

AGLAE

UN ACCELERATEUR DE PARTICULES AU CHEVET DES OEUVRES D'ARTS



Quentin Lemasson

AGLAE – C2RMF, Palais du Louvre, Paris

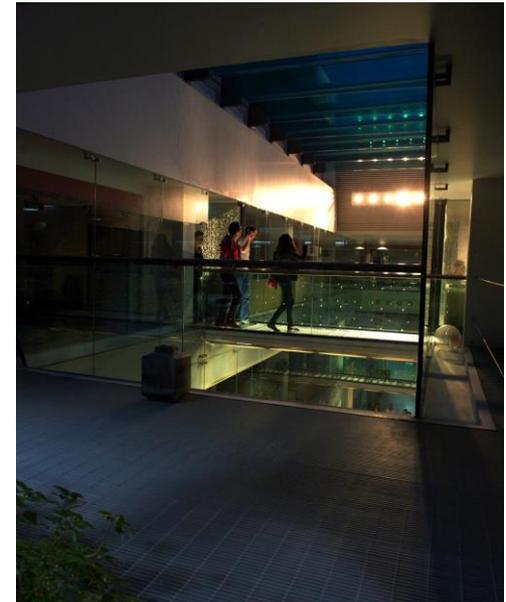
Contact: quentin.lemasson@culture.gouv.fr

Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France

Service à Compétence Nationale du Ministère de la Culture



© Vanessa Fournier / C2RMF



© Vanessa Fournier / C2RMF



© Vanessa Fournier / C2RMF

12 000 m² d'espaces répartis
sur 3 sites patrimoniaux :

- Pavillon de Flore et laboratoire au Palais du Louvre
- Petites écuries du Roi au château de Versailles)

Objectifs et rôle du C2RMF

- Analyses de diagnostic (études courtes)
 - Acquisition (authentification)
 - Restauration
 - Exposition
- Recherches à long terme
 - Archéométrie : études sur les techniques anciennes et les origines
 - Science de la conservation
 - Conservation préventive : investigation sur les procédés d'altération
- Publications et enseignement

Agents des filières
administratives
et techniques



Ingénieurs de recherche
Ingénieurs d'étude
Assistants ingénieurs,
Techniciens de recherche

Chefs des travaux d'art
Techniciens d'art

155 agents

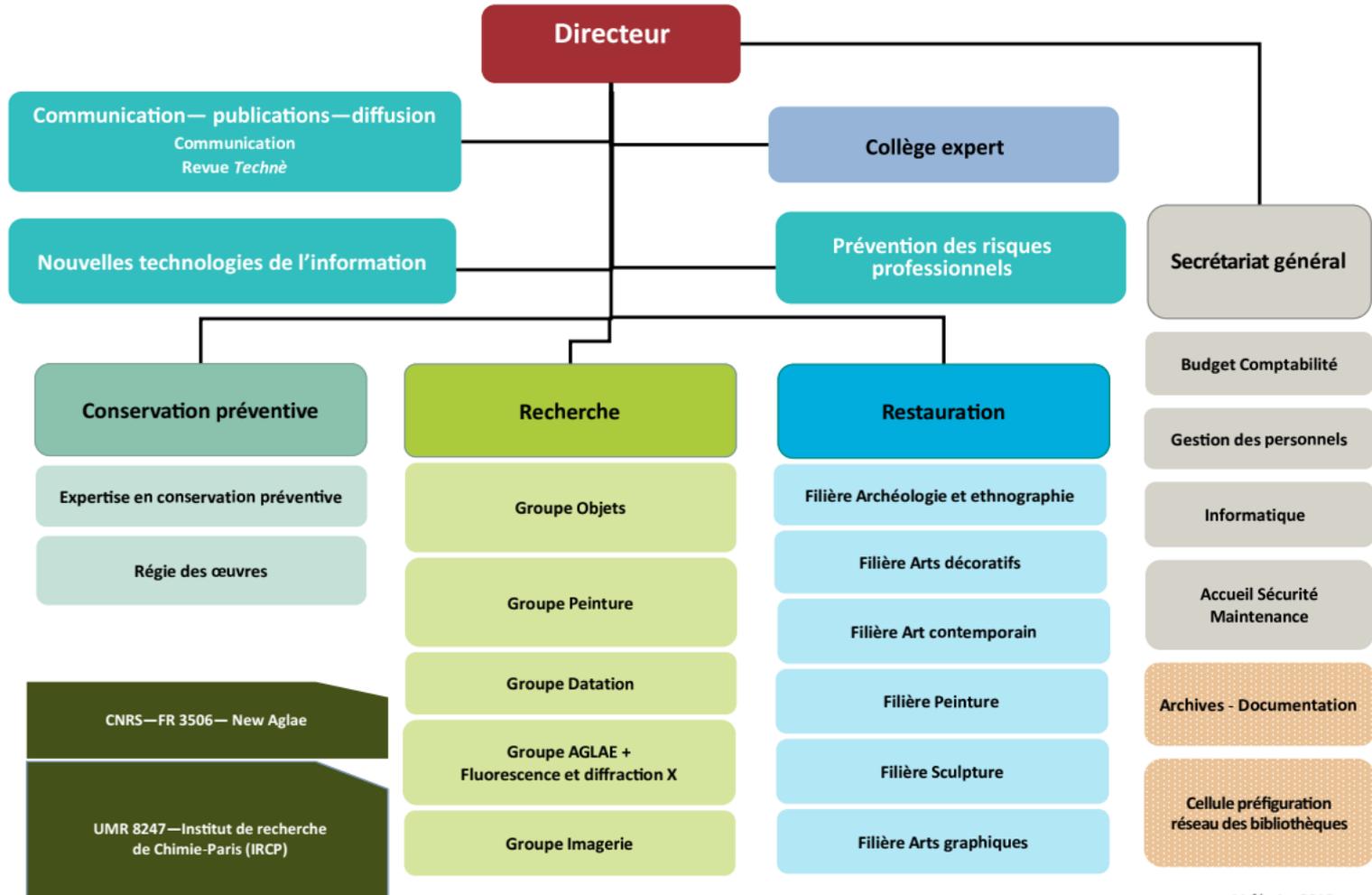


Conservateurs

Chargés d'études
documentaires



Organisation du C2RMF



Les rayonnements ionisants au C2RMF

Pourquoi?

