



HAL
open science

Journée Métal France 2025 - Protection & Conservation du Patrimoine Métallique Le Métal en danger et les dangers du Métal

Catherine Didelot, Charlotte Rérolle, Sidonie Lemeux-Fraitot, Jade Guilbaud,
Philippe Pagnon, Julia Jouet, Aurélia Azéma, Brittany Branche, Damien
Lopez, Laura Brambilla, et al.

► **To cite this version:**

Catherine Didelot, Charlotte Rérolle, Sidonie Lemeux-Fraitot, Jade Guilbaud, Philippe Pagnon, et al.. Journée Métal France 2025 - Protection & Conservation du Patrimoine Métallique Le Métal en danger et les dangers du Métal. Journée Métal France 2025, pp.191, 2025, Journée Métal France. hal-04944980

HAL Id: hal-04944980

<https://hal.science/hal-04944980v1>

Submitted on 13 Feb 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Métal France 2025

Protection & Conservation du Patrimoine Métallique Le Métal en danger – les dangers du Métal



© Sidonie Lemeux-Fraitot / musée Girodet

Maison de la Recherche - Université Jean Jaurès de Toulouse

Vendredi 7 Février 2025

Organisation

- Arc'Antique : GUILMINOT Elodie
- DRAC Occitanie : GENACHTE LE BAIL Anne
- Laboratoire TRACES : ROBBIOLA Luc
- MAD (Musée des Arts Décoratifs) : DIDELOT Catherine
- Université de Bologne : CHIAVARI Cristina



Journée Métal France 2025

PAGE 2

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Session 1 - Impact des sinistres sur les objets métalliques | |
| Présentation 1 | 9 |
| Catherine Didelot | |
| <i>Départ de feu, suies et corrosion au musée des Arts décoratifs de Paris</i> | |
| Présentation 2 | 25 |
| Charlotte Rérolle, Sidonie Lemeux-Fraitot | |
| <i>La collection métallique du musée Girodet après l'inondation du Loing, le 31 mai 2016</i> | |
| Session 2 - Dangers structurels du patrimoine métallique | |
| Présentation 3 | 33 |
| Aurélia Azéma, Philippe Pagnon, Julia Jouet, Brittany Branche | |
| <i>Restauration de l'Arc de Triomphe du Carrousel du Louvre</i> | |
| Présentation 4 | 57 |
| Laura Brambilla, Tobias Schenkel, Guillaume Rapp, Elodie Granget | |
| <i>Les dangers du métal dans les collections scientifiques, techniques et industrielles</i> | |
| Présentation 5 | 73 |
| Françoise Collanges | |
| <i>Conserver les objets dynamiques : quelle place pour le mouvement dans les projets de conservation ?</i> | |
| Session 3 - Objets métalliques en danger | |
| Présentation 6 | 89 |
| Marine Crouzet*, Elsa Rocca, Mohamed Kbiri Alaoui, Charlotte Carrato, Marine Bayle | |
| <i>Les derniers jours du coffre aux Bacchantes</i> | |
| Présentation 7 | 91 |
| Charlène Pelé-Meziani, Rossetti Loretta, Souhela Krabis, Elodie Guilminot | |
| <i>Bois et plomb : la liaison dangereuse</i> | |
| Session 4 - Collections industrielles et risques | |
| Présentation 8 | 111 |
| Alexandra Lefebvre | |
| <i>Les matériaux dangereux dans les objets techniques cinématographiques</i> | |
| Présentation 9 | 127 |
| Jacqueline Riddle, Skye Marshall | |
| <i>Une histoire de dangers : le déménagement des collections industrielles d'Ingenium</i> | |

Table des matières

Session 5 - Danger(s) des métaux modernes

Présentation 10 147

Paul Mardikian, Claudia Chemello

Cas d'un objet composite provenant de l'USS THRESHER (1963) comportant des restes d'amiante

Présentation 11 159

Monique Drieux, Caroline Moreau, Magali Brunet

La conservation des matériaux de la WW II : le moteur Merlin de Rolls Royce, son propre ennemi

Session Posters

Poster 1 168

Margot Morisse

Traitement après sinistre des oeuvres métalliques de musée Cocteau, collection Wunderman, à Menton

Poster 2 170

Typhaine Brocard Rosa, Monique Drieux

Le plomb et le feu, une alliance néfaste

Poster 3 172

Jade Guilbaud, Zoé Dauzat

Lutter contre la perte d'information en musée : vers une démarche systématique de restauration dans le cadre d'une reprise de traitement des objets métalliques

Poster 4 180

Edith Joseph, Luana Cuvillier, Arianna Passaretti, Qing Wu, Patrycja Petrasz

Solutions vertes pour lutter contre la corrosion des métaux

Poster 5 184

Elysa Letouzey, Marc Maleval, Laurent Mugherli, Delphine Neff

Protection des métaux cuivreux du patrimoine et inhibition de la corrosion atmosphérique par procédé sol-gel

Poster 6 188

Alix Lionni, Charlotte Rérolle

Un ostensor, danger pour lui-même ?

Articles

Session 1

Impact des sinistres sur les objets métalliques

DÉPART DE FEU, SUIES ET CORROSION AU MUSÉE DES ARTS DÉCORATIFS DE PARIS

Catherine Didelot

Conservatrice-restauratrice au musée des Arts décoratifs (MAD)

 catherine.didelot@madparis.fr

Résumé

Le 8 décembre 2022, un incendie s'est déclaré dans le restaurant « le Loulou », concessionnaire de locaux aux rez-de-chaussée et premier étage du musée des Arts décoratifs (MAD), situé dans les bâtiments du Louvre, au 107 rue de Rivoli, à Paris. Si le feu a rapidement été circonscrit et ne s'est pas étendu en dehors du restaurant, des suies se sont répandues dans différents espaces du musée des Arts décoratifs. Les deux salles de la galerie des bijoux ont fait partie des espaces touchés.

Ces événements ont été l'occasion de remettre en perspective le déroulement des interventions réalisées lors d'un précédent départ de feu en 2018 dans les espaces du MAD. Le Plan de Sauvegarde des Biens Culturels (PSBC) déjà existant au musée a pu être éprouvé. Peu de données sont publiées sur le traitement des suies en milieu muséal, cet article permet de compléter ces données en l'illustrant du retour d'expérience du MAD.

Mots clés

Incendies, suies, PSBC, métaux, bijoux, Argent

Abstract

On December 8, 2022, a fire broke out in the restaurant 'le Loulou', concessionaire of premises on the ground and second floors of the musée des Arts décoratifs (MAD), located in the Louvre buildings, 107 rue de Rivoli, Paris.

Although the fire was quickly contained and did not spread outside the restaurant, soot spilled into various areas of the Musée des Arts Décoratifs. Among those affected were the two rooms of the jewelry gallery.

These events provided an opportunity to put into perspective the work carried out during a previous outbreak of fire in the MAD spaces in 2018. The museum's existing Cultural Heritage Safeguarding Plan (CHSP) was tried and tested. Few data have been published on the treatment of soot in museums, and this article provides further information by illustrating it with feedback from the MAD.

Keywords

Fires - soot - CHSP- metals - jewelry – silver

Introduction

Le musée des Arts décoratifs (MAD) de Paris a connu ces dernières années deux départs de feu, l'un dans ses galeries permanentes, l'autre dans des locaux proches des lieux d'exposition. Aucune œuvre n'a eu à subir de dégâts directement liés à l'incendie ou à l'extinction, mais dans les deux cas, des suies se sont déposées dans plusieurs espaces du musée.

Le premier départ de feu, à priori d'origine humaine, a pris place le 2 novembre 2018 dans une encoignure de fenêtre masquée par des rideaux dans les salles des galeries permanentes consacrées aux arts décoratifs. Très rapidement éteint par l'équipe de sécurité du musée et avant l'arrivée des pompiers, quatre salles ont été touchées par les suies. Quelques années plus tard, en décembre 2022, un incendie plus important s'est déclaré pendant la nuit dans le restaurant « le Loulou », concessionnaire de locaux situés aux rez-de-chaussée et premier étage du MAD. Le feu, éteint par les pompiers, est resté contenu dans les espaces du restaurant, mais des suies se sont répandues dans certains espaces du musée en grande partie en lien avec le système de désenfumage. C'est ce deuxième événement qui sera plus particulièrement décrit ici (et l'effet de pollution par les suies sur les objets exposés).

Contexte

L'incendie s'est déclaré à 2h du matin dans la nuit du 7 au 8 décembre 2022 dans la salle de plonge du restaurant « le Loulou », concessionnaire de locaux situés aux rez-de-chaussée et premier étage du MAD côté jardin des Tuileries (Figure 1). Les alarmes d'incendie du restaurant étant reliées au système de sécurité du musée, les pompiers ont été alertés par les agents de nuit du MAD. A priori, l'origine de l'incendie provenait d'une défaillance électrique d'un appareil d'électroménager (une « cave à vin »). Aucune œuvre n'a été touchée par le feu ou par une élévation de température, il n'y a pas eu d'eau utilisée à proximité des œuvres. La structure du bâtiment n'a pas été endommagée. Le feu est resté contenu dans les espaces du restaurant, mais l'évacuation des fumées – denses et noires – s'est faite grâce au système de désenfumage du musée, avec extraction par la verrière au-dessus de la nef. Cela a entraîné l'aspiration des fumées et suies à travers la nef du musée sur toute sa hauteur pendant 4 heures. Le Plan de Sauvegarde des Biens Culturels (PSBC) a été déclenché et la chaîne d'appel lancée. Cette liste comprend les responsables de l'établissement et des collections ainsi que le personnel volontaire pour être contacté hors temps de travail en cas de sinistre ; les chefs d'équipe de sécurité présents contactent les premières personnes, qui sont ensuite chargées, au gré des besoins et des disponibilités, de mobiliser les équipes. La compagnie d'assurance du MAD a également été prévenue (le MAD est une structure associative, et les collections sont assurées). Il n'a pas été nécessaire de déplacer d'œuvres.

Pour toutes les questions concernant l'élaboration et la mise en place du PSBC, il est possible de consulter les différents documents présentés sur le site du C2RMF [1].

Les équipes du musée ont été autorisées à entrer dans les locaux à partir de 7h du matin, soit cinq heures après le départ de feu. Il n'y avait alors plus de fumées visibles, mais une forte odeur persistait. Dans la matinée, la priorité a été donnée à la protection des œuvres [2] : bâchage des œuvres et pose de scotchs sur les vitrines non étanches afin de limiter les dépôts supplémentaires de suies, qui peuvent se poursuivre plusieurs jours voire semaines après l'incendie par re-déposition. Trente-cinq personnes de la conservation et du département des collections ont participé à ces opérations. Par la suite, différents tests de nettoyage des podiums et des œuvres ont été effectués pour

déterminer les méthodes les plus adaptées selon les zones, la nature des surfaces considérées et la quantité de suies présentes. Ce sont les œuvres présentées dans la nef dans l'exposition « Années 80 » ainsi que les éléments de scénographie associés qui ont été les plus touchés par les suies et qui ont été traités en priorité (après accord des prêteurs le cas échéant). Également, des suies ont été retrouvées dans les galeries d'exposition bordant la nef au niveau 3 et 4, dans les galeries des bijoux et du Moyen Âge. Comme on peut le voir en violet sur la Figure 1, la galerie des bijoux est située au deuxième étage, immédiatement au-dessus des espaces du restaurant « le Loulou ». Le choix de la direction a été de rouvrir le musée le plus vite possible, les œuvres n'ont en conséquence pas été déplacées. Le musée est resté totalement fermé 5 jours dont un weekend. Dans un premier temps, les zones pas ou peu touchées ont été réouvertes ; l'échelonnement des réouvertures est dû aux délais de nettoyage et de dissipation des odeurs. Les galeries permanentes (en bleu sur la Figure 1) et deux expositions situées dans les trois niveaux de galeries à droite du hall du 107 et en rose sur la Figure 1 ont pu ouvrir dès le mardi 13 décembre après un dépoussiérage complet (expositions « Schiaparelli » et « Etienne Robial »). Ces espaces sont isolés par des portes coupe-feu. L'exposition « Années 80 », dans la nef –à gauche du hall du 107 et en rose sur la Figure 1 - a rouvert le samedi 17 décembre. La galerie des bijoux, quant à elle, est restée fermée jusqu'au 24 janvier, après que les filtres des centrales de traitement d'air (CTA) eurent été changés (ils sont pour les deux salles de la galerie des bijoux de formats non standards ce qui a entraîné un délai d'approvisionnement).

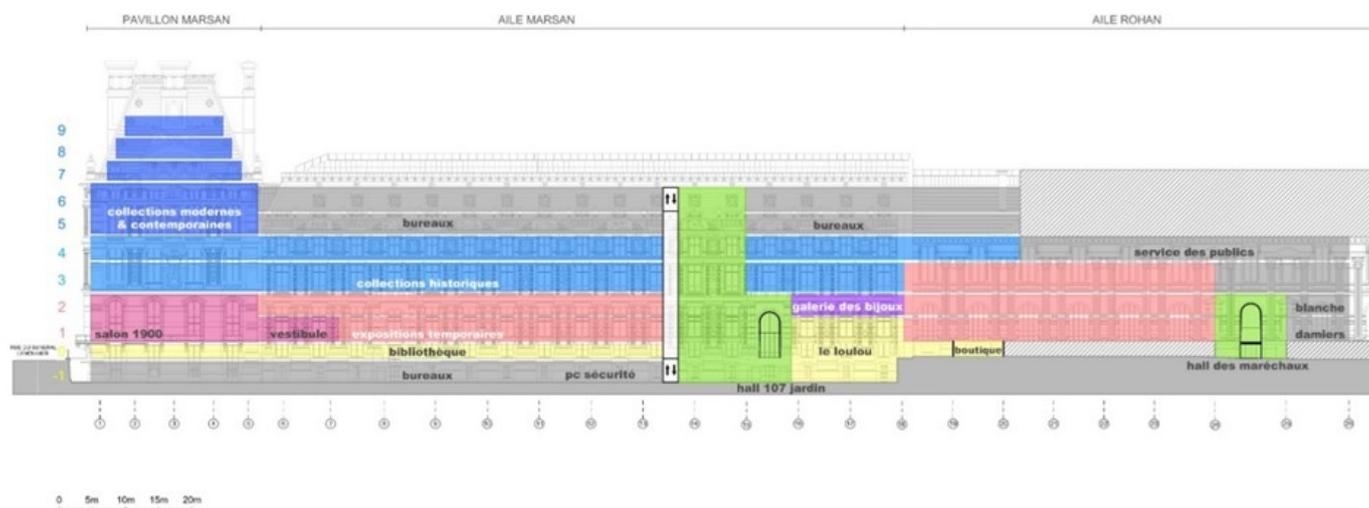


Figure 1. Plan en coupe de l'élévation Sud du MAD ©Les Arts Décoratifs

Qualité de l'air - pollution à l'intérieur des locaux

Lors d'un incendie, la combustion est dite vive ; elle se traduit par des flammes (ou une explosion). On parle généralement de « triangle du feu » pour citer les trois éléments nécessaires à une combustion : le combustible (les produits qui vont brûler, solides, liquides ou gaz), le comburant (pour les incendies domestiques le dioxygène de l'air ambiant), et enfin l'énergie d'activation (chaleur, flamme, étincelle...).

La combustion est une réaction exothermique et la chaleur produite lui permet de s'autoentretenir. Les réactions chimiques qui se produisent lors de la combustion sont complexes. L'une des premières étapes est la production de radicaux libres H-O extrêmement réactifs qui contribuent à la propagation de la combustion (en se recombinaut avec d'autres molécules, ils vont créer d'autres radicaux, c'est une réaction en chaîne qui dure tant que combustibles et comburant sont présents). Les produits utilisés pour ignifuger des matériaux sont le plus souvent des matériaux permettant de limiter la production de ces radicaux libres, ou de les absorber en partie.

La disparition de l'un des quatre éléments suffit à arrêter la combustion (d'ailleurs certains tiennent compte des radicaux libres et parlent de tétraèdre de la combustion plutôt que de triangle du feu).

Lors d'un incendie la combustion est le plus souvent incomplète : la quantité de comburant est insuffisante pour permettre la réaction complète du combustible. Il y a production de résidus de combustion, sous forme solide et gazeuse, dont la composition dépend des matériaux qui brûlent, des températures atteintes et des conditions de ventilation. En brûlant, tous les matériaux contenant des chaînes carbonées sont susceptibles d'émettre des composés tels que du monoxyde de carbone, des hydrocarbures aromatiques polycycliques ou HAP (sous forme gazeuse ou solide), et les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène), des particules de carbone plus ou moins pures (suie, goudron, cendres). Selon les matériaux combustibles, on pourra également avoir des composés soufrés, chlorés, des oxydes d'azote (NOx), ou des composés organiques volatils (COV). Les plastifiants des matériaux synthétiques et les retardateurs de flammes peuvent produire des composés spécifiques [3]. Les HAP sont issus de la combustion incomplète de matériaux organiques (y compris les plastiques et matériaux synthétiques).

Les produits de dégradation des matériaux synthétiques par la chaleur et par le feu sont décrits dans différentes publications en regard de leur toxicité pour l'homme (voir par exemple [4, 5]). Les suies formées par la combustion des matières plastiques sont le plus souvent grasses et collantes, en comparaison de celles issues de feu de bois, plus sèches. Pour reprendre la définition d'Airparif [6], « le terme particules désigne un mélange de polluants solides et/ou liquides en suspension dans un milieu gazeux ». L'échelle de taille des particules peut varier de l'ordre de quelques nanomètres à une centaine de micromètres (Tableau 1).

Tableau 1. description des particules d'après [6], les suies sont classées dans les particules fines, de diamètre <2,5 µm

| Dénomination des particules Chaque catégorie comprend les catégories de tailles inférieures. | Dimension (diamètre moyen) µm | Ordre de grandeur | Pénétration via les poumons |
|---|-------------------------------|-------------------|--|
| Nanoparticules | 0,001 | Molécule | Jusqu'aux alvéoles, sang, corps entier |
| | 0,01 | Protéine | |
| Ultrafines PM 0,1 | Jusqu'à 0,1 µm | | |
| | 0,1 µm | Virus | |
| Submicroniques PM 1 | Jusqu'à 1 µm | | Jusqu'aux alvéoles pulmonaires |
| Fines PM 2.5 | Jusqu'à 2,5 µm | Suies | Jusqu'aux voies respiratoires inférieures, bronchioles |
| | 2,5 µm | Bactéries | |
| Grossières PM 10 | Jusqu'à 10 µm | Pollen et spores | Voies respiratoires supérieures, jusqu'aux bronches |
| | >10 µm | | |
| | 50-70 µm | Cheveux humain | |

Pendant et à la suite d'un incendie, les particules émises s'agrègent et forment les suies. Les suies sont donc des amas complexes de petites particules riches en carbone (elles-mêmes formées par l'agrégation des HAP) et en composés divers dépendant des combustibles et des conditions de l'incendie.

Par comparaison, la production du pigment noir de fumée ou noir de carbone correspond à la combustion incomplète de gaz naturel dans des conditions contrôlées. Le pigment ne contient pas ou peu d'impuretés et est constitué de particules de taille et de formes plus homogènes et régulières.

Les particules produites lors d'un incendie sont très petites et sont classées dans les particules fines (voir tableau 1), dites PM2.5, soit « particulate matter » de diamètre inférieur à 2,5 µm. La combustion de matériaux organiques et de plastiques produit des gaz, des suies et des poussières toxiques dont il est d'autant plus nécessaire de se protéger qu'elles peuvent pénétrer profondément dans le corps humain [2, 6, 7]. À l'étape des premières interventions, quand les pompiers autorisent l'accès au site, les masques FFP2 sont un minima. Un masque FFP2 filtre 94 % des particules de plus de 0,6 µm de diamètre est donc adapté à la filtration des particules grossières et des plus grandes des particules fines (un masque FFP3 filtre plus efficacement - 99% - les mêmes particules de plus de 0,6 µm de diamètre).

Les diamètres ne sont qu'une donnée descriptive simplifiée des particules, qui, étant des agrégats, ne sont pas de forme sphérique mais sont, au contraire, très irrégulières.

En 2018, à la suite du premier incendie, les premières interventions de retrait des suies avaient été effectuées par les équipes du département des collections dans les heures qui avaient suivi l'extinction, avec les quelques équipements de protection individuelle (EPI) disponibles (essentiellement récupérés dans les ateliers de restauration). L'une des conclusions à la suite de cet incident était justement de constituer une réserve plus conséquente d'EPI.

En 2022, le musée avait déjà une réserve constituée d'EPI. Elle a pu être très rapidement complétée (achat d'équipements supplémentaires) pour être adaptée au nombre de personnes nécessaires aux premiers traitements. Dès les premières heures suivant l'incendie du 8 décembre, l'ensemble du personnel d'intervention était équipé de masques FFP2, de combinaisons en Tyvek™, de surchaussures et de gants en nitrile.

Une analyse de la qualité de l'air a été effectuée du 4 au 7 janvier 2023 par la société ISPIRA en 5 endroits du musée [8] : dans la nef au niveau de l'exposition « année 80 » et au niveau 5 (bureaux), dans une salle d'exposition temporaire du 1er étage à proximité du restaurant, dans la galerie des bijoux côté jardin des Tuileries (2eme étage au-dessus du restaurant), dans une des salles consacrées au Moyen Âge (3ème étage au-dessus du restaurant). Les éléments mesurés étaient les HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques) sous forme gazeuse et particulaire et les BTEX (Benzène, Toluène, Ethylbenzène et Xylène), tous sont des composés aromatiques toxiques. Ces analyses ont montré qu'il n'y avait aucun risque sanitaire dans les espaces contrôlés. Il est à noter que le nez est très sensible aux odeurs de suies et de « brûlé », et qu'il est capable de détecter ces odeurs à des concentrations bien en deçà des seuils considérés comme toxiques.

Dans les jours et semaines qui ont suivi l'incendie, tous les filtres des centrales de traitement d'air (CTA) des zones concernées ont été nettoyés ou changés, selon leurs modèles et leurs dimensions. Ce n'est qu'après le démontage (quatre mois après l'incendie) de l'exposition « Années 80 » que les toiles qui occultent les oculi au-dessus de la nef ont pu être démontées et remplacées, et les corniches nettoyées.

Mécanismes de dépôt des suies

Le comportement de dépôt des suies dépend de la taille des particules, de leur nombre et de leur concentration, ainsi que du comportement des gaz porteurs dans lesquelles elles évoluent. L'ensemble de particules liquides ou solides en suspension dans un milieu gazeux est appelé aérosol [9,10,11].

Comme indiqué dans le tableau 1, la gamme de dimensions des particules s'étend de 10^{-3} à $100 \mu\text{m}$. À l'intérieur de laquelle on considère généralement trois domaines :

- Pour les plus petites dimensions, de l'ordre du nanomètre à la dizaine de nanomètres, le domaine moléculaire qui correspond à des particules dont le comportement est décrit par la thermodynamique et plus particulièrement la théorie cinétique des gaz. Ces particules peuvent éventuellement se déposer par collision avec une surface, mais avant tout, elles vont coalescer entre-elles en cas de collision. Plus leur concentration est élevée, plus leur durée de vie est courte : elles forment rapidement des agrégats plus grands.
- Le domaine intermédiaire qui correspond à des dimensions comprises entre la dizaine de nanomètres et le micromètre, dont le comportement est décrit par extrapolation soit du comportement des particules plus petites soit de celui des particules plus grandes.
- Le domaine continu qui correspond à des dimensions de particule supérieures au micromètre et dont le comportement est décrit par l'aérodynamique : ces particules vont se déposer par sédimentation, d'autant plus rapidement que leur taille est grande.

La gamme de concentration couverte en physique et en métrologie des aérosols est extrêmement vaste (de 10^{-15} kg/m^3 à 1 kg/m^3). À titre d'exemple, on peut citer les quatre domaines suivants : les incendies (concentrations entre 10^{-3} et 1 kg/m^3), les rejets de cheminée (entre 10^{-6} et 10^{-3} kg/m^3), les aérosols atmosphériques (entre 10^{-10} et 10^{-5} kg/m^3), les milieux ultra propres (entre 10^{-15} et 10^{-9} kg/m^3).

Problématiques de nettoyage des dépôts de suies

La problématique globale après un incendie est le nettoyage des dépôts de suies. Il est tributaire des composés déposés, mais aussi des matériaux recouverts (nature, porosité, reliefs et état de surface). Les moyens à mettre en œuvre et la fréquence des interventions doivent être adaptés à chaque type de matériaux [12,13].

Si dans le restaurant les suies se sont déposées en une couche épaisse et très visible, dans le musée, elles sont à peine visibles à l'œil, sauf sur certaines surfaces horizontales de couleur claire. Une étude montre la difficulté de percevoir les dépôts fins de suie selon la couleur du support [14]. C'est en utilisant des matériaux blancs que l'on peut le mieux évaluer à l'œil la présence des retombées de suies sur les surfaces. Du fait de leurs faibles dimensions (Tableau 1), les particules de suies ultrafines peuvent rester en suspension dans l'air et des retombées peuvent se poursuivre plusieurs jours après le sinistre, nécessitant plusieurs campagnes de nettoyage. Pendant quelques semaines, des carrés de polycarbonate blanc ($10 \times 10 \text{ cm}$) posés à plat sur des podium ou des œuvres ont été utilisés dans les salles comme témoins visuels pour vérifier jour après jour le dépôt d'éventuelles particules en suspension et pour estimer les besoins en dépoussiérage.

L'équipe des monteurs - installateurs du département des collections du MAD - qui s'occupe du dépoussiérage des œuvres en salles, a été particulièrement sollicitée pendant les semaines qui ont suivi. Le protocole de dépoussiérage des œuvres et des silhouettes présentées hors vitrine dans l'exposition « années 80 » a été renforcé, avec une attention particulière portée aux suies [15]. Les vêtements ont été à nouveau dépoussiérés après le dé-

mannequinage suivant la fin de l'exposition.

Globalement, les suies étaient trop collantes pour être aspirées ou micro-aspirées efficacement. Pour les galeries permanentes comme pour les expositions temporaires, quand les surfaces le permettaient, il a été décidé de pratiquer un dépoussiérage à sec avec des chiffons en microfibres. Parmi plusieurs types de matériaux, nous avons choisi des chiffons microfibres Evolon® (intissé 70% polyester et 30% polyamide, sans PVC, qui peut être acheté en carrés, ou plus économiquement, chez certains fournisseurs, en rouleau de 1m par 10m) qui ne peluchent pas et peuvent être utilisés avec des solvants (ce qui a été le cas pour certains objets métalliques, qui ont été nettoyés avec de l'Evolon® et de l'éthanol). Par ailleurs, ce matériau peut être lavé plusieurs fois. Les podiums de l'exposition « années 80 » ont été nettoyés avec des microfibres polyester humidifiées avec ajout d'un tensio-actif neutre (Tween 20®). Ponctuellement, selon les œuvres et la quantité de suies déposée, d'autres techniques ont pu être utilisées, comme les « éponges à suies » ou « smoke sponge » (éponges/gommes en latex vulcanisé) ou les éponges de maquillage en polyuréthane sans latex (par ailleurs utilisées en restauration et dépoussiérage en arts graphiques). Quelques fournisseurs sont mentionnés à la fin de cet article.

En 2019, les toutes premières interventions de retraits des suies ont été effectuées en interne immédiatement après que les pompiers eurent autorisé les équipes du musée à pénétrer dans les espaces. Par la suite, les 350 œuvres (mobilier, céramiques, orfèvrerie, vitraux, verreries...) présentes dans les quatre salles directement impactées par les fumées ont été déposées et décontaminées après transport dans un entrepôt par une équipe réunie par Mme D. Elie-Lefebvre [16]. Sur les œuvres, des tests de pH de surfaces au moyen de bandelettes pH n'avaient pas indiqué de changement avant et après traitement. En 2022, une quinzaine de tests de pH ont été réalisés le lendemain du sinistre sur des podiums et des dessus de vitrines dans la nef. Ils ont été effectués avec des petits cylindres de gel d'agarose posés deux minutes sur la surface à tester puis placés sur la cellule d'un pH mètre Laquatwin (HORIBA). Les résultats de ces mesures étaient globalement neutres (entre 6 et 7,5), à l'exception de deux mesures plus acides (4,5). Le fait que ces tests de pH ne soient pas homogènes peut tenir aux méthodes utilisées mais aussi et surtout au fait que les suies ne sont pas homogènes et dépendent de ce qui a brûlé, de leur dimension et composition, et de la façon dont elles retombent.

La question du nettoyage des suies est problématique et nécessite *a priori* des séries de tests, entre efficacité et abrasion des surfaces. La rapidité d'intervention est également importante, car sur de nombreux matériaux la suie devient au fil des semaines de plus en plus difficile à éliminer [12,13]. Les suies, leur nature, leur adhérence et leur quantité dépendent des matériaux qui ont brûlé, et de la nature, des reliefs / état de surface et de la porosité du matériau de l'œuvre sur lesquelles elles se sont déposées. La distribution des suies est variable dans les espaces et sur les surfaces (orientation et nature). Il semble important de citer plusieurs techniques que nous n'avons pas eu l'occasion – ni de fait le besoin – d'envisager car correspondant à des situations beaucoup plus graves que celle à laquelle nous avons été confrontés : les éliminations des suies à la glace carbonique, par laser, par gel et le projet MOXY sur l'emploi d'oxygène monoatomique [17, 18, 19]. L'étude de V. M. Pozhidaev et al [20] décrit différents tests de nettoyages chimiques de surface d'une sculpture en marbre et d'un bas-relief de majolique ayant tous deux subi un incendie (complexants, solvants et mélanges, surfactants...). Par ailleurs, cette dernière étude montre que les produits de combustion ont été absorbés dans la couche de cire qui protégeait la surface du marbre (la présence de cire sur la surface montre que le marbre n'a pas été soumis à des températures élevées, mais seulement aux fumées de combustion). Ceci confirme que ces revêtements de protection doivent être supprimés pour s'assurer de l'élimination des contaminants.

Incendie et corrosion des métaux

La composition des fumées d'incendie est souvent étudiée du point de vue de la toxicité sur les personnes [3, 21] et leur corrosivité pour le métal du point de vue des altérations soit des structures, soit des matériels et composants électroniques [22, 23, 24]. En particulier, plusieurs articles traitent de la corrosion des aciers, du cuivre, de différents alliages de brasure dans des fumées de combustion de PVC, mais aussi de différents matériaux pouvant être présents dans des incendies domestiques (en opposition aux incendies dits industriels).

Bien que ces articles ne concernent pas des métaux culturels, certaines de leurs conclusions peuvent être notées. Pendant un incendie, l'élévation de la température, l'humidité et les possibles phénomènes de condensation jouent un rôle très important pour la corrosion des métaux mais aussi pour l'incrustation des suies. L'un des tests décrits par Hirschler et al. [23] met en évidence que lorsque les suies ne sont pas rapidement éliminées après l'incendie, les phénomènes de corrosion sont aggravés. Par ailleurs, la corrosivité des fumées n'est pas uniquement liée à leur acidité. En effet, si par exemple la combustion du bois produit de l'acide acétique et des suies globalement acides, des fumées provenant de composés contenant de l'azote tels que le nylon ou la laine sont alcalines, et sont très corrosives (en particulier pour le cuivre) [21, 23]. Les compositions des fumées et des suies ne sont pas homogènes et dépendent de facteurs complexes, qu'il n'est pas possible d'anticiper.

Par ailleurs, la corrosivité des aérosols dépendra des composés halogénés présents dans l'aérosol tout autant (voir plus) que du pH des suies [21].

Galerie des bijoux, exemple d'un bracelet de Jean Després

La galerie des bijoux occupe deux salles distinctes, situées au deuxième étage du pavillon de Marsan (Figure 2). La galerie sud, d'environ 70m² et donnant sur le jardin des Tuileries, se trouve juste au-dessus du restaurant. Y sont présentés des bijoux du moyen âge aux années 1930 dans une grande vitrine qui court sur trois côtés de la salle, des collections indiennes et asiatiques dans les trois vitrines centrales, enfin des exemples de matériaux et de techniques en bijouterie dans une série de vitrines cubes sur le quatrième côté : le « mur des matériaux ».

Côté nord, dans une salle d'environ 30m² donnant sur la rue de Rivoli, sont présentés les bijoux contemporains, dans une grande vitrine qui court sur trois côtés de la salle et deux vitrines centrales.

Dès le 8 janvier 2020 [25], les jours aux niveaux des portes des vitrines de la galerie des bijoux ont été recouverts avec du scotch (type scotch de peintre) afin de limiter l'apport de suies supplémentaires. L'extérieur de l'ensemble des vitrines ont été nettoyés. Les suies étaient particulièrement présentes sur les parois des vitrines cubes les plus proches des deux portes d'accès à la salle sud.

Le traitement de retrait des suies sur les œuvres de la galerie des bijoux (environ 1200 pièces) et sur les éléments muséographiques a été effectué un mois après le départ de feu et a représenté l'équivalent de 18 jours/hommes à deux restauratrices et deux monteuses-installateurs d'œuvres d'art. Ce délai est dû en partie à un problème de changement des filtres qui ont dû être commandés à cause de leurs dimensions non standard. Toutes les interventions pour retirer les suies se sont déroulées dans la galerie, les bijoux étant déposés puis réinstallés au fur et à mesure des interventions (ces deux salles sont restées fermées jusqu'à la fin de ces interventions).



Figure 2. Plan des deux salles de la Galerie des bijoux, MAD (en haut la rue de Rivoli, en bas le jardin des Tuileries) ©Les Arts Décoratifs

Juste après le sinistre, il a pu être observé que certaines des surfaces en argent avaient été affectées par les polluants libérés lors de l'incendie et avaient subi un ternissement. En milieu urbain, les suies font partie des polluants responsables de la corrosion des métaux d'autant qu'elles peuvent adsorber et maintenir en surface différents gaz polluants soufrés et chlorurés [26].

Les bijoux (principalement en argent, platine, or et alliage cuivreux, mais aussi acier, bois, émail, pierres, plastiques, textiles...) les plus touchés sont ceux de la salle sud, en particulier ceux présentés dans la grande vitrine à proximité des portes d'accès à la salle. La corrosion lente due aux polluants soufrés présents dans les vitrines non étanches a pu être comparée à celle qui a eu lieu à la suite de l'incendie.

Le cas du bracelet de Jean Després (inv. MAD 45976), en argent partiellement doré et laque, illustre parfaitement l'impact du ternissement résultant d'un départ de feu.

Onze mois avant l'incendie, en janvier 2022, le bracelet avait été retiré de vitrine pour un prêt. La présence d'un voile de corrosion hétérogène était clairement visible à la surface du bijou (Figures 3 et 4). Autour du motif central et au revers, l'argent était moins terni. On peut noter qu'au revers (Figure 4), deux lignes plus claires étaient visibles sur la surface ; elles correspondaient à un « fantôme » du socle de présentation.

Cette corrosion était le résultat de plusieurs années de présentation (durée inconnue depuis le précédent nettoyage, mais supérieure à 4 ans), en vitrine non étanche. Cette dernière communiquant non seulement avec la salle du musée mais aussi avec l'environnement urbain extérieur via trois fenêtres masquées par les fonds de vitrines (dont un accès pompier).



Figure 3. Avers du bracelet MAD 45976 avant nettoyage en janvier 2022 pour prêt, présentant un ternissement dû à plusieurs années de présentation en vitrine non-étanche
© Didelot 2022



Figure 4. Revers du bracelet MAD 45976 avant nettoyage en janvier 2022 pour prêt, présentant un ternissement dû à plusieurs années de présentation en vitrine non-étanche
© Didelot 2022



Figure 5. Avers bracelet MAD 45976 après le départ de feu
© Didelot 2023



Figure 6. Revers bracelet MAD 45976 après le départ de feu © Didelot 2023

Une mesure de corrosivité de l'air a été effectuée dans cette vitrine pendant 5 mois durant le premier semestre 2022 avec un appareil de mesure Aircorr® (capteur produit par l'institut de la corrosion) équipé d'une piste argent [27, 28]. Le principe de cet appareil est de mesurer et d'enregistrer la résistance électrique d'une fine piste métallique. Quand le métal se corrode, l'épaisseur et la section de la piste diminue et la résistance augmente. Cela permet d'estimer la corrosivité de l'environnement pour le métal considéré (il existe différents coupons, notamment cuivre, argent et plomb). Plusieurs vitrines du musée ont été testées, et la salle sud de la galerie des bijoux a montré une classe de corrosivité IC3, soit une corrosivité moyenne (selon la norme ISO11844-1).

Le bijou a été nettoyé avant le prêt et a ensuite été réinstallé, propre, en galerie quelques mois avant l'incendie. Juste après l'incendie de décembre 2022, les effets de l'incendie, des gaz émis et des particules fines sont clairement observables (Figures 5 et 6). Ils se traduisent par un très fort ternissement, beaucoup plus homogène, affectant l'avant comme le revers, et ceci bien que les portes de la salle des bijoux aient été fermées.

Les pompiers n'ont utilisé d'eau que dans le sous-sol des locaux du restaurant. L'incendie en lui-même n'a pas eu d'incidence sur le climat de la nef, en revanche l'enclenchement du désenfumage y a entraîné une baisse de température de 6°C et une augmentation de l'hygrométrie de 16% (données moyennes des relevés des capteurs de la nef au niveaux 1, 3 et 5). Au moment de l'enclenchement du désenfumage à 2h45, le capteur extérieur indiquait une température de 5°C et une humidité relative de 80%. Il n'y a pas eu de variation de la température dans la galerie des bijoux, mais il y a bien eu une augmentation de l'humidité relative (un seul capteur dans la galerie des bijoux, placé dans la salle sud), dont les portes n'ont pas été ouvertes pendant le désenfumage. Si la variation de l'humidité absolue est la même que dans la nef, l'augmentation de l'humidité relative est moitié moins importante (à cause de la température plus basse de la galerie des bijoux). Dans la galerie des bijoux, les variations demeurent dans les limites des variations observables le reste du temps.

Pour ce qui est de la corrosion des métaux, les suies déposées ne sont pas les seules en cause, les gaz émis pendant l'incendie jouent également un rôle important. Un facteur aggravant correspond à la présence de cire à la surface des objets car dans certaines conditions celles-ci peuvent absorber les aérosols émis par l'incendie et qui viennent se déposer ou se condenser sur les surfaces [20]. Il faudrait pouvoir connaître les effets des autres types de protection de surface. Dans le cas des bijoux en argent de la galerie des bijoux, on peut supposer que des joints ou autres matériaux contenant du soufre et/ou des chlorures ont pu brûler en dégageant des gaz qui sont venus oxyder les surfaces. La très grande majorité des bijoux en argent n'avaient pas de protection de surface.

Quand des œuvres métalliques se trouvent à proximité immédiate de l'incendie, on peut observer des altérations et déformations mécaniques dues aux températures élevées (selon le niveau d'oxygénation les températures peuvent aller de 600°C dans une pièce à 1200°C quand il y a appel d'air par une cage d'escalier par exemple), avec fusion des brasures et des métaux à bas points de fusion tels que le plomb, l'étain ou le zinc, déformation des assemblages... Si du mercure est présent, il sera vaporisé (relativement fréquemment présent en musée dans les instruments de mesure anciens type baromètres ou thermomètres, miroirs à l'amalgame Hg/Sn...). On peut observer des phénomènes de délamination et de cloques ou au contraire de diffusion quand des métaux sont plaqués (Le MAD conserve plusieurs pièces d'orfèvrerie Christofle en alliages cuivreux argentés rescapées de l'incendie des Tuileries de 1871, qui présentent des états de surfaces particuliers (Figure 7)). Toutes les réactions déjà décrites seront d'autant plus fortes que les concentrations des aérosols seront plus élevées à proximité immédiate de l'incendie. Enfin l'eau d'extinction est, elle aussi, vecteur d'altérations.

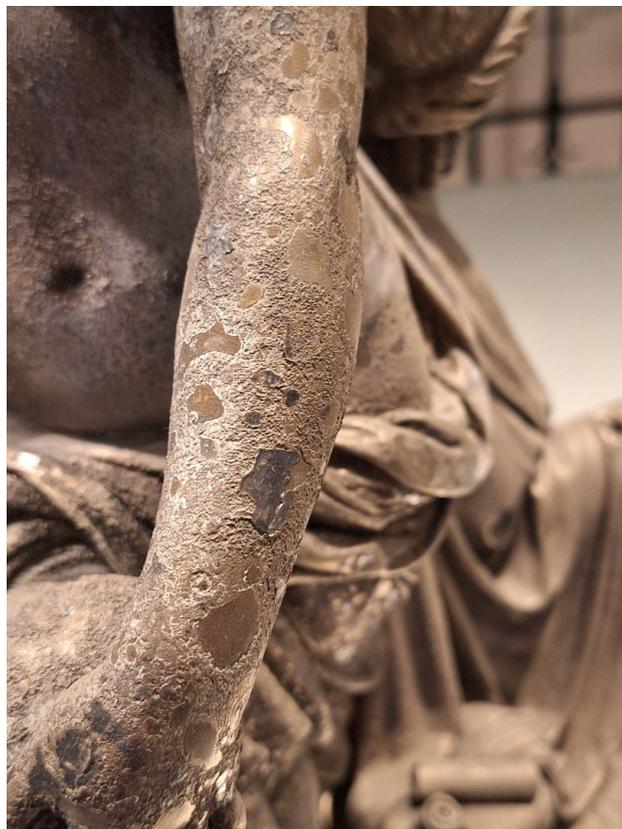


Figure 7. Alliage cuivreux argenté, détail de surface d'un des éléments du « surtout aux cent couverts », rescapé de l'incendie des Tuileries et conservé au MAD, inv. 7023 A-G. © Didelot

Conclusion

L'incendie décrit ici est resté cantonné aux espaces du restaurant ; les zones muséales n'ont été impactées « que » par les fumées et gaz émis. Ses conséquences sur les œuvres, non négligeables, sont néanmoins limitées : aucune œuvre n'a été touchée par le feu ou par une élévation de température, il n'y a pas eu d'eau utilisée à proximité des œuvres, il n'y a pas eu d'endommagement de la structure du bâtiment. Après l'intervention des pompiers, le personnel du musée a pu intervenir très rapidement, grâce notamment à la présence des EPI disponibles en quantité suffisante pour le personnel du musée.

Dans ce contexte, les opérations d'entretien et de nettoyage post-incendie ne peuvent pas être assimilées à un simple dépoussiérage. La mise en place de traitements de nettoyage spécifique est un élément obligatoire dans ce cas de sinistre. La production de suies et de composés issus des fumées engendre différents types de particules pouvant présenter différentes dynamiques de déposition et de comportement sur les œuvres ainsi que sur les parois des vitrines, des installations muséographiques et murs du musée.

Les effets des suies et gaz de combustion sur les bijoux et leurs éléments métalliques, de la Galerie des bijoux situés au-dessus du restaurant, ont été illustrés par l'exemple d'un bracelet en argent de Jean Desprès exposé dans une vitrine. On montre ici que les fumées dégagées ont induites en quelques heures un ternissement important, bien supérieur à plusieurs années d'exposition.

Remerciements

Madame Florence Bertin, responsable du département des collections du MAD.

Madame Michaela Florescu (Moderna Museet, projet MOXY).

Madame Elodie Guilminot, Madame Inocencia Queixalos et Monsieur Luc Robbiola pour leur relecture attentive.

Tous les collègues du MAD qui ont pris part aux premières interventions, en particulier ceux qui ont poursuivi toutes les étapes de dépoussiérage des galeries, ainsi que mesdames Biscarel, Chalons, Chardon, Gaihlbaut et Toubert, restauratrices indépendantes qui ont participé au dépoussiérage des textiles, sculptures, peintures et bijoux, et madame Binet (société ISPIRA) et Mr Mathieu Rousset-Perrier, Conservateur des collections Moyen Âge, Renaissance et Bijoux du MAD

Exemples de fournisseurs

Evolon® :

<https://deffner-johann.de>

<https://atlantis-france.com>

<https://www.cxdinternational.com>

Éponges en polyuréthane sans latex (vieilli en quelques mois, il vaut mieux éviter de faire des stocks « dormants ») :

<https://deffner-johann.de>

<https://www.schmedt.fr>

« Smoke sponge » (à noter, contient du soufre) :

<https://www.artdoctor.fr>

<https://www.preservationequipment.com>

<https://atlantis-france.com>

<https://promuseum.eu>

Tween 20® :

<https://ctsconservation.com>

Références

[1] Le plan de sauvegarde des biens culturels, C2RMF, <https://c2rmf.fr/le-plan-de-sauvegarde-des-biens-culturels>, Consulté le 31/10/2024

[2] Bertin F., Courselaud M., Conseils pratiques pour la protection des collections post-incendie, C2RMF, 2024, <https://c2rmf.fr/sites/c2rmf/files/documents/Conseils%20pratiques%20pour%20la%20protection%20des%20collections%20apre%CC%80s%20incendie.pdf>, Consulté le 04/09/2024

[3] Fent K., Evans D., Babik K., Striley C., Bertke S., Kerber S., Smith D, Horn G., Airborne contaminants during controlled residential fires, *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **15**, 5 (2018) p.399-412, DOI: 10.1080/15459624.2018.1445260

[4] Lafon D., Garnier R., Toxicité des produits de dégradation thermique des matières plastiques. *EMC - Pathologie professionnelle et de l'environnement* (Elsevier Masson SAS, Paris), 16-541-C-10, (2008) 12p. Doi : 10.1016/S1155-1925(08)44577-9

- [5] Mairesse M., Petit J.M., Chéron J., Falcy M., Produits de dégradation thermique des matières plastiques. *Cahiers de notes documentaires –Hygiène et Sécurité au Travail* 1999 ; 174:47-57. <https://www.inrs.fr/media.html?refINRS=ND%202097>, Consulté le 11/11/2024
- [6] Airparif – Surveillance de la Qualité de l’Air en Ile-de-France – Avril 2021, « Synthèse des connaissances sur les particules en suspension dans l’air en Ile-de-France », https://www.airparif.fr/sites/default/files/documents/2021-04/Note_particules_042021.pdf, Consulté le 18/10/2024
- [7] Fontan J., Les particules polluantes de l’air : de quoi s’agit-il ? *Encyclopédie de l’Environnement*, 2019. 12 p. <http://www.encyclopedie-environnement.org/?p=5923>, Consulté le 11/11/2024
- [8] ISPIRA, Rapport d’étude de la qualité de l’air, ERP_2212070_R1_V (23 janvier 2023), non publié
- [9] Laborde J.C., Le comportement des aérosols : de l’installation à l’environnement, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, Service d’Études et de Recherches en Aérodispersion des polluants et en Confinement (2005), <https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/Public/39/120/39120405.pdf>, Consulté le 18/10/2024
- [10] INERIS, dossier thematique Qu’est-ce qu’une particule ? 2024, <https://www.ineris.fr/fr/risques/dossiers-thematiques/qualite-air/qualite-air-ambient/pollution-atmospherique-particules>, Consulté le 18/10/24
- [11] Haynes B. S., Wagner H. G., Soot formation. *Prog. Energy Combust. Sci.*, **7** (1981) p. 229–273. doi:10.1016/0360-1285(81)90001-0
- [12] Spafford-Ricci S., Graham F., The Fire at the Royal Saskatchewan Museum, Part 1: Salvage, Initial Response, and the Implications for Disaster Planning. *Journal of the American Institute for Conservation*, **39** (1) (2000) p.15–36. <https://doi.org/10.1179/019713600806113338>
- [13] Spafford-Ricci S., Graham F., The Fire at the Royal Saskatchewan Museum, Part 2: Removal of Soot from Artifacts and Recovery of the Building. *Journal of the American Institute for Conservation*, **39** (1) (2000) p.37–56. <https://doi.org/10.1179/019713600806113310>
- [14] Bellan L., Salmon L., Cass G., A study on the human ability to detect soot deposition onto works of art, *Environmental Science & Technology* **34**, 10 (2000) p.1946–1952. <https://doi.org/10.1021/es990769f>
- [15] Toubert M., Chalons C., Suivi et dépoussiérage exposition « années 80 » (2022) rapports d’interventions non publiés
- [16] Elie-Lefebvre D., Rapport d’intervention : Mars-Avril 2019 (2019), non publié
- [17] Florescu M. communication personnelle, 11 juin 2024
- [18] <https://www.modernamuseet.se/stockholm/en/2023/07/10/moxy-space-art/> Consulté le 31/08/2024
- [19] Ortega Saez N. et al., Towards a novel strategy for soot removal from water-soluble materials: the synergetic effect of hydrogels and cyclomethicone on gelatine emulsion-based photographs, *Heritage Science* **11**, 78 (2023) p.1-17, <https://doi.org/10.1186/s40494-023-00916-5>
- [20] Pozhidaev V. M., Retivov V. M., Kamaev A. V., Belus S. K., Nartov A. S., Rastorguev V. A., Borodin I. V., Terechenko E. Y., Sandu R. A., Yatsishina E. B., Kovalchuk M. V. Research of a complex fire-induced pollution on the marble relief from the Pushkin state museum of fine arts collection, *Heritage Science* **7**:90 (2019) 12p. doi.org/10.1186/s40494-019-0329-z

[21] Hirschler M., Fire safety, smoke toxicity and acidity. *Proc. Flame Retardants - Interscience Communications*, London, UK (2006) p.47-58

[https://citeseerx.ist.psu.edu/document?](https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8a3c0b2110638d8bb351105ca451efaf22f10031)

[repid=rep1&type=pdf&doi=8a3c0b2110638d8bb351105ca451efaf22f10031](https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=8a3c0b2110638d8bb351105ca451efaf22f10031) Consulté le 31/08/2024

[22] Patton J.S., Fire and smoke corrosivity of metals, *Journal of Fire Sciences* **9**, 2 (1991) p.149- 161, DOI:10.1177/073490419100900204

[23] Hirschler M., Smith G., Corrosivity of Smoke Towards Metals, *Journal of Vinyl technology* **11**, 1 (1989) p.62-70, [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(89\)90048-9](https://doi.org/10.1016/0379-7112(89)90048-9)

[24] Li Q., Liu X., Lu S., Corrosion behavior assessment of tin-lead and lead free solders exposed to fire smoke generated by burning polyvinyl chloride. *Materials Chemistry and Physics* **212** (2018) p.298–307, <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2018.03.057>

[25] Didelot C., Compte rendu d'interventions de dépoussiérage dans les galeries des bijoux à la suite du départ de feu du Loulou (31 janvier 2023), non publié

[26] Grzywacz C., Monitoring for gaseous pollutants in museum environments, Ed. The Getty Conservation Institute (2006) https://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/monitoring.pdf Consulté le 29/09/2024

[27] Dubus M., Prosek T., Évaluation normalisée de l'environnement du patrimoine. *La Lettre de l'OCIM* **142** (2012) hal-01946030

[28] Capteur de Corrosion Atmosphérique AirCorr® : <https://www.institut-corrosion.fr/activites/capteur-de-corrosion-atmospherique/>, consulté le 31/12/2024

LA COLLECTION MÉTALLIQUE DU MUSÉE GIRODET APRÈS L'INONDATION DU LOING, LE 31 MAI 2016

Charlotte Rérolle^{1*}, Sidonie Lemeux-Fraitot²

¹ AntePostQuem, ² Musée Girodet (Montargis)

 charlotte_rerolle@yahoo.fr

* Autrice correspondante

Résumé

Le 31 mai 2016, la ville de Montargis connaissait une inondation exceptionnelle suite à la rupture du canal de Briare en amont de la ville, sous la pression de la crue des cours d'eau du bassin du Loing. Les œuvres du musée Girodet conservées dans une réserve en second sous-sol pendant les travaux de rénovation du musée furent immergées au moins trois jours, sinistrant 85% de la collection. On peut s'interroger sur la manière dont les objets métalliques, si sensibles à l'eau et aux variations d'humidités ont réagi : du sauvetage au traitement d'urgence ; du traitement de conservation-restauration au bilan sanitaire des collections métalliques 7 ans plus tard.

Mots clés

Inondation, intervention d'urgence, collection métallique

Abstract

On May 31, 2016, the town of Montargis experienced unprecedented flooding following the bursting of the Briare canal upstream from the town, due to the pressure of the flooding of the rivers in the Loing basin. The works in the Musée Girodet, stored in a second basement during the museum's renovation work, were submerged for at least three days. 85% of the collection was affected (by the disaster). One might wonder how the metal objects, so sensitive to water and variations in humidity, reacted: from the rescue to emergency treatments; and from conservation treatments to the sanitary assessment of the metal collections 7 years later.

Keywords

Flood, emergency intervention, metal collection

L'inondation

En 2016, après quatre ans de travaux, le musée Girodet s'apprête à ouvrir à nouveau ses portes au public. Le bâtiment doit être livré à l'automne, en attendant les œuvres rentrant de restauration ou sélectionnées pour exposition sont stockées dans des réserves de l'Hôtel d'Agglomération qui étaient à l'origine les chambres fortes de l'ancienne Caisse d'Épargne située face au musée. En mai 2016, de fortes précipitations sont enregistrées en France et notamment dans le bassin parisien où les eaux montent. Le 31 mai, la ville de Montargis connaît une inondation exceptionnelle suite à la rupture du canal de Briare en amont de la ville. La rupture se fait sous la pression des crues des cours d'eau du bassin du Loing. Quand la digue rompt, le musée a environ deux heures pour remonter quelques œuvres des réserves. L'eau montera à environ 1m50 au rez-de-jardin de l'Hôtel d'Agglomération, le musée (Figure 1), les réserves sont submergées, comme toute la ville, l'eau entrant notamment par les conduites techniques, produisant ainsi un vortex d'une puissance inimaginable. Des portes et des cloisons seront détruites, des étagères ou des caisses de transport de sculptures de plusieurs centaines de kilogrammes seront déplacées (Figure 2). L'eau va être pompée pendant trois jours avant de permettre de commencer à accéder aux réserves inondées.



Figure 1. Arrière du musée pendant l'inondation.
© Sidonie Lemeux-Fraitot / musée Girodet



Figure 2. Ouverture de la réserve après le pompage de l'eau.
© Sidonie Lemeux-Fraitot / musée Girodet

Le sauvetage, temps de l'urgence

Près de 85% des collections du musée sont touchées par l'inondation. Du 4 au 17 juin 2016, une fois l'accès à la réserve rendu possible, près de 56 conservateurs-restaurateurs bénévoles de toutes les spécialités vont se relayer soit 132 jours-homme de bénévolat pour le sauvetage. Le personnel du musée, les agents de l'Agglomération mais également des citoyens vont venir aider à sauver les collections inondées du musée. Éléonore Kissel, responsable du Pôle Conservation-Restauration au musée du quai Branly et spécialiste des risques et sinistres en musée, organise et coordonne les opérations de sauvetage. Les objets présents dans Plan de Sauvegarde des Biens Culturels (PSBC), les plus précieux et les plus fragiles dont la collection de dessins de Girodet sont extraits en priorité de la réserve inondée, est également remonté ce qui est accessible. Les espaces pour traiter les œuvres sont organisés en fonction de la nature des collections et des matériaux. Il est nécessaire de rincer immédiatement les œuvres et les objets à l'eau pour éviter tout dépôt de limon avant d'envisager un début de séchage.

Les collections contenant du métal au musée Girodet sont de plusieurs types : collections archéologiques restau-

rées, dépôts de fouille en sachets mini-grip avec des objets bruts de fouille, collection de monnaies et médailles, sculptures et objets d'arts, objets ethnographiques composites.

Trois conservatrices-restauratrices métal se sont rendues sur place, Michaela Florescu, Charlotte Rérolle et Julie Schroeter. Aux abords de l'Hôtel d'Agglomération, les premiers gestes consistent comme pour les autres matériaux en un rinçage à l'eau courante (Figure 3). Il a été nécessaire de se débarrasser des contenants ou supports comme les boîtes écrins des médailles trop imbibées d'eau et de boue. Tous les objets métalliques ont été séchés à l'aide de papier absorbant et de sèche-cheveux en insistant sur les zones d'assemblages des objets. Le Service Régional d'Archéologie Centre-Val de Loire et le service départemental d'archéologie du Loiret, sont venus en renfort très rapidement, pour prendre en charge les caisses de mobiliers archéologiques. Elles ont été emportées dans leurs locaux d'Orléans pour rincer tous les objets et les reconditionner dans de nouveaux mini-grips et avec des sachets dessiccants pour les objets en métal (Figure 4).

Le trésor de Sceaux-du-Gatinais, plus de 500 billons du III^{ème} siècle, a été confiée à Charlotte Rérolle pour une intervention d'urgence en atelier par sécurité, en raison de la valeur des pièces et de leur petite taille. La perte de la documentation du musée lors de l'inondation ne permet pas de se rendre compte de l'évolution réelle de l'état des monnaies. On peut noter qu'environ 40% des monnaies sont affectés par des problèmes de reprise de corrosion active et évolutive mais l'état de surface de ce trésor est très hétérogène (Figures 5, 6 et 7).



Figure 3. Sculptures après rinçage.
© Sidonie Lemeux-Fraitot / musée Girodet



Figure 4. Collections archéologiques en cours de séchage au SRA. © Sidonie Lemeux-Fraitot / musée Girodet



Figure 5. Monnaies à la sortie des réserves.
© Charlotte Rérolle / Antepostquem



Figure 6. Monnaie baignant dans une pochette d'eau.
© Charlotte Rérolle / Antepostquem



Figure 7. Monnaies du trésor monétaire de Sceaux-du-Gatinais après séchage et avant interventions.
© Charlotte Rérolle / Antepostquem

Le temps de la conservation

Lors de l'été 2016, des missions de surveillance ont été mises en place pour le séchage des peintures et des sculptures et un chantier-école avec TALM (l'école des beaux-arts de Tours) a permis d'initier une veille sanitaire des collections.

Suite à la signature d'un accord-cadre entre l'Etat et l'Agglomération Montargoise, les premiers marchés publics de conservation-restauration ont été lancés : accord-cadre multi-attributaires à bons de commande avec des lots peinture et art graphique entre 2017 et 2020, puis entre 2021 et 2025 des lots sculptures, objets d'art et cercueils égyptiens. Pour ce second marché, l'équipe de Claire Dard est intervenue par l'intermédiaire de Laura Caru, Sarah Dubuisson-Gonnet et Charlotte Rérolle sur le lot 9, objets d'arts métal. Ce lot comprenait 34 petites sculptures ou bas-reliefs en alliage cuivreux, bronze patiné ou doré et fonte de fer qui avaient été inondés. On retient de l'état de ces œuvres, un fort encrassement au limon qui a localement créé des corrosions préférentielles surtout dans les zones d'assemblage, dans les creux et sous les socles. Des coulures localisées et des usures des revêtements de surfaces ont également été causées par l'inondation. Les éléments en alliages ferreux semblent avoir subi un développement de la corrosion plus important que les alliages cuivreux. Parmi les objets d'arts qui ont subi une dégradation très importante, on peut noter les médaillons en galvanoplastie de cuivre. Il n'a pas été possible d'accéder au revers de certains entre eux lorsqu'étaient encore présents leurs supports en plâtre au dos. Pour ce lot, un peu plus de 300H d'interventions et de documentation ont été nécessaires.

