

# Sonder l'intimité des objets du passé grâce à l'accélérateur de particules du Louvre AGLAE



**Didier GOURIER**

*Institut de Recherche de Chimie-Paris (IRCP)*

et

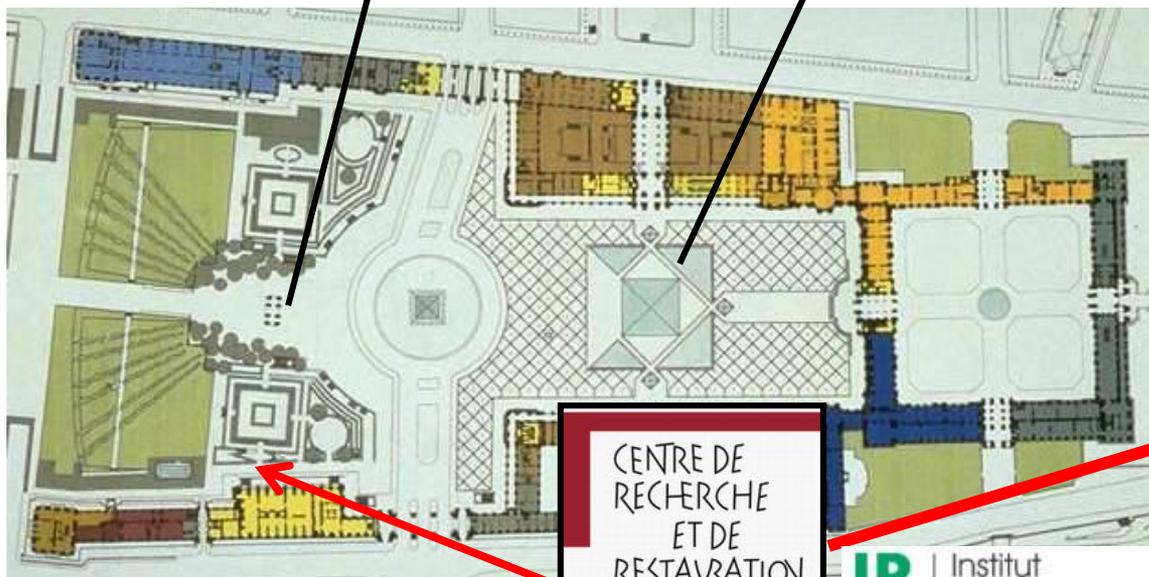
*Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France (C2RMF)*



# Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France



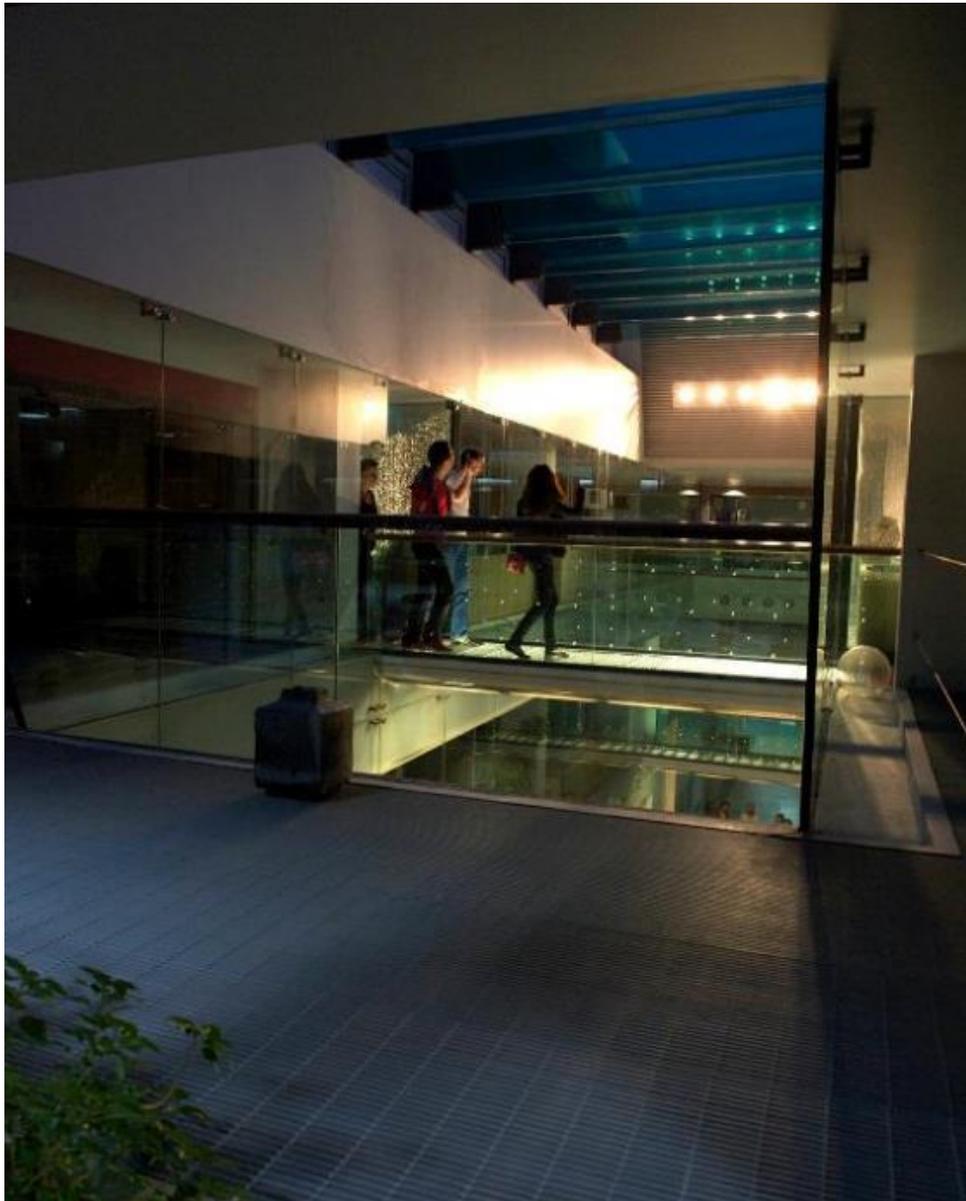
ParisTech



CENTRE DE RECHERCHE ET DE RESTAURATION DES MUSÉES DE FRANCE



# Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France



# Le C2RMF : 4 départements



Recherche

Restauration



Conservation  
préventive

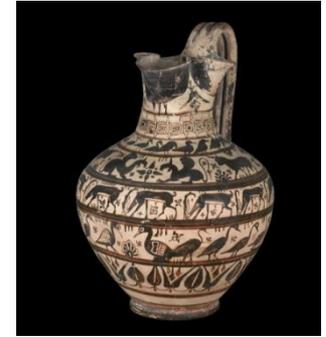


Documentation ,  
archives et nouvelles  
technologies de  
l'information



# Quelques questions posées aux sciences du patrimoine

- Comment l'objet a été réalisé ?
- D'où viennent les matériaux d'origine ?
- Comprendre la dégradation pour pouvoir la stopper
- De quand date l'objet ?
- Détecter les faux



Tête bleue Egyptienne, ©Musée du Louvre.



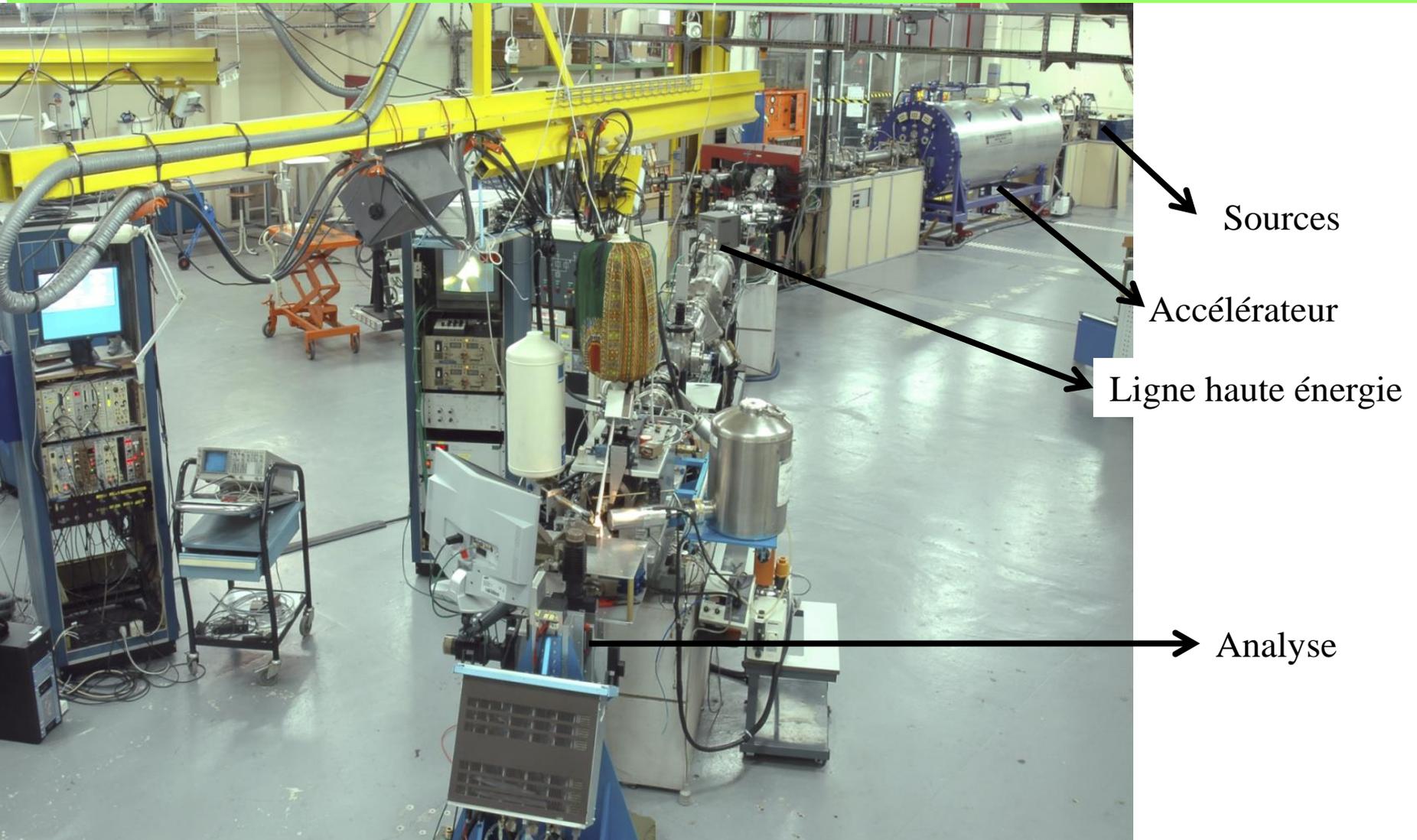
©C2RMF

*Sainte Anne*, Léonard de Vinci (1510)  
Musée du Louvre, Paris, France

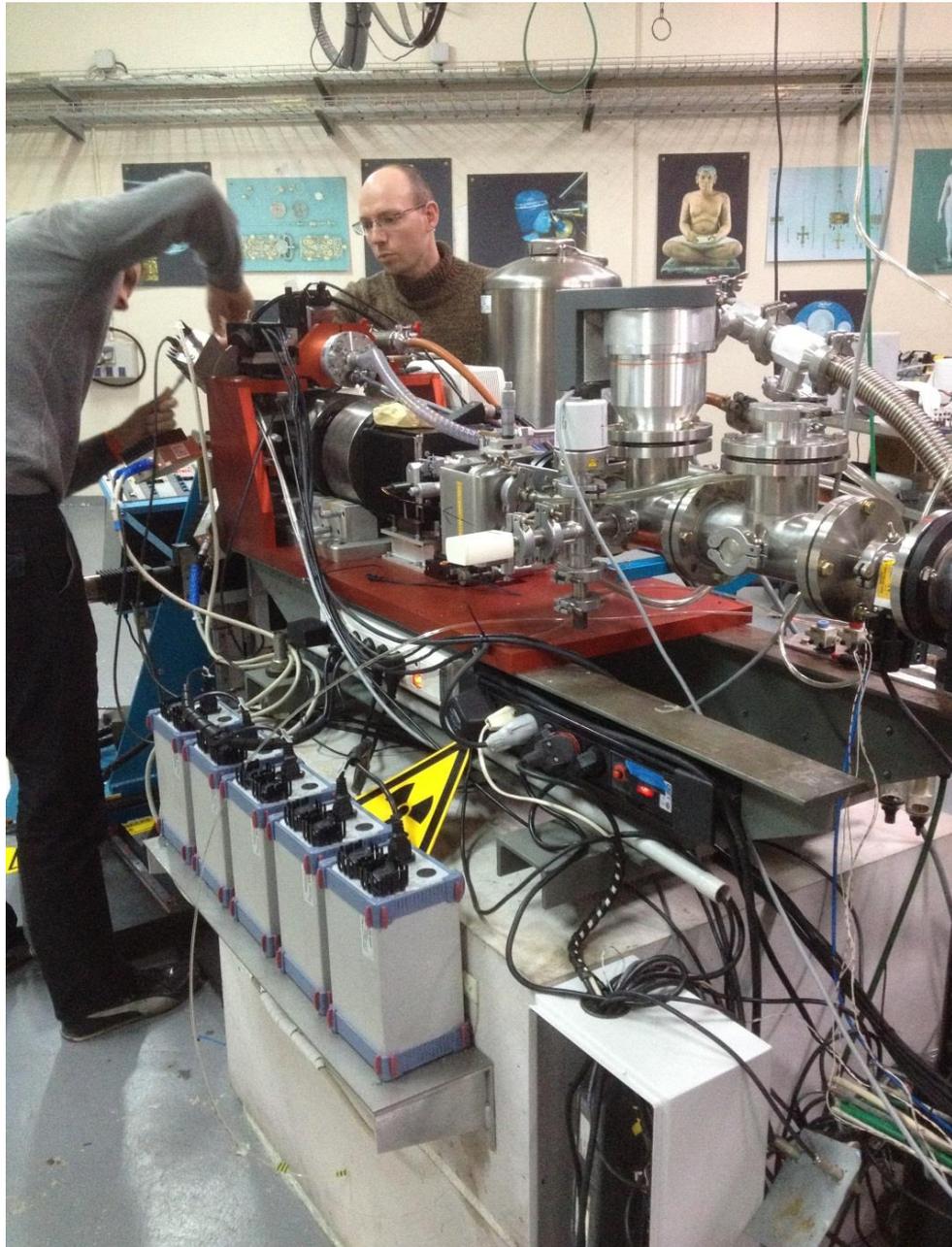


UP Antony 25-05-19

# Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Élémentaire (AGLAE)



“Premier” AGLAE (état en 2016)



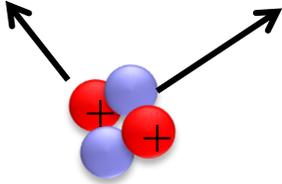
# *Les particules accélérées à AGLAE*

Proton



Vitesse = 24 000 km/s

Proton Neutron



Vitesse = 17 000 km/s

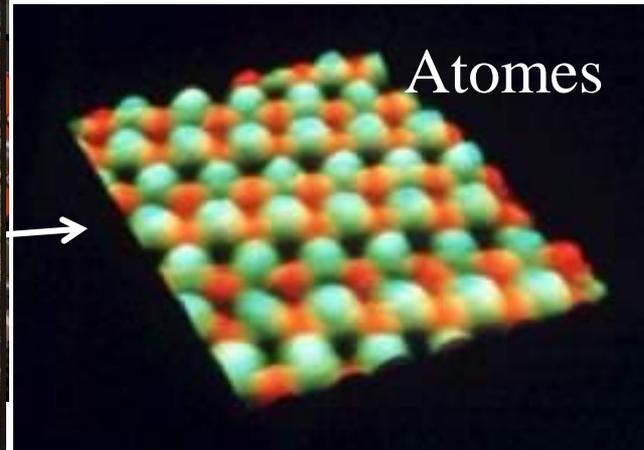
Particule  $\alpha$



Deuton

Vitesse = 19 600 km/s

# Structure de la matière



**Electron**

< noyau / 10 000



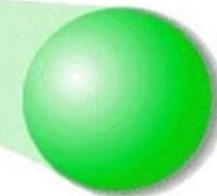
**Noyau**

~ atome / 10 000



**Quarks**

< proton / 1000



**Proton, neutron**

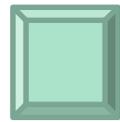
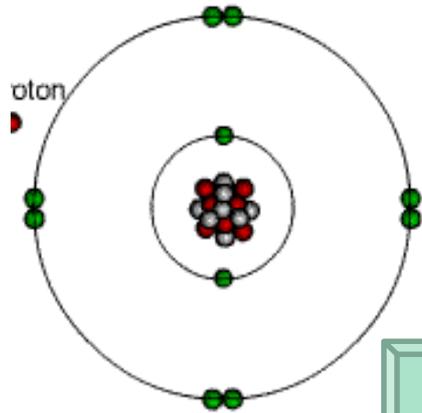
~ noyau / 10

**Taille de l'atome**

~ 1 / 10 000 000<sup>e</sup> mm

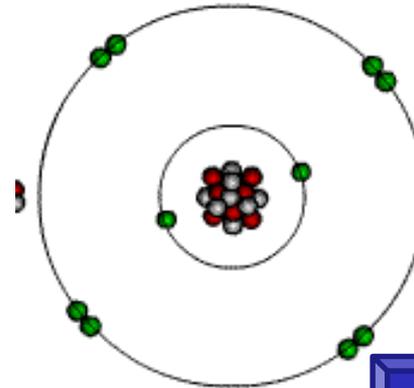
# *Ce qui se passe sous l'impact des particules*

