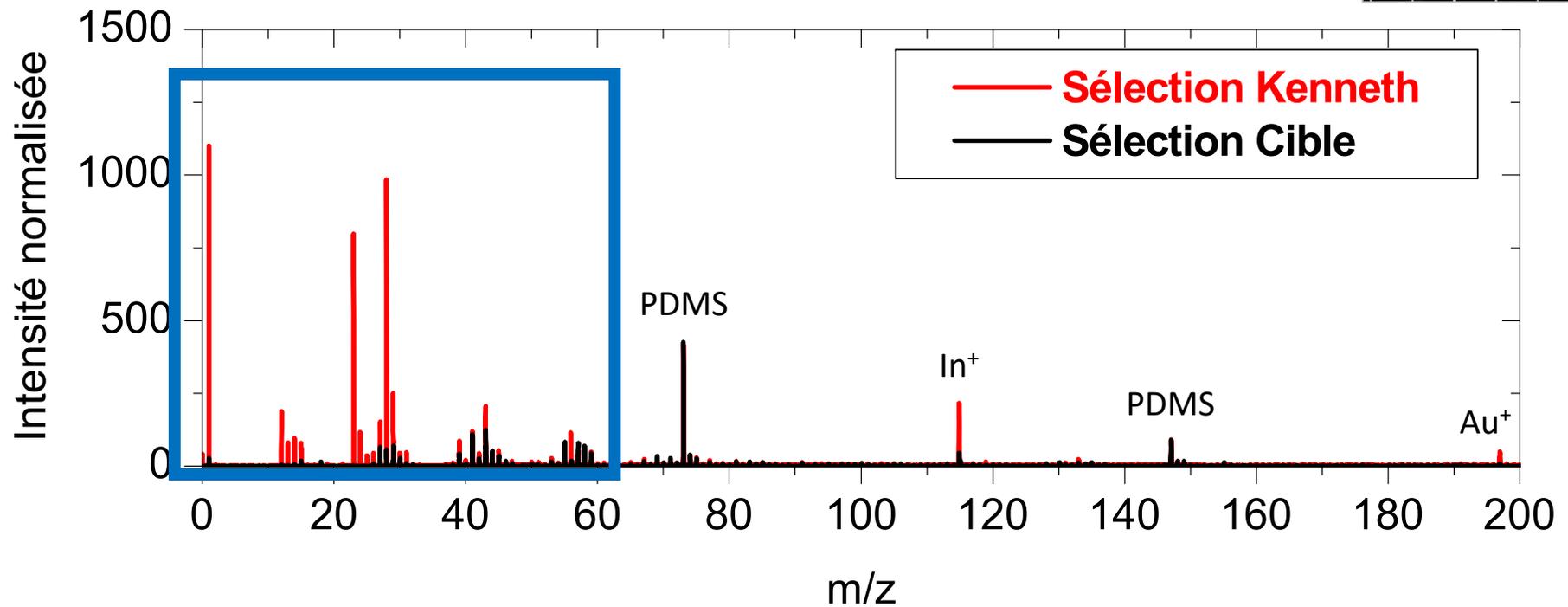
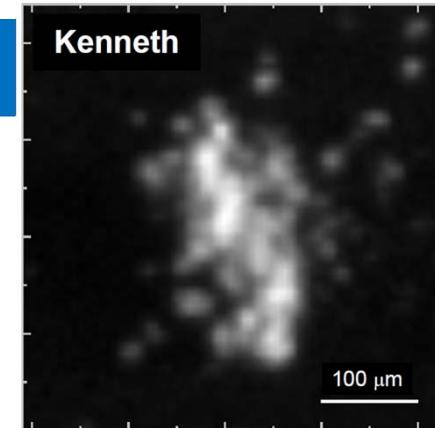


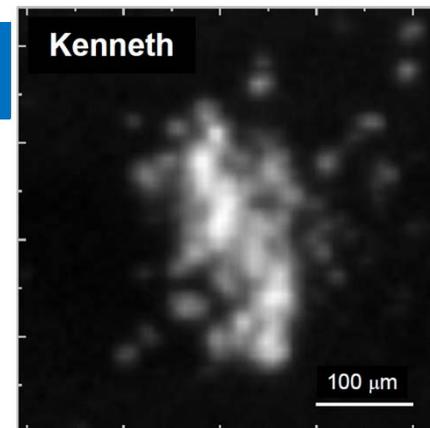
- Sélection de 10 spectres **ON** (sur la **particule Kenneth**)
- Sélection de 8 spectres **OFF** (sur la **cible**, à côté de la particule)



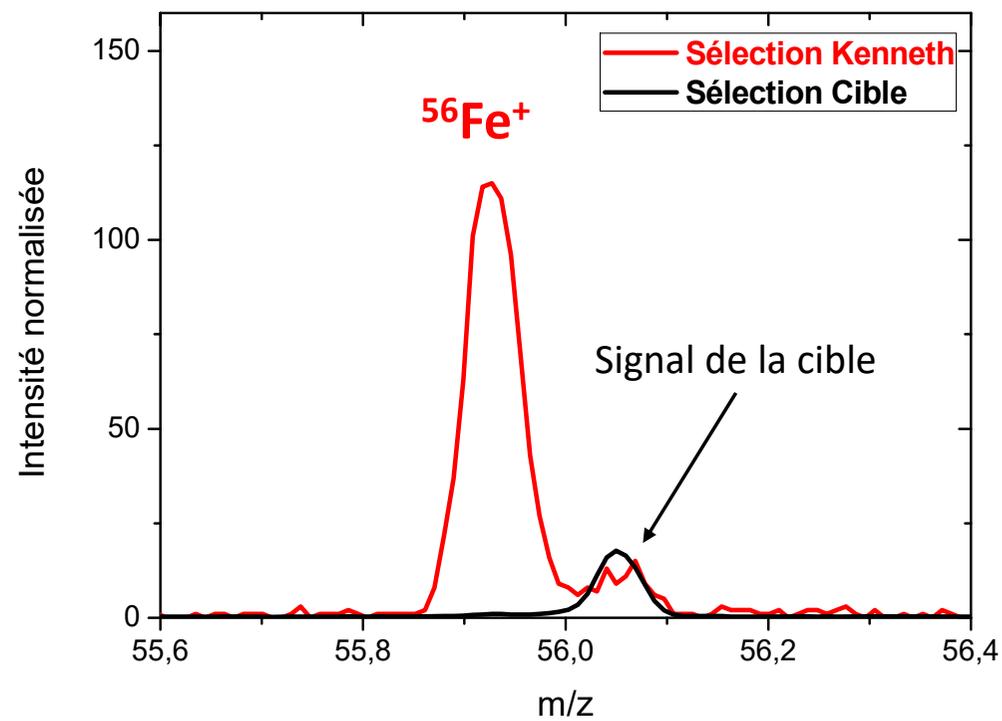
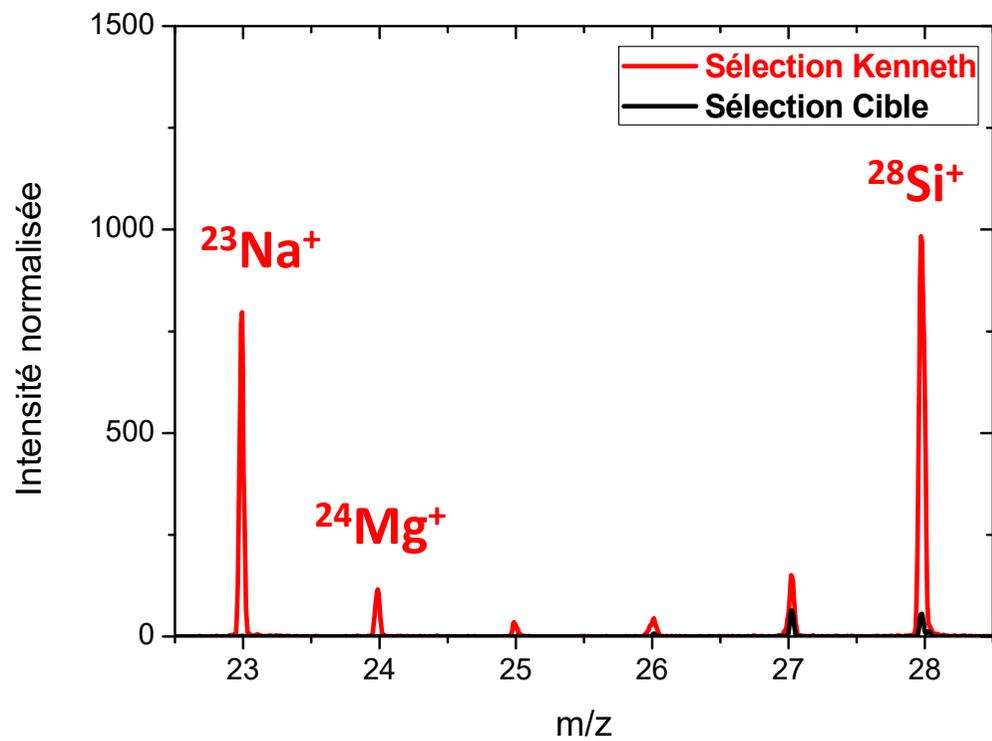
# Particule Kenneth