Parallèlement, entre 2021 et 2023, les élèves restaurateurs de l'INP, de la spécialité art du feu, atelier métal, ont pris en charge sous la direction de Marie-Anne Loeper-Attia, un casque Renaissance, un casque à visière, une ge-

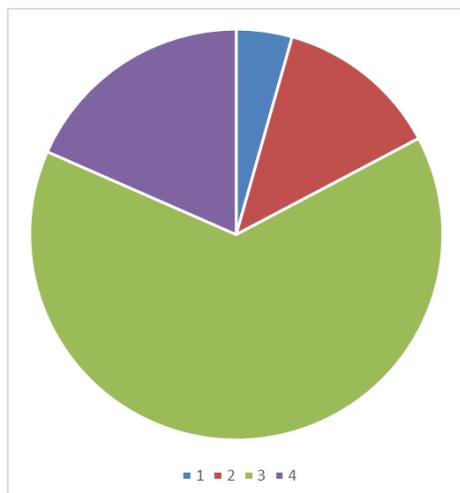
noillère et un brassard en alliage ferreux. L'objectif était de dégager les produits de corrosion pour retrouver la surface d'origine des objets, de les stabiliser et de les conditionner (Figure 8).



Figure 8. Objets à la sortie des bacs d'eau en attente de séchage.
© Sidonie Lemeux-Fraitot / musée Girodet

Enfin en 2023-2024, 26 jours ont été nécessaires pour réaliser un bilan sanitaire des collections inondées comprenant du métal. Dix jours supplémentaires seront à programmer en 2025 afin de terminer complètement ce bilan sanitaire. Laura Caru, Sarah Dubuisson-Gonnet et Charlotte Rérolle ont étudié toutes les caisses contenant du mobilier archéologique, ethnographique et historique afin d'évaluer le comportement du métal 6 à 7 ans après l'inondation. L'état des objets et leurs dégradations sont consignés dans un tableau. Pour les objets qui ont perdu leur numéro ou dont des éléments ont été dissociés lors de l'inondation, des numéros temporaires sont attribués, parfois grâce aux dimensions précises, certains objets peuvent être ré-identifiés. Le degré d'urgence des interventions à envisager est réparti en quatre catégories :

| Degrés d'urgence | Description de l'état | Nombre d'objets |
|------------------|---|-----------------|
| 1 | objet en mauvais état présentant une corrosion active importante ou un risque de fragmentation. Intervention à prévoir prochainement | 38 |
| 2 | objet dans un état moyen avec un peu de corrosion active ou qui a pu se réactiver et qui est donc sensible aux variations climatiques. | 112 |
| 3 | objet en bon état avec une corrosion qui ne semble pas avoir évolué mais qui pourrait nécessiter une intervention de conservation-restauration. | 560 |
| 4 | objet en bon état, exposable en l'état et si une intervention est à envisager, ce ne sera qu'esthétique. | 160 |



Si plus de 900 objets ont intégré les tableaux du bilan sanitaire, en réalité beaucoup plus d'objets ont été examinés car les monnaies, les trésors et les objets archéologiques en sachet contiennent bien souvent de plusieurs individus. Suite à l'inondation, de nombreuses reprises de corrosion ont été constatées mais elles n'ont pas évolué après que les objets eurent été séchés et stockés dans un environnement stable avec une humidité relative basse. On peut raisonnablement dire qu'il n'y a pas d'urgence et qu'aucun objet n'est en péril immédiat.

Et après ?

Lors de la phase d'urgence, les premiers gestes effectués (rinçage et séchage) ont permis de favoriser la conservation des objets à moyen terme. Le bilan sanitaire montre qu'un climat stable et adapté aux matériaux évite une évolution des corrosions qui ont été réactivées suite à l'inondation. Les œuvres et éléments les plus enclins à se dégrader sont les alliages ferreux, qu'ils soient archéologiques ou historiques. Les objets archéologiques restaurés par le passé semblent plus sensibles que les objets bruts de fouille.

L'identification et le récolement des collections sont amenés à se poursuivre afin de poursuivre l'association des objets à leurs numéros d'inventaire. Un nouveau marché de conservation-restauration englobant le reste des collections, archéologiques antiques et médiévales, objets d'art, numismatique, objets extra-européens devra encore être lancé. Enfin, si les collections métalliques ne semblent pas présenter aujourd'hui autant de complexité dans leur conservation que les peintures ou les plâtres, une veille sanitaire plus poussée que dans d'autres institutions est nécessaire. Une surveillance des restaurations post-inondation ne doit pas être négligée dans ce contexte de sinistre exceptionnel.

Références

- [1] Lemeux-Fraitot S., Second projet scientifique et culturel du musée Girodet, 2024 - 2034 (avis favorable DRAC du 19 juin 2024), Montargis, musée Girodet, janvier 2024
- [2] Rérolle C., Caru L., Dubuisson-Gonnet (S.), Bilan sanitaire des collections d'objets inondés en métal, phase 1, musée Girodet, Montargis, mars 2023
- [3] Rérolle C., Caru L., Dubuisson-Gonnet (S.), Bilan sanitaire des collections d'objets inondés en métal, phase 2, musée Girodet, Montargis, février 2024
- [4] Rérolle C., Caru L., Dubuisson-Gonnet (S.), Bilan sanitaire des collections d'objets inondés en métal, phase 3, musée Girodet, Montargis, novembre 2024
- [5] Rérolle C., L'éclat d'un trésor restauré, *Conférence Journées Européennes du Patrimoine*, musée Girodet, Montargis, 18 septembre 2022
- [6] Méthivier A., Kissel E., Lemeux-Fraitot S., Assises des restaurations après inondation au musée Girodet, Montargis, musée Girodet, 5 avril 2024, *Journée d'étude organisée en partenariat avec l'INP (2024)*

Session 2

Dangers structurels du patrimoine métallique

RESTAURATION DE L'ARC DE TRIOMPHE DU CARROUSEL DU LOUVRE

Philippe Pagnon¹, Julia Jouet², Aurélia Azéma^{3*}, Brittany Branche², Damien Lopez³

¹ La Fonderie de Coubertin, ² Indépendante, ³ Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques - LRMH, Centre de Recherche sur la Conservation – CRC (UAR 3224), Muséum national d'Histoire naturelle, CNRS

 aurelia.azema@culture.gouv.fr

* Autrice correspondante

Résumé

Monument emblématique de Paris et des temps forts de son histoire depuis plus de deux siècles, l'arc de triomphe du Carrousel du Louvre s'élève à l'entrée des actuels jardins des Tuileries. Le groupe sculpté exposé dans cet article et ornant la partie sommitale de l'ouvrage monumental est composé d'un quadriges en bronze et de deux Renommées en plomb doré. Huit chapiteaux et huit embases en alliage cuivreux habillent également les huit colonnes de marbre rose. Ces ensembles témoignent des évolutions et des choix techniques du travail du métal depuis leur création ainsi qu'au cours des différents remaniements opérés et motivés par des raisons politiques et/ou de conservation. Dans le cadre des travaux réalisés sur l'ensemble du monument entre 2022 et 2024, le quadriges et les éléments métalliques des colonnes ont pu être restaurés in-situ ou bien au pied du monument, en les déposant dans un atelier forain visible du public. En revanche, les Renommées ont été traitées dans les ateliers de la fonderie de Coubertin suivant les lois régissant le travail du plomb. Pour la première fois de manière aussi approfondie, ces sculptures ont été démontées, ce qui a permis de contribuer à leur connaissance matérielle et technique, mais aussi à identifier et à comprendre les pathologies et lacunes mettant en danger leur intégrité. C'est à partir de ces connaissances que les protocoles de restauration adaptés ont été construits. Dans le cas du quadriges, réalisé d'un seul jet selon la technique de fonte au sable à partir du métal de canons pris à l'ennemi (lors des campagnes Napoléoniennes), des phénomènes de corrosion galvanique entre la paroi interne de la « peau de bronze » et les armatures internes en acier ont nécessité une intervention lourde de retrait du noyau de fonderie. Les Renommées, quant à elles, accumulaient les pathologies liées au gonflement dû à la corrosion de certaines armatures internes et à l'affaissement du plomb aboutissant à de nombreuses fissures qui, pour certaines, avaient déjà été réparées lors des restaurations précédentes. Une nouvelle dorure à la feuille, succédant à un panel de couches anciennes de diverse nature, a été appliquée sur le plomb. Enfin, les chapiteaux présentaient surtout des encroutements extrêmement durs et adhérents principalement liés à des phénomènes de nidification qui, une fois retirés, ont permis de rendre la lisibilité des détails de ces œuvres qui résultent par ailleurs, chacune, de l'assemblage d'une soixantaine de pièces !

Mots clés

Sculpture monumentale, bronze, plomb, conservation, restauration, corrosion galvanique

Abstract

An emblematic Parisian monument and witness to the high points of its history for over two centuries, the Arc de Triomphe of the Carrousel du Louvre stands at the entrance of the present-day Tuileries Gardens. The sculpted group presented in this paper, which adorns the summit of this monumental structure, consists of a bronze quadriga and two gilded lead *Renommées*. Eight capitals and eight copper-alloy bases also adorn the eight pink marble columns. These ensembles bear witness to the evolution and technical choices made in metalworking since their creation as well as the various modifications carried out for political and/or conservation reasons. As part of the work carried out on the whole monument between 2022 and 2024, the quadriga and the metal elements of the columns were conserved in situ or at the foot of the monument by detaching and transferring them to a fairground workshop visible to the public. The *Renommées*, on the other hand, were treated in the workshops of the de Coubertin foundry following the laws governing working with lead. Since this was the first time the sculptures were dismantled so extensively, it not only expanded the technical and material knowledge of the objects but also enabled the identification and understanding of the pathologies and weaknesses endangering its integrity. The appropriate conservation protocols were developed based on this knowledge. For the quadriga, cast in a single piece from the metal of cannons taken from the enemy [during the Napoleonic campaigns using sand-casting, galvanic corrosion between the 'bronze skin' and the internal steel reinforcements required an extensive intervention to remove the foundry core. As for the *Renommées*, they were accumulating pathologies caused by swelling due to corrosion of certain internal armatures as well as the collapse of the lead. This resulted in numerous cracks, some of which had already been repaired during previous restorations. A new leaf/foil gilding was applied to the lead, following on from a variety of previous layers. Finally, the capitals showed extremely hard and adherent encrustations, mainly due to nesting activity, which, once removed, restored legibility to the details of these works, each of which is the result of the assembly of some sixty pieces!

Keywords

Monumental sculpture, bronze, lead, conservation, restoration, galvanic corrosion



© Malty, 2024

Figure 1. Quadriga de l'arc de triomphe du Carrousel du Louvre et *Renommées*, allégories de la Paix (à gauche sur l'image) et de la Victoire (à droite sur l'image), après restauration ©Thierry Malty, 202

Introduction

Édifié entre 1806 et 1808 comme entrée d'apparat du Palais des Tuileries pour célébrer les victoires Napoléoniennes, et remanié entre 1824 et 1830, l'arc de triomphe du Carrousel associe pierres et métaux imaginés, sculptés et magnifiés par les différents architectes, artistes et artisans successifs qui ont contribué à l'édification du monument.

Le groupe sculpté ornant la partie sommitale de l'ouvrage est composé d'un quadrigé en bronze, et de deux allégories en plomb doré. Ces dernières, symbolisant la Victoire et la Paix, datent de la construction de l'édifice (sculpteur F.-F. Lemot). Elles étaient initialement associées aux célèbres chevaux antiques de la basilique Saint-Marc, rendus à Venise en 1815, attelés à un char en plomb, aujourd'hui détruit. Son aurige en plomb doré, représentant Napoléon 1^{er}, a été déposé dès l'inauguration du monument à la demande de l'empereur. Il est actuellement conservé au sein des collections du musée du Louvre depuis 1999. L'actuel ensemble équestre a été fondu (fonderie C. Crozatier) en 1828 selon le modèle conçu par le sculpteur F. J. Bosio. Enfin, les chapiteaux et les bases des colonnes ont été mis en place dès la construction de l'arc [1][2] (Figure 2).

La dernière restauration du monument a été effectuée entre 2022 et 2024 grâce au mécénat de particuliers (9^e campagne « Tous mécènes ») et d'entreprises. Le musée du Louvre en a assuré la maîtrise d'ouvrage et les travaux de maîtrise d'œuvre ont été conduits par les l'Agence Goutal ACMH et CEBIBAT BEA. La restauration des sculptures métalliques a été confiée à la fonderie de Coubertin, en association avec les conservatrices-restauratrices J. Jouet et B. Branche et avec l'accompagnement scientifique du pôle Métal du LRMH. Cet article a pour objectif de documenter les différentes étapes qui ont présidé à cette restauration de grande envergure et de contribuer à enrichir nos connaissances de l'histoire matérielle, technique et politique de ces œuvres.



Figure 2. Arc du carrousel du Louvre, après restauration 2022-2024, juin 2024 ©LRMH, Angèle Dequier, 2024

Les Renommées en plomb doré

Étude technologique

Si les documents d'archives nous apprennent que le métal d'élaboration employé pour la coulée des Renommées de Lemot était du « plomb vieux » acheté auprès de plusieurs fournisseurs parisiens, le nom de l'atelier et la technique de fonderie utilisés ne sont pas mentionnés. Cependant, la description des différentes étapes techniques fournirait des indices qui conduirait à un savoir-faire développé par le fondeur H. Gonon, impliquant des moules en sable et l'usage de couches de terres repoussées pour effectuer le tirage d'épaisseur [3]. La lecture des parois internes des Renommées a été extrêmement difficile, d'une part à cause de la présence de restes de noyau plus ou moins désagrégés et d'un système d'armatures en fer de sections très larges dont les surfaces corrodées avait significativement contribué à augmenter leurs volumes. D'autre part, les épaisseurs des différentes pièces étaient très irrégulières et la fermeture partielle de la base des sculptures n'offrait que peu d'accès. Néanmoins, il a été possible d'établir que le système d'armature se composait de plusieurs éléments : un mât vertical de très large section (carré de 7cm x 7cm), qui montait jusque dans la calotte crânienne des statues et permettait un ancrage de 30 cm dans la maçonnerie de la terrasse ; une armature métallique circulaire au niveau de la base au centre de laquelle s'insérait le mât central (Figures 3 et 4); une armature similaire au niveau des hanches des statues. Si des éléments de liaison existaient nécessairement au niveau des ailes et des bras, ils n'ont pas pu être observés, même à l'aide d'un endoscope, à cause de la présence du noyau de fonderie.



Figure 3. Vue de la base de la sculpture figurant la Paix
©Fonderie de Coubertin, Philippe PAGNON, 2023

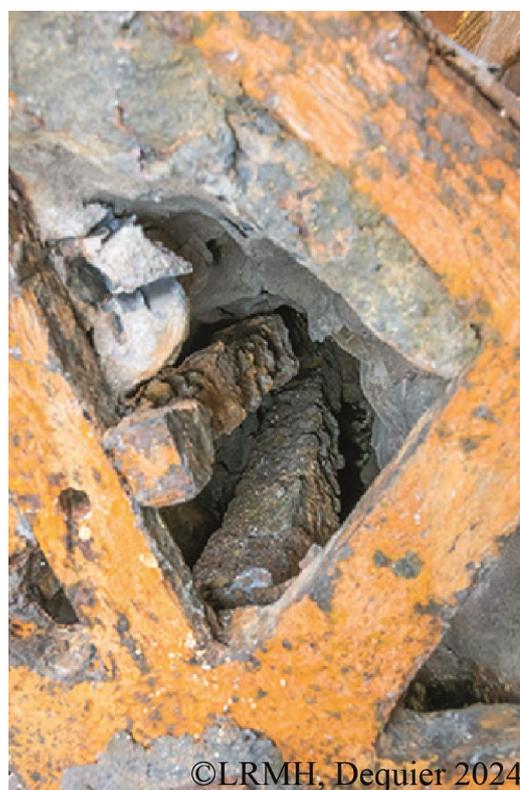
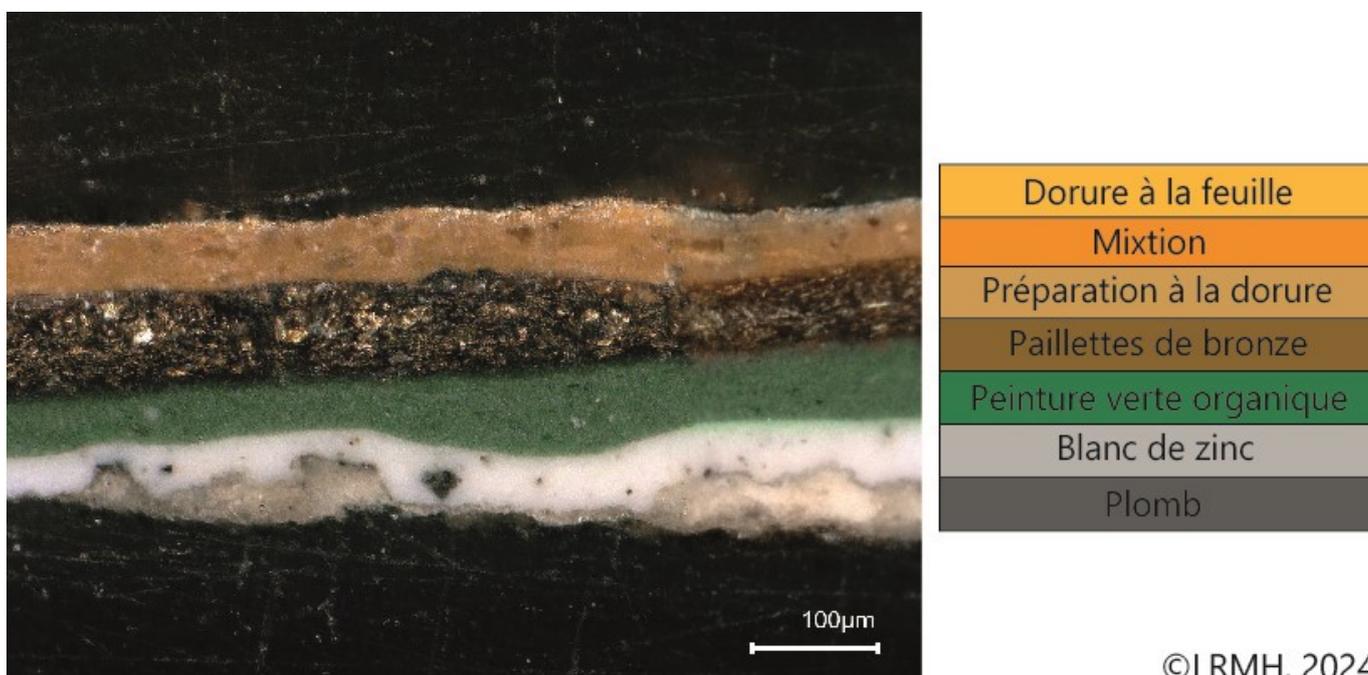


Figure 4. Vue de la paroi interne et des armatures de la sculpture figurant la Victoire ©LRMH, Angèle Dequier 2023

Le métal employé pour la coulée de la sculpture de la Victoire est un plomb allié à 2,5-3% d'étain en masse (analyse en spectroscopie à dispersion d'énergie sur micro-prélèvement dans le drapé). Ce résultat diffère légèrement de celui de l'analyse de la sculpture en plomb de l'ancien aurige représentant Napoléon 1^{er} (1,2% massique de Sn) [4]. Mais ces faibles teneurs en étain concordent avec le recyclage d'éléments en plomb tels que des tuyaux de canalisation qui possèdent des brasures à forte teneur en étain (quelques dizaines de pourcents) ou encore les chutes de divers scellements par exemple [1] [5]. Contrairement aux chevaux du quadrigé, les Renommées résultent de l'assemblage par brasage de plusieurs pièces coulées séparément (tête, bras, ailes, corps en deux parties) et comportent de nombreuses zones de reprises pouvant être d'origine ou dater des différentes interventions de réparation postérieures (Figure 18).

Les Renommées ont été conçues à l'origine avec une finition à la dorure, mais une étude stratigraphique de leurs revêtements témoigne de l'évolution de leur apparence au cours du temps. La succession de nombreuses couches visibles sur les coupes stratigraphiques réalisées en témoigne : par exemple, la présence d'une couche verte confirme que les Renommées ont été peintes de cette couleur à une date inconnue (restauration de 1930-1933 ?), probablement pour donner l'illusion de sculptures en bronze [6]. Une couche d'un revêtement organique contenant des paillettes de bronze a été également repérée sous la dorure appliquée lors de l'intervention de 1986. Les archives mentionnent, en effet, qu'un traitement de ce type, pouvant « recevoir une patine » avait été proposé, et visiblement appliqué sur la surface des Renommées, au moins partiellement (si ce n'est totalement) mais finalement recouvert d'une feuille d'or [7] (Figure 5).



©LRMH, 2024

Figure 5. Stratigraphie de la succession des revêtements appliqués sur les renommées lors des deux restaurations

Constat d'état

Les deux Renommées furent détériorées en 1815 lors de la dépose des chevaux de Saint-Marc, et remaniées entre 1824 et 1830 lors des travaux de transformation de l'Arc et la création du nouveau quadrigé. Suite à des problèmes

d'affaissement et de déchirure (Figure 6), les ailes des Renommées ont été restaurées et partiellement refondues durant la campagne menée par l'architecte Albert Ferran entre 1930 et 1933. La dorure actuelle a été réalisée lors de la dernière restauration de l'Arc en 1986.



Figure 6. Char et allégorie de la Paix, photographie (4-EPR-01308) publiée en 1922 par la Société des Archives photographiques d'Art d'Histoire, Ville de Paris, Numérisation BHVP, Roger Viollet

L'habillage en plomb des bases des sculptures était soudé à la table de plomb permettant l'étanchéité de la terrasse de l'arc (Figure 7). La mise au jour de la zone de fixation des sculptures sur la terrasse de l'arc a révélé un défaut de verticalité qui avait été partiellement compensé par des cales de fer et de briques disposées sous les armatures circulaires en fer constituant les bases des statues (Figure 8).



Figure 7. Vue de la base de l'allégorie de la Paix habillée d'une table de plomb se superposant à celle de la terrasse ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2023



Figure 8. Base de l'allégorie de la Victoire révélant le système de calage permettant de compenser la pente de la terrasse ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2023

Les observations réalisées lors de l'étude préalable de l'état de conservation des Renommées, ont été confirmées lors de leur dépose : elles étaient aussi bien pourvues d'altérations structurelles que de surface. En surface, la dorure de 1986 était en bon état général, malgré quelques zones d'usure. Structuellement, d'importantes fissures étaient perceptibles au niveau des têtes, des hanches et des accroches des ailes qui correspondent à des zones d'assemblage par brasage. Ces pathologies sont courantes sur les sculptures en plomb exposées en extérieur. En effet, le métal d'apport des brasures est un alliage de plomb et d'étain, d'une dureté supérieure à celle du plomb des sculptures. Il est, en conséquence, plus cassant et résiste moins bien aux sollicitations mécaniques particulièrement dues à l'affaissement des pièces de plomb. La fissure située au niveau des hanches (sur toute la circonférence) en particulier, avait déjà été traitée antérieurement. En témoigne la présence d'agrafes métalliques mises en place afin d'éviter que la fissure ne continue à s'ouvrir (Figure 9). La dépose a également permis de constater que le système d'armature à l'intérieur des Renommées, décrit précédemment, apparaissait entièrement corrodé.

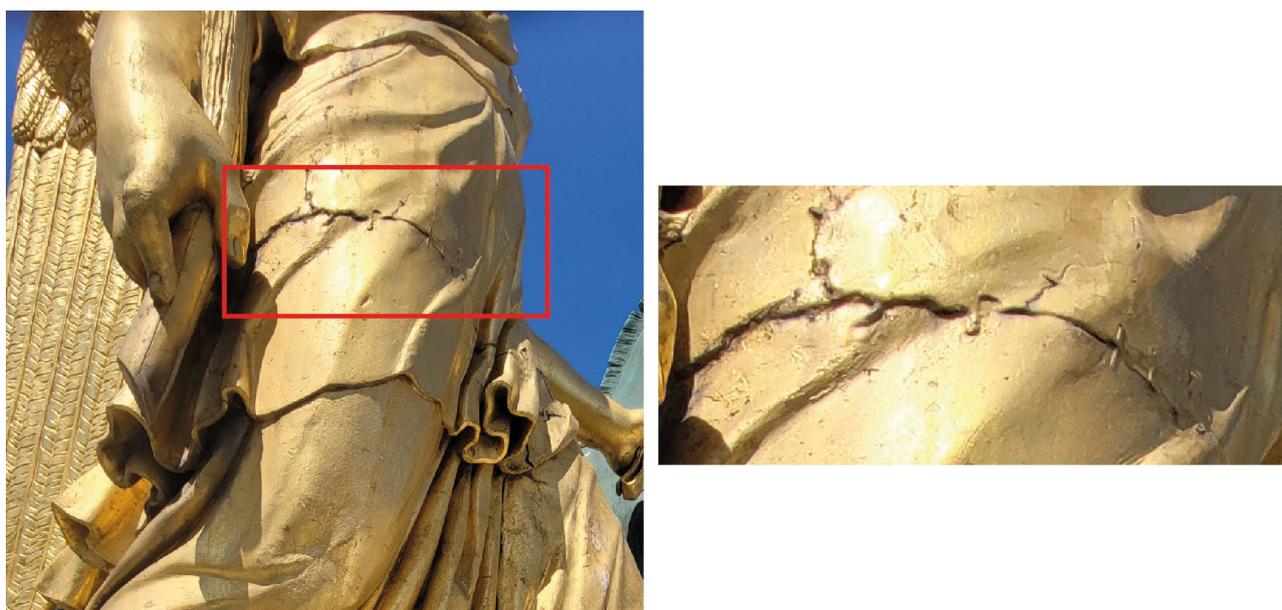


Figure 9. Agrafes mises en place pour maintenir la fissure entre les deux pièces principales du corps de la sculpture de la Paix © Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2023

Dépose des Renommées

Compte tenu des pathologies que présentaient les deux Renommées, des cages métalliques de maintien sollicitant uniquement les bases des sculptures ont été conçues sur mesure. Les châssis ont été construits en profilés métalliques, assemblés par boulonnage. Les statues ont été soulevées à l'aide de crics à talon afin d'avoir une hauteur suffisante pour insérer les poutrelles de sous-face du châssis (Figure 10). Les opérations de dépose ont été réalisées avec l'aide d'une grue télescopique de 60 tonnes (Figure 11). Les deux sculptures ont ensuite été déposées sur une remorque surbaissée, puis acheminées vers les ateliers de la fonderie Coubertin à Saint-Rémy-Lès-Chevreuse.



Figure 10. Dépose de la sculpture de la Paix
©Julia JOUET, 2023



Figure 11. Descente de la Renommée figurant la
Victoire ©Julia JOUET, 2023

Stratégie de restauration des Renommées

La grande particularité de la restauration des Renommées a été la prise en compte de l'exposition des intervenants aux risques de toxicité pouvant être occasionnés par le plomb dont elles sont constituées. L'ingestion ou l'inhalation de ce métal à faibles et moyennes doses dans l'organisme peut causer des dommages au système nerveux, aux reins, au système digestif et avoir des effets néfastes sur la fertilité. A fortes doses, elle peut entraîner le saturnisme. De ce fait, avant toute intervention, un protocole plomb très rigoureux a été mis en place [9]. Dans un premier temps, ce fut le choix du lieu. Pour les raisons évoquées précédemment, les Renommées ne pouvaient pas être restaurées sur site comme les bronzes, la logistique mise en œuvre aurait été trop complexe, coûteuse et vraisemblablement moins efficace. En conséquence, contrairement aux interventions antérieures réalisées in-situ et afin de répondre aux exigences sanitaires en vigueur aujourd'hui, l'ensemble des travaux de restauration de 2022-2024 ont été conduits au sein des ateliers de restauration de la fonderie de Coubertin, possédant les équipements adaptés pour traiter le plomb ornemental (Figures 12 et 13). En effet, le local de 50 m² dédié à ce type de travaux est muni d'un ensemble d'équipements permettant de limiter l'émission et d'évacuer la poussière de plomb produite par la restauration des sculptures de cette nature : ventilateur et extracteur d'air avec système de filtration, bras aspirateur de fumées de soudage, outillages électroportatifs et matériels uniquement dédiés au travail du plomb, aspirateurs adaptés équipés d'une filtration absolue HEPA, H14 ou ULPA.

En parallèle, en accord avec le code du travail (Article 4412), les opérateurs étant intervenus sur les Renommées ont tous été formés au travail du plomb (formation renouvelée tous les 5 ans) et équipés d'EPI réglementaires pour le travail des métaux et plus particulièrement celui du plomb : combinaisons jetables Tyvek®, masques à ventilation intégrée avec cartouches filtrants FFP3, gants nitriles/cuir...évitant l'inhalation des poussières de plomb lors du sa-

blage. Après chaque intervention dans l’atelier, les opérateurs devaient systématiquement passer par le sas de décontamination composé d’un vestiaire sale, de deux douches, d’un vestiaire intermédiaire et d’un vestiaire propre. Cette procédure permettait d’éviter la pollution des autres lieux et les risques de contamination par l’intermédiaire des mains ou des vêtements souillés.

A été également mis en place, un suivi médical personnalisé, avec prises de sang pour contrôle du taux de plomb : avant le début du chantier, tous les mois pendant la durée de réalisation du chantier et six mois après la fin de l’exposition au plomb.

Enfin, la collecte des déchets plomb (poussières, équipement contaminés...) était organisé par les ateliers de la Fonderie de Coubertin et le traitement assuré par une société spécialisée avec bordereau de suivi.

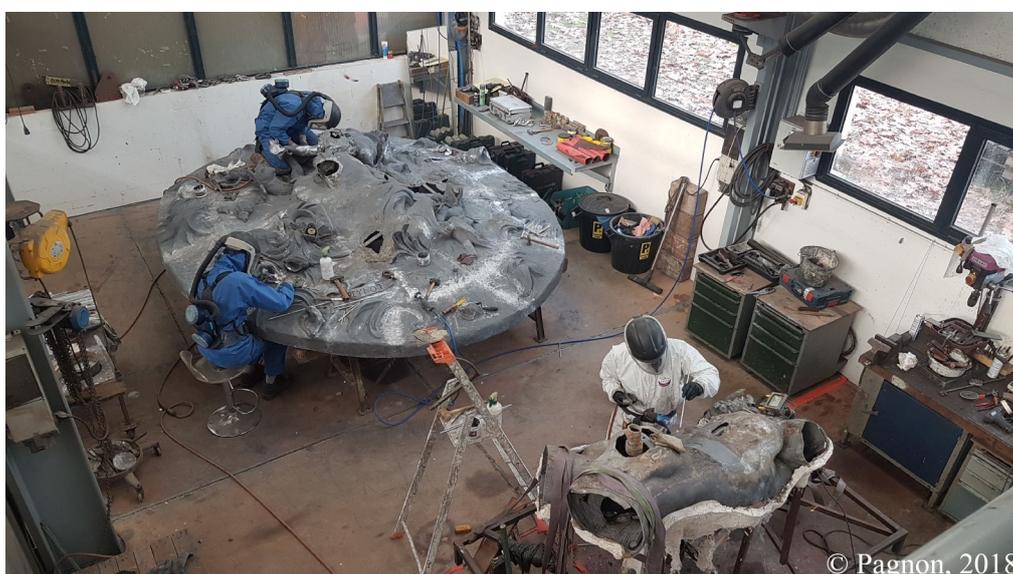


Figure 12. Vue de l’atelier dédié au travail du plomb, restauration de la fontaine du Triton du château de Vaux le Vicomte, © Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2018

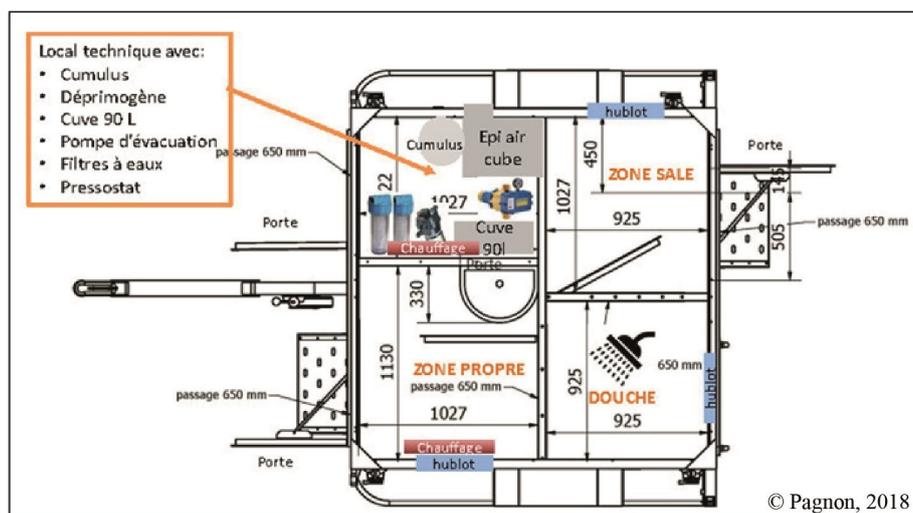


Figure 13. Plan du sas de décontamination plomb aménagé dans les ateliers de restauration de la Fonderie de Coubertin © Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2018

La restauration en atelier a en outre permis de positionner horizontalement les deux sculptures afin de faciliter la réparation des fissures. Pour ce faire, une coque de maintien en plâtre armé, solidaires de la cage métallique a été conçue pour chacune d'elles. (Figure 14 et 15).

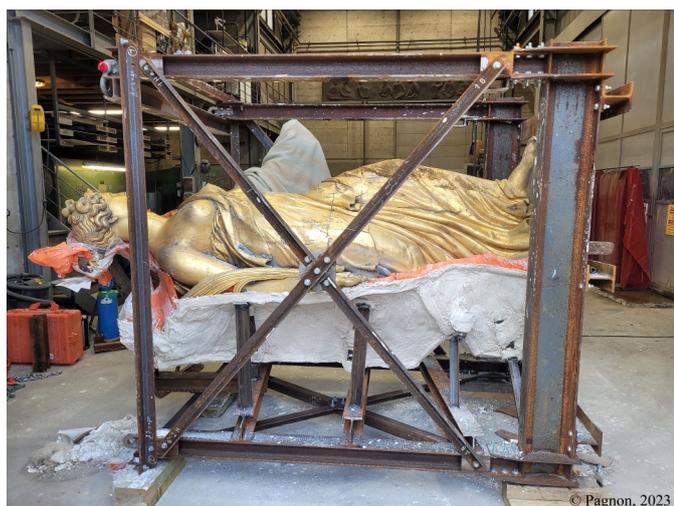


Figure 14. Sculpture de la Paix positionnée dans sa coque de maintien pour la restauration
©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2023

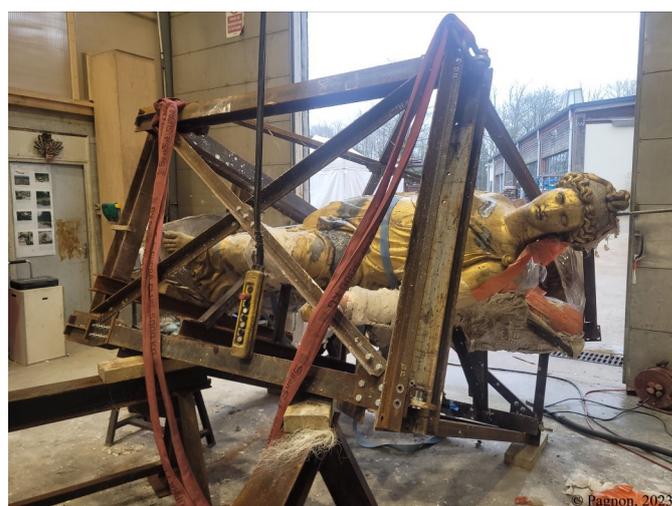


Figure 15. Sculpture de la Victoire positionnée dans sa coque de maintien pour la restauration
©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2023

Dans un premier temps, les agrafes en fer au niveau des hanches des Renommées ont été extraites, les fissures ouvertes afin de créer un chanfrein en « V » permettent ainsi de réaliser une soudure à cœur pour une meilleure solidité. Pour assurer une résistance supplémentaire à cette réparation, de nouvelles agrafes de section circulaire en acier inoxydable (de 4 mm de diamètre, de 30 mm de largeur et 15 mm de retour) ont été insérées dans des réservations afin qu'elles soient noyées dans la soudure et invisibles, après finition. L'assemblage a été réalisé selon le procédé de soudage oxyacétylénique avec apport de plomb pur. Le surplus de soudure a été éliminé et repris en ciselure afin de faire disparaître toute trace de ces interventions et de récréer le modelé des drapés (Figure 16). Les armatures internes en alliage ferreux accessibles ont été protégées par un vernis gras à base de résines de type alkyde et d'huile végétale dans un solvant.

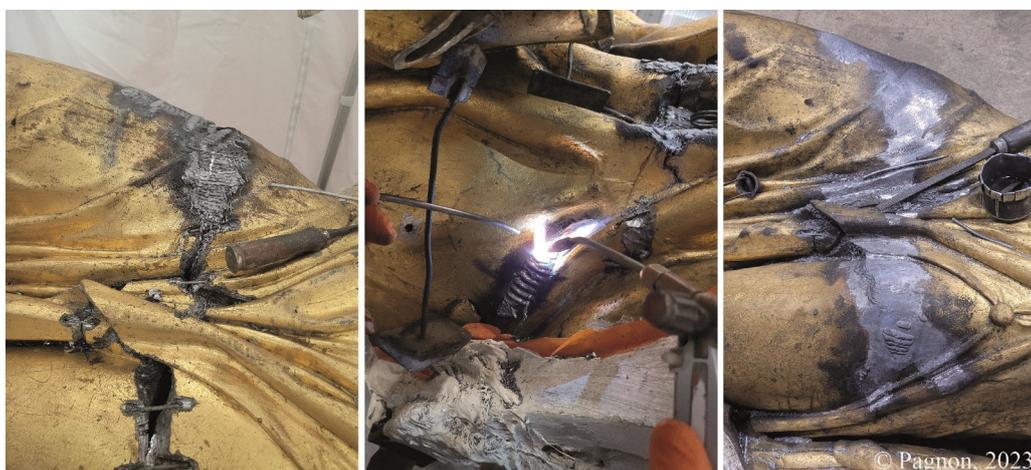


Figure 16. Succession des étapes de réparation de la fissure située au niveau des hanches de la statues de la Paix
©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2023

Initialement, le marché de restauration prévoyait une retouche en dorure de 20% de la surface, mais les interventions nécessaires sur la structure des Renommées ont amené à faire le choix de reprendre l'ensemble de la dorure des deux sculptures. Le nettoyage des surfaces a été réalisé par hydrogommage avec l'emploi d'abrasif minéral. L'emploi de l'eau a permis d'une part de contrôler l'action de l'abrasif, de préserver la surface et le modelé, et, d'autre part, de limiter la dispersion de poussière de plomb (Figures 17 et 18).

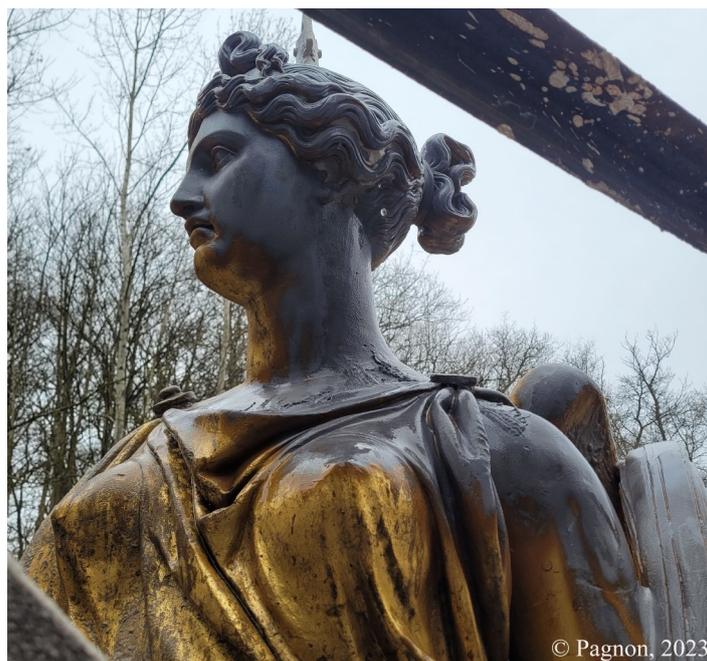


Figure 17. Allégorie de la Victoire dont la surface est en cours d'abrasion ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 18. Allégorie de la Paix, après abrasion ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 19. Allégorie de la Paix, après application des couches de primaire d'accroche ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

La dorure à la feuille des deux sculptures a été réalisée dans les ateliers de restauration de la Fonderie de Coubertin par les Ateliers Giordani. Sept couches successives de peinture de nature époxy ont été appliquées : deux couches de primaire dites « d'accroche » de couleur grise « Freitaxy » (Figure 19) et de cinq couches de peinture ocre « Freitadur PU HES » (Figure 20). Après l'application de la mixtion à l'huile siccative, des feuilles d'or 23.5 CTS neutre du batteur d'or Norris ont été posées sur les sculptures, puis époussetées, légèrement matifiées et protégées de l'érosion par l'utilisation de gélatine de porc à 3% massique diluée dans l'eau (Figure 21).



Figure 20. Allégorie de la Paix, après application des couches de peinture ocre
©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 21. Allégorie de la Paix, après dorure à la feuille
©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

Remontage des Renommées

Afin de faciliter le remontage des sculptures sans risquer d'abîmer leur finition et leur éventuelle dépose ultérieure, un point de levage a été confectionné au niveau la partie sommitale des statues au moment de la remise en état des désordres structurels. Pour ce faire, la calotte crânienne a été ouverte, donnant accès au mât en alliage ferreux vertical, dans lequel un taraudage M18 a été réalisé pour fixer un anneau de levage (Figures 22 et 23). Une fois la restauration terminée, les Renommées ont été reconduites vers l'arc de triomphe (Figure 24). Comme lors des opérations de dépose, une grue télescopique de 60 tonnes a été utilisée pour les réinstaller. Les deux statues dans leurs cages ont été grutées à proximité de leur emplacement. Elles ont ensuite été soulevées par le point d'ancrage se trouvant au niveau de leurs calotte crânienne et placées à leur emplacement initial.



Figure 22. Usinage de l'armature interne verticale traversant la boîte crânienne de l'allégorie de la Paix
© Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 23. Confection d'un système de levage au niveau de la boîte crânienne de l'allégorie de la Paix
© Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 24. Les statues des Renommées quittant les ateliers de restauration de la fonderie de Coubertin
© Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

L'étanchéité plomb de la partie sommitale du monument a été assurée par les couvreurs de la compagnie Le Bras Frères. Une remontée en plomb a été installée à l'emplacement de l'insertion du mât vertical des sculptures dans la maçonnerie de l'arc. Un système de calage en tôle acier inoxydable sur mesure est venu remplacer le calage provisoire en bois afin de compenser la pente de la terrasse et redresser les statues (Figure 25). Des feuilles de plomb ont ensuite été insérées afin d'isoler l'acier ancien de l'acier inoxydable (Figure 26).

Enfin, les terrasses ont été habillées de bandes de plomb, assemblées par agrafage et soudées à la base des statues (Figure 27).



Figure 25. Système de calage provisoire en bois permettant de compenser la pente de la terrasse, sculpture de la Victoire
© Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 26. Vue d'une cale en acier inoxydable et du retour de plomb permettant de protéger le mat central de la sculpture de la Paix, s'insérant dans la maçonnerie de l'arc
© Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 27. Renommées figurant la Paix ayant repris leur place au sommet de l'arc du Carrousel du Louvre
© Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

Les chapiteaux et les embases de colonnes en bronze

Étude technologique

Contrairement aux chevaux de F.J. Bosio, les archives consultées n'ont, à ce jour, pas livré d'information sur l'identité de l'atelier qui a fabriqué les chapiteaux et les bases des colonnes, ni sur la technique de mise en forme et la nature précise du métal employé [1]. La dépose des quatre chapiteaux de la face Est de l'arc, rendue nécessaire pour le remplacement de pierres sous-jacentes fissurées par le gonflement d'armatures en alliage ferreux ayant corrodé, a offert une opportunité rare d'en documenter le mode de fabrication. Les chapiteaux résultent de l'assemblage mécanique d'une soixantaine de pièces fixées les unes aux autres par des charnières ou des vis boulonnées. Ils se

composent du support comprenant le fût lisse (deux pièces) et l'abaque (quatre pièces) ornés de végétaux (52 pièces) et des quatre aigles (Figures 28 et 29).

L'examen des parois internes et externes des pièces des chapiteaux révèle des traces de raclage, des tracés incisés de chiffres mais aussi d'un dessin d'une tête d'aigle représentée de profil, qui témoignent du travail d'un matériau mou depuis l'intérieur du moule (Figure 30 et 31). Le procédé indirect de fonte à la cire perdue a vraisemblablement été employé pour la fabrication de ces éléments.



Figure 28. Chapiteau non démonté
©LRMH, D. Bouchardon, 2019



Figure 29. Chapiteaux démontés
© LRMH, A. Dequier, 2024



Figure 30. Tête d'aigle incisée visible depuis la paroi interne du fût d'un chapiteau ©LRMH, A. Dequier, 2024



Figure 31. Chiffre 6 incisé sur le revers d'une palmette démontée d'un chapiteau ©LRMH, 2024

L'analyse de la composition élémentaire des métaux employés a révélé une variation significative entre l'alliage employé pour le support (fût et abaque) et celui pour les décors végétaux et les aigles (Tableau 1). Le métal de ces derniers contient en effet trois fois plus de zinc et trois fois moins d'étain, ce qui induit une variation de la couleur des métaux perceptible à l'œil nu. Ce choix technique avait-il pour objectif de créer un effet de polychromie mettant en valeur les décors et plus particulièrement l'aigle et les feuillages (palmettes) grâce à un métal tirant sur le jaune doré (décor feuillage : palmettes) sur un fond de couleur plus orangée (abaque). Notons en outre que cette différence d'alliage entre les deux éléments constituant les bases des colonnes est également soupçonnée [8]. L'interaction avec l'environnement et/ou l'application d'une patine artificielle (d'origine ou postérieure) a fortement atténué cette différence de couleur.

Tableau 1. Résultats des analyses élémentaire réalisées en ICP-AES par le C2RMF [8] à l'exception de l'aigle dont le métal a été analysé en LIBS

| Localisation | Zn (%m) | Sn (%m) | Pb (%m) |
|---------------------------------|---------|---------|---------|
| Chapiteau Palmette | 15 | 2,5 | 6,4 |
| Chapiteau Abaque | 4,2 | 6 | 3,8 |
| Chapiteau Aigle | 8, 3* | 0.9* | 0.9* |
| Cheval C1, encolure | 3,7 | 8,5 | 1,9 |
| Cheval C3, jambe arrière gauche | 4,9 | 6,1 | 1,4 |
| Cheval C3, dos | 4,9 | 5,8 | 1,4 |
| Cheval C4, dos | 4,8 | 6,0 | 1,6 |
| Aurige, drapé du dos | 5,4 | 7,6 | 2,9 |

Enfin, des restes de préparation à la dorure et de feuilles d'or ont été identifiés sur des aigles ornant les quatre côtés des chapiteaux. Cependant, ni les analyses, ni les archives, ne permettent d'attester la présence de cette dernière dès la construction de l'édifice, ou lors des différents remaniements postérieurs.

Constat d'état

Les chapiteaux étaient dans l'ensemble très empoussiérés et recouverts de croûtes très indurées formées par un amoncellement de fientes d'oiseaux, de dépôts exogènes (type brins d'herbe, pailles, ficelles, ramenés par les oiseaux) et d'épaisses croûtes noires et croûtes calcaires notamment présentes sur le dessus des feuilles d'acanthé (Figures 32 et 33).

Le revers des chapiteaux, situé contre la paroi en pierre de l'arc et protégé du ruissellement des eaux de pluie, avait particulièrement perdu en lisibilité des décors notamment au niveau du modelé des feuilles d'acanthé. Les caractéristiques de cet emplacement plus abrité en faisaient également un lieu de nidification attractif pour les oiseaux et plus spécifiquement pour une espèce protégée d'hirondelles.

Si du point de vue de la surface, les chapiteaux étaient très hétérogènes, leur état de conservation était cependant stable. Hormis quelques pièces fissurées, certains bouchages en résine témoignant de restaurations antérieures visibles et des empiècements métalliques usés ou contrastés, aucune altération structurelle majeure n'a été constatée.

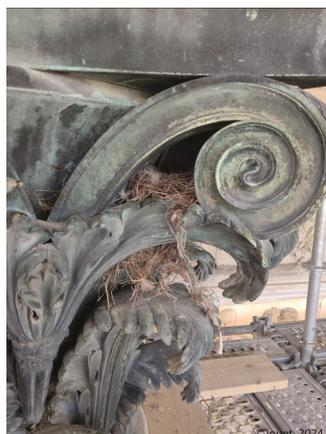


Figure 32. Nids d'oiseaux dans les feuilles d'acanthé
©Julia Jouet, 2024



Figure 33. Croûte indurée sur le dessus des feuilles
©Julia Jouet, 2024

Stratégie de restauration

Tandis que les quatre chapiteaux de la face ouest de l'arc ont été déposés et restaurés en atelier forain, ceux de la face est, ainsi que les huit bases de colonnes, ont été traités in-situ depuis l'échafaudage. La dépose des chapiteaux a permis d'une part le traitement complet des pierres d'architrave fissurées situées au-dessus et, d'autre part, un démontage total de leurs éléments constitutifs permettant de mieux comprendre leurs caractéristiques de mise en forme et d'assemblage (Figures 34 à 35).

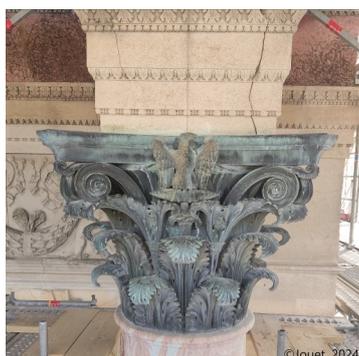


Figure 34. Chapiteau avec pierre d'architrave fissurée ©Julia Jouet, 2024



Figure 35. Démontage en cours ©Fonderie de Coubertin, P. Pagnon, 2024



Figure 36. Vue du dessus d'un chapiteau déposé ©Julia Jouet, 2024

Les croûtes, particulièrement dures et adhérentes, ont été retirées mécaniquement à l'aide de burins, marteaux, grattoirs, scalpel et brosses métalliques. Si leur retrait a parfois engendré la mise à nu du métal sous-jacent, ce premier nettoyage a majoritairement permis de retrouver la patine sous-jacente verte et d'optimiser un second nettoyage par micro-gommage à la poudre de noyaux d'abricots afin d'homogénéiser les alternances de teintes noir/vert liées au ruissellement des eaux de pluie (Figure 37).

Afin de former une couche protectrice pour isoler des polluants atmosphériques et ralentir les phénomènes d'oxydation, une couche de cire microcristalline H80® en solution dans le White Spirit® a ensuite été appliquée sur l'ensemble des chapiteaux. La cire a été appliquée teintée dans la masse à l'aide de pigments, ou teintée en surface avec de la peinture Maimeri Restaura®®, afin d'homogénéiser les surfaces.

Les chapiteaux ont été chauffés à la torche afin de retirer l'humidité présente dans les porosités du métal et à l'intérieur des œuvres (Figure 38). Après refroidissement, et une fois la surface tiède, la cire a été appliquée au pinceau. Après séchage, les surfaces ont été lustrées à la brosse synthétique afin de tendre la cire et d'en ajuster la brillance.



Figure 39. Vue depuis la paroi interne d'un cheval constituée d'une multitude de plaques de réparations et armature interne en fer encore en place ©LRMH

A l'instar de bas-reliefs de la colonne Vendôme, le métal employé pour la fonte est un bronze provenant de canons issus de prises de guerre. Leurs compositions ont soigneusement été identifiées au préalable à la fonte afin d'assurer la meilleure homogénéité possible (Tableau 1).

Constat d'état

Depuis l'extérieur, les chevaux du quadriges apparaissent bien conservés. La patine réalisée lors de la restauration de 1986 [7], malgré quelques coulures, déjections de volatiles et anciennes réparations contrastées, était stable et homogène. Mais un examen plus approfondi a révélé un phénomène interne qui pouvait mettre en danger l'intégrité de ces sculptures : des zones fissurées d'où suintait de l'eau parfois teintée de rouille (Figures 40 et 41). Des investigations à l'aide d'un endoscope réalisées lors de l'étude préalable à la restauration de l'arc en 2019, ont permis de révéler que trois chevaux sur les quatre possédaient encore leurs noyaux de fonderie, enrobant armatures de toutes tailles et végétaux, l'ensemble baignant dans une atmosphère humide constante [8] (Figure 42). La rétention d'eau a provoqué la corrosion (accentuée par l'effet galvanique au contact du bronze) et le gonflement des armatures en fer qui, dans certaines zones, expliquent les fissurations de la peau de bronze et l'apparition de coulures de rouille en surface. Le char et l'aurige présentaient un état de conservation très satisfaisant. En effet, les restes de noyaux et d'armature de l'aurige avaient été purgés lors de la restauration de 1986 par les ateliers SO-CRA. De même, la structure interne du char avait été remaniée et les matériaux de restauration employés étaient toujours fonctionnels. Seule la table de plomb posée sur la surface accueillant l'aurige ne semblait plus assurer l'étanchéité nécessaire (Figure 43).



Figure 40. Fissure du bronze dans la jambe d'un cheval par laquelle s'écoule de l'eau mélangée à des produits de corrosion du fer provenant de l'armature interne ©LRMH, 2019



Figure 41. Écoulement d'eau à travers la jonction entre une plaque de réparation et le corps d'un cheval ©LRMH, 2019



Figure 42. Intérieur d'un cheval où l'on distingue les restes d'armatures en fer dans un état de corrosion très avancé, enrobées de sable. La paroi interne en bronze présente une couche de corrosion verte intense très pulvérulente dans certaines zones ©LRMH, 2023



Figure 43. Intérieur du char avant restauration ©LRMH, 2023

Dépose du quadrigé

La première phase de la restauration a consisté à déposer les éléments du quadrigé. Pour se faire, les scellements ont tout d'abord été découpés et retirés. Cette opération s'est avérée très délicate et complexe puisque les chevaux étaient ancrés dans le sol à l'aide de barres en fer fixées dans les sabots plongeant dans la maçonnerie sur plus d'un mètre de profondeur (Figures 44 et 45). L'ensemble était maintenu à l'aide de plomb chargé avec des éléments de ferraille.



Figure 44. Vue des trous de scellement ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 45. Vue des massifs en plomb coupés, ©Julia Jouet, 2024

Une fois la totalité des ancrages retirés, les différents éléments ont été sécurisés sur des châssis métalliques conçus sur mesure comme pour les Renommées, puis transportés à l'aide d'un bras grue dans les ateliers de restauration situés au pied de l'arc (Figures 46 et 47).



Figure 46. Dépose du char en cours, ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 47. Dépose d'un cheval en cours, ©Julia Jouet, 2024

Stratégie de restauration

Compte tenu des observations faites lors de l'étude préalable quant à l'état sanitaire du quadrigé, il a été décidé de découper des trappes sur la croupe des chevaux afin de les vider. Chaque trappe a été dimensionnée à taille d'homme pour pouvoir pénétrer à l'intérieur des chevaux et accéder à l'ensemble des jambes et de des têtes (Figures 48 et 49).

L'ouverture des chevaux a permis de constater qu'ils étaient bien remplis d'éléments d'armature en fer et de terre ainsi que de végétaux et de paille tressée qui étaient probablement utilisés pour permettre d'évacuer plus facilement les gaz au moment de la coulée du métal dans le moule (Figures 50 et 51).



Figure 48. Vue d'une trappe ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024



Figure 49. Vue du revers d'une trappe, ©Julia Jouet, 2024



Figure 50. Vue de l'intérieur d'une trappe remplie de terre, paille et armatures en fer ©LRMH, 2024



Figure 51. Armatures en fer, ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

Afin d'assainir les surfaces externes des sculptures en bronze, un micro-gommage au noyaux d'abricots a été réalisé sur les chapiteaux comme sur l'ensemble des éléments du quadrigé (Figure 52). Ce traitement a permis de retirer les dépôts exogènes et certaines couches d'oxydation sans retirer l'ensemble de la patine verte du bronze. Ce micro-gommage a en outre atténué les phénomènes de coulures qui étaient notamment très visibles sur le bas-ventre des chevaux.

Afin d'homogénéiser les surfaces, des opérations de repatinage à chaud ont été effectuées à l'aide d'oxydes métalliques (nitrates de cuivre) et de pigments naturels (« vert olive » et « bleu des Caraïbes ») (Figure 53). Des retouches ponctuelles à la cire teintée et en employant des peintures Maimeri Restauro ont été appliquées, après cirage à la cire microcristalline H80 de l'ensemble, sur les zones de croûtes noires et sur les bouchages en résine. L'opération a également contribué à protéger l'ensemble des sculptures tout en conservant une légère hétérogénéité dans les différentes teintes de vert, brun et noir qui caractérisent la patine des bronzes et participent à leur appréciation esthétique.



Figure 52. Micro-sablage aux noyaux d'abricots, ©Louvre, 2024



Figure 53. Repatine en cours, ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

Remontage du quadrigé

Après leur restauration, l'ensemble des éléments du quadrigé a été remonté à l'aide d'un bras grue et de systèmes de cages métalliques identiques à celles de la dépose. Le scellement des chevaux a été amélioré en mettant en place un nouveau système d'ancrage : les tiges métalliques en alliage ferreux ont été scellées au plomb dans des boîtes en acier inoxydable elles-mêmes ancrées dans la pierre au mortier de chaux (Figure 54). La partie supérieure de la tige en alliage ferreux a été englobée dans une feuille de plomb afin d'isoler le fer et de limiter les risques d'apparition de phénomènes de corrosion (Figure 55). Enfin, un habillage en acier inoxydable recouvert de plomb a été placé sur le support surélevé des sabots afin d'étanchéifier l'ensemble.



Figure 54. Vue du système de calage des ancrages avant scellement au plomb ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

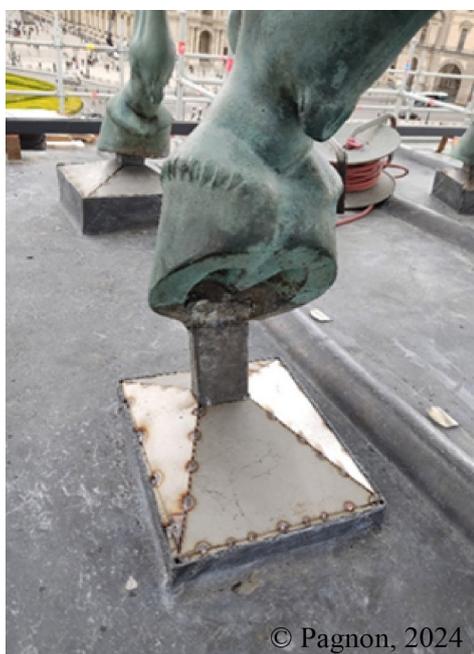


Figure 55. Vue de l'habillage en acier du support et de l'habillage plomb de la tige en alliage ferreux ©Julia Jouet 2024

Enfin, le bon état de conservation de l'aurige n'a nécessité que quelques interventions de nettoyage de la surface de la « peau de bronze » avec quelques reprises de patines et de bouchages de résines altérées datant de restaurations antérieures. En ce qui concerne le char, la plateforme en plomb mise en place en 1986 a été remplacée par une tôle de cuivre patinée ajustée pour assurer l'étanchéité de l'objet et retrouver l'harmonie chromatique de l'ensemble du quadrigé (Figure 56).



