

Journées du C2RMF

Mercredi 24 et 31 mars 2021
de 09h00 à 12h45

JOURNÉES DES DOCTORANTS ET DES POST-DOCTORANTS 2021

PROGRAMME des visioconférences

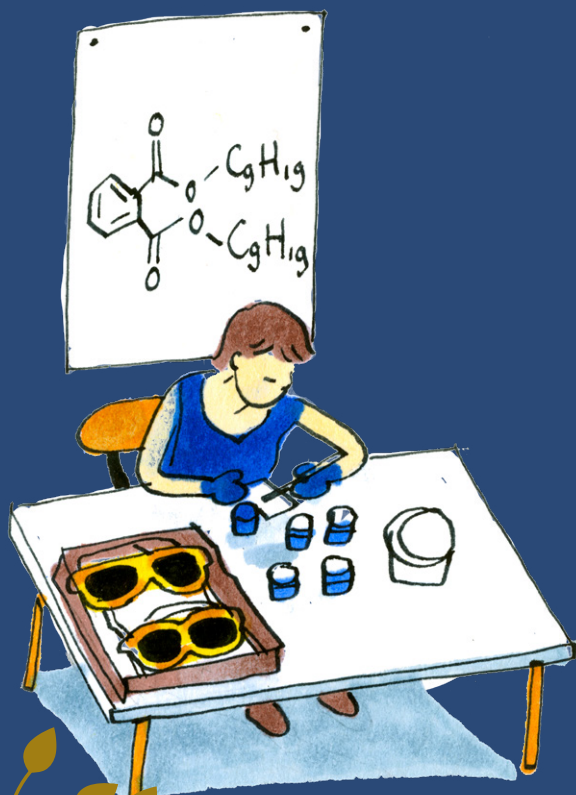
24 INTERVENTIONS
4 SESSIONS
2 ½ JOURNÉES

APPROCHES EN CONSERVATION ET
RESTAURATION

MATÉRIALITE ET TECHNIQUES
ANALYTIQUES ASSOCIÉES

IMAGERIE ET DEVELOPPEMENT
ANALYTIQUE

PHYSICOCHIMIE DES MATIERES
COLORANTES



CENTRE DE
RECHERCHE
ET DE
RESTAURATION
DES MUSÉES
DE FRANCE

C2RMF - Palais du Louvre - Porte des Lions
14 Quai François Mitterrand 75001 Paris, France.
Contact : agnes.lattuati-derieux@culture.gouv.fr

Mercredi 24 mars 2021

9h00

9h15

Ouverture par **Isabelle Pallot-Frossard**

SESSION 1

APPROCHES EN CONSERVATION ET RESTAURATION

9h15

Juliette ROBIN DUPIRE, doctorante 2^{ème} année : « *Restauration et étude de collections muséales en plâtre.* »

9h30

9h30

Zhang YUQING, doctorante 3^{ème} année : « *Partially fluorinated derivatives as powerful components for artworks restoration.* »

9h45

9h45

Julia TOURTELOT, doctorante 3^{ème} année : « *Compréhension des mécanismes de consolidation des terres de construction par des biopolymères.* »

10h00

10h00

Loren MASSON, doctorante 3^{ème} année : « *Stabilisation et consolidation de matériaux argileux pour la construction terre crue.* »

10h15

10h15

PAUSE

10h30

SESSION 2

MATÉRIALITE ET TECHNIQUES ANALYTIQUES ASSOCIÉES

10h30

Sibylle MANYA, doctorante 2^{ème} année : « *Analyse structurale et élémentaire de la transformation haute température de la chrysocolle en cuivre : application à la métallurgie préhispanique.* »

10h45

10h45

Kevin COSTA, doctorant 3^{ème} année : « *Une ressource oubliée des âges du Bronze et du Fer : Le cuivre de la France Atlantique (Massif Armoricaïn et Massif Central).* »

11h00

11h00

Sreyneth MEAS, doctorante 1^{ère} année : « *Le martelage du cuivre et de ses alliages à Angkor : étude archéologique et technologique (IX^e-XV^e siècle ap. JC.)* »

11h15

11h15

Alexandra DUMAZET, doctorante 2^{ème} année : « *Analyser les matériaux et la mise en œuvre des céramiques dites de Saint-Porchaire (XVI^e siècle).* »

11h30

11h30

Carine HARIVEL, doctorante 3^{ème} année : « *Connaissances technologiques des premiers potiers du Levant sud : approche techno-péetrographique des assemblages céramiques du 7^{ème} millénaire avant notre ère.* »

11h45

11h45

Thibault CLAUZEL, doctorant 3^{ème} année : « *Les Gaulois de Picardie (III^e – II^e siècle avant JC.) ont connu des températures équivalentes à celles du XXI^e siècle.* »

12h00

12h00

Océane ANDUZE, doctorante 1^{ère} année : « *Les complexes métalliques et les poussières minérales des « matières noires » : Nouveaux marqueurs des pratiques funéraires de l’Egypte ancienne (MANOIR).* »

12h15

12h15

Charles-Emmanuel DUTOIT, Post-doc : « *Spectroscopie par résonance paramagnétique électronique de la matière organique noire utilisée dans l’Egypte antique.* »

12h30

12h30

ou davantage si affinités scientifiques : Questions ouvertes et mots de la fin de la première 1/2 journée de la JDocPdoc 2021

12h45



Mercredi 31 mars 2021

9h00

9h15

Ouverture par **François Mirambet**

SESSION 3

IMAGERIE ET DEVELOPPEMENT ANALYTIQUE

9h15

Pablo FONTOURA, doctorant 3^{ème} année : « *La trace invisible du regard sur les œuvres d'Amedeo Modigliani.* »

9h30

9h30

Jessica AUBER-LE SAUX, doctorante 3^{ème} année : « *Développement d'un nouveau senseur holographique de conservation préventive des œuvres d'art par surveillance directe des surfaces.* »

9h45

9h45

Xueshi BAI, Post-doc : « *Quantitative mapping of carbon content in archaeological ferrous metals with laser-induced plasma spectroscopy.* »

10h00

10h00

Raphael MOREAU, doctorant 1^{ème} année : « *Développement d'un nouvel instrument multimodal intégrant MA-XRF, FORS et PL pour l'étude de l'art Byzantin.* »

10h15

10h15

Yoko ARTEAGA, doctorante 2^{ème} année : « *Microscopic 3D imaging and conservation.* »

10h30

10h30

Jizhen CAI doctorant, 2^{ème} année : « *Imagerie spectrale et data mining.* »

10h45

SESSION 4

PHYSICOCHIMIE DES MATIERES COLORANTES

10h45

PAUSE

11h00

11h00

Antoine TROSSEAU, doctorant 3^{ème} année : « *Fluorescence X et art pariétal : établissement d'un nouveau traitement des données.* »

11h15

11h15

Christelle CHAUFFETON, doctorante 3^{ème} année : « *Étude et prospection physicochimique des colorants utilisés à la Manufacture Nationale de Sèvres.* »

11h30

11h30

Nicoletta PALLADINO, doctorante 1^{ème} année : « *Zinc Oxide : from Macro to Micro (ZOoMM).* »

11h45

11h45

Victor GONZALEZ, Post-doc : « *Imagerie chimique multi-échelle de La Ronde de Nuit de Rembrandt.* »

12h00

12h00

Mathilde TIENNOT, Post-doc : « *Influence de l'addition de verre broyé sur les propriétés physicochimiques des couleurs employées en peinture et polychromie (VIP-2).* »

12h15

12h15

Lucile BRUNEL, Post-doc : « *FAYOUM : Recherche et Analyse des Portraits dits du Fayoum.* »

12h30

12h30

ou davantage si affinités scientifiques : Questions ouvertes et mots de la fin des JDocPdoc 2021

12h45



Résumés

SESSION 1 : APPROCHES EN CONSERVATION ET RESTAURATION

Juliette ROBIN DUPIRE - Doctorante 2^{ème} année

Restauration et étude de collections muséales en plâtre

Le projet REMuPlât porte sur l'étude des matériaux de comblement utilisés en conservation-restauration d'œuvres moulées en plâtre, telles que la statuaire et les cadres du XIX^e siècle. Les objectifs sont de caractériser les matériaux couramment utilisés par les professionnels, d'en affiner les connaissances, de les comparer avec les matériaux originaux et de proposer des formulations adaptées aux besoins des restaurateurs et aux spécificités des œuvres. Plusieurs approches sont ainsi mêlées : observations d'œuvres, étude des sources documentaires, enquêtes et entretiens avec les professionnels, partie expérimentale avec l'étude des comportements mécaniques et rhéologiques et l'analyse des structures physico-chimiques.

