

METHODE NOUVELLE POUR L'ENSEIGNEMENT DE LA GEOMETRIE DESCRIPTIVE

Traité élémentaire et collection de reliefs

A. Jullien

Objet issu de la Bibliothèque-Musée
Inguimbertine de Carpentras



Alicia Jay - Victor Mulé

Année Académique 2024-2025

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	2
FICHE D'IDENTIFICATION.....	3
PROPOSITION DE TRAITEMENT	4-5
Traitements de conservation curative.....	4-5
Traitementsderestauration.....	5
Conditionnement.....	5
NETTOYAGE A SEC DE LA BOÎTE, DES RELIEFS ET DU CARNET.....	6-9
La boite.....	6-7
Le reliefs.....	7-8
Le carnet.....	9
NETTOYAGE DES ELEMENTS METALLIQUES OXYDES.....	10-12
PASSIVATION DES ELEMENTS METALLIQUES FERREUX.....	12-15
Historique et situation actuelle.....	12
Options de passivation du fer.....	12-13
Évaluation de différents traitements de passivation du fer.....	13-14
Protocole de passivation pour les éléments ferreux.....	15
PASSIVATION DES ELEMENTS METALLIQUES CUIVREUX.....	16-17
Options de passivation des alliages cuivreux.....	16
Évaluation de différents traitements de passivation du cuivre.....	16-17
Protocole de passivation pour les éléments galvanisés.....	17
PROTECTION DES ELEMENTS METALLIQUES.....	18-20
Option de resine pour vernissage.....	18
Évaluation de différentes protection.....	19-20
Protocole de vernissage.....	20
CONSOLIDATION DU PAPIER DE LA BOITE.....	21
REINTEGRATION DES ELEMENTS MANQUANT.....	22
CONDITION DE CONSERVATION.....	23
CONCLUSION.....	24
BIBLIOGRAPHIE.....	25-26

INTRODUCTION

Le présent dossier s'appuie sur le travail de diagnostic et d'analyse réalisé par Solène Martinez en 2023-2024, intitulé : Étude préalable à la conservation-restauration d'une boîte de géométrie descriptive de la Bibliothèque-Musée Inguimbertine de Carpentras.

Son étude a permis de cerner avec précision les dégradations et les valeurs historiques, pédagogiques et scientifiques de cet objet du XIX^e siècle. Elle a mis en évidence les altérations causées par l'empoussièvement, la corrosion, l'infestation par des insectes xylophages, ainsi que les pertes et dégradations structurelles, compromettant la lisibilité et l'intégrité de la boîte.

S. Martinez a proposé un plan de traitement préventif et curatif visant à restaurer la lisibilité et la stabilité de l'objet, incluant des interventions telles que l'anoxie, le décrassage, le traitement anticorrosion, la consolidation des papiers fragiles et la réintégration des éléments détachés. Ce projet soulignait la complexité de l'objet, qui exige de préserver ses valeurs esthétiques et pédagogiques tout en minimisant l'impact sur son authenticité.

Dans une logique de continuité et de cohérence avec le travail initié par S. Martinez, ce dossier, en tant qu'addenda, détaille la mise en œuvre du traitement proposé, en intégrant et développant les bases solides qu'elle a établies.

Les observations, diagnostics et préconisations de son étude formeront le socle de nos interventions et seront évoqués, parfois en filigrane, tout au long du présent document.

Ce projet nous offre ainsi l'opportunité d'approfondir certains aspects laissés en suspens et d'ajuster les méthodes si nécessaire, afin que la boîte retrouve pleinement sa lisibilité, son intégrité, et son potentiel éducatif au sein de la Bibliothèque-Musée Inguimbertine de Carpentras.

Le lecteur sera amené à se référer à cette première étude pour saisir l'évolution du projet de restauration, comprendre les fondements de certaines décisions méthodologiques, et apprécier les ajustements ou approfondissements apportés dans cet esprit de continuité.

FICHE D'IDENTIFICATION

Dénomination	« Collection de reliefs à pièces mobiles » de géométrie descriptive
Créateur	A. Jullien (professeur de sciences)
Lieu de fabrication	Paris, France
Datation	Fin du XIXe siècle (1873 ?)
Institution propriétaire	Bibliothèque – musée de l'Inguimbertine (Carpentras)
Date d'acquisition	
Localisation actuelle	École supérieure d'art d'Avignon
Numéro d'inventaire	26.879
Dimensions (en cm)	Boîte : H : 9.5 / L : 66 / P : 28.5 Relief : Carnet :
Matériaux	Bois (feuillu), papiers, métal (fer galvanisé au cuivre et non galvanisé), textile, fils
Description	Grande boîte en bois contient trente reliefs. Chaque relief est en carton plié et décrit un concept de géométrie descriptive à l'aide de fils et de tiges métalliques. La boîte et les reliefs sont accompagnés d'une notice explicative présente sous la forme d'un carnet. Cette collection de reliefs était à destination des élèves en terminale scientifique, aux étudiants des Beaux-Arts, dans les Écoles navales, etc.

PROPOSITION DE TRAITEMENT

Propositions de traitement (d'après l'étude préalable de S. Martinez réalisée dans le cadre de son DNA – 2023/2024)

Les traitements de conservation-restauration doivent à la fois permettre une conservation à long terme de la matérialité de l'objet tout en rétablissant sa lisibilité ainsi qu'en facilitant la manipulation des éléments en cohérence avec les valeurs de l'objet, la vocation pédagogique, ainsi que l'objet compris comme témoignage de l'évolution de l'histoire des sciences et de l'enseignement.

Traitements de conservation curative

- Un traitement insecticide :

Objectif :

Prévenir une potentielle infestation identifiée par des exuvies, trous d'envol et vermouiture.

Traitement proposé :

Anoxie statique : élimination de l'oxygène dans une poche hermétique à l'aide d'absorbeurs, maintenue à moins de 0,1 % O₂ à ≥20°C pendant 21 jours.

- Dépoussiérage / Décrassage :

Objectif :

Un dépoussiérage et un décrassage de la boite et des reliefs et du carnet semblent nécessaires. En effet, la poussière est hygroscopique et abrasive représente un risque sanitaire pour l'objet.

Traitement proposé :

Dépoussiérage et décrassage mécanique avec brosses douces, aspiration HEPA, et gommages légers (ex. gomme Muji).

- Nettoyage à sec des parties métalliques :

Objectif:

Retirer et stabiliser la corrosion, limiter les tâches, améliorer l'aspect visuel et la lisibilité.

Traitement proposé :

Retrait mécanique de la rouille, application d'un inhibiteur de corrosion ou d'un convertisseur adapté, suivi d'une protection de surface.

- Consolidation du papier rose à l'intérieur de la boite :

Objectif :

Le papier rose se soulève, se déchire et se désolidarise. Il faut donc le consolider afin d'éviter de nouvelles déchirures ou de potentiels dégâts biologiques.

Traitement proposé :

Collage des soulèvements et réparation des déchirures à l'aide d'une colle cellulosique, assurant flexibilité, adhérence et compatibilité bois-papier.

- Détachement partiel d'un fragment de bois de la caisse :

Objectif :

Un morceau de la caisse, sur la jointure du rabat, se détache partiellement. Pour ne pas avoir de perte et éviter la désolidarisation du bois, il serait préférable de coller les deux morceaux ensemble.

Proposition de traitement :

Collage avec adhésif compatible (cellulosique ou protéinique) et maintien du collage par pression à l'aide de pinces ou de serre-joints.

Traitements de restauration

Replacer et remplacer les parties manquantes sur les reliefs :

Objectif :

Si des éléments sur les reliefs sont dissociés ou manquants, l'objet perd sa fonction et son intégrité.

Proposition de traitement :

Identifier les fonctions des éléments dissociés (structurels, fonctionnels, esthétiques).

Rétablissement le code couleur d'origine des éléments métalliques (cuivré ou fer brut) et des fils (noir ou rouge).

Fixer les éléments métalliques cassés avec un adhésif adapté.

Réaliser des schémas et documenter des reliefs présentant des manques.

Option : Transposer les données sur un support numérique interactif accessible au public

Remplacer le relief manquant :

Objectif :

Restaurer l'intégrité fonctionnelle de l'objet et les informations données par le relief 25 manquant.