Figure 56. Plateforme du char restaurée ©Fonderie de Coubertin, Philippe Pagnon, 2024

Conclusion

Après un an et demi de travaux de restauration, le quadriges en bronze, les Renommées en plomb doré qui l'escortent, les chapiteaux et embases en bronze des colonnes en marbre, ont repris leur place au sein de l'ensemble des décors sculptés composant l'arc de triomphe du Carrousel. Autrefois entrée d'apparat du Palais des Tuileries, l'arc est devenu une porte cérémonielle ouverte sur la flamme olympique, à l'aube du lancement des jeux de Paris 2024. Les travaux de grande ampleur, réalisés à la fois in-situ et en atelier, ont été conduits selon des stratégies de restauration adaptées à aux états de conservation de ses différents composants tout en répondant aux exigences sanitaires. Gonflement des armatures, fissuration, confinement du noyau, effets de pile, auront été tant de phénomènes d'altération mettant en péril les peaux de bronze et de plomb. A cela s'est ajoutée la problématique de la toxicité de ce dernier métal. Les Renommées en plomb ont ainsi été considérées comme étant source de danger pour la santé des restaurateurs et leur protocole de restauration a nécessité la mise en place d'importants équipements de protection adaptés et le suivi d'un protocole rigoureux. Enfin, l'accès aux structures internes de ces œuvres et l'étude de leur matérialité ont contribué à mettre en perspective et à approfondir nos connaissances techniques de ces éléments réalisés lors de deux grandes phases de l'histoire du monument et désormais restaurés pour la troisième fois au cours des XX^e et XXI^e siècle. Danger du métal, métal en danger : toute une histoire, surtout quand les oiseaux s'en mêlent.

Remerciements

Les travaux présentés dans cet article résultent de la contribution de nombreux intervenants de disciplines complémentaires dont les compétences sont mises au service de la conservation des monuments patrimoniaux. Nous souhaitons en particulier remercier les maîtrises d'œuvre (Agence Goutal ACMH et CEBIBAT BEA) et d'ouvrage (Musée du Louvre) qui ont conduit la restauration de ce monument emblématique, le C2RMF pour l'accompagnement à l'identification des bronzes du quadriges, Antoine Amarger pour ses conseils précieux, les Ateliers Giordani qui ont réalisé la dorure des Renommées, ainsi que toutes les personnes avec qui nous avons interagi pour mener à bien ces travaux jusqu'au Jeux Olympiques de Paris 2024.

Références

- [1] Fonkenell G., L'approvisionnement du chantier de l'arc de triomphe du Carrousel : construction et restauration (1806-1933), *Livraisons de l'histoire de l'architecture* **16** (2008) p 71-86. DOI : <https://doi.org/10.4000/lha.184>
- [2] Catalogue d'exposition. François-Frédéric Lemot (1771-1827) : statuaire des oeuvres officielles et leur histoire secrète, *Exposition du 24 juin au 2 octobre 2005, Domaine départemental de la Garenne Lemot*, Gétigné, Richard M. (coordination de la publication) (2005) p. 32-33
- [3] Lebon E., Le Fondateur et le Sculpteur, *Publications de l'Institut national d'histoire de l'art*, Ophrys, (2012) <https://doi.org/10.4000/books.inha.3243>
- [4] Amarger A., Statue en plomb de Napoléon Ier par Lemot, *Rapport de restauration*, MR3458, (1993) 18 p.
- [5] Gazagne D., Caillot I., L'Héritier M., Büttner S., Adduction, évacuation et gestion de l'eau dans l'enclos du Temple de Paris : approches archéologiques et techniques. *Archéologie médiévale* **47** (2017) p.9-32. DOI : 10.4000/archeomed.2718
- [6] Note LRMH 323/84/JMB/GT, 1984 et 683/85/JMB/GT (1985)
- [7] Duval G., La Restauration du quadriges en bronze de l'Arc de Triomphe du Carrousel, de la Vierge en plomb doré, *Conservation of metal statuary and architectural decoration in open-air exposure*, symposium ICCROM 1986, Paris, publication à Rome (1987) p. 169-198
- [8] Azéma A., Syvilay D., Arc de triomphe du Carrousel du Louvre. Sculptures en bronze et en plomb doré. Étude préalable à la restauration., *Champs-sur-Marne : LRMH*, juillet, R1490A (2019)
- [9] SYRTA, Dossier spécial plomb, in *Exigence Amiante* **13** (2018) p 11-25

LES DANGERS DU MÉTAL DANS LES COLLECTIONS SCIENTIFIQUES, TECHNIQUES ET INDUSTRIELLES

Brambilla Laura*, Granget Elodie, Schenkel Tobias, Rapp Guillaume

Haute école Arc Conservation-restauration HE-Arc CR, Haute école spécialisée de Suisse occidentale HES-SO

 Laura.brambilla@he-arc.ch

* Autrice correspondante

Résumé

Les collections scientifiques, techniques et industrielles sont composées d'objets particulièrement complexes, qui représentent un vrai défi pour les conservateurs-restaurateurs : multiples matériaux parfois composites et en interaction entre eux, mécanismes en mouvement, systèmes électriques, juste pour en citer quelques-uns.

En plus de cette complexité du point de vue technique, des nombreux dangers peuvent être retrouvés en leur sein. L'utilisation de matériaux potentiellement toxiques ou même radioactifs était courante dans le passé et ces matériaux, encore présents sur ou dans ces objets, représentent un danger lors du stockage dans les réserves mais particulièrement lors d'interventions de restauration quand les professionnels sont à leur contact direct. Le développement de gaz à l'intérieur de systèmes scellés comme des boîtes de conserve peut causer la déformation du contenant métallique et conduire à son explosion si la réaction n'est pas arrêtée à temps. Les systèmes électriques et en particulier les isolants dégradés peuvent causer des courts-circuits. Les poussières représentent un risque important pour la santé, en particulier celles provenant d'éléments en plomb corrodés, de composants contenant de l'amiante ou de collections scientifiques traitées avec de l'arsenic. La présence diffuse du mercure dans ce type de collections patrimoniales (thermomètres, interrupteurs électriques ou pendules de compensation) peut devenir un problème si les contenant (habituellement en verre) pour le maintenir en place sont cassés et le métal renversé dans l'environnement. Des composants mécaniques sous contrainte comme les ressorts peuvent représenter un danger important pour les opérateurs. Sans oublier les soucis de corrosion et corrosion galvanique qui, très avancées, peuvent engendrer une dégradation structurelle du métal compromettant la conservation des objets.

Mots clés

Patrimoine STI, métaux, toxicité, corrosion, mécanismes

Abstract

Scientific, technical, and industrial collections are made up of particularly complex objects that represent a real challenge for conservators: multiple materials, sometimes composite and interacting with each other, moving mechanisms, and electrical systems, just to name a few.

In addition to this technical complexity, many hazards can be found within these collections. The use of potentially toxic or even radioactive materials was common in the past, and these materials are still present on or in these objects. This, incidentally, represents a danger during storage in the reserves, but in particular during conservation

work when professionals are in direct contact with the object. The development of gases inside sealed systems, such as cans, can cause deformation of the metal container, resulting in a real explosion if the reaction is not stopped in time. Electrical systems, and in particular those with degraded insulation, can cause short circuits. Dust represents a major health risk, especially if it comes from corroded lead elements, asbestos-containing components, or scientific collections treated with arsenic. The pervasive presence of mercury in such heritage collections, used in thermometers, electrical switches, or compensation clocks, can become a problem if the containers (usually glass) holding it in place break and the metal spills into the environment. Stressed mechanical components such as springs can represent a significant hazard to operators. Not to mention concerns about corrosion and galvanic corrosion, even at a very advanced stage, which can lead to structural degradation of the metal and jeopardize the conservation of objects.

Keywords

Industrial and Scientific Technical heritage, metals, toxicity, corrosion, mechanisms

Introduction – Contexte

La conservation-restauration des objets scientifiques, techniques et industriels (OSTI) pose des défis uniques en raison de leur complexité intrinsèque. Constitués de multiples matériaux souvent composites et abritant des mécanismes complexes, ces objets exigent une expertise particulière pour assurer leur préservation à long terme. Les conservateurs-restaurateurs sont confrontés à des problématiques variées, où chaque intervention doit être soigneusement planifiée pour minimiser les risques.

L'une des principales préoccupations concerne les matériaux intrinsèquement toxiques présents dans de nombreux OSTI, plomb, amiante, arsenic et mercure, ainsi que des matériaux radioactifs, y sont fréquents. Leur manipulation expose les professionnels à des risques sanitaires importants, rendant nécessaire l'adoption de mesures de sécurité strictes.

En parallèle, la dégradation de certains matériaux constitue un autre défi majeur. Les OSTI peuvent émettre des composés organiques volatils (COV) lors de la détérioration de leurs composants, les isolants électriques peuvent perdre leur efficacité, et la corrosion, en particulier la corrosion galvanique, peut provoquer une dégradation structurelle. Ces processus compromettent non seulement la conservation des objets, mais également la sécurité des interventions.

Les dangers physiques associés aux OSTI ne doivent pas être sous-estimés. Ces objets, parfois monumentaux ou d'une masse difficile à évaluer avant manipulation, contiennent souvent des éléments mécaniques sous contrainte, tels que des ressorts, qui peuvent causer des accidents graves lors des interventions de restauration.

Cet article expose en détail ces différents risques spécifiques, en les illustrant par des exemples concrets. Enfin, il se penche sur le cas d'étude de la lunette PZT, un objet emblématique qui réunit plusieurs de ces risques, offrant ainsi un aperçu des défis complexes auxquels les conservateurs-restaurateurs doivent faire face.

Danger intrinsèque aux matériaux

Les collections techniques, scientifiques et industrielles regorgent de matériaux intrinsèquement dangereux. Les dangers de l'amiante, minéral formé de fibres microscopiques et extrêmement nocif si inhalé [1], sont bien connus. De même, l'utilisation très répandue d'insecticides et d'antifongiques à base d'arsenic pour préserver les matériaux organiques, en particulier dans les collections d'histoire naturelle, posent aujourd'hui encore des problèmes de

toxicité et rendent difficile la manipulation et l'exposition de ces objets [2]. Enfin, la plupart des préparations d'histoire naturelle contiennent des métaux toxiques (arsenic, mais aussi mercure ou plomb), rendant la consultation et l'exposition de ce matériel scientifique risqué [2]. C'est également le cas pour certains métaux qui, bien que faisant partie intégrante des OSTI, représentent un sérieux risque pour la sécurité des personnes en charge de leur manipulation, entretien ou conservation-restauration. Cette section va s'attarder sur le cas du plomb, du mercure et des matériaux radioactifs.

Le plomb

Le plomb existe sous diverses formes chimiques et physiques, chacune présentant des niveaux de toxicité et des risques spécifiques. Le plomb métallique, solide, est un métal lourd et gris utilisé dans de nombreux objets patrimoniaux, tels que tuyaux, sculptures, et vitraux. Dans le patrimoine technique, il est quasiment omniprésent, que ce soit dans les piles à accumulateurs de plomb rechargeables, électrodes, connecteurs, écrans de protection radiologique, soudures, fusibles, munitions, poids... [3].

Le plomb métallique massif n'est pas dangereux. Toutefois, s'il se trouve sous forme de particules inhalables, le plomb devient dangereux. Ces petites particules peuvent prendre plusieurs formes : la poussière, la fumée ou le brouillard. La poussière est formée lors de son usinage ou à l'usure, où des particules peuvent alors être libérées. Les fumées sont, elles, produites lors de la fusion ou du brasage de métaux contenant du plomb. Enfin, un brouillard de fines gouttelettes peut également se former lors de la pulvérisation de peintures à base de plomb [4].

Le plomb réagit facilement pour former des composés inorganiques, tels que des oxydes, carbonates, et autres sels, constitutifs de peintures, pigments, et glaçures. Bien qu'insolubles dans l'eau, ces composés peuvent être absorbés via les voies respiratoires ou digestives (corrosion du Pb détaillé dans la section suivante - "Altération des matériaux"). Enfin, il existe des composés organiques du plomb, comme le plomb tétraéthyle, autrefois utilisé comme additif dans les carburants, qui sont extrêmement toxiques et plus facilement absorbés par la peau [4, 5].

Les formes inhalables du plomb, telles que poussière, fumée et brouillard, pénètrent rapidement dans l'organisme par les voies respiratoires, causant des dommages graves, notamment le saturnisme. Il peut également être ingéré ou absorbé par la peau, entraînant des effets toxiques graves, surtout chez les enfants et les femmes enceintes.

Lors du travail avec du plomb, il est crucial d'assurer une bonne ventilation et filtration de l'air, et d'utiliser un équipement de protection approprié pour minimiser les risques. Lorsque la concentration de plomb est faible, un demi-masque avec un filtre à haute efficacité est recommandé. Pour des concentrations plus élevées, un appareil de protection respiratoire à adduction d'air pur est préférable. Les activités comme le brasage tendre, le décapage de peinture à base de plomb, ou l'application de revêtements plombifères peuvent générer des niveaux élevés de poussière de plomb. Il est également important d'assurer l'étanchéité des équipements de protection par des tests appropriés et de porter des vêtements de protection réutilisables ou jetables pour éviter la contamination de ceux personnels et des lieux de travail. Les déchets contaminés doivent être traités comme des déchets dangereux. [3, 4].

Le mercure

Le mercure est un métal lourd utilisé dans divers objets et équipements médicaux, scientifiques et industriels. Il est présent dans les collections muséales à l'état métallique ou sous forme de composés. A l'état métallique on le retrouve par exemples sous sa forme liquide dans les instruments de mesure de température ou pression et comme contact dans des interrupteurs ([1, 6], et en vapeur dans plusieurs instruments de mesures, des lampes incandes-

centes ou encore des redresseurs à vapeur de mercure (Figure 1) [7]. Il a enfin beaucoup été utilisé comme amalgame et il est possible d'en trouver des traces dans les anciens comblements dentaires (Hg-Pb) ou dorures (Hg-Au).

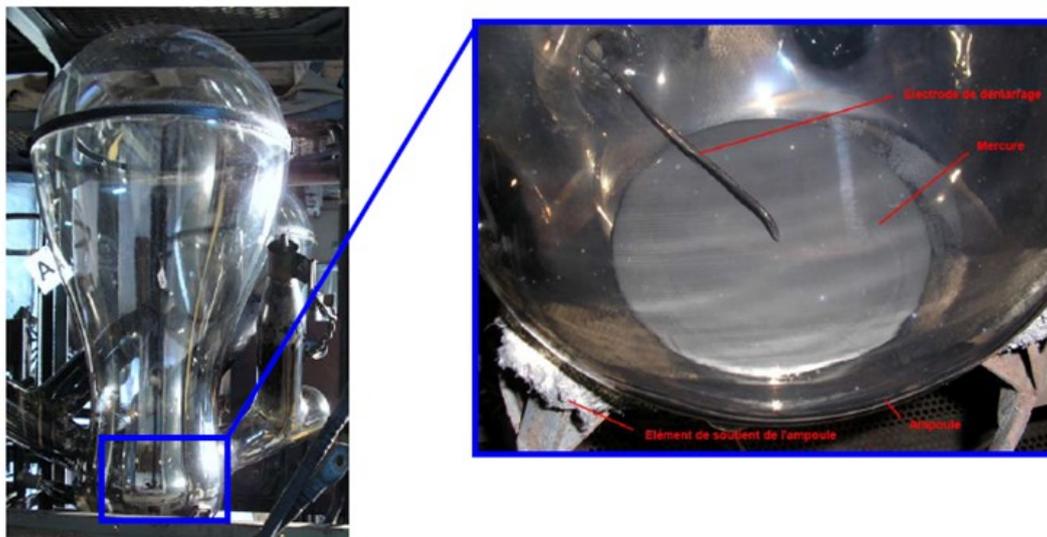


Figure 1. Redresseur à vapeur de mercure, vue de l'ampoule en verre avec détail de la base contenant du mercure liquide. ©Tarchini 2006

Des composés inorganiques du mercure se trouvent sous forme de pigment (cinabre), dans les piles [7], mais aussi dans les collections minéralogiques ou sur des objets traités avec des insecticides au mercure [2, 8]. Enfin, ses composés organiques peuvent se trouver dans les collections pharmaceutiques (mercurochrome / merbromine) [8]. Le mercure est toxique sous toutes ses formes. Il a un impact sur la santé physique, mentale, reproductive ainsi que sur l'environnement. En cas de casse de l'objet en contenant, il peut se retrouver répandu dans la pièce sous forme de gouttelettes qui peuvent être microscopique (Figure 2). La vapeur de mercure, si inhalée, est retenue jusqu'à 80% dans le corps et se diffuse par le sang vers les organes. L'ingestion d'une grande quantité de mercure (exposition aiguë) entraîne l'intoxication et affecte le système nerveux, impactant l'énergie et la stabilité émotionnelle du patient. À terme, l'intoxication au mercure peut entraîner des affectations cérébrales, respiratoires ou cardiaques mortelles [7, 8].

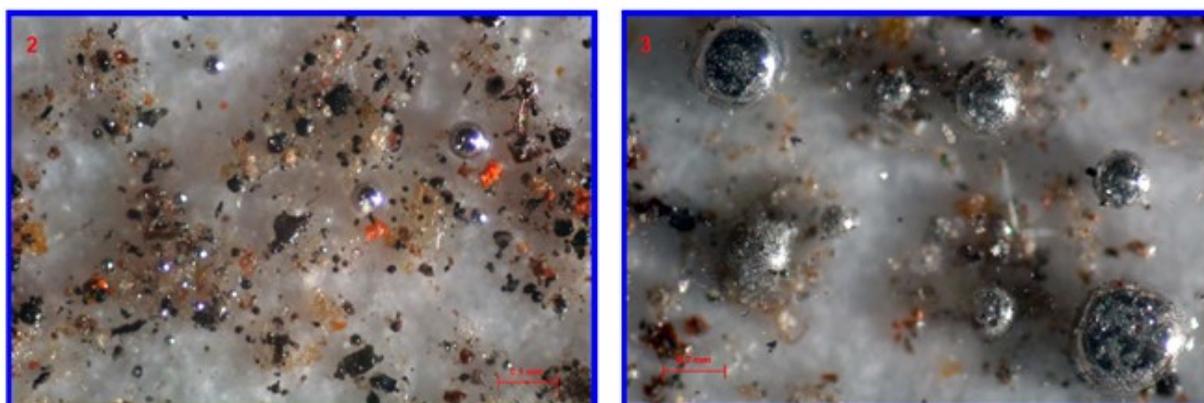


Figure 2. Micro gouttelettes de mercure identifiées dans la poussière. Tarchini 2006

En plus des risques pour la santé, le mercure a des interactions problématiques avec d'autres matériaux. Ainsi, il ne doit pas être mis en contact avec des nitrates, dioxydes de chlore ou acide peroxyformique au risque de causer une explosion. Le mercure dissout également beaucoup de métaux, comme le cuivre, l'argent, le plomb, l'or... avec lesquels il forme des amalgames [1, 3].

La radioactivité

La radioactivité est une propriété physique de certains atomes dont le noyau est instable. Des sources de radioactivités peuvent être trouvées directement dans la nature ou être créées artificiellement. Plusieurs isotopes radioactifs existent naturellement et proviennent essentiellement de l'écorce terrestre, tels que l'uranium, le thorium et le potassium et tous leurs produits de désintégration, tels que le radium et le radon. Les trois principaux radionucléides présents en nature sont le potassium 40, le radon 222 et le radon 220. Le radon est un gaz résultant de la désintégration du radium. Une autre source de radioactivité naturelle provient du rayonnement cosmique. Parmi les sources de radioactivité artificielle, peuvent être citées : les traitements médicaux ; les essais d'armes nucléaires, effectués à partir des années 1950 et les centrales à énergie nucléaire [9].

En ce qui concerne les objets STI, l'élément radioactif le plus fréquemment présent est probablement le radium. Découvert par Marie et Pierre Curie à la fin du XIXe siècle, il a été considéré pendant des décennies comme un « élément miracle » et utilisé pour fabriquer des objets du quotidien et à usage médical, tels que des crèmes, des sous-vêtements, des rasoirs, des stylos, des sodas, du beurre, des cigarettes, etc. Le radium était également employé dans des dispositifs produisant de l'eau radioactive, destinée à des traitements médicaux ou de « Jouvence », à boire ou à utiliser pour des bains. Parmi ces dispositifs figurent l'appareil Mund, inventé en 1929, ainsi que des fontaines à radium fabriquées par la compagnie anglaise Radium Ltd de Londres [9].

On le retrouve aussi dans des instruments médicaux, notamment pour le traitement du cancer, comme des aiguilles et tubes utilisés en curiethérapie, ou encore dans la bombe au radium développée en 1930 [9]. L'utilisation la plus célèbre du radium reste cependant dans la production de peintures fluorescentes, en raison de la luminescence naturelle de l'élément, pour peindre les aiguilles et cadrans de montres, boussoles et autres instruments de mesure. Il convient également de noter que ces peintures ont été largement utilisées pour les cadrans d'avions et de voitures, des objets religieux, les yeux de poupées, des leurres de pêche, et tout autre objet nécessitant une luminescence [9]. Ainsi, le radium se retrouve dans une grande variété d'objets, bien au-delà des collections STI.

Les OSTI contaminés par des éléments radioactifs peuvent être classés en deux catégories selon la nature de leur contamination : fixe et non-fixe. Les objets appartenant à la première catégorie sont radioactifs mais ne disséminent pas des particules actives. Les objets appartenant à la deuxième classe, sont considérés comme des contaminants et peuvent rendre radioactif d'autres objets par transfert, souvent de poussière. Les OSTI dans cette catégorie peuvent être traités de façons différentes : ils peuvent être scellés dans un compartiment hermétique ; ils peuvent être décontaminés (souvent retrait par méthode mécanique) ; la contamination non-fixe (poussière) peut être fixée (application d'un vernis sur la contamination non-fixe pour éviter la dissémination dans l'environnement et la contamination d'autres objets) [9].

Altérations des matériaux

Interaction avec l'environnement

Au-delà de la toxicité intrinsèque de certains métaux, comme décrit dans les paragraphes précédents, les métaux peuvent devenir « dangereux » en raison de phénomènes de dégradation. Lorsqu'on parle de métaux, le principal phénomène de dégradation est bien sûr la corrosion. Par définition, la corrosion est la réaction d'un métal avec son environnement [10,11] et en particulier, pour la corrosion dite environnementale, avec l'oxygène de l'air et avec l'eau, sous forme d'humidité ou liquide. En fait, la corrosion est un phénomène électrochimique dû à une réaction redox (oxydoréduction) entre le métal et un agent oxydant présent dans l'environnement [11].

Tous les métaux en contact avec l'atmosphère réagissent et forment des produits de corrosion qui peuvent avoir compositions et aspects différents : de la « rouille » du fer, en passant par les patines colorées des alliages cuivreux, du ternissement de l'argent aux produits pulvérulents du plomb, du zinc, du magnésium et de l'aluminium.

Les métaux ne se corrodent pas uniquement quand ils sont exposés aux agents atmosphériques en extérieur. Dans les environnements intérieurs, les concentrations de certains polluants, dont les composés organiques volatils (COV), ont également un impact sur la corrosion de certains matériaux. C'est le cas en particulier des acides organiques volatils, tels que l'acide acétique et l'acide formique, qui peuvent atteindre des concentrations très élevées et donc représenter un danger pour les métaux [10, 12]. Ces COV émanent en particulier de bois et de certains polymères. Ils peuvent donc être libérés dans l'air par les objets exposés, mais aussi par les matériaux d'emballage, les structures en bois, les adhésifs ou les produits d'entretien et de nettoyage. Les acides organiques volatils peuvent provoquer la corrosion de différents métaux, comme le cuivre, le zinc, le nickel, le fer et le cadmium. Toutefois, parmi les matériaux représentés dans les collections, le plomb est le métal le plus sensible à la présence de composés organiques volatils dans l'environnement. Ce métal se corrode très lentement dans des conditions atmosphériques normales grâce à la formation de films protecteurs adhérents à la surface. En revanche, l'action des acides organiques volatils provoque la rupture et la dissolution de ces couches protectrices et la précipitation de produits de corrosion volumineux peu cohésif à base de formiate ou d'acétate. Ceux-ci peuvent être transformés par l'action du dioxyde de carbone dans l'air en produits de corrosion à base de carbonate (cérusite et hydrocérusite), de couleur blanche et d'aspect pulvérulent. De plus, les acides organiques volatils libérés entretiennent le processus de corrosion. Ils peuvent se concentrer dans la couche superficielle et provoquer une corrosion supplémentaire, que la source d'origine soit toujours présente dans l'environnement ou pas [12].



Figure 3. Exemple de corrosion du plomb par exposition aux COV sur un élément d'une boîte à musique @HE-Arc CR

On trouve beaucoup d'éléments en plomb dans les objets STI et leur dégradation représente à la fois un danger pour l'objet lui-même et pour l'opérateur. D'une part, les parties d'un mécanisme ou circuit électrique particulièrement corrodées ne peuvent plus être considérées comme fonctionnelles, et d'autre part, comme détaillé dans la section précédente, la pulvérulence des produits de corrosion du plomb, très toxiques par inhalation, représentent un sérieux danger pour les opérateurs (personnel du musée, conservateurs-restaurateurs...). Un exemple de corrosion du plomb dans un objet STI est représenté dans la Figure 3. Il s'agit d'une pièce qui sert à donner les tonalités musicales graves dans une boîte à musique. On peut clairement noter la présence de produits de corrosion du plomb, avec leur couleur blanchâtre typique et leur consistance très pulvérulente et peu cohésive.

Auto-altération

Un phénomène lié à la corrosion, mais souvent moins considéré que la « simple » production de patines, rouille et autres produits pulvérulents est le développement de gaz. En fait, lors de phénomènes de corrosion dans des conditions particulières, comme en condition d'anoxie et en environnement acide, le développement d'hydrogène gazeux peut avoir lieu. Ce phénomène peut être particulièrement problématique à l'intérieur d'un récipient fermé, car le gaz peut s'accumuler et créer une pression à l'intérieur du récipient, qui, en fonction de matériau constitutif, peut se déformer ou même exploser. Ce phénomène spécifique peut par exemple être observé dans des boîtes de conserve en fer blanc contenant des aliments, jusqu'à plusieurs décennies après leur fabrication. Il faut en fait distinguer deux phénomènes pouvant amener au gonflement des boîtes de conserve : si le gonflement a lieu peu après la production de la boîte, alors cette la formation du gaz, dans ce cas du CO₂, peut être due à une activité de microorganismes à cause d'une mauvaise stérilisation en phase de production. Si, par contre, le gonflement a lieu longtemps après la production, de l'ordre d'années ou décennies, alors ce phénomène est sûrement lié à la corrosion. Pendant la durée de vie des boîtes en fer blanc, l'étain est libéré à trois vitesses différentes selon le temps de stockage [13,14] :

- 1ère étape : la couche d'oxyde d'étain est éliminée de la surface interne de la boîte. Le taux élevé de dissolution de l'étain est dû à la réduction de l'oxygène résiduel et à des espèces oxydantes présentes dans les aliments.



Figure 4. Exemple de gonflement de boîte de conserve à cause du développement d'hydrogène par corrosion

- 2ème étape : une dissolution lente de l'étain se produit à un rythme presque constant. La corrosion de la couche d'étain conduit à l'élargissement d'éventuels pores et des défauts existants, augmentant ainsi les zones exposées de l'alliage FeSn₂ (formé en phase de production du fer blanc) et de l'acier de base sous-jacent. L'acier de base exposé aux aliments fournit des sites catalytiques pour la réaction d'évolution de l'hydrogène (REH).
- 3ème étape : la dissolution de l'étain augmente de manière exponentielle en raison de l'exposition de larges zones d'acier de base, ce qui catalyse la REH. L'accumulation d'hydrogène moléculaire augmente la pression interne, induisant le gonflement et éventuellement l'explosion de la boîte.

Cette dernière étape a tendance à avoir peu d'importance dans l'industrie car, à ce stade, les aliments ont atteint la fin de leur durée de conservation. Cependant, cette étape est extrêmement importante pour les collections de musées où les boîtes atteignent cet état critique et commencent à se dégrader, comme on peut l'observer sur la Figure 4.

Mise en péril du fonctionnement

Enfin, l'instabilité de certains alliages anciens mettent en question le maintien du fonctionnement de certains objets techniques. Au-delà des altérations mécaniques, des phénomènes de corrosion liés à l'instabilité de ces matériaux posent des problèmes uniques au statut muséal de certains objets techniques fonctionnels. Le cas d'anciens alliages d'aluminium et de zinc dans l'automobile sont de bons exemples de cette problématique : les circuits de refroidissement des Bugatti du musée de Mulhouse, dont les alliages d'aluminium riches en cuivre (utilisés entre 1910 et 1930) sont peu résistants à la corrosion. Ils subissent des variations de température et d'humidité, et le liquide de refroidissement, en contact avec d'autres métaux, favorise la corrosion. Depuis leur patrimonialisation, il n'est plus possible de « simplement » changer ces pièces. De plus, l'utilisation irrégulière et la stagnation du liquide dans certaines parties du circuit accentuent ces phénomènes, remettant en cause leur maintien en fonctionnement [15]. Assez similairement, l'utilisation du Zamac dans l'industrie automobile aux alentours des années 1920 a permis l'élaboration de pièces complexes par moulage sous pression. Cependant, si on sait faire des alliages de zinc stables depuis environ 1950, la composition des premières productions de ces pièces les rendaient sujet à un phénomène de corrosion nommé la Peste du zinc. Cette corrosion cause la fissuration et l'éclatement de ces pièces moulées. Si ce n'est qu'un problème esthétique pour les pièces de décoration, la peste du zinc est désastreuse pour le fonctionnement du véhicule lorsqu'elle touche des pièces de mécanique [16].

Dangers mécaniques

De nombreux objets du patrimoine technique ont été fabriqués avec l'intention de créer un danger et conçus pour blesser, tel que les armes blanches. Leur forme pointue et tranchante, leur brillance, leur confère une apparence indestructible et dangereuse. Le métal est utilisé comme matériau de construction résistant et fiable qui permet d'être mis en forme avec précision et des propriétés mécaniques bien déterminées [17,18]. Du piège à souris jusqu'à l'arquebuse, si les dangers ont été initialement destinés aux adversaires, ils demeurent partiellement conservés avec les objets que nous trouvons dans les collections patrimoniales. S'il est facilement compréhensible qu'un couteau suisse historique ne perd pas sa fonctionnalité et reste un objet potentiellement coupant et dangereux, il existe une variété de biens culturels qui nous surprend avec des risques inattendus et non reconnaissables au premier regard.

En travaillant avec le patrimoine technique, il convient d'adopter une certaine méthodologie qui permet d'évaluer le danger et le risque d'accident propre à chaque objet et action de conservation-restauration. L'étude préliminaire représente une étape importante qui comprend une première identification des matériaux constitutifs, parfois de nature problématique, comme présenté dans les sections précédentes. S'en suit la réalisation d'un constat d'état qui inclut la vérification de la fiabilité structurelle des matériaux porteurs ou soumis aux contraintes mécaniques. Une particularité du patrimoine scientifique, technique et industriel est son rapport avec la transformation de l'énergie et sa capacité d'accumuler de l'énergie. De la montre de poche jusqu'à la locomotive à vapeur, les mécanismes ont été conçus pour transformer l'énergie et pour fonctionner avec une certaine autonomie. Même après une longue période d'abandon et d'arrêt, les objets historiques peuvent toujours accumuler de l'énergie. « Libérer » cette énergie de manière non contrôlée représente un risque important pour les professionnels et les objets concernés. Avant toute tentative de manipulation, il est fortement recommandé d'identifier les accumulateurs d'énergie et de procéder, si cela est possible, à leur neutralisation (Figure 5).

Nous sommes confrontés à une accumulation d'énergie potentielle quand la masse d'un objet se trouve en hauteur et si l'objet n'est pas dans une position stable. Une telle situation s'est produite quand un meuble de machine à coudre a perdu un de ses quatre pieds au moment de son arrivée à l'atelier. L'adhésif utilisé pour la fixation du pied a été altéré et il a cédé sous l'effet du poids de la machine à coudre. Posée sur seulement trois pieds, l'énergie potentielle accumulée par la machine à coudre s'est transformée en énergie cinétique et l'objet s'est renversé. Les leçons à tirer de ce cas d'étude : il convient de se méfier des anciens assemblages qui ont été beaucoup sollicités durant la vie de l'objet, de bien saisir la répartition des masses d'un objet et de veiller à ce que celles-ci ne se trouvent pas en hauteur et dans une position instable.

Une autre forme de l'énergie potentielle peut être accumulée par la déformation élastique d'un ressort en métal. Cette énergie de tension pose principalement des problèmes si des phénomènes de fatigue provoquent la rupture du ressort remonté. Il est également risqué de démonter un mécanisme « remonté » qui peut libérer soudainement et de façon non contrôlée son énergie. D'importants dégâts peuvent être le résultat allant de la déformation jusqu'à la rupture des composants mécaniques. Des cycles de compression et de décompression fatiguent avec le



Figure 5. Les dangers potentiels d'un mécanisme inconnu

temps les ressorts en acier ce qui induit une perte de leurs propriétés mécaniques jusqu'à leur rupture. La dégradation progressive des ressorts et la crainte des complications provoquées par un ressort cassé sont les raisons pour lesquelles ils sont considérés comme des composants consommables et remplacés après une certaine période d'utilisation. La perte d'authenticité peut être atténuée en conservant les composants consommables avec les mécanismes, ce qui permet de revenir à la configuration antérieure.

L'énergie cinétique est omniprésente dans tous mécanismes en mouvement, qui en règle générale, s'ils sont bien déterminés et contrôlés, demeurent également soumis à des phénomènes de détérioration. Ils s'accompagnent de frottements entre les surfaces en contact qui représentent un risque pour la conservation des mécanismes. À l'origine, ces surfaces fonctionnelles sont parfaitement lisses et séparées par un film de lubrifiant qui diminue les frottements et risques d'usure. Ce système tribologique évolue avec le temps et les conditions dans lesquelles les opérations mécaniques se déroulent. L'altération des surfaces fonctionnelles et la dégradation du lubrifiant provoquent la formation d'un milieu qui favorise l'usure. La lubrification se transforme ainsi en un agent de dégradation physicochimique qui endommage progressivement les surfaces en contact.

La remise en fonction d'un objet historique devrait toujours passer par l'étude approfondie de l'impact du fonctionnement sur la conservation des matériaux impliqués et l'adaptation du régime fonctionnel. Une telle limitation de la performance permet de ralentir les phénomènes d'usure sans péjorer la compréhension de l'objet et de son fonctionnement. Leur vérification périodique permet de contrôler leur état de fonctionnement. Émission de chaleur et d'odeur, apparition de vibrations et de bruits inhabituels, dégradation de l'aspect visuel du lubrifiant et des surfaces fonctionnelles sont autant d'indicateurs tribologiques démontrant une dégradation progressive.

L'énergie cinétique peut devenir dangereuse quand le mouvement ne peut pas se poursuivre comme prévu. En fonction de la vitesse et de la masse des composants en mouvement, un mécanisme accumule une certaine inertie qui s'oppose aux changements cinétiques. Le blocage accidentel d'un mécanisme en mouvement peut être dangereux et provoquer l'endommagement de composants ou représenter un risque pour les personnes à proximité. Un frein permet de ralentir et d'arrêter le mouvement de manière contrôlée. Il s'agit d'un dispositif de sécurité indispensable qui doit être conservé en priorité. Les véhicules de collection doivent être équipés d'un système de freinage fonctionnel permettant de les déplacer en sécurité. « On n'ose pas imaginer la surprise quand on descend une rampe avec un véhicule historique et quand on réalise que les freins ne fonctionnent pas ! » citation de Wolf Meyer zu Bargholz, ancien conservateur-restaurateur au Musée des transports Suisse.

L'énergie électrique peut conduire à des accidents de personnes et provoquer des dégâts importants. Isolation défectueuse ou surchauffe de composants électriques, les objets historiques ne remplissent que rarement les exigences de sécurité d'aujourd'hui. Leurs remises en fonction doivent être réfléchies en se basant sur une vérification des composants individuels et en adaptant leur tension de fonctionnement. L'observation à l'aide d'une caméra thermique permet de contrôler le comportement d'un mécanisme électrifié sous tension et en mouvement.

Les risques liés aux objets du patrimoine scientifique, technique et industriel sont dus à leurs matériaux parfois problématiques, à l'accumulation et la transformation des différentes énergies, mais également à leur manipulation. L'utilisation d'outils et d'installations techniques augmente les risques et démontre qu'il est nécessaire de connaître ces objets et leurs particularités.

Cas d'étude

Prenons ici le cas d'un objet STI traité à la HE-Arc en 2020-2021 : le télescope zénithal photographique "PZT". Il s'agit d'un instrument d'optique astronomique issu du corpus d'objets préservés de l'ancien Observatoire Cantonal de Neuchâtel (Suisse). D'une taille imposante de près de 3m de hauteur et d'une masse estimée à plus de 1500 kg, cet objet rentre dans la catégorie des pièces monumentales. Cet instrument, construit en 1954 par Grubbs, Parsons and Co. à Newcastle-on-Thames (GB), conçu pour des prises de vues photographiques du ciel permettant la détermination de l'heure exacte, fut en service jusqu'en 1982 puis, vers 1985, fut démonté et transporté par camion afin d'être intégré aux collections du Musée International d'Horlogerie de La Chaux-de-Fonds.

Créé en 1858, l'Observatoire de Neuchâtel, a honoré pendant presque 150 ans le mandat de livrer chaque jour en Suisse l'heure exacte, de la conserver et de fournir les mesures chronométriques nécessaires à l'essor de l'horlogerie. En 2007, une restructuration a conduit à scinder l'Observatoire en plusieurs entités distinctes, de sorte que sa forme ancienne a été abandonnée. C'est alors que s'est fait jour un intérêt à conserver la mémoire de cette institution représentative du savoir-faire local, non seulement dans son histoire mais aussi dans son évolution technologique. Or, si la période de 1858 à 1948, correspondant essentiellement à l'horlogerie électromécanique, était volontiers documentée, celle plus récente de l'horlogerie électronique, des débuts du quartz et de l'heure atomique, faite de boîtes noires et de machines grises reliées par des kilomètres de fils, était nettement moins recherchée. Dans l'espoir de combler en partie cette lacune, l'Université de Neuchâtel et la Haute école Arc sont convenues d'un partenariat pour l'étude du télescope PZT, objet de transition historique vers cette nouvelle génération d'instruments scientifiques.

C'est ainsi que les nombreux éléments constitutifs du PZT ont été acheminés pour étude dans les locaux en plain-pied de la He Arc Conservation-restauration à Neuchâtel. Un premier problème est alors apparu : la charge au sol du bâtiment He Arc était donnée pour 500kg/m². Or, la masse du tube du télescope était à elle seule estimée à 500-600 kg environ. Celle de sa base en fonte, à environ 1000-1200 kg. Chacun était posé sur des palettes format Europe de 80 x 120 cm, soit sur environ 1 m² de surface. Les ingénieurs-civils ayant conçu le bâtiment ont alors été contactés pour savoir si ponctuellement la charge au sol pouvait excéder ces 500 kg/m², ce qui a semblé possible en disposant correctement les charges à l'aplomb de murs porteurs situés à l'étage du dessous. À défaut, des étais mécaniques auraient dû être posés dans les étages en sous-sol. Il a dès lors été clair que nous ne pourrions pas remonter l'objet dans nos locaux, ce qui a orienté le projet sur une restitution uniquement graphique de l'objet complet.

Le constat d'état réalisé dans la foulée par l'étudiante chargée du projet a mis en évidence la présence dans certains interstices d'inquiétantes petites zones très mobiles renvoyant un reflet vif argenté lors de l'observation à la lampe torche en lumière blanche. Concentrées dans la partie basse de l'instrument, il devenait clair que nous étions devant les restes d'un épanchement de mercure survenu à un instant non-documenté de l'histoire de l'objet. L'étude des documents techniques historiques du PZT nous a appris peu après qu'en effet, un bain de mercure était bien utilisé comme miroir dans la partie inférieure du télescope. Sollicité en urgence, le laboratoire BAFOB, de Berne, a répondu immédiatement présent pour venir effectuer une mesure de la qualité de l'air dans nos locaux. Ceux-ci étant équipés d'une ventilation mécanique contrôlée renouvelant totalement le volume d'air environ six fois par heure, il est apparu lors des mesures au moyen de tubes Dräger spécifiques que la concentration en va-

peurs de mercure était toujours en-dessous du seuil critique et que, de ce fait, une évacuation de nos locaux ne s'imposait pas. Cependant, les mesures effectuées directement près des objets se sont avérées au-dessus des seuils admissibles, ce qui a confirmé la situation de contamination. L'information nous a en outre été donnée par BAFOB que la température ne devait en aucun cas dépasser les 27°C en présence de mercure liquide, car c'est alors qu'une quantité plus importante se vaporise dans l'air ambiant. Selon cette idée, il faut particulièrement éviter de chercher à aspirer les billes de mercure au moyen d'un aspirateur conventionnel, car la température dans les parties techniques de ces appareils dépasse facilement les 27°C. Le risque est encore accru lorsque les billes se fractionnent pour devenir toujours plus petites, possédant ainsi une surface spécifique plus importante en contact avec l'air qui est alors contaminé par ses vapeurs.

De ce fait, nous avons essayé de récolter mécaniquement la plus grande partie de ce qui était visible dans les interstices au moyen de seringues munies d'aiguilles (Figure 8) dont nous avons coupé les pointes. La succion des grosses gouttes s'est passée relativement bien et c'est cette méthode qui a offert le meilleur rendement sur de petites surfaces. En revanche, en dessous d'une taille de gouttes d'environ 1 mm de diamètre cela devenait une gageure. Nous tentions alors de faire se rencontrer ces gouttelettes entre-elles, de sorte qu'elles fusionnent en de plus grosses. D'autre part, de nombreuses microbilles de mercure étaient retenues dans les zones graisseuses (Figure 6) ; celles-ci ont été retirées mécaniquement (Figure 7). Sur les surfaces planes, nous avons répété plusieurs fois l'essai des éponges spéciales censées absorber le mercure. Malheureusement, dans notre cas, de telles éponges ont semblé ne pas avoir avec le mercure l'affinité promise par la notice d'utilisation du produit.



Figure 6. Perles de mercure prises dans la graisse d'une chaîne de transmission. Leur diamètre est de l'ordre de 0,1 à 0,5 mm



Figure 7. Retrait mécanique des morceaux graisseux retenant des particules de mercure n'ayant pas pu être aspirées

Confrontés au fait que la construction de cette partie basse du télescope PZT est en plusieurs pièces, d'où la présence d'interstices entre ces parties dans lesquelles le mercure s'était glissé, nous avons dû envisager une solution plus radicale pour assurer que les résidus piégés dans les zones inaccessibles à nos moyens ne se vaporisent dans le temps, faisant du PZT un instrument inexposable au public et dangereux pour la santé des personnes en général.

Après un premier projet d'intervention proposé par BAFOB, calqué sur le dispositif utilisé lors de désamiantages et impliquant la construction d'une tente à pression différentielle à l'intérieur de notre salle d'atelier, nous avons décidé de nous tourner vers l'antenne genevoise de la société Belfor, qui pouvait également témoigner d'une expérience importante et des équipements adéquats dans le domaine du nettoyage des épanchements de mercure dans des lieux publics.

Réalisée en mai 2021, avant les grosses chaleurs de l'été, l'intervention a consisté d'abord à rechercher toute évidence de gouttelettes de mercure en dehors de l'instrument incriminé, ce qui s'est avéré ne pas être le cas. Les sols ont été ensuite entièrement protégés par un revêtement de feutre plastifié imperméable. L'entreprise Belfor admit que le responsable d'atelier Conservation-restauration assisté d'un.e ou deux étudiant.e.s (sur un tournus de 45 minutes) collaborent avec leurs deux spécialistes dépêchés pour l'intervention. Ainsi, les bonnes pratiques en usage sur le patrimoine ont pu être assurées tout au long du traitement, notamment lors de la séparation et du levage des pièces lourdes au moyen d'une grue d'atelier, permettant d'atteindre toutes les parties contaminées (Figure 9). Le traitement a consisté en une aspiration au moyen d'un aspirateur d'un type spécial, dans la tuyère duquel un brouillard d'eau était continuellement pulvérisé, assurant une température toujours basse et condensant les éventuelles vapeurs de mercure. Les intervenants étaient équipés de combinaisons étanches en Tyvek[®], de surchaussures et de masques respiratoires à filtres spécifiques contre les vapeurs de mercure (Filtre combiné 3M, modèle AE1HgP3 R).



Figure 8. Aspiration des gouttes de mercure à la seringue. Avant (à gauche) et après (à droite)



Figure 9. L'accès aux interstices renfermant du mercure peut demander une manutention lourde. Ici au moyen d'une grue d'atelier



Figure 10. À gauche, le bac de récupération de l'aspirateur à vaporisation d'eau dans la tuyère, après le traitement. À droite, les billes de mercure récoltées parmi les autres poussières

Les parties traitées ont été déposées sur des palettes neuves dans une zone propre de la salle. En fin d'intervention c'est une trentaine de grammes de mercure dispersés dans une boue de poussières diverses qui a été récoltée (Figure 10). Ce composé, ainsi que tous les revêtements de sols, les palettes, les combinaisons et autres consommables utilisés durant l'intervention ont été emballés dans des sacs spécifiques qui ont ensuite pris le chemin de l'usine de retraitement CRIDEC à Éclépens (VD). Au total, le montant des opérations s'est élevé à environ CHF 7'000 mesures de l'air et élimination des déchets comprises, soit un montant du même ordre en EUR au cours actuel. Il faut également admettre que cette situation nous a fait réfléchir sur les points de vigilance à observer avant d'admettre des objets à intégrer le cursus de formation de nos étudiant.e.s en conservation-restauration. De même, les conséquences pour les bâtiments de contraintes au sol excessives ou de contamination à long terme sont à anticiper lorsque nous envisageons de traiter, exposer ou conserver en réserve un patrimoine de type STI.

Conclusions

Certains matériaux constitutifs des objets du patrimoine STI, et en particulier certains métaux, peuvent être considérés comme dangereux en raison de leur toxicité intrinsèque, de leur taille, de leur mécanisme ou de leur transformation en produits nocifs à cause de phénomènes d'altérations. Cet article avait pour objectif de présenter un panorama de ces dangers et de les illustrer avec des exemples tirés de travaux menés à la Haute Ecole Arc Conservation-restauration de Neuchâtel, en Suisse. Toutefois, ce texte ne peut pas, et ne veut pas être exhaustif d'une question si complexe, mais juste donner un aperçu de l'ampleur et de la diversité de cette problématique. En approchant l'étude et la restauration des OSTI, un professionnel doit être conscient des dangers possibles qui pourraient être rencontrés et planifier les protections qu'il convient d'utiliser. Le cas de la lunette télescopique PZT a mis en lumière la nécessité d'une bonne évaluation de ces risques, idéalement à réaliser en amont de la prise en main d'un mandat de restauration. Parfois, les objectifs initiaux de conservation-restauration eux-mêmes doivent être réévalués à cause des limitations engendrées par la taille, la toxicité ou l'instabilité de ces objets. Enfin, ce cas d'étude montre les infrastructures, les expertises et les coûts qu'engagent de tels projets. En somme, la prise en

charge d'un objet STI demande des précautions extrêmes, combinées à des compétences particulières pour identifier les caractéristiques technologiques de l'objet et savoir identifier les éventuels experts à impliquer sur le projet.

Remerciements

Les auteurs remercient les étudiants de Master 2 en conservation-restauration de l'HE-Arc pour leur travail sur le télescope zénithal photographique "PZT" lors du semestre d'hiver 2020-2021. Cet article s'est appuyé sur divers travaux de mémoire ou de semestre menés par des étudiants à la HE-Arc. Les images servant d'illustration ont été tirées de ces différents travaux.

Références

- [1] Lefebvre A., *Les matériaux dangereux dans les objets techniques cinématographiques*, Mémoire de bachelor, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2019) <https://sonar.ch/hesso/documents/313413>
- [2] Dangeon M., Contamination des collections naturalisées traitées aux biocides et mesures de conservation préventive, *CeROArt EGG 5* (2016) <http://journals.openedition.org/ceroart/4845> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ceroart.4845>
- [3] Marcé B., Entre santé publique et éthique patrimoniale : le poison dans les collections, *La Lettre de l'OCIM 176* (2018) <http://journals.openedition.org/ocim/2033> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ocim.2033>
- [4] Selwyn L., *La présence de plomb dans les collections muséales et les édifices patrimoniaux – Notes de l'Institut canadien de conservation (ICC) 1/8*. Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (2010) No. de cat. NM95-57/1-8-2010F, <https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/plomb-collections-museales.html>.
- [5] Selwyn L., Health and Safety Concerns Relating to Lead and Lead Compounds in Conservation, *Journal of the Canadian Association for Conservation 30* (2005) p. 18–37, <https://www.cac-accr.ca/fr/publications/health-and-safety-concerns-relating-to-lead-and-lead-compounds-in-conservation/>
- [6] Duc A., *Make it work? : The restoration of a Green Ray Television Wonder, a 1930s Fortune-teller slot machine from the Deutsches Technikmuseum Berlin*, Mémoire de master, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2020), <https://sonar.rero.ch/global/documents/313457>
- [7] Tarchini A., *Le mercure dans les collections du patrimoine technique et industriel : problématiques de conservation*, Mémoire de diplôme HES, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2006) <https://sonar.ch/hesso/documents/313431>
- [8] Selwyn L., *Le mercure présent dans les collections de musée – Notes de l'Institut canadien de conservation (ICC) 1/7*. Travaux publics et Services gouvernementaux Canada (2002) No. de cat. NM 95-57/1-7-2002F, <https://www.canada.ca/fr/institut-conservation/services/publications-conservation-preservation/notes-institut-canadien-conservation/mercure-collections-musee.html>.
- [9] Daval M., *La problématique de la radioactivité dans les objets patrimoniaux : identification, évaluation et gestion*. Mémoire de master, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2012)
- [10] Pedferri P., *Corrosion Science and Engineering*. Springer International Publishing AG (2018)

- [11] Landolt D., *Corrosion and surface chemistry of metals*. EPFL Press. (2007)
- [12] Kouřil M., Boháčková T., Strachotová K.C., Švadlena J., Prošek T., Kreislová K., Fialová P., *Lead Corrosion and Corrosivity Classification in Archives, Museums, and Churches*, *Materials* **15** (2022) 639. <https://doi.org/10.3390/ma15020639>
- [13] Mannheim C.H., Passy N., *Internal corrosion and shelf-life of food cans and methods of evaluation* **17** (4) (1982) p. 371-407.
- [14] Cova Caiazzo F., *Corrosion mechanisms and durability models for historical tinsplate food cans*, PhD Thesis, EPFL, (2018)
- [15] Granget E., *Corrosion des alliages d'aluminium des circuits de refroidissement à eau de véhicules en contexte patrimonial : Diagnostic à l'aide d'outils d'analyse portables et en libre accès sur un corpus de véhicules conservés au Musée National de l'Automobile de Mulhouse (Collection Schlumpf)*, Mémoire de master, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2020) <https://sonar.rero.ch/global/documents/313451>
- [16] Riva L., *La peste du zinc en milieu patrimonial : Caractérisation des alliages de zinc et étude de cas au Musée National de l'Automobile de Mulhouse*, Mémoire de bachelor, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2022) <https://sonar.rero.ch/global/documents/321896>
- [17] Braekman M., *La neutralisation des armes à feu portatives : approches historique, réglementaire, technique et déontologique*, Mémoire de diplôme HES, Orientation objets scientifiques, techniques et horlogers, Haute Ecole Arc Conservation-Restauration, Neuchâtel (2008) <https://sonar.rero.ch/global/documents/313447>
- [18] Aubagnac G., Les risques associés à la conservation des collections militaires et techniques, *La Lettre de l'OCIM* **168** (2016) <http://journals.openedition.org/ocim/1711> ; DOI : <https://doi.org/10.4000/ocim.1711>

CONSERVER LES OBJETS DYNAMIQUES : QUELLE PLACE POUR LE MOUVEMENT DANS LES PROJETS DE CONSERVATION ?

Françoise Collanges

CY Paris Cergy Université, laboratoire Héritages

 fcollanges@gmail.com

Résumé

Le patrimoine mobilier métallique est constitué en partie d'objets conçus pour réaliser une ou plusieurs actions, de manière unique ou répétitive, à court, moyen et/ou long terme. Qu'il s'agisse d'horloges, d'automates, de machines-outils, de véhicules de transport, d'art cinétique, ou même d'instruments de musique, voire de costumes, la question de la conservation des actions et mouvements qui font partie intégrante de leur fonction initiale reste un sujet de débat, voire parfois de polémique : les risques encourus ou créés par un objet en fonctionnement doivent-ils seuls définir son mode de conservation ? Comment les analyser et les gérer ? Dans quel contexte doit-on définir le projet de conservation d'un objet dynamique, pour quelles fins et dans quelle temporalité ?

Cette intervention propose une approche de la problématique du mouvement en conservation-restauration au filtre de différents types d'objets, essentiellement mécaniques, pour tenter de définir une conception ouverte de la conservation du mouvement dans les objets culturels. Fondée sur une approche des valeurs et des fonctions de l'objet autant que des besoins techniques imposés par la conservation de ses matériaux, elle propose une exploration des solutions de traitement et de gestion des objets en mouvement dans plusieurs pays, afin de proposer une démarche holistique pour la conservation et la restauration de ce patrimoine.

Mots clés

Objets dynamiques – fonctionnement – valeurs – théorie de la conservation

Abstract

The metal movable heritage is made up, in part, of objects designed to perform one or more actions, singly or repetitively, in a short, medium, and/or long-term timeframe. Whether it is clocks, automata, machine-tools, transport vehicles, kinetic art, or even musical instruments and costumes, the question of how to preserve the actions and movements that are an integral part of their initial function remains a subject of debate, and sometimes even controversy: should the risks incurred or created by a working object alone define its method of preservation? How should they be analyzed and managed? In what context should we define the conservation project for a dynamic object, for what purposes, and within what timeframe?

This talk looks at the issue of movement in conservation through the lens of different types of objects, essentially mechanical ones, to attempt to define an open concept regarding the conservation of movement in cultural ob-

jects. Based on an approach that takes into account the values and functions of the object as well as the technical needs imposed by the conservation of its materials, it offers to explore the treatment and management solutions for moving objects in several countries to propose a holistic approach to the conservation and restoration of this heritage.

Keywords

Dynamic objects - fonction - values - conservation theory

Introduction

La conservation-restauration en tant que discipline s'est développée d'abord par le traitement des arts visuels. Elle n'a donc longtemps été confrontée au mouvement qu'en tant qu'objet de représentation, et non en tant qu'action inhérente de l'œuvre. En corollaire, sa relation au temps est fondée sur une approche du temps long : intemporalité des valeurs artistiques, pérennité des moyens techniques de traitement de l'œuvre. Elle pense donc rarement la durée d'effectivité de ses traitements en termes de temps court et moyen, la maintenance des œuvres d'art relevant du champ de la conservation préventive et de la régie des œuvres, deux disciplines plus récentes.

La patrimonialisation plus récente d'autres champs de production humaine, par le biais de l'archéologie et de l'ethnologie, notamment, a amené d'autres types d'objets dans le périmètre de la discipline, mais les concepts théoriques en conservation-restauration n'ont pas changé fondamentalement cette approche, tout au moins en France. La discipline reste, en règle générale, tournée vers l'étude des matériaux et le traitement physique statique.

Pourtant, dans la pratique, l'émergence de nouveaux objets patrimoniaux a suscité de nombreux questionnements, liés aux besoins en conservation de ces objets. La question de leur préservation s'est d'abord développée dans deux univers parallèles : d'une part, celui de la conservation-restauration, expertise nouvelle, souvent opposée à une conception artisanale du travail, orientée vers les matériaux, qui s'est donc tournée davantage vers la conservation statique des objets ; d'autre part, celui des écomusées, des musées scientifiques et techniques, des amateurs de tel ou tel type d'objets, des artisans, focalisés sur la fonction initiale de l'objet et, par la même, sur son maintien en fonctionnement.

Chacun, dans son environnement choisi, porteur et *supporter* d'une culture matérielle spécifique, défendant son approche, dans le méandre des réglementations, codes éthiques et convictions personnelles, fait valoir sa compétence technique, sa compréhension et son respect de l'objet, pour proposer une vision bien souvent univoque de son traitement : Pour préserver ses matériaux, il faudrait l'arrêter, mais pour préserver sa fonction ou son sens, il faudrait qu'il fonctionne. Chacun est sommé de choisir son camp. Tant que le débat reste idéologique, peu de solutions, qu'elles soient simplement raisonnables, ou qu'elles tentent d'être innovantes, ont ici l'espace d'émerger.

En développant une vision transversale des objets dynamiques, qui partagent tous une même caractéristique : le mouvement, il est possible de dépayser son regard pour voir émerger de pistes de réflexions théoriques et pratiques afin d'envisager le traitement de ces objets, et redonner à leur conservation une approche dépassionnée, qui place la compréhension du mouvement au centre de la réflexion sur leur conservation.

Qu'est-ce qu'un objet dynamique ?

Le terme apparaît au Royaume-Uni, à partir de 2010. D'abord utilisé au sein d'un groupe réduit de professionnels, essentiellement horlogers de formation, il recouvre de fait des objets mécaniques de technologie proche : horloges, automates et instruments scientifiques. Cette notion regroupe donc des typologies de patrimoine assez similaires à la catégorie des « objets scientifiques et techniques » telle qu'elle est définie en France, ou en Suisse [1].

Le patrimoine industriel apparaît rapidement comme un champ important de la conservation des objets dynamiques. Transports et production industrielle sont les secteurs les plus évidents. Les collections rassemblées le sont d'abord par des collectionneurs ou d'anciens ouvriers, qui défendent la fonction initiale d'usage des objets. Dès que les collections rejoignent le secteur des musées labellisés, la question du maintien en état de marche devient un point critique. À l'étranger, l'émergence de manuels de conservation spécialisés et des conférences *Big Stuff* [2] à partir de 2004 marque l'importance prise par ces problématiques en conservation-restauration. Enfin, des parallèles intéressants se font progressivement jour avec d'autres domaines patrimoniaux, comme l'art moderne et contemporain, notamment pour l'art cinétique [3] (Figure 1), puis pour la conservation des *time-based media* [4], œuvres dont le sens ou la performance implique une mise en œuvre temporelle souvent basée sur des technologies à l'obsolescence rapide (lecteurs vidéo, écrans, logiciels, etc).