Identification des matériaux et des techniques

Fluorescence X

Diffraction X

MEB

Analyses par faisceau d'ions

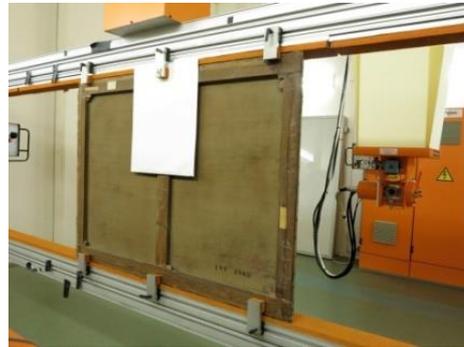


Etude des structures

Radiographie X

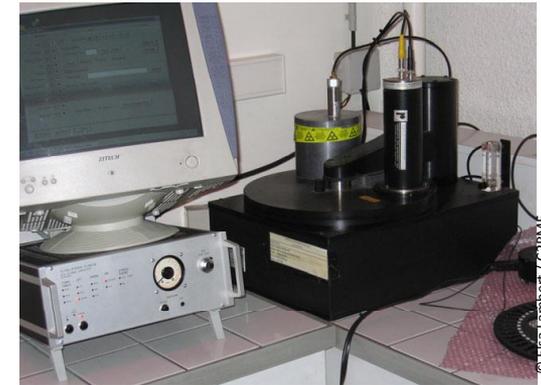
Tomographie X

Gammagraphie (CEA)



Datation

Thermoluminescence



Autorisation 2016 :

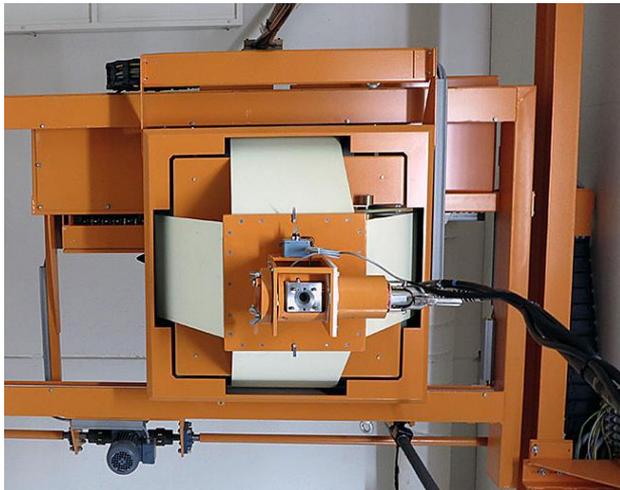
- 10 générateurs X
- 3 appareils contenant des sources
- 10 sources scellées
- 1 accélérateur de particules

Radiographie et tomographie

Postes fixes : 160kV et 420kV



© Elsa Lambert / C2RMF



© Elsa Lambert / C2RMF

Poste mobile : 200kV



© Elsa Lambert / C2RMF

PROBLÉMATIQUES

- Conservation
- Fabrication
- Assemblage

Radiographie



© Elsa Lambert / C2RMF



© Elsa Lambert / C2RMF

L'homme blessé, 1854, G.Courbet, Musée d'Orsay



© Elsa Lambert / C2RMF



© Elsa Lambert / C2RMF

Maquette de la Statue équestre d'Emmanuel-Philibert de Savoie, 1666, C.Marochetti, Musée du Louvre

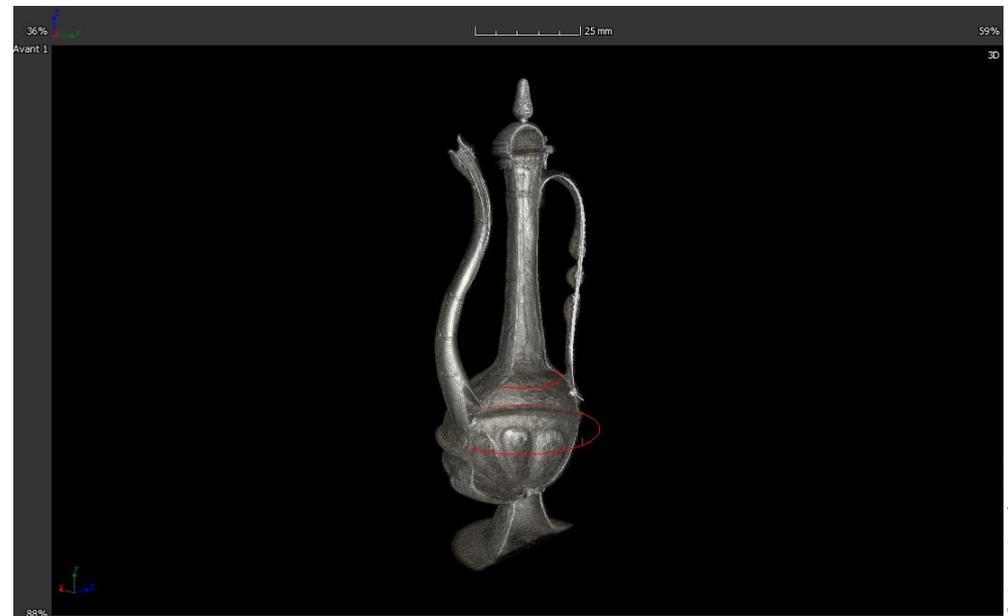
Tomographie

PRINCIPE

- Dispositif tube / objet / capteur numérique
- Rotation de l'objet sur 360°
- Acquisition d'une projection tous les $\frac{1}{2}$ degrés soit 720 images
- Reconstruction des images pour obtenir un volume en 3D

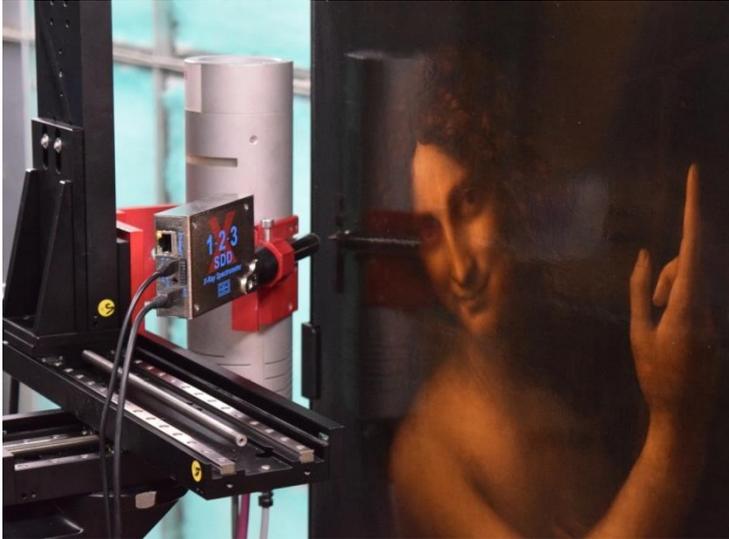


© Elsa Lambert / CZRMF



© Elsa Lambert / CZRMF

Fluorescence X



Saint Jean Baptiste (1513-1516)