Proposition de traitement :

Réalisation de répliques des reliefs manquants en se basant sur des modèles documentés ou des supports numériques existants, tout en respectant l'harmonie et l'authenticité de l'ensemble.

Remise en forme du carnet :

Objectif :

Prévenir les déchirures dues à des pliures sur la couverture et dans le corps d'ouvrage.

Proposition de traitement :

Humidifier très légèrement le carnet à l'aide d'un nébuliseur, puis mettre sous poids entre deux buvard et deux intissés.

Conditionnement

Rangement et conditionnement :

Objectif :

Assurer la pérennité de l'objet en garantissant sa protection et sa conservation dans des conditions optimales.

Proposition de traitement :

Concevoir une boîte de rangement adaptée permettant de regrouper la boîte, les reliefs et le carnet dans un même conditionnement pour éviter leur dissociation.

Rédiger un protocole de conservation précisant les conditions de stockage (température, humidité, manipulation) pour guider les futures interventions et garantir la préservation à long terme.

Nettoyage à sec de la boîte, des reliefs et du carnet

LA BOÎTE

La boîte de géométrie descriptive présente un encrassement généralisé et un empoussièvement qui nécessitent un dépoussiérage et un décrassage. La poussière, hygroscopique et abrasive, accumulée avec des débris organiques, peuvent favoriser le développement de moisissures et la curiosité des insectes. Elle contribue également à l'aggravation de la corrosion sur les éléments métalliques.

S.Martinez propose de procéder au dépoussiérage à l'aide de brosses douces et d'une aspiration légères avec un filtre HEPA et une cartouche jetable conçue pour éliminer les spores de moisissures, les champignons et les poussières irritantes ou toxiques.

Afin d'éviter d'aspirer par inadvertance des éléments de la boîte, l'embout de l'aspirateur est recouvert d'une toile à maillage fin, permettant uniquement le passage des particules les plus fines.

Après avoir éliminé les dépôts superficiels, un nettoyage plus en profondeur sera effectué à l'aide de gommages doux, à la gomme en polyuréthane (PU Sponge) de la marque Deffner&Johann, choisie pour son faible pouvoir abrasif et son caractère peu intrusif. Cette étape nécessite une attention particulière, car les étiquettes du couvercle et le papier rose qui tapisse l'intérieur de la boîte sont fragiles et peuvent se déchirer facilement.

Plusieurs types de gommes sont envisagés pour cette opération. Le choix final se fera en comparant leur efficacité de nettoyage, leur abrasivité, l'impact potentiel sur la brillance des surfaces, ainsi que les résidus qu'elles pourraient laisser. Ces produits ont été sélectionnés à partir d'études de conservation-restauration existantes^(1, 2 et 3) et de nos propres observations^[Tableau 1].



[Img1] Aspiration avec filtre HEPA et ajout d'une toile sur l'embout.



[Img2] Méthode de dépoussiérage avec brosse douce et aspiration.

1 Daudin-Schotte, Madeleine Bisschoff, Ineke Joosten, Henk van Keulen, and Klaas Jan van den Berg, *Dry Cleaning Approaches for Unvarnished Paint Surfaces*, Maude, Proceedings from of the Cleaning 2010 Conference, Valence.

2 Nguyen, T-P., Bouvet, S., Eveno, M., *Effet des gommes à effacer sur la cellulose du papier*, Paris, Laboratoire de la Bibliothèque Nationale de France, 2003

3 Aude Lafitte, *Etude et conservation-restauration d'un Qilin en émail cloisonné chinois provenant du musée des Arts décoratifs de Paris*, EGG 2016-2017.

Dénomination commerciale	Composition chimique	Polluants	Force d'abrasion (de 1 à 10)	Ressenti d'utilisation
Gomme Muji ®	caoutchoucs	S, Ca, Ti, Zn, K	1	Souple et douce, laisse peu de résidus, gommage uniforme.
Smoke Sponge ®	Latex naturel vulcanisé (isoprène)	/	2	Souple, légèrement rugueuse, laisse peu de résidus.
Wishab blanche®	copolymère de styrène butadiène	S, Cl, K; Ca, Zn	3	Souple et compacte.
Staedtler Mars Plastic ®	Polychorure de vinyle (PVC)	S, Cl, Ca, Ti	5	Solide. Doit être utilisée avec peu de pression. Nettoie plus en profondeur.
Gomme en poudre Atlantis ®	Polychorure de vinyle (PVC) et toile de coton	S, Cl, Ca, Ti	3	Souple et douce, laisse beaucoup de résidus.
PU Sponge Deffner & Johann	Hydrophilic Polyurethane Foam	/	1	Souple et douce, laisse peu de résidus, gommage uniforme.

[Tableau 1]



L'objectif principal est de retirer le maximum d'encrassement tout en préservant une uniformité visuelle sur l'ensemble des éléments nettoyés. La boîte doit présenter un aspect harmonieux et uniformément propre.

Après intervention, nous avons constaté que l'aspiration et le gommage se sont révélés très efficaces pour éliminer la poussière et l'encrassement des surfaces. Cependant, ces méthodes se sont montrées inefficaces pour retirer les petites peluches de fibres vertes présentes sur l'extérieur de la boîte.

Une analyse au microscope a permis d'identifier ces résidus comme des fibres provenant d'un chiffon en coton utilisé pour le nettoyage. Bien qu'il semble qu'une tentative ait été faite pour dépoussiérer la boîte avec ce chiffon, les aspérités de la surface, ainsi que des zones où la matière bois est légèrement arrachée, ont capturé et retenu ces fibres.

Outre l'aspect visuel peu discret de ces résidus, la présence de fibres de coton représente un risque supplémentaire : elles peuvent retenir l'humidité et favoriser l'encrassement au sein de la matière bois, ce qui est potentiellement dommageable pour l'objet à long terme.

Pour remédier à ce problème, les fibres seront retirées mécaniquement à l'aide d'un bâtonnet souple en bambou et d'une pince à épiler. Cette méthode permettra d'éliminer ces résidus de manière précise et sans endommager davantage la surface de la boîte.

LES RELIEFS

Les reliefs présentent également un empoussièvement et un encrassement généralisés sur leurs surfaces en carton.

Le protocole de nettoyage des reliefs est similaire à celui appliqué à la boîte. Nous commençons par une aspiration très légère à l'aide d'un aspirateur équipé d'un filtre HEPA, en passant soigneusement sur toutes les faces des reliefs.

Les mêmes gommes mentionnées précédemment seront testées afin de déterminer le meilleur compromis pour éliminer l'encrassement sans abîmer, par abrasion, les surfaces des reliefs.

Les reliefs sont traversés par des fils de fer et des fils plus souples, probablement en coton, ce qui rend l'accès à certaines zones difficile.

Dans ce contexte, la PU Sponge est privilégiée. Elle présente l'avantage d'être à la fois peu abrasive et suffisamment souple pour nettoyer efficacement entre les fils.

Le gommage avec la gomme est appliqué sur toutes les faces des reliefs. Certaines zones, particulièrement encrassées, nécessitent parfois l'utilisation de la Smoke Sponge. Cette dernière, presque aussi souple que la PU Sponge, offre une légère abrasivité supplémentaire, idéale pour les zones les plus sales situées entre les fils.



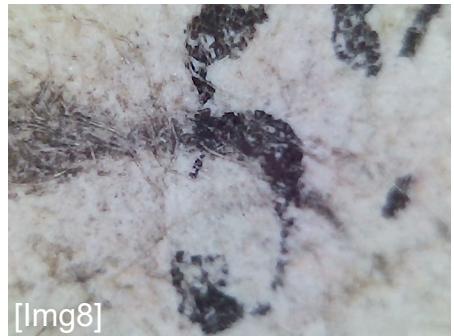
L'alternation entre ces deux gommes offre une efficacité optimale pour éliminer les encrassements légers à modérés et permet un nettoyage homogène.

Cependant, pour les zones plus encrassées, comme celle avec des dépôts de rouille, là où la saleté est plus tenace, la gomme Staedtler Mars Plastic peut être associée à la Smoke Sponge et à la PU Sponge.