Figure 1. La Fontaine, Jean Tinguely, Bâle, © Rufus46 (licence Creative Commons Attribution)

En 2017, un réseau pour la conservation des objets dynamiques voit le jour au sein d'Icon, organisation professionnelle des conservateurs-restaurateurs au Royaume-Uni, éditrice d'*Icon Journal*. Le réseau, devenu un groupe à part entière en 2023, reste fondé par des conservateurs-restaurateurs d'horlogerie, discipline qui offre l'avantage d'être à la fois fondée sur une solide approche en mécanique des objets, mais pour des typologies de collections à la croisée des arts décoratifs, du patrimoine universitaire, des objets industriels. Le point focal se place sur les objets de moyenne dimension, plus courants dans les collections, parfois produits en plusieurs exemplaires, en série ou en masse, et dont la dimension dynamique reste bien souvent peu considérée. Des rencontres successives [5] vont permettre d'explorer des types d'objets nouveaux sous l'angle du mouvement, comme le livre ou les instruments de musique anciens, qui rencontrent des problématiques proches sur leur « jouabilité » [6, 7], ou les textiles, en particulier le costume [8].

Si les objets sont extrêmement variés, leur nature dynamique est un point commun. À travers des champs professionnels, des spécialités techniques, des lieux de conservation et des attentes différentes pour ces objets, des questions communes se dessinent.

Peut-on conserver le mouvement ?

Le mouvement d'un objet, sur le plan physique, se définit comme un déplacement, soit un changement par rapport à un référentiel géographique dans un rapport temporel. On peut le définir par différents paramètres, essentiellement sa trajectoire et sa vitesse. Il est également initié par l'application d'une force ou d'une somme de forces non nulle. En cela, le mouvement est avant tout relationnel, fruit de la connexion de l'objet avec ce qui l'entoure, selon les principes de la dynamique newtonienne.

Par cette nature relationnelle, le mouvement porté par l'objet dynamique est conçu et produit dans un contexte qui lui est propre. Une machine est élaborée pour des tâches spécifiques, mais également pour un environnement et un mode d'utilisation adapté. La manière dont un conservateur-restaurateur utilise un tour à métaux, de manière occasionnelle, pour produire ou traiter une pièce précise diffère de son usage en contexte industriel, qui demande une résistance à un usage soutenu, parfois pour réaliser un seul type de pièce, par exemple dans une usine automobile. Aux débuts de la machine-outil, la conception est faite en fonction des tâches à accomplir, pas dans l'optique de produire des machines identiques en série, utilisables à l'identique dans tous les secteurs. La production standardisée de machines-outils ne se développe largement qu'au XX^e siècle. L'adaptation de la machine à son contexte d'utilisation, et l'histoire dont elle porte les marques dans ses schémas d'usure, ses réparations, sont donc bien souvent constitutives de son identité en tant qu'objet patrimonial.

Au-delà de sa nature relationnelle, le mouvement se produit dans un univers physique, qui va lui résister, notamment par l'effet de la gravité, mais pas seulement. S'appliquant à un objet physique, soumis lui-même à la loi d'entropie, et donc à des matériaux qui vont changer avec le temps et perdre une partie de leurs qualités physiques, le mouvement va donc contribuer à la détérioration. Usure, maintenance, réparation installent un cycle qui est constitutif de l'objet dynamique : un vêtement va ainsi être nettoyé, repris, réparé par changement ou ajout de pièces. La reliure d'un livre va s'affaiblir, demander des recollages, finalement un travail sur sa couverture ou son dos. Une machine-outil va demander un nettoyage régulier, des démontages pour dégraissage, réparation et huilage, etc. L'ensemble des schémas d'usure, des réparations anciennes, des traces de maintenance vont donc aussi influencer sur le mouvement produit.

Pour les arts performatifs, comme la danse ou le théâtre, la reproductivité identique du mouvement n'est jamais attendue. La similarité d'intention, la perception dans le temps de rencontre avec le public sont acceptées sur le même plan que la subjectivité de l'artiste, dont on conçoit qu'il apporte à chaque interprétation des dimensions différentes. Seul l'enregistrement audiovisuel apporte un caractère de reproductivité à l'identique du mouvement. Pour l'objet patrimonial, la mise en fonctionnement relève également de la performance. Une machine industrielle en démonstration va produire un mouvement dépendant de son opérateur, dont les objectifs ne sont plus la production mais la démonstration. Il va donc l'actionner d'une manière différente de ce qu'un ouvrier aurait fait pour produire, il va être influencé, dans sa manière de rendre la machine plus ou moins visuelle, plus ou moins sonore, par la présence d'un public. En ce sens, il va produire un vécu nouveau de l'objet, à la manière d'un interprète. Comment doit-on considérer ces changements ? Influent-ils sur l'authenticité, les valeurs de l'objet ? Si oui, en positif ou en négatif ? Relèvent-ils forcément de la dégradation à corriger ? Ou est-ce négliger un point essentiel : l'objet est conçu pour bouger. Sa détérioration n'est pas que le fruit de l'entropie et d'agressions extérieures, il est générateur de ses propres dégradations. La gestion et le traitement de ses dégradations ne relèvent donc pas de la compensation du passage du temps et des hasards environnementaux. Elle est constitutive de l'objet, elle participe à sa ou ses significations.

Dans ce cas, que tente-t-on de conserver dans le mouvement d'un objet ? Tout comme pour un objet statique, on doit s'interroger sur ce que l'on tente de protéger, par la conservation préventive ou curative, ou de mettre en avant, par la restauration. Il ne s'agit pas seulement de conserver la mobilité ou « le » mouvement d'un objet donné, mais d'abord de comprendre quel(s) mouvement(s) l'anime, dans quelle temporalité, pour quels objectifs.

Analyse des valeurs et choix de conservation

Les valeurs d'un objet, patrimonial ou non, résident avant tout dans la reconnaissance sociale de son importance [9]. Qu'il soit encore perçu comme simple marchandise, ou qu'un attachement individuel ou collectif lui attribue des valeurs nouvelles, c'est sa dimension sociale qui détermine la considération qu'on lui porte, à une époque donnée. En ce sens, l'analyse des valeurs telles qu'elle est souvent pratiquée en conservation-restauration, comme une affaire d'experts, tend à sous-estimer la variété des intervenants impliqués dans les choix de conservation, au sens large. Certains domaines adoptent cependant déjà un point de vue plus large. Par exemple, en art contemporain, l'analyse des valeurs est plus souvent placée au cœur du projet de conservation [10] et formalise une approche fondée sur l'identification du contexte de l'opération et des parties prenantes du projet, sur la « performativité » des œuvres et le remplacement des éléments obsolètes ou défectueux que l'on retrouve également au premier plan des problèmes de conservation pour les *time-based media* [11].

La recherche de sens sociétal est également mise en avant, plus largement, depuis quelques années par des théoriciens de la conservation [12, 13], ou des ethnologues [14], qui prônent une meilleure prise en compte du public, des collectifs et des communautés dans l'analyse des valeurs, présumé d'un projet de conservation construit collectivement et non issu, au plus, d'une discussion entre le restaurateur et le conservateur. Cette approche, qui se veut nouvelle, de la conservation, axée sur les valeurs et usages actuels de l'objet, rappelle, de fait, celle déjà pratiquée sur le terrain dans les écomusées et les musées de sciences et techniques. Le paradoxe est que ces mêmes institutions, au fur et à mesure que leur statut évolue vers celui de musées plus classiques, s'éloignent sou-

vent de cette approche basée sur les valeurs collectives locales pour adopter le schéma plus professionnel du secteur de la conservation.

Cette ambiguïté sur la compréhension des valeurs d'un objet, selon les acteurs impliqués dans leur analyse, se retrouve dans les choix de traitement que l'on est parfois amené à construire. Deux exemples de traitement pour des horloges électromécaniques permettent de matérialiser ces débats.

Toutes deux conservées dans un musée situé à Londres, *The Clockworks* (<https://theclockworks.org/>), elles représentent deux marqueurs essentiels pour l'histoire de l'horlogerie électromécanique, thème majeur de la collection :

- Le régulateur d'Alexander Bain, n°117, v.1844-1852 (Figure 2), est un représentant du premier système breveté d'horloge électrique (1844). À ce titre, les rares horloges de Bain encore conservées (une quinzaine sont connues) sont considérées comme des pièces historiques importantes.

- L'horloge de précision de Leroy & Cie, n°1430, produite en 1930 (Figure 3), est l'une des rare conservées complète, des 64 exemplaires produits, sur commande, entre 1912 et 1957 [15].



Figure 2. Régulateur n°117, A.Bain, 1844-1852, *The Clockworks*, © F.Collanges



Figure 3. Horloge de précision, Leroy & Cie, 1930, *The Clockworks*, © F.Collanges

Valeurs patrimoniales et valeurs sociétales

Les deux objets traités, produits à moins d'un siècle l'un de l'autre, relèvent tous deux de l'histoire contemporaine, et pourraient être catégorisés comme objets techniques. En valeur historique, elles constituent des pièces majeures pour des raisons bien différentes :

- l'horloge de Bain est une version domestique, dans une boîte de qualité, d'un système inventé pour l'industrie ferroviaire. Conçue à la manière d'un télégraphe, elle est pionnière par son emploi de l'électricité mais aussi en ce qu'elle participe de l'émergence d'un temps normalisé à l'échelle d'un pays, pour accompagner le développement des trains. Elle est conçue pour être produite en série, sinon en masse, et elle est la première horloge en réseau.

Elle envoie en effet une impulsion à des cadrans secondaires, qui peuvent être placés dans différents lieux, et théoriquement, différentes villes.

-L'horloge Leroy & Cie appartient à un type d'objet apparu dès le XVI^e siècle, le garde-temps de précision adapté à l'observation astronomique. Produite à la pièce, par des artisans hautement qualifiés, sa production est soignée, à la manière d'un instrument scientifique.

Les valeurs patrimoniales de ces deux pièces sont donc évidentes : objets rares, marquant des étapes technologiques importantes pour l'histoire de l'horlogerie mais aussi pour l'histoire sociale et économique de l'époque contemporaine.

Cependant, l'horlogerie électromécanique reste un sujet assez méconnu du public. Les collections d'horlogerie spécialisées sont rares, peu médiatisées et surtout peu valorisées. Les deux horloges sont présentées au public mais dans le cadre d'un lieu ouvert sur rendez-vous ou lors d'évènements annuels. Le lieu d'exposition repose sur l'initiative personnelle d'un collectionneur qui a pérennisé son action par la création d'un trust indépendant et répond à l'intérêt de publics plutôt spécialisés bien que les évènements annuels rassemblent désormais un large public non spécialiste. Le lieu abrite un atelier de restauration, et le présumé initial à sa création est que les pièces de la collection devaient fonctionner pour exprimer toutes leur(s) valeur(s).

Valeurs matérielles et immatérielles : la place du fonctionnement

Les objets dynamiques demandent des compétences particulières pour assurer leur fonctionnement et leur maintenance au quotidien. Ces savoirs et savoir-faires, lorsqu'ils concernent du patrimoine scientifique et technique constituent l'une des dimensions immatérielles associée à l'objet. Leur non-transmission et le refus de leur prise en compte dans l'étude du projet de conservation peut donc constituer une perte de valeurs, qui peut être lourde de conséquence.

Dans le cas des horloges du *Clockworks*, l'atelier a été conçu pour encourager de jeunes horlogers à pratiquer la restauration de pièces électromécaniques en ayant à disposition une collection majeure mais aussi en encourageant la communauté des amateurs de cette technologie à venir discuter, étudier, travailler sur ces œuvres. Pour tout un pan de la collection, qui présente la production anglaise du XX^e siècle dans ce domaine, l'atelier fait régulièrement appel à l'expertise de collègues horlogers mais aussi d'amateurs, dont certains ont été, durant leur vie professionnelle, chargés d'installer ou de maintenir ces horloges. Une réelle transmission de savoirs-faires est donc à l'œuvre par le biais du *Clockworks*, où de la documentation historique sur les modèles est aussi proposée à la consultation.

Se pose alors la question de ce qu'est l'objet conservé : un objet avant tout, ou l'ensemble signifiant qu'il forme avec sa documentation qui peut inclure d'autres objets sous forme de modèles, copies, scan, etc., et aussi les pratiques qui le concerne (démonstration, usage, prêt, etc.). Pour l'horloge Leroy, les choix de conservation ont impliqué de longues recherches documentaires, discussions avec des spécialistes et des entreprises horlogères contemporaines qui ont permis de retrouver mais aussi de compléter ces valeurs immatérielles d'une documentation technique qui ne devrait pas être dissociée de l'objet.

L'objet forme aussi un ensemble avec d'autres appareils. Le régulateur dans son caisson sous vide est accompagné d'un panneau de contrôle du voltage et de trois autres éléments tous plus ou moins détériorés. Le baromètre, par

exemple, avait été vidé de son mercure durant le transport. Une fois l'étanchéité d'un tel objet compromis, le remettre en état devient problématique. Quant à l'horloge elle-même, bien que destinée à l'observation de précision, elle fut commandée par un particulier et l'usage précis qu'il faisait de l'ensemble qu'il avait acheté reste inconnu. Le choix de faire fonctionner un tel objet pose donc la question de ce que l'on souhaite effectivement montrer. La galerie présentant également un exemple de chaque autre dispositif électromécanique inventé pour l'horlogerie de précision (Riffler, Hipp, Synchronome, etc), le fonctionnement d'un système Leroy pouvait paraître indispensable. Dans le cas du régulateur de Bain, plus ancien, cet aspect de transmission des savoirs était encore plus complexe. L'objet montrait la trace de très nombreuses modifications et altérations. Objet rapidement obsolète dans son siècle, son sauvetage et sa remise en fonctionnement a surtout relevé de la volonté de collectionneurs, remettant l'objet en fonctionnement par leurs propres moyens ou en faisant appel à un horloger. Son histoire matérielle révélait donc plus du goût de collectionner un objet symboliquement fort, et ses traitements précédents avaient ainsi simplifiés le circuit électrique tout en assurant que l'aspect visuel corresponde aux attentes du propriétaire : un balancier mobile avec un contact glissant visible au centre de la boîte. Placé dans une galerie rassemblant des objets représentatifs d'une histoire technologique, son aspect visuel mais aussi sa présence sonore (bruit classique d'un mécanisme en laiton et acier, mais accompagné d'un frottement due au contact électrique) permettent cependant de matérialiser la révolution technologique opérée par l'électromagnétisme.

Valeurs immatérielles, maintenance et expertises professionnelles

La sauvegarde d'objets en fonctionnement demande une approche des objets au quotidien. Elle demande au moins des opérateurs compétents et capables de détecter les signes annonciateurs de panne ou de danger. Ces compétences sont rarement attendues du conservateur-restaurateur, d'une part parce que peu d'entre eux sont spécialisés en mécanique, d'autre part parce qu'ils sont rarement en poste pérenne dans des institutions, avec mission de maintenance quotidienne des collections. Les spécialistes en conservation-restauration sont donc parfois prescripteurs de la maintenance mais rarement missionnés pour la mener eux-mêmes. Les artisans et maîtres d'art, en revanche, sont reconnus compétents, pour certains domaines, comme l'horlogerie ou la lutherie, dans le cadre de prestations de suivi et maintenance qu'ils mènent directement, dans la mesure où la législation sur les habilitations l'autorise. Pour le patrimoine scientifique et technique, les profils professionnels comprennent un corps de métier supplémentaire : ingénieurs ou techniciens sont nécessaires, mais rarement reconnus en tant que professionnels de la conservation, malgré quelques tentatives de reconnaissance des compétences à l'œuvre dans des équipes techniques d'écomusées, par exemple, qu'elles soient constituées de salariés ou de volontaires [16].

Pour les deux objets du *Clockworks*, ces questions pourraient passer pour secondaires, la présence d'un atelier interne à l'établissement pouvant garantir ce suivi quotidien. Pour le régulateur de Bain, la simplicité du fonctionnement mécanique et électrique après restauration permettait d'envisager ce suivi sans difficulté. Pour la Leroy, en revanche, comme pour les autres horloges astronomiques conservées, la question de la maintenance reste un point plus difficile. Leur démontage est complexe et comporte des risques d'endommagement importants. Ces horloges n'ont pas été conçues pour être maintenues par des horlogers de formation classique, ou des conservateurs-restaurateurs polyvalents, mais par du personnel d'observatoire formé. Leur suivi dans le temps, l'observation et la documentation de leur fonctionnement et de leurs dysfonctionnements sont les clés d'une maintenance efficace.

Pour d'autres horloges de précision de la collection, un ingénieur-restaurateur, porteur d'une spécialisation dans ce domaine et venant régulièrement vérifier les horloges, a permis d'envisager un maintien en fonctionnement constant. Pour la Leroy, de conception fondamentalement différente, un tel processus était difficile. Le risque couru par certaines pièces du mécanisme en cas de dysfonctionnement non repéré était plus grand. L'objet est donc présenté à l'arrêt mais « en état de marche » : sous réserve d'un contrôle d'un état des huiles, l'horloge peut être mise en fonctionnement pour des motifs de démonstration. Mais sa conservation à plus long terme, dans le contexte du musée, se fait à l'arrêt.

La différence de traitement avec les autres horloges astronomiques de la collection repose bien sur le constat d'une fragilité mécanique particulière. Elle ne contredit pas le choix fait pour d'autres pièces de la collection, d'importance similaire, mais pour lesquelles la reconnaissance de la compétence spécifique d'un restaurateur précis, susceptible de vérifier l'usure régulièrement, permet la mise en place d'un suivi du fonctionnement différent. La question de la perte de certaines compétences techniques, de la capacité à réaliser certains gestes, doit donc rester au cœur des choix de conservation de ces objets.

La maintenance fait partie du vécu de l'objet, elle ajoute ou retranche à ses valeurs. Quel que soit le domaine technique concerné, conservation-restauration incluse, l'importance du geste technique [17] et des compétences manuelles sont au centre des préoccupations [18]. Si le geste technique est objet d'étude, dans le domaine de l'ethnologie, par exemple, il doit comprendre tout autant le geste de l'artisan, de l'ouvrier que du restaurateur, car ils participent tous trois à la « biographie de l'objet » [9] tout autant qu'ils manifestent la transcription physique d'une pensée technique [19], qui a une évolution historique.

En ce sens, le fait de ne pas comprendre le but ou de désapprouver la mise en œuvre de réparations anciennes ne devrait pas constituer une justification en soi pour leur retrait. Certaines réparations anciennes peuvent être préjudiciables à la conservation à plus long terme de l'objet, elles peuvent être inesthétiques mais elles peuvent aussi permettre un mode de fonctionnement qui contribue à matérialiser certaines valeurs de l'objet. Ainsi l'analyse de valeurs ne doit pas être, en fin de compte, un jugement de valeurs, qui manifesterait avant tout le cadre culturel de la personne menant l'analyse. Elle doit au moins s'accompagner d'une solide réflexion sur le positionnement de l'auteur ou du groupe en charge de l'élaboration du projet [20, 21].

Valeurs, fonctions et choix de conservation

La spécificité du conservateur-restaurateur se place en définitive dans son expertise sur la fonction patrimoniale de l'objet. Alors que l'horloger maître d'art est un spécialiste de la fonction initiale de l'objet (objet d'indication horaire), l'ingénieur de ses fonctions technologiques (métrologie), le conservateur-restaurateur peut tenter de proposer une vision inclusive de ces différentes fonctions, dans le cadre d'une protection à long terme. Il doit être capable de créer et documenter ses processus techniques de traitement, d'avoir une approche « académique », informée à la fois en sciences de l'ingénierie et en sciences humaines, tout en restant ancrée dans de son travail de praticien [22]. Selon les valeurs analysées et comprises lors de l'élaboration du projet de conservation, il peut proposer des choix qui mettent en avant certaines valeurs et certaines fonctions, sans pour autant interdire de futurs traitements qui reflèteront d'autres visions de l'objet.

Pour le régulateur de Bain, le choix de traitement a privilégié de retrouver un fonctionnement plus proche du fonctionnement original. Le circuit électrique, bien qu'invisible pour le spectateur, a été rétabli, car il permettait de re-

trouver un fonctionnement tel qu'il avait été inventé par Bain. Cela a impliqué la fabrication de nouvelles pièces, et le retrait d'éléments restaurés précédemment qui peuvent être montrés lors des visites pour expliquer le fonctionnement du régulateur et l'histoire de ses réparations. Pour l'horloge Leroy & Cie, en revanche, le choix a porté sur l'installation de l'ensemble des composantes conservées. Elle a cependant été traitée de manière à pouvoir être mise en mouvement, sous certaines conditions. Ces choix ont été le fruit de discussions avec les personnes en charge avec la gestion de l'objet, de collègues horlogers, de conservateurs, etc. Ils correspondent aux objectifs d'exposition de la collection à l'heure actuelle, mais n'empêchent pas d'envisager des alternatives dans le futur, notamment si une expertise se développe en interne pour le suivi de fonctionnement continu de ces objets.

« Cycles de vie » et analyse des risques pour les objets dynamiques

Cette approche se retrouve également dans la définition de la conservation mise en œuvre par le *National Trust*, fondée sur « la gestion attentive du changement » [23]. La notion de changement met l'accent sur un élément essentiel et pourtant manquant dans les définitions courantes de la conservation-restauration : le cadre temporel. La conservation se préoccupe d'une évolution physique dans le temps. Mais le temps a d'autres impacts sur les objets, en particulier dynamiques. Le sens de tout objet évolue : ses fonctions, sa biographie, son importance, etc. changent. L'analyse des valeurs que l'on peut mener pour un projet de conservation est donc elle aussi menée dans un contexte mouvant. Nous perdons des connaissances, nous en gagnons aussi d'autres. Nos prédécesseurs ont fait des choix informés selon leurs connaissances, leurs aptitudes ; nos successeurs feront de même, mais nous ne raisonnons pas sur les mêmes données, dans le même contexte culturel.

Replacer la conservation des objets dynamiques, qui accélèrent par leur fonctionnement même leur propre usure, dans un cadre d'analyse lui-même dynamique est donc essentiel. Les fonctions et les valeurs de l'objet changent au cours de son histoire. Sa matérialité, son fonctionnement mais aussi tous les gestes qui mettent en œuvre ce fonctionnement, sa maintenance, sa réparation et sa conservation, participent de son cycle de vie (Figure 4). Le fait qu'un objet fonctionne aujourd'hui, soit arrêté demain, puis remis en marche des années plus tard est aussi une réalité. Une période d'arrêt, faute de compétences pour le faire fonctionner, ou par choix patrimonial, peut signifier sa « fin de vie » tout comme son sauvetage. La perte de l'intérêt qu'il suscitait par son fonctionnement peut le condamner à la destruction, tout autant que lui permettre de passer une période au-delà de laquelle les compétences pour l'opérer seront à nouveau présentes.



Figure 4. *Cleaning the clock*, anonyme irlandais, v.1880, coll. David Boles, Waterford Irish Museum of Time.

L'analyse des risques, assise sur une compréhension du ou des « cycles de vie » de l'objet, peut aider à construire cette vision dynamique, pour peu qu'elle soit prise en toute conscience dans sa dimension temporelle : le risque est une potentialité, pas une cause effective. Son analyse peut donc permettre de révéler des scénarios futurs, d'articuler valeurs et contexte, de dynamiser l'approche de la détérioration. Elle s'articule avec l'idée de gérer le changement : l'objet dynamique demande de comprendre les mécanismes d'usure et de rupture dans un environnement donné pour un mode de fonctionnement donné. Il demande aussi une vision informée des objectifs et des règles éthiques à poser pour ce type d'objets.

Les méthodologies d'analyse des risques utilisées en conservation à l'heure actuelle sont très peu adaptées aux objets dynamiques. Élaborées pour la conservation préventive de collections, elles commencent tout juste à se développer pour l'analyse d'objets individuels complexes [24]. La difficulté de mettre en œuvre ce type d'approche pour les objets dynamiques est donc réelle. Qu'il s'agisse de comprendre un objet électromécanique [25], de documenter une œuvre d'art contemporain [3] ou d'identifier des moyens d'évaluer l'état d'un moteur [26] beaucoup reste à faire pour commencer à élaborer des protocoles d'analyses qui puisse être partagés et employés dans le cadre d'une analyse globale, nécessaire pour fonder des choix de conservation, dont la relativité doit être perçue et comprise.

L'approche du mouvement dans le champ de la conservation-restauration, par le biais d'une large catégorisation d'artefacts rassemblés sous le titre d'objets dynamiques fait émerger de nombreux points communs dans leurs besoins de conservation : fondée sur une compréhension plus large de leurs valeurs et de leurs fonctions, des parties prenantes de leur préservation, de leur évolution temporelle, leur conservation se doit d'être elle-même dynamique et ouverte. Pour les objets de série, appartenant à un patrimoine récent, l'élaboration d'outils d'analyses spécifiques à leur maintenance et leur restauration n'en est qu'à ses débuts. Cependant, le cadre conceptuel est aussi important à poser que les connaissances techniques à développer. Sans lui, nous continuerons à envisager la conservation du mouvement dans les objets dans un cadre inadapté, privilégiant le matériau sur la compréhension de l'objet dans son contexte, mettant en œuvre des modes de gestion, des projets de conservation ou de restauration parfois dangereux pour sa survie. C'est peut-être un des risques les plus inquiétants pour des collections encore trop souvent mésestimées.

Remerciements

Je tiens à remercier mon directeur de recherche, Thierry Sarmant, conservateur général aux Archives Nationales, ainsi que mes collègues conservateurs-restaurateurs du Dynamic Objects Group (Icon), en particulier Matthew Read, pour nos conversations stimulantes.

Références

- [1] l'école ARC de Neuchâtel, par exemple, utilise l'expression « objets scientifiques, techniques et horlogers » comme descriptif de spécialité dans son programme de conservation-restauration
- [2] Un exemple de manuel pour les collections de transport, par l'association britannique des musées du transport et de l'ingénierie, <https://abtemguidelines.org.wordpress.com/page/> (consulté le 11/09/2024); <https://bigstuffheritage.org/> présente l'ensemble des conférences et les communications présentées depuis cette date

- [3] Bek R., Conserving Junk and Movement: Machines by Jean Tinguely, *Studies in Conservation*, **49** (2) (2004) 44-48, DOI: 10.1179/sic.2004.49.s2.010; in *Keep it moving? : conserving kinetic art : proceedings from the meeting organized by the Getty Conservation Institute, the ICOM-CC Modern Materials and Contemporary Art Working Group, and Museo del Novecento*, (2018), Rachel Rivenc et Reinhard Bek, editors, J.Paul Getty Trust
- [4] <https://www.guggenheim.org/conservation/time-based-media> (consulté le 10/09/2024)
- [5] <https://www.youtube.com/playlist?list=PLbo-IRzNca56eloglwoibLlcuiZrEhOpp> (consulté le 30/08/2024)
- [6] Howard K., Musical instruments as tangible cultural heritage and as/for intangible cultural heritage, *International Journal of Cultural Property* **29** (1), (2022) p.23–44. DOI : 10.1017/S0940739121000436
- [7] *Conservation-restauration des biens culturels – dossier Instruments de musique*, **40** (2023)
- [8] Kim K., Conserving Performance, Performing Conservation: Kim Kardashian x Marilyn Monroe, *Studies in Conservation* **69** (6) (2023) p.369–387. <https://doi.org/10.1080/00393630.2023.2260628>
- [9] Bonnot T., La biographie d’objets : Une proposition de synthèse, *Culture & Musées* **25** (2015) p.27-35, DOI : <https://doi.org/10.4000/culturemusees.p.543>
- [10] Giebeler J., Sartorius A., Heydenreich Gunnar et Fischer Andreas, A Revised Model for Decision-Making in Contemporary Art Conservation and Presentation, *Journal of the American Institute for Conservation* **60** (2-3) (2021) p.225-235, DOI: 10.1080/01971360.2020.1858619
- [11] Engel Deena, Phillips Joanna (ed.), *Conservation of Time-Based Media Art* (2023), Routledge
- [12] Sweetnam E., Henderson J., Disruptive Conservation: Challenging Conservation Orthodoxy, *Studies in Conservation* **67** (2021) p.63-71, DOI: 10.1080/00393630.2021.1947073
- [13] Muñoz-Viñas S., Contemporary theory of conservation, *Reviews in Conservation* **3** (2002) p.25-34
- [14] Tornatore J.-L., Pour une anthropologie pragmatiste et plébéienne du patrimoine : un scénario contre-hégémonique, *In Situ* **1** (2019), DOI : <https://doi.org/10.4000/insituarss.449>.
- [15] *L’atelier parisien de L. Leroy et Cie, par P. Rudolf et G. Régnier dans Horlogerie ancienne*, **30** (1991), 135-140
- [16] Wain A., Stein, Jesse A., Cleghorn M., “Rare and vital”: positive terminology, contemporary relevance and robust teaching options for heritage maker trades, *Conservar Património* **44** (2023) p.132–142, DOI: <https://doi.org/10.14568/cp31208>
- [17] Mille M., Petit J., La vie du geste technique. Approche pluridisciplinaire, *e-Phaistos III-1* (2014) p.43-58, DOI : <https://doi.org/10.4000/ephaistos.573>
- [18] Ashley-Smith J., Losing the edge: the risk of a decline in practical conservation skills, *Journal of the Institute of Conservation* **39** (2) (2016) p.119-132, DOI: 10.1080/19455224.2016.1210015
- [19] Garçon A.-F., *L’imaginaire et la pensée technique, une approche historique XVIe-XXe siècle*, (2012), Classiques Garnier
- [20] Wei W., Authenticity and Originality, Objectivity and Subjectivity in Conservation Decision-making – or is it Just a Matter of Taste? *Studies in Conservation* **67** (2022) p.15-20, DOI: 10.1080/00393630.2021.1940796
- [21] Coleman Neil T., Wight H., External values and support for ethical decision-making in conservation, *Journal of the Institute of Conservation* **44** (3) (2021) p.158-169, DOI: 10.1080/19455224.2021.1969258
- [22] Wain A., The importance of Movement and Operation as Preventive Conservation Strategies for Heritage Machinery, *Journal of the American Institute for Conservation* **56** (2) (2017) p.81-95, DOI: 10.1080/01971360.2017.1326238

[23] « ...the careful management of change », Stanisforth Sarah, Conservation: principles, practice and ethics, *The National Trust Manual of Housekeeping, care and conservation of collections in historic houses*, (2011), The National Trust, 35

[24] Debulpaep M., Otten E., Watteeuw L., Art Technical Research and Preservation of Historical Mixed-Media Ensembles: 'Enclosed Gardens, Final Report, *Bruxelles : Belgian Science Policy Office* (2023) https://www.belspo.be/belspo/brain-be/projects/FinalReports/ARTGARDEN_FinRep.pdf (consulté le 10/09/2024)

Outil final en ligne: <https://agato.kikirpa.be/> (consulté le 10/09/2024)

[25] Collanges Françoise, Conservation of an Early Electric Master Clock: Making a Copy as a Conservation Tool, *CeROArt* 4 (2014) DOI: <https://doi.org/10.4000/ceroart.3914>

[26] Chalançon B., Roda-Buch Al., Cornet E., Rapp G., Weisser T., Brambilla L., Acoustic Emission Monitoring as a Non-invasive Tool to Assist the Conservator in the Reactivation and Maintenance of Historical Vehicle, Engines, *Studies in Conservation* 69 (2) (2023) p.102-112, DOI: 10.1080/00393630.2023.2183808

Session 3

Objets métalliques en danger

LES DERNIERS JOURS DU COFFRE AUX BACCHANTES.

DEPLOIEMENT SIMULTANE D'UNE ETUDE TECHNOLOGIQUE ET DE TRAVAUX DE CONSERVATION-RESTAURATION POUR LA COMPREHENSION D'UN OBJET UNIQUE EN PERIL : UNE RARE PIECE DE MOBILIER D'EPOQUE ROMAINE (III^e S.), RETROUVEE SUR LE SITE ARCHEOLOGIQUE DE RIRHA (MAROC).

Marine Crouzet*, Elsa Rocca, Mohamed Kbiri Alaoui, Charlotte Carrato, Marine Bayle

A-CORROS

 mcrouzet@a-corros.fr

* Autrice correspondante

Résumé

En 2011, une équipe d'archéologues maroco-française fouille une maison romaine et retrouve sous une couche de terre rougie par le feu un ensemble métallique décoré de plusieurs bustes en relief. C'est dans un contexte d'incendie ayant entraîné l'effondrement de l'étage d'une domus que cet objet a été abandonné à Rirha au III^e siècle. À sa découverte, l'objet est déformé, multifragmenté et très corrodé : il est en péril. Une fouille fine serait nécessaire mais la campagne de fouille touche à sa fin. Dans cette situation tendue, la zone est donc immédiatement prélevée en motte pour garder en connexion l'essentiel des fragments. Une première étude est menée ainsi que des interventions d'urgence de mise en sécurité pour une conservation en caisse dans les réserves de l'INSAP. L'objet est une paroi de coffre-fort.

Dix ans plus tard, la même équipe a trouvé les moyens de financer la restauration de cette pièce exceptionnelle. Toutefois, avant toute intervention et compte-tenu de la fragilité extrême de cet objet, de surcroit complexe, une étude préalable technologique et matérielle est engagée.

La paroi de coffre est composée d'une tôle en alliage cuivreux décorée de médaillons figurant des personnages féminins coiffés et portant des attributs : il s'agit de figures de bacchantes. Les éléments prélevés comportent aussi des tiges en alliage ferreux et des restes de bois carbonisés et minéralisés laissant envisager un système de serrurerie. Une approche non destructive par cartographie a été réalisée à différents niveaux : des relevés visuel et graphique, mais aussi radiographique, physico-chimiques et enfin numérique ont ainsi permis de mettre en lumière une complexité technologique particulière de décors et d'huissierie et de comprendre les événements à l'origine de la destruction du coffre ainsi que les phénomènes de corrosion en jeu dans ces processus de dégradation. Sur la base de ces données cartographiques, les fragments ont ensuite été soigneusement nettoyés et remontés permettant de retrouver une lisibilité proche de l'aspect d'origine. Nourri par des recherches typologiques complé-

mentaires, un travail précis de soclage a abouti à une présentation fidèle appuyée sur les hypothèses d'usage de cette remarquable pièce de mobilier découverte dans une domus romaine de Rirha.

Mots clés

Coffre, bronze, Maroc, restauration, soclage

Abstract

In 2011, a Moroccan French team of archaeologists excavated a Roman house and found, under a layer of earth reddened by fire, a metal ensemble decorated with several busts in relief. The object was abandoned in Rirha in the 3rd century after a fire had caused the collapse of the upper floor of a *domus*. When it was discovered, the object was deformed, multi-fragmented, and highly corroded: it was in peril. A detailed excavation was necessary, but the campaign was drawing to a close. In this tense situation, the area was immediately block-lifted to keep most of the fragments connected. An initial study was carried out, as well as emergency work to secure the object for storage in a crate in the INSAP storerooms. The object is the wall of a safe.

Ten years later, the same team found the means to finance the conservation of this exceptional piece. However, before any intervention and given the extreme fragility of this complex object, a preliminary technological and material study was undertaken.

The wall of a safe is made of copper-alloy sheet metal decorated with medallions featuring female figures wearing headdresses and attributes: these are Bacchante figures. The lifted finds also include ferrous alloy rods and charred and mineralized wood remains, suggesting a lock system. An approach using non-destructive mapping was carried out at various levels: visual and graphic, as well as radiographic, physicochemical, and, finally, digital surveys were used to highlight the particular technological complexity of the decoration and frame as well as to understand the events that led to the destruction of the safe, and the corrosion phenomena involved in these degradation processes. Based on these cartographic data, the fragments were then carefully cleaned and reassembled, restoring legibility close to the original appearance. Further typological research was also carried out, resulting in a faithful presentation, based on the hypotheses of its use, of this remarkable piece of furniture discovered in a Roman *domus* in Rirha.

Keywords

Chest, bronze, Morocco, restoration, pedestal

« *Le coffre aux bacchantes de Rirha en cours de restauration et encore en cours d'étude par l'équipe, sa publication est reportée à une date ultérieure.* »

BOIS ET PLOMB : LA LIAISON DANGEREUSE

Loretta Rossetti, Souhela Krabis, Charlène Pelé-Meziani*, Elodie Guilminot

Laboratoire Arc'Antique, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique

 charlene.pele-meziani@loire-atlantique.fr

* Atrice correspondante

Résumé

Les solutions de stockage d'objets patrimoniaux lourds et volumineux diffèrent selon les capacités financières des responsables des collections et les types de conditionnements adaptés disponibles sur le marché. Dans certains cas, on privilégie la fabrication de caisses en bois, matière pouvant présenter un risque pour certains matériaux sensibles aux composés émanant du bois. Comme le plomb est sensible aux vapeurs d'acides organiques, leur présence entraîne la transformation du plomb en acétate / carbonate de plomb. Cette corrosion peut entraîner une perte de la tenue mécanique partielle voire totale. Afin de prévenir ce risque, une étude préliminaire avait été menée en 2014 pour sélectionner le bois adapté à la fabrication de caisses de stockage. Ces premiers tests réalisés sur 2 mois à température ambiante et à ~100% d'humidité relative avaient permis d'identifier le panneau en bois OSB 3 comme le moins impactant. Des caisses ont donc été fabriquées avec l'OSB 3 afin de conserver des objets en plomb archéologiques, en incluant sur les côtés des grilles d'aération pour assurer une circulation d'air. Un coupon en plomb témoin avait aussi été placé dans chaque caisse afin de contrôler son évolution pendant le stockage. Au bout de deux ans et demi, les coupons témoins ont légèrement évolué nous poussant à approfondir l'étude. Il existe en fait plusieurs panneaux en bois OSB de type 1, 2 et 3, qui peuvent être recouverts d'une protection appelée bouche-pores, jouant le rôle de barrière physique aux COVs. Les tests, présentés dans cet article, ont été réalisés suivant deux protocoles : une mise en pot Parfait® qui a pour objectif d'observer l'influence des COVs sur le plomb en temps réel (sur 1 an) à température ambiante et un vieillissement selon les conditions du test Oddy. Pour le suivi de ces tests, des analyses colorimétriques ont été réalisées sur la surface des coupons en plomb. Les résultats avec un vieillissement se rapprochant de conditions réelles et ceux obtenus avec un vieillissement accéléré ont été comparés et ont montré des différences quant à la réactivité des OSB avec et sans bouche-pores sur le plomb. Cela interroge sur l'interprétation de ces tests et les limites des protocoles de vieillissement. Le test Oddy ne semble pas adapté dès lors que des multi-matériaux sont à tester.

Mots clés

Plomb, Conservation Préventive, Bois, Composés Organiques Volatils, Test Oddy

Abstract

The storage of heavy and bulky heritage objects has been solved in various ways, depending on the financial capabilities of those in charge of the collections and the types of suitable conditioning solutions available on the market. In some cases, custom-made wooden crates have been preferred. This can be risky for certain materials which are sensitive to chemical compounds emanating from the wood. Lead is sensitive to organic acid vapors. Their presence transforms it into lead acetate/carbonate. Corrosion can lead to partial or total loss of the mechanical strength of the object. To prevent this risk, a preliminary study was carried out in 2014 to select the wood best suited for the manufacture of storage crates. These initial tests, carried out over 2 months at room temperature and ~100% relative humidity, identified the OSB 3 wood panel as having the least impact. Crates were therefore made from OSB 3 to store archaeological lead objects with ventilation grids on the sides to ensure air circulation. A sample lead coupon was also placed in each crate to monitor its evolution during storage. After two and a half years, the control coupons changed slightly, prompting us to investigate further. There are several OSB wood panels, types 1, 2, and 3, which can be coated with a filler, acting as a physical barrier to Volatile Organic Compounds (VOCs). The tests presented in this paper were carried out according to two protocols: one putting lead coupons in sealed Parfait® pots, to observe the influence of VOCs on lead in real-time (over 1 year) at room temperature, and the other following the ageing conditions set out by the Oddy test. To follow up these tests, colorimetric analyses were carried out on the surface of the coupons. The results of the ageing process close to real conditions and those of accelerated ageing were compared, showing differences in the reactivity of OSBs with and without fillers on the lead. This raises questions about the interpretation of these tests and the limitations of ageing protocols. The Oddy test does not appear to be suitable for multi-material testing.

Keywords

Lead, Preventive Conservation, Wood, Volatile Organic Compounds, Oddy Test

Introduction

Le plomb est considéré comme un métal très stable qui évolue peu grâce à la formation de sa couche passive. Pourtant certains polluants peuvent provoquer son altération [1-3]. La modification de sa structure chimique entraîne alors la fragilisation de la tenue mécanique de l'objet. Le bois est un des matériaux pouvant en être la cause, car source de différents composés organiques volatils (acide acétique, formique, formaldéhydes) issus de l'hydrolyse de la cellulose et de l'hémicellulose [4-6]. En milieu humide, ces composés réagissent avec le plomb et entraînent une transformation de la couche protectrice du plomb (PbO) en acétate et carbonate de plomb. Ce phénomène de corrosion cyclique entraîne la formation de couches de corrosion sous forme de composés très friables et volumineux entraînant la destruction quasi complète du métal [7-14]. Il est donc important de limiter le contact des objets en plomb avec le bois. Dans le domaine patrimonial, le bois est présent dans l'aménagement des vitrines, des caisses de stockage ou encore en support d'objets. Peu coûteux, facilement modifiable, c'est l'un des matériaux les plus abordables. En 2019, lors de la restauration de plusieurs conduites en plomb au laboratoire Arc'Antique, des caisses de stockage en bois ont été conçues. Des tests préalables avaient été réalisés en 2014 afin d'évaluer l'impact de 4 essences de bois (panneau OSB 3, peuplier, panneau aggloméré hydrofugé, sapin) sur le plomb en milieu humide et à température ambiante. Pour ce faire, quatre coupons de plomb avaient été suspendus individuellement dans quatre enceintes hermétiques avec une fiole d'eau afin d'assurer 100% d'humidité relative. À l'intérieur,

des copeaux de chaque essence de bois avaient été disposés. Les observations après deux mois avaient permis de sélectionner l'OSB 3 comme l'une des essences n'ayant pas entraîné de corrosion significative sur le plomb. Cette essence a ainsi été utilisée pour la fabrication des caisses de stockage. Des bouches d'aération avaient aussi été aménagées sur le côté afin d'assurer une circulation minimale de l'air et ainsi réduire, le cas échéant, les concentrations de vapeurs organiques volatiles [8]. Un coupon de plomb témoin avait été placé dans chacune des caisses afin d'observer leur évolution. Un an après, ce coupon de Pb présentait des efflorescences blanches, légèrement poudreuses indiquant que l'environnement était potentiellement pollué au COVs. Il a alors été décidé de mener une étude complémentaire afin d'optimiser le choix de l'essence de bois et plus spécifiquement centrée sur le type d'OSB (Figure 1).



Figure 1. Photographies des caisses en bois (OSB 3) de stockage. ©C. Colonnier, Arc'Antique – Grand Patrimoine de Loire-Atlantique

L'OSB, Oriented Strand Board, ou panneau de lamelles orientées, est un matériau composite composé principalement de bois (pin, épicéa ou feuillus) à hauteur de 95%, et de 5% de résine synthétique [15]. Les OSB provenant de France sont composés d'un mélange 50/50 de bois feuillus, tels que le chêne et le châtaignier, et de bois non feuillus (essences non précisées par le fabricant). Les lamelles de bois sont comprimées et collées en couches successives à l'aide d'une résine synthétique et d'une cire. Aucune bibliographie ne précise ni la composition ni la proportion de résine/colle par rapport au bois [16]. Il existe plusieurs types de bois OBS, classés de 1 à 4. L'OSB 1 et 2 sont des panneaux destinés à une utilisation pour de l'aménagement intérieur (fabrication de meubles pour l'OSB 1 et de plancher ou parois murales pour l'OSB 2). La différence entre les deux réside sur le fait que l'OSB 1 est un panneau non structuré contrairement à l'OSB 2. Tous deux sont considérés de qualité tant qu'ils ne sont pas exposés à l'humidité. L'OSB 3 est conçu pour résister à l'humidité grâce à sa formulation comprenant une résine polyuré-

thane de diphenylmethane diisocyanate (PMDI) (D'après la fiche INRS, le produit est susceptible de provoquer le cancer. Sa dégradation peut attaquer certains types de plastique et de caoutchouc ainsi que certains métaux comme le cuivre et le zinc) [17], des agents hydrofuges et une émulsion de paraffine. Il est idéal pour la construction d'étagères, de cloisons et de divers meubles dans des pièces telles que les salles de bains. Cependant, bien qu'il soit résistant à l'humidité, il ne doit pas être exposé directement aux intempéries, sous peine de se détériorer en mettant en danger la sécurité de la construction. Le composé diphenylmethane diisocyanate peut s'hydrolyser au contact de l'eau avec formation de polyurées et de dioxyde de carbone gazeux. Il est donc généralement stocké et transporté sous atmosphère sèche (air ou azote). L'OSB 4 est un des bois mis sur le marché récemment et offre un meilleur pouvoir isolant et une meilleure résistance mécanique que les autres OSB. Contrairement aux autres références, cet OSB ne présenterait pas de formaldéhydes. Pourtant, il n'a pas pu être testé dans cette étude au regard de la difficulté d'approvisionnement. Ainsi, ce sont les bois OSB 1, 2 et 3 qui ont été sélectionnés pour cette étude. Pour limiter les émanations de COVs, l'application d'un primaire appelé « bouche-pores » dont l'intérêt est de pénétrer dans les pores du bois et de se lier fortement à la matrice venant ainsi venir solidifier sa surface. C'est un matériau inorganique (de type silicates) qui ne dégage ni COV, ni solvant, ni odeur. Peu de bibliographie est disponible sur ce composé, et les données industrielles restent succinctes au regard de l'enjeu commercial. Toutefois, le bouche-pores est utilisé dans plusieurs domaines d'application pour sa capacité à réduire l'absorption d'eau et à apporter une meilleure résistance chimique [18-20]. Il est conçu sur la technologie des silicates, se caractérisant par la présence de silicium et d'oxygène dont la structure cristalline forme un tétraèdre $(\text{SiO}_4)^{4-}$ qui peut être associé à divers éléments métalliques [21]. Dans le domaine du patrimoine, la technologie des silicates a été expérimentée pour le comblement du verre sous forme d'organo-silicates [18] ou encore dans le patrimoine architectural pour la consolidation de la pierre. Leur application entraîne la formation de silice amorphe constituée d'un réseau désordonné et continu de tétraèdres de silice formant des anneaux avec 3 à 8 atomes de silicium. Cette structure contient de nombreux groupes silanoliques Si-OH, qui confèrent un caractère hygroscopique au système [22]. Dans le cas du bois, ces consolidants inorganiques à base de silice permettent d'augmenter la stabilité mécanique et d'améliorer les propriétés hydrophobiques de la structure [20, 23]. Les propriétés de ces composés à base de silice sont intéressantes dans le cadre de notre étude car ils limiteraient les émanations de COVs en constituant une barrière étanche, avec une mise en œuvre simple.

Notre étude a pour objectif d'évaluer l'impact d'utilisation du bouche-pore sur trois bois OSB dans différentes conditions de vieillissement. Le vieillissement accéléré est réalisé selon le protocole du test Oddy. D'abord proposé par Antony Wernder en 1973, ce test a été adapté pour une utilisation en musée en 1975 par Andrew Oddy (conservateur du British Museum). Il permet d'observer, en accéléré, l'impact des polluants volatils qui sont dégagés par les matériaux testés. De nombreuses études ont été menées selon cette méthode pour identifier les matériaux dangereux en conservation [24-29]. Le principe repose sur le confinement de trois coupons métalliques (cuivre, argent et plomb) dans un tube à essai de 50cm³ dans un environnement proche de 100% d'humidité relative et mis en étuve à 60°C pendant 28 jours. Le résultat des tests Oddy sont souvent discutés car décrits comme subjectifs [30]. Plusieurs auteurs ont étudié la possibilité de les normaliser en mettant en place des protocoles avec des paramètres normés tant sur l'observation des coupons métalliques que sur l'évaluation de leur niveau de dégradation [27,31]. La méthodologie d'ailleurs est souvent réinterrogée. Il existe plus de 20 procédés différents. Les résultats peuvent varier si certaines étapes ne sont pas respectées comme le manque de respect des consignes ex-

périmentales, le mauvais stockage du matériel ou encore un mauvais nettoyage de celui-ci, sans parler de l'utilisation et la réutilisation des coupons métalliques. Ces limites entraînent une interprétation des résultats plutôt subjective et interrogent sur leur reproductibilité d'un laboratoire à un autre [25,32]. En parallèle, ces tests ont été reproduits dans des conditions que nous qualifierons de non accélérées. Le conditionnement est aussi dans une enceinte à 100% d'humidité relative, les coupons métalliques et le bois sont laissés à température ambiante mais pendant plusieurs mois et dans un volume plus grand (1000cm³). L'objectif est d'observer la réactivité du plomb si celui-ci est placé dans des conditions environnementales agressives soit « normées » par un protocole de vieillissement reconnu, soit adaptées à des conditions plus « réelles » malgré un maintien à 100% HR avec une durée plus longue d'exposition.

Matériel et Méthodes

Tests de vieillissement

Le test ODDY

Le protocole se base sur celui proposé par le Centre de Restauration et de Recherche des Monuments de France (C2RMF). Une fiole en verre contenant 0,8 ml d'eau osmosée bouchée avec du coton pour ralentir l'évaporation est placée dans le fond d'un tube à essai de 50 cm³ avec les échantillons de bois de 2 g. Un coupon en plomb métallique est suspendu dans la fiole, inséré dans une incision pratiquée dans le bouchon en silicone, qui referme l'enceinte. Pour chaque échantillon de bois, trois fioles sont préparées. Une fiole témoin (coupon métallique en l'absence d'échantillons de bois) complète ces tests. Les témoins permettent de s'assurer qu'il n'y a pas de COVs pouvant réagir avec les coupons métalliques en l'absence d'échantillons de bois. Les coupons métalliques sont quasi-purs ($\leq 99,998\%$), d'épaisseur 0,1mm, achetés sous forme de feuille (VWR, Alfa Aesar, REF12051.Fi, Puratronic®). Ils sont dégraissés à l'acétone 99,5% (VWR, REF20065.293, GPR RECTAPUR) puis découpés à l'aide d'un scalpel pour obtenir les dimensions suivantes 10x35mm. Les quatre fioles sont ensuite mises à l'étuve à 60°C, pendant 28 jours. Pour ces tests, seuls les coupons métalliques en plomb ont été utilisés au regard de l'intérêt attendu pour cette étude.

Le test de vieillissement à température ambiante

Pour les seconds tests, chaque échantillon de bois (80x100 mm) est placé au fond d'un pot Parfait® (1000 cm³) ainsi qu'une fiole de 20 ml d'eau. Un coupon métallique en plomb d'épaisseur 3 mm et de dimensions 20x25 mm est suspendu par un fil de pêche dans le pot (Figure 2). L'enceinte est laissée à température ambiante et à 100% d'humidité relative. La durée de ces tests est de 12 mois pour l'OSB 1, 6 mois pour l'OSB 2 et 3, et ce pour les tests avec et sans bouche-pores. La différence de vieillissement repose sur le fait que les OSB 2 et 3 ont été ajoutés en cours d'études. Pourtant, les essais ont été stoppés en même temps afin de pouvoir exploiter les résultats.

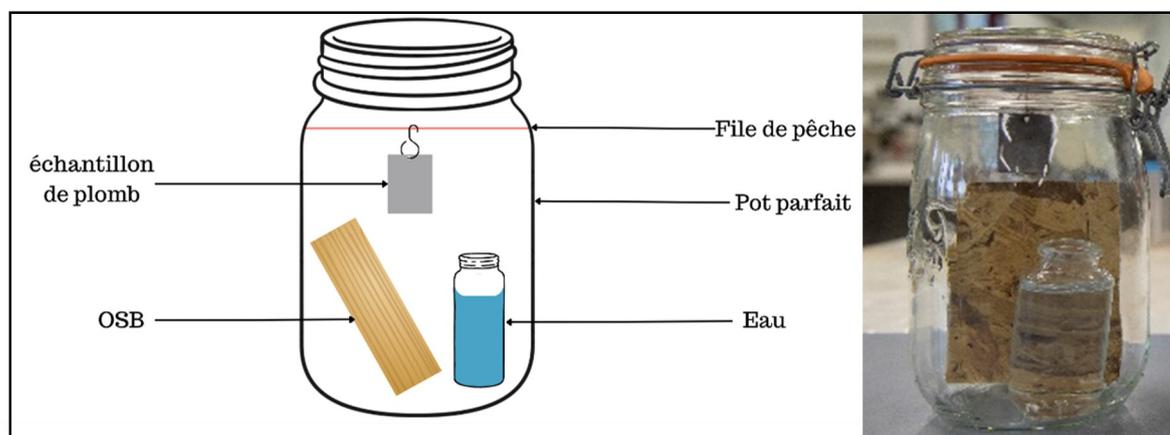


Figure 2. Schéma (à gauche) et photo (à droite) de l'enceinte correspondant au montage pour le vieillissement non accéléré © S. Krabis, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique 2024

Matériel

Préparation des OSB pour les tests

Trois types de panneaux OSB ont été sélectionnés. Les panneaux OSB 1, 2 et 3 (Castorama®, Nantes, France) ont été découpés afin d'obtenir des échantillons dont les dimensions correspondent aux conditions demandées par les protocoles de vieillissements. Pour le test ODDY, les panneaux OSB ont été découpés afin d'obtenir des échantillons circulaires de 2 gr. Pour les tests dans les pots Parfait®, les OSB ont été découpés à la scie sauteuse pour obtenir des échantillons de dimensions 80x100 mm. Les épaisseurs des panneaux sont de 14 mm (OSB1), 18 mm (OSB 2) et 14 mm (OSB 3). Afin que les tests comparent l'influence du bois avec et sans bouche-pores dans les mêmes conditions d'échantillonnage, il a donc été décidé de ne pas les broyer, contrairement aux recommandations des protocoles de vieillissement. Le broyage du bois aurait rendu difficile l'application du bouche-pores.

Bouche-pores

Le bouche-pores testé a été conseillé par Marie-Anne Loeper-Attia (Restauratrice Équipe Conservation -Recherche, site Philharmonie de Paris, Centre de recherche sur la Conservation. Information requise lors de la formation contre les polluants dans les institutions patrimoniales, ARAAFU 2021, Cité de la musique, Paris). Il s'agit d'un bouche-pores RX OBE SIL (REVOXIA) vendu comme promoteur d'adhérence pour ciment. Il est vendu sous forme liquide, dissout dans l'eau. Ce produit est censé pénétrer jusqu'à 2 mm de profondeur dans les pores du support de type béton et former une couche de silice en surface. Le bouche-pores est appliqué uniformément à l'aide d'un pinceau sur toutes les surfaces des échantillons de bois, en travaillant toujours dans le même sens. Une première couche est appliquée sur la surface des échantillons en OSB jusqu'à saturation, puis laissée au repos pendant 10 à 15 minutes. Ensuite, une seconde couche est appliquée de la même façon que la première. Les échantillons de bois traités peuvent être manipulés après une heure de séchage. D'après la fiche technique, l'exposition à des liquides ne peut se faire qu'après 24 heures, les tests ont donc commencé après 24 heures de séchage. Le bouche-pores seul (sans l'application sur le bois) a aussi été testé via le test Oddy pour vérifier son innocuité en termes de déga-

gement de COVs. Pour cela, le produit a été appliqué au pinceau selon la même méthode sur un film en polyéthylène. Une fois sec, le bouche-pores a été prélevé au scalpel. 2 grammes ont ensuite été disposés dans 3 tubes à essai du test Oddy.

Expérimentations

Les tests et les conditions expérimentales de vieillissements sont récapitulés dans le tableau 1. Le bouche-pores seul a été testé dans les conditions du test Oddy (100% HR, 60°C, 50 cm³, 28 jours). Les trois OSB 1, 2 et 3 ont été testés avec et sans bouche-pores en condition de vieillissement accéléré (100% HR, 60°C, 50 cm³, 28 jours) et non accéléré (100% HR, environ 20°C, 1000cm³, 12 mois pour OSB 1, 6 mois pour OSB 2 et 3). En complément, l’OSB 1 avec et sans bouche-pores a été testé dans un environnement à 100% HR, en pot Parfait® (1000 cm³) à différentes températures. Ce dernier test a permis d’observer l’impact du système bois / bouche-pores sur le plomb en fonction :

- Du volume de l’enceinte sur les émanations de l’OSB 1 (HR100%, 60°C) en tube à essai (50 cm³) et en pot Parfait® (1000 cm³).
- De la température (HR100%, 1000 cm³) à 30, 40 et 60°C.

Tableau 1. Récapitulatif des tests réalisés sur les échantillons d’OSB 1, 2 et 3 et le bouche-pores

| 100%HR | OSB 1 | OSB 1 BP | OSB 2 | OSB 2 BP | OSB 3 | OSB 3 BP | BP | OSB 1 | OSB 1 BP |
|-----------------------------------|------------------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|----|--------------|-------------|
| Pot Parfait® | 12 mois | | 6 mois | | | | | 30, 40, 60°C | |
| 1000 cm ³ | 20°C | | | | | | | | |
| Tube à essai 50cm ³ | 28 jours 60°C | | | | | | | | |

Suivi analytique

La photographie

L’objectif est de documenter visuellement les changements d’aspect de surface des coupons métalliques, causés par la corrosion. Les observations sont réalisées à l’œil nu et par photographie avant et après chaque test pour ceux réalisés en vieillissement accéléré et tous les mois pour ceux réalisés en vieillissement non-acceléré. Les photographies sont réalisées par les photographes du laboratoire, avec un Nikon D850 - 60mm – Macro. En complément, et quand cela semblait pertinent, des photographies prises au microscope Leica, DM1000 sont réalisées permettant des grossissements allant jusqu’à x40.

