



Effets du rayonnement cosmique galactique sur les petits corps glacés du système solaire externe : indices pour la formation de la matière organique des micrométéorites antarctiques ultra-carbonées

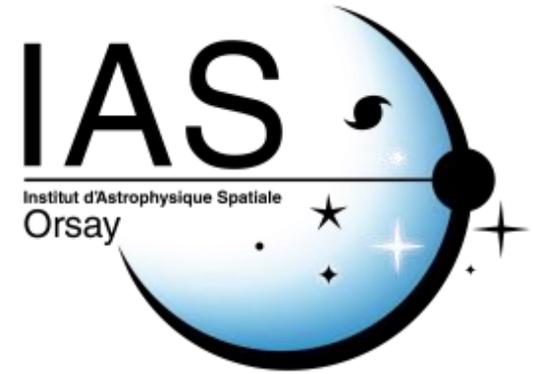
Basile Augé^{1,2}

¹ Centre de Recherche sur les Ions, les Matériaux et la Photonique, CEA, CNRS, ENSICAEN, Université de Caen Normandie

² Institut d'Astrophysique Spatiale, CNRS-Univ. Paris-Sud, Université Paris-Saclay

auge@ganil.fr





Marie Godard



Herman Rothard



Emmanuel Dartois



Cécile Engrand



Philippe Boduch



Jean Duprat

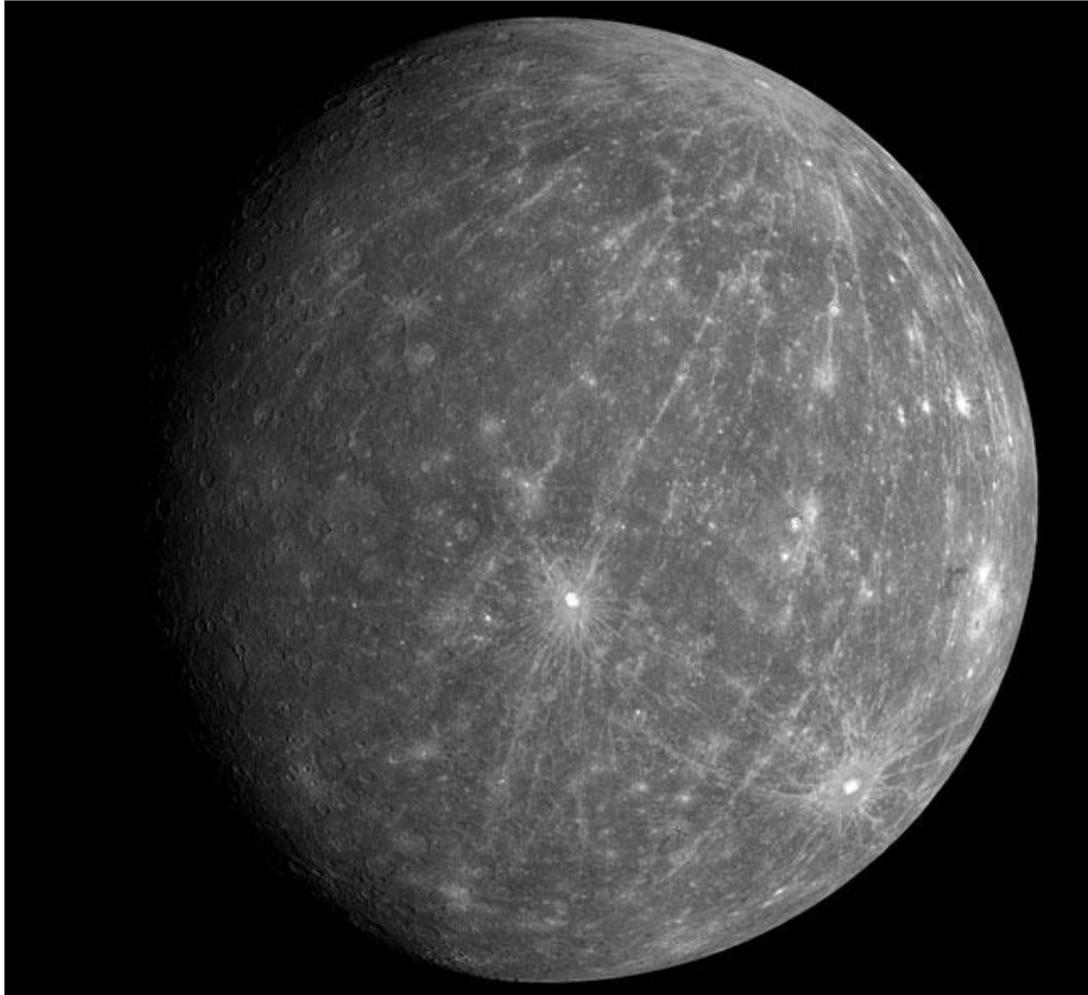




Plan

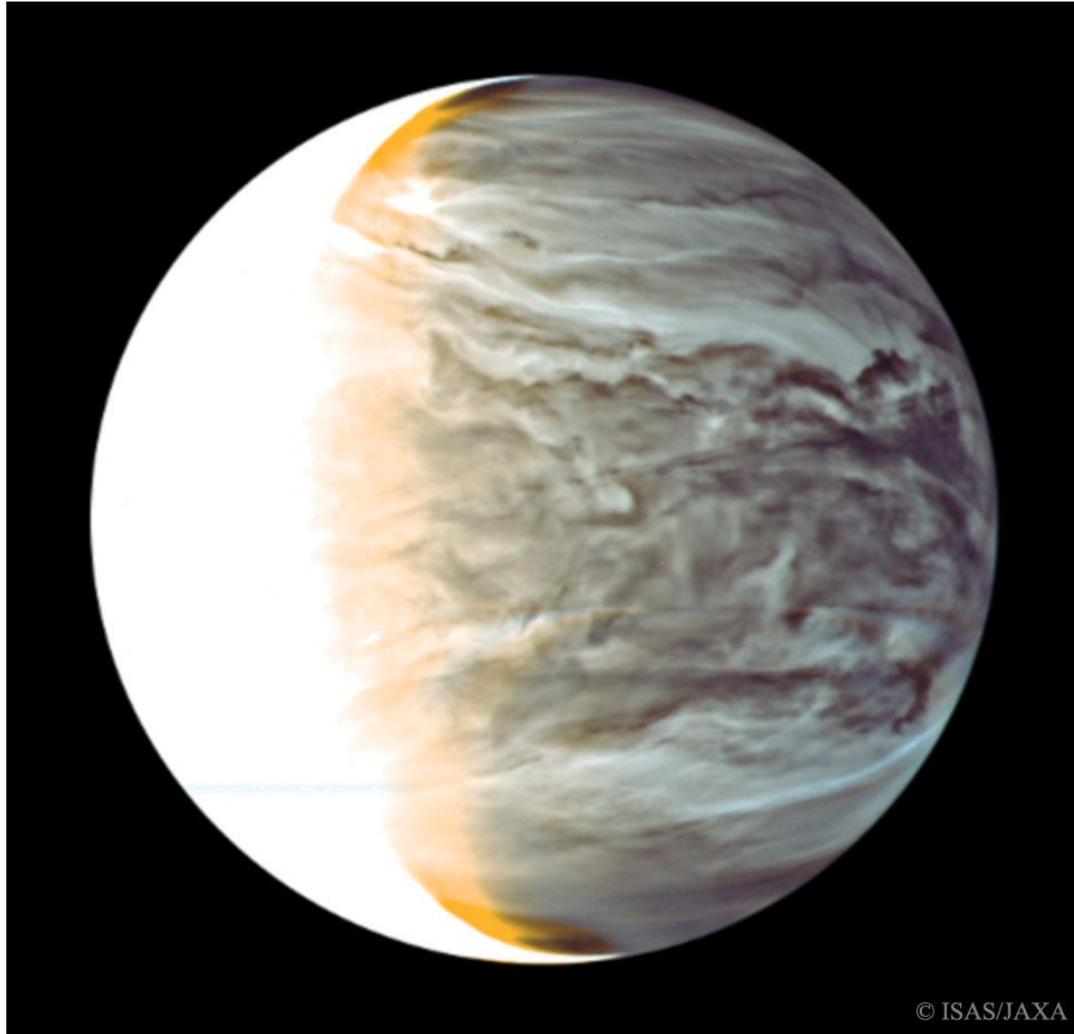
- **Le système solaire interne et externe**
- **La matière extraterrestre sur Terre**
- **Irradiation d'analogues de la surface d'objets transneptuniens**
- **Perspectives**

Système solaire interne : Mercure

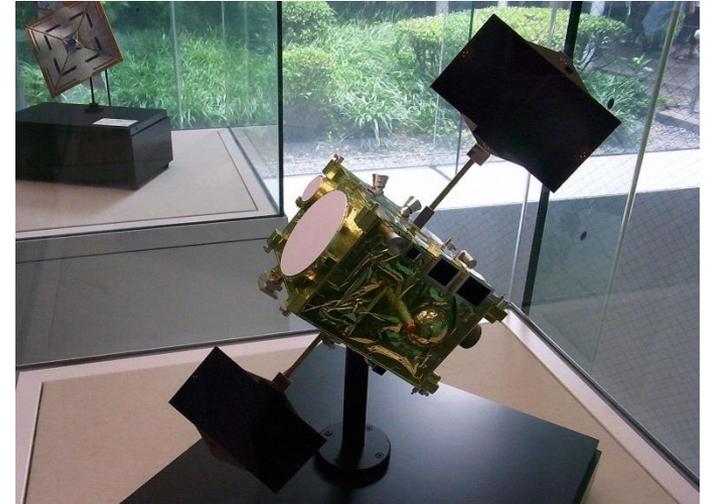


- 0,39 UA
- 0,055 M_{\oplus}

Systeme solaire interne : Venus



© ISAS/JAXA



- 0,72 UA
- 0,815 M_⊕



Systeme solaire interne : Terre

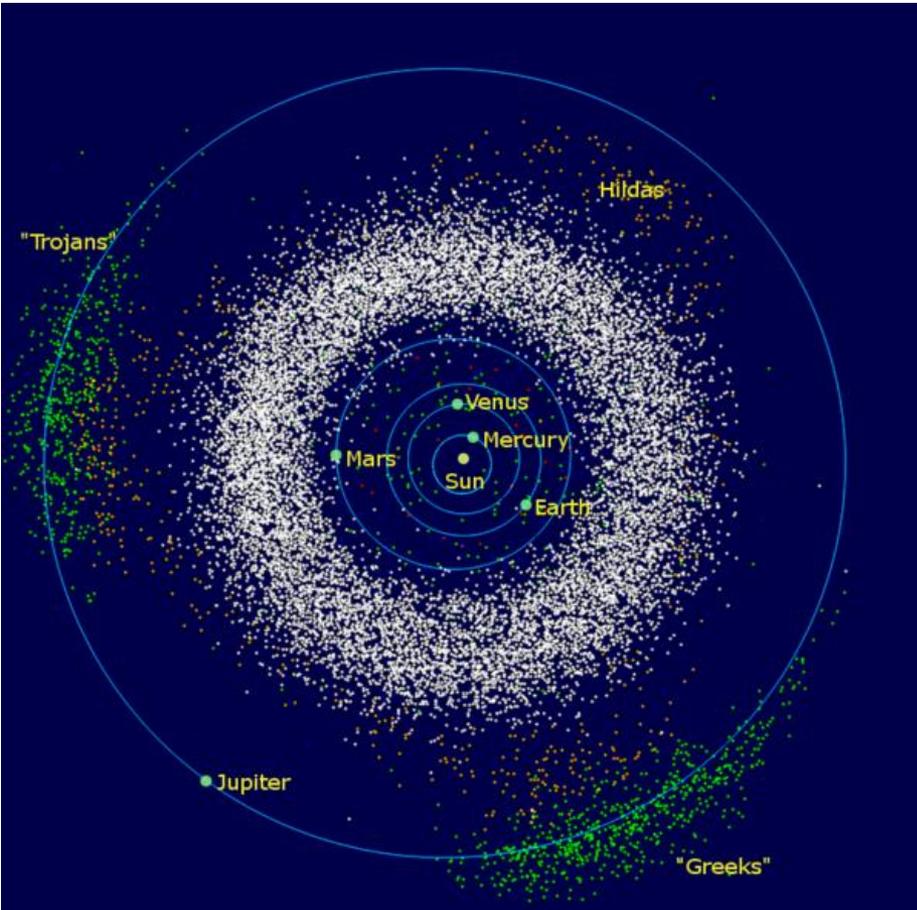


Système solaire interne : Mars

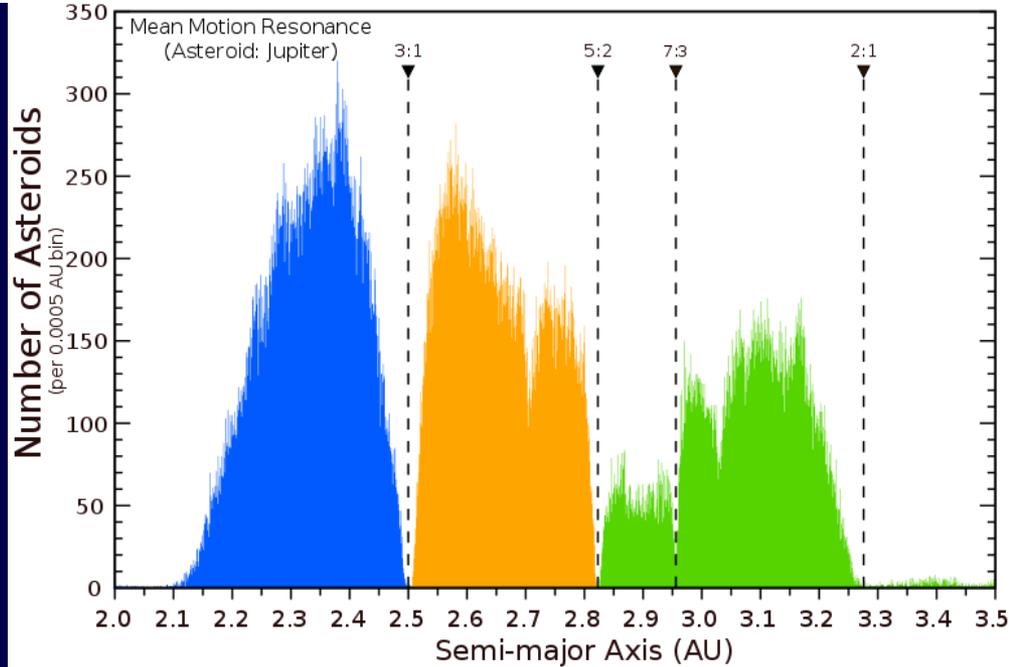


- 1,52UA
- 0,107M_⊕

Systeme solaire interne : les astéroïdes



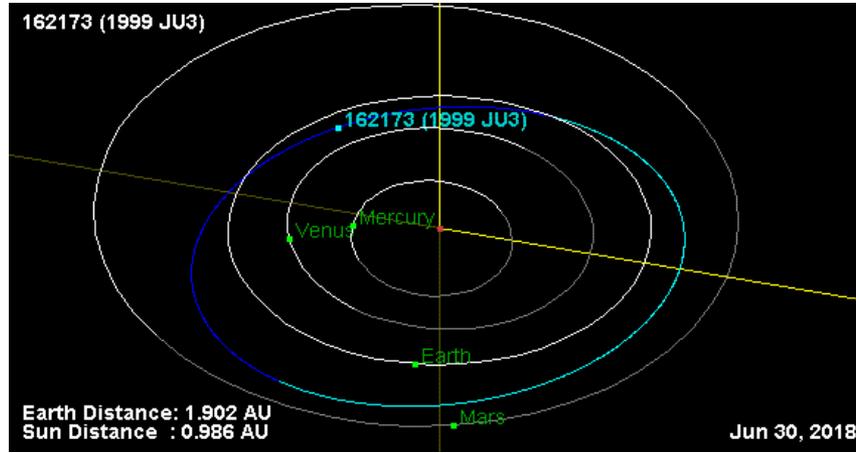
Asteroid Main-Belt Distribution
Kirkwood Gaps



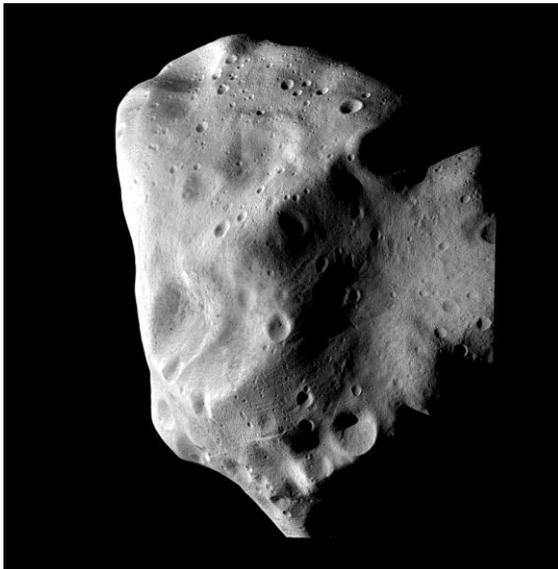
- Au moins 500 000 objets
- $0,0005 M_{\oplus}$