Encadrement : Anne-Solenn Le Hô, François Pernot (Sorbonne), Yannick Mélinge (INSA Rennes), Charlotte Chastel-Rousseau (Louvre), Elisabeth Le Breton (Louvre) et Sigrid Mirabaud (INHA)

Thématiques : Etude de matériaux de comblement, caractérisation des comportements mécaniques et rhéologiques, et analyses structurales de matériaux, recherche de formulations pour la conservation-restauration.

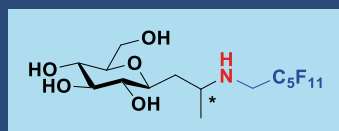


Détails d'un cadre du XIX^e siècle du musée du Louvre et d'une statue de la gypsothèque comportant d'anciennes restaurations de collage et comblement, musée du Louvre. © J. Robin Dupire

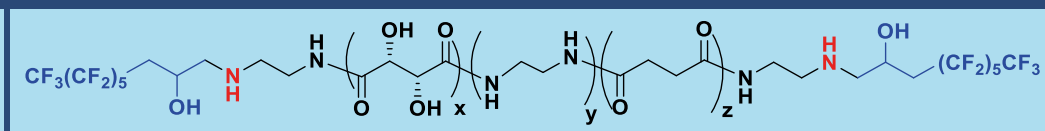
Yuqing ZHANG - Doctorante 3^{ème} année

Partially fluorinated derivatives as powerful components for artworks restoration

The synthesis of fluorinated compounds and their use for the restoration of artworks will be showed. Those compounds proposed are new compounds designed according to particular expected physical chemical properties. They are used for the protections of stone materials and the restorations of bleached easel paintings. The synthesis of two partially fluorinated glycosides, with and without hydroxyl groups, will be presented, along with the preliminary results of the hydrophobic test carried out on a highly porous rock. On the basis of these preliminary results, partially fluorinated hydroxylated oligoamids with different specific properties that have been designed and synthesized will be also presented. Moreover, results of their hydrophobic tests carried out on different stone materials will be shown. Tests of all the synthesized products as restoration agents for bleached easel paintings are planned.



fluorinated glycoside



fluorinated hydroxylated oligoamids

Encadrement : Nadège Lubin-Germain (UCP), Agnès Lattuati-Derieux (C2RMF), Antonella Salvini (Università de Florence) and Mara Camaiti (Consiglio nazionale delle Ricerche, Bologna)

Main theme: Perfluorinated compounds, blanching easel paints restoration, stone materials protections



Julia TOURTELOT - Doctorante 3^{ème} année

Compréhension des mécanismes de consolidation des terres de construction par des biopolymères

Construire en terre crue nécessite le contrôle des propriétés mécaniques du matériau terre. Les argiles, constitutives de la terre, permettent sa cohésion par effet capillaire entre les grains de sable. Le renforcement par additifs bio-sourcés du matériau terre a été préféré à celui minéral pour son faible impact environnemental. Cette technique de stabilisation est issue des recettes traditionnelles utilisées à travers le monde. L'objectif de cette thèse est la compréhension des mécanismes d'action des biopolymères dans le matériau terre. Cette étude adopte une démarche multi-échelle, allant de l'observation des propriétés mécaniques à l'échelle macroscopique d'une terre commerciale stabilisée, jusqu'à l'étude des effets de deux biopolymères aux échelles méso-, micro- et nanoscopiques sur des argiles pures. Réalisée au sein de l'Université Gustave Eiffel, la thèse fait partie du projet Alluvium portant sur la stabilisation et la consolidation du matériau terre crue utilisé pour la construction.



©Julia Tourtelot

Encadrement : Ann Bourgès (C2RMF) et Emmanuel Keita (Université Gustave Eiffel)

Thématiques : terre crue, renforcement, argiles, biopolymères



Loren MASSON - Doctorante 3^{ème} année

Stabilisation de minéraux argileux pour la construction en terre crue

La présence d'argiles dans le matériau terre crue permet sa cohésion mais est également responsable de sa dégradation. Les argiles étant sensibles à l'hygrométrie environnante, elles captent facilement de l'eau modifiant consistance et propriétés mécaniques du matériau. Des cycles de gonflement/retrait sous l'effet des saisons entraînent des contraintes et des modifications de la microstructure du matériau, responsables de desquamations et de fissurations. La solution explorée est d'utiliser des tensioactifs pour réduire les effets de gonflement/retrait du matériau terre crue par diminution de l'adsorption d'eau. Le choix de tensioactifs, la compréhension de leur mode d'action et l'optimisation de leur concentration est le cœur de ce travail de thèse. Réalisée au sein de l'Université Gustave Eiffel, cette thèse fait partie du projet I Site FUTURE « Alluvium » portant sur la stabilisation et la consolidation du matériau terre crue utilisé pour la construction.



@libre de droit

Encadrement : Jeanne- Sylvine Guedon (Université Gustave Eiffel) et Ann Bourges (C2RMF)

Thématiques : terre crue, argile, gonflement, tensioactifs

SESSION 2 : MATÉRIALITE ET TECHNIQUES ANALYTIQUES ASSOCIÉES

Sibylle MANYA - Doctorante 2^{ème} année

Analyse structurale et élémentaire de la transformation haute température de la chrysocolle en cuivre : application à la métallurgie préhispanique

Une équipe associant archéologues, archéométallurgistes, géologues français et chiliens ont découvert à Collahuasi, dans le désert d'Atacama, le plus important site de production de cuivre préhispanique connu pour le nord du Chili. Plus de cinquante fours en très bon état de conservation (X^e-XV^e s. ap. J.-C.) ont permis de collecter des témoins du mode de fonctionnement de ces fours. Les premières caractérisations des scories orientent vers un procédé de métallurgie extractive qui a su atteindre des températures étonnamment élevées, au-delà de 1200°C. Cette



Analyse PIXE d'une veine de chrysocolle, © S. Many, C2RMF

équipe a également montré que la chrysocolle $\text{Cu}_2\text{H}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ était le principal minéral recherché et extrait par les anciens mineurs. Ce minéral secondaire, formé dans les couches d'oxydation des gisements cuprifères, possède une structure mal connue et controversée. Le premier objectif de la thèse est donc de déterminer comment les artisans métallurgistes de Collahuasi ont réussi à réduire ce minéral de cuivre en métal, à la fois d'un point de vue cinétique et thermodynamique et ce, en associant une combinaison de techniques d'études structurales (MEB-EDX, TG-ATD, spectroscopie Raman, XRD, RQN 63Cu et RMN 29Si). Le deuxième objectif sera de déterminer la signature géochimique du cuivre produit à Collahuasi (PIXE, LA-ICP-MS) et de la comparer à une série d'objets finis afin de mesurer la part des approvisionnements du secteur de Collahuasi.

Ce projet doctoral est soutenu par l'ENSCR, C2RMF et l'ESPCI et fait partis du projet de l'IRP « Sciences Humaines et Sociales dans le désert d'Atacama » (2020-2024).