La spectrophotométrie

La couleur des coupons métalliques est mesurée à l’aide d’un spectrophotomètre CM-2600d (Konica Minolta, VWR) dans les conditions ambiantes de température (18-22°C) et d’humidité relative (45-60%). La source lumineuse D65 (correspondant à la lumière du jour à 6 500 K) est utilisée comme paramètre de couleur pour mesurer et calculer l’espace colorimétrique. Les mesures sont effectuées avec les composantes spéculaires incluses (SCI). Ici, l’éclaircissement était un facteur important, car la corrosion du plomb se caractérise généralement par la formation d’une poudre blanche à la surface. Il est préférable d’obtenir une représentation précise de la couleur réelle de l’objet ce qui justifie le choix du mode SCI. Le système de couleurs CIE HUNTERLAB (1995) évalue la couleur mesurée sur la base de trois critères : l’axe noir et blanc, ou luminosité L* (L=0 pour le noir, L=100 pour le blanc), l’axe rouge et

vert a^* (+100 valeurs pour le rouge, -100 valeurs pour le vert), et l'axe jaune et bleu b^* (+100 valeurs pour le jaune, -100 valeurs pour le bleu). La magnitude de la différence de couleur du bois, appelée ΔE^* est utilisée pour comparer les échantillons avant et après le traitement :

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

$$\Delta L^* = L_f^* - L_i^* ; \Delta a^* = a_f^* - a_i^* ; \Delta b^* = b_f^* - b_i^*$$

i : couleur initiale, coupon de référence et *f* : couleur finale, après les tests de vieillissement

Pour couvrir une surface maximale, une fenêtre de 8 mm est utilisée pour chaque mesure. Pour chaque face du coupon, trois mesures sont réalisées puis moyennées. Les valeurs de ΔE^* correspondantes aux évolutions de couleur des coupons avant et après les tests ont permis d'évaluer l'impact colorimétrique des échantillons de bois (avec et sans bouche-pores) sur le coupon métallique. Les valeurs de ΔE^* inférieures à 1 sont considérées comme non perceptibles par l'œil humain. Celles entre 1 et 2 peuvent devenir perceptible mais par un observateur expérimenté. Entre 2 et 10, l'évolution de la couleur est perceptible au premier coup d'œil. Au-delà de 11, le changement de couleur est significatif par tout observateur [33-35]. Chaque test ayant été répété 3 fois, les résultats colorimétriques présentés dans cette étude correspondent à la moyenne des mesures réalisées. En fonction des valeurs calculées des ΔE^* , celles des Δa^* , Δb^* et ΔL^* sont étudiées afin de comprendre quel axe est la cause de l'évolution perceptible de la couleur de la surface des coupons en plomb.

Résultats et Discussion

Les tests du bouche-pores

À partir des tests réalisés sur le bouche-pores seul (sans matrice de bois) dans les conditions de tests d'Oddy, aucune réactivité des coupons en plomb n'est observée vis-à-vis du bouche-pores : aucune efflorescence blanche n'est apparue. Les mesures colorimétriques ΔE^* des coupons en Pb sont comprises entre 10 et 12, avec la valeur du coupon témoin à 10. Ces valeurs peuvent se justifier par une oxydation du plomb en milieu humide. En outre, le bouche-pores s'est liquéfié (Figure 3). Sa fiche produit indique que ce dernier doit être stocké entre +5°C et +25°C. Il est donc probable qu'à 60°C, ce dernier ait changé d'état. Il est aussi conseillé de l'utiliser à une humidité relative inférieure à 85%. Dans les conditions de tests d'Oddy, une dégradation physique du bouche-pores n'est donc pas à exclure.



Figure 3. Test de vieillissement selon les conditions du test Oddy du bouche-pores. De gauche à droite : le bouche-pores avant, après 28 jours, coupons métalliques en plomb après 28 jours (T : témoin, C : coupons 1, 2 et 3). © L.Preud'homme, C. Colonnier, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique 2024

Les tests OSB avec et sans bouche-pores

Pour une meilleure lisibilité des résultats, les valeurs de ΔE^* et ΔL^* sont reportées dans le tableau 2.

Tableau 2. Récapitulatif des valeurs colorimétriques des tests accélérés et non-accelérés
(BP = bouche-pores, CV = coefficient de variation)

| | $\Delta E^*(D65)$ | $\Delta L^*(D65)$ | $\Delta E^*(D65)$ | $\Delta L^*(D65)$ |
|---------|--|-------------------|--|-------------------|
| | Vieillissement accéléré (Oddy) (CV 11%) | | Vieillissement non accéléré (pot Parfait®) (CV 30%) | |
| OSB 1 | 26 | -25 | 2 | 0 |
| OSB1 BP | 14 | -13 | 4 | -3 |
| OSB 2 | 27 | -27 | 9 | 8 |
| OSB2 BP | 18 | -17 | 4 | -2 |
| OSB 3 | 24 | -24 | 9 | 8 |
| OSB3 BP | 13 | 11 | 5 | -4 |

Vieillissement accéléré

Après 28 jours, les coupons en plomb qui sont conditionnés selon le protocole Oddy, en présence des trois OSB (1, 2 et 3) présentent une évolution significative de leur couleur. Leur ΔE^* est respectivement de 26, 27 et 24 (avec un coefficient de variation de +/- 11%). Mais le ΔE^* du coupon témoin est de 21. Ces valeurs sont dues à l'évolution de la couleur sur l'axe L. Négatives pour les trois (-25 pour l'OSB 1, -27 pour l'OSB 2 et -24 pour l'OSB 3), elles indiquent un assombrissement de la surface des coupons, lié à une probable oxydation du plomb métallique. Dans les conditions d'humidité et de température des tests Oddy, une fine couche de monoxyde de plomb de type Pb-O se forme à la surface du plomb. En 2002, une étude menée par Dubus M. et al [12], a montré qu'au-delà de 50% HR, un mélange d'oxydes de plomb et d'oxycarbonate de plomb se forme et peut être considéré comme stable.

En présence des OSB avec bouche-pores, les variations de ΔE^* sont plus limitées : 14 pour l'OSB 1, 18 pour l'OSB 2 et 14 pour l'OSB 3 (avec un coefficient de variation de +/- 40%). Le ΔE^* du plomb témoin est de 16. On note un ΔL^* négatif pour le témoin, l'OSB 1 et l'OSB 2 indiquant un assombrissement des coupons, et suggérant une oxydation de la surface. En revanche, pour l'OSB 3, la valeur ΔL^* est positive (+11) indiquant un blanchiment de la surface du coupon et donc la formation de carbonate de plomb (Figure 4). Ces produits de corrosion sont généralement dus à un environnement corrosif pollué par des vapeurs d'acides organiques de type acide acétique. Cela peut être dû à un effet combiné de la dégradation du bouche-pores (60°C, 100%HR) et une concentration peut être plus élevée de COVs dans l'OSB 3. Mais cela n'explique pas pourquoi l'OSB 3 sans bouche pores dans ces mêmes conditions n'a pas impacté le plomb (Figure 5). D'après le commercial Thomas Jacob de Revoxia, il est probable que le bouche-pores se dégrade. Il est probable que dans ces conditions, le bouche-pores se dégrade, entraînant une réaction avec le bois qui par conséquent dégagerait des COVs.

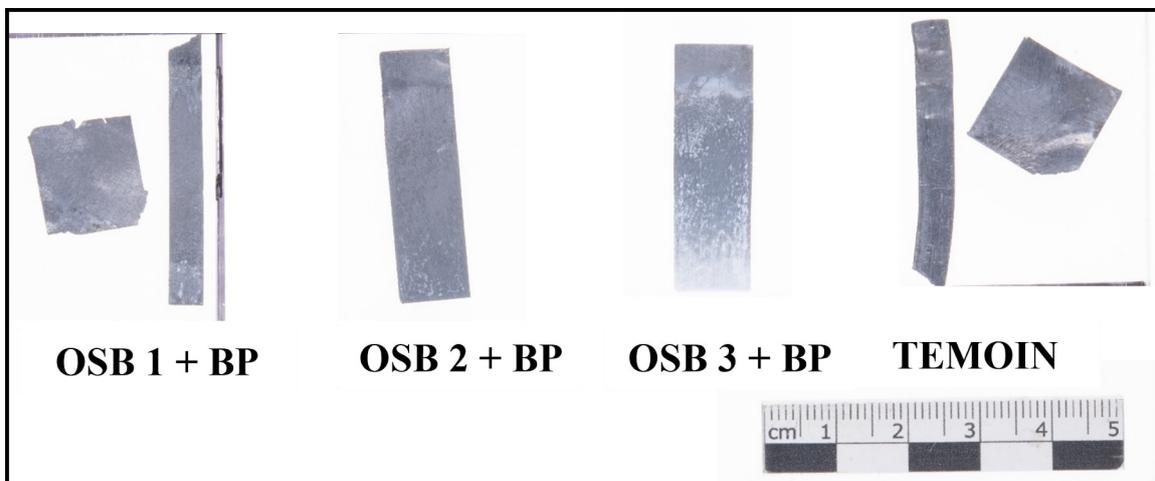


Figure 4. Coupons métalliques en plomb après avoir été exposés à l’OSB 1, 2 et 3 avec bouche-pores selon les conditions du test Oddy. © L.Preud’homme, C. Colonnier, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique 2024

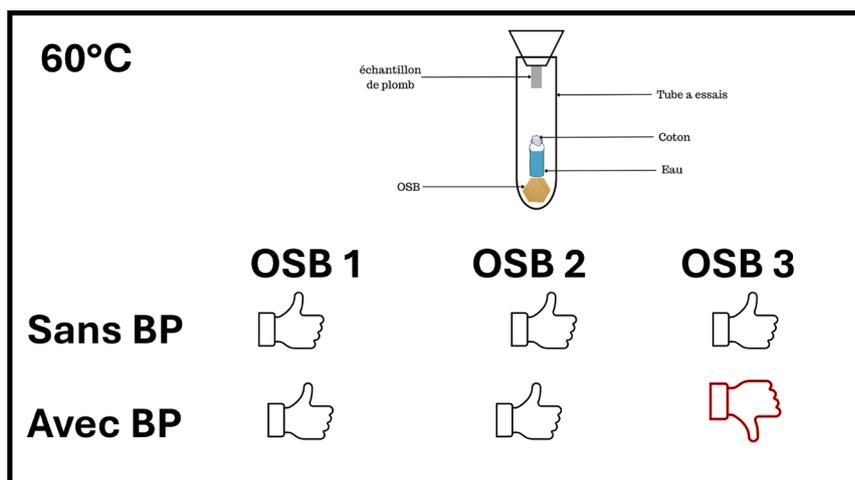


Figure 5. Représentation schématique des résultats obtenus pour les vieillissements Oddy

Vieillessement non-accélééré

Le coefficient de variation pour ces tests est de 30% en moyenne. Les coupons testés avec l’OSB 1 en vieillissement non-accélééré et sans bouche-pores ne présentent pas d’évolution significative en termes de couleur : ΔE^* est de 2. En revanche, ceux conditionnés avec les OSB 2 et 3 présentent un ΔE^* à 9, avec des valeurs positives du ΔL^* ($\Delta L^*=8$). Ces valeurs indiquent un blanchiment de la surface des coupons en plomb et donc une corrosion de surface pouvant être attribuée aux carbonate/acétate de plomb.

L’ajout du bouche-pores sur l’OSB 1 ne semble pas avoir d’impact significatif sur le coupon en plomb : le ΔE^* étant de 4. En revanche, avec l’OSB 2 et 3, l’ajout du bouche-pores réduit de moitié cette valeur passant respectivement de 9 à 4 pour l’OSB 2 et à 5 pour l’OSB 3. Dans les deux cas, c’est le ΔL^* qui évolue vers des valeurs négatives indiquant un assombrissement de la surface. Le bouche-pores, appliqué sur les OSB 2 et 3, limite la corrosion du plomb dans ces conditions (Figure 6).

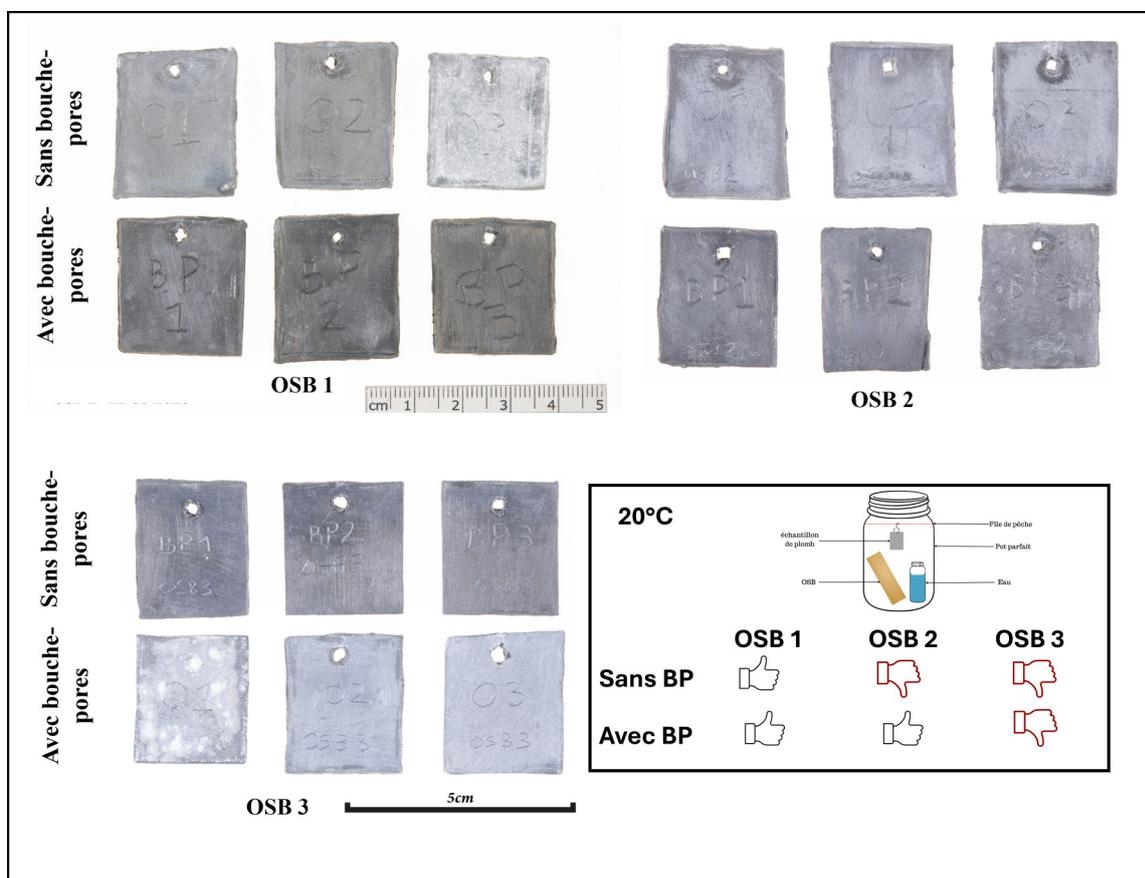


Figure 6. Photographies des coupons en plomb ayant subi un vieillissement non-acceléré en pot parfait et représentation schématique des résultats obtenus. © L.Preud'homme, C. Colonnier, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique 2024

Ces tests révèlent ici une différence notable entre les résultats obtenus à 60°C pendant 28 jours et ceux à température ambiante sur plusieurs mois. En regardant les résultats obtenus via le test Oddy, les 3 OSB peuvent être proposés pour la réalisation de support/caisses de stockage, bien que l'OSB 3 avec le bouche-pores indique une possible émanation de COVs. En revanche, les tests réalisés à température ambiante (pots Parfait®) suggèrent une meilleure innocuité pour l'OSB 1 avec ou sans bouche-pores. Les OSB 2 et 3 peuvent être utilisés mais seulement avec bouche-pores.

Les différences de paramètres entre ces deux méthodes de vieillissement sont la température, la durée et le volume des enceintes qui est à rapporter à la surface des coupons en plomb et du bois (Tableau 3). Dans les tubes à essai (Oddy), la surface du plomb est plus importante que celle du bois, alors que dans les pots Parfait®, elle est moins importante. Rapporté au cm³ d'air de l'enceinte, le rapport S_{Pb}/S_{bois} est de 351 pour les tubes à essai contre 57 pour les pots Parfait®. Les COVs dégagés par les panneaux d'OSB sont donc plus concentrés dans les pots Parfait® que les tubes à essai. Ceci pourrait justifier l'impact plus significatif des COVs sur le plomb lors des vieillissements non accélérés. La température est aussi un paramètre à ne pas négliger car en effet, les tests Oddy sont réalisés à 60°C contrairement aux tests dans les pots Parfait® qui eux sont à température ambiante.

Tableau 3. Calcul des surfaces disponibles des coupons en plomb, du bois, selon la méthode de vieillissement

| | Surface du Pb (mm ²) | Surface du bois (mm ²) | Volume de l'enceinte (cm ³) | S _{bois} /V _{air} (mm ² /cm ³) | S _{Pb} /S _{bois} /V _{air} (mm ² /mm ² /cm ³) |
|--|----------------------------------|------------------------------------|---|---|---|
| Vieillessement accéléré - Oddy | 709 | 101 | 50 | 2 | 351 |
| Vieillessement non-acceléré – Pot Parfait® | 1270 | 22120 | 1000 | 22 | 57 |

L'impact de la température sur les émanations provenant de l'OSB 1 avec bouche-pores

L'OSB 1 avec bouche-pores a été testé dans les pots Parfait® (1000 cm³) à 100% HR, à 30, 40 et 60°C en étuve et pendant 28 jours. À 60°C, les trois coupons métalliques en plomb se sont corrodés de manière significative. Une importante couche blanche s'est développée (Figure 7). L'analyse a permis d'identifier ce produit de corrosion comme étant du carbonate de plomb (Figure 8). Aucune trace de corrosion n'est visible sur les coupons à 30°C. En revanche à 40°C, des premiers signes de corrosion sur les extrémités des coupons apparaissent au bout de 15 jours (Figure 9). Ces résultats viennent compléter les tests précédents. L'augmentation de la température favorise les cinétiques de corrosion. Dans un environnement concentré en COVs (avec un faible ratio S_{Pb}/S_{bois}) mais à une température inférieure ou égale à 30°C, la corrosion n'est pas perceptible même sur une durée d'un an (cas à température ambiante), elle apparait au bout de 15 jours à 40°C et elle devient très significative à 60°C (Figure 10).



Figure 7. À gauche : coupons métalliques en plomb après avoir été placés dans les pots Parfait®, à 60°C, 100% HR, avec l'OSB 1 + bouche-pores ; à droite : représentation schématique des résultats. © L.Preud'homme, C. Colonnier, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique 2024

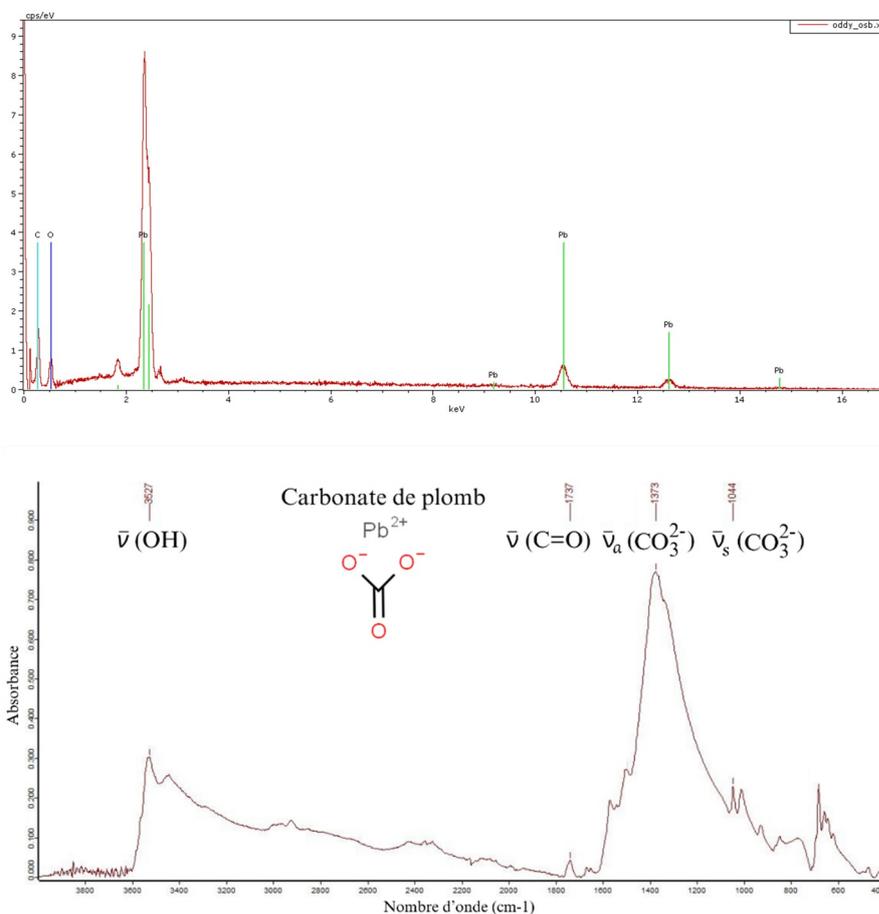


Figure 8. Spectres correspondant à l'analyse du produit de corrosion du plomb développé pendant les tests de vieillissement aux conditions suivantes : 100%HR, 60°C, 1000 cm³, en présence d'OSB 1 + bouche-pores. En haut, le spectre obtenu par spectrométrie à dispersion d'énergie et en bas, le spectre par spectroscopie infra-rouge

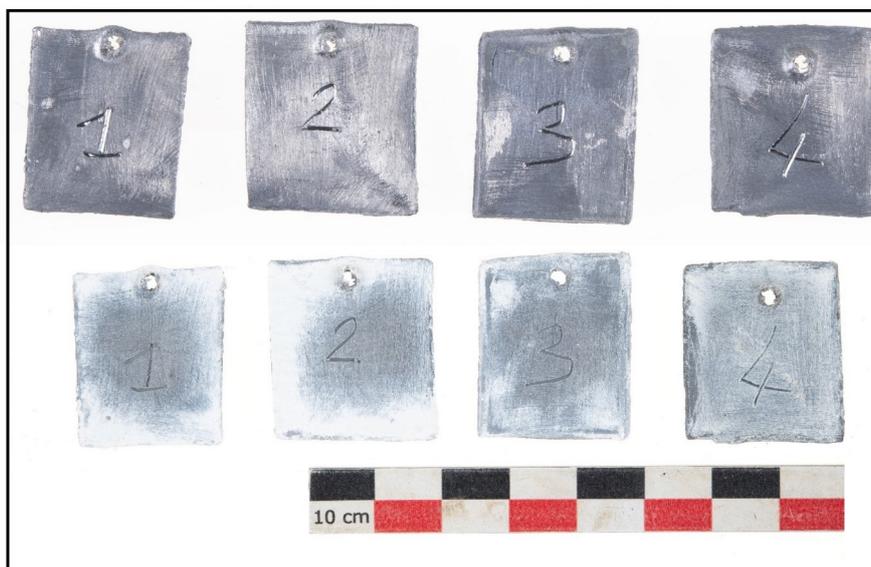


Figure 9. Coupons métalliques en plomb avant (en haut) et après (en bas) vieillissement dans les pots Parfait®, à 100% RH, à 40°C, avec l'OSB 1 + bouche-pores. © L.Preud'homme, C. Colonnier, Grand Patrimoine de Loire-Atlantique 2024

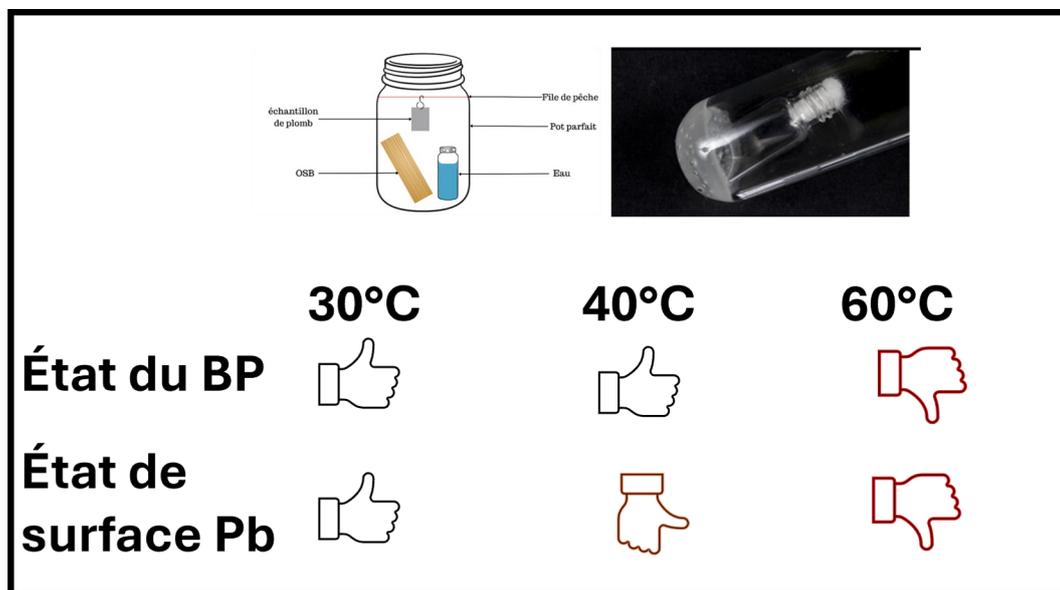


Figure 10. Représentation schématique des résultats des tests de l'OSB 1 avec bouche pores dans les pots Parfait® à différentes températures

Conclusion

Le stockage des objets de grandes dimensions est un sujet toujours d'actualité, notamment pour les objets en plomb. Le bois est connu pour dégager des vapeurs d'acides organiques et le plomb pour sa sensibilité à ces mêmes vapeurs. Pourtant, d'un point de vue logistique et financier, le bois reste un matériau privilégié lors du conditionnement. L'intérêt de cette étude était d'observer la réactivité des trois types d'OSB, communément utilisés pour la fabrication de caisses de stockage, sur le plomb et d'évaluer l'utilisation d'un bouche-pores en tant que barrière à ces potentielles émanations. Pour cela, deux protocoles de tests ont été proposés. Un premier qui reprenait les conditions du test Oddy (100% HR, 60°C, 28 jours, 50cm³) avec des coupons en plomb pur à 99,9% de faible épaisseur ; et un second protocole, dont les conditions étaient de 100% HR, 20°C environ, 1000 cm³ et allant jusqu'à 12 mois sur des coupons de plomb plus épais et à 99,5%. L'observation et les mesures colorimétriques ont permis de mettre en évidence que, dans les conditions Oddy, seuls les OSB 1 et 2 n'entraînaient pas de corrosion du plomb. Dans les conditions de tests à température ambiante, les OSB 2 et 3 ont entraîné une corrosion blanche. En revanche, les mêmes tests à température ambiante avec le bouche-pores ont permis de limiter ces émanations et de diminuer l'impact corrosif sur les coupons en plomb.

Lors de ces tests, la température et le volume de l'enceinte, ainsi que le ratio S_{Pb}/S_{bois} ont un effet non négligeable sur le comportement du plomb. Le développement de la corrosion des coupons en plomb à 60°C, 100% RH, 1000 cm³ en contact avec l'OSB 1 protégé par le bouche-pores est étonnement significatif. Au travers de ces tests, il est observé une réactivité du bouche-pores qui se liquéfie dès 60°C. Des répercussions sur le plomb sont notées dès 40°C. Ceci semble cohérent au regard des indications apportées sur la notice de ce produit. Le bouche pores doit être stocké entre +5 et +25°C et appliqué entre +5 et +40°C. En revanche, il n'y a pas de conseils quant aux conditions après application sur un support. Les résultats évoluent de manière significative selon les paramètres des tests de vieillissement. La température, mais aussi l'humidité imposée ainsi que les proportions des matériaux placés dans les enceintes jouent un rôle évident dans l'interprétation des résultats. Le choix des tests Oddy est à inter-

roger en fonction des matériaux à tester et de leur complexité (plusieurs matériaux ensemble comme c'est le cas pour les OSB+ bouche-pores). À partir de ces tests, il est toutefois possible de conseiller l'utilisation des panneaux OSB 1 avec et sans bouche-pores. L'OSB 2 serait potentiellement utilisable mais uniquement avec un matériau barrière, alors que l'OSB 3 serait déconseillé. Le rôle de l'humidité aussi n'est pas à négliger, il devra être testé à l'avenir afin d'observer son influence sur les émanations de COVs. Enfin, rappelons que l'objectif de cette étude est de proposer des solutions pour les caisses de stockage afin de limiter l'influence du bois sur les objets en plomb. Les conditions habituelles des réserves sont bien plus favorables que celles testées ici en laboratoire et les réactions bien plus lentes. C'est pourquoi et en attendant de comprendre l'influence de ces paramètres, l'aération des caisses par l'aménagement en place de fenêtres a permis de réduire fortement le risque. La mise en place de coupons témoin à l'intérieur de ces mêmes caisses favorise le contrôle. À ce jour la préconisation reste l'utilisation de l'OSB 1 avec bouche pores.

Remerciements

Les autrices remercient Nicolas Stephant et Jean-Yves Mevellec, pour nous avoir donné accès aux techniques d'analyses via la plateforme de caractérisation PLASSMAT de l'IMN (Institut des matériaux Jean Rouxel, Nantes), ainsi que Lisa Preud'Homme et Carl Colonnier (laboratoire Ar'Antique, service imagerie) pour les prises de vue des échantillons. Nous remercions aussi Marie-Anne Loeper-Attia (Centre de Recherche sur la Conservation) pour ses conseils sur l'utilisation et le choix du bouche pores. Enfin, les auteurs tiennent à remercier la Direction Régionale des Affaires Culturelles des pays de la Loire (DRAC) pour son soutien financier.

Références

- [1] Švadlena J., et al., Protective ability of lead corrosion products in indoor atmosphere with acetic acid vapours, *Koroze a ochrana materiálu*, **65** (4) (2021) p.1-6
- [2] Schotte, B. et Adriens, A., The treatment of corroded lead artefacts, *Studies in Conservation*, **51** (2006) p.1-8
- [3] Tétrault J., Polluants dans les musées et les archives : évaluation des risques, stratégies de contrôle et gestion de la préservation, *Travaux publics et Services gouvernementaux Canada* (2003)
- [4] Clarke S.G. et Longhurst E.E., The corrosion of metals by acid vapours from wood, *Journal of Applied Chemistry*, **11** (1961) p.435-443
- [5] Roffael, E., On the release of volatile acids from wood-based panels- chemical aspects, *European Journal of Wood and Wood Products*, **66** (5) (2008) p.373-378
- [6] Bailey G., An Investigation into the Impact of Sealed Wooden and Acrylic Showcases and Storage Cases on the Corrosion of Lead Objects during Long Term Storage and Display, *Bulletin of the Australian Institute for the Conservation of Cultural Material*, **38** (1) (2017) p.43-50
- [7] Rocca E. et Mirambet F., Des savons métalliques pour la protection du patrimoine, *Métaux et métallurgie* **312-313** (2007) p.65-70
- [8] Guilminot E. et al, Prévention des risques associés au plomb en conservation-restauration : de l'atelier de restauration au musée, *Sciences des matériaux du patrimoine culturel – 2* (2012), Paris, 20 et 21 novembre, p.86-89
- [9] Selwyn L., La présence de plomb dans les collections muséales et les édifices patrimoniaux – Note de l'Institut canadien de conservation (ICC) 1/8 », *Travaux publics et Services gouvernementaux Canada* (2010) p.1-6

- [10] Selwyn L., Métaux et Corrosion : un manuel pour le professionnel de la conservation, *Travaux publics et Services gouvernementaux Canada* (2004)
- [11] Tétreault, J. et al., Corrosion of copper and lead by formaldehyde, formic and acetic acid vapours, *Studies in Conservation*, **48** (2003) p.1-6
- [12] Dubus M. et al., Évaluation de la corrosion du plomb aux archives nationales de France, *ICOM Comite for Conservation Metal 13th Triennial Meeting*, Rio de Janeiro (2002)
- [13] Degriigny, C. et al., Faciès de corrosion développés sur des poids en plomb du musée du CNAM de Paris, *ICOM Committee for Conservation Metal 11th Triennial Meeting*, Edimbourg (1996)
- [14] Graedel, T. E., Chemical mechanisms for the atmospheric corrosion of lead, *Journal of Electrochemical Society*, **141** (4) (1994) p.922-927
- [15] <https://lanselle-decoupe.fr/guide-matiere-osb/>, « L'OSB : quels usages, avantages & inconvénients de ce bois pour le bricolage ? », consulté le 06/02/2024
- [16] Communication téléphonique en date du 23/05/24, responsable laboratoire, SWISS KRONO
- [17] <https://polyurethanes.basf.us/markets/engineered-wood-products/binders-for-oriented-strand-board-osb>, consulté le 23/05/2024
- [18] Monti M. et al., New protective coatings for ancient glass: Silica thin-films from perhydropolysilazane, *Journal of Cultural Heritage*, **9** (2008) p.143-145
- [19] Capasso I. et al, Silica-based consolidants: Enhancement of chemical-physical properties of Vicenza stone in heritage buildings, *Journal of Building Engineering*, **68** (2023) 106124
- [20] Zhou K., et al., The organic-inorganic hybrid sol for the consolidation of decayed wood in architectural heritage, *Construction and Building Materials*, **372** (2023), 130847
- [21] <https://www.france-mineraux.fr/geologie/mineralogie/classification-des-mineraux/silicate/>, consulté le 16/07/2024
- [22] Zendri E. et al., Characterization and reactivity of silicatic consolidants, *Construction and Building Materials*, **21** (2007) p.1098-1106
- [23] Mai C., Militz H., Modification of wood with silicon compounds. Inorganic silicon compounds and sol-gel systems: A review, *Wood Science and Technology*, **37** (2004) p.339-348
- [24] <https://www.metmuseum.org/fr/about-the-met/conservation-and-scientific-research/scientific-research/benchmarking-oddy-test>, consulté le 16/07/2024
- [25] <https://www.klug-conservation.fr/Le-test-Oddy-Possibilites-et-limite>, consulté le 16/07/2024
- [26] [https://www.conservation-wiki.com/wiki/Project:Combined_Materials_Testing_Results_\(Simple\)](https://www.conservation-wiki.com/wiki/Project:Combined_Materials_Testing_Results_(Simple)), consulté le 16/07/2024
- [27] Long E.R., Bone A., Breitung E.M., Thickett D., Grau-Bové J., Automated corrosion detection in Oddy test coupons using convolutional neural networks, *Heritage Science* **10** (2022), p.150
- [28] Breitung E., Springer S., Benchmarking the Oddy Test: A New Research Program at the Metropolitan Museum of Art, *AIC News* **47** (5) (2022), p.36-37
- [29] Robinet L., Thickett D., A New Methodology for Accelerated Corrosion Testing, *Studies in Conservation* **48** (4) (2003), p.263-268

- [30] Lee S., Roh H., Yi Y., Effects of wood materials on metal corrosion – Oddy test, *Conservation Science in Museum* **5** (2004), p.31-36
- [31] Díaz I., Cano E., Quantitative Oddy test by the incorporation of the methodology of the ISO 11844 standard: A proof of concept, *Journal of Cultural Heritage* **57** (2022) p.97-106
- [32] Green L.R., Thickett D., Testing materials for use in the storage and display of antiquities: A revised methodology, *Studies in Conservation*, **40** (1995), p.145-152
- [33] Mokrzycki W., Tatol M., Color difference Delta E – A survey, *Machine Graphics and Vision* **20** (4) (2011) p.383-411
- [34] https://www.viewsonic.com/library/creative-work/what-is-delta-e-and-why-is-it-important-for-color-accuracy/#Why_You_Should_Choose_a_Monitor_with_Delta_E_of_2, consulté le 16/07/2024
- [35] <http://zschuessler.github.io/DeltaE/learn/>, consulté le 16/07/2024

Session 4

Collections industrielles et risques

LES MATÉRIAUX DANGEREUX DANS LES OBJETS TECHNIQUES CINÉMATOGRAPHIQUES

Alexandra Lefebvre

conservatrice-restauratrice indépendante d'objets métalliques et techniques

 vertdegris.atelier@gmail.com

Résumé

Cet article traite de l'amiante, du mercure et des biphényles polychlorés (PCB) dans les objets techniques cinématographiques patrimoniaux. Ces matériaux dangereux ont été choisis pour leurs propriétés intéressantes et utilisés dès l'aube du 20^{ème} siècle, afin de répondre aux besoins techniques des appareils.

Un premier travail mené en 2019 [1] a permis la constitution d'un corpus d'objets représentatif de la problématique. 8 appareils de projection et leurs accessoires, conservés au Centre de recherche et d'archivage de la Cinémathèque suisse et à la Cinémathèque de Berne, ont été étudiés à des vues d'application à l'ensemble de la collection. Il en résulte que l'amiante était utilisé comme protection face à la chaleur des sources lumineuses et des résistances des appareils de projection, mais aussi comme protection anti-feu à proximité des supports filmiques hautement inflammables en nitrate de cellulose, de 1880 à 1960. Deux formes du mercure sont mises à contribution dans les appareils entre 1920 et 1945 : sa vaporisation permet le redressement du courant des lampes à arc pour les projecteurs de films muets, tandis que sa liquidité à température ambiante assure l'arrêt immédiat d'un moteur ou d'un lecteur en cas de danger. Aussi, les propriétés isolantes des PCB sont intégrées dans les condensateurs à tubes entre 1929 et 1986.

L'identification et l'évaluation des risques ont constitué la seconde étape de ce travail et ont mis en évidence que le risque amiante est le plus élevé pour les collaborateurs et l'environnement des collections. Ce risque est accru par la sensibilité des supports et la mise en fonction des appareils de projection.

Enfin, les conservations préventive et curative, couplées à l'information des collaborateurs et à la connaissance technologique des objets, sont les clés d'une préservation sur le long terme de ce patrimoine.

Mots clés

Amiante, mercure, PCB, conservation, stabilisation

Abstract

This paper discusses the presence of asbestos, mercury, and polychlorinated biphenyls (PCBs) in technical cinematographic heritage objects. These hazardous materials were chosen for their interesting properties and used from the dawn of the 20th century to meet the technical requirements of the devices.

Initial work carried out in 2019 [1] led to the creation of a corpus of objects representative of the issue. 8 projection devices and their accessories, conserved at the Swiss Film Archive's Research and Archiving Center and the Cinémathèque de Berne, were studied with the perspective of applying these observations to the collection as a whole. The results of the study showed that from 1880 to 1960, asbestos was used as a protection against the heat of light sources and resistors in projection equipment, as well as for fire protection when highly flammable cellulose nitrate film supports were in the vicinity. Two forms of mercury were used in equipment between 1920 and 1945: when vaporized, it could be used to rectify the current in arc lamps for silent film projectors, while when liquid at room temperature it ensured the immediate shutdown of a motor or player in the event of danger. Finally, the insulation properties of PCBs were incorporated into tube capacitors between 1929 and 1986.

The identification and assessment of risks was the second stage of this work and showed that the asbestos risk is the highest for employees and the collections' environment. This risk is heightened by the sensitivity of the media and the use of the projection equipment.

Finally, preventive, and curative conservation, coupled with information staff and technological knowledge of the objects, are the keys to the long-term preservation of this heritage

Keywords

Asbestos, mercury, PCBs, preservation, stabilization

Introduction

Cet article explore la présence des matériaux dangereux que sont l'amiante, le mercure et les biphényles polychlorés (PCB) dans les objets techniques cinématographiques patrimoniaux et détaille les risques leur étant intrinsèquement liés. Utilisés dans les appareils de projection dès le début du 20^{ème} siècle pour leurs propriétés intéressantes, ces matériaux toxiques pour l'être humain sont aujourd'hui strictement légiférés et nécessitent une attention particulière en termes de conservation préventive et de restauration. La question de la conservation de ces matériaux in situ dans les appareils est également à considérer du point de vue de la compréhension accrue des fonctionnalités de ces objets techniques aujourd'hui inertes.

L'amiante est un matériau minéral extrait des roches métamorphiques, libérant des fibres microscopiques en très grand nombre pouvant engendrer des maladies respiratoires graves suite à de faibles expositions. Le mercure est un métal liquide qui, sous sa forme élémentaire, présente un aspect argenté et miroitant. C'est un matériau toxique, écotoxique et reprotoxique. Les PCB sont un ensemble de 209 composés chimiques prenant la forme d'un liquide huileux jaunâtre, présent dans les mélanges techniques.

Ce document s'appuie sur deux travaux menés en 2019 [1] et 2021 [2] à la Haute École Arc en conservation, respectivement en collaboration avec le Centre de recherche et d'archivage de la Cinémathèque suisse [3] et le Centre des collections du Musée national suisse [4], ainsi que sur plusieurs interventions professionnelles menées sur des objets porteurs de ces matériaux dangereux ces cinq dernières années.

Après avoir répertorié les différents matériaux dangereux dans les objets techniques cinématographiques, plusieurs exemples d'appareils présentant des risques potentiels de dangerosité seront rapportés via des cas d'études. Une synthèse des procédés d'identification, de localisation, d'évaluation des risques et de conservation préventive de l'amiante, du mercure et des PCB dans les objets techniques cinématographiques patrimoniaux sera ainsi exposée.

Plusieurs importantes recommandations de conservation préventive et curative, de manipulation et sécurité ainsi qu'une méthode de stabilisation de l'amiante seront enfin présentées dans le dernier chapitre de cet article.

Localisation, forme et fonction des matériaux dangereux

Méthodologie

Afin d'appréhender cette étude de manière exhaustive, un corpus constitué de huit appareils et de leurs accessoires électrifiés a été défini, et dont la constitution se base sur la compréhension des différentes typologies d'appareils et de leurs caractéristiques techniques. Elle s'est établie via la rencontre de spécialistes du patrimoine technique cinématographique en France et en Suisse en concomitance avec la littérature traitant des matériaux dangereux. L'observation des appareils conservés au Centre de recherche et d'archivage de la Cinémathèque suisse, à la Cinémathèque de Berne et à la Cinémathèque française y a également contribué.

La datation des appareils de projection ainsi que leur identification par typologies de projecteurs a permis de déterminer leur représentativité par rapport à la problématique (appareil de projection domestique, appareil de projection cinématographique, résistance, transformateur, etc.) puis en définissant les caractéristiques suivantes : année (s) de production, distributeur, modèle, série et format(s).

La considération des éléments techniques et des caractéristiques des appareils précédemment sélectionnés ont permis de déterminer la représentativité des objets et de définir l'échelle temporelle où ces matériaux dangereux sont présents [1].

Auparavant, les références des fiches de toxicité, détaillant les propriétés et les principaux éléments de dangerosité pour ces trois matériaux, sont indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1. Information générale sur les matériaux dangereux considérés dans cet article

| Matériaux | Composition | Référence fiche toxicologique INRS (Santé et sécurité au travail) - information détaillée |
|---|---|---|
| amiante (asbeste) | fibres minérales naturelles de type serpentine ou amphibole | Référence INRS : FICHETOX_145 https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_145 |
| mercure | Hg | Référence INRS : FICHETOX_55 https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_55 |
| PCB biphényles polychlorés (polychlorobiphényles) | C₁₂H_(10-n)Cl_n | Référence INRS : FICHETOX_194 https://www.inrs.fr/publications/bdd/fichetox/fiche.html?refINRS=FICHETOX_194 |

Amiante

On trouve de l'amiante dans les appareils de projection dès la fin du 19^{ème} siècle jusqu'aux années 1960. Cette présence est essentiellement liée à la nature des supports filmiques et des sources lumineuses. L'amiante intervient alors comme protection anti-feu dans les appareils de projection domestiques et cinématographiques projetant des films en nitrate de cellulose hautement instables chimiquement et inflammables, mais aussi à proximité des lampes oxhydriques à bâton de chaux (Figure 1) et des lampes à arc électrique (Figure 2), atteignant respectivement une chaleur de 1710°C et 3600°C. L'amiante recouvre ainsi l'intérieur des carters (Figure 3) renfermant les

pellicules en nitrate de cellulose et tapisse l'intérieur des lanternes de projection munies de ces typologies de lampes. On le retrouve également sous la forme d'un rideau fixé à l'arrière des lanternes (Figure 4) – protégeant le projectionniste de la lampe. Le matériau a aussi été utilisé en tant qu'isolant électrique dans les interrupteurs des lampes à arc, dans les boîtiers électriques, en revêtement intérieur ou extérieur des câbles électriques (Figure 5) et dans certaines résistances (Figure 6). Ces matériaux ont été mis en évidence suite à des analyses réalisées au microscope électronique à balayage [1].

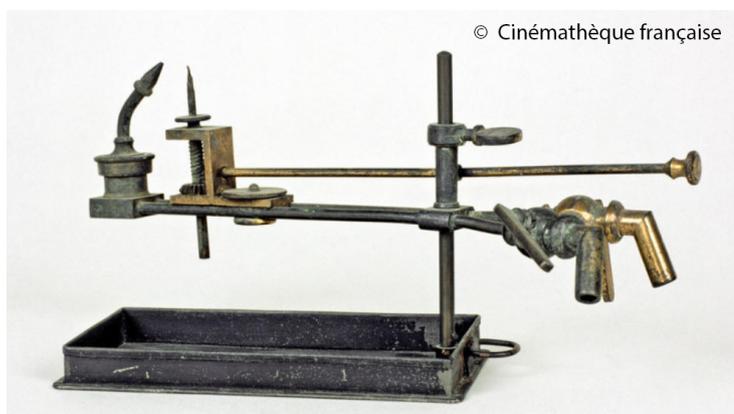


Figure 1. Lampe oxhydrique à bâton de chaux
©Cinémathèque française 2014



Figure 2. Lampe à arc dans sa lanterne amiantée
©HE Arc CR A.L 2019

Sa présence se raréfie au cours des années 50, du fait de l'évolution du support film passant du nitrate à l'acétate de cellulose, puis au polyester. Le remplacement progressif des lampes à arc électrique au carbone, utilisées jusque dans les années 1980, par les lampes à arc au xénon qui ne dégagent qu'une température d'environ 200°C est aussi à considérer [1].



Figure 3. Carter à bobine amiantée, Bauer M7, 1928
©HE Arc CR A.L 2019



Figure 4. Rideau amianté, Ernemann IV, 1937
©HE Arc CR A.L 2019

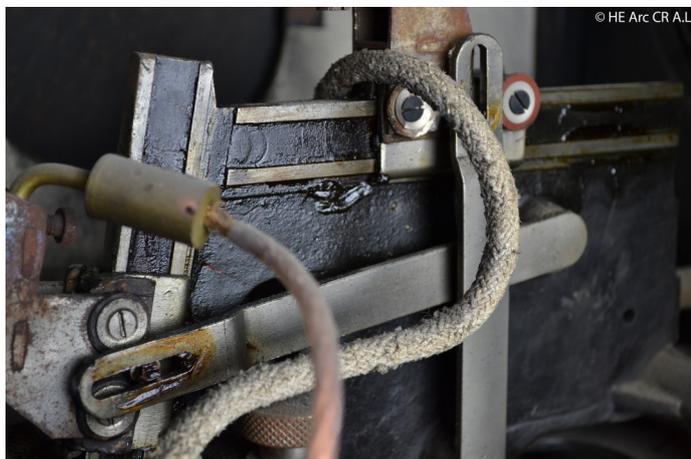


Figure 5. Câble électrique amianté, Ernemann IV, 1937
©HE Arc CR A.L 2019



Figure 6. Résistance amiantée, Pathé Baby Super, 1926
©HE Arc CR A.L 2019

Mercur

On identifie la présence de mercure dans les interrupteurs à mercure à bascule et dans les redresseurs à vapeur de mercure, dès 1920 jusqu'après la Seconde Guerre Mondiale. Les interrupteurs permettent l'ouverture ou la fermeture d'un circuit électrique, tandis que les redresseurs convertissent le courant alternatif (AC) en courant continu (DC) pour alimenter les lampes à arc de carbone des projecteurs équipés en courant continu. L'usage des redresseurs à mercure se raréfie avec l'arrivée du film sonore dès les années 1930, le redresseur au sélénium étant plus approprié à l'application de la basse tension adéquate à ce nouveau support [1].

PCB (biphényles polychlorés)

On trouve des PCB dans les condensateurs à proximité des moteurs à courant alternatif (AC) et dans les amplificateurs, de 1929 à 1987. Ils prennent la forme d'une huile intervenant comme isolant diélectrique entre les différentes strates métalliques composant le condensateur. Seuls les condensateurs à tubes, utilisables en courant alternatif (AC) et en courant continu (DC) peuvent contenir des PCB.

Identification et évaluation des risques

Formes des supports (amiante, mercure, PCB)

Amiante

Plusieurs typologies de matériaux amiantés peuvent être rencontrés dans les appareils cinématographiques. Ils présentent essentiellement une teinte blanchâtre, sauf particularité mentionnée ci-dessous.

L'amiante en feuille ou en plaque est constitué d'amiante faiblement aggloméré et est utilisé comme isolant thermique [5]. Il prend la forme d'une plaque dont l'épaisseur varie entre 3 et 5 mm, constituée de plusieurs feuilles (Figure 7). Son aspect fibreux est caractéristique de sa faible agglomération. Il peut être observé sur des supports en tôle repliée sur lesquels il peut être fixé avec des attaches parisiennes ou vissé [1].



Figure 7. Constitution en feuilles d'une plaque d'amiante faiblement aggloméré
©HE Arc CR A.L 2019

L'amiante tissé ou tressé est composé d'amiante pur [5] faiblement aggloméré [6] et détient deux fonctions : celle d'isolant électrique et celle d'isolant thermique. Il est reconnaissable à sa forme de textile présentant un maillage régulier, d'épaisseur variable selon les supports. Lorsqu'il présente une fine épaisseur, il peut être vissé ou collé sur un support en tôle repliée à l'intérieur d'une lanterne pour assurer une protection anti-feu (Figure 8), ou être installé dans un interrupteur de lampe à arc en tant qu'isolant électrique. Sous la forme d'un rideau d'épaisseur plus importante, il peut être vissé à l'arrière d'une lanterne de projection (Figure 9). Sa forme tressée est également identifiable en tant que gaine isolante autour et dans les câbles électriques [1].



Figure 8. Amiante tissé, Bauer M7, 1928
©HE Arc CR A.L 2019



Figure 9. Rideau d'amiante tissé, Ernemann IV, 1937 ©HE Arc CR A.L 2019

L'amiante fortement aggloméré prend la forme d'un carton [5] au rainurage régulier et peu marqué. De couleur blanche (Figure 10) ou revêtu d'une strate colorée et imprimée (Figure 11), il est utilisé sous cette forme comme isolant électrique et thermique. On le retrouve à proximité des câblages des dispositifs d'éclairage, mais aussi dans les lanternes de projection, dans lesquelles il est vissé sur un support en tôle repliée [1].



Figure 10. Carton d'amiante fortement aggloméré, Bauer M7, 1928 ©HE Arc CR A.L 2019

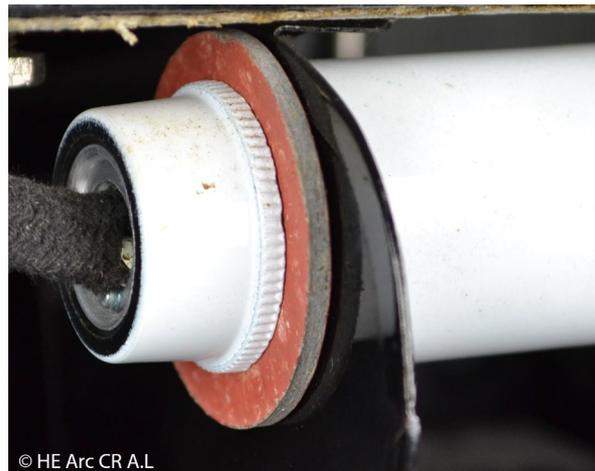


Figure 11. Carton d'amiante fortement aggloméré, Acme portable projector, 1920 ©HE Arc CR A.L 2019

L'amiante pressé ou moulé [7] est identifié comme composante de certaines résistances des appareils de projection domestiques (Figure 12). Ces résistances ne contiennent cependant pas toutes de l'amiante. Certaines d'entre elles sont faites de silicates d'alumine (Figure 13), dont les propriétés isolantes électriques et la résistance aux hautes températures sont avérées. Ces deux typologies de résistances ne peuvent cependant pas être différenciées visuellement, leur apparence étant très analogue. Une analyse au microscope électronique à balayage a permis de déterminer si les échantillons de cette étude étaient fibreux et si leur spectre concordait à celui de l'amiante [1].

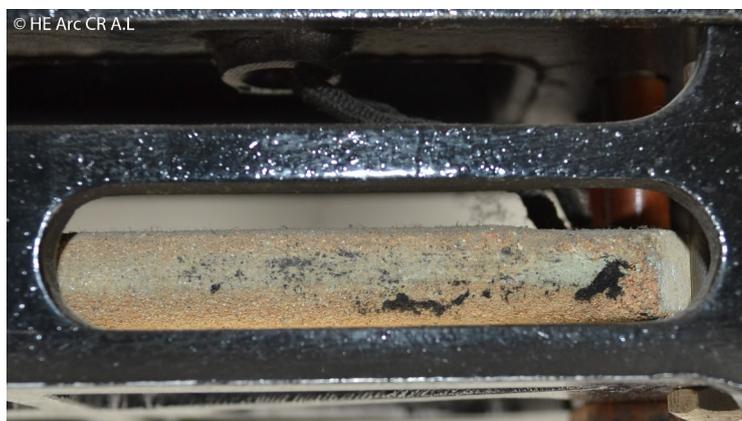


Figure 12. Résistance amiantée, Pathé Baby Super, 1926 ©HE Arc CR A.L 2019

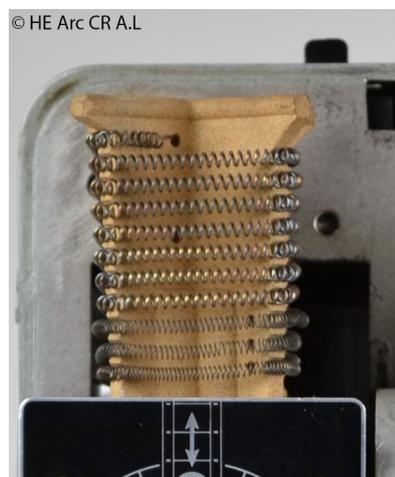


Figure 13. Résistance en silicate d'alumine Siemens 2000, 1954 ©HE Arc CR A.L 2019

Toutefois, l'état de dégradation des supports amiantés est à considérer lors de leur identification, celle-ci pouvant être plus complexe de ce fait [1].

Mercure

Le mercure est identifiable dans les appareils sous sa forme élémentaire. Il est ainsi caractérisé par un aspect liquide, une teinte argentée et une surface miroitante [8]. On le retrouve dans les contenants en verre des interrupteurs (Figure 14) et dans les ampoules des redresseurs à mercure (Figure 15) des appareils de salle. Les présences d'une irisation et d'une opacification de couleur grise-noire de l'intérieur du verre des ampoules des redresseurs indiquent qu'une vaporisation du mercure a eu lieu lors du fonctionnement de l'appareil [1].



Figure 14. Interrupteur à mercure ©HE Arc CR A.L 2019



Figure 15. Redresseur à mercure externe ©HE Arc CR A.L 2019

Les interrupteurs à mercure ne se trouvent jamais à proximité directe des lampes à arc (Figure 16), du fait de la possible présence d'étincelles [9]. En tant qu'interrupteurs de sécurité, ils permettent d'établir ou de couper le courant électrique dans l'arc des lampes au carbone ou au xénon, grâce à un système mécanique fixé à la porte de l'appareil de projection.

Ils peuvent également détenir une double fonction de sécurité et de coupe-feu. Dans ce cas de figure, un double interrupteur à mercure interrompt le lecteur sonore et le moteur du projecteur au niveau électrique, puis relève un clapet coupe-feu entre la lanterne et le couloir du film lors d'un incendie de la pellicule. Un triple interrupteur a également pu être observé dans les collections.

Les interrupteurs à mercure peuvent parfois être soustraits à la vue et protégés d'un cache en métal ou en polymère (Figure 17) [1].



Figure 16. Interrupteur de sécurité, projecteur RCA 400 conservé à la Cinémathèque de Berne ©HE Arc CR A.L 2019

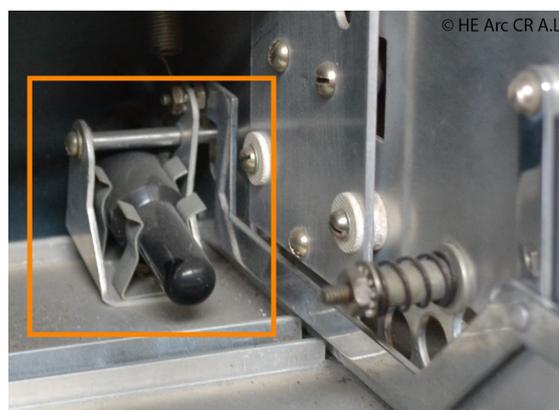


Figure 17. Interrupteur à mercure protégé par un cache métallique, projecteur RCA 400 ©HE Arc CR A.L 2019

PCB

Il existe deux types de condensateurs que l'on peut identifier dans les appareils cinématographiques. Cette différence permet d'isoler les condensateurs contenant des PCB des autres, de même que certaines informations figurant sur les composants. On distingue deux grands types de condensateurs.

Les *condensateurs électrolytiques* sont constitués d'armatures métalliques séparées par une solution chimique. Cette dernière est parcourue par une tension continue qui, par un phénomène d'électrolyse, constitue une strate isolante entre les armatures [10]. Ces condensateurs ne contiennent pas de PCB et ne sont fonctionnels qu'en courant continu (DC) [1]. Dans les appareils, on les retrouve connectés aux moteurs et aux appareils à courant continu (DC) pour lesquels ils ont un rôle de déparasitage : ils lissent la tension du circuit en limitant les étincelles de commutation des balais du moteur [11]. On reconnaît aisément les condensateurs électrolytiques à leurs sorties opposées, schématisées sur la Figure 18, et au signe '+' qui indique un fonctionnement en courant continu (DC) (Figure 19). Ils peuvent arborer toutes sortes de dimensions et de couleurs [1].



Figure 18. Représentation schématique d'un condensateur électrolytique ©HE Arc CR A.L 2019

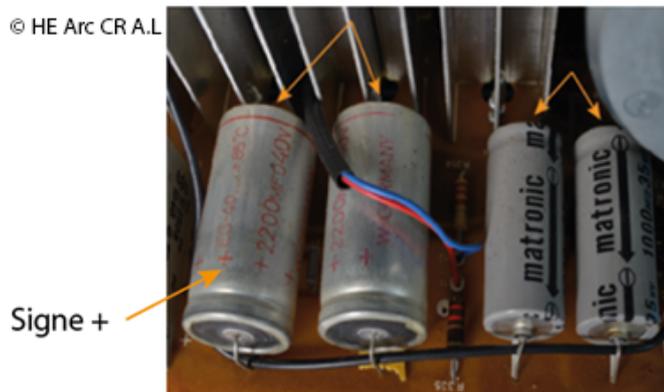


Figure 19. Condensateurs électrolytiques, Bauer T 600©HE Arc CR A.L 2019

Les condensateurs à tubes sont constitués d'armatures en papier métallisé ou en plastique séparées par un isolant. Ils sont utilisables en courant alternatif (AC) ainsi qu'en courant continu (DC) : on peut ainsi les observer à proximité des moteurs et appareils à courant alternatif (AC) ou continu (DC). Les condensateurs à tubes sont identifiables à leurs deux sorties placées du même côté, représentées Figure 20, ainsi qu'à la mention 'MP' (Figure 21) qui indique un condensateur à papier métallisé (metallic paper) (Figure 21). L'isolant de ces condensateurs peut contenir des PCB [1].