Léonard de Vinci, Musée du Louvre

Fe -> Ocre ou terre

Pb -> Blanc de plomb $PbCO_3$

Hg -> Cinabre HgS

Cu -> Pigment inconnu

APPAREILLAGE

Générateur de rayons X

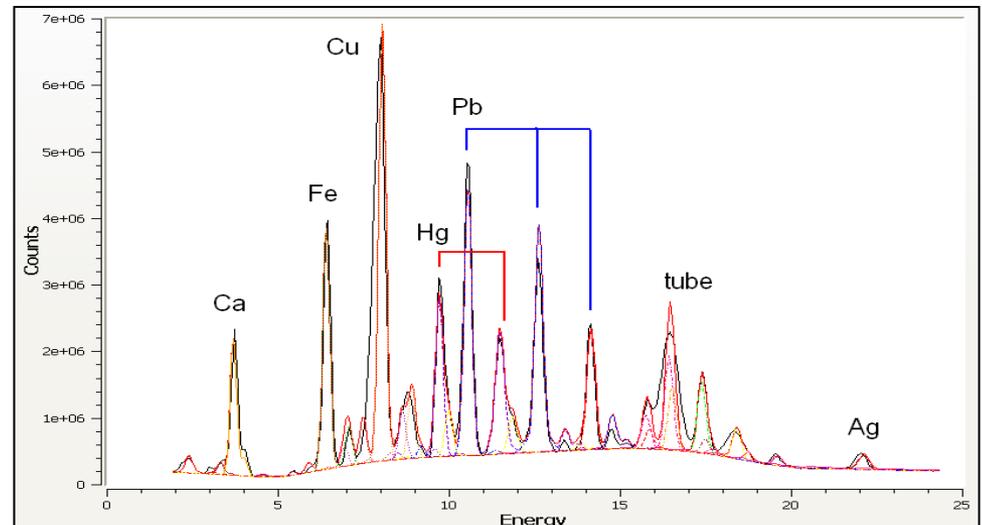
40 kV tube Mo 1 mA

Ø collimateur de 0.6 mm

Platine motorisée

Pas 0.5 mm

2 x 8 h total

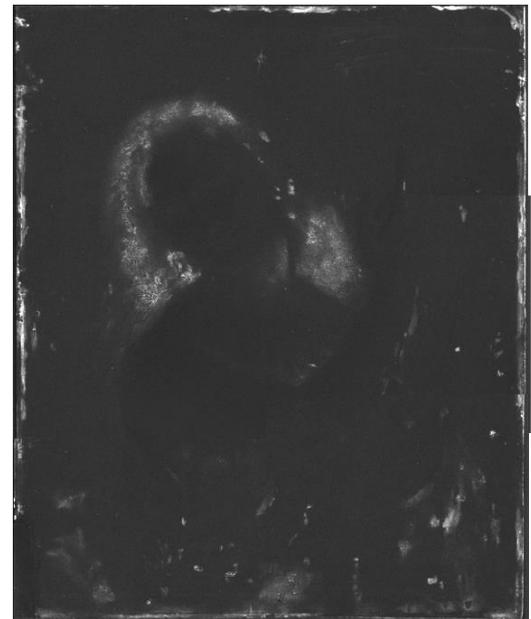




1991 - Paris, musée du Louvre, INV 775AR 318 - LEONARDO DA VINCI (1452-1519), Saint-Jean-Baptiste - Peinture sur bois © L'ORMF Jean-Louis Béné
162-BEJ2092, vue d'ensemble sous lumière blanche par réflexion impression en couleurs-2/11/2008



Plomb



Cuivre



Fer



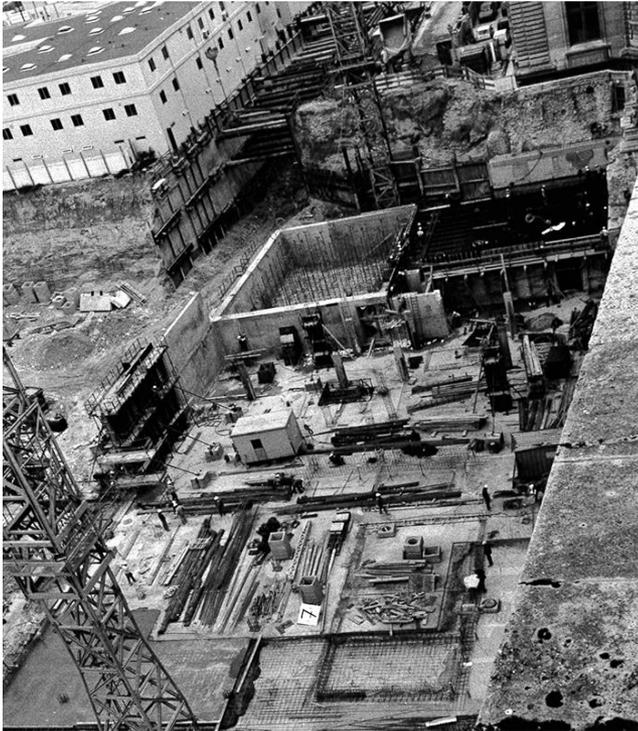
Manganèse



Mercure



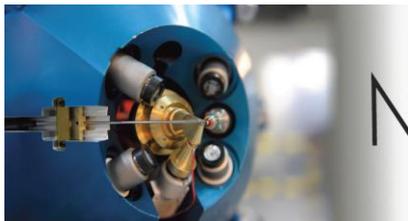
Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Elémentaire



© Archives / C2RMF



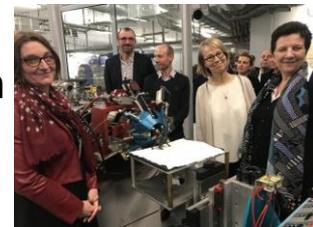
1988: AGLAE dans les sous-sols du Palais du Louvre



NewAGLAE

2012-2017 : Equipex New AGLAE (ANR-10-EQPX-22)

- Automatisation de la ligne
- Amélioration de capacité de détection
- Mise aux normes de la salle



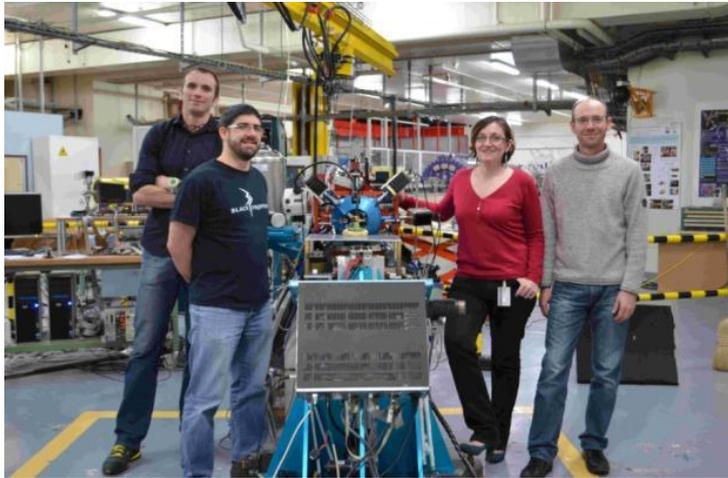
Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Elémentaire



© Christophe HARGOUES / C2RMF / AGLAE / CNRS Photothèque

Unique car :

- Localisation stratégique
- 100% dédié à l'étude d'objets du patrimoine
- Compilation de données sur 25 ans
- Développement instrumental et méthodologique pour des problématiques spécifiques du patrimoine et aux contraintes d'objets de musées



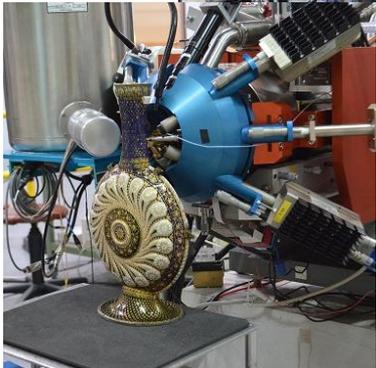
Accélérateur Grand Louvre d'Analyse Elémentaire

CARACTÉRISTIQUES :