Encadrement : Laurent Le PollesSa, Jean-Baptiste d'Espinose de Lacailieried, Benoît Milleb, c, Thierry Bataillea

a: Institut des Sciences Chimiques de Rennes (UMR CNRS 6226), École nationale supérieure de chimie de Rennes, France

b : Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Paris, France

c : Préhistoire et Technologie (UMR 7055), Nanterre, France

d : Sciences et Ingénierie de la Matière Molle (UMR CNRS 7615), École supérieure de physique et de chimie industrielles de la ville de Paris, France

Thématiques : Chrysocolle, cuivre, époque préhispanique, archéométallurgie



Kevin COSTA - Doctorant 3^{ème} année

***Une ressource oubliée des âges du Bronze et du Fer :
Le cuivre de la France Atlantique (Massif Armoricain et Massif Central)***



*Dépôt non funéraire de «La prairie de mauves», Nantes
(âge du bronze final)*

Les objets métalliques de l'âge du Bronze en France, constituant des dépôts non funéraires, ont été délibérément abandonnés pour diverses raisons. Afin d'étudier ces dépôts, une base de données interdisciplinaire a été créée dans le cadre du programme de recherche DEPOMETAL. Cette thèse vise à caractériser la métallurgie et les réseaux d'approvisionnement en cuivre pour la façade Atlantique durant l'Age du Bronze. En effet, l'origine des cuivres utilisés pour la confection d'objets en alliage cuivreux reste pour le moment inconnue. Ce travail s'accompagne d'un travail bibliographique et l'acquisition de nouvelles données de composition élémentaire au sein du C2RMF. Un protocole statistique permettant le regroupement chronologique et géographique des artefacts en fonction de leur signature chimique a été mis en place. Ces analyses seront confrontées également à des données isotopiques afin de définir au mieux les réseaux d'échanges en matières premières. Cette thèse vise donc à caractériser faire le lien entre les données archéométriques et archéologique.

Encadrement : Patrice Brun (Paris 1 Panthéon Sorbonne, UMR7041 ArScAn) et Benoit Mille (C2RMF)

Thématiques : Age du Bronze, archéométallurgie, compositions élémentaires, isotopes, réseaux d'échanges



Le martelage du cuivre et de ses alliages à Angkor : étude archéologique et technologique (IX^e-XV^e siècle ap. JC.)

La pratique du martelage du cuivre et de ses alliages dans le contexte du royaume d'Angkor (IX^e-XV^e siècle ap. JC) est attestée par de nombreux objets comme le mobilier cultuel (vaisselles), les dépôts de fondation et les décors architecturaux. Pourtant, jusqu'à présent, la technique du martelage et les productions qui lui sont associées n'ont bénéficié que de très peu d'attention de la part des chercheurs. Après avoir constitué notre corpus que l'on peut aujourd'hui estimer à plusieurs centaines d'objets (collections muséales, fouilles archéologiques) nos recherches s'emploieront d'une part à établir une chrono-typologie, inexistante à ce jour, et d'autre part à mener une étude technologique afin de caractériser les chaînes opératoires de mise en forme.

Différents types d'examens et d'analyses seront réalisés sur les objets : examens visuels et microscopiques, éventuellement complétés de métallographies (microscopie optique et digitale, microscopie électronique à balayage) et d'analyses élémentaires (XRF, PIXE, LA-ICP-MS). Des liens avec les autres sources disponibles seront établis (archéologie, dont la fouille en cours sur le site de la fonderie royale d'Angkor Thom, épigraphie, enquêtes ethnographiques), et il est envisagé de recourir à la simulation expérimentale pour documenter au besoin certaines propriétés mécaniques et aider à la caractérisation des techniques de martelage.



Cuivre martelé : a. Bol à pied, Mébon occidental, D. 150 mm, H. 100 mm, ép. 1-2 mm. b. Dépôt de fondation composé d'un disque et d'un tube, Kapilapura, disque : AA.DCMA.20.27, D. 450 mm, ép. 0,5 mm ; tube : AA.DCMA.2017.679, L. 115 mm, D. 27 mm, ép. 0,5 mm (cliché APSARA). c. Plaque de revêtement pour boiserie, région d'Angkor, MG 18182 a : H. 70 mm ; L. 145 mm ; ép. 4 mm, MG 18182 b : H. 80 mm ; L. 160 mm ; ép. 40 mm. © S. Clouet

Encadrement : David BOURGARIT^{1,2}, Brice VINCENT^{3,4}.

1 Centre de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF)

2 UMR 7055 Préhistoire et Technologie (Pretech)

3 Maître de conférences à l'École française d'Extrême-Orient (EFEO)

4 UMR 8170 – Centre Asie du Sud-Est (CASE)

Thématiques : Martelage, Angkor, Archéologique, Technologique

Alexandra DUMAZET - Doctorante 2^{ème} année

Analyser les matériaux et les céramiques dites de Saint-Porchaire (XVI^e siècle)



©RMN-Grand Palais (musée du Louvre) / Jean-Gilles Berizzi

Les céramiques de Saint-Porchaire sont des céramiques d'apparat produites au XVI^{ème} siècle. Comme la pâte, kaolinique et très blanche, la technique de décor utilisée est très spécifique : le corps est incisé avec une matrice finement travaillée, et les creux sont ensuite remplis d'argile colorée. Il existe peu de sources fiables sur la production de ces pièces. A travers l'analyse des objets des musées et de recreations faites en laboratoire, nous espérons répondre à deux problématiques : sur quels critères matériaux et esthétiques peut-on séparer les pièces authentiques des copies plus tardives, et quelles matières premières, recettes et techniques ont été utilisées pour leur élaboration. D'autre part, trois techniques non destructives ou micro-destructives (PIXE-PIGE, LA-ICP-MS, LIBS) seront évaluées pour la détection et la quantification de traces d'éléments légers (notamment le bore, qui peut être un marqueur temporel) dans les matrices vitreuses plombifères.

Encadrement : Anne Bouquillon (C2RMF), Daniel Caurant (IRCP)

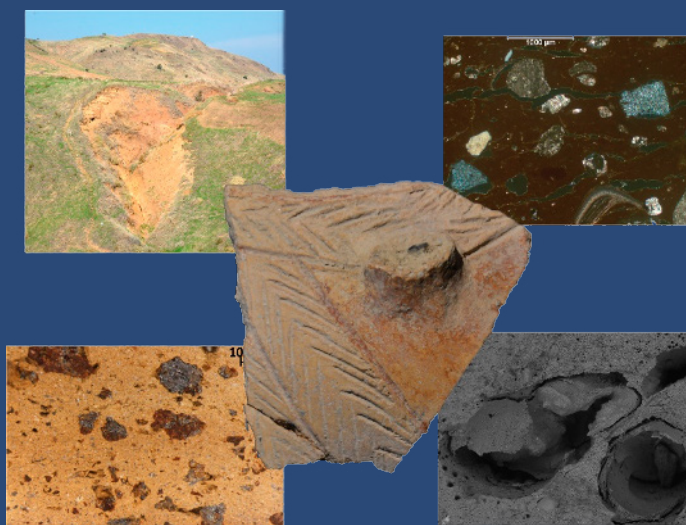
Thématiques : Céramiques, verres, analyse non-destructive



Carine HARIVEL - Doctorante 3^{ème} année

**Connaissances technologiques des premiers potiers du Levant sud :
approche techno-péetrographique des assemblages céramiques
du 7^{ème} millénaire avant notre ère**

Au Levant sud, les premières céramiques apparaissent à partir de la seconde moitié du 7^{ème} millénaire avant n. è., plus récemment que dans les régions voisines. Ces productions témoignent d'un savoir-faire maîtrisé sur une large gamme de récipients. Cela interroge quant à leur origine et à l'organisation de la production de céramique dans cette région. Inclus au sein du projet ANR CERASTONE (dirigé par J. Vieugué), mes recherches visent à caractériser la nature des matériaux utilisés par les potiers et à déterminer si leur sélection résulte de choix liés aux propriétés de ces matériaux. Afin de répondre à ces questions, deux volets d'analyse sont mis en place : d'une part, des observations à différentes échelles couplées à des analyses chimiques me permettent de caractériser la nature des matériaux ; d'autre part, des expérimentations sur des matériaux analogues vont être menées pour mieux comprendre les propriétés des matériaux utilisés dans l'objectif d'appréhender les choix des potiers. Ces analyses sont réalisées sur les assemblages céramiques des sites néolithiques de Munhata, de Sha'ar Hagolan (Vallée du Jourdain) et de Lod (plaine côtière).