Figure 20. Représentation schématique d'un condensateur à tubes ©HE Arc CR A.L 2019



Figure 21. Mention MP (metallic paper) sur un condensateur à tubes ©HE Arc CR A.L 2019

Quatre éléments de réponse permettent d'affirmer ou d'infirmer leur présence dans les condensateurs à tubes. Un condensateur à tubes dont la date de production est antérieure à 1929 et postérieure à 1987 ne contient pas de PCB [12]. Par contre quand les mentions 'CP' ou 'CD' figurent sur le condensateur, cela indique la présence de PCB. Cependant, les quatre entreprises suivantes ont produit des condensateurs dépourvus de PCB : Bosch, Elco (comprenant aussi Elyt), ITT et SEL [13]. Enfin, les Services cantonaux des produits chimiques (Chemsuisse) ont publié *Le répertoire des condensateurs* [12] : ce document répertorie les entreprises fabriquant des condensateurs et distingue les appareils contenant des PCB, de ceux suspectés d'en contenir, des appareils sans PCB, cela en parallèle avec les domaines d'usage de ces condensateurs et leur période de production [12].

Lorsque l'identification du condensateur est incomplète ou incertaine, on considère que les appareils construits avant 1982 comme << contenant des PCB >>, tandis que les appareils construits avant 1987 ou ceux dont on ignore la date de fabrication sont considérés comme << suspectés de contenir des PCB >> [12]. Un test de mesure de la teneur en chlore de l'huile isolante présente dans le condensateur permettrait d'infirmer ou de confirmer la présence de PCB. Dans le cas où la teneur en chlore mesurée est inférieure à 20 ppm, le condensateur est considéré comme exempt de PCB. Si celle-ci est supérieure à 20 ppm, la teneur exacte en PCB et en composés aromatiques chlorés peut alors être déterminée par le biais d'une analyse par chromatographie en phase gazeuse (GC/MS) et/ou une chromatographie en phase gazeuse couplée à la détection d'électrons (GC/EDS) [12]. Toutefois, cela n'est pas à envisager pour un objet du patrimoine dont les condensateurs sont en bon état de conservation [14]. De surcroît, les condensateurs électriques ne sont pas équipés de bouchons d'ouverture et de fermeture [15] : la réalisation d'une telle analyse mènerait à une détérioration irréversible du condensateur [1].

Cas d'études

Amiante

Lanterne de projection Ganz & Co, conservée au Centre des collections du Musée national suisse

Cette lanterne de projection produite par Ganz & Co vers 1914, conservée au Centre des collections du Musée national suisse, permettait la projection et l'agrandissement de photographies sur plaques de verre.

La lanterne présente cinq panneaux d'amiante prenant la forme de plaques de 5 mm d'épaisseur. Ces dernières sont constituées de plusieurs feuilles d'amiante faiblement aggloméré superposées recouvrant trois des faces intérieures de la lanterne, ainsi que les deux portes latérales de l'appareil. Elles sont fixées aux parois à l'aide de vis, de rondelles et de boulons, tandis que les plaquettes recouvrant les portes de la lanterne sont tenues mécaniquement par les structures en tôle d'acier des portes et les pièces en laiton circulaires constituant respectivement chaque fenêtre.

Ces plaques ont pour fonction principale l'isolation thermique au sein des lanternes équipées de lampes à arc de carbone, celles-ci dégageant une chaleur importante. Cependant, la source lumineuse de cette lanterne est une ampoule : cet indice a permis de comprendre que cet appareil a connu des modifications techniques au fil du temps, la lampe à arc de charbon constituant la source lumineuse initiale de l'objet ayant été remplacée par une ampoule dont les dates de production sont comprises entre 1938 et 1968. Ce changement technique peut s'expliquer par le souhait de projeter des diapositives en plastique, ce qui aurait été impossible avec une lampe à arc dégageant une chaleur extrêmement élevée. Malgré cette modification, les plaques d'amiante ont été conservées dans l'appareil.

Cet exemple encourage donc à la prudence lors de l'ouverture d'un appareil de projection, quant à l'exposition à des matériaux dangereux [1].

Mercur

Projecteur de salle Ernemann IV, daté de 1937, conservé au Centre de recherche et d'archivage de la Cinémathèque suisse et projecteur de salle Ernemann IV, daté de 1926, conservé à la Cinémathèque de Berne

Lors de la première évaluation visuelle d'un appareil de projection, les interrupteurs à mercure ne sont pas forcément les éléments les plus aisément perceptibles. Il peut ainsi être intéressant de savoir reconnaître les enveloppes les dissimulant. Le projecteur de salle Ernemann IV, daté de 1937, comporte un interrupteur à mercure (Figure 22) dissimulé dans un mécanisme de sécurité et coupe-feu.

Le projecteur Ernemann IV daté de 1926 présente quant à lui un double interrupteur à mercure propre à la sécurisation des appareils de projection des films en nitrate de cellulose (Figure 23). Il permet d'ouvrir le circuit moteur et de conséquemment couper le moteur et le lecteur son, mais aussi d'enclencher un clapet coupe-feu dans le cas d'un incendie du film [1].



Figure 22. Interrupteur à mercure de sécurité et coupe-feu, Ernemann IV 1937 ©HE Arc CR A.L 2019

© HE Arc CR A.L

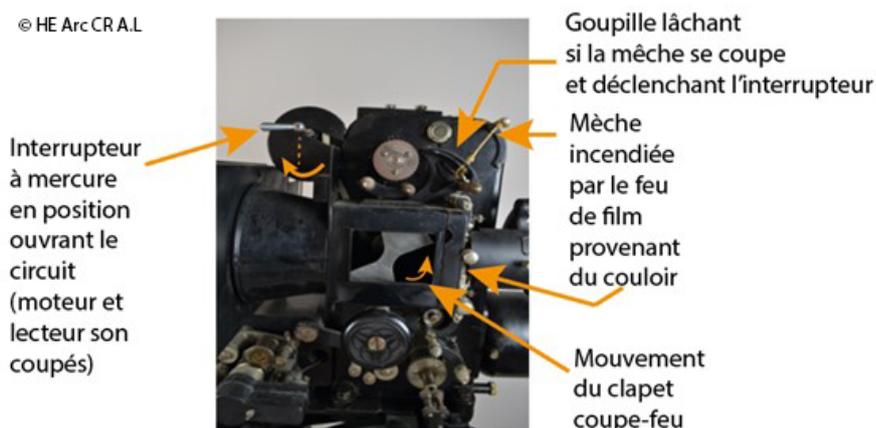


Figure 23. Double interrupteur à mercure, Ernemann IV 1926 ©HE Arc CR A.L 2019

PCB

Projecteur cinématographique de salle Micron 18, daté de 1958, conservé au Centre de recherche et d'archivage de la Cinémathèque suisse

Parmi les appareils du corpus étudié, quatre condensateurs à tubes ont été identifiés dans l'amplificateur d'un projecteur Micron 18, daté de 1958. Trois de ces quatre condensateurs ont été produits par le fabricant Icar – Slimotor, mais leur date de fabrication n'est pas visible du fait de leur montage sur l'appareil. On peut ainsi prendre en considération le fait que ces condensateurs soient fixés sur un projecteur des années 1950 et le fait qu'aucune information écrite ne confirme la présence de PCB sur les composants. La consultation du *Répertoire des condensateurs* permet de classer l'ensemble des condensateurs produits avant 1981 par Icar– Slimotor avant – sauf une exception - comme appareils contenant des PCB [12]. Dans le cas où l'un de ces condensateurs se dégraderait, une analyse de son huile pourrait confirmer le diagnostic [1].

Échelle des dangers**Amiante***Facteurs intrinsèques à la matérialité*

La considération des différents types de matériaux amiantés et de leur potentiel de libération des fibres dans l'environnement permet d'appréhender l'identification et l'évaluation des risques liés à ce matériau [16].

L'amiante en plaque faiblement aggloméré libère des fibres d'amiante dans un état stable du fait de vibrations ou de la circulation de l'air environnant, ce qui est accentué dans un état altéré.

L'amiante pur tressé ou tissé libère des fibres dans un état stable, notamment lors de sa manipulation, le phénomène s'accroissant lors de son abrasion et sa dégradation.

L'amiante en 'carton' fortement aggloméré ne libère pas de fibres dans un état stable. Cependant, son altération mécanique par perçage, tronçonnage ou cassure engendre la libération de fibres. L'apport important d'humidité sur un carton amianté peut aussi amener sa rupture [5]. Une humidité relative élevée est ainsi un facteur de dégradation à considérer.

La mise en forme des supports amiantés, étant pour la plupart percés pour être fixés, engendre également un affaiblissement au niveau des points de fixation [1].

Facteurs liés au fonctionnement des appareils

La manipulation de la lanterne, pouvant consister à une ouverture de porte ou au branchement d'un câble amianté accroît le risque d'émission des fibres.

Aussi, la dégradation généralisée des supports amiantés dans les lanternes, les carters et sur les résistances se manifeste par une perte de cohésion matérielle, une pulvérulence et des soulèvements de fibres importants.

L'activité fonctionnelle dans une lanterne engendre un dégagement de chaleur soutenu de la lampe à arc, mais aussi des projections de fumée et de suie depuis ses charbons. Malgré les propriétés ignifuges et la dureté plus importante de l'amiante (2,5 à 3 Mohs [17]) en comparaison avec la suie (1 à 2 Mohs [18]), cette dernière engendre un brunissement de l'amiante à proximité de l'arc, couplée à des soulèvements importants du matériau [1] générant sa fragilité à long terme.

Dans le cas des résistances, le dégagement de chaleur contribue également à leur dégradation, tout comme le réglage de leur molette, générant un phénomène d'abrasion de surface.

Dans les carters à bobine des projecteurs, le mouvement produit par les bobines lors de leur fonctionnement, ainsi que leur manipulation par l'utilisateur peuvent engendrer une dégradation mécanique de l'amiante [1].

Mercurie

Facteurs intrinsèques à la matérialité

L'évaluation des risques liés au mercure passe par la localisation des contenants à mercure en couplant observation et documentation technique. La quantification du mercure et le constat d'état de chaque contenant peuvent alors être effectués [8]. Celle-ci a été estimée par calcul à 21 grammes pour un interrupteur et à 1,5 kg pour un redresseur à mercure [1]. À l'aide d'une source lumineuse en lumière rasante et d'une loupe, il est ainsi possible d'identifier des fissures ou des fuites reconnaissables par la présence proche de perles de mercure.

Toutefois, il est également important de considérer l'âge de l'objet et de son support, ces derniers engendrant une fragilité mécanique, malgré l'absence d'altérations visibles du verre [8].

Facteurs liés au fonctionnement des appareils

La sensibilité du mécanisme de coupe-feu est inhérente à sa fonction sécuritaire dans l'appareil de projection. L'interrupteur à mercure est alors relié mécaniquement à une goupille pouvant engendrer son basculement de 30° C. Cette propriété du mécanisme conjointe à la masse relativement lourde du mercure peuvent, dans le cas du mouvement ou de la manipulation de l'objet, générer une contrainte du métal sur son contenant ancien [1].

Dans le cas du bris d'un récipient contenant du mercure à température ambiante (~25°C), la vaporisation du mercure reste lente, ce qui permet la collecte des billes de mercure à l'aide d'une éponge Bürkle ou d'une seringue, puis la sécurisation du matériau dans un récipient hermétique en verre ou en polypropylène. Toutefois il est à noter que la quantité de vapeur de mercure varie fortement avec la température ambiante. Ainsi, par rapport à une température ambiante à 20°C, la quantité de vapeur de mercure produite triple à 40°C : le port d'un équipement de protection respiratoire adéquat est alors primordial [8].

PCB

Facteurs intrinsèques à la matérialité

Pour les PCB, le risque est d'abord propre à la matérialité des condensateurs, combiné aux facteurs de température et d'humidité relative. Les contacts métalliques des composants peuvent être recouverts de caoutchouc gainé de textile. Ce matériau sensible peut alors devenir cassant et, dans un stade de dégradation plus avancé, se réduire en poudre, induisant ainsi des courts-circuits partiels ou totaux.

Le caractère composite des condensateurs en papier métallisé est également un facteur de risque. Ils peuvent être constitués de paraffine, de bitume, de cire ou de polymères absorbant l'humidité, ce qui réduit leurs propriétés isolantes [20]. C'est pour cela qu'en pratique, les condensateurs sont remplacés tous les 20 à 30 ans, du fait de leur durée de vie limitée [9].

On repère un condensateur altéré à son état fondu ou gonflé, ainsi qu'à ses isolants pouvant couler [8]. Si ce condensateur contient des PCB, cela induit un risque important pour la santé du collaborateur, mais aussi une décontamination inévitable relativement onéreuse.

Facteurs liés au fonctionnement des appareils

La mise en fonction des appareils contenant des condensateurs est également un facteur de risque important. Un usager souhaitant relier un appareil au courant électrique sans avoir auparavant diagnostiqué la capacité et la possible fuite des condensateurs ainsi que l'état du moteur, s'expose à plusieurs risques. En effet, un appareil qui n'a pas reçu de courant depuis un certain temps reçoit alors une tension élevée pouvant provoquer une surtension ou l'explosion des condensateurs [13], impliquant la projection d'éclats de métal et de produits chimiques en fusion [11].

Aussi, le moteur bloqué d'un projecteur peut engendrer des soucis de tension des condensateurs [13]. Dans les amplificateurs, les condensateurs en papier métallisé peuvent alors chauffer à une tension de 600 à 800V et provoquer une mise à terre [20]. Dans les moteurs ou sur des interrupteurs ouverts, les condensateurs ne sont pas protégés. Un risque de dommage initié par un mouvement pour un transport des objets pourrait ainsi induire une tension au niveau des contacts des composants.

Synthèse des risques

Parmi ces trois matériaux, l'amiante constitue le risque le plus élevé pour les collaborateurs, tout comme pour la contamination des espaces de stockage et de travail. Les supports en amiante pur altéré ainsi que ceux faiblement agglomérés libèrent des fibres du simple fait du passage de l'air ou de vibrations. L'état majoritairement altéré des supports amiantés des objets du corpus étudié rend toute opération quotidienne de travail dangereuse pour les collaborateurs.

Dans le cas du mercure, seul un incident mécanique lié à la manipulation des contenants en verre pourrait exposer les collaborateurs et l'environnement direct de l'objet.

Pour les PCB, la mise en fonction des projecteurs cinématographiques constitue le plus grand risque, puisqu'elle peut avoir pour conséquences un court-circuit de l'appareil ou l'explosion du condensateur [1].

Conservation préventive et curative

Recommandations de conservation

Une température environnant les 18°C et une humidité relative comprise entre 40 et 55% est recommandée pour la conservation de ces objets composites et plus spécifiquement des matériaux les plus sensibles : le mercure et les polymères des condensateurs en regard de la température d'une part ; l'amiante et les matériaux constitutifs des condensateurs vis-à-vis de l'humidité relative d'autre part. La température basse limite la vaporisation du mercure, tandis qu'une humidité relative modérée est adéquate à la conservation des matériaux organiques et des métaux.

Une signalétique désignant les objets contenant de l'amiante, du mercure, des PCB et ceux suspectés d'en contenir doit figurer dans l'inventaire, sur les objets, à l'entrée du lieu de stockage et sur les armoires d'entreposage.

Il est recommandé d'emballer les objets amiantés dont les supports n'ont pas été stabilisés dans un double emballage en polyéthylène [5]. De même, des récipients en polyéthylène ou en verre peuvent être disposés sous les contenants à mercure non protégés par la structure de l'appareil de projection, afin de prévenir toute fuite [8]. Une analyse de la concentration en fibres d'amiante dans l'air des dépôts est impérative pour la sécurité des collaborateurs et des collections. Aussi, une veille annuelle de l'état des supports amiantés stabilisés, des condensateurs et des contenants à mercure peut constituer un suivi adapté à ces matériaux [1].

Manipulation et sécurité

La manipulation, le transport et le traitement des objets contenant des matériaux dangereux s'envisagent suite à une évaluation préalable des risques. Ils s'effectuent avec des équipements de protection individuelle adaptés et conformes aux normes du pays d'exercice. La réglementation, les valeurs moyennes d'exposition et les institutions compétentes en Suisse sont détaillées dans la source [1].

Méthode de stabilisation de l'amiante

Ce point est illustré à travers l'exemple du projet de restauration d'une lanterne de projection [2]. Dans le cadre de ce projet, cinq panneaux d'amiante en feuilles faiblement aggloméré ont été stabilisés afin d'être conservés dans l'objet. Le but de ce traitement est de couvrir les fibres microscopiques d'amiante afin d'éviter leur détachement des supports, et, dans le cas où elles se dissocient, qu'elles soient suffisamment grandes pour être éliminées du corps humain.

Les critères pour mener à bien ce traitement sont un recouvrement homogène du substrat, l'usage de résine acrylique pure, l'obtention d'un fini mat proche de celui du matériau et un changement de couleur limité.

Le liant Plexigum® PQ611 est un copolymère acrylique à 97% en masse soluble dans les esters, les cétones ainsi que les hydrocarbures aromatiques et aliphatiques. Deux concentrations (10 et 15% en volume) dans de la benzine 100/140 v/v ont été testées, ainsi que trois modes d'application : en bain, par seringue et au pinceau.

La concentration de 10% offrant un recouvrement homogène et un changement de couleur limité, les surfaces plates des plaques ont été enduites goutte à goutte à l'aide d'une seringue et les bordures ont été traitées à l'aide d'un pinceau plat, sécurisant l'ensemble des fibres soulevées [2].

Conclusion

L'étude de l'amiante, du mercure et des PCB dans les objets techniques cinématographiques patrimoniaux exprime l'importance de prises en charge de conservation préventive, curative et de restauration adaptées, permettant de préserver l'intégrité et la compréhension de ces objets de manière sécurisée. La proposition de critères d'identification de ces matériaux en corrélation avec leur fonction va également dans ce sens.

L'identification et l'évaluation des risques sont également indispensables afin de temporiser les inquiétudes pouvant être ressenties face à ces matériaux toxiques et mettre en place des protocoles efficaces et sécurisants pour les collaborateurs et les collections.

Remerciements

Je remercie vivement les professionnels de la Haute École Arc en conservation-restauration, qui m'ont permis d'explorer cette thématique qui m'est chère dans le cadre de deux projets de diplôme. Je remercie également les équipes du Centre de recherche et d'archivage de la Cinémathèque suisse et du Centre des collections du Musée national suisse, pour leur accueil enthousiaste. Je remercie aussi l'ensemble des personnes ayant contribué à mes recherches par la transmission de savoirs précieux et leur bienveillance.

Références

- [1] <https://sonar.ch/hesso/documents/313413>, consulté le 15/09/2024
- [2] <https://sonar.ch/hesso/documents/313399>, consulté le 15/09/2024
- [3] <https://www.cinematheque.ch/la-cinematheque/centres-de-recherche-et-darchivage>, consulté le 19/08/2024
- [4] <https://www.sammlungszentrum.ch/fr>, consulté le 19/08/2024
- [5] http://www.art-conservation.fr/colloques/2007/11_ECHINARD.pdf, consulté le 22/08/2024
- [6] <https://polludoc.ch/fr/materiel/tissus-cordons-coussins-amiante-pur> consulté le 22/08/2024

UNE HISTOIRE DE DANGERS : LE DÉMÉNAGEMENT DES COLLECTIONS INDUSTRIELLES D'INGENIUM

Skye Marshall, Jacqueline Riddle*

Ingenium – Musées des sciences et de l'innovation du Canada, Ottawa, Ontario, Canada

 jriddle@ingeniumcanada.org

Traduction de l'article publié dans *CONSERVAR PATRIMÓNIO* 44 (2023) p.15-29
<https://doi.org/10.14568/cp29217> , ISSN 2182-9942

* Atrice correspondante

Résumé

En 2018, Ingenium a entrepris un déménagement de collections à grande échelle, en regroupant les objets de quatre entrepôts de location dans une nouvelle réserve spécialement conçue. Les risques liés aux collections ont été évalués, hiérarchisés et traités conformément au programme complet de gestion des risques liés aux collections (PGRC) d'Ingenium, plaçant la santé et la sécurité au premier plan de la conservation des collections. Cet article présentera l'évaluation et la réduction des risques dans un entrepôt, notamment la collection de la réserve du bâtiment 2421 qui a présenté des défis surmontés pour déplacer une grande collection industrielle dans un délai restreint et avec un personnel et des ressources limités. Une sélection d'études de cas fournira des exemples de réduction des risques liés aux objets contenant de l'amiante, de la radioactivité, des biphényles polychlorés (PCB) et du mercure. Les études de cas montrent comment des solutions simples et des traitements de triage ont été mis en œuvre par les restaurateur(trice)s et les entrepreneurs spécialisés afin de réduire les risques liés aux collections pendant le projet de déménagement. Le déménagement de la collection de la réserve du bâtiment 2421 a été achevé en décembre 2021 et le déménagement complet des collections a été finalisé en août 2022.

Mots clés

Déménagement de collections, Amiante, Biphényles polychlorés (PCB), Mercure, Radioactif, Collections dangereuses

Abstract

In 2018, Ingenium began a large-scale collections move, consolidating artefacts from four rental warehouses into a new purpose built storage facility. Collection hazards were assessed, prioritised and treated according to Ingenium's comprehensive Collection Risk Management Program (CRMP), placing health and safety at the forefront of collections care. This paper will present hazard assessment and mitigation in one warehouse, the Building 2421 Reserve Collection,

showing the challenges overcome to move a large industrial collection on a tight schedule and with limited staffing and resources. A selection of case studies will provide examples of hazard mitigation in artefacts containing asbestos, radioactivity, polychlorinated biphenyls (PCBs) and mercury. The case studies demonstrate how simple solutions and triage treatments were implemented by conservators and specialised contractors in order to mitigate collection hazards during the move project. The Building 2421 Reserve Collection move was completed in December 2021 and the full collections move was completed in August 2022.

Keywords

Collections move, Asbestos, Polychlorinated biphenyls (PCBs), Mercury, Radioactive, Hazardous collections

Introduction

Nous commençons comme toutes les bonnes histoires : il était une fois... dans un pays lointain, très lointain, où les hivers sont froids et les étés chauds, une société muséale du nom d'Ingenium... Nichée dans la capitale du Canada, la ville d'Ottawa, Ingenium gère trois musées nationaux situés sur trois campus distincts : le Musée de l'aviation et de l'espace du Canada (MAEC), le Musée des sciences et de la technologie du Canada (MSTC) et le Musée de l'agriculture et de l'alimentation du Canada (MAAC). Les trois musées contiennent une variété d'objets de l'histoire scientifique et technologique, avec un accent particulier sur le Canada.

Auparavant, les collections d'Ingenium étaient stockées dans quatre entrepôts de location. Une nouvelle installation de stockage spécialement conçue, le Centre Ingenium, a récemment été construite pour abriter les 165 000 objets de grande et de petite taille. De 2018 à août 2022, les personnages de notre histoire ont travaillé à la préparation et au déménagement des objets dans leur nouveau domicile, trouvant et résolvant les problèmes d'entretien des collections en cours de route.

Parmi les quatre bâtiments locatifs anciens et désuets se trouvait la réserve du bâtiment 2421, qui comprenait 5 500 artefacts industriels. Cet espace de collections industrielles comprenait des milliers d'artefacts acquis après la fermeture du Musée des progrès de l'électricité d'Ontario Hydro en 1992 ainsi que deux salles de stockage de radioactivité. Cependant, l'espace de stockage des collections était surpeuplé, ce qui a entraîné une multitude de problèmes en raison du manque d'accès. Le déménagement des collections a été l'occasion de corriger certaines lacunes en matière de conservation de collections et de répondre aux normes modernes de conservation. Des recherches documentaires et des consultations sur place avec d'autres musées nationaux et internationaux ont aidé aux étapes de planification avant le déménagement de la collection.

Trois restauratrices ont travaillé à temps plein à l'évaluation et à la réduction des risques dans la réserve du bâtiment 2421. Le personnel de restauration a dirigé le projet de déménagement ainsi que l'évaluation et la réduction des risques, la stabilisation physique et l'emballage ou la palettisation de chaque artefact. Une équipe de manutentionnaires d'artefacts, de socleurs, de catalogueur(euse)s d'artefacts, et de conservateur(trice)s a partagé son temps entre cette collection et les trois autres bâtiments ; et des entrepreneurs ont été appelés pour effectuer des travaux spécialisés. Les 5 500 objets ont été déplacés sur 12 mois entre octobre 2020 et décembre 2021, plusieurs confinements liés au COVID-19 ayant entraîné l'arrêt des travaux.

Contexte du projet : dangers dans les collections

De nombreux artefacts d'Ingenium ne pouvaient pas être déplacés légalement sans avoir réduit au préalable les dangers inhérents. Les lois et règlements qui régissent l'étiquetage, l'entreposage, le déplacement et l'élimination des matières dangereuses à l'échelle industrielle s'appliquent souvent également dans les musées. Les restaurateurs d'Ingenium ne sont pas des professionnels certifiés en santé et sécurité, mais ont servi d'experts de facto en gestion des risques liés aux collections pendant le déménagement.

La gestion des risques a toujours fait partie des pratiques des collections d'Ingenium. Des évaluations avaient auparavant lieu au besoin, mais une évaluation systématique des risques n'était pas possible dans les anciens espaces de collections surpeuplés. En 2018, un plan complet de programme de gestion des risques liés aux collections (PGRC) a été mis en œuvre. Le nouveau PGRC a placé la sécurité du personnel et des visiteurs au premier plan de nos pratiques de conservation des collections, en donnant la priorité à la gestion des risques dans le but ultime de rendre nos espaces de collections plus accessibles physiquement au public canadien. Le début du PGRC s'est aligné sur le début du déménagement, offrant l'occasion d'évaluer systématiquement chaque artefact de la collection.

Des documents écrits, appelés "Évaluation des risques liés aux artefacts et procédures de travail sécuritaire" (ERPS) pour chaque type de danger, sont des documents de lecture obligatoires pour toutes les personnes travaillant dans ces espaces de collections. Les ERPS servent de point de départ pour informer le personnel et les bénévoles des risques et des pratiques de sécurité de travail pour prévenir chaque danger, leur permettant d'élaborer des protocoles de déplacement en toute sécurité. L'étiquetage suit le Système Général Harmonisé (SGH) pour les objets contenant un produit chimique connu. Nous avons également des étiquettes pour les dangers non SGH, par exemple : les pneus à jantes fendues, ou des objets à énergie mécanique stockée. Les étiquettes sont imprimées sur du papier cartonné et attachées à l'objet lorsque le danger est identifié. Les dangers sont signalés numériquement dans notre base de données de gestion du musée avec une icône apparaissant dans le fichier de base de données pour indiquer la présence de matières dangereuses.

Une histoire d'amiante

L'amiante dans les collections des musées

Les matériaux contenant de l'amiante (MCA) sont largement présents dans les objets fabriqués industriellement en raison de leur résistance à la chaleur et aux produits chimiques. L'amiante est un groupe de minéraux fibreux d'origine naturelle utilisé depuis la préhistoire. Il a été commercialisé et est devenu courant dans une variété de produits à la fin des années 1800 après la révolution industrielle [1]. L'histoire industrielle du Canada est étroitement liée à l'extraction et à la fabrication de l'amiante, le pays en ayant été un important fournisseur d'amiante dans le monde. Son extraction au Canada n'a cessé qu'en 2011, des décennies après avoir été déclaré cancérigène pour l'homme par le Centre international de recherche sur le cancer de l'Organisation mondiale de la santé en 1987 [2]. Les effets à long terme de l'exposition à l'amiante sur la santé sont bien connus, notamment les mésothéliomes, les maladies pulmonaires et les cancers [3].

Les MCA sont répandus dans les collections des musées du monde entier. L'amiante peut être présent dans des objets dotés d'un élément chauffant, comme des grille-pains, des fours et des lampes, des textiles historiques, des matériaux d'isolation, des joints, des tuyaux d'incendie, des spécimens d'histoire naturelle et minéralogiques, ainsi

que dans de nombreux autres objets communs aux collections scientifiques. Bien que l'amiante soit souvent mentionnée sur les sites Web des musées consacrés aux dangers, la littérature sur la conservation présente une pénurie relative d'articles traitant des traitements possibles pour les objets en MCA [4].

Réduction de l'amiante chez Ingenium

Chez Ingenium, la réduction des risques liés à l'amiante se divise généralement en trois catégories : l'élimination, l'isolement ou l'encapsulation. Les lois provinciales dictent quel traitement est approprié pour quel type et quelle quantité d'amiante, et si le traitement peut être effectué par les restaurateurs d'Ingenium ou par un entrepreneur externe spécialisé [5]. Le cas échéant, la partie en MCA peut être retirée de l'objet et éliminée comme déchet dangereux en consultation avec le conservateur ou conservatrice. Alternativement, les petits objets ou les parties de grands objets peuvent être isolés en les scellant dans des enceintes à double couche de feuilles de polyéthylène de 0,15mm (6 mil). Lorsque l'enlèvement ou l'élimination de la partie n'est pas possible, ou que l'importance historique de la partie en MCA l'emporte sur sa nature dangereuse, l'encapsulation peut être une stratégie appropriée d'atténuation des risques.

Il existe diverses méthodes d'encapsulation de l'amiante. Une discussion détaillée de ces processus dépasse le cadre de cet article. Cependant, une méthode utilisant deux produits de décontamination est couramment utilisée chez Ingenium : Childers CP-240 CHIL-LOCK (transparent), pour mouiller les fibres d'amiante et les consolider en vue d'un traitement ultérieur, et Childers CP-211 CHILBRIDGE, un encapsulant blanc de type pâte [6-7]. Ces produits peuvent être utilisés en toute sécurité et légalement au Canada pour la décontamination de l'amiante.

Étude de cas : deux machines à vapeur

L'histoire de cette section commence avec deux machines à vapeur, toutes deux contenant de l'amiante friable. Elles ont été sélectionnées parmi 436 traitements à l'amiante effectués lors du déménagement de la collection du bâtiment 2421. La première machine à vapeur de notre histoire est une machine Corliss fabriquée par E. Leonard & Sons à London, en Ontario, en 1903 (Figure 1), qui était principalement utilisé dans les industries du textile et de la métallurgie.

Lors de l'évaluation de l'artefact avant son déplacement vers la nouvelle réserve, nous avons découvert une épaisse couche d'isolant en amiante sous le revêtement métallique. L'amiante était à l'air libre au fond (Figure 2a). Les restaurateurs d'Ingenium possèdent une certification d'amiante de type 1 et 2 de l'Ontario, ce qui nous permet de traiter jusqu'à 1 m² d'amiante friable dans nos artefacts [8]. Cependant, comme nous avons estimé qu'environ 3 m² d'amiante étaient présents, nous étions tenus par la loi de faire appel à des spécialistes de l'amiante de type 3 pour travailler sur cet artefact.

Les entrepreneurs spécialisés ont construit une enceinte autour du carter du moteur à partir d'un cadre en bois et d'une bâche en plastique (Figure 2c). L'élimination de l'amiante a été effectuée à l'intérieur de cette enceinte, et seuls les entrepreneurs spécialisés pouvaient y entrer pendant les travaux. Nous avons discuté en détail de l'étendue des travaux et des étapes exactes à suivre avec les entrepreneurs, en effectuant des contrôles à intervalles réguliers pendant les deux jours de travail. Autant d'amiante friable que possible a été retiré, en remplissant le vide avec de l'isolant en laine de roche et en appliquant une pièce en toile avec un encapsulant (Figure 2b). Les maté-

riaux utilisés lors de leur traitement n'ont pas été testés pour leur stabilité à long terme, mais répondent aux exigences légales en matière de réduction de l'amiante. De tels traitements augmentent l'accessibilité globale de nos collections, car nos nouvelles zones de stockage sont plus sûres pour le personnel, les visiteurs et les autres personnes qui manipulent la collection.

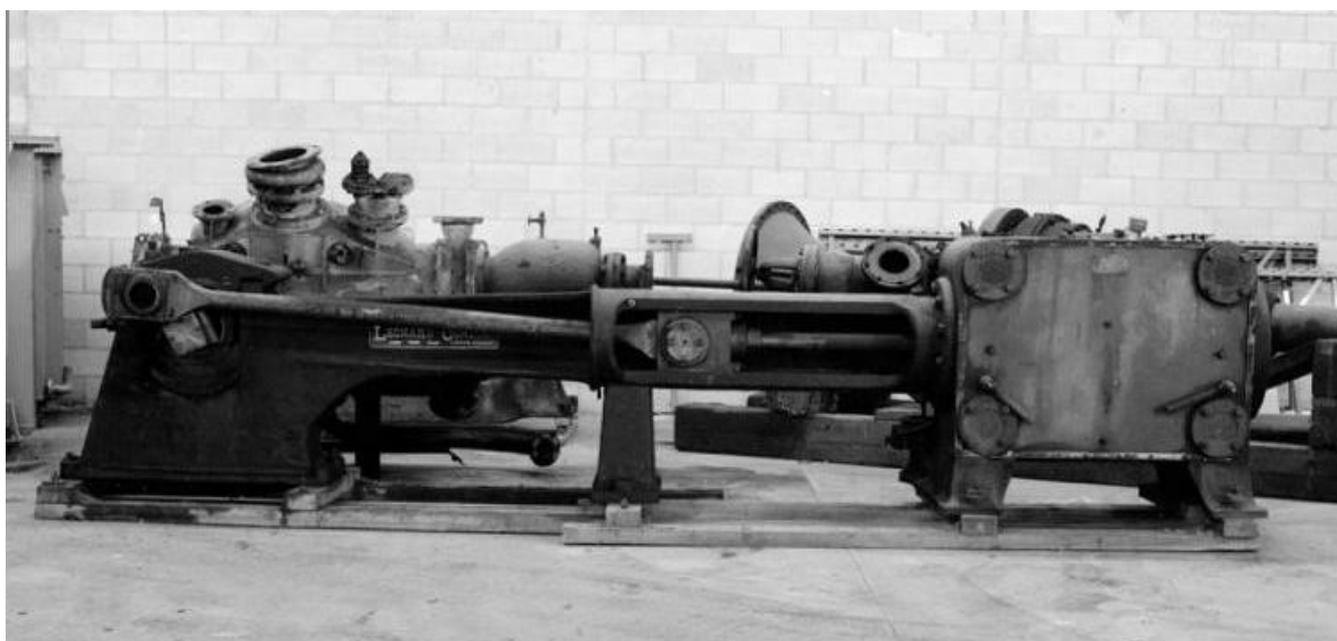


Figure 1. Machine à vapeur Corliss, vers 1903, fabriquée par E. Leonard and Sons à London, Ontario, Canada (numéro d'artefact 1980.0526).

En raison de la taille des déchirures et de l'extrême friabilité de l'amiante, nous n'avons pas pu appliquer directement les consolidants, car cela provoquait un détachement supplémentaire de l'amiante de l'objet. L'élimination de l'amiante n'était pas non plus pratique, car elle aurait compromis l'intégrité visuelle de l'objet et exposé davantage d'amiante, ce qui aggraverait le risque. Nous avons décidé qu'une méthode de patch serait la meilleure solution pour encapsuler les zones déchirées. Nous avons travaillé sur cet objet en portant un respirateur à particules P100, une protection oculaire, une combinaison à capuche Tyvek et des gants en nitrile (Figure 3c). Les surfaces ont été aspirées avec un aspirateur HEPA avant et après le traitement. Nous avons trempé la zone avec un agent d'élimination de l'amiante (CP-240) pour mouiller les fibres d'amiante et les préparer à l'encapsulation, comme l'exige la réglementation sur l'amiante [5]. Nous avons ensuite appliqué un patch en toile et un encapsulant épais et pâteux blanc (CP-211) pour contenir complètement les zones endommagées. Ce protocole de traitement suivant les pratiques courantes de l'industrie a été mis en œuvre en consultation avec des entrepreneurs spécialisés conformément à la réglementation en vigueur.



a



b



c

Figure 2. Traitement de l'amiante dans la machine à vapeur Corliss (numéro d'artefact 1980.0526) par des entrepreneurs spécialisés : a) vue détaillée avant traitement ; b) vue détaillée après traitement ; c) pendant le traitement montrant l'enceinte construite sur mesure.

La deuxième machine à vapeur de notre histoire est une machine à vapeur à flux unique datant d'environ 1920, fabriquée par Fitchburg Steam Engine Co. et utilisée dans un laboratoire d'ingénierie de l'Université de Toronto. Lors de notre évaluation de l'état des lieux avant le déménagement, nous avons découvert de l'amiante friable dans le logement isolé (Figure 3a). Dans ce cas, il s'agissait d'une surface inférieure à 1 m², ce qui a permis de le traiter en interne. L'isolant en amiante était situé sous une couche de toile verte peinte et était relativement bien encapsulé lors de la conception. Cependant, de l'amiante friable était présent au niveau des joints et dans deux zones endommagées.

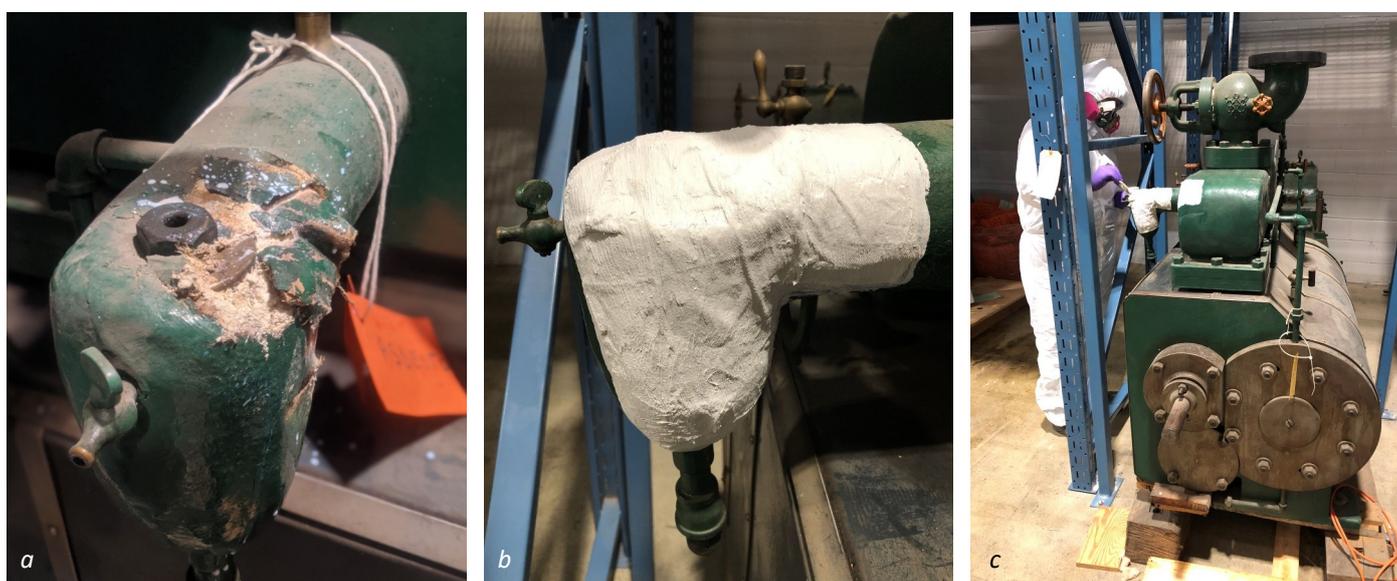


Figure 3. Encapsulation d'amiante friable par les restaurateurs d'Ingenium (numéro d'artefact 1969.1317) :

a) détail d'une zone friable avant traitement ; b) détail d'une zone après traitement ;

c) pendant le traitement montrant un restaurateur portant un EPI.

Le traitement final est visuellement discordant avec l'artefact environnant, mais diminue efficacement le danger (Figure 3b). Étant donné le calendrier extrêmement serré du projet de déménagement des collections, notre équipe évaluait, traitait et déplaçait des dizaines d'artefacts par jour et seulement une heure et demi était consacrée à la documentation, au traitement et à la rédaction du rapport de ce grand artefact. En tant que professionnels de la conservation, il est important de partager une diversité de traitements (pas seulement les plus jolis), et nous sommes réconfortés par le fait que le traitement final a rendu ces artefacts sûrs pour le déménagement et leur manipulations. À l'avenir, il sera possible de retraiter les zones encapsulées pour les rendre plus esthétiques, par exemple en les peignant pour qu'elles correspondent à la couleur verte du boîtier de la machine à vapeur environnante.

Une fois le risque d'amiante réduit, les deux machines à vapeur étaient prêtes à être déplacées vers le nouveau centre Ingenium spécialement construit à cet effet. Cependant, les deux machines à vapeur étaient trop lourdes pour être déplacées par nos propres chariots élévateurs. Par conséquent, nous avons engagé des déménageurs spécialisés en machinerie lourde pour déplacer ces objets et d'autres objets en surpoids dans la collection de réserve 2421.

Une histoire de radioactivité

Les risques radioactifs dans les collections des musées

La collection radioactive d'Ingenium comprend une variété d'objets dont des cadrans d'avion, des échantillons de minerai et des produits de bien-être historiques dont on pense (à tort) qu'ils ont des effets positifs sur la santé. Les effets des rayonnements sur la santé sont bien connus, notamment sur les modifications de l'ADN, le cancer, le syndrome d'irradiation aiguë (SRA) et les lésions cutanées dues aux radiations (CRI) [9]. Les rayonnements haute fréquence ou ionisants comprennent les rayons alpha (α), bêta (β) et gamma (γ). Les particules alpha ne peuvent pas pénétrer la peau, mais causent des dommages lorsqu'elles sont inhalées ou ingérées dans le corps. Les particules bêta peuvent pénétrer la peau, mais peuvent être bloquées par des vêtements ou d'autres barrières minces. Les effets des rayonnements β sont moins nocifs que ceux des rayonnements α , bien qu'une fois de plus, les dommages les plus importants soient causés par l'ingestion ou l'inhalation [10]. Les rayonnements gamma sont la source de la plus grande préoccupation en matière d'effets sur la santé. Ils sont capables de pénétrer et de causer des dommages lorsqu'ils traversent le corps humain, et nécessitent un blindage épais et dense [10]. Ces trois types de rayonnement constituent les risques de rayonnement auxquels sont confrontées les collections d'un musée. Alors que les rayonnements α et β sont particulièrement préoccupants sous forme de poussière radioactive et de peintures écaillées, les rayonnements γ sont préoccupants sous toutes leurs formes. Un cadran luminescent, par exemple, présenterait un risque d'exposition aux rayonnements γ en fonction de la proximité du cadran, mais la peinture écaillée ou la fine poussière de radium qui se détache du cadran présentent un risque de dommages α et β en cas d'ingestion, d'inhalation ou de pénétration dans le corps par une coupure.

Les équipements de protection individuelle peuvent aider à se protéger des rayonnements α et β . Les combinaisons Tyvek, ainsi que les gants en nitrile et les masques respiratoires complets peuvent garantir que la poussière radioactive ne pénètre pas dans le corps. Les rayonnements gamma doivent être gérés différemment, en réduisant la proximité d'une source radioactive et en réduisant la durée d'exposition [11]. Dans le cas du déménagement à grande échelle des collections d'Ingenium, la décision a été de limiter le temps d'exposition aux rayonnements en travaillant aussi rapidement et efficacement que possible avec ces artefacts. Les doses de rayonnement de chaque artefact ont été mesurées à l'aide d'un compteur Geiger RadEye G-10 pour le rayonnement γ . Un radiamètre Dosimeter 3700 a été utilisé pour mesurer les rayonnements α et β , et les restauratrices portaient des dosimètres corporels et annulaires pour mesurer les expositions individuelles.

Le transport, l'élimination et le stockage des matières radioactives sont réglementés par le gouvernement fédéral au Canada en vertu de la Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires (L.C. 1997, ch. 9) [12]. Afin de garantir que nos processus respectent la législation applicable, nous avons consulté la Commission canadienne de sûreté nucléaire. Ingenium gère les matières radioactives dans les collections depuis des décennies. Sue Warren, ancienne responsable des services de conservation chez Ingenium, a publié sur ce sujet et sur le projet de cadran lumineux qui a eu lieu au début des années 2000 [13].

Étude de cas : une balance au radium

Notre histoire suivante concerne une balance au radium qui revêt une importance particulière pour l'histoire industrielle et radioactive du Canada. Cette balance analytique associant des poids, des bols et des outils a été utilisée à Port Hope, en Ontario, par la Eldorado Mining and Refining Company (Figure 4). Elle a servi à peser une partie du premier radium produit au Canada. Par conséquent, la balance était recouverte d'une couche de poussière radioactive. La poussière de radium est dangereuse lorsqu'elle est ingérée, inhalée ou en contact avec la peau, en raison de la présence de rayons γ , α et β . Notre première étape a consisté à prendre des mesures de rayonnement à la surface de différentes zones de la balance, qui indiquaient entre 2 et 12 $\mu\text{Siverts}$ par heure ($\mu\text{Sv/h}$) de rayonnement γ . Pour mettre les choses en contexte, une personne devait travailler avec cet artefact pendant 83 heures pour atteindre la limite de dose annuelle publique (APDL) de 1 milliSievert par an, un chiffre fixé par la Commission canadienne de sûreté nucléaire [14].

L'exposition directe aux radiations représentait donc un risque relativement faible pour cet artefact. Cependant, la poussière de radium représentait toujours un risque d'inhalation. Par conséquent, nous portions un équipement de protection individuelle comprenant des combinaisons Tyvek, des gants en nitrile et des respirateurs à particules lorsque nous travaillions avec cet artefact et d'autres artefacts radioactifs. Notre solution au problème de la poussière radioactive était assez simple. Nous avons enveloppé et scellé la balance dans une bâche en plastique pendant le déménagement, afin de garantir que la poussière serait contenue, et nous l'avons placée dans une boîte en



Figure 4. Balance analytique (numéro d'artefact 1969.1002)



Figure 5. La balance analytique radioactive (numéro d'artefact 1969.1002) contenue dans du plastique lors du déplacement des collections

Coroplast pour faciliter la manipulation (Figure 5). Une fois la balance déplacée vers le nouveau lieu de stockage des collections, le plastique a été retiré et éliminé avec nos EPI et d'autres déchets radioactifs. Cette approche très simple nous a permis de terminer le déménagement tout en conservant le radium historique laissé sur la balance. Les artefacts radioactifs sont maintenant dans leur nouveau lieu de stockage au Centre Ingenium, dans une salle spécialement conçue pour eux. Ils ont été placés de manière à ce que les niveaux de radiation sur les murs des couloirs et des pièces adjacentes soient inférieurs à $2,5 \mu\text{Sv/h}$, comme le recommande la Commission canadienne de sûreté nucléaire. Nous avons également installé un capteur de gaz radon avec alarme lumineuse visuelle à l'extérieur de la pièce. Le capteur évacuera automatiquement l'air à l'extérieur si les niveaux de gaz radon deviennent trop élevés, et l'exploitant du bâtiment sera averti.

Histoire des biphényles polychlorés (PCB)

Les dangers des PCB dans les collections des musées

Les biphényles polychlorés, ou PCB, sont une classe de composés hautement réglementée au Canada et à l'étranger. Ils causent une grande variété de problèmes environnementaux et de santé, notamment la bioaccumulation, les affections cutanées, les dommages neurologiques, les perturbations hormonales, les dommages à la fertilité et le cancer [15]. Le premier PCB a été synthétisé à la fin du XIXe siècle, mais la production industrielle n'a commencé qu'en 1929. Les préoccupations pour la santé ont été soulevées pour la première fois par la communauté médicale dès les années 1930, et en 1979, la fabrication des PCB a commencé à être réglementée. En 2001, les PCB ont été inclus dans la catégorie des polluants organiques persistants dans la Convention de Stockholm des Nations Unies [16].

Les PCB se trouvent généralement dans les objets manufacturés qui doivent résister à la chaleur et au feu. On les trouve le plus souvent dans les condensateurs, les transformateurs et les équipements électriques. Cependant, les PCB ont également été fréquemment utilisés dans les systèmes hydrauliques, les liquides de frein, les plastifiants, les peintures, les encres d'impression, les ballasts de lampes fluorescentes et le papier autocopiant. Les PCB ont également été utilisés comme pesticides et ont été retrouvés appliqués sur des objets en bois dans les collections des musées des beaux-arts [17]. Nos recherches jusqu'à présent se sont concentrées sur les huiles contenant des PCB [18], et nous avons récemment commencé à étudier les matériaux PCB solides.

Au Canada, la législation sur les PCB relève de la Loi canadienne sur la protection de l'environnement (1999), Règlement sur les PCB (DORS/2008-273) [19]. Les collections des musées ne sont actuellement pas considérées comme une exception au titre de la réglementation, par conséquent, les musées ne sont pas légalement autorisés à stocker des objets contenant des matériaux contenant plus de 50 ppm (ou $50 \mu\text{g}/100 \text{cm}^2$ de contamination de surface) de PCB. Les musées sont également tenus de déposer un rapport annuel détaillant les objets contenant des PCB dans leur collection. En vertu de la législation actuelle, les musées canadiens ont jusqu'en 2025 pour se conformer pleinement à la législation et peuvent être soumis à des inspections et à des amendes en cas de non-conformité.

Il a été démontré que la contamination de l'environnement par les PCB, ainsi que par d'autres substances toxiques bioaccumulables persistantes, affecte continuellement et de manière disproportionnée les peuples autochtones du monde entier [20]. En tant que musées au passé colonial, il est important de reconnaître que les dangers liés à nos collections continuent de contribuer à cet impact disproportionné, et que choisir de s'attaquer aux PCB et à leur

histoire implique de reconnaître cet impact et d'admettre notre responsabilité d'éliminer les PCB en toute sécurité à l'avenir.

Bien qu'Ingenium sache depuis longtemps que des PCB étaient présents dans notre collection, les tests et la documentation qui en a résulté ont été sporadiques. En 2014, un effort majeur a été fait pour commencer à tester les gros transformateurs remplis d'huile de la collection et pour effectuer des tests de qualité de l'air. Depuis 2019, des tests plus complets ont été effectués dans le cadre du déménagement de la collection achevé en août 2022. Une partie importante des tests et du traitement des matériaux PCB au cours de cette période a été réalisée dans la collection de réserve 2421.

Étude de cas : un magnétophone

Ce magnétophone a été utilisé entre 1963 et 1996 dans le cadre du système de diffusion régionale de la Société Radio-Canada au siège régional des services d'urgence de Nanaimo, en Colombie-Britannique (Figure 6). Le siège de Nanaimo était l'un des sept bunkers souterrains du Canada conçus pour abriter des responsables militaires et gouvernementaux en cas d'attaque nucléaire. Lors de l'évaluation de l'objet pour le déménagement des collections, nous avons trouvé à l'intérieur six condensateurs cylindriques noirs portant l'estampille Pyranol, un nom commercial de PCB.

Ce type de condensateur au Pyranol est rempli d'un matériau d'enrobage noir qui s'est détérioré, fondant lentement sur les surfaces inférieures (Figure 7a). Nous avons prélevé un échantillon et l'avons envoyé à un laboratoire d'analyse environnementale externe pour analyse par chromatographie en phase gazeuse avec détection par capture d'électrons (GC-ECD) selon la méthode 8082A de l'américaine Environmental Protection Agency afin de déter-



Figure 6. Lecteur de bande magnétique (numéro d'artefact 1996.0284)

miner ses niveaux de PCB [21-22]. Le résultat du test était de $32\ 100\ \mu\text{g}/100\ \text{cm}^2$, ce qui indique des niveaux extrêmement élevés de contamination de surface par les PCB, au-delà de la limite légale pour les musées au Canada. Les résultats du test et l'importance historique de l'artefact ont créé un dilemme. Les condensateurs ne pouvaient pas être conservés légalement, mais l'artefact lui-même devait rester dans la collection nationale. Après consultation avec le conservateur, nous avons déterminé que le retrait des condensateurs était la meilleure option, nous permettant de conserver légalement le reste de l'unité. En raison du niveau élevé de PCB, ce travail a été effectué par des entrepreneurs spécialisés dans la réduction des PCB, qui ont été engagés pour travailler sur un certain nombre d'artefacts à haut niveau de PCB. Les entrepreneurs ont retiré les condensateurs et décontaminé toutes les surfaces avec lesquelles le matériau d'enrobage était en contact à l'aide de Varsol sur des chiffons en coton. Nous avons directement supervisé les entrepreneurs et avons aidé au démontage de l'artefact si nécessaire. Nous avons également documenté le travail à l'aide de photographies numériques et de rapports de traitement écrits. La Figure 7b montre une zone après le retrait d'un condensateur cylindrique noir et le nettoyage des résidus de PCB. Six condensateurs ont été retirés et documentés photographiquement avec des descriptions écrites, puis ont été éliminés comme déchets de PCB.

Cette étude de cas fournit un exemple de l'un de nos protocoles d'atténuation des PCB dans les artefacts historiques. Pour d'autres types d'artefacts, d'autres méthodes d'atténuation des PCB telles que la vidange de l'huile de PCB ou la dépossession complète de l'artefact étaient plus appropriées [18]. Collectivement, nos protocoles de réduction des PCB garantissent un accès continu et sûr de nos collections.

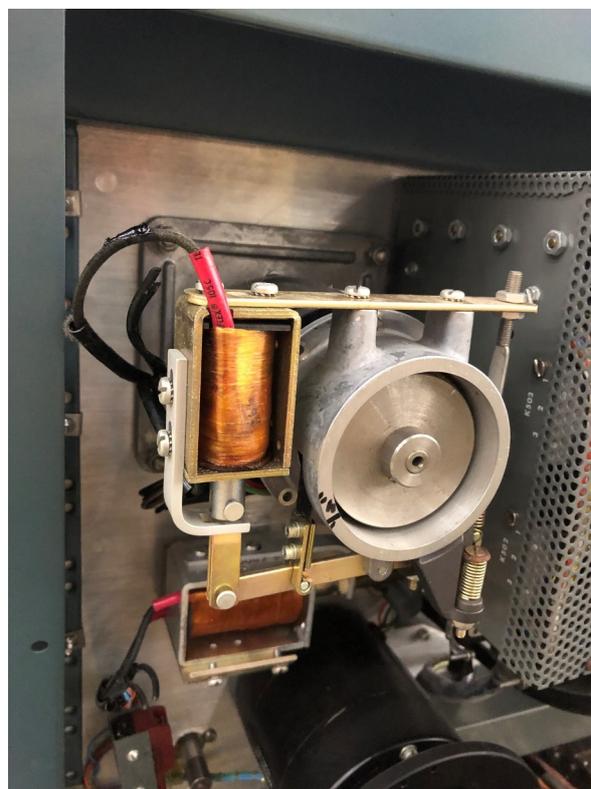


Figure 7. Réduction des risques liés aux PCB dans le magnétophone : a) avant le retrait du condensateur PCB (de marque Pyranol), montrant le matériau de fusion noir ; b) après le retrait du condensateur PCB.

Une histoire de mercure

Les dangers du mercure dans les collections des musées

Le mercure est une substance métallique élémentaire connue pour son état liquide à température ambiante et sa faible viscosité. Il provoque divers effets neurologiques et autres effets néfastes sur la santé et est particulièrement dangereux à l'état de vapeur [23]. Les effets du mercure comprennent des changements neuromusculaires, des lésions rénales, une instabilité de l'humeur et même la mort à des niveaux d'exposition élevés [24]. Comme le mercure s'évapore facilement, tout déversement de mercure est une source d'inquiétude dans une collection de musée. Un déversement se dispersera rapidement en une couche semblable à de la poussière sur toutes les surfaces environnantes, ce qui le rendra très difficile à nettoyer et augmentera la surface sur laquelle s'évaporer. Dans les collections des musées, le mercure est présent dans une variété d'objets, et plusieurs articles ont été rédigés sur les pesticides et pigments au mercure dans les collections [25-26]. Dans les collections d'Ingenium, le mercure est couramment présent dans les thermomètres, les baromètres, les médicaments, les pluviomètres, les pesticides sur les textiles, les collections de minéraux et la taxidermie, et les compteurs d'électricité. Ce mercure est présent sous des formes élémentaires, des composés organiques comme le méthylmercure, et dans des composés inorganiques comme les amalgames dentaires.

Étude de cas : caisses de compteurs électriques

L'un des défis auxquels nous avons été confrontés lors du déménagement de la collection était de grandes caisses remplies d'objets inconnus et non catalogués datant des débuts de l'histoire de l'électricité. Bon nombre de ces caisses n'avaient pas été ouvertes depuis leur arrivée en 1992, après la fermeture du Musée des progrès de l'électricité d'Ontario Hydro. Les journaux et les magazines utilisés comme matériel d'emballage indiquaient que les caisses avaient probablement été emballées pour la dernière fois dans les années 1960 et 1970. À leur arrivée à Ingenium, chaque caisse avait reçu un numéro d'accession global à des fins de suivi, mais seules quelques caisses avaient été évaluées ou réemballées par le personnel d'Ingenium. Il y avait environ 30 caisses, chacune contenant en moyenne 100 compteurs et autres petits composants électriques. Il est immédiatement devenu évident que la présence d'objets non étiquetés et instables contenant du mercure dans ces caisses était très préoccupante.

Lors de l'inspection de l'une des premières caisses, nous avons trouvé une petite fuite de mercure dans le matériau d'emballage. Cet incident a donné lieu à une évaluation approfondie de chaque caisse afin de nous assurer que nous ne négligeons pas le risque d'un déversement supplémentaire de mercure. Grâce à cette évaluation, nous avons déterminé que le risque était le plus élevé dans deux situations. Tout d'abord, certains compteurs étaient équipés d'un interrupteur à mercure. Ceux-ci se trouvaient parfois dans un boîtier de câblage supplémentaire sur le compteur, mais d'autres fois, ils n'étaient découverts qu'en ouvrant l'appareil. La Figure 8 montre deux exemples d'interrupteurs à mercure situés à l'intérieur de deux compteurs.

Le deuxième risque lié au mercure dans cette collection était beaucoup plus facile à identifier. Les compteurs à

mercure, tels que ceux fabriqués par Ferranti ou Sangamo, contiennent un réservoir (Figure 9). De nombreux compteurs à mercure de notre collection avaient des joints défectueux, ce qui permettait au mercure de s'infiltrer dans le boîtier du compteur. Comme nous nous y attendions, tous les joints finissent par se fissurer, provoquant de futurs déversements, nous avons donc séparé tous les compteurs contenant du mercure des caisses et les avons stockés dans des bacs en plastique dans notre salle de stockage d'objets chimiques. Tous les déversements que nous avons rencontrés ont été nettoyés à l'aide d'un kit de déversement de mercure Mercon et un respirateur avec des cartouches à vapeur de mercure a été porté en présence de mercure ouvert.

Tous les objets contenant du mercure, y compris les compteurs, sont désormais stockés ensemble dans notre salle de stockage des objets chimiques, y compris ceux trouvés dans la collection de la réserve 2421. À la suite de ce projet, nous avons acquis un système de surveillance des vapeurs de mercure à utiliser dans la salle de stockage des objets chimiques. Le moniteur de vapeur de mercure VM 3000 envoie des notifications par le biais d'alarmes sonores et visuelles, et des alertes par courrier électronique lorsque les niveaux de vapeur de mercure dépassent un seuil prédéfini, indiquant la présence potentielle d'un déversement de mercure et garantissant un nettoyage efficace.