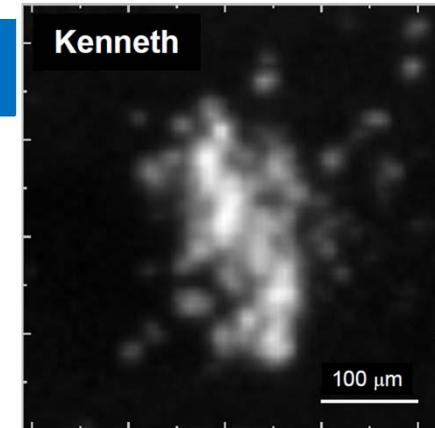
- Sélection de 10 spectres **ON** (sur la **particule Kenneth**)
- Sélection de 8 spectres **OFF** (sur la **cible**, à côté de la particule)



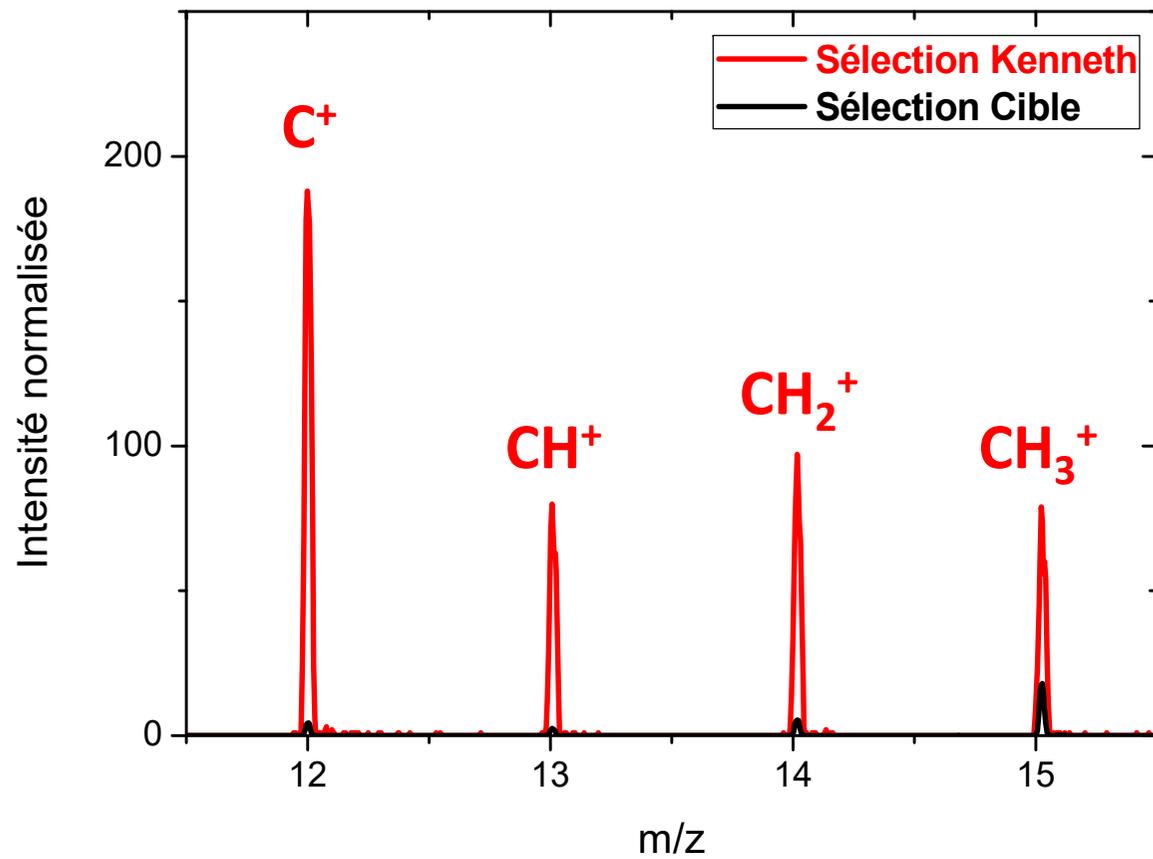


## Détection d'ions inorganiques





## Détection d'ions organiques !!!



# Signature organique cométaire

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

# Signature organique cométaire

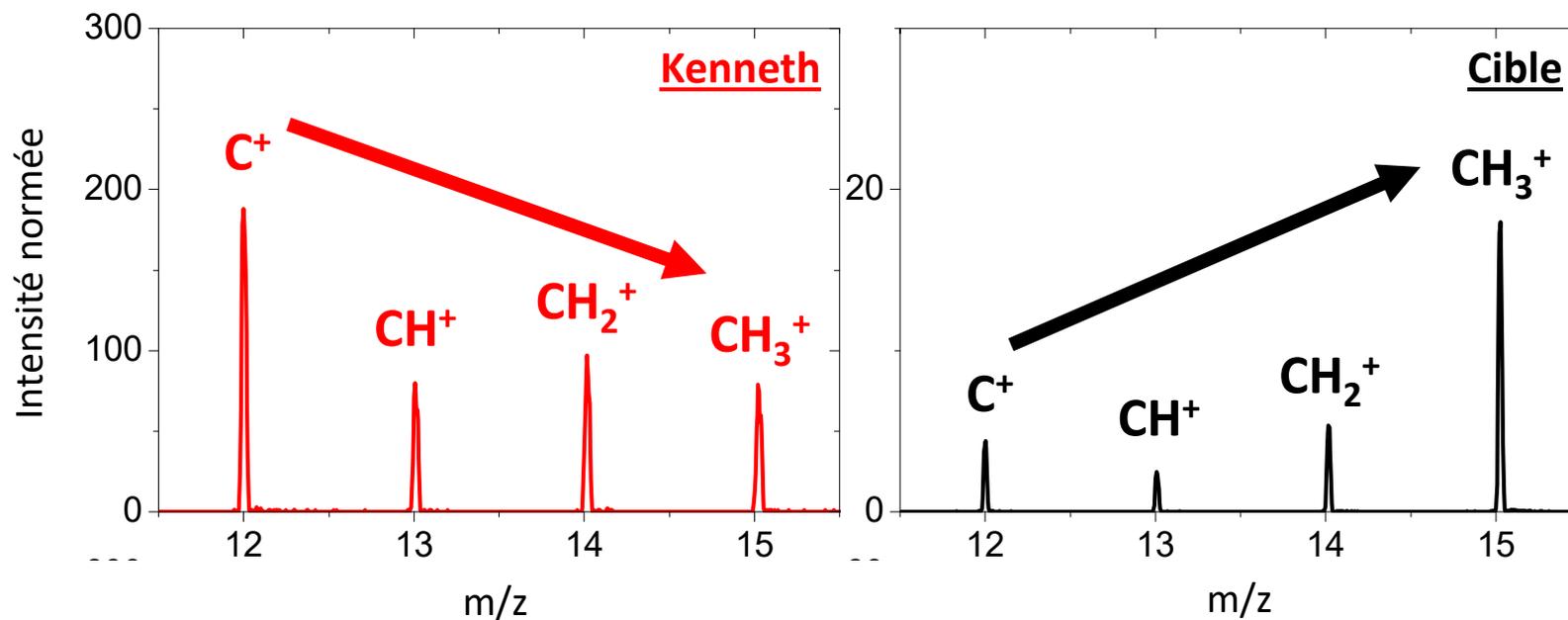
Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )