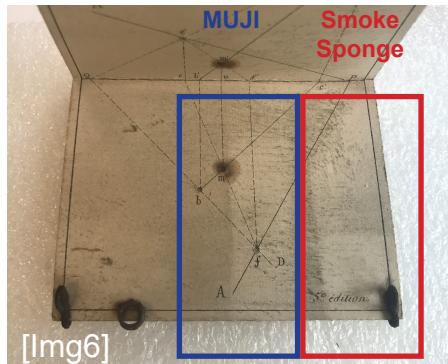
La gomme Staedtler Mars Plastic permet une action plus forte pour éliminer les salissures persistantes sans compromettre la structure des matériaux, à condition que la surface ne soit pas excessivement fragilisée. L'utilisation de cette gomme doit être réalisée avec une vigilance accrue afin d'éviter toute abrasion excessive qui pourrait altérer les supports papier ou endommager les reliefs.

[Img6]: La Muji permet un gommage plus homogène que la Smoke Sponge

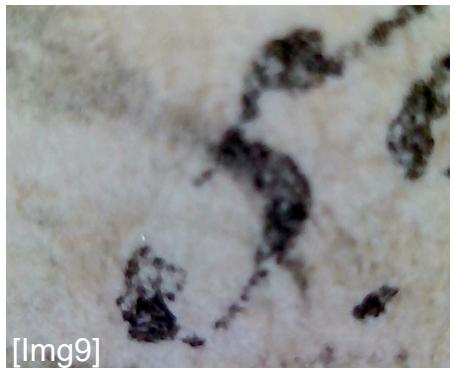
[Img7]: Aspect de surface des reliefs avant (relief de gauche) et après (relief de droite) nettoyage a sec.



[Img8]



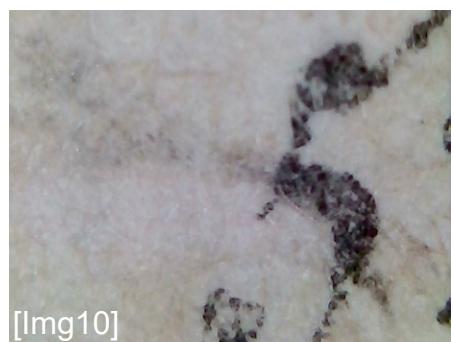
[Img6]



[Img9]

Détail d'une impression au binoculaire pendant le gommage

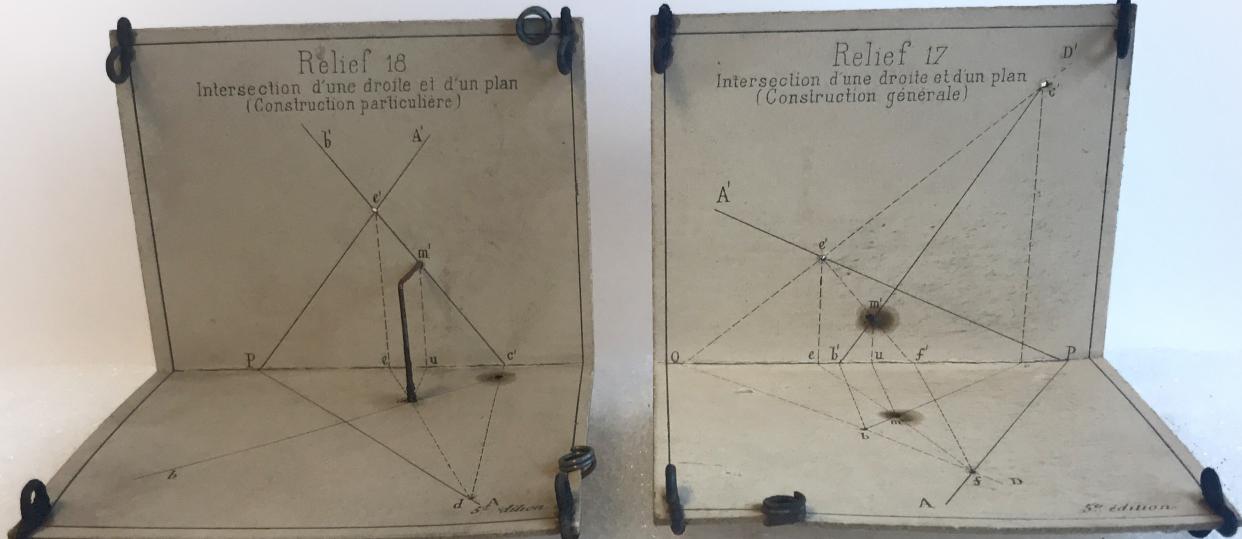
[Img8]: Avant nettoyage



[Img10]

[Img9]: Nettoyage avec la Smoke Sponge

[Img10]: Nettoyage avec Staedtler Mars Plastic



[Img7]

LE CARNET

Le carnet est peu encrassé, mais de la poussière est présente sur la couverture et dans le corps de l'ouvrage.

Bien que ce léger empoussièvement puisse sembler anodin à première vue, il représente un risque potentiel. En cas d'augmentation du taux d'humidité ou d'un apport accidentel d'eau, ces poussières pourraient migrer dans le papier et former des auréoles difficiles, voire impossibles à éliminer. Ainsi, un nettoyage minutieux est nécessaire, même si cela n'améliore pas de manière significative l'aspect visuel du carnet.

Le carnet est constitué de papier très fin, nettement plus fragile que le carton des reliefs ou le bois de la boîte. Dans ce contexte, l'utilisation d'un aspirateur, même avec une aspiration légère, est déconseillée. Cela pourrait risquer de froisser, plier, ou déchirer les pages. Il est préférable de remplacer l'aspiration par le passage d'une brosse douce, à poils souples.

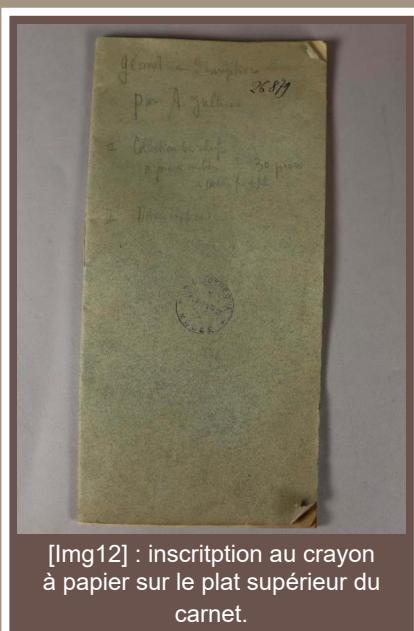
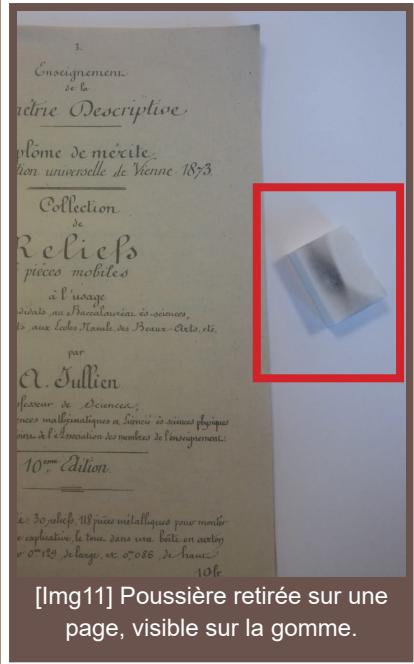
Pour préserver l'intégrité du papier, nous nous limiterons à l'utilisation de la PU Sponge. Celle-ci est particulièrement appréciée pour sa souplesse, sa douceur, et son absence d'abrasivité.

L'extrême finesse des pages impose une manipulation régulière et délicate. Lors du passage de la gomme, il est crucial de maintenir fermement la page et de travailler dans un seul sens : depuis le centre du carnet (au niveau de la reliure) vers le bord de la page côté gouttière. Cette méthode permet de réduire les risques de plis ou de froissements du papier.

Il est essentiel de faire preuve de vigilance pour éviter de passer la gomme sur des surfaces contenant des inscriptions manuscrites. En particulier, le plat supérieur de la couverture qui comporte des annotations manuscrites réalisées au crayon à papier. Toute intervention sur ces zones pourrait effacer ou altérer ces inscriptions.

Ainsi, les parties portant des écritures seront soigneusement contournées lors du nettoyage pour préserver l'intégrité de ces éléments graphiques.

Le dépoussièrage du carnet permettra, par la suite, d'humidifier le carnet en toute sécurité afin de procéder à un aplatissement pour tenter de résorber les plis et déformations présents sur les pages et la couverture.