Réaction avec les  
électrons: PIXE



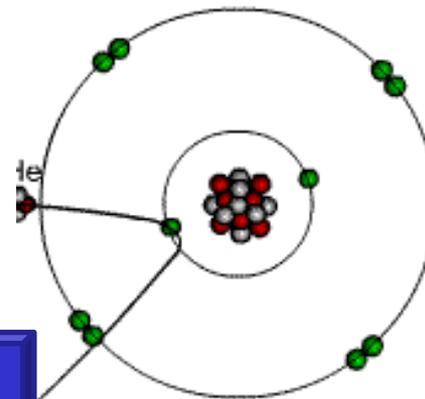
*Détecteur de  
rayons X*

Réaction nucléaire:  
PIGE



*Détecteur de  
rayons  $\gamma$*

Répulsion des particules:  
RBS



*Détecteur de particules*

# *Nouveau « nez » d'AGLAE*

1 Détecteurs X haute énergie

2 Détecteur X basse énergie

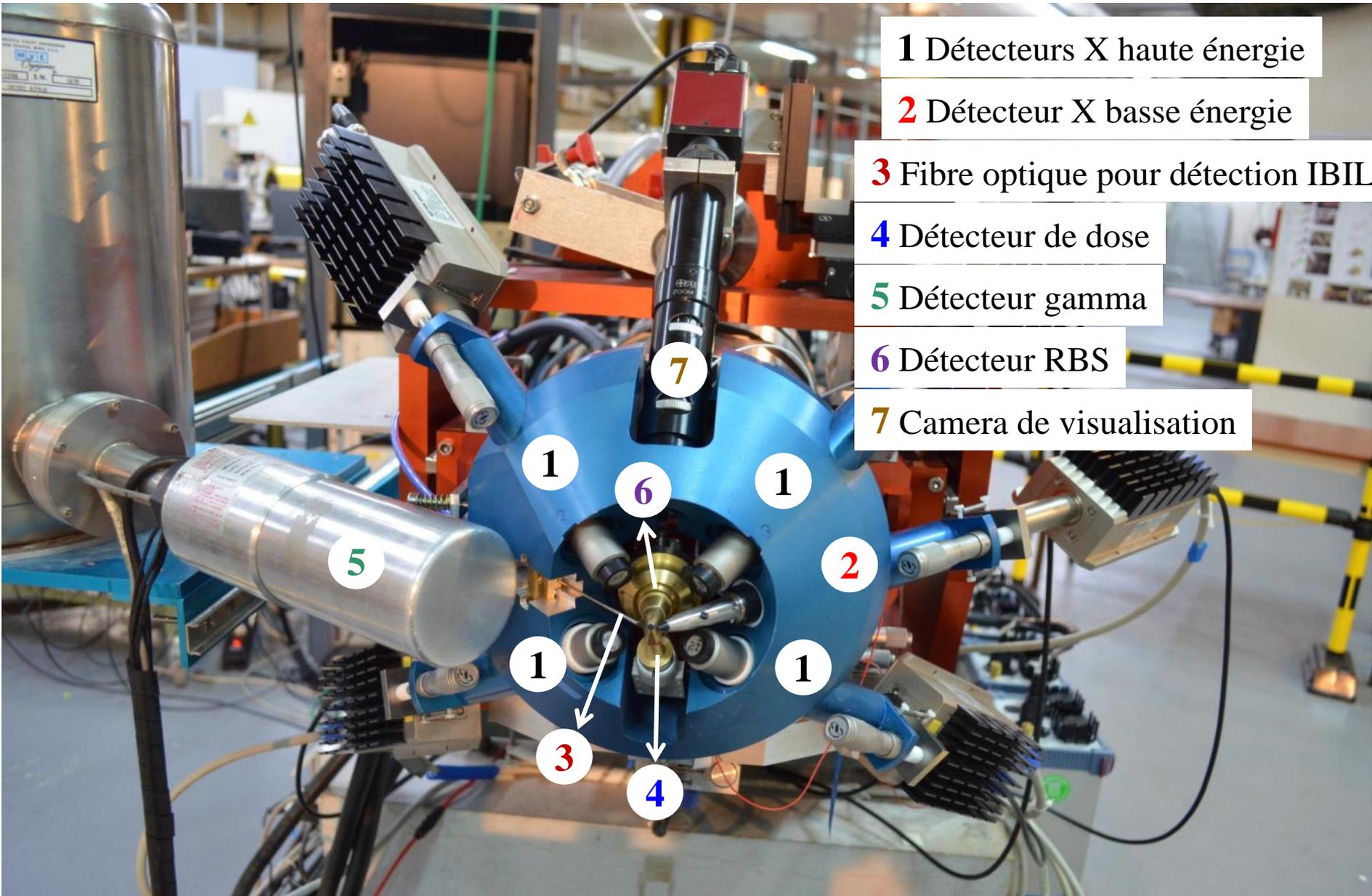
3 Fibre optique pour détection IBIL

4 Détecteur de dose

5 Détecteur gamma

6 Détecteur RBS

7 Camera de visualisation



# Exemple simple d'application: **les yeux d'Ishtar**

Déesse mère Mésopotamienne

Découverte en 1863 dans une tombe près de Babylone

Datée de la période Parthe (3<sup>ème</sup> siècle avant JC)



Nature des yeux:

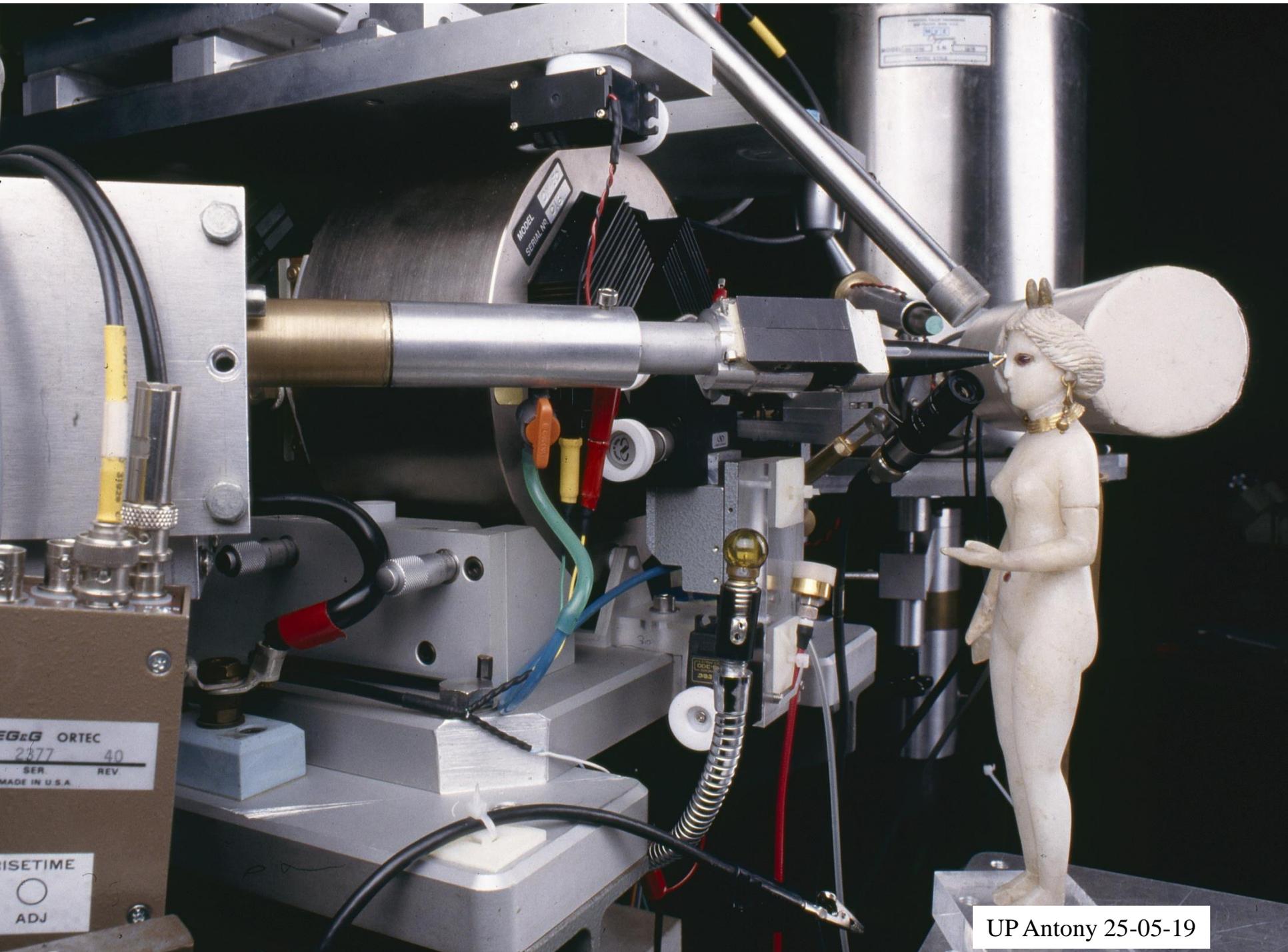
- Verre coloré ?
- Grenat ?
- Rubis ?

Région d'origine ?



Thomas Calligaro, C2RMF

UP Antony 25-05-19



EG&G ORTEC  
2377 40  
SER REV  
MADE IN U.S.A.

RESET TIME  
○  
ADJ

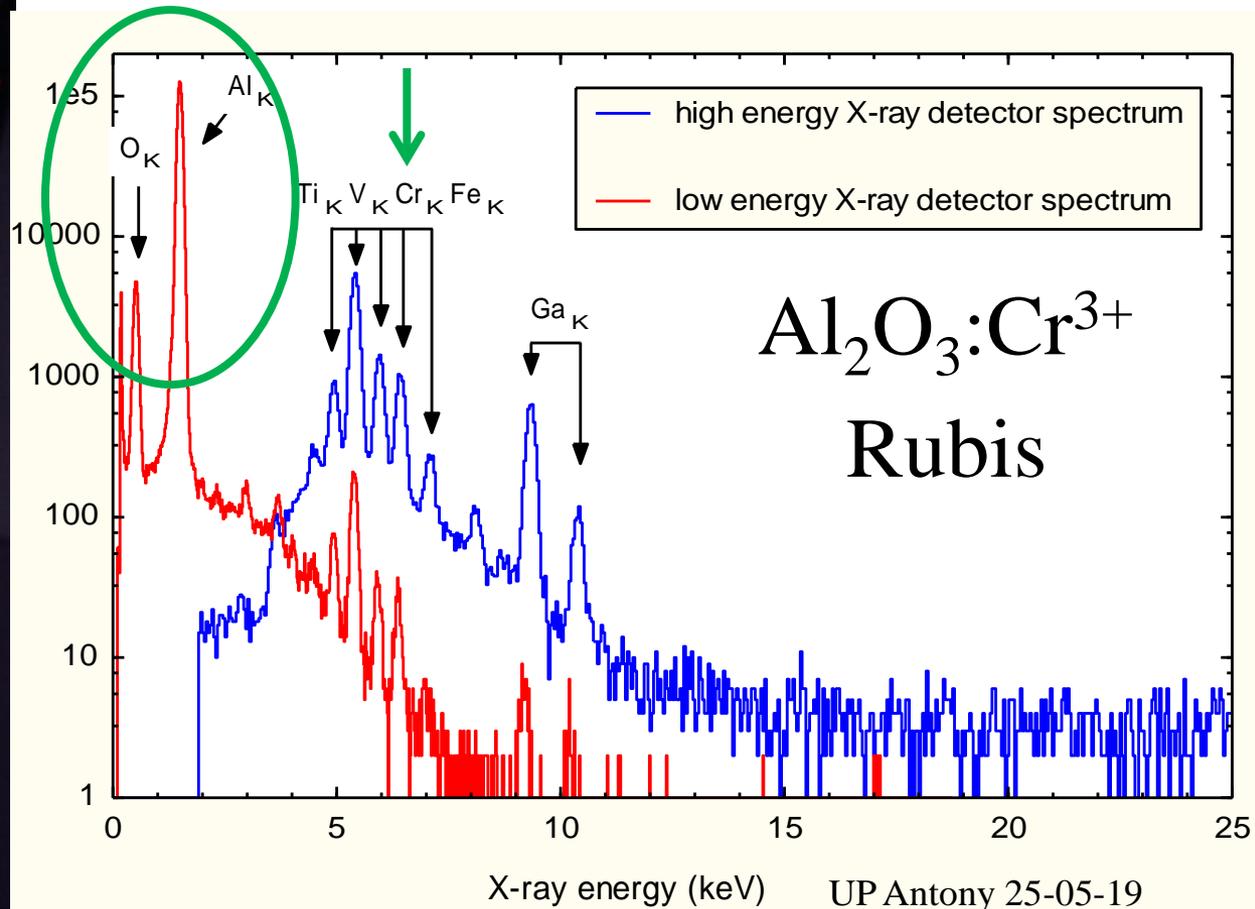
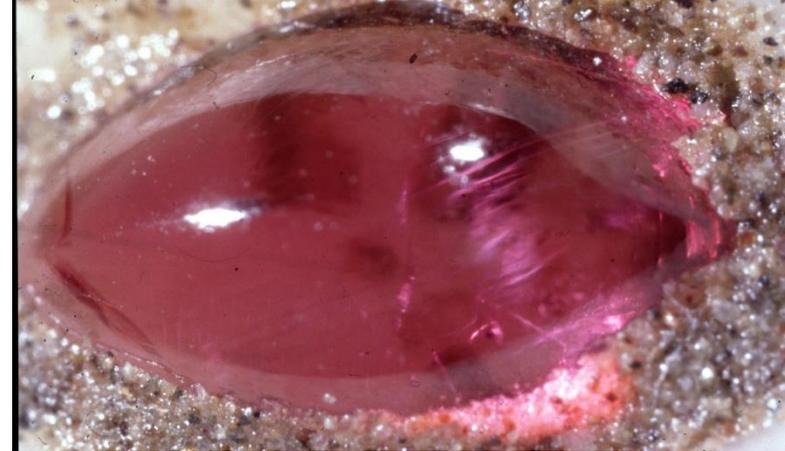
MODEL SERIAL NO 015

