



## Fiche de poste Ingénieur de Recherche



# MONIONS

**Mon**itorage des matériaux patrimoniaux fragiles en analyse par faisceau d'**ions**

### Informations générales

Lieu de travail : Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France - C2RMF - 75001 Paris

Type de contrat : CDI de chantier / Ingénieur de recherche (recrutement fait par la Fondation des sciences du patrimoine).

Durée du contrat : 12 mois

Date d'embauche prévue : mars 2025

Quotité de travail : Temps complet

Rémunération : entre 2 300 € et 2500 € bruts mensuels (selon profil du candidat retenu)

Niveau d'études souhaité : Doctorat, Diplôme d'ingénieur

Expérience souhaitée : caractérisation des matériaux des œuvres patrimoniales

Candidature ouverte du 17/02/2025 au 03/03/2025

Envoyer CV et lettre de motivation à Dr Thomas Calligaro - [thomas.calligaro@culture.gouv.fr](mailto:thomas.calligaro@culture.gouv.fr)

### Contexte

L'impact des faisceaux intenses des grands instruments employés pour analyser les matériaux du patrimoine font l'objet d'une préoccupation croissante, du fait des possibles biais analytiques induits et des conséquences potentiellement préjudiciables sur les œuvres étudiées. Au cours de la dernière décennie, ces considérations ont motivé le développement de stratégies d'analyses non-vulnérantes, qui respectent l'intégrité des œuvres d'art et des objets archéologiques et qui n'hypothèquent pas leur conservation à long terme.

Les points clés de ces stratégies sont les suivants :

- **Identifier** les matériaux à risque
- **Comprendre** les mécanismes de modification
- **Déterminer** des seuils d'exposition maximum
- **Minimiser** l'exposition au faisceau d'ions
- **Optimiser** les conditions d'analyse et maximaliser la détection
- **Adapter** le traitement à des données frugales
- **Surveiller** en permanence l'objet sous faisceau

Le programme **MONIONS** consiste à développer et à implémenter de nouvelles stratégies garantissant l'innocuité des analyses par faisceaux d'ions, notamment à l'aide de nouvelles techniques de monitoring en temps-réel. Ces méthodes de surveillance en temps-réel ont pour but d'alerter et de prévenir d'une possible modification des matériaux, d'éviter d'acquiescer des résultats analytiques biaisés ou d'induire des effets retardés à cinétique lente. Ces nouvelles stratégies seront mises en œuvre dans la ligne de faisceau PIXXL de l'accélérateur AGLAE développée dans le cadre de l'EquipEx+ ESPADON (lot de travail numéro 2).

**MONIONS** se décline en trois phases :

**Phase 1.** Compréhension fondamentale des mécanismes d'interaction entre le faisceau d'ions et les matériaux fragiles et détermination pratique des seuils d'innocuité. Développement d'un outil de simulation permettant de prédire en temps réel le niveau d'exposition au cours de l'analyse. Détermination des seuils d'innocuité des matériaux sensibles à l'exposition au faisceau, notamment la matière picturale.

**Phase 2.** Sélection des méthodes permettant de détecter les prémices des modifications, en fonction de leur sensibilité, rapidité et facilité d'implémentation dans le dispositif d'analyse (ligne de faisceau extrait). Les moniteurs exploitent des capteurs chimiques (émission de gaz), optiques (modification de réflectance) et thermique (élévation de la température au point d'impact).

***Les phases 1 et 2 ont été traitées dans le cadre d'un premier contrat MONIONS financé sur les ressources propres de l'UAR 3506 Lab-BC.***

**Phase 3.** Elle concerne directement le présent contrat MONIONS financé par la FSP. Il vise deux objectifs. 1) finalisation du choix des moniteurs entamé dans la phase 2 et intégration dans la ligne de faisceau PIXXL. Ces moniteurs seront testés en place sur des matériaux de référence. 2) intégration du code de calcul prédictif du niveau d'exposition en temps-réel développé dans la phase 1 dans la station d'analyse de la ligne PIXXL, en exploitant les seuils d'innocuité déterminés sur des panneaux de matière picturale de référence.

## Activités

Les objectifs de la personne recrutée seront les suivants :

### **1/ Installer les moniteurs de modifications dans la ligne de faisceau PIXXL - ESPADON**

Les méthodes les plus efficaces pour détecter les prémices d'une modification sont celles qui sont rapides (réponse en temps-réel) et sensibles. Elles fournissent un signal d'alerte au niveau de l'expérience basées sur la réponse optique, l'analyse chimique et l'imagerie thermique :

- **chimique** : émission de gaz H<sub>2</sub> provenant et de radiolyse des molécules organiques ou de CO<sub>2</sub> des carbonates à l'aide de capteurs électrochimiques à l'état solide.
- **optique** : modification de la réflectance et luminescence sous faisceau avec une caméra hyperspectrale compacte dans le domaine 200 à 1000 nm.
- **thermique** : élévation en température de la zone analysée durant l'analyse à l'aide d'une caméra FLIR permettant l'imagerie thermique dans l'infrarouge.

## 2/ Intégrer des indicateurs instantanés de l'exposition des œuvres analysées

Exploitant des conditions expérimentales de la cartographie IBA (énergie et intensité du faisceau, taille de la zone cartographiée, compositions élémentaire déterminée dynamiquement par PIXE) et les données fondamentales (tables TRIM), cet outil permettra de garantir à tout instant que seuil d'innocuité n'est pas dépassé. Le code de calcul PYTHON sera intégré à l'interface d'acquisition de la ligne PIXXL.