Systeme solaire interne : les astéroïdes

- Type C : ~75%
- Type S : ~ 17%
- Type M : ~ 8%



(162173) Ryugu, Hayabusa 2 (JAXA -2018/2020) C



(21) Lutèce par Rosetta (ESA) M



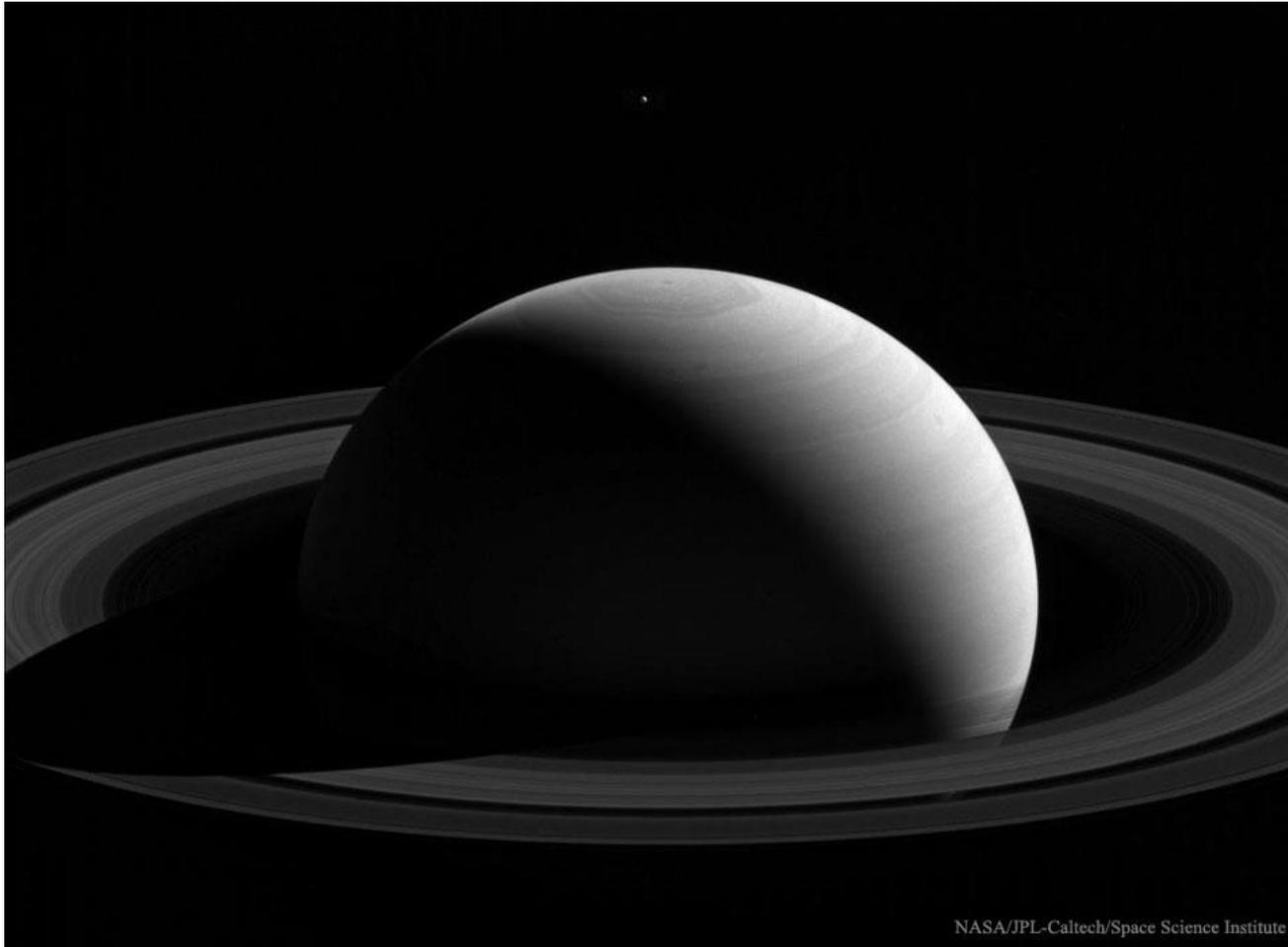
(25143) Itokawa par Hayabusa 1 (JAXA) S

Système solaire externe : Jupiter



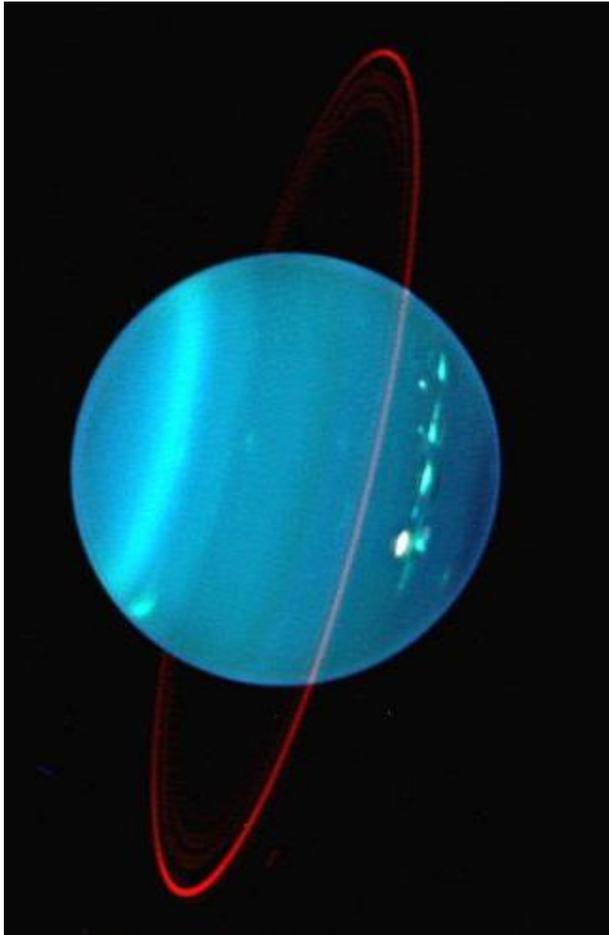
- 5,20 UA
- 317,8 M_⊕

Système solaire externe : Saturne



- 9,55 UA
- 95,2 M_⊕

Système solaire externe : Uranus



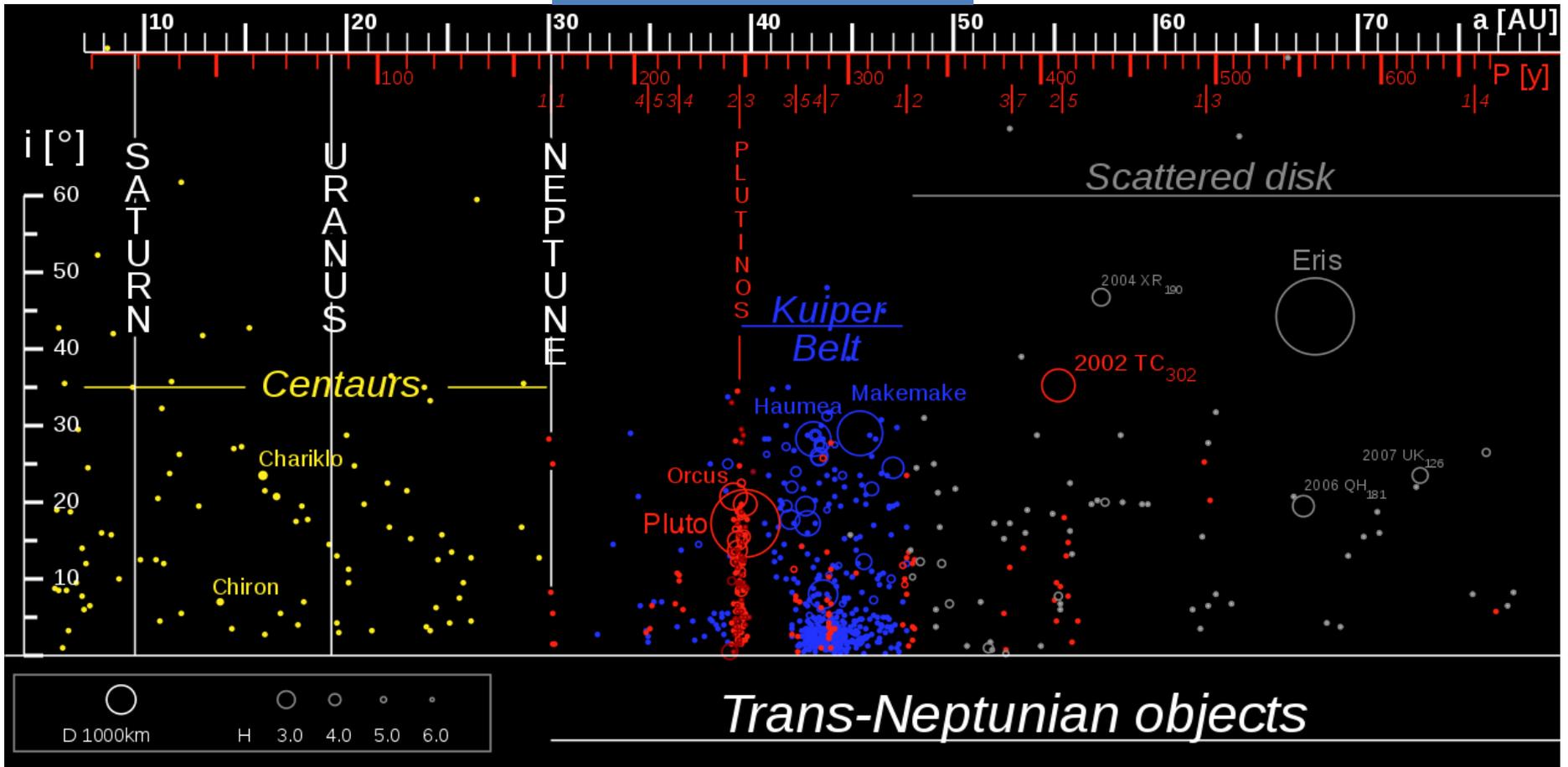
- 19,19 UA
- 14,54 M_{\oplus}

Système solaire externe : Neptune



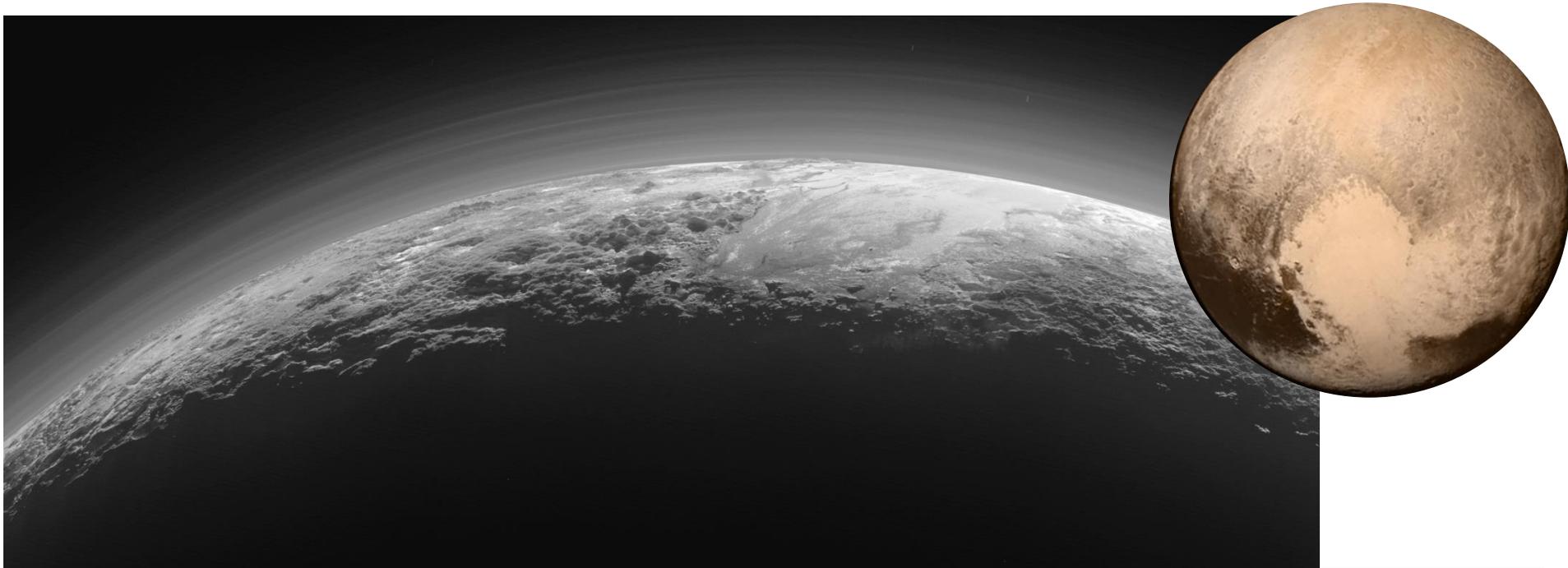
- 30,10 UA
- 17,15 M_{\oplus}

Système solaire externe : Ceinture de Kuiper



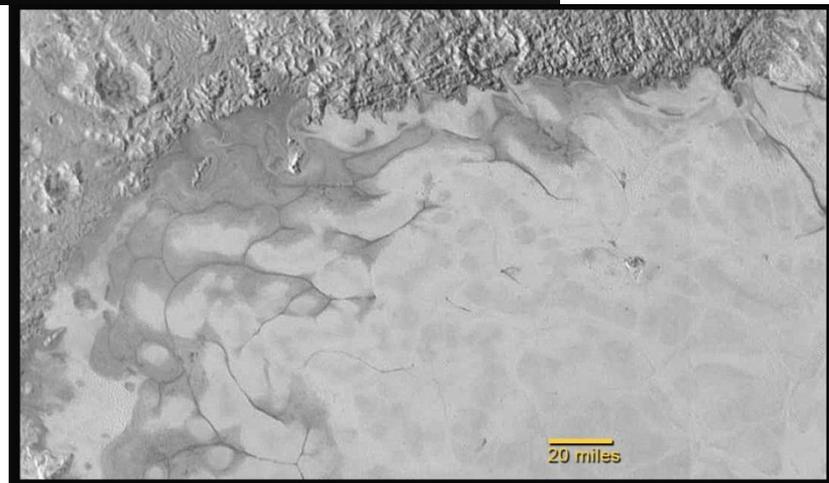
Environ $0,1 M_{\oplus}$

Premier TNO découvert : Pluton



- Découvert en 1930
- Déclassé en planète naine en 2006
- Survolé en 2015 par la sonde New Horizons

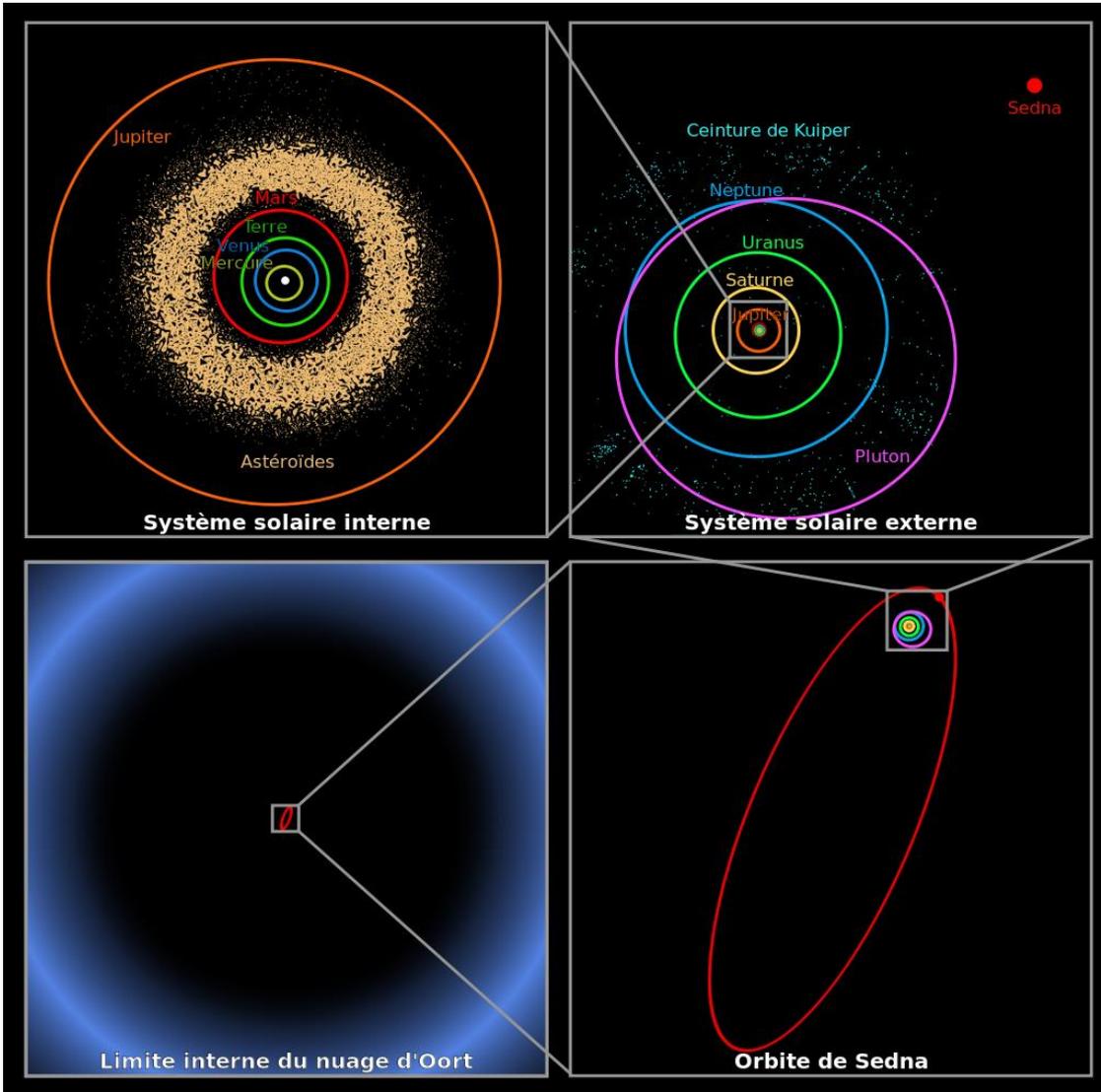
- 39,44 UA
- 0,002 M_{\oplus}



Les plus grands objets transneptuniens connus



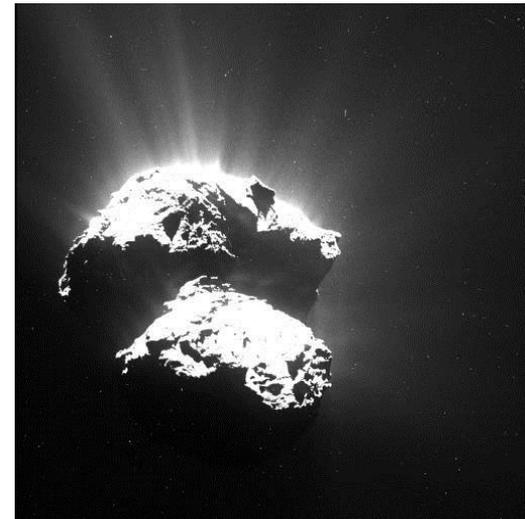
Système solaire externe : le nuage de Oort



- 20 000 à 150 000 UA
- Des milliards d'objets glacés
- Quelques M_{\oplus}

Les comètes

- Courte période de la famille de Jupiter ($T < 20$ ans) [Kuiper]
- Courte période de type Halley ($T < 200$ ans) [nuage de Oort]
- Longue période ($T > 200$ ans) [nuage de Oort]
- Apériodique
- Perdue



Comète 67P/T-G par Rosetta (6-7 ans)



Comète de Hale-Bopp (2533 ans)

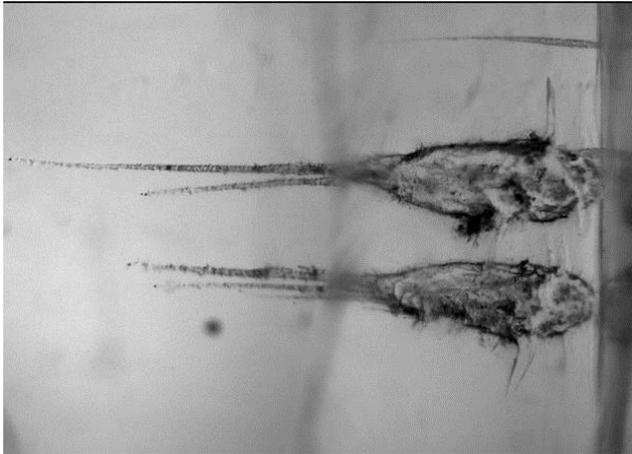


D/1993 F2 (perdue)

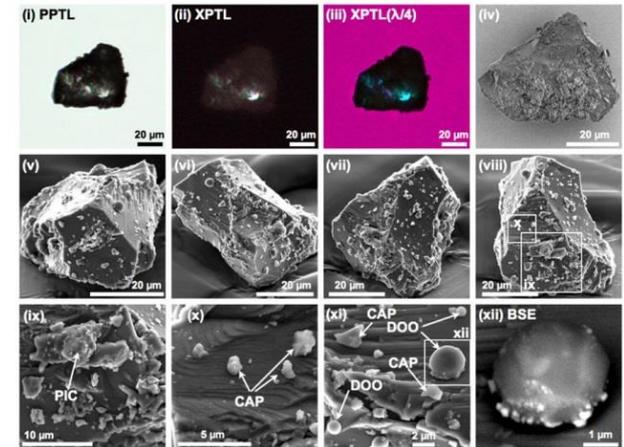


Comète de Halley (76 ans)

Matière extraterrestre sur Terre : missions spatiales



Comète 81P/Wild (*Stardust*)



Asteroïde Itokawa (*Hayabusa 1*)

- Stardust : 7 ans de voyage interplanétaire (10 000 poussières, altération thermique)
- Hayabusa 1 : 7 ans de voyage, 5 ans de retard (1500 poussières micrométriques)
- Hayabusa 2 : lancée en 2014, retour en 2020 (impacteur puis collecteur)
- Osiris-Rex : lancée en 2016, retour en 2023 (entre 60 gr et 2 kg)

Matière extraterrestre sur Terre : météorites

Environ **40 tonnes** de chute par an, **une douzaine** de météorites collectées

différenciées (~ 13%)

non différenciées (~ 87%)

Achondrites (~ 8%)

Sidérites (~ 5%)

Lithosidérites (~ 1%)

Chondrites ordinaires (~79%)

Chondrites carbonées (~ 5%)

Chondrites à enstatite (~ 2%)



Météorite de Krasnojarsk
lithosidérite



Météorite de Chupaderos
sidérite



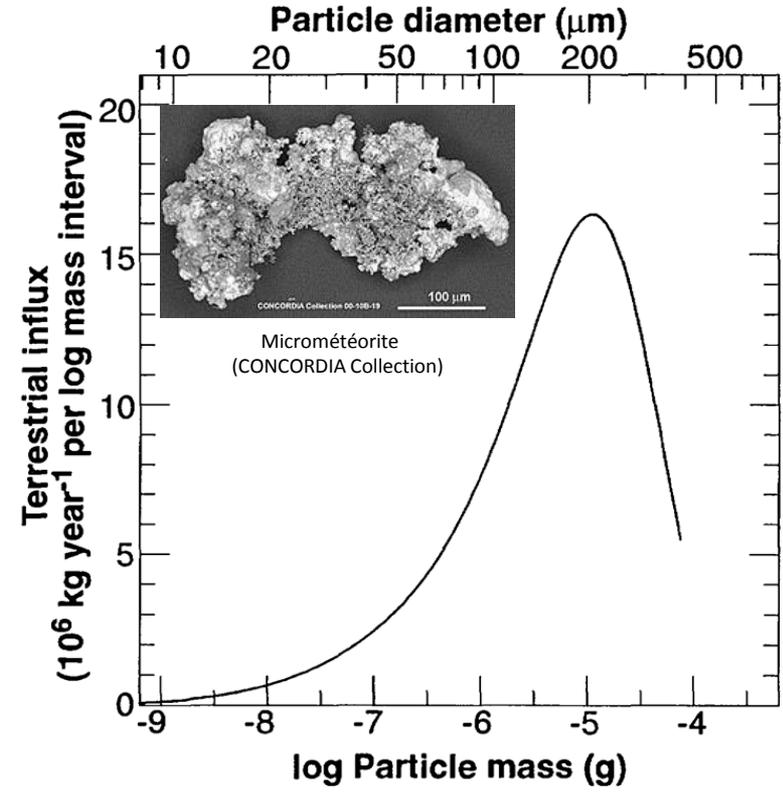
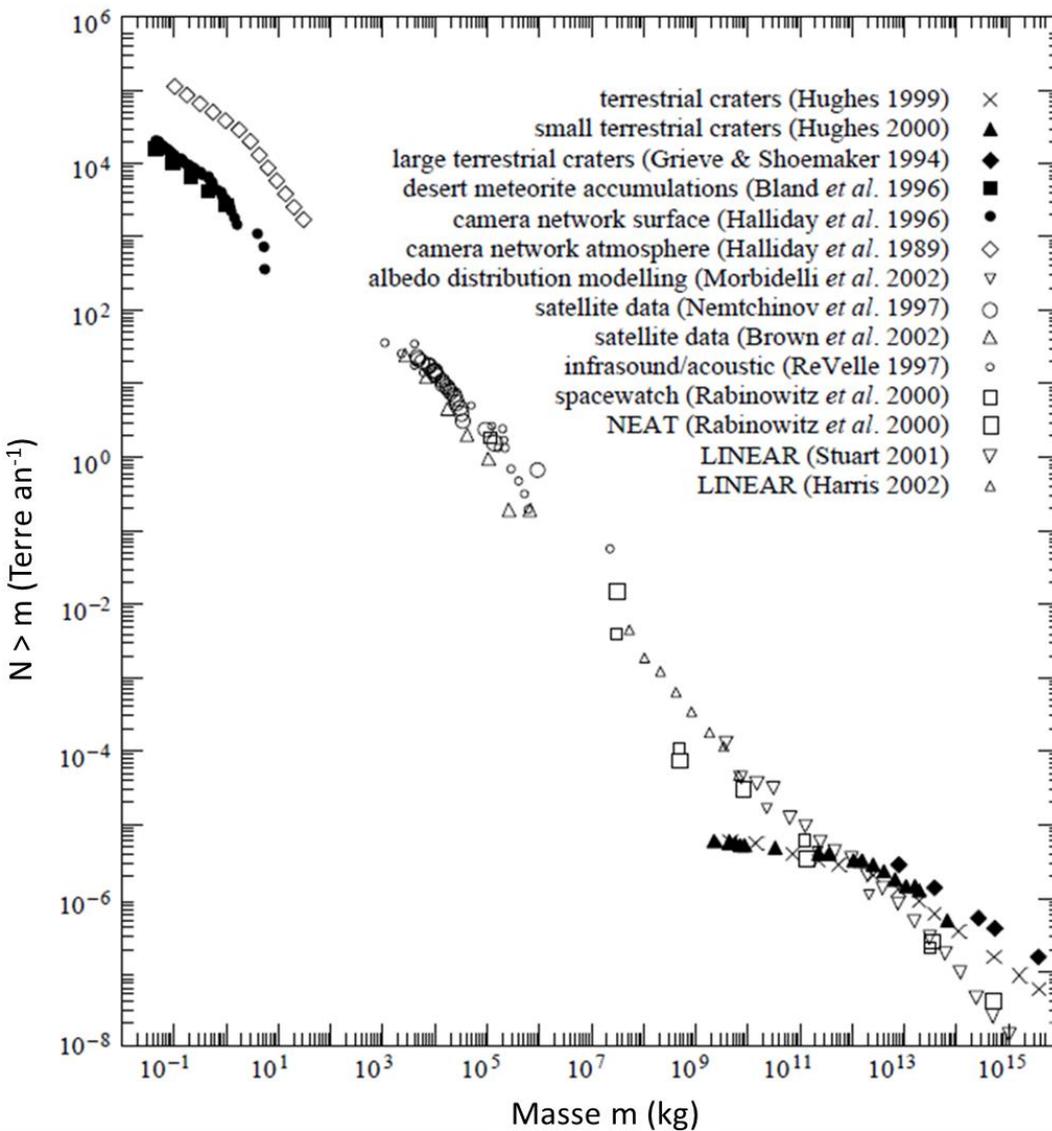
Météorite ordinaire (Maroc)



Météorite d'Orgueil
carbonée

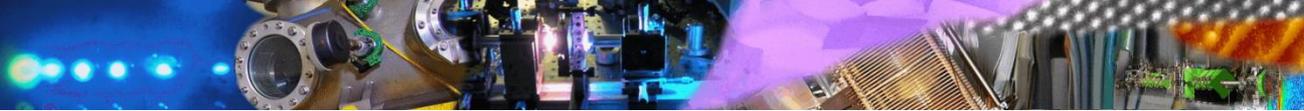


Matière extraterrestre sur Terre : micrométéorites

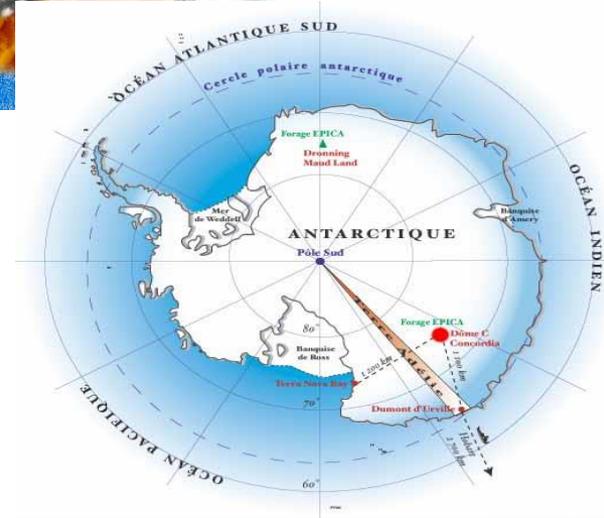


Entre 15 000 et 40 000 tonnes de chute par an

Love et al. 1993, Science, 262, 550
 Bland et al. 2005, Philosophical tr., 363, 2793