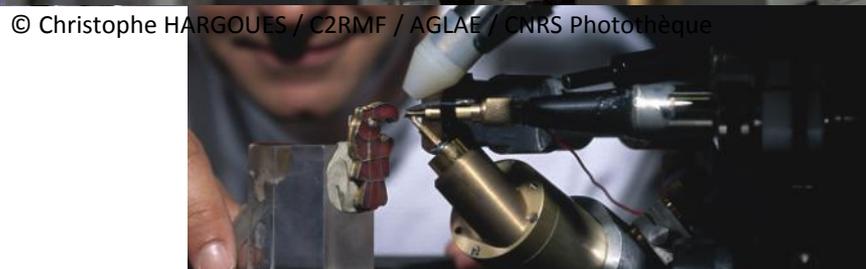
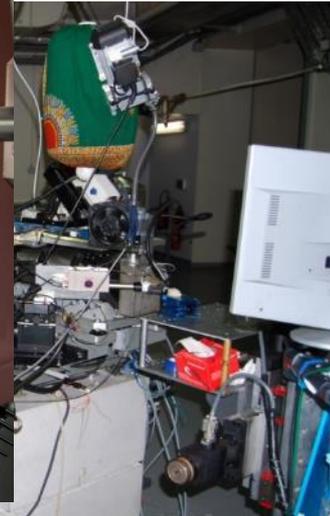
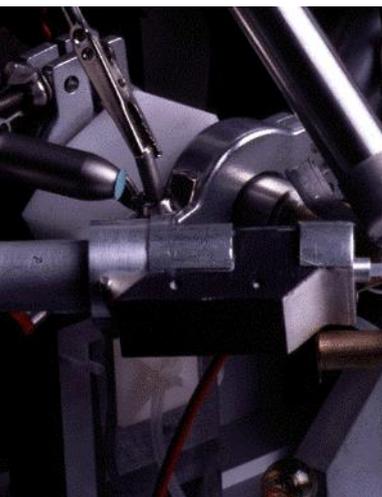
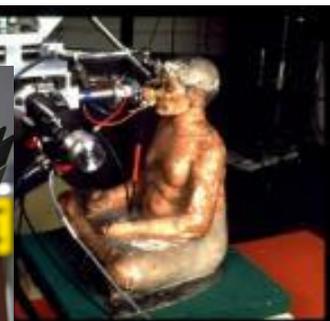
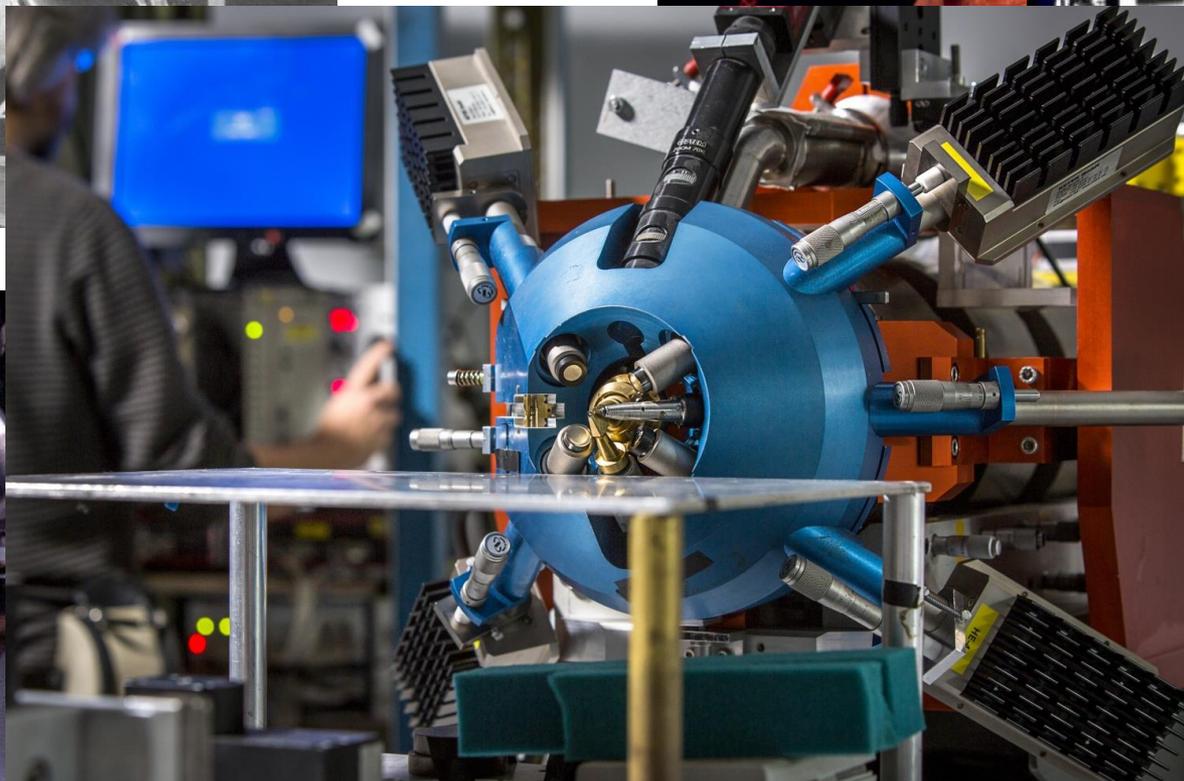
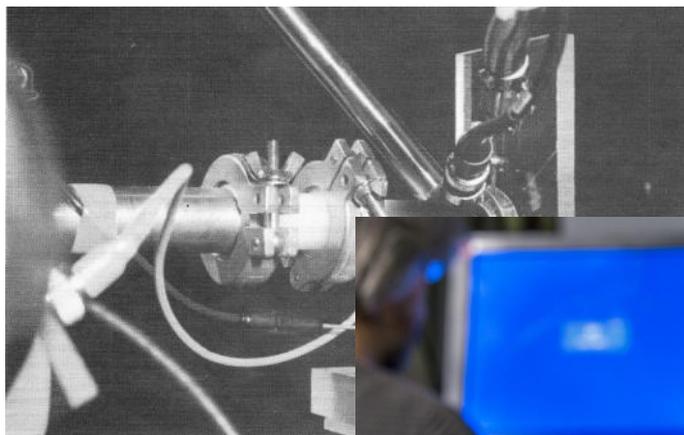
Accélérateur Van de Graaff tandem de 2MV
2 sources pour 3 types de particules
(protons, alphas et deutons)

FAISCEAU EXTRAIT APPLIQUÉ À L'ÉTUDE DU PATRIMOINE :

- analyse d'objets de n'importe quelle taille et forme sans prélèvement
- pas de dégradation lié à la mise sous vide (déshydratation, dégazage,...)
- pas de préparation d'échantillon
- simplification du changement d'échantillon et de son positionnement