# Signature organique cométaire

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

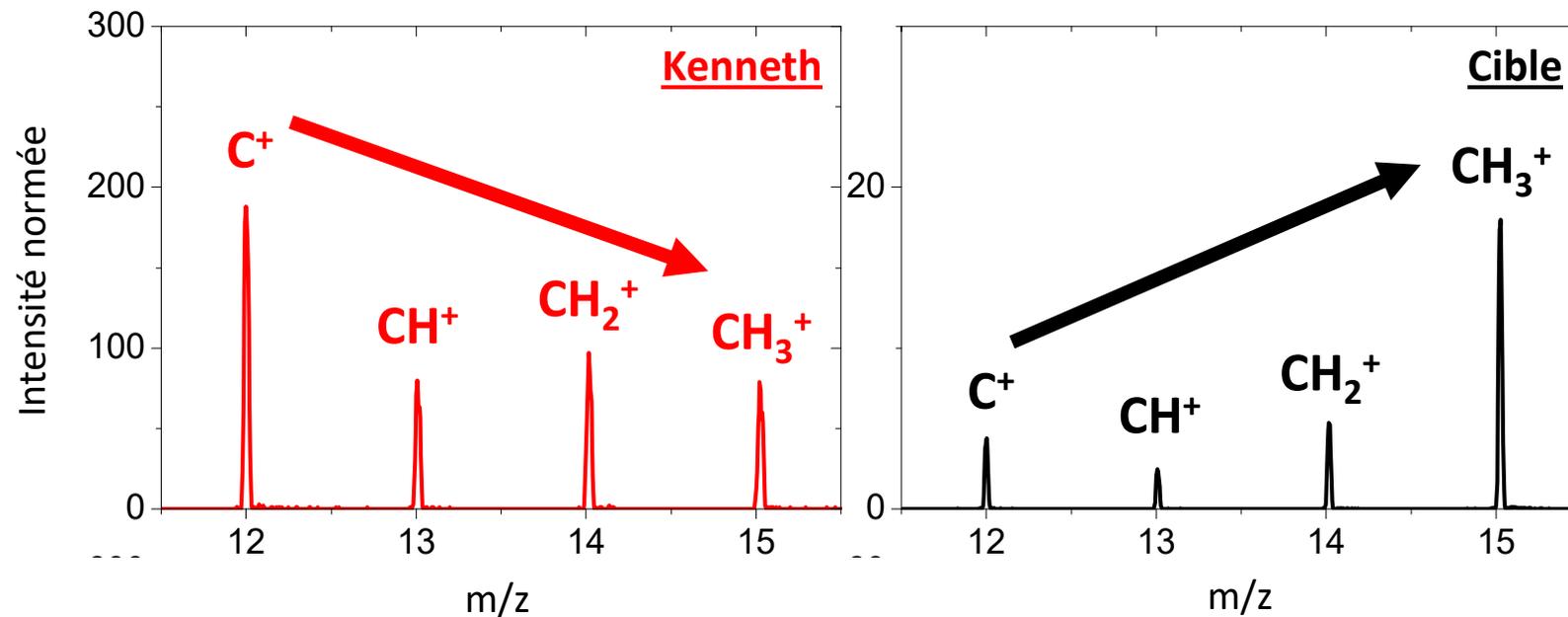
- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$



# Signature organique cométaire

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$
- Une **signature similaire** pour toutes les particules cométaires
- **Ions organiques et inorganiques** toujours présents ensemble



## Thèse

Etudier la **composante organique** des particules

- Calibration
- Détection
- **Caractérisation**
- Quantification



## Retour sur les mesures de calibration

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

Bibliothèque de  
spectres de masse de  
référence COSIMA ??

# Retour sur les mesures de calibration

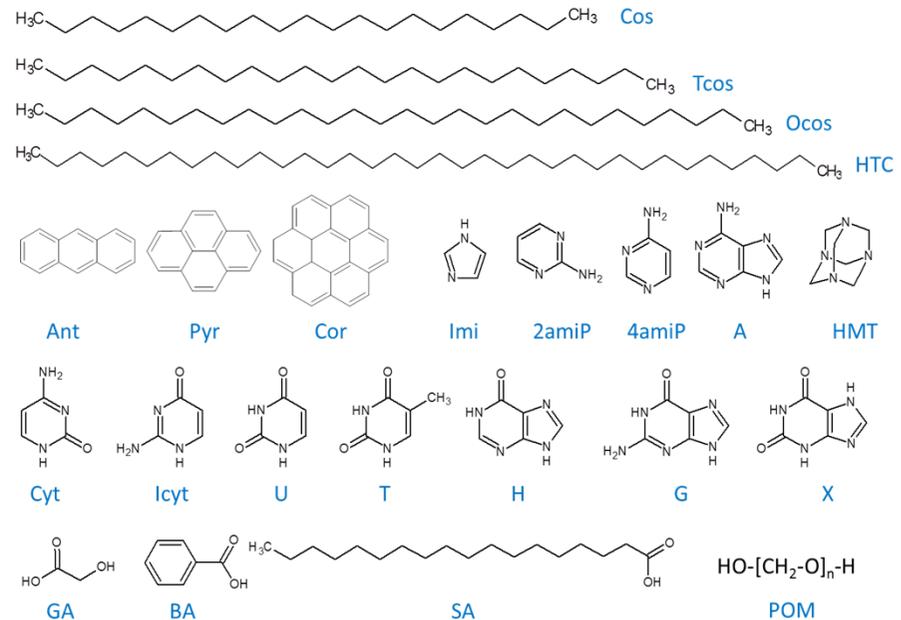
Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

Bibliothèque de spectres de masse de référence COSIMA ??