Nettoyage des éléments métalliques oxydés



[Img13] Détail de la rouille solidarisée avec le papier au binoculaire.



[Img14] Détail de la rouille au binoculaire. Corrosion importante sur certains éléments.



[Img15] Détail du vert de gris (acétate de cuivre) au binoculaire. Deux types de corrosion selon que le fil de fer est galvanisé de cuivre ou non.

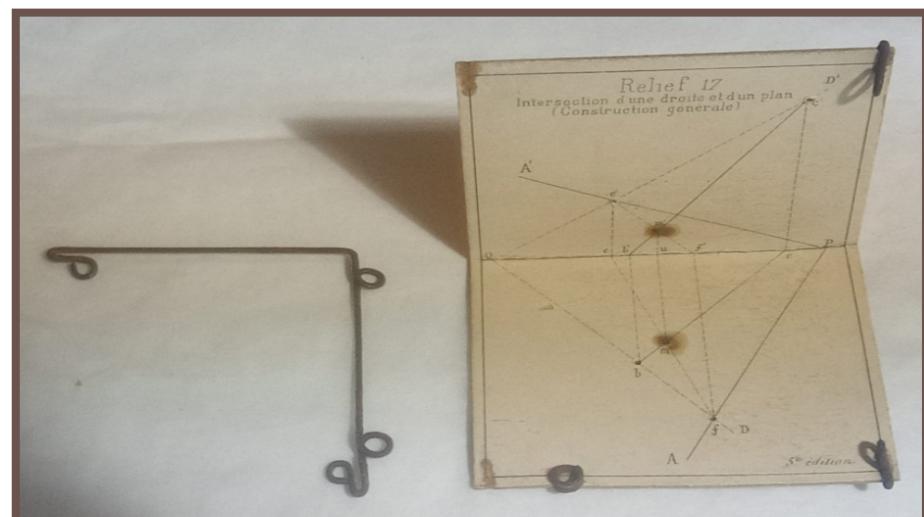
Les éléments métalliques présentent une rouille (oxyde de fer) pulvérulente qui non seulement tâche, mais détériore également le papier adjacent. Des amas et agrégats de rouille sont visibles le long des tiges, compromettant ainsi la lisibilité de l'objet. Cette altération est provoquée par une auto-alimentation entre deux facteurs.

Le métal, en tant qu'excellent conducteur thermique, est souvent plus froid que le papier environnant lorsque la température baisse. Cette différence de température provoque la condensation de l'humidité sur les tiges métalliques. Le papier absorbe l'humidité aux zones de contact avec le métal, se mouillant ainsi et maintenant le métal humide, ce qui favorise une forte oxydation. Des morceaux de rouille migrent ensuite dans le papier, altérant la structure de celui-ci.

L'objectif de cette intervention est de stopper le processus d'oxydation, de stabiliser les éléments métalliques et d'améliorer à la fois l'aspect visuel et la lisibilité de l'ensemble.

Les éléments métalliques seront démontés pour être traités séparément, ce qui permet un nettoyage plus aisés et réduit les risques de détérioration du papier.

Par endroits, la rouille a fusionné certains éléments métalliques avec les supports en papier, rendant le métal d'origine presque inexistant, remplacé par de la rouille. Certaines parties des tiges peuvent se casser ou ne pas pouvoir être nettoyées en raison d'une corrosion excessive. Il est néanmoins impératif de retirer ces éléments métalliques rouillés du contact avec le papier.



[Img16] Démontage des éléments métalliques, rangement dans des pochettes plastiques avec méthode d'étiquetage.

Toutes les parties métalliques, détachables ou non, doivent être nettoyées de manière homogène afin de préserver l'unité esthétique de l'ensemble. Différents outils et méthodes de nettoyage à sec sont testés pour traiter le métal:

Brosse en Métal

Avantages :

Simple à manier, la brosse en métal permet un accès rapide aux zones larges et facilement accessibles.

Inconvénients :

Elle s'avère peu efficace pour enlever la rouille incrustée, nécessitant souvent des efforts répétés.

Scalpel en Acier Inoxydable

Avantages :

Efficace pour retirer les couches superficielles de rouille, permettant une certaine restauration de la surface métallique.

Inconvénients :

Ne parvient pas à éliminer la rouille plus profonde, laissant des résidus persistants.

Dremel (Brosses Plastiques et Inoxydables)

Avantages :

Brosse en plastique :

Permet une élimination douce des résidus de rouille sans endommager le métal original.

Brosse en inoxydable :

Capable de retirer la rouille plus tenace sans compromettre l'intégrité du métal.

Laisse une surface relativement propre, facilitant les étapes suivantes du traitement.

Papier à Poncer 1200 gr

Avantages :

Très efficace pour retirer les couches de rouille et lisser les surfaces métalliques, améliorant ainsi l'aspect visuel.

Inconvénients :

La nature abrasive du papier à poncer peut endommager irrémédiablement la surfaces des éléments métalliques, compromettant l'intégrité historique de l'objet.

En raison de ce risque élevé, son utilisation est à écarter.

Stylo Fibre de Verre

Avantages :

Offre une meilleure pénétration dans les zones difficiles d'accès par rapport au cutter et à la brosse en métal, permettant une élimination plus complète des dépôts de rouille.

Inconvénients :

Peut rencontrer des difficultés avec les dépôts de rouille fortement incrustés.

L'utilisation du stylo fibre de verre génère une quantité considérable de poussières et particules fines.

Le port d'un masque et de gants est obligatoire.

Inconvénients :

Malgré son efficacité, le Dremel peut laisser des micro-taches d'oxyde qui nécessitent des traitements supplémentaires pour une finition parfaitement homogène.

[Img17]

[Img20]

[Img18]

[Img21]

[Img19]

Détail de la rouille sur un élément métallique vue au binoculaire

[Img17]: Echantillon avant traitement

[Img18]: Nettoyage avec une Brosse en métal

[Img19]: Nettoyage avec un Stylo micro fibre de verre

[Img20]: Nettoyage avec du Papier a poncer 1200g

[Img21]: Nettoyage avec un Dremel brosse plastique

Suite à nos observations et la comparaison entre ces différents outils, le choix s'est porté sur un nettoyage à sec à l'aide d'un Dremel équipé d'une brosse en acier inoxydable. Cela permet d'éliminer efficacement la rouille tout en conservant l'intégrité de la surface métallique.

Passivation des éléments métalliques ferreux

Après le nettoyage des éléments métalliques et l'élimination de la couche de corrosion, une passivation du fer est nécessaire pour protéger le matériau.

Historique et situation actuelle

La passivation consiste à traiter la surface métallique pour neutraliser les ions fer libres, principaux acteurs de la corrosion. Ce processus vise à ralentir significativement le transfert électronique, créant une couche protectrice qui empêche le métal de réagir avec l'oxygène atmosphérique.⁽⁴⁾

Depuis le milieu du XIX^e siècle, l'acier est généralement protégé contre la corrosion par l'application d'une couche d'oxyde de zinc, appelé galvanisation. Cette technique permet de passer la surface métallique en formant une barrière protectrice.⁽⁵⁾

D'autres oxydes métalliques, tels que ceux de cuivre ou de chrome (utilisés plus tard), offrent une protection similaire en ralentissant la progression de la corrosion. Certains métaux, dans de bonnes conditions, produisent de manière naturelle une couche passive.

Bien qu'il soit possible que les éléments métalliques des reliefs aient été galvanisés au zinc à l'origine, aucune preuve ou trace tangible ne permet de le confirmer. Les parties non corrodées des éléments métalliques présentent un aspect mat et une teinte gris foncé, typique du fer, très différente de l'apparence brillante et gris clair du zinc. En revanche, une petite proportion des éléments métalliques sont galvanisés au cuivre.