Micrométéorites antarctiques



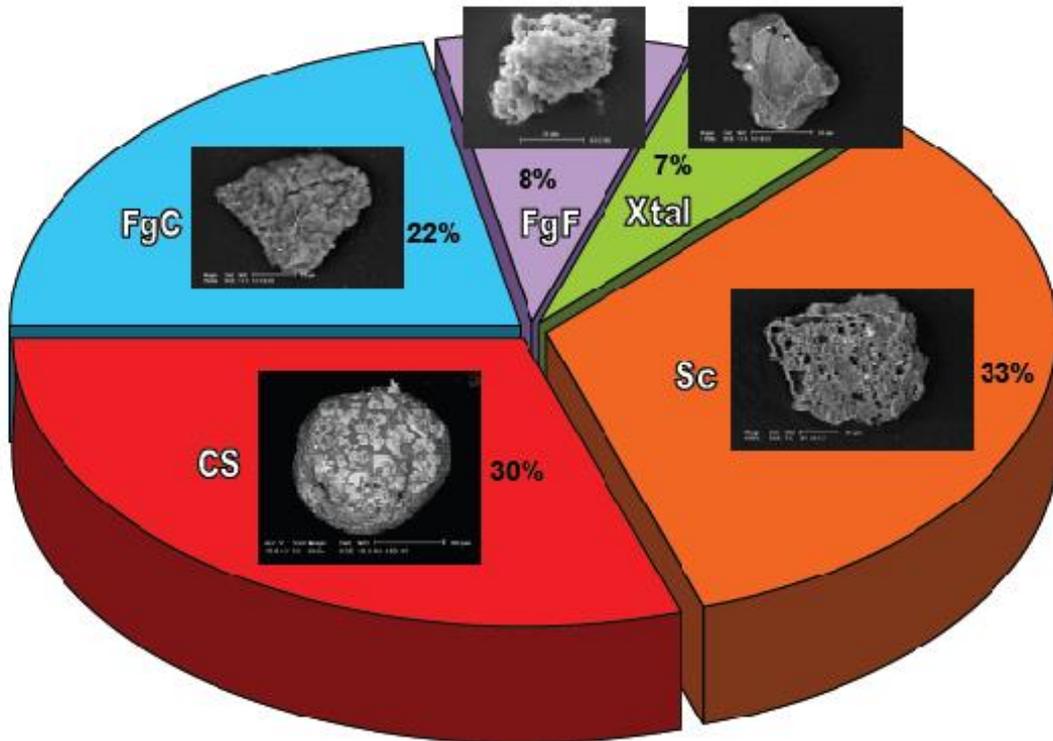
- 1000 km des côtes et 3,5 km de calotte
- $-30\text{ °C} < T < -70\text{ °C}$
- Sol enneigé et non glacé



- Peu de contamination humaine ou terrestre
- Excellente conservation
- Pas d'altération mécanique



Micrométéorites antarctiques

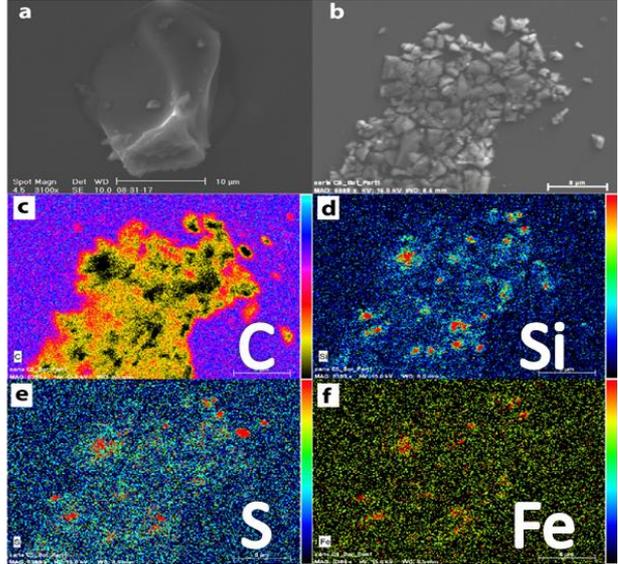
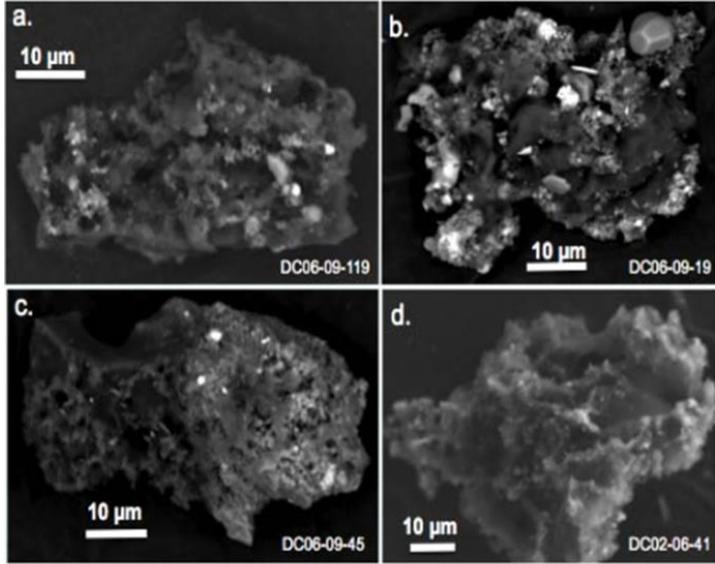


- FgC, non fondues à grains fins compacts
- Xtal, non fondues à gros grains
- Sc, partiellement fondues
- CS, complètement fondues
- FgF, non fondues à grains fins poreux



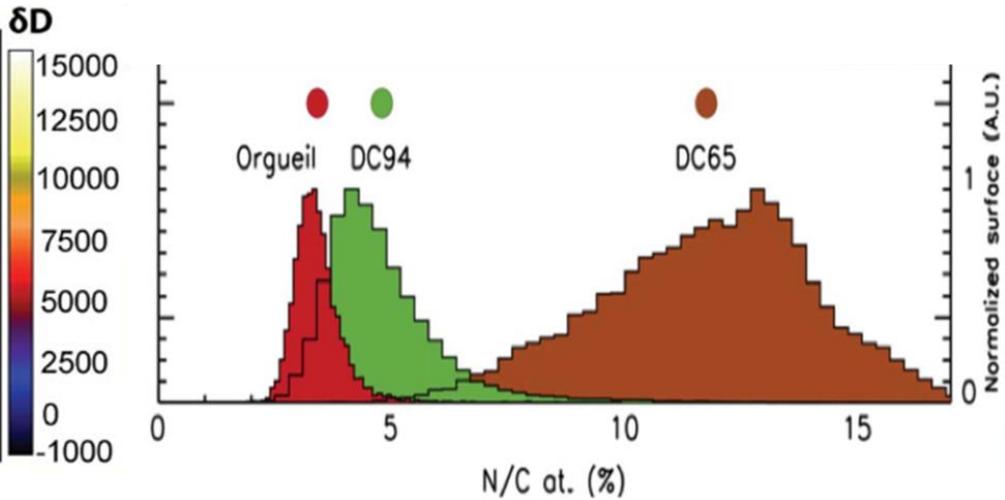
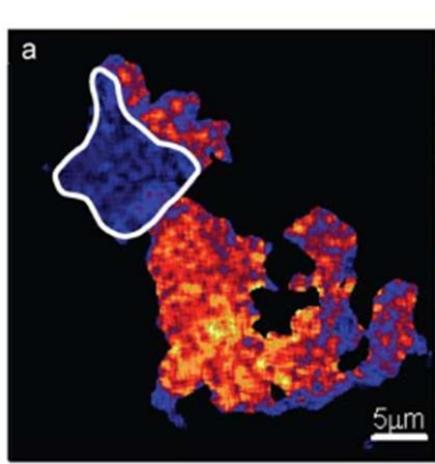
+ 5000 micrométéorites dans la collection Concordia du CSNSM

UltraCarbonaceous Antarctica MicroMeteorites



Environ 1% des micrométéorites non fondues, **composition exceptionnelle**

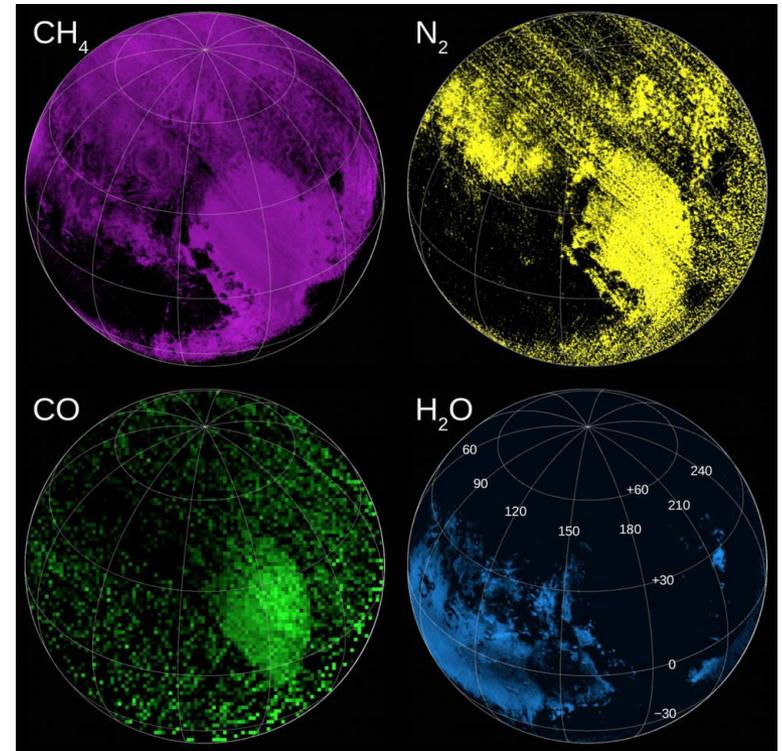
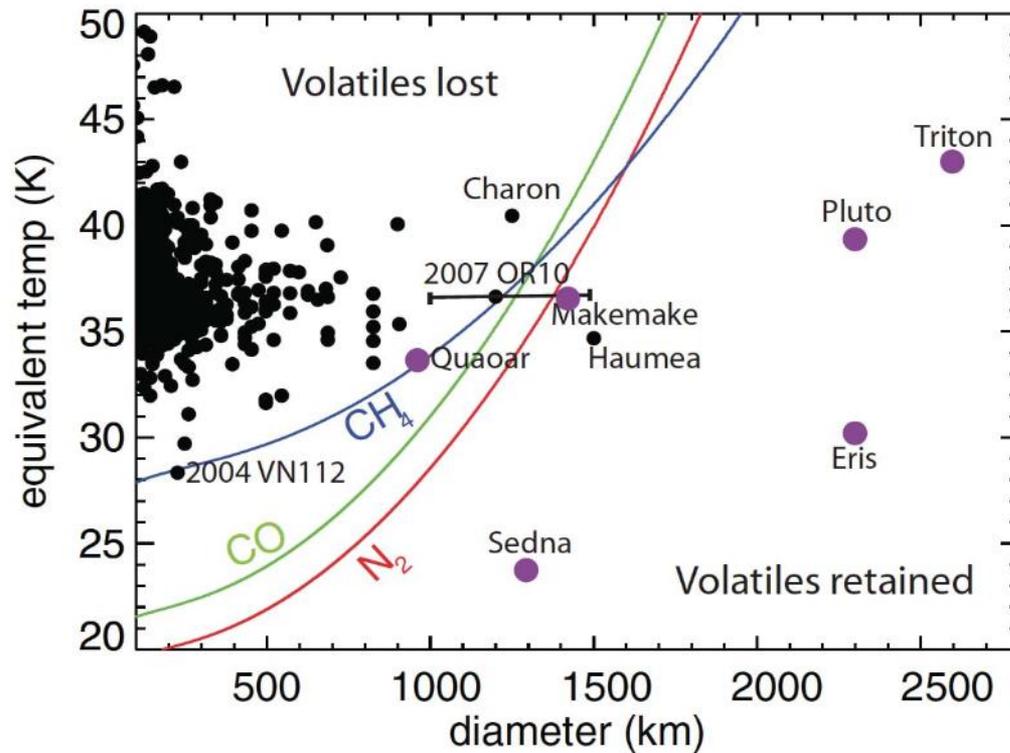
- Au moins 50% C
- D/H 20 fois SMOW
- N/C jusqu'à 20%
- Xtal/am au moins 20%



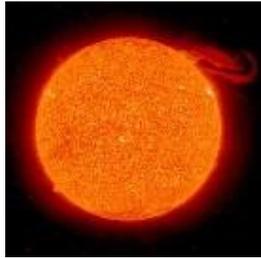
Dartois et al. 2013, Icarus, 224, 243
 Duprat et al. 2010, Science, 328, 742
 Dobrica et al. 2011, Meteoritics and Planetary Science, 46, 1363

Scénario de formation des UCAMMs : milieu

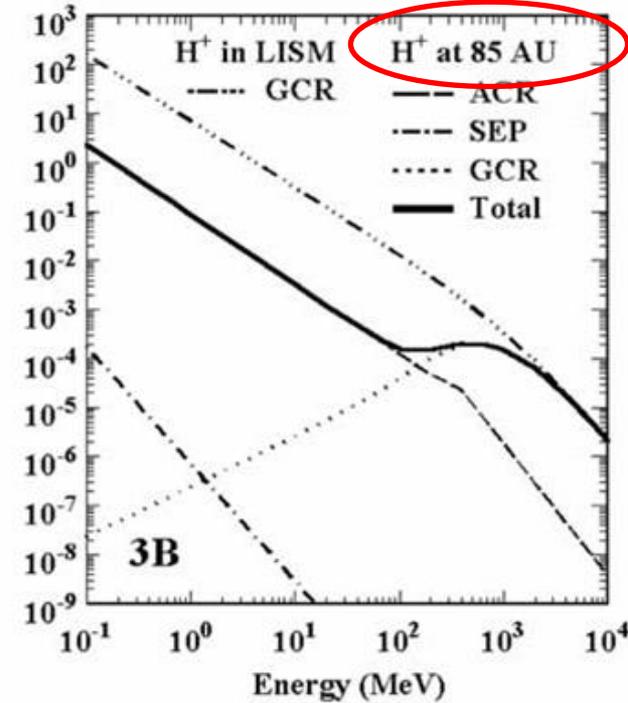
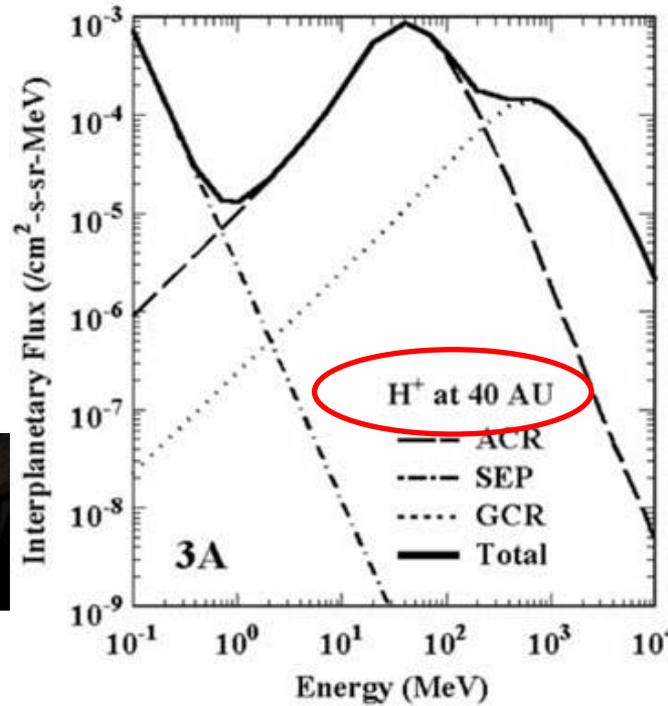
- Environnement froid
- Précurseur carboné et environnement riche en azote
- Source d'énergie efficace pour former de la matière organique riche en azote
- Milieu pauvre en oxygène (CO ou H₂O)



Scénario de formation des UCAMMs : énergie

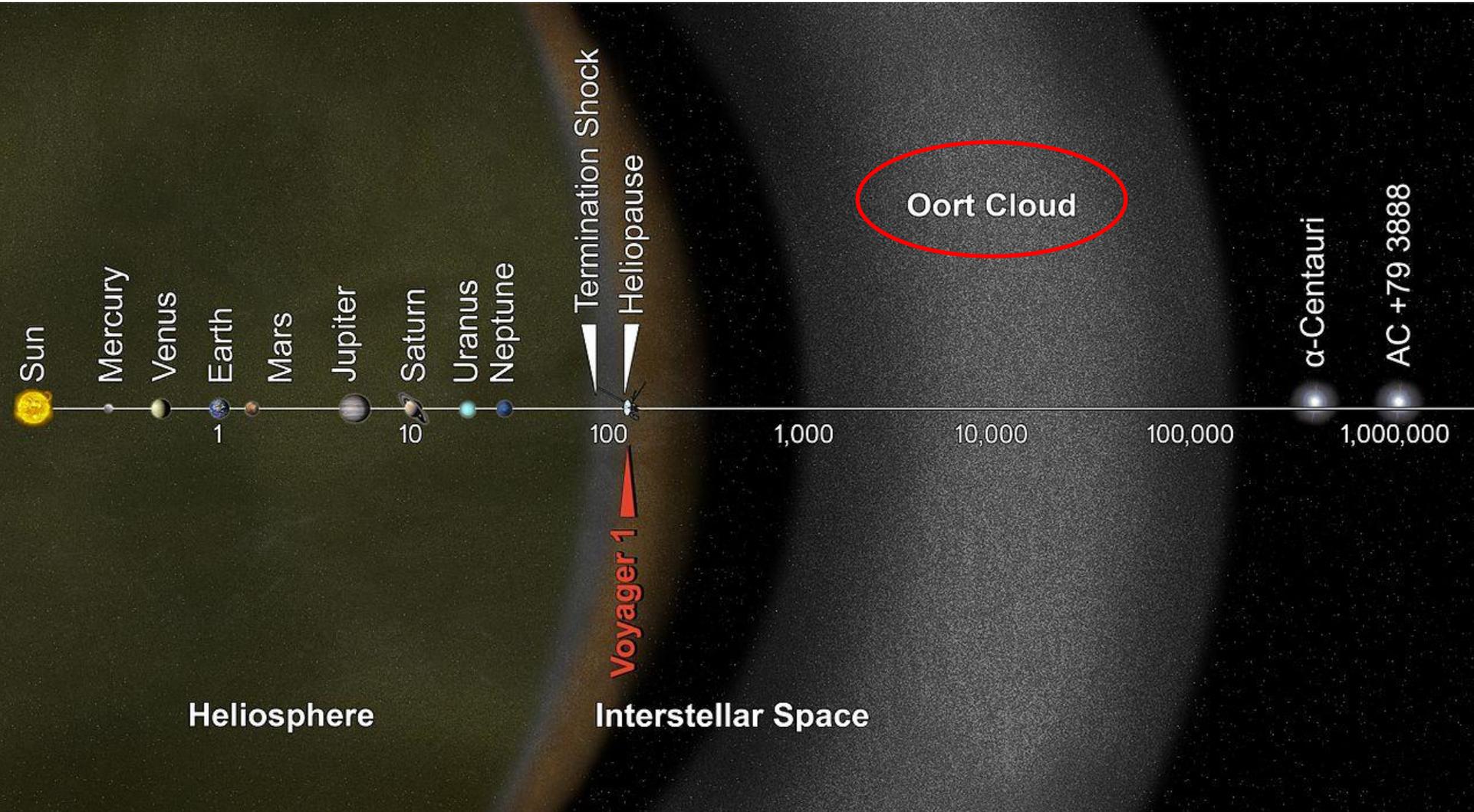


ou

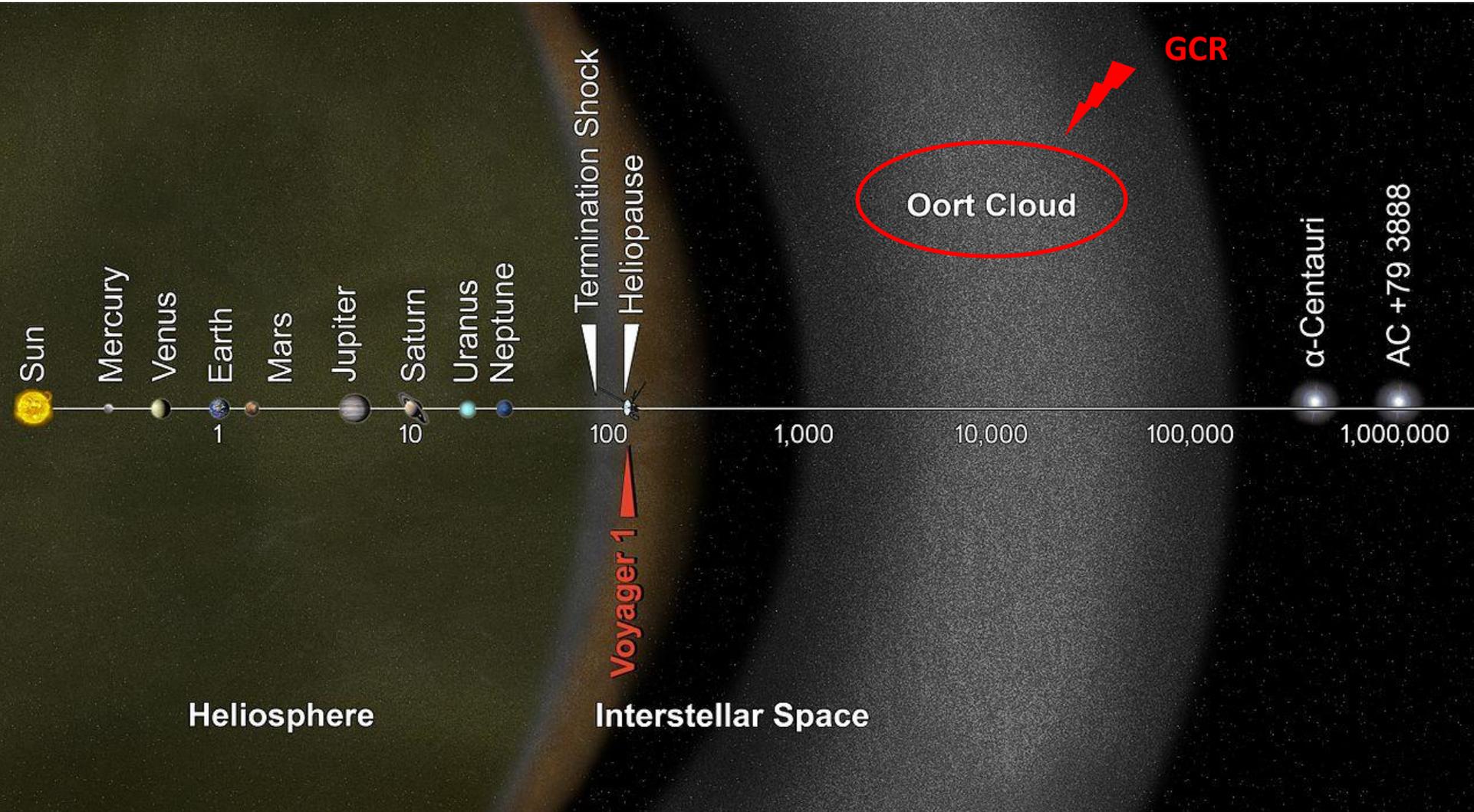


- Flux de rayons cosmiques galactiques plus intense dans le système solaire externe
- Beaucoup de matière, orbite stable à moyen terme
- Radiochimie par le GCR