UP Antony 25-05-19

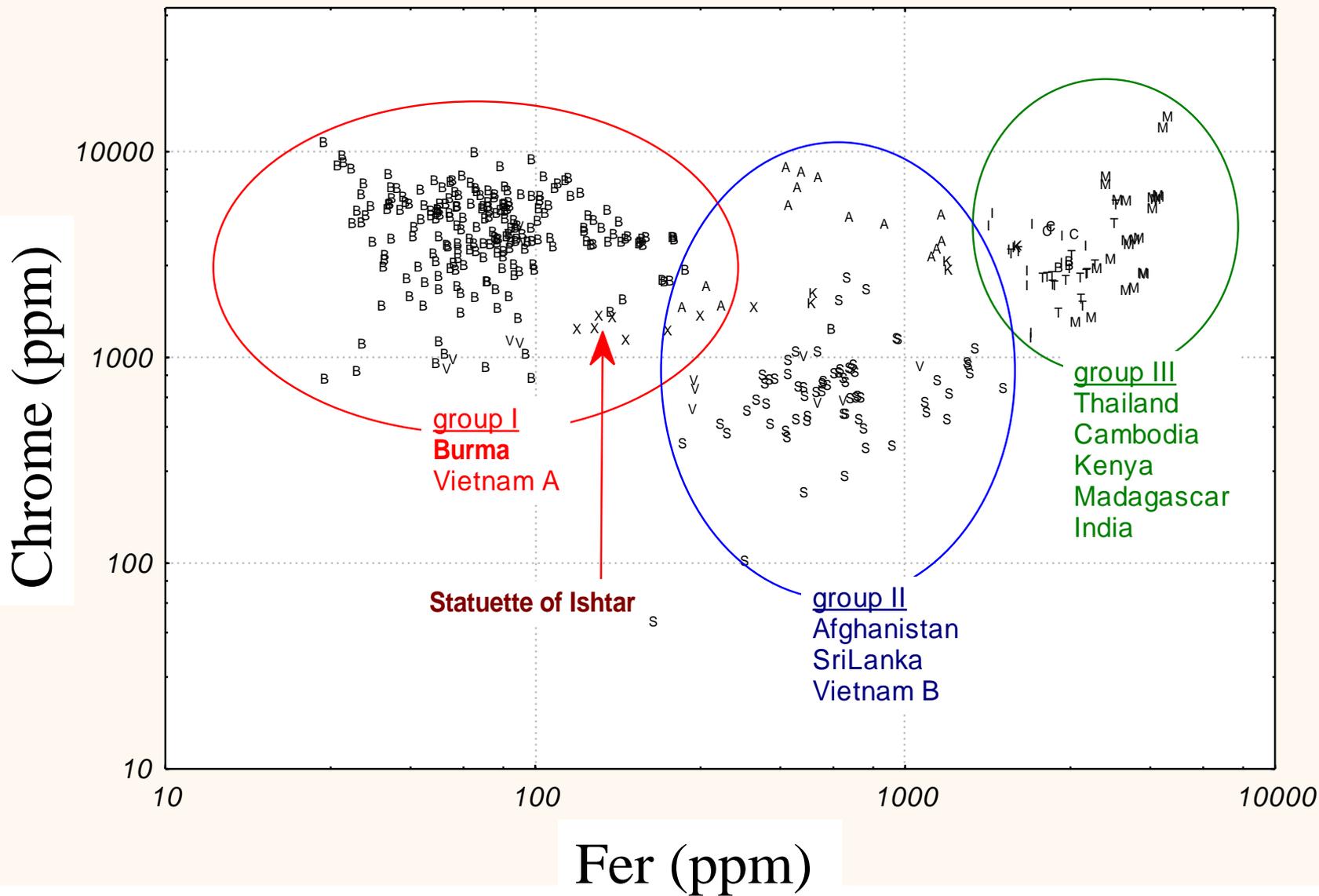
# Emission rayons-X de l'œil d'Ishtar

Elements majeurs: Al, O

Elements traces: Cr, V, Ti, Fe



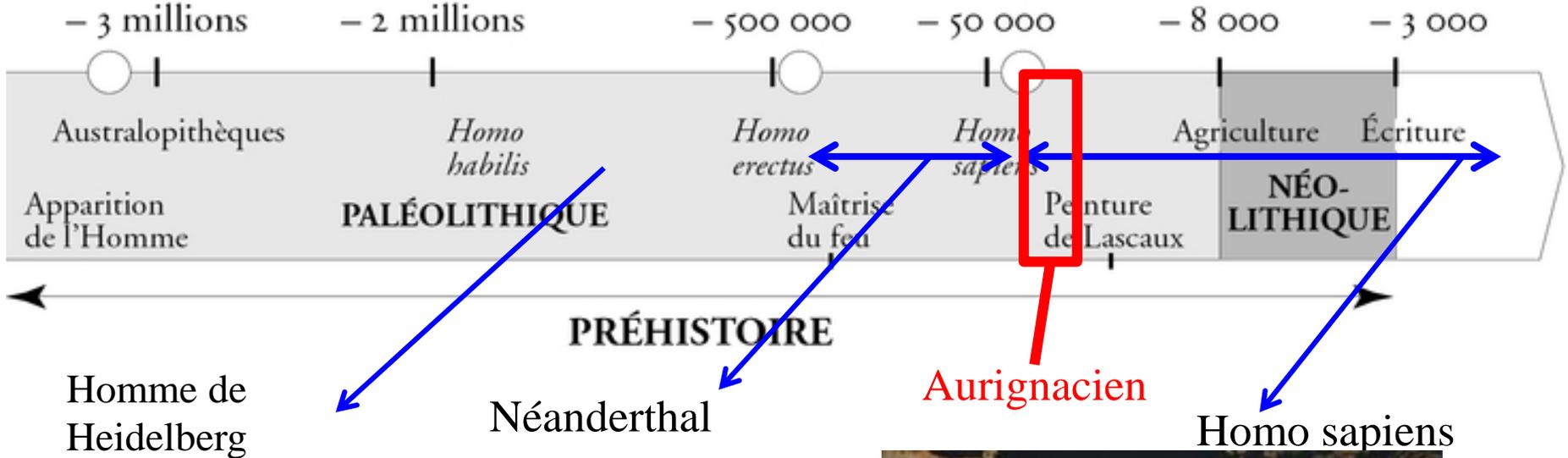
# Origine des rubis



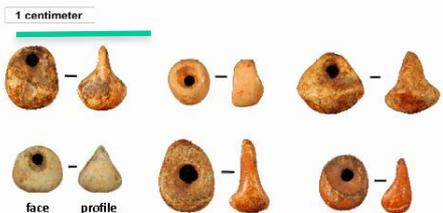


# Exemple plus compliqué:

## Provenance d'objets en ivoire de mammouth des Aurignaciens

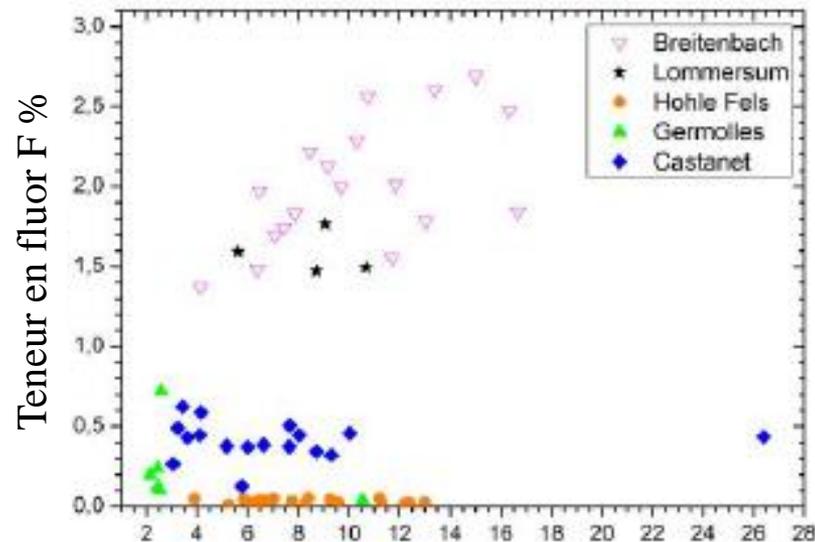
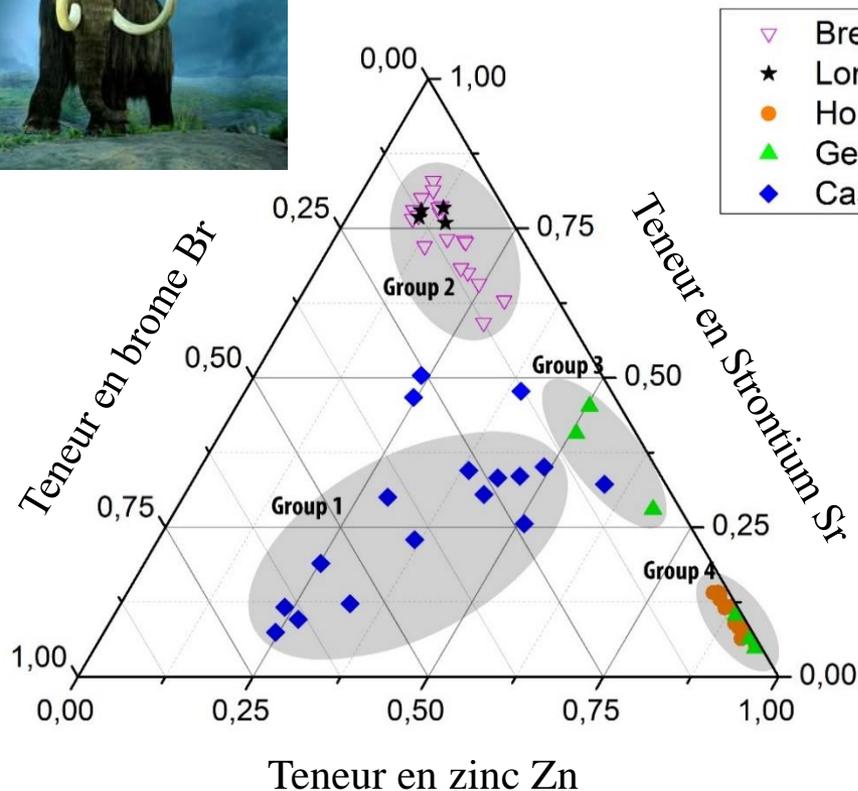


# Sites archéologiques aurignaciens avec objets en ivoire de mammoth

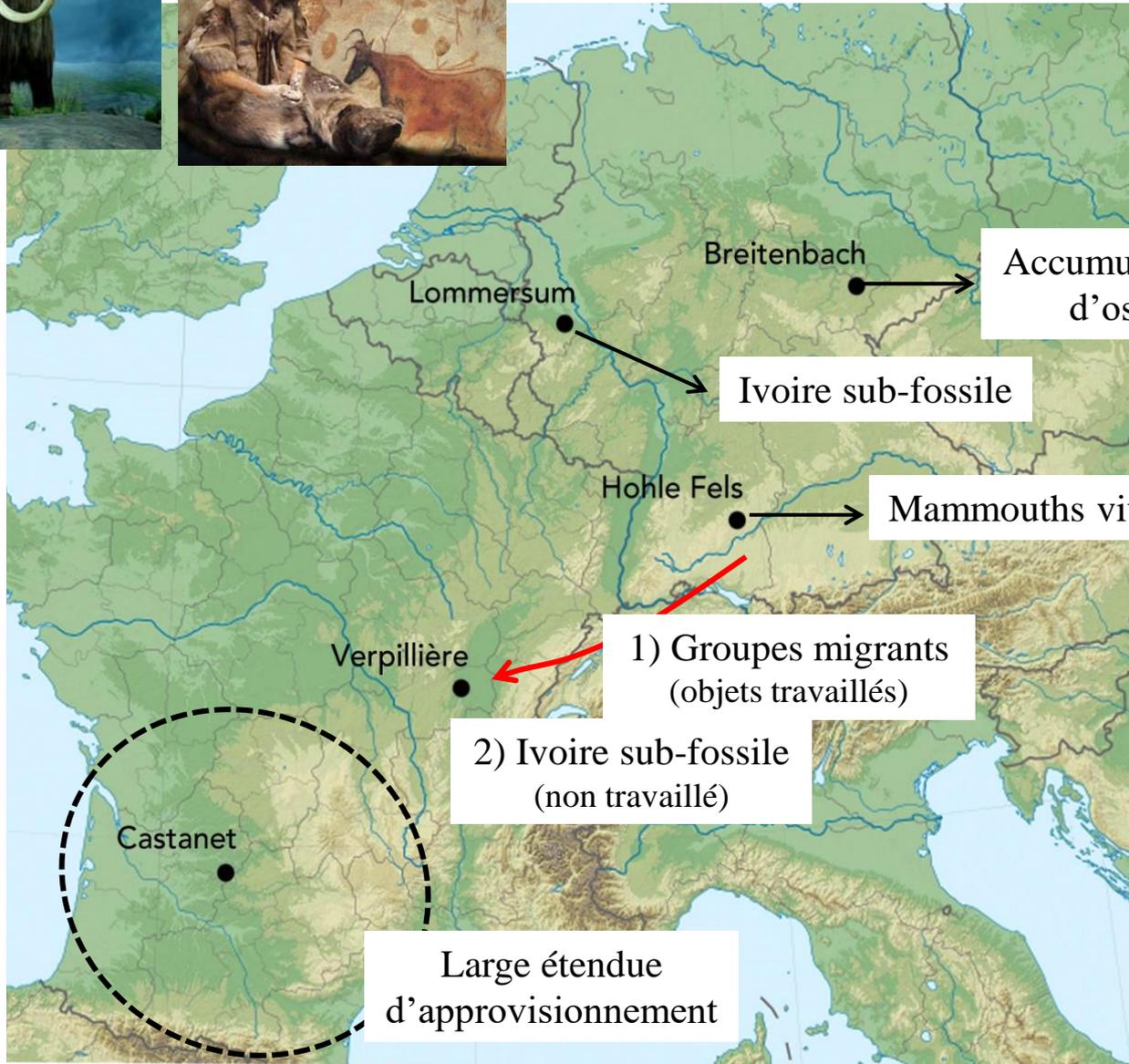


# Des marqueurs chimiques de la provenance

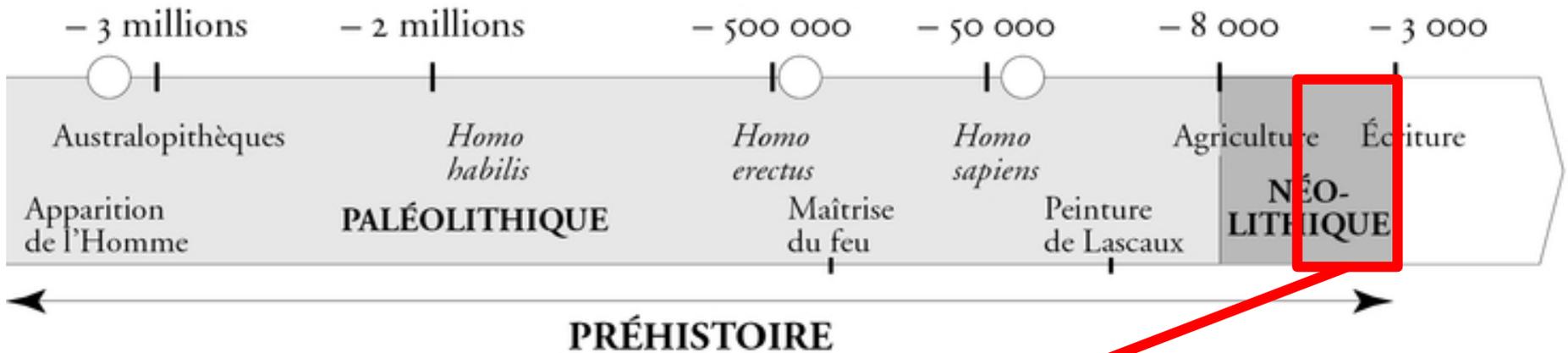
Comparaison des teneurs en SrO, ZnO and Br des ivoires Aurignaciens



Rapport magnesium / calcium (Mg / Ca)



# Exemple encore plus compliqué: Circuits “commerciaux” durant le Néolithique



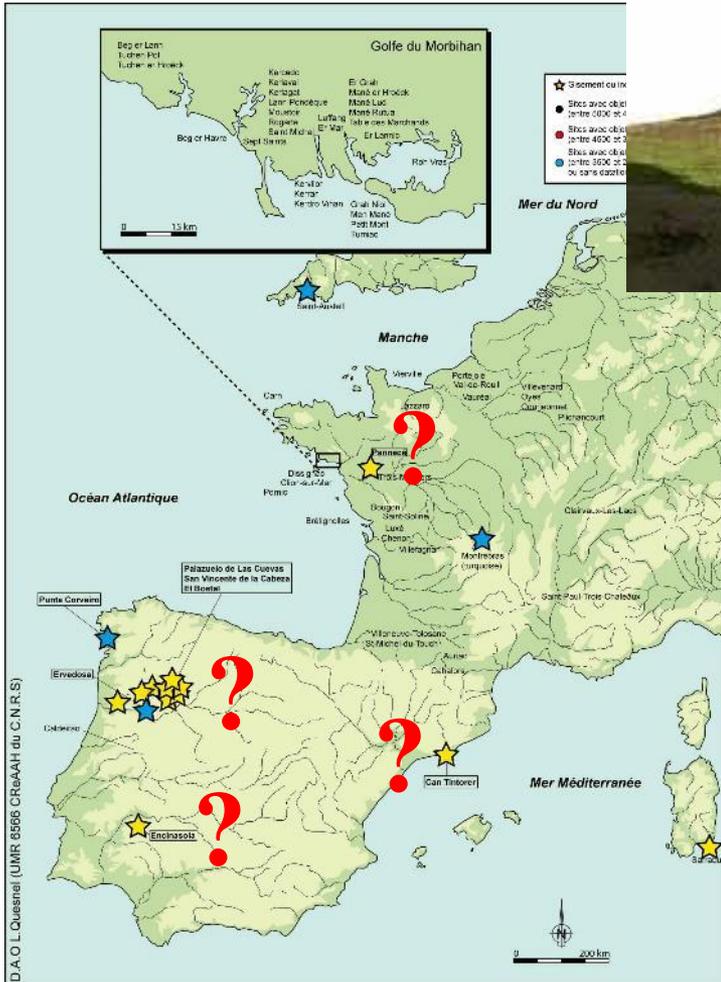
# Perles en variscite au Néolithique

G. Querré, Th. Calligaro, S. Cassen, S. Domínguez-Bella



Tumulus St Michel Carnac

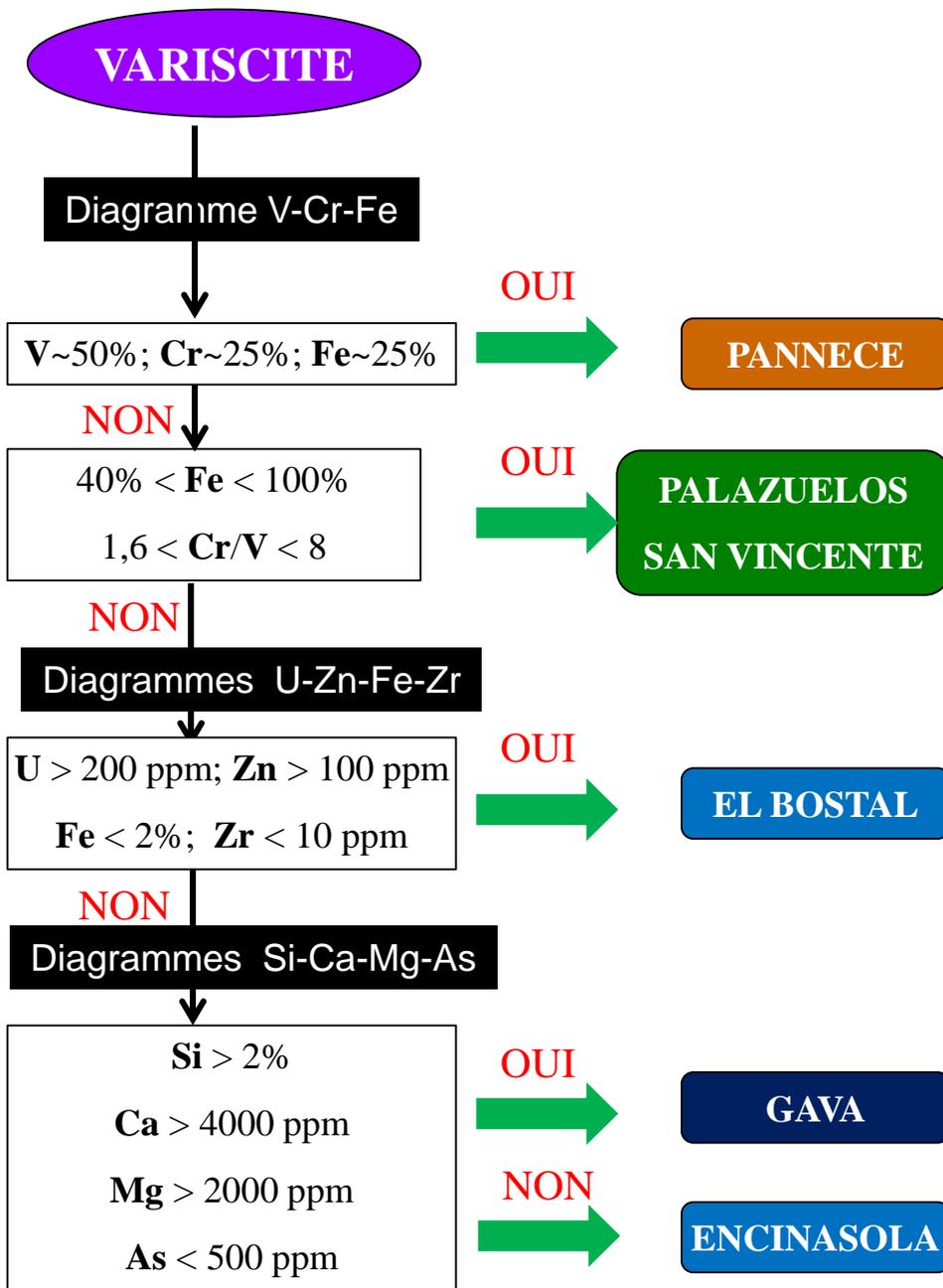
5<sup>ème</sup> millénaire avant JC



1<sup>ère</sup> fouille en 1862

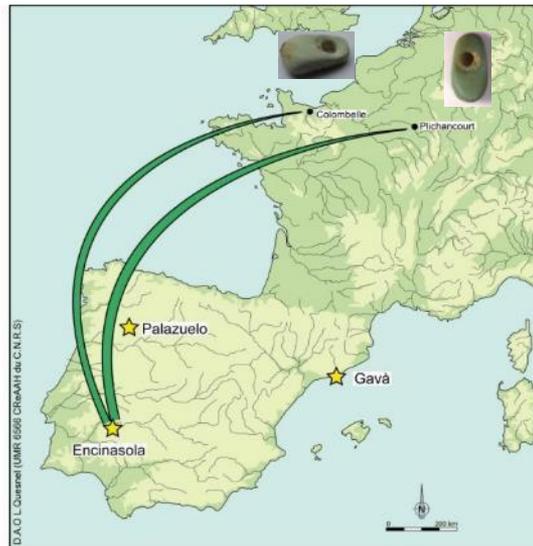


# Determination des caractéristiques géochimiques des gisements de variscite

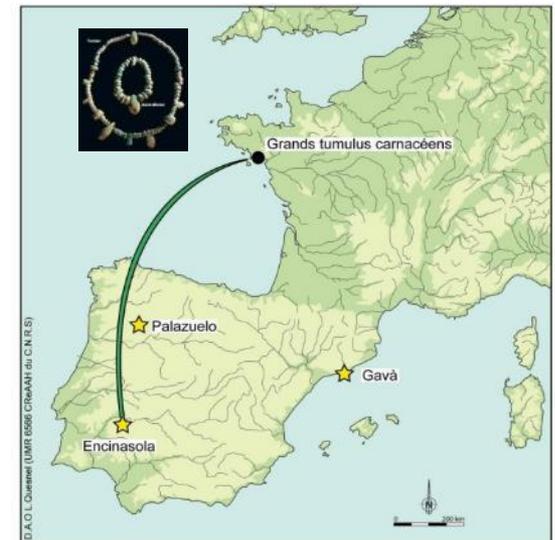


# “Commerce” de la variscite au néolithique

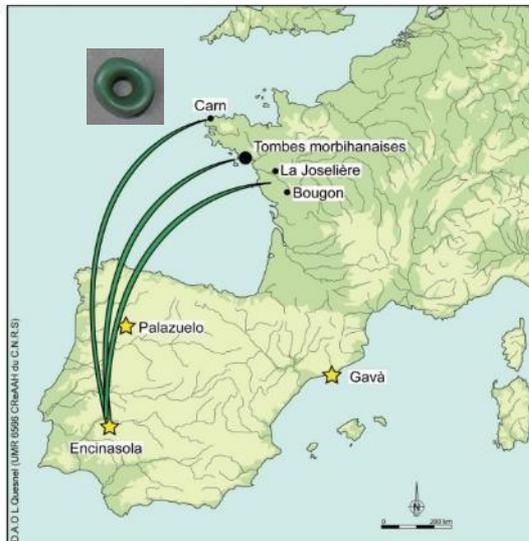
G. Querré, Th. Calligaro,  
S. Cassen, S. Domínguez-Bella



5.000 – 4.800 av. JC.