## Calibration :

- **Beaucoup de signatures spectrales sur toute la gamme de masse**



# Retour sur les mesures de calibration

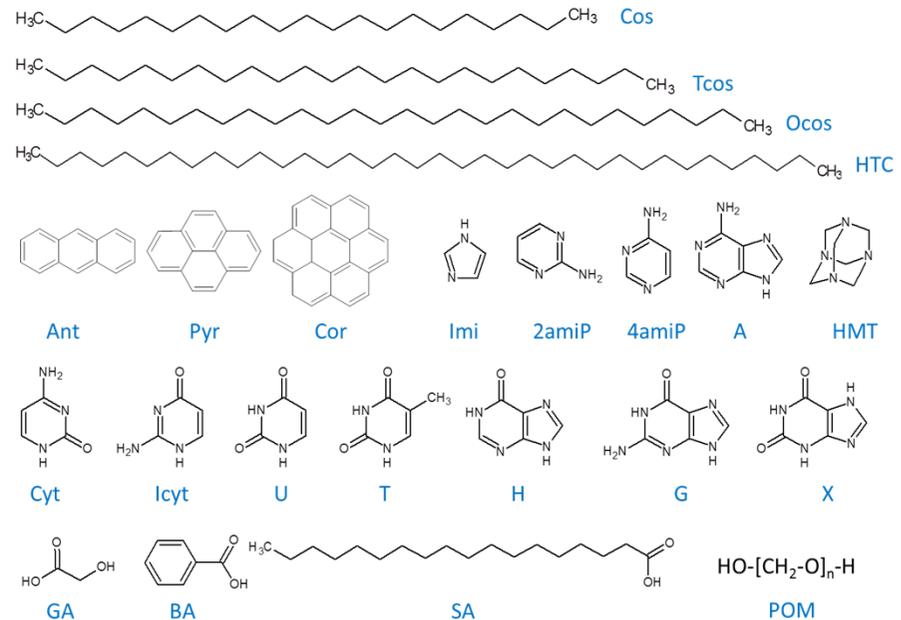
Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

Bibliothèque de spectres de masse de référence COSIMA ??

## Calibration :

- **Beaucoup de signatures spectrales sur toute la gamme de masse**
- $C^+ < CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$



# Retour sur les mesures de calibration

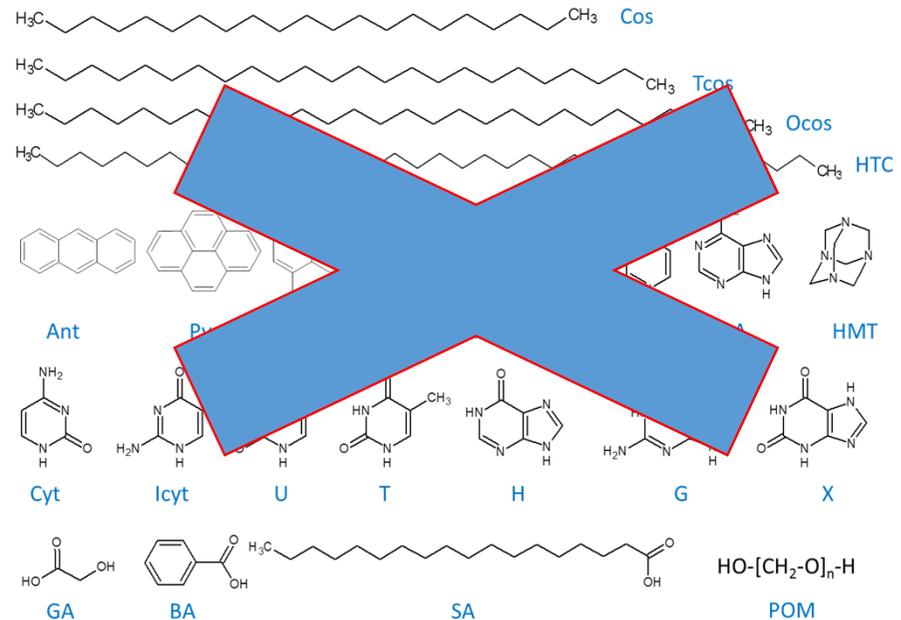
Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

Bibliothèque de spectres de masse de référence COSIMA ??

## Calibration :

- **Beaucoup de signatures spectrales sur toute la gamme de masse**
- $C^+ < CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$



## Retour sur les mesures de calibration

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
  - Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
  - $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$
- 

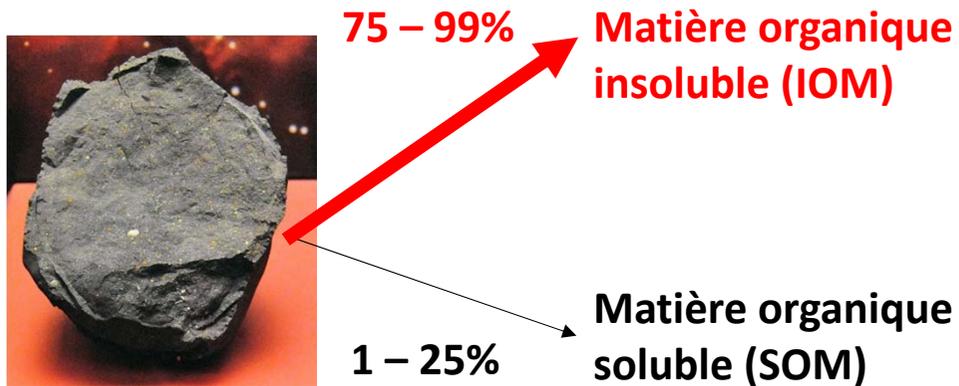
**Calibration** : **2013** : Analyse d'**IOMs** sur le modèle de référence de COSIMA

# Retour sur les mesures de calibration

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

## Calibration :



Météorite Murchison

# Retour sur les mesures de calibration

## Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

## Calibration :

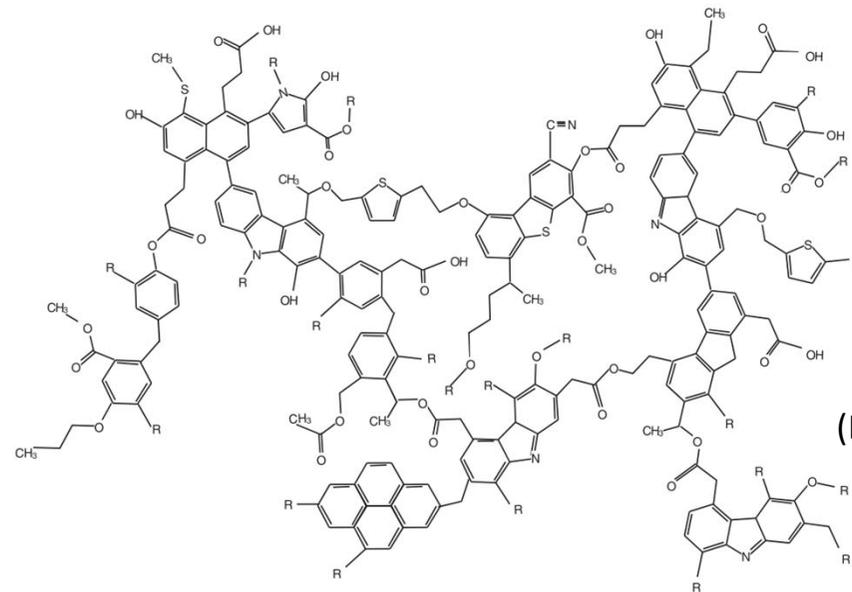


75 – 99%

**Matière organique insoluble (IOM)**

**Carbone macromoléculaire  
Haut poids moléculaire**

Météorite Murchison



(Derenne *et al.*, 2010)