Identifier les matériaux qui composent les poteries yarmoukiennes à partir d'observations et d'analyses complémentaires : tesson yarmoukien entouré d'une photo d'un affleurement autour du site archéologique et de trois images obtenues au microscope pétrographique, à la loupe binoculaire et au microscope électronique à balayage (respectivement de haut en bas et de droite à gauche). ©Vieugué J., Harivel C., C2RMF

Encadrement : Valentine Roux (PréTech, UMR 7055), Julien Vieugué (PréTech), Yvan Coquinot (CR2MF)

Thématiques : provenance des matériaux, propriétés des matériaux, Néolithique, Levant du sud



Thibault CLAUZEL - Doctorant 3^{ème} année

Les Gaulois de Picardie (III^e – II^e siècle avant JC) ont connu des températures équivalentes à celles du XXI^e siècle



Site de Thézy-Glimont, fosse 1138 : un humain, quatre bovidés et un équidé.
© Service d'Archéologie Préventive d'Amiens Métropole

Le Second Âge du Fer semble marqué, en Europe de l'Ouest, par un épisode climatique appelé l'Optimum Climatique Romain, qui aurait contribué au développement de la civilisation Romaine. Néanmoins, les caractéristiques climatiques de cet épisode sont encore peu connues et souffrent d'incertitudes temporelles. Dans cette étude, des valeurs de température moyennes de l'air (Mean Air Temperature, MAT) ont été obtenues à partir de l'étude des isotopes stables

de l'oxygène sur l'apatite d'os et de dents d'humains et d'animaux provenant du site archéologique Gaulois de Thézy-Glimont, Picardie, France, daté entre le III^e et le II^e siècle avant JC. Les MAT obtenues sont » $10.4^{\circ}\text{C} \pm 1.5^{\circ}\text{C}$, ce qui est comparable aux températures moyennes actuelles de 10.9°C enregistrées en Picardie. Ces températures élevées pourraient avoir eu une influence sur les pratiques d'agriculture et d'élevage en Gaule.

Encadrement : Thibault Clauzel^{1,*}, Pascale Richardin^{2,3}, Jannick Ricard⁴, Yves Le Béchenec⁴, Romain Amiot¹, François Fourel⁵, Brian Phouybanhdy^{2,6}, Arnauld Vinçon-Laugier¹, Jean-Pierre Flandrois⁷ et Christophe Lécuyer¹

1 Laboratoire de Géologie de Lyon (LGL-TPE) CNRS UMR 5276, Université Claude Bernard Lyon 1 – France

2 Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France C2RMF, Palais du Louvre – France

3 PRETECH – Préhistoire et Technologie, CNRS UMR 7055, Université Paris Nanterre - France

4 TRAME (Université de Picardie Jules Verne) & UMR 8546, AOrOc, CNRS, ENS Ulm, Paris – France

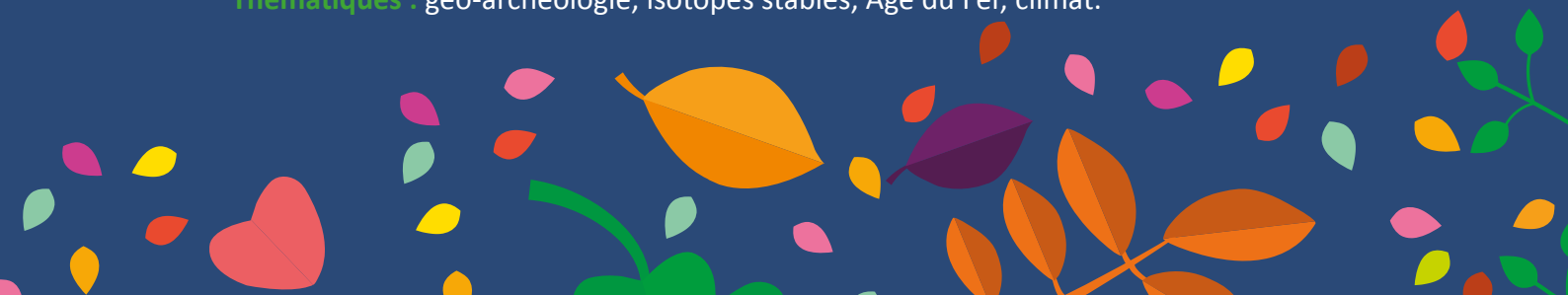
5 Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (LEHNA), CNRS UMR 5023, Université Claude Bernard Lyon 1 – France

6 GEOTRAC - Géochronologie Traceurs Archéométrie LSCE- Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement (Gif-sur-Yvette) – France

7 Université de Lyon, CNRS, UMR 5558, Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive, Villeurbanne - France

Mots-Clés : isotopes stables de l'oxygène, squelette humain, climat, gaulois, Optimum Climatique Romain

Thématiques : géo-archéologie, isotopes stables, Âge du Fer, climat.



Les complexes métalliques et les poussières minérales des « matières noires » : Nouveaux marqueurs des pratiques funéraires de l'Égypte ancienne

Les « matières noires » utilisées dans l'Égypte ancienne en contexte funéraire (momies, cercueils, objets funéraires) sont un mélange complexe de substances naturelles, organiques et inorganiques et de diverses origines. Alors que jusqu'ici, c'est surtout la composition bioorganique qui a fait l'objet de nombreuses études, nous nous intéressons particulièrement à d'autres composants que sont le bitume, et les espèces inorganiques (complexes métalliques, poussières minérales). Ces composants pourraient constituer de nouveaux marqueurs de l'origine, des procédés de fabrication, et de l'évolution de ces matières noires au cours du temps. Ils pourraient également révéler des variations dans les pratiques et les intentions des embaumeurs. Le projet s'appuie sur une démarche analytique comportant une étude non invasive de la composante inorganique (RPE-ENDOR, fluorescence X) suivie d'une analyse invasive de la composante organique (GC-MS). Nous disposons d'échantillons de momies égyptiennes humaines et animales, ainsi que de matière noire prélevée sur un cercueil ; le projet a été étendu à l'examen d'échantillons du DAO badigeonnés de matière noire bitumineuse.

Encadrement : Laurent Binet (Chimie ParisTech), Agnès Lattuati-derieux (C2RMF) et Didier Gourier (Chimie ParisTech)

Thématiques : Égypte ancienne, mélange de composés organiques et inorganiques, bitume, matières hydrocarbonées, marqueurs inorganiques



De gauche à droite et de haut en bas :

- Cercueil d'Irethorerou (Période ptolémaïque), Musée d'Art et d'Histoire, Narbonne, France

© C2RMF/A.Chauvet

- Spectre RPE de matière noire prélevée dans la cuve du cercueil d'Irethorerou, enregistré en phase et en quadrature de phase par rapport à la modulation
© D. Gourier

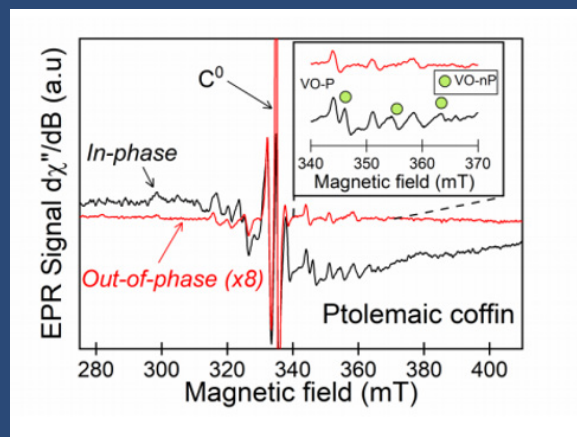
- Tête de la momie de l'homme barbu (Basse époque), Château-musée, Boulogne-sur-Mer, France

© P. Dal-Pra.