4.700 – 4.300 av. JC.



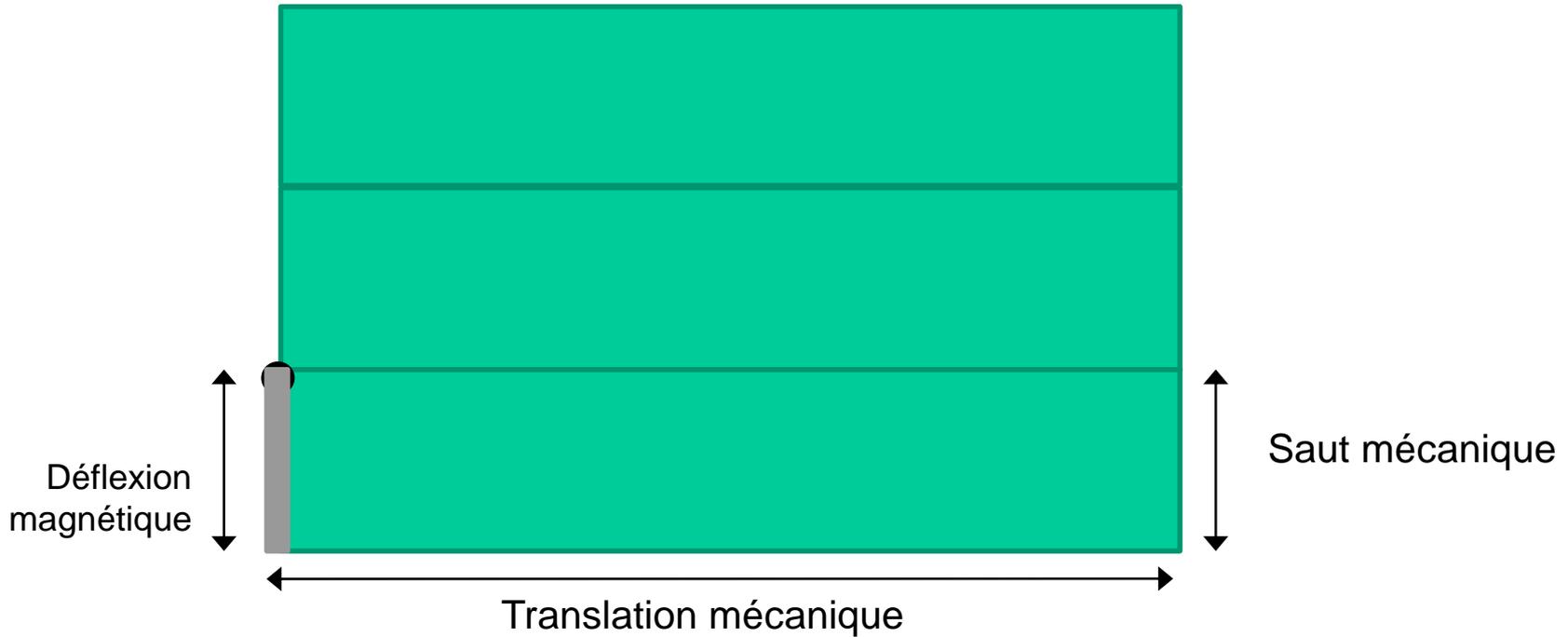
4.300 – 4.000 av. JC



4.000 – 3.300 av. JC

# Imagerie chimique

→ Réalisation de cartographies chimiques.



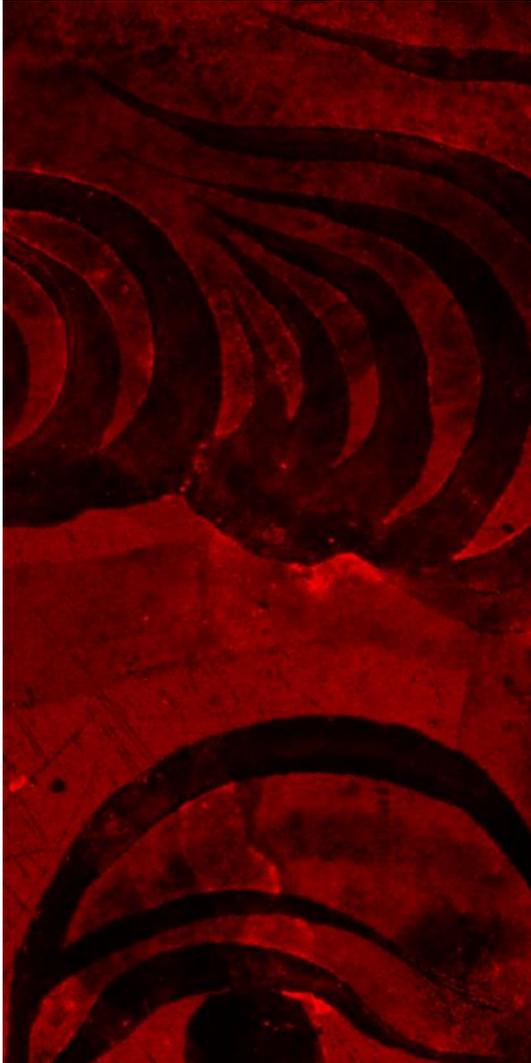
# Exemple d'imagerie

## Vitraux - Cathédrale de Chartres - XIIe-XIIIe s.

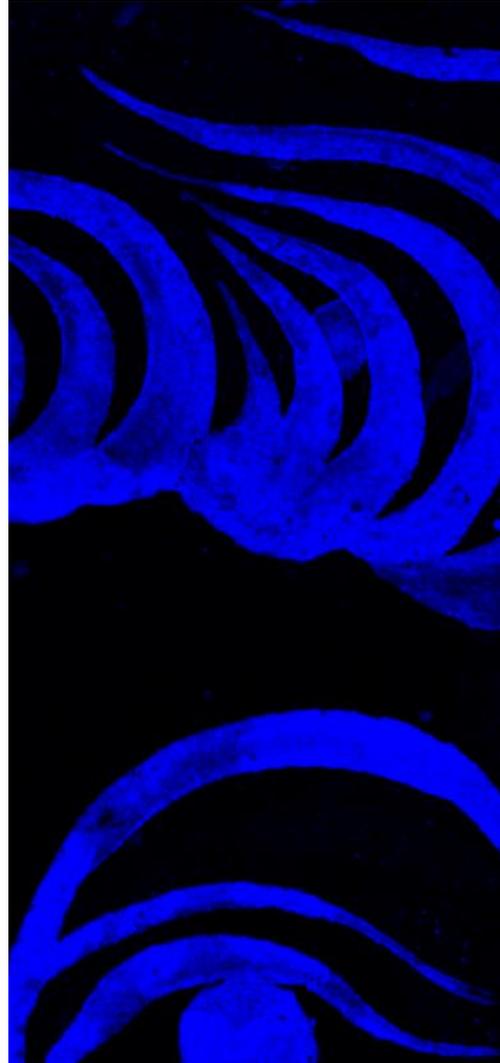


# Images PIXE (émission rayons-X)

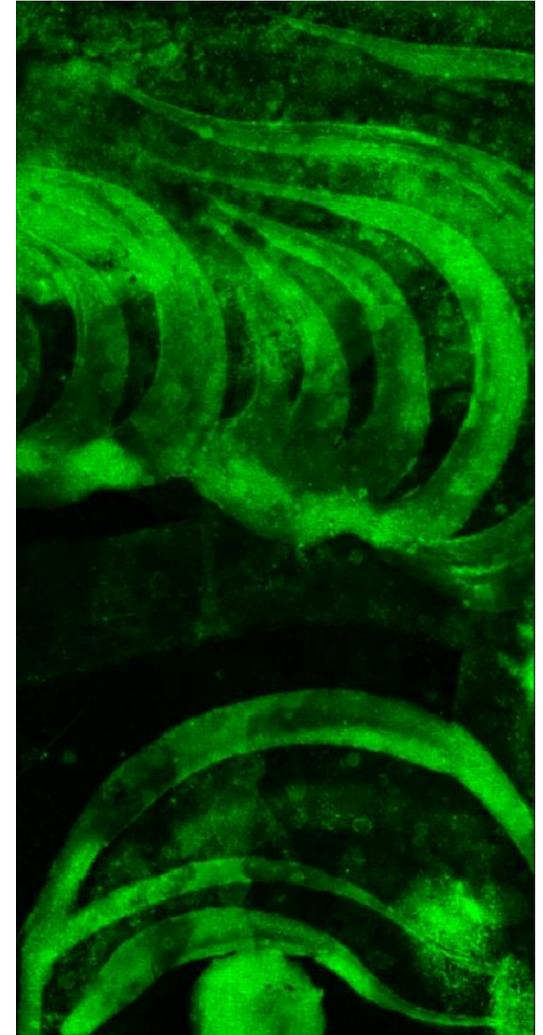
Ca



Fe

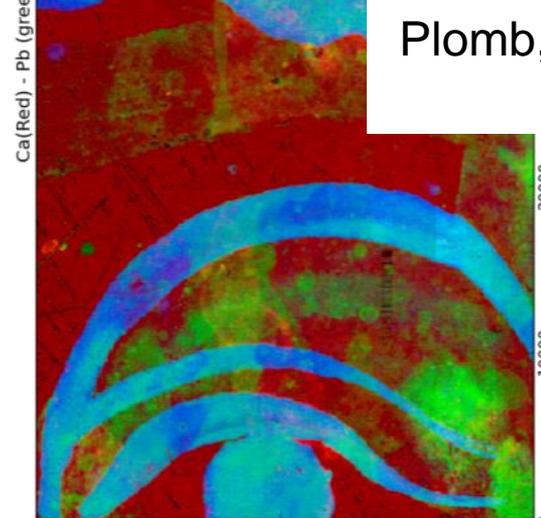
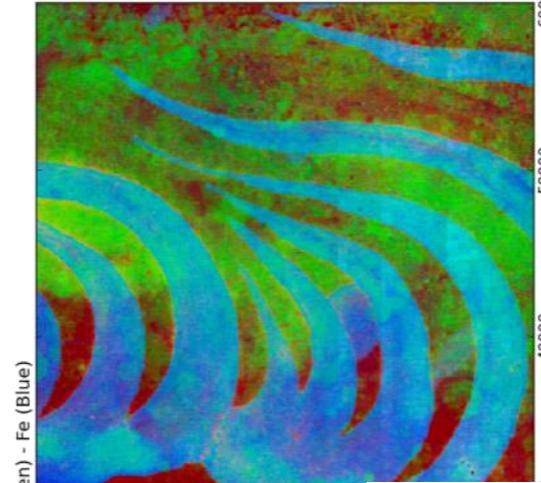
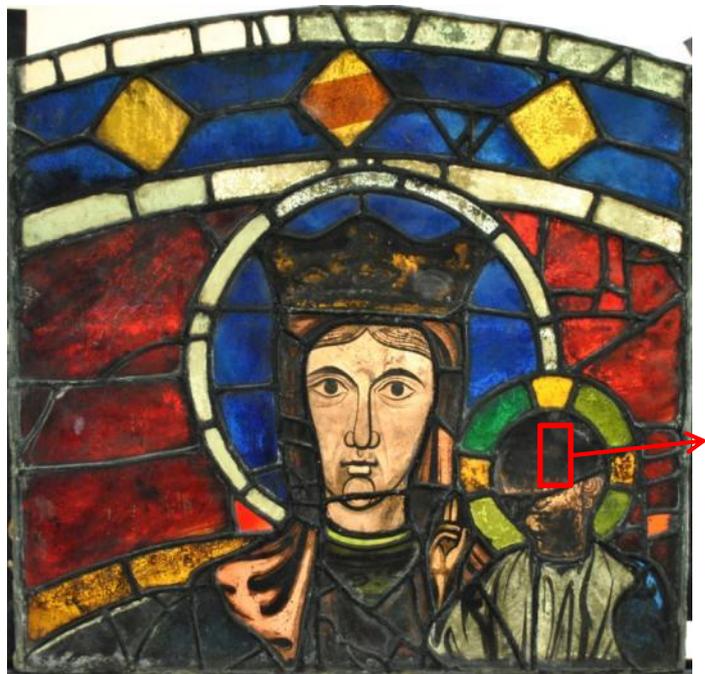


Pb

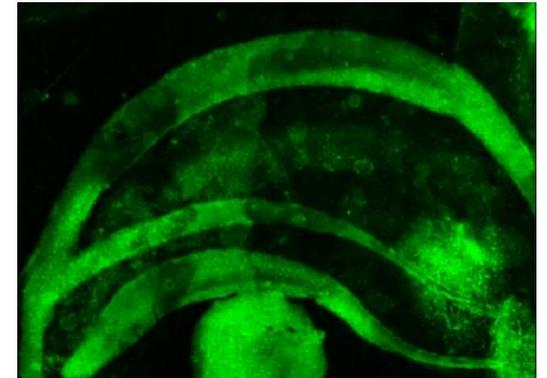


# Vitraux - Cathédrale de Chartres – XIIe-XIIIe s.

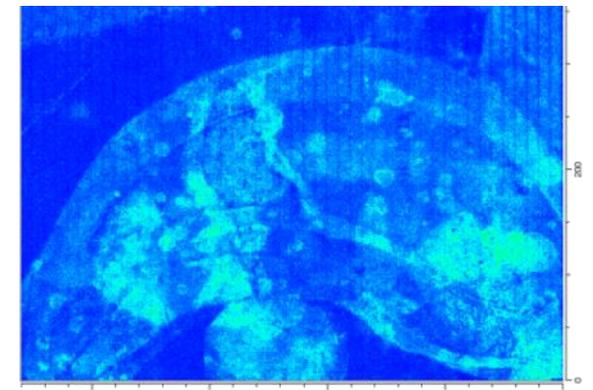
## Images émissions rayons-X



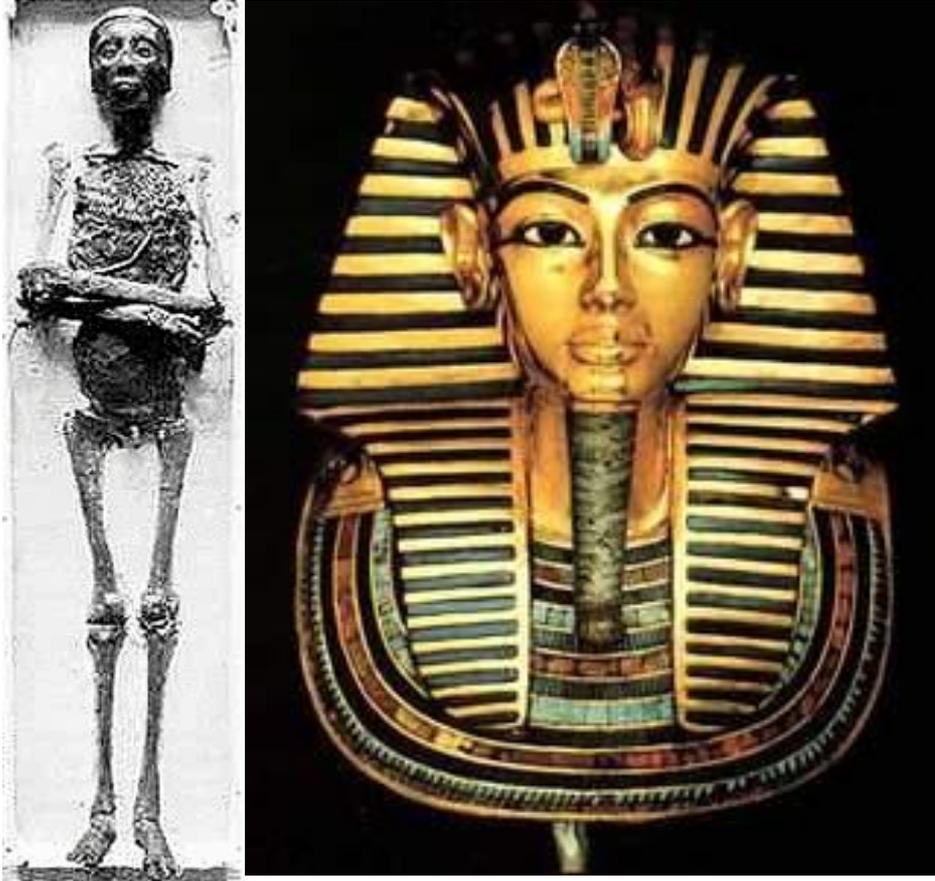
Plomb, rayons-X (PIXE)



Plomb, rétrodiffusion des particules (RBS)

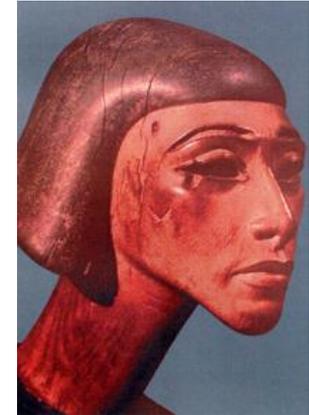


# Authentification d'objets de musées



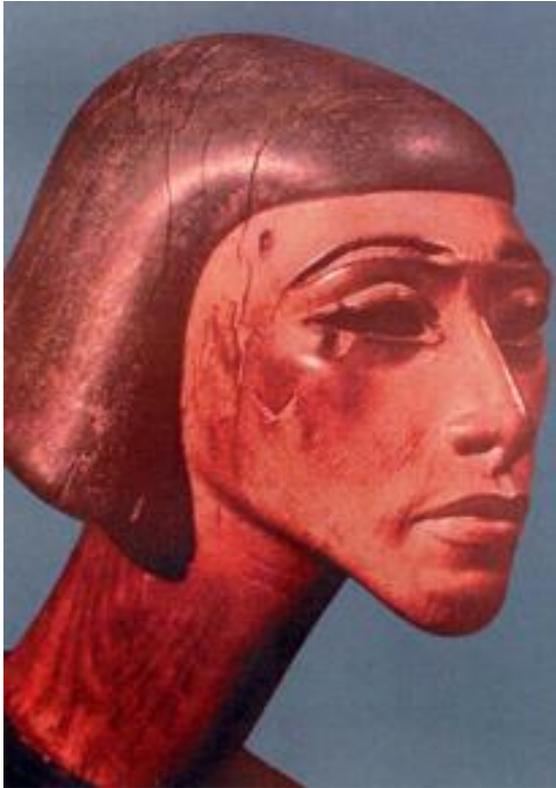
Toutânkhamon

Règne 1335 -1327 avJC



Pièces acquises par le musée du  
Louvre après 1922

# La « tête de harpe » en bois



Attribuée au règne d'Amenhotep IV  
(vers 1353-1338 avant JC)