Options de passivation du fer

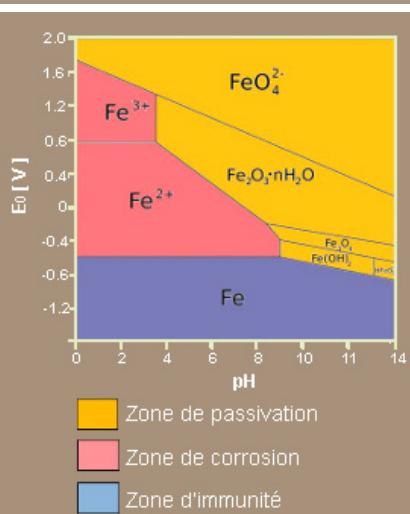
Pour reformer une couche passive sur le fer, plusieurs méthodes peuvent être envisagées: L'acide tannique, l'acide phosphorique et l'acide nitrique.⁽⁶⁾

4 Stéphanie Hollner, *Développement de nouveaux traitements de protection à base d'acide carboxylique pour la conservation d'objets en fer du patrimoine culturel*, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2009, page 34 à 37

5 Information provenant des archives du site de Galvazinc, Association française indépendante composée d'experts en galvanisation à chaud.
- Lien vers le site dans la Bibliographie -

6 Jonathan Piard, Renaud Taleroy, Olivier Bonjour. *La passivation du fer sous le choc*. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2015, 109 (974), pp.767-781.

Acide tannique	Acide phosphorique	Acide Nitrique
Utilisé depuis les années 1920 dans la conservation du patrimoine, cet acide réagit avec les ions fer libres pour former des tannates de fer. Il forme une couche protectrice d'aspect mat et de couleur noire bleuté.	Cet acide forme une couche de phosphate de fer en réagissant avec les ions fer libres, produisant un film protecteur de couleur gris clair.	En oxydant les ions fer en Fe^{3+} , l'acide nitrique génère du nitrate de fer(III), de l'oxyde nitrique et de l'eau. Il en résulte une couche d'oxyde de fer protectrice et imperméable (Fe_3O_4). ⁶



[Img22] Diagramme E-pH du fer.

Un pH de 2 à 3 favorise la solubilisation des ions fer nécessaires à la réaction avec l'acide tannique, tout en minimisant la dissolution excessive du métal.

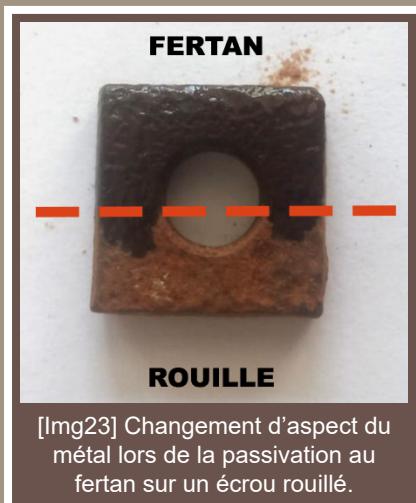
À pH inférieur à 2, une acidité trop forte pourrait augmenter la dissolution du fer et affaiblir la structure métallique.

À pH supérieur à 3, les ions fer tendent à précipiter sous forme d'oxydes ou d'hydroxydes ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), ce qui peut limiter la réaction avec l'acide tannique et entraîner une protection moins uniforme.

7 Judy Logan, *Le soin et le nettoyage du fer – Notes de l’Institut canadien de conservation (ICC) 9/6*
Première date de publication : 1987
Révision : 1995, 2007

8 Judy Logan, *Le traitement à l’acide tannique pour les artefacts en fer rouillé*, publié antérieurement sous le titre *Le traitement du fer à l’acide tannique – Notes de l’Institut canadien de conservation (ICC) 9/5*
Première date de publication : 1989
Révision : 1997, 2007, 2013

9 Marie-Anne Loeper-Attia, *La stabilisation des alliages ferreux : évolution du diagnostic et des traitements réalisés dans les laboratoires de restauration en France depuis 1998*, Centre de Recherche sur la Conservation, 2014.



[Img23] Changement d'aspect du métal lors de la passivation au fertan sur un écrou rouillé.

Afin de pouvoir déterminer quelle méthode de passivation choisir pour les éléments métalliques non galvanisés de cuivre, nous pouvons procéder à une phase de tests.

Évaluation de différents traitements de passivation du fer

Cette étude vise à comparer l'efficacité de plusieurs traitements de passivation appliqués sur des éléments métalliques ferreux oxydés, afin d'identifier celui offrant la meilleure protection contre la corrosion et un rendu esthétique satisfaisant.

Méthodologie

Trois solutions sont testées :

Fertan ® – Produit commercial à base d'acide tannique, pH de 2.

Solution d'acide tannique – Acide tannique à 10 % dilué dans de l'eau déminéralisée, acidifié à pH 2 par ajout d'acide phosphorique.

Solution d'acide phosphorique – Acide phosphorique à 10 % dans de l'eau déminéralisée, pH ajusté à 2 par ajout de bicarbonate de soude.

Chaque une de ces solution est appliquée avec un pinceau sur un clou rouillé. Le port d'équipements de protection individuelle (gants, masque, lunettes de sécurité) sont requis pendant la manipulation.

Importance du pH dans le traitement du fer

Le pH joue un rôle déterminant dans la réaction chimique entre le fer et les agents de passivation. Une solution trop acide peut attaquer la surface métallique, tandis qu'un pH trop basique compromet la formation d'une couche protectrice uniforme. Selon le diagramme potentiel-pH du fer^[Img22], un pH entre 2 et 3 semble optimal pour favoriser la formation de composés protecteurs sans endommager le support.

Propriétés des traitements à base d'acide tannique

L'acide tannique est couramment utilisé pour la passivation du fer dans la restauration, comme indiqué dans des rapports de l'Institut de Conservation du Canada (ICC)^(7 et 8) et du Centre de Recherche sur la Conservation (CRC)⁽⁹⁾. Il réagit avec les oxydes de fer pour former une couche de tannate, de couleur bleu-noir, relativement stable^[Img23].

Toutefois, le tannate de fer, acide, peut détériorer le papier des reliefs, en contact, comme cela se produit parfois avec les encres ferro-galliques.

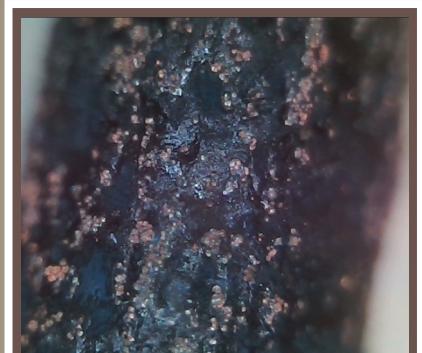
Observation après traitement

Après application et séchage (24 heures), les clous sont nettoyés à la brosse et à l'eau déminéralisée pour retirer les résidus d'acide. Les traitements au Fertan et à l'acide tannique ont tous deux produit une teinte bleu-noir, indiquant la formation du tannate de fer.

Malgré une apparence visuelle très proche, un test complémentaire est réalisé pour évaluer la qualité réelle de la passivation.

Test de l'efficacité de la passivation avec CuSO₄

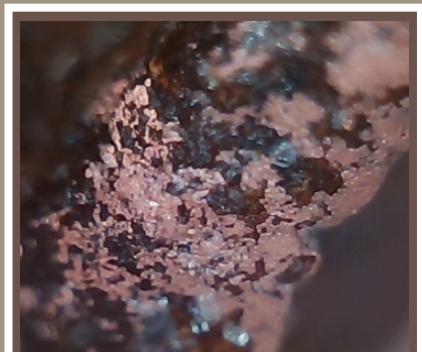
Conformément à la norme ASTM A967, les clous traités ont été immergés pendant six minutes dans une solution de sulfate de cuivre (CuSO₄), puis rincés et inspectés. Ce test met en évidence la présence de fer libre par une coloration rose à la surface des échantillons.



A : Passivation au Fertan, petite proportion d'ions fer ayant réagi avec le sulfate de cuivre.



B : Passivation à l'acide tannique, proportion moyenne d'ions fer ayant réagi avec le sulfate de cuivre.



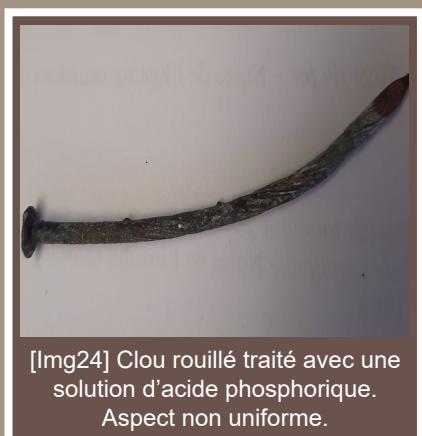
C : Témoin rouillé, réaction presque totale des ions fer ayant réagi avec le sulfate de cuivre.