Charles-Emmanuel DUTOIT - Post-doc

Spectroscopie par résonance paramagnétique électronique de la matière organique noire utilisée dans l'Égypte antique

Dans le cadre du projet MANOIR (A. Lattuati-Derieux), nous avons utilisé pour la première fois la spectroscopie RPE en onde continue pour identifier des biomarqueurs paramagnétiques dans la matière organique noire utilisée durant l'Égypte antique dans le contexte funéraire. Un exemple de spectres RPE à la fréquence de 9.4GHz d'une matière noire est donné à la figure 1. Nous avons identifié deux complexes de vanadyle paramagnétique (VO_2^+) dans la matière noire Ptolémaïque. Les simulations des spectres indiquent que l'espèce dominante est un complexe de vanadyle de porphyrine (i.e. VO_2^+ avec 4 ligands azotes) dont les caractéristiques sont proches du bitume de Judée (bitume de référence). La seconde espèce, minoritaire, est un complexe de vanadyle avec 4 ligands oxygènes, qui est absent du bitume de Judée. Il est probable que celle-ci provienne d'un traitement intentionnel des prêtres, ou bien de la réaction chimique avec la résine végétale de la matière noire ou encore de la dégradation du bitume dans le contexte de la momification. La spectroscopie ENDOR du proton est également réalisée afin de sonder l'environnement local des VO_2^+ et déterminer la structure moléculaire des vanadyle de porphyrine. Cependant, avec un spectromètre RPE conventionnel seul des échantillons de tailles millimétriques peuvent-être étudiés. A cette fin, nous développons actuellement un spectromètre RPE portable non invasive utilisant la technologie de résonateurs micro-strip (projet ANR ESCULAPE) pour sonder une large gamme d'objets du patrimoine.



Spectres RPE de la matière noire présente dans un cercueil Ptolémaïque obtenu à 9.4GHz et à température ambiante.

Encadrement : Olivier Pilone¹, Sylvain Bertain², Océane Anduze¹, Laurent Binet¹, Didier Gourier¹

¹ Institut de Recherche de Chimie de Paris, Chimie ParisTech, UMR-CNRS 7574, Paris, et Centre de Recherche et de Restauration des Musées de France, Paris

² Institut Matériaux Microélectronique Nanosciences de Provence, Aix-Marseille Université, UMR-CNRS 7334, Marseille

Thématiques : RPE, matière organique noire, spectromètre RPE portable

SESSION 3 : IMAGERIE ET DÉVELOPPEMENT ANALYTIQUE

Pablo FONTOURA - Doctorant 3^{ème} année

La trace invisible du regard sur les œuvres d'Amedeo Modigliani

La façon dont nous voyons les images contribue à la dimension esthétique de notre expérience des peintures. L'exploration visuelle des représentations bidimensionnelles active des capacités visio-mimétiques universelles, mais autre que physiologiquement, ces capacités sont toujours mises en œuvre culturellement et historiquement. En combinant des études psychologiques et cognitives avec des analyses oculométriques, je présenterai les résultats de la campagne d'eye-tracking sur les œuvres d'Amedeo Modigliani réalisée au C2RMF. Je parlerai sur l'influence que la matière (les formes et les couleurs) et la figuration (la représentation réelle de quelque chose) jouent sur notre expérience visuelle des tableaux du peintre.

Encadrement : Michel Menu (C2RMF), Jean-Marie Scheffer (EHESS)

Thématiques : Oculométrie ; perception Visuelle ; Eye-tracking ; Expérience Esthétique des peintures



©Pablo Fontura

Jessica AUBER-LE SAUX - Doctorante 3^{ème} année

Développement d'un nouveau senseur holographique de conservation préventive des œuvres d'art par surveillance directe des surfaces

Dans le contexte actuel d'instabilité climatique combiné à la mobilité croissante des œuvres du patrimoine, la conservation préventive prend une place prépondérante et doit se doter de nouveaux outils de mesures et de contrôles. La technique d'interférométrie de speckle est une des rares techniques de contrôle non destructif sans contact et plein champ pouvant permettre de capturer l'impact mécanique des fluctuations environnementales sur un objet.

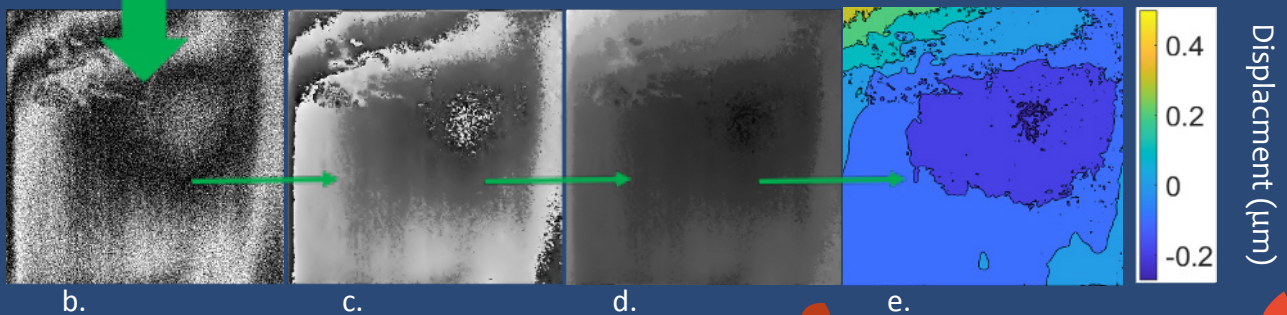
Mon doctorat s'inscrit dans le projet Holosens et se focalise sur les réactions des panneaux de bois peints du XV^e et XVI^e siècles aux changements hygrométriques de leur environnement. Dans ce but, j'ai effectué une recherche sur les bois et techniques de ces deux siècles pour en tirer des échantillons. Quelques uns de ces échantillons ont pu être soumis à des variations d'humidité relative contrôlées et la déformation de leur surface a pu être enregistrées à l'aide de la technique d'interférométrie, utilisée par le FORTH en Crète. Je suis ensuite passé aux traitements de ces données. D'autre part, j'ai réalisé un nouveau montage utilisant la technique d'interférométrie de speckle.

Encadrement : Vincent Detalle (C2RMF), Nicolas Wilkie-Chancellor (SATIE), Vivi Tornari (FORTH)

Thématiques : panneaux de bois peints, interférométrie speckle, conservation préventive



a. Montage optique,
b. Image brute obtenue par interférométrie sur un échantillon d'épicéa,
c. Image après débruitage,
d. Image après démodulation de la phase
e. déplacement de la surface de l'échantillon.
©Jessica Auber-Le Saux

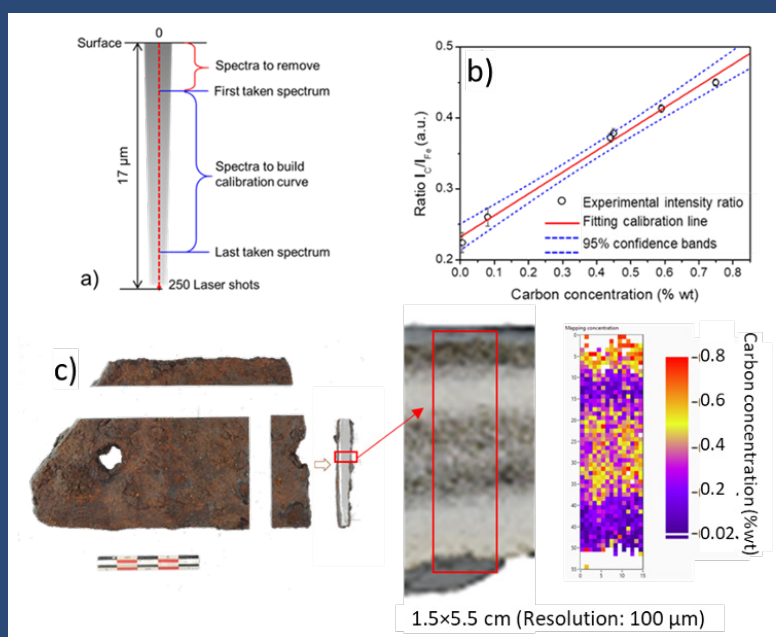


Xueshi BAI - Post-doc

Quantitative mapping of carbon content in archaeological ferrous metals with laser-induced plasma spectroscopy

content is one of the most influential factors of the mechanical behavior of iron and steel and a time marker of the fabrication period. The quantitative assessment of carbon content distribution in archaeological artefacts gives us insights on their properties and nature.