Modèle de la structure de l'IOM de Murchison

# Caractérisation de la composante organique

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

**IOM** des météorites  
Murchison et Orgueil

# Caractérisation de la composante organique

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

**IOM** des météorites  
Murchison et Orgueil



# Caractérisation de la composante organique

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

**IOM** des météorites  
Murchison et Orgueil

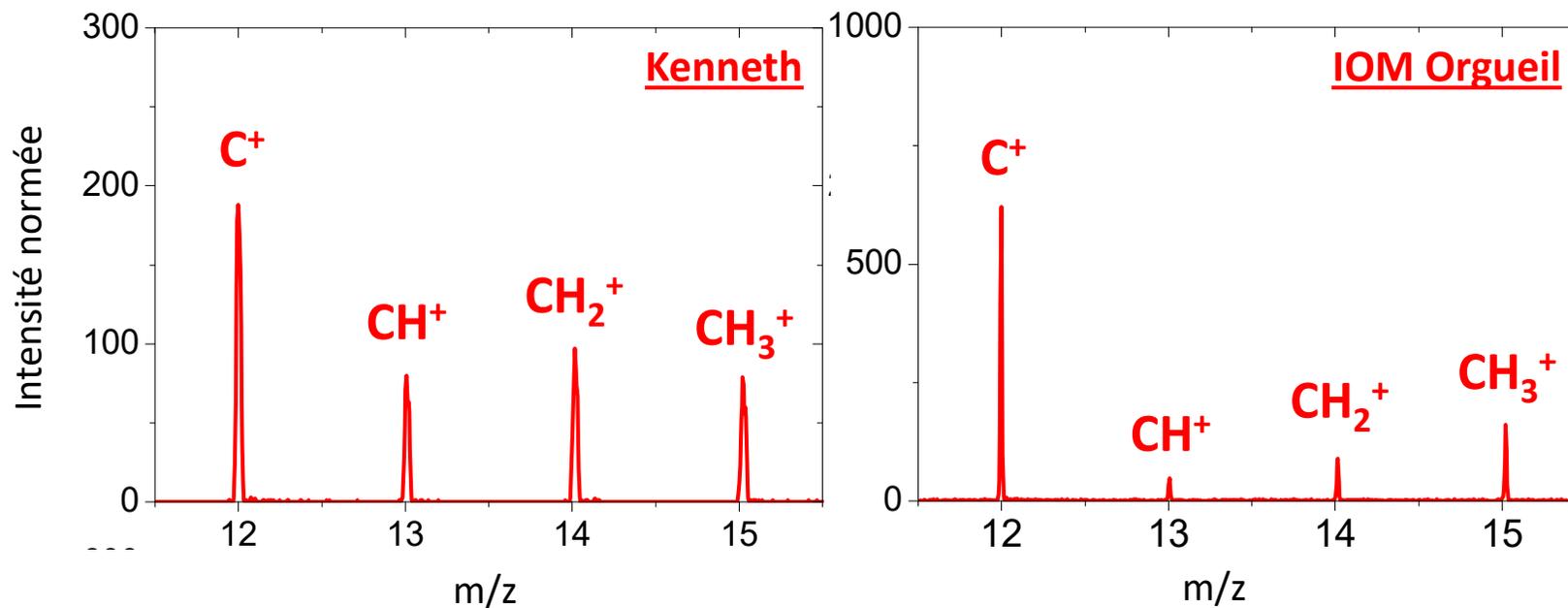


# Caractérisation de la composante organique

Les **ions organiques cométaires** : une **signature très spécifique**

- Seulement aux **petites masses** :  $m/z < 50$
- Nombre très limité : **5 ions organiques identifiés** ( $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$ )
- $C^+ > CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$

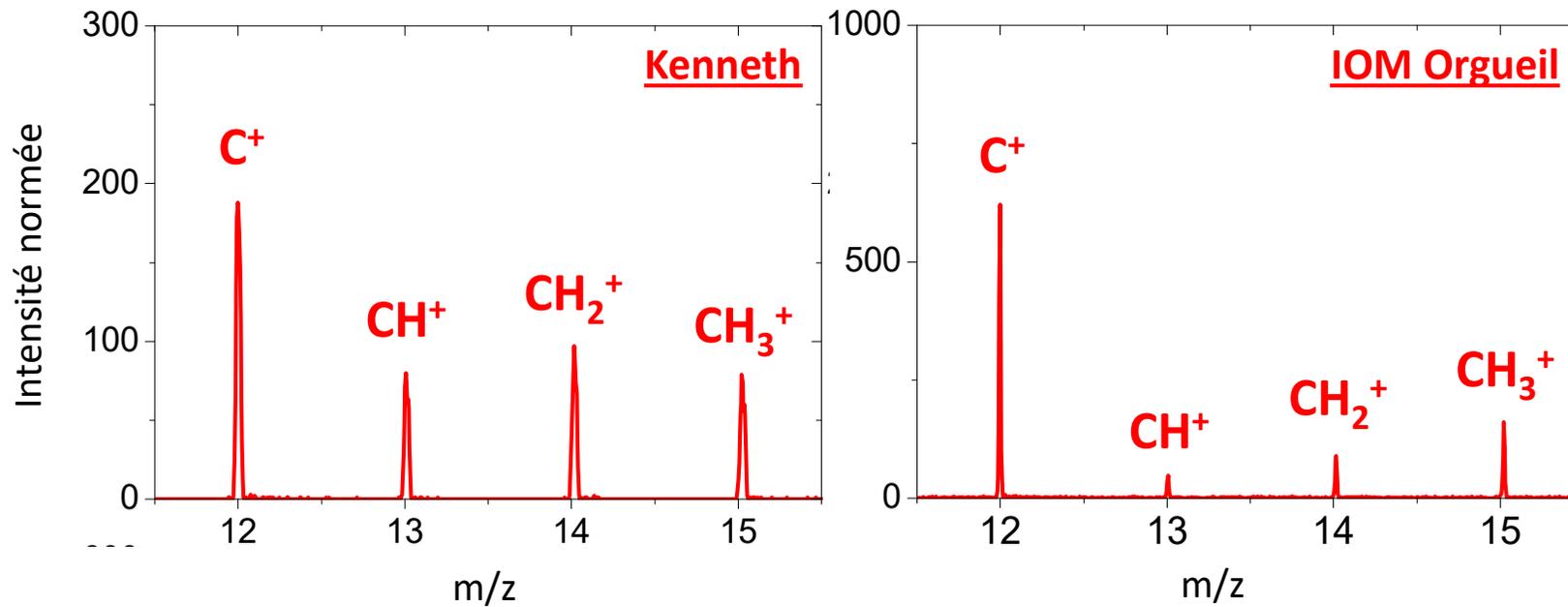
**IOM** des météorites  
Murchison et Orgueil



# Caractérisation de la composante organique

L'IOM extraite des météorites carbonées :