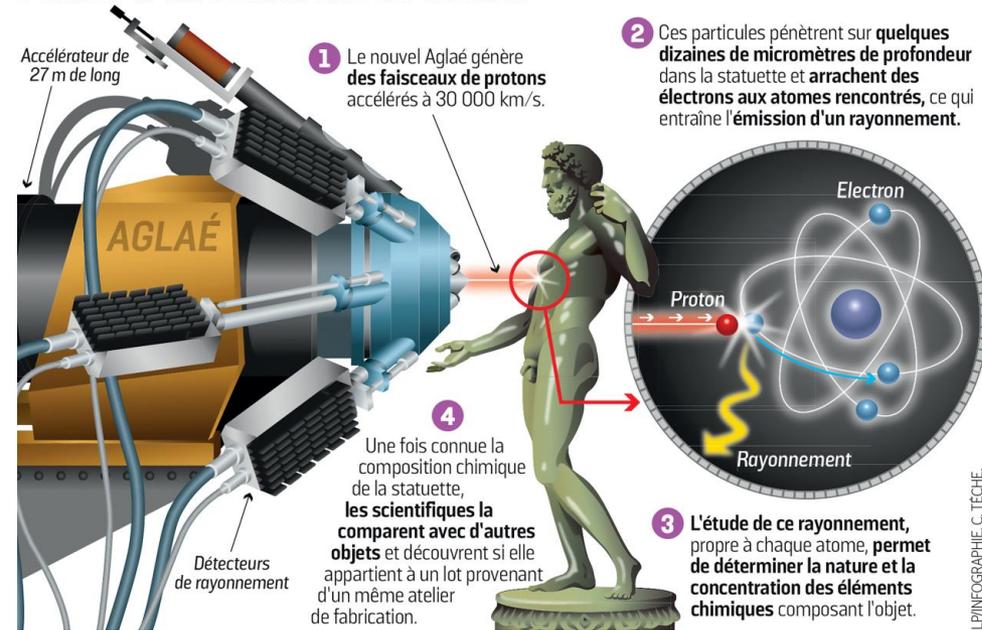
Evolution du système de détection depuis 1990



© Christophe HARGOUES / C2RMF / AGLAE / CNRS Photothèque

Principe de fonctionnement

L'étude d'une statuette de bronze



INTERACTIONS AVEC LA MATIÈRE :

PIXE: particle induced X-ray emission

PIGE: particle induced gamma ray emission

RBS: Rutherford Backscattering spectroscopy

IL: ionoluminescence

NRA: nuclear reaction analysis

Quelles informations récupère-t-on ?

- La composition élémentaire quantitative de tous les éléments du sodium à l'uranium (avec une sensibilité de l'ordre de quelques ppm)
- La quantification des éléments légers telles le bore, le fluor, le béryllium, le lithium
- Des informations sur la répartition en profondeur des éléments
- Des informations sur la structure minérale des matériaux

A quoi sert AGLAE ?

- Donner des éléments de réponse aux questions de sciences des matériaux qui s'insèrent dans une problématique de SHS plus générale.
- SHS: une meilleure compréhension des sociétés et de leurs interactions dans des contextes géo-chronologiques bien définis.
 - De quand ça date ? → *ateliers, centres de production...*
 - Comment ça a été fait ? → *procédés de fabrication et histoire des techniques*
 - D'où ça vient ? → *provenance, routes commerciales,...*
- Science de la conservation
 - Est-ce un faux ? → *authentification*
 - Pourquoi est-ce altéré/corrodé ? → *mécanismes de dégradation*

Paravent de Yoshida

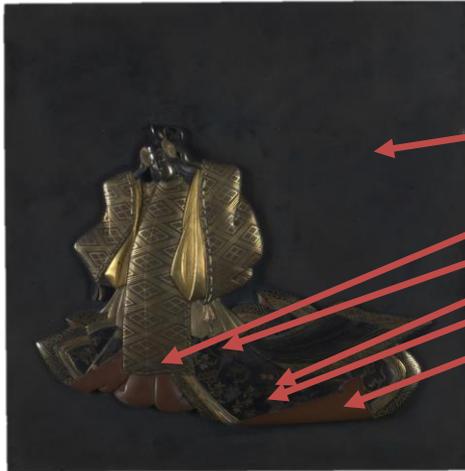


Paravent japonais présenté à l'Exposition
Universelle de Paris de 1878
Attribué à un artiste appelé Yoshida
Représentatif des techniques d'artisanat
japonais ayant inspirées le mouvement
du japonisme
Collection du musée des Arts Décoratifs

Identifier les artistes

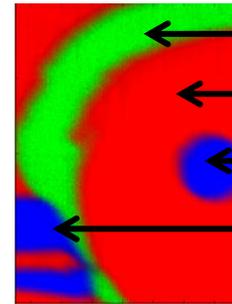
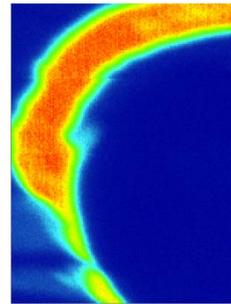
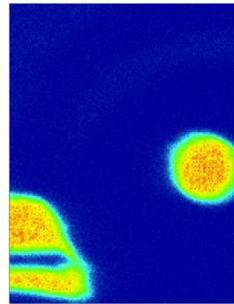
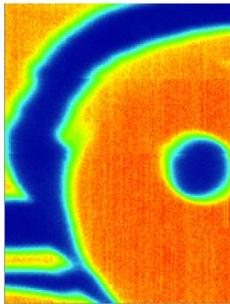
Documenter les techniques

Paravent de Yoshida



1
2
3
4
5
6

Analyse PIXE du 6 ^{ème} panneau						
	Lieu	Cu (%)	Ag (%)	Au (%)	Traces	Alliage
1	Fond patiné	95.8	0.58	2.88	As (3800)	Shakudo
2	Fond brun	32.2	14.1	52.6	As (4200), Pd (2100)	Multicouche?
3	Oiseau (rouge)	97.3	2.05	0.3	Pb (1100)	Suaka
4	Or pale	0.33	33.8	65.6		
4 bis	Or jaune	1.23	0.84	97.2	As (260)	Kin
5	Oiseau (argent)	0.98	98	0.44	Pb (4700)	Gin
6	Fond fauve	99.6	0.039	< 0.0081	Co (180), Pb (1900), Sb (810)	Suaka
6 bis	Fond fauve	95.1	1.59	2.43	As (380), Sb (960)	Suaka?



← Cu 5,29% Ag 93,7% Au 0,45%
 ← Cu 97,3% Ag 1,27% Au 1,14%
 ← Cu 9,75% Ag 0,91% Au 87,8%
 ← Cu 6,19% Ag 5,24% Au 87,0%