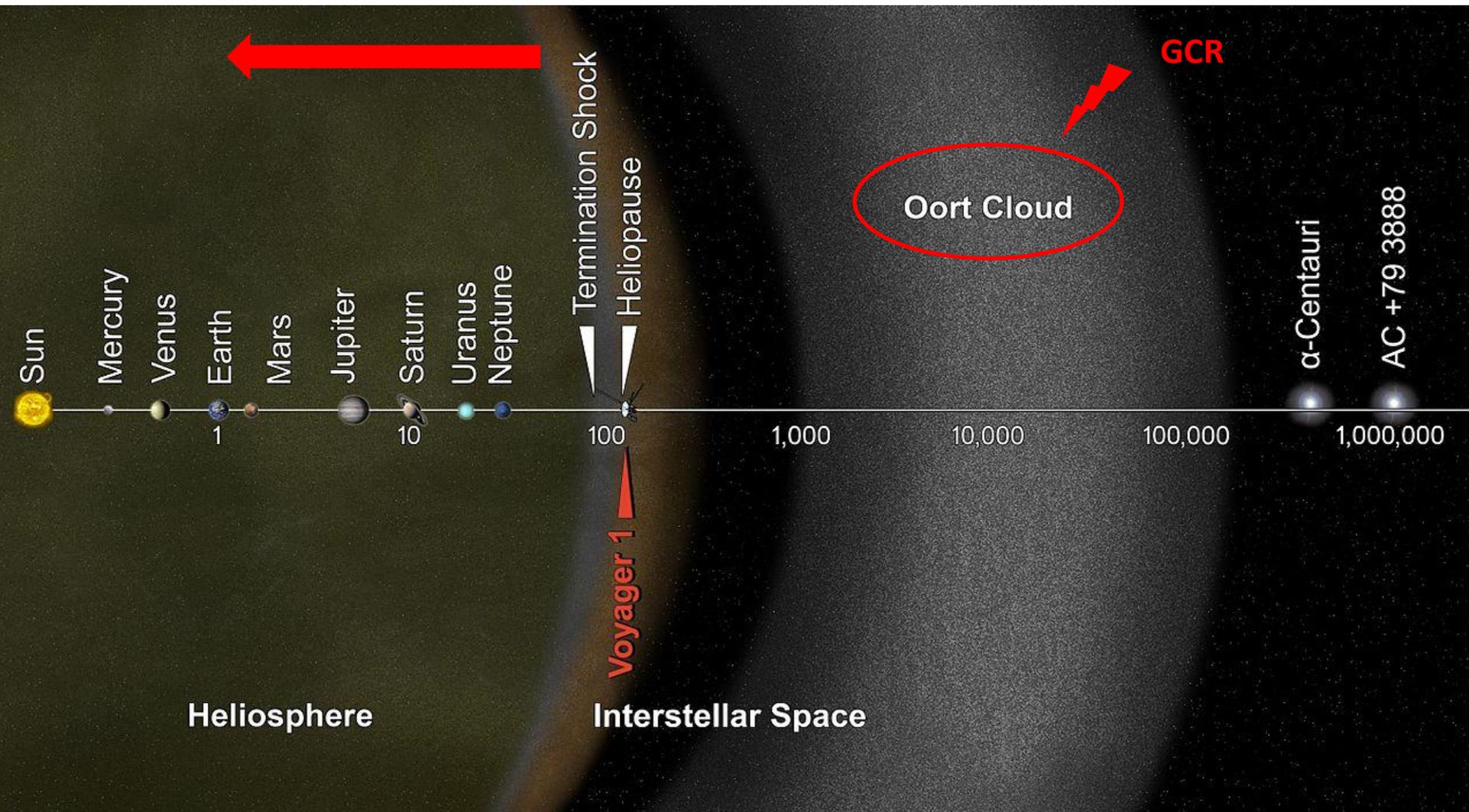
Scénario de formation des UCAMMs



Scénario de formation des UCAMMs



Scénario de formation des UCAMMs





Map data ©2015 GeoBasis-DE/BKG (©2009), Google, Inst. Geogr. Nacional





Ganil

Rue Moïse Ohayon

Rue Moïse Ohayon

Cyceron



2D





GANIL
laboratoire commun CEA/DSM *spiral2* CNRS/IN2P3



GANIL
laboratoire commun CEA/DSM *spiral2* CNRS/IN2P3

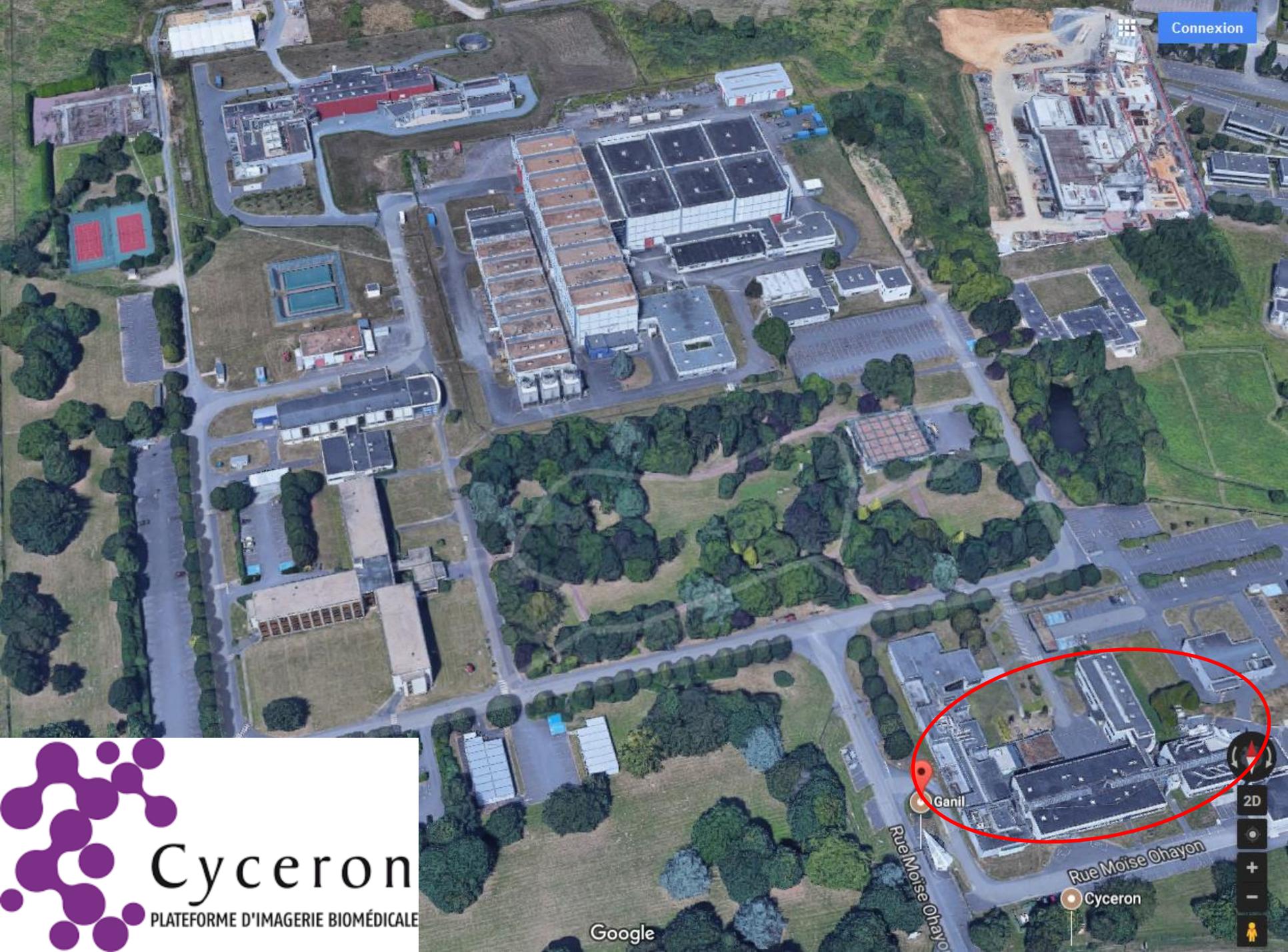
Map navigation controls including a compass, 2D/3D toggle, zoom in (+) and zoom out (-) buttons, and a person icon.

Rue Moïse Ohayon

Rue Moïse Ohayon

Ganil

Cyceron



Cyceron
PLATEFORME D'IMAGERIE BIOMÉDICALE

Ganil

Cyceron

Rue Moïse Ohayon

Rue Moïse Ohayon

2D

+

-

Person icon



Connexion



Ganil

Rue Moïse Ohayon

Rue Moïse Ohayon

Cyceron



2D



Archade

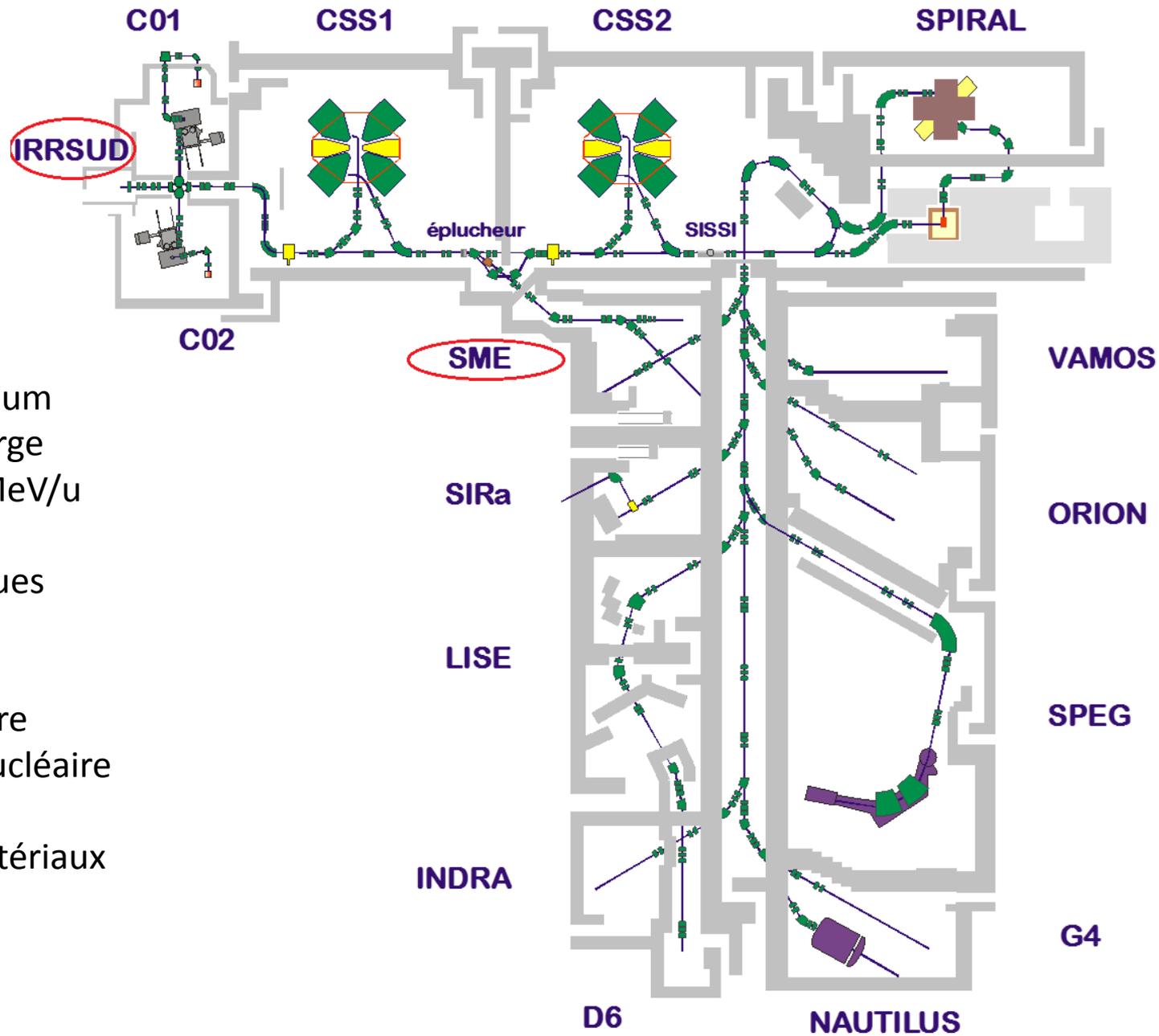
ADVANCED RESOURCE CENTRE
FOR HADRON THERAPY IN EUROPE

Google



CiMap

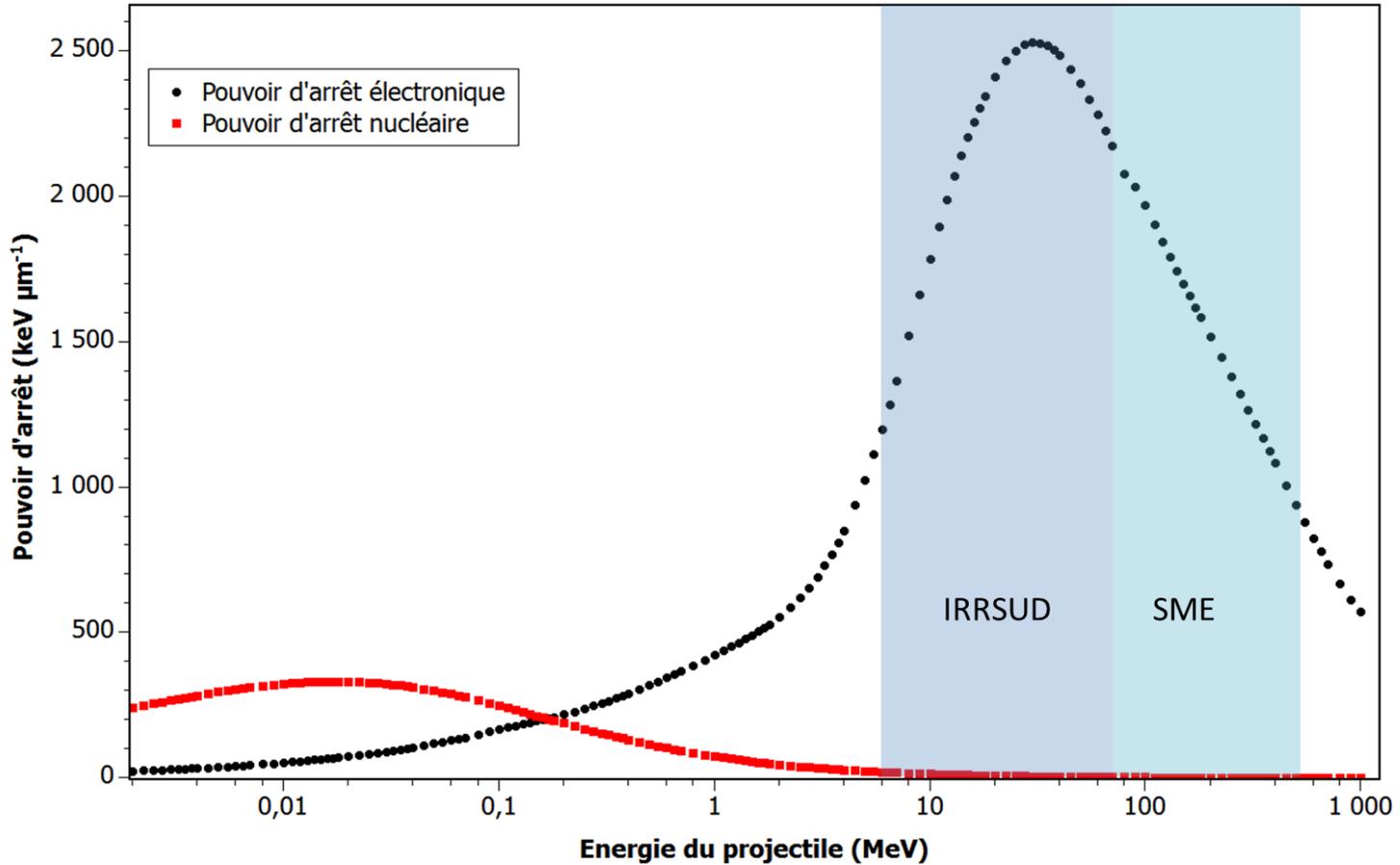
Le GANIL



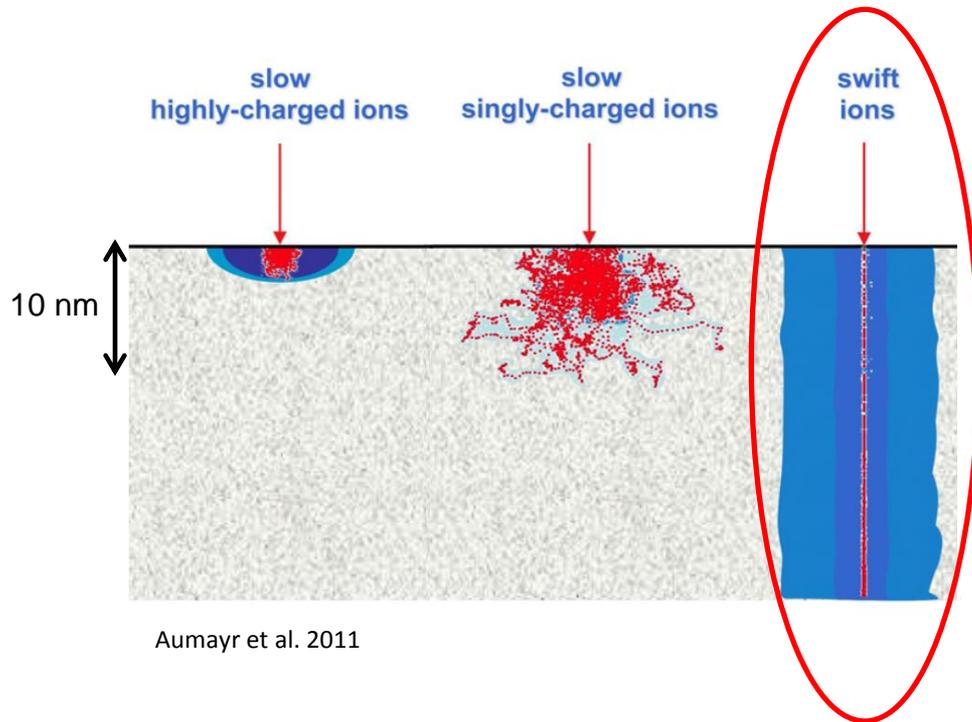
- Carbone à l'uranium
- Haut état de charge
- 1 MeV/u à 100 MeV/u
- Haute intensité
- Faisceaux exotiques

- Physique nucléaire
- Astrophysique nucléaire
- Astrochimie
- Physique des matériaux
- Radiobiologie

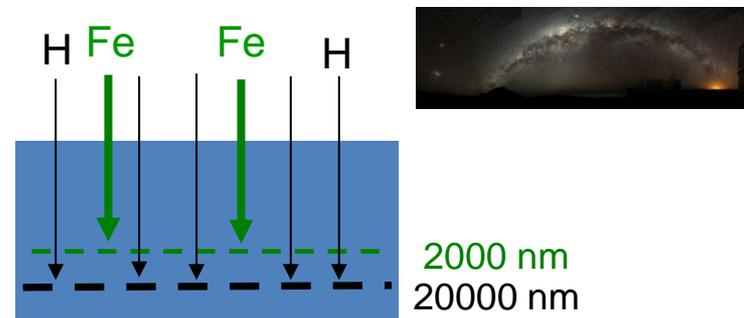
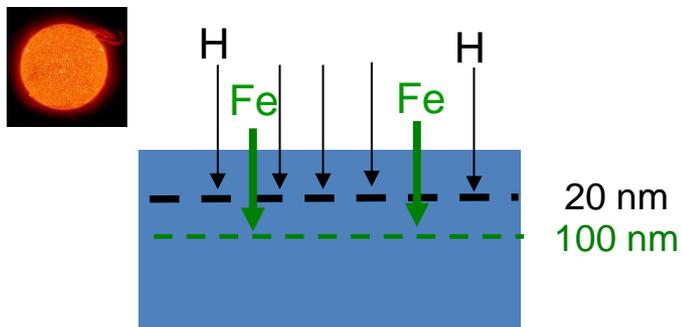
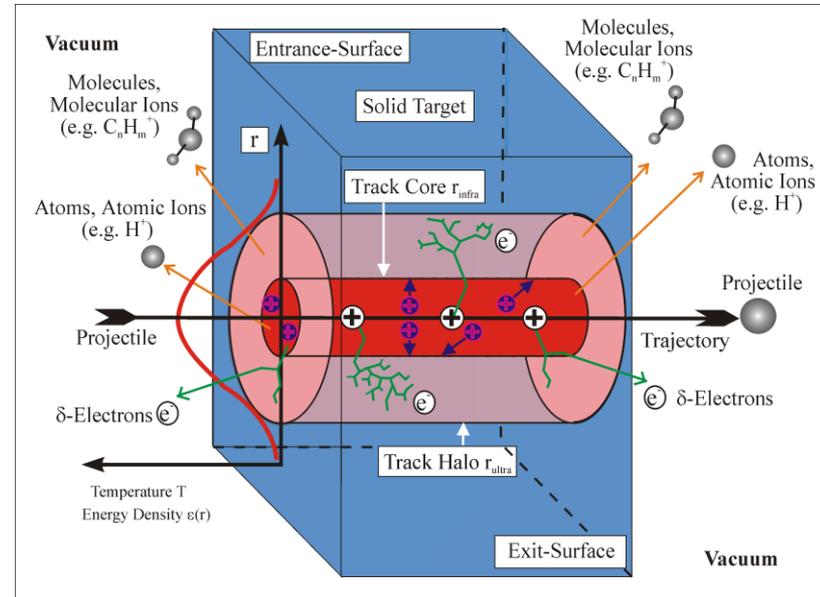
Interaction ions-matière