Les clous traités avec le Fertan ont montré une réactivité légèrement inférieure à ceux traités avec les solutions d'acide tannique, suggérant une passivation plus efficace.

Le traitement avec la solution d'acide phosphorique n'a pas été testée au CuSO₄ en raison d'un rendu visuel trop hétérogène : dépôts blanchâtres, coloration irrégulière et corrosion localisée exposant le métal nu. [Img24]

Conclusion

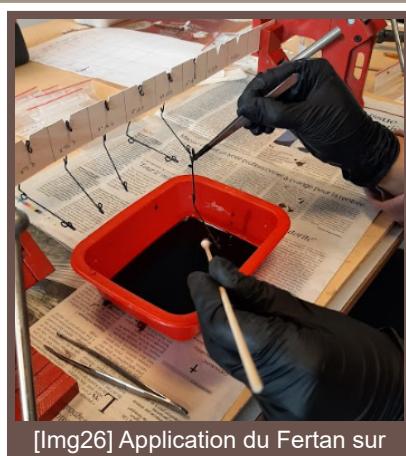
Parmi les traitements évalués, le Fertan s'est révélé être le plus performant. Il offre une couche de passivation homogène, une bonne résistance à la corrosion et mise en application simple.



[Img24] Clou rouillé traité avec une solution d'acide phosphorique. Aspect non uniforme.



[Img25] Utilisation de la spatule chauffante sur les éléments métalliques.



[Img26] Application du Fertan sur les éléments métalliques en bain.



[Img28] Rinçage à l'eau déminéralisée pour éliminer l'acide qui n'aurait pas réagi.

Protocole de passivation pour les éléments ferreux

Les éléments métalliques ferreux ont été soumis à un traitement de passivation à l'aide de la solution commerciale Fertan. Le protocole appliqué est le suivant :

Apport de chaleur

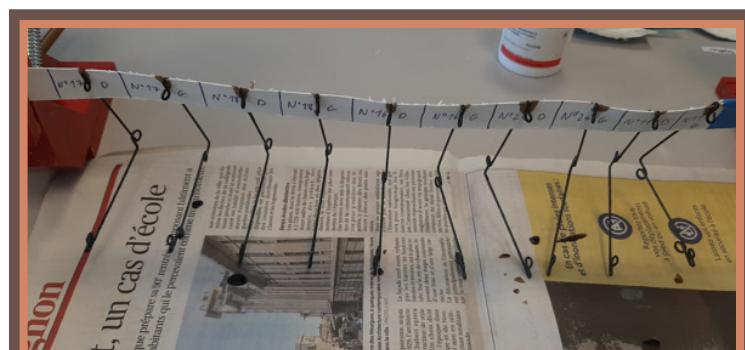
En chauffant modérément le métal, à l'aide d'une spatule chauffante, on accélère la cinétique de réaction entre les ions fer libres et l'acide tannique, ce qui favorise une couche passivation plus homogène et une meilleure fixation des tannates sur le support métallique. [Img25]

Application du Fertan

Les pièces métalliques ont été brièvement immergées, pendant quelques secondes, dans un bain de Fertan, de manière à assurer un contact homogène avec l'ensemble de la surface. [Img26]

Séchage du Fertan

Après immersion, les éléments ont été disposés sur une bande de papier annotée permettant leur identification. Ils ont ensuite été laissés à l'air libre pendant 24 heures, afin de permettre le séchage complet et la réaction de passivation. [Img27]



[Img27] Élément métallique suspendu sur une bande de papier annotée durant le temps de séchage.

Rinçage

En raison de la petite taille des éléments, la réaction de passivation n'a pas été totalement uniforme. Certains résidus de Fertan non réagis sont restés en surface. Ces excès ont été éliminés par rinçage à l'eau déminéralisée, à l'aide d'une petite brosse souple, afin de préserver l'intégrité de la couche protectrice. [Img28]

Séchage et conditionnement

Une fois nettoyés, les éléments ont été soigneusement séchés, puis isolés individuellement dans des sachets plastiques pour éviter toute recontamination ou exposition à l'humidité ambiante.

Passivation des éléments métalliques cuivreux

Certaines tiges métalliques observées sur les reliefs présentent une fine couche de cuivre, indiquant qu'elles ont été galvanisées. Cette caractéristique a été confirmée par l'identification de produits de corrosion typiques, tels que l'acétate de cuivre (vert-de-gris), ainsi que par les descriptions contenues dans le carnet.

Le cuivre, en raison de ses propriétés chimiques spécifiques, ne réagit pas comme le fer face à l'oxydation. Le fer, étant moins noble électrochimiquement que le cuivre, agit comme l'anode et se corrode préférentiellement, tandis que le cuivre, plus noble, agit comme la cathode et est davantage protégé.⁽¹⁰⁾

Options de passivation du cuivre

Avant toute passivation, il est indispensable d'éliminer les produits de corrosion instables. Pour cela, l'EDTA, un agent complexant, est couramment utilisé en conservation. Il agit en piégeant les ions métalliques à la surface, facilitant leur élimination. Son action chélatante varie selon le pH (3 pKa).

Une fois la surface nettoyée, la protection peut être assurée par des inhibiteurs organiques, notamment le benzotriazole et ses dérivés comme le tolyltriazole. Ces molécules, basées sur un noyau triazole, se fixent sur les atomes de cuivre et forment une couche stable à l'échelle moléculaire. Cette barrière limite les échanges avec les agents corrosifs, ralentissant significativement la corrosion⁽¹¹⁾. Ces composés sont néanmoins à manipuler avec précaution en raison de leur toxicité pour la santé et l'environnement.⁽¹²⁾

Des alternatives plus récentes et plus écologiques, tel que la biopassivation, semblent très prometteuses⁽¹³⁾. Cette méthode repose sur l'action de micro-organismes capables de transformer les produits de corrosion en oxalates de cuivre stables et insolubles. La couche passive ainsi formé stabilise la corrosion, en conservant un aspect patiné vert, proche de la patine naturelle du cuivre en extérieur.

Évaluation de différents traitements de passivation du cuivre

Un test a été mené sur un échantillon de cuivre afin d'évaluer l'efficacité combinée du nettoyage à l'EDTA et de la passivation au benzotriazole. L'échantillon a été divisé en deux moitiés : l'une laissée en l'état comme témoin, l'autre traitée selon trois variantes. Une première zone a été nettoyée à l'EDTA à pH 6, une seconde à pH 10, et une troisième non nettoyée ; toutes ont ensuite été passivées au benzotriazole.

Après 24 heures d'exposition à une atmosphère saturée en acide acétique, les zones traitées au benzotriazole ont montré une amélioration nette de la stabilité de surface. Aucune différence réellement significative n'a été observée entre les traitements à l'EDTA pH 6 et pH 10. [Img29]

10 SELWYN, Lyndsie. Comprendre la corrosion galvanique. Ottawa : Institut canadien de conservation, 2019. 21 p. (Notes de l'ICC ; 22).

11 Zoulikha Khiati. *Inhibition de la corrosion du cuivre en milieux chlorure et sulfate neutres par une nouvelle molécule dérivée de 1,2,4-triazole.*. Autre. Université Paris 6-Pierre et Marie Curie; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (Algérie), 2013.

12 Groupe des benzotriazoles et des benzothiazoles - fiche d'information. Environnement et changement climatique Canada, organisme de publication, Santé Canada, 2025

13 Joseph E Méthode de biopassivation pour la préservation des artefacts en cuivre et en bronze. (2021), Front. Mater. 7:613169. doi: 10.3389/fmats.2020.613169



[Img29] : Cuivre en atmosphère acétique après 3h et 24h. Benzotriazole a ralenti la corrosion.



[Img30] : Fertan appliqué sur un échantillon de cuivre.

La combinaison d'un nettoyage préalable à l'EDTA, de préférence à pH neutre, suivi d'une passivation au benzotriazole, semble constituer une méthode assez efficace pour ralentir la corrosion du cuivre.

Toutefois comme pour le fer, l'application complémentaire d'un vernis de protection apparaît nécessaire pour garantir une conservation optimale dans le temps.

Par ailleur, dans le cas présent, les éléments métalliques étudiés ne sont pas constitués uniquement de cuivre : ils contiennent également du fer, qui présente lui aussi des signes d'oxydation. Cela soulève la nécessité de trouver un traitement compatible avec les deux métaux.