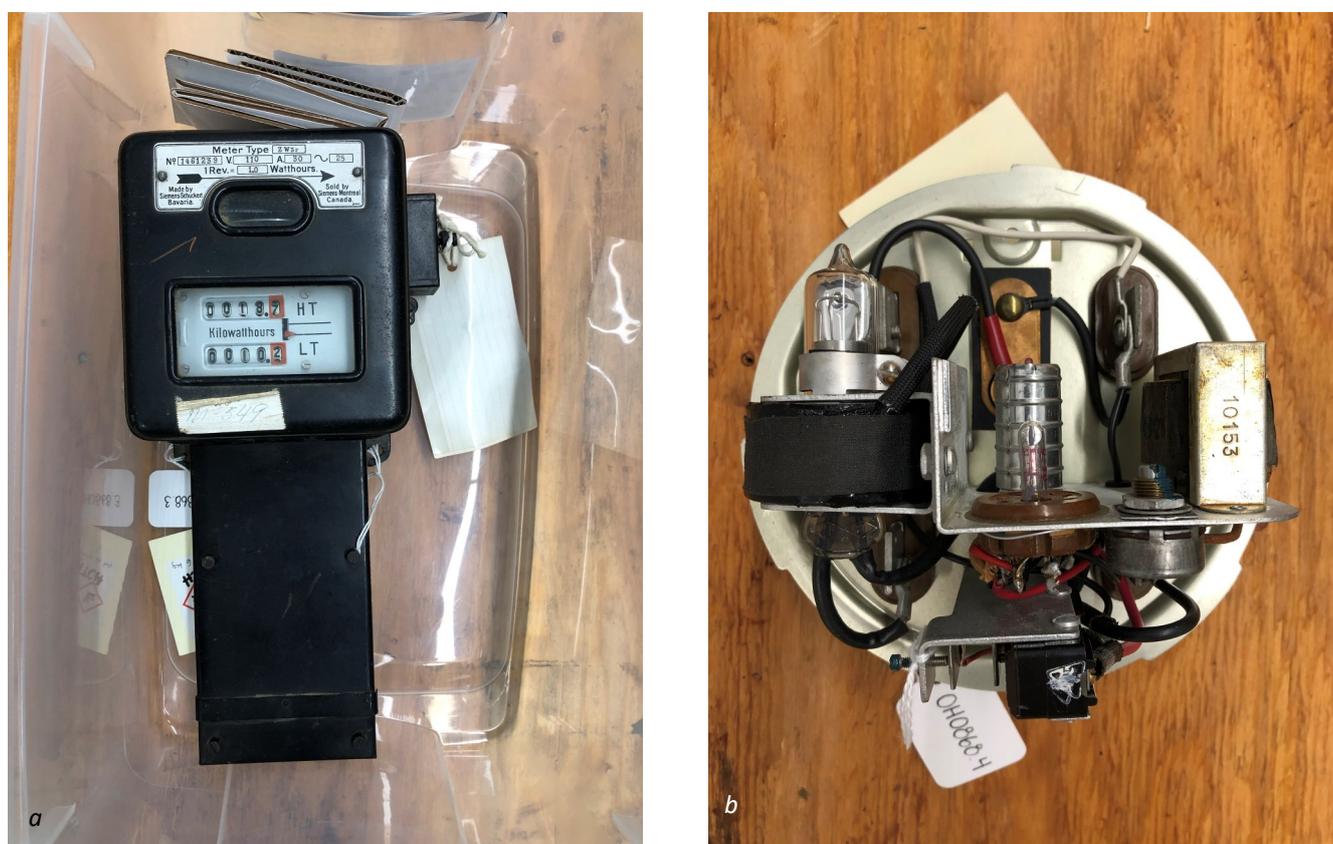


Figure 8. Exemples d'interrupteurs à mercure dans les compteurs électriques : a) Compteur Siemens ; b) Compteur Lumatrol

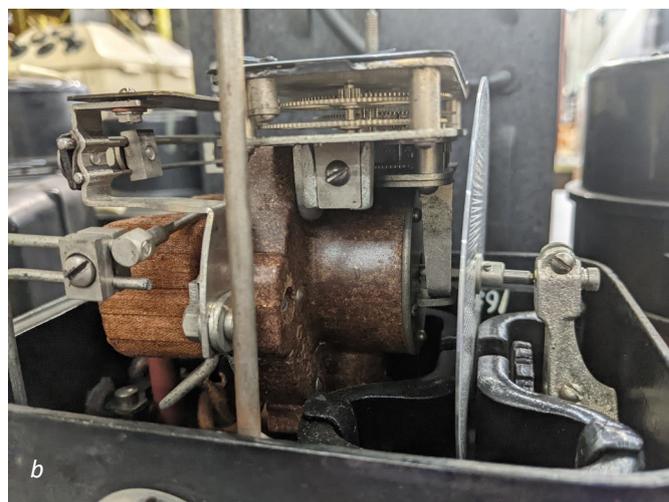


Figure 9. Exemple d'un compteur avec un réservoir de mercure, un compteur Sangamo Type D : a) vue d'ensemble ; b) un réservoir de mercure (composant marron) à l'intérieur du compteur

Conclusions

Le déménagement des collections a permis d'évaluer et de réduire divers risques dans la collection. Le déménagement des 5 500 objets du bâtiment 2421 est un microcosme avec des collections industrielles, telles que celles-ci peuvent être extrêmement riches en risques, et montrant la capacité du processus PGRC d'Ingenium à détecter efficacement les risques. Sur 5 500 objets, nous avons identifié 1 133 risques, soit plus de 20 % de la collection totale stockée dans le bâtiment 2421.

Les études de cas montrent comment traiter les risques typiques dans une collection. Les traitements de conservation de type triage peuvent être considérés comme réussis bien qu'ils soient visuellement incongrus, mais sont un outil essentiel dans un déménagement de collections à grande échelle. L'identification des risques et la compréhension des réglementations qui permettent d'assurer un environnement de travail sûr sont les premières étapes pour garantir qu'une collection industrielle peut être déplacée légalement en toute sécurité. Les lois dictent la manière dont certains objets dangereux peuvent être traités, transportés, étiquetés et stockés. La connaissance de ces lois nous permet d'établir un cadre qui nous donne les connaissances et la confiance nécessaires pour travailler avec ces matériaux et qui fixe des limites qui garantissent la sécurité de tout le personnel de conservation. Dans ces situations, les sous-traitants extérieurs peuvent fournir les connaissances, les compétences et les accréditations nécessaires pour réduire efficacement les risques. Des solutions simples comme celles démontrées dans les études de cas sur la radioactivité et le mercure aux traitements de réduction de l'amiante et des PCB, nous accordons la priorité à la sécurité avant tout.

Le nouveau bâtiment de stockage du Centre Ingenium a amélioré l'accès et la sécurité des collections, grâce à des équipements de détection de danger avancés comme le capteur de radon et le capteur de vapeur de mercure. De meilleurs rayonnages, un étiquetage visuel des dangers et des champs de dangers mis à jour dans la base de don-

nées signifient que la collection est non seulement dans un bien meilleur environnement, mais que les chercheurs et le public qui y accèdent peuvent prendre les précautions appropriées pour le faire. Le déménagement a été achevé dans les délais, malgré plusieurs confinements liés à la COVID. Toutes les collections d'Ingenium de nos entrepôts de location sont désormais entièrement déménagées et intégrées au nouveau Centre Ingenium.

Remerciements

Nous tenons à souligner le travail d'Erin Secord, gestionnaire des services de conservation chez Ingenium, pour son travail déterminant dans l'élaboration du PGRC. Nous tenons également à souligner le travail d'Alyson Tang, technicienne adjointe en conservation, pour sa contribution au déménagement d'Ontario Hydro de 2020 à 2021.

Références

- [1] King D., 'History of asbestos' (2022-12-20), in Asbestos.com, The Mesothelioma Center at Asbestos.com, <https://www.asbestos.com/asbestos/history/>, consulté le 10/01/2023
- [2] « Le gouvernement du Canada prend des mesures pour interdire l'amiante et les produits qui en contiennent » Environnement et Changement climatique Canada, Gouvernement du Canada, <https://www.canada.ca/fr/environnement-changement-climatique/nouvelles/2018/10/le-gouvernement-du-canada-prend-des-mesures-pour-interdire-lamiante-et-les-produits-qui-en-contiennent.html> consulté le 28/08/2024
- [3] « Amiante - Les effets sur la santé » Fiches d'information Réponses SST, Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, Gouvernement de Canada, <https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/asbestos/effects.html>, consulté le 28/08/2024
- [4] Holzer, C., 'Asbestos containing objects in museum collections: the conservation of an asbestos suit in the Technical Museum Vienna, Austria', in Student Posters Congress The Decorative, International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, Vienna (2012), <https://www.iiconservation.org/congress/sites/iiconservation.org.congress/files/IIC%202012%20Vienna%20Congress/studentposters/student-poster-518.pdf>, consulté 10/10/2023
- [5] « Règl. de l'Ont. 278/05 : substance désignée – amiante dans les chantiers de construction, les édifices et les travaux de réparation » Santé et la sécurité au travail (Loi sur la), L.R.O. 1990, chap. O.1, <https://www.ontario.ca/fr/lois/reglement/050278>, consulté le 28/08/2024
- [6] 'Childers® CP-240 CHIL-LOCK Asbestos Removal Agent/Post Removal Sealer', in Foster Childers, <https://fosterproducts.com/product/foster-cp-240/>, consulté le 10/01/2023
- [7] 'Childers® CP-211 CHIL-BRIDGE™ Bridging Encasement/Encapsulant Coating', in Foster Childers, <https://fosterproducts.com/product/foster-cp-211/>, consulté le 10/01/2023
- [8] « Amiante - Stratégies de maîtrise des risques en milieu de travail » Fiches d'information Réponses SST, Centre canadien d'hygiène et de sécurité au travail, Gouvernement de Canada, <https://www.cchst.ca/oshanswers/chemicals/asbestos/control.html>, consulté le 28/08/2024
- [9] 'Health effects of radiation' (2021-08-06), in Radiation and Your Health, Centers for Disease Control and Prevention, <https://www.cdc.gov/nceh/radiation/health.html>, consulté le 10/01/2023
- [10] 'Radiation basics' (2022-06-24), in Radiation Protection, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/radiation/radiation-basics>, consulté le 10/01/2023
- [11] 'Protecting Yourself from Radiation' (2022-07-05), in Radiation Protection, United States Environmental Protec-

- tion Agency, <https://www.epa.gov/radiation/protecting-yourself-radiation>, consulté le 10/01/2023
- [12] Loi sur la sûreté et la réglementation nucléaires (L.C. 1997, ch. 9), Site Web de la législation (Justice), <https://laws-lois.justice.gc.ca/fra/lois/n-28.3/> (consulté le 28/08/2024).13. Warren, S., 'Dealing with radiation hazards: the luminous dial project at the Canada Science and Technology Museum', *Journal of the Canadian Association for Conservation* 35 (2010) 9-15, https://www.cac-accr.ca/wp-content/uploads/2018/12/Vol35_doc2.pdf, consulté le 10/01/2023
- [14] "Doses de rayonnement," Commission canadienne de sûreté nucléaire, Gouvernement du Canada, <https://www.cnsccsn.gc.ca/fra/resources/radiation/radiation-doses/>, consulté le 28/08/2024
- [15] 'Learn about polychlorinated biphenyls (PCBs)' (2022-06-05), in Polychlorinated Biphenyls, United States Environmental Protection Agency, <https://www.epa.gov/pcbs/learn-about-polychlorinated-biphenyls-pcbs>, consulté le 10/01/2023
- [16] 'The 12 initial POPs under the Stockholm Convention', in Stockholm Convention, United Nations Environment Programme, <http://www.pops.int/TheConvention/ThePOPs/The12InitialPOPs/tabid/296/Default.aspx>, consulté le 10/01/2023
- [17] Covaci A.; Kawaki P.; Indekeu C.; Schepens P.; Neels H., Highly chlorinated toxic contaminants in pesticide-treated wooden art objects, *Archives of Environmental & Occupational Health* 61 (6) (2006) p. 245-248, <https://doi.org/10.3200/AEOH.61.6.245-248>
- [18] Riddle J.; Marshall S., "Don't you know that you're toxic?": Identification and hazard mitigation of Polychlorinated biphenyls (PCBs) during a large-scale collections move', oral presentation, *Canadian Association for Conservation Annual Meeting*, Hamilton, Ontario, 26-28 May 2022
- [19] Règlement sur les PCB (DORS/2008-273), Site Web de la législation (Justice), <https://laws.justice.gc.ca/fra/reglements/DORS-2008-273/index.html>, consulté le 28/08/2024
- [20] Hoover E.; Cook K.; Plain R.; Sanchez K.; Waghiyi V.; Miller P.; Default R.; Sislin C.; Carpenter D., Indigenous Peoples of North America: Environmental Exposures and Reproductive Justice, *Environmental Health Perspectives* 120 (12) (2012) p.1645-1649, <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/pdf/10.1289/ehp.1205422>, consulté le 10/01/2023
- [21] Protocol for Testing and Sampling at PCB Storage Sites in Ontario, Ontario Ministry of the Environment, Queen's Printer for Ontario (2000), <https://clu-in.org/download/contaminantfocus/pcb/protocol-for-sampling-ontario-4049e.pdf>, consulté le 10/01/2023
- [22] 'Method 8082A: Polychlorinated Biphenyls (PCBs) by Gas Chromatography', United States Environmental Protection Agency (2007) <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/8082a.pdf>, consulté le 10/01/2023
- [23] « Mercure et santé » Organisation mondiale de la Santé, <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/mercury-and-health>, consulté le 28/08/2024
- [24] 'Health effects of exposure to Mercury' (2022-04-14), in Mercury, United States Environmental Protection Agency, www.epa.gov/mercury/health-effects-exposures-mercury, consulté le 11/01/2023
- [25] Goodall R.A.; Measday, D. Measuring and mitigating mercury vapor in the collection cabinets at Museums Victoria, *AICCM Bulletin* 41 (2) (2020) p.140-151, <https://doi.org/10.1080/10344233.2020.1870301>
- [26] Strahan D.; Tsukada M., Measuring mercury emissions from cinnabar lacquer objects, *Studies in Conservation* 61 (3) (2016) p.166-172, <https://doi.org/10.1080/00393630.2016.1227048>

Session 5

Danger(s) des métaux modernes

CAS D'UN OBJET COMPOSITE PROVENANT DE L'USS THRESHER (1963) COMPORTANT DES RESTES D'AMIANTE

Paul Mardikian*, Claudia Chemello

Terra Mare Conservation LLC, Charleston, South Carolina, USA

 paul@terramareconservation.com

* Auteur correspondant

Résumé

Cet article décrit le traitement de remédiation et de stabilisation d'un objet composite provenant de l'épave du sous-marin nucléaire USS *Thresher* (1963). Le fragment d'aluminium peint attaché à une section de tuyauterie en cuivre était partiellement recouvert d'une gaine isolante en amiante. En 2024, lors du déménagement des collections du Musée National de la Marine des Etats-Unis à Washington D.C., en vue de sa réouverture sur un autre site, une équipe pluridisciplinaire a été mise en place pour satisfaire aux obligations réglementaires liées à la présence d'amiante sur l'objet tout en préservant au mieux son intégrité historique. Ce travail détaille l'approche des conservateurs-restaurateurs, les options techniques présentées au musée et la méthode d'encapsulation de l'amiante.

Mots clés

USS *Thresher*, Marine des Etats-Unis, sous-marin nucléaire, amiante, objet composite, encapsulation, corrosion, gestion des risques

Abstract

This paper describes the remediation and stabilization treatment of a composite artifact recovered from the wreck of the nuclear submarine USS *Thresher* (1963). The painted aluminum piece was attached to a copper pipe partially covered with asbestos insulation. In 2024, during the relocation of museum collections at the National Museum of the United States Navy in Washington, D.C., in preparation for moving the museum to a new location, a multidisciplinary team was assembled to remediate the asbestos while preserving the artifact's historical integrity. The conservators' approach to the work, the technical options presented to the museum, and the asbestos encapsulation method are detailed.

Keywords

USS *Thresher*, United States Navy, nuclear submarine, asbestos, composite artefact, encapsulation, corrosion, risk management

Introduction

L'USS *Thresher* (SSN-593) est le premier sous-marin d'attaque à propulsion nucléaire de l'histoire à avoir coulé (Figure 1). Sa disparition le 10 avril 1963 cause la mort de 129 marins. Un champ de débris est identifié à 2560 mètres de profondeur par le bathyscaphe *Trieste II* mais son unique réacteur nucléaire reste introuvable. En 1985, la recherche du *Titanic* par Bob Ballard sert de couverture à la Marine des Etats-Unis d'Amérique pour localiser et examiner l'intégrité du réacteur sans éveiller les soupçons de l'Union Soviétique.

Parmi les artefacts récupérés dans le champ de débris en 1963, un fragment d'aluminium peint attaché à une section de tuyauterie en cuivre partiellement recouverte d'une gaine isolante comportant de l'amiante, permet aux enquêteurs d'identifier formellement le *Thresher* (Figure 2). Cet artefact sert aussi à avancer un certain nombre d'hypothèses pouvant expliquer le naufrage, notamment la défaillance du système de purge des ballasts.

L'objet entre dans les collections permanentes du Musée National de la Marine des Etats-Unis à Washington où il est présenté dans une vitrine individuelle accompagné de coupures de presse de l'époque. En 2024, dans le cadre du déménagement des collections et de l'ouverture d'un nouveau musée dédié aux collections de la marine militaire des Etats-Unis, une équipe pluridisciplinaire est mise en place pour déterminer comment satisfaire aux obligations réglementaires liées à la présence d'amiante sur l'objet tout en préservant au mieux son intégrité. L'encadrement du chantier est placé sous la responsabilité d'une entreprise spécialisée dans l'abattement de l'amiante.

Cet article examine les défis associés à la présence d'amiante sur cet objet composite et décrit la méthodologie et les techniques employées pour son traitement de remédiation.



Figure 1. Photographie de l'USS *Thresher* prise le 24 juillet 1961. © Naval Institute Archives



Figure 2. Objet après récupération en 1963 sur le site du naufrage. A noter les restes de la gaine d'amiante autour du tuyau. © Naval Institute Archives

Protocole d'intervention

Un plan de prévention des risques d'accident [1] ainsi qu'un protocole d'analyse ont été soumis au musée puis approuvés par ce dernier. Ils consistent, dans un premier temps, à décrocher la vitrine du mur puis de la placer dans une enceinte de confinement temporaire, sous dépression et filtration, avec chambre de décontamination. Ce dispositif permet aux conservateurs-restaurateurs d'examiner et de documenter l'objet en détail. 14 échantillons ont été prélevés pour analyse en collaboration avec un hygiéniste industriel (Figure 3). Les résultats d'analyse par microscopie électronique à transmission confirment la présence de 58% chrysotile et de 2% d'amosite dans la gaine d'isolation et la bourre (Figure 4). En revanche, les résultats sont négatifs sur le reste de l'objet, notamment sur le tuyau en cuivre et l'aluminium peint. Il s'agit donc d'un cas d'amiante dit « libre » (en opposition à l'amiante lié) sous forme de bourre contenue dans un sac, lui-même composé d'amiante. Cette forme d'amiante est la plus dangereuse car les fibres sont facilement dispersibles dans l'environnement sous l'effet de chocs ou de vibrations.

À la suite de cette première expertise, un rapport technique [2] a été soumis au musée détaillant les deux options envisagées par les conservateurs-restaurateurs :

- Séparer les matériaux contenant de l'amiante (MCA), les encapsuler et les placer dans une vitrine individuelle. La faisabilité de cette option a été vérifiée lors de l'examen préliminaire de l'objet : la gaine isolante qui est partiellement enroulée autour du tuyau n'est pas prise en tenaille entre ce dernier et la plaque d'aluminium déformée (Figure 5). Elle est donc théoriquement libre de coulisser le long du tuyau après dépose d'une attache métallique boulonnée.

- Sectionner la gaine dans sa partie la moins épaisse sans avoir besoin de déposer l'attache métallique.

Ces propositions ont été présentées au musée qui, après réflexion, a choisi l'option de séparer la gaine du reste de l'objet après sectionnement. Cette solution présente plusieurs avantages : elle permet d'éviter le démontage risqué et potentiellement impossible de l'attache métallique, mais aussi de réduire le risque de dispersion des fibres d'amiante lors du coulisser de la gaine le long du tuyau. Un autre avantage est de pouvoir immerger entièrement la gaine et sa bourre dans le consolidant immédiatement après sa dépose, et ainsi maximiser l'encapsulation en ré-

duisant la dispersion des fibres d'amiante. À noter qu'en pratique, le sectionnement de la gaine a été assez difficile, probablement à cause des fibres minérales et à leurs propriétés mécaniques. Sans l'utilisation de ciseaux puissants le sectionnement aurait été difficile (Figure 6).



Figure 3. Objet attaché à son panneau explicatif lors de l'examen préliminaire et échantillonnage de l'amiante dans l'enceinte de décontamination. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 4. Gaine d'isolation vue du dessous avec bourre apparente. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 5. Détail de la gaine avant sectionnement et encapsulation. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command

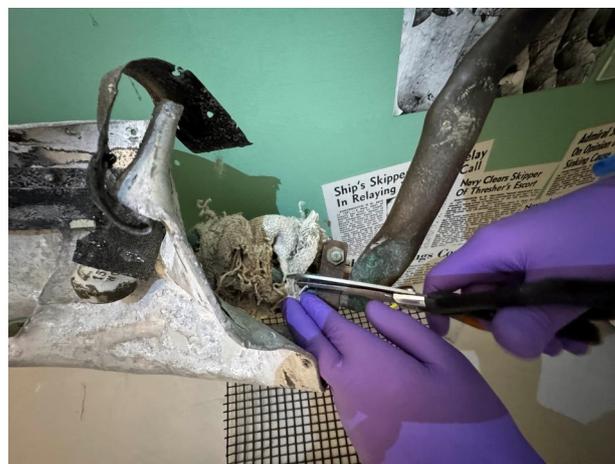


Figure 6. Sectionnement de la gaine. U.S. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command

Problématique de l'encapsulation du MCA

La problématique de l'encapsulation était double car il nous était impossible d'utiliser des consolidants – non homologués – couramment employés en conservation-restauration ni de les tester sur des échantillons provenant de l'objet. La pré-sélection des encapsulants commerciaux s'est faite sur la base de critères incluant : la couleur, la consistance du produit après séchage, la viscosité, la composition chimique, la durée de séchage ainsi qu'une évaluation sur des matériaux similaires de type toile de jute et coton. Notre choix final s'est porté sur un copolymère acrylique non teinté fabriqué par la compagnie Foster, le *Protektor Sealant 32-22* (Annexe 1). Le produit s'utilise

pur et a une viscosité inférieure à 20 cP ce qui lui confère une très bonne mouillabilité, qualité essentielle pour imprégner à cœur, non seulement la gaine, mais aussi la bourre épaisse composée de fibres de différentes longueurs (Figures 7, 8). La méthode d'imprégnation a consisté à placer la gaine sur une nacelle en polyéthylène au-dessus du liquide puis de l'immerger doucement pendant une durée d'environ 30 minutes. Pour s'assurer d'une pénétration à cœur du consolidant, la nacelle était agitée régulièrement de haut en bas et la masse de fibre était légèrement pressée à la main pour éliminer les bulles d'air. A la fin de cette opération, la nacelle a été remontée pour laisser le consolidant s'égoutter librement pendant 24 heures (Figure 9).

La phase d'égouttage a été mise à profit par les conservateurs-restaurateurs pour dépoussiérer et rincer l'objet. La partie de l'objet directement en contact avec la gaine a été décontaminée à l'aide d'un aspirateur comportant un système de filtration à plusieurs étages de type HEPA (H14) capable de retenir 99.995% des particules fines



Figure 7. Gaine après séparation avant encapsulation. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 8. Gaine durant encapsulation. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 9. Gaine après encapsulation. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 10. Nettoyage et rinçage de l'objet après dépose de la gaine. © Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command

d'amiante de taille supérieure ou égale à 0,3 μm . Après dépoussiérage, le reste de l'objet a été rincé à l'eau déminéralisée et brossé doucement à plusieurs reprises puis séché dans l'enceinte de confinement maintenue sous dépression et filtration (Figure 10). La vitrine de l'objet a également été décontaminée par l'équipe d'assainissement.

Échantillonnage de l'air par test PCM

Durant toute la phase de décontamination et d'encapsulation qui s'est étalée sur deux jours, l'enceinte de confinement est restée sous dépression et filtration jusqu'à ce que le test d'échantillonnage de l'air soit effectué. Ce test dit : « PCM asbestos » s'est fait selon la norme NIOSH Method 7400, qui consiste à utiliser un système de filtration permettant de collecter, de détecter, de compter et de mesurer les fibres d'amiante sur un filtre examiné sous microscope à contraste de phase. Cette technique diffère de celle utilisée pour l'identification des fibres d'amiantes qui se fait généralement par microscopie électronique à transmission (TEM). Le test PCM permet de quantifier la concentration d'amiante dans l'air exprimée en fibres par centimètre cube pour une durée et un périmètre donné. Ce test se fait en quelques heures. A la suite des résultats négatifs du test PCM, l'objet, puis la gaine ont pu être extraits de l'enceinte [3]. L'enceinte a ensuite été démontée et tous les matériaux utilisés, y compris les restes d'encapsulant, ont été placés dans des emballages sécurisés et étiquetés avant d'être transportés pour être enfouis sur un site spécialisé dans l'Ohio. A noter que bien que la destruction de l'amiante par fusion entre 1400 et 1600°C soit théoriquement possible, le coût d'un tel procédé reste encore trop élevé et la plupart des pays, dont les Etats-Unis, continuent à enfouir les matériaux contenant de l'amiante.

Traitement et conditionnement

Une fois l'enceinte de confinement démontée, la suite des travaux s'est déroulée en partie dans l'espace ouvert du musée et dans son laboratoire. Le poids de la gaine a été enregistré pour suivre son séchage. Après 24 heures, l'extérieur de la gaine était sec au toucher mais l'objet continuait à perdre du poids. La gaine a été placée sur un socle en polyméthacrylate de méthyle et maintenue par un monofilament de polyéthylène téréphtalate (PET) pour éviter qu'elle puisse se déplacer une fois dans sa vitrine. Le poids final de la gaine s'est stabilisé à 2,245 kg après 15 jours de séchage sous hotte accusant une perte de poids de 212 g. Cette période de séchage est essentielle pour éviter des problèmes de condensation sur les parois de la boîte une fois le couvercle scellé avec un silicone transparent (Figure 11).

Évaluation des résultats

Sur le plan visuel, l'apparence de la gaine et de sa bourre est satisfaisante car la fibre apparaît naturelle, sans accumulation de consolidant. Au toucher, la texture garde une certaine souplesse. La présentation offre le double avantage d'avoir un MCA encapsulé tout en étant contenu dans une boîte hermétique pouvant être présentée à côté de l'objet ou mis en réserve.

Traitement du reste de l'objet

La partie conservation à proprement parler était relativement simple. Elle a consisté à refixer les soulèvements de peinture sur la partie en aluminium ainsi qu'à nettoyer et stabiliser les zones de corrosion sur le tuyau en cuivre (Figure 12). Les premiers tests ont montré une sensibilité de la peinture à l'alcool ou l'acétone, il fallait donc utiliser un consolidant avec un solvant strictement aqueux. Les soulèvements de peinture les plus importants ont donc été refixés à l'aide d'une solution de Jade 403 (Annexe 2), émulsion vinylique à pH neutre appliquée à l'aide d'une se-



Figure 11. Gaine après séchage complet dans sa boîte de présentation avec étiquettes réglementaires avant fermeture. ©Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 12. Claudia Chemello travaillant sur l'objet après dépose de l'amiante. ©Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command

ringue. La section en cuivre a été nettoyée à l'alcool éthylique. La partie qui était directement en contact avec l'amiante a été nettoyée mécaniquement à l'aide d'une brosse et d'un scalpel. Un traitement d'inhibition a été appliqué à l'ensemble du tuyau à l'aide d'une solution de Benzotriazole (BTA) à 3% (p/v) composée à 85% d'eau déminéralisée et 15% d'alcool éthylique suivi d'un rinçage rapide à l'eau déminéralisée deux heures après application pour éliminer les efflorescences de BTA.

Après finalisation des opérations de restauration, l'objet a été placé sur une plaque de Coroplast® de 6 mm en polypropylène ondulé avec des rubans de lin non blanchi puis installé dans une boîte en carton non-acide fabriquée sur mesure (Figures 13 et 14). L'ensemble des opérations de remédiation et de conservation a été consigné dans le rapport final d'intervention [4].



Figure 13. Fixation de l'objet après traitement sur une plaque de Coroplast®. ©Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command



Figure 14. Objet installé dans sa boîte. U.S. Navy Photos par Terra Mare Conservation. Courtesy of the Naval History and Heritage Command

Conclusion

Cet article décrit la gestion du traitement d'un objet composite contenant de l'amiante libre provenant d'une épave historique moderne. Les précautions nécessaires à sa préservation et sa présentation impliquaient des choix de conservation-restauration dictés par les exigences de sécurité lourdes liées à la présence d'amiante et par des contraintes techniques imposées par l'objet. Une des difficultés de ce projet a été de travailler sur des matériaux sur lesquels les conservateurs-restaurateurs n'ont pas ou peu d'expérience. Les protocoles de traitement ont été aussi limités par l'emploi de produits commerciaux dont le comportement à long-terme est difficilement prévisible. Grâce à une planification rigoureuse et une approche collaborative, ce projet a pu être exécuté sans incident et permettre à ce témoin important de l'histoire de la Marine des Etats-Unis de pouvoir être présenté au public en toute sécurité.

Remerciements

Les auteurs souhaitent remercier leurs partenaires et collaborateurs ayant permis la réalisation de ce projet : Jennifer H. Harris et Kyle Young, Bluestone Environmental Group, Inc., (Maitre d'œuvre) ; Jose Palacios et son équipe, ACM Services, In., (Entreprise de désamiantage) ; Elizabeth Farber, VERTEX Engineering (Prise d'échantillons et test PCM); AMA Analytical Services Inc., (Analyse MCA); Julie Kowalsky, directrice adjointe du Musée National de la Marine des Etats-Unis à Washington ainsi que Kate Morrand et Shanna Daniel, conservatrices, pour leur assistance lors du séchage de la gaine.

Références

- [1] Bluestone Environmental Group, Inc. *Accident Prevention Plan National Museum of The United States Navy (NMUSN) Asbestos Abatement, USS Thresher Artifact Conservation Washington, DC.* Contract #: N4008021D0010. Delivery Order #: N4008023F4907 October 2023. 184 p.
- [2] Terra Mare Conservation, LCC. *Work Plan for Abatement and Consolidation/Encapsulation of Historic Artifact from the USS Thresher in the National Museum of the United States Navy for Bluestone Environmental Group, Inc.* October 2023. 17 p.
- [3] The Vertex Companies, LLC. *Vertex Asbestos Abatement Final Clearance Results Thresher Artifact Conservation.* Project #: 92048. January 2024. 7 p.
- [4] Terra Mare Conservation, LCC and Bluestone Environmental Group, Inc. *Abatement and Consolidation/ Encapsulation of Historic Artifact from the USS Thresher in the National Museum of the United States Navy (NMUSN) Washington, DC.* Contract #: N4008021D0010. Delivery Order #: N4008023F4907. February 2024. 28 p.

Annexe 1 - Fiche technique du produit Protektor Sealant 32-22



Foster® 32-21/32-22
Product Data Sheet

PROPERTIES

COLOR:
32-21: Blue
32-22: Untinted
Other colors available on special order.

TYPE:
Acrylic copolymer

VOLATILE:
Water

WEIGHT PER U.S. GALLON (ASTM D1475):
8.5 lbs. (1.02 kg/l)

APPLICATION CONSISTENCY:
Airless spray

ODOR:
Mild when wet; none when dry

AVERAGE COVERAGE RANGE:
Subject to the thickness, absorbency and nature of the asbestos containing material (ACM) being encapsulated.
As an Encapsulant:
2 – 10 gal./100 sq. ft. (0.82 – 4.07 l/m²), applied in 2 coats of 1 – 5 gal./100 sq. ft. (0.41 – 2.03 l/m²) each.
As a Lockdown (see application guide):
Spray tests should always be conducted to determine actual on-the-job coverage rates, ideally duplicating the anticipated project application mechanics and environment.

SERVICE TEMPERATURE LIMITS:
Temperature at coated surface of encapsulated ACM.
-20°F to 250°F (-29°C to 121°C)

WET FLAMMABILITY:
No flash to boiling, 205°F (96°C)

SURFACE BURNING CHARACTERISTICS (ASTM E84):
Flame Spread: 15
Smoke Developed: 0
Applied to 1/4 inch (6.35 mm) inorganic reinforced cement board at a coverage rate of 10 gal./100 sq. ft. (4.07 l/m²).

SURFACE FLAME SPREAD (ASTM E162):
Flame Spread: 5
Applied to 1 inch (25.4 mm) sprayed mineral wool insulation. The flame spread may vary at different product thicknesses and/or when applied over surfaces other than inorganic reinforced cement board and sprayed mineral wool insulation.

FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT



FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT is a single-component, penetrating encapsulation coating for abating asbestos fiber fallout (retention method).

FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT penetrates deeply into the asbestos containing materials, and then dries to form a firm, lightweight, damage-resistant surface.

FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT has been extensively tested by Battelle Columbus Laboratories and is on the list of products deemed acceptable by the U.S. Environmental Protection Agency.

FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT is produced under the classification and follow-up service of Underwriters Laboratories, Inc. It meets NFPA 90A and 90B 25/50 requirements.

LIMITATIONS
As an Encapsulant – do not store or apply below 40°F (4°C) or above 100°F (38°C). Protect from freezing until dry.
As a Post Removal Residual Encapsulant – do not store or apply below 40°F (4°C). Do not apply to surfaces operating at, or intended to operate at, temperatures in excess of 250°F (121°C).

| |
|--|
|  <p>ENCAPSULANT MATERIALS FIRE RESISTANCE CLASSIFICATION</p> <p>For use with classified sprayed fiber or cementitious mixtures at an application rate of not less than 10 sq. ft./gal. Ability of this material to act as a sealant has not been investigated. See UL Fire Resistance Directory.</p> <p>82P5</p> |
|--|

+ These products have been tested for the U.S. EPA and found to satisfactorily seal asbestos insulation under restricted conditions. This does not constitute an endorsement or recommendation by the EPA.

™ Trademark of H.B. Fuller Construction Products Inc.

Visit us on the web at www.fosterproducts.com

Annexe 1 - Fiche technique du produit Protektor Sealant 32-22

**APPLICATION GUIDE
FOR
FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT
32-21/32-22**

MATERIAL PREPARATION

Stir well. Do not use sticks, boards or anything that would splinter or otherwise contaminate the product. **DO NOT THIN.**

SITE PREPARATION

As a minimum, follow all procedures outlined by Federal, State and Local Authorities regulating asbestos abatement projects and the wastes generated therein.

APPLICATION – AS AN ENCAPSULANT

Assess the adhesive/cohesive strength of the intended matrix to ensure sufficient integrity to accept the added weight of the encapsulant in the wet state using methodology based on ASTM E736. Once the integrity of the intended matrix is assured, in an aesthetically insensitive area, conduct a penetration test. Apply FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT to the candidate matrix using a trigger-type spray apparatus or garden sprayer and saturate the matrix. Since absorption is a time related phenomenon, multiple passes are required, allowing time between passes for the dissipation of the encapsulant into the matrix. Full saturation is defined as the point where a given ACM will not, under the particular circumstances, absorb any more encapsulant into the matrix. Waiting no less than 8 hours, nor more than 24 hours, a second application of encapsulant is made to the same area in the same manner until full saturation is achieved for a second time. After allowing for full cure of the applied matrix, secure a core sample and evaluate for depth of penetration. Submerge the core sample in water for four hours. Remove the sample from the water and with a pointed instrument, starting from the substrate end of the core, scrape the plug removing those segments not solidly bound by the encapsulant. The remaining plug length is the effective depth of penetration. NOTE: If the candidate matrix shows any indication of loss of adhesion to the substrate or cohesive strength, or if the FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT fails to achieve any level of penetration, it must be assumed that the candidate matrix is not suitable for encapsulation. Having determined that the candidate matrix is a viable recipient, apply the first coat of FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT to the intended matrix (using airless spray as indicated below) until saturation is achieved. Multiple passes at varying intervals may be required. Wait no less than 8 hours or more than 24 hours and apply a second coat in the same manner as the first.

APPLICATION – AS A LOCKDOWN

Apply FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT using airless spray equipment as indicated below, directly to the exposed substrate from which the ACM has been removed in a continuous manner at an application rate of 400 – 600 sq. ft./gal (9.8 – 14.7 m²/l) (steel surface). Porous or uneven surfaces may require additional material. CONSULT APPLICABLE OSHA AND EPA REGULATIONS.

FLOORS

FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT is not suggested as a floor traffic coating. It may be used on floors provided that a new floor surfacing material is installed over it. Flooring installers must determine by their own tests that any mastic, adhesive or cement they plan on using is compatible with, and bonds firmly to, the dried FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT.

SPRAY EQUIPMENT

High output, electric, airless spray equipment is ideal, but pneumatic or hydraulic can be used. FOSTER® PROTEKTOR® SEALANT can be applied with virtually any type of airless spray equipment on the market today capable of spraying water-based paint. Pressure settings should be set as low as possible while still achieving atomization. Average viscosity range: 5 – 20 cps.

CLEAN UP

Use fresh water to clean equipment before product dries. Dry product may be removed with hot soapy water or strong solvents such as chlorinated solvent (non-flammable) or xylol (flammable).

CUSTOMER SERVICE: (800) 832-9002

IMPORTANT: H.B. Fuller Construction Products Inc. warrants that each of its products will be manufactured in accordance with the specifications in effect on the date of manufacture. WE MAKE NO OTHER WARRANTIES AND EXPRESSLY DISCLAIM ANY WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. If a product fails to meet this limited warranty, purchaser's sole and exclusive remedy is replacement of the product or, at our option, refund of the purchase price. OUR ACCEPTANCE OF ANY ORDERS FOR THE PRODUCT IS EXPRESSLY CONDITIONAL UPON PURCHASER'S ASSENT TO THE TERMS ON THE APPLICABLE INVOICE.

ADEQUATE TESTS: The information contained herein we believe is correct to the best of our knowledge and tests. The recommendations and suggestions herein are made without guarantee or representation as to results. We recommend that adequate tests be performed by you to determine if this product meets all of your requirements. The warranted shelf life of our products is twelve months from date of shipment to the original purchaser or as otherwise provided on the certificate of analysis.

**For professional use only. Keep out of reach of children.
Consult Safety Data Sheet and container label for further information.**

Annexe 2 - Fiche technique du produit Jade 403



Jade 403 Adhesive

Product Information Sheet

User must pre-approve and pre-qualify adhesion achieved with this product as well as the functionality of the product before on test pieces before embarking on use of actual pieces or mass production.

Glued surfaces must be allowed to completely dry out at temperatures between 60°F to 90°F for a period of 24 hours before being stored or shipped in sub zero temperatures in a non-heated freight carrier.

User must allow the product to reach at least room temperature of 72°F to ensure proper viscosity flow and functionality stated.

Physical Properties:

| | |
|------------------------|---|
| Method of Application: | Brush, Roller or Extrusion |
| Base: | Modified polyvinyl acetate resin emulsion |
| Color: | Milk white when wet, clear when dried |
| Odor: | Typical sweet when wet, none when dry |
| Solvent: | (None) water-based |
| Shelf-Life: | 90 Days |
| Adhesion: | Excellent |
| Viscosity: | 4000-5000 cps |
| Total Solids: | 49-52% (gravimetric) |
| Water Resistance: | Poor |
| pH: | 7.1 – 7.3 |
| Clean Up: | Use hot water |
| Ash: | None |
| Weight / Gallon | 8.9 – 9.2 pounds per gallon |

Talass cannot guarantee the quality of finished materials incorporating this product.

Do not mix with other adhesives that may cause an adverse chemical reaction, or with other materials that will have undesirable results. Keep container sealed. Store away from direct sun light or extreme cold, and at temperatures between 60°F and 100°F. Rotate materials first in, first out. Material solids will settle after prolonged standing. For uniform results, stir product before use.

Do not allow material to freeze in its liquid state, it will render the product useless.

The information contained in this sheet is for educational purposes. However, the information is provided without any representation of warranty, expressed or implied, regarding its performance.

The materials, environment, and other factors with which this product may be used are beyond our control and may also be beyond our knowledge. For this and other reasons, we do not assume responsibility and expressly disclaim liability for loss, damage, or expense arising out of or in any way connected with the use of this product.

LA CONSERVATION DES MATERIAUX DE LA WWII : LE MOTEUR MERLIN DE ROLLS ROYCE, SON PROPRE ENNEMI

Monique Drieux^{1*}, Caroline Moreau¹, Magali Brunet²

¹ Laboratoire Materia Viva, ² Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES-CNRS)

 materia-viva@orange.fr

* Autrice correspondante

Résumé

Des éléments d'un moteur Merlin - XX Rolls Royce, datant de la WWII, ont été restaurés par le Laboratoire Materia Viva de 2017 à 2018. Découvert lors de travaux de voirie en 2011 et conservé par l'association des Ailes Anciennes de Toulouse, le moteur a été mis à la disposition de Toulouse Métropole pour envisager sa restauration. La diversité des matériaux présents et la complexité du moteur ont finalement initié une collaboration entre les Ailes Anciennes, le CEMES, le laboratoire Traces, Toulouse Métropole et Materia Viva. L'étude historique et descriptive du moteur, les analyses des matériaux, l'intégration du moteur dans les réflexions du projet européen PROCRAFT ont permis de proposer finalement une mise en valeur de qualité sur le site de l'Envol des Pionniers. La restauration a été menée dans les limites imposées par le moteur lui-même, qui porte en son sein les éléments de sa propre destruction. La conservation sur le long terme d'un tel assemblage de matériaux repose essentiellement sur l'environnement mis en œuvre, de la vitrine à climat contrôlé à une maintenance rigoureuse.

Mots clés

Aéronautique, moteur, alliage aluminium, objet composite, conservation préventive

Abstract

Elements of a Merlin - XX Rolls Royce engine, dating from WWII, were treated by Laboratoire Materia Viva from 2017 to 2018. Discovered during roadworks in 2011 and stored by the Ailes Anciennes de Toulouse association, the engine was made available to Toulouse Métropole to consider its conservation. The diversity of materials present and the complexity of the engine eventually led to a collaboration between Ailes Anciennes, CEMES, the Traces laboratory, Toulouse Métropole, and Materia Viva. The historical and descriptive study of the engine, the analysis of the materials, and the integration of the engine into the European PROCRAFT project enabled us, in the end, to present a high-quality enhancement of the Envol des Pionniers site. The conservation work was carried out within the limits imposed by the engine itself, as it carries within it the elements of its own destruction. The long-term preservation of such an assemblage of materials depends essentially on the environment in which it is placed, from climate-controlled showcases to rigorous maintenance.

Keywords

Aeronautics, engine, aluminum alloy, composite object, preventive conservation

Introduction-contexte

C'est en juillet 2016 que Materia Viva a été contacté par l'Atelier de restauration de la Ville de Toulouse pour effectuer une étude préalable à la restauration et à l'exposition d'un moteur Merlin, conservé par l'association des Ailes Anciennes de Blagnac (31).

Découvert en 2011 lors de travaux de voirie, le moteur, identifié comme tel par un des employés municipaux, a été confié à l'association des Ailes Anciennes de Toulouse. Il s'est rapidement avéré que ce moteur V12, conçu en 1941 par Rolls Royce, provenait d'un Avro Lancaster, abattu dans la nuit du 5 au 6 avril 1944 par les canons aériens de la Flack allemande stationnée à l'aérodrome de Montaudran, à l'Ouest de Toulouse. À la suite de l'explosion du bombardier, le moteur est tombé dans une zone proche de l'actuelle avenue Saint Exupéry, et a été enfoui depuis cette date. Lors de notre visite le 11 juillet 2016, il se présentait en plusieurs éléments, et en cours de dégradation ; son séjour dans le sol assimilait certains aspects de corrosion à ceux des objets archéologiques (Figure 1).



Figure 1. État de conservation du moteur Merlin lors de sa découverte. © Materia Viva 2016

Après avoir contacté Christian Degryny, spécialiste notamment de la corrosion des alliages d'aluminium, Materia Viva a proposé que des analyses soient faites pour déterminer les matériaux et qu'une étude documentaire puisse être menée pour mieux comprendre la fabrication de ce moteur, et donc les matériaux en présence. Le CEMES a ainsi été associé au projet.

Une recherche documentaire sur les moteurs en V et les moteurs Merlin plus particulièrement, a été effectuée, ce qui a permis de nommer toutes les parties du moteur en présence et de retrouver certains des matériaux utilisés à la fabrication.

En vue d'analyses en laboratoire, des prélèvements ont ensuite été réalisés sur différentes parties du moteur : au niveau du carter, des pistons, des attaches, du radiateur, des câbles de transmission, des courroies. Après enrobage en résine des fragments et polissage mécanique, des analyses au microscope électronique à balayage (MEB) associée à de la spectroscopie de dispersion d'énergie de rayons X ont permis d'identifier les matériaux constitutifs.

Mesurant l'intérêt de la restauration associée à l'histoire de l'aéronautique et à celle de la Seconde Guerre Mondiale à Toulouse, nous avons convaincu Toulouse Métropole d'envisager une présentation du moteur à la hauteur de cette découverte. Johanne Banchet (Toulouse Métropole) a permis le financement des traitements, de la réalisation d'un film documentaire, et d'une vitrine garantissant la conservation de long terme et un lieu d'exposition sur

le site de l'Envol des Pionniers, équipement culturel sis sur le site de l'ancien aérodrome de Montaudran. Le CEMES a donné une ampleur à cette restauration en l'intégrant initialement dans le projet européen PROCRAFT piloté par Arc Antique, et en constituant à Toulouse un comité de pilotage incluant Jean-Marc Olivier de Framespa et la direction d'Aeroscopia.

Un exemple de résultats obtenus sur un échantillon est montré sur la Figure 2. Il s'agit de photographies macroscopiques d'un fragment du carter et de vues en coupe (après inclusion en résine et polissage) obtenues par microscopie optique et microscopie électronique à balayage. L'alliage contient de l'aluminium comme élément de base auquel sont ajoutés environ 4% Si, 1,3% Cu, 1% Fe (pourcentages en masse) et autres éléments Mg, Ti, Ni en traces. Les inclusions (plus claires sur l'image de droite) sont des phases intermétalliques secondaires contenant AlNiFeSi et/ou AlCuNiSi.

D'après les images en microscopie optique (Figure 2, C), l'alliage est corrodé sur une épaisseur de près de 1 mm. Sur la photographie MEB (Figure 2, D), il est clair que la corrosion est intergranulaire au sein de l'alliage. La perte du revêtement de protection d'origine et la précipitation aux joints de grain de phases intermétalliques secondaires peuvent expliquer qu'en présence d'eau (ou d'humidité), la corrosion se soit propagée dans cet alliage. Les phases présentes aux joints de grains (AlNiFeSi et AlCuNiSi) sont plus nobles (cathodiques) par rapport à la matrice et c'est cette dernière qui se dissout, en présence d'eau : formant ainsi des micro-piles galvaniques.

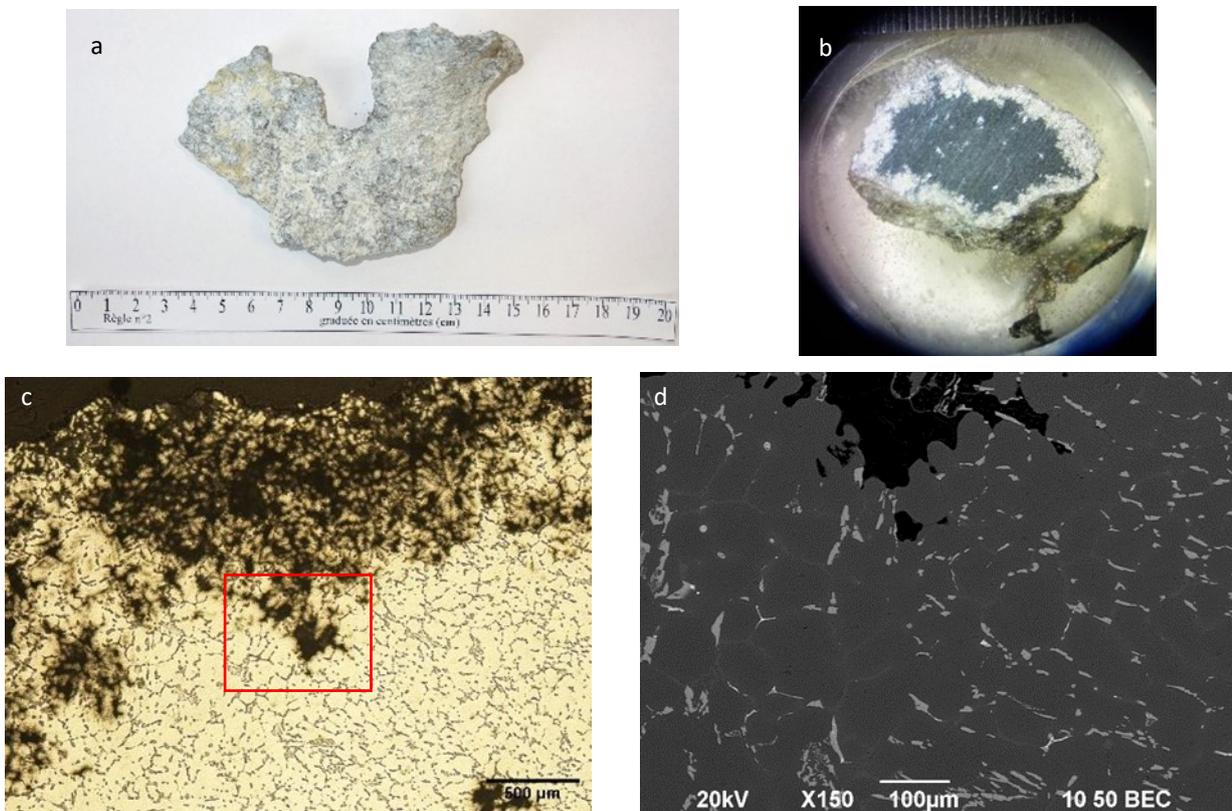


Figure 2. Photographies du prélèvement (a) ; après coupe, inclusion en résine et polissage (b) ; de la coupe en microscopie optique (c) et image en microscope électronique à balayage (mode électrons rétrodiffusés) d'une zone saine et corrodée (d) © CEMES

Au niveau des parties d'assemblage du carter en alliage d'aluminium avec d'autres alliages (ferreux), la corrosion qui se développe est une corrosion galvanique. Cette corrosion, comme le montre la figure 3 est active. Entre 2017 (quand l'échantillon a été préparé) et 2019 (après un stockage au laboratoire, dans une atmosphère non contrôlée) : des produits de corrosion se sont développés à la fois sur la partie en alliage ferreux (rouille) et sur la partie en alliage d'aluminium (produits blancs).

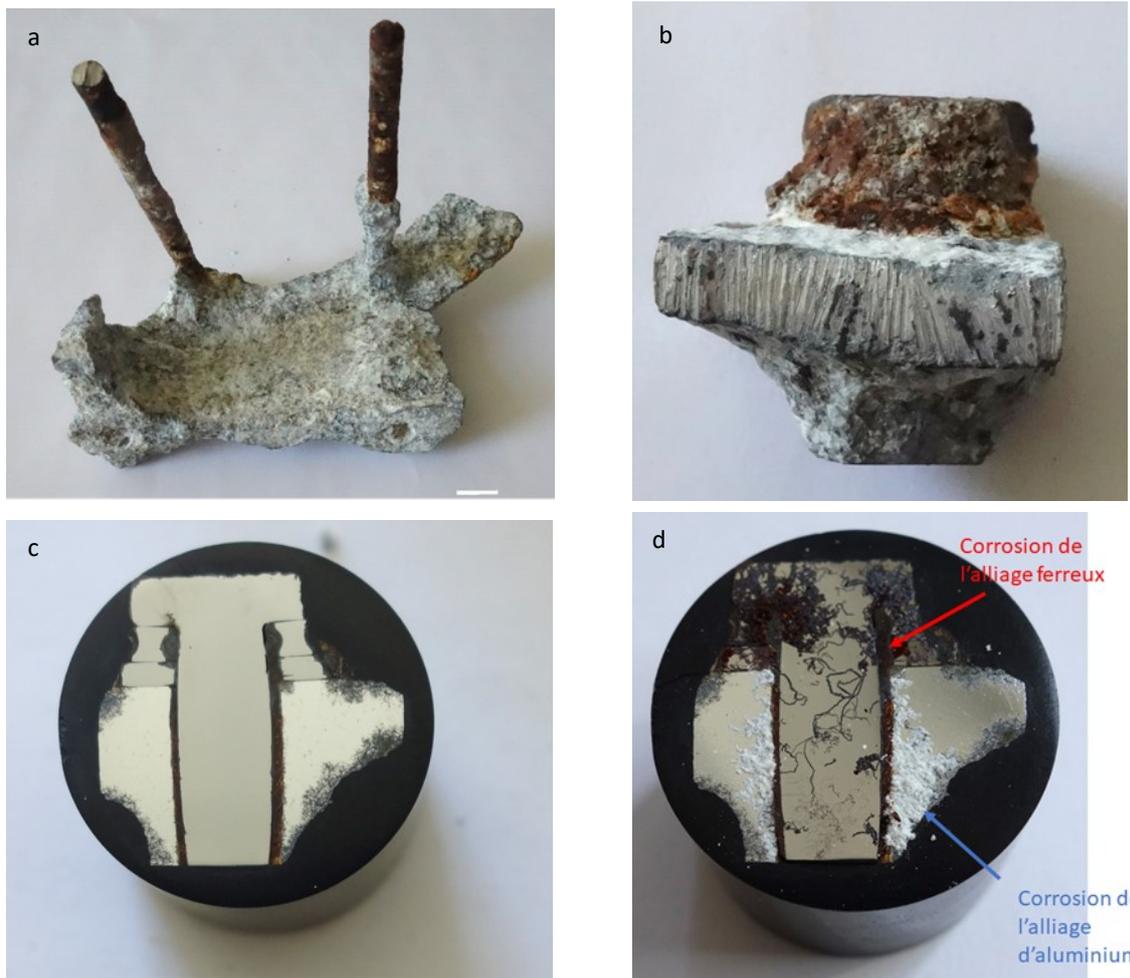


Figure 3. Photographies du prélèvement carter/vis en alliage ferreux (a) ; du micro-prélèvement avant enrobage (b) ; de la coupe en 2017 (c) et de la coupe en 2019 (d). © CEMES

Les analyses et la compréhension du fonctionnement du moteur, des matériaux en présence et de l'état de conservation ont donné les orientations possibles de la restauration. Le carter qui enveloppe tous les éléments constitutifs du moteur – propulseur d'hélice, vilebrequin, cylindre, etc – dont certaines parties sont à l'air libre ; ce carter est en alliage d'aluminium de fonderie de type AlSi5Cu1Mg ; les autres alliages identifiés sont des cupro nickel étamés, des cupro aluminium, des aciers, du fer forgé, des laitons au plomb. En outre, des matériaux non-métalliques sont également présents : caoutchouc des joints, tissus d'amiante.

Par la diversité des métaux et alliages intimement liés, le moteur peut se comporter comme une pile galvanique ; seules les parties visibles pourront être traitées, il est impensable d'inclure le moteur sous résine tel qu'il a pu être suggéré. Après discussions, le traitement mécanique par micro-sablage et des vernis ou cires de protections

adaptées aux matériaux sont validés ; de fait, la conservation a reposé en grande partie sur la conception de la vitrine et le contrôle des conditions climatiques.

L'Atelier de Restauration de la Ville de Toulouse a mis à notre disposition sa cabine de sablage avec aspiration centralisée, combinaison intégrale avec arrivée d'air. Les sables et leur granulométrie ont été choisis en fonction des produits de corrosion à éliminer et bien sûr de l'état de conservation et de la résistance des matériaux à dégager : billes de verre, noyaux de fruits pour les parties d'aluminium, oxydes de corindon pour les alliages ferreux. Ce dégagement a permis aussi de retrouver des informations propres au moteur Merlin comme les numéros de séries des pièces (Figures 4 et 5).



Figure 4. Mise en évidence des numéros de séries après dégagement des produits de corrosion. © Materia Viva 2017



Figure 5. Traitement par micro-sablage dans la cabine à aspiration centralisée. © Materia Viva 2017

La protection a été aussi adaptée. Les éléments en fer ont été passivés par application un mélange d'acide tanique /acide orthophosphorique, et protégés par une double protection de Paraloid B48® à 10% (p/v) dans l'acétone et une cire Cosmoloïd H 80® (Figure 6). L'alliage d'aluminium a été consolidé par infiltration avec une émulsion acrylique (Acril AC33) à différentes concentrations (Figure 7).



Figure 6. Vue générale du moteur après passivation et protection. © Materia Viva 2017



Figure 7. Détail de la surface consolidée en alliage d'aluminium.
© Materia Viva 2017



Figure 8. Mise en réserve et création d'une enceinte climatique. © Materia Viva 2017

Après séchage lent et vérification de l'effectivité des protections, le moteur a été mis dans une réserve sans climat contrôlé des musées de la Ville de Toulouse. Pour garantir la conservation tout en permettant une maintenance visuelle, le moteur a été placé sur palette enveloppé dans une enceinte climatique réalisée par des films utilisés pour l'anoxie, et que nous avons employés pour la conservation des éléments du trésor gaulois de Tintignac-Naves : films en multicouches de PE et aluminium Valsem 50, thermosoudés à 190°C (Figure 8). L'enceinte limite les variations d'humidité relative et de température, protège de la poussière et permet une maintenance visuelle effectuée par nos soins tous les 6 mois.

Cette mise en réserve a été nécessaire le temps que différents éléments soient validés : en effet, le moteur Merlin relève de la seconde guerre mondiale ; or les équipements culturels dédiés à Toulouse à l'aéronautique sont l'Envol des Pionniers, ouvert en 2018 et dédié au début de l'aviation et jusqu'à la première guerre mondiale, et Aéroscopia, créé en 2015 et consacré à l'histoire de l'aviation post WWII essentiellement. Toulouse Métropole a opté pour une présentation du moteur Merlin à l'Envol des Pionniers, là-même où l'Avro Lancaster avait été abattu. Nous avons dressé un cahier des charges pour la conception de la vitrine avec Johanne Banchet, après avoir étudié les conditions de conservation de tels vestiges dans les autres musées au plan national (Le Bourget) ou international.

Les matériaux métalliques multiples et en contact, non dissociables, forment une pile galvanique, *a fortiori* en présence d'humidité importante. L'alliage d'aluminium qui constitue l'élément principal est aussi le plus fragile chimiquement. Sont présents des éléments en matières dites organiques : joints en caoutchouc, fibres textiles, plastique des fils tenant par exemple le scellement. La poussière, les polluants atmosphériques et l'humidité relative sont des facteurs essentiels de la corrosion.