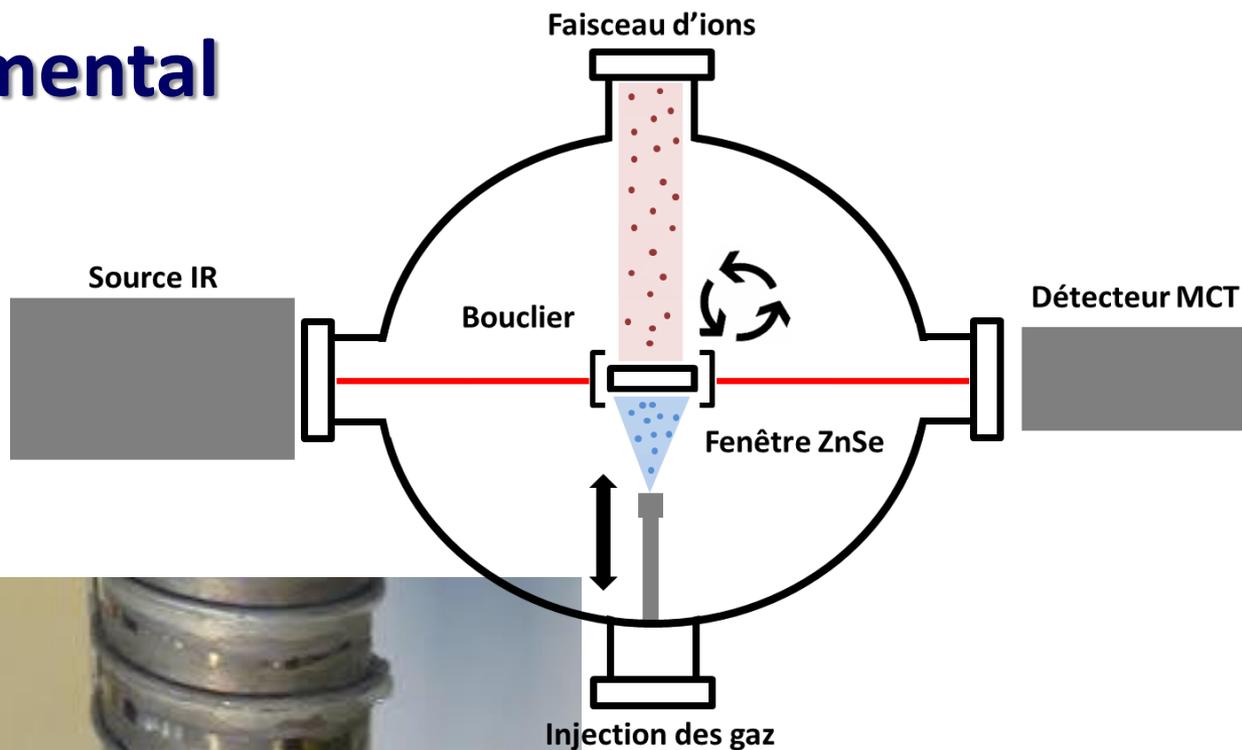
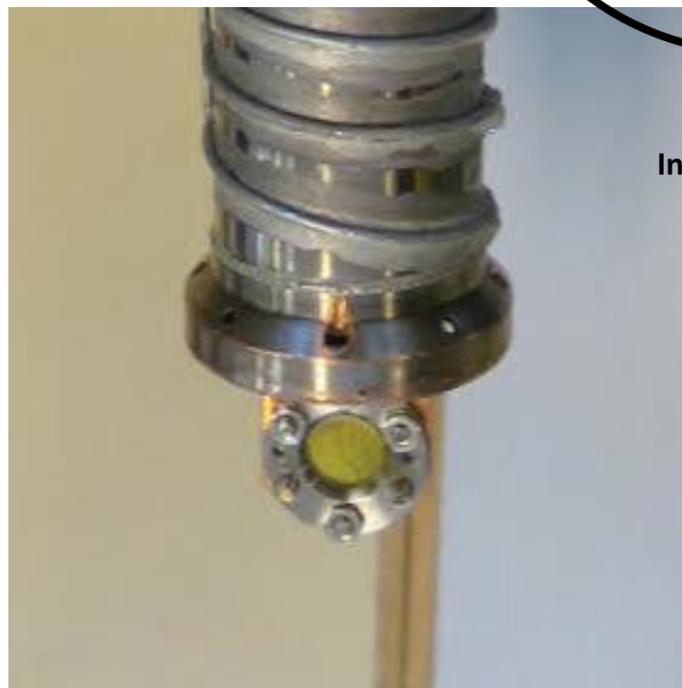
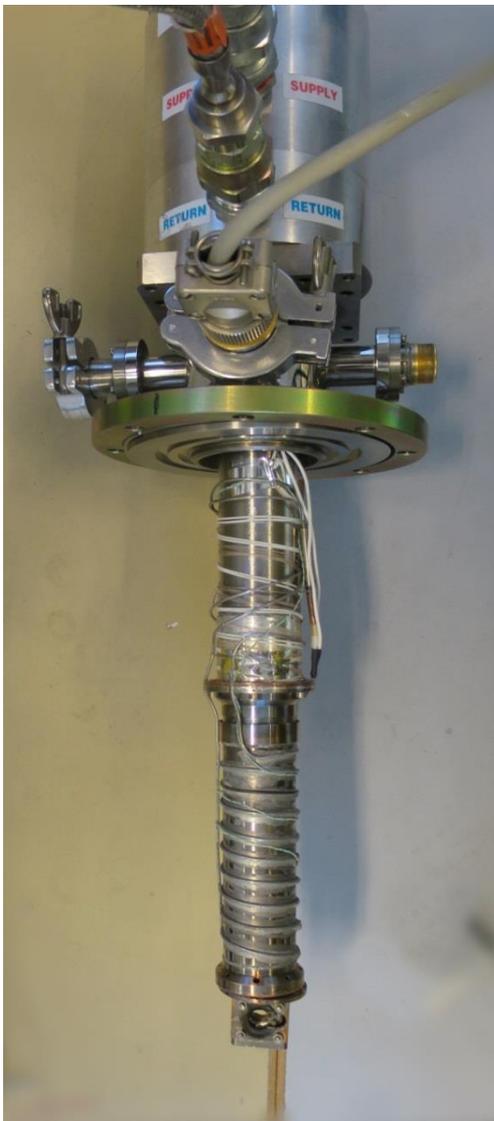
Dépôt d'énergie d'un noyau d'argon dans une glace d'azote et de méthane



Aumayr et al. 2011



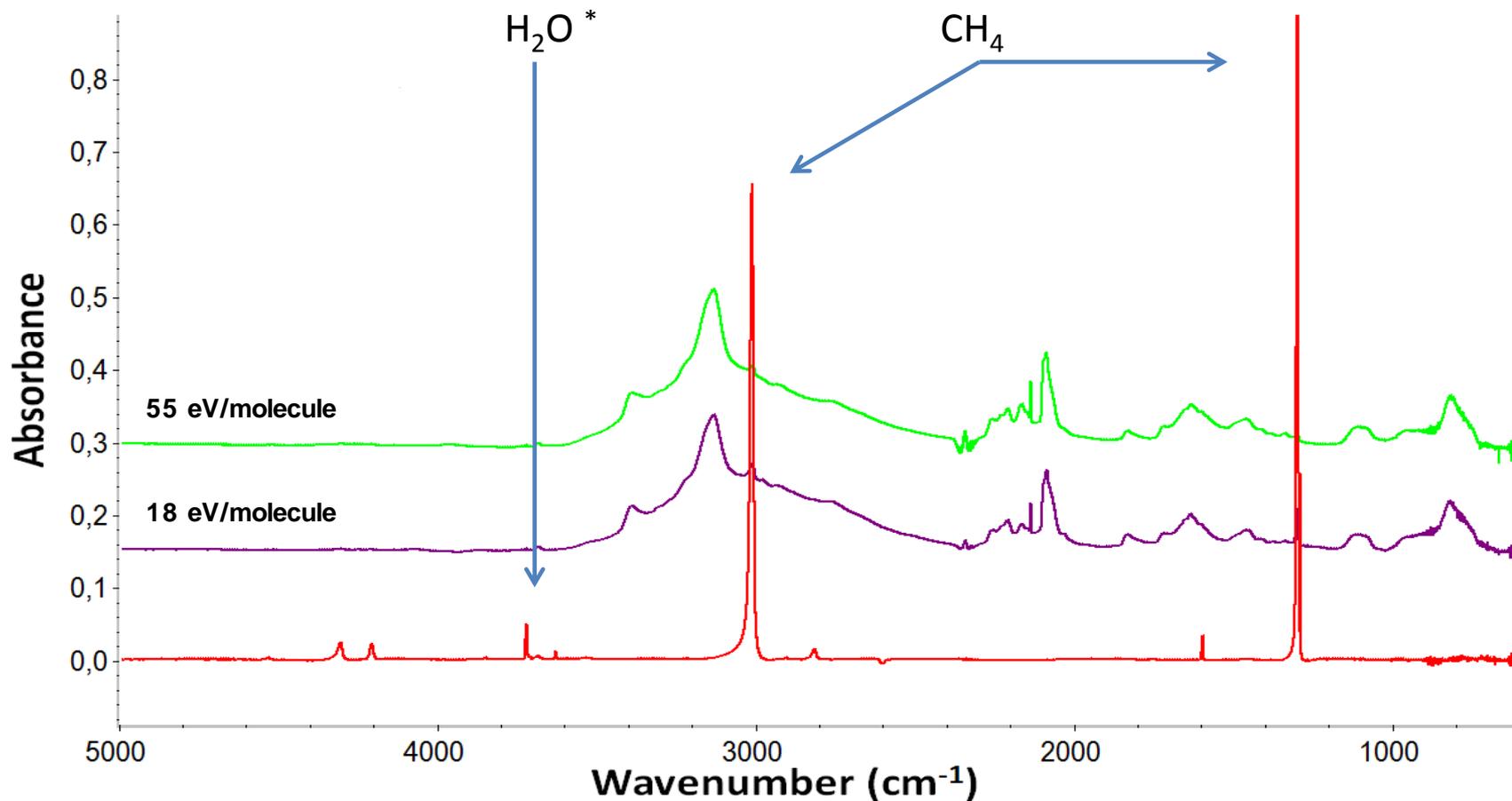
Dispositif expérimental



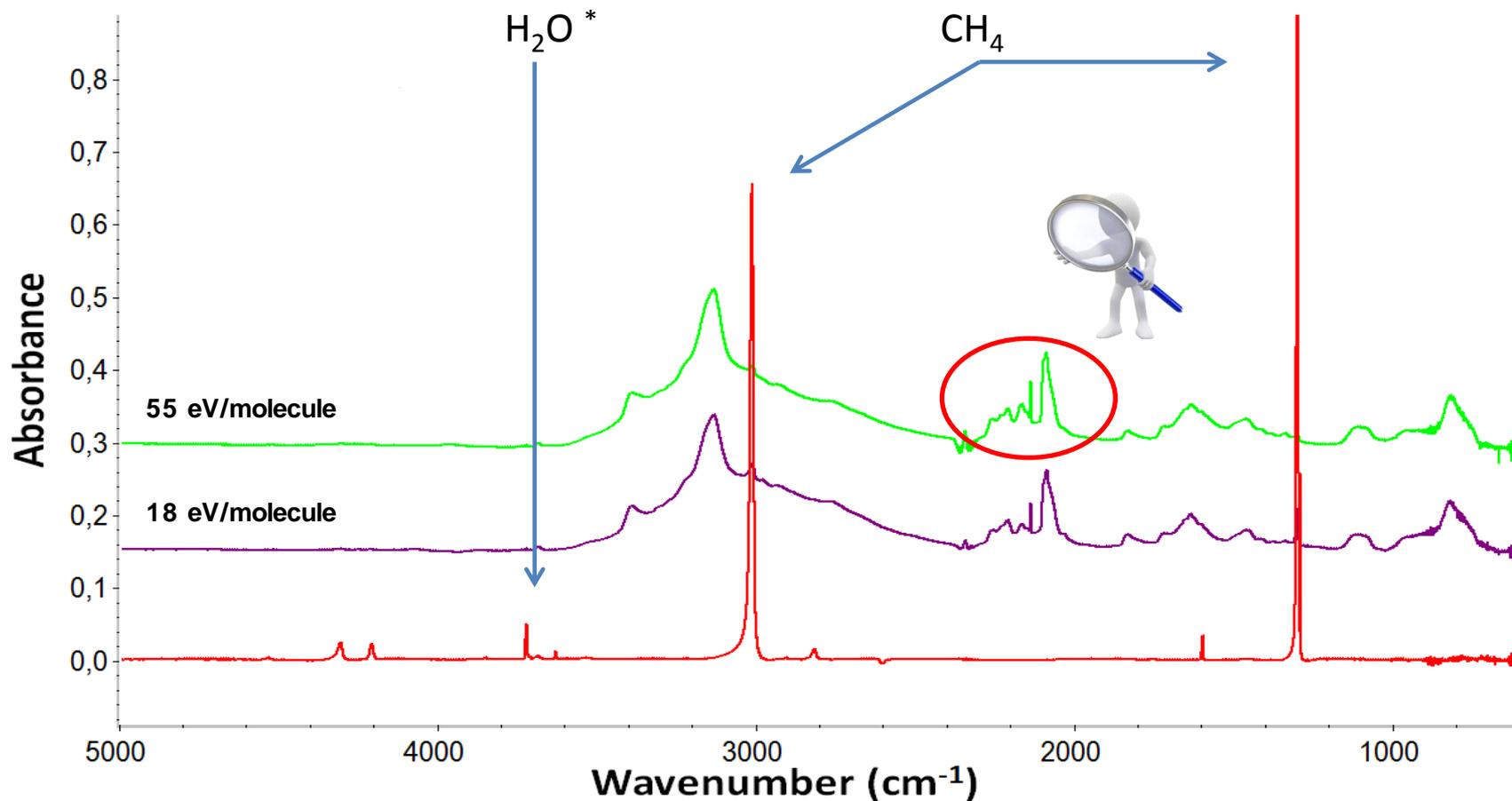
- 10^{-8} mbar
- 12 K



N₂-CH₄ (90:10), IRRSUD (Ni¹¹⁺, 44 MeV)

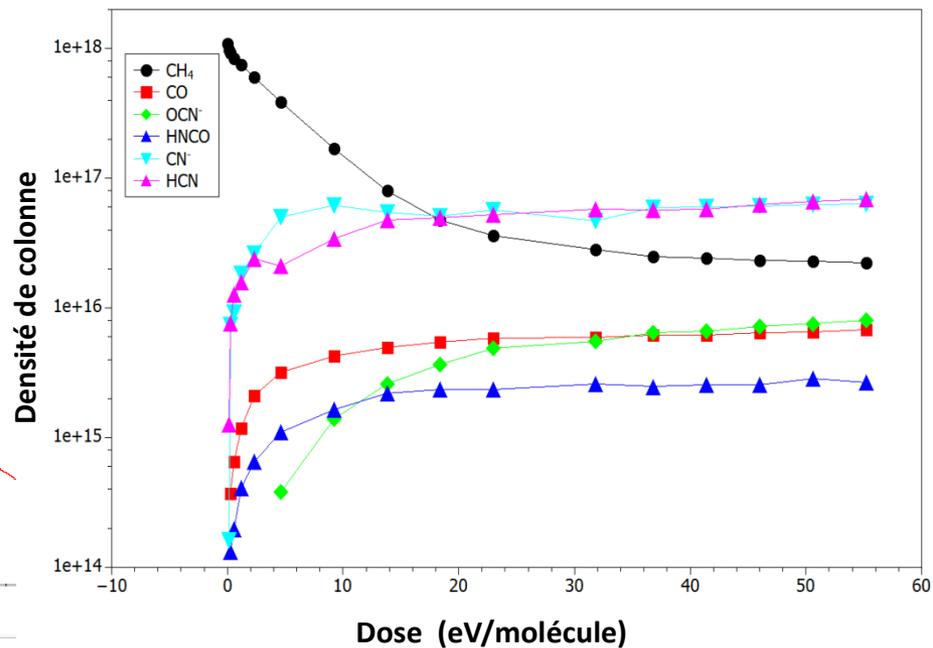
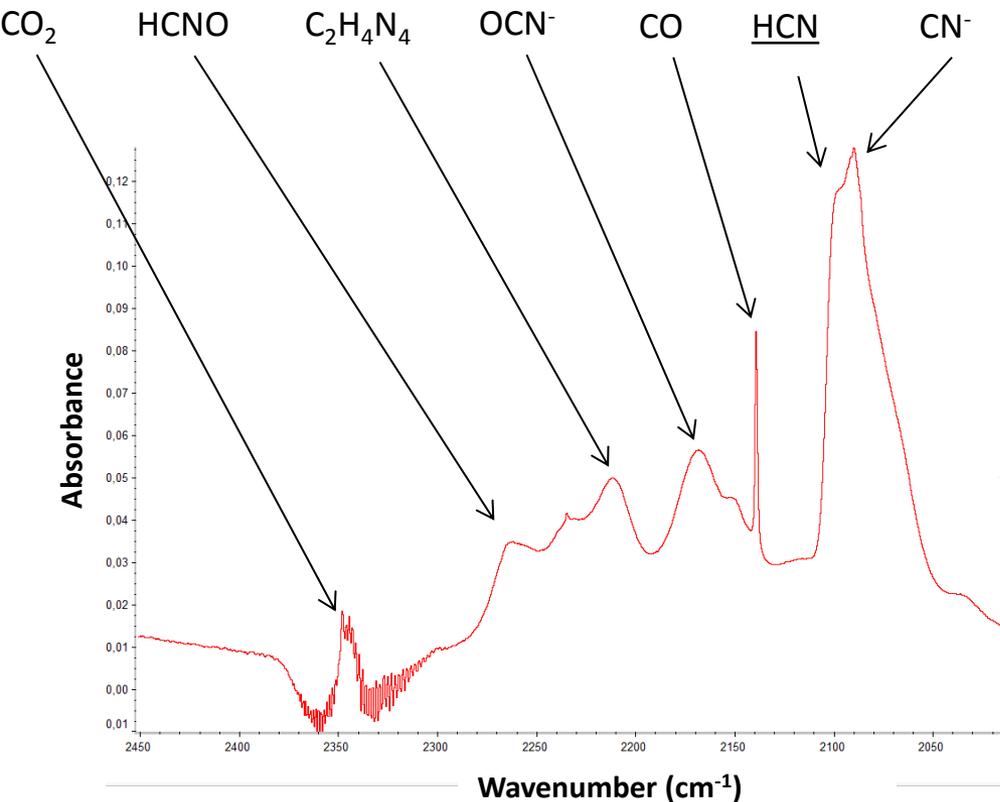


N₂-CH₄ (90:10), IRRSUD (Ni¹¹⁺, 44 MeV)

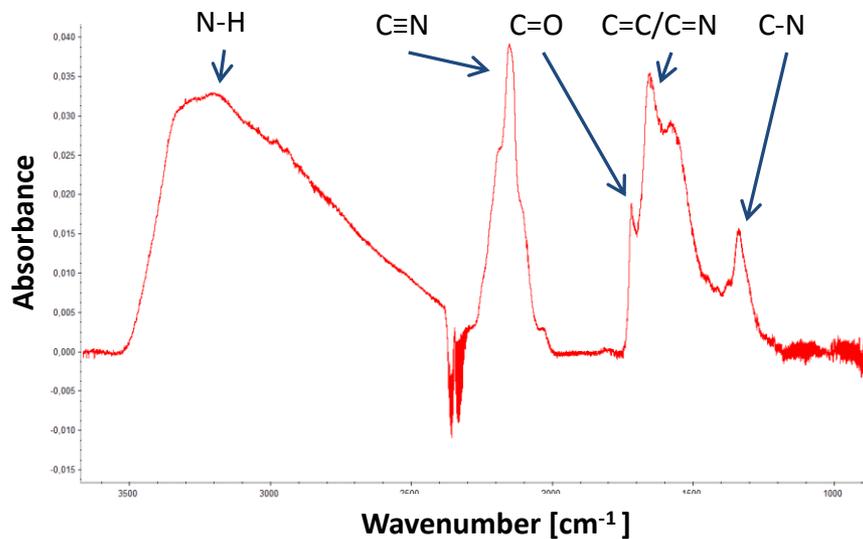
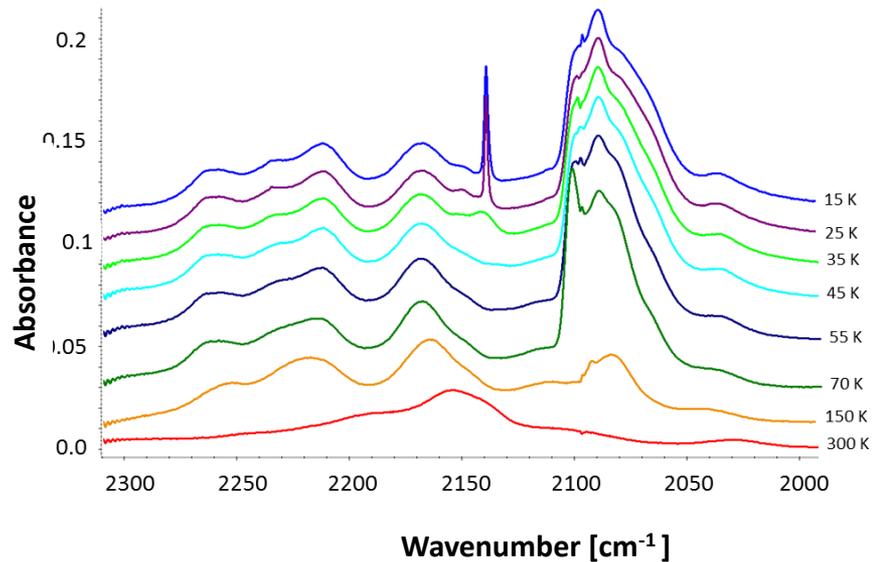
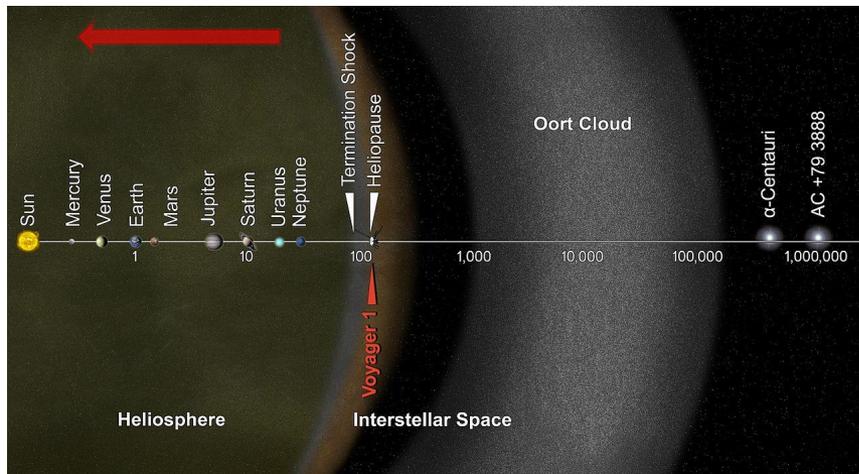