*... mais...*

Datation par dendochronologie et  $^{14}\text{C}$ :

**20<sup>ème</sup> siècle !**

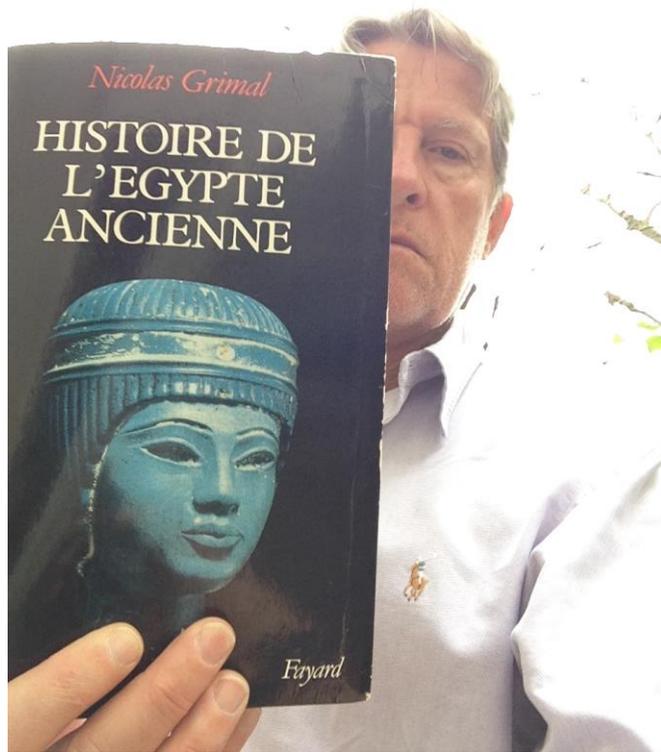
Musée du Louvre E 14255

Achetée en 1932



# La tête Egyptienne en verre bleu du Louvre:

Achetée en 1923 par le musée du Louvre



Tête en verre bleu (9 cm)

Département des antiquités égyptiennes

Musée du Louvre, E 11658

*La tête Egyptienne n verre bleu du musée du Louvre : la découverte d'un faux*, par Isabelle BIRON et Geneviève Pierrat-Bonnefois,  
L'actualité chimique - octobre-novembre 2007 - n° 312-313

UP Antony 25-05-19

# Un jeu de couleur typique de la 18<sup>ème</sup> dynastie

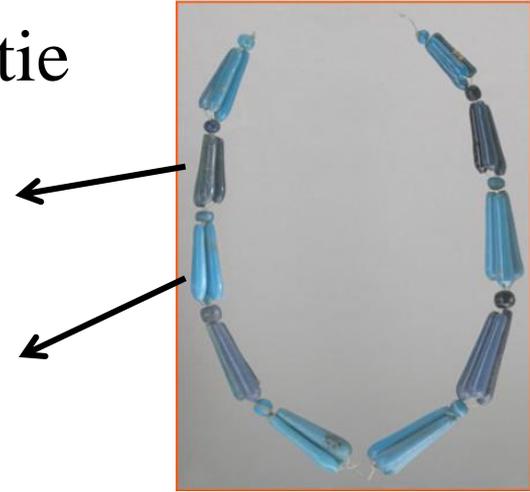
Collier de perles de verre bleu

Fin de la 18<sup>ème</sup> dynastie, vers 1400-1300 avant JC

Musée du Louvre, AF 2631

Couleur bleu foncé:  $\text{Co}^{2+}$

Couleur bleu clair:  $\text{Cu}^{2+}$



# Un style typique de la fin de la 18<sup>ème</sup> dynastie

- sous Amenhotep III (~1391-1353 avant JC)  
ou
- sous Toutânkhamon (~1336-1327)

*... mais quelques doutes...*

- Le style de la perruque
- Le style des lèvres

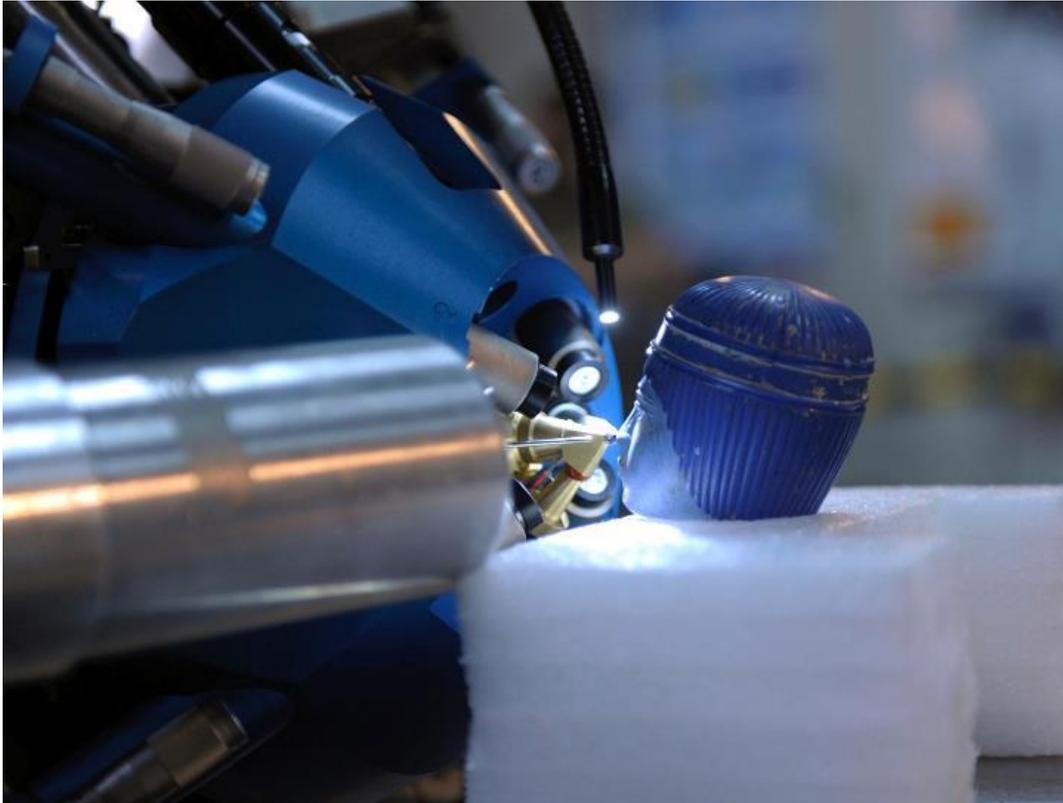




## Comparaison avec les verres de la 18<sup>ème</sup> dynastie:



- Verres de silicates sodo-calciques (Na et Ca)
- Na provient de cendres végétales (présence de Mg, K, S et P)
- Couleur bleu foncé due au cobalt Co (+ impuretés Mn, Ni et Zn)
- Couleur bleu turquoise due au cuivre (Cu)
- Opacifiants: petits cristaux d'antimoniante de calcium  $\text{Ca}_2\text{Sb}_2\text{O}_7$





## Détection des **rayons X** et **gamma**

- Verre sodo-calcique
- Bleu dû au cobalt Co



- **Forte teneur en Pb (28-29%) et As (4-6%)**

→ Opacifiant à base d'arséniate de plomb  
(inventé à Venise au 17<sup>ème</sup> siècle)

- **Co associé à Al et Ni** → Source de cobalt différente de celle des verres de la 18<sup>ème</sup> dynastie (oasis de Kharga et d'Akhla)
- **Absence de S et P** → Le sodium n'est pas de source végétale
- **Présence de F** → vieillissement à l'acide fluorhydrique  
→ Aspect rugueux et mat (19<sup>ème</sup> siècle)

# Authentification des crânes « Aztèques » en quartz

12<sup>ème</sup> siècle - 1521



« Crâne du destin »  
*Mitchell Edges*



Crâne du B.M.



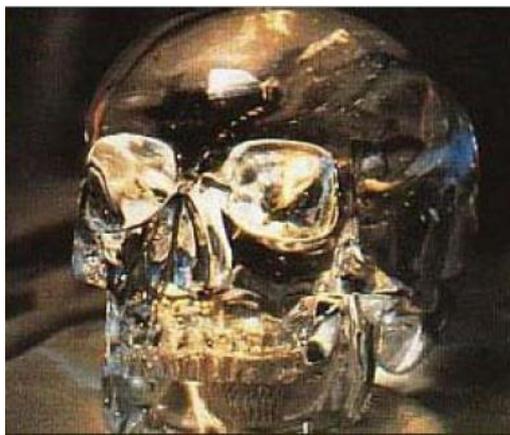
Crâne de la S.I.



Crâne « Sha Na Ra »



Crâne « Max »



Crâne « du destin » ou  
de Mitchell Edges



Musée National  
d'Anthropologie  
de Mexico



Musée du Louvre

# Authentification du crâne « Aztèque » en quartz (Musée du Quai Branly)

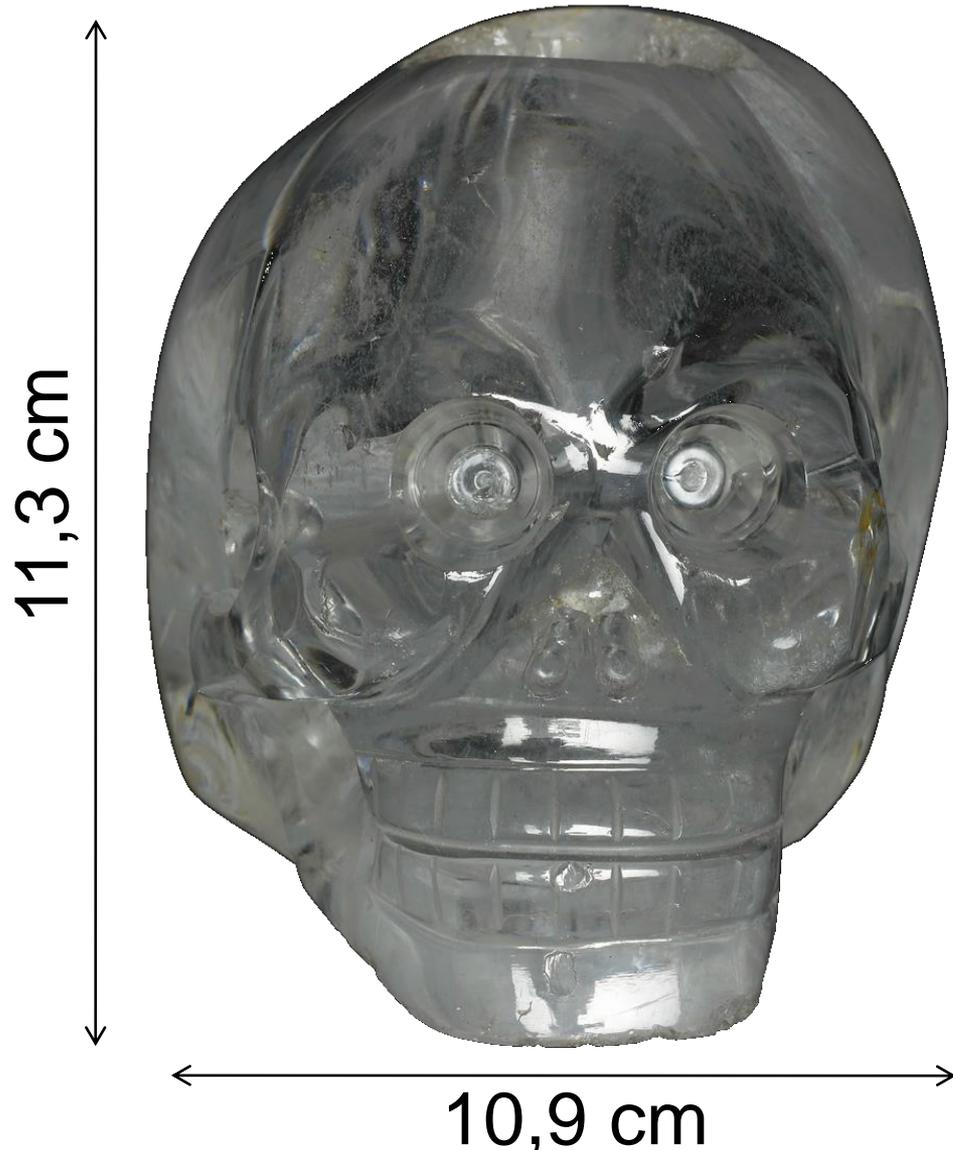


Mictecacihuatl  
déesse de la mort

★ musée du quai Branly  
LÀ OÙ DIALOGUENT LES CULTURES

Calligaro et all. *Appl. Phys. A* (2009) 94, 871

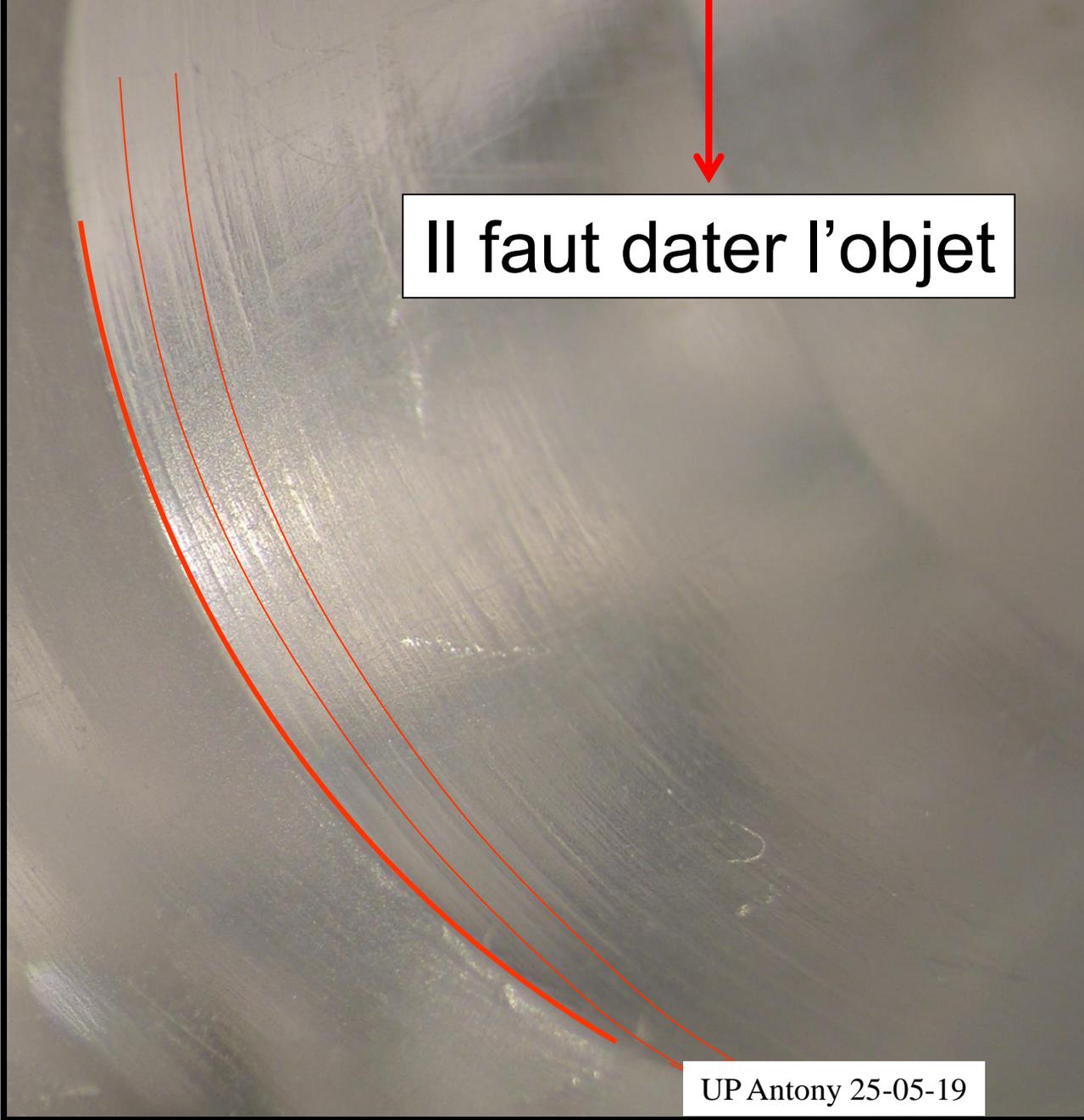
Crâne en quartz (NI 71.1878.1.57)



Statuette anthropomorphe  
(NI 71.1878.1.217)



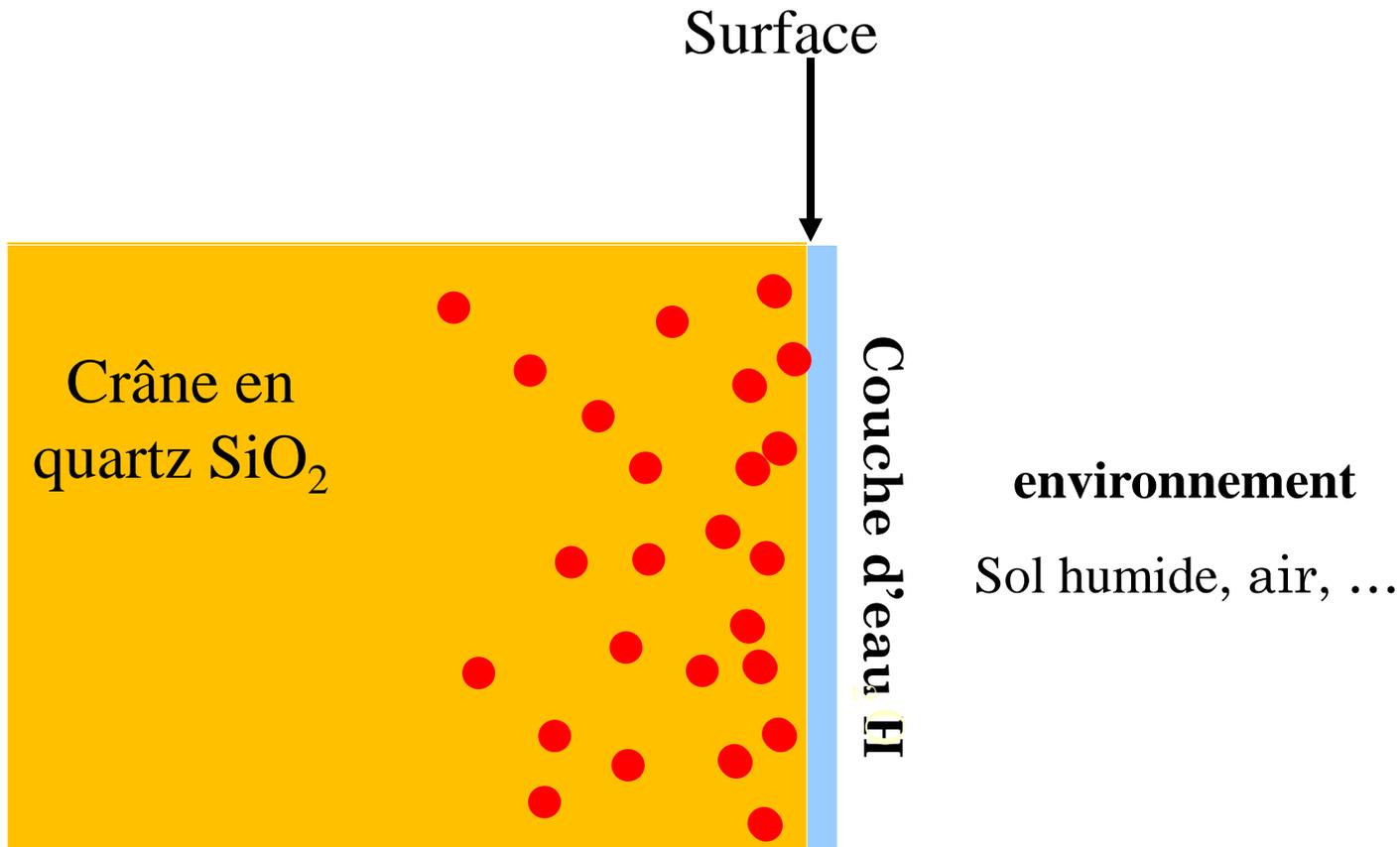
# Traces d'outils (d'usure): doute sur son origine