2 mm

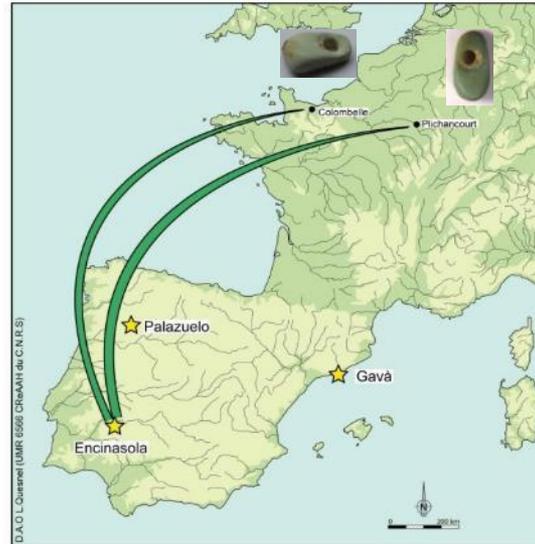
Cu

Au

Ag

Rouge Cu
 Bleu Au
 Vert Ag

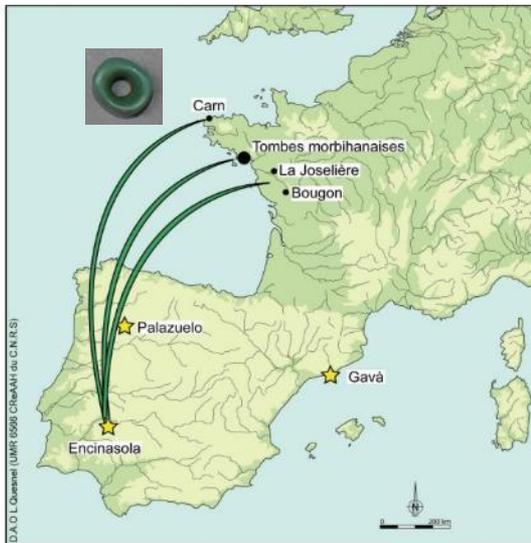
Evolution de la provenance de la variscite de l'ouest de la France au cours du Néolithique



5 000 – 4 800 av. J.C.



4 700 – 4 300 av. J.C.



4 300 – 4 000 av. J.C.



4 000 – 3 800 av. J.C.



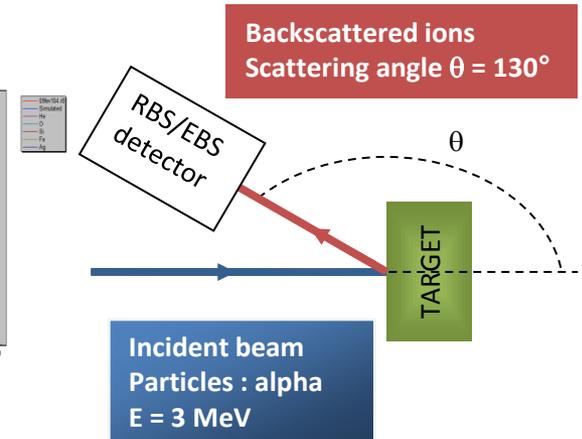
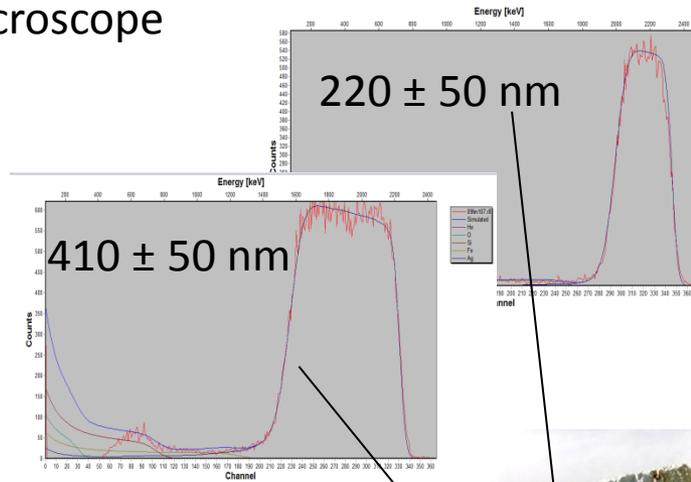
3 500 – 3 300 av. J.C.

Etude de dorures

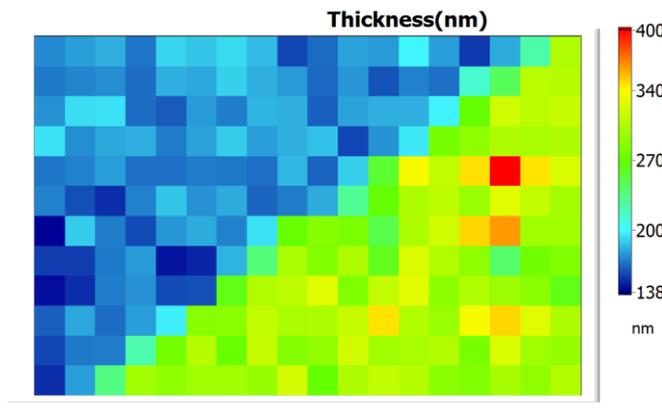
Modèle simple = feuille d'argent pliée sur une lame de microscope



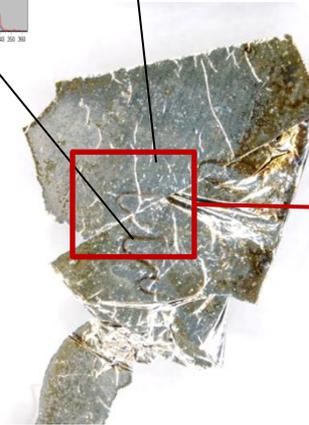
Berta Battiloro - Venise



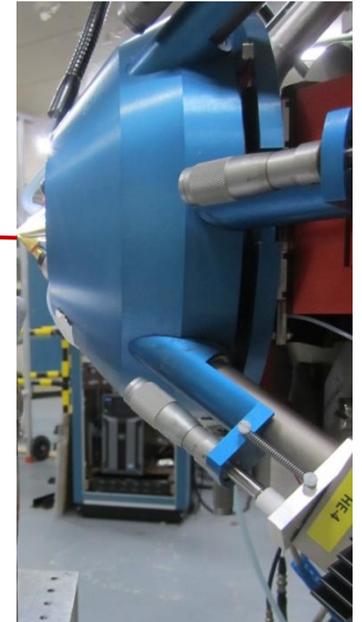
Thickness
(nm)



Projection de la cartographie de l'épaisseur d'argent en nm attendue



2 x 3 cm²



Radioprotection

2 conseillers en radioprotection :

- Antoine Zink : générateurs X et sources scellées (IR, 20%)
- Quentin Lemasson : accélérateur de particules (IE, 10%)