### Planification

Les moniteurs seront implémentés dans la nouvelle ligne de faisceau PIXXL (WP2 de l'Equipex+ ESPADON). Le recrutement devra être effectif au début du deuxième trimestre 2025 pour participer au montage de la ligne de faisceau. L'implémentation des capteurs de MONIONS se poursuivra hors faisceau pendant la phase d'aménagement de la salle de l'accélérateur pour l'installation des dispositifs de radioprotection (premier semestre 2026). Les résultats des tests seront synthétisés et diffusés à la fin du contrat (communication à conférence et publications).

### Compétences requises

Le/La candidat(e) sera diplômé(e) d'un **doctorat** ou d'un **diplôme d'ingénieur** dans le domaine de la caractérisation physico-chimique des matériaux. Il/elle doit maîtriser les **techniques de caractérisation des matériaux des œuvres du patrimoine** à l'aide de **faisceaux d'ions ou de rayons X, et de spectroscopies optiques** (UV-Vis-NIR, infrarouge). Une première expérience avec des publications et participations à des colloques internationaux sera appréciée.

Il/elle doit pouvoir mener les travaux d'installation et d'intégration des équipements avec une bonne autonomie et en concertation avec les membres de l'équipe AGLAE. Cet aspect du travail fait requiert des capacités **d'ingénierie et d'instrumentation** ainsi que de **programmation** des systèmes d'acquisition en temps-réel.

Il/elle devra implémenter les logiciels de calcul prédictifs des effets des faisceaux d'ions dans la matière (SRIM) et la physique sous-jacente. Une compétence en PYTHON et en acquisition temps-réel est indispensable.

Le/La candidat(e) devra savoir appliquer les procédures d'assurance qualité ainsi que les règles d'hygiène et de sécurité.

Le sujet étant à l'interface avec les sciences du patrimoine, le/la candidat(e) devra montrer une forte motivation et un réel intérêt pour ces dernières. Une expérience dans ce domaine sera appréciée.

Il/Elle doit pouvoir synthétiser, mettre en forme et présenter des résultats en français et en anglais, et être capable de participer à un projet dans le cadre d'un travail en équipe dans une démarche collective respectant la déontologie scientifique.

## Contexte de travail

Le projet MONIONS fait partie de la programmation scientifique 2023 de la Fondation des sciences du patrimoine. A ce titre il bénéficie d'un financement dans le cadre de l'EUR (ANR-17-EURE-0021). Le projet est également rattaché à l'Equipex+ ESPADON (ANR-21-ESRE-0050- ESPADON - PATRIMEX+ : [www.espadon.net](http://www.espadon.net))

Ce contrat se déroulera au sein de l'équipe qui met en œuvre la nouvelle ligne PIXXL, sous la supervision de Thomas Calligaro (chef de programme), Ina Reiche (directrice de l'unité UAR 3506 Lab-BC) et Claire Pacheco (DU adjoint et responsable groupe AGLAE+), en étroite collaboration avec les membres de l'équipe AGLAE (J-P. Berthet, Q. Lemasson, B. Moignard, L. Pichon). PIXXL rentre aussi dans le périmètre de l'unité d'appui et de recherche Lab-BC (UAR 3506 CNRS/Ministère de la Culture/Chimie-Paristech-PSL). En effet, les membres du Lab-BC développent de nouveaux instruments pour l'analyse des biens culturels et travaillent sur l'optimisation des méthodologies existantes dont les analyses par l'accélérateur.

La recherche s'effectuera en partenariat avec les structures suivantes :

Les équipes pluridisciplinaires du C2RMF (Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France,) notamment avec le groupe « objets » pour la mise au point des méthodes (T. Calligaro, X. Bai, M. Godet, A. Bourgès) et le groupe « peinture » pour le choix des matériaux à étudier (L. Brunel, G. Bastian, M. Eveno).

Le laboratoire **IPANEMA**, où une approche similaire a été menée dans cadre de IPERION-HS avec la lumière du synchrotron SOLEIL (K. Müller, S. Schoeder, M. Thoury, IPERION-HS task 5.3)

Le Service d'Études Analytiques et de Réactivité des Surfaces **SEARS**, Université Paris-Saclay, CEA, (A. Semerok) qui dispose de l'expertise et des moyens avancés pour l'imagerie thermique.

## Contraintes et Risques

Les risques auxquels sera soumise la personne recrutée sont ceux liés à l'utilisation d'un accélérateur de particules (irradiation, haute tension, forts champs magnétiques, etc.). La formation obligatoire de conduite à tenir devra être suivie dès les premiers jours d'arrivée auprès de cet équipement.

## Références

T. Calligaro, V. Gonzalez, L. Pichon, PIXE analysis of historical paintings: Is the gain worth the risk?, Nucl. Instr and Meth. B363 (2015) 135–143. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.08.072>

D. Gourier, L. Binet, V. Gonzalez, H. Vezin, N. Touati, T. Calligaro, Effects of analytical proton beam irradiation on lead- white pigments, characterized by EPR spectroscopy, Nucl. Instr and Meth. B415 (2018) 64–71. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2017.10.032>

K. Müller, Z. Szikszai, Csepregi, R. Huszank, Z. Kertesz, I. Reiche, Proton beam irradiation induces invisible modifications under the surface of painted parchment, Scientific Reports 12 (2022) 113. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02993-7>

L. Bertrand, S. Schöder, I. Joosten, S. Webb, M. Thoury, T. Calligaro, É. Anheim, Practical advances towards safer analysis of heritage samples and objects, TrAC-Trends in Analytical Chemistry, *Trends in Analytical Chemistry* 164 (2023) 117078, <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117078>