**meilleur analogue** à la **matière organique cométaire**



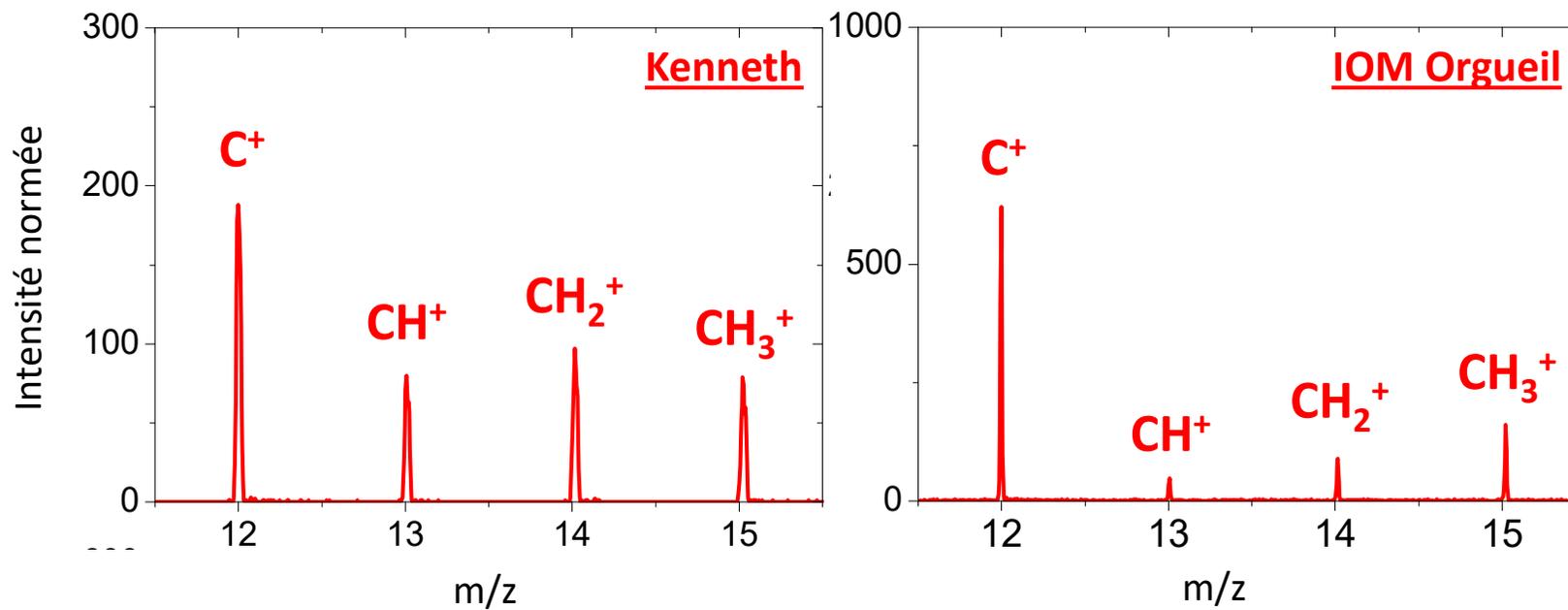
(Fray *et al.*, 2016)

# Caractérisation de la composante organique

L'**IOM** extraite des météorites carbonées :  
**meilleur analogue** à la **matière organique cométaire**



- de **haut poids moléculaire**
- sous une forme **macromoléculaire**



(Fray *et al.*, 2016)

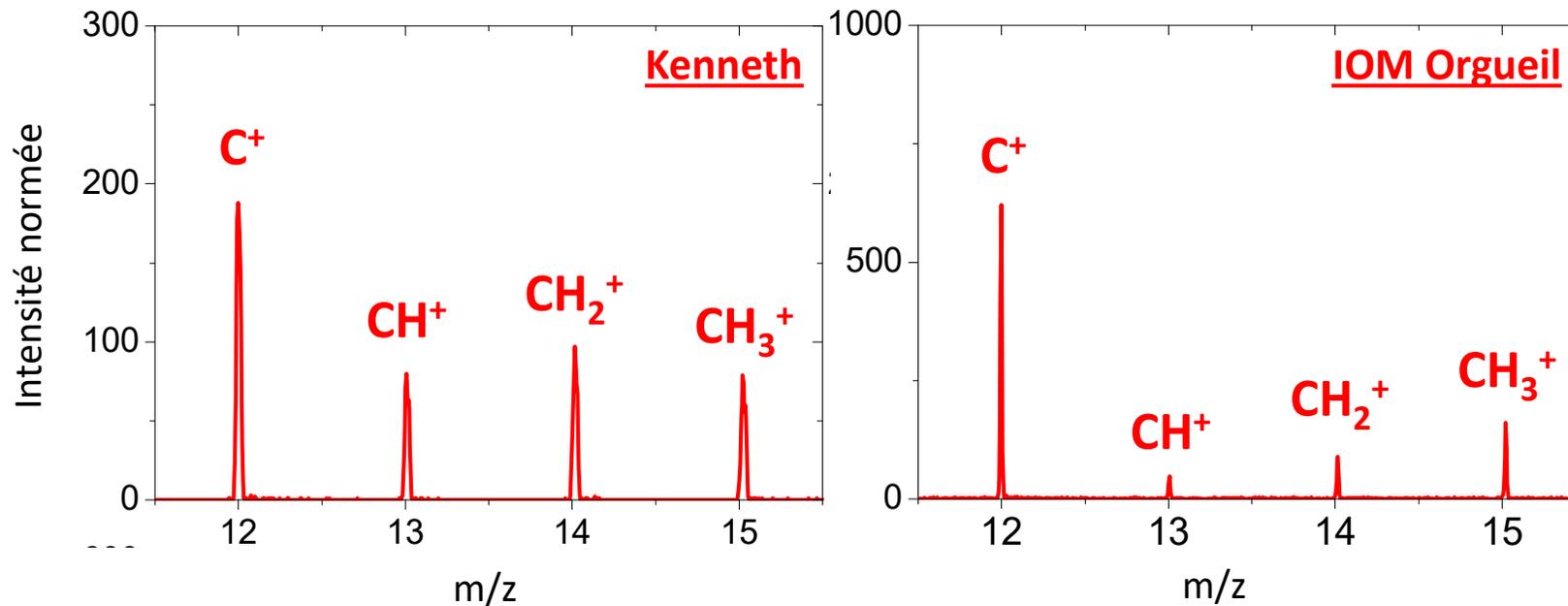
# Caractérisation de la composante organique

L'**IOM** extraite des météorites carbonées :  
**meilleur analogue** à la **matière organique cométaire**

- 
- de **haut poids moléculaire**
  - sous une forme **macromoléculaire**

Il existe **des différences** :  $(\text{CH}_x^+/\text{C}^+)_{67\text{P}} > (\text{CH}_x^+/\text{C}^+)_{\text{IOM}}$

$(\text{H}/\text{C})_{67\text{P}} > (\text{H}/\text{C})_{\text{IOM}}$



(Fray *et al.*, 2016)