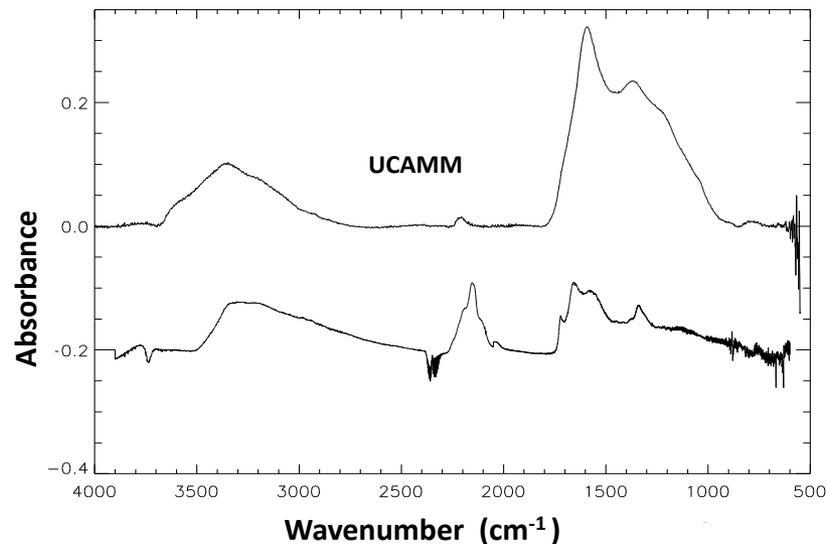
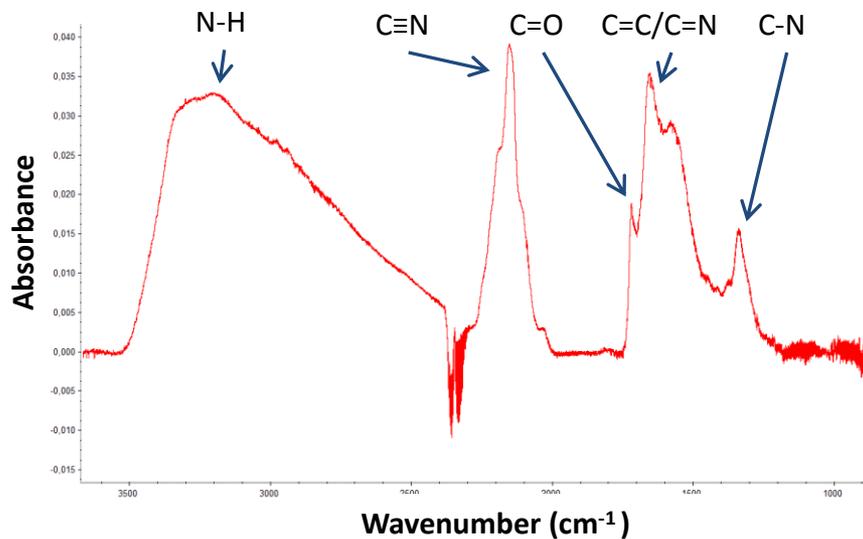
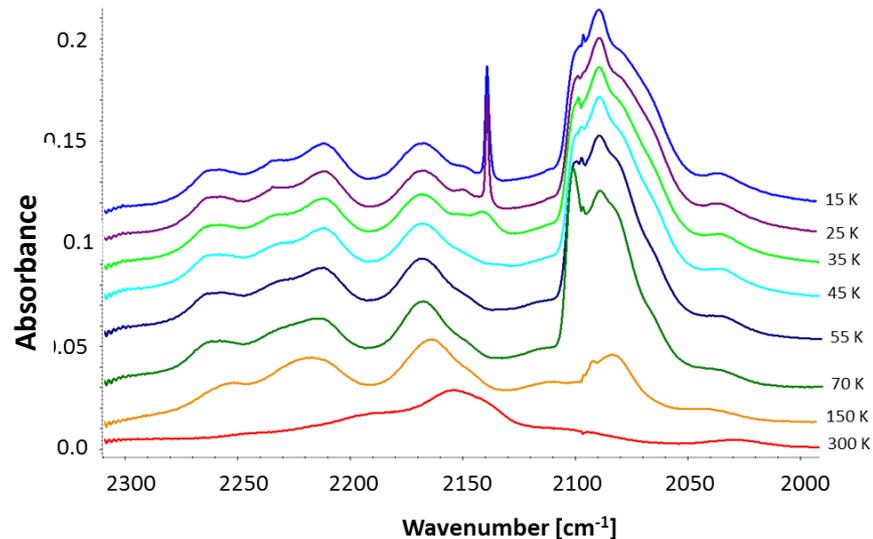
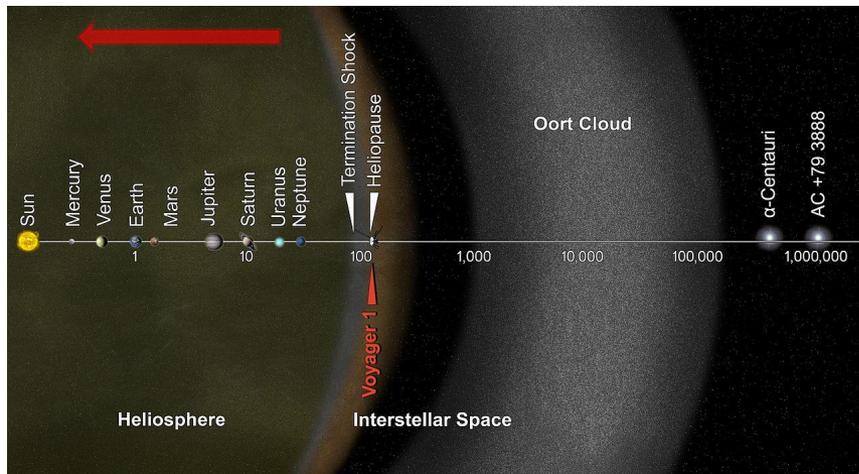
N₂-CH₄ (90:10), IRRSUD (Ni¹¹⁺, 44 MeV)



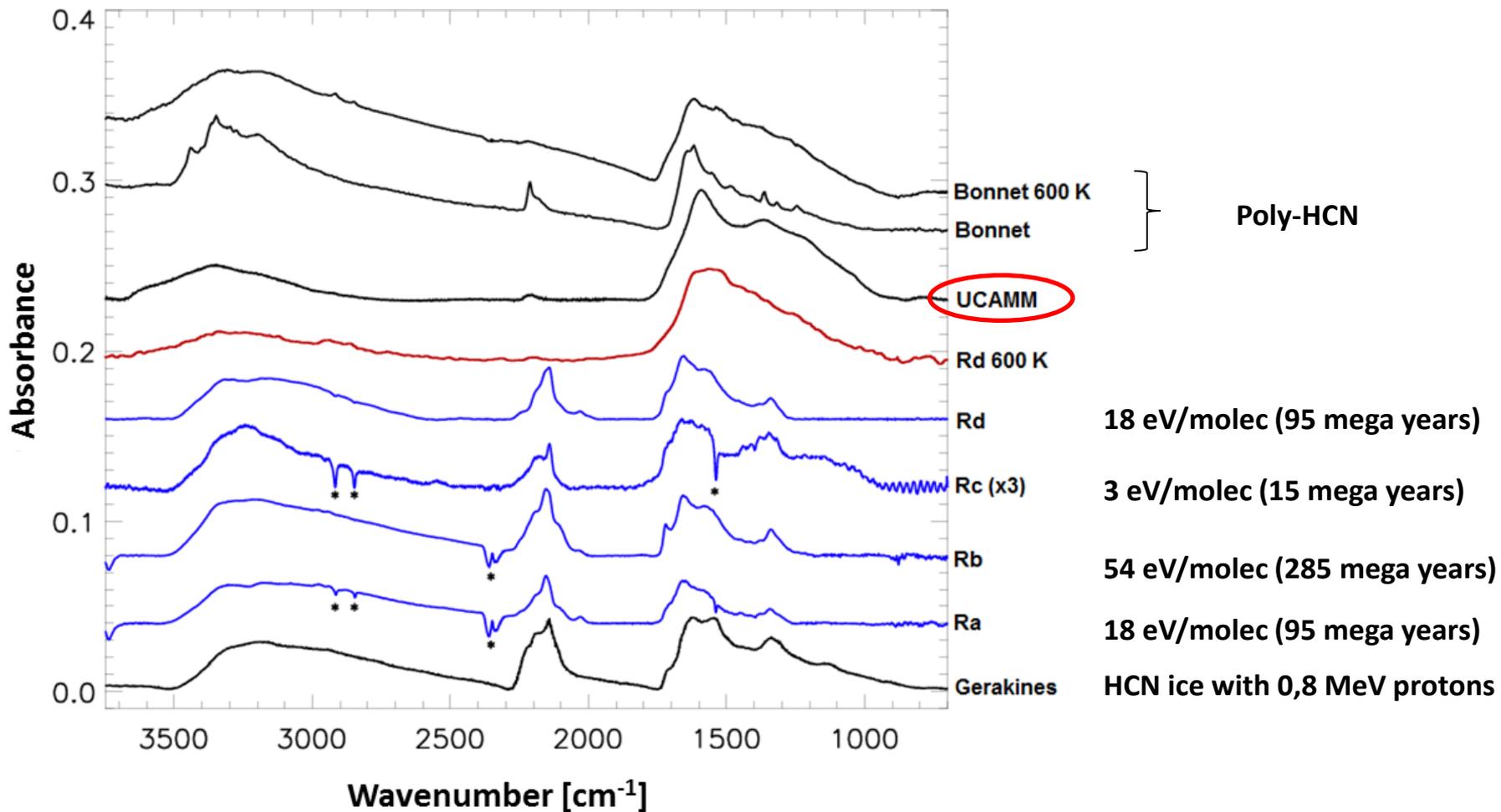
Recuit et obtention d'un résidu à 300 K



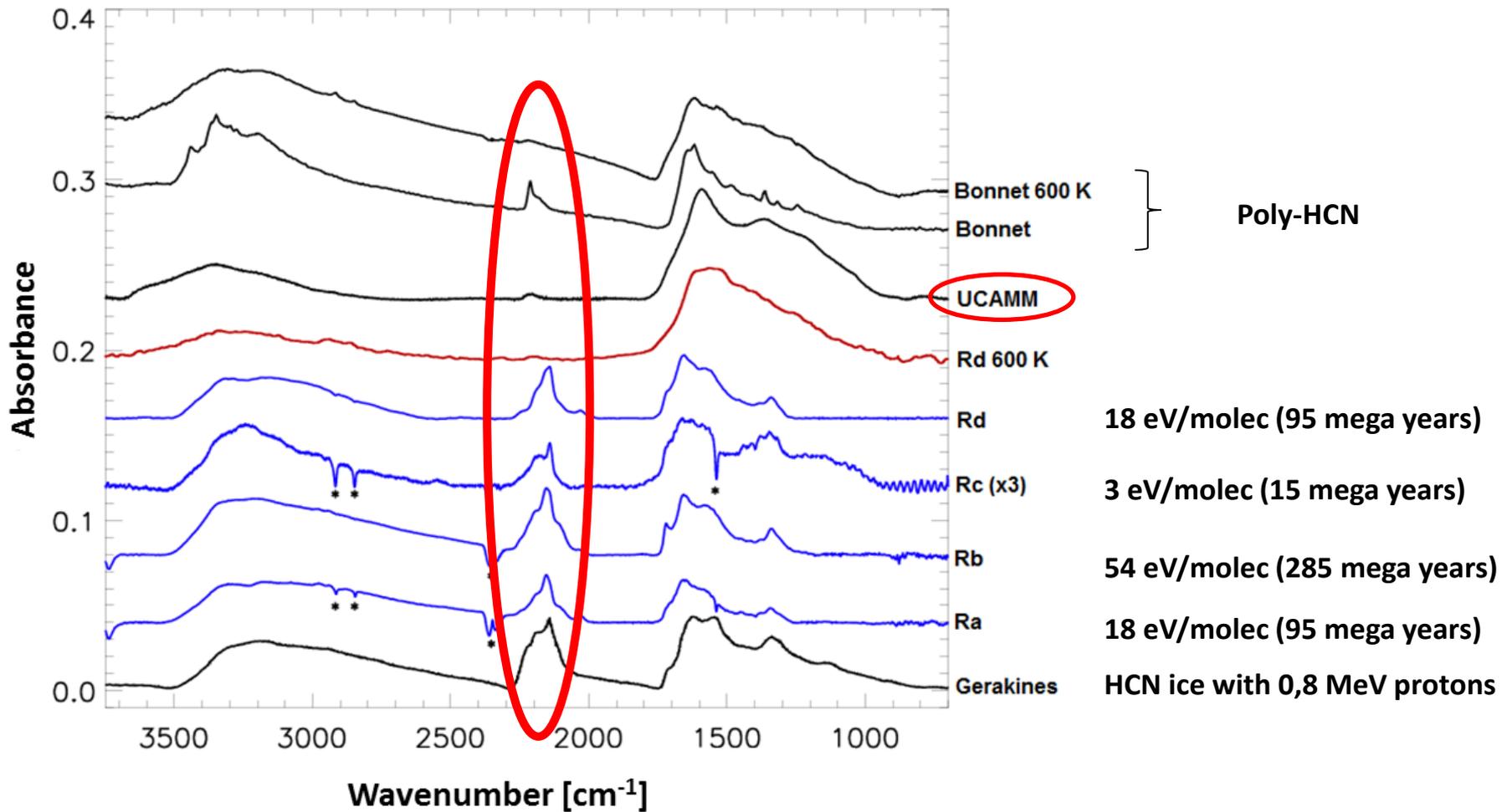
Recuit et obtention d'un résidu à 300 K



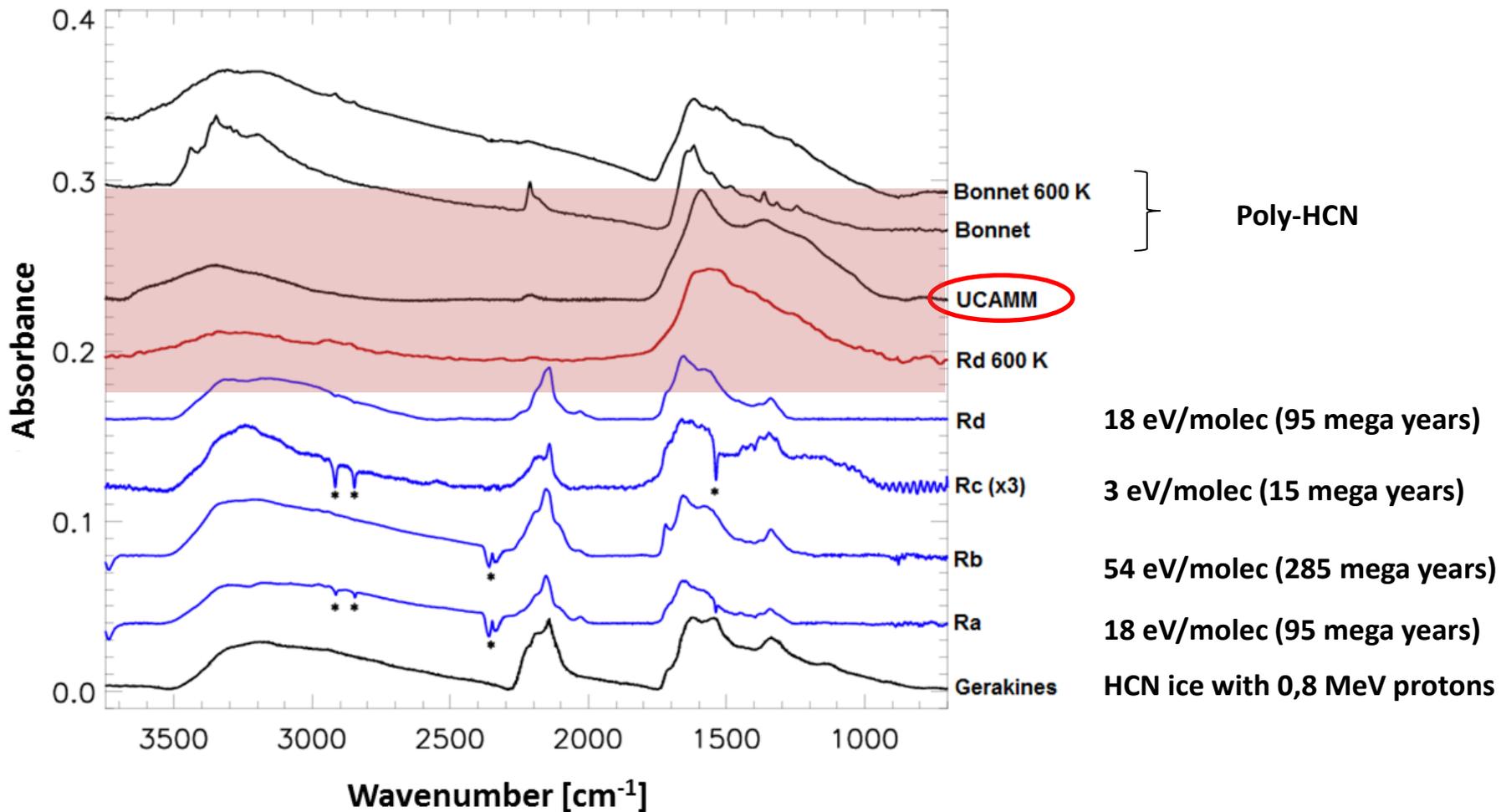
Résultats



Résultats



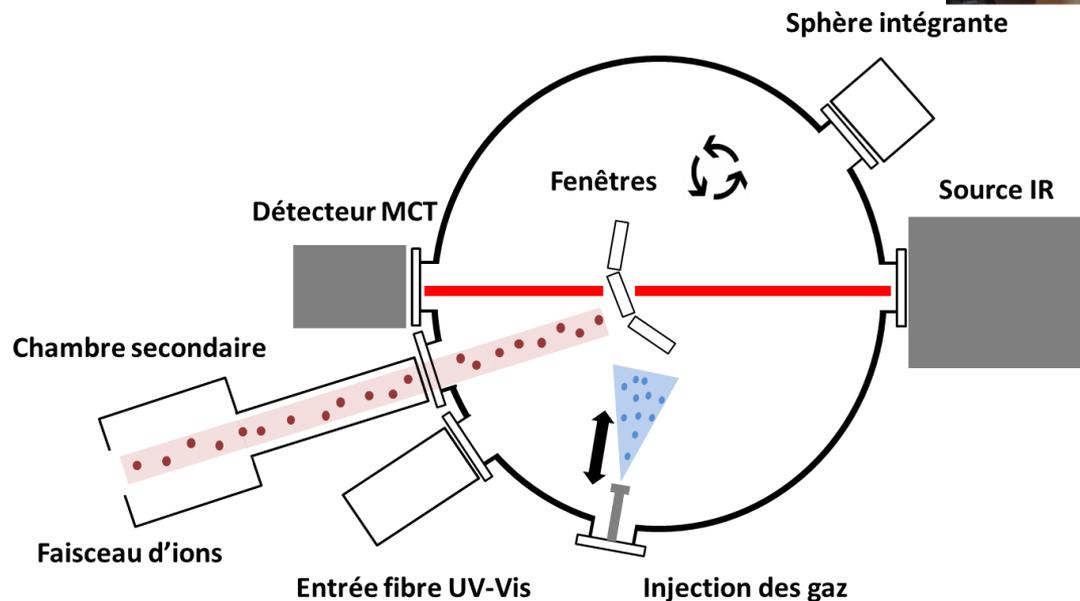
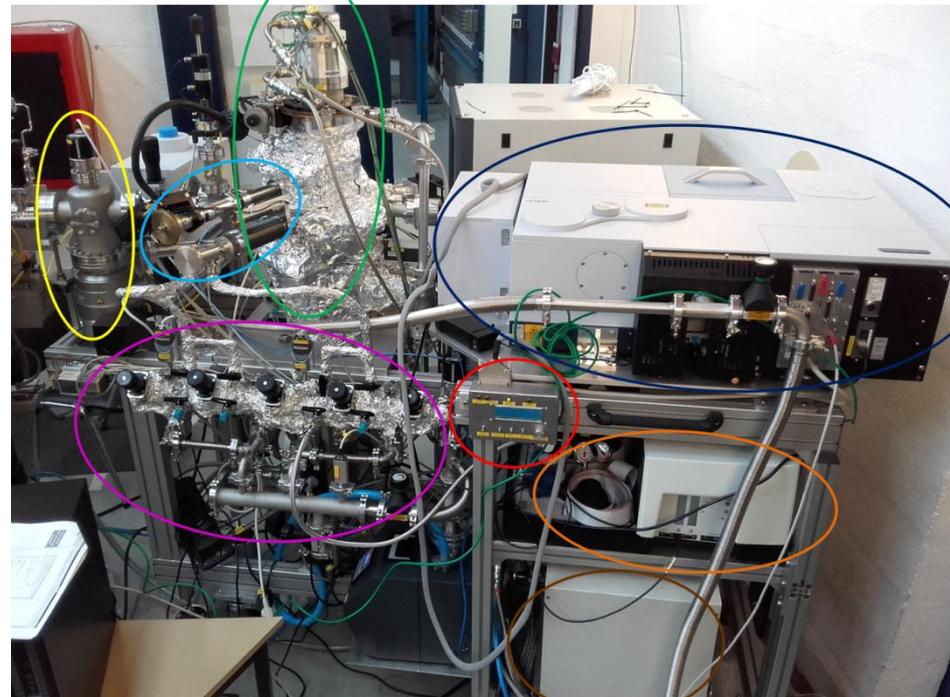
Résultats



Nouveau dispositif

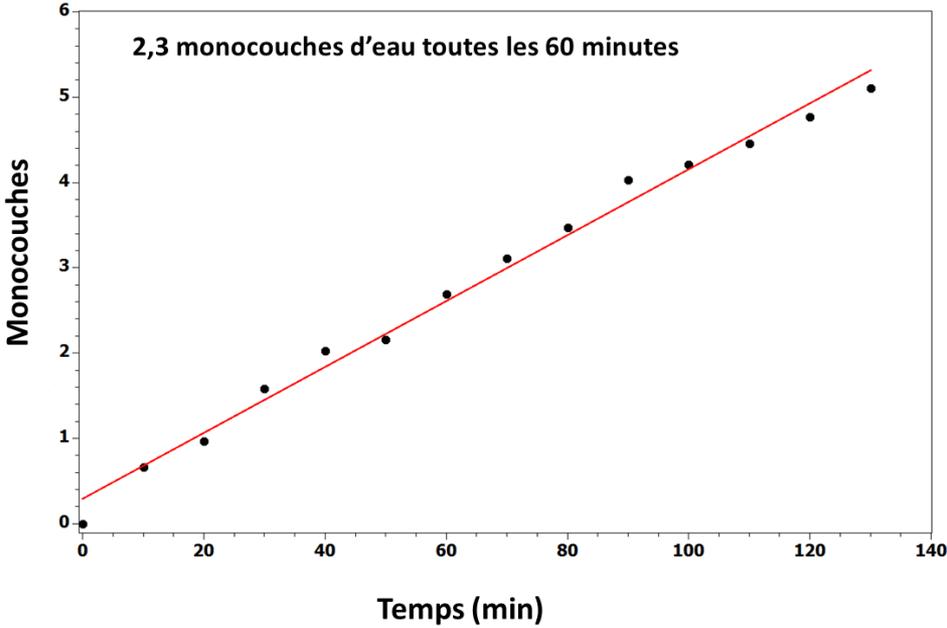
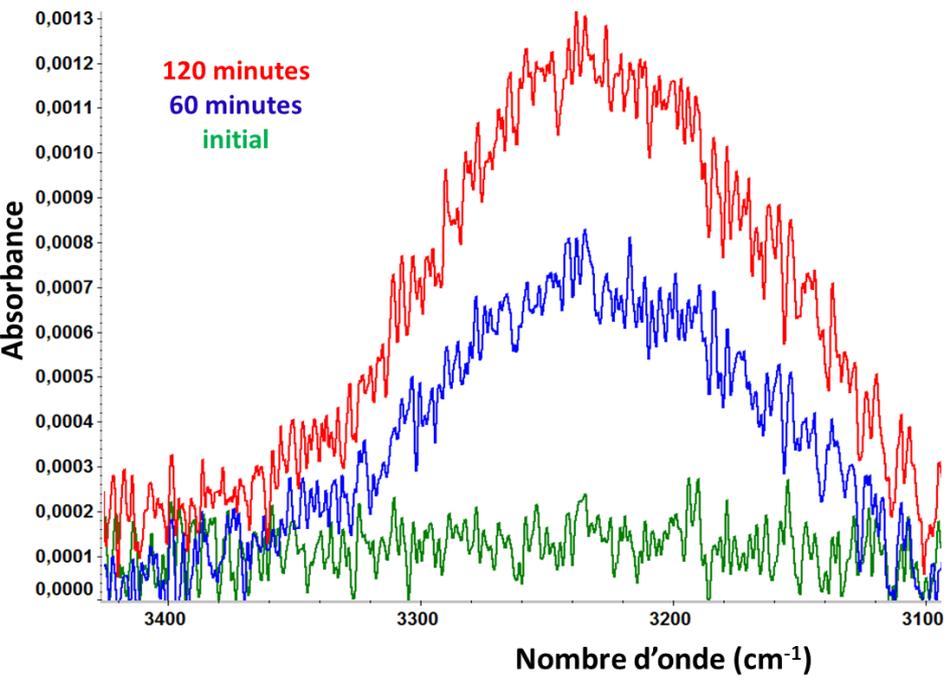
IGLIAS (Irradiation de Glaces d'Intérêt Astrophysique)