In this collaborative work, we propose to use laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) as a new and easier way to solve problems related to in situ analysis and to offer a high spatial resolution. We performed LIBS analysis on archaeological steel in order to reconstruct its carbon content distribution map. The quantitative mapping of the carbon distribution enabled us to infer the different phases of the metallographic structure without time-consuming Nital attack treatment. In addition, LIBS carbon content mapping revealed phases that are invisible with metallographic method. This new method can be the ground for further uses of LIBS in archeometallurgical studies.



a) Diagram of spectra selection; b) Calibration curve from the intensity ratio of carbon and iron line of 230 averaged spectra; c) Archaeologic sample (CL13286) after cut and its cross section. The micro-analysis mapping of carbon concentration in the red rectangle on the microscopic image.

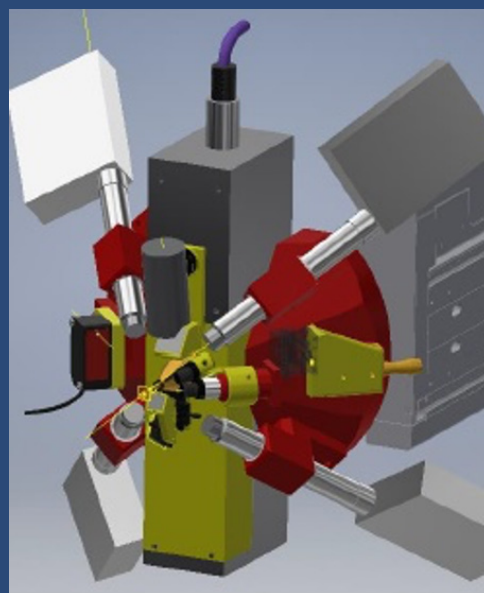
Encadrement : Hortense Allégre, Manon Gosselin, Philippe Dillmann, Jessica Auber--Le Saux, Florian Téreygeol et Vincent Detalle

Thématiques : Heritage science, Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) mapping, Quantitative analysis, Archaeological ferrous metals, Carbon content, Steel phase characterization

Raphael MOREAU - Doctorant 1^{ère} année

Développement d'un nouvel instrument multimodal intégrant MA-XRF, FORS et PL pour l'étude de l'art Byzantin

Depuis la dernière décennie, la cartographie de Fluorescence X (MA-XRF) a révolutionné l'imagerie multi-échelle des objets du patrimoine culturel, en particulier les tableaux, grâce à la combinaison de plusieurs avantages, notamment la non-destructivité, la haute sensibilité et la haute efficacité. La cartographie élémentaire obtenue en utilisant la MA-XRF permet l'identification des matériaux inorganiques (pigments, métaux) et la détermination de leur distribution en surface et en profondeur de l'objet. D'autre part, les spectroscopies optiques (spectres de réflectance et de photoluminescence, possiblement résolue en temps) ont montré d'excellents résultats pour l'identification de matériau organique tel que les liants, les vernis et les colorants, ou pour la différenciation de différentes qualités de pigments. Nous proposons ici une nouvelle approche combinant les bénéfices des deux précédentes techniques. Un nouvel instrument sera développé pour acquérir simultanément des cartographies de spectroscopies de Fluorescence X, de Photoluminescence (PL) et de Réflectance (RS). Dans ce couplage multimodal, chaque méthode complète l'autre, la PL et la RS révélant des caractéristiques non observables par la Fluorescence X seule, tandis que la Fluorescence X permet d'établir un lien entre la réponse optique et la composition chimique. L'exploitation couplée des jeux de données de XRF/PL/RS est une tâche difficile demandant le développement de nouvelles méthodologies. L'enregistrement systématique et l'interprétation couplée d'image complémentaire permettra d'aborder le challenge complexe de la caractérisation globale d'œuvres majeures du monde Méditerranéen pour leur étude et leur préservation.



Prototype du scanner multimodale développé au C2RMF ©C2RMF/ Brice Moignard

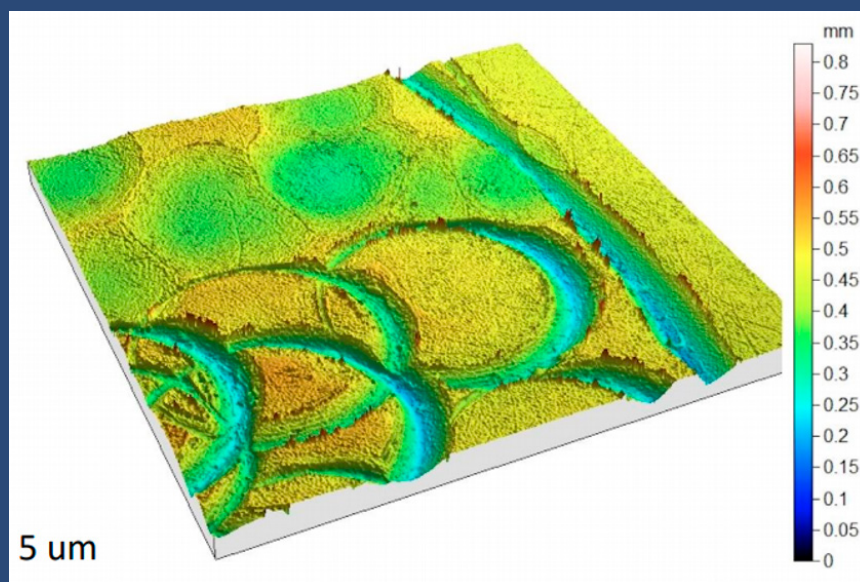
Encadrement : N.Bakirtzis (Cyprus Institute), S.Hermon (Cyprus Institute), T.Calligaro (C2RMF), M.Menu (C2RMF), I.Reiche (Chimie ParisTech)

Thématiques : Instrument multimodale, Fluorescence X, Photoluminescence, Réflectance, Machine Learning



Microscopic 3D imaging and conservation

The subject of this thesis work is the creation of a protocol for the characterisation of surface details in cultural heritage objects, based on microscopic 3D data. By measuring and modelling surface details with the support of a range of imaging devices, the roughness and appearance of objects can be quantified. Initial experimental work using the microtopography station has consisted of characterising engraving and chasing tool marks made on copper and bronze plates. Using form descriptors, a morphometric model has been developed to classify these tools. In the case of object's appearance, a range of bronze patinas with different colour and roughness, have been characterised in terms on gloss and surface microtopography.



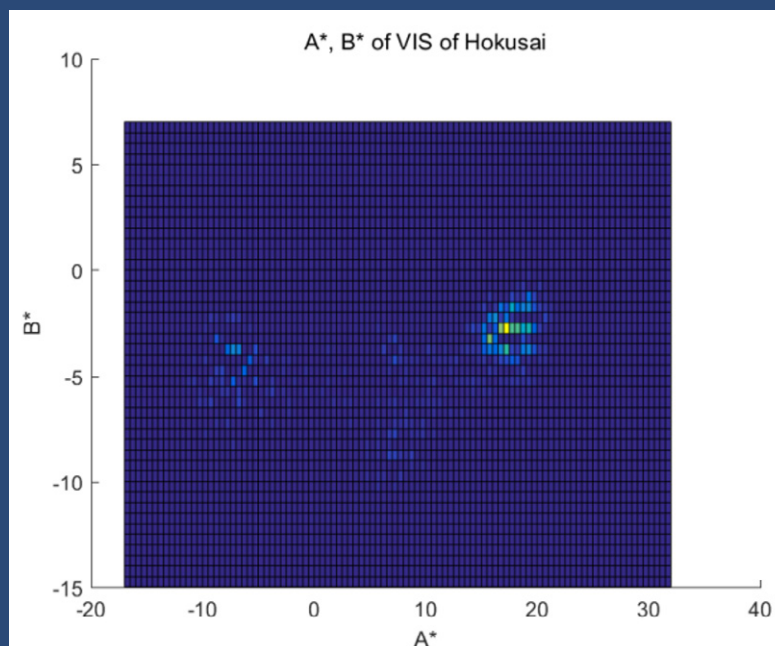
Microtopography scan of a bronze plate showing three different chasing tool marks. Scanned with a 5 micron resolution.