Nous avons soumis un échantillon de cuivre à une application de Fertan, laissé pendant 24 heures [Img30], puis rincé à l'eau déminéralisée.

Les observations réalisées indiquent que :

Le Fertan, principalement conçu pour la passivation du fer, ne réagit pas avec le cuivre de manière visible ou problématique. [Img31]

Le benzotriazole, quant à lui, est inoffensif pour le fer, n'induisant aucune réaction indésirable ni modification de surface.

Protocole de passivation pour les éléments galvanisés



[Img31] : Après 24 heures, le Fertan est rincé et ne semble pas avoir attaqué ni altéré le cuivre. Il a plutôt agit comme un nettoyant.

Protocole de passivation des éléments galvanisés en cours de traitement

PROTECTION DES ELEMENTS METALLIQUES

14 Rocca E., Mirambet F., *Corrosion inhibitors for metallic artefacts: temporary protection in: corrosion of metallic heritage artefacts: investigation, conservation and prediction for long term behaviour*, ed. by P. Dillman, G. Béranger, P. Piccardo and H. Matthiesen, 2007, p. 308-334

15 Mourey W., Czerwinski E., *Essais comparatifs de revêtements protecteurs utilisés en conservation-restauration des métaux*, in: Preprints of the 10th Triennial Meeting, Washington DC, USA, 1993, publication ICOM Committee for Conservation/

16 Les résines Paraloid®, Regalrez® et Laropal® sont des résines thermoplastique utilisés dans le vernissage des métaux et dont la fiabilité à déjà fait l'objet de nombreuses études.

Julie Gordon. Development of an analytical strategy for the study and preservation of painted metal objects in museum collections. Analytical chemistry. Sorbonne Université, 2022, page 32-33

Après la passivation des supports métalliques, une protection supplémentaire est indispensable pour réduire les risques de reprise de la corrosion.

L'application d'un vernis permet de former une barrière contre l'humidité et les agents atmosphériques. Celui-ci contribue également à améliorer l'apparence de la surface métallique en atténuant l'aspect mat issu de la réaction avec le Fertan.

Option de résine pour vernissage

En conservation-restauration, les vernis utilisés pour les métaux sont aujourd'hui principalement synthétiques. Les vernis d'origine naturelle, comme la gomme-laque ou la résine dammar, sont peu utilisés en raison de leur instabilité à long terme⁽¹⁴⁾.

Trois grandes familles de polymères sont couramment employées : les nitrocelluloses, les résines acryliques et les résines vinyliques⁽¹⁵⁾.

De manière générale, les résines acryliques apparaissent comme un choix pertinent pour la protection des objets métalliques.

Résines acryliques	Résines vinyliques	Nitrocelluloses
Largement privilégiées pour leur stabilité, leur transparence et leurs réversibilité. Bonne adhérence sur le métal.	Efficacité très variables selon les formulations et les supports. Bonne adhérence sur le métal. Utilisation marginale et spécifique.	Peu résistantes à l'humidité et particulièrement inflammables. Mauvaise adhérence sur métal



Mais d'autres polymères thermoplastiques, au propriété similaire pourrait faire l'objet d'un tests comparatifs : Paraloid® B72, Regalrez® 1094 et Laropal® A81.⁽¹⁶⁾

Paraloid ® B72	Regalrez ® 1094	Laropal ® A81
Résine commercial acrylique. Copolymères d'éthacrylate de méthyle et de méthacrylate d'éthyle. Adapté pour vernir différents métaux (fer et cuivre). Réversible avec une chaleur modérée de 40°C (Tg).	Résine commercial aliphatique, non polaire. Copolymère de styrène et de dérivés du styrène. Hydrophobe. Peut être associé à du Cosmoloid H80®, une cire microcristalline synthétique, inhibitrice de corrosion. Réversible avec une chaleur de 95°C (Tg).	Résine commercial aldéhyde. Urée-aldehyde, cétonique. Réversible avec une chaleur modérée de 49°C (Tg).

Test de l'efficacité du vernis protecteur

Trois clous rouillés, préalablement nettoyés et passivés avec du Fertan, sont utilisés comme échantillons témoins pour évaluer l'efficacité des différents vernis choisis.

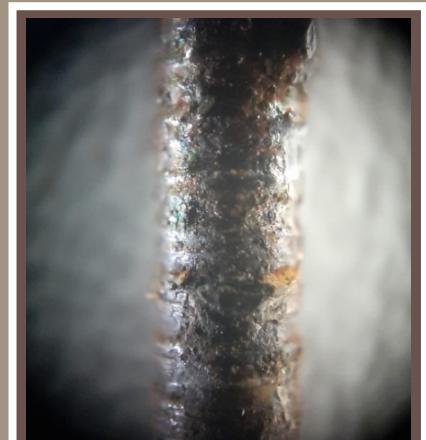
Paraloid ® B72 est préparé à 20% dans l'acétone.

Regalrez ® 1094 est préparé à 20% dans l'essence F.

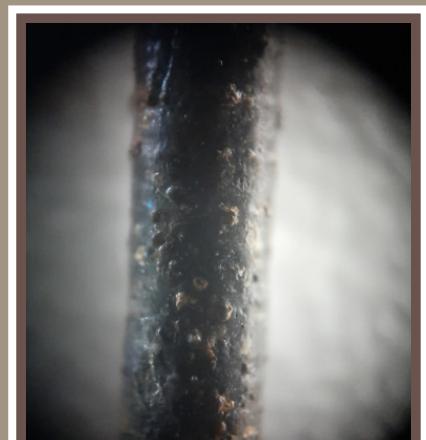
Laropal ® A81 est préparé à 20% dans l'acétone.

L'application a été réalisée au pinceau. Après vernissage, les clous ont été laissés à sécher 24 heures.

Une fois secs, les clous ont été partiellement immergés dans un bocal contenant de l'eau de mer afin de simuler une exposition prolongée à l'humidité.



D : Détail du clou vernis au Laropal A81 vue au binoculaire. Après 24h, soulèvement de la couche de vernis. Réactivation de la corrosion.



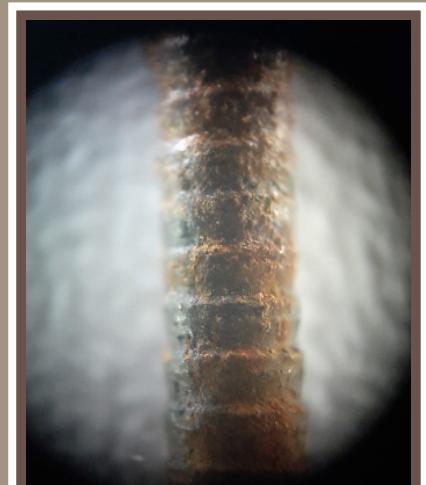
E : Détail du clou vernis au Paraloid B72 vue au binoculaire. Après 24h bonne tenu du vernis, peu de rouille réapparut

TEST DES VERNIS DE PROTECTION

+24H

Les échantillons vernis sont maintenus en suspension dans l'eau de mer pendant 24h.

D E F



F : Détail du clou vernis au Regalrez 1094 vue au binoculaire. Après 24h, réactivation de la corrosion en grande quantité à la surface.

Après 48 heures, des différences notables sont apparues. Observées à la loupe binoculaire :

Le clou verni au Paraloid B72 présentait moins de réapparition de rouille et une surface mieux conservée.

Les clous vernis avec Laropal A81 et Regalrez 1094 montraient des traces précoce d'oxydation sur certaines zones exposées.

Résultat

Au terme de ce test comparatif, le Paraloid B72 a été retenu pour la protection finale des éléments métalliques. Il offre une meilleure résistance à la corrosion en environnement humide, une couche homogène et légèrement brillante et une réversibilité satisfaisante.

Protocol d'application du vernis

Le Paraloid B72 a été appliqué au pinceau fin sur chaque élément métallique passivé. Les objets ont ensuite été déposés sur des bandes de papier annotées pendant un séchage de 24 heures, permettant de conserver une traçabilité précise.

Une fois secs, les éléments métalliques peuvent être remonté sur les reliefs en papier.

En cours de traitement

CONSOLIDATION DU PAPIER DE LA BOITE



Assouplissement par apport de chaleur localisé avec une spatule chauffante.



Plis et déformation du papier avant traitement.