Il faut dater l'objet

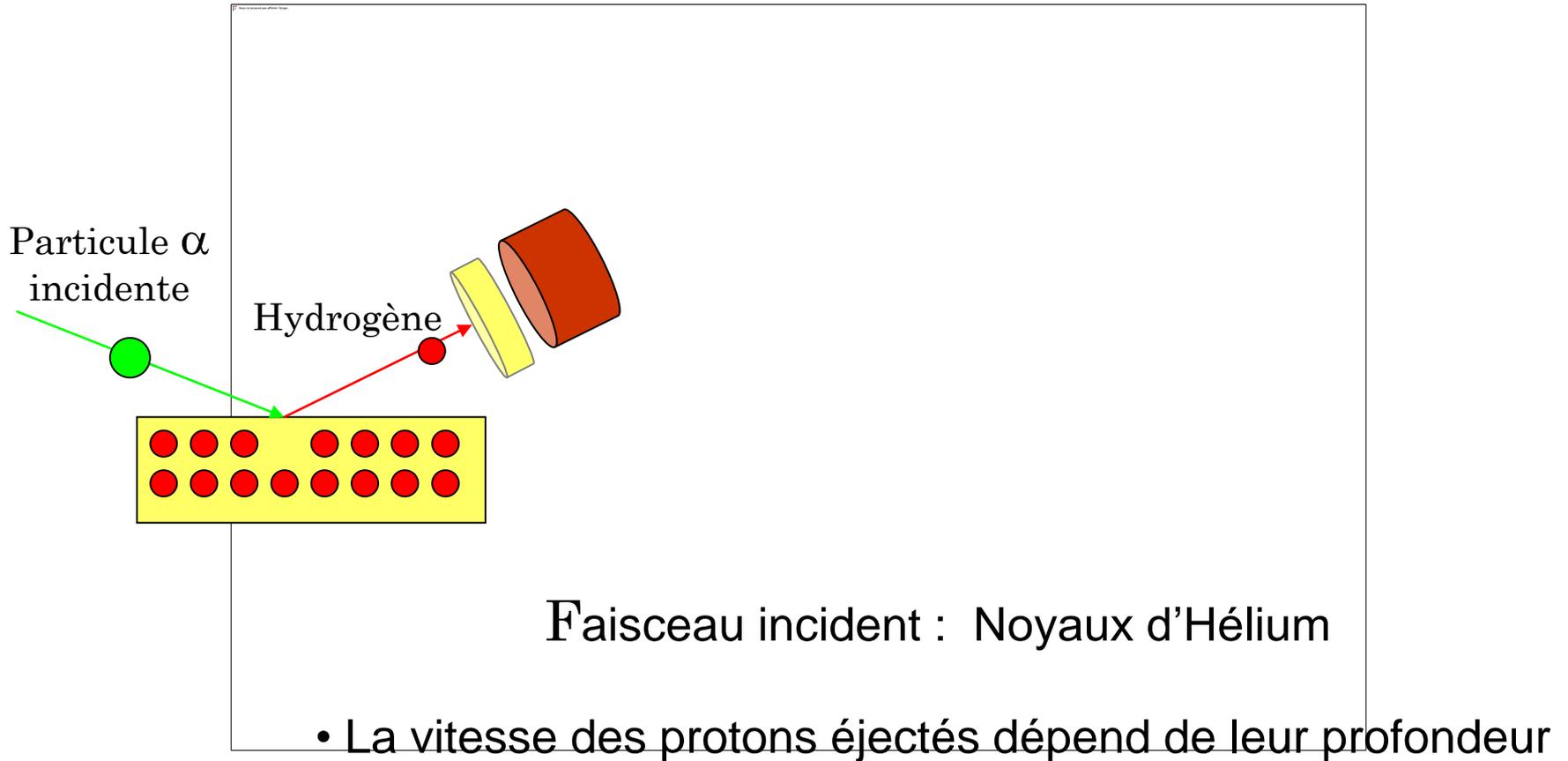
# Processus d'hydratation de la surface du quartz

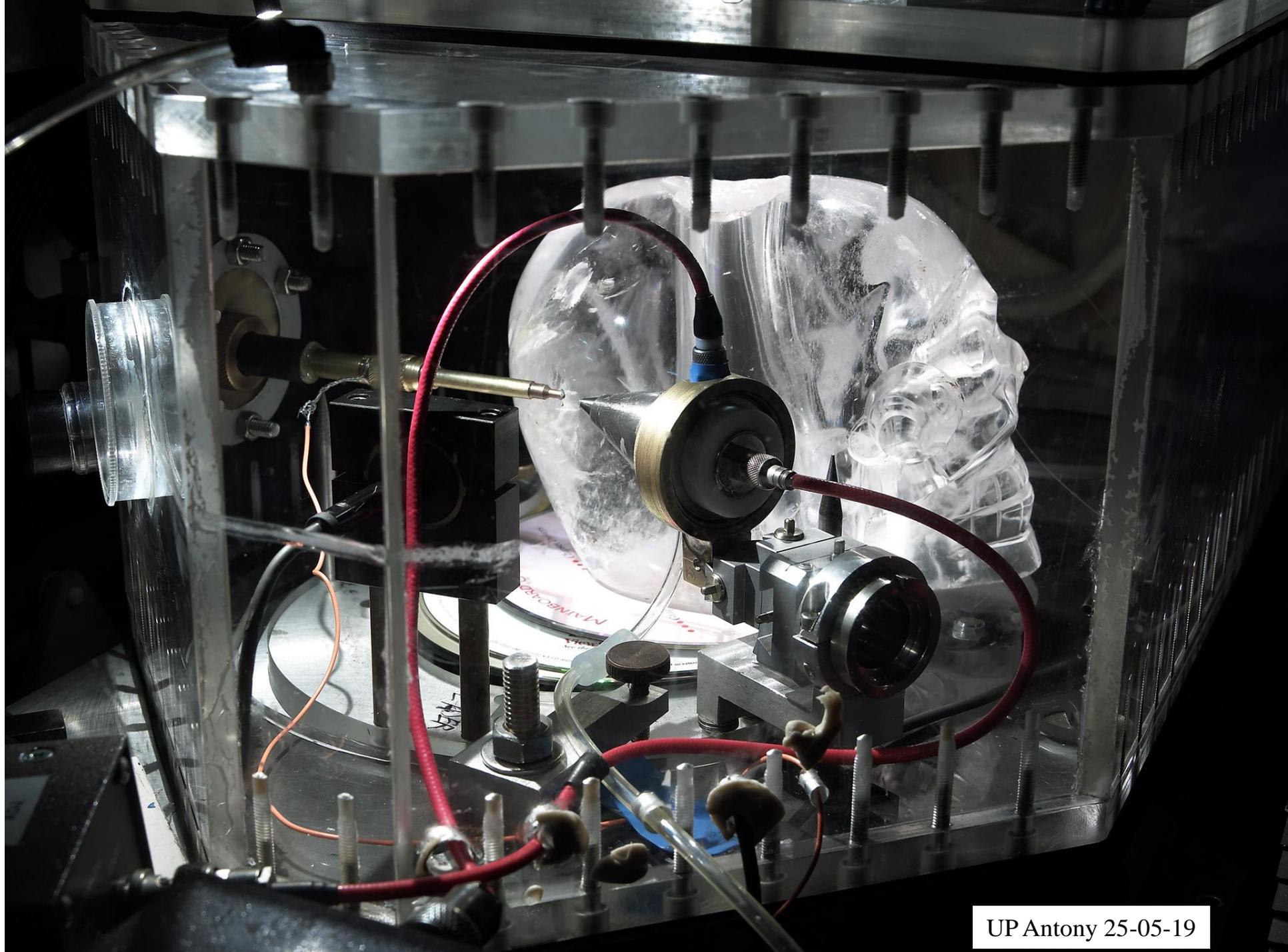
- Les atomes d'hydrogène diffusent très lentement dans le quartz : ~ moins de 1 micron / siècle



# Principe de la technique **ERDA**

## Elastic **R**ecoil **D**etection **A**nalysis





# Résultats ERDA

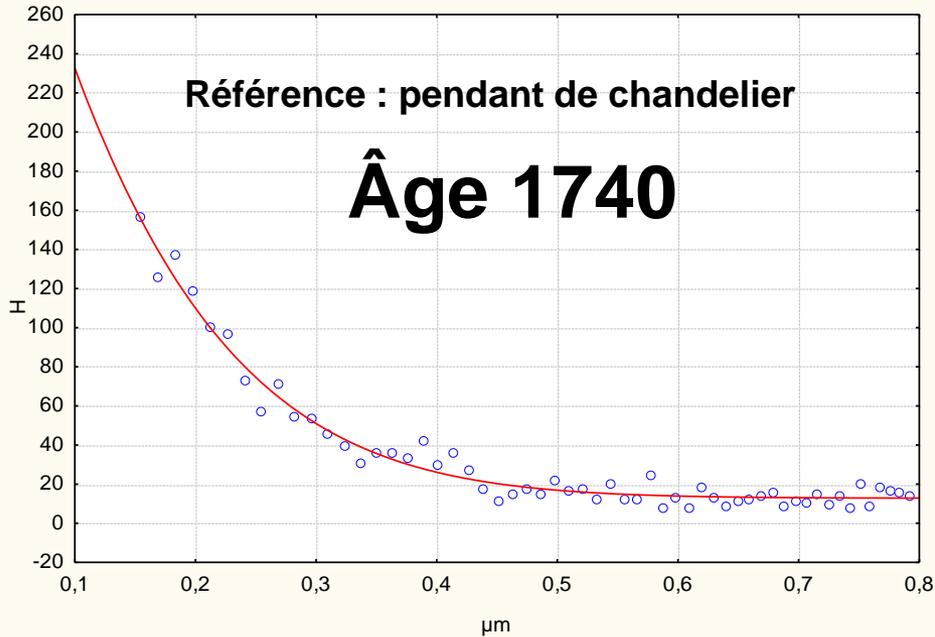
## Profils de diffusion de l'hydrogène



Chandelier 1740  
Chateau Sans Souci

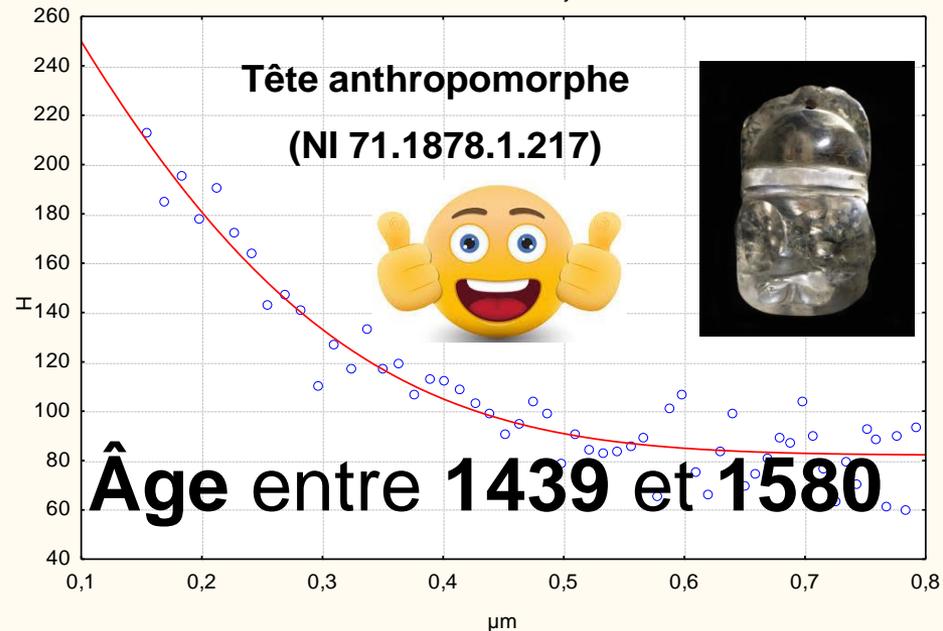
Référence : pendant de chandelier

**Âge 1740**



Masque mexique  
Musée du Quai Branly

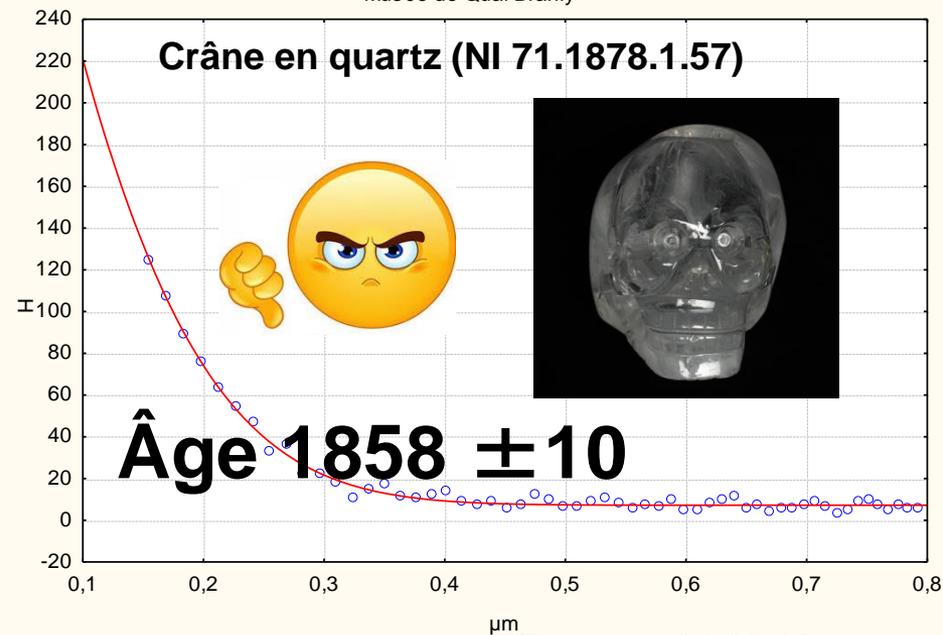
**Tête anthropomorphe  
(NI 71.1878.1.217)**



**Âge entre 1439 et 1580**

Musée de Quai Branly

**Crâne en quartz (NI 71.1878.1.57)**



**Âge 1858 ± 10**



Crâne du B.M.

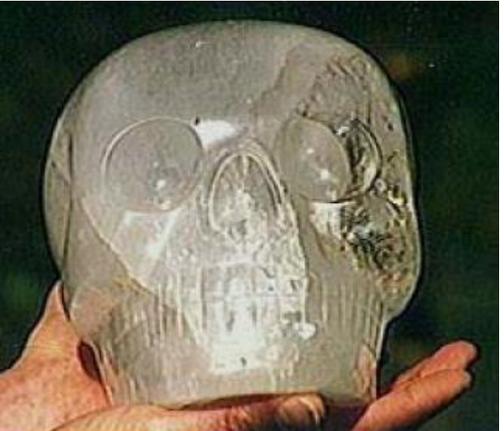


Crâne de la S.I.