Encadrement : Clotilde BOUST (C2RMF), Jon Yngve Hardeberg (NTNU) et Angèle Dequier (INP)

Thématiques : Microtopography, Tool marks, Surface appearance, Surface characterisation

Imagerie spectrale et data mining

The protection and conservation of cultural heritage require a profound knowledge of materials used by the artist and their subsequent changes. In the case of paintings, this requires the ability to correctly identify the pigments that were used for the creation or later restoration of the artwork. This can be challenging and difficult because it must be non-destructive. In the past decades, the techniques of spectral imaging have become more and more important in the field of cultural heritage. While at the same time, the methods of data mining have been proved to be efficient in various fields. In this presentation, Jizhen Cai's work focuses on applying the knowledge and skills of data mining to pigment detection. For example, traditionally, conservators compare the VIS, UVFC, IRFC images of the same painting, because a specific pigment can show different colors in different light circumstances. However, if such work is done manually, it can be very time-consuming. In that case, developing methods to automatically find out the specific pigments used in the paintings can be useful.



Encadrement : Clotilde BOUST (C2RMF) and Alamin Mansouri (UBFC)

Main Theme: Spectral Imaging, unmixing, data Mining

SESSION 4 : PHYSICOCHIMIE DES MATIÈRES COLORANTES

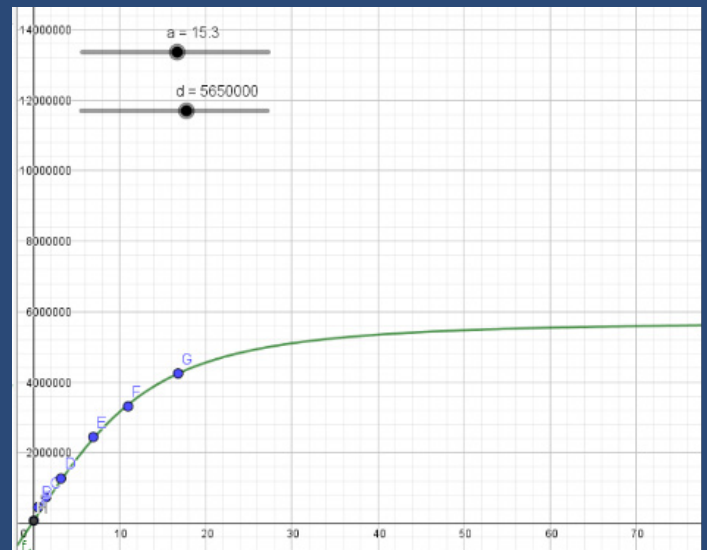
Antoine TROSSEAU - Doctorant 3^{ème} année

Fluorescence X et art pariétal : établissement d'un nouveau traitement des données

Cette thèse est l'occasion de participer activement à l'étude du décor de la grotte de Font-de-Gaume, Dordogne et s'inscrit dans la dynamique de recherche autour de ce patrimoine paléolithique riche. Ainsi, le contexte archéologique et le programme de recherche en cours de l'équipe IRCP-C2RMF sont introduits. Mon sujet de doctorat s'inscrit pleinement dans ce programme et porte particulièrement sur l'établissement et l'application de nouveaux protocoles de semi-quantification des spectres de fluorescence X mis au point en s'appuyant sur de la simulation et l'étude de d'éprouvettes modèles réalisées en laboratoire. Ces nouveaux protocoles se basent sur la multiplication des analyses et la préconcentration artificielle des couches picturale. Ils permettront la comparaison de la composition chimiques des différentes figures rouges et noires de la grotte analysées in situ.



Campagne d'analyse in-situ des peintures de la grotte de Font-de-Gaume.
De droite à gauche : Spectrométrie XRF, Spectrométrie Raman et Imagerie.
© Anne Maigret, C2RMF.



Extrapolation de l'intensité des raies K du fer en spectrométrie de fluorescence X dans un système {Substrat calcaire + Matière colorante à base d'oxyde de fer}. Logiciel : Géogébra.

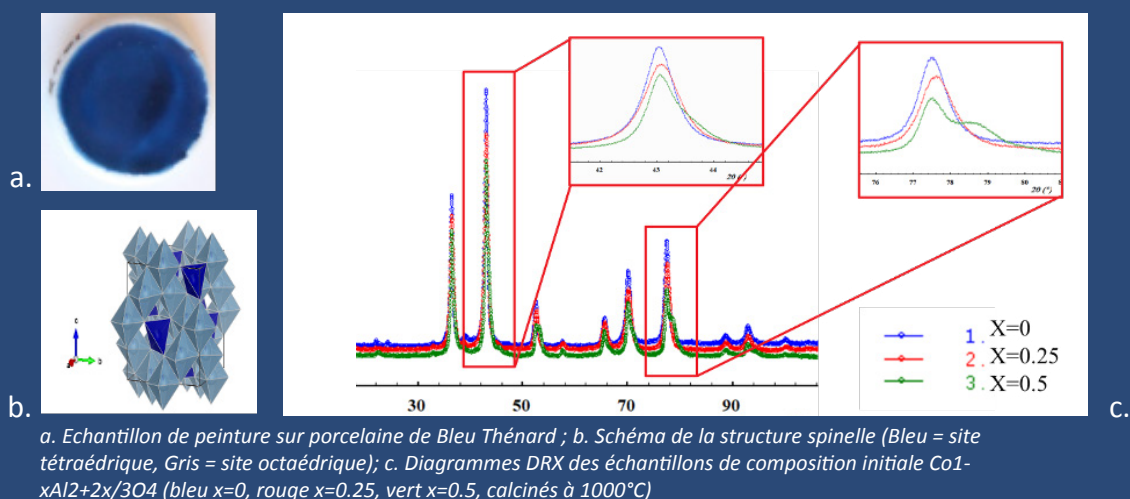
Encadrement : Ina Reiche (Chimie ParisTech) et Yvan Coquinot (C2RMF)

Thématiques : Spectrométrie de fluorescence X ; Traitement de données ; Simulation ; Préhistoire ; Art pariétal

Christelle CHAUFFETON - Doctorante 3^{ème} année

Étude et prospection physicochimique des colorants utilisés à la Manufacture Nationale de Sèvres

La Manufacture de Sèvres a acquis, à travers 280 ans d'histoire et de recherche dans la fabrication de porcelaines, une très importante collection de pigments historiques. En hommage à cet héritage, et avec l'idée de créer de nouvelles couleurs pour porcelaines, nous nous sommes intéressés aux pigments spinelles et en particulier le Bleu Thénard CoAl_2O_4 . Nous avons synthétisé des pigments de type $\text{Co}_{1-x}\text{Al}_2+2x/3\text{O}_4$ ($0 \leq x \leq 1$) et étudié, en fonction de la température de calcination et du taux de cobalt, la structure cristallographique, la couleur, ainsi que la stabilité dans une glaçure pour porcelaine. Par ailleurs, un nouvel axe de recherche a été ouvert sur la potentialité d'utiliser des pigments de structure Nasicon $\text{AZr}_4(\text{PO}_4)_6$ ($A = \text{Co}, \text{Cu}, \text{Cr} \dots$). Leur structure et le lien avec leur couleur, ainsi que l'utilisation potentielle comme couleur à peindre sur les porcelaines de Sèvres ont été étudiés.