- $1,5 \cdot 10^{-10}$ mbar à 8K
- 3 fenêtres
- Spectromètre IR sous vide
- Spectromètre Vis-UV



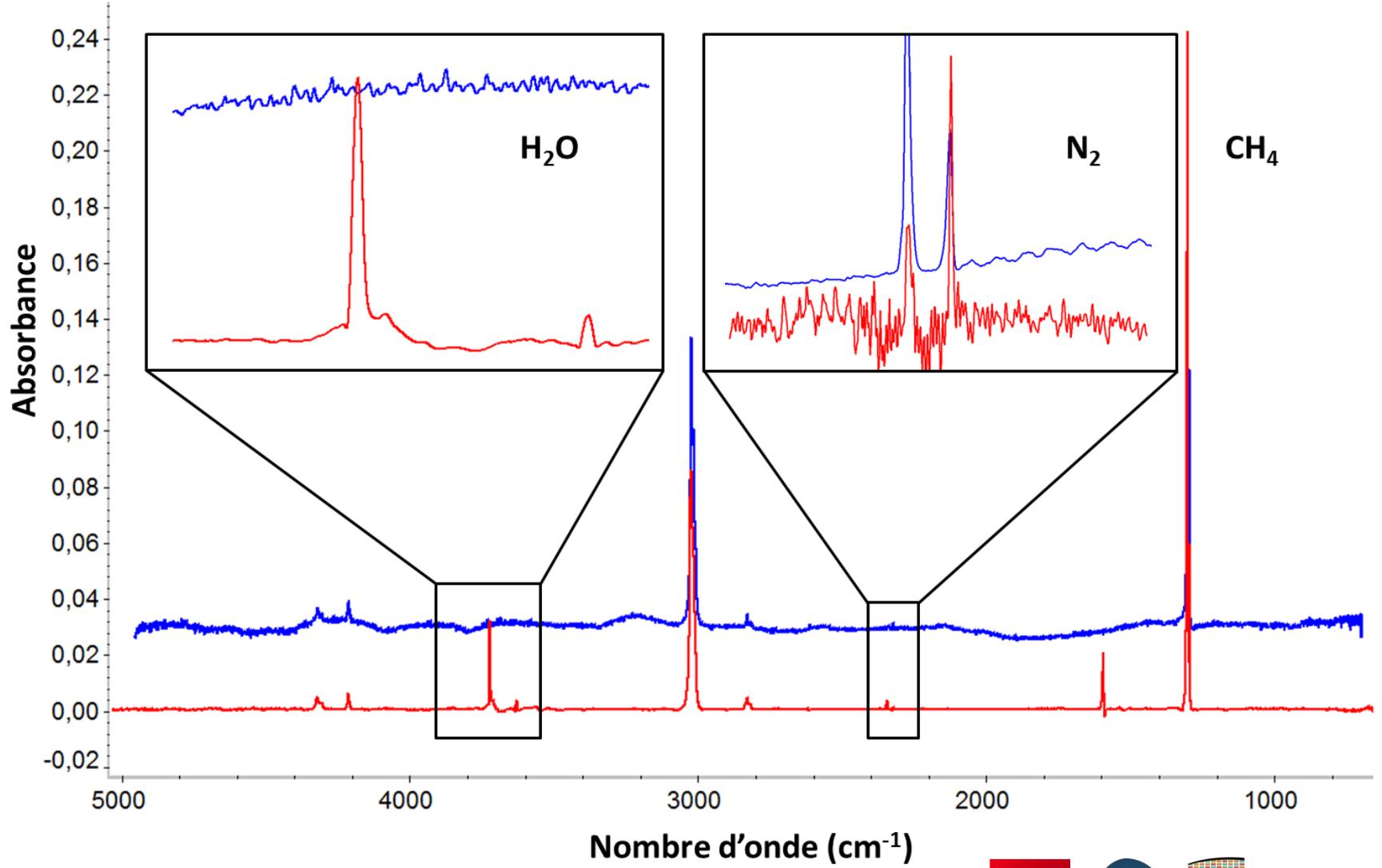


Condensation du gaz présent dans le vide résiduel



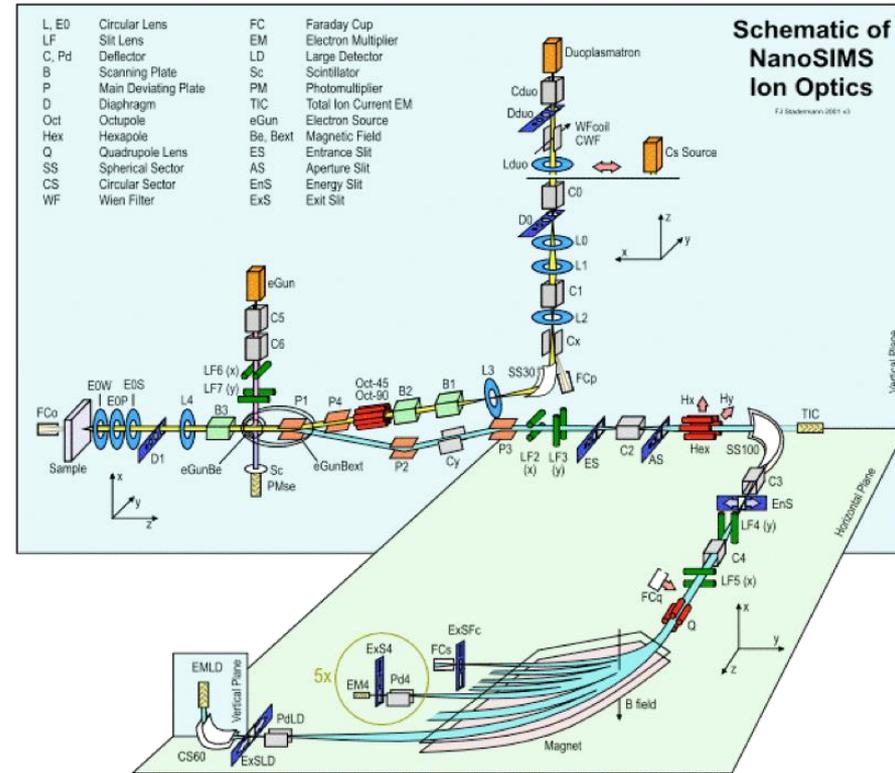


N₂-CH₄ (98:2) CASIMIR et IGLIAS



Perspectives

- Mesure de l'évolution des rapports isotopiques D/H et $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ suite à une irradiation
- Mélange $\text{N}_2\text{-CH}_4/\text{CD}_4/\text{N}_2\text{-CH}_4$ pour comprendre l'origine de l'enrichissement en D/H observé dans les UCAMMs (expériences faites il y a une semaine...)
- Prochaine campagne de collecte à Concordia
- Dernières expériences il y a une semaine, production de 3 résidus...

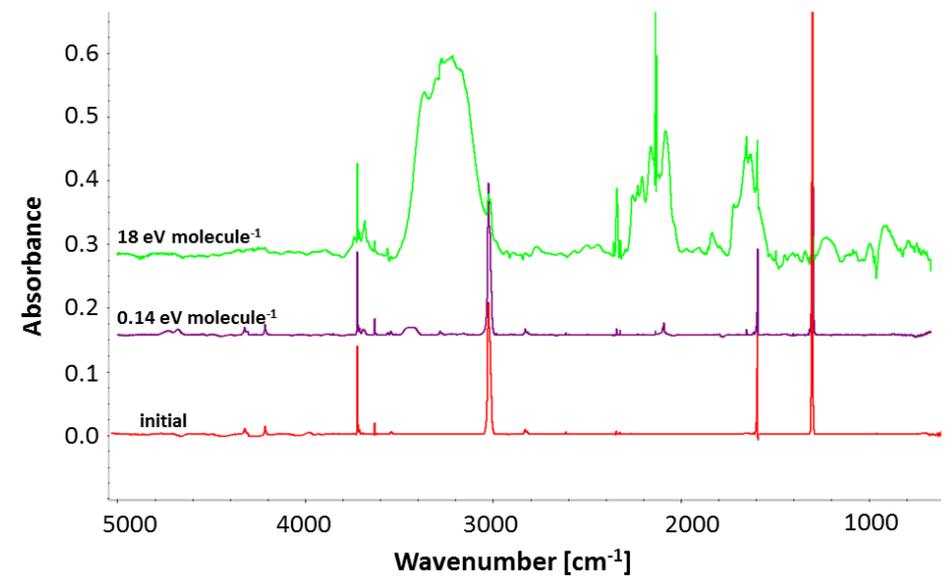
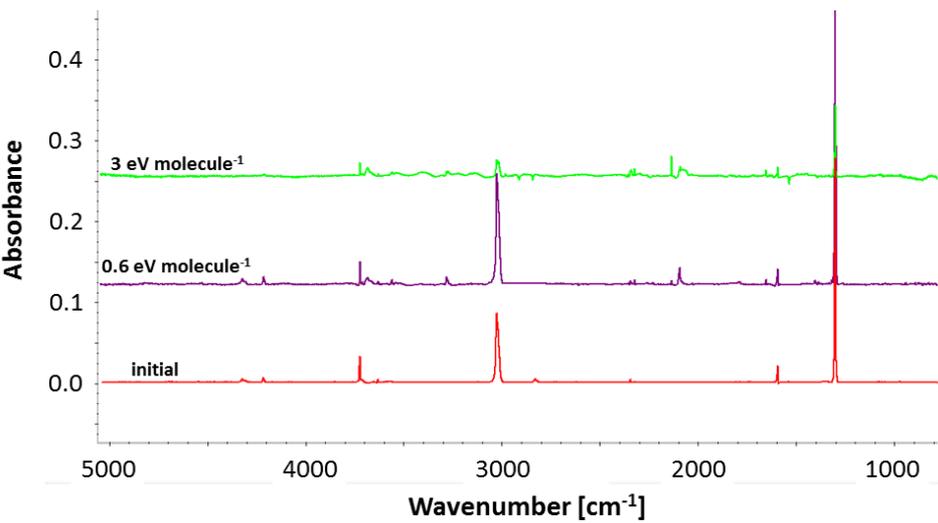
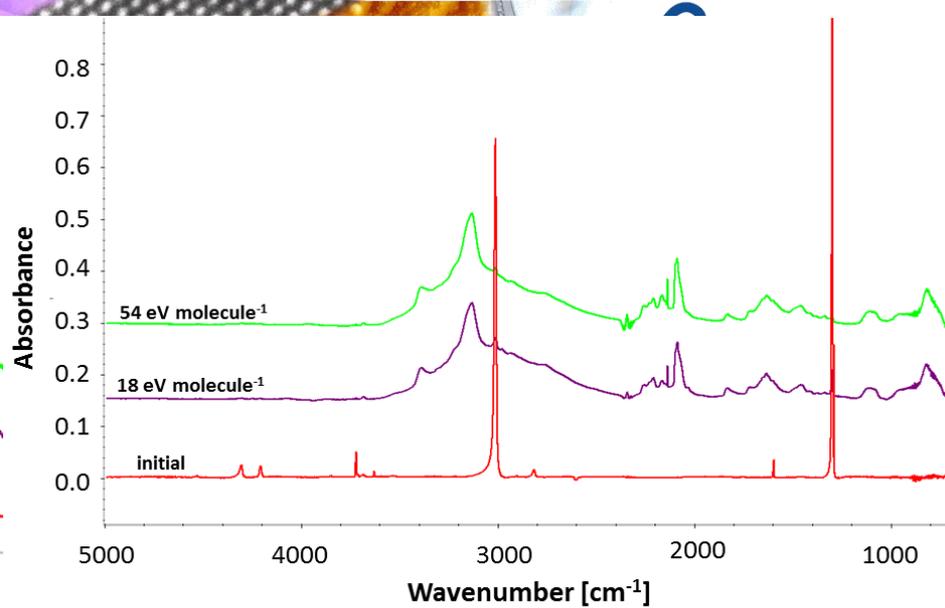
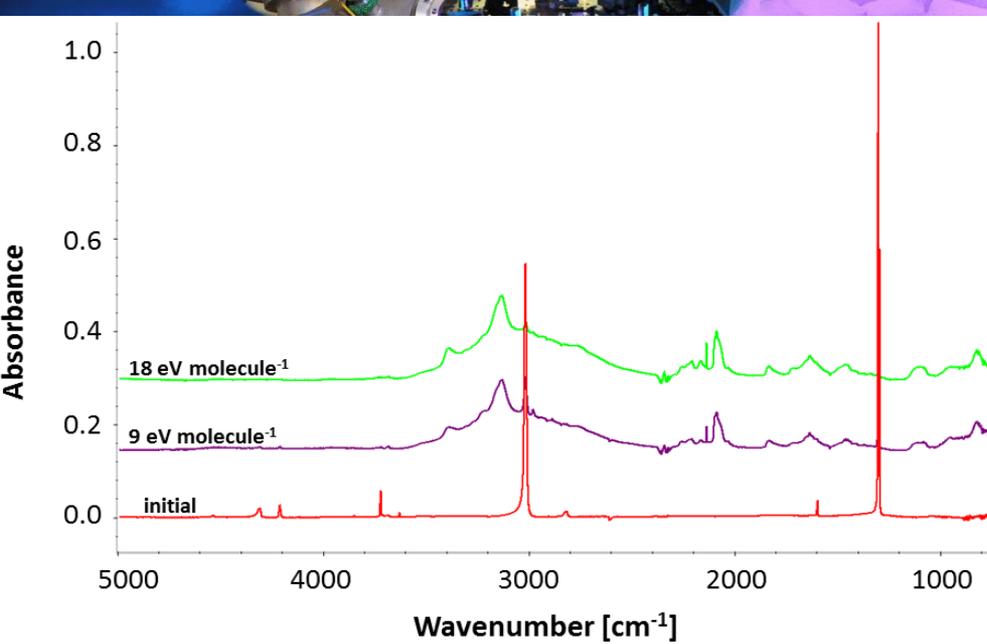


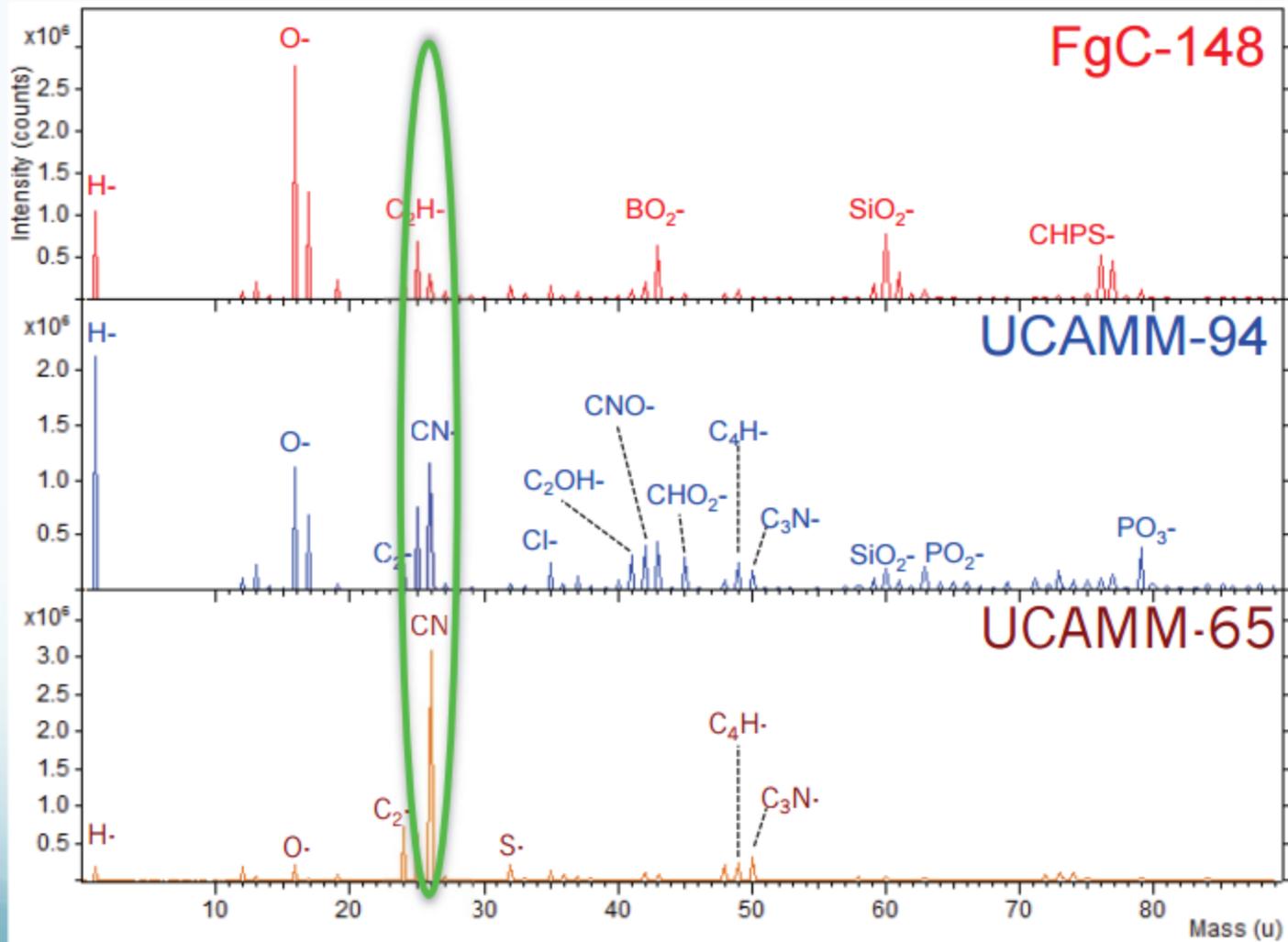
Conclusion

- Les ions lourds ont une action radiochimique efficace sur les glaces N_2-CH_4
 - Les résidus présentent des similarités frappantes avec les UCAMMs
 - Pas de contrainte temporelle sur le temps d'exposition au GCR dans le nuage de Oort
 - **Un précurseur à la matière organique des UCAMMs pourrait être un polymère de HCN**
-
- Les premiers résultats sans contamination par des molécules d'eau obtenus avec IGLIAS sont cohérents avec les précédents
 - Prochaine étape : compréhension de l'enrichissement isotopique



Merci pour votre attention !