**Faux avérés**



Crâne « Sha Na Ra »



Crâne « Max »



Crâne « du destin » ou  
de Mitchell Edges

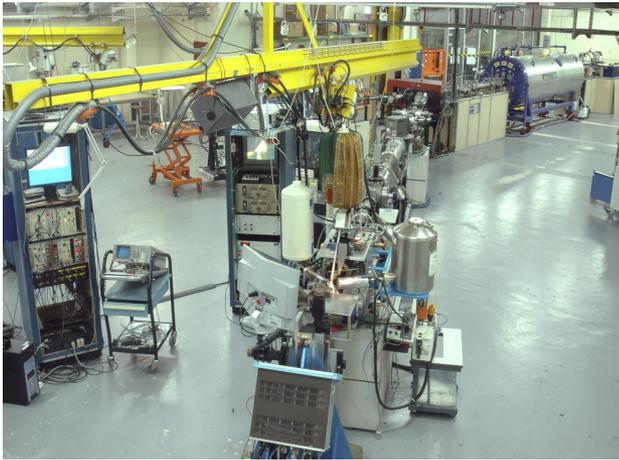


Musée National  
d'Anthropologie  
de Mexico



Musée du Louvre

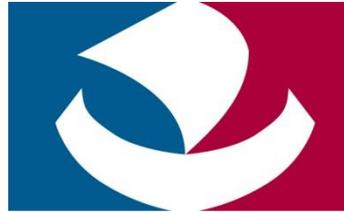
# Les défauts de l'ancien AGLAE



- Impossibilité d'étudier des œuvres « fragiles »
- Fonctionnement « manuel » (6 h par jour)

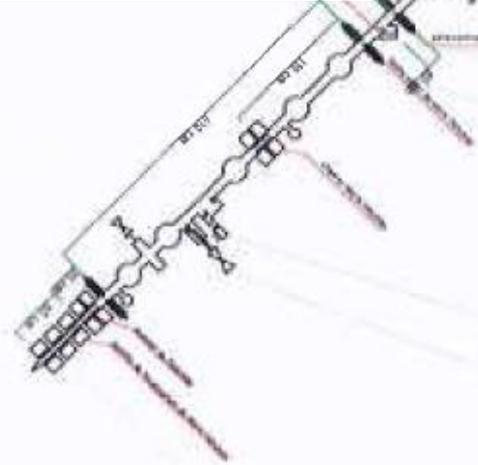
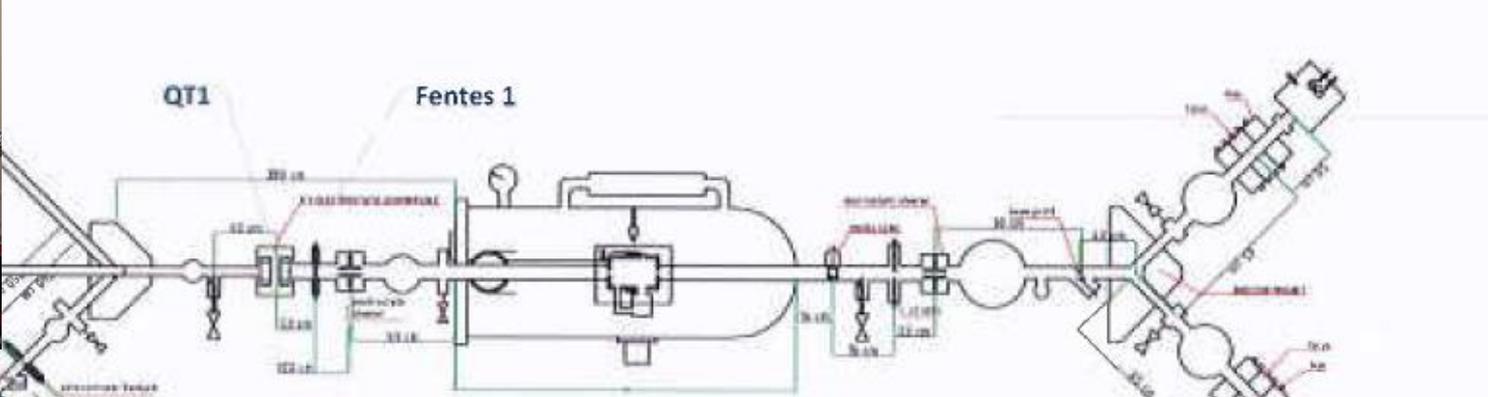
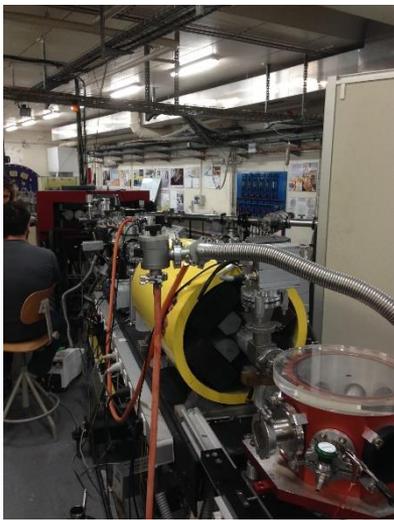
# Projet « Nouvel-AGLAE »

2012 - 2019

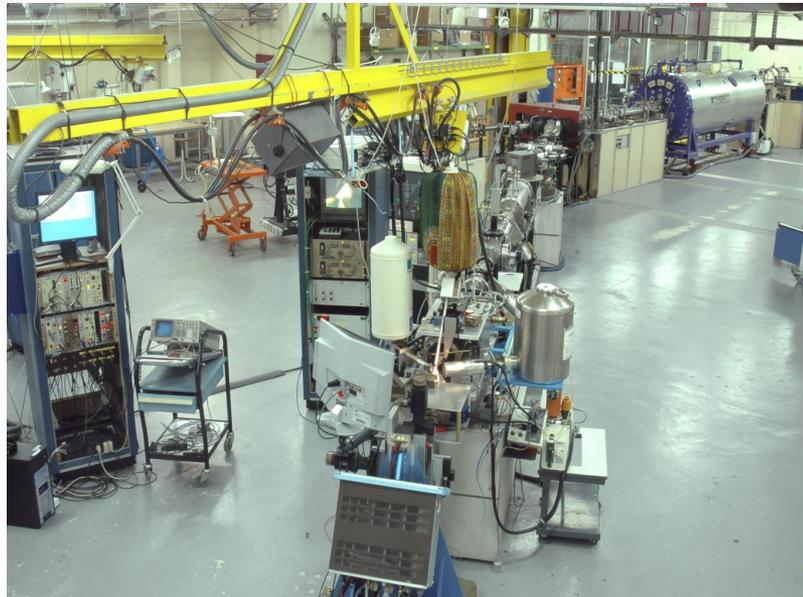


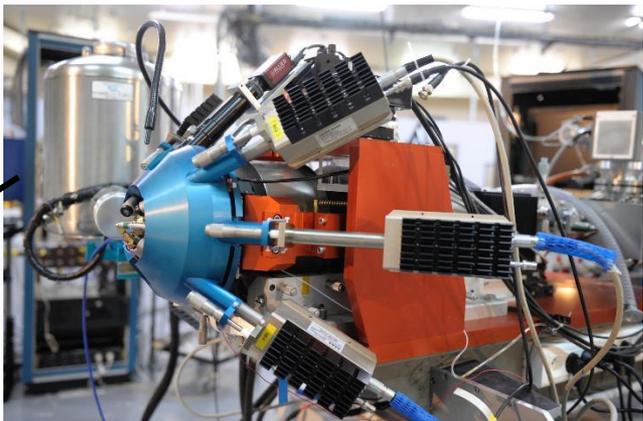
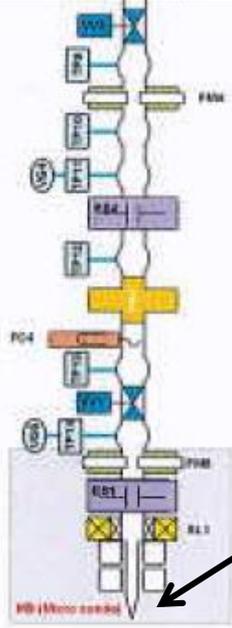
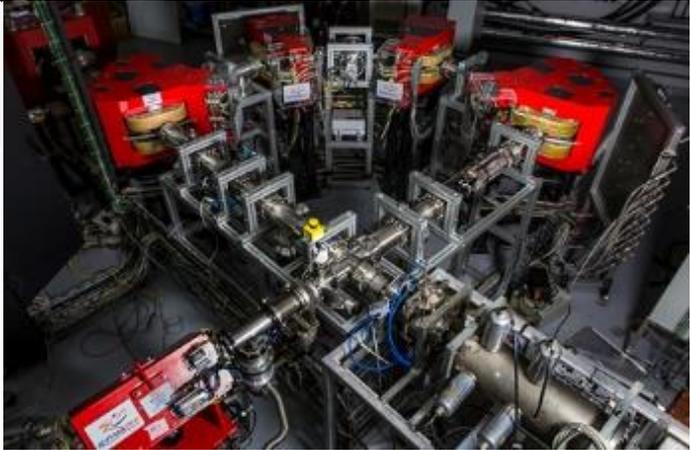
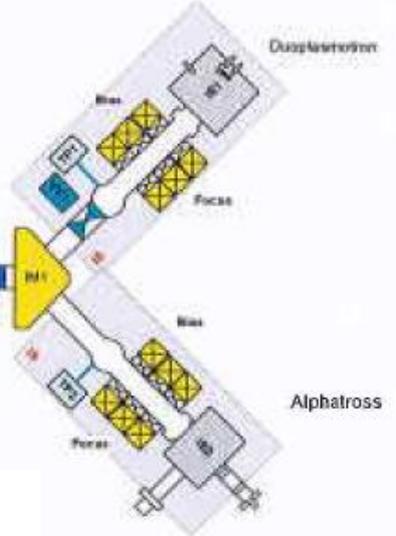
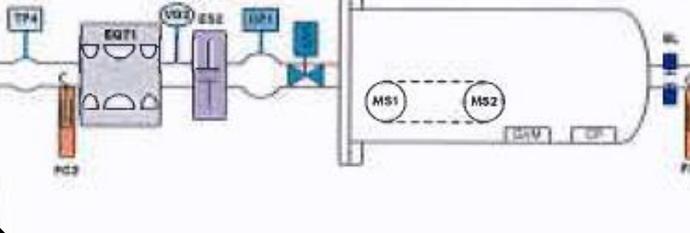
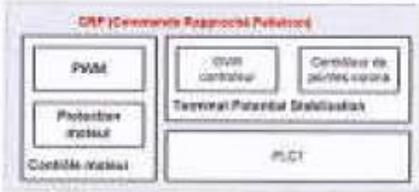
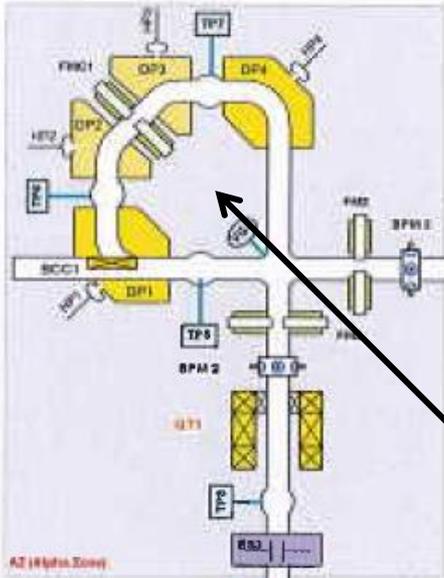
- Etude des œuvres « fragiles »
- Analyses par réactions nucléaires (NRA)
- Fonctionnement 24h/24

# Etat jusqu'en juillet 2016



$\mu$ BEAM  
Utilisateur  
10 $\mu$ m / 10nA

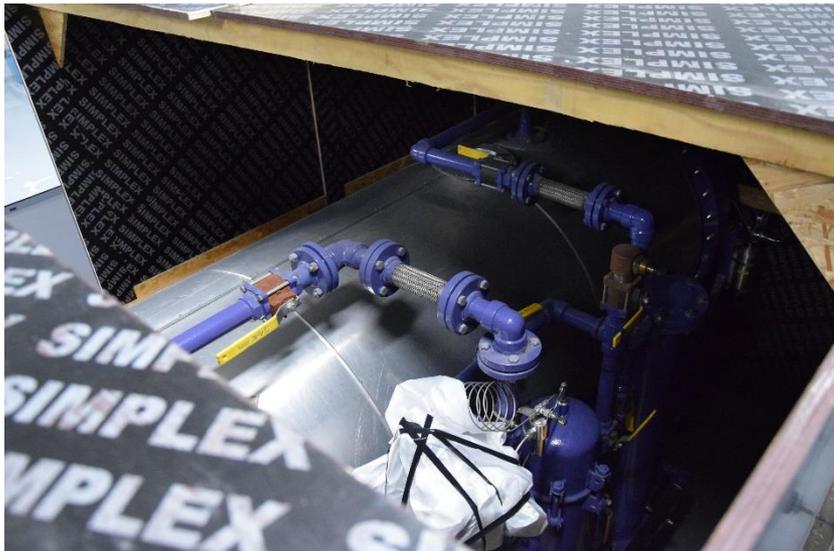




# Nouvel AGLAE

novembre 2017

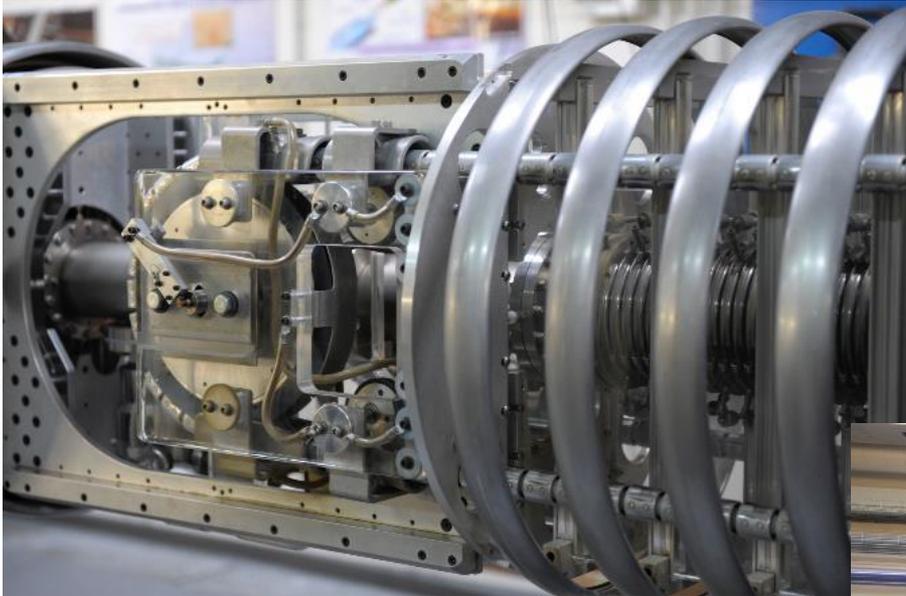
# Démantèlement AGLAE: état fin septembre 2016



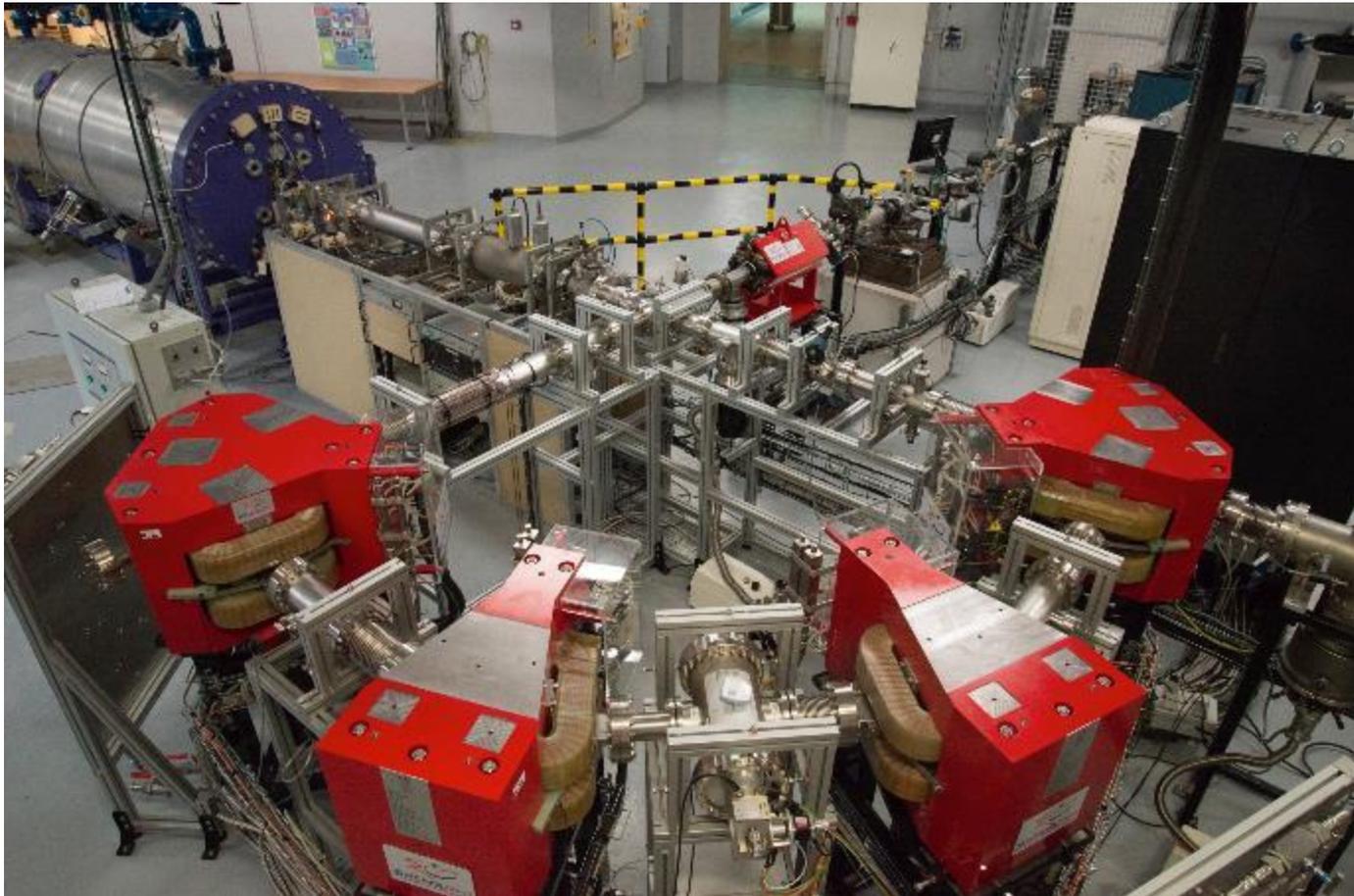
Travaux de la salle: octobre 2016-mars 2017  
Montage de la ligne: avril-septembre 2017