Plis et déformation résorbés par l'action de la chaleur.

L'objectif de cette opération est de réduire les plis et déformations d'un support papier fortement altéré, devenu rigide et cassant, tout en refixant les zones soulevées ou décollées, dans le respect des matériaux constitutifs et de leur sensibilité.

Assouplissement par apport d'humidité

Un premier essai a été réalisé à l'aide d'un ébulliseur à vapeur, afin de réintroduire de l'humidité dans les fibres du papier pour faciliter son aplatissement. Cependant, cette méthode s'est révélée peu concluante en raison d'un temps de traitement trop long, d'un manque de précision dans l'application, d'un risque élevé d'auréoles et d'une inefficacité notable sur les déformations structurelles.

Assouplissement par apport de chaleur

Face aux limites de l'humidification, une seconde approche a été testée. L'application localisée de chaleur douce, entre 50 et 100 °C. Cette méthode vise à réactiver l'adhésif ancien, probablement de nature protéïnique.

assouplir partiellement les fibres cellulosiques et la lignine du papier, facilitant la réduction des plis.

Ce traitement thermique ciblé a permis de résorber les déformations les plus marquées, tout en évitant l'introduction d'humidité.

Ré-encollage du papier de la boite

Après réduction des plis, les zones nécessitant un refixage ont été traitées localement :

Une solution de Klucel G (hydroxypropylcellulose) à 10 % dans un mélange acétone/éthanol (90:10) a été choisie comme adhésif.

Ce choix repose sur les tests de sensibilité à la goutte, qui ont démontré que le papier est insensible à l'acétone mais réactif à l'eau et à l'éthanol, d'où un dosage limité de ce dernier.

La Klucel G présente un faible pouvoir adhésif, ce qui limite les risques de tensions ou de nouvelles déchirures sur un papier fragilisé. L'adhésif est appliqué avec précision sur les zones à traiter, puis le papier est maintenu en place à l'aide d'un plioir en teflon, pour ajuster la mise en contact et d'un intissé, pour protéger la surface.

L'ensemble est ensuite maintenu sous poids pendant quelques heures afin d'assurer une bonne adhésion.

Réintégration des éléments manquants

Les tiges métalliques nettoyées, passivées et vernies pourront être réintégrées dans les modèles. Cependant, certaines tiges, trop corrodées, n'ont pas pu être nettoyées et devront être conservées séparément.

Pour assurer l'intégrité visuelle de l'objet et la bonne lisibilité des descriptions des modèles, plusieurs options s'offrent à nous :

- 1: Remplacer les éléments manquants par de nouvelles tiges métalliques, tout en veillant à les différencier visuellement des tiges métalliques originales (par exemple, par une légère teinte ou une finition différente).
- 2: Utiliser des tiges fabriquées à partir de matériaux alternatifs tels que le plastique, permettant ainsi une distinction claire entre les éléments restaurés et les originaux.
- 3: Réaliser un document décrivant de manière fictionnelle les parties manquantes. Ce document, qu'il soit papier ou numérique, devra être conservé avec l'objet pour fournir une information contextuelle sans altérer l'intégrité physique de l'œuvre.

Par ailleurs, certaines tiges sont cassées mais demeurent propres et ont été correctement passivées. Il est donc possible d'envisager de les recoller afin de les réintérer dans les modèles. Plusieurs tests seront réalisés pour évaluer la faisabilité de cette opération, incluant l'utilisation de différents adhésifs et techniques de collage afin de garantir une fixation durable et esthétiquement harmonieuse.

Il est également envisageable d'accompagner l'objet d'une documentation numérique regroupant diverses informations, telles que les modèles et leurs descriptions issues du carnet. Cela permettrait de mieux comprendre la fonction pédagogique de l'objet et de rendre la géométrie descriptive accessible à un public non initié.

Une maquette de cette documentation numérique est disponible via le lien suivant :
<https://geometrique.netlify.app/>

CONCLUSION

Le traitement de la « Collection de reliefs à pièces mobiles » a représenté une opportunité précieuse pour approfondir les problématiques spécifiques à la conservation d'un objet composite associant métal et papier.

Ce travail s'est appuyé sur l'étude préalable menée par S. Martinez, dont les observations et recommandations ont fourni une base solide. Toutefois, certaines divergences sont apparues entre ses conclusions et nos propres analyses, soulignant l'importance d'un traitement itératif et du croisement des regards dans le domaine de la conservation-restauration.

L'intervention a également permis d'évaluer diverses méthodes de nettoyage à sec appliquées au papier, au bois et au métal, ainsi que des techniques de passivation et de protection des éléments métalliques. Ces essais ont conduit à l'identification de solutions adaptées aux spécificités de l'objet, tout en enrichissant les connaissances pratiques sur les produits et techniques disponibles. L'accent a été placé à la fois sur la stabilisation des matériaux et sur la préservation de la lisibilité des éléments fonctionnels, essentiels à la compréhension de la vocation pédagogique de cette collection.

BIBLIOGRAPHIE

Daudin-Schotte, Madeleine Bisschoff, Ineke Joosten, Henk van Keulen, and Klaas Jan van den Berg, *Dry Cleaning Approaches for Unvarnished Paint Surfaces* Maude, Proceedings from the Cleaning 2010 Conference, Valence.

Nguyen, T-P., Bouvet, S., Eveno, M., *Effet des gommes à effacer sur la cellulose du papier*, Paris, Laboratoire de la Bibliothèque Nationale de France, 2003

Aude Lafitte, *Etude et conservation-restauration d'un Qilin en émail cloisonné chinois provenant du musée des Arts décoratifs de Paris*, EGG 2016-2017.

Information provenant des archives du site de Galvazinc, Association française indépendante composée d'experts en galvanisation à chaud.

- Lien vers le site dans la Bibliographie -

Stéphanie Hollner, *Développement de nouveaux traitements de protection à base d'acide carboxylique pour la conservation d'objets en fer du patrimoine culturel*, Université Henri Poincaré- Nancy 1, 2009

Jonathan Piard, Renaud Taleroy, Olivier Bonjour. *La passivation du fer sous le choc*. Le Bulletin de l'Union des Professeurs de Physique et de Chimie, 2015

Judy Logan, *Le soin et le nettoyage du fer* – Notes de l’Institut canadien de conservation (ICC) 9/6

Première date de publication : 1987

Révision : 1995, 2007

Judy Logan, *Le traitement à l’acide tannique pour les artefacts en fer rouillé*, publié antérieurement sous le titre *Le traitement du fer à l’acide tannique* – Notes de l’Institut canadien de conservation (ICC) 9/5

Première date de publication : 1989

Révision : 1997, 2007, 2013

Marie-Anne Loepert-Attia, *La stabilisation des alliages ferreux : évolution du diagnostic et des traitements réalisés dans les laboratoires de restauration en France depuis 1998*, Centre de Recherche sur la Conservation, 2014.

Rocca E., Mirambet F., *Corrosion inhibitors for metallic artefacts: temporary protection in: corrosion of metallic heritage artefacts: investigation, conservation and prediction for long term behaviour*, ed. by P. Dillman, G. Béranger, P. Piccardo and H. Matthiesen, 2007

Mourey W., Czerwinski E., *Essais comparatifs de revêtements protecteurs utilisés en conservation-restauration des métaux*, in: Preprints of the 10th Triennial Meeting, Washington DC, USA, 1993, publication ICOM Committee for Conservation/

Julie Gordon. *Development of an analytical strategy for the study and preservation of painted metal objects in museum collections*. Analytical chemistry. Sorbonne Université, 2022.

Joseph E Méthode de biopassivation pour la préservation des artefacts en cuivre et en bronze. (2021), Front. Mater. 7:613169. doi : 10.3389/fmats.2020.613169

Groupe des benzotriazoles et des benzothiazoles - fiche d'information. Environnement et changement climatique Canada, organisme de publication, Santé Canada, 2025

Zoulikha Khiati. *Inhibition de la corrosion du cuivre en milieux chlorure et sulfate neutres par une nouvelle molécule dérivée de 1,2,4-triazole.. Autre.* Université Paris 6- Pierre et Marie Curie; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (Algérie), 2013.

SELWYN, Lyndsie. *Comprendre la corrosion galvanique.* Ottawa : Institut canadien de conservation, 2019. 21 p. (Notes de l'ICC ; 22).