# Caractérisation de la composante organique

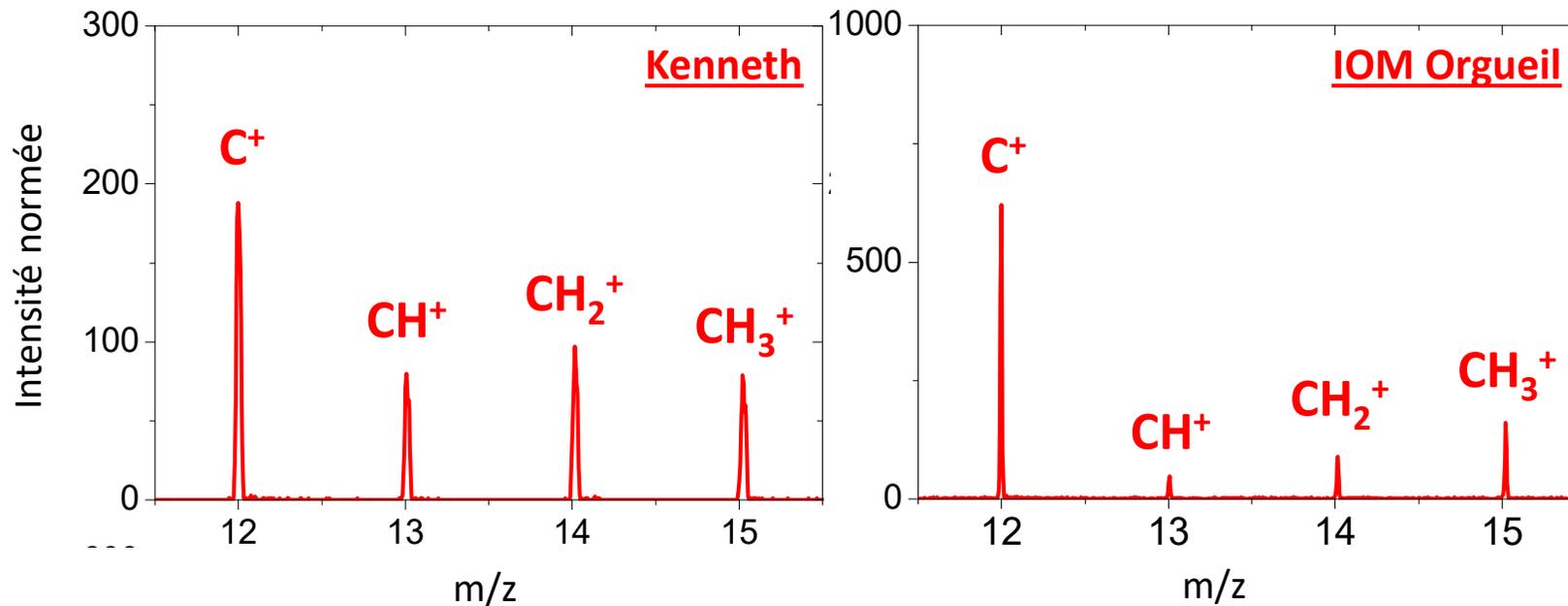
L'**IOM** extraite des météorites carbonées :  
**meilleur analogue** à la **matière organique cométaire**

- 
- de **haut poids moléculaire**
  - sous une forme **macromoléculaire**

Il existe **des différences** :  $(\text{CH}_x^+/\text{C}^+)_{67\text{P}} > (\text{CH}_x^+/\text{C}^+)_{\text{IOM}}$

$(\text{H}/\text{C})_{67\text{P}} > (\text{H}/\text{C})_{\text{IOM}}$

→ métamorphisme thermique  
altération aqueuse ) Processus pouvant faire diminuer H



↓

**Composante organique cométaire serait moins altérée que celle de l'IOM**

(Fray *et al.*, 2016)

## Thèse

Etudier la **composante organique** des particules

- Calibration
- Détection
- Caractérisation
- **Quantification**



# Quantification

**25 particules cométaires** sélectionnées (~ 500 spectres):

- Cible
- Morphologie
- Taille
- Dates de collection et analyse

**Composition moyenne  
cométaire**

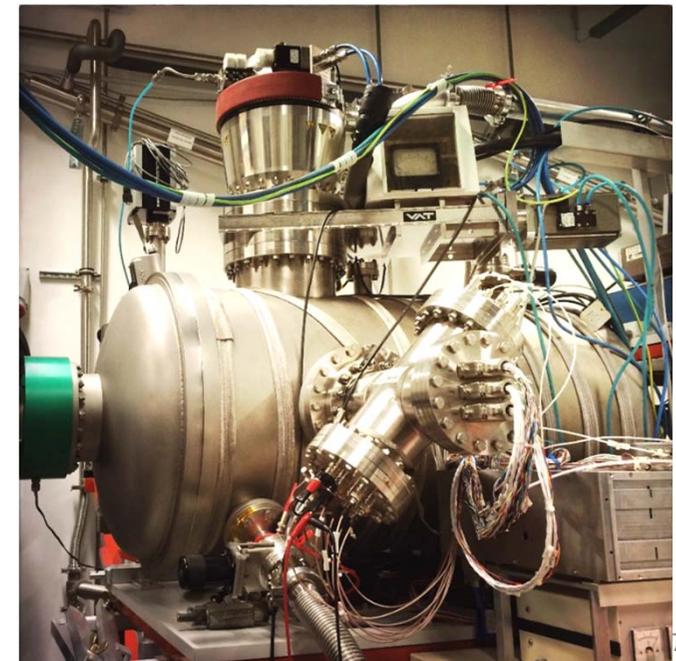
**RSF** = Relative Sensitivity Factor

$$\text{RSF}(E, E_0) = \frac{(E^+/E^+_{0})_{\text{Standard}}}{(E/E_0)_{\text{Standard}}}$$

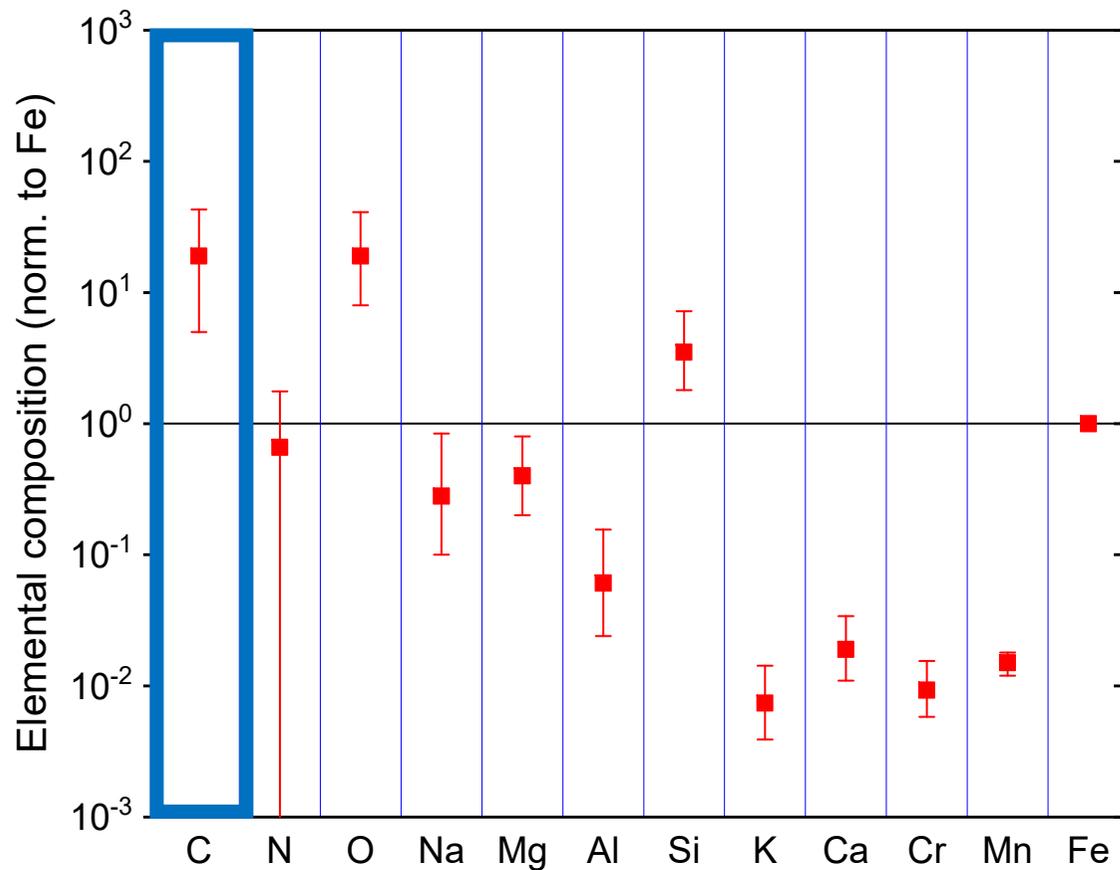
$$(E/E_0)_{\text{Sample}} = \frac{(E^+/E^+_{0})_{\text{Sample}}}{\text{RSF}(E, E_0)}$$