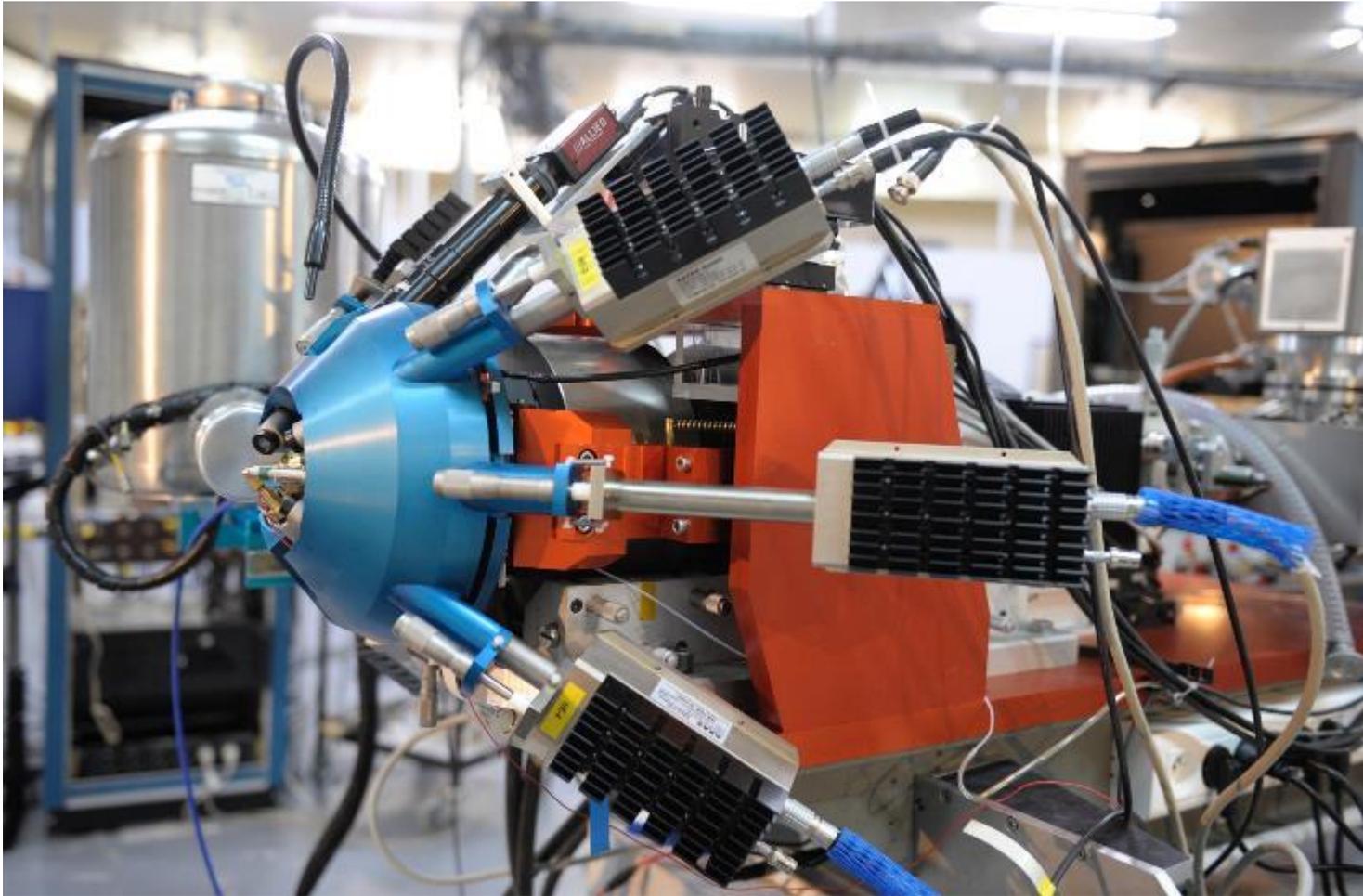
# Accélérateur en cours de modification



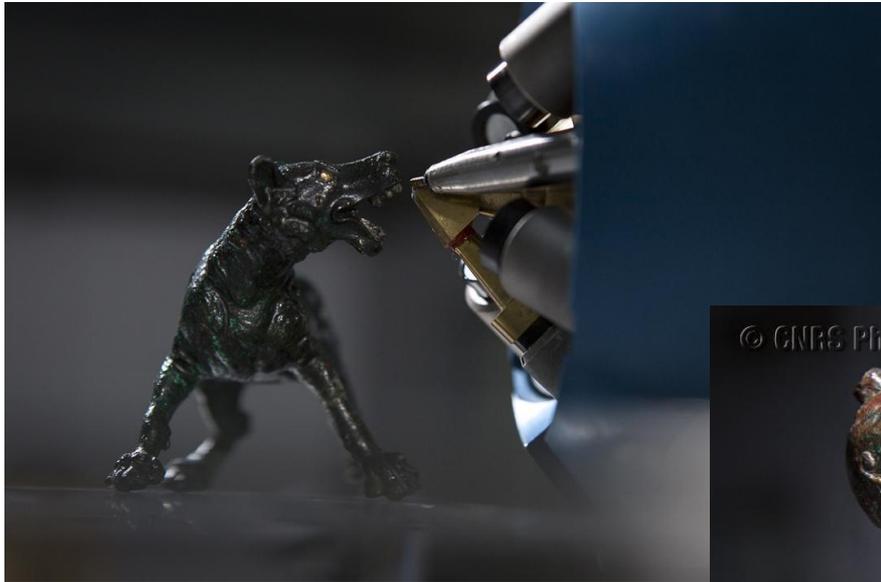
# Système de stabilisation du faisceau de particules



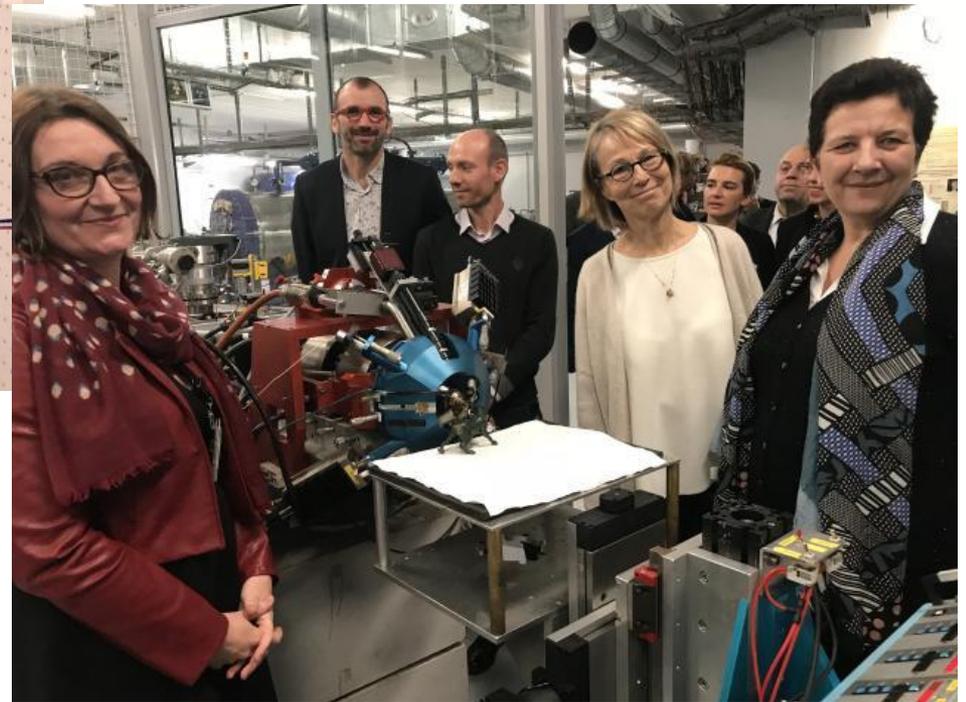
# Le « nez » d'AGLAE



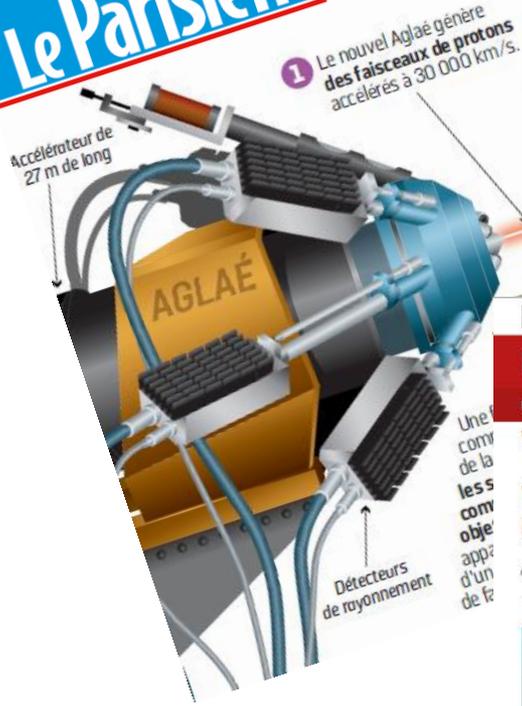
# 1<sup>ère</sup> analyse aux protons d'objets du trésor gallo-romain de Bavay **21/11/2017**



# Inauguration 23/11/2017



Le Parisien



## New AGLAE, l'accélérateur de particules dit parler les oeuvres d'art

Par Iris Joussea le 24.11.2017 à 12h29

Les objets du patrimoine culturel portent en eux des énigmes : d'où viennent les matériaux qui les constituent ? Quels sont leurs secrets de fabrication ? Comment les conserver et les restaurer ? L'accélérateur de particules New AGLAE est capable de fournir des éléments de réponse...



LE  
QUOTIDIEN  
DE L'ART

MARDI 28 NOVEMBRE 2017 NUMÉRO 1390

PARTENARIAT  
UN PROGRAMME  
COMMUN  
DE RESIDENCES  
À LA VILLA MEDICIS  
ET À LA CITÉ  
DE LA BD  
P. 3

UNE ŒUVRE DE BOTTICELLI  
SOUS LE MARTEAU  
À DROUOT  
VENTES PUBLIQUES

LE MUSEE D'ORSAY  
S'EXPORTE  
À SINGAPOUR  
IMPRESSIONNISME

L'ACCELERATEUR  
DE PARTICULES DU LOUVRE  
ENCORE PLUS PUISSANT  
CNRS

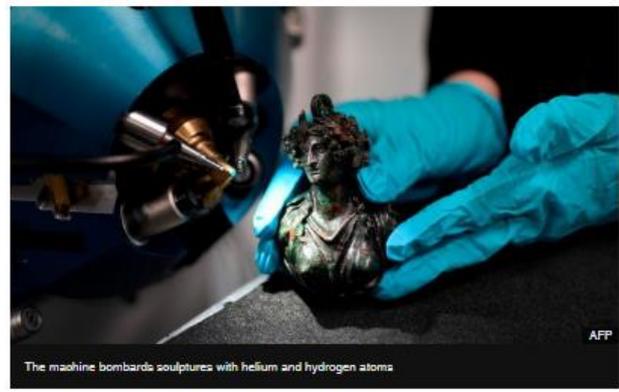
BBC Sign in News Sport Weather Shop Earth Travel More Search

NEWS Home Video World UK Business Tech Science Stories Entertainment & Arts Health World News TV More

World Africa Asia Australia Europe Latin America Middle East US & Canada

## World's only particle accelerator for art is back at the Louvre

23 November 2017 | Europe



The world's only particle accelerator used regularly in the analysis of art has gone back into use at the Louvre museum in Paris.

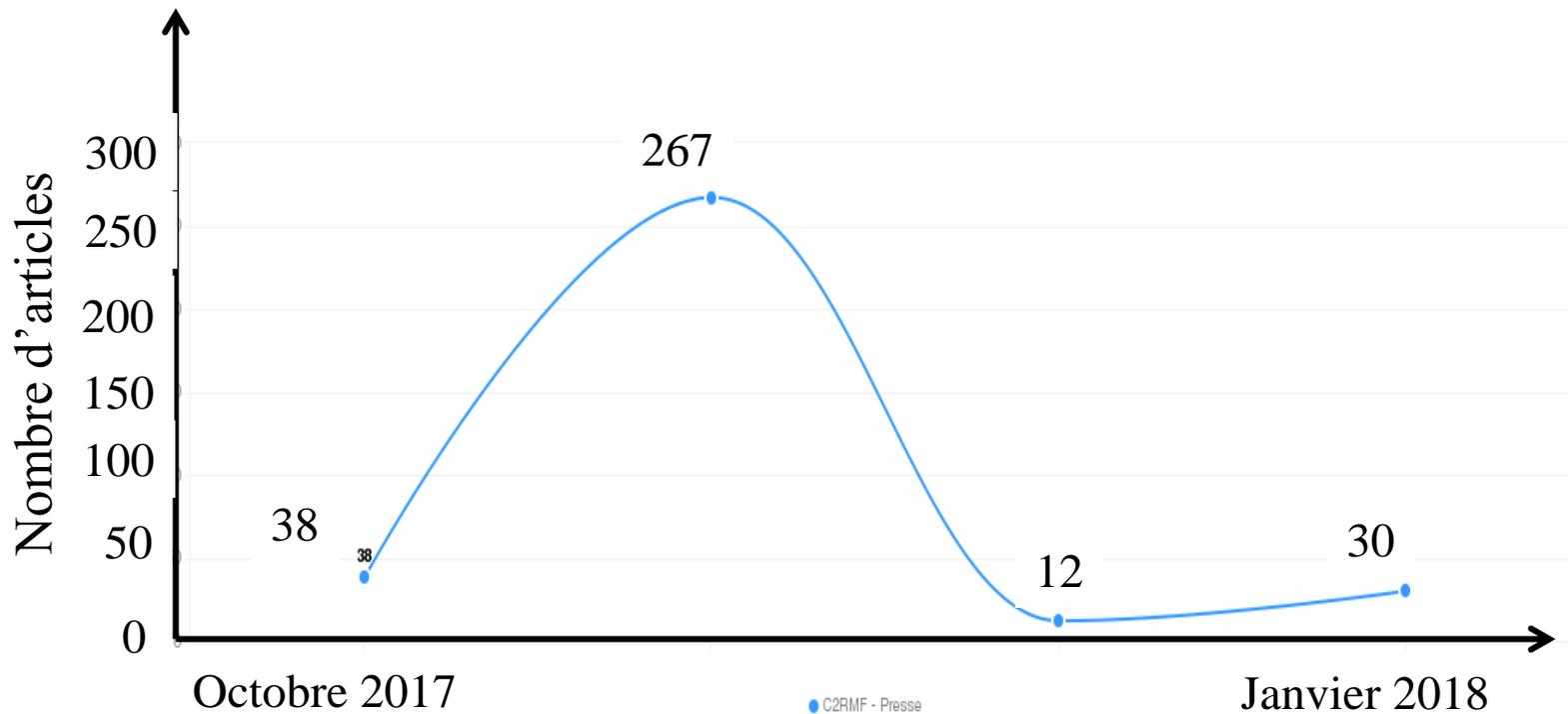
### Top Stories

- Kenyatta vows to overcome divisions**  
4 minutes ago
- German pro-refugee mayor stabbed**  
3 hours ago
- Irish deputy PM 'to resign' amid crisis**  
53 minutes ago

### Features

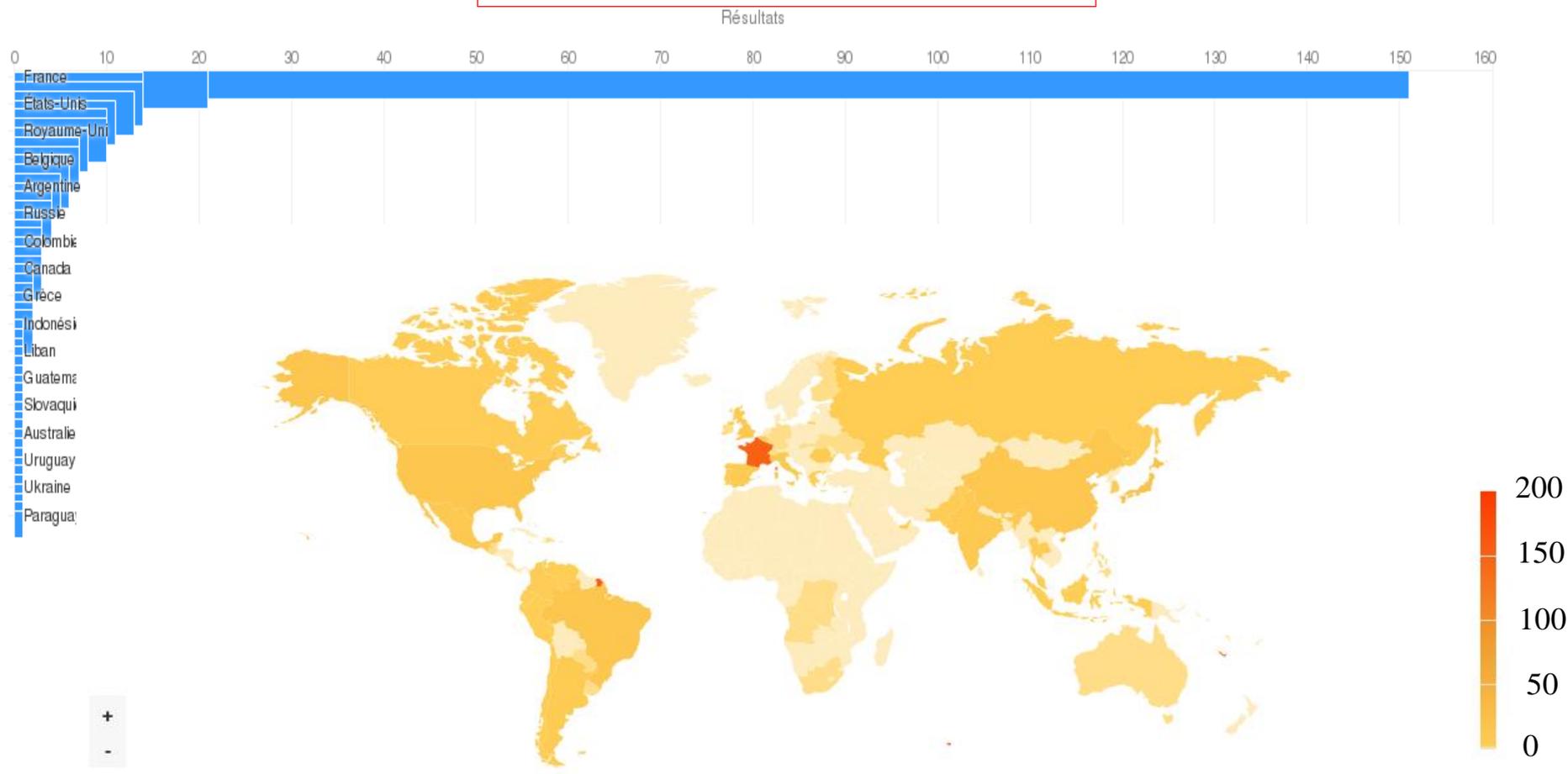


# Couverture médiatique



Source Meltwater

# Couverture médiatique



Source: Meltwater

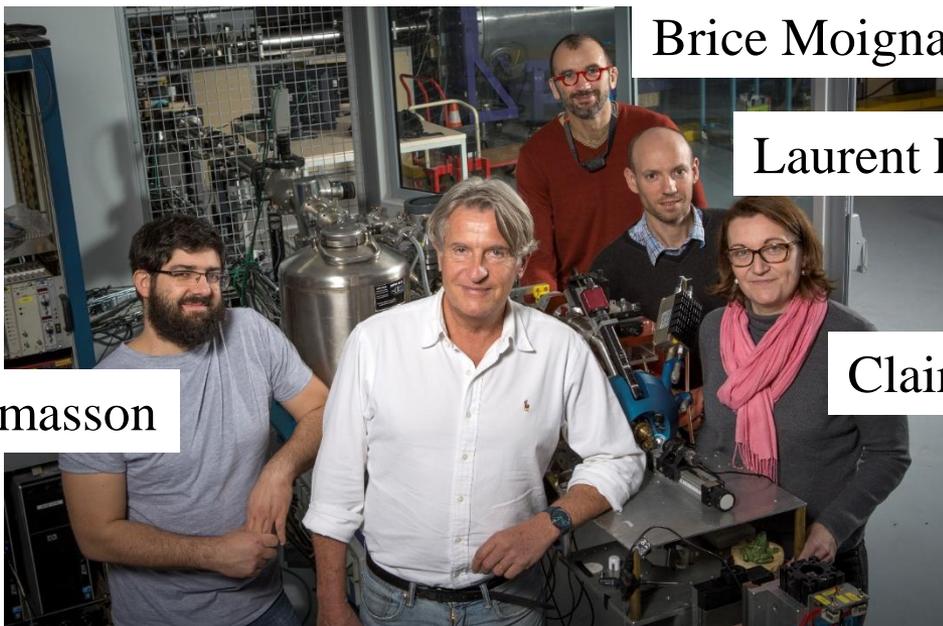


ParisTech

# Un grand merci à



Ina Reiche  
Michel Menu  
Thomas Calligaro  
Isabelle Biron  
Anne Bouquilon  
Philippe Walter



Brice Moignard

Laurent Pichon

Claire Pacheco

Quentin Lemasson



MERCI POUR VOTRE ATTENTION