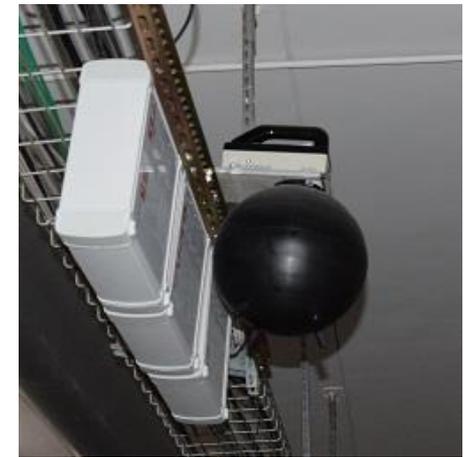
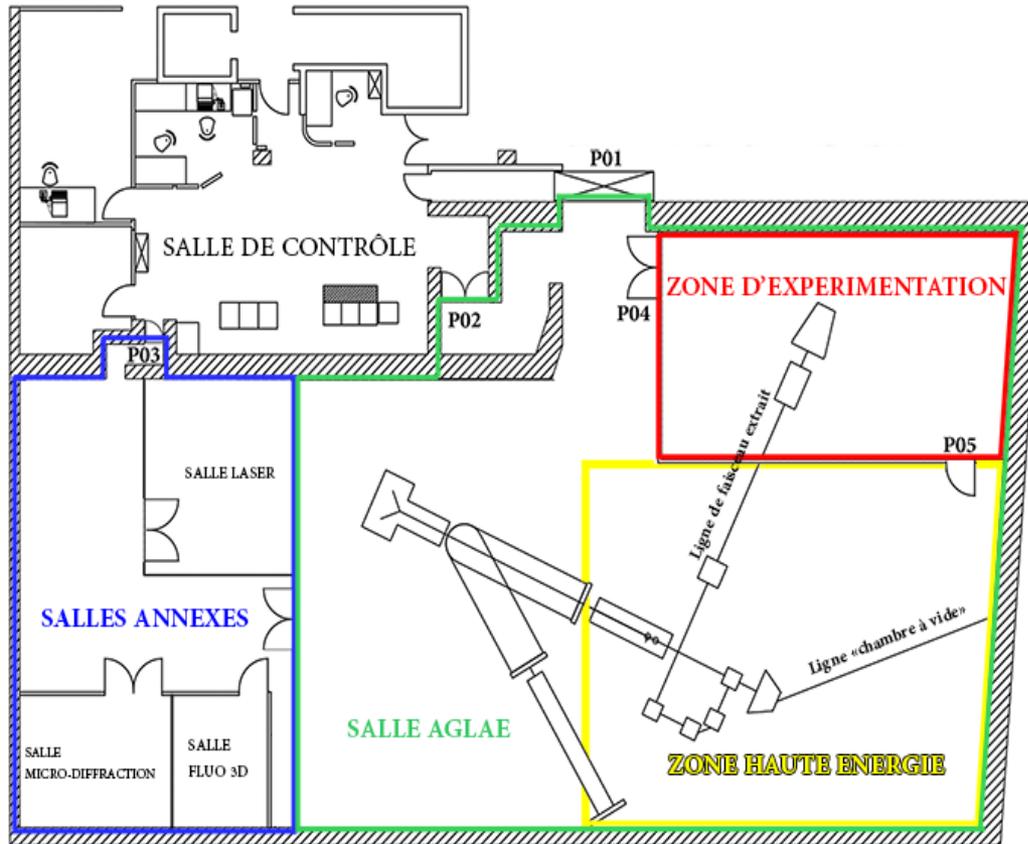
Pour l'accélérateur :

- Appareil soumis à autorisation
- Norme NF M62-105
- Contrôles internes semestriels
- Contrôles externes annuels

Types d'émissions :

- Particules chargées (protons, deutons, alphas)
- Rayonnements X et γ
- Neutrons
- Emissions tertiaires par activation neutronique avec les deutons

Mesures d'ambiance



Dosimétrie passive : dosimètre RPL + neutrons le long de la ligne

Quelques chiffres

Contrôle des rayonnements de fuite de l'équipement – conteneur – installation		H*(10) à 50cm					
Faisceau jusqu'à cible		Résultats en µSv/h (Wendi-2)					
Ligne micro-faisceau extrait		Protons 3 MeV			Deutons 3 MeV		
Point de mesure	Emplacement	Gamma	Neutrons	Obs.	Gamma	Neutrons	Obs.
1	CF 1 : 2µA / 0,8µA	0,06	0,00		0,17	0,32	
2	Cuve	0,07	0,09		3,00	85,4	

Dans le faisceau...

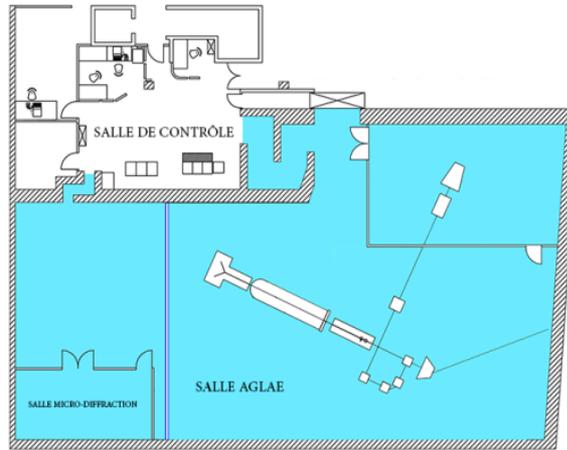
Non mesuré mais le calcul donne plus de 10^{10} Gy/s

6	Fentes objet	0,47	9,36		8,64	90,7	
7	CF3 : 170nA /	0,07	0,21				
8							
9							
9 bis	Nez (CF3 ouverte, cible Au)	0,15	0,11				
10	Porte P04	0,10	1,02				
11	Salle de contrôle	0,07	0,00		0,09	0,08	
12	Porte P01				0,08	0,00	
13	Escaliers de service				0,10	0,00	
14	Salle Raman				0,18	0,00	
15	Salle Microtopo				0,00	0,06	
	Salle Laser				0,32	1,37	

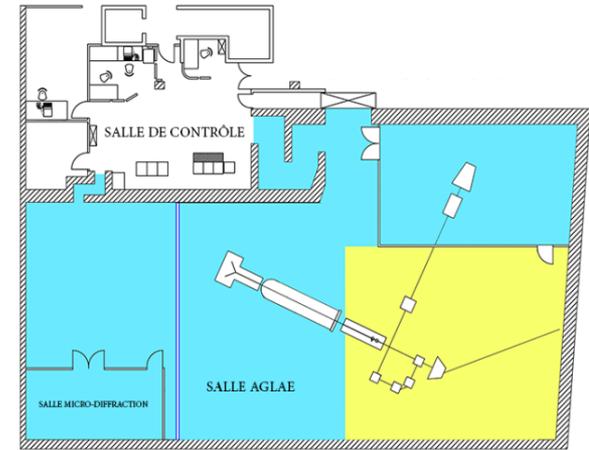
Avec des deutons...

Fort flux neutronique

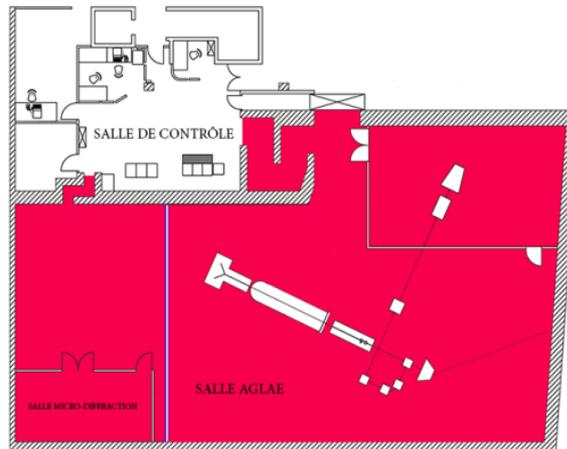
Zonage intermittent



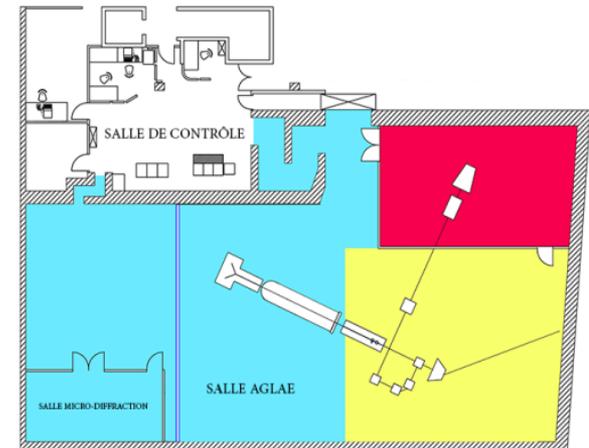
Machine éteinte
ou particules non accélérées