Krüger *et al.* (2015),  
Bardyn *et al.* (2017)



# Abondance élémentaire des particules de 67P



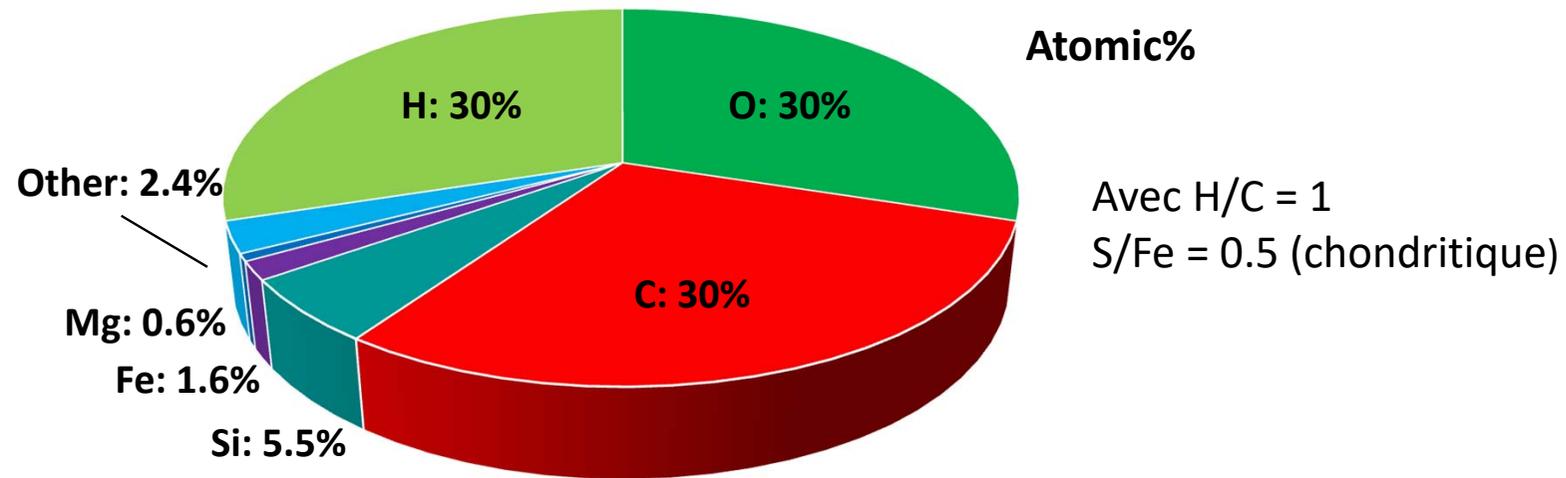
## Éléments majeurs

C, O, Si, Fe, N, Mg, Na

Les particules solides cométaires sont  
riches en carbone !

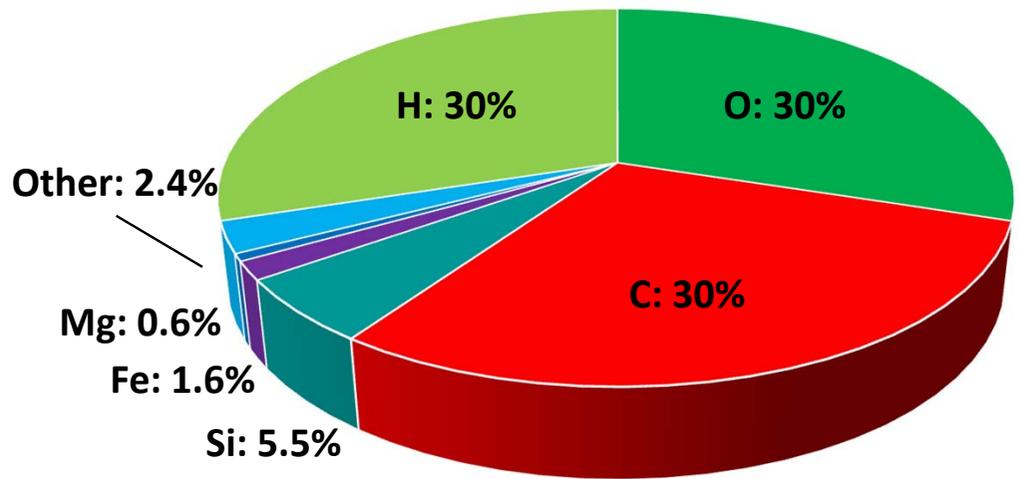
Bardyn et al., 2017 : Abondance élémentaire  
Fray et al., 2017 : N/C des particules de 67P

# Phases Organique vs Minérale



(Bardyn *et al.*, 2017)

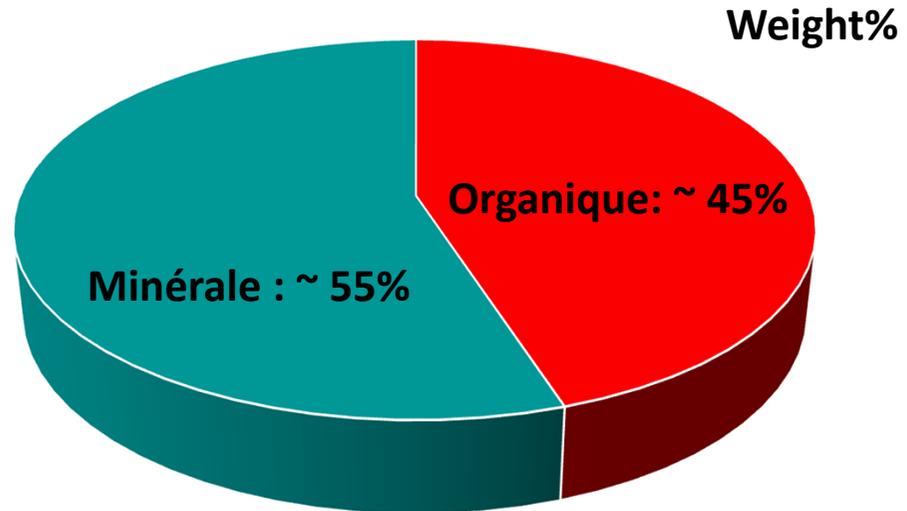
# Phases Organique vs Minérale



Atomic%

Avec  $H/C = 1$   
 $S/Fe = 0.5$  (chondritique)

Avec C, H, N et une fraction de O dans la phase organique  
( $O/Si = 4$  au maximum ( $SiO_4$ ) dans la phase minérale)



Weight%

(Bardyn *et al.*, 2017)

# Conclusions

- Identification de **5 ions organiques d'origine cométaire** :  $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$
- Meilleur analogue à la signature organique cométaire est l'IOM extraite des météorites carbonées

➔ La phase organique réfractaire est dominée par une composante organique macromoléculaire

# Conclusions

- Identification de **5 ions organiques d'origine cométaire** :  $C^+$ ,  $CH^+$ ,  $CH_2^+$ ,  $CH_3^+$ ,  $C_2H_3^+$
- Meilleur analogue à la signature organique cométaire est l'IOM extraite des météorites carbonées

➔ La phase organique réfractaire est dominée par une composante organique macromoléculaire

- Le **carbone** figure parmi les **éléments majoritaires** des particules

➔ Les particules sont constituées ~ 45% en masse de matière organique