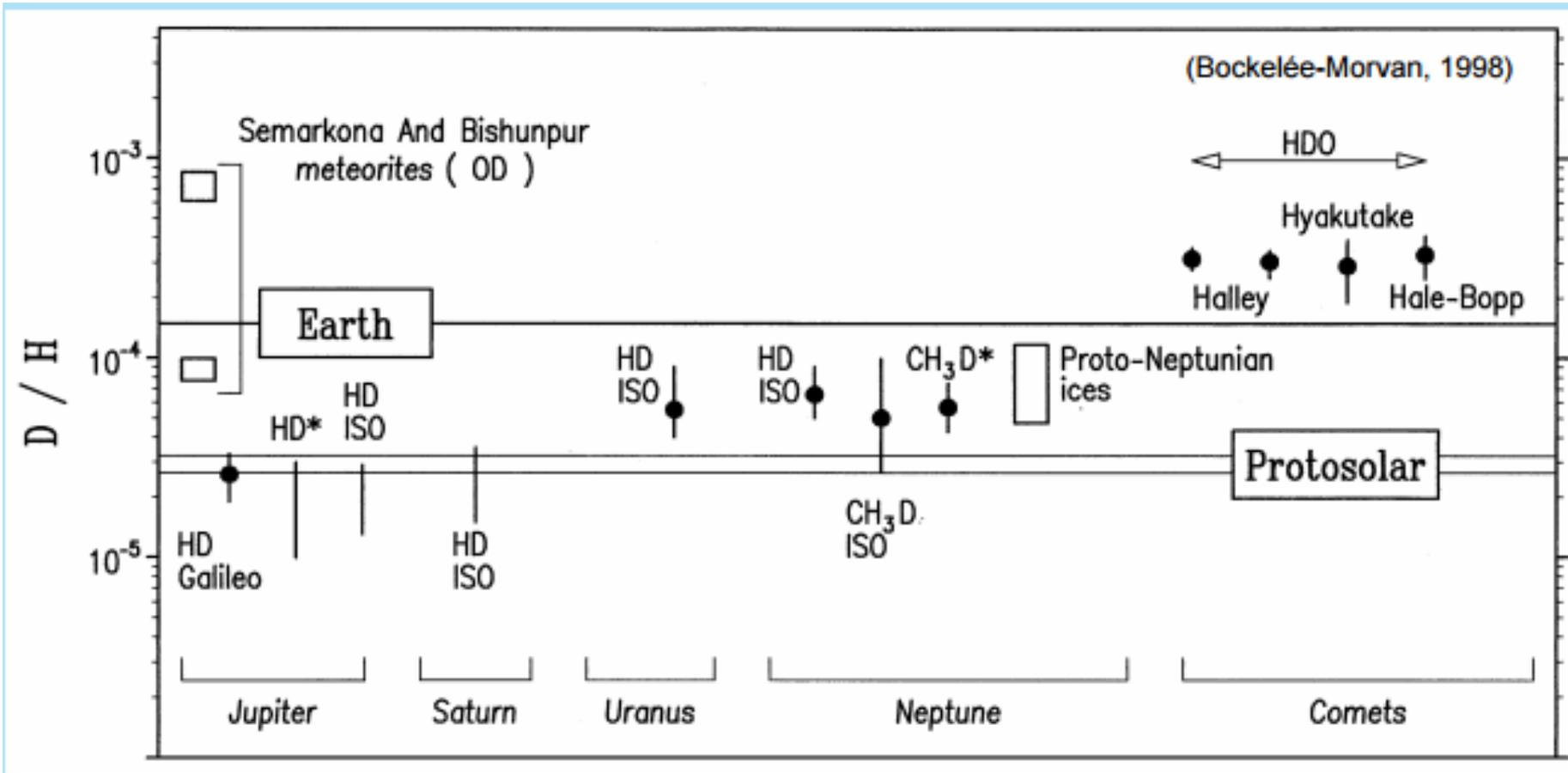


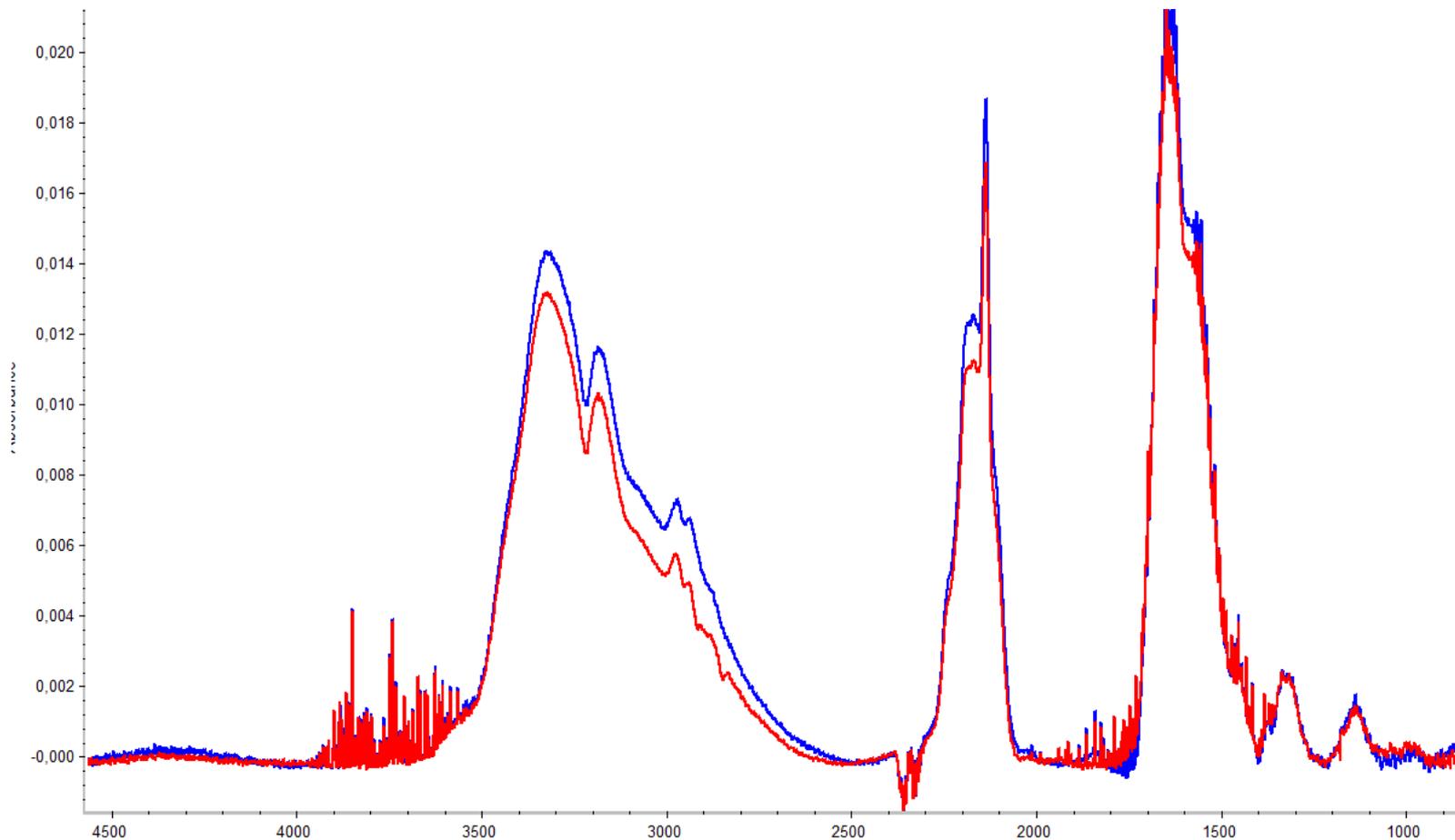


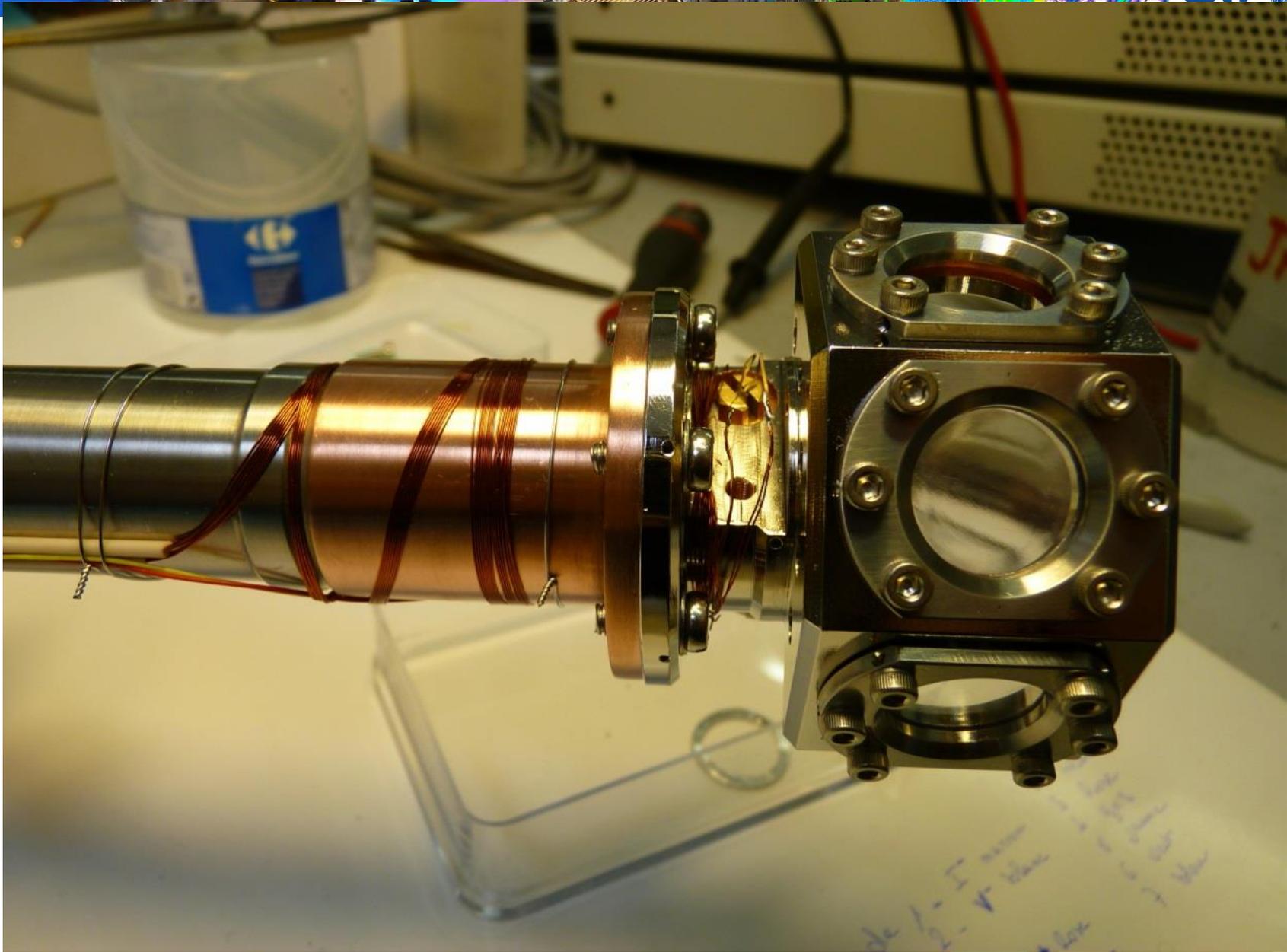
AMM

UCAMM

UCAMM

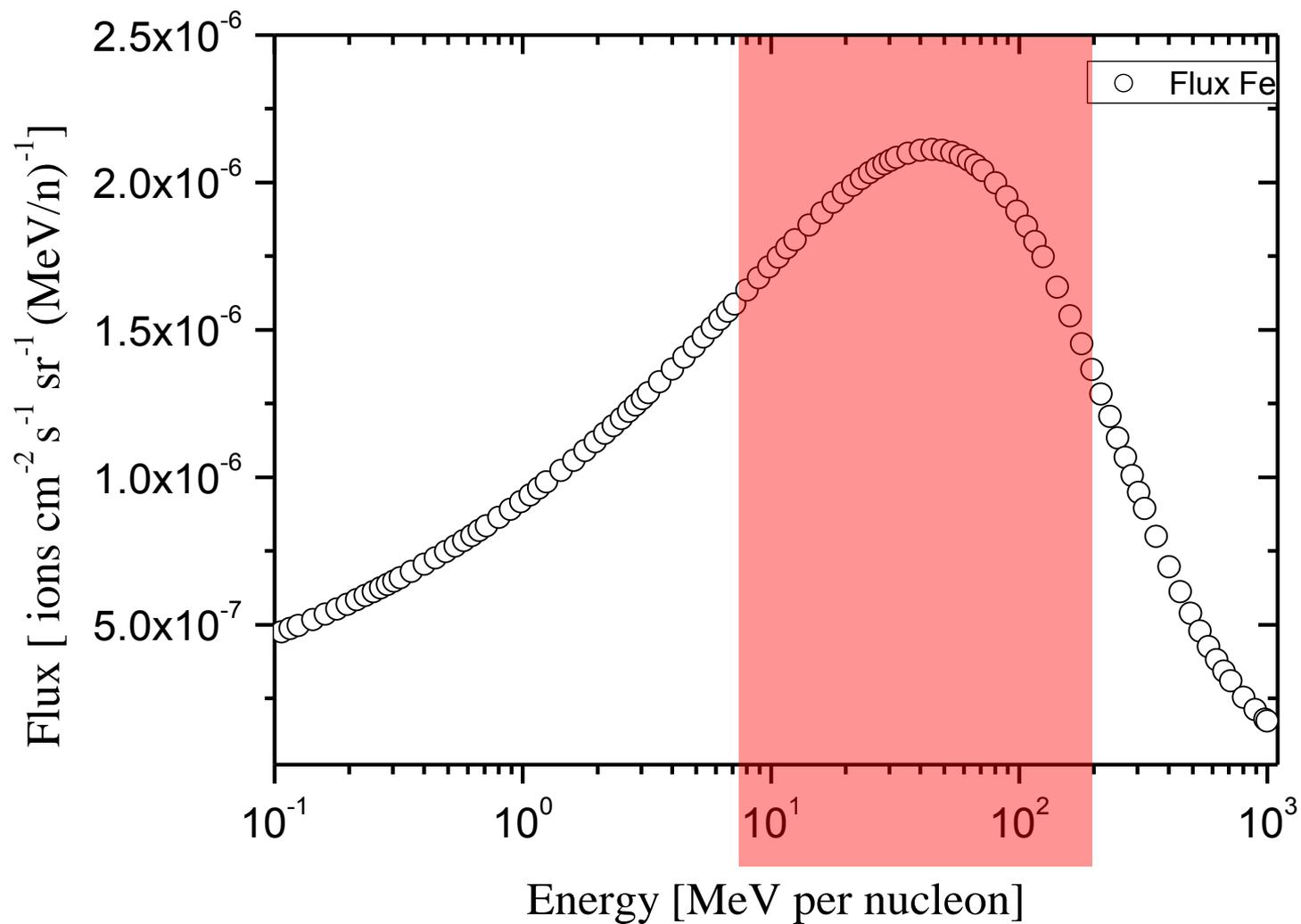


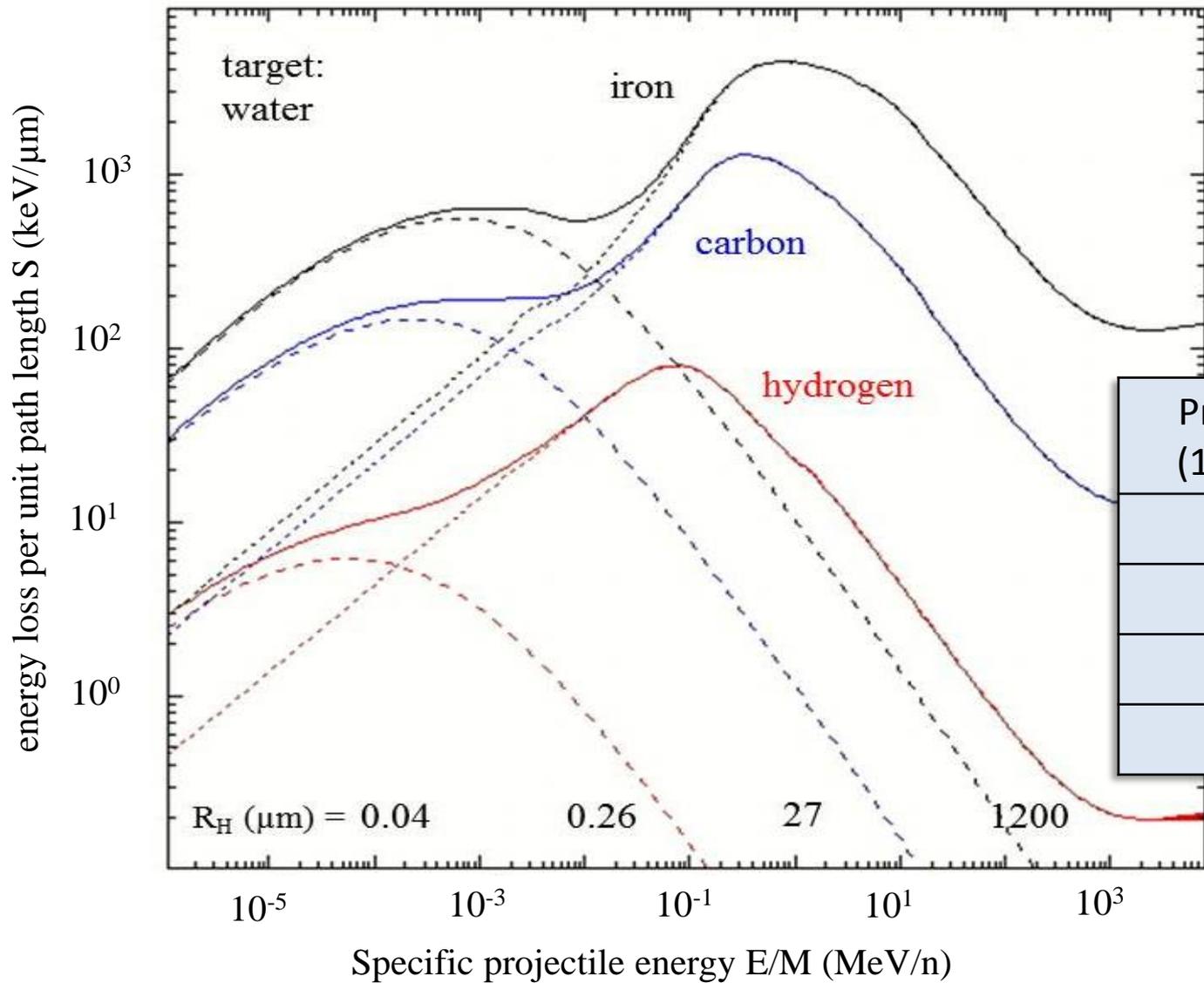




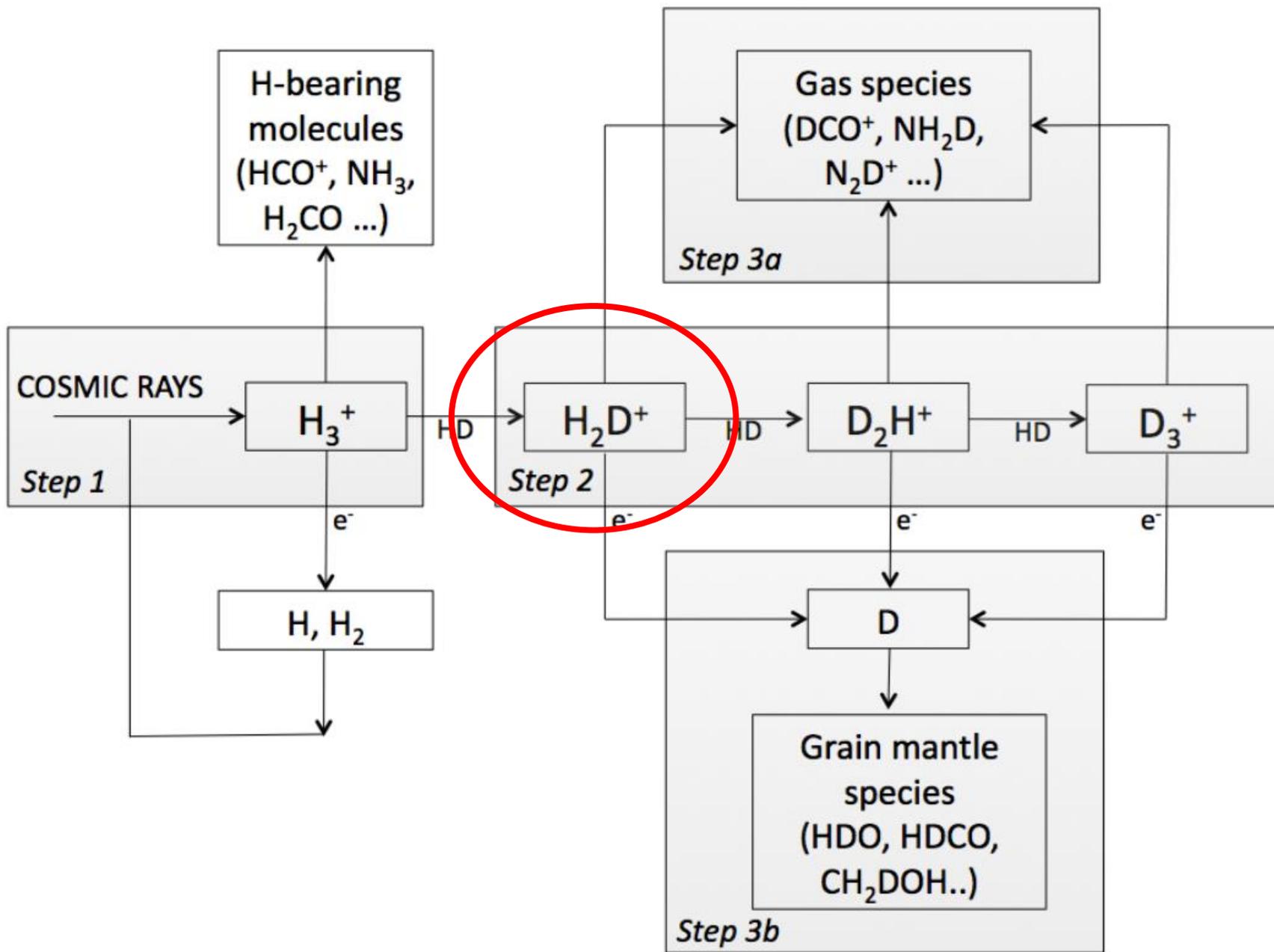
A satellite map of the Concordia Antarctic base, showing a large red boundary around the base area. The base is labeled "Base antarctique Concordia". The map shows a snowy landscape with various structures and equipment. A large, dark, irregularly shaped area is visible within the red boundary, likely representing a large structure or a significant feature of the base. The surrounding terrain is mostly flat and covered in snow, with some faint lines and structures visible in the distance.

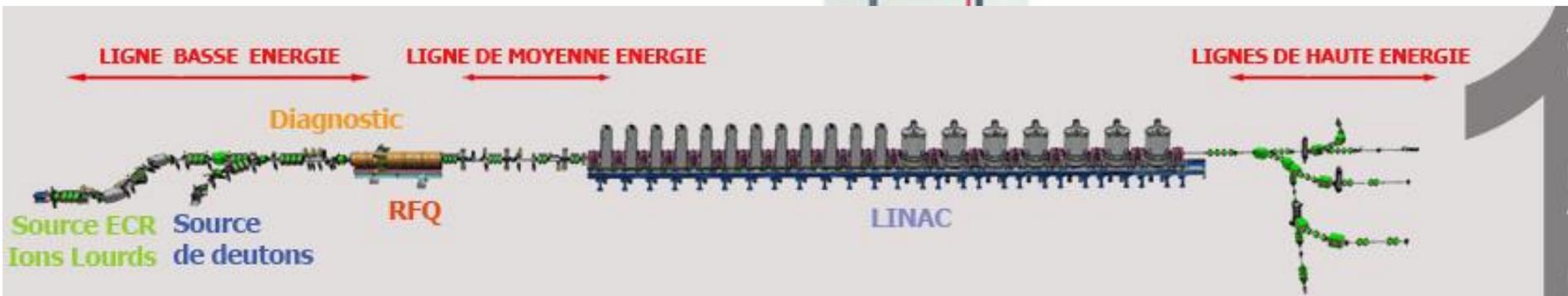
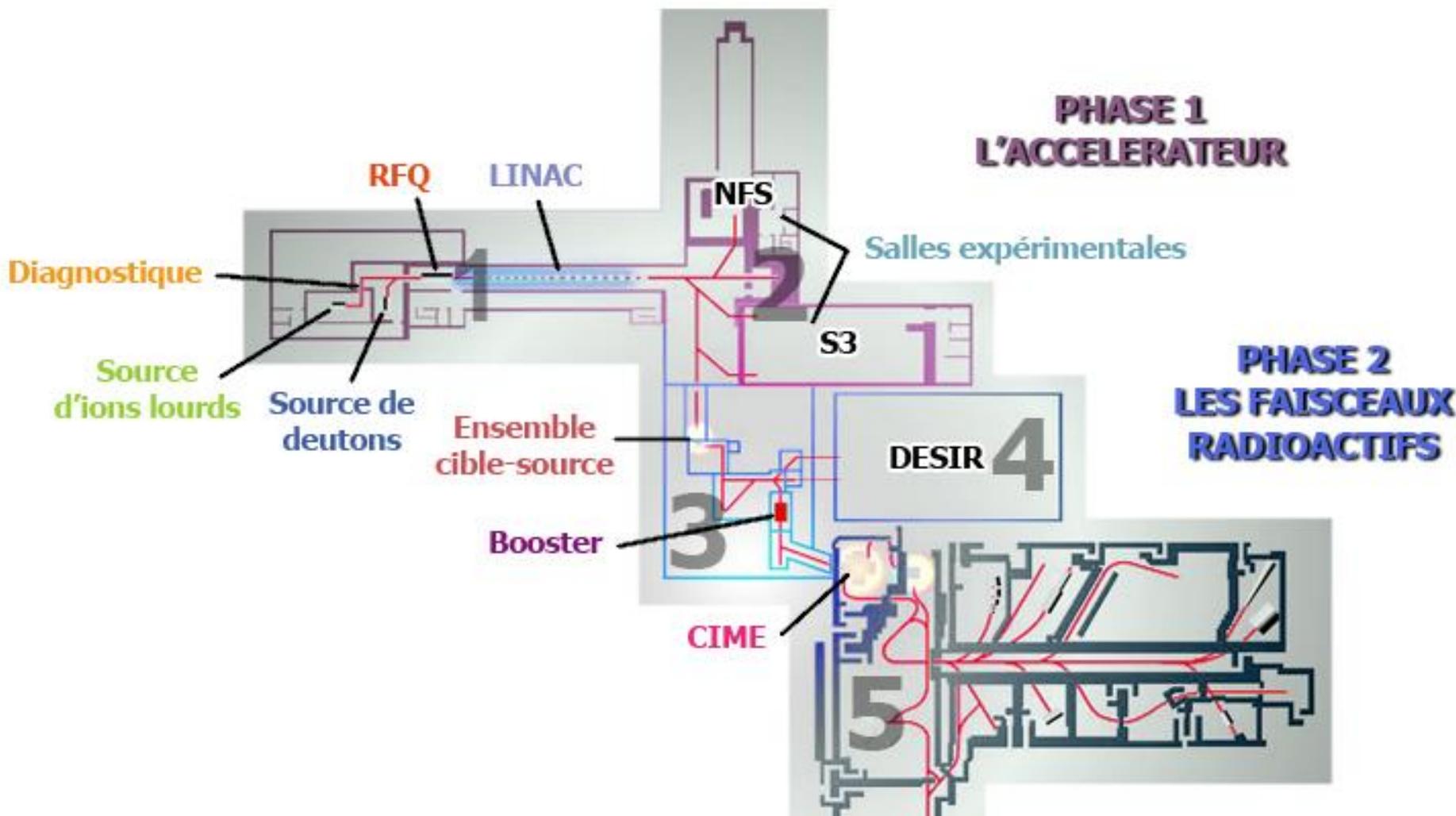
Base
antarctique
Concordia





Projectile (1MeV/n)	Se (keV μm^{-1})
H	2.5×10^1
C	7.4×10^2
Fe	4.7×10^3
U	1.4×10^4





ACCÉLÉRATEUR D'IONS LOURDS