Protons ou alphas accélérés



Deutons accélérés



Protons ou alphas extraits

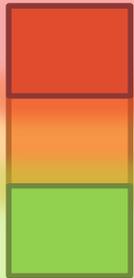
Signalisation à AGLAE



Signalisation à AGLAE



Feux tricolores



Machine allumée - Faisceau accéléré

Machine allumée - Faisceau non accéléré

Machine éteinte

Feu neutrons



Balise au dessus du seuil

Balise sous le seuil



Présence anormale
de neutrons

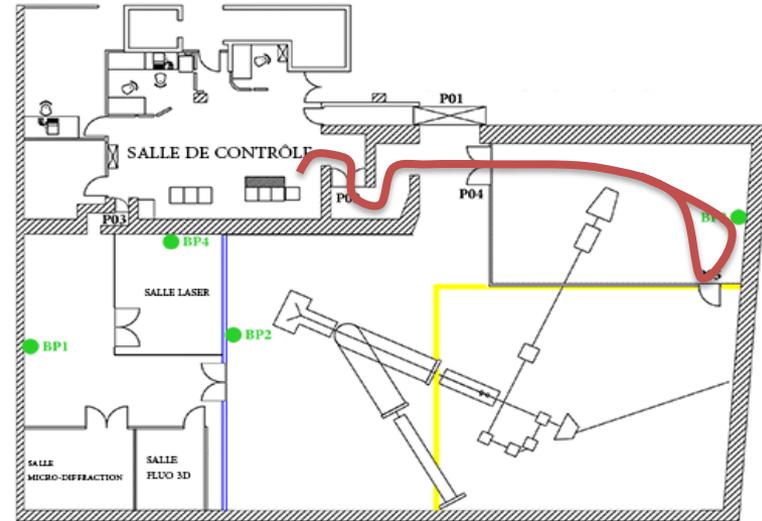
Procédures de mise en route



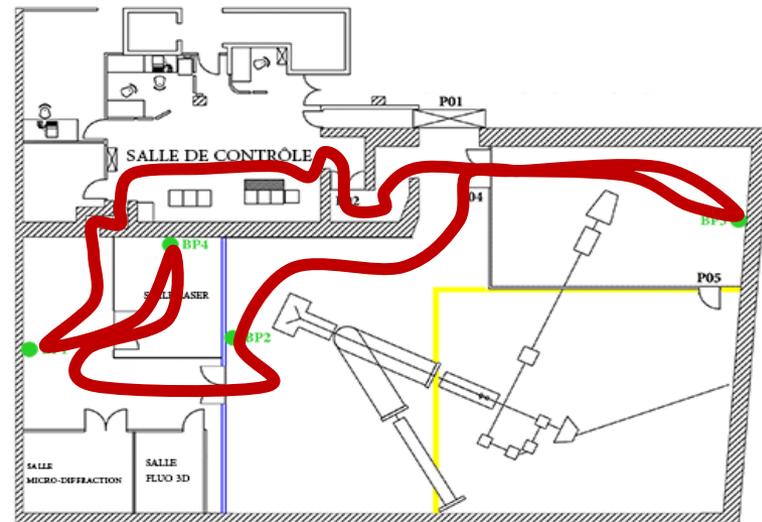
Rondes avec clés prisonnières

Faisceau asservi :

- aux clés
- aux contacteurs de porte



Protons ou alphas



Deutons

Etudes de poste

	Utilisateur	Opérateur
Type d'exposition	$\alpha - \gamma - X - n - p - d$	$\alpha - \gamma - X - n - p - d$
Débit de dose max	$< 2 \mu\text{Sv/h}$	$100 \mu\text{Sv/h max}$
Contamination interne	Non	Non
Contamination externe	Non	Non
Classement	Non classé	B
Suivi dosimétrique	Non	Trimestriel Corps entier + bague + dosimètre opérationnel
Objectif de dose	$< 1\text{mSv}$	$< 1\text{mSv}$

Remerciements



C2RMF :

- Elsa Lambert
- Eric Laval
- Dominique Robcis
- Vanessa Fournier
- Thomas Calligaro
- Claire Pacheco



IRSN :

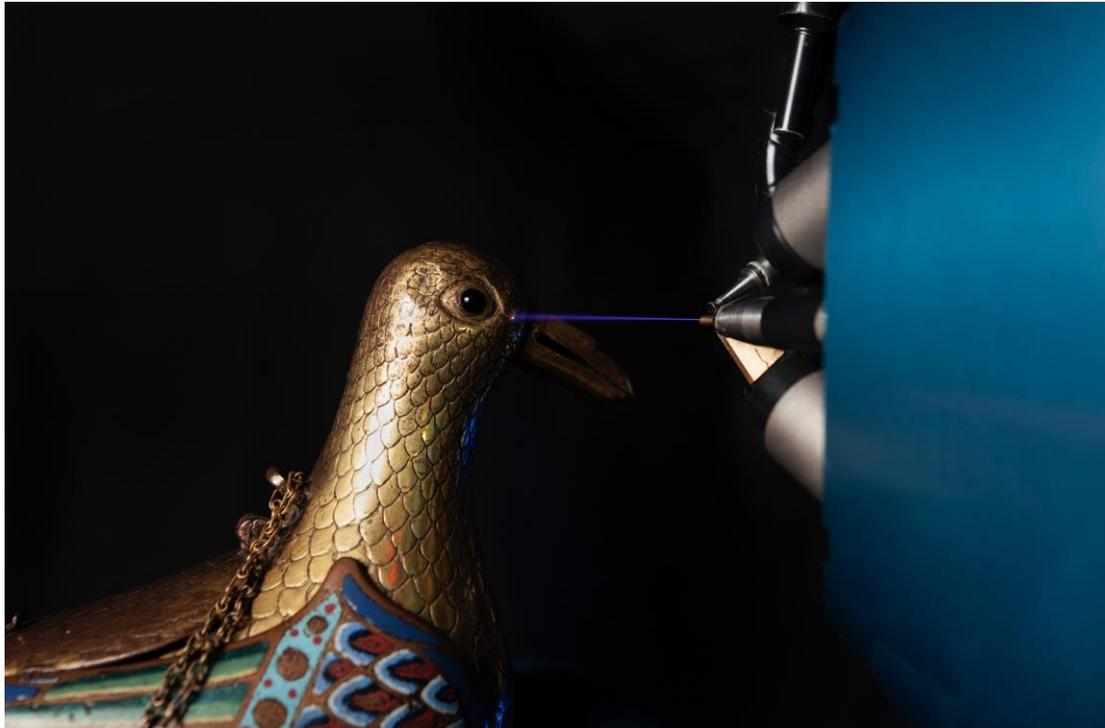
- Sophie Vecchiola
- Valérie Chambrette



CReAAH :

- Guirec Querré

Merci pour votre attention



© Vanessa Fourmier / C2RMF