Par rapport aux moteurs Merlin ou Rolls Royce exposés notamment en Grande Bretagne, celui de Montaudran présente une dégradation particulière due à son enfouissement pendant plusieurs décennies, ce qui rapproche sa sensibilité de celle des métaux archéologiques.

Les préconisations de conservation du moteur étaient les suivantes :

- Opter pour une HR non dessiccante entre 20 et 30% pour conserver les métaux, les résines de protections et les matières organiques présentes,

- Étudier la possibilité de mettre l'objet dans un environnement sans oxygène, avec des capteurs dans l'enceinte,
- Étudier la possibilité de mettre l'objet en atmosphère sous azote (*cf. exemple du casque de Coppergate en cuir et fer exposé au York Museum à York (GB)*),
- Étudier la possibilité de mettre l'aluminium en contact avec une anode sacrificielle, sans pour autant mettre en péril les autres métaux.

En l'absence d'une enveloppe budgétaire complémentaire et face à l'impératif d'exposer le moteur, ces solutions n'ont pas été développées plus avant.

En raison des contraintes statutaires exposées ci-dessus, une vitrine cloche avec support mobile pour entrer et sortir de moteur a finalement été réalisée en 2022-2023, avec contrôle climatique par cassettes de ProSORB et relevés climatiques avec rapport annuel. Nous avons contribué à la conception de la vitrine en proposant les paramètres suivants :

- 1/ Vitrine cloche avec joints toriques pour assurer une parfaite étanchéité dont l'efficacité sera à vérifier ;
- 2/ Socle de 60 centimètres de haut pour permettre la vue de dessus du moteur ;
- 3/ Conception du socle de présentation qui doit supporter une charge de 300 kg (poids du moteur) + le poids de la vitrine / Robustesse de la structure et les dimensions qui doivent s'adapter aux dimensions du moteur ;
- 4/ Le socle doit permettre le rangement des appareils de mesure et des systèmes de régulation thermo-hygrométrique ;
- 5/ Le socle doit permettre l'installation de capteurs dans la vitrine qui feront interface avec les appareils de régulation dans le socle (prévoir des passages pour câbles, capteurs et échanges gazeux avec joints toriques).

Le moteur a finalement été exposé en 2023. La maintenance est réalisée par une chargée des collections de la Se-mecel, société exploitant par délégation les sites de la Cité de l'Espace et l'Envol des pionniers. De la conception de la vitrine à aujourd'hui, nous ne sommes plus intervenus.

Résultats et discussion

D'une première demande simple de restauration à la compréhension historique et technique du moteur Merlin, l'intervention conjointe de Materia Viva et du CEMES aura permis une valorisation bien plus intéressante qu'espérée initialement. En raison de la nature même du moteur, véritable pile galvanique comportant tous les éléments de sa propre destruction, les traitements ont été *a minima*, et c'est sur la conservation préventive que repose le futur de ce vestige. Les mesures prises finalement sont *a minima*, et il serait intéressant d'étudier et de mettre en œuvre des moyens de contrôle de l'évolution des corrosions, des protections avec anodes sacrificielles ou la mise en atmosphère pour garantir la conservation de long terme.

Si son statut n'a pu finalement permettre l'intégration à Procraft, espérons que les résultats à venir du projet européen pourront améliorer et garantir l'avenir du moteur Merlin. Sa restauration et son exposition ont été valorisées à Toulouse par une cérémonie d'hommages aux pilotes et mécaniciens anglais de l'Avro Lancaster que le moteur Merlin équipait, en présence de certains descendants. Gageons que cette notoriété soit garante de l'intérêt qui sera toujours porté à ce vestige.

Conclusion

La restauration du moteur Merlin de Rolls Royce, découvert dans le sous-sol de Toulouse en 2011, a été restauré en 2017 puis exposé à l'Envol de Pionniers en 2023. Vestige historique de la Seconde Guerre mondiale, il se distinguait des autres vestiges aéronautiques conservés en France et en Europe par son enfouissement dans le sol, et les systèmes de corrosion s'apparentaient à ceux des métaux archéologiques.

L'étude et les analyses des différentes parties restantes du moteur ont mis en évidence la diversité des métaux présents et leur connexion dans l'alliage d'aluminium constituant l'essentiel du moteur. Les traitements ont été validés selon les données obtenues : micro-sablage et protections adaptées. Mais le moteur est une pile galvanique, acteur de sa propre destruction. Seules des mesures de conservation préventive et un contrôle rigoureux permettront d'en garantir l'avenir. Espérons que les recherches menées dans le cadre du projet européen PRO-CRAFT pourront ouvrir de nouvelles perspectives pour ce moteur, tant pour des protections plus efficaces que pour des mesures environnementales plus adaptées.

Remerciements

Nous remercions vivement les Ailes Anciennes de nous avoir accueillies et toujours épaulées, Johanne Banchet de Toulouse Métropole d'avoir mené et défendu le projet, Sophie Reynard Dubis de l'Atelier de restauration de la Ville de Toulouse, Christian Degriigny de la Haute Ecole Arc'Neuchatel, de nous avoir livré ses connaissances sur le sujet, et tous les partenaires toulousains réunis autour du projet Procraft : Aeroscopia, l'Envol des Pionniers, Jean-Marc Olivier de Framespa, Luc Robbiola de Traces.

Session Poster

TRAITEMENT APRÈS SINISTRE DES OEUVRES MÉTALLIQUES DU MUSÉE COCTEAU, COLLECTION WUNDERMAN, À MENTON (ALPES MARITIMES)

Livia Marini, Margot Morisse*

Atelier Morisse- Marini

 info@morisse-marini.com

* Autrice correspondante

Résumé

Durant la nuit du 29 au 30 octobre 2018, le Musée Cocteau- Collection Wunderman, construit sur le parvis du bastion de Menton en zone inondable est inondé en totalité, par suite d'une alerte vague-submersion. Avec l'aide des pompiers en grande partie, toutes les oeuvres sont évacuées dans les jours qui suivent.

Notre atelier est appelé, un an jour pour jour après l'évènement, pour effectuer, pour les assurances, les constats d'état et les devis de restauration des oeuvres sculptées en métal de la collection conservées au musée de Pré-histoire Régionale dans l'attente.

En mai 2024, les 8 oeuvres sculptées et 2 médailles sont livrées dans notre atelier pour restauration.

Abstract

During the night of October 29 to 30, 2018, following a wave-submergence alert, the Musée Cocteau- Collection Wunderman, built on the forecourt of the Menton bastion in a flood-prone area, was flooded in its entirety. With the fire department's help, all the works were evacuated in the following days.

One year to the day after the event, our workshop was called in to carry out condition reports for the insurance and provide estimates for the conservation of the collection's metal sculptures stored temporarily in the Musée de Préhistoire Régionale.

In May 2024, the 8 sculptures and 2 medals were delivered to our workshop for conservation.

TRAITEMENT APRÈS SINISTRE DES OEUVRES MÉTALLIQUES DU MUSÉE COCTEAU, COLLECTION WUNDERMAN, À MENTON

Morisse Margot Conservatrice-restauratrice, Atelier Morisse Marini - Marini Livia, Etudiante HE-ARC

CONTEXTE

Durant la nuit du 29 au 30 octobre 2018, le Musée Cocteau- Collection Wunderman, construit sur le parvis du bastion de Menton en zone inondable, par suite d'une alerte vague-submersion, est inondé en totalité. Avec l'aide des pompiers les œuvres sont évacuées, en grande partie, dans les jours qui suivent.

Notre atelier est appelé, un an jour pour jour après l'évènement, pour effectuer, pour les assurances, les constats d'état et les devis de restauration des œuvres sculptées en métal de la collection conservées au musée de Préhistoire Régionale dans l'attente.

AVANT TRAITEMENT



L'ENSEMBLE EST COMPOSÉ DE

- C. De La Patelliereyu, «Jean Cocteau»
- J. Gastalder, «Buste de Jean Cocteau»
- J. Cocteau, «Jean Marais en faune»
- Anonyme, «Main gauche de Jean Cocteau»
- Anonyme, «Main droite de Jean Cocteau»
- S. Bernhardt, «Autoportrait aillée, Shakespeare et Molière»
- J. Herbert-Coeffin, «médaille profil de Cocteau»
- J. Herbert-Coeffin, «médaille profil de Cocteau»

TRAITEMENT



LES TRAITEMENTS EFFECTUÉS SONT

1. Un premier nettoyage à l'eau de ville et à la brosse pour enlever les dépôts de minéraux et de poussières.
2. Une mise en bain d'eau déminéralisée avec «agitateur» pendant trois jours. Mesure au conductimètre de la teneur de sels solubles de l'eau une fois par jour, jusqu'à l'obtention de valeurs acceptable.
3. Un premier rinçage à l'éthanol et à la brosse pour enlever les derniers résidus qui pourraient rester.
4. Un deuxième rinçage à l'acétone pour enlever les résidus d'éthanol.
5. Retouche à la peinture acrylique sur les zones d'impact.
6. Cirage final avec une cire microcristalline.

APRÈS TRAITEMENT



DÉCOUVERTES FAITES LORS DU TRAITEMENT

- Présence de polychromie (cuivre) sur l'oeuvre de S. Bernhardt
- Concentration de sels solubles particulièrement basse dans les bains d'eau déminéralisée.

CONCLUSION

Malgré des conditions climatiques et environnementales peu adaptées à ce type de matériau et une intervention de traitement particulièrement tardive, l'état global de ces objets en bronze s'est révélé très satisfaisant.

Nous pensons que leur bonne conservation pendant le sinistre est due aux couches de cire et aux patines présentes, qui les ont efficacement protégés de cet environnement défavorable. Pour ces raisons, l'utilisation d'un traitement final à base de cire microcristalline nous est apparue comme la meilleure solution.

LE PLOMB ET LE FEU, UNE ALLIANCE NÉFASTE

Typhaine Brocard Rosa*, Monique Drieux

Materia Viva

 materia-viva@orange.fr

* Autrice correspondante

Résumé

La cuve en plomb baptismale d'Aubin (12) : une perte irrémédiable. Une cuve en alliage de plomb du XIII^e siècle et classée monument historique en 1908 est conservé sur un socle de pierre dans l'église d'Aubin. En 2007, la cuve a subi un incendie criminel qui a détruit une grande partie des décors historiés. Materia Viva est intervenu de 2007 à 2010 pour mettre en place des mesures d'urgence, puis pour proposer une restauration des éléments restants et un soclage de conservation offrant une prothèse à l'œuvre. De l'absence de protection à la fusion du métal par vandalisme, la cuve a souffert de façon irréversible. Quelles mesures auraient été nécessaires en amont et quels dispositifs ont été pris depuis ?

Abstract

The St Aubin lead baptismal font (12): an irretrievable loss. A 13th-century lead-alloy baptismal font, listed as a historic monument in 1908, is preserved on a stone base in the church of Aubin. In 2007, the font suffered an arson attack, which destroyed much of its historiated decoration. Materia Viva intervened from 2007 to 2010 to implement emergency measures, and then to propose a conservation of the remaining elements and a conservation stand offering a prosthesis to the work. From the lack of protection to the metal melting due to vandalism, the vessel has suffered irreversibly. What measures should have been taken beforehand, and what measures have been taken since?



Journée Métal France 2025

Le plomb et le feu, une alliance néfaste

Monique Drieux et Typhaine Brocard-Rosa*

Fonts baptismaux en alliage de plomb datés du début du 1^{er} quart du XIII^{ème} siècle et classés au titre objet par les Monuments Historiques le 5 mai 1908. (H : 34 cm et diam. ext. 50cm). Les flans sont décorés par moulage de deux registres historiés.

La cuve est conservée dans l'église d'Aubin (12), sur un socle en pierre où elle est maintenue et sécurisée par deux pattes d'acier noires fixées sur les côtés.



Le sinistre

En 2007, un incendie criminel a détruit une grande partie des fonts, notamment des décors historiés. Des livres du culte ont été brûlés dans la cuve, avec quatre bougies neuves placées autour. Le plomb se liquéfie à 327,5°C, température facilement atteinte au centre d'un feu de papiers.



Des dégâts irréversibles

Fusion de l'alliage, du fond et des trois quarts du bandeau inférieur et un quart du bandeau supérieur : perte irréversible. Début de clivage entre l'épaisseur réduite en métal et la surface encore minéralisée. Présence de poussières de plomb et de suie.

Mesures conservatoires

Dépose et transport à Materia Viva.

Recherche de documentation : aucune photographie existante représentant la totalité du décor ni de l'objet. L'option envisagée de restituer en impression 3D les parties manquantes est abandonnée.

Réalisation d'un support en acier recouvert d'une peinture cuite, sorte de prothèse ajustable supportant la partie supérieure et placée à l'intérieur de la cuve. (Réalisation M. Jeanclos, Paris).

Élimination des suies et des dépôts par aspiration.

Conservation des parties restantes avec des consolidations.

Restitution des parties manquantes par une plaque métallique non décorée, mise en teinte, entièrement réversible et placée à l'intérieur pour être en retrait.



Mesures de protection

Mise en sécurité dans un lieu clos : mise à distance et installation de grilles.

Recommandations de conservation préventive : climat, manipulation, entretien.



*Monique Drieux et Typhaine Brocard-Rosa, conservatrices-restauratrices au laboratoire Materia Viva, Toulouse. materia-viva@orange.fr

LUTTER CONTRE LA PERTE D'INFORMATION EN MUSÉE : VERS UNE DÉMARCHE SYSTÉMATIQUE DE RESTAURATION DANS LE CADRE D'UNE REPRISE DE TRAITEMENT DES OBJETS MÉTALLIQUES

Jade Guilbaud*, Zoé Dauzat

Musée Émile Chenon, Châteaumeillant

 musee@chateaumeillant.fr

* Autrice correspondante

Résumé

Le musée Emile Chénon expose dans son parcours permanent et conserve en réserve 90 objets métalliques inscrits à l'inventaire réglementaire. Les premières campagnes du récolement décennal 2016 – 2025, permettant de faire le point sur l'état général d'une grande partie des collections, ont révélé une altération du mobilier métallique qui présentait des signes d'oxydation. Face à ces collections qui nécessitent une attention particulière, les agents patrimoniaux se sont mobilisés pour améliorer leurs conditions de conservation.

Le musée bénéficiant d'une enveloppe budgétaire relativement faible, nous avons dû prioriser les demandes de restauration, en privilégiant des objets qui constituent des pièces indispensables au discours scientifique et au parcours de visite. Suite à l'avis favorable de la CSRR en 2022, une paire de force gauloise en fer forgé présentant des signes de corrosion active avec notamment des fissures et des soulèvements, et un lot de 75 potins en alliage cuivreux dont nous avons constaté la présence d'une corrosion en amas, sont actuellement en restauration. Il conviendra pour le restaurateur de procéder à une stabilisation de la corrosion, au comblement et à la protection générale de ces objets. Leur retour étant prévu en septembre 2024, le musée se prépare à leur offrir un environnement optimal pour garantir leur conservation.

Afin de préserver la durabilité de ces objets, deux études ont été programmées durant l'année 2024 : un rapport de mission réalisé par le C2RMF en vue d'une évaluation globale des conditions de conservation des collections et la mise en œuvre d'une étude en conservation préventive des collections archéologiques, spécifiquement du mobilier métallique inscrit à l'inventaire réglementaire du musée.

Lors de cet échange, nous souhaitons vous présenter les différentes étapes engagées par le corps muséal pour la sauvegarde à moyen et long terme de notre patrimoine métallique.

Abstract

The Emile Chénon Museum exhibits 90 metal objects in its permanent collection and keeps 90, listed in its statutory inventory, in its storerooms. The first campaigns of the 2016 - 2025 decennial inventory, which enabled us to take stock of the general condition of a large part of the collections, revealed the deterioration of the movable metallic objects, which showed signs of oxidation. Faced with these collections needing special attention, heritage agents were mobilized to improve their conservation conditions.

As the museum has a relatively small budget, we had to prioritize conservation requests that focused on objects

that are essential to the scientific discourse and the visitor experience. Following approval from the CSRR in 2022, a pair of Gallic wrought-iron forks showing signs of active corrosion, including cracks, and lifting, as well as a batch of 75 copper-alloy pots with clustered corrosion, are currently being conserved. The conservator will have to stabilize the corrosion, make fills, and protect these objects. Since their return is scheduled for September 2024, the museum is currently preparing to provide them with an optimal environment to guarantee their preservation.

To preserve the long-term preservation of these objects, two studies were scheduled for 2024: a mission report by the C2RMF for an overall assessment of the conservation conditions of the collections, and the implementation of a preventive conservation study of the archaeological collections, specifically the movable metallic objects listed in the museum's statutory inventory.

During this discussion, we would like to present the various steps taken by the museum to safeguard our metal heritage in the medium and long term.

Introduction – Contexte

Inauguré en 1963, le musée Emile Chénon conserve les collections issues du site archéologique de Châteaumeillant, l'antique oppidum celte de *Mediolanum*, l'un des grands sites de hauteur fortifiés du second âge du Fer de la cité des Bituriges Cubes [3]. Les campagnes de fouilles successives, débutées au XIXe siècle, ont permis la découverte d'artefacts significatifs retraçant l'histoire générale de Châteaumeillant depuis le paléolithique jusqu'à l'époque contemporaine.

En 2012, la découverte d'objets exceptionnels en bronze dans un puits gallo-romain initie un important programme de rénovation du musée permettant la refonte du parcours muséographique. Si jusqu'en 2015 des collections de toutes époques étaient exposées, le discours permanent est désormais articulé selon un cheminement chronologique de l'âge du Fer à l'époque gallo-romaine, évoquant ainsi 500 ans de l'histoire de Châteaumeillant.

Au sein des collections archéologiques du musée sont exposés et conservés en réserve 90 objets métalliques inscrits à l'inventaire réglementaire. Face à ces artefacts qui nécessitent une attention particulière, les agents patrimoniaux se sont mobilisés pour améliorer leurs conditions de conservation. Depuis plusieurs années un suivi détaillé est mis en place, notifié dans le Plan de Conservation Préventive alimenté par des « fiches protocoles ». Le musée a également acquis un matériel spécialisé afin de contrôler et de réguler les variations de température et d'hygrométrie dans les salles, réserves ou vitrines exposant ces objets (thermohygromètres simples, thermohygromètres enregistreurs, générateurs microclimats, déshumidificateurs).

Cependant, les premières campagnes du récolement décennal 2015 – 2025 permettant de statuer sur l'état général des collections ont révélé une altération du mobilier métallique qui présentait des signes avérés de reprise de corrosion active, notamment des tâches de corrosion vert clair pulvérulentes sur certains potins. Le musée bénéficiant d'une enveloppe budgétaire relativement faible, nous avons dû prioriser les demandes de restauration, en privilégiant des objets qui constituent des pièces indispensables au discours scientifique et au parcours de visite. Suite à l'avis favorable de la CSRR Centre-Val de Loire en 2022, une paire de forces gauloise en fer forgé (Figure 1) et un lot de 75 potins en alliage cuivreux (Figure 2) ont pu bénéficier d'une restauration. En septembre 2024, les objets ont pu retrouver leurs vitrines.



Figure 1. Paire de forces gauloise, vue générale. Dimensions de l'objet : L. 25cm x l. 5,7cm x h. 4 cm.
© Musée Emile Chénon.2022



Figure 2. Lot de potins, vue générale. Dimensions moyennes de l'objet : D. 1,7cm x P. 0,4cm.
© Musée Emile Chénon.2022

Les objets en restauration

Le nouveau parcours muséographique de 2015 a dédié une salle à l'artisanat gaulois, dans laquelle sont présentés des témoignages de la vie quotidienne des habitants de *Mediolanum*. La paire de forces exposée aux côtés de fusaïoles et de pesons fait état du travail du textile alors que les monnaies évoquent celui du métal. Ces objets constituent des pièces indispensables au discours scientifique et au parcours de visite.

Suite au récolement décennal, des signes de corrosion sont constatés sur le lot de potins. Une corrosion en amas (Figure 3), mais également d'importantes fissures sur certaines monnaies (Figure 4). Les moins bien conservées présentent des marques avérées de corrosion active. Sur le lot, 68 monnaies sont en mauvais ou dans un état moyen. Concernant la paire de forces, plusieurs altérations sont à mentionner : fragilisation au niveau du ressort (Figure 5), signes de corrosion active tels que fissures et soulèvements (Figures 6-7) ; une fissure s'est amplifiée depuis l'entrée de l'objet à l'inventaire réglementaire.

Afin d'améliorer leur lisibilité et de garantir leur conservation à long terme, il convient de procéder à une stabilisation de la corrosion et à la protection générale de ces objets. Une dérestauration ainsi qu'un comblement des parties seront nécessaires pour la paire de forces.

Les objets, confiés au laboratoire *Antepostquem* ont bénéficié d'une restauration dite « classique » : dérestauration pour la paire de forces, stabilisation de la corrosion par voie chimique (8), nettoyage et curage des spots de corrosion active (Figures 9 et 10), puis protection.



Figure 3. Potins, détails de corrosion.
© Musée Emile Chénon.2022



Figure 4. Potins, détails d'altération avec déformation et fissures. © Musée Emile Chénon.2022



Figure 5. Paire de forces gauloise, détails fragilisation du ressort avec fissuration. © Musée Emile Chénon.2022



Figure 6. Paire de forces gauloise, détails du soulèvement des surfaces corrodées avec desquamation partielle.
©Musée Emile Chénon.2022



Figure 7. Paire de forces gauloise, détails du soulèvement des surfaces corrodées avec desquamation partielle. © Antepostquem.2024



Figure 8. Paire de forces gauloise après le processus de stabilisation. © Antepostquem.2024



Figure 9. Sablage de la paire de forces gauloise, laboratoire Antepostquem. ©Musée Emile Chénon.2022



Figure 10. Curage des spots de corrosion active, laboratoire Antepostquem. ©Musée Emile Chénon.2022

L'absence de contexte de restauration : le cas des potins de Châteaumeillant

Si aucune méthode « innovante » n'a été utilisée pour la restauration de ces objets, Madame Charlotte Rérolle, restauratrice au sein du laboratoire *Antepostquem*, a néanmoins rencontré plusieurs difficultés. Une question centrale mais peu évoquée s'est posée quant aux restaurations antérieures du trésor monétaire. En somme, s'agit-il d'une reprise de traitement ?

Plusieurs éléments convergent vers cette hypothèse, selon laquelle les potins gaulois auraient subi, dans le passé, une première campagne de restauration. L'expertise de Madame Rérolle évoque un possible nettoyage par sablage qui aurait abrasé la surface des monnaies rendant difficile la lecture iconographique de ces dernières. Le seul document qu'il nous a été possible de consulter et qui mentionne cette supposition est l'étude concernant *Les trouvailles monétaires gauloises de Châteaumeillant (Cher)* d'André Cothenet [4] datée de l'année 1962. Il évoque « un premier nettoyage qui ne prétend pas avoir éliminé toutes les impuretés incorporées dans l'oxyde ». Selon cette même analyse, l'altération des dessins initiaux pourrait venir du terrain dans lequel les monnaies ont été découvertes : un environnement contenant du sable gréseux extrêmement fin qui aurait pénétré le métal et provoqué des protubérances destructrices.

Entrer dans une démarche systématique de restauration

Afin de lutter contre la perte d'information, le musée Emile Chénon tend à intégrer une démarche systématique dans le but d'offrir un cadre spécifique de restauration. Un cheminement nécessaire pour la préservation des objets les plus fragiles que sont nos collections métalliques.

Outre le suivi détaillé et les divers aménagements en conservation préventive évoqués plus haut dans l'article, deux études ont été programmées durant l'année 2024 afin de préserver la durabilité des nos collections. Un rapport de mission réalisé par le C2RMF en vue d'une évaluation globale des conditions de conservation et la mise en œuvre d'une étude en conservation préventive des collections archéologiques, spécifiquement du mobilier métallique inscrit à l'inventaire réglementaire du musée. Recommandée par la Commission Scientifique Régionale de Restauration en septembre 2022, cette seconde étude comprend un bilan sanitaire général, un examen de leurs conditions de conservation et des préconisations d'intervention. Les conclusions de l'étude ont permis de planifier et prioriser plus facilement les restaurations à effectuer dans le cadre de notre calendrier pluriannuel mais aussi de compléter notre Plan de Conservation Préventive. Il est fondamental de signaler ici l'importance et l'utilité de ces bilans qui participent à la compréhension de nos collections et de leurs besoins impérieux ou secondaires. Qu'il s'agisse de besoins relatifs à leur environnement, à leur conditionnement ou à leur stockage, mais également dans certains cas, des besoins nécessitant l'intervention d'un tiers : la restauration.

Nous espérons que ces initiatives, entreprises dans le cadre du musée, se poursuivront de façon pérenne afin de faciliter le travail des spécialistes lors de nos restaurations ou reprises de traitements futures.

Conclusion

Le manque de renseignements quant aux potentielles restaurations antérieures des monnaies gauloises de Châteaumeillant a considérablement perturbé la mise en œuvre de la restauration, à savoir : un traitement beaucoup plus long que celui initialement prévu par la restauratrice ainsi qu'une détérioration considérable conduisant à la perte d'informations iconographiques (Figures 11 et 12). Une altération telle qu'un choix entre traitement approfondi susceptible d'une perte totale d'information ou traitement « partiel » a dû être envisagé pour certaines monnaies du lot.

Rappelons qu'une restauration largement documentée, notamment concernant les collections métalliques qui restent les plus susceptibles de subir des altérations, permettra de garantir l'intégrité de l'œuvre lors d'une potentielle reprise de traitement, et de la sauvegarder à moyen et long terme.

Il revient aux musées d'offrir un encadrement spécifique, garantissant une documentation précise quant au contexte de restauration des objets inscrits dans leurs collections.



Figure 11. Potins dits au cheval «courant» ou «bondissant» avec récupération iconographique



Figure 12. Potin dits « indéterminés » avec perte considérable, si ce n'est totale, de la lecture iconographique

Remerciements

Les deux agents en charge du musée Emile Chénon tiennent à remercier Madame Charlotte Rérolle du laboratoire *Ante-postquem* pour ses différentes interventions pour la restauration et la conservation de nos collections métalliques. Nous souhaitons également remercier la DRAC Centre-Val de Loire sans qui la restauration de nos objets ne serait pas envisageable. Enfin, un grand merci au comité d'organisation de la Journée Métal France pour leur accompagnement.

Références

- [1] <https://www.ecco-eu.org/>, consulté le 10/09/2024
- [2] Picard C., Circonscription de Paris (région sud), *Gallia* **21** (2) (1963) p. 383-390
- [3] Krausz S., La topographie et les fortifications celtiques de l'oppidum biturige de Châteaumeillant-Mediolanum (Cher), *Revue archéologique du Centre de la France* **45-46** | (2006-2007), <http://journals.openedition.org/racf/632>
- [4] Cothenet A., Les trouvailles monétaires gauloises de Châteaumeillant (Cher), « *Celticum VI* », supp. à *Ogam* (1963) p.95-98

Conservation – restauration de la paire de forces et des potins gaulois de Châteaumeillant.

Vers une démarche systématique de restauration dans le cadre d'une reprise de traitement des objets métalliques.

Jade Guilbaud* responsable scientifique des collections ; Zoé Douzat médiatrice culturelle

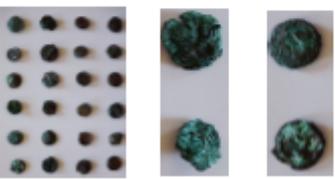
| | |
|--|--|
| <p>Notice d'œuvre : Paire de forces</p> <p>Désignation : Paire de forces gauloise N° d'inventaire : 2015.1.8 Période : Âge du fer Période de découverte : 2008 Technique : Fer forgé Matériau : Alliage ferreux Dimensions : L : 25cm X h : 4cm X l : 5,7cm</p>  | <p>Notice d'œuvre : Potins gaulois</p> <p>Désignation : Potin (lot, 75) N° d'inventaire : 2013.0.10 Période : Âge du fer Période de découverte : Entre 1956 et 1963 Technique : Potin coulé Matériau : Alliage cuivreux Dimensions : Diamètre moyen : 1,7cm X épaisseur moyenne : 0,4cm</p>  |
|--|--|

Contexte

Le récolement décennal 2015 – 2025 a permis d'évaluer l'état général des collections du musée et a révélé une altération du mobilier métallique qui présentait des signes avérés de corrosion active. Après avoir priorisé les urgences d'intervention, deux éléments qui constituent des pièces indispensables au discours scientifique ont été envoyés en restauration au sein du laboratoire AntePostQuem. Grâce aux subventions accordées par la CSRR Centre-val de Loire en 2022, la paire de forces gauloise et le lot de potins ont pu bénéficier d'un nouveau traitement.

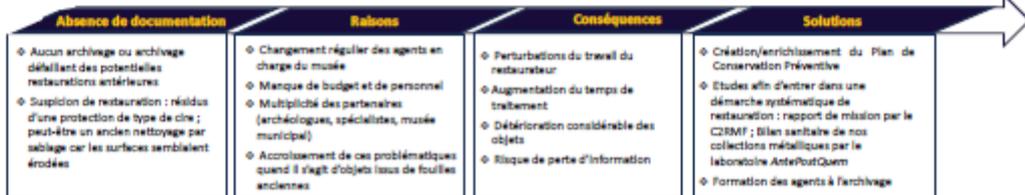
Etapes et contraintes rencontrées

| 2015 - 2025 | 2022 | 2023 - 2024 | 2024 |
|--|---|---|--|
| Récolement et priorisation des interventions. Contrainte : Le musée dispose d'un budget très restreint. | Avis favorable de la CSRR Centre-val de Loire et obtention de subventions de la DRAC CVL. | Restauration au sein du laboratoire AntePostQuem. Contrainte : Restauration dite « classique » mais perturbée à cause de la méconnaissance du contexte de restauration des objets. | Retour des objets en vitrine pour la paire de forces et en réserve pour le trésor monétaire. Réalisation d'un bilan sanitaire des collections métalliques du musée. |

| | | |
|---|--|---|
| <p>Paire de forces gauloise avant restauration</p>  <ul style="list-style-type: none"> Corrosion active Fissures et soulèvements Fragilisation au niveau du ressort Première restauration en 2008 – lacunaire | <p>Paire de forces gauloise pendant restauration</p>  <ul style="list-style-type: none"> Consolidation préalable : résine époxyde à prise rapide Stabilisation : déchloration ; 5 bains de soude sur 10 mois Nettoyage : micro-sablage Passivation : acide tartrique à 5% dans l'eau déminéralisée Collage et comblement : résine époxyde de type Araldite rapide Protection | <p>Paire de forces gauloise après restauration</p>  |
| <p>Potins gaulois avant restauration</p>  <ul style="list-style-type: none"> Corrosion en amas Importantes fissures et déformations sur certaines monnaies Indices de corrosion active et évolutive Potins déjà traités. Néanmoins aucune archive à ce propos | <p>Potins gaulois pendant restauration</p>  <ul style="list-style-type: none"> Nettoyage mécanique pour les potins en alliage cuivreux : stylo ultrason, brossage Stabilisation : bains individuels de benzo trioxole ; brossage au pinceau imbibé d'éthanol et stabilisation blanche en surface ; curage si reprise de corrosion Protection : résine acrylique et inhibiteur de corrosion pour les potins en alliage cuivreux | <p>Potins gaulois après restauration</p>  |

Problématique : L'absence de contexte de restauration peut – il perturber une reprise de traitement ? Le cas des 75 potins de Châteaumeillant

« Le conservateur veille à ce que chaque restauration fasse l'objet d'un dossier la documentant (examen diagnostique, détail des interventions de conservation et de restauration). Ces documents demeurent accessibles au musée et mentionnent les noms des restaurateurs sollicités. », article L. 452-1 du Code du Patrimoine



SOLUTIONS VERTES POUR LUTTER CONTRE LA CORROSION DES MÉTAUX

Edith Joseph*, Luana Cuvillier, Arianna Passaretti, Qing Wu, Patrycja Petrasz

Haute école Arc Conservation-restauration HE-Arc CR, Haute école spécialisée de Suisse occidentale HES-SO

 edith.joseph@he-arc.ch

* Autrice correspondante

Résumé

Le changement climatique est défini par l'UNESCO comme l'une des plus grandes menaces de notre époque, et il est donc crucial de préserver et de transmettre non seulement le patrimoine culturel, mais aussi le patrimoine naturel aux générations futures. La science de la conservation doit répondre à ces défis sociétaux en se concentrant sur des solutions qui remplaceraient les méthodes et matériaux désormais obsolètes en termes de durabilité environnementale, liés à la gestion des déchets, à la contamination de l'eau et des sols, et à la pollution de l'air. En effet, les dommages et pertes sévères du patrimoine culturel sont accélérés par le changement climatique mondial, y compris pour les artefacts métalliques archéologiques ou historiques. Parallèlement, les professionnels de la conservation sont de plus en plus attentifs à l'impact environnemental et sanitaire négatif de leurs pratiques. Agir pour le développement de méthodes et de matériaux durables représente donc une stratégie de conservation ultime pour préserver le patrimoine culturel. La présentation donnera un aperçu des approches alternatives vertes développées à la Haute École Arc Conservation-restauration en conservation des métaux.

Basée sur une approche de conservation verte qui priorise l'environnement et la santé, la recherche proposée vise à lutter contre la corrosion sur les objets métalliques archéologiques et historiques et à aborder cette problématique sur des objets en cuivre, en fer et en argent. En particulier, un nettoyage contrôlé peut être réalisé en utilisant des composés d'origine biologique tels que les métabolites secondaires (par exemple, les sidérophores, les acides organiques) capables de complexer les ions métalliques avec des rendements de performance similaires aux alternatives chimiques (par exemple, l'acide éthylène diamine tétraacétique, EDTA). De plus, la stabilisation est effectuée en exploitant les processus de biominéralisation se produisant chez les micro-organismes, tels qu'un traitement fongique (biopassivation) pour protéger les alliages de cuivre, une méthode de désalinisation bactérienne pour le fer archéologique ou un traitement contre les problèmes de soufre dans le bois gorgé d'eau. Pour réaliser une évaluation complète de l'impact de telles solutions innovantes, une analyse du cycle de vie est explorée et un exemple sera donné pour illustrer la performance de différents agents chélatants en termes de nettoyage mais aussi de durabilité, englobant la santé des opérateurs, la sécurité des objets et l'innocuité environnementale. À la frontière entre la conservation de l'art et les sciences naturelles, des solutions pionnières sont obtenues vers des méthodes inspirées de la nature, plus compatibles et plus écologiques, pour la conservation du patrimoine métallique.

Abstract

Climate change is defined by UNESCO among the greatest threats of our time and there is thus a crucial need to preserve and transmit not only cultural but also natural heritage for next generations. Conservation science should address both these societal challenges focusing on solutions that would replace methods and materials from now on outdated in terms of environmental sustainability linked to waste management, water and soil contamination, and air pollution.

Indeed, severe cultural heritage damage and loss are accelerated by global climate change, including archaeological or historical metal artefacts. At the same time, conservation professionals are always more attentive to the negative environmental and health impact of their practice. Acting towards the development of sustainable methods and materials hence represents an ultimate conservation strategy to preserve cultural heritage.

The presentation will give an overview of the alternative green approaches developed at the Haute Ecole Arc Conservation-restauration in metal conservation.

Based on a green conservation approach that prioritises the environment and health, the proposed research aims to act against corrosion on archaeological and historical metal objects and tackle this issue on copper-, iron- and silver-based objects.

In particular, controlled cleaning can be achieved using bio-originated compounds such as secondary metabolites (e.g. siderophores, organic acids) capable of complexing metallic ions with performance yields similar to chemical alternatives (e.g. ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA). Also, stabilization is performed exploiting biomineralization processes occurring in microorganisms, such as a fungal treatment (biopassivation) for protecting copper alloys, a bacterial desalination method for archaeological iron or a treatment against sulfur issues in waterlogged wood. To achieve a comprehensive evaluation of the impact of such innovative solutions, life cycle assessment is explored and an example will be given to illustrate the performance of different chelating agents in terms of cleaning but also sustainability, encompassing health of operators, objects safety and environmental innocuity. At the boundaries between art conservation and natural sciences, pioneering solutions are obtained towards more compatible and greener nature-inspired methods in metal heritage.

PROTECTION DES MÉTAUX CUIVREUX DU PATRIMOINE ET INHIBITION DE LA CORROSION ATMOSPHÉRIQUE, PAR PROCÉDÉ SOL-GEL

Elysa Letouzey^{1,2*}, Marc Maleval², Laurent Mughherli², Delphine Neff¹

¹LAPA-NIMBE/IRAMAT, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, France

²LEDNA-NIMBE, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, France

 elysa.letouzey@cea.fr

* Autrice correspondante

Résumé

Pour limiter les interactions entre le métal et l'atmosphère tout en préservant les couches de produits de corrosion (CPC), les restaurateurs utilisent des traitements de protection à base de composés organiques (e.g. cires microcristallines, BTA), appliqués à la surface de l'objet. Cependant, ces traitements ont une durée de vie limitée et/ou peuvent être toxiques pour les utilisateurs et l'environnement. Il est donc nécessaire de rechercher des traitements de protection innovants écoresponsables.

Récemment, les acides carboxyliques avec différentes longueurs de chaînes C_n, ont été étudiés en tant qu'inhibiteurs de corrosion dans la préservation des objets métalliques. Des mesures d'impédance ont prouvé leur efficacité sur différents substrats, grâce à la précipitation de carboxylates métalliques. Concernant le cuivre exposé en extérieur, l'étude par Apchain sur l'effet protecteur de l'acide C10 a démontré que la pénétration de l'inhibiteur dans la CPC poreuse est cruciale pour une meilleure protection. Afin de faire pénétrer l'inhibiteur plus profondément dans la CPC poreuse et hydrophile malgré le caractère hydrophobe des acides carboxyliques, et tout en améliorant la tenue sur le long terme, Lob a utilisé le procédé sol-gel et étudié des formulations à base de silice (TMOS), d'acétone et d'acides carboxyliques (C7, C8 et C10).

A la suite de ces travaux, pour pallier la toxicité de l'acétone, nous étudions plusieurs formulations sol-gel dopées en acide C8 avec divers solvants, sous forme de monolithes. Des mesures d'adsorption d'azote et de thermogravimétrie ont relié la nature des solvants et la quantité d'acide à la porosité des gels et à la vitesse de diffusion de l'inhibiteur. Les formulations ont ensuite été appliquées sur des échantillons modèles de CPC. Ces derniers sont fabriqués à partir de pastilles de brochantite de synthèse, phase représentative des CPC, ainsi que sur des échantillons de toiture historique (~ 100 ans) pour les formulations les plus performantes.

Afin de mieux comprendre les mécanismes d'inhibition de la corrosion, nous avons employé une approche analytique multi-échelle de la porosité du système, de sa composition chimique et de sa structure. Nous détaillerons cette approche basée sur les analyses complémentaires par adsorption d'azote, analyse thermogravimétrique, spectroscopie Raman et SEM-EDS. Nous discuterons ensuite de la pénétration du silicium et de l'acide résultant du processus sol-gel dans la CPC et de la cinétique de formation du carboxylate de cuivre dans le modèle CPC ainsi que dans les échantillons historiques.

Abstract

To limit interactions between metals and the atmosphere while preserving the layers of corrosion products (CPC), conservators use protective treatments based on organic compounds (e.g., microcrystalline waxes, BTA) applied on the surface of the object. However, these treatments have a limited lifespan and/or can be toxic for users and the environment. It is therefore necessary to look for innovative, eco-friendly protective treatments.

Recently, carboxylic acids with different C_n chain lengths have been studied as corrosion inhibitors in the preservation of metal objects. Impedance measurements have proven their effectiveness on different substrates, thanks to the precipitation of metal carboxylates. In the case of copper presented outdoors, Apchain's study of the protective effect of C₁₀ acid showed that penetration of the inhibitor into the porous CPC is crucial for better protection. To make the inhibitor penetrate more deeply into the porous and hydrophilic CPC despite the hydrophobic nature of the carboxylic acids, while improving long-term resistance, Lob used the sol-gel process and studied formulations based on silica (TMOS), acetone, and carboxylic acids (C₇, C₈, and C₁₀).

Following on from this work, to offset the toxicity of acetone, we are studying several sol-gel formulations doped with C₈ acid with various solvents, in the form of monoliths. Nitrogen adsorption and thermogravimetric measurements linked the nature of the solvents and the amount of acid to the porosity of the gels and the diffusion rate of the inhibitor. The formulations were then applied to CPC model samples made from synthetic brochantite pellets, a representative phase of CPCs, as well as on samples of historic roofs (~ 100 years old) for the most effective ones.

To gain a better understanding of the corrosion inhibition mechanisms, we employed a multi-scale analytical approach to the porosity of the system, its chemical composition, and its structure. We will detail this approach based on complementary analyses by nitrogen adsorption, thermogravimetric analysis, Raman spectroscopy, and SEM-EDS. We will then discuss the penetration of silicon and acid resulting from the sol-gel process into the CPC and the kinetics of copper carboxylate formation in the CPC model as well as in the historical samples.



Protection des métaux cuivreux du patrimoine par des traitements à base de sol-gel - compréhension des mécanismes physicochimiques de l'inhibition de la corrosion



Letouzey Elysa^{1,2}, Maleval Marc², Mugherli Laurent², Neff Delphine¹

¹LAPA-NIMBE/IRAMAT, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, France

²LEDNA-NIMBE, CEA, CNRS, Université Paris-Saclay, France

Contexte

La protection des objets en cuivre et alliages de cuivre contre la corrosion atmosphérique constitue un enjeu crucial pour la conservation du patrimoine. La nature poreuse et hydrophile des couches de produit de corrosion (CPC), formées à la surface du métal, ainsi que les nouvelles normes sur la toxicité encouragent la recherche de traitements de protection innovants et efficaces dans le temps. Pour ralentir l'effet de la corrosion atmosphérique tout en protégeant les CPC, nous développons un traitement sol gel dopé en inhibiteur de corrosion et étudions les mécanismes de protection résultants.

Problématique

CPC poreuse et hydrophile sensible aux conditions extérieures [1].

Afin de conserver la CPC, des traitements de protection à base d'acides carboxyliques hydrophobes ont prouvé leur efficacité comme inhibiteur de corrosion [2, 3] mais leur pénétration dans la couche minérale reste difficile.

Procédé sol-gel : faire pénétrer l'inhibiteur de corrosion hydrophobe dans les porosités hydrophiles de la CPC [4]

Objectifs

- Optimiser la formulation/application sol-gel
- Formulation peu toxique
- Application adaptée au terrain
- Comprendre les mécanismes de protection impliqués
- Diffusion inhibiteur de corrosion dans la CPC
- Temps de cure
- Comportement du gel dans les pores :
 - formation d'espaces hydrophobes (carboxylates de cuivre) ?
 - effet réservoir d'inhibiteur ?

Non-toxique utilisateurs / environnement

Transparent

Réversible

Morphologie complexe

Compatible couche minérale poreuse

Résistant long terme

Traitement de protection du patrimoine

Axe 1 : Formulation sol-gel

Procédé sol-gel et dopage

Généralité sur le procédé sol-gel

Dopage du procédé sol-gel en inhibiteur de corrosion

- Précurseur alylé
- Inhibiteur de corrosion

Formulations

matrice de silicium — TEOs
 inhibiteur — acide octanoïque (HC₈)
 solvant — variable

La transparence, l'homogénéité et la tenue mécanique des monolithes résultent d'une solubilité suffisante de l'acide

→ critère de sélection

Influence de la formulation sur la porosité du gel

→ L'inhibiteur de corrosion est encapsulé dans le monolithe de silice.

La nature et la quantité de solvant et d'inhibiteur modifient la porosité du gel

→ présence de pores couverts et de pores fermés dans le monolithe

→ variation de l'état de solubilité d'HC₈ selon le type de pores (ouverts, fermés, taille des pores)

Axe 2 : Mécanismes de protection Interactions traitement /CPC

• Développement et traitement d'une couche modélisée : pastille de brochantite de synthèse

Couche modélisée pastille brochantite synthèse

Couche historique tourbe Eglise St Martin (Mez)

Application sol sur couche modélisée

Dip coating couches historiques dans sol

Distribution de porosité semblable → sélection du modèle

• Etudes physico-chimiques du comportement du traitement sur des couches modélisées et historiques

COUCHES MODELISEES

→ présence de Cu₂ dans la brochantite traitée

Le gel occupe 100% du volume poreux de la pastille (selon)

porosité de couche après traitement

COUCHES HISTORIQUES

→ Silicium : marqueur de la pénétration du gel dans toute l'épaisseur de la couche avec front de pénétration

→ le gel pénètre dans les pores de la couche et modifie la porosité.

Axe 3 : Application sur matériaux historiques Perspectives

Substrat

- Influence du type de substrat et des CPC (alliages bronze et laiton)
- Etat hydrique de la CPC (saturation en eau des pores)

Application du traitement :

- Méthode d'application (pinceau, spray...)
- Temps d'application (optimisation de la viscosité du gel)

Efficacité :

- Temps de cure (durée nécessaire à l'efficacité optimale)
- Durabilité (efficacité dans le temps de la protection en exposition extérieure)

En laboratoire : application sur chérons en laiton et coupon cuivre historique (MEB-EDS et μ-Raman)

Sur site : application sur un buste en bronze (fluo X, μ-Raman)

1 cm

Chéron en laiton, cimetière du Père Lachaise

Buste en bronze, cimetière du Père Lachaise

Conclusion et perspectives

Une étude paramétrique sur des monolithes a d'abord montré l'influence de la formulation (solvants, acide) sur le gel et sa porosité. Les quantités d'acide et de solvant sont optimisées avec un ratio molaire de 0,34/4 pour obtenir un monolithe homogène et empêcher la démixtion du gel.

De plus, des couches modélisées de brochantite de synthèse ont été développées, sous forme de pastille. La pénétration de la matrice de Si est observée dans l'épaisseur de la brochantite avec un front de pénétration d'une 10⁴ μm, ainsi que la formation de Cu₂ sur des couches modélisées et historiques.

Les questions de temps de cure, d'état hydrique du substrat et d'efficacité du traitement sur le long terme sont en cours d'étude. Enfin, les modes d'application du traitement seront expérimentés sur des couches historiques de différents substrats (cuivre, bronze, laiton) en vue d'une application sur site.

UN OSTENSOIR, DANGER POUR LUI-MÊME ?

Alix Lionni*, Charlotte Rérolle

 alixlionni@hotmail.com

* Autrice correspondante

Résumé

Une corrosion vert émeraude est repérée sur un ostensor dans les collections du Château-musée de Saumur. Les conditions de conservation n'étant pas bonnes, il est proposé de faire une « bulle » thermosoudée afin de stabiliser son environnement. Si les produits de corrosions font penser à de la chalconatronite ou de la socoformacite pouvant se développer sur les objets composites à la limite entre le verre et le métal, il n'avait pas été envisagé que la « bulle » thermosoudée serait un catalyseur pour les réactions de corrosion.

Abstract

Emerald-green corrosion was spotted on a monstrance in the collections of the Château-musée de Saumur. As the conservation conditions were not good, it was suggested that a heat-sealed 'bubble' be made to stabilize its environment. While the corrosion products remind of chalconatronite or socoformacite, which can develop on composite objects at the interface between glass and metal, it had not been considered that the heat-sealed 'bubble' would act as a catalyst for corrosion reactions.

MÉTAL France 2025
Le cas de l'ostensoir-soleil, un danger pour lui-même ?
Étude et intervention d'un objet présentant un cycle d'altération auto-entretenu
Alix Lionni, Charlotte Réroille



IDENTIFICATION
Dénomination : Ostensoir-soleil
Matériaux : Alliages cuivreux, ferreux, d'argent, verre, mastic
Revêtement de surface : Dorure, argenture, vernis
N° d'inventaire : 935.13.2.335
Datation : XIX^e siècle
Dimensions : 38,5 x 15 x 8 cm
Lieu de conservation : Château-Musée de Saumur, France

HISTORIQUE DE L'OBJET ET CONDITIONS DE CONSERVATION
XIX^e siècle : Fabrication de l'objet.
1919 : Arrivée dans les collections du Château-Musée de Saumur.
2004 : Photographie de l'ostensoir-soleil sur laquelle on observe un début de corrosion bleu-vert et un début de cristallin.
2004 - 2022 : Climat non contrôlé de la réserve - Monument historique. Conditionnement : emballage de papier de soie dans un bac gerbable normes Europe.
2022-2023 : Mise en poche hermétique de l'ostensoir-soleil.
2023 : Détection de la présence d'acide formique et de formaldéhyde à l'aide de tube dosimétrique Gasteq®. Intervention de conservation-restauration de l'ostensoir-soleil.
2024 : Identification et caractérisation des produits de corrosion bleu-vert auprès des laboratoires CARAA, Paris (Michel Boichard) et Staatliche Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart (Andreas Fischer et Gerhard Eggert).

CONSTAT D'ÉTAT

Structure
0 Jeu mécanique et perte de verticalité.
0 Cristallin du verre avec fissurations traversantes amenant à un écaillage du verre.
Surface
0 Empoississement, notamment au niveau des joints d'assemblage, dans les décors en creux.
0 Encrassement et abîmement d'un matériau organique de type vernis.
0 Dépôts blancs dans les creux.
0 Rayures et micro-rayures des revêtements (argenture et dorure, vernis).
0 Lacunes de l'argenture et de la dorure.

Corrosion

0 Sur l'ensemble de l'argenture et de la dorure :
• Couches de produits de corrosion hétérogènes, d'intensité allant du jaune au gris. Ils sont localisés sur les zones sans revêtement organique.
0 Sur la partie, autour du verre cristallin et à l'intérieur de la custode et sur la lunette :
• Couche localisée et adhérente de produits de corrosion compactes et tendres, d'une tonalité plus saturée (vert émeraude et bleu profond), à l'interface avec le métal-transition nettes. Dans les zones de contact avec le verre, ils semblent hydratés.
• Couche généralisée et non-adhérente de produits de corrosion compactes, tendres et pulvérulents (bleu-vert), à l'interface avec le métal - transition nette, et les produits saturés - transition diffuse. Elle correspond à la couche externe.



DIAGNOSTIC

• Manipulation et entretien inadéquats.
→ Dépôt et encrassement du matériau organique et développement du tarmeissement.
• Composés Organiques Volatiles provenant du mobilier en bois dans les anciennes réserves.
Fortes variations climatiques au sein du Monument Historique (avant 2004).
→ Apparition des premières altérations cuivre/verre.
• Confinement de l'objet dans sa caisse de stockage dans les réserves du Château-Musée et fortes variations climatiques au sein du Monument Historique (après 2004).
→ Activation du système d'altération auto-entretenu malgré l'absence de la cause directe (mobilier en bois).
• Mise en poche hermétique climatique provoquant une saturation des polluants atmosphériques.
→ Accélération du processus de corrosion et du cristallin du verre.

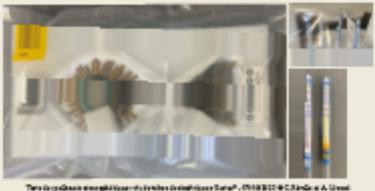
INTERVENTIONS DE CONSERVATION-RESTAURATION

• Dépousselage et dégrassage à l'acétone.
• Nettoyage localisé par gel d'EDTA à 3% masqué dans l'eau déminéralisée et l'Agastat®.
• Solubilisation des produits de corrosion bleu-vert dans de l'eau déminéralisée avec un bûtonnet de coton et ponctuellement avec un gel d'Agastat® dans l'eau déminéralisée.
• Nettoyage mécanique au scalpel des produits de corrosion bleu-vert adhérents.
• Consolidation des fissures traversantes du verre à la résine acrylique de type Paraloid® B72 à 50% masquée dans l'acétone.
• Démontage du verre cristallin et remplacement par un verre colonial.
• Nettoyage mécanique et passivation des alliages ferreux à l'acide tartrique à 3% masquée dans l'eau déminéralisée.
• Protection par pulvérisation à l'éthylacrylate d'une résine acrylique de type Paraloid® B72 à 5% masquée dans l'acétone d'éthyle et diacétone alcool (70/30).

TESTS DE POLLUANTS

Des tubes dosimétriques Gasteq® ont été positionnés 10h dans une bulle hermétisée avec un climat stable (25°C et 60% d'humidité relative)

| | | |
|--|---|---------|
| Acide acétique (CH ₃ COOH) réf/norm : 043102 | + 30 ppm (résultat égal au seuil de détection) | Positif |
| Formaldéhyde (CH ₂ O) Acide formique (HCO ₂ H) réf/norm : 043102 | > 20 ppm (résultat supérieur au seuil de détection) | Positif |
| Sulfure d'hydrogène (H ₂ S) réf/norm : 043102 | | Négatif |
| Sulfure de soufre (SO ₂) réf/norm : 043102 | | Négatif |
| Sulfure d'hydrogène (H ₂ S) réf/norm : 043102 | | Négatif |

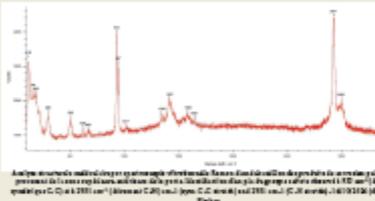


HYPOTHÈSE DU PROCESSUS DE CORROSION

Les produits de corrosion de l'alliage cuivreux allant du vert au bleu proviendraient d'une cinétique cyclique d'altération, continue et évolutive, impliquant le cuivre, le verre et les polluants atmosphériques.



PREMIÈRE HYPOTHÈSE DU PROCESSUS D'ALTÉRATION :
Au vu du faible de corrosion et des résultats des tests de polluants atmosphériques, notre première supposition s'est orientée vers la présence d'un composé similaire au formate de cuivre hydroxyde oxyde hydraté (anciennement appelé sulfate de formate de sodium de cuivre, anciennement Scofoformache, Na₂HCOO[OH]₂).
IDENTIFICATION DES PRODUITS DE CORROSION PAR ANDRÉAS FISCHER :
Sur la base d'analyses effectuées par spectroscopie micro-Raman et microscopie électronique à balayage couplée à une analyse par dispersion d'énergie des rayons X (MEB-EDX), la phase principale des produits de corrosion a été identifiée comme étant un acétate-carbonate-potassium-cuivre. Le rapport molaire potassium/cuivre est d'environ 1:2, avec la détection d'éléments traces de sodium et de zinc.



MISE EN CAUSE DE LA PREMIÈRE HYPOTHÈSE ET NOUVELLES PISTES DE RECHERCHE :
La présence de formaldéhyde et/ou d'acide formique dans les tests de polluants demeure inexpliquée. Si les résultats des analyses élémentaires et structurales ont permis de caractériser les produits de corrosion pulvérulents bleus comme étant des acétates de carbonate de potassium et de cuivre, aucune des analyses effectuées par les laboratoires n'a permis d'identifier la présence de formiates dans les échantillons de ces produits de corrosion.
L'altération de Cavazzano, soit l'auto-oxydation des formaldéhydes, en présence de surfaces alcalines, ne se produisant pas, il ne se formerait pas d'ions formiates.
La formation de composés dominants en acétate pourrait provenir de la présence en plus forte concentration d'acide acétique que d'acide formique ou de formaldéhyde dans l'environnement.

ALTÉRATION DU VERRE

2004 : Lésion du verre - début de transpiration, sans opacification du verre.
2022 : Lésion du verre - transpiration du verre, début d'opacification, Cristallin - développement du réseau de microfissuration.
2023 : Lésion du verre - transpiration du verre - Cristallin, opacification importante et fissuration traversantes.



BIBLIOGRAPHIE SELECTIVE

• Beccia Patrizia Sofia, The formation of a white corrosion on bronze antiques: characterization and conservation, *Stato di Ricerca, Università degli Studi di Padova*, 2015.
• Aggett Richard, « Copper and Bronze in Art and the Search for their Corrosion Products », in *Heritage*, vol. 9, 6 (2023), p. 1748-1764.
• « Silver-glass and metal-ceramic interfaces: a case study of the Black Point (Vidzeme) and further occurrence of archaeological sites in Latvia », in *Materials*, 2020.
• Aggett Richard et Hecker Andrea, « Corrosion Corrosion Compounds Caused by Contact: A Review of Glass and Metal Corrosion », in *Materials*, 2020.
• « The formation of formate: a review of metal formates on heritage objects », in *Heritage Science*, vol. 9, 21 (2021).
• Aggett Richard, Hecker Andrea, Hecker Andrea et Hecker Andrea, « When glass and metal corrode together: II The formation of copper hydroxyformate », in *Proceedings of the ICOM-CC 14th Triennial Conference*, 2015.
• Hecker Andrea, Aggett Richard et Hecker Andrea, « When Glass and Metal Corrode Together: V The Role of Copper Formate », in *Studies in Conservation*, 2017.
• Hecker Andrea, Aggett Richard et Hecker Andrea, « When Glass and Metal Corrode Together: VI Characterization of the Corrosion Products », in *Studies in Conservation*, 2017.
• Hecker Andrea, Aggett Richard, Hecker Andrea et Hecker Andrea, « Experimental Study of Chloride Corrosion: From the Identification to the Treatment of Copper Alloy Objects », in *Heritage*, vol. 9, 10 (2023), p. 2050-2070.
• Hecker Andrea, « Recherches expérimentales sur la chloruration du métal: cas d'un objet de conservation d'art », in *Annales de la Société Française de Conservation Préventive*, 2017.

Remerciements à Andreas Fischer, Gerhard Eggert et Michel Boichard pour leur accompagnement et les analyses réalisées dans leurs laboratoires, ayant contribué à la caractérisation des produits de corrosion

JOURNEE METAL FRANCE 2025

Elodie GUILMINOT

GPLA - Arc'Antique
26 rue de la Haute Forêt
44300 NANTES

Téléphone : 02 51 81 06 16

Messagerie : Elodie.GUILMINOT@Loire-atlantique.fr

Luc ROBBIOLA

Laboratoire TRACES (CNRS)
Université Toulouse Jean Jaurès
5, allées Antonio MACHADO
31058 TOULOUSE Cedex 9

Téléphone : 05 61 50 24 35

Messagerie : luc.robbiola@univ-tlse2.fr

Anne GENACHTE - LE BAIL

DRAC Occitanie -Service régional de l'archéologie
(SRA) - Régie des collections
Hôtel de Grave, 5 rue Salle-l'Évêque, CS 49020
34967 Montpellier Cedex 2

Téléphone : 04 67 02 35 17

Messagerie : anne.genachte-le-bail@culture.gouv.fr

Catherine DIDELOT

MAD– Musée des Arts Décoratifs
107 Rue de Rivoli,
75001 Paris

Téléphone : 01 44 55 59 98

Messagerie : catherine.didelot@madparis.fr

Cristina Chiavari

Université de Bologne
Department of Cultural Heritage
Via degli Ariani, 1 - 48121 Ravenna - Italy

Téléphone : 39 0544 9 36 722

Messagerie : cristina.chiavari@unibo.it

Traduction des résumés en anglais par **Anna Beaumont**

Relecture par **Stéphane Lemoine**