Encadrement : Gilles Wallez (Chimie ParisTech)

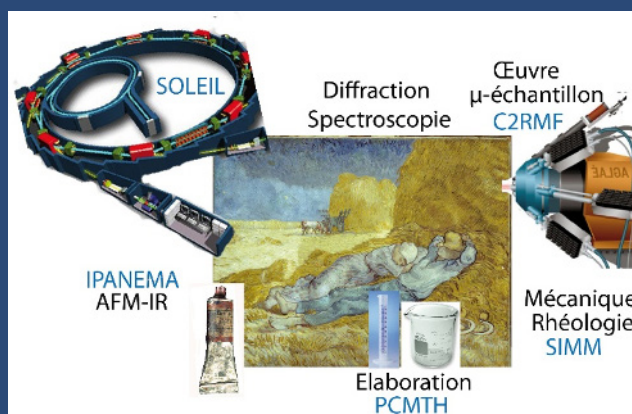
Thématiques : Pigments pour Glaçures de Porcelaine, re-création

Nicoletta PALLADINO - Doctorante 1^{ère} année

Zinc Oxide: from Macro to Micro (ZOoMM)

Le projet concerne l'étude multi-dimensionnelle des propriétés des peintures de blanc de zinc (ZnO). Ce pigment blanc, employé par les artistes des XIX et XXe siècles a été développé pour proposer une alternative au traditionnel blanc de plomb, toxique. L'objectif est de caractériser ses propriétés nano- et micro-scopiques en fonction de la méthode de production (française ou américaine), et de déterminer leur impact, ainsi que celle du liant, sur les propriétés macroscopiques, en relation avec les choix artistiques de son emploi par certains peintres (tels que Van Gogh, Modigliani, Courbet). Cette recherche vise également à apporter de nouvelles informations pour la conservation et l'authentification des peintures.

Des techniques conventionnelles (e.g., FEG-SEM, XRD), combinées à des méthodologies peu exploitées pour l'étude de la matière picturale à la micro- et nano-échelle (e.g., cathodo- et photoluminescence, XPS, AFM-IR, RPE, nano-indentation) et à la macro-échelle (e.g., XRF, RTI, colorimétrie, mesures de rhéologie, brillance, luminescence) seront utilisées. Celles-ci, éventuellement complétées par des analyses synchrotron à SOLEIL, permettront de caractériser les propriétés physico-chimiques de poudres de ZnO et de peintures de blanc de zinc (historiques, modernes, commerciales et reconstruites). Ce protocole analytique sera également appliqué sur un corpus d'oeuvres d'étude par le biais des analyses non invasives couplées à quelques micro-échantillons.



Exemple de méthodes de caractérisation multi-dimensionnelle prévues pour le projet

Encadrement : Directeur de thèse: Etgens Victor, IPANEMA - Co-directeur de thèse: Salvant Johanna, C2RMF

Thématique : Pigments semi-conducteurs, Analyse multi-dimensionnelle de pigments et de peintures, Matériaux hybrides et multi-couches, Reconstruction de procédés de synthèse, Propriétés mécaniques

Victor GONZALEZ - Post-doc

Imagerie chimique multi-échelle de La Ronde de Nuit de Rembrandt



©Rijksmuseum

Mes recherches visent à obtenir une meilleure compréhension des procédés d'élaboration de la matière picturale ancienne, et des mécanismes d'altération pouvant affecter cette dernière. Depuis 2019, je travaille au Rijksmuseum (Amsterdam), au sein de l'Operation Night Watch, projet de recherche et de conservation se déroulant en direct dans le musée, devant le public. Ma communication s'attachera à illustrer la complémentarité des données chimiques obtenues aux échelles microscopiques et macroscopiques. En ce qui concerne la micro-échelle, la présentation portera principalement sur des résultats d'imagerie structurale, fondée sur l'utilisation du rayonnement Synchrotron. Je m'intéresserai particulièrement à la formation in-situ de composés cristallins au sein des stratigraphies picturales de la Ronde de Nuit. Concernant la macro-échelle, les récents développements instrumentaux (MA-XRD, imagerie hyperspectrale, MA-XRF...) effectués au Rijksmuseum et utilisés lors de l'analyse du tableau seront présentés.

Encadrement : Gilles Wallez (Chimie ParisTech)

Thématiques : Pigments historiques ; Imagerie multi-échelle ; Synchrotron ; Rayons X ; Altération



Mathilde TIENNOT - Post-doc

Influence de l'addition de verre broyé sur les propriétés physicochimiques des couleurs employées en peinture et polychromie (VIP-2)

Des analyses et observations ont mis en évidence la présence de particules de verre dans les peintures à l'huile de la Renaissance. Ce procédé s'est révélé diffus en Europe. Des traités historiques évoquent plusieurs raisons à de tels ajouts par les artistes, comme la volonté de modifier les propriétés optiques des couches considérées, la texture à l'application, ou encore le caractère siccatif de ces particules. Ce second volet du projet étudie l'influence de l'ajout de particules de verre sur le comportement de la laque rouge, pigment souvent associé au verre broyé dans les peintures des XVe et XVIe siècles. Les recherches menées évaluent les effets de la quantité de verre, de sa granulométrie et de la nature des particules, et notamment le rôle du manganèse d'un verre reconstitué selon des recettes anciennes, sur les propriétés optiques, rhéologiques et mécaniques des couches de peintures.



Pigment et laque de cochenille lors de l'analyse des propriétés rhéologiques. © Mathilde Tiennot

Encadrement : Elisabeth Ravaud et Yannick Melinge

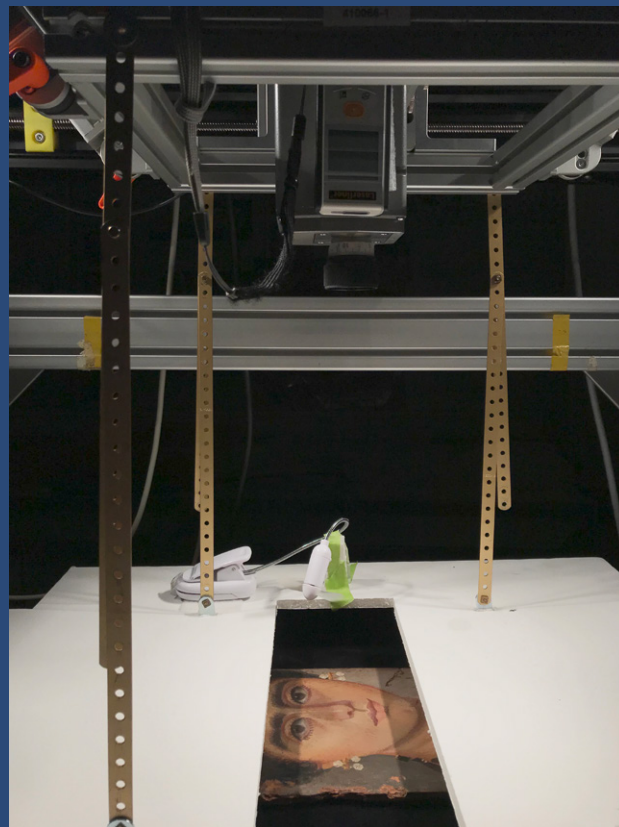
Thématiques : peinture, laque rouge, pigment, verre



Lucile BRUNEL - Post-doc

FAYOUM : Recherche et Analyse des Portraits dits « du Fayoum »

Le projet FAYOUM cherche à obtenir une connaissance plus approfondie des matériaux et techniques employés pour la réalisation des portraits dits « du Fayoum ». Ces réalisations polychromes sur panneaux de bois représentent le plus ancien témoignage de portraits réalistes d'individus qui appartenaient à une société cosmopolite, l'Égypte romaine, imprégnée d'hellénisme et de traditions pharaoniques. Ces œuvres, datées entre le I^{er} et le IV^{ème} siècle de notre ère, présentent des caractéristiques iconographiques, stylistiques et matérielles à la croisée de ces civilisations. En ce sens, les trente portraits conservés au Département des antiquités égyptiennes du musée du Louvre vont être analysés de manière non-invasive, privilégiant les techniques renseignant la nature des matériaux à l'échelle de l'entière surface de l'œuvre pour mieux connaître son élaboration. Au-delà de l'identification précise des matériaux employés sur chaque portrait, une attention particulière sera portée sur les choix de combinaisons pigment-liant, témoins des transformations des pratiques artisanales dues à la cohabitation des savoir-faire.



Portrait funéraire de femme (n° inv. E 12569) en cours d'analyse sous la caméra hyperspectrale. © Lucile Brunel-Duverger

Contrat postdoctoral d'un an financé par la Fondation des Sciences du Patrimoine qui s'intègre directement dans le projet APPEAR initié en 2013 par le J. Paul Getty Museum.

Encadrement : Caroline Thomas (Musée du Louvre, Département des antiquités égyptiennes), Michel Menu (C2RMF).

Thématiques : Corpus, Polychromie, Echange de savoir-faire.

